

分类号：TK124

密 级：公开

学校代码：10363

学 号：2220120107



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

# 硕士学位论文

题 目    镓基液态金属电质共传行为的  
          电-热耦合特性研究及应用

论 文 作 者    王 青

指 导 教 师    周洲 讲师

学 科（专业）    机械工程

研 究 方 向    机械电子工程

论文提交日期： 2025 年 5 月 20 日

## 安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：2025 年 5 月 18 日

## 安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在            年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期：2025 年 5 月 13 日

日期：2025 年 5 月 13 日

分类号：TK124

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220120107

镓基液态金属电质共传行为的电-热耦合特性研究及应用

RESEARCH ON THE ELECTRICAL-THERMAL COUPLING  
CHARACTERISTICS OF THE ELECTRO-LIQUID CO-  
TRANSFER BEHAVIOR OF GALLIUM-BASED LIQUID  
METALS

学生姓名：\_\_\_\_\_王 青\_\_\_\_\_

校内导师：\_\_\_\_\_周 洲\_\_\_\_\_

专 业：\_\_\_\_\_机械工程\_\_\_\_\_

研究方向：\_\_\_\_\_机械电子工程\_\_\_\_\_

论文答辩日期：2025 年 5 月 13 日

## 镓基液态金属电质共传行为的电-热耦合特性研究及应用

### 摘 要

镓基液态金属（Gallium-based liquid metal, EGa）在柔性电子领域应用广泛，尤其在热管理和柔性传感技术领域。然而，其在柔性电子领域的应用面临高温模态畸变和信号失真的两大挑战，影响传感器性能。传统的材料革新以及强制对流等解决方案存在匹配性低、技术成本高和结构冗杂等问题。因此，在热流激励环境下开发高效的液态金属柔性传感器自适应模态调控技术，是柔性电子领域亟待解决的关键问题。

鉴于此，本文以典型热流激励器件为研究主体，系统研究液态金属作为功率变换主体时的电质共传行为和在不同电信号及温域场激励的电-热耦合特性，解决电机和高温传感器两种典型场景下的应用问题。本文主要研究内容如下：

（1）液态金属凭借其优异的导电性和流动性，兼具传质和传能特性，其电质共传行为包括电-液耦合和解耦两个环节。针对液态金属的腐蚀性，本研究对比多种常见的导电材料，最终选择含 Cr 合金为电-液耦合器件材质。该部件为中空管结构，通过内外壁接触实现电流传输以及流体的隔离。实验表明电-液耦合处电阻为接触电阻串联模型，在系统总阻抗中占比最大。为在单一管道中实现流-电两个独立环

节的解耦，将液态金属从连续相转换为离散相，解决了电流环的短路行为，通过仿真和实验获得了电-液解耦的关键参数（如流量和管径），设计并验证了液滴解耦器件，优化了其解耦效果。该研究为液态金属电质共传的系统高效运行提供了重要技术支撑。

（2）针对电磁感应线圈这一功率转换器件自发热的边界条件，以液态金属柔性导线为研究主体，探究其在焦耳热这一主动发热的特殊边界条件下的电-热耦合特性。开发液态金属柔性导线的制备方式并测试其电阻特性，并基于流体传热原理分析其在电质共传行为下的传热规律，以流量为调控变量时温度降幅最高可达 12%。其次利用柔性导线制备了具备三相星形连接特征的直流无刷电机（Brushless DC motor, BLDC）样机，并通过温度云图分析了其电-热耦合特性，该电机系统最高温度降幅高达 7.3%。该研究验证了基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢具有优异的散热性能，该技术绕过了固液界面传热环节，为微型散热器件的热管理提供了新思路。

（3）针对柔性压力传感器应用场景的热流激励边界条件，以液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器为对象，设计并研究其在外界温度场下的电-热耦合特性。探讨了传感器的模具制备方式和电阻式传感机制，分析了其在多模态耦合（流-固、流-热和流-热-力）下的性能参数，包括灵敏度、信噪比和带宽等关键参数。其能应用于高温液压平台管道，传感器表现出良好的贴合性和响应性能，有效降低了温度对压力测量信号的干扰，为热流激励场景下的柔性压力传感器制备

提供了新策略。

**关键词：**镓基液态金属 (EGa)，电质共传，柔性电子技术，柔性导线，  
对流传热

# RESEARCH ON THE ELECTRICAL-THERMAL COUPLING CHARACTERISTICS OF THE ELECTRO-LIQUID CO- TRANSFER BEHAVIOR OF GALLIUM-BASED LIQUID METALS

## ABSTRACT

Gallium-based liquid metal (EGa) is widely used in flexible electronics, especially in thermal management and flexible sensing technology. However, its application in the field of flexible electronics faces two major challenges: high-temperature modal distortion and signal distortion, which affect the performance of the sensor. Traditional solutions such as material innovation and forced convection have problems such as low compatibility, high technical cost and redundant structure. Therefore, the development of efficient adaptive modal control technology for liquid metal flexible sensors in the heat flux excitation environment is a key problem to be solved in the field of flexible electronics.

In view of this, this paper takes a typical heat flow excitation device as the main body of research, systematically studies the electro-mass co-transfer behavior of liquid metal as the main body of power conversion and the electrical-thermal coupling characteristics of excitation in different electrical signals and temperature field excitation, and solves the application problems in two typical scenarios of motor and high temperature sensor. The main research contents of this paper are as follows:

- (1) Due to its excellent conductivity and fluidity, liquid metal has both

mass and energy transfer characteristics, and its electro-mass co-transfer behavior includes two links: electro-hydraulic coupling and decoupling. In view of the corrosiveness of liquid metal, a variety of common conductive materials were compared, and finally the Cr-containing alloy was selected as the material for electro-hydraulic coupling devices. The component is a hollow tube structure, which realizes current transmission and fluid isolation through the contact between the inner and outer walls. Experiments show that the resistance at the electro-hydraulic coupling is a series model of contact resistance, which accounts for the largest proportion of the total impedance of the system. In order to realize the decoupling of two independent links of flow and electricity in a single pipeline, the liquid metal is converted from continuous phase to discrete phase, the short-circuit behavior of the current loop is solved, and the key parameters of electro-liquid decoupling (such as flow rate and pipe diameter) are obtained through simulation and experiment, and the droplet decoupling device is designed and verified, and its decoupling effect is optimized. This study provides important technical support for the efficient operation of the liquid metal electro-mass co-transfer system.

(2) Aiming at the boundary condition of self-heating of power conversion devices such as electromagnetic induction coils, the electrical-thermal coupling characteristics of liquid metal flexible wires under the special boundary conditions of Joule heating, which is active heating, are explored. The preparation method of liquid metal flexible wire was developed and its resistance characteristics were tested, and the heat transfer law under the electro-mass co-transfer behavior was analyzed based on the principle of fluid heat transfer, and the temperature drop could reach up to 12% when the flow rate was used as the control variable. Secondly, a prototype of a brushless DC motor (BLDC) with three-phase

star-shaped connection was fabricated by using a flexible wire, and its electrical-thermal coupling characteristics were analyzed by a temperature contour map, and the maximum temperature drop of the motor system was as high as 7.3%. This study verifies that the BLDC armature based on liquid metal flexible wire has excellent heat dissipation performance, which bypasses the heat transfer link at the solid-liquid interface, and provides a new idea for the thermal management of micro heat dissipation devices.

(3) Aiming at the heat flux excitation boundary conditions of the application scenario of flexible pressure sensors, the electrical-thermal coupling characteristics of flexible pressure sensors with convection sensitive layers of liquid metal are designed and studied under the external temperature field. The mold preparation method and resistive sensing mechanism of the sensor are discussed, and its performance parameters under multimodal coupling (fluid-solid, flow-heat, and flow-heat-force) are analyzed, including key parameters such as sensitivity, signal-to-noise ratio and bandwidth. It can be applied to high-temperature hydraulic platform pipelines, and the sensor shows good fit and response performance, which effectively reduces the interference of temperature on the pressure measurement signal, and provides a new strategy for the preparation of flexible pressure sensors in the heat flow excitation scenario.

**KEY WORDS:** Gallium-based liquid metal (EGa), Electro-mass co-transfer, Flexible electronics, Flexible wires, Convective heat transfer

# 目 录

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 摘 要.....                          | I   |
| ABSTRACT .....                    | IV  |
| 目 录.....                          | VII |
| 第 1 章 绪论.....                     | 1   |
| 1.1 研究背景.....                     | 1   |
| 1.2 镓基液态金属的物化性质 .....             | 2   |
| 1.3 基于液态金属的管道流功能性器件研究现状 .....     | 2   |
| 1.3.1 基于液态金属的微型散热器件研究现状 .....     | 3   |
| 1.3.2 基于液态金属的柔性传感器件研究现状 .....     | 5   |
| 1.4 液态金属器件的电-热耦合研究现状.....         | 7   |
| 1.4.1 微型散热器件的电-热耦合研究.....         | 7   |
| 1.4.2 柔性传感器件的电-热耦合研究.....         | 8   |
| 1.5 目前存在的问题.....                  | 11  |
| 1.6 本文研究内容 .....                  | 12  |
| 第 2 章 镓基液态金属电质共传行为理论与结构实现.....    | 14  |
| 2.1 引言 .....                      | 14  |
| 2.2 液态金属材料特性与电-液耦合部件设计 .....      | 14  |
| 2.2.1 液态金属材料特性 .....              | 14  |
| 2.2.2 电-液耦合部件设计 .....             | 15  |
| 2.3 液态金属系统的电-液耦合特性.....           | 17  |
| 2.3.1 电-液耦合处的结构及电阻分布 .....        | 17  |
| 2.3.2 电-液耦合处的电阻波动.....            | 17  |
| 2.4 液态金属系统的电-液解耦理论与结构实现.....      | 20  |
| 2.4.1 液态金属液滴生成规律 .....            | 20  |
| 2.4.2 多管道液滴解耦器设计 .....            | 22  |
| 2.4.3 多管道液滴解耦器性能研究 .....          | 24  |
| 2.5 本章小结 .....                    | 25  |
| 第 3 章 电流激励环境的镓基液态金属电-热耦合特性研究..... | 26  |

|                                           |           |
|-------------------------------------------|-----------|
| 3.1 引言 .....                              | 26        |
| 3.2 液态金属柔性导线制备及特性 .....                   | 26        |
| 3.3 电流激励环境下液态金属柔性导线的传热规律 .....            | 29        |
| 3.4 电流激励环境下液态金属柔性导线的电-热耦合特性 .....         | 30        |
| 3.5 液态金属柔性导线的应用及其性能 .....                 | 33        |
| 3.5.1 液态金属柔性导线的应用 .....                   | 33        |
| 3.5.2 BLDC 星形连接的电枢系统性能 .....              | 39        |
| 3.6 本章小结 .....                            | 43        |
| <b>第 4 章 热流激励环境的镓基液态金属电-热耦合特性研究 .....</b> | <b>44</b> |
| 4.1 引言 .....                              | 44        |
| 4.2 具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的制备 .....         | 44        |
| 4.3 柔性压力传感器的传感原理 .....                    | 47        |
| 4.4 柔性压力传感器的多模态耦合特性 .....                 | 50        |
| 4.4.1 柔性压力传感器的流-固耦合 .....                 | 53        |
| 4.4.2 柔性压力传感器的流-热耦合 .....                 | 56        |
| 4.4.3 柔性压力传感器的流-热-力多模态耦合 .....            | 61        |
| 4.5 柔性压力传感器的性能分析及应用领域 .....               | 64        |
| 4.5.1 柔性压力传感器的性能分析 .....                  | 64        |
| 4.5.2 柔性压力传感器的应用领域 .....                  | 68        |
| 4.6 本章小结 .....                            | 69        |
| <b>第 5 章 结论与展望 .....</b>                  | <b>71</b> |
| 5.1 研究成果 .....                            | 71        |
| 5.1.1 研究成果总结 .....                        | 71        |
| 5.1.2 论文创新性 .....                         | 72        |
| 5.2 未来研究工作展望 .....                        | 72        |
| <b>参考文献 .....</b>                         | <b>75</b> |
| <b>攻读硕士学位期间承担的科研任务与主要成果 .....</b>         | <b>83</b> |

# 第 1 章 绪论

## 1.1 研究背景

自然界中存在的一些金属，如镓基合金，钠基合金，汞等，在室温环境下呈现液态，具有液体般的优异流动性。然而，当温度降低时，这些金属又会从液态转换为固态，展现出典型的金属特性，这类金属通常具有低熔点特性。熔点低于 200°C 的合金被称为液态金属<sup>[1]</sup>。然而，汞、铯和钠基合金等液态金属分别存在毒性、放射性和高挥发性等问题，限制了其在工业领域的广泛应用。相比之下，镓基合金具有无毒性、优异的导热性、流动性和生物兼容性，在柔性电子领域中被广泛用作微型散热器件的冷却介质、柔性传感器件的敏感层和电极材料。

以液态金属为冷却介质的对流传热系统相比较于传统散热鳍片、风冷和液冷散热系统，表现出更优异的散热性能。Guo 等<sup>[2]</sup>针对电机的热管理问题，提出了一种基于定子槽深置的冷却通道结构。该结构利用液态金属作为对流传热介质，优化了冷却管道结构和热阻路径，降低了系统的热阻分布，实现高效散热。镓基液态金属还被用作柔性热界面材料（如导热板和导热脂等）的填充材质<sup>[3-4]</sup>，这类材料不仅能提高热界面材料的热导率，还能有效减少界面结构的机械应力。

随着柔性电子技术的快速发展，柔性传感技术在可穿戴设备<sup>[5]</sup>、软体机器人<sup>[6]</sup>和人机交互<sup>[7]</sup>等领域展现出广阔的应用前景。然而，传统的柔性传感器件主要通过将有金属导体或导电复合材料设计为“之”字形<sup>[8]</sup>和 3D 结构<sup>[9]</sup>等各向异性高阻抗结构，采用拓扑设计方法实现可拉伸功能。这些方法在复杂应变条件下存在接触面滑移、断裂和分离等问题，难以满足透明电极、跨尺度应变响应和自愈合柔性器件的性能需求。目前柔性电子领域的常见导电材料包括金属纳米导线、金属颗粒、石墨烯、碳基纳米材料和导电复合材料<sup>[10]</sup>，这些材料普遍存在脆性、共形性差和电导率损失等问题<sup>[11-12]</sup>，严重限制了以它们为敏感层或电极材料的柔性传感器件的综合性能和应用领域。镓基液态金属凭借其优异性能，有望成为柔性传感器件的理想导电材料。其研究能够保证柔性传感器件在跨尺度、多维度等复杂应变条件下仍具有良好的工作性能，为未来解决功率电路、多维度柔性传感器件以及磁-热-力多模态耦合响应等问题提供关键材料和工艺技术<sup>[13]</sup>。

## 1.2 镓基液态金属的物化性质

镓基合金是一类熔点低于 200℃的低熔点合金，根据掺杂比例的不同，其熔点介于 5℃~30℃，在液态下具有出色的共形性、优异的导热性和生物兼容性，以及与金属相当的导电性能，其还具有稳定的物理化学性能。

镓基液态金属呈现平滑的表面状态，然而在空气环境中，其表面会迅速氧化生成固体氧化物薄膜，从而显著改变材料的电导率和界面润湿性等性质。室温环境下，镓基液态金属通常呈现核壳结构<sup>[14]</sup>，如图 1-1a 所示。核壳结构中的外壳为氧化镓 ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ )，内核为未氧化镓基合金。这种良性氧化物薄膜可有效阻隔内部合金的持续氧化，起到保护的作用。镓、铝同属周期表第 13 族 (IIIA 族)，化学性质具有一定相似性。二者均表现为两性金属，其外部的良性氧化物薄膜可通过酸或碱性溶液去除，图 1-1b 展示了盐酸溶液处理粘附的镓基液态金属的过程<sup>[15]</sup>。此外，镓基液态金属能腐蚀电路板和电子元件中的多种金属，其能与金属基体形成金属间化合物，尤其是铜和铝。其中镓基合金能与铜基合金形成  $\text{CuGa}_2$  的金属间化合物。镓基液态金属对部分金属材料 (如铝) 表现出晶界腐蚀特性，能扩散到某些固体金属的晶界，显著降低其机械性能。图 1-1c 展示了镓基液态金属对金属铝的侵蚀机理，镓基合金渗透进入铝的晶格结构中，导致材料力学性能显著劣化<sup>[16]</sup>。

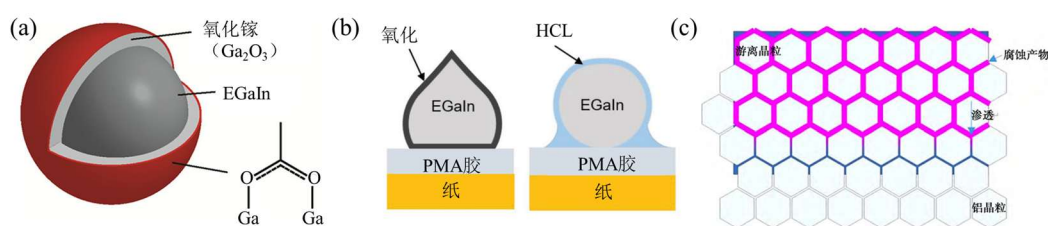


图 1-1 镓基液态金属物化性质 (a) 氧化后的镓基液态金属核壳结构<sup>[14]</sup> (b) 盐酸 (HCL) 去除粘附镓基液态金属示意图<sup>[15]</sup> (c) 镓基液态金属腐蚀铝金属的机理示意图<sup>[16]</sup>

## 1.3 基于液态金属的管道流功能性器件研究现状

液态金属在新能源、柔性电子和生物医疗等领域具有广阔的应用前景<sup>[17]</sup>。在柔性电子领域中，液态金属可通过微流控技术和 3D 打印技术制备微型散热器件、电子皮肤和柔性形变传感器等柔性电子器件。在生物医药领域中，液态金属可制

备生物医学传感器和作为药物传递的载体,实现辅助诊断和治疗疾病的功能。在新能源领域中,液态金属可应用于太阳能电池、燃料电池的热管理,显著提高设备的散热性能。在航天航空领域中,液态金属用于热控系统、电磁屏蔽材料等,增强航天航空器的稳定性和抗干扰能力。

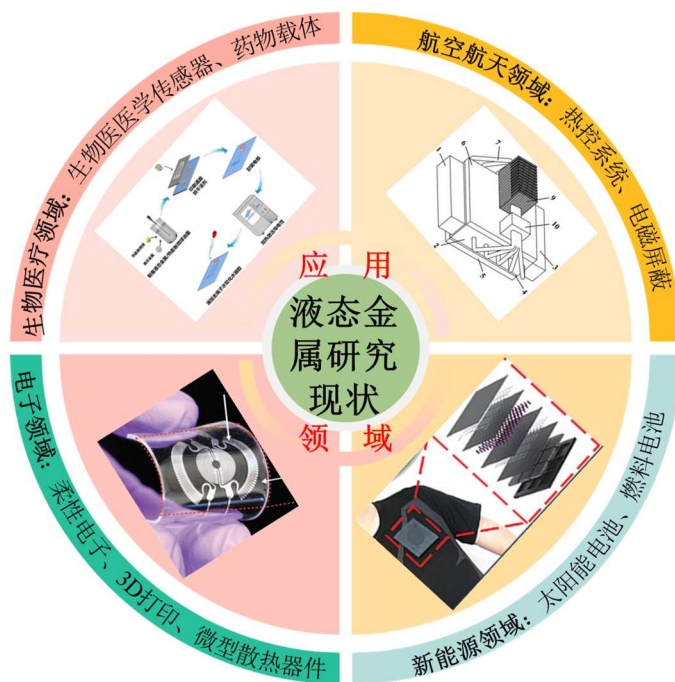


图 1-2 镓基液态金属的应用领域

### 1.3.1 基于液态金属的微型散热器件研究现状

液态金属在微型散热系统中的研究进展显著,其已成为微型器件液冷系统的理想冷却介质。实验数据显示,在  $0.1\text{m/s}$  流速条件下,镓基液态金属的对流换热系数约为相同条件下水的 3 倍<sup>[18]</sup>,液态金属的对流换热系数可达  $10\text{kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。基于这一优势,液态金属已成功应用于电子开关器件<sup>[19]</sup>、电磁阀<sup>[20]</sup>和大功率 LED<sup>[21]</sup>的研究中,并且出现在航空航天领域的涡轮导叶对流换热研究<sup>[22]</sup>。

在热沉传热机理研究方面,重庆大学宋思洪课题组<sup>[23]</sup>通过数值模拟与实验平台分析了热沉流道长度和直径等几何参数对镓基液态金属散热效能的影响,为液态金属对流传热系统的合理设计提供理论基础,其相应的热沉传热数值实验平台如图 1-3a 所示。在此基础上,其他研究团队也针对液态金属散热系统开展了进一步的研究工作,以解决实际应用中的关键问题并优化系统性能。中科院刘静

课题组<sup>[24]</sup>突破传统泵驱限制，开发出一种热芯片散热的液态金属热致浮力的自驱动冷却装置，其封闭柜的结构如图 1-3b 所示。硅胶管内的液态金属将热芯片产生的热量传递至翅片散热器，利用温度梯度产生的浮力实现液态金属的自驱动。该自驱动冷却装置具有安全、可靠和节能的优点，但受限于自然对流速率调控难题及昂贵成本。为此，北京工业大学 Deng 等<sup>[25-26]</sup>提出了分区冷却策略，以平衡系统成本和散热效率的问题，图 1-3c 展示了一种液态金属-水混合散热系统。高热流密度区域使用液态金属，在低热流密度区域使用水冷散热，既有效降低系统成本，又显著提高散热能力，但存在散热系统庞大等问题。

为了实现以液态金属为冷却介质的散热系统的集成化和微型化，昆明理工大学陈永华团队<sup>[27]</sup>优化设计了温差发电驱动的自供能散热系统。该系统以镓基液态金属为冷却介质，通过冷却介质在微流道内的强制对流与热电转换方式驱动液态金属，实现大功率器件的自驱动高效散热，图 1-3d 展示了自驱动系统的运行原理。该系统不仅实现微流道的对流冷却功能，还通过自供电模块提高了系统的集成化和微型化程度，为高集成功率器件的热管理提供创新解决方案。

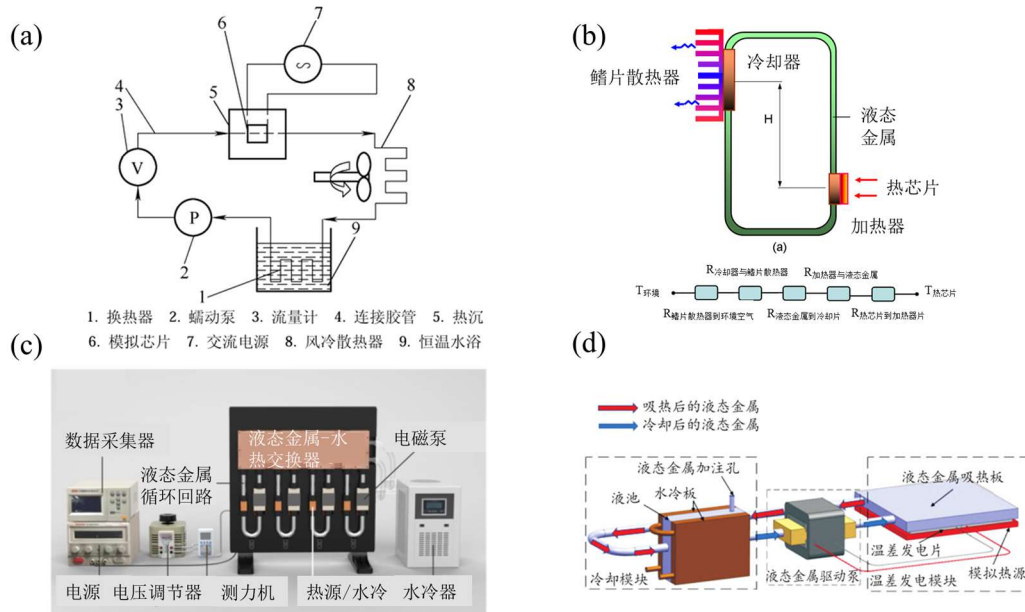


图 1-3 基于液态金属的微型散热器研究现状 (a) 低熔点液态金属工质的热沉传热数值实验平台<sup>[23]</sup> (b) 封闭柜内热芯片散热自驱动液态金属冷却装置<sup>[24]</sup> (c) 高热流密度芯片阵列的二级多管道液态金属冷却系统<sup>[25]</sup> (d) 基于液态金属的自驱动系统原理图<sup>[27]</sup>

目前研究表明，液态金属已在微型散热器中取得重大突破，从热沉传热机理研究延伸至散热系统的微型化和集成化的结构设计。在热沉传热机理研究领域

中，探索并解释液态金属在微尺度结构下的强化对流传热机制。在动力源驱动结构技术中，目前研究已实现脱离传动机械泵动力源，液态金属可实现无源自驱动。在散热系统集成化和微型化研究中，现有研究已构建自供能（对流传热-能量回收-驱动）一体化的微型散热系统。

### 1.3.2 基于液态金属的柔性传感器件研究现状

液态金属凭借其高电导率、优异的共形性和生物兼容性，已成为柔性传感领域的关键材料，广泛应用于传感器件的敏感层和电极材料。基于液态金属的柔性传感器件的制备方式多样，主要分为两大类：液态金属嵌入弹性体和弹性体表面涂敷的印刷式制备方式。

液态金属嵌入弹性体的制备方式能与基底材质形成良好的共形接触，适应不规则表面，实现有效热管理，适用于热载荷场景。液态金属嵌入弹性体的制备方式可细分为微流管注入法和复合材料掺杂液态金属。其中，微流管注入法是液态金属管道流器件的主要制备方式，该方法利用注射器等设备将液态金属注入弹性体空腔内，制备过程简单且无需后处理步骤。刘宜伟<sup>[29]</sup>利用注射器将镓基液态金属注入热塑性弹性体（Thermoplastic elastomers, TPE）空腔内，制备了液态金属可拉伸导线。图 1-4a 还展示了微流管注入法制备的超拉伸热致变色纤维<sup>[30]</sup>。该纤维采用鞘-芯结构，通过注射器将液态金属注入中空纤维管内。此外，意大利米兰理工大学的 Fabio Lazzari 等<sup>[31]</sup>也利用微流管注入法制备了用于呼吸监测的液态金属可穿戴柔性传感器，图 1-4b 展示了微流管注入法制备柔性传感器的过程。

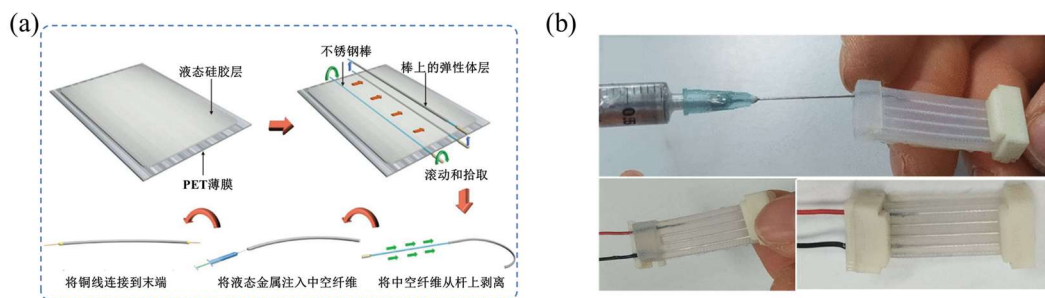


图 1-4 基于液态金属的柔性传感器制备方式 (a) 超拉伸热致变色纤维制备过程<sup>[30]</sup> (b) 可穿戴柔性传感设备微流道注入法<sup>[31]</sup>

微流道注入法制备柔性传感器件的关键环节是加工弹性体微流道空腔。传统的微机电系统（Micro-Electro-Mechanical System, MEMS）刻蚀技术虽然能够实

现高精度加工，但会削弱弹性基体的机械性能，从而限制柔性传感器件的性能和应用范围。

近年来，3D 打印技术作为一种高效的快速制造技术<sup>[32]</sup>，为弹性体微流道空腔的制备提供了新的策略。3D 打印技术能够利用柔性材料制备具有微流道空腔的弹性体模具，具有快速成型、低成本和高灵活性等优点。例如，桂林理工大学的蓝嘉昕等<sup>[33]</sup>以热塑性聚氨酯弹性体（Thermoplastic polyurethane elastomer, TPU）为打印耗材，使用熔融沉积建模（Modeling of fused deposition, FDM）型台式双喷头 3D 打印机制备了微流道模型。面对复杂微流道结构的制备，3D 打印技术直接制备具有微流道空腔的弹性体面临一定的挑战性，为此研究人员提出利用 3D 打印技术制备可溶性的微流道结构。Li<sup>[34]</sup>提出了一种利用 3D 打印技术制备弹性体微流道空腔的新策略，通过制备具有凹凸结构的可溶性丙烯腈-丁二烯-苯乙烯（Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS）模板。该方法进一步提升了 3D 打印技术构建的微流道结构的复杂性和精度。

基于微纳 3D 打印技术的突破性进展，科研人员已能运用柔性高分子材料直接构建具有亚微米级的特征尺寸的微流道空腔的弹性基体，其空腔结构精度可达纳米量级。胡靓等<sup>[35]</sup>采用了一体式制备柔性可拉伸导线，通过 3D 打印技术将液态金属挤压成线状，并提出镓基液态金属诱导成丝的 3D 打印制备方式。然而，该方法目前仍难以制备具有复杂微流道结构的空腔弹性体。为此厦门大学孙道恒团队<sup>[36]</sup>提出了一种纳米纤维自支撑增材制造（Nanofiber Self-Consistent Additive Manufacturing, NSCAM）制造策略，通过静电纺丝和电流体动力射流（Electrospinning and electrodynamic jets, E-jet）直接制备纳米纤维自支撑 3D 微流道。该方法利用电纺纳米纤维多孔性和自支撑特性，纳米纤维既作为功能材料又作支撑结构，简化工艺流程。该技术避免了传统 3D 打印中因支撑结构去除而导致的通道堵塞问题，实现了高精度（横、纵向分辨率分别为~120 $\mu\text{m}$ 和~45 $\mu\text{m}$ ）和复杂结构的微流道制备，并且制备的 3D 流体微阀可实现~50ms 的快速开关响应。

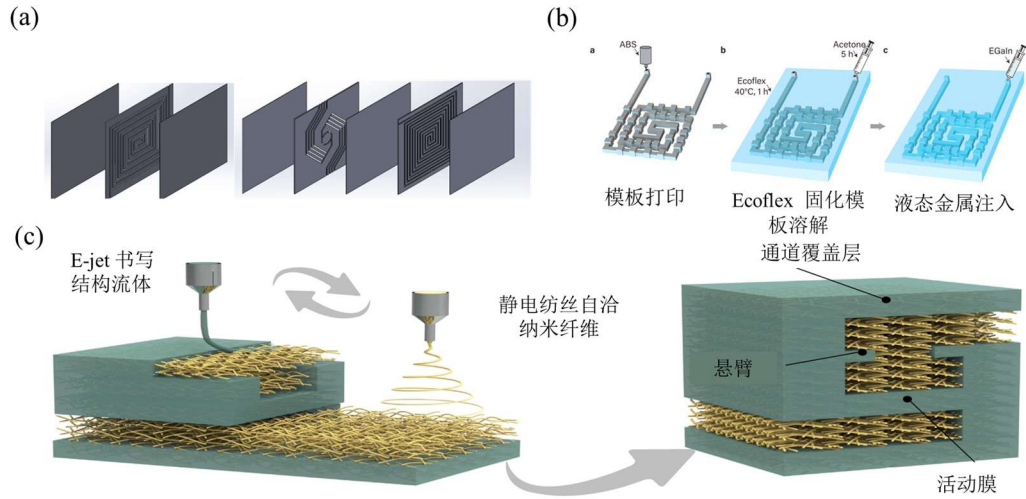


图 1-5 基于液态金属的柔性传感器研究现状 (a) TPU 微流道模型<sup>[33]</sup> (b) 凹凸结构微流道的液态金属传感器阵列<sup>[34]</sup> (c) NSCAM 制造策略<sup>[36]</sup>

