

分类号: TG506

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220120102



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

# 硕士学位论文

题 目 碳纤维复合材料制孔试验  
及加工机理研究

论 文 作 者 王 诚

指 导 教 师 苏永生(副教授)

学 科 ( 专 业 ) 机械工程

研 究 方 向 机械设计及理论

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号: TG506

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220120102

## 碳纤维复合材料制孔试验及加工机理研究

### EXPERIMENTAL AND PROCESSING MECHANISM RESEARCH ON HOLE-MAKING OF CFRP

学 生 姓 名: 王诚

指 导 教 师: 苏永生 (副教授)

专 业: 机械工程

研 究 方 向: 机械设计及理论

论文答辩日期: 2025 年 5 月 13 号

## 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它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：王斌

日期：2025 年 5 月 20 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：

王斌

指导教师签名：

蒋永生

日期： 2025 年 5 月 20 日

日期： 2025 年 5 月 20 日

## 碳纤维复合材料制孔试验及加工机理研究

### 摘 要

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)因其具有良好的耐腐蚀性、较低的热膨胀系数等优异性能,被广泛用于航空航天、军事等重要科学领域,但由于其本身具有各向异性、非均质性等特点,加工过程中容易产生毛刺、分层等不可修复的加工缺陷,这使得 CFRP 的加工质量和加工效率大大降低。随着高端装备构件对制孔精度和质量的要求进一步提高,能否实现高效低损伤制孔加工,直接关系到我国航空航天等重要科学领域的发展速度和发展水平,是当前先进加工学术界和航空装备业迫切需要解决的重大技术问题之一。本文在不同制孔加工条件下开展了 CFRP 试验研究,分析了不同工艺参数和制孔方法对加工性能的影响。主要研究内容如下:

(1) 本文采用了传统干钻制孔、二氧化碳低温冷却制孔和超声振动干钻制孔三种制孔方法,分析了不同参数条件下 PCD 常规刀具和组织构刀具对 CFRP 制孔加工性能的影响。

(2) 对比分析了不同进给速度和主轴转速条件下,传统干钻和低温冷却干钻对 CFRP 制孔性能的影响规律。结果表明,相较于传统干钻制孔,采用二氧化碳低温冷却制孔能够有效抑制刀具前刀面的切屑黏结。

(3) 对比分析了不同制孔参数条件下,传统干钻和超声振动干钻对 CFRP 制孔性能的影响规律。结果表明,相较于传统干钻,采用超

声干钻制孔能够有效抑制孔入口处毛刺的产生,制孔过程中断屑效果更好。

(4) 本文对不同条件下 CFRP 制孔试验的结果进行了讨论,分析了不同因素对制孔性能的影响,为实现 CFRP 的高效高质量加工提供了一定的参考。

**关键词:** 碳纤维复合材料, 制孔, 超声振动, 低温冷却, PCD 刀具, 切削力

# EXPERIMENTAL AND PROCESSING MECHANISM RESEARCH ON HOLE-MAKING OF CFRP

## ABSTRACT

Carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites have gained significant popularity in a variety of fields, including aerospace, military, and scientific research due to their exceptional properties, such as their ability to exhibit superior corrosion resistance and a low coefficient of thermal expansion. However, their inherent anisotropic and heterogeneous characteristics frequently result in deleterious machining defects, including burrs and delamination, during the manufacturing process. These defects can have a substantial impact on the quality and efficiency of the machining process. The necessity for high-end equipment components to meet increasingly stringent accuracy and quality standards has been well-documented. Achieving efficient and damage-free hole-making processes is of paramount importance in the context of China's scientific progress, particularly in the field of aerospace research. This issue represents a significant technical challenge that demands immediate attention from academia and the aviation equipment industry. In this paper, CFRP experiments were conducted under various hole-making conditions, and the impacts of different

process parameters and methods on machining performance were systematically analyzed. The primary research contents are summarized as follows:

(1) In this paper, three drilling methods, traditional dry drilling, carbon dioxide low-temperature cooling and ultrasonic vibration dry drilling, were used to analyze the influence of PCD conventional tools and texture tools on the processing performance of CFRP drilling under different parameters.

(2) A comparative analysis is also conducted on the influence of feed rate and spindle speed on CFRP hole-making performance between traditional dry drilling and cryogenic cooling drilling. The results indicated that, in comparison with traditional dry drilling, carbon dioxide cryogenic cooling drilling can effectively suppress chip adhesion on the tool rake face.

(3) The impact of conventional dry drilling and ultrasonic vibration dry drilling on the performance of CFRP was examined and analysed under various hole-making parameters. The findings indicate that ultrasonic dry drilling can effectively suppress the formation of burrs at the hole's entrance when compared with traditional dry drilling. Additionally, ultrasonic dry drilling demonstrates a superior capacity to disrupt the process of hole making.

This paper presents an in-depth discussion of the results obtained

from drilling experiments conducted on CFRP under varying conditions. It systematically analyzes the impact of multiple factors on hole-making performance and offers valuable insights for achieving high-efficiency and high-quality machining of CFRP materials.

**KEY WORDS:** carbon fiber reinforced polymer, hole-making, ultrasonic vibration, cryogenic cooling, PCD tools, cutting forces

## 目录

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| 摘 要 .....                        | I    |
| ABSTRACT.....                    | III  |
| 目 录 .....                        | VI   |
| 插图清单 .....                       | VIII |
| 插表清单 .....                       | X    |
| 第 1 章 绪 论 .....                  | 1    |
| 1.1 课题研究背景及意义.....               | 1    |
| 1.2 国内外研究现状.....                 | 3    |
| 1.2.1 CFRP 材料常规制孔研究.....         | 3    |
| 1.2.2 CFRP 材料低温制孔研究.....         | 6    |
| 1.2.3 CFRP 材料超声制孔研究.....         | 8    |
| 1.2.4 课题研究现状总结及目的.....           | 10   |
| 1.3 本文研究内容.....                  | 11   |
| 第 2 章 CFRP 材料制孔思路及试验设计 .....     | 12   |
| 2.1 制孔思路分析.....                  | 12   |
| 2.2 制孔方案设计.....                  | 12   |
| 2.3 试验参数设计.....                  | 15   |
| 2.4 制孔加工设备.....                  | 16   |
| 2.5 制孔刀具设计.....                  | 18   |
| 2.6 本章小结.....                    | 19   |
| 第 3 章 CFRP 材料 PCD 刀具低温制孔试验 ..... | 20   |
| 3.1 不同进给速度下干式和低温制孔试验.....        | 20   |
| 3.1.1 不同制孔方式下的切削力分析.....         | 20   |
| 3.1.2 不同条件下孔径尺寸及相对误差.....        | 22   |
| 3.1.3 不同制孔条件下刀具表面黏结.....         | 24   |
| 3.1.4 孔壁内部形貌及表面缺陷分析.....         | 25   |
| 3.2 不同主轴转速下干式和低温制孔试验.....        | 26   |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.2.1 制孔过程切削力分析.....            | 27 |
| 3.2.2 入口尺寸及误差分析.....            | 29 |
| 3.2.3 入口处表面形貌分析.....            | 31 |
| 3.2.4 孔内壁表面形貌分析.....            | 32 |
| 3.2.5 刀具的表面黏结分析.....            | 35 |
| 3.3 制孔机理讨论和分析.....              | 36 |
| 3.4 本章小结.....                   | 38 |
| 第 4 章 CFRP 材料 PCD 刀具超声制孔试验..... | 40 |
| 4.1 不同进给量下超声制孔试验.....           | 40 |
| 4.1.1 不同制孔方式下切削力分析.....         | 40 |
| 4.1.2 孔入口直径尺寸及相对误差.....         | 43 |
| 4.1.3 复材孔入口处表面形貌分析.....         | 44 |
| 4.1.4 PCD 刀具的表面黏结状况.....        | 46 |
| 4.2 不同主轴转速下超声制孔试验.....          | 46 |
| 4.2.1 不同制孔方式下切削力分析.....         | 47 |
| 4.2.2 孔入口直径尺寸及相对误差.....         | 50 |
| 4.2.3 复材孔入口处表面形貌分析.....         | 51 |
| 4.2.4 PCD 刀具的表面黏结状况.....        | 53 |
| 4.3 制孔机理讨论和分析.....              | 55 |
| 4.4 本章小结.....                   | 56 |
| 第 5 章 结论与展望 .....               | 58 |
| 5.1 全文总结.....                   | 58 |
| 5.2 研究展望.....                   | 59 |
| 参考文献 .....                      | 61 |
| 攻读硕士学位期间取得的成果及参与的项目 .....       | 70 |
| 致 谢 .....                       | 71 |

## 插图清单

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 图 1-1 复合材料在波音、空客飞机上的用量 <sup>[1]</sup> .....                  | 1  |
| 图 1-2 复材加工常见加工缺陷 .....                                       | 2  |
| 图 1-3 钻孔过程中切削力分布图 <sup>[20]</sup> .....                      | 4  |
| 图 1-4 基于 SIMULINK 的 CFRP 钻削过程轴向力模糊控制仿真框图 <sup>[41]</sup> ... | 6  |
| 图 1-5 超声振动辅助系统 .....                                         | 8  |
| 图 2-1 超声振动制孔示意图 .....                                        | 13 |
| 图 2-2 CFRP 材料制孔 .....                                        | 13 |
| 图 2-3 制孔过程中切削力信号 .....                                       | 14 |
| 图 2-4 力信号寻峰分析 .....                                          | 15 |
| 图 2-5 低温冷却制孔试验现场 .....                                       | 17 |
| 图 2-6 超声辅助干钻试验现场 .....                                       | 17 |
| 图 2-7 PCD 刀具及表面微织构图 .....                                    | 19 |
| 图 3-1 不同制孔方式下 X 轴方向上的切削力变化 .....                             | 20 |
| 图 3-2 不同制孔方式下 Y 轴方向上的切削力变化 .....                             | 21 |
| 图 3-3 不同制孔方式下 Z 轴方向上的切削力变化 .....                             | 21 |
| 图 3-4 不同制孔方式下总切削力变化 .....                                    | 22 |
| 图 3-5 不同制孔下孔入口直径尺寸图 .....                                    | 23 |
| 图 3-6 不同制孔方式下孔直径相对误差图 .....                                  | 24 |
| 图 3-7 不同制孔方式下刀具前刀面抗黏结状况 .....                                | 25 |
| 图 3-8 低温和干式条件下的内壁孔表面形貌 .....                                 | 26 |
| 图 3-9 不同制孔条件下 X 轴方向上的切削力变化 .....                             | 27 |
| 图 3-10 不同制孔条件下 Y 轴方向上的切削力变化 .....                            | 28 |
| 图 3-11 不同制孔条件下 Z 轴方向上的切削力变化 .....                            | 28 |
| 图 3-12 不同制孔方式下孔入口直径尺寸图 .....                                 | 29 |
| 图 3-13 不同制孔方式下孔径相对误差图 .....                                  | 30 |
| 图 3-14 不同制孔方法下孔入口处局部表面形貌图 .....                              | 31 |

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 图 3-15 CPC 条件下孔入口处整体形貌图.....      | 32 |
| 图 3-16 不同制孔方式下孔内壁表面粗糙度 .....      | 33 |
| 图 3-17 不同制孔方式下孔内壁扫描电镜图 .....      | 34 |
| 图 3-18 不同方式制孔后刀具前刀面光学 SEM 图 ..... | 36 |
| 图 4-1 常规刀具干钻和织构刀具干钻 .....         | 40 |
| 图 4-2 常规刀具干钻和常规刀具超声干钻 .....       | 41 |
| 图 4-3 常规刀具超声干钻和织构刀具超声干钻 .....     | 42 |
| 图 4-4 织构刀具干钻和织构刀具超声干钻 .....       | 42 |
| 图 4-5 不同制孔方式下孔入口直径尺寸图 .....       | 43 |
| 图 4-6 不同制孔方式下孔径相对误差图 .....        | 44 |
| 图 4-7 不同制孔方式下孔入口外部宏观形貌 .....      | 45 |
| 图 4-8 不同制孔方式下孔入口处表面微观形貌 .....     | 45 |
| 图 4-9 不同制孔方式下刀具表面黏结情况 .....       | 46 |
| 图 4-10 不同转速条件下总切削力变化曲线 .....      | 47 |
| 图 4-11 干钻条件下常规刀具和织构刀具 .....       | 48 |
| 图 4-12 常规刀具条件下干钻和超声干钻 .....       | 48 |
| 图 4-13 超声下常规刀具和织构刀具 .....         | 49 |
| 图 4-14 织构刀具下干钻和超声干钻 .....         | 49 |
| 图 4-15 不同制孔方式下孔径尺寸图 .....         | 50 |
| 图 4-16 干钻和超声干钻条件下孔入口处宏观形貌图 .....  | 52 |
| 图 4-17 不同制孔方式下孔入口处微观形貌 .....      | 53 |
| 图 4-18 刀具底面光学电镜图 .....            | 54 |
| 图 4-19 刀具表面黏结光学电镜图 .....          | 54 |

## 插表清单

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 表 2-1 制孔试验 1 的切削参数 ..... | 15 |
| 表 2-2 制孔试验 2 的切削参数 ..... | 16 |
| 表 2-3 制孔试验 3 的切削参数 ..... | 16 |
| 表 2-4 制孔试验 4 的切削参数 ..... | 16 |
| 表 2-5 PCD 刀具参数表 .....    | 18 |
| 表 4-1 孔径的直径误差和相对误差 ..... | 51 |

## 第1章 绪 论

### 1.1 课题研究背景及意义

碳纤维增强树脂基复合材料是由高强碳纤维增强相与低强树脂基相复合而成的新型复合材料，因其具有耐热性好、抗腐蚀性好、比模量大、比强度高、可设计性能强等优点，已经被广泛应用于航空航天、军事、医学等各种重要科学领域<sup>[1-3]</sup>，且其用量占比更是被当作重要指标来衡量装备是否先进<sup>[4]</sup>。例如在航空航天领域，复合材料已经大量应用于飞机的主要结构件当中。如下图 1-1 所示，在空客 A350WXB 和波音 B787 的主要结构件上，先进复合材料的用量占比已经超过了 50%，而复合材料在我国新一代国产大飞机 C929 的结构件上的用量占比预计也会达到 50%以上<sup>[5-6]</sup>。大量先进复合材料在飞机结构件上的使用，在保证质量安全的前提条件下，可以降低约 40%的飞机重量<sup>[7]</sup>，同时也使得经济效益得到大大的提高。

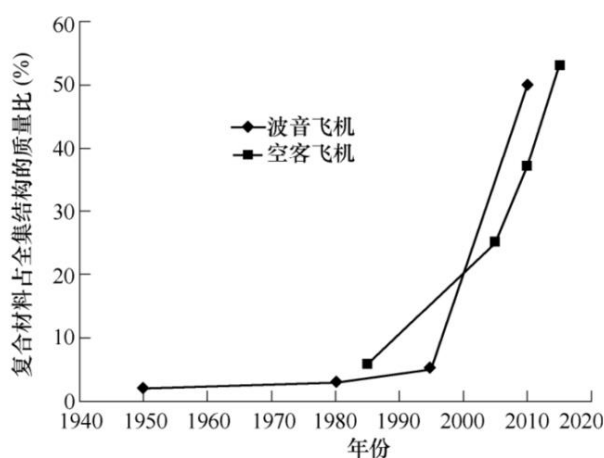


图 1-1 复合材料在波音、空客飞机上的用量<sup>[1]</sup>

碳纤维复合材料在作为结构件使用的时候，通常会采用螺栓连接或铆钉连接的方式与其它结构件进行装配连接，因此根据不同的使用环境和工作条件，需要对 CFRP 材料加工出不同直径的孔，根据相关资料统计显示，在 CFRP 材料加工过程中，制孔加工的比例已经超过了 50%<sup>[8-11]</sup>。例如，在一架波音 787 飞机上大约有一万多个孔连接，一架 F-16 战斗机在装配过程中则需要约 24 万个孔。然而在飞机零部件装配过程中，因为制孔质量不达标而造成的零件报废比例高达 60%<sup>[11]</sup>，由此可见，在 CFRP 材料的机械加工中，制孔加工显得尤为重要。

碳纤维复合材料细观上呈多相混合态，宏观上呈层叠、强各向异性、非均质性等特征，是国际公认的典型难加工材料<sup>[12-13]</sup>。现阶段对 CFRP 材料的加工方式主要有两种，一种是以超声振动辅助加工、化学方法加工、激光加工、高压水射流加工、电火花加工等为主的特种加工方法，另外一种还是以铣削、磨削、车削、钻削等为主的传统加工方法<sup>[14]</sup>。采用特种加工方法加工 CFRP 材料时，加工的工件精度很高，与理论设计数据之间的误差相对较小，但缺点是加工效率低，且加工成本很高，不适合用于大量生产。而传统机械加工的理念和方法在加工 CFRP 材料时，极易产生毛刺、撕裂、分层等加工缺陷<sup>[15-16]</sup>，如下图 1-2 所示，且相较于金属材料，CFRP 材料的导热效率相对较低<sup>[17]</sup>，使得加工区域产生的切削热不能够及时有效的排出，这不仅会加速刀具的磨损，降低刀具的使用寿命，还会影响工件的整体质量，导致制孔精度达不到使用标准，严重降低了 CFRP 材料的制孔质量和制孔效率，并且在一定程度上导致了加工成本的升高<sup>[18]</sup>。以 CFRP 为代表的先进复合材料能否实现高效低损伤加工、实现低缺陷的加工质量，直接关系到我国航空航天等重要领域高端装备的发展速度，对解决我国先进复合材料高质高效切削加工瓶颈和先进制造业的发展水平至关重要，因此，探寻 CFRP 材料高效、高质量、低损伤制孔的加工理论和方法任然是研究关键。

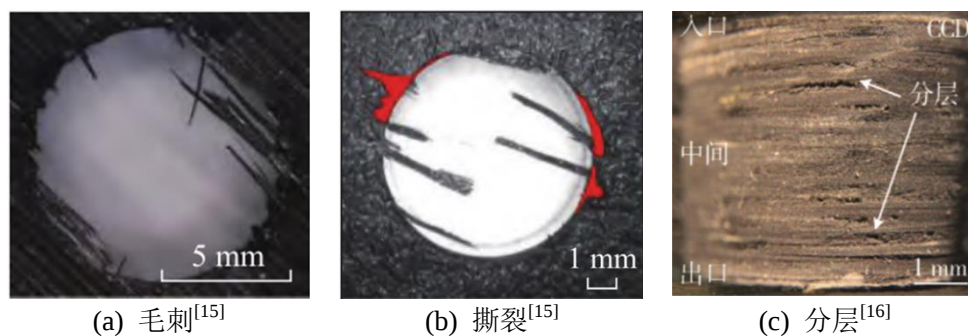


图 1-2 复材加工常见加工缺陷

综上所述，为了探究提高碳纤维复合材料制孔质量和效率的方法，本文在不同制孔方式条件下通过改变相应的切削参数，对 CFRP 材料的制孔性能和加工机理展开了研究。首先，在传统干钻制孔的基础上添加二氧化碳低温冷却技术，对 CFRP 材料进行制孔试验，然后又将传统干钻制孔与超声振动辅助技术相结合，对其进行制孔试验，试验结束后分别对其切削性能进行分析，探求其内在的加工机理。在本文中，系统研究了在不同制孔方式条件下改变进给速度、进给量、主轴转速对制孔过程中产生的切削力、孔入口直径尺寸、孔径相对误差、孔入口处

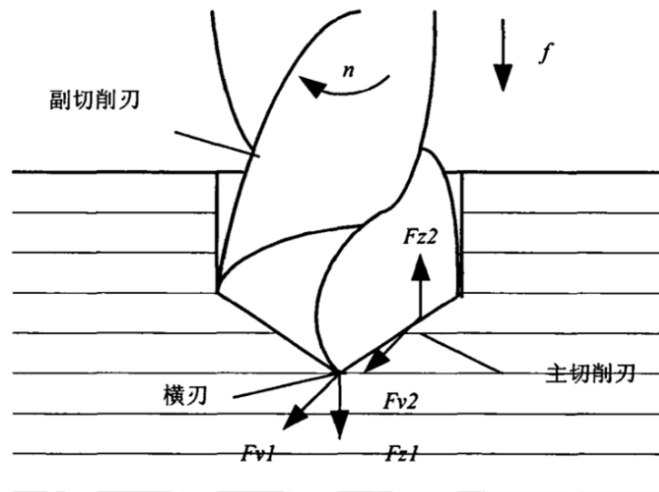
表面形貌、孔内壁的表面形貌及刀具表面黏结的影响规律，这对降低 CFRP 材料钻削加工过程中产生的加工缺陷、实现 CFRP 材料高效、高质量、低损伤加工提供了一定的借鉴和参考。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 CFRP 材料常规制孔研究

碳纤维复合材料的应用场景非常广泛，应用环境非常的复杂，在对其进行二次加工过程中，钻削加工是尤为重要的一环，但是由于 CFRP 本身的特性，在制孔加工过程中极易产生分层、毛刺、撕裂等加工缺陷，严重降低了制孔效率和质量，所以如何提高复合材料制孔加工效率备受国内外专家学者的关注。

付鹏强等<sup>[19]</sup>通过对现有制孔技术、制孔机理以及制孔缺陷的分析和探讨，提出了通过优化切削工艺参数、应用新型排屑制孔方式，实现高效绿色制孔加工。赵悦<sup>[20]</sup>和孙路华等<sup>[21]</sup>采用硬质合金钻头对 CFRP 材料开展了制孔试验研究，并探究了工艺参数与制孔质量之间的影响规律，制孔过程中切削力如下图 1-3 所示。试验结果表明，随着主轴转速的增大，切削力会变小，制孔精度会提高。张厚江<sup>[22]</sup>对 CFRP 材料的高速、高效、高质量制孔技术方向开展了研究，分析了进给速度、进给量、转速等因素对切削力的影响，得到了进给速度、切削速度以及轴向力之间的经验公式。研究结果表明，随着主轴转速的增大，制孔过程中产生的切削力会降低，而进给速度和刀具直径的增大会造成切削力的增大。Won 等<sup>[23]</sup>针对 CFRP 材料开展了一系列的制孔试验，研究了制孔过程中有无先导孔对切削力的影响。研究结果表明，相较于无先导孔制孔，在工件上提前预制先导孔能够有效降低制孔过程中产生的切削力，对于分层缺陷的抑制也有良好的作用。Guo 等<sup>[24]</sup>提出了一种模型用来预测麻花钻对 CFRP 材料钻削过程中产生的轴向力和扭矩，纤维取向、进给速度、主轴转速等因素均为该模型主要考虑的因素。李纯杰等<sup>[25]</sup>构建了一个切削仿真模型来研究分析 CFRP 材料二次切削过程中切削损伤的演变及切削表面的形成机制。结果表明，二次切削的合力随着主轴转速的增大呈现出减小的趋势，而进给速度的增大会造成切削力的增大。

图 1-3 钻孔过程中切削力分布图<sup>[20]</sup>

邱新义等<sup>[26]</sup>研究发现,适当的钻头结构能够有效弥补制孔过程中的加工损失和加工缺陷。寇万胜<sup>[27]</sup>通过对比试验和正交试验的方法,对 CFRP 材料开展了直径为 1.5 mm 的制孔试验,探究了制孔参数和刀具对制孔性能的影响。结果发现,剥离层可以有效降低制孔过程中的分层因子,且对孔壁粗糙度的影响不大,而进给速度是切削力和分层因子主要的影响参数。李树健等<sup>[28]</sup>以碳纤维复合材料为研究对象,对其层间钻削出口损伤的形成机理进行了研究,分析了钻头角度等因素对制孔性能的影响,并且构建了一个相关的数学模型。研究结果表明,出口毛刺会随着钻头顶角的增加而减少。杨进<sup>[29]</sup>和魏良耀<sup>[30]</sup>以碳纤维复合材料为研究对象,采用不同的钻头对其进行钻削制孔试验。研究结果表明,相较于其它刀具,采用涂层刀具能够有效降低制孔过程中产生的切削力和切削温度。Wang 等<sup>[31]</sup>采用螺旋铣孔的方式对 CFRP 材料开展了制孔试验研究,研究分析了工艺参数、刀具磨损对制孔过程中铣削力的影响规律,同时建立了一个可以预测铣削力的模型。试验结果表明,铣削力会随着进给速度的增大而增大,且通过预测模型预测的结果与实际测量值之间的最大误差为 18%。Raj 等<sup>[32]</sup>在实验中分别采用双刃钻头、麻花钻头、金刚石涂层钻头和八面钻头对 CFRP 材料进行制孔试验,对比分析了不同刀具的使用寿命。研究结果发现,在制孔过程中,相较于其它三种钻头,金刚石涂层钻头表现的性能最好。王海艳等<sup>[33]</sup>以 CFRP 材料为研究对象,基于能量法的前提下首次建立了一个模型用来预测球头铣刀倾斜螺旋铣孔的轴向力,对比分析了不同参数对 CFRP 材料制孔性能的影响规律。研究结果表明,制孔过程中产生的轴向力的大小会受到球头铣刀倾斜角度的直接影响。

石文天等<sup>[34]</sup>为了改善复合材料制孔过程中产生的加工缺陷,开展了微量润滑和干式制孔试验对比研究,结果发现,采用微量润滑方式能够更好地降低切削力、提高制孔尺寸精度及孔壁质量。张俊清等<sup>[35]</sup>在实验中采用了高速电火花加工方法对 CFRP 材料开展了制孔试验研究。研究结果表明,在制孔过程中,相较于没有添加喷雾冷却加工,采用喷雾冷却能够有效减少表面热影响区,进一步提高了复材的制孔质量和加工效率。Kumar 等<sup>[36]</sup>针对 CFRP 材料采用了一种新型微孔放电钻削工艺对其进行制孔加工试验,主要通过改变电压、电容以及刀具的转速来探究其加工机理。研究结果表明,相对较高的电压和电容有助于增大制孔过程中的材料去除率。Li 等<sup>[37]</sup>在试验中采用了连续波(CW)光纤激光器对 CFRP 进行了制孔试验研究,通过单通和多通的策略在工件上分别钻削直径为 2 mm 和 6 mm 的孔,并分析了其内在的加工机理。研究结果表明,相较于 2 mm 的孔,高功率光纤激光器更适合于钻削直径为 6 mm 的孔。Ouyang 等<sup>[38]</sup>针对 CFRP 材料采用了一种新型皮秒激光技术制孔方法,在工件上加工出直径为 5 mm 的孔。试验结果表明,与传统的制孔方法相比,皮秒激光加工制孔对于 CFRP 材料的拉伸强度和疲劳性能的改善效果明显,可以显著提高制孔质量和加工性能。Li 等<sup>[39]</sup>在不同切削参数条件下采用水射流方法对 CFRP 材料进行制孔加工试验,研究了横向速度、水射流压力等对加工性能的影响。研究结果表明,在相同加工参数条件下,相较于纯水水射流切割,采用磨料水射流切割工件时的抗拉强度显著提高。温泉<sup>[40]</sup>以碳纤维/环氧树脂复合材料为研究对象,通过理论分析、模拟试验以及有限元相结合的方法对其制孔过程中的力学性能展开了研究,并根据制孔过程中产生的切削力建立了相应的解析模型。研究结果表明,树脂拉伸失效是复合材料内部的主要失效形式,且相较于传统的麻花钻,采用金刚石磨料套料制孔工具制孔能够有效减少分层损伤,提高整体的加工质量。詹迪雷等<sup>[41]</sup>为了提高 CFRP 材料的制孔质量及制孔效率,采用试验与仿真相结合的方法对制孔过程中产生的轴向力进行了研究。结果表明,通过仿真试验的参数对轴向力进行调控是可行的,如图 1-4 所示,且能够提高材料的制孔加工性能,这为提高复合材料的制孔效率和制孔精度提供了一种新的思路。