## 1.4 液态金属器件的电-热耦合研究现状

### 1.4.1 微型散热器件的电-热耦合研究

镓基液态金属凭借其高导热性和流动性，成为对流传热系统的理想冷却介质之一。在微型散热器件和机电系统中，热源组件与流体对流传热系统之间存在固有的结构独立性。目前，传统的以液态金属为冷却介质的对流传热系统仍依赖于固液界面热传导机制，因而受限于固液界面传热路径。近年来，随着流体对流传热技术在生物医疗器件和精密温控器件中的应用，以自发热对流传热模型为主体的散热系统受到广泛关注。以液态金属为冷却介质的对流传热系统将液态金属作为载电和传热介质，在微流道结构中实现电流循环和热流传输，为突破依赖于固液界面传热机制的传统散热系统提供了新的思路。

近年来的研究逐渐聚焦于无接触驱动液态金属，实现液态金属系统的高效热传导、微型化和集成化。目前的研究基于磁流体动力学（Magnetohydrodynamics, MHD）原理，通过电磁场驱动液态金属，实现非接触式驱动，解决液态金属系统的微型化和集成化难题。佛山科学技术学院的黄彦博团队<sup>[37]</sup>基于电磁感应，驱动异步电机主轴轴芯的冷却机构内的液态金属，并研究其传热特性。该研究中，驱动液态金属的电磁场来源于电机转子表面导体在转速差下切割定子磁场产生的电动势，电磁感应产生的安培力驱动轴芯内的液态金属将轴芯热量传递至冷却室。

该系统优点为无需冷却液流入轴芯，避免冷却液对轴芯机构的干扰，图 1-6a 展示了异步电机轴芯内液态金属循环流动原理。Li 等<sup>[38]</sup>也开展了基于电磁场驱动镓铟锡液态金属的传热特性研究，该实验系统主要由加热、冷却、电磁驱动和信号采集子系统组成。图 1-6b 展示了电磁驱动液态金属的实验平台布局，该平台利用安培力驱动液态金属，通过液态金属循环将内部加热板的热量传递至外部的水冷系统，降低液态金属系统温度，使得系统内温度分布更均匀。

此外，中科院理化技术研究所刘静课题组<sup>[39]</sup>将液态金属作为载电和传热介质，开展电解液-液态金属双流体的芯片系统研究。承载电荷的液态金属在环形封闭管道内自旋转，能够更高效地为外部热源散热，图 1-6c 展示了双流体芯片散热系统。典型案例还包括了澳大利亚皇家墨尔本理工大学的 Khashayar 团队<sup>[42]</sup>所提出的液态金属液滴的集成系统。该系统通过诱导液态金属液滴表面的马朗戈尼流，增强对流换热，进一步提高散热效率，图 1-6d 展示了液滴集成系统。

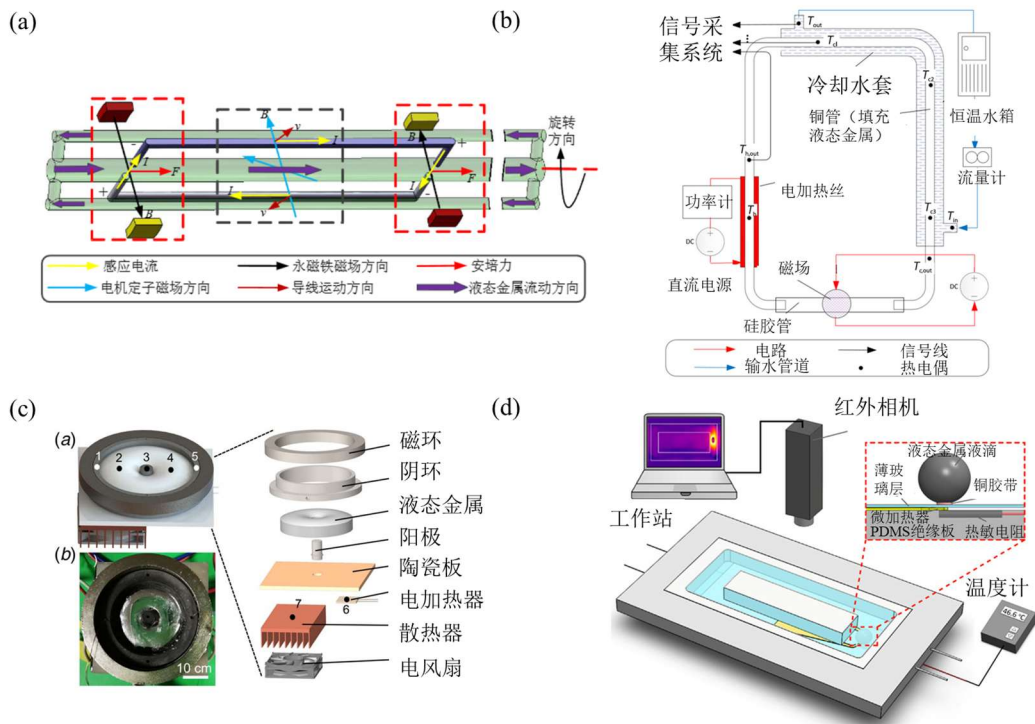


图 1-6 微型散热器件的电-热耦合 (a) 电磁驱动液态金属轴循环原理图<sup>[37]</sup> (b) 电磁驱动液态金属实验图<sup>[38]</sup> (c) 电解液-液态金属双流体芯片散热系统<sup>[39]</sup> (d) 液态金属液滴集成系统<sup>[40]</sup>

#### 1.4.2 柔性传感器件的电-热耦合研究

镓基液态金属在柔性电子器件领域中既能作为微型散热介质，又能用于构建

柔性传感电路。在热流激励场景下，液态金属柔性传感器面临高温模态畸变和导电材料电导率变化等技术瓶颈，导致传感器测量精度降低，甚至发生泄露等问题。

目前的研究探究了热流激励场景下的液态金属柔性压力传感器的测量精度问题。重庆大学的于子豪团队<sup>[41]</sup>开展不同温度场景下基于液态金属的多模态压力传感器的性能研究。该传感器采用聚二甲基硅氧烷（Polydimethylsiloxane, PDMS）作为基底材料，封装液态金属形成导电通道，图 1-7a 展示了多模态压力传感器的 PDMS-LM 复合结构。该传感器在低温环境中表现出较高的曲线柔度、良好的重复性和低滞后性，为低温岩土施工的压力检测提供了有效的工具。然而在  $80^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$  的工作温度范围内，传感器的压力测量信号输出值与  $20^{\circ}\text{C}$  时相比产生了较大差异，最大误差可达 16.403%。这表明热激励场景对液态金属柔性传感器性能有显著影响。中国科学技术大学的唱睿喆团队<sup>[42]</sup>也开展热激励场景下的基于液态金属的传感器性能测试，在磁流变弹性体（Magnetorheological Elastomers, MRE）内填充液态金属，制备了液态金属填充式的磁流变弹性体，并设计了一款柔性触觉传感器（如图 1-7b 所示）。该传感器采用“三明治”夹层结构，由电极层-传感层-电极层组成。研究发现，磁流变弹性体的触觉传感器成本低廉、工艺简单，且具备良好的灵敏性和低迟滞误差。然而在  $-16^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$  的温度区间内，传感器的灵敏度随着温度降低而降低，表现出“正电阻-温度效应”，即温度降低导致电阻增加，影响触觉传感器的测量精度。

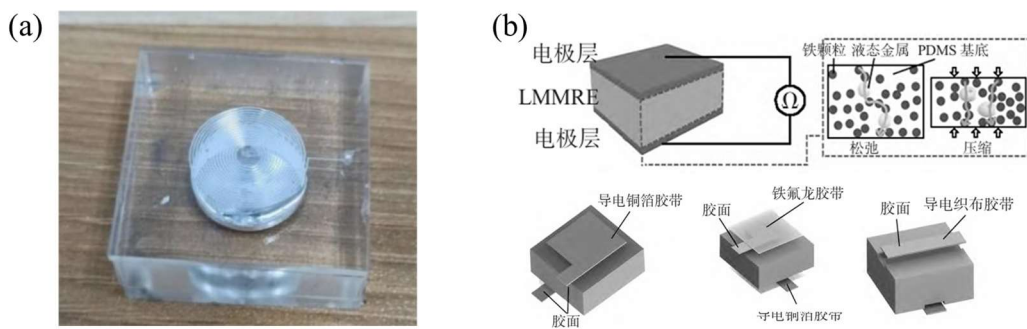


图 1-7 柔性传感器电-热耦合现状 (a) 基于液态金属的 PDMS 芯片<sup>[41]</sup> (b) 液态金属填充式的柔性触觉传感器<sup>[42]</sup>

基于液态金属的柔性传感器在热流激励场景下存在测量精度低等问题，目前研究采用了温度补偿策略提高传感器测量精度。惠斯通电桥的硬件电路方式因其结构简单、效果突出等特性，在柔性传感器的后端电路设计中被广泛应用。

Wang 等<sup>[43]</sup>使用两步数字光处理 (Digital light Processing, DLP) 3D 打印技术制备了基于液态金属的触觉传感器, 其结构图如图 1-8a 所示。该触觉传感器中心区域的微流道结构内填充液态金属, 将外部力刺激转换为电信号, 通过惠斯通电桥电路实现该传感器的力信号和温度信号的解耦。

基于液态金属的触觉传感器系统的外部温度补偿电路 (惠斯通电桥) 会导致整个系统笨重, 不能实现系统的微型化和集成化。为此, Wang 团队<sup>[44]</sup>还设计了一款基于液态金属的可穿戴柔性传感器, 惠斯通电桥电路已集成至传感器结构内, 具体结构如图 1-8b 所示。该传感器设计了四个相同的微流道结构, 流道内的液态金属形成了四个电阻, 实现了惠斯通电桥电路的集成化。该微流道的几何参数相同, 外部温度引起的电阻变化也相同。当温度变化时, 该微流道式电阻与工作电阻变化相似, 在电桥电路中抵消温度效应产生的影响。通过上述结构, 该可穿戴传感器能实现系统微型化和集成化, 能抵消温度效应的影响, 还能获得准确的力刺激信号。

除了硬件补偿方法外, 研究还采用了数学建模、人工智能和神经网络等软件方式来提高测量精度。Zhang 等<sup>[45]</sup>提出了一种液态金属基双参数传感器, 采用多层结构设计: 顶层为电容式变形传感单元, 中间层为电阻式温度传感单元 (如图 1-8c 所示)。为解决信号串扰问题, 提出了一种基于数学建模的信号解耦策略, 通过拟合方程推导出解耦方程, 实现对变形和温度信号解耦。此外, 目前研究还通过制备导电复合材料来降低温度对信号测量的干扰。Wang 课题组<sup>[46]</sup>制备了一种基于壳聚糖季铵盐和液态金属的复合水凝胶 (CHACC-LM), 该材料具有温度-应力双模态传感功能 (如图 1-8d 所示)。CHACC-LM 水凝胶对温度和应力的响应机制相对独立, 能在一定程度上区分温度和应力信号, 降低温度变化对传感精度的影响。

目前研究通过温度补偿策略以提高基于液态金属的柔性压力传感器在热流激励场景下的测量精度, 如惠斯通电桥等硬件电路和数学建模与信号解耦等软件算法相结合的方式, 以及开发新型的导电复合材料。现有方式在提升柔性压力传感器的力信号检测精度方面取得了显著进展, 为后续适用于温度场景下的柔性压力传感器的开发提供了新的思路和策略。

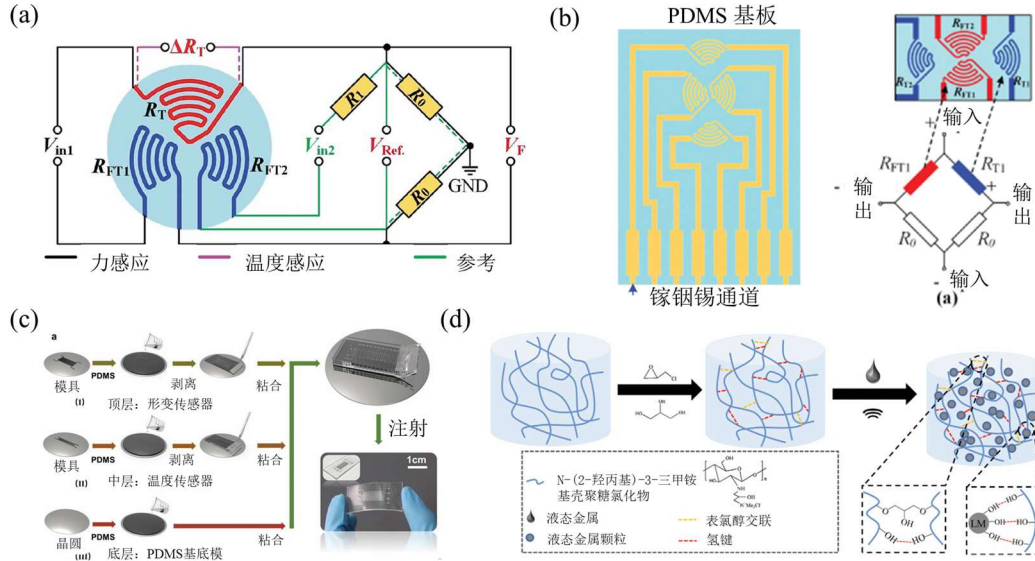


图 1-8 柔性传感器的温度补偿策略 (a) 3D 打印液态金属基触觉传感器<sup>[43]</sup> (b) 基于液态金属的可穿戴接触传感器<sup>[44]</sup> (c) 双参数传感器制造过程的示意图<sup>[45]</sup> (d) CHACC-LM 水凝胶制备过程的示意图<sup>[46]</sup>

## 1.5 目前存在的问题

目前以液态金属为冷却介质的微型散热器件研究中,已有部分课题组将液态金属作为载电、传热介质,为绕开固液传热界面环节提供了新的思路。然而在柔性电子领域研究中,以液态金属为冷却介质的散热系统仍主要依赖于固液界面热传导,固液界面接触热阻较大,传热效率受限。此外,在热载荷场景下,柔性传感器件面临高温模态畸变和温度干扰信号测量的问题,目前主要通过惠斯通电桥等硬件方法或人工智能等软件方式对传感器进行温度补偿。尽管取得了一定进展,但仍面临诸多挑战。

(1)目前,以液态金属为冷却介质的散热方式主要依赖于固液界面热传导。热源与液态金属对流传热系统之间存在固液接触界面,导致接触热阻较大,显著降低散热效率。为了提高固液界面热传导效率,现有研究普遍会增加液态金属的填充量,但会增加系统的成本。此外,复杂的系统设计和制造工艺也会增加系统的复杂性和制造成本,并且液态金属在固液界面处的润湿性较差,容易导致界面处的热传导不均匀。

(2)以微流管注入法制备的液态金属基柔性传感器为例,常见的液态金属

基柔性器件中的液态金属通常处于静止状态。然而，在热流激励场景下，液态金属柔性传感器的导电组分和结构组分的热膨胀系数不同，热效应会对传感器产生热应力、热膨胀和蠕变等不利影响，甚至导致泄漏。此外，液态金属的电导率会随温度变化而变化，这使得不同热载荷场景下的柔性传感器信号测量受到干扰。目前，研究采用温度补偿方式解决温度场对信号测量的干扰，包括硬件方式（如惠斯通电桥<sup>[47]</sup>）和软件方式（如人工智能<sup>[48]</sup>）。然而硬件方式存在可控性差和应用受限等问题，软件方式则存在系统复杂程度高、应用成本昂贵等问题，难以实现一种通用的温度补偿策略。为解决上述问题，现有研究又提出了一种新硬件调控系统介入方法，即通过制备电导率与温度无关或相关性较低的导电复合材料<sup>[49]</sup>。然而，实现一种通用的、温度与电导率无关或相关性较低的复合材料以降低温度场对传感器信号测量的干扰，仍具有较大的挑战性。

## 1.6 本文研究内容

在柔性电子领域中，液态金属柔性传感器在电-热耦合特性研究中面临电流激励和热流激励的影响，主要表现为高温模态畸变和测量信号失真等问题。目前，常用的解决策略是开发电导率与温度无关或相关性低的导电复合材料，但目前已有的此类材料并不适用于喷印、电镀和填充为代表的柔性电子器件工艺。为解决柔性器件在热载荷场景下的高温模态畸变和测量信号失真问题，本文提出一种替代策略，即将液态金属作为载电和传热介质，通过液态金属循环系统实现自冷却，降低温度场对柔性器件的干扰。本文的主要研究内容包括：研究不同温域下镓基液态金属的电质共传行为及电-热耦合特性，并表征其在柔性器件中的应用性能，研究路线如图 1-9 所示。

第 1 章：本章主要阐述液态金属的研究背景、定义及物化性质。介绍以液态金属为冷却介质的管道流散热系统和液态金属基柔性器件的制备方式及研究现状。最后总结液态金属管道流器件的电-热耦合研究现状及当前研究存在的问题。

第 2 章：本章主要研究镓基液态金属电解质共传行为中的电流导通、流场循环和电场中断的功能实现方式。介绍了镓基液态金属的组成成分、材料特性，基于液态金属的物化性质选择合适的电极材料和端部结构，实现电-液耦合功能。研

究了电-液耦合处的电阻串联模型和液态金属流动对该处电阻的波动情况。基于镓基液态金属的射流不稳定性,分析了其从连续相转换为离散相的参数,并设计了一款多管道液滴解耦器件,探究了其稳定生成液态金属液滴的性能和实现流场循环、电场中断的功能。

第3章:以液态金属柔性导线为例,本章研究电流激励(焦耳热)温度场下镓基液态金属电质共传行为的电-热耦合特性及应用。介绍镓基液态金属柔性导线的制备和特性,并分析焦耳热下的柔性导线的电质共传行为下的传热规律。最后,将单根镓基液态金属基柔性导线的传热规律拓展至镓基液态金属柔性导线制备的BLDC电枢,并表征了BLDC电枢的性能。

第4章:本章设计一款具有镓基液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器,并以此为例研究外界热流激励温度场下镓基液态金属电质共传行为的电-热耦合特性及应用。首先,介绍该柔性压力传感器的制备、设计和传感原理。然后,研究该传感器在多模态耦合下的电-热耦合特性,并阐述其性能及应用。

第5章:本章总结镓基液态金属电质共传行为的电-热耦合特性及其在柔性器件中的应用领域,并对未来的研究方向进行展望。

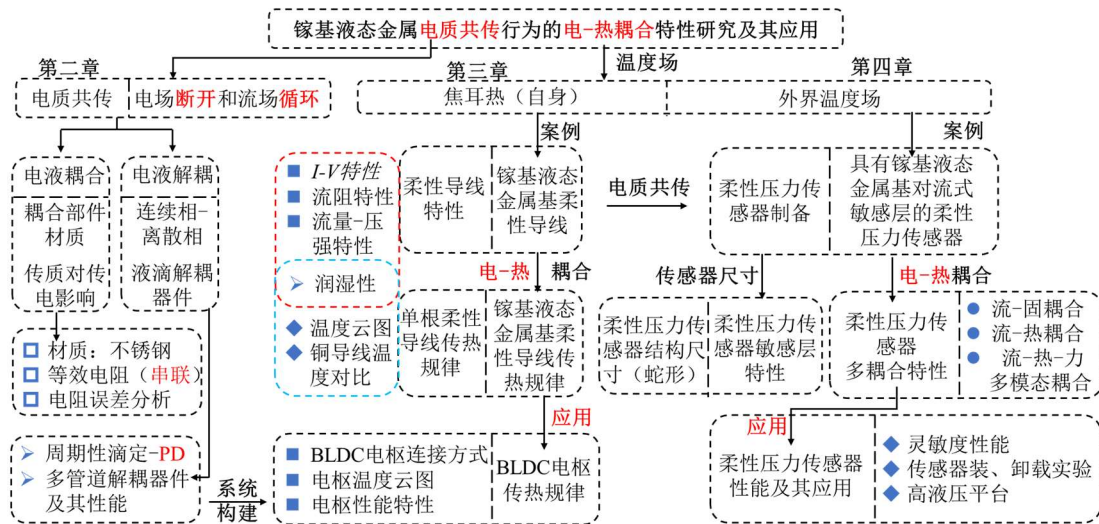


图 1-9 本文主要研究内容

## 第 2 章 镓基液态金属电质共传行为理论与结构实现

### 2.1 引言

基于液态金属的管道流器件内的液态金属普遍被封闭在微流道结构内，通过铜、银合金等导电复合材料制备的导线或电极片等实现电流传输。本文研究的镓基液态金属处于循环流动状态，其电质共传行为需要合适的端口连接部件实现电流传输、流场循环和电场中断功能。本章将重点研究镓基液态金属电质共传行为中的电-液耦合和结构特性。

本章将详细介绍镓基液态金属的电导率、表面张力和流变特性等物化性质。基于液态金属的物化性能，选择合适的端口连接部件材料和结构设计，确保电流能高效导入至液态金属电质共传系统。本章探究电-液耦合处的电阻串联模型，分析材料、不同几何参数的结构和液态金属流量对该处电阻的影响，为优化电-液耦合效率提供理论基础。本章还探究液态金属电质共传行为的电-液解耦功能，通过液态金属从连续相转换为离散相，实现流场循环和电场断开功能。该部分的主要研究内容为液态金属液滴的稳定生成参数，通过理论分析、仿真和实验验证，设计能实现电-液解耦的器件结构，并表征其性能。

### 2.2 液态金属材料特性与电-液耦合部件设计

#### 2.2.1 液态金属材料特性

镓（Ga）位于元素周期表第四周期 IIIA 族，原子量为 69.72。镓金属具有极低的熔点，仅为 303K（29.76°C），显著低于其他常见金属。镓能够与多种金属形成合金，其中最常见的是镓铟合金（Ga-In）和镓铟锡合金（Ga-In-Sn）。如图 2-1a 所示<sup>[50]</sup>，镓铟锡合金中最具代表性的是 Galinstan（66% Ga，20.5% In，13.5% Sn），其熔点接近 10°C；而镓铟合金中最具代表性的是 EGaIn（85.8% Ga，14.2% In），熔点为 15.3°C。本文所选用的低熔点液态金属为 Galinstan（66% Ga，20.5% In，13.5% Sn）。

液态金属在室温下表现出类似液体的流动性，其动态粘度较低（2.22mPa·s），仅为水动态粘度（1.003mPa·s）的 2.2 倍，展现出优异的流动性<sup>[51]</sup>。然而，液态

金属的表面张力较高（0.5-0.7N/m），远大于水的表面张力（0.072N/m），这导致其与基底材料之间的浸润性较差。尽管如此，液态金属具有不挥发、无毒的物理特性，其稳定的物理性质使其能够有效应对热载荷场景下的高热通量，是一种安全的合金材料。



图 2-1 镓基液态金属实物图

此外，液态金属还具有与金属相当的高导电性，其电导率（ $3\text{-}6\times 10^6\text{S/m}$ ）远高于碳基、硅基等非金属导电材料<sup>[52]</sup>，这为基于液态金属的柔性器件提供了优异的电学特性。基于这些特性，液态金属适用于透明电极、自愈合、跨尺度以及多维度柔性传感器件的开发。镓基液态金属的物理特性如表 2.1 所示。

表 2.1 镓基液态金属的物理特性<sup>[53-56]</sup>

| 材料名称                                                   | 镓 (Ga)                | 镓基合金 (EGaIn) | 镓铟锡 (GaInSn)        |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|---------------------|
| 熔点 (°C)                                                | 29.76                 | 16           | ≈11                 |
| 沸点 (°C)                                                | 2204                  | 2000         | 1300                |
| 蒸汽压 (Pa)                                               | ≈ $10^{-35}$ (29.9°C) | N/A (500°C)  | < $10^{-8}$ (500°C) |
| 电导率 ( $\times 10^6\text{S/m}$ )                        | 3.7 (20°C)            | 3.4 (20°C)   | 3.64 (20°C)         |
| 表面张力 (mN/m)                                            | 711                   | 624 (20°C)   | 718 (20°C)          |
| 热导率 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 29.3                  | 26.6         | 16.5                |

### 2.2.2 电-液耦合部件设计

在液态金属电质共传系统中，液态金属处于循环流动状态，其管道末端通常

呈现液滴状态。图 2-2a 展示了液态金属管道末端的液滴状态，其与传统固体金属导体或封闭在微流道内的液态金属不同。循环流动的液态金属无法通过简单金属触点实现电流传输，因此需要设计专门的端口连接部件。该端口部件不仅需要承载液态金属的流动，还需要缠绕外部导线以实现电流导入功能。基于这些要求，端口部件的结构设计为中空毛细管形式：毛细管外壁缠绕导线，内壁为液态金属流道。

液态金属对许多金属具有极高的亲和力，会腐蚀铜、铝等常见合金。因此，端口部件的金属材质需要具备一定的抗腐蚀能力。目前，常见的导电金属材料包括银、锌、钨和钛合金等。实验测试液态金属对这些金属的腐蚀情况，结果如图 2-2b 所示。其中，液态金属对锌制导线的腐蚀最为严重，其余的金属也存在被液态金属腐蚀的情况。相比之下，不锈钢和金属镍展现出较好的抗腐蚀性能，能满足电-液耦合部件的材质要求。由于不锈钢的成本比镍金属更低廉，因此选不锈钢金属为液态金属电解质共传系统的电-液耦合部件材质。

电-液耦合部件最终设计为不锈钢中空毛细管，其内壁承载液态金属流动，外壁缠绕铜制导线（如图 2-2c 所示）。这种结构实现电流的高效导入和导出，同时保证系统的稳定性和经济性

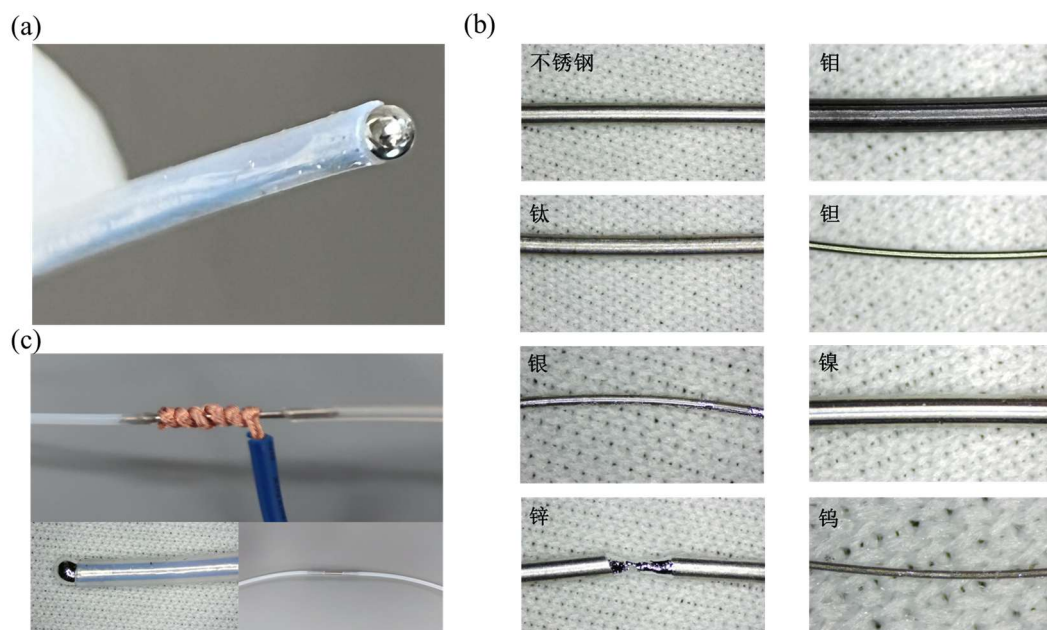


图 2-2 电-液耦合部件设计 (a) 液态金属管道末端的液滴形态 (b) 液态金属对不同金属材料腐蚀情况 (c) 电解质共传行为的液态金属系统电-液耦合部件

## 2.3 液态金属系统的电-液耦合特性

### 2.3.1 电-液耦合处的结构及电阻分布

以 304 不锈钢为代表的 Cr 基合金与镓基液态金属之间存在优异的化学惰性，其对液态金属具有一定的抗腐蚀性，因此电-液耦合部件选用不锈钢金属制备。不锈钢中空毛细管插入承载液态金属的聚四氟乙烯（Polytetrafluoroethylene, PTFE）管道内，使用胶水填充两者之间空隙，确保电-液耦合结构稳定。图 2-3a 展示了液态金属系统的电-液耦合处结构，不锈钢中空毛细管内壁承载液态金属，外壁缠绕铜导线。电流通过铜导线传输至不锈钢中空毛细管，再由中空毛细管传输至液态金属内，通过内外壁接触实现电流传输以及流体的隔离。

然而，电-液耦合处存在多个不理想的接触界面，导致接触电阻的产生。液态金属与不锈钢中空毛细管内壁之间、不锈钢中空毛细管外壁与外接铜导线之间的接触面均存在接触电阻，如图 2-3b 所示。电-液耦合处的电阻分布可简化为三个电阻的串联：导线接触电阻、不锈钢中空毛细管电阻和固液接触电阻，该位置是液态金属电解质共传系统中的电阻最大区域。

液态金属的高粘度和表面能特性在其电解质共传行为中，会导致电-液耦合处的电阻产生波动。该电阻波动会对后续的电-热耦合特性研究产生影响，需要研究液态金属柔性导线电-液耦合处的电阻波动，探究其电阻变化情况。

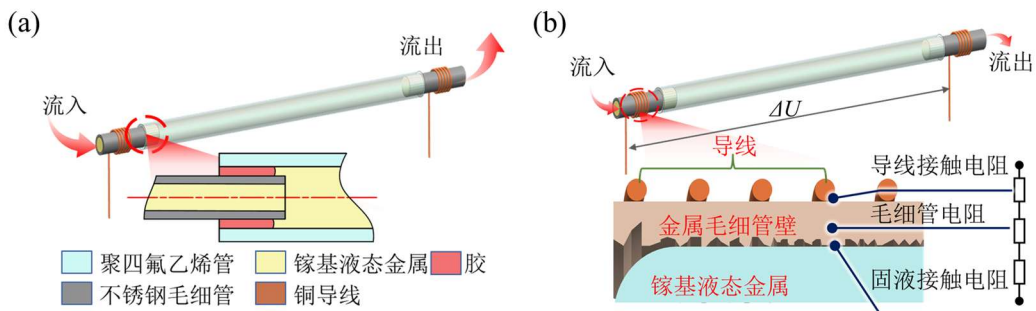


图 2-3 电-液耦合处的结构及电阻分布 (a) 不锈钢金属中空毛细管与液态金属柔性导线的电-液耦合处结构图 (b) 电-液耦合处电阻串联分布图

### 2.3.2 电-液耦合处的电阻波动

液态金属具有高表面能特性，其在流动时会在电-液连接处产生电阻波动。

对于未缠绕铜导线的液态金属柔性导线，其电-液连接处的电阻分布为不锈钢中空毛细管电阻和固液接触电阻的串联模型。由于不锈钢中空毛细管内壁与液态金属之间存在不理想界面，该连接处电阻会随着液态金属的流动而产生波动。

实验测量不同尺寸的不锈钢中空毛细管在不同液态金属流量下的电-液耦合处电阻波动。首先，内径为 0.8mm、壁厚为 0.2mm、长度为 1.5mm 的不锈钢中空毛细管，在液态金属流量分别为 1mL/min 和 3mL/min 时，电-液耦合处的电阻波动情况如图 2-4a 所示。长度为 1.5mm 的不锈钢金属毛细管在 1mL/min 流量下，该电-液耦合处的电阻约为 201mΩ，在 3mL/min 流量下的电阻约为 172mΩ。实验结果表明，不同流量下电-液耦合处的电阻值存在差异，且电阻随流量增大而减小。相同条件的电-液耦合处在相同流量下的电阻也存在波动情况，但均在电阻平均值附近波动。

其次，实验还测量内径为 0.39mm、壁厚为 0.12mm、长度为 4mm 的不锈钢中空毛细管在液态金属流量为 1mL/min 和 2mL/min 时的电-液耦合处电阻波动，结果如图 2-4b 所示。在该实验条件下，液态金属流量为 1mL/min 时，电-液耦合处电阻的平均值为 30.80mΩ；流量为 2mL/min 时，电-液耦合处电阻平均值为 28.42mΩ。与图 2-4a 的结果类似，液态金属流量越大，电-液耦合处的电阻反而越小，且电阻波动不显著。

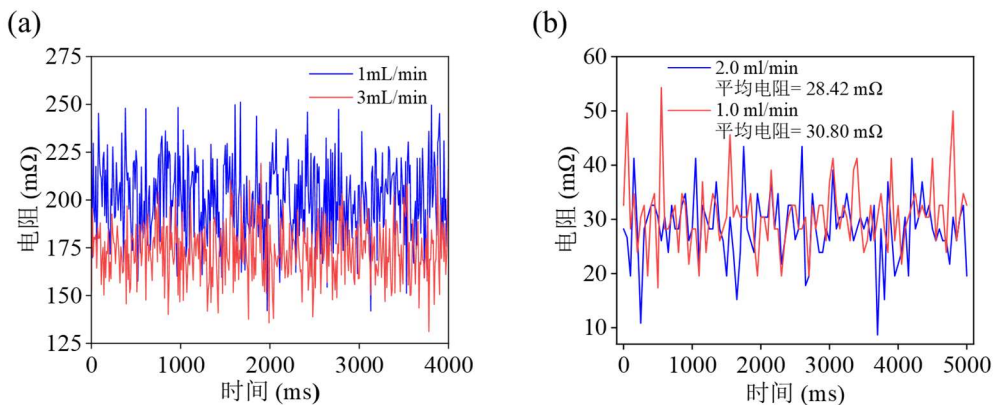


图 2-4 电-液耦合处电阻波动（未缠绕铜导线） (a) 不锈钢金属中空毛细管（内径为 0.8mm、壁厚为 0.2mm、长度为 1.5mm）在液态金属 1mL/min 和 3mL/min 流量下的电-液耦合处电阻波动图 (b) 不锈钢金属中空毛细管（内径为 0.39mm、壁厚为 0.12mm、长度为 4mm）在液态金属 1mL/min 和 2mL/min 流量下的电-液耦合处电阻波动图

通过对比图 2-4a 和图 2-4b 的结果，可以发现两组实验中电阻波动的趋势一致：液态金属流动会引起电-液耦合处电阻波动，且流量越大，电阻越小，电阻波动也越不显著。

当铜导线缠绕在不锈钢中空毛细管外壁时，相比于未缠绕铜导线的情况，电-液耦合处会额外出现一个串联的导线接触电阻。因此，缠绕铜导线的电-液耦合处电阻大于未缠绕铜导线的情况。由于铜导线与不锈钢中空毛细管之间的接触界面为非理想接触界面，实际接触面积减少，导致导线接触电阻的存在。液态金属的流动可能会加剧该电-液耦合处的电阻波动。

实验测量外壁缠绕铜导线的不锈钢中空毛细管（内径 0.8mm、壁厚 0.2mm、铜导线缠绕长度 1.5mm）在液态金属流量为 1mL/min 和 3mL/min 时的电阻波动情况，结果如图 2-5a 所示。与图 2-4 类似，实验观察到液态金属流量越大，电-液耦合处的电阻越小，并且在相同流量下，电-液耦合处的电阻仍存在波动。

此外，实验还测量了另一种尺寸的不锈钢中空毛细管（内径 0.39mm、壁厚 0.12mm、铜导线缠绕长度 4mm）在液态金属流量为 1mL/min 和 3mL/min 时的电阻波动情况，结果如图 2-5b 所示。图 2-5b 中的电阻波动趋势与图 2-4 类似，均表现出液态金属流量越大，电-液耦合处的电阻波动越不显著的特征。

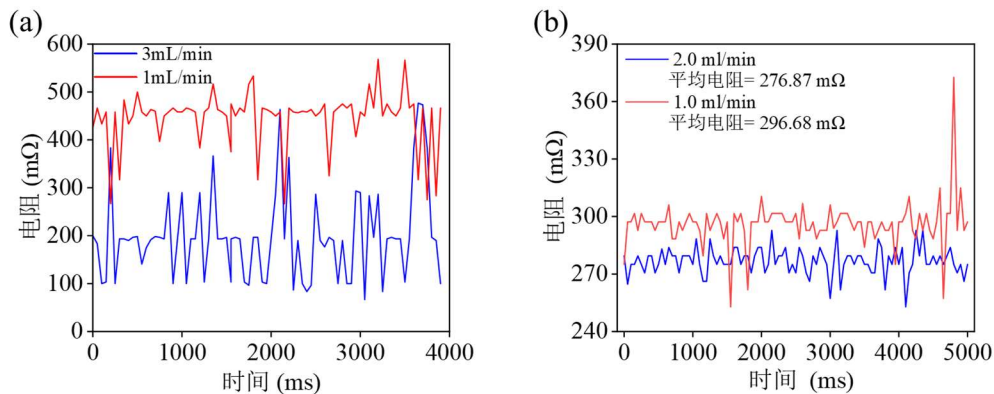


图 2-5 电-液耦合处电阻波动（缠绕铜导线） (a) 不锈钢中空毛细管（内径为 0.8mm、壁厚为 0.2mm、铜导线缠绕长度为 1.5mm）的在液态金属 1mL/min 和 3mL/min 流量下的电-液耦合处的电阻波动图 (b) 不锈钢中空毛细管（内径为 0.39mm、壁厚为 0.12mm、铜导线缠绕长度为 4mm）在液态金属 1mL/min 和 2mL/min 流量下的电-液耦合处的电阻波动图

内径为 0.39mm，壁厚为 0.12mm 的不锈钢金属中空毛细管（未缠绕铜导线）

在 1mL/min 流量下的电阻率为 7.7mΩ/mm，在 2mL/min 流量下的电阻率为 7.1mΩ/mm。内径为 0.39mm，壁厚为 0.12mm 的不锈钢金属中空毛细管（缠绕铜导线）在 1mL/min 流量下的电阻率为 74.17mΩ/mm，在 2mL/min 流量下的电阻率为 69.22mΩ/mm。对比不锈钢中空毛细管的未缠绕和缠绕铜导线两种情况下的电阻，缠绕铜导线不锈钢中空毛细管的电-液耦合处电阻明显增大额外的导线接触电阻会增大电-液耦合处的电阻波动情况，缠绕铜导线的电-液耦合处的电阻波动更明显。

## 2.4 液态金属系统的电-液解耦理论与结构实现

### 2.4.1 液态金属液滴生成规律

在本章中，已将不锈钢中空毛细管作为电质共传液态金属系统的电-液耦合部件，实现液态金属系统的电-液耦合功能。然而流体的循环是连续的，电路的两极接在流体的中端，导致非做功区域的循环的液态金属直接导通电源两端，导致电源短路。为实现电-液解耦功能并避免系统导通导致短路，需要将液态金属在非做功区域中从连续相转换为离散相，实现电场断开。液态金属的射流不稳定性使其射流末端能够破碎成液滴，这一特性为实现流场连续和电场断开提供了可能性。因此，本章通过控制液态金属的流量，实现液态金属从连续相到离散相的转换，从而实现电-液解耦功能。

液态金属液滴的稳定生成是保证液态金属电路系统稳定运行的关键，而液态金属的流量大小决定液滴的产生速率和稳定性<sup>[57]</sup>。因此，流量是液态金属电路稳定运行的关键参数。本节将液态金属的流量分为低流量和高速射流阶段进行讨论。

在低流量阶段，液态金属的表面张力无法克服液体重力，从而形成周期性滴注（Periodic Dropping, PD）。PD 阶段的液滴产生速率可通过 Tate 方程计算得出：

$$M = \pi \sigma D / g \quad (2-1)$$

其中  $M$ 、 $\sigma$ 、 $D$ 、 $g$  分别表示液滴重量（单位：Kg）、液体的表面张力系数（单位：N/m）、管道外半径（单位：m）、重力加速度（单位：m/s<sup>2</sup>）。

液态金属的高速射流阶段中，其会断裂形成液态金属液滴，这一现象通常称为“滴水龙头”（Dripping Faucet, DF）。液态金属射流断裂产生液滴的过程与韦

伯数（Weber Number,  $We$ ）的大小密切相关，当韦伯数低于临界韦伯数时，液态金属射流呈现周期性液滴状态，当韦伯数高于临界韦伯数时，液态金属射流呈现连续射流状态。韦伯数是一个无量纲数，主要描述流体流动过程中的惯性力与表面张力之间的平衡关系。液态金属流体的韦伯数可以通过韦伯数计算公式得出：

$$We = 4 \frac{Bo_o}{Bo} [1 + KBo_oBo - \sqrt{(1 + KBo_oBo)^2 - 1}]^2 \quad (2-2)$$

$$B = \sqrt{\rho g D^2 / 2\sigma} \quad (2-3)$$

其中  $Bo$  和  $Bo_o$  是由管道的外径  $D$ （单位：m）和内径  $D_o$ （单位：m）计算得出， $K$  是通过实验测量的常数， $\rho$  为流体密度（单位：Kg/m<sup>3</sup>）。

当液态金属在管道内流动时，韦伯数  $We_v$  可以通过韦伯数计算公式得出：

$$We_v = \rho v^2 l_v / \sigma \quad (2-4)$$

其中  $v$  是液态金属流速（单位：m/s），其中  $l_v$  是特征长度（单位：m）。

根据上述理论公式，当流体介质和管道规格确定后，通过减小流体流量可以有效降低韦伯数。在高速射流阶段，破碎射流生成的液滴长度难以精确控制，且射流可能会将两端导通，从而导致短路。因此，本文选择采用安全的周期性滴注（PD）状态，通过控制液态金属流量确保其处于低流量阶段。液态金属流量是确保液态金属电路系统稳定断开的的关键参数。

本章利用 COMSOL Multiphysics 5.6 仿真软件模拟了液态金属液滴的生成过程，仿真结果如图 2-6 所示。

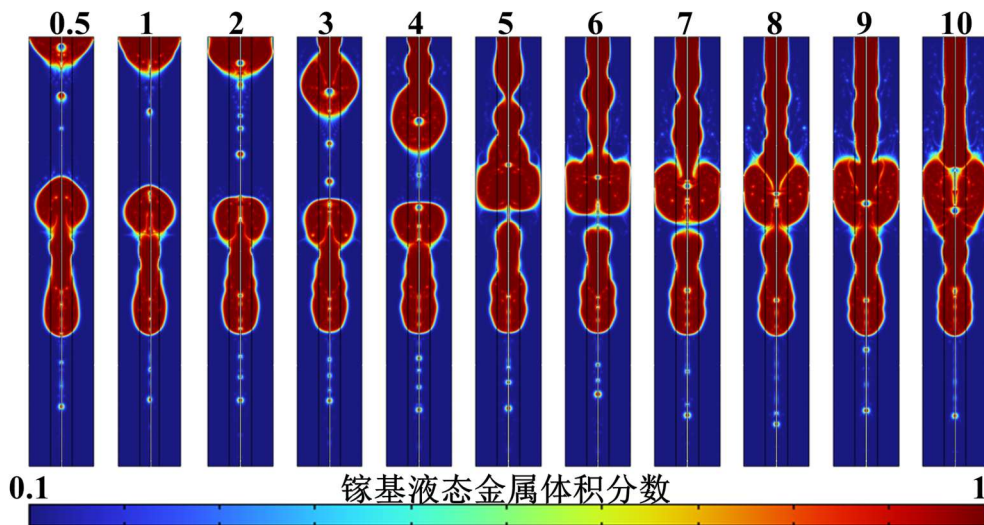


图 2-6 液态金属液滴生成的两相数值仿真模拟图

图 2-6 上方的数字是液态金属流动时的韦伯数大小，当液态金属的韦伯数大于 6 时，液态金属射流并未产生液滴。仿真结果显示液态金属射流生成液滴的最大韦伯数为 6，即其临界韦伯数为 6。液态金属的韦伯数增大，其射流长度也逐渐增加。液态金属射流不会一直处于连续射流状态，根据射流破碎理论，当液态金属射流的韦伯数增大到一定程度时，射流末端会呈现不稳定状态，并会破碎生成液态金属液滴。但是这种射流破碎生成液态金属液滴的长度难以控制，会将液态金属喷口与液面两端导通，造成液态金属系统短路。

#### 2.4.2 多管道液滴解耦器设计

液态金属液滴的稳定生成依赖于 PD 状态，此时液态金属的韦伯数需要低于临界值。液态金属流速成为液滴稳定生成的关键参数。液态金属系统设计一款液滴解耦器，稳定生成液态金属液滴，确保系统的流场连续和电场断开。

实验测量不同管径的管道在相同液态金属流量下的液滴生成频率，通过在液滴降落路径上设置光电传感器（QS96 计数器，广州市青松公司，广州市，广东省），记录单位时间（本实验以 1 分钟为标准）内通过的液滴数  $N$ ，并计算液滴生成频率。实验中使用的管道管径分别为  $1200\mu\text{m}$ 、 $800\mu\text{m}$  和  $600\mu\text{m}$ ，图 2-7a 展示不同管径管道的液滴生成频率与液态金属流量的关系。实验结果表明，液态金属液滴生成频率与其流量呈线性关系。具体而言， $600\mu\text{m}$  管径的管道液滴生成频率为  $0.79 \times 10^{-3} \text{Hz} \cdot \text{min}/\text{ml}$ ， $800\mu\text{m}$  管径的管道液滴生成频率为  $0.64 \times 10^{-3} \text{Hz} \cdot \text{min}/\text{ml}$ ， $1200\mu\text{m}$  管径的管道液滴生成频率为  $0.44 \times 10^{-3} \text{Hz} \cdot \text{min}/\text{ml}$ 。在相同流量条件下，管径越小，液态金属的韦伯数越大，液滴生成频率越高；而在相同管径条件下，流量越大，韦伯数越大，液滴生成频率越高。因此，在液滴解耦器的管道尺寸确定后，应尽可能减小液态金属流量，以确保液滴的稳定生成。

基于上述实验结果，本章设计的液滴解耦器采用多管道结构，以减少滴头处的液态金属流量。这种结构能在液态金属大流量输入时，仍保持液滴的稳定生成，确保电-液解耦功能的可靠性。

由于液态金属具有一定的还原性，容易被空气氧化，其表面形成的氧化物薄膜会影响电导率和流动性。本文设计的多管道液滴解耦器对液滴的离散表面有特定需求，储液罐表面必须为开口结构，会导致明显的氧化现象。为减少氧化，解

耦器的储液池采用连通器结构，并在液态金属液滴生成端用惰性气体（如氩气或氮气）保护，同时在另一端的空气接触区域使用 0.1mol/L 的 NaOH 电解液进行密封。此外，储液池的设计为斜坡结构，利用液态金属的重力驱使其流动，避免液态金属堆积导致液面升高。图 2-7b 展示了多管道液滴解耦器的具体结构，该解耦器共有三个开口：连通器结构的空气接触区域上方的开口用于保持内外气压平衡，其余两个开口分别为液态金属的入口和出口。

图 2-7c 展示了多管道液滴解耦器的三维建模模型。该模型包含一个进口和四个出口，设计用于优化液态金属的流量分布。入口管道的内径为 1.5mm，外径为 2.4mm；出口管道的内径为 1.2mm，外径为 3mm。根据管道分布情况，靠近进口处的出口管道流量最大，其韦伯数也最大，因此该处最容易发生短路现象。为了确保系统的稳定运行，仍需严格控制液态金属的输入流量。图 2-7d 还展示了多管道液滴解耦器的空腔体结构。空腔体采用连通器结构，能够有效防止液态金属与空气接触，从而减少氧化现象的发生。这种设计不仅保证了液态金属的电导率和流动性，还提高了系统的可靠性和稳定性。

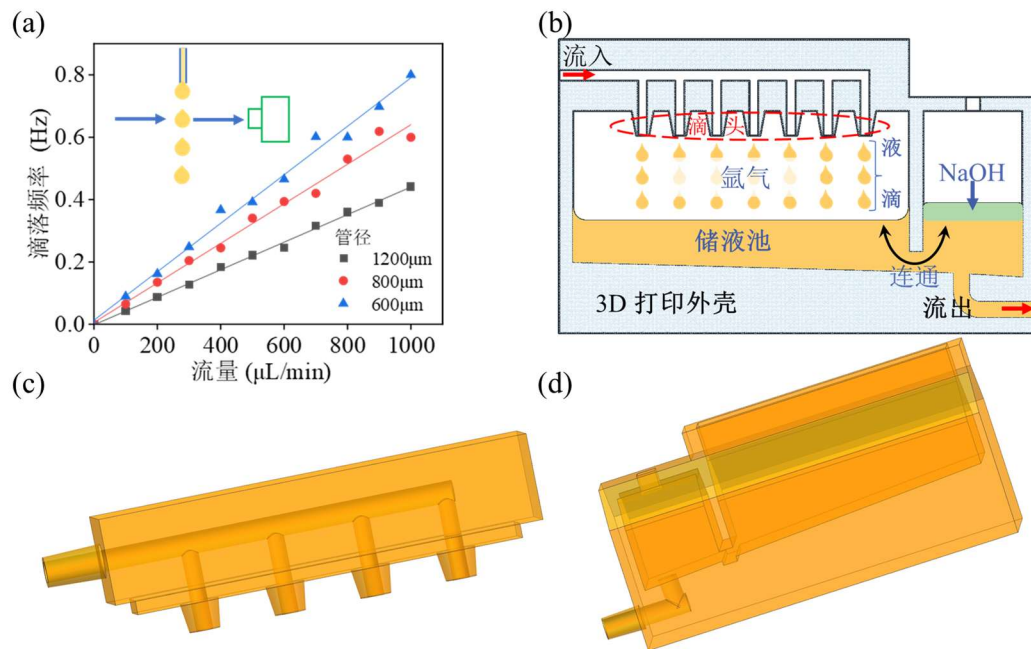


图 2-7 多管道液滴解耦器结构设计 (a) 液态金属液滴产生频率与流速关系图 (b) 多管液滴解耦器结构示意图 (c)多管道液滴解耦器的多管道体三维建模 (d) 多管道液滴解耦器的空腔体三维建模

3D 打印技术，又称增材制造技术，是一种通过逐层堆积材料来制造三维物体的技术。常见的 3D 打印技术包括 FDM、立体光刻（Stereolithography, SLA）和 DLP 技术。这些技术目前已广泛应用于制造业、医疗领域和建筑行业等。近年来，3D 打印技术在微流控芯片领域也得到了广泛应用，能较为轻松地制备复杂的微流道结构。在柔性电子领域中，常见的 3D 打印材料为丙烯酸材料，其与液态金属之间具有优异的化学惰性，不会被液态金属腐蚀。因此，本文采用多喷头打印技术（Multi-Jet Printing, MJP）制备多管道液滴解耦器。该技术基于独特的支撑层溶解和去除方法，能够实现高精度的多管道结构制备。多管道液滴解耦器的材质选用丙烯酸材料，确保了其在液态金属环境中的稳定性。

#### 2.4.3 多管道液滴解耦器性能研究

多管道液滴解耦器的主要功能是将液态金属从连续相转换为离散相，确保液态金属液滴的稳定生成，实现液态金属电路系统的流场连续和电场断开。为探究多管道液滴解耦器的性能，实验中将不锈钢中空毛细管分别连接到液滴解耦器的入口和出口端，并接入 50mV 的电源。滴头与液面之间保持 10mm 的距离，液态金属以不同流量输入。通过测量不锈钢中空毛细管与多管道液滴解耦器之间的电流，记录电流的变化情况（如图 2-8a 所示）。

实验结果表明，当液态金属的初始流量较小时，液滴解耦器两端的电流为 0A，呈现断路状态。随着液态金属流量的逐渐增大，液滴解耦器两端出现微弱电流，呈现导通状态。进一步增大液态金属流量时，液滴解耦器两端的导通电流逐渐增大。然而，当液滴解耦器两端的导通电流达到一个定值后，液滴解耦器两端的电流不再随液态金属流量的增大而增大。这是因为此时液滴解耦器两端产生的射流长度已经超过了滴头与液面之间的距离，液态金属流量对液滴解耦器两端的导通电流值不再有显著影响。当液滴解耦器两端的导通电流达到阈值后，逐渐降低液态金属流量，导通电流也随之逐渐减小，最终恢复到断路状态。在断路到导通以及导通到断路的转换过程中，明显观察到两种状态转换的临界流量存在差异。这可能是由于电场对液滴生成过程产生了影响。

为探究这种状态转换（导通-断路、断路-导通）的液态金属临界流量差异，实验通过改变液滴解耦器两端的电源电压，测量从断路到导通以及从导通到断路

状态的临界流量差值（如图 2-8b 所示）。实验结果表明，液滴解耦器两端的电压越大，两种状态转换的临界流量差值也越大。液滴解耦器两端的电压会干扰器件导通、断路两种状态的切换速度。

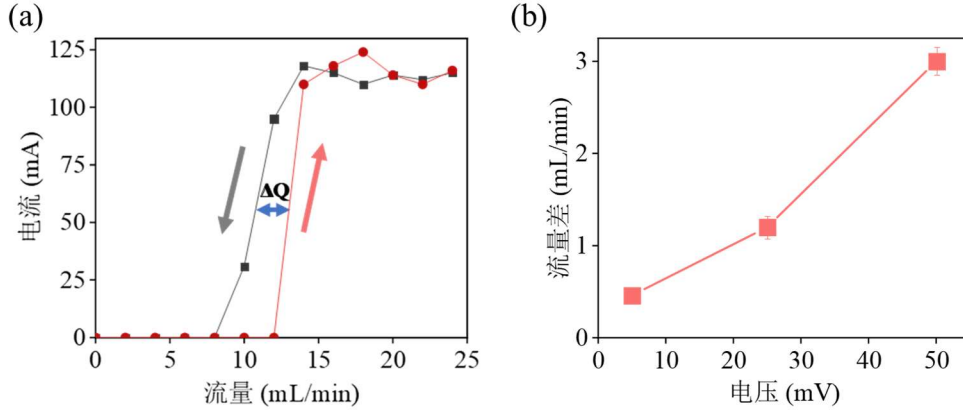


图 2-8 多管道液滴解耦器性能研究 (a) 多管道液滴解耦器两端导通电流与液态金属流量之间的关系图 (b) 两种状态切换（断路-导通，导通-断路）的临界流量差值与多管道液滴解耦器两端电压关系图

## 2.5 本章小结

本章详细探讨液态金属在柔性电子器件中的应用，重点研究其电-液耦合和解耦机制。液态金属因其卓越的导热性、流动性和导电性，以及低于  $20^{\circ}\text{C}$  的熔点，已成为柔性电子器件的理想导电组分。然而，液态金属管道末端呈现液滴状态，无法像传统金属那样通过触点连接，因此需要设计专门的端口连接部件。

端口连接部件采用 304 不锈钢材质，这种材料能够有效抵抗液态金属的腐蚀。部件采用中空管结构，内壁承载液态金属，外壁缠绕铜导线，从而实现电流的导通。实验表明，电-液耦合处的电阻分布为三个电阻串联模型：导线接触电阻、毛细管电阻和固液接触电阻。液态金属流量较大时，电-液耦合处的电阻较小，且电阻波动不显著。

此外，本章设计并研究多管道液滴解耦器，该解耦器能够将液态金属从连续相转换为离散相，确保液态金属液滴的稳定生成，在单一管道中实现流-电两个独立环节的解耦。多管道液滴解耦器采用丙烯酸材料，并通过 MJP 制备。实验发现，液滴解耦器两端存在一个导通电流阈值，施加的电场会对状态转换的临界流量产生干扰，导致断路到导通以及导通到断路状态切换的临界流量存在差值。

## 第 3 章 电流激励环境的镓基液态金属电-热耦合特性研究

### 3.1 引言

上一章详细探讨了液态金属电质共传系统的电-液耦合和解耦机制，分析电-液耦合处的三个电阻的串联模型及电阻波动情况，并设计和研究了多管道液滴解耦器的结构和性能。基于这些研究理论，为了深入研究液态金属电质共传行为的电-热耦合特性，将液态金属电-热耦合的温域分为两部分：电流激励环境和热流激励环境。本章将以镓基液态金属柔性导线为例，研究电流激励环境下的液态金属电质共传行为及电-热耦合特性，并探讨其在实际应用中的性能。

本章首先介绍镓基液态金属柔性导线的制备方法及其电阻、填充率等物理特性，然后详细阐述电流激励环境下液态金属柔性导线的传热规律，以及单根镓基液态金属柔性导线的电-热耦合特性。最后，本章探讨了液态金属柔性导线制备 BLDC 电枢系统的方法，研究了其在 BLDC 电枢系统中的电-热耦合特性，并评估其在柔性电子领域中的应用潜力。

### 3.2 液态金属柔性导线制备及特性

液态金属已在柔性电子领域中得到了广泛的应用，其中最简单的液态金属柔性器件为液态金属柔性导线。液态金属柔性导线是承载液态金属的柔性管道，其通常采用注射工艺制备。本文使用注射工艺制备液态金属柔性导线的动力源为晞迈智能分体进样器（XMSP-1C，晞迈纳米科技有限公司，南京市，江苏省），它可夹持注射器外径小于 50mm 的任意规格注射器。

由于液态金属重力的影响，柔性管道内的液态金属在开端条件下会自然流失，因此采用先绕制后填充的方法制备液态金属柔性导线。液态金属柔性导线两端插入不锈钢中空毛细管，能实现电-液耦合功能。其中不锈钢中空毛细管的外径可根据柔性管道内径选择，实现两者之间的紧密连接，并使用胶水填充两管间缝隙，避免液态金属泄露。

液态金属柔性导线由液态金属填充柔性管道制备而成，其本身具有电阻属性。电流导通时，液态金属柔性导线会产生热量，材料电阻率受温度影响，不同温度下的柔性导线的电阻值也不同。实验测量管径为 800 $\mu\text{m}$  的三种不同长度（60mm、

80mm 和 100mm) 的液态金属柔性导线在不同温度条件下的电阻值。图 3-1a 展示了液态金属柔性导线的  $I-V$  特性曲线。液态金属柔性导线内填充的液态金属的等效电阻率为:  $\sigma_l = l_\sigma / R_\sigma s_\sigma$ 。其中  $R_\sigma$  为液态金属柔性导线总电阻 (单位:  $\Omega$ ),  $l_\sigma$  为柔性导线长度 (单位: m),  $s_\sigma$  为管道横截面积 (单位:  $\text{m}^2$ ),  $\sigma_l$  为电阻率 (单位:  $\Omega \cdot \text{m}$ )。

通过计算不同长度的液态金属柔性导线的等效电阻率, 发现  $30^\circ\text{C}$  下的柔性导线内液态金属的等效电阻率平均值为  $1.60 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $50^\circ\text{C}$  下的等效电阻率平均值为  $1.60 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ,  $80^\circ\text{C}$  下的等效电阻率平均值为  $1.70 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 。实验测得的柔性导线内液态金属的等效电阻率约为理想条件下液态金属电阻率的 5 倍, 这个差异主要来源于液态金属柔性导线的电-液耦合处接触电阻和自身填充率。

液态金属具有高表面能特性, 其不同在不同介质表面的润湿性不同。 $30^\circ\text{C}$  的温度条件下, 液态金属与硅胶界面的接触角为  $72^\circ$ 。液态金属与硅胶介质表面的润湿性不足, 会导致硅胶软管内的液态金属填充不充分, 增大液态金属柔性导线内液态金属的等效电阻率。在保证材料和温度稳定的情况下, 实验测量了  $30^\circ\text{C}$  温度条件下的不同液态金属流量的硅胶软管的填充率。图 3-1b 展示了液态金属柔性导线的填充率变化情况。在本实验中, 注射泵将液态金属注入硅胶软管内, 液态金属将管内原本存在的空气完全排出后, 注射泵继续工作 30 秒后停止工作。此时, 液态金属已完全填充硅胶软管, 然后将软管内的液态金属用气流完全排出, 并测量液态金属的质量  $m_f$ 。在已知液态金属密度  $\rho_f$ 、柔性导线的直径  $D_f$ 、长度  $l_f$  的情况下, 可以用公式计算填充率  $f$ , 填充率  $f$  的计算公式:

$$f = 4m_f / \rho_f \pi D_f^2 l_f \quad (3-1)$$

图 3-1b 的结果表明, 在液态金属流量较低时 (注射流量小于  $10 \mu\text{L}/\text{min}$ ), 壁面力和粘滞力占主导地位, 液态金属与硅胶软管壁面之间存在许多间隙, 导致液态金属柔性导线的填充率保持在较低水平。随着流量的增加, 液态金属的惯性力逐渐克服壁面力的阻碍, 从而提高了硅胶界面区域的填充率。在流量范围为  $1 \sim 80 \mu\text{L}/\text{min}$  内, 观察到一个填充率上升的周期过程。当流量达到约  $90 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 液态金属柔性导线的填充率趋于稳定。这一现象表明, 液态金属的流动特性与填充率之间存在密切关系。液态金属流量的增大显著改善了液态金属在硅胶软管中的填充效果。

液态金属流量控制不仅需要考査管道填充率,还需要考査硅胶软管能承受的极限压力。根据泊肃叶定律:

$$R_f = 8\mu_f l_f / \pi r_f^4 \quad (3-2)$$

$$Q_f = P_f / R_f \quad (3-3)$$

其中  $R_f$  为液态金属柔性导线流阻 (单位:  $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ),  $\mu_f$  为流体粘度系数 (单位:  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),  $l_f$  为导线长度 (单位:  $\text{m}$ ),  $r_f$  为导线的特征半径 (单位:  $\text{m}$ ),  $Q_f$  为流量 (单位:  $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $P_f$  为压强差 (单位:  $\text{Pa}$ )。

上述公式表明,液态金属柔性导线的流阻与硅胶软管的长度和管径等几何参数密切相关。硅胶软管的入口端为管道压强最大的位置。为了便于测量液态金属柔性导线的最大压强,实验中将柔性导线的出口端设为开放状态,此时柔性导线入口端的压强值即为液态金属柔性导线两端之间的压强差。