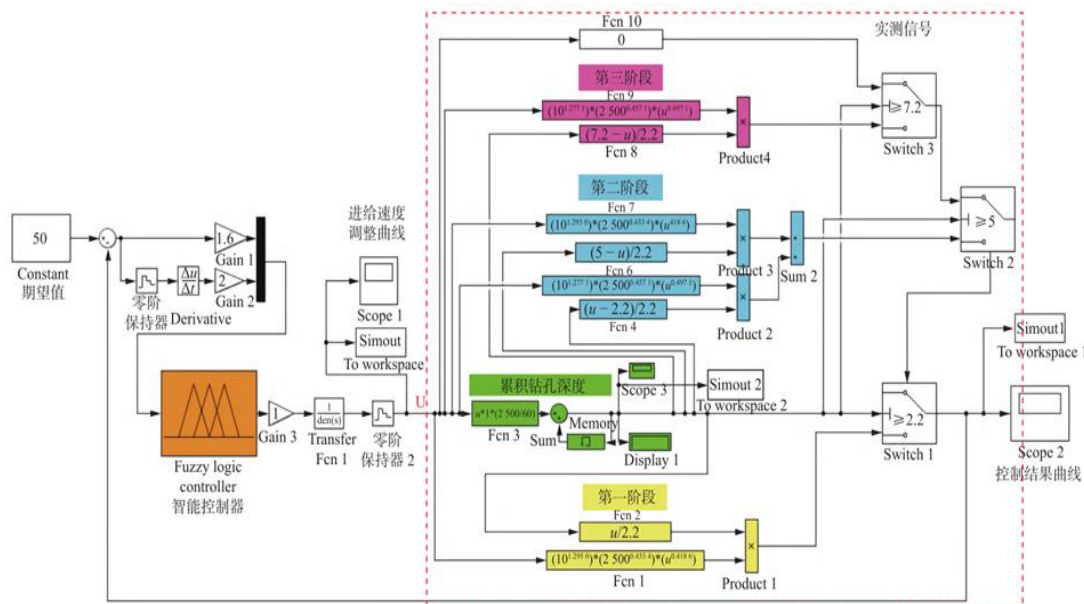


图 1-4 基于 SIMULINK 的 CFRP 钻削过程轴向力模糊控制仿真框图<sup>[41]</sup>

### 1.2.2 CFRP 材料低温制孔研究

相较于其它金属材料来说,碳纤维复合材料的导热性相对较差,切削加工过程中产生的切削热难以及时有效的散发,会导致加工区域的温度不断积累,从而加剧制孔过程中加工缺陷的产生,严重降低了材料的加工质量和效率,同时也会加速刀具的磨损。为了解决这些问题,国内外的专家学者在 CFRP 低温加工方向进行了大量的研究。

Kumar 等<sup>[42]</sup>以 Ti/CFRP/T 材料为研究对象,分别在干式和低温条件下对其进行制孔试验,通过电子显微镜对孔的尺寸及形貌进行观测,并分析了低温对制孔性能的影响。研究表明,相比于传统的干式制孔,采用低温冷却制孔过程中产生的切削力会更大,但所获得的孔的质量显著提高,有效减少了制孔损伤的出现。李树健等<sup>[43]</sup>针对 CFRP 材料提出了一种创新性的制孔方法,在传统制孔方法的基础上再将超声振动和超低温液氮相结合,采用超低温条件下形成的冰层对工件进行支撑,对其切削性能进行研究。结果发现,相较于传统钻削制孔,采用该方法可以有效降低孔出口处的毛刺、分层因子以及孔壁表面的粗糙度。Rodríguez 等<sup>[44]</sup>采用低温冷却方式对 CFRP-Ti6Al4V 材料开展了叠层钻孔加工,结果显示,相对于干式加工,在二氧化碳低温冷条件下切削温度明显降低,获得的孔径尺寸更接近实际尺寸数值,刀具磨损情况得到明显改善。苏春杰等<sup>[45]</sup>针对 CFRP 材料分别在常温和低温条件下开展了螺旋铣孔试验,对不同条件下获得孔的质量进行了对比。结果表明,相较于干钻制孔,采用低温冷却制孔会使得制

孔过程中的切削力增大,但是能够有效降低分层因子,表面质量显著提高。Cao 等<sup>[46]</sup>针对 CFRP 材料分别开展了液氮低温冷却制孔和干式铣削制孔对比试验研究,分析了铣削力、孔形貌、切削温度等因素之间的相互影响规律。研究结果表明,相较于干式铣削制孔,采用液氮低温冷却制孔对制孔过程中产生的铣削力影响较大,能够有效提高复合材料的制孔质量。

Yin 等<sup>[47]</sup>为了探究 CFRP 材料的最佳制孔温度范围,采用无线温度测量系统对制孔过程中产生的切削温度进行实时采集测量,并结合 3D 机械-热耦合模型进行辅助试验。研究结果表明,碳纤维复合材料制孔的最佳温度范围在 41.5℃至 112℃之间。Koklu 等<sup>[48]</sup>在对 CFRP 材料钻削制孔过程中将其完全浸没在液氮中,对其制孔性能进行分析。研究结果表明,相较于传统干式钻削制孔,制孔过程中将工件完全浸没在液氮中可以有效降低刀具磨损和表面粗糙度,但是会使得切削力有所增大。Xia 等<sup>[49]</sup>分别采用传统干钻制孔和低温冷却制孔两种方法对 CFRP 材料进行制孔试验,并对实验数据进行分析。研究结果发现,相较于传统干钻制孔,采用低温冷却制孔会使得制孔过程中的切削力和扭矩增大,但是能够有效降低工件表面的粗糙度,延长刀具的使用寿命。孙昊<sup>[50]</sup>在 CFRP 材料低温性质的基础上,采用液氮作为冷却介质对其开展了制孔试验研究,对不同制孔条件下获得孔的质量进行了对比。结果表明,相较于常温干式制孔,采用低温冷却制孔能够有效降低制孔过程中的切削温度,减小刀具磨损,对于出口处的撕裂缺陷有良好的抑制作用。Rodriguez 等<sup>[51]</sup>研究发现,与干式加工相比,采用刀具几何形状与低温冷却相结合的策略可显著改善复合材料制孔的表面完整性。

张高峰等<sup>[52]</sup>采用硬质合金钻头对 CFRP 材料开展了低温冷却制孔和常温干钻制孔的对比试验,探究不同切削工艺对制孔性能的影响规律,并对其声发射信号值(AE-RMS)和孔的质量进行观察对比。研究发现,相较于常温干钻制孔,采用低温冷却制孔的 AE-RMS 值总体偏大,但是孔壁的表面质量明显提高。周群力<sup>[53]</sup>为了探究制孔过程中切削热对制孔质量的影响规律,研制了一种可以用来测量制孔过程中产生的切削热的刀具,并建立了一个配套的无线测温系统。研究结果表明,相较于进给速度,主轴转速对制孔过程中切削热产生的影响更大,且相对较低的切削温度能够有效提高制孔质量。Prakash 等<sup>[54]</sup>以 CFRP 为研究对象,在不同制孔参数条件下,分别采用干式钻孔、液氮层钻孔以及冰层钻孔三种方法

对其进行制孔试验,分析不同制孔方法对制孔性能的影响。研究表明,相较于其它两种制孔方法,采用冰层钻孔能够有效改善制孔质量,提高制孔效率。秦一鸣<sup>[55]</sup>以 CFRP 材料为研究对象,分别在干式铣孔和超低温冷却铣孔条件下,采用螺旋铣孔方式对其进行制孔试验研究,分析了不同参数条件下不同制孔方式对制孔加工性能的影响。研究表明,相较于传统干式铣孔,采用超低温冷却铣孔能够有效提高复合材料的制孔效率和制孔质量。Su 等<sup>[56]</sup>在不同工艺参数条件下采用低温辅助螺旋铣削方式对 CFRP 材料进行制孔试验研究,分析了不同参数对制孔加工性能的影响规律,为实现复合材料的高效低损伤制孔加工提供了一种有效的方法。

### 1.2.3 CFRP 材料超声制孔研究

超声振动辅助加工技术是在传统加工的基础上,添加一个合适的高频振动,从而将一个连续切削过程变成断续加工过程,改变了刀具与工件之间的作用机理。超声振动系统主要包含超声电源、能量传输装置、超声振动装置等几个部分,如下图 1-6 所示。大量研究表明,采用超声振动辅助技术能够明显提高复合材料的加工效率和质量。

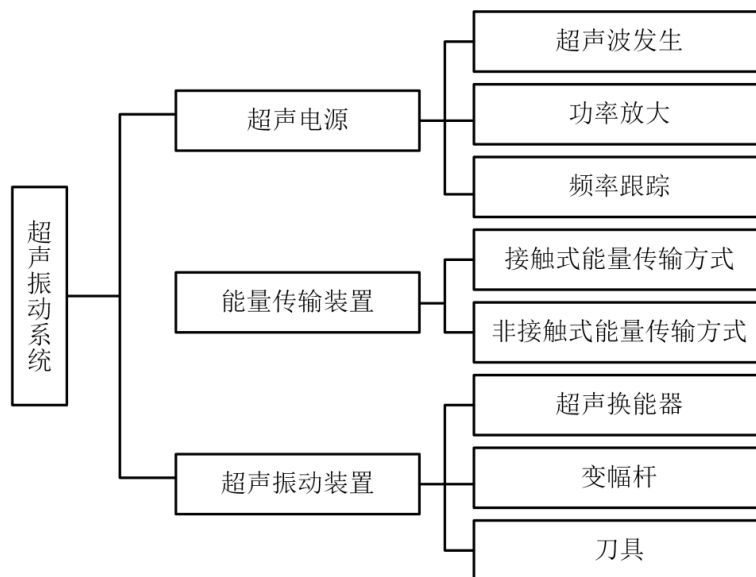


图 1-5 超声振动辅助系统

刘逸航等<sup>[57]</sup>针对 CFRP 材料开展了传统铣磨制孔和超声辅助铣磨制孔对比试验,分析其加工机理,并对超声辅助铣磨的刀具切削轨迹进行了建模。研究发现,相较于普通铣磨,超声铣磨制孔在降低切削力方面的效果显著,能够有效提高制孔精度,获得更好的表面粗糙度。Makhdum 等<sup>[58]</sup>和 Won 等<sup>[59]</sup>对 CFRP 材料

开展了超声振动辅助钻削试验,对其钻削性能进行分析。研究表明,相较于传统的钻削制孔,采用超声振动辅助钻削能够有效降低钻削过程中产生的切削力,有效抑制制孔缺陷的产生。Cong 等<sup>[60]</sup>在可变进给速度和固定进给速度条件下,对 CFRP/Ti 材料开展了旋转超声钻削试验。研究表明,相较于固定进给速度钻削,采用可变进给速率钻削时能够有效降低刀具的磨损,延长刀具的使用寿命。Liu 等<sup>[61]</sup>针对 CFRP 材料采用了旋转超声椭圆加工方法(RUEM)对其进行了钻削制孔试验,并对其制孔性能进行分析。研究表明,相较于传统的干钻切削,采用 RUEM 制孔能够显著降低制孔过程中产生的切削热,去除切屑的效果更好,有效降低了刀具的磨损,延长了刀具的使用寿命,提高了制孔精度。Zhou 等<sup>[62]</sup>人采用纵向扭转超声振动钻孔的方法对 CFRP/Ti 叠层材料开展了制孔试验,并对其钻孔性能进行分析。研究结果发现,相较于常规钻孔,采用纵向扭转超声振动钻孔能够有效降低制孔过程中产生的切削力,显著提高了制孔精度。龚佑宏等<sup>[63]</sup>以 CFRP 为研究对象,对超声振动辅助钻削中的低频振动进行优化,探究高阶振形对复合材料制孔性能的影响规律。研究表明,采用高阶振形能够显著提高复合材料的制孔质量,为实现高效低损伤制孔加工提供了一定的参考。Wang 等<sup>[64]</sup>为了减小孔入口缺陷,提高制孔加工质量,采用了一种纵向扭转超声波辅助螺旋铣削方法对 CFRP 材料进行制孔试验研究,并分析了孔入口损伤的形成机理。研究表明,采用纵向扭转超声波辅助螺旋铣削方法能够有效提高复合材料的制孔质量,减少制孔过程中加工缺陷的产生。

董慧民等<sup>[65]</sup>以 CFRP 材料为研究对象,分别采用不同的刀具,在普通钻削和超声振动辅助钻削条件下对其进行制孔试验研究。研究表明,相较于其它两种刀具,采用硬质合金匕首钻能够有效提高制孔质量,而在硬质合金匕首钻的基础上结合超声振动后,制孔精度进一步提高。陈光等<sup>[66]</sup>采用超声振动辅助螺旋铣孔方式对 CFRP 材料进行制孔试验研究,并分析了不同制孔参数对制孔加工性能的影响。研究表明,采用采用超声振动辅助螺旋铣孔能够有效提高制孔质量。Ma 等<sup>[67]</sup>开展了超声钻孔试验及运动特性分析,研究了在超声振动辅助钻孔条件下振幅比对碳纤维复合材料制孔质量的影响,结果表明,增大振幅比会有效降低钻孔过程中产生的切削力、毛刺系数以及孔壁表面粗糙度。Wu 等<sup>[68]</sup>人以 CFRP 材料为研究对象,系统研究了制孔过程中超声振动辅助技术、主轴转速、

进给速度等对分层缺陷的影响规律。试验结果表明, 分层缺陷会随着进给速度的增大而越增大, 相较于传统干钻制孔, 采用超声振动辅助制孔能够有效抑制分层缺陷出现。

Phadnis 等<sup>[69]</sup>采用超声辅助钻削(UAD)的方法对 CFRP 材料开展了试验研究, 并建立了一个超声辅钻削模型。研究结果发现, 相较于传统钻削加工, 采用超声振动辅助钻削能够有效提高钻削后材料的表面质量。李哲等<sup>[70]</sup>开展了超声辅助套磨制孔试验研究, 试验结果发现, 相较于普通套磨, 采用超声辅助套磨制孔能够有效降低切削力、切削温度和表面粗糙度, 并且延长了刀具的使用寿命。Geng 等<sup>[71]</sup>为了提高 CFRP 制孔质量, 采用了超声波旋转螺旋制孔加工技术(RUHM)对其进行了制孔加工试验, 并对 RUHM 中刀具的运动轨迹进行了建模分析。研究结果表明, 相较于传统磨削制孔, 采用旋转超声螺旋制孔时产生的切削力和表面粗糙度明显降低, 孔的质量显著提高。Zhu 等<sup>[72]</sup>以 CFRP 材料为研究对象, 基于能量守恒原理建立了切削力分析模型, 通过全因素试验对比分析了旋转钻孔和旋转超声波钻孔两种制孔方法的差异性。结果表明, 相较于旋转钻孔, 采用旋转超声波钻孔能够显著提高复合材料的制孔质量。

#### 1.2.4 课题研究现状总结及目的

综上所述, 国内外专家学者从工艺参数、加工方法、加工刀具的材料和结构等方面对 CFRP 材料的钻削加工进行了大量研究, 在提高 CFRP 材料的加工性能方面取得了丰厚的成果, 研究结果表明:

(1) 在 CFRP 材料切削加工过程中, 采用不同的工艺参数对加工结果的影响较大, 合适的加工参数能够显著提高复合材料的切削加工性能。

(2) 研究结果表明, 相较于常温钻削, 采用低温冷却钻削能够有效降低加工过程中产生的切削热, 材料的表面质量显著提高。

(3) 相较于传统干钻制孔, 采用超声振动辅助干钻能够有效降低钻削过程中加工缺陷的产生。

(4) 在 CFRP 材料钻削过程中, 相较于传统的加工刀具, 采用硬质合金刀具能够有效降低刀具磨损, 显著提高复合材料的钻削加工性能。

然而, 目前在 CFRP 材料进行制孔加工过程中, 国内外专家学者在结构化刀具结合低温冷却或超声辅助制孔方面的研究涉足较少, 其内在加工机理和切削性

能方面的研究还有待进一步深入，因此，本文在传统干钻制孔基础上，将低温冷却、超声振动辅助技术与结构化刀具相结合，分析不同制孔方法、工艺参数对 CFRP 材料制孔性能的影响规律。

### 1.3 本文研究内容

本文以碳纤维增强树脂基复合材料为对象，分别在不同加工方法和工艺参数条件下对其进行制孔试验研究，通过对制孔过程中产生的切削力、孔入口处直径尺寸及相对误差、孔入口处表面形貌、孔内壁表面形貌、刀具表面黏结等进行分析，探究提高 CFRP 制孔效率和精度的方法，为实现 CFRP 材料的高效高质量加工提供了一定的参考依据，章节安排如下所示：

第 1 章 绪论：首先对本文的研究背景进行介绍，对 CFRP 材料的应用领域、加工方法和特点等方面进行了简要概述，梳理了国内外专家学者在 CFRP 材料切削和制孔加工方面的研究现状，并对本文的研究内容进行了简介。

第 2 章：CFRP 材料制孔试验设计。在本章节中对具体的试验方案、制孔过程中的工艺参数、刀具参数以及相关的试验设备和测量设备进行了介绍。

第 3 章：CFRP 材料的低温制孔试验研究。本章节中，在不同制孔方式和切削参数条件下，对 CFRP 材料开展低温钻削制孔试验研究，通过分析制孔过程中产生的切削力、孔径尺寸及相对误差、孔内壁表面形貌以及刀具表面黏结等情况，探寻其内在的相互影响规律。

第 4 章：CFRP 材料超声制孔试验研究。本章节中，在不同制孔方式和切削参数条件下，对 CFRP 材料开展超声辅助钻削制孔试验研究，通过分析制孔过程中产生的切削力、孔径尺寸及相对误差、孔入口处表面形貌以及刀具表面黏结等情况，并分析其内在的相互影响规律。

第 5 章：总结与展望。对本文的研究内容及相关结论进行整理和归纳，并提出今后可以继续深入研究的方向。

## 第2章 CFRP 材料制孔思路及试验设计

### 2.1 制孔思路分析

目前针对 CFRP 材料的制孔加工可以分为两大类,一种是以超声振动辅助加工、高压水射流加工、电火花加工等为主的特种加工方法,另一种是以铣削、磨削、车削、钻削等为主的传统加工方法。为了探究提高碳纤维复合材料制孔效率和精度的方法,国内外大量的专家学者分别在工艺流程参数、制孔加工方法、刀具材料结构等方面做了大量的研究工作,且已经获得了丰富的研究成果。大量研究表明,低温冷却加工和超声振动辅助加工能够有效抑制制孔过程中产生的加工缺陷,提高制孔精度和制孔效率,但是利用织构化铣刀结合低温冷却或者超声振动辅助制孔的方式涉足较少。因此,本文在传统干钻制孔方式的基础上,采用 PCD 织构化铣刀与二氧化碳低温冷却、超声振动辅助技术相结合的方法,开展不同制孔参数条件下 CFRP 材料的制孔加工性能试验研究和分析,为提高复合材料制孔性能,提供一种可能的途径和试验尝试。

### 2.2 制孔方案设计

为了系统研究不同工艺参数条件下不同加工方式对制孔性能的影响,探求 CFRP 材料高效、高质量、低损伤的制孔加工方法,本文在不同进给速度、不同进给量和不同主轴转速条件下,分别采用了传统干钻制孔、低温冷却干钻制孔以及超声振动辅助干钻制孔三种方式对 CFRP 材料进行直径为 4 mm 的制孔试验。

传统干钻制孔:采用数控机床对 CFRP 材料进行铣削制孔试验。

二氧化碳低温冷却干钻制孔:在传统干钻制孔基础上,添加二氧化碳冷却后对 CFRP 材料进行铣削制孔试验。

超声振动辅助干钻制孔:在传统干钻制孔基础上,添加一个轴向高频振动后对 CFRP 材料进行铣削制孔试验。

超声振动辅助干钻制孔是一种针对难加工材料的特种加工方法,其原理就是在传统干钻制孔的基础上,添加一个合适的高频振动,从而改变刀具与工件之间的作用机理,使得刀具与工件之间发生周期性的分离,相关研究表明,超声振动辅助干钻能够显著降低制孔过程中产生的切削热,提高制孔精度和质量,延长刀

具的使用寿命<sup>[73]</sup>。在本次试验中,采用超声振动的频率为 30 kHz,振幅为 6  $\mu\text{m}$ 。超声振动制孔示意图如下图 2-1 所示。

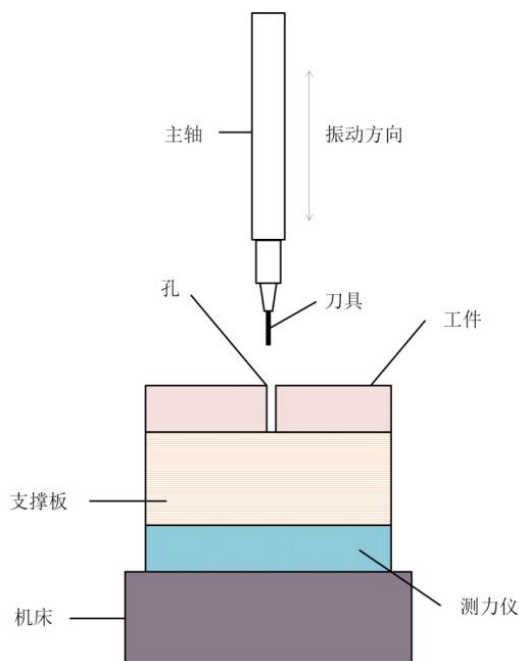


图 2-1 超声振动制孔示意图

在本文的制孔试验中,为了降低试验的偶然性,保证试验结果的稳定性和可靠性,在相同条件下每组切削参数均会连续进行 3 次制孔,依次编号为孔 1、孔 2 和孔 3,并且每个孔均要求完全钻通,为后续的孔径测量、计算相对误差提供可靠的基础。CFRP 材料制孔如下图 2-2 所示。

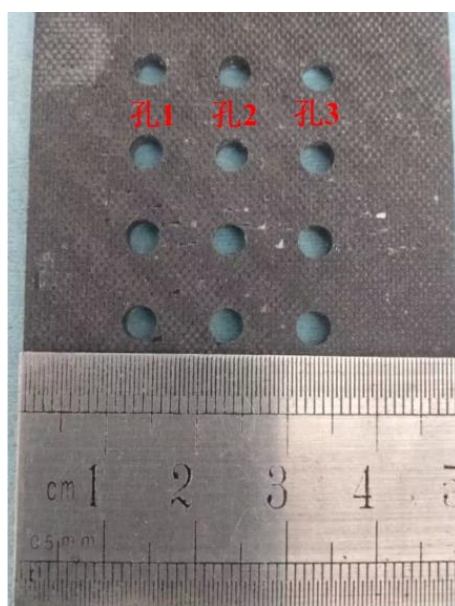


图 2-2 CFRP 材料制孔

制孔过程中通过测力仪实时采集每组参数制孔过程中所产生的切削力,测力

仪记录的原始切削力信号如下图 2-3 所示。

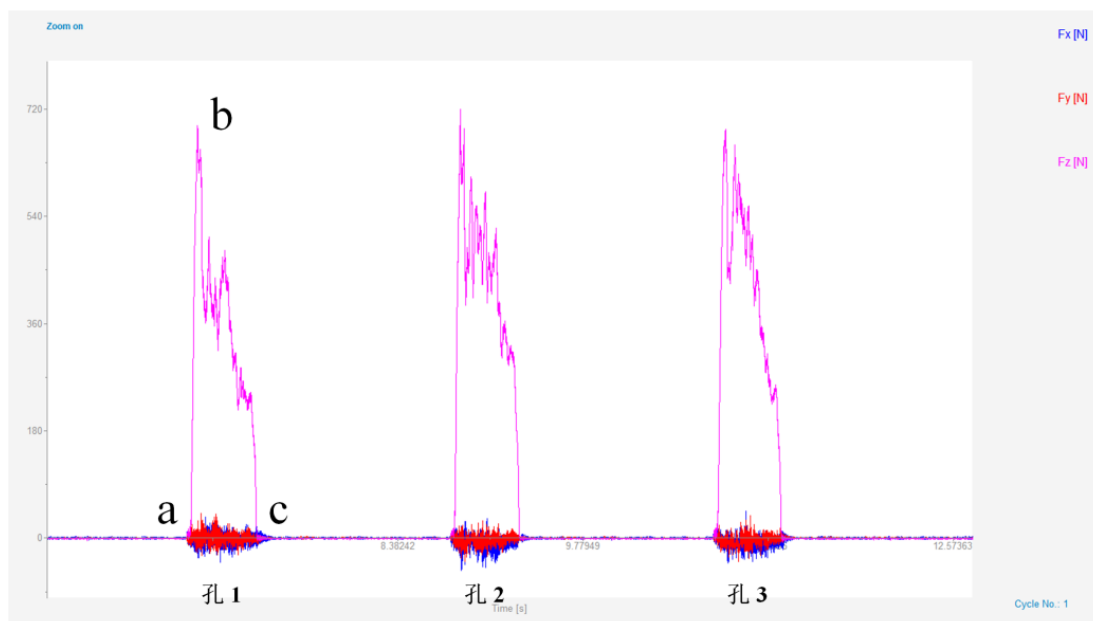


图 2-3 制孔过程中切削力信号

从此图可以明显看出,从 a 到 b 为刀具钻入阶段:PCD 刀具从开始接触 CFRP 材料到完全钻入,记录的 Z 轴方向上的切削力  $F_z$  从零(a 点)逐渐增大到峰值(b 点); b 到 c 为刀具钻出阶段:从刀具逐渐接触孔出口到完全钻出,记录的 Z 轴方向的切削力  $F_z$  从峰值(b 点)逐渐降低到零(c 点)。因为 CFRP 材料是由多种材料复合而成,且制孔是一个非常复杂的过程,所以需要对制孔过程中采集到的原始切削力进行处理,为后文中切削力的分析建立基础。

在本次试验中,是通过 Origin 软件对力信号进行处理分析。首先,将制孔过程中采集的原始切削力信号导入到 Origin 软件中,通过软件分析模块中的寻峰模块对原始切削力进行寻峰操作,计算后得到一组寻峰的数据,如下图 2-4 所示。在寻峰结束后,对所得到的数据进行进行列统计分析,并求得该组数据的均值与标准差。

制孔完成后,通过测量设备对孔入口处直径尺寸进行测量,通过误差计算公式对孔径相对误差进行计算分析,并且对孔的入口处的表面形貌、孔内壁的形貌及缺陷的差异性进行对比,在所有制孔试验结束后,对刀具前刀面的表面黏结情况进行观测分析。

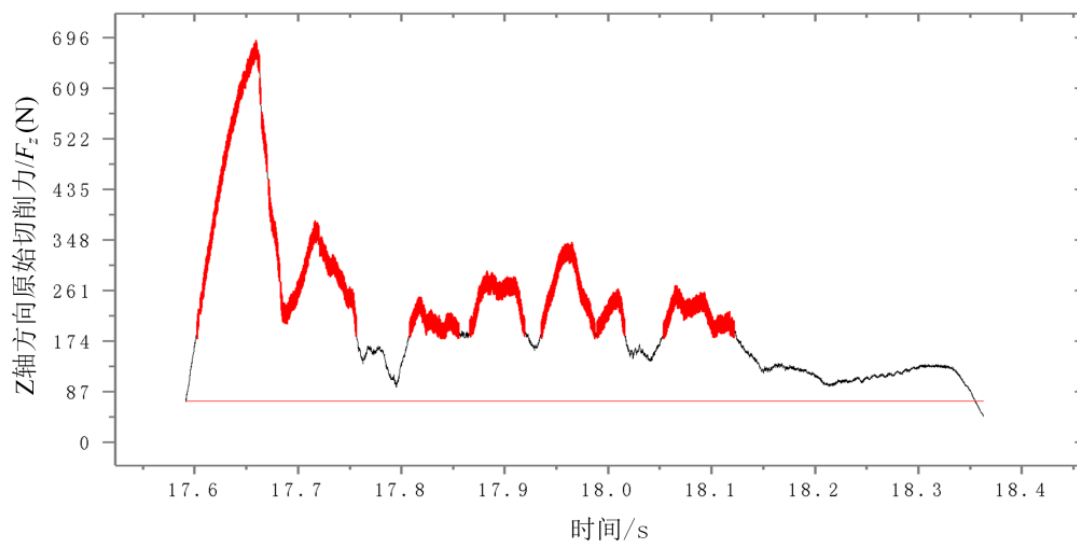


图 2-4 力信号寻峰分析

### 2.3 试验参数设计

在本次试验中，所用 CFRP 材料中的碳纤维铺层总共为 8 层，其中碳纤维的铺层角度分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $315^\circ$ ，按照上述铺层角度顺序依次铺设。试验中工件的长度为 150 mm，宽度为 50 mm，高度为 3 mm。试验主要可以分为以下几个部分：

试验 1：本次试验采用了 PCD 常规刀具干钻制孔(DDP)、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔(CPC)和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔(TPC)3 种制孔方式，对 CFRP 材料进行制孔试验。在制孔过程中，其它制孔参数均保持不变，仅通过进给速度的改变来研究分析不同制孔方法对制孔性能的影响规律。制孔过程中的工艺参数如下表 2-1 所示。

表 2-1 制孔试验 1 的切削参数

| 切削参数                | 取值范围            |
|---------------------|-----------------|
| 主轴转速 $n$ (r/min)    | 5000、8000       |
| 钻孔深度 $a_p$ (mm)     | 4               |
| 进给速度 $V_f$ (mm/min) | 320、480、640、800 |

试验 2：在试验 1 的基础上，将进给速度保持不变，通过改变主轴转速来研究不同制孔方法对制孔性能的影响规律。制孔过程中的工艺参数如下表 2-2 所示。

表 2-2 制孔试验 2 的切削参数

| 切削参数                      | 取值范围                  |
|---------------------------|-----------------------|
| 主轴转速 $n(\text{r/min})$    | 5000、8000、11000、14000 |
| 钻孔深度 $a_p(\text{mm})$     | 4                     |
| 进给速度 $V_f(\text{mm/min})$ | 320                   |

试验 3: 本次试验分别采用了 PCD 常规刀具干钻制孔(DDP)、PCD 织构刀具干钻制孔(DDTP)、PCD 常规刀具超声干钻制孔(UDDP)、PCD 织构刀具超声干钻制孔(UDDTP)4 种加工方法, 对 CFRP 材料进行制孔试验。在制孔过程中, 其它制孔参数均保持不变, 仅通过改变每齿进给量来研究分析不同制孔方法对制孔性能的影响规律。制孔过程中的工艺参数如下表 2-3 所示。

表 2-3 制孔试验 3 的切削参数

| 切削参数                     | 取值范围                |
|--------------------------|---------------------|
| 主轴转速 $n(\text{r/min})$   | 8000                |
| 钻孔深度 $a_p(\text{mm})$    | 4                   |
| 每齿进给量 $f_z(\text{mm/z})$ | 0.02、0.03、0.04、0.05 |

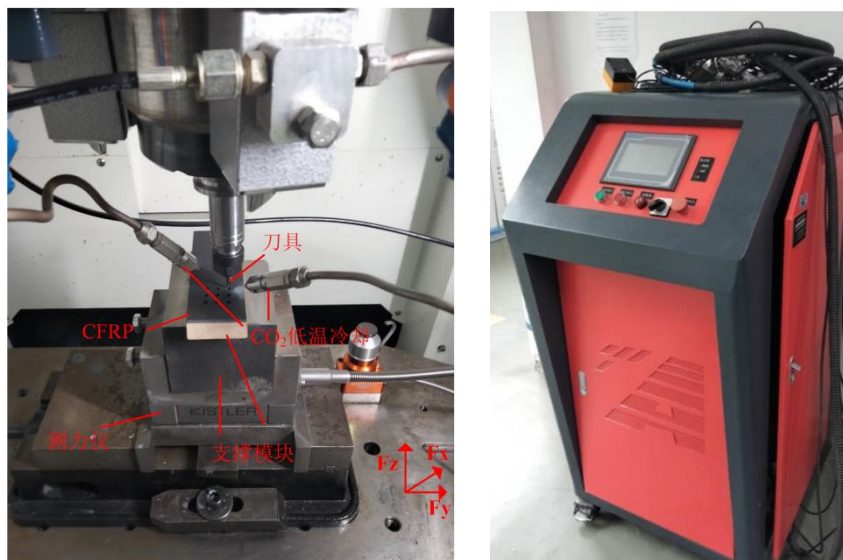
试验 4: 在试验 3 的基础上, 每齿进给量保持不变, 通过改变主轴转速来研究分析不同制孔方法对制孔性能的影响规律。制孔过程中的工艺参数如下表 2-4 所示。

表 2-4 制孔试验 4 的切削参数

| 切削参数                     | 取值范围                  |
|--------------------------|-----------------------|
| 主轴转速 $n(\text{r/min})$   | 5000、8000、11000、14000 |
| 钻孔深度 $a_p(\text{mm})$    | 4                     |
| 每齿进给量 $f_z(\text{mm/z})$ | 0.02                  |

## 2.4 制孔加工设备

在二氧化碳低温冷却制孔试验中采用的机床型号为 MAKINO Slim3n, 试验现场及低温冷却系统如图 2-5 所示。



(a) 低温制孔试验现场图

(b) 二氧化碳低温冷却系统

图 2-5 低温冷却制孔试验现场

采用型号为 Kistler 9129AA 的测力仪对不同制孔工艺参数条件下不同制孔方式制孔过程中产生的切削力进行实时采集,制孔完成后,分别采用型号为 Leica S9D 的立体光学显微镜、型号为 HITACHI Regulus 8220 和 HITACHI S-4800 的扫描电子显微镜、型号为 NANOVEA PS50 的三维非接触式表面轮廓仪以及型号为 KEYENCE VHX-5000 的超景深显微镜分别对孔直径尺寸、孔入口处的表面形貌、孔内壁形貌以及刀具前刀面的黏结情况等进行观测。

在超声振动辅助干钻制孔试验中采用的机床型号为 HAAS OM-2A, 试验现场及加工机床如下图 2-6 所示。

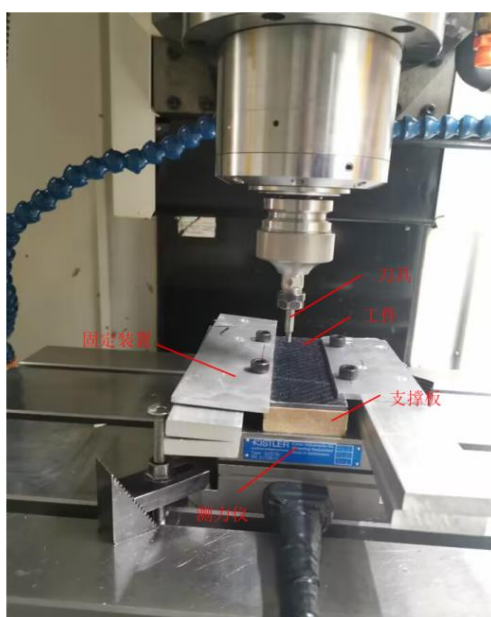


图 2-6 超声辅助干钻试验现场

采用型号为 Kistler9257B 的测力仪对不同制孔工艺参数条件下不同制孔方式制孔过程中产生的切削力进行实时采集，制孔完成后，分别采用型号为 Leica S9D 的立体光学显微镜、型号为 HITACHI Regulus 8220 和 HITACHI S-4800 的扫描电子显微镜对孔直径尺寸、孔入口处的表面形貌以及刀具前刀面的黏结情况进行观测。

## 2.5 制孔刀具设计

在本次设计的制孔试验中，考虑到刀具表面织构激光制备工艺的可行性，故采用的是前角为 0 度的 PCD 直刃铣刀，刀具的刀刃直径为 4 mm、前角为 0°、后角为 15°，其中刀具包括 PCD 常规刀具和 PCD 织构刀具。刀具参数如下表 2-5 所示。PCD 织构刀具是在常规刀具的基础上，通过二次加工的方法在刀具表面进行微织构的制备。本文中 PCD 织构刀具表面的微织构是采用飞秒激光系统制备，其沟槽织构的深度为 6  $\mu\text{m}$ ，宽度为 40  $\mu\text{m}$ ，两沟槽之间的间隔为 100  $\mu\text{m}$ ，距离侧刃的距离为 250  $\mu\text{m}$ 。PCD 刀具及表面织构如图 2-7 所示。

表 2-5 PCD 刀具参数表

| 刀具参数      | 取值 |
|-----------|----|
| 刀具总长度(mm) | 45 |
| 刀刃长度(mm)  | 4  |
| 刀刃直径(mm)  | 4  |
| 刀杆直径(mm)  | 6  |
| 刀具前角(°)   | 0  |

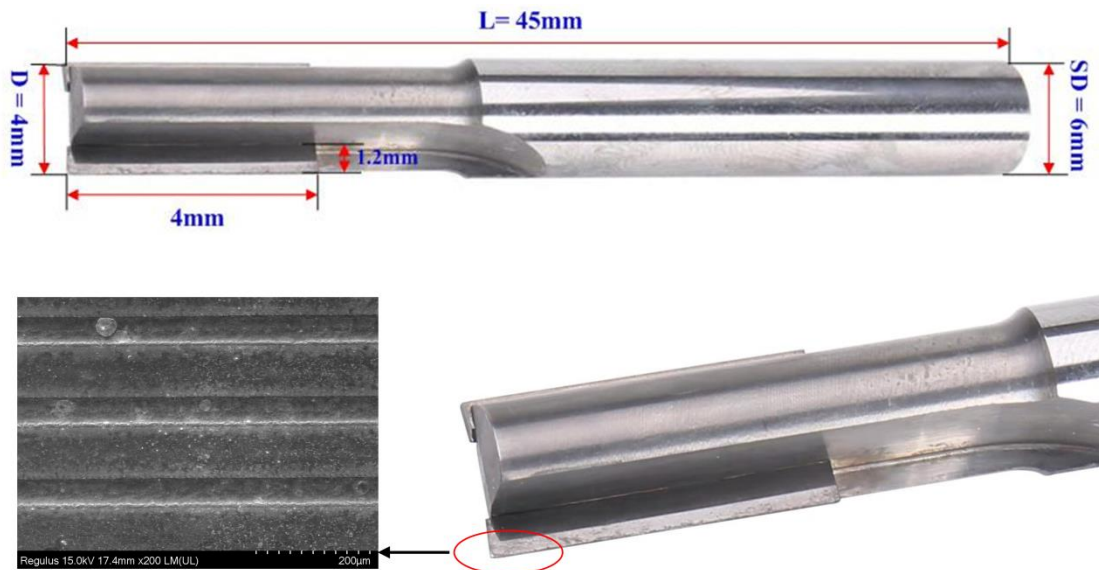


图 2-7 PCD 刀具及表面微织构图

## 2.6 本章小结

在本章节中，根据研究内容需要确定了试验的相关细节，为后续试验的开展以及数据分析奠定了基础。具体内容如下：

- (1) 介绍了试验中需要用到的 CFRP 材料的相关参数及尺寸大小；
- (2) 根据研究内容确定了具体的试验方案；
- (3) 根据不同的试验方案，确定了相对应的钻削工艺参数；
- (4) 确定了试验中所需要的刀具，并对刀具的相关参数进行了仔细的说明；

### 第3章 CFRP 材料 PCD 刀具低温制孔试验

本章的主要内容是针对 CFRP 材料, 分别开展在传统干钻和二氧化碳低温冷却干钻条件下 PCD 刀具制孔试验研究, 探求提升碳纤维复合材料切削性能的方法, 进一步提高 CFRP 的制孔效率和质量。在干钻和二氧化碳低温冷却干钻条件下, 分别采用 PCD 常规刀具和 PCD 织构刀具对复合材料进行制孔试验, 对不同制孔条件下产生的切削力、孔入口直径尺寸及相对误差、孔内部形貌及刀具表面黏结情况进行分析, 研究分析不同制孔方法对 CFRP 材料制孔性能的影响规律。

#### 3.1 不同进给速度下干式和低温制孔试验

在本次 CFRP 制孔试验中, 为了使孔能够完全钻通, 钻孔深度  $a_p$  始终保持在 4 mm, 制孔过程中进给速度  $V_f$  的取值分别为 320 mm/min、480 mm/min、640 mm/min、800 mm/min。

##### 3.1.1 不同制孔方式下的切削力分析

下图 3-1 为相同制孔参数条件下, 采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔以及 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔对 CFRP 材料制孔过程中产生的 X 轴方向上的切削力  $F_x$  变化曲线图。

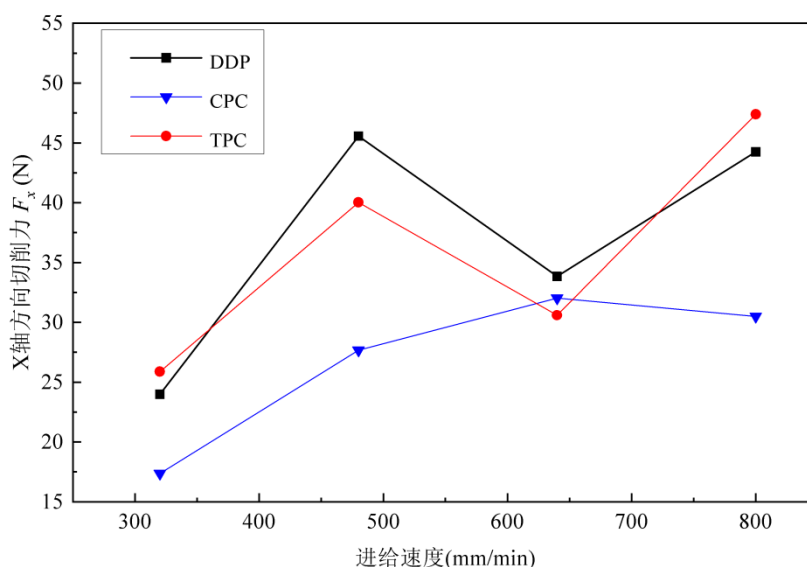


图 3-1 不同制孔方式下 X 轴方向上的切削力变化

从此图可以看出, 随着进给速度不断增加, 三种不同制孔方式制孔过程中产生的 X 轴方向上的切削力  $F_x$  的取值范围为 17.36 N~47.39 N。

下图 3-2 为相同制孔参数条件下，分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔以及 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔对 CFRP 材料制孔过程中产生的 Y 轴方向上的切削力  $F_y$  变化曲线图。

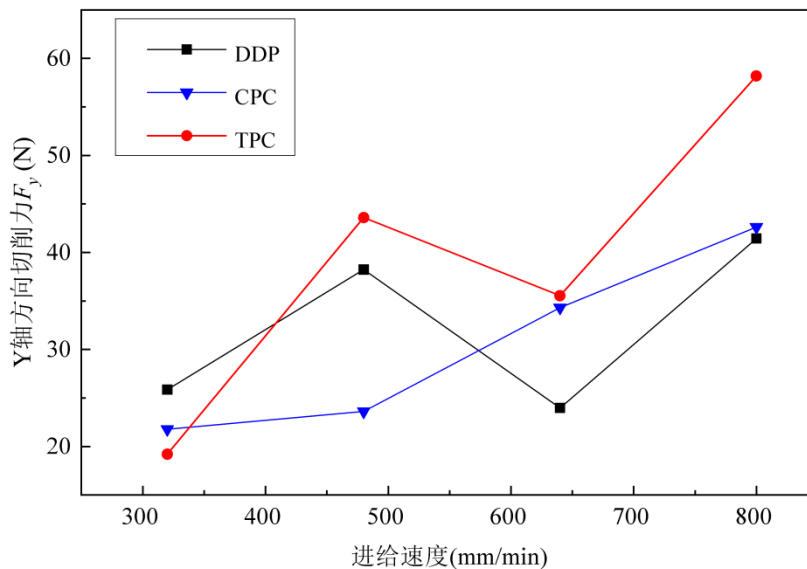


图 3-2 不同制孔方式下 Y 轴方向上的切削力变化

从此图可以明显看出，随着进给速度不断增加，三种不同制孔方式制孔过程中产生的 Y 轴方向上的切削力  $F_y$  的取值范围为 19.2 N~58.18 N。

下图 3-3 为相同制孔参数条件下，分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔以及 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔对 CFRP 材料制孔过程中产生的 Z 轴方向上的切削力  $F_z$  变化曲线图。

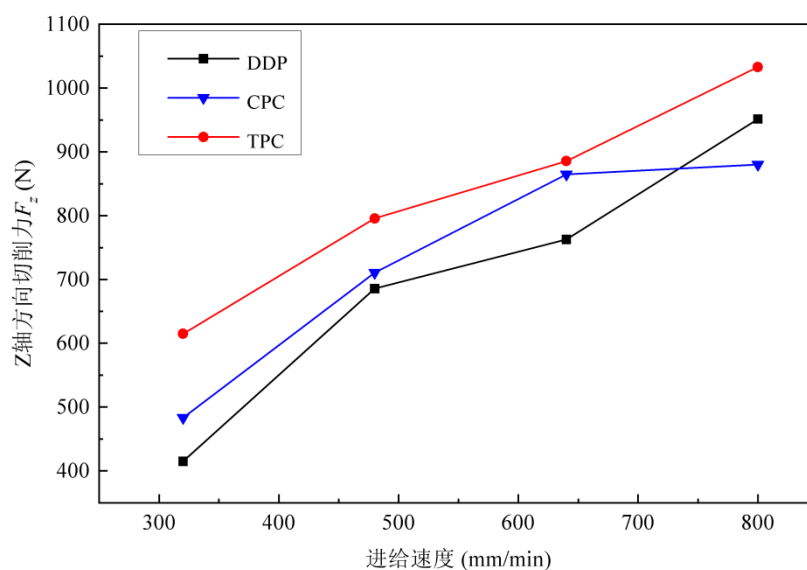


图 3-3 不同制孔方式下 Z 轴方向上的切削力变化

从此图可以明显看出，随着进给速度不断增加，三种不同制孔方式制孔过程

中产生的 Z 轴方向上的切削力  $F_z$  的取值范围为 414.9 N~1033 N。

下图 3-4 为相同制孔参数条件下，分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔以及 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔对 CFRP 材料制孔过程中产生总的切削力  $F_r$  变化曲线图。

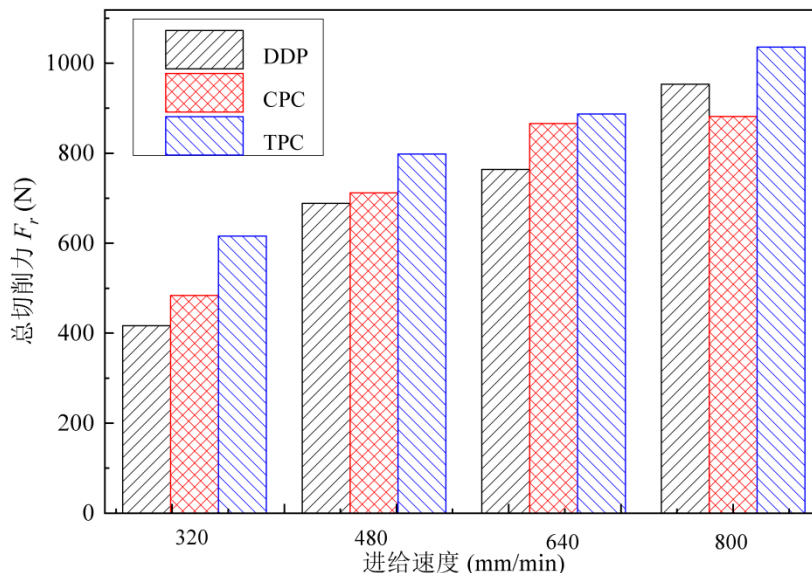


图 3-4 不同制孔方式下总切削力变化

从此图可以明显看出，随着进给速度不断增加，三种不同制孔方式制孔过程中产生的总切削力  $F_r$  的取值范围为 416.4 N~1035.7 N。

从图 3-1、3-2、3-3 可明显看出，随着进给速度不断从 320 mm/min 增加到 800 mm/min，X 轴方向上的切削力  $F_x$  和 Y 轴方向上的切削力  $F_y$  的变化幅度明显小于 Z 轴方向上切削力  $F_z$  的变化幅度<sup>[74]</sup>。从图 3-3 可以明显的看出，随着进给速度的增加，不同制孔方式下 Z 轴方向的切削力  $F_z$  均表现出逐渐增大的趋势，这是因为在制孔过程中，切削层面积会随着进给速度的增大而增大，从而使得制孔过程中的切削摩擦阻力增大，最终导致切削力不断地增大<sup>[75]</sup>。此外，从图 3-3、3-4 可以明显的看出，当进给速度在 320~640 mm/min 之间时，相较于 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔，采用 PCD 常规刀具干钻制孔过程中产生的 Z 轴方向的切削力和总切削力明显更小。上述结果表明，在对 CFRP 材料制孔过程中，相较于其它两种制孔方式，采用 PCD 常规刀具干钻制孔所产生的切削力更小。

### 3.1.2 不同条件下孔径尺寸及相对误差

图 3-5 为在相同制孔参数条件下，分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD

常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔后孔入口直径尺寸对比图。

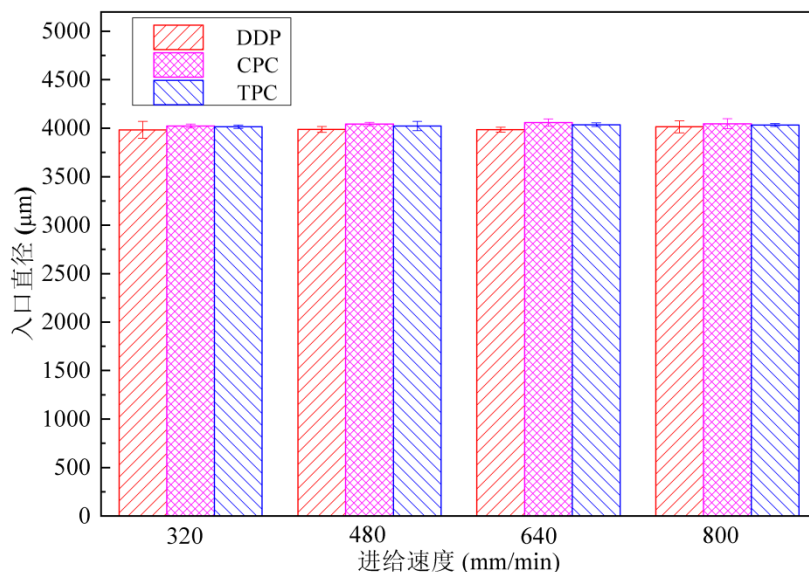


图 3-5 不同制孔下孔入口直径尺寸图

从此图可以明显看出,随着进给速度从 320 mm/min 不断增加到 800 mm/min,采用 PCD 常规刀具干钻制孔得到的孔入口直径尺寸分别为 3983.3 μm、3988.3 μm、3984.4 μm、4014.0 μm,采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔得到的孔入口直径尺寸分别为 4023 μm、4043 μm、4057.1 μm、4045.8 μm,采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔得到的孔入口直径尺寸分别为 4015.0 μm、4022.5 μm、4035.7 μm、4032.1 μm。

图 3-6 为不同制孔方式下孔径相对误差图,试验中的切削参数与图 3-5 保持一一对应。根据下文中公式(3-1)可以计算出不同制孔方式下孔径尺寸的相对误差。

$$\delta = \frac{|M-N|}{N} \times 100\% \quad (3-1)$$

式中:  $\delta$  为相对误差为;  $M$  为测量尺寸;  $N$  为名义尺寸。

根据公式(1)可以计算得到如图 3-6 所示的不同制孔方式制孔后孔入口直径的相对误差。随着进给速度的不断增大,采用 PCD 常规刀具干钻制孔,孔入口直径的相对误差分别为 0.42%、0.29%、0.39%和 0.35%,采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔,孔入口直径的相对误差分别为 0.57%、1.08%、1.43%和 1.15%,采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔,孔入口直径的相对误差分别为 0.38%、0.56%、0.89%和 0.80%。

上述结果表明,在本次试验条件下,相较于 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷

却干钻制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔, 采用 PCD 常规刀具干钻制孔获得的孔入口直径更加接近孔径的理论设计值, 且孔径相对误差更小, 制孔过程中的稳定性更好。

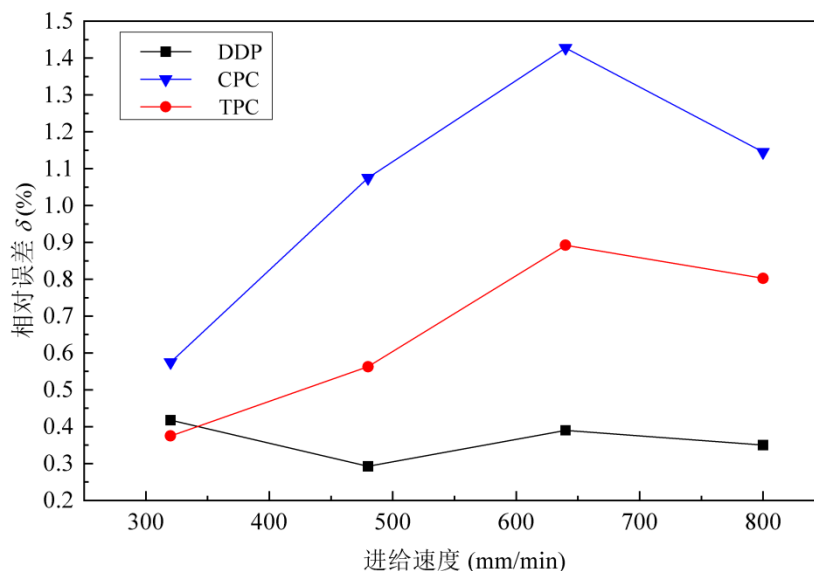


图 3-6 不同制孔方式下孔直径相对误差图

### 3.1.3 不同制孔条件下刀具表面黏结

图 3-7 为在相同切削参数和钻孔数量条件下, 分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔三种方式制孔后刀具前刀面的黏结状况。

从此图可以明显看出, 采用 PCD 常规刀具干钻制孔后(图 3-7(a)), 刀具的前刀面存在着明显的黏结物和断裂的纤维丝, 且数量较多, 通过对图 3-7(a)中刀具上黏结物的 EDX 成分分析可以基本判断(图 3-7(b)), 黏结物成分来自于碳纤维复合材料制孔过程中产生的切屑。相较于 PCD 常规刀具干钻制孔, 在二氧化碳低温冷却干式制孔条件下, 钻孔后刀具的前刀面几乎没有出现切屑黏结情况(图 3-7(c)), 或者存在着少量的黏结物(图 3-7(d))。由此可见, 相较于传统的干钻制孔, 采用二氧化碳低温冷却制孔能够显著降低制孔过程中刀具前刀面的切屑黏结。