实验测量了三种不同管径 ( $600\mu\text{m}$ 、 $800\mu\text{m}$  和  $1200\mu\text{m}$ ) 的液态金属柔性导线在不同压强下的流量,结果如图 3-1c 所示。通过  $P$ - $Q$  曲线分析,计算得到管径为  $600\mu\text{m}$ 、 $800\mu\text{m}$  和  $1200\mu\text{m}$  的液态金属柔性导线的流动阻力分别趋近于  $2.62\times 10^{11}\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ 、 $1.13\times 10^{11}\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$  和  $0.57\times 10^{11}\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ 。通过对比不同管径的柔性导线的流阻大小,可以得出管径为  $600\mu\text{m}$  的液态金属柔性导线的流阻约为管径为  $800\mu\text{m}$  的液态金属柔性导线流阻的 2.32 倍,并且其流阻也约为管径为  $1200\mu\text{m}$  的液态金属柔性导线流阻的 4.60 倍。

目前,常见的液冷散热系统根据冷却介质可分为水冷和油冷散热系统。为进一步评估液态金属柔性导线的流阻特性,实验中将其与水和油这两种常见的冷却介质进行了比较,结果如图 3-1d 所示。值得注意的是,液态金属的流阻变化曲线表现出一个显著特点:随着压强的增加,其流阻趋于稳定。相比之下,水和油的流阻在相同区间内几乎不随流量变化。这一现象归因于液态金属等高粘性流体在高速流动时的剪切变稀效应,即其流阻值会趋近于一个定值。

在相同条件下,硅胶软管内的镓基液态金属的流动阻力约为水的 10 倍。这意味着为了达到相同的流量,镓基液态金属基柔性导线的驱动泵需要输出更大的压强,其需要更高功率的动力源。然而,与目前的高性能泵系统输出能力相比,这种流阻差异并非不难克服。

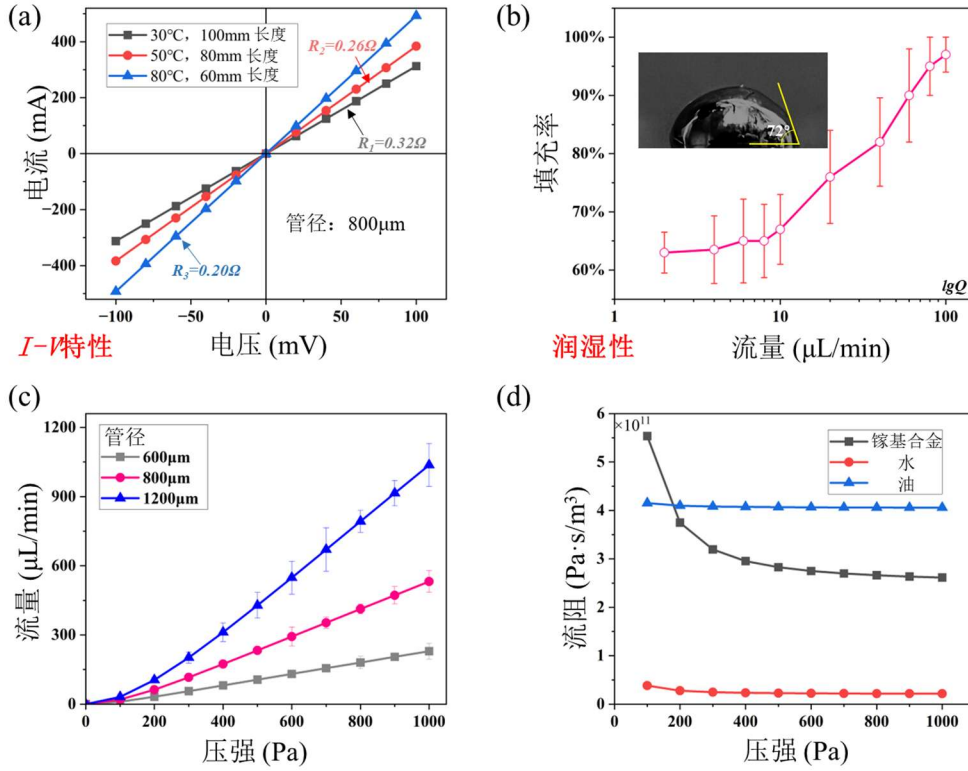


图 3-1 液态金属柔性导线性能研究 (a) 管径为 800μm 的 3 种不同长度 (60mm、80mm 和 100mm) 的液态金属柔性导线在不同温度下的  $I$ - $V$  特性曲线图 (b) 不同流量下液态金属柔性导线填充率变化图 (c) 3 种不同管径 (600μm、800μm 和 1200μm) 的液态金属柔性导线的入口压强与流量关系图 (d) 水、油和液态金属的流阻与入口压强关系图

### 3.3 电流激励环境下液态金属柔性导线的传热规律

电流激励环境下的液态金属柔性导线产生的热量主要为本身产生的焦耳热，而液态金属的流动则将这些热量带走。当液态金属柔性导线被用作热源时，假设忽略柔性导线的散热系数，仅考虑液态金属流动带走的热量。单位时间内液态金属带走液态金属柔性导线的热量为  $J$  (单位: J), 可由公式计算得出:

$$J = I_f^2 R_J l_f / v_J \quad (3-4)$$

其中  $l_f$  为液态金属基柔性导线长度 (单位: m),  $v_J$  为液态金属流速 (单位: m/s),  $I_f$  为电流 (单位: A),  $R_J$  为单位长度液态金属电阻 (单位:  $\Omega$ )。

单位长度液态金属电阻  $R_J$  可由下列计算公式得出:

$$R_J = \eta_J v_J / A_J \quad (3-5)$$

其中  $\eta_J$  为液态金属电阻率 (单位:  $\Omega \cdot m$ ),  $A_J$  为液态金属柔性导线的截面积

(单位:  $\text{m}^2$ )。

根据上述公式, 可以得出液态金属带走热量的计算公式:

$$J = I_J^2 \eta_J l_f / A_J \quad (3-6)$$

从上述公式得出, 除液态金属材料性能和导线长度等固定参数外, 散热功率只与液态金属柔性导线截面积有关。液态金属柔性导线的截面积越小, 其散热功率越高。

根据传热公式:

$$Q = cm_Q \Delta t \quad (3-7)$$

其中  $\Delta t$  为温升 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ),  $c$  为热容 (单位:  $\text{J}/(\text{Kg } ^{\circ}\text{C})$ ),  $m_Q$  为单位时间内的流体质量 (单位:  $\text{Kg}$ )。

进一步分析可知, 镓基液态金属基柔性导线末端的温升  $\Delta t$  计算公式为:

$$\Delta t = I_J^2 \eta_J l_f / c A_J^2 \rho_f v_J \quad (3-8)$$

其中  $\rho_f$  为流体的密度 (单位:  $\text{Kg}/\text{m}^3$ )。

理论公式表明, 液态金属柔性导线的长度方向上存在温度梯度, 其末端为温度最高处, 并且柔性导线温升随着液态金属流速和柔性导线截面的增加均呈现降低趋势。因此, 液态金属柔性导线的管径确定时, 可通过调节液态金属的流速来调控柔性导线的温升。

### 3.4 电流激励环境下液态金属柔性导线的电-热耦合特性

为研究电流激励环境下单根液态金属柔性导线的电-热耦合特性, 实验中选取了一段长度为 200mm 的聚四氟乙烯管 (内径 1.2mm, 外径 1.6mm), 并根据其内径选择了外径为 1.2mm、内径为 0.8mm、长度为 5mm 的不锈钢中空毛细管。聚四氟乙烯管用于承载液态金属, 通过注射工艺将其制成液态金属柔性导线, 并将不锈钢中空毛细管连接在柔性导线的两端, 以实现电-液耦合功能。

为确保实验中电流传输的效率, 根据液态金属柔性导线的电阻值选取了外接铜导线的规格。选取的铜导线具有与液态金属柔性导线相同的截面积, 但适当减少长度, 以匹配液态金属柔性导线的电阻值。通过这种方式, 同截面积的铜导线与液态金属柔性导线的电阻值保持一致, 从而实现了液态金属柔性导线电阻值的精确拟合。

在实验中，液态金属柔性导线的一端通过不锈钢中空毛细管连接到恒流源的正极，另一端的不锈钢中空毛细管则与铜导线相连，铜导线进一步连接到恒流源的负极，从而形成完整的电流回路。实验中使用的恒流源为线性可编程直流电源（型号：优利德 UDP4303S），其输出电流设定为 200mA。该恒流电源具备 4 个独立通道，最大输出功率为 297W，分辨率为 1mV/1 $\mu$ A，如图 3-2a 所示。

液态金属具有金属般的电导率，它的电导率约为  $3\text{-}6\times 10^6\text{S/m}$ ，因此液态金属柔性导线本身的电阻较小，电流激励环境下的液态金属柔性导线产生的焦耳热有限，发热现象并不明显。液态金属柔性导线的电-热耦合处存在接触电阻，这一部分是整个系统电路中电阻最大的区域，也是发热最为显著的位置。为了观察和精确测量这一区域的温度分布，实验选用手持式红外热成像仪（优利德 Uti120S）拍摄温度云图。该设备的测温范围为  $-20\sim 400^\circ\text{C}$ ，红外分辨率高达 1080P，并且具备中心点测温及高低温自动追踪功能，能有效捕捉液态金属柔性导线与铜导线连接处的温度变化，如图 3-2b 所示。



图 3-2 液态金属柔性导线的电-热耦合特性实验设备 (a) 优利德 UDP430S 可编程线性直流电源 (b) 优利德 Uti120S 手持式红外热成像仪

利用优利德 Uti120S 手持式红外热成像仪，对导通 200mA 电流的液态金属柔性导线和铜制导线分别进行温度云图拍摄，图 3-3a 展示了液态金属静止状态下的温度分布情况。此时，电流回路的液态金属柔性导线系统的最高温度点位于电-液耦合处，温度高达  $35.2^\circ\text{C}$ ，而环境温度为  $26.8^\circ\text{C}$ 。因此，该点温度比环境温度高出  $8.4^\circ\text{C}$ ，显示出明显的发热现象。此外，液态金属柔性导线和铜制导线的整体温度均高于环境温度。

当柔性导线内的液态金属以 0.2mL/min 的流量流动并持续一段时间后，液态

金属柔性导线的温度逐渐趋于稳定。此时，再次使用红外热成像仪拍摄柔性导线和铜制导线的温度云图，结果如图 3-3b 所示。图中观察到电-液耦合处的最高温度降至  $30.9^{\circ}\text{C}$ ，仅比环境温度高出  $4.1^{\circ}\text{C}$ 。与液态金属静止状态相比，液态金属柔性导线的电-液耦合处温度显著降低，最高温度降幅达  $4.3^{\circ}\text{C}$ ，即液态金属柔性导线系统的最高温度降低了 12.21%。

通过对比图 3-3a 和图 3-3b 的结果，可以明确看到液态金属的流动有效地带走柔性导线的热量，显著降低了柔性导线的温度。此外，液态金属的流动不仅降低了柔性导线的温度，还对连接柔性导线的铜导线起到了显著的散热作用。这表明液态金属的电质共传系统具有优异的散热能力，能在流动过程中有效带走柔性导线的热量，从而降低整个系统的温度。

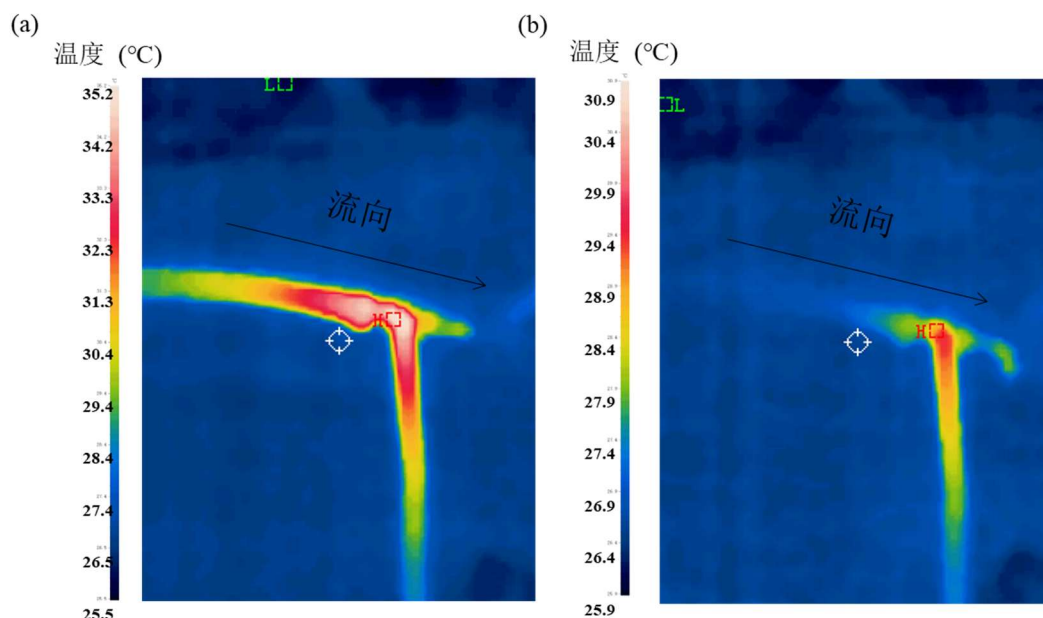


图 3-3 液态金属柔性导线温度云图 (a) 液态金属柔性导线与铜导线的温度云图（液态金属静止状态） (b) 液态金属柔性导线与铜导线的温度云图（液态金属流量： $0.2\text{mL/min}$ ）

为对比液态金属柔性导线在不同状态下的温度变化，实验中沿着液态金属的流动方向，每隔  $1\text{mm}$  选取一个温度测量点。分别测量了液态金属静止状态和以  $0.2\text{mL/min}$  流量流动状态下的温度，结果如图 3-4a 所示。液态金属柔性导线的温度呈现先升高后降低的趋势，这是由于温度最高点位于柔性导线与不锈钢金属中空毛细管的连接处，该处电阻值最大，发热最为显著。连接点之后的界面为不锈钢材质，其散热能力远高于聚四氟乙烯材质，因此温度逐渐降低。当液态金属以  $0.2\text{mL/min}$  的流量流动时，柔性导线的温度显著降低，整根导线的温度分布趋于

平衡，没有明显的温度异常点。这表明液态金属的流动有效地带走柔性导线的热量，实现了良好的散热效果。

为了评估液态金属流动对外接铜制导线温度的影响，实验中沿着铜导线从上到下的方向，每隔 1mm 选取一个温度测量点。分别测量了液态金属静止状态和以 0.2mL/min 流量流动状态下的温度，结果如图 3-4b 所示。图中明显观察到液态金属流动对外接铜制导线温度的影响，液态金属的流动降低了铜导线的温度，但整体温度仍高于液态金属柔性导线，表明铜导线的散热能力低于液态金属柔性导线。

液态金属柔性导线相较于常规固体导线具有显著优势，液态金属的优异流动性能够弥补导线内部产生的空穴，避免断路现象的发生。同时，液态金属的流动使得柔性导线的温度趋于均衡状态，不会产生异常高温点，从而有效提高镓基液态金属柔性导线的散热能力和可靠性。

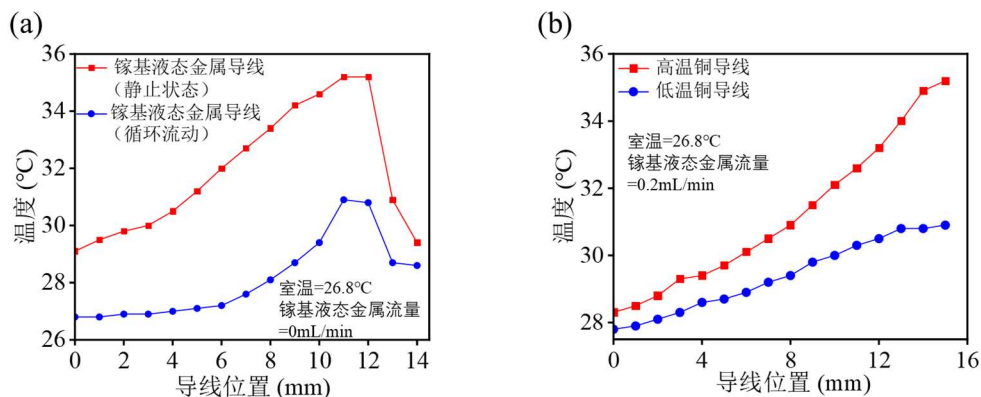


图 3-4 液态金属柔性导线和外接铜导线温度分布位置图 (a) 液态金属柔性导线温度测量点的温度图 (d) 外接铜导线温度测量点的温度图

### 3.5 液态金属柔性导线的应用及其性能

#### 3.5.1 液态金属柔性导线的应用

电机作为一种多物理场的能量转换系统，在将电能转换为机械能的过程中，能量转换效率无法达到 100%。在这一过程中，部分能量会以热量的形式损失，导致电机温度升高。这种温度升高会引起材料老化、退磁以及几何结构的热变形等问题<sup>[58]</sup>，严重时甚至会威胁电机的寿命和运行可靠性。因此，温度控制对于电机的正常运行具有至关重要的意义。

电机的主要组成部分包括定子铁芯、绕组、永磁体和壳体。其中，绕组是主要的热源，其温度通常是最高的<sup>[59]</sup>。绕组产生的热量需要通过热传导传递给定子铁芯和外壳，再通过热对流散发到外界环境中。然而，电机内部空间狭窄且电枢结构紧凑，这使得热量难以及时传递到外部，从而导致电机温度进一步升高。

目前，电机散热系统主要分为四大类：风冷、液冷、蒸发冷却和额外热路增强型散热系统<sup>[60]</sup>，图 3-5 展示了四大类的电机散热系统。液冷散热系统通过在电机内部或外壳部分设置密封的循环通道，使冷却介质在通道内循环流动，从而带走电机产生的热量。这种散热系统在高功率和高热负荷的应用中尤为有效。

电机内部的损耗主要来源于绕组线圈的电阻、磁性材料的磁阻以及电机各部件之间的机械摩擦。具体而言，损耗可以分为绕组损耗、转子铁耗和机械损耗三部分。对于典型的电枢，损耗主要由铁芯处的铁损耗和导线的铜损耗组成。在电机低速旋转时，铁芯内部磁场的交变频率较低，铁损耗可以忽略不计，此时电机发热主要由绕组导线产生。

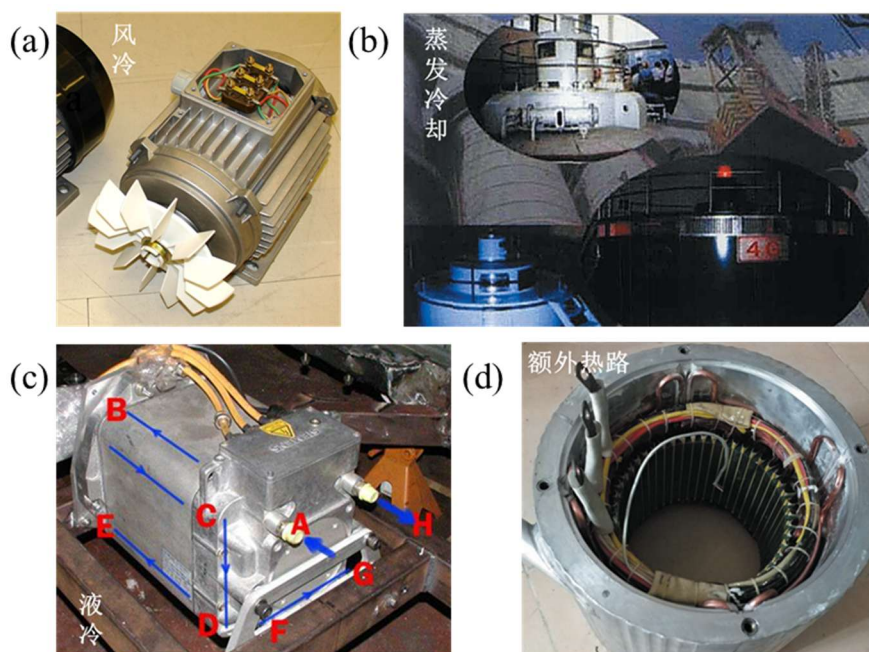


图 3-5 电机四种常见的散热方式<sup>[60]</sup> (a) 电机的风冷散热方式 (b) 电机的蒸发冷却散热方式  
(c) 电机的液冷散热方式 (d) 电机的额外热路散热方式

在生物领域，人体血液循环不仅具有传质（血液）功能，还兼具传能（热能、营养）的特性。类似地，电机的电枢绕组导线可以由液态金属柔性导线替代，液态金属不仅具有传质功能，还兼具传能（热能、电能）的特性。通过液态金属的循环流动，可以有效降低电机温度。这种设计能绕过传统的固液界面传热原理，

实现电质共传，从而提高电机的散热效率。基于液态金属柔性导线的电机热管理系统的构思原理图如图 3-6 所示。



图 3-6 基于液态金属柔性导线的直流无刷电机设计构思图

本章设计一款基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢系统，该系统由三部分组成：液态金属柔性导线、定子铁芯和液滴解耦器。其中，定子铁芯由硅钢片叠压而成，与传统电机和变压器的定子结构相同，构成了电机单个槽的变压器结构。

液态金属柔性导线采用“先缠绕后注射”的方式制备，硅胶软管约束液态金属的路径，同时确保绝缘性。液滴解耦器通过生成液滴，将液态金属从连续相转换为离散相，确保整个 BLDC 电枢电路的稳定断开，并且在液态金属回路连续的情况下实现电路的单向导通。

图 3-7a 展示了由硅胶软管、液滴解耦器、蠕动泵和液态金属组成的循环系统。液态金属柔性导线连接电枢系统的各个组件，液滴解耦器用于液态金属的自然冷却和电枢系统的稳定运行。液滴解耦器中预填充有一定量的液态金属，用于补充液态金属循环流动导致的柔性导线内的气泡和空穴。

BLDC 通过三相电驱动，不同绕组间采用多端口连接器连接，蠕动泵驱动液态金属循环。电枢绕组内的液态金属柔性导线与外接循环系统的柔性导线之间采用不锈钢金属中空毛细管连接，并使用胶水密封间隙以避免泄露问题。BLDC 电枢系统的运行原理如图 3-7b 所示。蠕动泵驱动液态金属在 BLDC 电枢绕组系统的管道内流动，液滴解耦器冷却液态金属，并将液态金属从连续相转换为离散相，实现流场连续和电场断开。

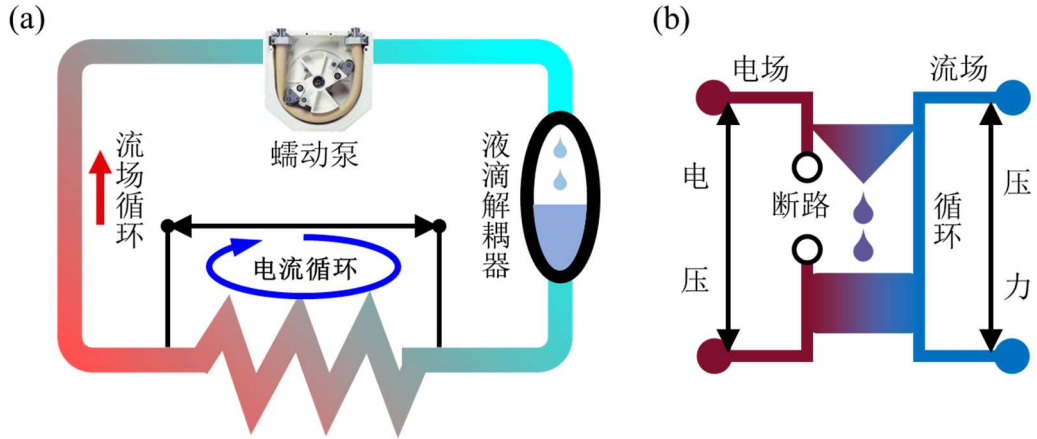


图 3-7 基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢系统设计 (a) 基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢结构示意图 (b) 基于液态金属柔性导线的 BLDC 系统运行原理图

BLDC 电枢的连接方式主要包括三角形连接和星形连接，这两种连接方式在电气性能和应用场景上各有特点。在三角形连接中，BLDC 电枢的三个绕组相互连接形成一个闭合三角形，每个绕组连接在电源的两相之间，直接承受线间电压。这种连接方式的优点是能够承受更高的电压，从而在高电压应用中具有优势，图 3-8a 展示了 BLDC 电枢的三角形接法。星形连接中，三个绕组的一端连接在一起形成一个中性点，另一端分别连接到电源的三相上。在这种连接方式下，每个绕组承受的电压约为线间电压的 0.86 倍，显著降低了绕组的电压应力。BLDC 电枢的星形接法需要一个端口连接器将电枢绕组连接起来，本章选择了边四通连接器，该连接器为 BLDC 电枢星形接法的一个中性点。图 3-8b 展示了 BLDC 电枢的星形接法和连接三个绕组的边四通连接器。

BLDC 电机的驱动策略对其性能和效率有重要影响。方波驱动是 BLDC 电机的经典驱动方式之一，通过三相六步换相法实现。在方波驱动下，星形连接的 BLDC 电枢能够有效减少环流损耗，提高系统效率。此外，方波驱动的控制策略相对简单，易于实现，适用于多种应用场景。星形连接中的三次谐波电动势可以相互抵消，从而减少额外损耗。这种连接方式通常具有较低的转矩波纹和较高的性能，适用于对效率和转矩质量要求较高的应用场景，故本章的液态金属柔性导线应用于 BLDC 电枢的连接方式为星形接法，并采用方波驱动。

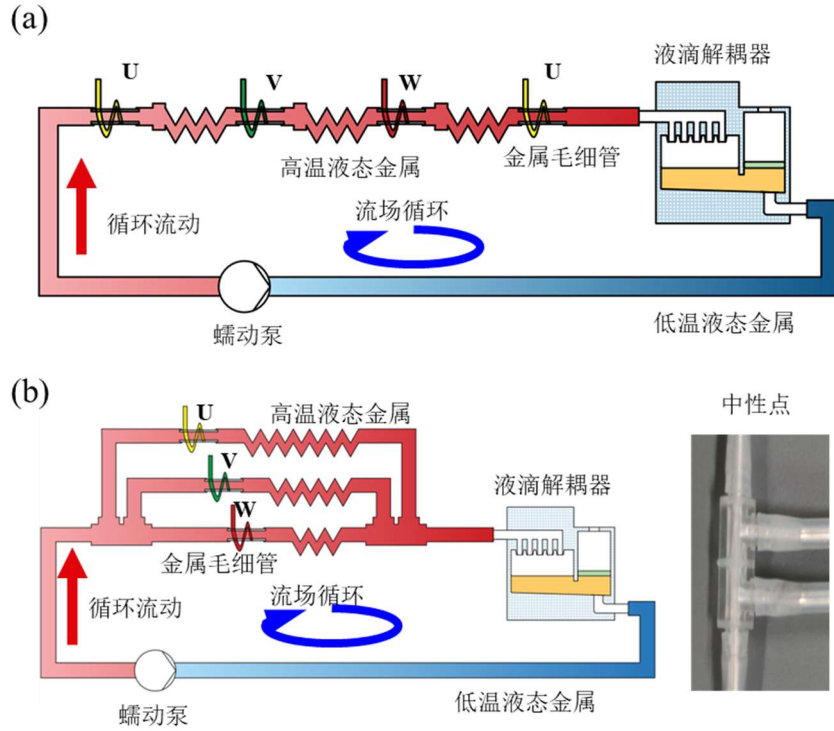


图 3-8 基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢连接图 (a) 基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢三角形接法 (b) 基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢星形接法

BLDC 电枢的三角形接法和星形接法虽然在绕组连接上有所不同，但其基本原理相同，主要区别在于电枢定子槽绕组的液态金属柔性导线的缠绕方式。本章将重点讨论 BLDC 电枢的星形连接方式及其制备方法。

液态金属因其优异的流动性，成为制备 BLDC 电枢的理想材料。在制备过程中，采用“先绕制后注射”的方法，即先将硅胶软管缠绕在定子槽上，再通过注射工艺将液态金属注入软管内。然而，在绕组绕制过程中，硅胶软管在定子槽端部容易产生较大的弯曲幅度，这可能导致硅胶软管内堵塞和局部流阻突变。为避免这些问题，需在绕制过程中向管内引入气流，以产生一定的恢复力，从而保证液态金属在 BLDC 电枢绕组内的顺畅流动，并降低硅胶软管的流动阻力。

BLDC 星形连接方式的电枢绕组搭建过程：

- (1) 硅胶软管按照星形连接方式缠绕在电枢定子绕组中，绕制期间避免管道产生较大的弯曲幅度。
- (2) BLDC 电枢绕组内的液态金属柔性导线分别与不锈钢金属中空毛细管连接，两者之间的间隙使用胶水进行密封，电流与液态金属在该交汇处实现耦合。
- (3) 边四通的多端口连接器将 BLDC 电枢的 3 个绕组的液态金属柔性导线

进行并联连接，BLDC 电枢绕组内液态金属能通过多端口连接器相互顺畅流通，并且该点为中性点。

(4) 四通道的多端口连接器的一个端口与蠕动泵的管道连接，驱动液态金属在电枢系统中循环流动。

(5) 另一个四通道的多端口连接器的一个端口与液滴解耦器连接，实现流自然冷却和电-液解耦。

(6) BLDC 电枢的绕组内注射液态金属，确保电枢绕组的硅胶软管内充满液态金属。

在本章设计的 BLDC 电枢系统中，采用了一种四通道的多端口连接器，具体为边四通软管接头。该接头由聚丙烯材质制成，具有良好的耐温性能，适用温度范围为 $-10^{\circ}\text{C}$ 至 $120^{\circ}\text{C}$ 。其具体规格如图 3-9a 所示：总长度为 34mm，管道端口的外径为 2.4mm，内径为 1.3mm。这种多端口连接器的设计能够有效满足液态金属柔性导线的连接需求，确保系统的稳定运行。

蠕动泵作为一种容积泵，其工作原理是通过周期性地挤压软管来输送流体。在输送过程中，流体仅与软管内壁接触，而不与泵的其他部件接触，从而避免了流体的污染。这一特性使得蠕动泵在医药、化工、食品和环保等领域得到了广泛应用。本章选用的蠕动泵型号为 104KA/ZL（杰恒，重庆），其最大输入电压为 24V，最大输入功率为 24W，能够输出的最大压力为 1700Pa。图 3-9b 展示了该蠕动泵的实物图。通过选用上述多端口连接器和蠕动泵，本章设计的 BLDC 电枢系统能够在确保液态金属循环流动的同时，维持系统的高效运行和稳定性。

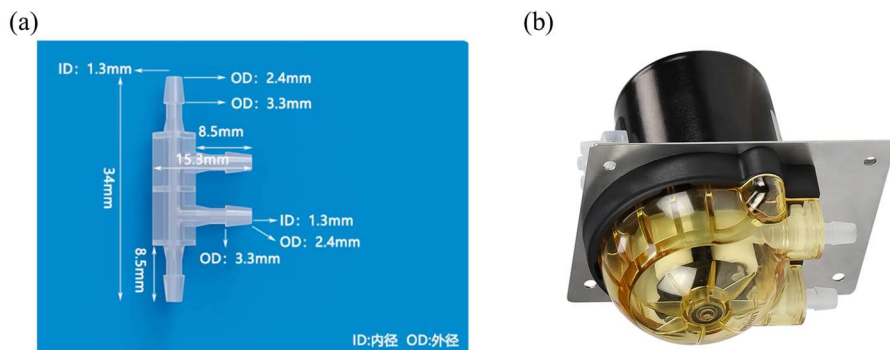


图 3-9 构建实验平台设备图 (a) 边四通多端口连接器 (b) 蠕动泵实物图

基于液态金属柔性导线的星形连接 BLDC 系统及实验平台如图 3-10a 所示。系统中使用的硅胶软管内径为 1.4mm，外径为 2.4mm，具备优异的拉伸性能，能

与外径为 2.4mm 的多端口连接器形成紧密连接。PTFE 管的内径为 1.2mm，外径为 1.6mm，能与硅胶软管以及外径为 1.2mm 的不锈钢中空毛细管形成紧密连接。

根据 BLDC 电机在实际应用中的铜损特性，该电枢绕组通过直流及无位置传感方式驱动。在这种驱动方式下，液态金属柔性导线的散热功率和温升与电枢系统内的电流变化无关，仅与柔性导线自身的属性相关。在星形连接的 BLDC 电枢系统中，电枢系统的三个绕组出口端的聚四氟乙烯管道均缠绕成螺旋状。聚四氟乙烯螺旋管道的电阻值近似于 BLDC 电枢绕组的电阻值。在后续分析中，假设聚四氟乙烯螺旋管道的电阻与 BLDC 电枢绕组电阻相等，如图 3-10b 所示为 BLDC 电枢系统的简化电路。

在该简化电路中，BLDC 电枢绕组会产生感应电动势，因此将其简化为电源和电阻的串联解耦。聚四氟乙烯螺旋管道则简化为纯电阻结构。这种简化模型有助于分析液态金属柔性导线在 BLDC 系统中的散热和电-热耦合特性。

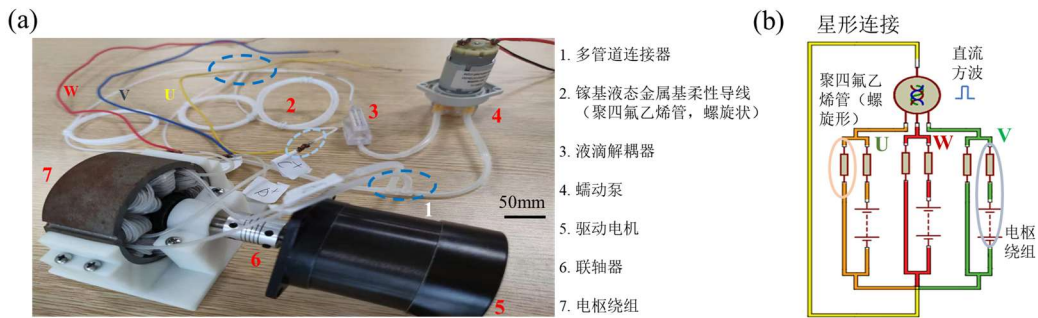


图 3-10 星形连接的 BLDC 电枢的实验平台 (a) BLDC 星形连接的电枢系统实验台 (b)

BLDC 星形连接电枢系统的等效电路

### 3.5.2 BLDC 星形连接的电枢系统性能

BLDC 的主要热源为电枢绕组。基于液态金属柔性导线的 BLDC 系统中，热量主要来源于柔性导线的电流损耗。当柔性导线导通电流时，电机损耗转化为热量，导致整个 BLDC 电枢系统的温度升高。

图 3-11a 展示了液态金属静止状态下的 BLDC 电枢系统的温度云图。此时环境温度为 26.8℃，而电枢系统的最高温度达到 54.9℃，比环境温度高出 28.1℃，温度升高幅度高达 104.85%。这表明在液态金属静止时，BLDC 电枢系统的散热能力不足，导致显著的温升。

为了改善散热效果，BLDC 电枢系统的蠕动泵以 0.8mL/min 的流量驱动液态

金属循环流动。循环流动的液态金属能有效带走柔性导线产生的热量。图 3-11b 展示了液态金属以 0.8mL/min 流量循环时的 BLDC 电枢系统的温度云图。此时环境温度仍为 26.8℃，但电枢系统的最高温度降至 50.9℃，比液态金属静止状态下的最高温度降低了 4℃，降幅为 7.3%。此外，电枢系统温度云图中左部的高温区域得到了明显缓解。

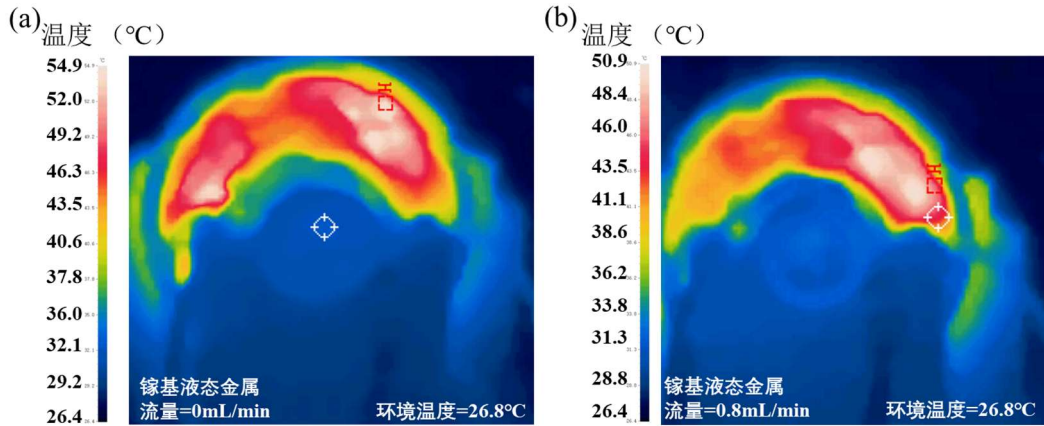


图 3-11 星形连接 BLDC 电枢系统的温度云图 (a) BLDC 星形连接的电枢系统温度云图（液态金属静止） (b) BLDC 星形连接的电枢系统温度云图（液态金属流量：0.8mL/min）

因此基于液态金属柔性导线制备的 BLDC 电枢系统在液态金属循环流动时表现出显著的温降效果。表明液态金属的循环流动能够有效改善系统的散热性能，降低电枢系统的温度，从而提高电机的运行效率和可靠性。

在理想情况下，BLDC 电枢的定子槽和硅胶软管的尺寸规格一致，电枢绕组的各定子槽绕制方式应完全相同，从而确保各个绕组的流阻和电阻分布均匀，电枢绕组的温度分布也应一致。然而，在实际应用中，BLDC 电枢系统的温度云图显示温度分布并不均匀。这种不均匀性可能源于实际绕制过程中的人为因素。具体而言，人工绕制电枢绕组可能会改变导线流阻的均匀分布，导致局部流阻增加。此外，为了避免弯折硅胶软管，绕制过程中可能会导致硅胶软管重叠，从而在温度云图中显示出局部高温区域。

液态金属循环流动状态下的 BLDC 电枢绕组的温度云图也显示出不同的温降效果。这可能是由于边四通多端口连接器的结构导致各个绕组之间存在流量差异。图 3-12a 展示了边四通多端口连接器的流速分布情况，其中 A 端口为液态金属的输入口，其余端口为输出口。在该结构中，B 端口的流速最高，而 D 端口的流速最低。理论上，B 端口连接的电枢绕组的散热功率应最大，但这一流速分布

并未考虑电枢绕组的流阻分布。因此 BLDC 电枢绕组系统的温度分布不均的主要原因是人工绕制电枢绕组导致的流阻分布不均。尽管如此，液态金属的循环流动仍能显著降低电枢温度。液态金属柔性导线在高温要求且散热困难的场合，尤其是需要高导热率和高机械强度的场合，展现出巨大的应用潜力。

液态金属的循环流动能够显著降低 BLDC 电枢系统的温度。根据焦耳热下的液态金属柔性导线电质共传的传热规律，液态金属流量是调控 BLDC 电枢系统温降的关键参数。液态金属柔性导线的流量与其两端的压强差密切相关。在柔性导线的尾端为开路状态下，其两端的压强差等于入口压强。

蠕动泵施加的入口压强对液态金属流量和系统稳定性有重要影响。如果施加的入口压强过小，液态金属在柔性导线内的流量将较小，导致柔性导线的散热功率较低。相反，如果施加的压强过大，会增大液态金属柔性导线内部的压力，对柔性导线与不锈钢中空毛细管之间的胶水密封产生负面影响，可能导致液态金属泄漏。严重时，还可能造成 BLDC 电枢系统连接处断裂，甚至导致多管道液滴解耦器的电-液解耦功能失效。

为研究液态金属流量与入口压强的关系，实验选取了一段与电枢支路绕组液态金属柔性导线长度相同的同规格硅胶软管，模拟 BLDC 电枢绕组的流阻。然而，电枢支路绕组的柔性导线长度过长，导致流阻过大，液态金属流量难以直接观测。因此，实验通过适当减小管道长度，并采用流阻比例放大的方法来观测液态金属流量的变化。蠕动泵在 600 $\mu\text{m}$ 、800 $\mu\text{m}$  和 1200 $\mu\text{m}$  管径的管道入口施加不同压强，并测量硅胶软管出口端的液态金属流量。图 3-12b 展示了液态金属柔性导线入口压强与出口流量之间的关系。

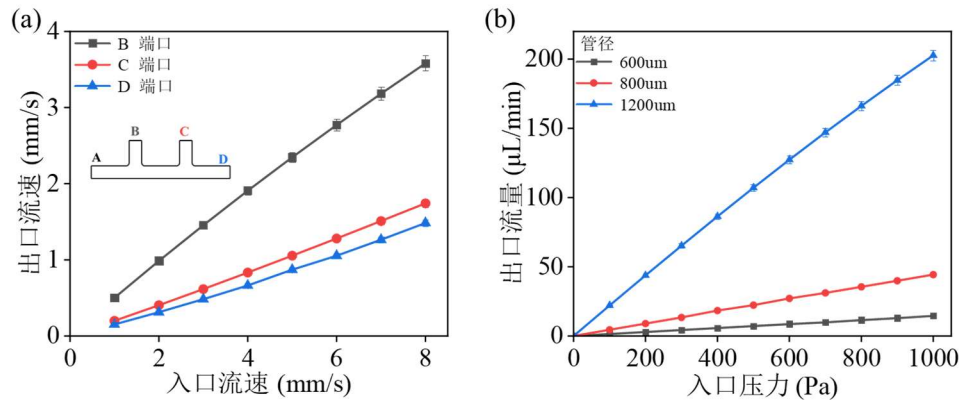


图 3-12 BLDC 电枢系统的硅胶软管的性能分析 (a) 边四通多端口连接器流速分布图

(b) BLDC 电枢支路绕组的入口压强与出口流量关系图

实验结果表明,柔性导线的出口流量与入口压强之间呈现线性关系。在相同入口压强下,管径越小的管道,其出口流量越小。随着管道入口压强的增大,管道出口的液态金属流量也相应增大。

BLDC 的转子旋转会切割磁感线,从而产生与施加在 BLDC 电枢上的电势方向相反的感应电动势。这种感应电动势的大小与 BLDC 的转速密切相关,不同转速下产生的感应电动势也不同。基于液态金属柔性导线的 BLDC 通过柔性联轴器与驱动电机相连,驱动电机由单片机系统控制,以不同转速带动 BLDC 转子旋转。柔性联轴器能够吸收传动系统中的冲击能量,有效减少传动过程中的振动,使传动更加平稳,并降低噪声。

图 3-13a 展示了 BLDC 电枢在不同转速下的感应电动势。随着驱动电机转速的增大, BLDC 电枢产生的感应电动势也相应增大,且感应电动势与驱动电机的转速成正比关系。电机电动势的计算公式为  $E=K_e w_e+E_a$  (其中  $E$  为电机两端电压,单位: mV;  $K_e$  为感应电动势常数,单位: (min·mV)/r,  $w_e$  为电机转速,单位: r/min;  $E_a$  为电枢电动势,单位: mV), 实验中测得的感应电动势常数  $K_e=0.217(\text{min} \cdot \text{mV})/\text{r}$ 。电机转子旋转时切割磁感线产生的感应电动势会阻碍电机的转动,导致电机内部电流减小。最终,电机电枢内部的电流趋近于一个定值,并且电机转速会稳定在一定范围内。

图 3-13b 展示了 BLDC 电枢绕组电流与电枢感应电动势之间的关系。由于 BLDC 内部存在摩擦和电机损耗,即便在没有外部负载的情况下, BLDC 电枢绕组仍会有电流产生旋转力矩以维持电机运行。因此,在 BLDC 转子稳定转速的情况下,其内部电流也不会为零。

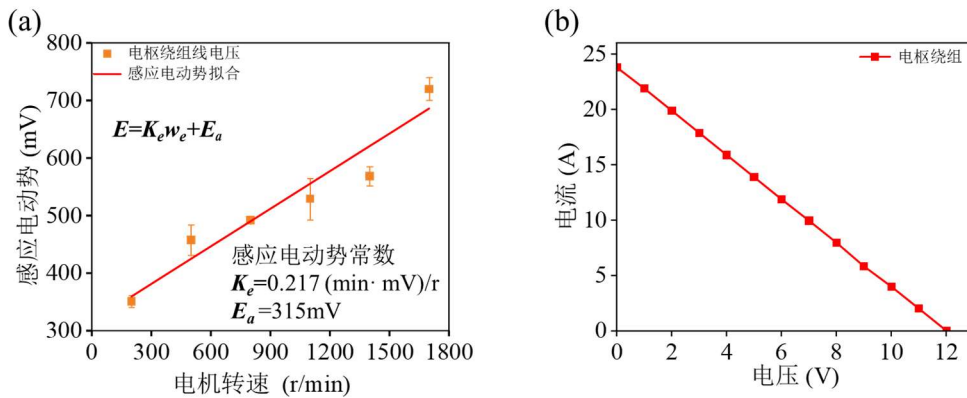


图 3-13 BLDC 电枢的性能分析 (a) BLDC 在不同转速下的感应电动势变化图 (b) BLDC 电枢绕组感应电动势与电枢电流关系图

### 3.6 本章小结

本章以液态金属柔性导线为例,研究了电流激励环境下的液态金属电质共传行为的电-热耦合特性,并评估基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢系统在液态金属电质共传行为下的散热性能。

研究结果表明,液态金属柔性导线具有优异的散热性能。当液态金属以 0.2mL/min 的流量流动时,液态金属柔性导线的最高温度从 35.2°C降低到 30.9°C,温度降低了 4.3°C,最高温度的降幅高达 12%。基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢系统进一步验证了其散热能力。在该系统中,液态金属以 0.8mL/min 的流量循环流动,BLDC 电枢系统的最高温度从 54.9°C降低到 50.9°C,温度降低了 4°C,最高温度的降幅为 7.3%。这些结果表明,焦耳热下的液态金属电质共传行为不仅绕过了固液界面传热环节,还显著提高了散热效率。

液态金属柔性导线在电机热管理领域展现出巨大的应用潜力。通过制备液态金属柔性导线循环系统,可以有效降低电机运行温度,提高电机的运行效率和可靠性。此外,这种基于液态金属柔性导线的散热技术有望拓展到生物电极等领域,为后续相关散热技术的发展提供新的思路和方法。

## 第 4 章 热流激励环境的镓基液态金属电-热耦合特性研究

### 4.1 引言

在上一章中,以液态金属柔性导线为例,研究了电流激励环境下液态金属电质共传行为的电-热耦合特性及应用。本章将研究焦点转向具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器,探讨其在外界热流激励温度场下的电-热耦合特性及应用场景。通过这一研究,旨在进一步拓展液态金属电质共传行为在柔性电子器件中的应用潜力。

在本章中,介绍了具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的制备过程和传感原理。本章还研究该柔性压力传感器在多模态耦合条件下的性能表现,最后阐述其不同应用场景中的潜在价值。

### 4.2 具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的制备

近年来,柔性传感技术在个性化健康检测<sup>[61]</sup>、人机交互<sup>[62]</sup>、可穿戴设备<sup>[63]</sup>和软体机器人<sup>[64]</sup>等领域具有广阔的应用前景。柔性压力传感器能安装在曲面上并收集信号,成为柔性传感领域的研究热点之一。柔性压力传感机制主要基于电容式<sup>[65]</sup>、电阻式<sup>[66]</sup>、压电式<sup>[67]</sup>和摩擦电式<sup>[68]</sup>,以及少见的电感式<sup>[69]</sup>。其中电阻式传感器通常由活性材料、电极和柔性基板组成的三明治夹层结构。液态金属凭借出色的导电性、形变能力和优异的生物兼容性,能响应外界压力变化,在柔性传感领域得到广泛应用。

本章设计一款基于电阻式传感机制的柔性压力传感器,其核心部件为液态金属对流式敏感层。该传感器通过内部微流道结构的形变,将外力刺激转化为电阻信号变化,从而实现压力检测。然而,柔性压力传感器内部的微流道需要满足微型尺寸、可变形性和透明性等要求,这使得常见的 3D 打印技术难以满足其制备需求。因此,本章采用模具制备方法来实现柔性压力传感器的制造。

模具的制备利用了 CNC 加工平台(台群精机 T-V856S 线轨型立式加工中心,深圳市,广东省),其表面粗糙度( $Ra$ )可达  $1.5\mu\text{m}$  至  $3.2\mu\text{m}$ ,材质为铝合金,如图 4-1 所示。铝合金模具相较于 3D 打印制备的聚丙烯模具,在热固化过程中具有更高的热稳定性、不易变形且温度分布均匀等优势。此外,铝合金模具能够

进行多次微流道部分的制备，展现出优异的耐用性。

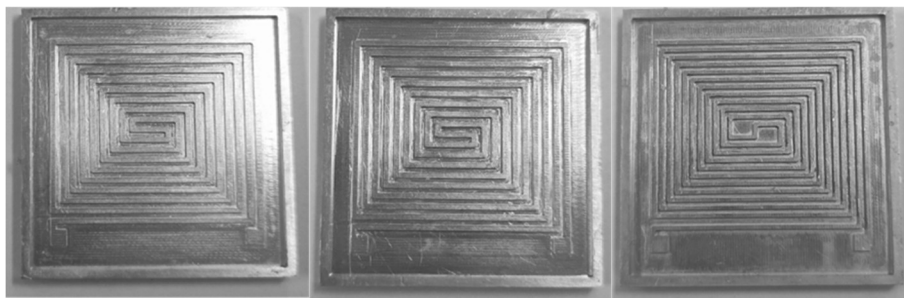


图 4-1 铝合金金属模具实物图

柔性压力传感器的微流道部分通过模具制备，并采用热键合方式与基底部件连接。在制备具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器时，全透明双组分液态硅橡胶（普斯顿高透明 AB 胶，0 度，东莞市，广东省）作为传感器的结构组分。这种液态硅橡胶的 A、B 组分按照 1:1 的质量比混合后，通过交联和催化反应实现固化。固化后的透明硅橡胶具有高弹性、透明度高且成本低廉等优点，已成为柔性压力传感器结构组分的理想选择之一。

在硅橡胶混合过程中，液态硅橡胶的 A、B 组分需要充分混合以确保均匀性。传统的玻璃棒搅拌方法不仅混合效率低，还容易引入大量气泡。因此，本研究采用双中心混合机（DAC150R，上海钧直进出口有限公司，上海市）进行混合。该混合机是一种无叶片混合器，通过结合相反的离心力实现高效的混合过程，并且能够在混合过程中实现几乎 100%的脱气，从而获得无气泡的混合物，节省了额外的脱气步骤。混合后的液态硅橡胶需要静置一段时间以完成固化。由于室温下固化时间较长，本研究将混合后的硅橡胶置于高温环境中以缩短固化时间。固化设备采用真空干燥箱（DZF-6012 型，上海一恒科学仪器有限公司，上海市），该设备配备微电脑温度控制器，控温精确可靠，与传统真空箱相比，干燥时间减少了 40%以上。相关仪器设备如图 4-2 所示。

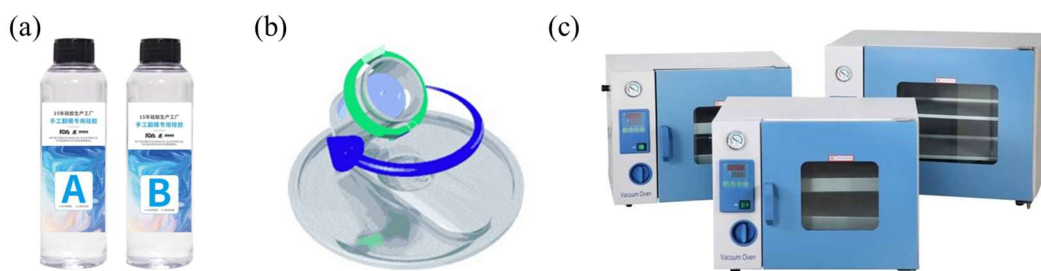


图 4-2 柔性压力传感器制造设备 (a) 双组分液态硅橡胶 (b) 双中心混合机 (c) 真空干燥箱

图 4-3 展示了模具法制备具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的流程<sup>[70]</sup>。

(1) 按照 1: 1 的质量比, 将 A、B 胶放置到双中心混合机的小瓶中, 并将转速设置为 1500r/min、3000r/min 和 4500r/min, 各旋转 1 分钟, 使全透明硅橡胶的双组分充分混合。

(2) 铝合金模具表面喷涂脱模剂, 将混合均匀的液态硅橡胶倾倒至铝合金模具中, 并放置在真空干燥箱的 $-3 \times 10^3 \text{ kPa}$ 环境中进行消泡处理, 持续时间为 2~3 分钟, 次数 1-3 次, 保证铝合金模具内的液态硅橡胶中不存在气泡。刮平铝合金模具内的消泡的液态硅橡胶, 确保制备微流道部分的尺寸准确, 并将其放入 80°C 的真空干燥箱中固化 2 小时, 然后进行脱模工作。

(3) 按照相同步骤制备液态硅橡胶, 将其涂覆在已喷涂脱模剂的玻璃片上, 并静置玻璃片, 玻璃片上的硅橡胶自流平。然后, 将已自流平的玻璃片放置于 80°C 的真空干燥箱中加热 5~7 分钟进行半固化。半固化过程中, 尤其需要严格控制加热时间, 使用镊子轻轻触碰硅橡胶判断是否达到合适的粘附状态 (镊子轻微粘附起硅橡胶, 而不在表面留下残留物)。随后, 将制备的微流道部分与半固化盖板粘合, 在 80°C 的真空干燥箱中加热 2 小时, 保证两者之间完全粘合。

(4) 微流道部分与盖板粘合固化后, 切割所需尺寸规格的柔性压力传感器。柔性压力传感器的入口、出口端插入不锈钢金属毛细管 (外径 0.63mm, 内径 0.39mm, 长度 25mm), 并在连接处使用透明的密封胶密封, 避免产生泄露。

(5) 最后, 用注射器给具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的微流道注射液态金属, 并将其连接到外部的液态金属循环系统, 至此完成柔性压力传感器的制备。

在柔性压力传感器的微流道被注射液态金属过程中, 液态金属不可避免地会接触到空气。液态金属具有较高的化学活性, 容易被氧化。氧化后的液态金属表面会形成氧化物薄膜, 导致其粘度、导热性和电导率等物理性质发生显著变化。因此, 为了确保柔性压力传感器的性能稳定, 需要使用具有抗氧化能力的镓基液态金属。

本研究中, 采用  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  作为抗氧化剂。 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  具有良好的抗氧化能力, 能在惰性气体保护环境下与液态金属充分混合。通过将粉末状的  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  以合适的

配比与液态金属混合， $C_6H_8O_6$  的还原性能够赋予液态金属一定的抗氧化性能，从而在注射过程中减少氧化反应的发生。这一处理方法有效避免液态金属在注射过程中因氧化而引起的物理和化学性质变化，确保了柔性压力传感器的性能稳定。

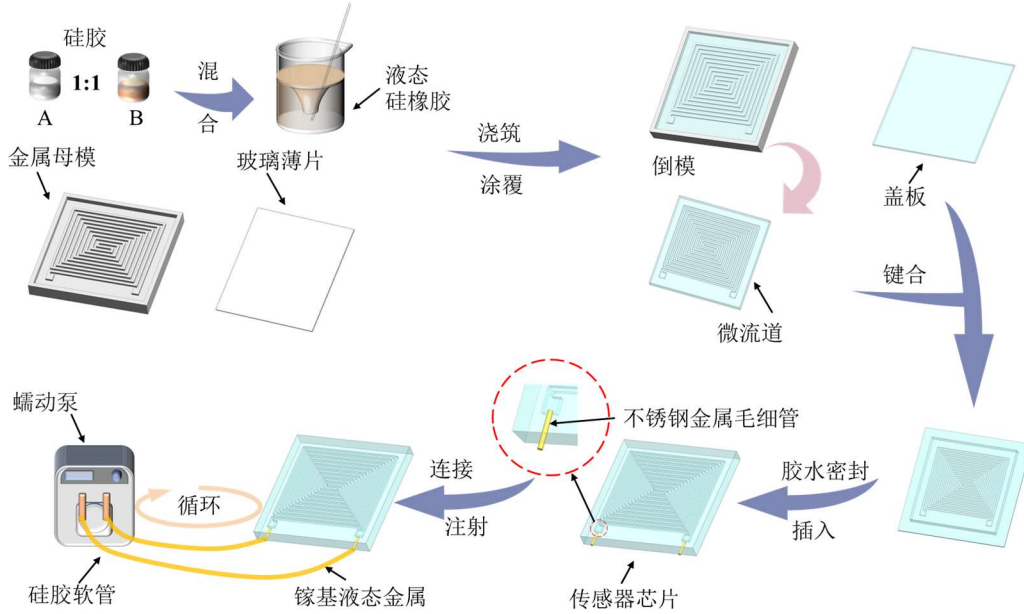


图 4-3 具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的模具法制备流程

### 4.3 柔性压力传感器的传感原理

具有液态金属对流式敏感层柔性压力传感器导电组分为共晶镓基合金，室温环境呈现液态；结构组分为柔性硅橡胶，具备高可拉伸性和变形性等特性。电阻公式为  $R=\rho L/s$  (其中  $R$  是电阻，单位： $\Omega$ ； $\rho$  是电阻率，单位： $\Omega \cdot m$ ； $L$  为导电组分的长度，单位： $m$ ； $s$  为截面积，单位： $m^2$ )，柔性压力传感器电阻与导电组分形状相关。压力通过传感器表面传导给内部的微流道结构，传感器通过微流道形变将力刺激转换为电阻信号变化。图 4-4a 的嵌入式微流道柔性弹性体长度为  $L_l$ ，宽度为  $a$ ，内部的微流道宽度为  $w$ ，高度为  $h$ ，并且顶面于弹性体表面的距离为  $z$  (壁厚  $z$ )，弹性体上表面的压力为  $F$ ，微流道宽度从左到右的距离为  $l$ 。假设压力  $F$  在柔性传感器上表面产生均匀分布压强  $P$ ，均匀分布压强  $P$  通过  $P=F/(L_l a)$  (其中： $P$  的单位： $Pa$ ； $F$  的单位： $N$ ； $L_l$  的单位： $m$ ， $a$  的单位： $m$ )求得。本章节采用 COMSOL Multiphysics 5.6 仿真软件进行数值模拟，嵌入式微流道柔性弹性体 (图 4-4b) 的高度形变量大于宽度形变量，因此着重研究柔性压力传感器内部的微流道高度形变量。

假设该橡胶弹性体为理想弹性体，卸载压力后不会产生残余形变。小变形情况下，微流道高度形变量分为 2 个部分，分别为垂直位移量和向下弯曲形变量。根据 Yong-Lae Park 的研究<sup>[71]</sup>、断裂力学和接触力学理论<sup>[72]</sup>，微流道可视为传感器内部的微裂纹。承受均匀法向应力微裂纹的高度会产生形变，其张开位移为 $\Delta h$ 。根据线弹性断裂力学（*LFFM*）的公式求得：

$$\Delta h = 2(1 - \nu_p^2)w\partial_z/E \quad (4-1)$$

其中 $\Delta h$  为微裂纹的张开位移量（单位：m）， $\nu_p$  为传感器柔性材料的泊松比， $w$  为传感器内部的微流道宽度（单位：m）， $\partial_z$  为沿  $Z$  轴方向施加的应力（法向应力，单位：Pa）， $E$  为传感器柔性材料（柔性弹性体）的弹性模量（单位：Pa）。

微流道尺寸远小于传感器尺寸，其对应力分布的影响可忽略不计。传感器内部的微流道附近接触应力近似为 $\partial_z = -P$ 。

$$\Delta h = -2(1 - \nu_p^2)wP/E \quad (4-2)$$

微流道高度形变量的垂直位移导致的横截面积的变化值 $\Delta S_1$ （单位： $\text{m}^2$ ）为：

$$\Delta S_1 = |w\Delta h| = 2(1 - \nu_p^2)w^2P/E \quad (4-3)$$

微流道高度形变量中的垂直位移与微流道宽度、接触应力和材料泊松比成正比，适当增加微流道宽度可以增大垂直位移引起的截面积变化。微流道高度形变量的向下弯曲量可简化为长  $w$ 、均匀分布载荷  $P$  简支梁的向下弯曲量，微流道上表面沿着宽度  $l$  的方向上的向下弯曲量  $h(l)$  用均匀分布载荷  $P$  简支梁挠度公式：

$$h(l) = \frac{P}{2EI} \left( \frac{l^4}{12} - \frac{wl^3}{6} - \frac{w^3l}{12} \right) \quad (0 \leq l \leq w) \quad (4-4)$$

其中  $l$  为微流道到起始端宽度（单位：m）， $EI$  为微流道上表面的弯曲刚度（单位： $\text{Pa} \cdot \text{m}^3$ ）。

微流道高度形变量的向下弯曲位移导致横截面积的变化值 $\Delta S_2$ （单位： $\text{m}^2$ ），积分公式求得：

$$\Delta S_2 = \int_0^a h(l)dl = \int_0^a \frac{P}{2E} \left( \frac{l^4}{12} - \frac{wl^3}{6} - \frac{w^3l}{12} \right) dl = \frac{Pw^5}{120EI} \quad (4-5)$$

微流道高度形变量中的向下弯曲变形量与微流道宽度和接触应力成正比，适当增大微流道宽度可以增大向下弯曲位移引起的截面积变化。微流道高度形变位移引起截面变化总量 $\Delta S$ （单位： $\text{m}^2$ ）、电阻变化量 $\Delta R$ （单位： $\Omega$ ）求得：

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{2(1-\nu_p^2)w^2P}{E} + \frac{Pw^5}{120EI} \quad (4-6)$$

$$\Delta R = |R - R_0| = \rho L \left( \frac{1}{S - \Delta S} - \frac{1}{S} \right) = \rho L \left( \frac{1}{wh - \Delta S} - \frac{1}{wh} \right) = \rho L \left( \frac{\Delta S}{(wh - \Delta S)wh} \right) \quad (4-7)$$

微流道高度形变位移引起截面变化量 $\Delta S$  相对于初始横截面积  $S$  可以忽略, 简化公式。

$$\Delta R = \rho L \frac{\Delta S}{w^2 h^2} = \rho L \frac{\frac{2(1-\nu_p^2)P}{E} + \frac{Pw^3}{120EI}}{h^2} \quad (4-8)$$