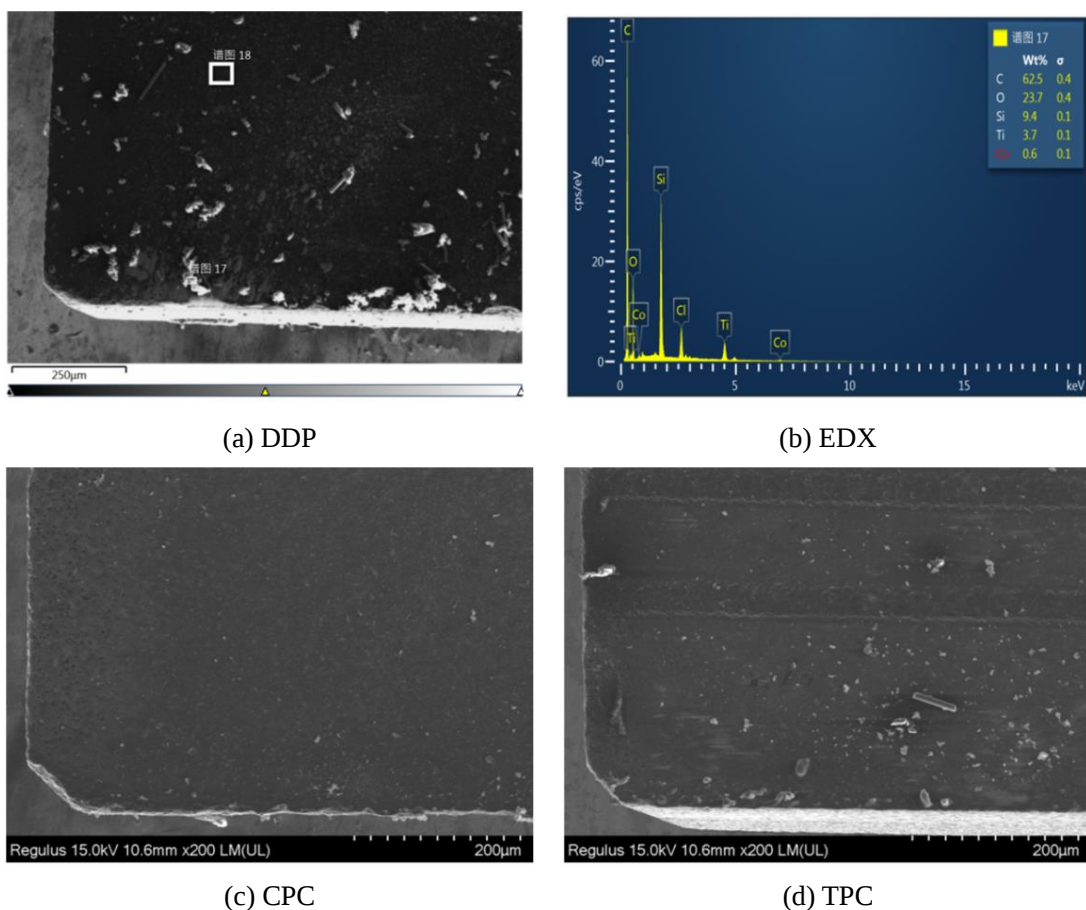


图 3-7 不同制孔方式下刀具前刀面抗黏结状况

### 3.1.4 孔壁内部形貌及表面缺陷分析

下图 3-8 为在相同的切削参数条件下, 采用传统干式制孔和二氧化碳低温冷却制孔后获得的孔内壁 SEM 形貌图, 其中, 图 3-8(a)、(c)、(e)为传统干钻制孔组, 图(b)、(d)、(f)为二氧化碳低温冷却制孔组, 在本组试验中, 主轴转速  $n=5000$  r/min, 钻孔深度  $a_p=4$  mm, 切削速度  $V_f=200$  mm/min, 试验中均采用 PCD 常规刀具。

从图 3-8(a)中可以明显看出, 在干式制孔条件下, 传统干钻制孔组制孔得到的孔内壁表面出现了少量的切屑黏结物和断裂的纤维残留物, 较高倍数的 SEM 图显示(图 3-8(c)和(e)), 在孔内壁表面可以看到较为完整的碳纤维和树脂涂覆现象, 且内壁表面的树脂涂覆和分布总体较为平整和均匀。

从图 3-8(b)可以明显看出, 对于二氧化碳低温冷却制孔组, 孔内壁表面也出现了切屑黏结物和较多的断裂碳纤维残留物, 图 3-8(d)的 SEM 图显示, 在孔内壁表面还产生了微裂纹。从图 3-8(f)可以明显看出, 在低温冷却条件下, 孔内壁出现了若干纤维断裂及其纤维断口, 并且形成了许多圆状断口坑。

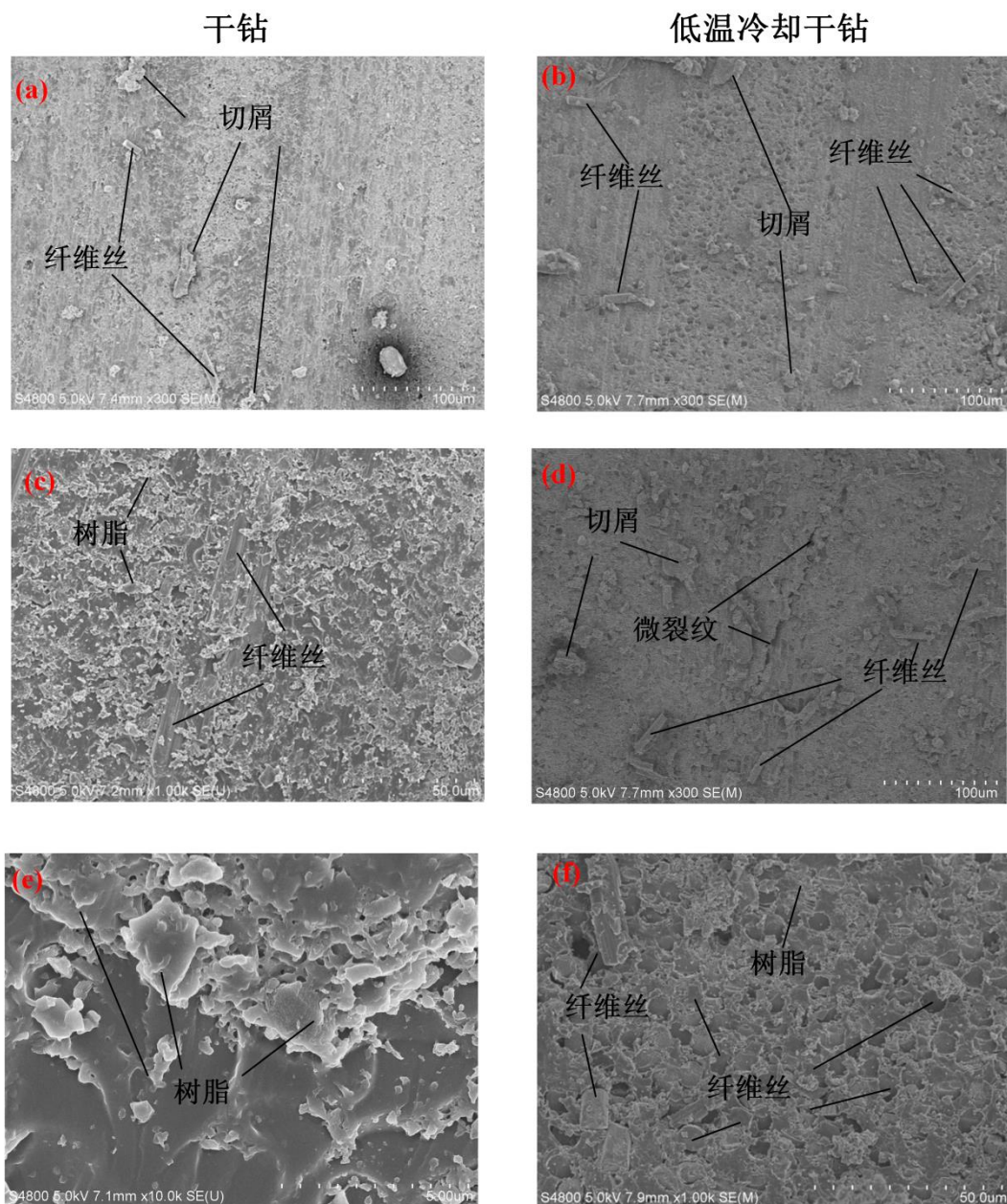


图 3-8 低温和干式条件下的内壁孔表面形貌

由此可见，与干式组制孔相比，低温冷却条件下孔内壁表面出现了明显的纤维断裂，形成了较多的纤维断口坑。此外，低温制孔下的内壁表面出现了微裂纹现象，树脂表面的涂覆均匀性相较于干钻制孔条件下更差。

### 3.2 不同主轴转速下干式和低温制孔试验

在本次 CFRP 制孔试验中，每齿进给量  $f_z$  和切削深度  $a_p$  均保持不变，分别为 0.02 mm/z 和 4 mm，主轴转速  $n$  分别为 5000 r/min、8000 r/min、11000 r/min、14000 r/min。

### 3.2.1 制孔过程切削力分析

图 3-9、图 3-10、图 3-11 分别为在不同主轴转速且其它制孔参数均相同的条件下，采用不同制孔方式制孔过程中产生的 X 轴方向上的切削力、Y 轴方向上的切削力和 Z 轴方向上的切削力变化趋势图。

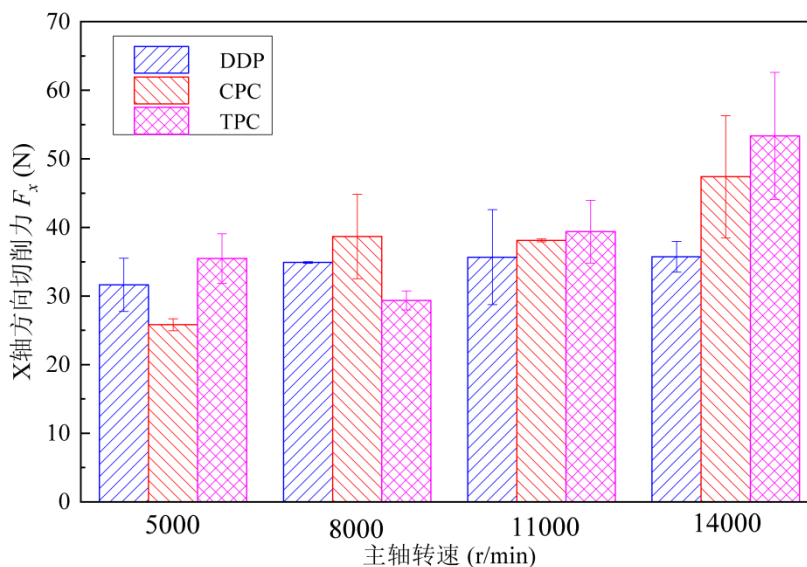


图 3-9 不同制孔条件下 X 轴方向上的切削力变化

从图 3-9 可以明显看出，随着主轴转速不断增加，采用 PCD 常规刀具干钻制孔所得到的 X 轴方向上的切削力  $F_x$  分别为 31.6 N、34.9 N、35.6 N 和 35.7 N，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔所得到的 X 轴方向上的切削力  $F_x$  分别为 25.8 N、38.7 N、38.1 N、47.3 N，采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔所得到的 X 轴方向上的切削力  $F_x$  分别为 35.4 N、29.3 N、39.3 N、53.3 N。

从图 3-10 可以明显看出，随着主轴转速不断增加，采用 PCD 常规刀具干钻制孔所得到的 Y 轴方向上的切削力  $F_y$  分别为 25.8 N、26.2 N、25.3 N 和 43.9 N，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔所得到的 Y 轴方向上的切削力  $F_y$  分别为 37.9 N、27.7 N、24.6 N、49.5 N，采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔所得到的 Y 轴方向上的切削力  $F_y$  分别为 34.4 N、29.6 N、30.2 N、36.4 N。

从图 3-11 可以明显看出，随着主轴转速不断增加，采用 PCD 常规刀具干钻制孔所得到的 Z 轴方向上切削力  $F_z$  分别为 487.5 N、603.2 N、639.9 N 和 761.3 N，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔所得到的 Z 轴方向上切削力  $F_z$  分别为 398.3 N、494.2 N、564.6 N 和 640.8 N，采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔所得到的 Z 轴方向上切削力  $F_z$  分别为 536.2 N、695.8 N、785.1 N 和 901.9 N。

根据上述测量数据可以明显看出,随着主轴转速的不断增大,Z轴方向上的切削力也会随之增大<sup>[76-77]</sup>,且相较于X轴和Y轴方向上的切削力,Z轴方向上的切削力明显更大<sup>[78]</sup>。

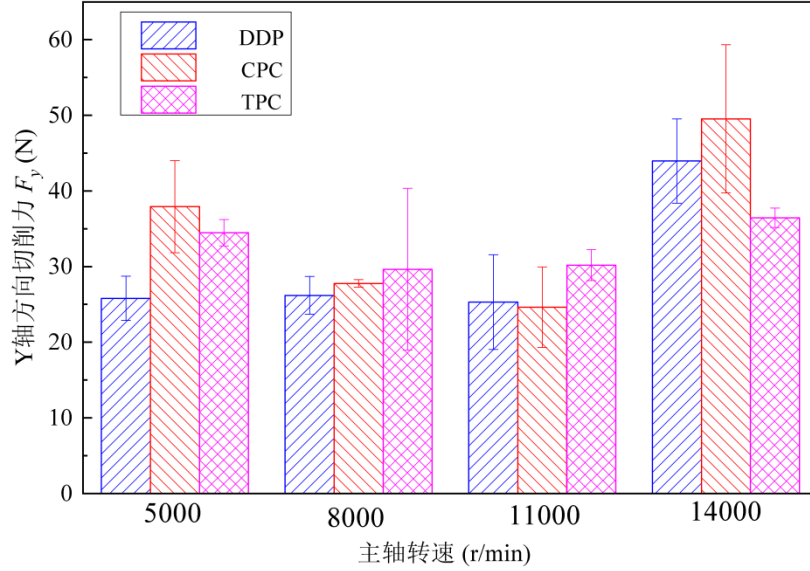


图 3-10 不同制孔条件下 Y 轴方向上的切削力变化

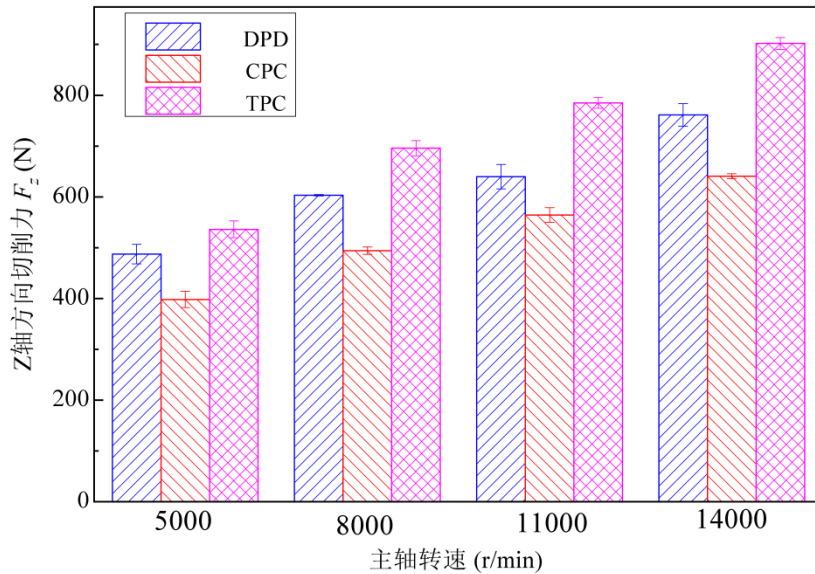


图 3-11 不同制孔条件下 Z 轴方向上的切削力变化

制孔过程中材料去除率(MRR)的计算公式(3-2)如下所示:

$$MRR = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot v_f = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot f_z \cdot z}{4 \times 100} \cdot n \quad (3-2)$$

式中,  $D$  为刀具直径, 单位为 mm;  $V_f$  为进给速度, 单位为 mm/min;  $f$  为每转进给量, 单位为 mm/min;  $n$  为转速, 单位为 r/min;  $f_z$  为每齿进给量, 单位为 mm/z。

在测量切削力的过程中,除了转速在变化之外,其它的参数都是固定不变的。

由此可见,根据公式(3-2)可以计算得出,当转速增加,会导致制孔过程中的  $MRR$  也随之增加,从而导致  $Z$  轴方向上的切削力  $F_z$  不断增大。

从试验结果分析可以得出,相较于 PCD 常规刀具干钻制孔,采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔在降低切削力方面的效果更加的明显<sup>[79]</sup>,这可能是因为采用二氧化碳低温冷却制孔过程中摩擦界面的切削温度在一定程度上有所降低而导致的。同时,相较于其它两种制孔方法,采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔过程中产生的切削力最大。

### 3.2.2 入口尺寸及误差分析

图 3-12 为相同制孔参数条件下,不同制孔方式制孔后孔入口处直径尺寸图。本次实试验中,在切削参数都相同的条件下,每种制孔方式均会重复制孔 3 次,且每个孔均要求钻通。制孔过程中,孔径理论设计值为 4 mm,钻孔深度  $a_p$  为 4 mm,每齿进给量  $f_z$  为 0.02 mm/z,制孔过程中上述参数均保持不变,主轴转速  $n$  从 5000 r/min 逐渐增大到 14000 r/min。

从图 3-12 可以明显看出,当主轴转速逐渐增大,采用 PCD 常规刀具干钻制孔后获得的孔入口处直径尺寸分别为 3994.5  $\mu\text{m}$ 、3994.0  $\mu\text{m}$ 、3976.3  $\mu\text{m}$  和 3975.9  $\mu\text{m}$ ,采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔后获得的孔入口处直径尺寸分别为 4001.3  $\mu\text{m}$ 、4002.3  $\mu\text{m}$ 、4001.0  $\mu\text{m}$  和 4005.4  $\mu\text{m}$ ,采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔后获得的孔入口处直径尺寸分别为 4013.9  $\mu\text{m}$ 、4014.0  $\mu\text{m}$ 、4019.0  $\mu\text{m}$  和 4024.0  $\mu\text{m}$ 。

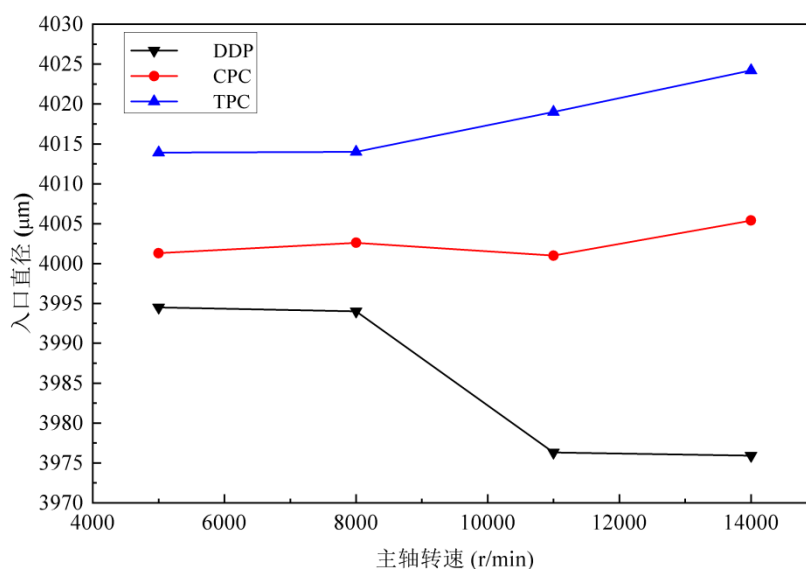


图 3-12 不同制孔方式下孔入口直径尺寸图

图 3-13 为不同制孔方式条件下，孔径相对误差图，且图 3-13 中的制孔参数与图 3-12 中的制孔参数保持一一对应。

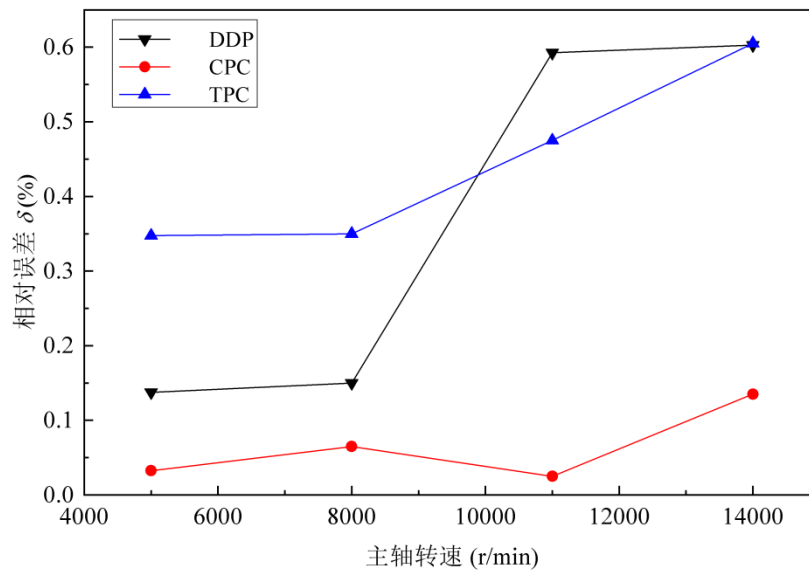


图 3-13 不同制孔方式下孔径相对误差图

根据上述章节 3.1.2 中相对误差公式(3-1)可以计算出不同制孔方式获得的孔入口直径的相对误差，如图 3-13 所示，采用 PCD 常规刀具干钻制孔后孔径相对误差值分别为 0.14%、0.15%、0.59%、0.60%，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔后孔径相对误差值分别为 0.03%、0.06%、0.03、0.14%，采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔后孔径相对误差值分别 0.35%、0.35%、0.48%、0.60%。从此图可以明显看出，在相同切削参数条件下，相较于 PCD 常规刀具干钻制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔来说，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔获得的孔径相对误差较小，制孔过程中的稳定性更好。

上述试验结果表明，在切削参数相同的条件下，相较于其它两种制孔方法，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔获得孔入口处的直径尺寸更加接近理论设计值，且相对误差更小<sup>[80-81]</sup>，制孔精度更高<sup>[82]</sup>。造成这种试验结果的原因可能有以下几个方面：首先，如上图 3-12 所示，相较于其它两种制孔方式，采用 PCD 常规刀具干钻制孔时所获得切削力相对较小，这有助于改善制孔过程中加工区域的摩擦状态，提高整个制孔过程中的稳定性，从而获得更好的孔入口质量，与此同时，相较于传统的干钻制孔，低温冷却可以有效减少加工区域摩擦温度的积累，这有助于减少制孔过程中因树脂基体软化而导致的尺寸偏差。

### 3.2.3 入口处表面形貌分析

图 3-14 为相同制孔参数不同制孔方法条件下获得的孔入口处局部表面形貌图。如图所示，图 3-14(a)和(d)、(b)和(e)、(c)和(f)分别为 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔条件下制孔所获得的试验结果。

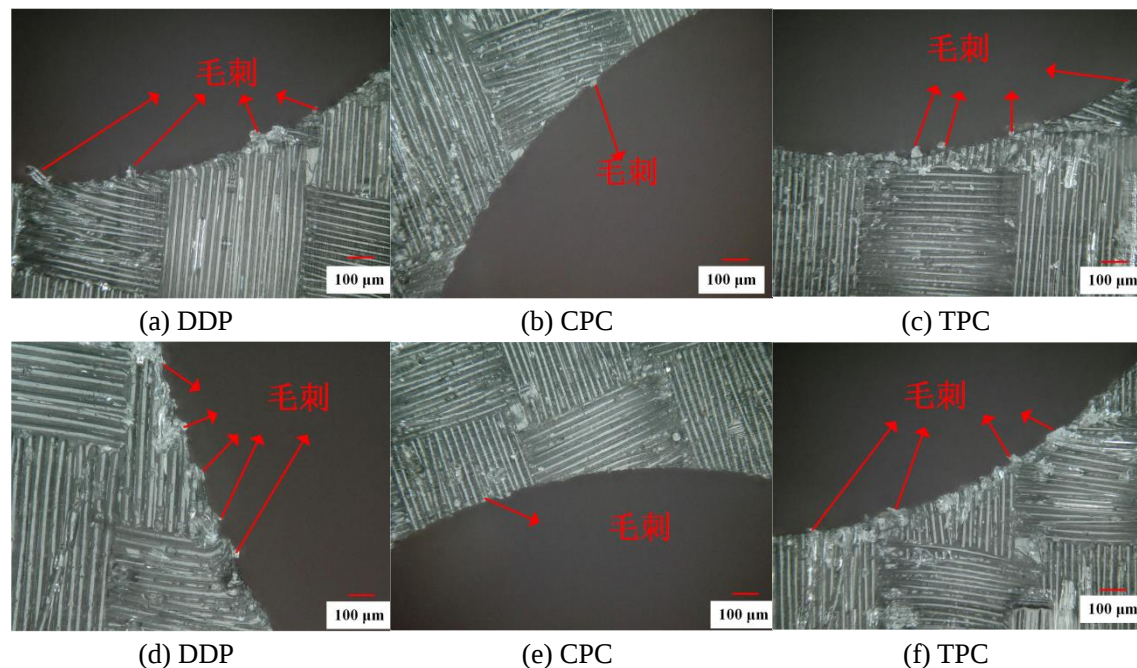


图 3-14 不同制孔方法下孔入口处局部表面形貌图

在本组试验中，图 3-14(a)~(c)的切削参数是相同的( $n=8000$  r/min,  $a_p=4$  mm,  $f_z=0.02$  mm/z)，图 3-14(d)~(f)的切削参数也是相同的( $n=14000$  r/min,  $a_p=4$  mm,  $f_z=0.02$  mm/z)。从图 3-14(a)和(d)可以明显看出，采用 PCD 常规刀具干钻制孔时，孔入口处的表面存在较多的毛刺，且相对粗糙，而采用 PCD 织构刀具低温冷却制孔所获得的孔入口处表面也存在相对较多的毛刺，但相对于 PCD 常规刀具干钻制孔来说，毛刺会相对较少，且尺寸相对较小，如图(c)和(f)所示。但是从图(b)和(e)可以清晰的看出，采用 PCD 常规刀具低温冷却制孔所获得的孔入口处表面的毛刺几乎没有，且入口处表面相对光滑。

总体来说，相较于 PCD 常规刀具干钻制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔能够获得更好的孔入口质量，这主要的原因可能如上图 3-11、3-12 和 3-13 所示，采用这种方法制孔过程中所产生的切削力最小，且制孔状态最稳定，同时，在制孔过程中，相较于孔的内部来说，孔入口处能够更好地获得低温冷却的效果，这有利于降低切削热积累，同

时有利于促进摩擦界面的润滑，从而使得孔入口处的表面更加光滑，毛刺更少<sup>[83]</sup>。

图 3-15 为不同转速条件下 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔所获得的孔入口处整体形貌图。

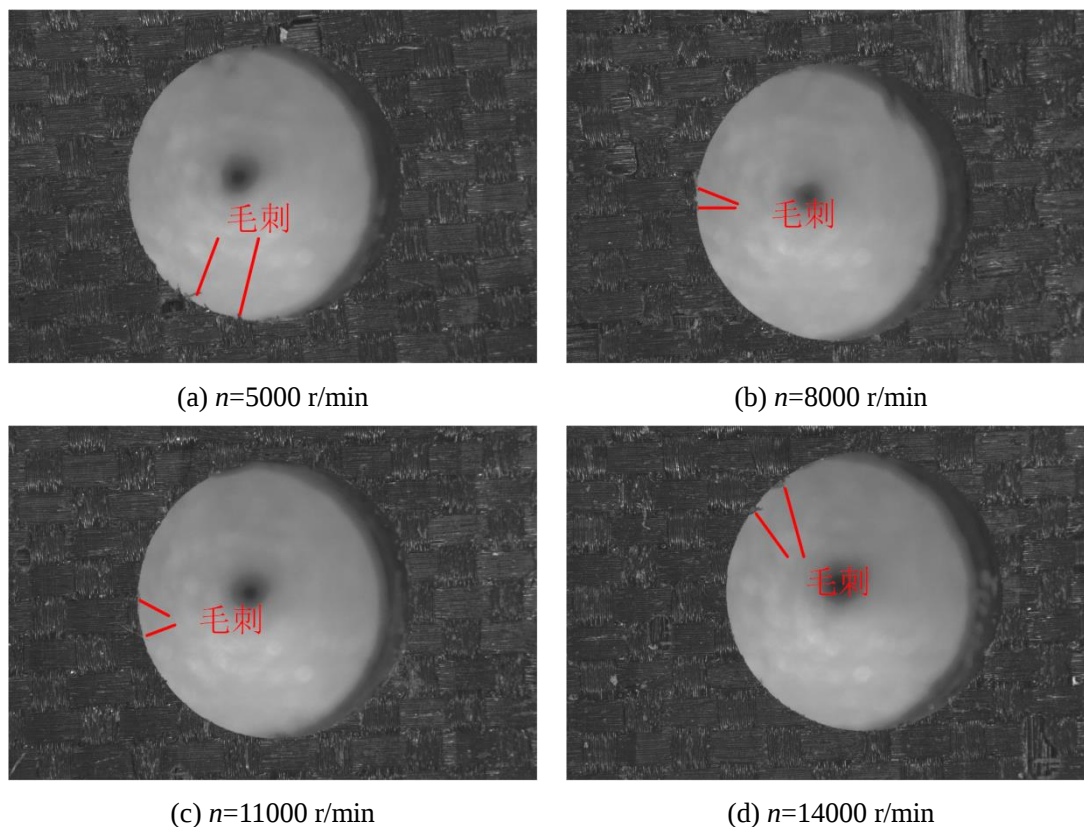


图 3-15 CPC 条件下孔入口处整体形貌图

在制孔过程中，钻孔深度  $a_p$ 、每齿进给量  $f_z$  均为定值，分别为 4 mm、0.02 mm/z。从此图可以明显的看出，在不同主轴转速条件下，采用 PCD 常规刀具低温冷却制孔获得的孔入口处的表面基本看不到毛刺的存在，且相对光滑。图 3-14 和图 3-15 的结果表明，相较于其它两种制孔方式，采用 PCD 常规刀具低温冷却制孔能够有效减少孔入口处毛刺的产生，显著提高了制孔质量。

### 3.2.4 孔内壁表面形貌分析

图 3-16 为相同切削参数条件下，不同制孔方式制孔后孔内壁表面的粗糙度  $R_a$  值。在本组试验中，三种不同制孔方式的钻孔深度  $a_p$  均为 4 mm，每齿进给量为固定值 0.02 mm/z。

从此图可以明显看出，随着主轴转速不断增加，PCD 常规刀具干钻制孔条件下的  $R_a$  变化范围为 0.041  $\mu\text{m}$ ~0.050  $\mu\text{m}$ ，PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔条件下  $R_a$  的变化范围为 0.055  $\mu\text{m}$ ~0.080  $\mu\text{m}$ ，PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制

孔条件下  $R_a$  的变化范围为  $0.063\ \mu\text{m}\sim 0.109\ \mu\text{m}$ 。此外, PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔的条形值最大值分别约为 0.005、0.016 和 0.019。根据上述表面粗糙度测量值和相应的误差条可以发现,相较于 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔这两种方法,PCD 常规刀具干钻制孔所获得的孔内壁表面  $R_a$  值总体更小。

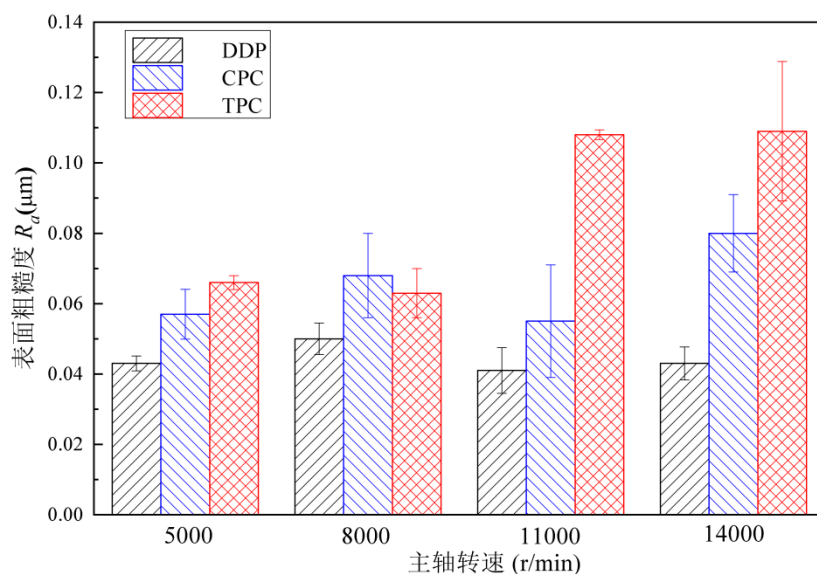


图 3-16 不同制孔方式下孔内壁表面粗糙度

根据上述测量数据结果显示,相较于未加工 CFRP 材料的横截面,采用 PCD 常规刀具干钻制孔和 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔均可以有效降低孔内壁的  $R_a$  值,但相较于 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔,PCD 常规刀具干钻制孔在降低孔内壁  $R_a$  的效果更好。

下图 3-17 为相同切削参数条件下( $n=5000\ \text{r/min}$ 、 $a_p=4\ \text{mm}$ 、 $f_z=0.02\ \text{mm/z}$ ),不同制孔方式制孔后获得的孔内壁表面扫描电镜图。

其中,图 3-17(a)、(c)和(e)分别为 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔所得到的结果,图 3-17(b)、(d)和(f)分别为图 3-17(a)、(c)和(e)相应的放大图。

从图 3-17 可以明显看出,在相同加工参数条件下不同制孔方式对孔内壁质量的影响是不同的。如图 3-17 中(a)和(b)所示,相较于 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔,采用 PCD 常规刀具制孔获得的孔内壁表面基本上没有切屑黏结情况,且孔内壁表面相对光滑平整,树脂涂

覆相对均匀。

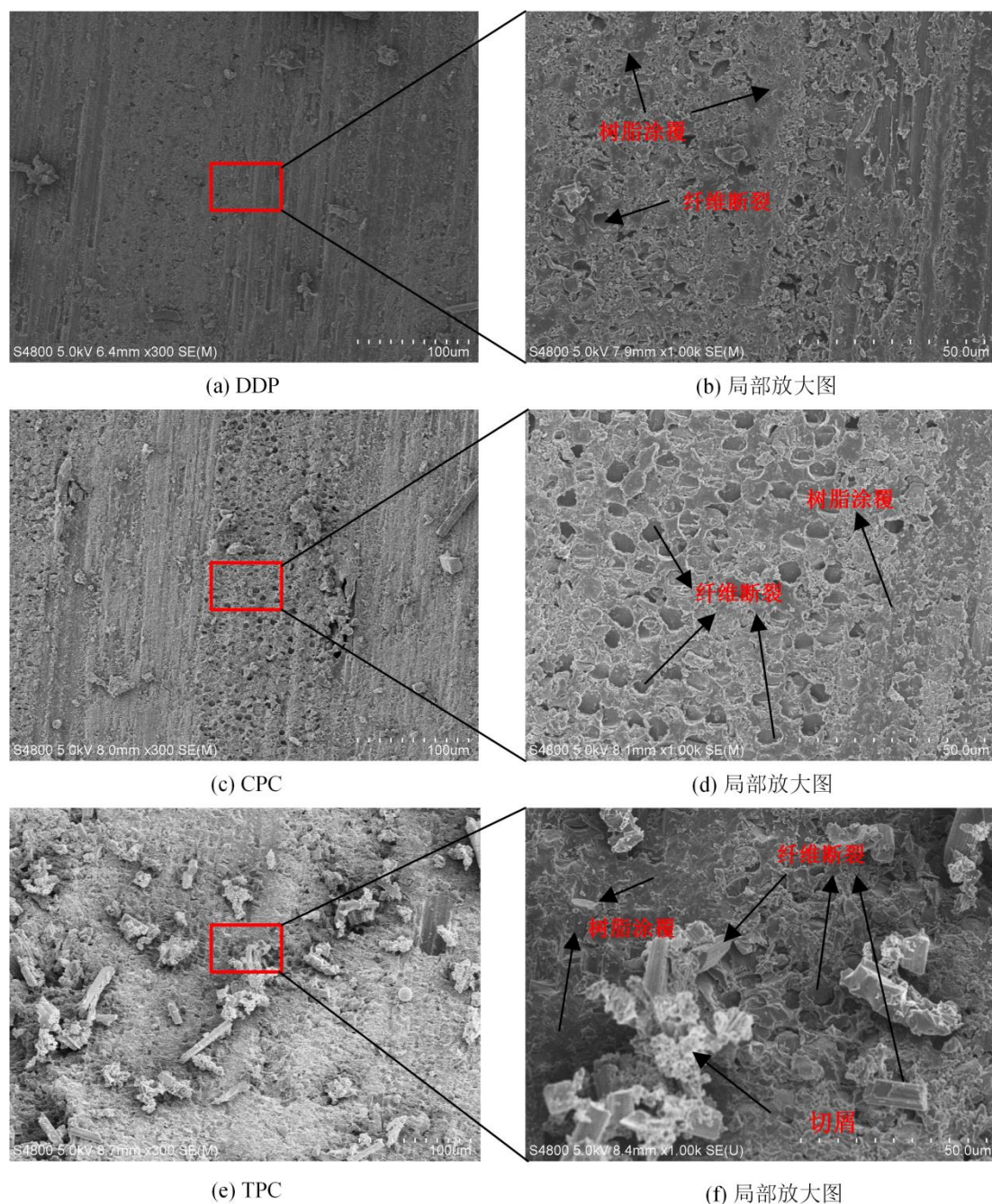


图 3-17 不同制孔方式下孔内壁扫描电镜图

从图 3-17(c)、(d)、(e)和(f)可以明显看出，相较于传统干钻制孔，在二氧化碳低温冷却制孔条件下，所获得孔的内壁表面存在较为明显的切屑黏结情况，并且出现了一些明显的纤维断裂和基体分布不均的情况。如图 3-17(e)和(f)所示，相较于 PCD 常规刀具干钻制孔和 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔，采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔获得的孔内壁质量最差。上述结果表明，相较于其它两种制孔方式，采用 PCD 常规刀具干钻制孔可以获得更好的孔内壁

表面质量。造成这种结果的原因可能是：首先，PCD 织构刀具的表面微织构可能会增加刀具表面的  $R_a$ ，从而增大制孔过程中的摩擦力，导致所得到的孔内壁质量相对较差。其次，采用二氧化碳低温冷却制孔也可能会使得孔内壁产生一些纤维裂纹和凹坑，进一步增加表面粗糙度。最后，在本次试验中，设计和选择的刀具前角为 0 度，PCD 刀具表面织构的特征和分布可能是导致切削效果最差的因素之一。因此，图 3-17 中不同制孔方法得到的结果可以在一定程度上解释上述图 3-16 中孔内壁表面粗糙度的差异。

### 3.2.5 刀具的表面黏结分析

图 3-18 为在相同切削参数条件下，采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔、PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔三种制孔方式制孔后刀具前刀面的光学 SEM 图。其中，图 3-18(a)和(b)为采用 PCD 常规刀具制孔过程中产生的切屑，图 3-18(c)为 PCD 常规刀具干钻制孔后刀具前刀面的切屑黏结图，图 3-18(d)为图 3-18(c)中 A 区域的 EDS 分析，图 3-18(e)为采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔后刀具前刀面的切屑黏结图，图 3-18(f)为采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔后刀具前刀面的切屑黏结图。

从此图可以明显看出，采用 PCD 常规刀具干钻制孔后刀具的前刀面存在许多的黏结物，并且还存在少量断裂的纤维丝，如图 3-18(c)所示，在刀具表面的黏结物中进行区域取样(区域 A)，并对区域 A 中的黏结物进行 EDS 成分分析后发现，刀具表面的黏结物主要来自于 CFRP 材料制孔过程中产生的切屑。从图 3-18(e)和(f)可以明显看出，采用 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔这两种方法，刀具的前刀面几乎没有黏结物。试验结果表明，在减少刀具表面黏结方面，相较于传统的干钻制孔，采用二氧化碳低温冷却制孔的效果更加明显，效果更好。

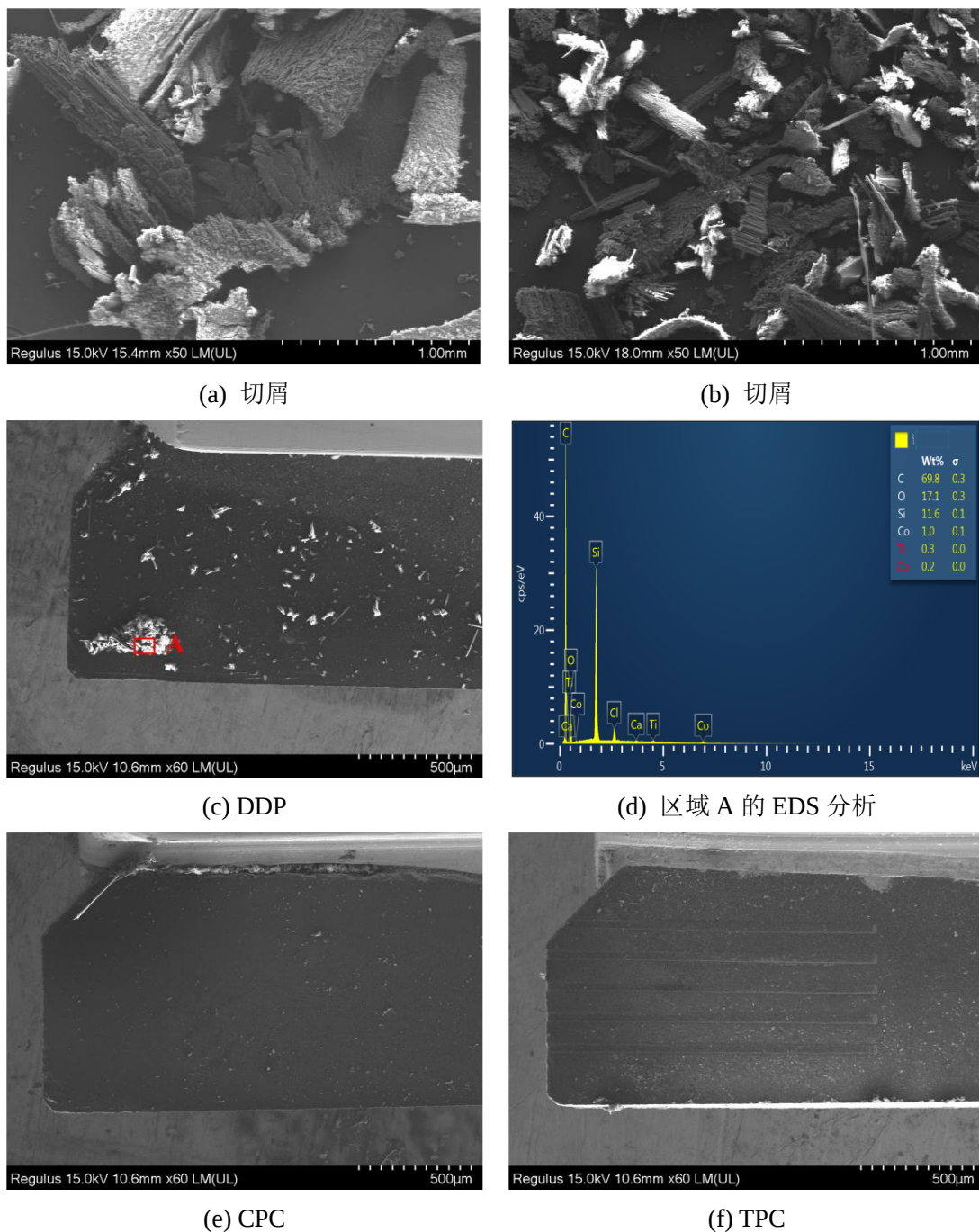


图 3-18 不同方式制孔后刀具前刀面光学 SEM 图

### 3.3 制孔机理讨论和分析

从图 3-3、3-11 可以明显看出,在不同进给速度和不同主轴转速条件下,采用 PCD 常规刀具干钻制孔过程中产生的 Z 轴方向上切削力  $F_z$  的取值范围分别为 414.9 N~951.4 N、487.5 N~761.3 N,采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔过程中产生的 Z 轴方向上切削力  $F_z$  的取值范围分别为 483.4 N~880.1 N、398.3 N~640.8 N,采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔过程中产生的

Z 轴方向上切削力  $F_z$  的取值范围分别为 614.9 N~1033.0 N、536.2 N~901.9 N，结果表明，在制孔参数都相同的条件下，相较于其它两种制孔方式，采用 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔过程中产生的 Z 轴方向上切削力  $F_z$  均会偏高。图 3-8、3-16、3-17 的结果表明，相较于二氧化碳低温冷却制孔，采用传统干钻制孔获得的孔内壁表面质量更好，树脂涂覆更加均匀。图 3-7、3-18 的结果表明，相较于传统干钻制孔，采用二氧化碳低温冷却制孔能够有效抑制刀具前刀面的切屑黏结。在低温和干式制孔加工条件下，对切削力、刀具表面黏结和孔内部形貌的差异性及其加工机理的讨论和分析如下。

碳纤维复合材料是由高强碳纤维增强相与低强树脂基相复合而成的新型复合材料，所以材料本身具有的各向异性、非均质性等特性，且加工过程中，不同纤维角的纤维丝断裂的形式区别也很大，因此，CFRP 材料的制孔加工是一个相对复杂的过程。在传统加工方法制孔过程中，复合材料中的纤维丝在刀具的作用下受到挤压、剪切、弯曲等作用后发生形变，当受到的力超过纤维的所能承受的最大强度的时候，纤维发生脆性断裂，从而形成切屑。

在干式制孔加工条件下对 CFRP 材料进行制孔，由于制孔过程处于一个半封闭状态，且相较于金属材料来说，碳纤维复合材料的导热效率相对较差，所以制孔过程中产生的切削热难以及时有效的散发，从而使得加工区域的温度不断升高，容易导致材料基体发生软化，从而利于降低制孔过程中产生的切削力，在一定的切削参数条件下也使得孔内壁树脂基体涂覆平整、均匀性较好，获得相对较小的  $R_a$ <sup>[83-84]</sup> 相对于传统干式钻孔，采用二氧化碳低温冷却制孔条件下 Z 轴方向上的切削力和总的切削力均更大，这主要归因于：一方面，在二氧化碳低温冷却制孔条件下，有助于加快制孔过程中切削热的散发，使得加工区域的温度降低，而温度降低会导致复合材料杨氏模量和拉伸强度增加，使复合材料变得更硬、更脆、更易碎，会产生更强的抗变形能力；另一方面，在本次试验中，采用 CFRP 材料的厚度为 3 mm，制孔过程中，从刀具刚开始接触到材料一直到制孔完成，刀具与工件之间的接触时间较短，产生的摩擦热相对较少，而二氧化碳低温冷却又加快的切削热的散发，导致材料基体软化效果变差，因此，相对于传统干式加工，低温冷却易于产生较高的切削力<sup>[84-86]</sup>。

相较于传统干钻制孔，采用二氧化碳低温冷却制孔能够有效抑制刀具前刀面

的切屑黏结情况，出现这种情况的主要原因可能是：一方面，二氧化碳低温冷却辅助切削能够加快刀-屑接触界面的散热，能够有效降低加工区域的切削温度，削弱其黏附特性，不容易黏附在刀具表面；另一方面，加工过程供应的二氧化碳气流或切削摩擦有助于将刀具表面微小的黏结物吹走和刮擦掉，从而有效降低刀具前刀面的表面黏结情况。

在二氧化碳低温冷却辅助条件下，相较于传统干钻制孔，二氧化碳低温冷却有利于降低制孔过程产生的摩擦热，加速加工区域切削热的散发，而且二氧化碳低温冷却能够改变复合材料的弹性模量、刚度和脆性等特性<sup>[86]</sup>，这使得复合材料碳的纤维脆性增加，易于断裂，从而形成了较多碳纤维断裂和纤维断口凹坑(图 3-8(b)、(d)、(e)，图 3-17)，同时也容易出现微裂纹(图 3-8(d))。

### 3.4 本章小结

本章在干式制孔和二氧化碳低温冷却制孔条件下，分别采用了 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔三种方式，对 CFRP 材料开展了制孔试验，在不同的切削参数条件下，对制孔过程中产生的切削力、孔入口直径尺寸及相对误差、刀具的表面黏结和孔内壁形貌及表面缺陷等进行了讨论和分析，最后得出以下结论：

(1) 在干式和低温冷却条件下，PCD 刀具钻入 CFRP 材料过程产生的切削力随着进给速度、主轴转速的增大而增大。当进给速度不断增大，相较于传统干式钻孔，采用低温冷却制孔条件下获得的 Z 轴方向上的切削力和总切削力更大；而当主轴转速不断增大，相较于其它两种制孔方法，采用 PCD 常规刀具低温冷却干钻制孔在降低切削力方面的效果更加显著。

(2) 在进给速度不断增大且其它制孔参数均保持不变的条件下，相较于 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔，采用 PCD 常规刀具干钻制孔能够有效降低孔入口直径尺寸的相对误差，制孔过程中的稳定性更好。在主轴转速不断增大且其它制孔参数均保持不变的条件下，相较于 PCD 常规刀具干钻制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔，采用 PCD 常规刀具低温冷却制孔获得的孔入口直径更加接近理论设计值，相对误差较小，孔入口处的表面质量更好更光滑，毛刺更少。

(3) 在其它切削参数都相同且仅改变进给速度或主轴转速条件下，与传统干

钻制孔相比，采用低温冷却制孔能够有效降低刀具前刀面的切屑黏结，提高刀具前刀面的抗黏结能力。

(4) 在相同切削参数且仅改变进给速度或主轴转速条件下，采用传统干钻制孔获得的孔内壁表面树脂基体涂覆和分布更加平整和均匀；在低温冷却条件下，与干式组制孔相比，孔壁表面出现了明显的纤维断裂，形成了较多纤维断口坑，出现了微裂纹现象，树脂表面涂覆均匀性较差。

(5) 在相同切削参数且仅改变主轴转速条件下，相较于 PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却制孔，采用 PCD 常规刀具干钻制孔获得的表面粗糙度更小。SEM 图像结果表明，采用 PCD 常规刀具干钻制孔所得到的孔壁质量更好，孔内基体涂覆更加均匀，纤维丝断裂更少。

## 第4章 CFRP 材料 PCD 刀具超声制孔试验

本章的主要内容是针对 CFRP 材料, 分别开展在传统干钻和超声干钻条件下 PCD 刀具制孔试验研究, 探求提升碳纤维复合材料切削性能的方法, 进一步提高 CFRP 的制孔效率和质量。在干钻和超声干钻条件下, 分别采用 PCD 常规刀具和 PCD 织构刀具对碳纤维复合材料进行制孔, 对不同条件下产生的切削力、孔入口直径尺寸、孔外部形貌及刀具表面黏结情况进行分析, 研究分析不同制孔方法对 CFRP 材料制孔性能的影响规律。

### 4.1 不同进给量下超声制孔试验

本组试验中, 主轴转速  $n=8000$  r/min, 钻孔深度  $a_p=4$  mm, 每齿进给量分别为 0.02 mm/z、0.03 mm/z、0.04 mm/z、0.05 mm/z。

#### 4.1.1 不同制孔方式下切削力分析

##### (1) 织构化刀具干钻下的切削力

图 4-1 为干钻制孔条件下, PCD 常规刀具和 PCD 织构刀具对 CFRP 材料制孔过程中产生的总切削力  $F_r$  的变化曲线。

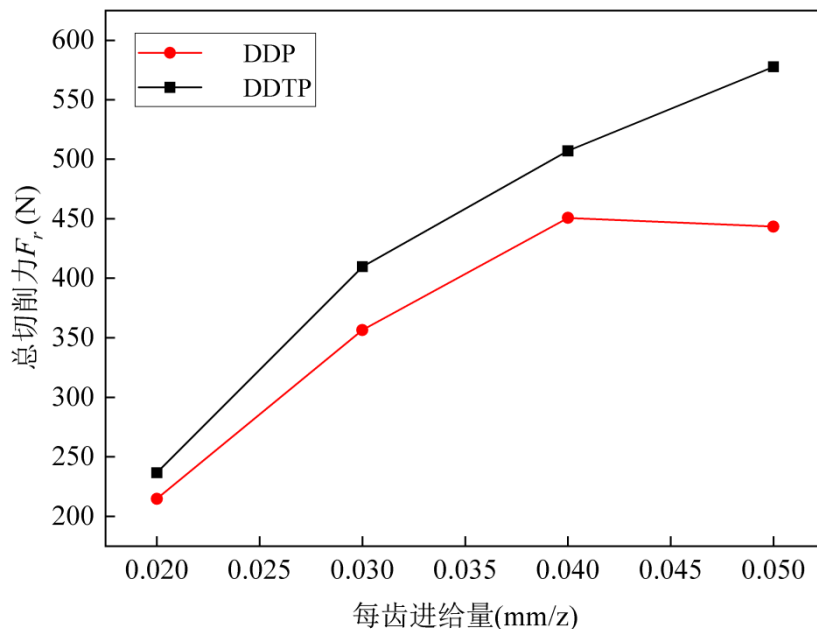


图 4-1 常规刀具干钻和织构刀具干钻

从此图可以清晰看出, 在干钻条件下, 随着每齿进给量增加, PCD 常规刀具制孔过程中产生的总切削力大小分别为 214.79 N、356.45 N、450.64 N、443.35

N, PCD 织构刀具制孔过程中产生的总切削力大小分别为 236.67 N、409.74 N、506.99 N、577.68 N。相较于 PCD 织构刀具, 采用 PCD 常规刀具在制孔过程中产生的总切削力分别降低了 9.24%、13.01%、11.11%、23.25%。结果显示, 在干钻条件下, 随着每齿进给量的增加, PCD 常规刀具制孔过程中产生的总切削明显低于 PCD 织构刀具。

### (2) 超声振动对刀具切削力的影响

图 4-2 为超声干钻制孔条件下总切削力  $F_r$  的变化曲线, 从此图可以看出, 随着每齿进给量的增加, PCD 常规刀具干钻制孔过程中产生的总切削力分别为 214.79 N、356.45 N、450.64 N、443.35 N, 超声干钻制孔过程中产生的总切削力分别为 326.90 N、393.83 N、473.25 N、592.12 N。相较于超声干钻, 干钻制孔过程中产生的总切削力分别降低了 34.29%、9.49%、4.78%、25.12%。结果显示, 相较于超声干钻制孔, 采用 PCD 常规刀具干钻制孔可以明显降低制孔过程中产生的总切削力。

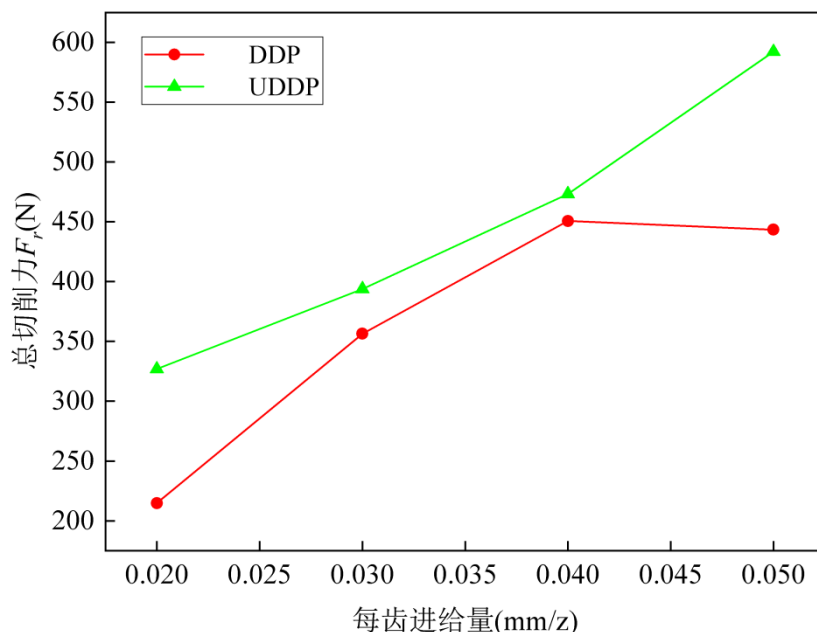


图 4-2 常规刀具干钻和常规刀具超声干钻

### (3) 超声复合织构化刀具对切削力的影响

图 4-3 为超声振动复合 PCD 织构刀具条件下, CFRP 材料制孔过程中产生的总切削力  $F_r$  的变化曲线。

从此图可以看出, 在超声干钻条件下, 随着每齿进给量的增加, PCD 常规刀具制孔过程中产生的总切削力分别为 326.90 N、393.83 N、473.25 N、592.12 N,