柔性压力传感器结构组分的弹性模量 ( $E$ )、泊松比 ( $\nu_p$ )、上表面的弯曲刚度 ( $EI$ ) 和导电组分的电阻率 ( $\rho$ ) 不变, 柔性压力传感器电阻变化只与微流道尺寸相关。传感器电阻变化( $\Delta R$ )与均匀分布载荷 ( $P$ )、微流道宽度 ( $w$ ) 和微流道长度 ( $L$ ) 成正比, 与微流道的高度 ( $h$ ) 成反比。柔性压力传感器主要为柔性基底-液态金属敏感层-微流道结构的“三明治”结构。图 4-4c 中的柔性压力传感器的敏感层结构为蛇形结构, 在固定尺寸的弹性体内嵌入更长的导电组分, 在外界力刺激下, 柔性压力传感器的电阻响应变化更明显。

图 4-4d 展示了具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器实物图。其中, 中间银白色部分为液态金属, 液态金属沿着微流道结构呈现出“回”形分布。柔性硅橡胶部分中没有气泡, 并且微流道和基底部分保持透明状态, 能提高传感器的光学性能和可靠性。

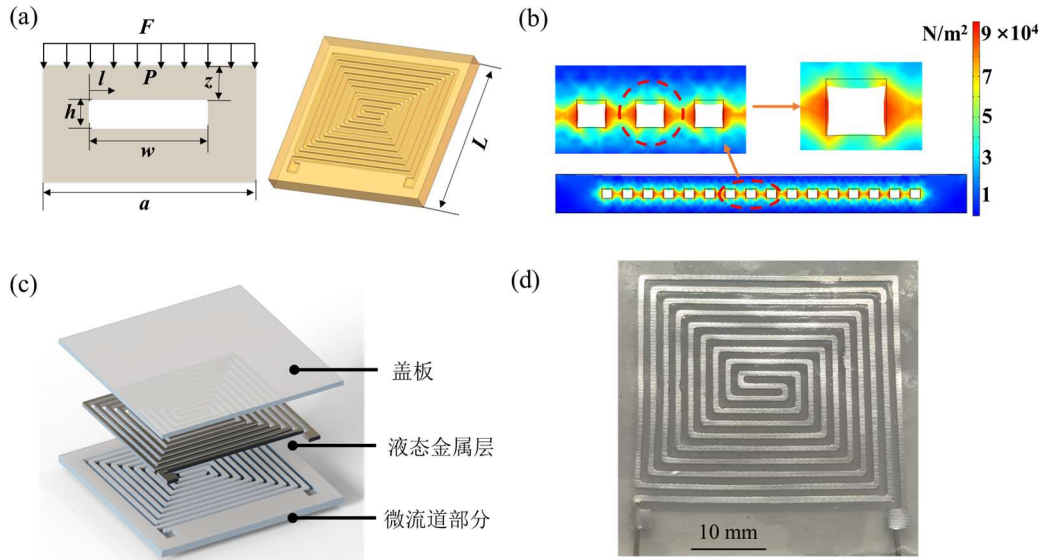


图 4-4 柔性压力传感器的结构设计 (a) 柔性压力传感器剖面结构简图 (b) 柔性压力传感器受压状态下的微流道形变图 (c) 柔性压力传感器的“三明治”结构图 (d) 柔性压力传感器 (微流道尺寸为  $800\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ ) 的实物图

本章设计了三种不同微流道规格的柔性压力传感器。图 4-4d 展示了一种微

流道宽度为  $800\mu\text{m}$ 、高度为  $600\mu\text{m}$  的柔性压力传感器,其长度和宽度均为  $40\text{mm}$ ,图 4-5 详细展示了这些柔性压力传感器的具体规格。图 4-5a 展示了微流道宽度为  $800\mu\text{m}$  的两种柔性压力传感器的尺寸结构。左侧的传感器微流道高度为  $600\mu\text{m}$ ,而右侧的传感器微流道高度为  $800\mu\text{m}$ 。此外,图 4-5b 展示了微流道宽度为  $600\mu\text{m}$  的柔性压力传感器的尺寸结构,其微流道高度为  $800\mu\text{m}$ 。

在设计中,柔性压力传感器的微流道间隔与微流道宽度相同,并且在入口和出口端部设计了  $2.5\text{mm}$  的方形结构。这种方形设计不仅便于不锈钢金属毛细管的插入,还能确保毛细管插入的尺寸规格。使用电子卡尺测量了具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的尺寸规格,如图 4-5c 所示。测量结果显示,微流道结构部分的高度为  $1.5\text{mm}$ ,整体高度为  $2.9\text{mm}$ ,与图 4-5a 和 b 中展示的尺寸规格一致。

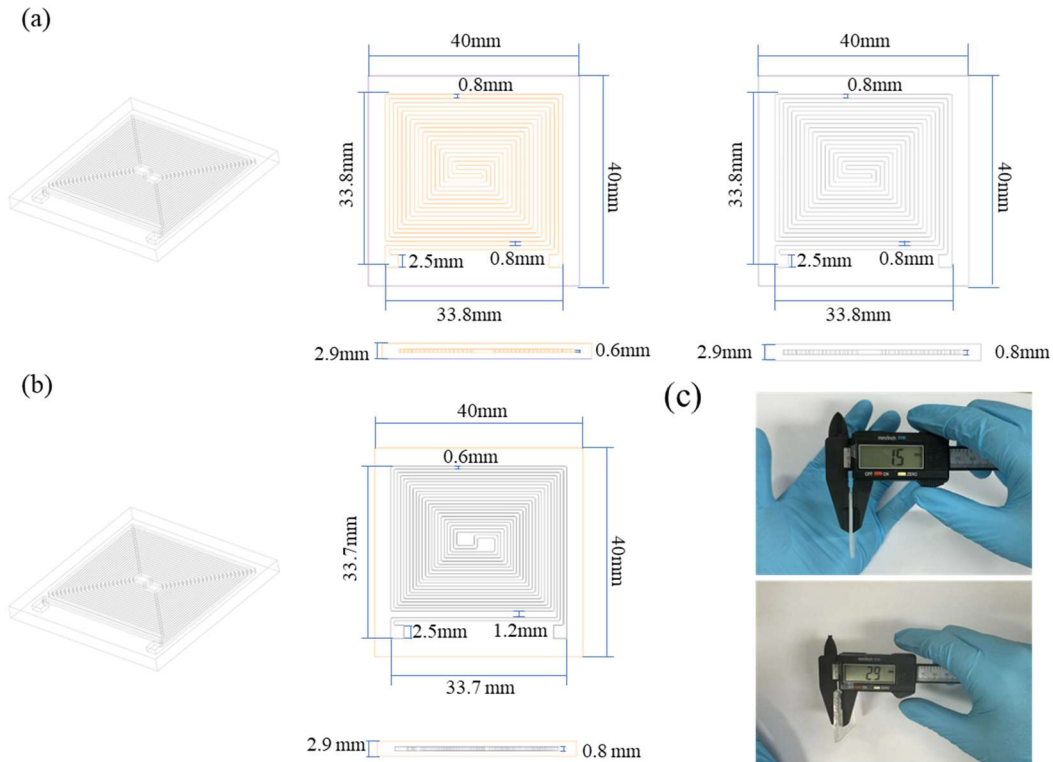


图 4-5 柔性压力传感器的几何参数 (a) 微流道宽度为  $800\mu\text{m}$  的柔性压力传感器尺寸图 (左侧: 微流道高度为  $600\mu\text{m}$ , 右侧: 微流道高度为  $800\mu\text{m}$ ) (b) 微流道宽度为  $600\mu\text{m}$  的柔性压力传感器尺寸图 (微流道高度为  $800\mu\text{m}$ ) (c) 柔性压力传感器实际尺寸测量图

#### 4.4 柔性压力传感器的多模态耦合特性

基于电阻式传感机制的柔性压力传感器由基底和敏感层组成的“三明治”夹

层结构，通过将力刺激转换为电阻信号变化来实现传感功能。具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的电阻信号采用伏安法测量。柔性压力传感器的液态金属敏感层的两端输入恒定电流，测量其在受压状态下的电压信号变化，并通过伏安法计算出对应的电阻信号变化。伏安法测量电阻信号的实验中，可编程线性直流电源提供恒流输入至传感器的液态金属敏感层，示波器则测量其入口和出口两端的电压值。

不锈钢金属凭借其良好的导电性和导热性，以及对液态金属的优异抗腐蚀性，被选为电-液耦合部件的材料。不锈钢中空毛细管的内壁承载液态金属，外壁缠绕铜导线，实现电-液耦合功能。实验进一步测量了三种不同规格的柔性压力传感器在不同流量下的电阻值，结果如图 4-6a 所示。随着液态金属流量的增大，三种规格的柔性压力传感器的电阻值均呈现降低趋势。这一现象可以通过液态金属填充率的变化来解释。在第三章的液态金属柔性导线的特性研究的部分中，研究了液态金属柔性导线的填充率。该研究发现液态金属流量越大，柔性导线的填充率越高。类似地，液态金属流量越大，柔性压力传感器的微流道填充率也越大，导致传感器的电阻值降低。

在三种规格的柔性压力传感器中，微流道截面积最大且长度最短的传感器具有最小的电阻值；而微流道截面积最小且长度最长的传感器具有最大的电阻值；微流道截面积和长度适中的传感器的电阻值则介于两者之间。本章以柔性压力传感器为例，实验测量了其在不同流量下的电阻变化值，结果如图 4-6b 所示。从图中可以看出，电阻波动趋势与第二章的结论一致：在液态金属流量较小时，柔性压力传感器的电阻较大，且电阻波动范围也较大。

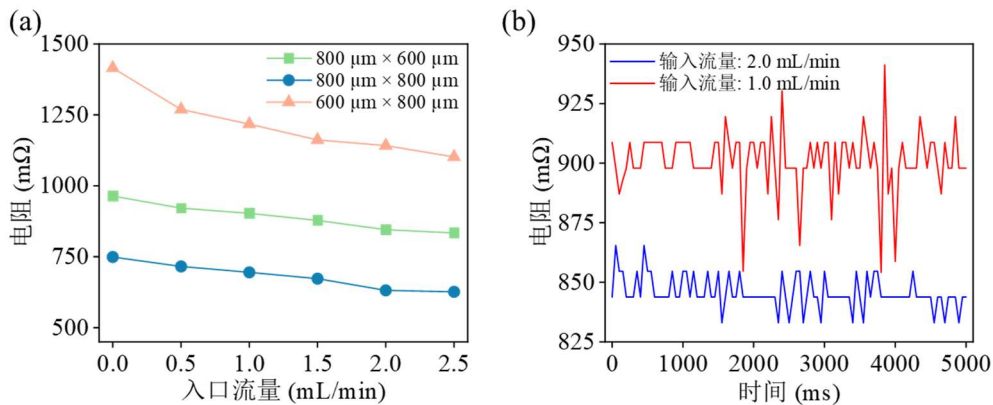


图 4-6 柔性传感器电阻变化 (a) 3 种不同规格的柔性传感器的电阻值与液态金属流量关系

图 (b) 柔性压力传感器 (800μm×600μm) 在不同液态金属流量下的电阻波动图

在第二章的中，对液态金属的电-液耦合处的电阻波动进行了研究。实验结果表明，不锈钢中空毛细管（外径 0.63mm，内径 0.39mm）在液态金属流量为 1.0mL/min 和 2.0mL/min 时，电阻率平均波动值分别为 7.7mΩ/mm 和 7.1mΩ/mm。这些波动值远小于柔性压力传感器的电阻值，因此电-液耦合处的电阻波动对传感器的电阻干扰较小，可以忽略不计。

图 4-7a 展示了采用伏安法测量具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器电阻变化值的系统简图。该系统的液态金属外部循环系统的柔性管道采用硅胶软管，其硅胶材质对液态金属具有良好的抗腐蚀性能，适合作为承载液态金属的管道材料。硅胶软管与不锈钢金属中空毛细管之间通过鲁尔接口连接，这种连接方式简单、安全且可靠。液态金属的循环动力由蠕动泵提供，其通过挤压管道驱动流体，能在不直接接触液态金属的情况下实现定量、定速驱动。

在测量过程中，可编程线性直流电源向柔性压力传感器的液态金属敏感层输入 0.1A 的恒定电流，以避免传感器内部液态金属产生的焦耳热对测量结果的干扰。示波器用于测量传感器两端的电压差，而柔性压力传感器的电阻值则是示波器电压测量值的 10 倍。

柔性压力传感器的伏安法测量实验平台主要由三个部分组成：温度调节、电阻测量和温度-压力发生单元。温度调节部分由液态金属循环系统构成，包括硅胶软管、鲁尔接口、不锈钢金属针管和蠕动泵。电阻测量部分由可编程线性直流电源和示波器组成。温度-压力发生单元则由力发生器、柔性加热板、硅胶板和直流稳压电源组成，其中柔性加热板为纯电阻加热器。在该实验平台中，直流稳压电源向柔性加热板提供恒定功率，以模拟高温环境。力发生器在柔性压力传感器的上表面施加一定压力，蠕动泵驱动液态金属循环流动。同时，可编程线性直流电源和示波器采用伏安法测量柔性压力传感器的电阻变化。

柔性压力传感器的伏安法测量电阻实验平台中，直流稳压电源（WPS250B，WANPTEK，深圳，广东）的最大电压、电流和功率输出分别为 30V、5A 和 150W，能够向柔性加热板提供 150W 的加热功率。2.8W 的柔性加热板可以产生 120℃ 至 150℃ 的高温，完全能够模拟柔性压力传感器应用领域的高温场景。实验平台中的可编程线性直流电源（DP832，RIGOL，苏州市，江苏省）具有三个通道，总输出功率为 195W，电压纹波低于 35μVrms/2mVpp。示波器（MSO5072，RIGOL，

苏州市，江苏省）的模拟带宽为 70MHz，最高实时采样率为 8GSa/s。

图 4-7c 展示了柔性压力传感器的入口和出口端均为开放结构，使得液态金属能够在传感器内循环流动。循环流动的液态金属能够降低柔性压力传感器敏感层的液态金属温度。通过将高温液态金属的热量散发至外界环境，柔性压力传感器能够减弱热载荷对其压力测量的干扰。

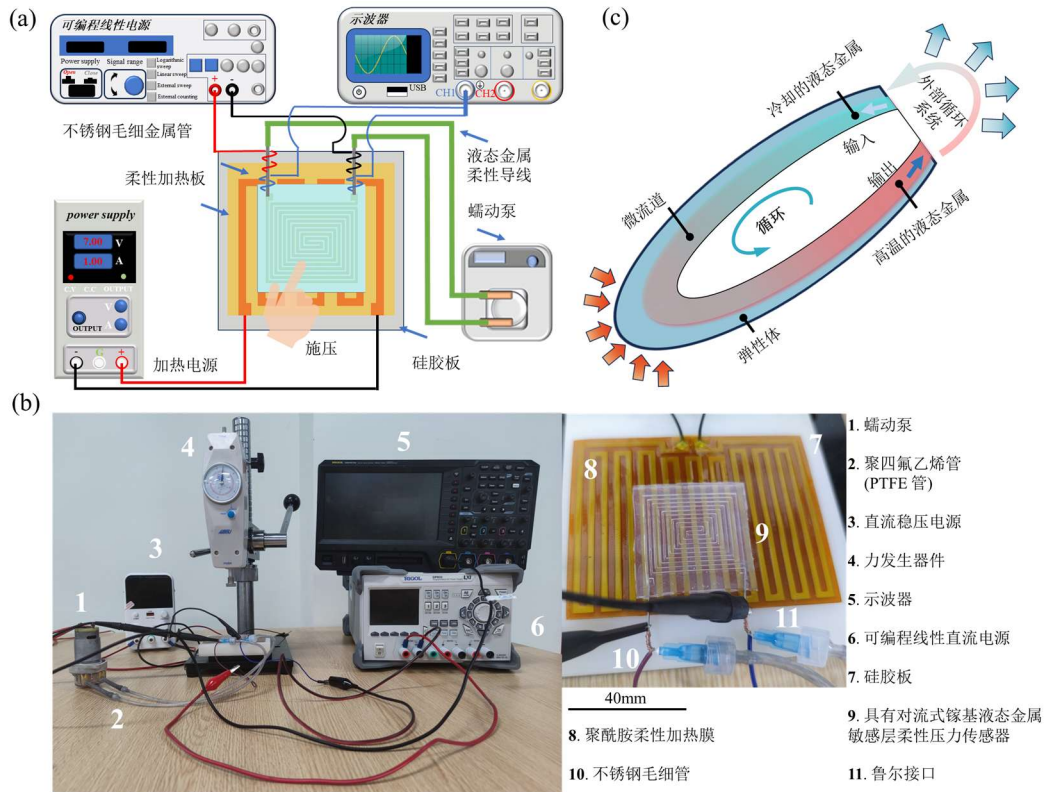


图 4-7 柔性传感器实验平台、原理 (a) 柔性压力传感器电阻伏安法测量实验平台简图 (b) 柔性压力传感器伏安法测量实验平台实物图 (c) 柔性压力传感器液态金属循环散热原理图

#### 4.4.1 柔性压力传感器的流-固耦合

柔性压力传感器基于电阻式传感机制，通过检测导电材料的形变来测量施加的压力大小。传感器上表面受到机械载荷（如按压、撞击等）时，微流道内的液态金属形状发生改变，从而导致传感器的电阻值发生变化。此外，传感器上表面的压力不仅改变柔性压力传感器的电阻值，还会改变微流道的流阻，进而对传感器的液态金属循环系统的动力源负载产生干扰。图 4-8a 展示了具有镓基液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的检测机制。

在实验中，液态金属的雷诺数范围为 1.5~12，远低于层流状态 3000 的临界

值，表明液态金属流体处于层流状态。实验中使用 COMSOL Multiphysics 5.6 软件对受压状态下的柔性压力传感器进行数值模拟，研究其微流道流速分布及形变状态。在仿真实验中，柔性压力传感器的入口压强设置为 1kPa，上表面所受均匀压强为 9kPa。实验选取柔性压力传感器的微流道横向截面作为参考面，图 4-8b、c、d 展示了传感器的微流道流速分布和形变情况。

实验结果表明，柔性压力传感器两侧在压力作用下产生明显形变，但最大形变量控制在 70 $\mu\text{m}$  以内。由于液态金属具有高粘度特性，微流道的管壁处流速低于管道中心区域，流速最高点位于管道中心区域附近。此外，在截面积、入口压强和表面受压相同的条件下，微流道宽度为 600 $\mu\text{m}$  的传感器的微流道整体长度大于微流道宽度为 800 $\mu\text{m}$  的传感器。因此，微流道宽度较小的传感器流阻较大，流速相应减小，这表明微流道的整体长度对流速具有重要影响。

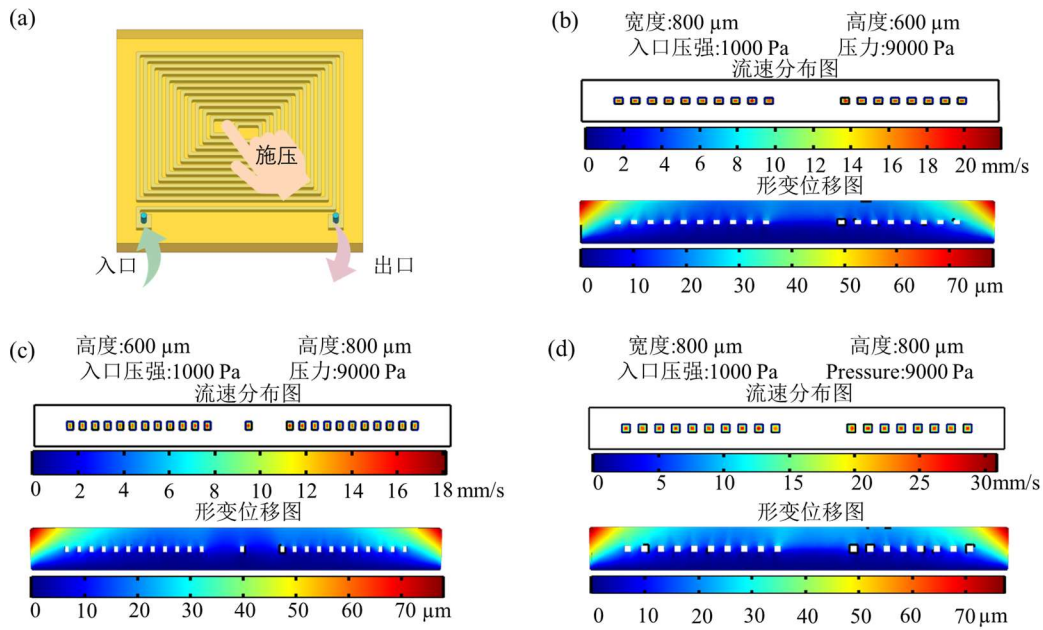


图 4-8 柔性传感器的流-固耦合性能 (a) 柔性压力传感器压力检测机制图 (b) 柔性压力传感器（微流道规格：800 $\mu\text{m}$ ×600 $\mu\text{m}$ ）上表面受压的微流道流速分布和形变图 (c) 柔性压力传感器（微流道规格：600 $\mu\text{m}$ ×800 $\mu\text{m}$ ）上表面受压的微流道流速分布和微流道形变图 (d) 柔性压力传感器（微流道规格：800 $\mu\text{m}$ ×800 $\mu\text{m}$ ）上表面受压的微流道流速分布和形变图

柔性传感器入口压强与出口流量之间的关系可根据矩形管道的泊肃叶定律计算得出：

$$R_{flow} = \frac{12\mu L}{wh^3(1-0.578)} = \frac{28.4\mu L}{h^4} \quad (h = w) \quad (4-9)$$

$$R_{flow} = \frac{12\mu L}{wh^3(1-0.630\frac{h}{w})} \quad (h > w) \quad (4-10)$$

$$Q = \frac{\Delta P}{R_{flow}} \quad (4-11)$$

其中  $R_{flow}$  为矩形管道的流阻（单位： $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ ）， $\Delta P$  为柔性传感器入口和出口端之间的压强差（单位： $\text{Pa}$ ）， $\mu$  为流体的粘度（单位： $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）， $w$  为微流道的宽度（单位： $\text{m}$ ）， $h$  为微流道的高度（单位： $\text{m}$ ）， $L$  为微流道的长度（单位： $\text{m}$ ）， $Q$  为微流道出口流量（单位： $\text{m}^3/\text{s}$ ）。

压降  $\Delta P$  定义为柔性压力传感器入口与出口端之间的压强差。在实验中，柔性压力传感器的出口端压强设定为 0，因此压降  $\Delta P$  的大小等于传感器的入口端压强。实验测量了三种不同规格的柔性压力传感器在不同入口压强下的出口流量，结果如图 4-9a 所示。当微流道横截面积相同时，微流道宽度越小，出口流量越小；而当微流道宽度相同时，横截面积越大，出口流量越大。

实验测量在上表面施加不同压强的三种不同规格的柔性压力传感器在不同入口压强下的出口流量，结果如图 4-9b 和 c 所示。图中明显看出，随着上表面所受压强的增大，出口流量呈现降低趋势，但整体变化幅度不大。此外，柔性压力传感器的出口流量变化图还揭示了：对于相同截面积（微流道宽度较小）的传感器，初始流量较小，受压情况下的流量变化幅度也较小。对于同规格的柔性压力传感器，入口压强越大，出口流量越大，受压情况下的流量下降幅度也越大。

根据泊肃叶公式计算了三种不同规格的柔性压力传感器的流动阻力，结果如图 4-9d 所示。图中显示， $800\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$  规格的传感器流阻最小， $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$  规格的流阻次之，而  $600\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$  规格的流阻最大。柔性压力传感器的流阻与微流道宽度和截面积成反比。柔性传感器微流道的流阻也与其上表面所受压力相关，传感器上表面所受压强越大，其流阻也越大。传感器微流道的流阻与上表面所受压强呈现正相关，但整体上幅度不大。其与微流道尺寸对微流道流阻的影响相比，上表面所受压力对微流道流阻的影响可以忽略不计。因此可以得出，在柔性压力传感器的入口压强恒定时，上表面所受压强不会对微流道的流阻产生显著影响。

后续研究中，柔性传感器的输出流量达到稳定状态时，其入口压强不会因上表面所受到的外部压强变化而产生显著的波动。在柔性传感器输出流量稳定的情况下，蠕动泵不会承受较大的输出负担，能实现高效流体运输。目前市场上已有

的高性能泵系统已经能轻易实现所需的流阻差,从而保证长时间稳定的流量输出。

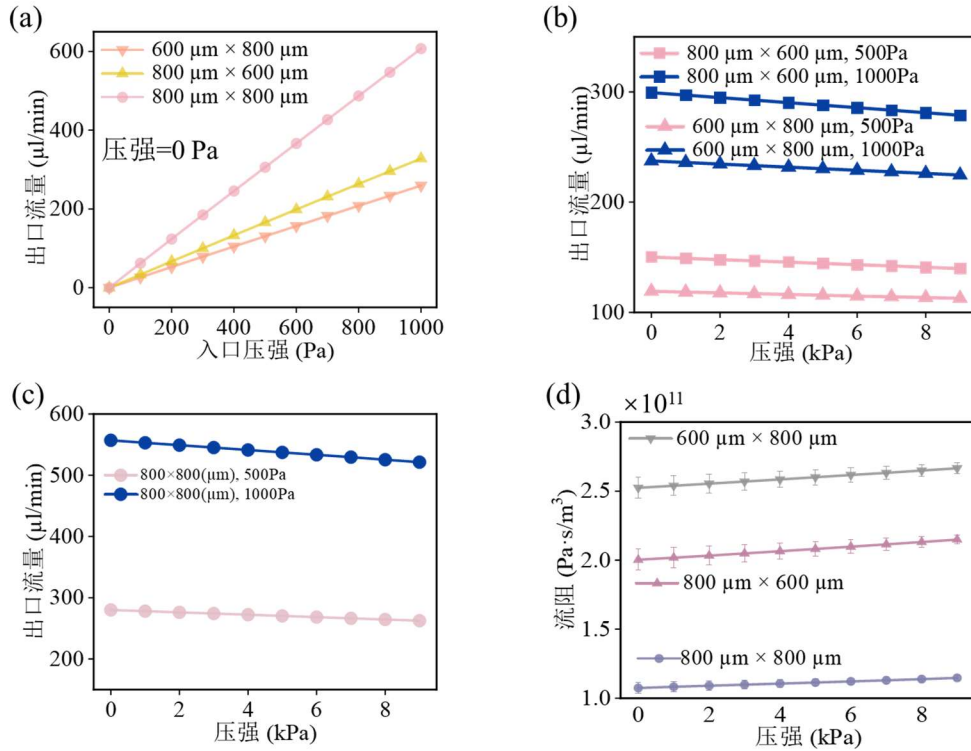


图 4-9 柔性压力传感器微流道的流阻变化 (a) 柔性压力传感器入口压强与出口流量关系图 (b) 柔性压力传感器(微流道规格:  $600\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$ ,  $800\mu\text{m} \times 600\mu\text{m}$ ) 上表面受压与出口流量关系图 (c) 柔性压力传感器(微流道规格:  $800\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$ ) 上表面受压与出口流量关系图 (d) 柔性压力传感器上表面受压与微流道流阻关系图

#### 4.4.2 柔性压力传感器的流-热耦合

上一节已研究了柔性压力传感器的流-固耦合特性,传感器上表面的压力不会显著干扰传感器内的微流道流阻,本节将重点研究传感器的流-热耦合特性。

为了实现温度调控,实验中采用了一种柔性纯电阻加热板(薄型加热片 PI 聚酰亚胺加热膜-可弯曲加热器),将其粘贴在硅胶板上,并用隔热材料包裹加热板底部。柔性加热板产生的热能主要用于加热柔性压力传感器,而非散失至周围环境或被硅胶板吸收。通过调控加热板的输入功率,可以模拟不同的高温场景。放置于柔性加热板上方的传感器通过鲁尔接口与外部液态金属循环系统连接,实现整个系统的液态金属循环流动,图 4-10a 展示了柔性压力传感器温度调控系统。

在第三章中,使用红外热成像枪测量了液态金属柔性导线的温度并绘制了温度云图。然而,本章的热量主要来源于外界温度场,外界温度场的干扰使得绘制温度云图变得困难。借鉴 Liu 的研究方法<sup>[60]</sup>。通过检测基于液态金属的 LED 散

热器入口和出口温度,使用两者温度的平均值替代散热器内部液态金属的温度。这种测量方式很好地解决了柔性传感器微流道内液态金属温度难以检测的问题。因此,本章采用热电偶温度传感器(接触式测温仪热电偶温度计-K型数字温度表,UT32D,优利德)测量柔性压力传感器入口和出口端的不锈钢金属温度。柔性传感器的电-液耦合部件为不锈钢金属材质,具备优异的导热性,因此不锈钢金属的电-液耦合部件的温度可以近似为入口和出口端的液态金属温度。

柔性压力传感器的入口和出口端的不锈钢针管上粘贴热电偶式温度传感器,测量入口和出口端不锈钢针管的温度,以替代传感器入口和出口的液态金属温度。传感器内部液态金属的平均温度使用入口和出口端的不锈钢金属针管的平均温度值来替代。图 4-10b 展示了在室温  $26^{\circ}\text{C}$  环境和  $2.8\text{W}$  (热流密度:  $1750\text{W}/\text{m}^2$ ) 热载荷条件下,不同液态金属输入流量下不同规格传感器的温度变化。 $2.8\text{W}$  输入功率的柔性加热板能产生  $120\sim 150^{\circ}\text{C}$  的高温。随着液态金属流量的逐渐增大,柔性传感器内的液态金属平均温度呈现出明显的下降趋势。在相同的液态金属输入流量条件下,  $600\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$  规格的传感器内液态金属的温差最为明显,而  $800\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$  规格的传感器内液态金属的温度下降幅度最低。在相同的液态金属输入流量和微流道截面积的条件下,微流道宽度越小,传感器内液态金属的平均温度越低;在相同的液态金属输入流量和微流道宽度条件下,微流道在加热器法向方向上的尺寸越大,传感器内液态金属的平均温度越高。在相同的液态金属输入流量条件下,传感器内液态金属的平均温度与微流道宽度成反比,与微流道截面积成正比。

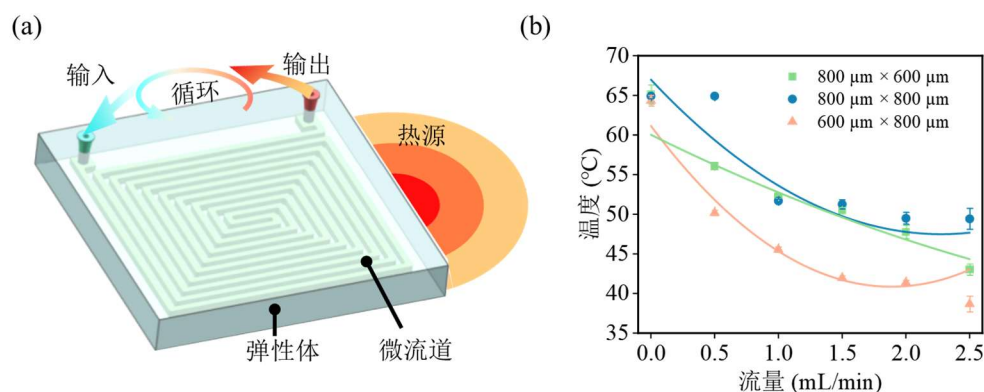


图 4-10 柔性传感器的温度调控 (a) 柔性压力传感器温度调控系统简图 (b) 3 种不同微流道规格的柔性压力传感器在不同液态金属流量下的液态金属平均温度变化图