PCD 织构刀具制孔过程中产生的总切削力分别为 213.39 N、340.62 N、473.32 N、517.95 N。试验结果显示,在超声干钻条件下,相较于 PCD 常规刀具,采用 PCD 织构刀具整体上来说,可以显著降低制孔过程中产生的总切削力,且总切削力最大降低 34.72%。

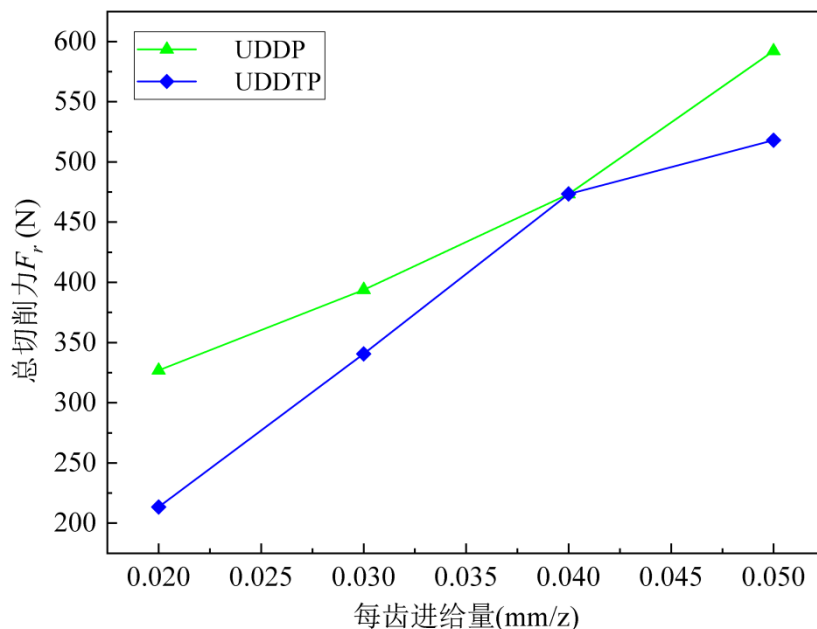


图 4-3 常规刀具超声干钻和织构刀具超声干钻

#### (4) 干钻与超声干钻对织构刀具切削力的影响

图 4-4 为 PCD 织构刀具制孔条件下,分别采用干钻和超声干钻制孔过程中产生的总切削力变化曲线。

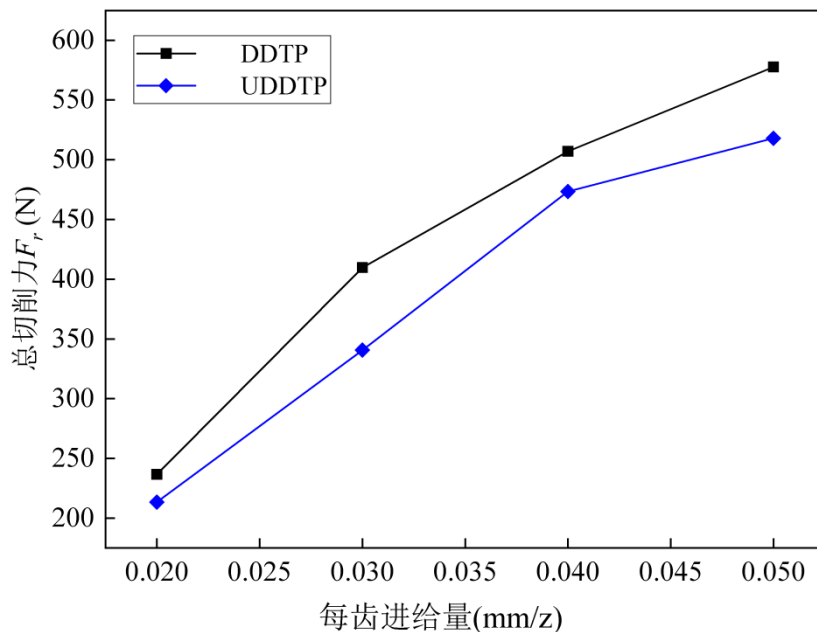


图 4-4 织构刀具干钻和织构刀具超声干钻

从此图可以清晰看出，在 PCD 织构刀具制孔加工条件下，采用干钻制孔过程中产生的总切削力分别为 236.67 N、409.74 N、506.99 N、577.68 N，超声干钻制孔过程中产生的总切削力分别为 213.39 N、340.62 N、473.32 N、517.95 N。上述结果显示，在 PCD 织构刀具制孔条件下，相较于干钻，采用超声干钻制孔产生的总切削力分别降低了 9.84%、16.87%、6.64%、10.34%，总体来说，超声干钻可以有效降低制孔过程中产生的总切削力。

#### 4.1.2 孔入口直径尺寸及相对误差

图 4-5 为在相同制孔参数条件下，采用不同制孔方式制孔后获得的孔入口直径尺寸对比图。

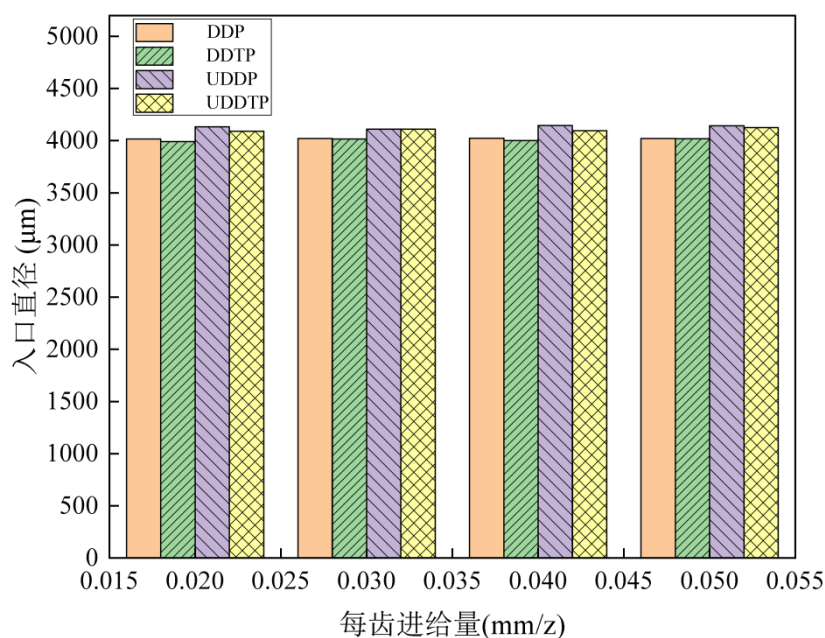


图 4-5 不同制孔方式下孔入口直径尺寸图

从此图可以清晰的看出，随着每齿进给量从 0.02 mm/z 增加到 0.05 mm/z，干钻条件下，采用 PCD 常规刀具制孔的孔直径尺寸大小分别为 4015.0 μm、4019.6 μm、4022.1 μm、4021.1 μm，PCD 织构刀具制孔的孔直径尺寸大小分别为 3991.1 μm、4015.5 μm、4001.5 μm、4017.9 μm。在超声干钻条件下，PCD 常规刀具制孔的孔直径尺寸大小分别为 4132.2 μm、4111.0 μm、4144.7 μm、4142.5 μm，PCD 织构刀具制孔的孔直径尺寸大小分别为 4091.3 μm、4111.1 μm、4093.9 μm、4124.7 μm。

根据上述章节 3.1.2 中相对误差公式(3-1)可以计算出不同制孔方式下孔入口直径的相对误差，如图 4-6 所示。结果表明，随着每齿进给量的不断增大，在干

钻条件下,PCD 常规刀具制孔的孔径相对误差分别为 0.38%、0.49%、0.55%、0.53%,PCD 织构刀具制孔的孔径相对误差分别为 0.22%、0.39%、0.04%、0.45%。相较于 PCD 常规刀具制孔,采用 PCD 织构刀具制孔的孔径相对误差分别降低了 0.16%、0.10%、0.51%、0.08%。

在超声干钻条件下,PCD 常规刀具制孔的孔径相对误差分别为 3.31%、2.78%、3.62%、3.56%,PCD 织构刀具制孔的孔径相对误差分别为 2.28%、2.78%、2.35%、3.12%。相较于 PCD 常规刀具超声干钻制孔,采用 PCD 织构刀具超声干钻制孔的孔径相对误差分别降低了 1.03%、0%、1.27%、0.44%。

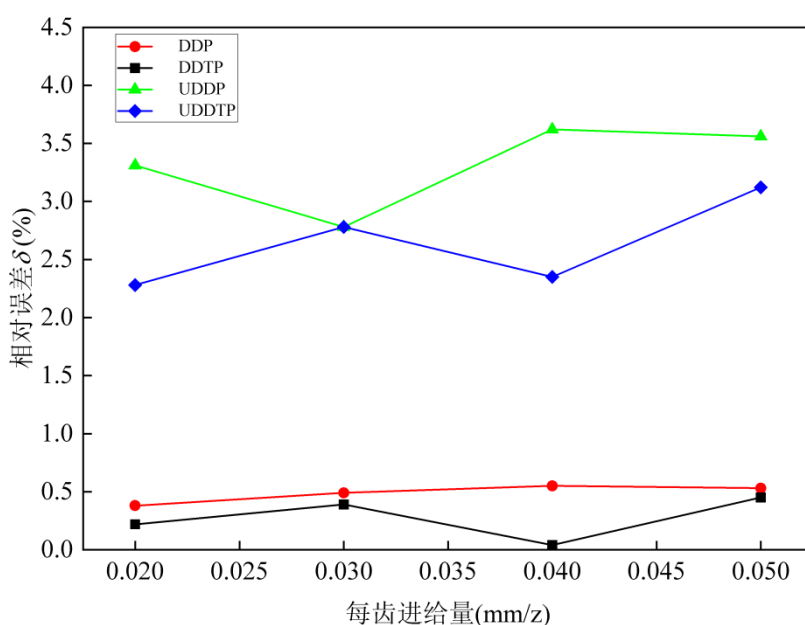


图 4-6 不同制孔方式下孔径相对误差图

#### 4.1.3 复材孔入口处表面形貌分析

图 4-7 为在相同制孔参数条件下,不同制孔方式制孔后孔入口处表面的光学形貌图。从图 4-7 可以看出,采用传统干钻制孔时,孔入口处的表面毛刺较明显,且尺寸相对较大,如图 4-7(a)、(b)所示。采用超声干钻制孔条件下,孔入口处表面基本没有较大毛刺,表面相对光滑,如图 4-7(c)、(d)所示。

图 4-8 为在相同制孔参数条件下,采用不同制孔方式制孔后孔入口处表面微观缺陷图。从图 4-8 可以清晰的看出,采用 PCD 常规刀具制孔获得的孔入口处存在较多的微小毛刺、撕裂等缺陷,入口处总体的表面质量较差,如图 4-8(a)、(b)所示,采用 PCD 织构刀具制孔获得的孔入口处表面微小毛刺相对较少,且孔入口处的表面更加光滑,表面质量更佳,如图 4-8(c)、(d)所示。

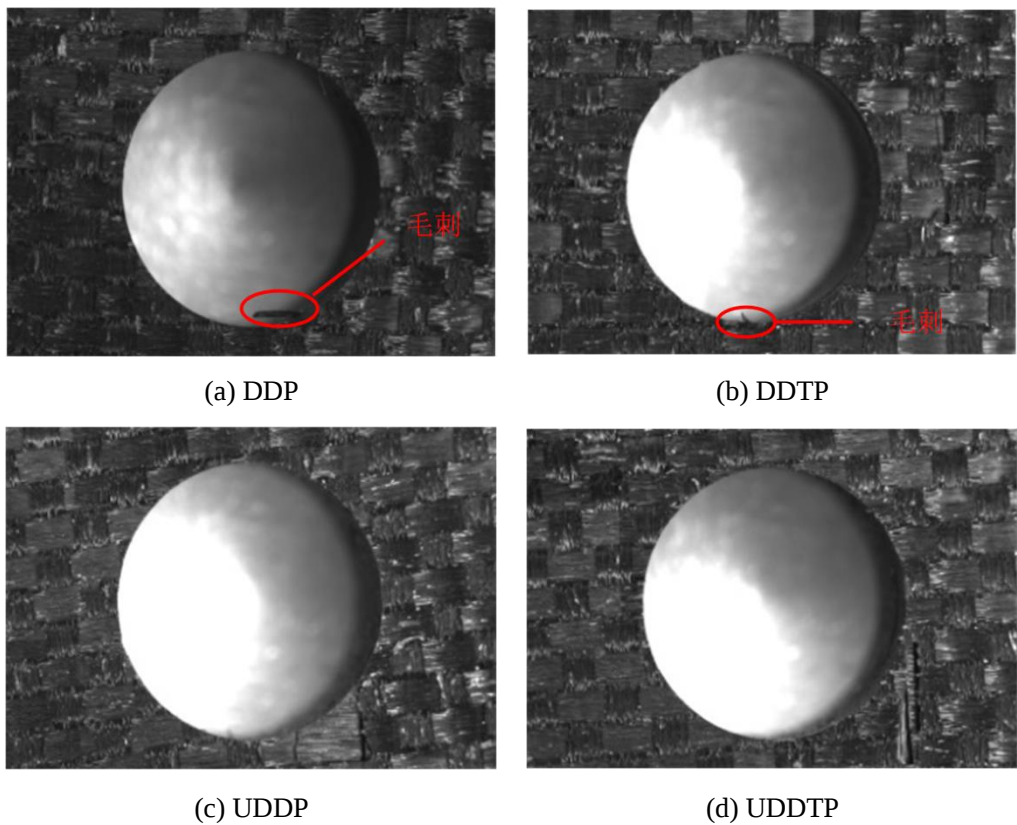


图 4-7 不同制孔方式下孔入口外部宏观形貌

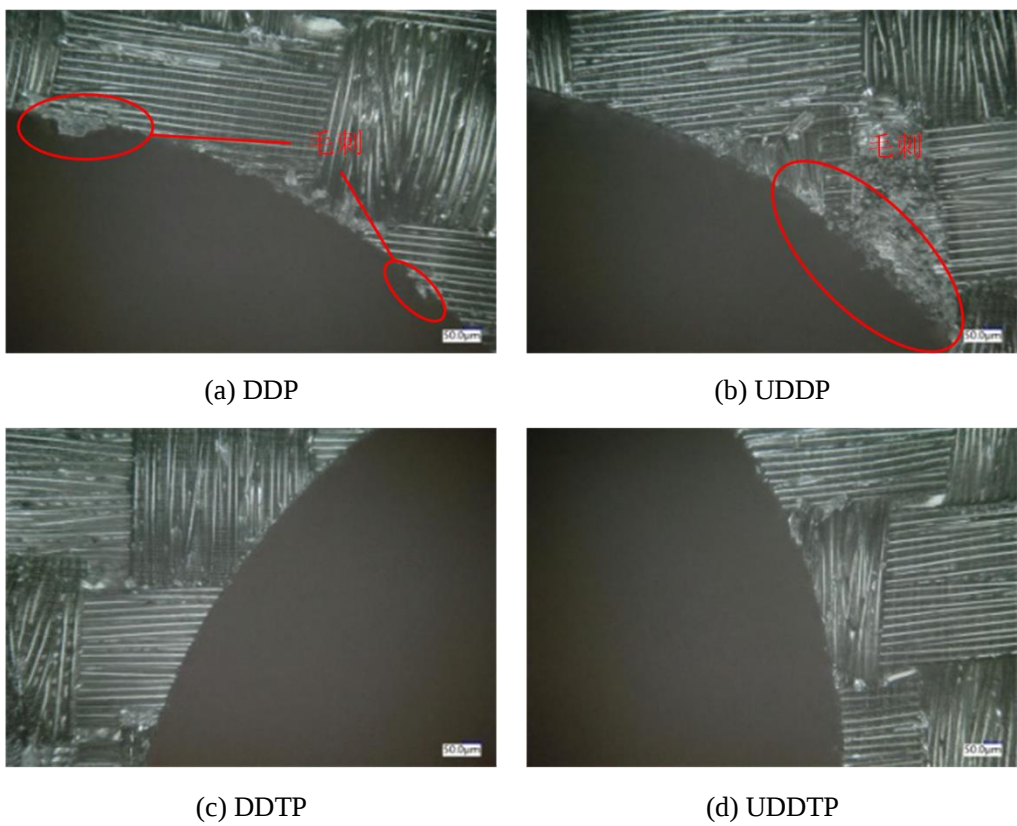


图 4-8 不同制孔方式下孔入口处表面微观形貌

上述结果表明，相较于传统干钻制孔，采用超声振动干钻制孔可以有效抑制

制孔过程中孔入口处较大毛刺的产生。相较于 PCD 常规刀具，使用 PCD 织构刀具制孔可以有效提高孔入口处的表面质量。

#### 4.1.4 PCD 刀具的表面黏结状况

图 4-9 为在相同制孔切削参数条件下，采用不同制孔方式制孔后获得的 PCD 刀具前刀面的 SEM 图。从此图可清晰看出，不同制孔方式下刀具表面均存在明显的黏结物。从图 4-9(a)、(b)可看出，在织构刀具制孔条件下，相对于单一干钻制孔，采用超声干钻制孔后，出现了较多微小的切断纤维丝分布，从图 4-9(c)、(d)可看出，在常规刀具条件下，采用干钻制孔后刀具表面黏结物中分布着许多未被切断的纤维丝，且尺寸相对较长，而采用超声干钻制孔后，刀具表面出现的纤维丝基本都被切断，且尺寸相对更小。上述结果表明，在干式制孔条件下，相较于传统干钻，超声干钻具有断屑的效果，在制孔过程中使得纤维丝断裂得更加充分，能够促进切屑的排出。

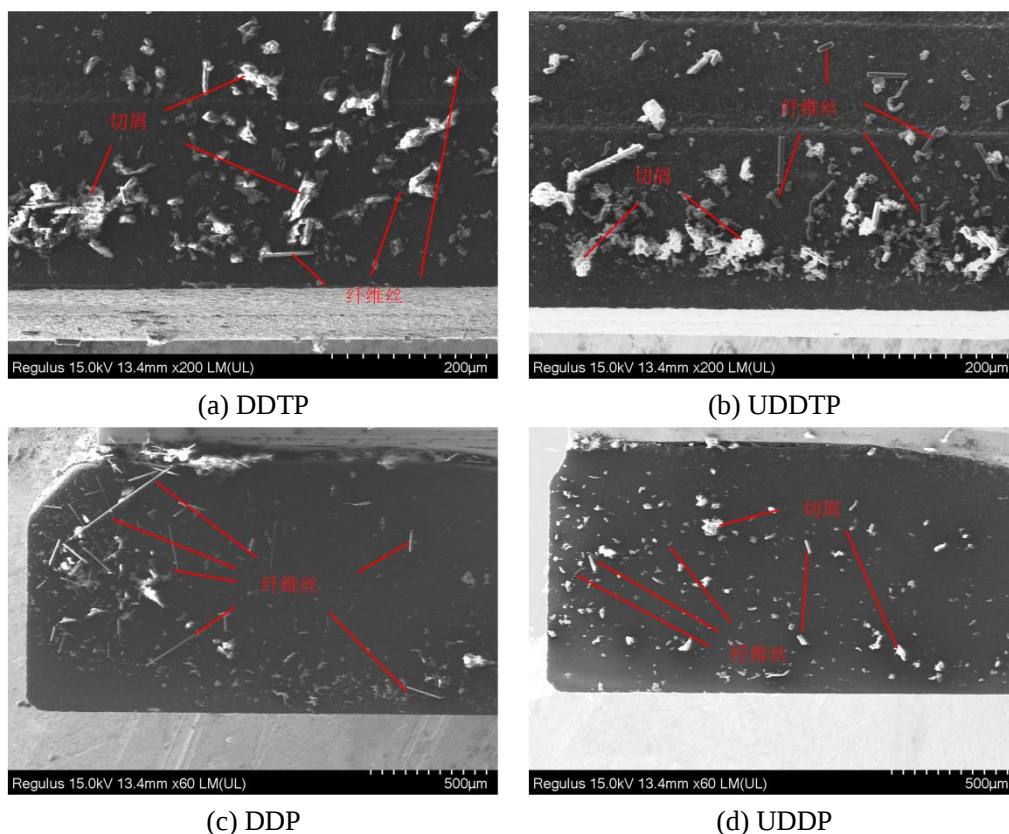


图 4-9 不同制孔方式下刀具表面黏结情况

## 4.2 不同主轴转速下超声制孔试验

本组试验中，每齿进给量  $f_z$  均为为 0.02 mm/z，钻孔深度  $a_p=4$  mm，主轴转速  $n$  分别为 5000 r/min、8000 r/min、11000 r/min、14000 r/min。

### 4.2.1 不同制孔方式下切削力分析

图 4-10 为每齿进给量均为  $0.02 \text{ mm/z}$ ，主轴转速逐渐增大条件下，四种不同制孔方式制孔过程中产生的切削力变化曲线。

从此图可以明显的看出，随着主轴转速从  $5000 \text{ r/min}$  逐渐增加到  $14000 \text{ r/min}$ ，不同制孔方式下产生的总切削力  $F_t$  均呈现增大的趋势。这是因为在单位时间内，随着主轴转速的增大，刀具与工件之间的相对接触时间增加，从而导致切削力增大。但相较于 PCD 织构刀具干钻制孔、PCD 常规刀具超声干钻制孔、PCD 织构刀具超声干钻制孔这三种方法来说，采用 PCD 常规刀具干钻制孔过程中产生的总切削力明显会更低。

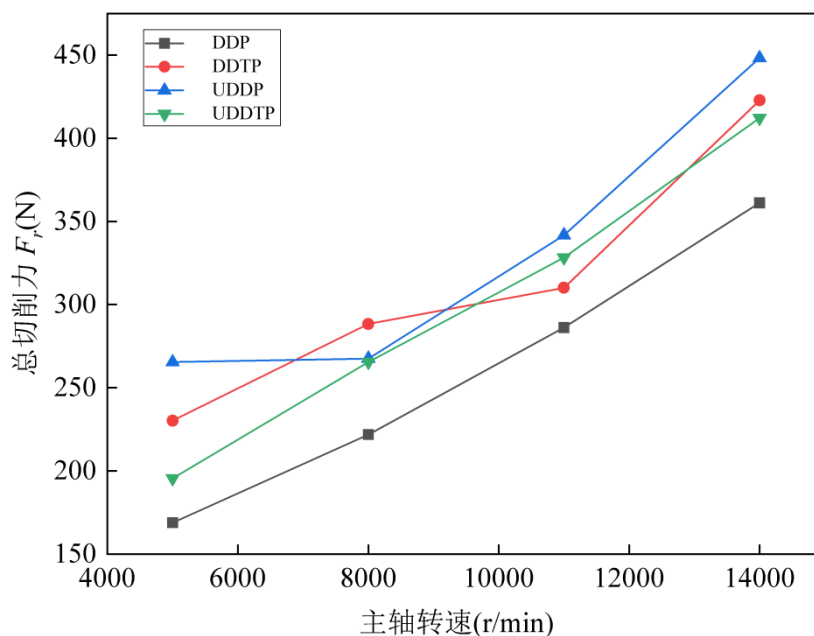


图 4-10 不同转速条件下总切削力变化曲线

图 4-11 为在不同主轴转速且其它制孔参数相同条件下，分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔和 PCD 织构刀具干钻制孔两种方式在制孔过程中产生的总切削力变化曲线。图 4-12 为在不同主轴转速且其它制孔参数相同条件下，分别采用 PCD 常规刀具干钻和 PCD 常规刀具超声干钻制孔两种方式在制孔过程中产生的总切削力变化曲线。

从图 4-11、图 4-12 可以清晰的看出，在干钻条件下，随着主轴转速的不断增加，PCD 常规刀具制孔过程中产生的切削力大小分别为  $168.96 \text{ N}$ 、 $221.94 \text{ N}$ 、 $286.19 \text{ N}$ 、 $361.12 \text{ N}$ ，采用 PCD 织构刀具制孔过程中产生的切削力大小分别为  $230.26 \text{ N}$ 、 $288.37 \text{ N}$ 、 $310.12 \text{ N}$ 、 $422.69 \text{ N}$ 。

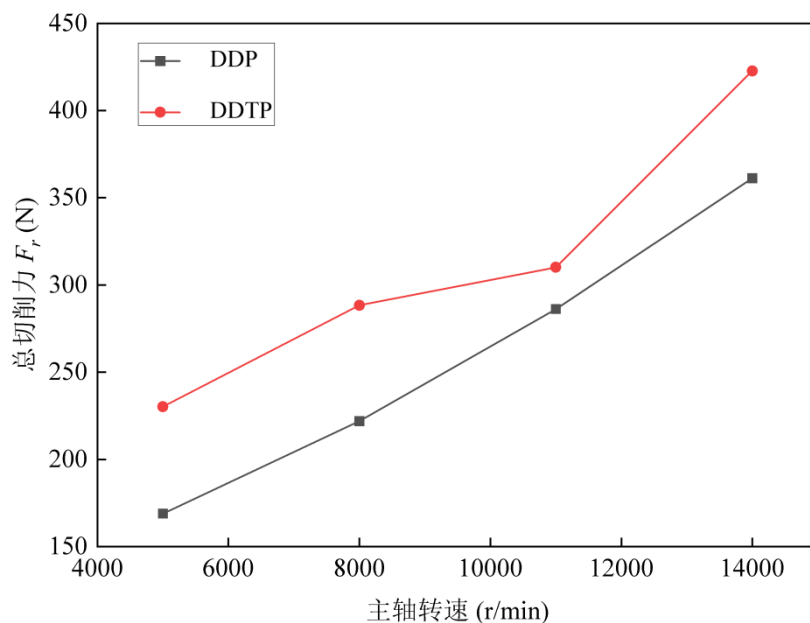


图 4-11 干钻条件下常规刀具和织构刀具

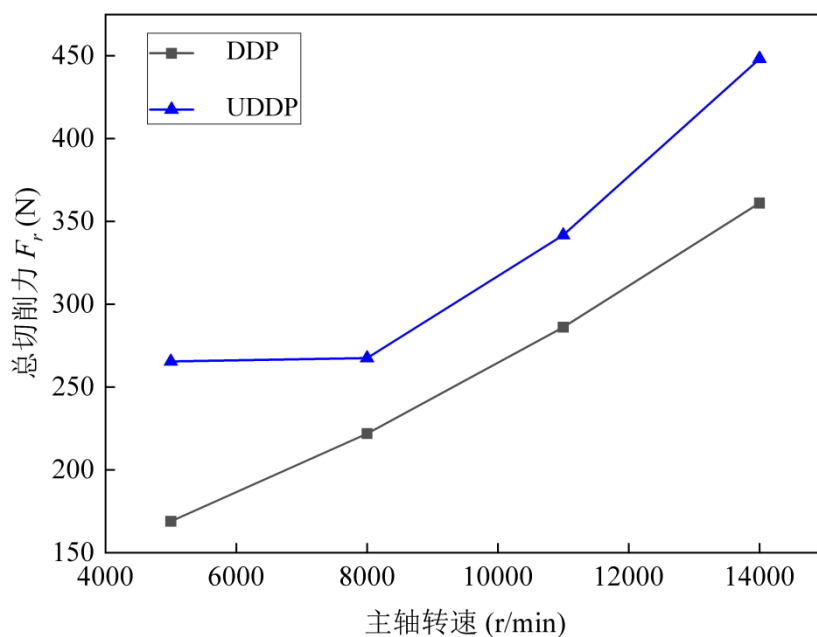


图 4-12 常规刀具条件下干钻和超声干钻

图 4-13 为在不同主轴转速且其它制孔参数相同条件下, 分别采用 PCD 常规刀具超声干钻制孔和 PCD 织构刀具超声干钻制孔两种方式在制孔过程中产生的总切削力变化曲线。图 4-14 为在不同主轴转速且其它制孔参数相同条件下, 分别采用 PCD 织构刀具干钻制孔和 PCD 织构刀具超声干钻制孔两种方式在制孔过程中产生的总切削力变化曲线。

从图 4-13、图 4-14 可以清晰的看出, 在超声干钻条件下, 随着主轴转速的不断增加, PCD 常规刀具制孔过程中产生的切削力大小分别为 265.46 N、267.52

N、341.71 N、448.17 N，PCD 织构刀具制孔过程中产生的切削力大小分别为 195.61 N、265.53 N、328.34 N、412.17 N。。

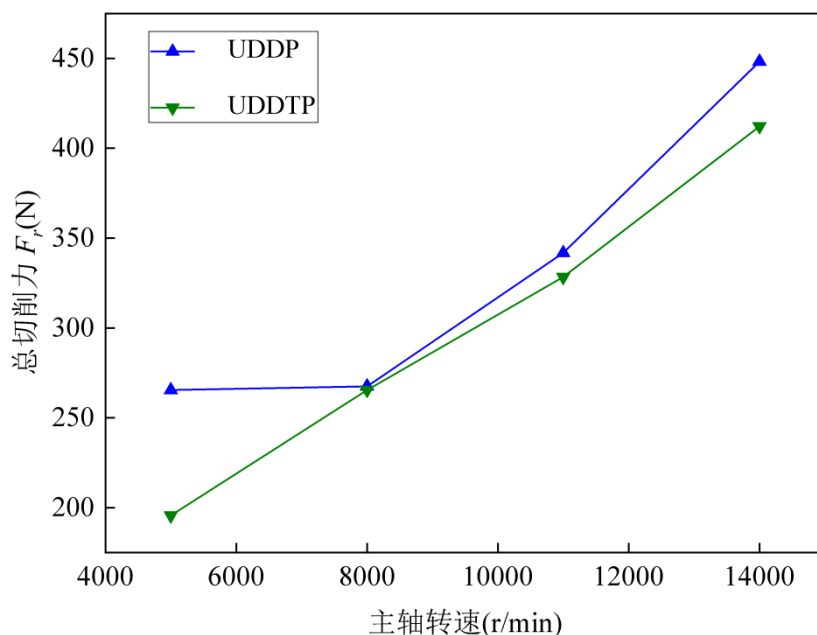


图 4-13 超声下常规刀具和织构刀具

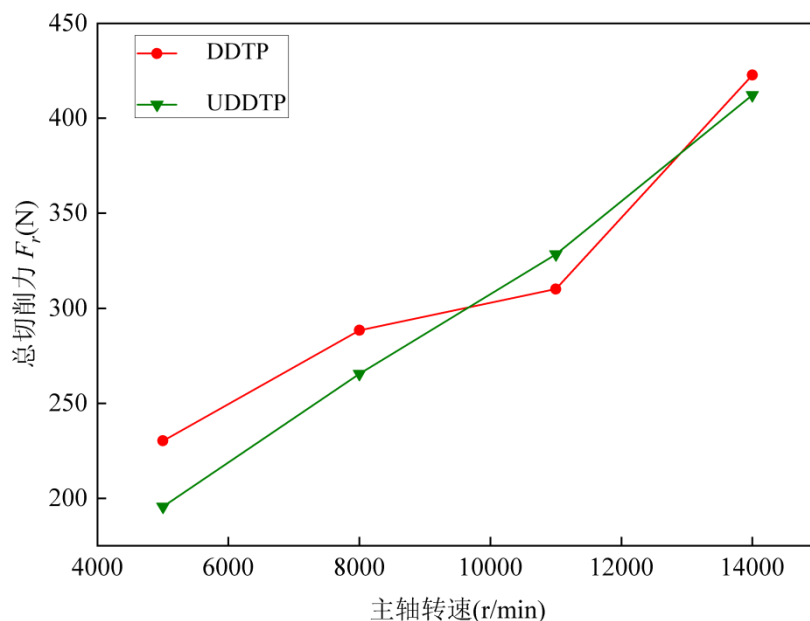


图 4-14 织构刀具下干钻和超声干钻

根据上述数据结果发现，相较于 PCD 织构刀具干钻制孔和 PCD 常规刀具超声制孔，采用 PCD 常规刀具干钻制孔产生的切削力明显降低，如图 4-11、图 4-12 所示，制孔过程中总切削力分别降低了 7.72%~26.62%、16.25%~36.35%。在超声干钻条件下，相较于 PCD 常规刀具，采用 PCD 织构刀具制孔能有效降低制孔过程中产生的切削力，如图 4-13 所示，切削力分别降低了 26.31%、0.71%、3.91%、

8.03%。采用织构刀具制孔条件下，相较于干钻，超声干钻制孔过程中产生的切削力的变化趋势更稳定，如图 4-14 所示。

#### 4.2.2 孔入口直径尺寸及相对误差

图 4-15 为相同制孔参数条件下，采用不同制孔方式制孔后孔径尺寸对比图。从此图可以明显看出，随着主轴转速从 5000 r/min 增加到 14000 r/min，在干钻条件下，采用 PCD 常规刀具制孔获得的孔直径尺寸大小分别为 4027.6  $\mu\text{m}$ 、4024.9  $\mu\text{m}$ 、4035.1  $\mu\text{m}$ 、4035.3  $\mu\text{m}$ ，PCD 织构刀具制孔获得的孔直径尺寸大小分别为 4000.2  $\mu\text{m}$ 、4021.6  $\mu\text{m}$ 、4000.1  $\mu\text{m}$ 、4006.1  $\mu\text{m}$ 。在超声干钻条件下，采用 PCD 常规刀具制孔获得的孔直径尺寸大小分别为 4126.5  $\mu\text{m}$ 、4135.2  $\mu\text{m}$ 、4120.8  $\mu\text{m}$ 、4136.7  $\mu\text{m}$ ，PCD 织构刀具制孔获得的孔直径尺寸大小分别为 4104.0  $\mu\text{m}$ 、4115.1  $\mu\text{m}$ 、4097.7  $\mu\text{m}$ 、4111.9  $\mu\text{m}$ 。

根据上述章节 3.1.2 中相对误差公式(3-1)可以计算出不同制孔方式下孔入口直径的相对误差如下表 4-1 所示。基于表 4-1 数据结果可以得出，在干钻条件下，相较于 PCD 常规刀具，采用 PCD 织构刀具制孔获得的孔径相对误差分别降低了 0.69%、0.08%、0.88%、0.73%。在超声干钻条件下，相较于 PCD 常规刀具，采用 PCD 织构刀具制孔获得的相对误差分别降低了 0.56%、1.00%、0.58%、0.62%。

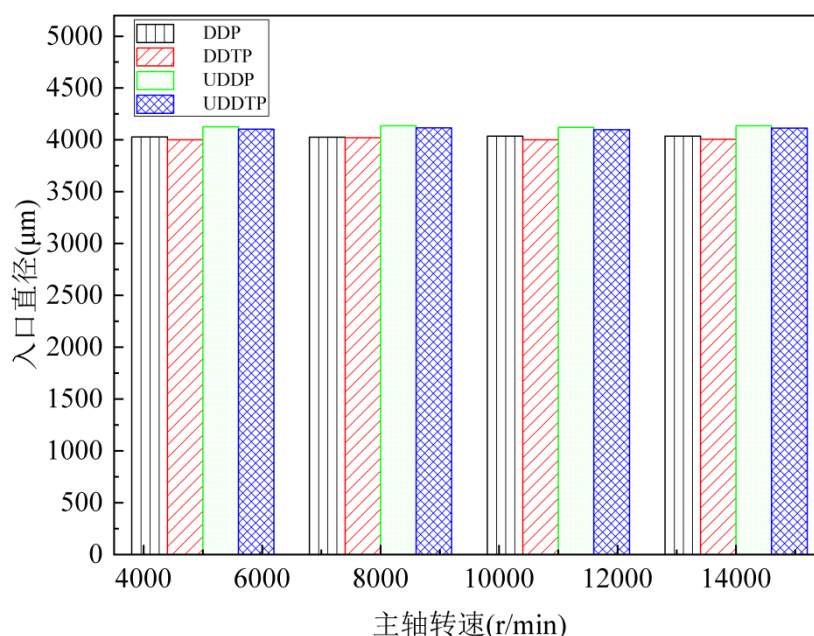


图 4-15 不同制孔方式下孔径尺寸图

表 4-1 孔径的直径误差和相对误差

| 主轴<br>转速<br>/r/min | DDP                         |                | DDTP                        |                | UDDP                        |                | UDDTP                       |                |
|--------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
|                    | 直径<br>误差<br>/ $\mu\text{m}$ | 相对<br>误差<br>/% | 直径<br>误差<br>/ $\mu\text{m}$ | 相对<br>误差<br>/% | 直径<br>误差<br>/ $\mu\text{m}$ | 相对<br>误差<br>/% | 直径<br>误差<br>/ $\mu\text{m}$ | 相对<br>误差<br>/% |
| 5000               | 27.6                        | 0.69           | 0.2                         | 0              | 126.5                       | 3.16           | 104.0                       | 2.60           |
| 8000               | 24.9                        | 0.62           | 21.6                        | 0.54           | 135.2                       | 3.38           | 115.1                       | 2.88           |
| 11000              | 35.1                        | 0.88           | 0.1                         | 0              | 120.8                       | 3.02           | 97.7                        | 2.44           |
| 14000              | 35.3                        | 0.88           | 6.1                         | 0.15           | 136.7                       | 3.42           | 111.9                       | 2.80           |

上述结果表明,在本组试验中,在不同制孔方式下条件下,主轴转速的增大对制孔获得的孔直径尺寸的影响并不明显。相较于传统干钻制孔,采用超声干钻制孔会使得孔直径尺寸总体变大。在干钻条件下,相较于 PCD 常规刀具,采用 PCD 织构刀具制孔能够有效降低孔径相对误差,降低的范围为 0.08%-0.88%。在超声干钻条件下,相较于 PCD 常规刀具,采用 PCD 织构刀具使得孔径相对误差有效降低 0.56%-1.00%。

#### 4.2.3 复材孔入口处表面形貌分析

图 4-16 为相同制孔参数条件下,分别采用干钻和超声干钻制孔后获得的孔入口处光学形貌图。

因为 CFRP 属于典型的难加工材料,制孔过程中极易产生毛刺、分层等加工缺陷。从图 4-16 可以明显看出,在本组试验条件下,采用不同制孔方式对 CFRP 材料进行制孔,所获得孔入口处的表面形貌整体相差不大,在孔入口处均会有毛刺的产生。但在干钻制孔条件下,孔入口处存在较多的毛刺,如图 4-16(e)、(g) 所示。超声干钻制孔条件下,虽然孔入口处也会产生毛刺,但是毛刺的数量会相对较少,且毛刺的尺寸也会相对较小,如图 4-16(f)、(h)。

图 4-17 为相同制孔参数条件下,采用不同制孔方式获得的孔入口处表面微观形貌图。从此图可以明显看出,在不同制孔方式下,孔径入口处的圆度总体相差不大,但相较于 PCD 常规刀具,采用 PCD 织构刀具制孔后,孔入口处的表面质量会稍好一点。

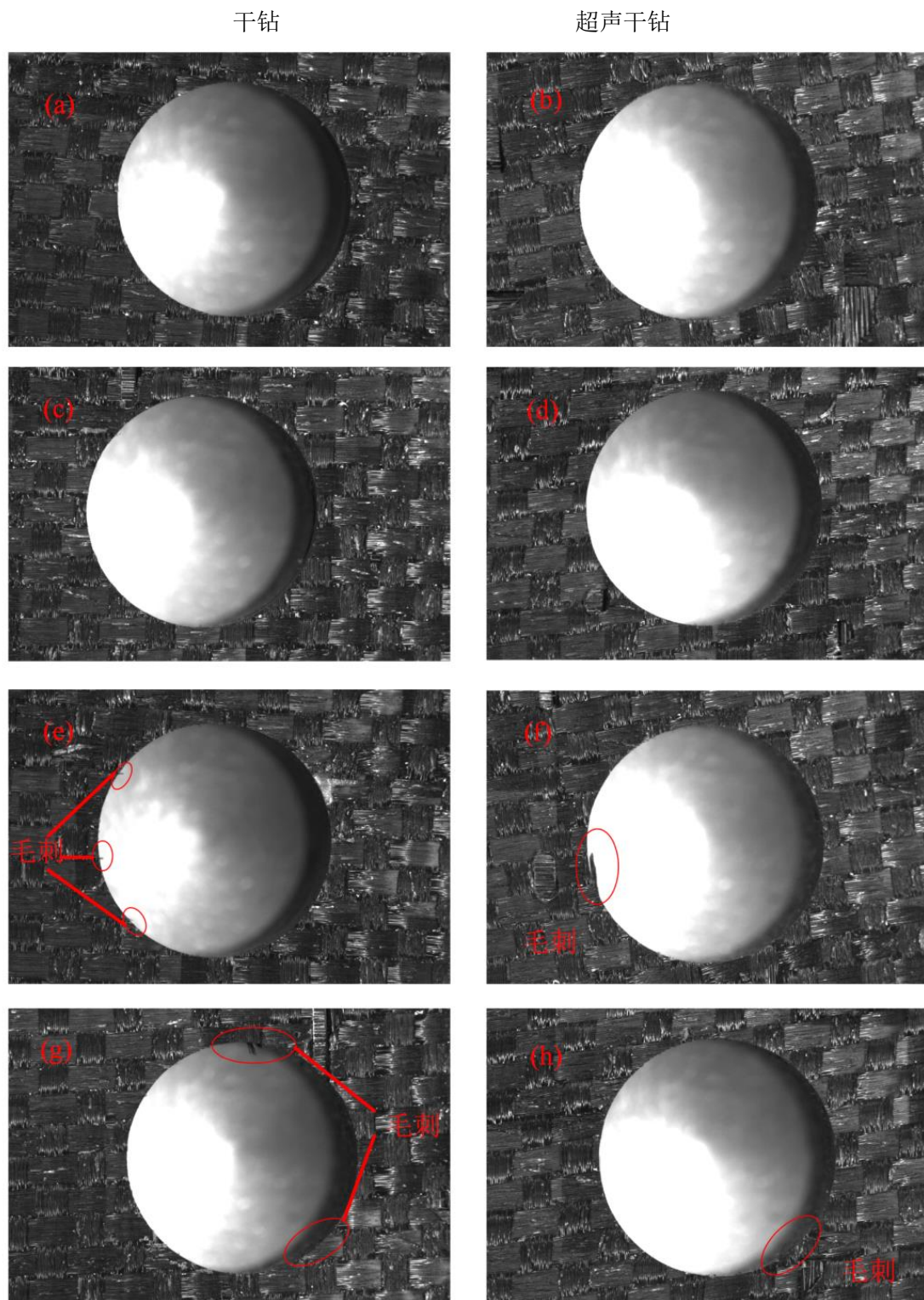


图 4-16 干钻和超声干钻条件下孔入口处宏观形貌图

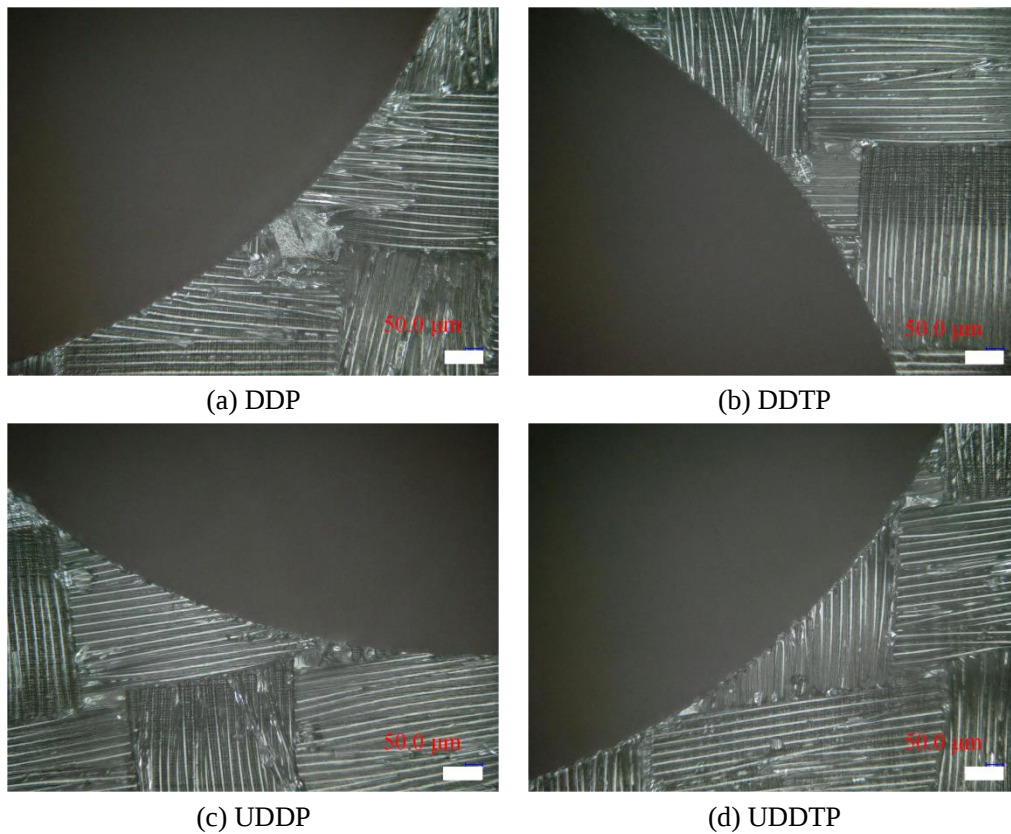


图 4-17 不同制孔方式下孔入口处微观形貌

#### 4.2.4 PCD 刀具的表面黏结状况

下图 4-18 为在相同制孔参数条件下, 采用不同制孔方式制孔后 PCD 刀具底面的光学 SEM 图。从此图可以明显的看出, 所有刀具的底面均存在切屑黏结, 但是相较于 PCD 常规刀具制孔, 采用 PCD 织构刀具制孔后刀具底面的切削黏结物相对较多, 如图 4-18(b)、(d)所示。

图 4-19 为相同制孔参数条件下, 不同制孔方式制孔后 PCD 刀具刀面的光学 SEM 图, 且图 4-19 中的参数与图 4-18 中保持一一对应。

从此图可以清晰的看出, 不同制孔方式下刀具表面均存在着明显的切屑黏结情况。从图 4-19(a)、(b)可以清晰的看出, 在采用 PCD 织构刀具制孔条件下, 相较于干钻, 采用超声干钻制孔后刀具表面的切屑黏结明显减少, 且表面黏结的分布主要集中在刀具的前刀面。

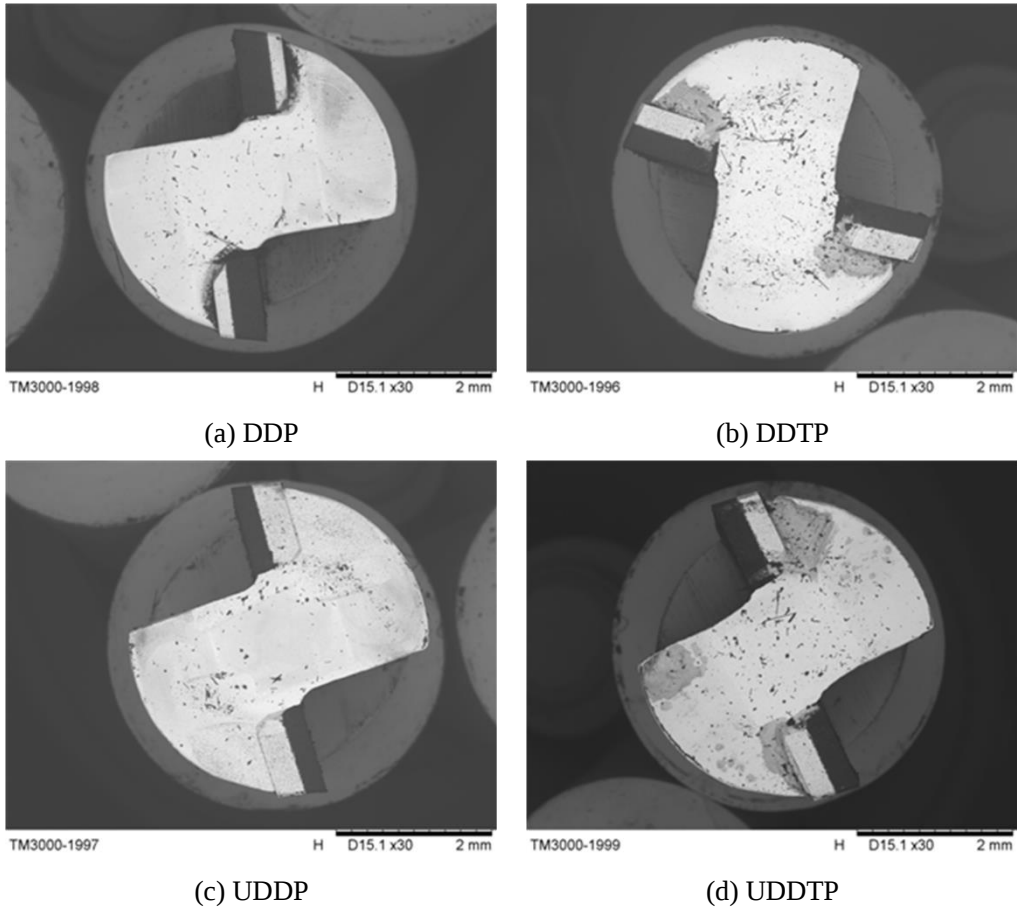


图 4-18 刀具底面光学电镜图

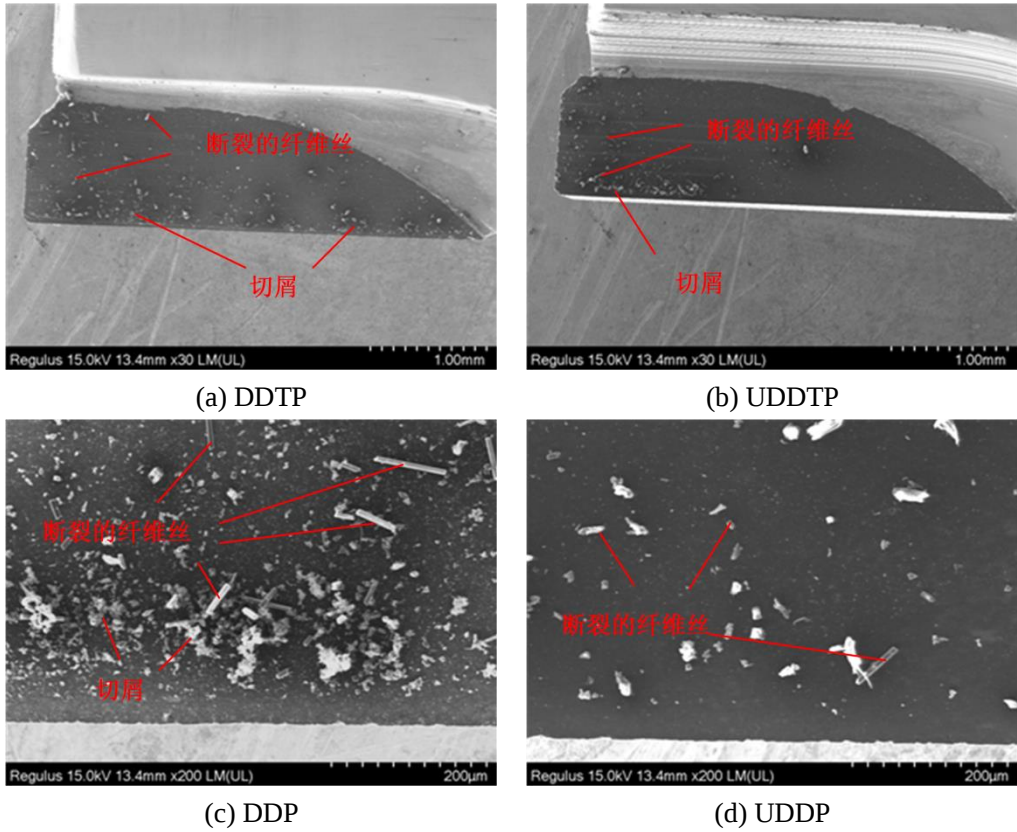


图 4-19 刀具表面黏结光学电镜图

从图 4-19(c)、(d)可以清晰的看出,在 PCD 常规刀具条件下,采用干钻制孔后刀具前刀面存在大量的黏结物,分布着较多的未被切断的纤维丝,且纤维丝的尺寸较大,相较于干钻制孔,超声干钻制孔刀具表面的黏结显著减少,纤维丝的尺寸更小,切削更加充分。

上述结果表明,相较于常规干钻制孔,在超声干钻制孔条件下,刀具前刀面的表面黏结物明显减少,分布更加均匀,且切屑中,纤维丝断裂的更加充分,尺寸明显减小。这是因为传统干钻制孔过程中,纤维丝的断裂是由挤压力的作用而发生形变,当材料受到的力不断增大从而使得纤维丝发生断裂,超声干钻是在传统钻孔基础上添加一个超声振动,使得一个连续切削变成断续切削,能够促进切屑的排出,并且具有良好的断屑效果。

### 4.3 制孔机理讨论和分析

从图 4-1、4-2、4-10 可以看出,在不同进给量和不同主轴转速条件下,采用 PCD 常规刀具干钻制孔过程中产生的切削力相对较小。相较于干钻,采用超声干钻可以有效抑制孔入口处表面较大毛刺的产生(如图 4-7、4-16),具有明显的断屑效果(如图 4-9、4-19)。从图 4-5、图 4-6、图 4-15 和表 4-1 可以看出,在不同进给量和不同主轴转速条件下,PCD 常规刀具干钻制孔得到的孔入口直径的取值范围分别为  $4015.0\ \mu\text{m}\sim 4022.1\ \mu\text{m}$ 、 $4024.9\ \mu\text{m}\sim 4035.3\ \mu\text{m}$ ,孔径相对误差的取值范围分别为  $0.38\%\sim 0.55\%$ 、 $0.62\%\sim 0.88\%$ ,PCD 织构刀具干钻制孔得到的孔入口直径的取值范围分别为  $3991.1\ \mu\text{m}\sim 4017.9\ \mu\text{m}$ 、 $4000.1\ \mu\text{m}\sim 4021.6\ \mu\text{m}$ ,孔径相对误差的取值范围分别为  $0.04\%\sim 0.45\%$ 、 $0\%\sim 0.54\%$ ,PCD 常规刀具超声干钻制孔得到的孔入口直径取值范围分别为  $4111.0\ \mu\text{m}\sim 4144.7\ \mu\text{m}$ ,孔径相对误差的取值范围分别为  $2.78\%\sim 3.62\%$ 、 $3.02\%\sim 3.42\%$ ,PCD 织构刀具超声干钻制孔得到的孔入口直径取值范围分别为  $4091.3\ \mu\text{m}\sim 4124.7\ \mu\text{m}$ ,孔径相对误差的取值范围分别为  $2.28\%\sim 3.12\%$ 、 $2.44\%\sim 2.88\%$ ,结果表明,相较于干钻制孔,采用超声干钻制孔会造成孔入口直径尺寸增大,相较于 PCD 常规刀具制孔,采用 PCD 织构刀具能够有效降低孔径相对误差,且孔入口处能够获得更好的表面质量(如图 4-8、4-17)。相较于其它三种制孔方法,干钻复合 PCD 织构刀具在制孔过程中的稳定性更好,孔入口直径更加接近理论值,相对误差最小,且孔入口处的微观形貌较好,表面质量较光滑。在不同制孔条件下,对切削力、孔径尺寸、形貌差异、相