三种柔性传感器的制备过程相同,唯一的差别在于其尺寸参数。为简化实验

过程,本章以  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$  规格的柔性压力传感器为例,研究具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的流-热耦合特性。实验测量了不同液态金属输入流量下,柔性压力传感器在 330 秒内的平均温度变化。图 4-11a 展示了实验测量的传感器内液态金属的平均温度。

实验中, 2.8W 输入功率的加热板被用于加热柔性传感器。在柔性传感器温度稳定 1 分钟后,开始通入液态金属。结果显示,柔性传感器内的液态金属平均温度波动存在明显的波谷和波峰,但整体仍呈现温度降低趋势。液态金属输入流量越小,波峰存在的时间越长。由于柔性加热板加热柔性压力传感器,内部液态金属温度略高于入口和出口端测得的平均温度。液态金属循环后,入口处温度降低,而出口处温度由于内部高温液态金属的排出反而升高,因此柔性压力传感器内的液态金属平均温度呈现先下降后上升的趋势。液态金属输入流量越大,内部高温液态金属排出的时间越短,波峰存在的时间也越短。传感器平均温度波动的主要原因是传感器出口端温度的波动。

为了进一步分析这一现象,实验测量了不同液态金属输入流量下,柔性压力传感器在相同注入容积下的温度变化。图 4-11b 展示了该条件下的柔性压力传感器的温度变化。结果显示,不同液态金属输入流量下,柔性压力传感器出口端温度波动出现位置的注入容积大小相差不大。随着液态金属注入容积的增大,出口端温度呈现先上升后下降的趋势,与图 4-11a 中的温度波动趋势一致。

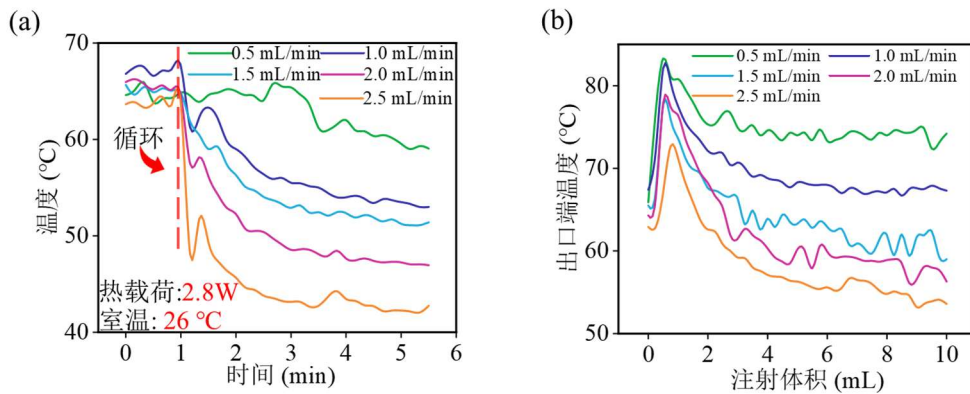


图 4-11 柔性传感器的温度变化图 (a) 柔性压力传感器(微流道尺寸:  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$ )在不同液态金属流量下随时间变化的平均温度图 (b) 柔性压力传感器(微流道尺寸:  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$ )在不同液态金属流量下随注射液态金属体积变化的出口端液态金属温度图

由于不同规格的柔性压力传感器具有不同的微流道尺寸参数,其在相同热载荷条件下的初始温度存在差异,这使得直接对比温度变化变得困难。因此,本研

究通过对比初始温度与测量温度之间的差值来进行分析。实验中,选取了两种不同微流道规格的柔性压力传感器(微流道尺寸分别为  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$  和  $600\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$ ),在  $1.5\text{mL/min}$  和  $2.0\text{mL/min}$  的液态金属流量条件下,测量了相同液态金属注射体积下的温度差值,结果如图 4-12a 所示。实验结果表明,柔性压力传感器的液态金属输入流量越大,相同液态金属注射体积下的温度差值越小。此外,在微流道横截面积相同的条件下,微流道宽度越小,柔性传感器出口端的温度差值越明显。

为了进一步对比柔性压力传感器在相同微流道长度条件下,微流道横截面积对其出口端液态金属温度的影响,实验中选取了另外两种不同微流道规格的柔性压力传感器(微流道尺寸分别为  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$  和  $800\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$ ),在  $1.5\text{mL/min}$  和  $2.0\text{mL/min}$  的液态金属流量条件下,测量了相同液态金属注入容积下的温度差值,结果如图 4-12b 所示。实验结果表明,当微流道宽度相同时,微流道截面积越大,柔性传感器出口端的温度差值越明显。

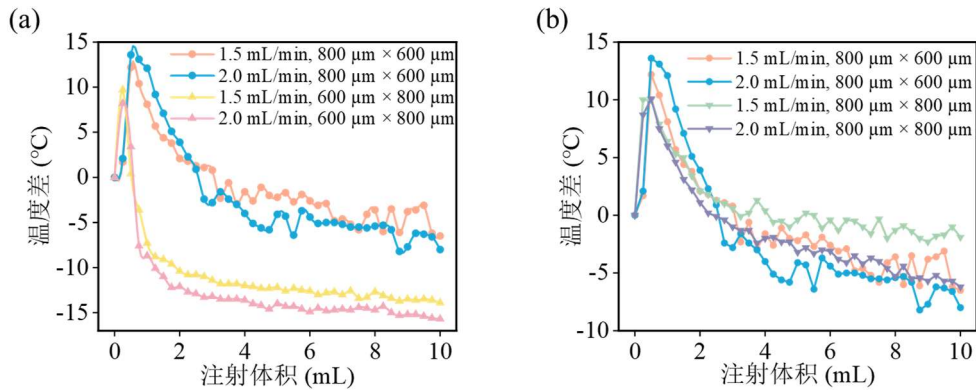


图 4-12 柔性传感器的温度变化 (a) 2 种不同微流道规格(微流道尺寸:  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$ 、 $600\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$ ) 在  $1.5\text{mL/min}$  和  $2.0\text{mL/min}$  流量下随着注射液态金属体积变化的出口端液态金属温度图 (b) 2 种不同微流道规格(微流道尺寸:  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$ 、 $800\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}$ ) 在  $1.5\text{mL/min}$  和  $2.0\text{mL/min}$  流量下随着注射液态金属体积变化的出口端液态金属温度变化图

为进一步展示具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的温度调控能力,图 4-13a 展示了  $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$  规格的柔性压力传感器在不同液态金属输入流量下的温度变化情况。实验中,液态金属静止状态下的柔性压力传感器被柔性加热板加热至稳定温度后继续加热 1 分钟,此时传感器的平均温度约为  $65^{\circ}\text{C}$ 。随后,液态金属以  $0.5\text{mL/min}$  的流量开始循环流动,4 分钟后改变流量大小,再过 4 分钟停止镓基液态金属的循环。在整个过程中,柔性加热板以  $2.8\text{W}$  的加热

功率持续加热柔性压力传感器。结果显示，外部液态金属循环系统能够有效降低柔性压力传感器内镓基液态金属的平均温度，且液态金属的循环流量越大，温度降低越显著。

在热载荷场景中，柔性压力传感器可能会遭遇热冲击，因此需要具备一定的抗热冲击能力。为了模拟这一场景，实验中将液态金属静止状态下的柔性压力传感器加热至稳定温度后继续加热 1 分钟，随后以 2.0mL/min 的流量启动液态金属循环流动。4 分钟后，将柔性加热板的加热功率从 2.8W 提高到 6W，以模拟高温环境下的热冲击。图 4-13b 展示了该过程中柔性传感器内液态金属的平均温度波动情况。结果表明，液态金属循环流动能显著降低传感器的平均温度，其在热冲击状态下的温升幅度明显低于液态金属静止状态下的柔性压力传感器，展现了良好的温度调控效果。

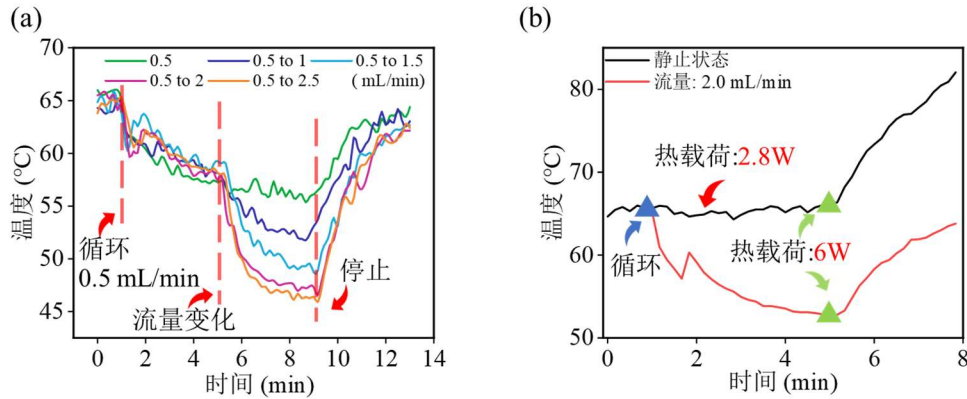


图 4-13 柔性传感器动态调控的温度变化 (a) 柔性压力传感器（微流道尺寸：800μm×600μm）在变流量下随时间变化的液态金属平均温度图 (b) 柔性压力传感器（微流道尺寸：800μm×600μm）以 2.0mL/min 流量在变功率下随时间变化的液态金属平均温度图

周期稳定性是传感器的重要性能之一。为了评估镓基液态金属柔性压力传感器的周期稳定性，实验中将镓基液态金属静止状态下的传感器加热至温度稳定后继续加热 6 分钟，随后以 2.00mL/min 的流量启动镓基液态金属的循环流动，持续 3 分钟，最后停止镓基液态金属的循环，但仍继续加热 6 分钟。这一过程定义为一个完整的周期。图 4-14 展示了柔性压力传感器内液态金属平均温度的周期变化情况。

实验结果表明，柔性压力传感器在降温周期中表现出良好的稳定性。液态金属循环系统能够多次稳定地降低传感器的温度，显示出优异的重复性和可靠性。本章提出的具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器不仅能够显著降低温

度，还具备优异的抗热冲击性和周期稳定性，使其在高温场景中具有广泛的应用前景。

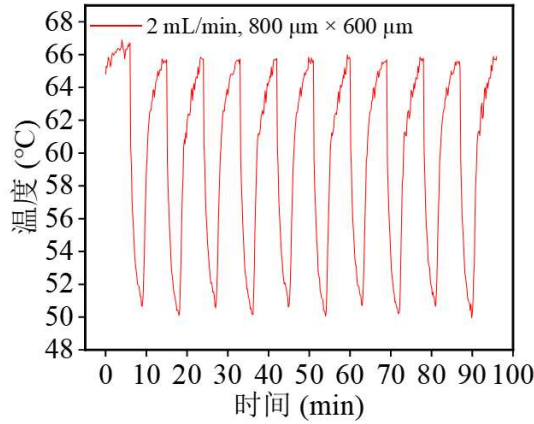


图 4-14 流量为 2.0mL/min 柔性压力传感器（微流道尺寸：800 $\mu$ m $\times$ 600 $\mu$ m）的液态金属平均温度周期性变化图

#### 4.4.3 柔性压力传感器的流-热-力多模态耦合

具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器能够有效降低外界温度对传感器电阻的干扰。为了评估其抗温度干扰能力，实验中将传感器置于不同加热功率的柔性加热板上，模拟不同的高温场景。图 4-15a 展示了在不同热载荷下，800 $\mu$ m $\times$ 600 $\mu$ m 规格的柔性压力传感器的电阻变化。结果显示，随着加热功率的增大，传感器的电阻显著升高。在 2.8W 热载荷下，传感器的电阻增加了 48.5m $\Omega$ ，升高约 5%。这表明高温场景对传感器电阻有一定的干扰，因此热载荷应用场景中的传感器需要具备一定的抗温度干扰能力。

图 4-15b 进一步展示了液态金属静止和以 2.0mL/min 输入流量流动时，柔性传感器在不同热载荷下的电阻差值，以及 2.0mL/min 输入流量的传感器在不同热载荷下与室温环境中的电阻差值。实验结果表明，2.0mL/min 输入流量的传感器与液态金属静止的传感器电阻差值随着热载荷的增大而逐渐增大。在热载荷场景中，2.0mL/min 输入流量的传感器自身阻值呈现上升趋势，但电阻差值较小。在 2.8W 热载荷下，2.0mL/min 输入流量的传感器电阻仅增加了 30m $\Omega$ ，比液态金属静止的传感器电阻降低了 18.5m $\Omega$ ，降幅达到 38.1%。

这一结果表明，液态金属的循环流动能快速排出传感器内部的高温液态金属，使传感器内的液态金属温度保持在一个相对稳定的区间，从而显著降低传感器的

平均温度。这不仅减少了高温对传感器电阻的干扰，还提高了传感器在高温环境中的稳定性和可靠性。

理论上，只要液态金属的循环速度足够快，低温液态金属可以迅速排出微流道内的高温液态金属，从而保持柔性传感器微流道内液态金属的温度稳定。因此，具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的工作温度范围应与柔性传感器的结构组分的工作温度相匹配。

柔性传感器的衬底材料通常包括 PDMS、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚酰亚胺和复合材料等。理论上，通过选择合适的传感器衬底材料，可以满足柔性传感器在不同热载荷场景下的应用需求。然而，柔性传感器的微流道存在极限承受压力，这意味着液态金属的流量不宜过大，否则可能会对微流道结构造成破坏。因此，在设计柔性压力传感器时，需要综合考虑液态金属的循环速度、流量以及微流道的结构强度，以确保传感器在高效散热的同时，保持结构的完整性和稳定性。

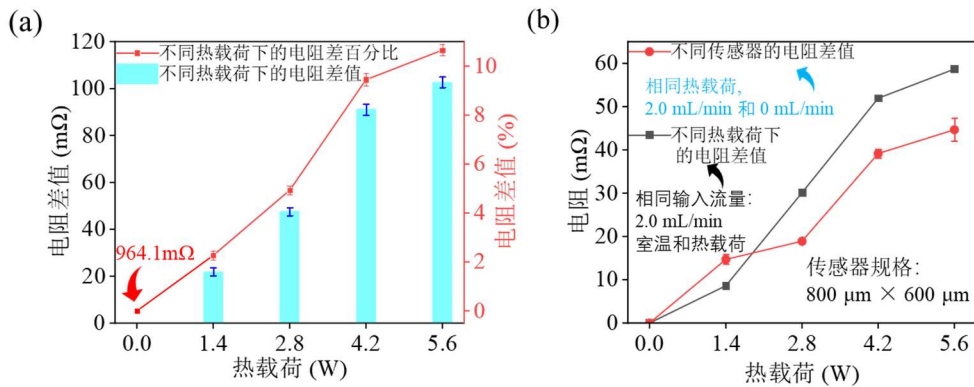


图 4-15 柔性传感器流-热-力耦合下的电阻变化 (a) 柔性压力传感器 ( $800\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$ ) 在不同加热功率下的电阻差值图 (b) 液态金属静止和  $2.0\text{mL}/\text{min}$  输入流量的传感器和液态金属  $2.0\text{mL}/\text{min}$  输入流量下的柔性压力传感器随着热载荷变化的电阻差值图

为了研究液态金属柔性压力传感器的压力响应特性，实验中分别在室温环境和  $2.8\text{W}$  热载荷场景下对传感器施加压力，并测量其电阻变化。图 4-16a 展示了在室温和  $2.8\text{W}$  热载荷场景下，柔性压力传感器电阻随施加压力的变化情况。结果显示，室温场景下的电阻变化幅度远小于热载荷场景。这是因为温度升高会导致液态金属电导率降低，并且微流道受热形变，使得压力响应更加明显，电阻变化幅度更大。然而，高温场景下电阻测量的波动明显增大，导致测量误差增加。

在室温场景下，柔性压力传感器上表面施加  $4\text{N}$  的力，均匀压强为  $2.5\text{kPa}$  时，

电阻变化范围为  $25\sim 30\text{m}\Omega$ 。此外，当在柔性压力传感器上表面中心区域施加  $4\text{N}$  的力（力发生器直径  $15\text{mm}$ ，局部压强高达  $22.6\text{kPa}$ ）时，电阻变化值约为  $81\text{m}\Omega$ ，是平均受力状态下的  $2.7\sim 3.2$  倍，表现出急剧的电阻变化。这表明在相同施加压力下，局部受压的压强大，电阻变化明显，压力响应性能优异。

在  $2.8\text{W}$  热载荷场景中，柔性压力传感器上表面施加均匀载荷，图 4-16b 展示了液态金属静止和  $2.0\text{mL}/\text{min}$  流量状态下柔性传感器的电阻随施加压力的变化情况。结果显示，液态金属以  $2.0\text{mL}/\text{min}$  流量输入时，柔性传感器的电阻明显降低，电阻波动范围小，测量精度高。然而，由于液态金属在微流道中循环流动时存在静水压力，对微流道形变存在一定抵抗作用，导致压力响应不明显，柔性压力传感器的压力响应曲线的斜率较低。

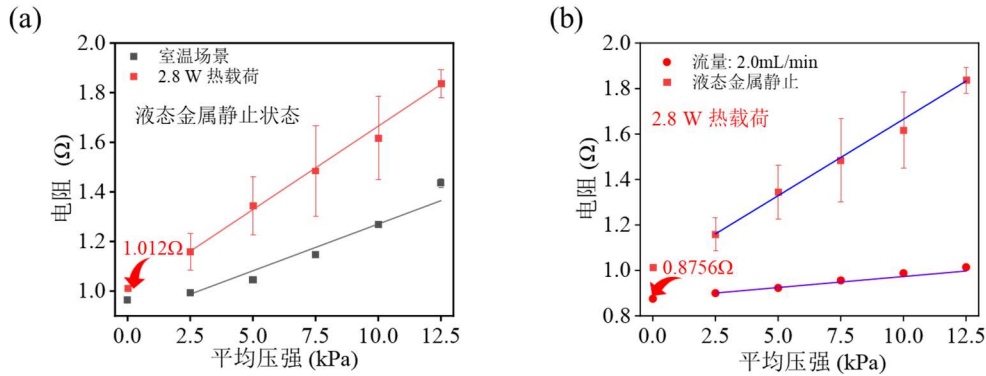


图 4-16 不同场景下的柔性传感器电阻变化 (a) 室温和  $2.8\text{W}$  热载荷场景下的柔性传感器的上表面压强与电阻关系图 (b) 液态金属静止和  $2.0\text{mL}/\text{min}$  流量下的柔性传感器在  $2.8\text{W}$  热载荷下的表面压强与电阻关系图

图 4-17a 进一步展示了在常温和  $2.8\text{W}$  热载荷下，液态金属输入流量为  $2.0\text{mL}/\text{min}$  时，柔性压力传感器随施加压力的变化情况。结果显示，室温场景下的柔性传感器电阻线性拟合优异，但电阻变化小，对压力响应不明显。相比之下， $2.8\text{W}$  热载荷下的柔性传感器电阻变化大，压力响应明显。

图 4-17b 展示了在  $2.8\text{W}$  热载荷和液态金属  $2.0\text{mL}/\text{min}$  输入流量条件下，柔性压力传感器在上表面  $10\text{kPa}$  均匀载荷下的周期循环电阻变化情况。实验中， $35$  秒为一个周期，第  $11$  秒后施加载荷， $21$  秒后移除载荷。实验结果显示， $10\text{kPa}$  均匀载荷引起的电阻变化明显，装载引起的电阻变化存在一定波动，但都稳定在一个区间范围内，表现出优异的周期稳定性。

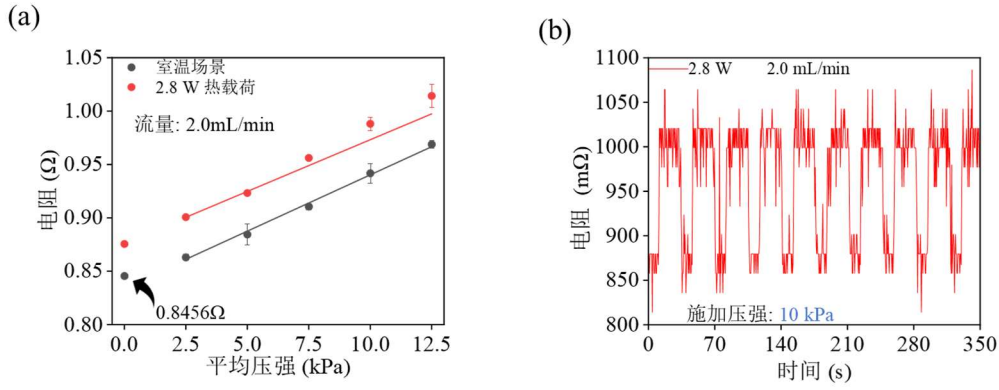


图 4-17 柔性传感器的电阻变化 (a) 液态金属 2.0mL/min 输入流量的柔性传感器在室温和 2.8W 热载荷下的上表面压强与电阻关系图 (b) 2.8W 热载荷、液态金属 2.0mL/min 输入流量的柔性压力传感器在上表面均匀 10kPa 压强下的循环装载电阻变化图

## 4.5 柔性压力传感器的性能分析及应用领域

### 4.5.1 柔性压力传感器的性能分析

灵敏度是评价传感器性能的一个重要指标，表征传感器元件对外界变化的反应程度，影响传感器测量精度和可靠性等。传感器灵敏度是在稳定工作条件下，输出信号与输入信号的比值，根据  $\Delta R/R$  曲线的斜率进行判断，下列公式为灵敏度计算公式：

$$S = \frac{\delta(\Delta R/R)}{\delta P} = \frac{\Delta R/R}{P} \quad (4-12)$$

其中  $\delta$  为数学符号，表示变数的变化； $P$  为施加在传感器上表面的压强（单位：kPa）， $\Delta R$  为柔性压力传感器的电阻变化值（单位： $\Omega$ ）， $R$  是传感器初始的电阻值（单位： $\Omega$ ）， $S$  为器件灵敏度（单位为  $\text{kPa}^{-1}$ ）。

图 4-18a 和 b 分别展示了液态金属静止的柔性压力传感器在室温和 2.8W 热载荷场景下的灵敏度。实验结果显示，其灵敏度分别为  $0.30\text{kPa}^{-1}$  和  $0.65\text{kPa}^{-1}$ ，表明传感器在热载荷场景下具有优异的压力响应性能。这是由于热载荷场景下的温度变化导致传感器敏感层的液态金属电导率发生变化，使得压力引起的电阻变化更加明显。然而，热载荷场景中的柔性压力传感器的电阻波动较为明显，并且不同热载荷场景下的电阻变化值不一致，这增加了压力测量的误差，表明温度对压力测量存在干扰。

图 4-18c 和 d 展示了液态金属以 2.0mL/min 输入流量流动时，柔性压力传感

器在室温和 2.8W 热载荷场景下的灵敏度。结果显示，其灵敏度分别为  $0.08\text{kPa}^{-1}$  和  $0.11\text{kPa}^{-1}$ 。液态金属以  $2.0\text{mL/min}$  输入流量流动的传感器灵敏度明显低于液态金属静止的传感器。这是由于液态金属循环流动时存在静水压力，会抵抗上表面施加的均匀载荷，导致实际施加载荷低于液态金属静止状态，从而降低了压力响应性能和灵敏度。然而，液态金属以  $2.0\text{mL/min}$  输入流量流动的传感器在常温和热载荷场景下的电阻变化线性拟合优异，压力测量更加精确。

具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器在不同工作条件下表现出不同的灵敏度特性。尽管液态金属循环流动降低了传感器的灵敏度，但其在常温和热载荷场景下均展现出较为优异的线性拟合和精确的压力测量能力。与表 4.1 中列出的其他传感器相比，本研究中的柔性压力传感器在灵敏度和压力响应方面表现出一定的优势。

表 4.1 不同传感机制的柔性压力传感器的性能表<sup>[73-77]</sup>

| 传感器类型    | 结构   | 灵敏度                                                                                                           | 测量范围         |
|----------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 电阻式压力传感器 | 三维多孔 | 0~30kPa: $0.014\text{kPa}^{-1}$<br>30~100kPa: $0.009\text{kPa}^{-1}$                                          | 0~100kPa     |
| 电阻式压力传感器 | 微观褶皱 | 0.24kPa $^{-1}$<br>0~0.33kPa: $0.26\text{kPa}^{-1}$                                                           | 0.033~535kPa |
| 弹性介电膜    | 微流道  | 0.33~250kPa: $0.01\text{kPa}^{-1}$<br>250~1000kPa: $0.0009\text{kPa}^{-1}$<br>0~10kPa: $0.161\text{kPa}^{-1}$ | 0~1MPa       |
| 电容式压力传感器 | 多孔结构 | 10~50kPa: $0.015\text{kPa}^{-1}$<br>50~200kPa: $0.003\text{kPa}^{-1}$                                         | 0~200kPa     |
| 压电式压力传感器 | 薄膜   | $0.018\text{kPa}^{-1}$                                                                                        | /            |

在图 4-18 中，室温场景下的柔性压力传感器对测量压力的响应线性度不如其他条件下的传感器。这一现象主要归因于液态金属的高粘度和表面能特性。在室温条件下，柔性压力传感器内的微流道填充率不足，导致传感器的初始压力响应不明显。然而，在压力响应曲线的后半部分，即柔性压力传感器的上表面施加 5.0kPa 至 12.5kPa 的压强范围内，传感器表现出较好的压力响应线性度。

相比之下，热载荷场景下的柔性压力传感器由于温度对液态金属的影响，其

微流道填充率显著提高，从而增强了传感器的整体性能。具体而言，温度升高使得液态金属的粘度降低，表面能减小，从而改善了微流道内的填充情况。此外，液态金属的流动进一步优化了微流道内的填充率，使得该条件下的柔性压力传感器在压力响应线性度方面表现出色。

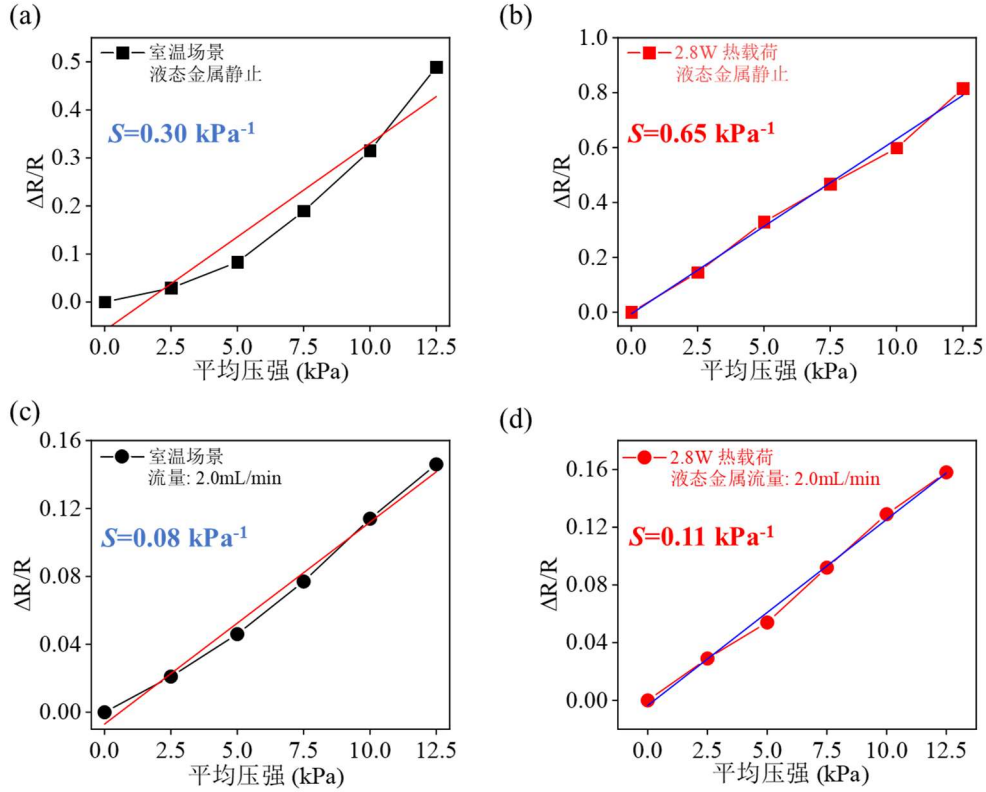


图 4-18 不同场景下的柔性压力传感器的灵敏度 (a) 室温场景下的柔性压力传感器（液态金属静止）的灵敏度图 (b) 2.8W 热载荷下的柔性压力传感器（液态金属静止）的灵敏度图 (c) 室温场景下的柔性压力传感器（液态金属 2.0mL/min 输入流量）的灵敏度图 (d) 2.8W 热载荷下柔性压力传感器（液态金属 2.0mL/min 输入流量）的灵敏度图

频率响应是压力传感器动态响应的重要参数，决定了传感器能够测量的压力频率范围。压力传感器的频率响应与其几何和结构特性密切相关。为了评估柔性压力传感器的动态性能，实验中测量了传感器在 8kPa 压强下的不同频率响应。图 4-19a 展示了柔性压力传感器在恒定压强下的频率响应比。实验结果显示，当施加 3Hz 频率的压强时，柔性压力传感器的电阻值约为 50%；而在 1.75Hz 频率的压强下，电阻值约为 70%。这表明柔性压力传感器对高频压力的响应较弱，而对低频压力的响应较好，说明了频率对传感器动态响应能力的影响。

除了频率响应，响应时间也是衡量压力传感器动态性能的关键参数。响应时

间定义为从压力传感器检测到压力变化到输出相应电信号的持续时间。图 4-19b 描述了柔性压力传感器在 8kPa 压强下的响应时间。实验结果表明，传感器的上升响应时间为 0.64 秒，下降响应时间为 0.54 秒。这些结果表明，柔性压力传感器具有快速的动态响应能力。具体而言，传感器能够迅速响应外力变化，并输出稳定的电信号，这在需要快速测量压力变化的应用场景中尤为关键。

具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器在动态响应方面表现出色，具有较短的响应时间和较高的频率适应性，使其在多种动态压力测量场景中具有潜在的应用价值。

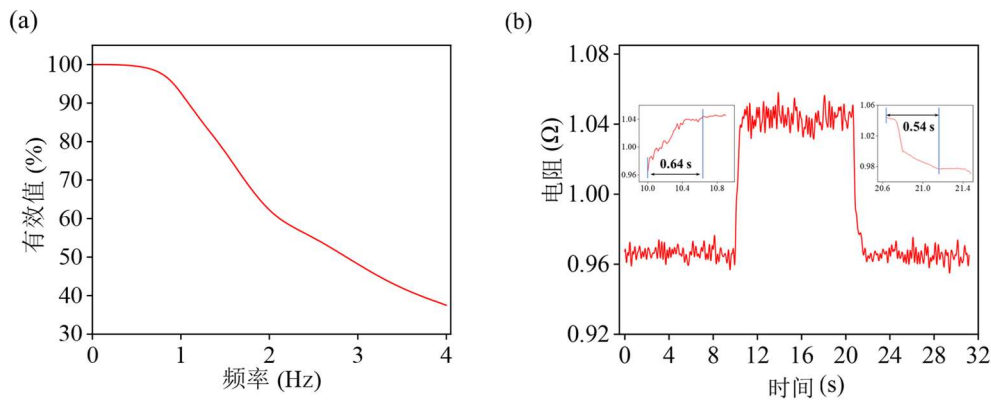


图 4-19 柔性压力传感器的性能参数 (a) 柔性压力传感器的压力频率响应 (b) 柔性压力传感器的响应时间

柔性压力传感器通过将力刺激转化为电信号来实现测量功能，但这一过程经常受到各种形式的噪声干扰，主要包括热噪声和闪烁噪声。这些噪声会掩盖或扭曲传感器的实际输出信号，导致测量结果不准确。因此，压力传感器的信噪比（SNR）是一个关键的性能指标，其定义为传感器输出信号功率与噪声功率之比。较高的信噪比表明传感器输出的信号质量较高，噪声对信号的影响较小。