对误差及其加工机理的讨论与分析如下：

干钻制孔条件下，由于碳纤维复合材料的热导效率较低，制孔过程中产生的切削热不能够及时有效的散发，导致加工区域的温度不断升高，引发复合材料基体发生软化<sup>[87]</sup>，从而有利于降低制孔过程中产生的切削力<sup>[88]</sup>。超声干钻将一个连续加工过程变成一个断续加工的过程<sup>[89]</sup>，有效减少刀具与工件之间的摩擦，使得加工区域的温度相对于干钻来说有所降低<sup>[90]</sup>，被加工区域基体软化效果变差，从而导致超声制孔过程中产生的切削力相对较大，但是超声干钻可以有效抑制制孔入口处较大毛刺的产生，具有良好的断屑效果<sup>[90-91]</sup>。在本次试验中，CFRP 的厚度仅为 3 mm，所以制孔过程中刀-工之间的接触时间相对较短，产生的摩擦热相对较少，根据上述分析，相较于 PCD 常规刀具干钻制孔，采用超声干钻或 PCD 织构刀具在一定程度上会降低被加工区域的温度，使得 CFRP 基体软化效果变差，从而导致制孔过程中产生的切削力相对增大。

在干摩擦条件下，刀具表面织构不但可以储存制孔过程中产生的微小切屑，也可以有效减少实际摩擦接触面积，进而起到有效降低摩擦和减小磨损的作用<sup>[92-93]</sup>，所以在制孔过程中利于获得更好的表面质量，孔入口处形貌更加光滑平整<sup>[93]</sup>，同时可以降低孔径相对误差。根据上述分析，相对于常规刀具制孔，织构化刀具制孔会减小切削摩擦，一定程度上有助于降低加工区域的温度<sup>[94-95]</sup>，使得被加工区域基体软化效果变差，从而导致制孔过程中产生的切削力相对增大。

#### 4.4 本章小结

本章试验均为干式制孔，分别在不同进给量和主轴转速条件下，采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 织构刀具干钻制孔、PCD 常规刀具超声干钻制孔、PCD 织构刀具超声干钻制孔 4 种方法对 CFRP 开展了制孔试验，在不同的切削参数下，对制孔过程中产生的切削力、孔入口直径尺寸及相对误差、刀具的表面黏结和孔内壁形貌及表面缺陷进行了分析，最后得出以下结论：

(1) 在不同进给量或不同主轴转速条件下，相较于传统的干钻制孔，超声干钻可以有减少孔入口处毛刺的产生，使得毛刺的尺寸明显减小，并且可以有效抑制刀具的表面黏结，使得纤维丝的断裂更加充分，具有良好的断屑效果，但是超声干钻会造成制孔的直径总体增大，孔径相对误差偏大。

(2) 在超声干钻条件下，随着进给量的不断增加，相较于 PCD 常规刀具，

采用 PCD 织构刀具可以有效降低制孔过程中产生的总切削力，切削力最大降低 34.72%；随着主轴转速的不断增加，相较于 PCD 常规刀具制孔，采用 PCD 织构刀具使得切削力最大降低 26.31%。

(3) 在 PCD 织构刀具制孔条件下，随着进给量的不断增加，相较于传统干钻，采用超声干钻可以有效降低制孔过程中产生总切削力  $F_r$ ，总切削力最大降低 16.87%。

(4) 在不同进给量或不同主轴转速条件下，相较于 PCD 常规刀具制孔，采用 PCD 织构刀具制孔可以获得更光滑的孔入口质量，显著提高制孔精度，使得孔径尺寸更加接近理论设计值。

(5) 相较于 PCD 常规刀具，采用 PCD 织构刀具制孔能够有效降低孔径相对误差，在不同进给量条件下，孔径相对误差最大降低了 1.27%，在不同主轴转速条件下，孔径相对误差最大降低了 1.00%。

## 第5章 结论与展望

### 5.1 全文总结

本文以碳纤维复合材料为研究对象，分别采用传统干钻制孔、二氧化碳低温冷却干钻制孔、超声振动辅助干钻制孔三种方式对其进行制孔试验研究。在不同的制孔方式下，通过改变刀具、进给量以及主轴转速的相关参数，探究其内在的切削机理，分析不同参数对钻削制孔性能的影响。本文试验中，主要针对制孔过程中的切削力、孔入口处直径尺寸及相对误差、孔入口处表面质量及内壁缺陷、刀具的表面黏结情况等方面进行分析，探求其内在的影响规律，并对其作用机理进行相应讨论和分析，这对于实现 CFRP 材料的高效、高质量、低损伤加工具有一定的参考意义。本文的主要工作及结论如下：

1、分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 常规刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔和 PCD 织构刀具二氧化碳低温冷却干钻制孔三种方法对 CFRP 材料进行制孔试验，在制孔过程中通过改变进给速度、主轴转速的大小，研究分析不同制孔方法对制孔性能的影响，主要的结论如下：

(1) 试验结果表明，在其它制孔参数均保持一致的条件下，仅改变进给速度或主轴转速，相较于传统干钻制孔，采用二氧化碳低温冷却制孔能够有效降低刀具前刀面的切屑黏结情况，提高了刀具的抗黏结效果，但是所获得孔的孔壁表面出现了明显的纤维断裂，形成了较多纤维断口坑，出现了微裂纹现象，树脂表面涂覆均匀性较差；当进给速度不断增大，相较于传统干钻制孔，低温冷却条件下制孔过程中获得的切削力更大。

(2) 在其它制孔参数均保持一致的条件下，当进给速度不断增大，相较于低温冷却制孔，采用传统干钻制孔能够有效降低孔径相对误差，所获得的孔入口直径尺寸更加接近理论设计值，制孔过程中的稳定性更好，获得的孔内壁表面质量更好，孔内壁表面树脂基体涂覆和分布更加平整和均匀。

(3) 在其它切削参数均保持一致的条件下，当主轴转速不断增大，相较于其它两种制孔方式，采用 PCD 常规刀具低温冷却干钻制孔在降低切削力方面的效果更加显著，且孔入口直径更加接近理论设计值，孔径相对误差较小，孔入口处

的表面质量更好更光滑，毛刺更少。

2、分别采用 PCD 常规刀具干钻制孔、PCD 织构刀具干钻制孔、PCD 常规刀具超声干钻制孔、PCD 织构刀具超声干钻制孔四种方法对 CFRP 材料进行制孔试验，在制孔过程中通过改变每齿进给量、主轴转速，研究分析不同制孔方式对制孔性能的影响，主要的结论如下：

(1) 试验结果表明，在其它制孔参数均保持一致且仅改变每齿进给量或主轴转速条件下，相较于传统干钻制孔，采用超声振动辅助干钻制孔可以有效减少孔入口处毛刺的产生，使得毛刺的尺寸明显减小，并且可以有效抑制刀具的表面黏结，使得纤维丝的断裂更加充分，具有良好的断屑效果，但是超声干钻会造成制孔的直径总体增大，孔径相对误差偏大。

(2) 在超声干钻制孔条件下，其它制孔参数均保持一致，仅改变每齿进给量或主轴转速时，相较于 PCD 常规刀具，采用 PCD 织构刀具制孔能有效降低制孔过程中产生的切削力，切削力最大降低 34.72%。

(3) 在其它制孔参数均保持一致且仅改变进每齿进给量或主轴转速条件下，相较于常规 PCD 刀具，采用 PCD 织构刀具可以有效减少切削摩擦，可以获得更光滑的孔入口质量，减小孔径的相对误差，孔径相对误差最大降低了 1.27%。

## 5.2 研究展望

本文在不同制孔方式和不同制孔条件下对碳纤维复合材料进行了制孔试验研究，虽然取得了一定的研究结果，但是由于 CFRP 材料钻削制孔的复杂性、试验条件的局限性以及个人能力有限，所以本文研究工作还有待进一步完善和提高，主要包括以下几个方面：

(1) 在本文试验中，所采用 PCD 织构刀具的表面织构为单一织构，仅针对刀具表面织构和常规刀具开展试验对比，后续研究可以设计多种不同形状、分布特征及尺寸大小的表面织构来分析其对于制孔性能的影响。

(2) 在本文低温冷却制孔试验过程中，采用了二氧化碳来作为冷却条件，后续研究可以采用多种冷却条件来研究温度对 CFRP 制孔性能的影响，分析不同冷却润滑条件下的切削行为及加工质量的差异性，为提高制孔性能及改善加工工艺提供依据。

(3) 在本文制孔试验过程中，考虑到方便刀具表面织构激光制备工艺的可行

性，故采用的是前角为 0 度的 PCD 直刃刀具，后续研究可考虑不同类型结构的刀具和不同织构特征的刀具对 CFRP 制孔特性的对比试验和分析，为刀具织构化在复合材料制孔领域的应用开展深入的基础研究和探索。

## 参考文献

- [1] 郝大贤, 王伟, 王琦珑, 等. 复合材料加工领域机器人的应用与发展趋势[J]. 机械工程报, 2019, 55(03): 1-17.
- [2] 秦旭达, 朱圣富, 李士鹏, 等. 不同纤维方向角时碳纤维增强树脂基复合材料切削力建模[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(06): 31-40.
- [3] 王天宇, 金成哲, 邵雍博. 碳纤维增强复合材料钻削轴向力的研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(02): 241-246+252.
- [4] 贾振元, 付饶, 王福吉. 碳纤维复合材料构件加工技术进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(19): 348-374.
- [5] 邵振宇, 姜兴刚, 张德远, 等. CFRP 旋转超声辅助钻削的缺陷抑制机理及实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(08): 1613-1621.
- [6] 柯映林, 曲巍巍, 李江雄, 等. 碳纤维复合材料结构件自动铺放技术与装备研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 401-435.
- [7] 李金儒, 周鑫月, 张欢, 等. 复合材料在飞机结构中的应用[J]. 纤维复合材料, 2018, 35(01): 3-5.
- [8] Aamir M, Tolouei-Rad M, Giasin K, et al. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5-6): 2289-2308.
- [9] 蒋晓捷, 胡小平, 苏飞, 等. CFRP 制孔加工缺陷及制孔技术的研究进展[J]. 机械设计与制造, 2021, (08): 79-82.
- [10] Luo B, Li Y, Zhang K, et al. A novel prediction model for thrust force and torque in drilling interface region of CFRP/Ti stacks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9-12): 1497-1508.
- [11] Gaugel S, Sripathy P, Haeger A, et al. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)[J]. Composite Structures, 2016, 155: 173-183.
- [12] 史振宇, 崔鹏, 李鑫, 等. 基于纤维增强复合材料的超声振动辅助加工技术

- 综述[J]. 表面技术, 2019, 48(01): 305-319.
- [13] 李欣, 宋绮梦, 张学强, 等. 激光加工碳纤维增强复合材料及其在航空航天领域应用(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(04): 9-30.
- [14] 姜飞龙. 碳纤维复合材料铣削力研究及表面质量分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [15] 徐锦泐. 碳纤维增强树脂基复合材料钻削缺陷研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(22): 24-33.
- [16] 李哲, 邓琦键, 杨志波, 等. CFRP 复合材料超声振动套孔分层抑制机理分析[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(06): 19-25+32.
- [17] Wang H J, Sun J, Li J F, et al. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9-12): 1517-1525.
- [18] 束静, 廖文和, 郑侃, 等. 旋转超声加工碳纤维复合材料研究现状与展望[J]. 航空学报, 2024, 45(13): 114-138.
- [19] 付鹏强, 蒋银红, 王义文, 等. CFRP 制孔加工技术的研究进展与发展趋势[J]. 航空材料学报, 2019, 39(6): 32-45.
- [20] 赵悦. 碳纤维复合材料小孔钻削力和工艺参数优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [21] 孙路华, 全燕鸣, 钟文旺. 碳纤维复合材料高速钻削力的研究[J]. 纤维复合材料, 2005, (4): 30-32.
- [22] 张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- [23] Won M S, Dharan C K H. Chisel Edge and Pilot Hole Effects in Drilling Composite Laminates[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2002, 124(2): 242-247.
- [24] Guo D M, Wen Q, Gao H, et al. Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic composites using a twist drill[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2011, 226(1): 28-42.

- [25] 李纯杰, 苏飞, 刘广涛, 等. CFRP 二次切削加工表面的形成机理及试验研究[J]. 宇航材料工艺, 2024, 54(04): 93-102.
- [26] 邱新义, 李鹏南, 陈安华, 等. 三种钻头钻削 CFRP 的制孔损伤对比[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(1): 68-71.
- [27] 寇万胜. 碳纤维增强复合材料小孔钻削工艺的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [28] 李树健, 李晴晴, 杨彭, 等. CFRP 层间钻削出口损伤机理及多参量优化设计[J]. 机械工程学报, 2025(<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20250325.1718.032.html>).
- [29] 杨进. 碳纤维复合材料的高速钻削试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
- [30] 魏良耀. 碳纤维复合材料钻削轴向力及刀具磨损的试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [31] Wang H Y, Qin X D, Li H, et al. Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber-reinforced plastics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B:Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(1): 62-74.
- [32] Raj D S, Karunamoorthy L. A new and comprehensive characterisation of tool wear in CFRP drilling using micro-geometry and topography studies on the cutting edge[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 839-856.
- [33] 王海艳, 于万春, 冯岩, 等. 基于能量法的 CFRP 倾斜螺旋铣孔轴向力建模[J]. 机械工程学报, 2025, 61(07): 245-258.
- [34] 石文天, 王林, 李杰, 等. 基于 MQL 的碳纤维复合材料制孔表面质量及切削力试验[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 235-246.
- [35] 张俊清, 汪炜, 张伟, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料的高速电火花穿孔加工试验研究[J]. 电加工与模具, 2014, (02): 21-24.
- [36] Kumar R, Agrawal P K, Singh I. Fabrication of micro holes in CFRP laminates using EDM[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 859-866.
- [37] Li M, Li S, Yang X, et al. Fiber laser cutting of CFRP laminates with single-and multi-pass strategy:A feasibility study[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 107: 443-453.
- [38] Ouyang W T, Jiao J K, Xu Z F, et al. Experimental Study on CFRP Drilling with

- the Picosecond Laser “Double Rotation” Cutting Technique[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107238.
- [39] Li M, Huang M, Yang X, et al. Experimental study on hole quality and its impact on tensile behavior following pure and abrasive waterjet cutting of plain woven CFRP laminates[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(9): 2481-2490.
- [40] 温泉. C/E 复合材料制孔损伤形成机理与评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [41] 詹迪雷, 李鹏南, 邱新义, 等. CFRP 制孔过程中轴向力自适应控制仿真及实验研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(03): 474-482.
- [42] Kumar D, Gururaja S, Jawahir I S. Machinability and surface integrity of adhesively bonded Ti/CFRP/Ti hybrid composite laminates under dry and cryogenic conditions[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 1075-1087.
- [43] 李树健, 陈蓉, 李常平, 等. 一种超声超低温冰层支撑辅助 CFRP 钻削方法[J]. 复合材料学报, 2022, 39(03): 1044-1054.
- [44] Rodríguez A, Calleja A, Delacalle N L, et al. Drilling of CFRP-Ti6Al4V Stacks Using CO<sub>2</sub>-Cryogenic Cooling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 58-66.
- [45] 苏春杰, 程祥, 闫新华, 等. 碳纤维复合材料螺旋铣孔工艺研究[J]. 工具技术, 2022, 56(06): 47-51.
- [46] Cao L H, Wang F B, Sun L. Milling hole characteristic of cryogenic cooling for carbon fiber reinforced composite based on laminated material structure[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 138(3): 1-14.
- [47] Yin J W, Wang X S, Zhou Q L, et al. Determination of optimal temperature range and prediction of tool life to ensure hole quality during continuous drilling of CFRP composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 141: 1535-1550.
- [48] Koklu U, Morkavuk S. Cryogenic drilling of carbon fiber-reinforced composite

- (CFRP)[J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 26(09): 11.
- [49] Xia T, Kaynak Y, Arvin C, et al. Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1-4): 605-616.
- [50] 孙昊. 碳纤维复合材料低温钻削试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- [51] Rodriguez I, Arrazola P J, Cuesta M, et al. Improving Surface Integrity when Drilling CFRPS and Ti-6Al-4V Using Sustainable Lubricated Liquid Carbon Dioxide[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(7): 129-146.
- [52] 张高峰, 袁雷, 孙昊. 液氮冷却对碳纤维复合材料钻削表面完整性的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(10): 64-71.
- [53] 周群力. CFRP 钻削用测温刀具的研制与连续制孔温度对其制孔质量的影响研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
- [54] Prakash A J, Wook H P. Experimental investigation of the minimization of uncut fiber length in bidirectional CFRP drilling[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, 37(12): 6173-6180.
- [55] 秦一鸣. 超低温冷却工艺在碳纤维增强复合材料铣制孔中的应用[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2024.
- [56] Su C J, Cheng X, Li Y, et al. Low Temperature Assisted Small Hole Fabrications on Carbon Fiber Reinforced Polymer[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2023, 47(4): 2211-2223.
- [57] 刘逸航, 滕云达, 耿大喜, 等. 复合材料小孔超声铣磨质量研究[J]. *电加工与模具*, 2020, (04): 61-65.
- [58] Makhdum F, Jennings T L, Roy A, et al. Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 382(1): 012019-012019.
- [59] Won S J, Li C P, Park K M, et al. The exit hole Burr generation of CFRP with ultrasonic vibration[J]. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 2017, 16(1): 134-140.
- [60] Cong W L, Pei Z J, Deines T W, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP/Ti stacks using variable feedrate[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2013, 52:

303-310.

- [61] Liu J, Zhang D, Qin L, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 53(1): 141-150.
- [62] Zhou Z Y, Feng Y, Xu W W, et al. Experimental study on longitudinal-torsional ultrasonic vibration drilling of carbon fiber-reinforced plastics/titanium alloy stacks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 124(1-2): 527-543.
- [63] 龚佑宏, 陈德雄, 陈燕, 等. 基于高阶振形优化的 CFRP 低频振动辅助钻削研究[J]. 复合材料学报, 2025(<https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250328.003>).
- [64] Wang X, Jiao F, Zhang X, et al. The hole entrance damage in longitudinal torsional ultrasonic helical milling of CFRP composites[J]. Machining Science and Technology, 2022, 26(4): 619-639.
- [65] 董慧民, 王赫, 孟繁星, 等. 新型国产 T800 碳纤维复合材料制孔特性[J]. 航空材料学报, 2023, 43(03): 94-104.
- [66] 陈光, 刘见, 戈家影, 等. 基于运动学及力热分析的 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔质量影响机制[J]. 机械工程学报, 2021, 57(01): 199-209.
- [67] Ma G F, Kang R K, Yin S, et al. Effect of amplitude ratios on hole quality in longitudinal-torsional coupled ultrasonic-assisted drilling of CFRP composites[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(7): 2911-2926.
- [68] Wu C Q, Gao G L, Li H N, et al. Effects of machining conditions on the hole wall delamination in both conventional and ultrasonic-assisted CFRP drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2301-2315.
- [69] Phadnis V A, Roy A, Silberschmidt V V. A finite element model of ultrasonically assisted drilling in carbon/epoxy composites[J]. Procedia CIRP, 2013, 8:141-146.
- [70] 李哲, 王新, 张毅, 等. CFRP 超声振动套磨钻孔高效排屑机理和实验[J]. 北

- 京航空航天大学学报, 2020, 46(01): 229-240.
- [71] Geng D X, Teng Y D, Liu YH, et al. Experimental study on drilling load and hole quality during rotary ultrasonic helical machining of small-diameter CFRP holes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 270: 195-205.
- [72] Zhu F X, Zhang H W, Hu K J, et al. A comparative investigation on surface quality of CFRP laminates between rotary drilling and rotary ultrasonic-assisted drilling[J]. Composite Structures, 2025, 358: 118964-118964.
- [73] 冯真鹏, 肖强. 超声加工技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(04): 161-172.
- [74] Iqbal A, Zhao G L, Zaini J, et al. CFRP Drilling under Throttle and Evaporative Cryogenic Cooling and Micro-Lubrication[J]. Composite Structures, 2021, 267: 113916.
- [75] Shi Q, Li L, He N, et al. Experimental Study in High Speed Milling of Titanium Alloy TC21[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1): 49-54.
- [76] Isbilir O, Ghassemieh E. Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(10): 717-727.
- [77] Cao S, Li Y, Zhang K, et al. Investigation of CFRP dam-ages induced by the interface high temperature and mixed tool wear mechanism in drilling of thin-walled CFRP/Ti stacks[J]. Composite Structures, 2023, 323.
- [78] Wang B, Wang YF, Zhao H, et al. CFRPs drilling: com-parison among holes produced by different drilling strate-gies[J]. Procedia CIRP, 2019, 79: 325-330.
- [79] Domingo R, Agustina B, Mari'n M M. An analysis of the forces in the cryogenic peripheral milling of compo-sites reinforced with carbon fiber[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 41: 423-429.
- [80] Nagaraj A, Uysal A, Jawahir I S, et al. An investigation of process performance when drilling carbon fiber rein-forced polymer (CFRP) composite under dry, cryogenic and MQL environments[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 43: 551-558.

- [81] Nagaraj A, Uysal A, Gururaja S, et al. Analysis of surface integrity in drilling carbon fiber reinforced polymer composite material under various cooling/lubricating conditions[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 82: 124-137.
- [82] Agrawal C, Khanna N, Pimenov D Y, et al. Experimental investigation on the effect of dry and multi-jet cryogenic cooling on the machinability and hole accuracy of CFRP composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1772-1783.
- [83] Basmaci G, Yoruk A, Koklu U, et al. Impact of Cryogenic Condition and Drill Diameter on Drilling Performance of CFRP[J]. Applied Sciences, 2017, 7(7): 667.
- [84] Zou F, Dang J Q, Wang X F, et al. Performance and Mechanism Evaluation during Milling of CFRP Laminates under Cryogenic-Based Conditions[J]. Composite Structures, 2021, 277: 114578.
- [85] Nagaraj A, Uysal A, Jawahir I. An Investigation of Process Performance when Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite under Dry, Cryogenic and MQL Environments[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 43: 551-558.
- [86] Zadafiya K, Bandhu D, Kumari S, et al. Recent Trends in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRPS): A State-of-the-Art Review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 47-68.
- [87] 王福吉, 殷俊伟, 贾振元, 等. CFRP 复合材料铣削力、温度及表层损伤分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(03): 186-195.
- [88] Chetan A, Navneet K, Yu D P, et al. Experimental investigation on the effect of dry and multi-jet cryogenic cooling on the machinability and hole accuracy of CFRP composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1772-1783.
- [89] 许剑锋, 黄凯, 郑正鼎, 等. 难加工材料场辅助超精密加工研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(06): 829-853.

- [90]张存鹰, 赵波. 超声振动辅助加工表面微结构及其特性研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(05): 259-274.
- [91]张园, 康仁科, 刘津廷, 等. 超声振动辅助钻削技术综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 33-44.
- [92]李强, 刘清磊, 杜玉晶, 等. 织构化表面优化设计及应用的研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(06): 59-73.
- [93]赵立新, 章宝玲, 刘洋, 等. 基于表面织构技术改善摩擦学性能的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(01): 202-224.
- [94]郭江, 王兴宇, 赵勇, 等. 微织构刀具制备技术及加工性能研究新进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 172-200.
- [95]郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面织构化刀具的研究现状与进展[J]. 表面技术, 2016, 45(09): 170-181.

## 攻读硕士学位期间取得的成果及参与的项目

### 一、发表的论文

[1] 苏永生, 王诚, 朱益洋, 等. 碳纤维复合材料 PCD 刀具低温和干式制孔试验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(14): 157-163. (EI, 导师一作, 本人二作)

[2] 王诚, 苏永生, 阮芳涛, 等. 碳纤维复合材料超声制孔试验研究[J]. 中国塑料, 2025, 39(03): 65-70. (CSCD, 本人一作)

[3] Su Y S, Zhu Y Y, Wang C, et al. Investigation on effect of cryogenic cooling on the hole-making of CFRP with conventional PCD tool and textured PCD tool[J]. Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture, 2024. (SCI, 本人三作)

### 二、发明专利

[1] 苏永生, 王诚, 朱益洋, 等. 一种超声振动协同仿生织构改善刀具摩擦特性的方法. (实审) (导师一作, 本人二作)

### 三、参加的科研项目

[1] 安徽省高等学校科学研究重大项目:增材制造钛合金超声辅助低温切削及低损伤控制机理研究(2022AH040134), 2022.9-2024, 参与.

[2] 安徽省重点研究与开发计划项目:飞机碳纤维增强树脂基复合材料构件超声制孔关键技术研发及应用(2022a05020006), 2022.1-2024.12, 参与.

[3] 横向项目:面向航天用零部件的高性能加工关键技术研(HX-2024-09-006), 2024.5-2027.5, 参与.

## 致 谢

行文至此，意味着三年的研究生生涯即将画上句号。还记得 2022 年 9 月刚开学时的情景，依旧历历在目，从初入校园时的喜悦，到现在即将离别时淡淡的忧伤。回首这段时光，那些为论文反复推敲的焦灼、与同门并肩攻克课题的喜悦，此刻都化作记忆长河中的粼粼波光。一路走来，幸得诸多师长、亲友的扶持，在此谨以最诚挚的谢意，致那些照亮我学术之路的明灯。

首先，谨向我的导师苏永生教授致以最深切的感激。感谢您以不厌其烦的遵遵教导，从选题到试验设计，从数据整理到论文成稿，您严谨的治学态度和敏锐的学术洞察力始终为我指明方向。记得研一刚开始时什么都不懂，是您一步一步的引导着我前行。记得每次论文投稿之前，都会不厌其烦的一遍一遍的帮我检查，

感谢我室友这三年的陪伴和支持，营造了一个良好的宿舍氛围，还有 211 和 202 的兄弟们，充实了我整个研究生生涯。

最让我幸福的是，我遇到了最关心我、最喜欢我的女朋友，她会给我无微不至的爱，无脑的支持我，只要是我开口说的话，哪怕是自己再怎么不喜欢，都会以我为主，尽量去满足我。回想起来，我们两已经认识两年了，一想到还有接下来的共赴春秋，就无比的期待。

二十余载求学路，最愧对的是我的父母。你们以朴实的双手托举我的梦想，却从未要求我以世俗的成功作为回报。每当我因科研焦虑失眠，妈妈总会给我最温柔的关爱，父亲虽不善言辞，但每次归家时他默默将我的论文打印稿摆在书桌最显眼处，便是最深沉的支持。你们教会我“踏实做事，真诚待人”，这份质朴的品格是我此生最珍贵的行囊。

感谢未曾放弃的自己。那个在文献堆里抓耳挠腮的菜鸟，那个为 0.1% 的数据提升欢呼雀跃的科研民工，那个在学术会议上颤抖着做英文汇报的年轻人.....正是无数个平凡瞬间的坚持，让我逐渐读懂“研究”二字的分量。未来的长路上，愿始终怀揣对知识的赤诚，以渺小启程，以坚韧前行。

最后，十分感谢中电科芜湖通用航空产业技术研究院有限公司在我做试验提供的帮助。

尚德敏学 唯实惟新