为了评估具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器的信噪比，实验中首先测量了传感器的初始电阻，其值为 965.1mΩ。随后，将柔性压力传感器的两端连接至恒流源，并使用示波器测量其两端的电压。通过离散型傅里叶变换（FFT）分析示波器测量的电压信号，并绘制功率谱密度（PSD）图。基于 PSD 图，对柔性压力传感器的有用信号功率和噪声功率进行积分，进而通过以下信噪比公式计算：

$$P_{noise} = P_{total} - P_{signal} \quad (4-13)$$

$$SNR = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (4-14)$$

其中  $P_{noise}$  是柔性压力传感器的噪声信号功率（单位：W）， $P_{total}$  是传感器总功率（单位：W）， $P_{signal}$  是传感器的有用功率（单位：W）， $SNR$  是传感器信噪比（单位：dB）。柔性压力传感器信噪比经过 FFT 变换，其为 43.5dB。具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器能够提供清晰的力刺激引起的电信号，抗干扰能力较强。

#### 4.5.2 柔性压力传感器的应用领域

在 2.8W 热载荷场景下，液态金属以 2.0mL/min 输入流量的柔性压力传感器的装、卸载电阻变化如图 4-20a 所示。实验结果表明，随着压强的增大，传感器的电阻逐渐增大。在 0~12.5kPa 的压强范围内，该传感器对加载和卸载压力的变化表现出快速且稳定的响应，并且测量出其极限压强为 30kPa。这表明该柔性压力传感器能够有效应用于热载荷场景下的压力测量领域。

高压液压仿真试验台是一种专门用于模拟高压液压系统工作环境的实验设备，能够模拟液压系统的各种工况，包括压力、流量和温度等参数。该设备用于测试和研究液压系统的性能和可靠性。柔性压力传感器附着在不规则表面上，适用于测量管道中的压力。然而，高液压测试平台模拟的不同温度条件可能会干扰传感器的压力测量。本章提出的柔性压力传感器能够显著减弱温度对压力测量的干扰，从而可以测量不同温度流体的供路、回路管道压力。图 4-20b 展示了粘贴在高液压仿真平台上的柔性压力传感器。

聚氨酯镀铜伸缩钢丝真空收集软管主要由聚氨酯（PU）和镀铜钢丝制成，广泛应用于通风和排气系统，能够排出蒸汽及焊接烟雾，也可用于食品加工和气动工具中输送油液和空气等。具有液态金属对流式敏感层的柔性传感器附着在管道内壁，用于测量管道压力，确保管道输送的安全性。图 4-20c 展示了柔性传感器粘贴在聚氨酯镀铜伸缩钢丝吸尘管道中的实物图。实验表明，管道运输物质的温度不会对压力测量产生显著干扰。

实验测量了粘贴在不同管径的管道上的柔性压力传感器的压力响应曲线，粘贴在管道外侧的柔性压力传感器通入 2.0mL/min 流量的液态金属，并在两端施加 50mV 的恒定电压。通过对柔性压力传感器表面施加不同压强，测量其电流变化

情况，结果如图 4-20d 所示。实验发现，粘贴在管径较大的管道上的柔性压力传感器的电流变化相对较不明显，但所有传感器均能稳定测量出施加的压力值。

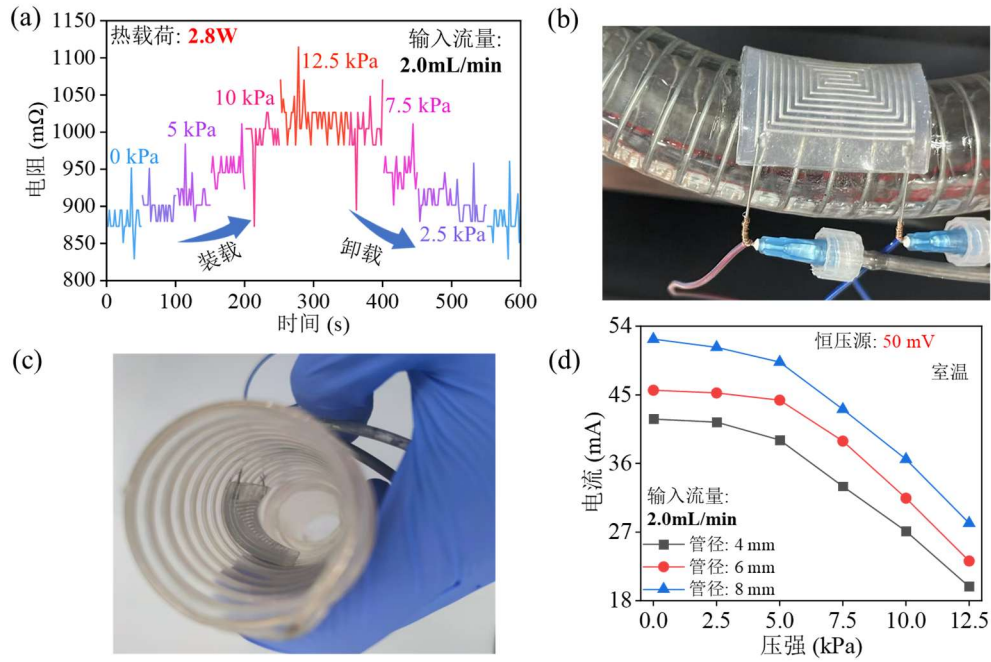


图 4-20 柔性压力传感器的实验性能 (a) 0~12.5kPa 压强梯度的装、卸载下的柔性压力传感器电阻变化图 (b) 柔性压力传感器粘贴在高液压实验平台管道实物图 (c) 柔性压力传感器粘贴在聚氨酯镀铜伸缩钢丝软管实物图 (d) 粘贴在不同管径的管道下的柔性压力传感器电流随施加压强变化图

## 4.6 本章小结

本章研究了一种具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器，旨在解决传统多固体结构柔性压力传感器在高温模态畸变和干扰压力测量的问题。通过引入外部液态金属循环系统，该传感器实现了液态金属的电质共传，有效降低了敏感层的温度，从而减少了外部温度场对压力测量的干扰。

在 2.8W 热载荷条件下，液态金属以 2.0 mL/min 的输入流量流动时，柔性压力传感器在 0~12.5 kPa 的压力范围内展现出  $0.11 \text{ kPa}^{-1}$  的灵敏度，最大量程可达 30 kPa。与液态金属静止状态下的传感器相比，其电阻降低了  $18.5 \text{ m}\Omega$ ，降幅达到 38.1%。这一结果表明，液态金属的循环流动显著提升了传感器的散热性能和测量精度。

具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器具有优异的散热性能、高灵敏

度与宽量程、周期稳定性和快速响应等显著优势。这些性能优势使得该柔性压力传感器在热载荷场景下的压力测量中具有广阔的应用前景。例如，它可以用于飞行器蒙皮的压力监测，提供高精度的实时数据，帮助优化飞行器的气动性能和结构设计。在机器人领域，该传感器能够集成到机器人的关节和触觉系统中，实现对复杂环境的高精度感知。此外，它还可以应用于高温油路的压力监测，确保工业系统的安全运行。

## 第 5 章 结论与展望

### 5.1 研究成果

#### 5.1.1 研究成果总结

本文针对液态金属电质共传行为、不同温度场下液态金属的电-热耦合特性及其应用开展了研究，给出了相应的液态金属电质共传行为的电-液耦合和解耦的结构，以及不同温度场下液态金属的电-热耦合特性及其应用领域，对构建基于液态金属的电质共传系统提供了有力的技术支撑。主要完成工作如下：

（1）为探究镓基液态金属的电质共传行为，本研究对液态金属的电-液耦合和解耦特性进行了深入研究。分析了液态金属对常见金属的腐蚀情况，并设计了电-液耦合部件结构，研究了液态金属电-液耦合处的电阻分布，实现了液态金属的电-液耦合功能。通过仿真计算液态金属从连续相转换为离散相的滴定条件，设计了一款多管道液滴解耦器，满足了电质共传的液态金属的流场循环和电场中断需求。这一研究为液态金属电质共传行为在柔性电子器件中的应用提供了重要的技术支撑。

（2）构建了一种电流激励（焦耳热）温度场下的液态金属电质共传模型——液态金属柔性导线，针对导线焦耳热导致的热量堆积、电阻增大和设备损坏等问题，分析了焦耳热场景下液态金属柔性导线的传热规律，并实验探究了其温度分布情况，液态金属以 0.2mL/min 的流量流动时，柔性导线的最高温度从 35.2℃降低到 30.9℃，温度降低了 4.3℃，最高温度的降幅高达 12%。以电机电枢作为应用场景，采用先绕制后注射的方式和星形连接方式，制备了基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢。通过温度云图探究了其电质共传行为的电-热耦合特性，液态金属以 0.8mL/min 的流量循环流动，BLDC 电枢系统的最高温度从 54.9℃降低到 50.9℃，温度降低了 4℃，最高温度的降幅为 7.3%，并研究了感应电动势等电机性能。液态金属柔性导线展现出优异的散热性能，为电机热管理领域提供了新的解决方案。

（3）构建了一种外界热流激励温度场下的液态金属电质共传模型——具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器。针对热载荷场景下柔性压力传感器存在的材料制备困难、系统可靠性差和应用受限等问题，利用模具制备方式制备柔性传感器，并开展了流-固耦合、流-热耦合和多模态耦合特性研究。通过实验探

究了柔性压力传感器的灵敏度、噪声和带宽等关键性能,在 2.8W 热载荷条件下,液态金属以 2.0mL/min 的输入流量流动时,柔性压力传感器在 0~12.5kPa 的压力范围内展现出  $0.11\text{kPa}^{-1}$  的灵敏度。以高温液压管道为应用场景,柔性传感器贴合曲面管道,在热载荷场景下能有效降低温度对压力测量的干扰。基于液态金属电质共传行为的对流式敏感层为外部热流激励场景下的柔性传感器技术研究和应用提供了新的思路,拓宽了飞行器蒙皮、特种机器人和高温液油平台等领域的应用范围。

### 5.1.2 论文创新性

论文以电质共传行为的液态金属为研究对象,探究其电-热耦合特性和应用领域,深入开展了理论与实验研究,主要创新点如下:

(1) 现有的以液态金属为冷却介质的微型机电系统的热源与液冷系统双循环间存在固有的结构独立性,依然是以固液界面热传导原理,无法绕过固液传热界面。在生物领域,人体血液循环不仅具有传质(血液),还兼具传能(热能、营养)特性。流体传热领域出现了传质传热概念,本文利用液态金属材料,实现传质(液态金属)和传电(电能)循环耦合,绕过了机电系统的固液传热界面,提高液态金属柔性导线所能承载的电流密度上线,增加其的功率密度和热量传输效率。

(2) 热载荷场景下的柔性压力传感器的常用解耦方式是使用电导率与温度无关或相关性较低的导电复合材料,然而开发该材料仍是一项艰巨的挑战。为了解决该问题,本文采用了一种替代策略来制备适用于热负载场景的柔性压力传感器。该策略旨在稳定柔性压力传感器敏感层导电材料温度,减少热载荷引起的电阻波动,确保柔性传感器内导电材料的电导率一致性。本文提出的了一种柔性压力传感器,其特点是具有液态金属对流式敏感层。该传感器采用开放式微流道,这种独特结构设计中的液态金属具有双重功能,它既可以作为柔性压力传感器的信号检测和传输介质,也作为热管理系统中的冷却介质。

## 5.2 未来研究工作展望

(1) 基于液态金属柔性导线的 BLDC 电枢系统的优化和后续开发

目前的研究由于实验设备的限制,仅在小电流的安全范围内对电质共传的液

态金属柔性导线的温度场进行了测试,在后续的研究将对液态金属柔性导线进行满载测试,测试不同规格的液态金属柔性导线的最大满载电流及温度分布情况。研究表明,基于液态金属柔性导线的 BLDC 电机相比于传统电机的温度下降了约 10%,热沉降效果明显,但电流波动相对较大,在优化控制算法还未实现以前,作为伺服系统电机使用时存在一定的缺陷,后续研究将开展 BLDC 电机控制算法的开发和其他类型电机的完善。

### (2) 柔性压力传感器的微型化与集成化

本文提出的具有液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器在热载荷场景下展现出优异的性能,但其液态金属循环系统依赖于外部蠕动泵,导致整个传感器系统相对笨重,限制了其在某些领域的应用。为了克服这一限制,后续研究可以考虑采用更微型化的泵技术,如压电泵。压电泵凭借微型体积、高效性能和强大的流量控制能力,已在微流体技术领域得到广泛应用,成为实现精确流体控制的关键部件。最近的研究推出了两种新型基于阀的微型压电液体泵<sup>[78]</sup>,其尺寸仅为 7mm×7mm×1.5mm,流速可达 5mL/min,最大出口压力超过 20kPa。这些微型泵的引入将使柔性压力传感器系统更加微型化和集成化,拓宽其在高速飞行器、特种机器人和可穿戴设备等领域的应用范围。

此外,柔性压力传感器目前主要通过模具法制备,其尺寸和排列方式存在诸多限制,不便实现复杂排列的阵列化,限制了其应用范围。因此,后续研究将探索采用微纳 3D 打印、静电纺丝和软光刻等先进制备技术,以实现微流道尺寸在 50~70μm 范围内,传感器整体尺寸控制在 4~6mm 的微型化设计。这种设计不仅能够实现传感器的阵列化排列,还能显著提高其在机器人应用中的基于接触的机械成像能力,进一步拓展其应用领域。

### (3) 柔性压力传感器灵敏度与多模态感知性能提升

然而,基于电阻式传感机制的液态金属柔性压力传感器在灵敏度方面仍存在不足,尤其是在检测较小压力和测量范围方面。相比之下,电容式和压电式传感器具有更高的灵敏度和更宽的测量范围。为了提升液态金属柔性压力传感器的性能,后续研究可以通过优化微流道结构设计,例如设计凹凸结构的微流道和孔隙结构,以提高传感器的压缩和变形率,从而增强其对压力的响应能力。随着 3D 打印技术的发展和制作工艺的优化,进一步微型化微流道尺寸和提高电容式传感

器的测量精度将成为未来研究的重要方向。

因此本研究提出的液态金属对流式敏感层的柔性压力传感器在热载荷场景下展现出显著优势，但其系统微型化和性能提升仍存在较大空间。通过引入微型泵技术、微纳 3D 打印技术和优化传感器结构设计，有望进一步提升其性能和应用范围，为柔性电子技术的发展提供新的解决方案。

## 参考文献

- [1] 王磊,刘静.液态金属印刷电子墨水研究进展[J].影像科学与光化学,2014,32(4):382-392.
- [2] Guo CB, Long LS, Wu Y et al. Electromagnetic-Thermal Coupling Analysis of A Permanent-Magnet in-Wheel Motor with Cooling Channels in The Deepened Stator Slots[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 35: 102158.
- [3] Wang Q, Yu Y, Liu J. Preparations, Characteristics and Applications of the Functional Liquid Metal Materials[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20 (5): 1700781.
- [4] Gao YX, Liu J. Gallium-Based Thermal Interface Material with High Compliance and Wettability[J]. Applied Physics A-Materials Science Processing, 2012, 107 (3): 701-708.
- [5] Shang J, Tang LX, Guo KQ et al. Electronic Exoneuron Based on Liquid Metal for The Quantitative Sensing of The Augmented Somatosensory System[J]. Microsystems Nanoengineering, 2023, 9 (1): 112.
- [6] Goldoni R, Ozkan-Aydin Y, Kim YS et al. Stretchable Nanocomposite Sensors, Nanomembrane Interconnectors, and Wireless Electronics Toward Feedback-Loop Control of a Soft Earthworm Robot[J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2020, 12 (39): 43388-43397.
- [7] Li YX, Chen ZF, Zhang K et al. A Flexible Capacitive Pressure Sensor with Adjustable Detection Range Based on the Inflatable Dielectric Layer for Human-Computer Interaction[J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2024, 6 (30): 40250-40262.
- [8] Jang S, Kim C, Park JJ et al. A High Aspect Ratio Serpentine Structure for Use as A Strain-Insensitive, Stretchable Transparent Conductor[J]. Small, 2018, 14 (8): 1702818.
- [9] Jang KI, Li K, Chung HU et al. Self-Assembled Three Dimensional Network Designs for Soft Electronics[J]. Nature Communications, 2017, 8 (1): 15894.
- [10] Chen DP, Cai YZ, Cheng LF et al. Structure and Function Design of Carbon

- Nanotube-Based Flexible Strain Sensors and Their Application[J]. Measurement, 2023, 225: 113992.
- [11] Nag-Chowdhury S, Bellegou H, Pillin I et al. Non-Intrusive Health Monitoring of Infused Composites with Embedded Carbon Quantum Piezo-Resistive Sensors[J]. Composites Science and Technology, 2016, 123: 286-294.
- [12] Zha JW, Zhang B, Li RKY et al. High-Performance Strain Sensors Based on Functionalized Graphene Nanoplates for Damage Monitoring[J]. Composites Science and Technology, 2016, 123: 32-38.
- [13] 雷贤良,郭汶沧,李智宁.永磁驱动液态金属磁-电-流-热耦合特性研究[J].西安交通大学学报,2025,(03):1-10.
- [14] Dickey MD, Chiechi RC, Larsen RJ et al. Eutectic Gallium-Indium (EGaIn): A Liquid Metal Alloy for the Formation of Stable Structures in Microchannels at Room Temperature[J]. Advanced Functional Materials, 2008, 18 (7): 1097-1104.
- [15] 秦琴,刘宜伟,王永刚等.基于液态金属的柔性导线的制备方法研究进展[J].电子元件与材料, 2017,36(04):1-8.
- [16] 张振娇.镓基液态金属复合热界面材料的制备、性能与腐蚀性研究[D].天津理工大学,2023.
- [17] Ma YH, Liang ST, Jiang DB et al. Overview of Progress of Liquid Metal Applications in Nanomaterials, Flexible Electronics and New Energy[J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2024, 15 (4): 743-766.
- [18] Cao JW, Li X, Li YW. Liquid Metal-Based Electronics for On-Skin Healthcare[J]. Biosensors, 2023, 13 (1): 84.
- [19] Yerasimou Y, Werner TC, Pickert V. On The Application of Liquid Metal Cooling for Electronic Switching Devices[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 42: 101875.
- [20] Shahi P, Deshmukh AP, Hurnekar HY et al. Design, Development, and Characterization of a Flow Control Device for Dynamic Cooling of Liquid-Cooled Servers[J]. Journal of Electronic Packaging, 2022, 144 (4): 041008.
- [21] Ramos-Alvarado B, Feng B, Peterson GP. Comparison and Optimization of Single-Phase Liquid Cooling Devices for The Heat Dissipation of High-Power LED

- Arrays[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 59 (1-2): 648-659.
- [22] Zhang Z, Wu Z, Luo X et al. Numerical Study on Convective Heat Transfer of Liquid Metal Gallium in Turbine Guide Vane[J]. *Aerospace*, 2023, 10 (6): 548.
- [23] 宋思洪,廖强,沈卫东.采用低熔点液态金属工质散热的热沉传热数值模拟[J]. *机械工程学报*,2011,47(14):146-150.
- [24] Li P, Liu J, Zhou Y. Design of A Self-Driven Liquid Metal Cooling Device for Heat Dissipation of Hot Chips in A Closed Cabinet[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2014, 6 (1): 011009.
- [25] Deng YG, Zhang MM, Jiang Y et al. Two-stage multichannel liquid-metal cooling system for thermal management of high-heat-flux-density chip array[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 259: 115591.
- [26] Deng YG, Liu J. Hybrid Liquid Metal-Water Cooling System for Heat Dissipation of High Power Density Microdevices[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2010, 46 (11-12): 1327-1334.
- [27] 陈永华,酒晨霄,张文斌等.大功率电子器件的自驱动散热系统技术研究[J].*兵器装备工程学报*,2024,45(09):307-313.
- [28] Zhang KK, Kong SX, Li YY et al. Soft Elastomeric Composite Materials with Skin-Inspired Mechanical Properties for Stretchable Electronic Circuits[J]. *Lab on a Chip*, 2019, 19 (16): 2709-2717.
- [29] Khan MR, Eaker CB, Bowden EF et al. Giant and Switchable Surface Activity of Liquid Metal Via Surface Oxidation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111 (39): 14047-14051.
- [30] 周西林,刘宜伟,郭智勇等.基于液态金属的可拉伸导线制备与性能研究[J].*功能材料*, 2018,49(3):3152-3159.
- [31] Tang LX, Yang SJ, Zhang K et al. Skin Electronics from Biocompatible in Situ Welding Enabled by Intrinsically Sticky Conductors[J]. *Advanced Science*, 2022, 9 (23): 2202043.
- [32] 刘通,诸葛祥群,蓝嘉昕等.聚氨酯基压敏材料 3D 打印结合 GaInSn 液态金属导线制作柔性压力传感器的研究[J].*材料导报*,2022,36(15):186-190.

- [33] 蓝嘉昕.基于镓基液态金属的柔性压力传感器 3D 打印制备与性能研究[D].桂林理工大学,2020.
- [34] Liu YM, Yin R, Chen YY et al. Fully Elastic and High-Sensitivity Liquid Metal Sensor Based on Concave–Convex Structured Microchannel for Human Activity Monitoring and Object Recognition Sensor Array[J]. *Acs Applied Electronic Materials*, 2023, 5 (11), 6157-6164.
- [35] Zhu Z, Park SH, McAlpine CM. 3D printed deformable sensors[J]. *Science Advances*, 2020, 6 (25): eaba5575.
- [36] Qiu B, Chen XJ, Xu F et al. Nanofiber Self-Consistent Additive Manufacturing Process for 3D Microfluidics[J]. *Microsystems Nanoengineering*, 2022, 8 (1):102.
- [37] 黄彦博.基于电磁驱动液态金属电主轴轴芯冷却结构传热特性研究[D].佛山科学技术学院,2023.
- [38] Li FJ, Zhang ZK, Xie SM et al. Experimental Investigation on The Heat Transfer Performance of Galinstan Liquid Metal Driven by Electromagnetism[J]. *Thermal Science*, 2024, 28 (4): 2765-2775.
- [39] Wang L, Zhang XD, Liu J et al. Heat Dissipation System Based on Electromagnetic-Driven Rotational Flow of Liquid Metal Coolant[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2021, 13: 061023.
- [40] Zhu JY, Tang SY, Khoshmanesh K et al. An Integrated Liquid Cooling System Based on Galinstan Liquid Metal Droplets[J]. *Acs Applied Materials Interfaces*, 2016, 8, 2173.
- [41] 于子豪.基于液态金属的多模态压力传感器的原理及实验研究[D].重庆大学,2022.
- [42] 唱睿喆,陈怡.基于液态金属磁流变弹性体的柔性触觉传感器[J].*传感器与微系统*,2024,43(09):79-82.
- [43] Wang Y, Jin J, Lu Y et al. 3D Printing of Liquid Metal Based Tactile Sensor for Simultaneously Sensing of Temperature and Forces[J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2021, 12 (3): 269–285.
- [44] Wang Y, Li Y, Mei D et al. Liquid Metal-Based Wearable Tactile Sensor for Both Temperature and Contact Force Sensing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21 (2):

1694-1703.

- [45] Zhang P, Fu JH, Liu MY et al. Liquid-Metal-Based Stretchable Dual-Parameter Sensor for Simultaneous Detection of Deformation and Temperature[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8 (5).
- [46] Wang C, Li J, Fang ZZ et al. Temperature-Stress Bimodal Sensing Conductive Hydrogel-Liquid Metal by Facile Synthesis for Smart Wearable Sensor[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2021, 43 (1): e2100543.
- [47] Pereira RD, Cima CA. Thermal Compensation Method for Piezoresistive Pressure Transducer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-7.
- [48] Zhou GW, Zhao YL, Guo FF et al. A Smart High Accuracy Silicon Piezoresistive Pressure Sensor Temperature Compensation System[J]. Sensors, 2014, 14 (7): 12174-12190.
- [49] He WN, Li GY, Zhang SQ et al. Polypyrrole/Silver Coaxial Nanowire Aero-Sponges for Temperature-Independent Stress Sensing and Stress-Triggered Joule Heating[J]. Acs Nano, 2015, 9 (4): 4244-4251.
- [50] 关子横.多元镓基液态金属的导电性能研究[D].燕山大学,2023.
- [51] Zhu L, Wang B, Handschuh-Wang S et al. Liquid Metal-Based Soft Microfluidics[J]. Small, 2020, 16 (9): e1903841.
- [52] Tevis ID, Newcomb LB, Thuo M. Synthesis of Liquid Core-Shell Particles and Solid Patchy Multicomponent Particles by Shearing Liquids into Complex Particles (SLICE)[J]. Langmuir, 2014, 30 (47): 14308-14313.
- [53] 蔡志洋,孟旭,张登科等.强磁场影响下金属相变传热的MHD效应实验研究[J].中国科学院大学学报(中英文),2024,41(06):746-754.
- [54] 张春小,崔丹丹,杜轶等.镓基液态金属的结构与物性[J].自然杂志,2023,45(5):340-354.
- [55] 陆奔,李安敏,杨树靖等.磁性镓基液态金属复合材料的研究进展[J].材料导报,2024,38(8):170-184.
- [56] Choi S, Han SI, Kim D et al. High-Performance Stretchable Conductive Nanocomposites: Materials, Processes, and Device Applications[J]. Chemical

- Society Reviews, 2018, 48 (6): 1566-1595.
- [57] 董泉润,阳倦成,倪明玖.水平磁场作用下液态金属自由射流破碎特性的实验研究[J].中国科学院大学学报,2022,39(05):577-585.
- [58] Gai YH, Kimiabeigi M, Chong YC et al. Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples, and Computation Methods[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (3): 1681-1692.
- [59] Zou JB, Zeng DP, Xu YX et al. An Indirect Testing Method for The Mechanical Characteristic of Multiunit Permanent-Magnet Synchronous Machines with Concentrated Windings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62: 7402-7411.
- [60] 汤勇,孙亚隆,郭志军等.电机散热系统的研究现状与发展趋势[J].中国机械工程,2021,32(10):1135-1150.
- [61] Gul O, Kim K, Gu J et al. Sensitivity-Controllable Liquid-Metal-Based Pressure Sensor for Wearable Applications[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2021, 3 (9): 4027-4036.
- [62] 刘会聪,杨梦柯,袁鑫等.液态金属柔性感知的的人机交互软体机械手[J].中国机械工程,2021,32(12):1470-1478.
- [63] Wang SL, Nie YY, Zhu HY et al. Intrinsically Stretchable Electronics with Ultrahigh Deformability to Monitor Dynamically Moving Organs[J]. Science Advances, 2022, 8 (13): eabl5511.
- [64] Sheng L, Zhang J, Liu J. Diverse Transformations of Liquid Metals Between Different Morphologies[J]. Advanced Materials, 2014, 26 (34): 6036-6042.
- [65] Gong W et al. Capacitive Flexible Haptic Sensor Based on Micro-Cylindrical Structure Dielectric Layer and Its Decoupling Study[J]. Measurement, 2023, 223: 113785.
- [66] Yi Y, Liu EZ, Deng H. Porous Flexible Piezoresistive Sensor Using Liquid Metal for Low Pressure Detection[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2024, 375: 115536.
- [67] Tian HY, Chen H, Liu C et al. Serpent-Inspired Multimodal Flexible Sensor for Multi-Signal Measurement Based on PVDF-TrFE/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanofibers[J].

- Measurement, 2024, 236: 115074.
- [68] Qu XC, Xue JT, Liu Y et al. Fingerprint-Shaped Triboelectric Tactile Sensor[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107324.
- [69] Hamaguchi Shota, Kawasetsu Takumi, Horii Takato et al. Soft Inductive Tactile Sensor Using Flow-Channel Enclosing Liquid Metal[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5 (3): 4028-4034.
- [70] 张琦.基于液态金属的柔性压力传感器的研究[D].深圳大学,2020.
- [71] Park YL, Majidi C, Kramer R et al. Hyperelastic Pressure Sensing with A Liquid-Embedded Elastomer[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20 (12): 125029.
- [72] Zhou XP, He Y, Zeng J. Liquid Metal Antenna-Based Pressure Sensor[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28 (2): 025019.
- [73] Jing MY, Zhou J, Zhang PC et al. Porous AgNWs/Poly(vinylidene fluoride) Composite-Based Flexible Piezoresistive Sensor with High Sensitivity and Wide Pressure Ranges[J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2022, 14: 55119-55129.
- [74] Liu C, Xu L, Kong LY et al. High-Performance Piezoresistive Flexible Pressure Sensor Based on Wrinkled Microstructures Prepared from Discarded Vinyl Records and Ultra-Thin, Transparent Polyaniline Films for Human Health Monitoring[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2022, 10: 13064-13073.
- [75] Chen SJ, Zhou BG, Guo XJ. Large Area One-Step Facile Processing of Microstructured Elastomeric Dielectric Film for High Sensitivity and Durable Sensing over Wide Pressure Range[J]. ACS Applied Materials Interfaces, 2016, 8: 20364-20370.
- [76] Park SW, Das PS, Chhetry A et al. A Flexible Capacitive Pressure Sensor for Wearable Respiration Monitoring System[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17: 6558-6564.
- [77] Park DY, Joe DJ, Kim DH et al. Self-Powered Real-Time Arterial Pulse Monitoring Using Ultrathin Epidermal Piezoelectric Sensors[J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1702308.
- [78] Liu RY, Liu GJ, Wang M et al. Novel Miniature Valve-Based Piezoelectric Liquid

Pump[J]. *Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems*, 2024, 31 (1): 219-229.

## 攻读硕士学位期间承担的科研任务与主要成果

### （一）发表的学术论文

- [1] Study of an Active Heat-Dissipating Liquid Metal Wire with Electrical-Material Cotransmission Characteristics and Its Applications[J]. Advanced Engineering Materials, 2024 26 (9): 202301998. <https://doi.org/10.1002/adem.202301998>. (JCR Q2, 中科院三区, 对应第二章和第三章, 一作, 已见刊)
- [2] 液态金属柔性导线跨尺度制备技术和应用研究进展[J]. 汕头大学学报(自然科学版), 2024, 39(03): 24-37. (对应第一章, 一作, 已见刊)
- [3] Multimodal Response Characteristics of Convective Liquid Metal Sensitive Layers in Flexible Pressure Sensor[J]. Microsystems & Nanoengineering, <https://doi.org/10.1038/s41378-025-00915-5> (JCR Q1, 中科院一区 Top, 对应第二章和第四章, 一作, 已见刊)

### （二）申请的发明专利

- [1] 一种电流与交变流场双循环的液态金属导线温度平衡系统[P]. 中国, CN116844762A, 2024-04-19. (实质审查, 一作)

### （三）参加的比赛项目

- [1] 第 18 届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛“黑科技展示活动”安徽省星系（特等）奖（2/3）
- [2] 第 18 届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛“黑科技展示活动”全国恒星（一等）奖（2/3）
- [3] 2022 年全国大学生英语翻译大赛荣获研究生组省级三等奖（1/1）

尚德致学 唯实惟新

