

分类号: TG668; TG142.12

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110154



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于喷丸强化的 7B50 铝合金
表面完整性和疲劳性能研究

论文作者 段尚岐

校内导师 王安恒（副教授）

校外导师 李红伟（工程师）

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 铝合金的疲劳性能

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号: TG668; TG142.12

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110154

基于喷丸强化的 7B50 铝合金表面完整性和疲劳性能
研究

SURFACE INTEGRITY AND FATIGUE PROPERTIES
OF 7B50 ALUMINUM ALLOY BASED ON SHOT
PEENING

学生姓名: 段尚岐

校内导师: 王安恒 (副教授)

校外导师: 李红伟 (工程师)

专 业: 机械

研究方向: 铝合金的疲劳性能

论文答辩日期: 2025 年 5 月 9 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：段尚岐

日期：2025年5月16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：殷尚岐

指导教师签名：王成恒

日期：2025年5月16日

日期：2025年5月16日

基于喷丸强化的 7B50 铝合金表面完整性和疲劳性能研究

摘 要

在航空航天领域,诸多零部件使用铝合金并在复杂载荷环境下服役,对疲劳性能要求极高。掌握经过喷丸强化处理后的 7B50 铝合金疲劳性能变化规律,对于航空航天结构件的设计、制造以及维护工作意义重大。研究喷丸强化后 7B50 铝合金的相关性能,能为机械零件选材和表面处理提供优化方案,提高零件抗疲劳性能,降低机械故障发生率,推动机械制造行业技术进步和产业升级。本研究以航空装备构件采用的 7B50 超高强铝合金为研究对象,系统探究喷丸工艺参数对材料表面完整性及疲劳失效行为的影响机制。通过实验表征与数值仿真相结合的研究方法,阐明喷丸处理引发的疲劳裂纹扩展规律及其与表面改性的内在关联。主要研究内容及结果如下:

(1) 本研究选取航空用 7B50 高强铝合金作为基础材料开展喷丸强化机理研究。基于 Python 程序对 ABAQUS 有限元平台进行二次开发,结合正交试验设计方法构建喷丸强化数值仿真模型。在工艺评价体系,建立多指标综合评价函数,研究经表面强化处理后工件的残余压应力场分布特征、应力峰值及其作用层深度等性能指标。通过方差解析方法,得出弹丸粒径 B 的极差值最大(10.461),其次为喷射 A 速度(5.166)和入射角度 C(3.394)的影响规律,即 $B > A > C$ 。

(2) 研究不同喷丸强度(0.1 mmA、0.2 mmA)和入射角度(45°、

60°、90°) 对 7B50 铝合金表面形貌、粗糙度及残余应力的影响规律。结果表明：当喷丸强度为 0.2 mmA 且入射角度为 90°时，表面粗糙度 $RaRa$ 值由未处理试样的 0.3 μm 增至 0.524 μm (提升 74%)，残余压应力层深度达 210 μm ，最大残余压应力为 -481 MPa，揭示垂直入射角度 (90°) 与高喷丸强度 (0.2 mmA) 的协同强化机制。

(3) 通过低周疲劳试验 (应力幅值为 300 MPa，应力比为 0.1) 分析不同喷丸参数下的疲劳寿命与断口特征。喷丸强度 0.2 mmA、入射角度 90°时，疲劳寿命达 6.44×10^4 周次，裂纹源由表面转移至次表层，扩展区切离密集且路径迁出，断裂模式由脆性解理主导转变为韧脆混合型，证实残余压应力场与晶粒细化对疲劳性能的协同提升作用。

本文所得研究成果对于喷丸强化后的 7B50 铝合金表面完整性和疲劳特性的深入研究具有重要的指导意义。通过对喷丸强化后 7B50 铝合金的研究所获取的数据、现象分析以及结论等，为进一步揭示材料在复杂工况下的失效机制提供有力支撑。

关键词：7B50 铝合金，喷丸强化，表面特征，数值模拟，疲劳断裂

SURFACE INTEGRITY AND FATIGUE PROPERTIES OF 7B50 ALUMINUM ALLOY BASED ON SHOT PEENING

ABSTRACT

In the aerospace field, many parts use aluminum alloys and are in service under complex load environments, which require very high fatigue performance. It is of great significance for the design, manufacture and maintenance of aerospace structural components to understand the changing law of fatigue properties of 7B50 aluminum alloy after shot peening treatment. The study of shot peening 7B50 aluminum alloy performance, can provide optimized solutions for mechanical parts selection and surface treatment, improve parts fatigue performance, reduce the incidence of mechanical failure, and promote the technological progress and industrial upgrading of machinery manufacturing industry. This study takes 7B50 ultra-high-strength aluminum alloy used in aviation equipment components as the research object, and systematically investigates the influence mechanism of shot peening process parameters on the material surface integrity and fatigue failure behavior. Through the combination of experimental characterization and numerical simulation, the fatigue crack extension law induced by shot peening and its intrinsic correlation with surface modification are elucidated. The main research contents and results are as follows:

(1) In this study, aerospace 7B50 high strength aluminum alloy is selected as the base material to carry out the study of shot peening

mechanism. The secondary development of ABAQUS finite element platform is based on Python program, and the numerical simulation model of shot peening is constructed by combining orthogonal test design method. In the process evaluation system, a multi-indicator comprehensive evaluation function is established to study the residual compressive stress field distribution characteristics of the workpiece after surface peening treatment, the peak stress and the depth of its action layer and other performance indicators. Through the method of variance analysis, it is concluded that the projectile particle size B has the largest extreme value (10.461), followed by the influence law of jet A velocity (5.166) and incidence angle C (3.394), i.e., $B > A > C$.

(2) To study the effects of different shot peening strengths (0.1 mmA, 0.2 mmA) and incidence angles (45° , 60° , 90°) on the surface morphology, roughness and residual stress of 7B50 aluminum alloy. The results show that when the shot peening intensity is 0.2 mmA and the incidence angle is 90° , the RaRa value of the surface roughness increases from $0.3\ \mu\text{m}$ to $0.524\ \mu\text{m}$ in the untreated specimen (an increase of 74%), and the depth of the residual compressive stress layer reaches $210\ \mu\text{m}$, and the maximum residual compressive stress is $-481\ \text{MPa}$, which reveal the influence of the perpendicular incidence angle (90°) on the surface morphology, roughness and residual stress of 7B50 aluminum alloys with a high shot peening intensity (0.2 mmA). (0.2 mmA), revealing the synergistic strengthening mechanism of vertical incidence angle (90°) and high blast strength.

(3) The fatigue life and fracture characteristics under different shot peening parameters were analyzed by low week fatigue test (stress amplitude 300 MPa, stress ratio 0.1). It can be seen that the fatigue life reaches 6.44×10^4 cycles when the shot peening intensity is 0.2 mmA and

the incidence angle is 90° , the crack source is shifted from the surface to the sub-surface layer, the extended area is densely cut off and the path is relocated out, and the fracture mode is changed from brittle deconstruction dominant to tough-brittle hybrid, which confirms that the synergistic enhancement of fatigue performance by the residual compressive stress field and the grain refining is achieved.

The results of this paper are of great significance for the in-depth study of the surface integrity and fatigue properties of shot peened 7B50 aluminium alloy. The data, phenomenological analysis and conclusions obtained from the study of 7B50 aluminium alloy after shot peening will provide a strong support to further reveal the failure mechanism of the material under complex working conditions.

KEY WORDS: 7B50 aluminium alloy, shot peening, surface characterization, numerical simulation, fatigue fracture

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
插表清单	XI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 喷丸强化技术概述	3
1.2.1 喷丸工艺研究	3
1.2.2 喷丸强化机理	5
1.3 喷丸数值模拟研究现状	6
1.4 喷丸处理后材料表面改性以及疲劳性能的研究现状	7
1.5 本文主要研究内容及章节安排	8
1.5.1 研究内容	8
1.5.2 章节安排	9
第 2 章 喷丸模型及实验制备	11
2.1 引言	11
2.2 实验材料制备	11
2.2.1 实验材料	11
2.2.2 样品制备	12
2.3 实验及检测设备	12
2.4 喷丸模型的建立	16
2.4.1 单喷丸模型	16
2.4.2 随机多喷丸模型	21
2.5 本章小结	22
第 3 章 工艺参数对喷丸强化效果研究	24
3.1 引言	24
3.2 正交试验法	24

3.3 Python 在 ABAQUS 二次开发与应用	25
3.3.1 GUI 交互界面设计	26
3.3.2 交互界面功能	27
3.3.3 交互界面介绍	27
3.4 随机喷丸仿真模型脚本的创建	27
3.4.1 模型预处理脚本的建立	28
3.4.2 喷丸强化模拟后处理分析	29
3.4.3 随机喷丸强化仿真	30
3.4.4 有限元模型的喷丸强化参数化	30
3.5 喷丸工艺正交试验研究	30
3.5.1 喷丸参数影响程度的正交试验分析	31
3.5.2 喷丸强化参数的选择和模拟正交试验	31
3.5.3 结果分析	35
3.6 本章小结	37
第 4 章 喷丸强化后 7B50 铝合金的表面质量研究	38
4.1 引言	38
4.2 喷丸强化对 7B50 铝合金表面特征的影响	38
4.2.1 喷丸后的表面形貌	38
4.2.2 表面粗糙度	40
4.3 横截面微观组织形貌	42
4.4 硬度分布	43
4.5 残余应力分布	43
4.6 本章小结	45
第 5 章 喷丸强化后 7B50 铝合金的疲劳性能研究	46
5.1 引言	46
5.2 喷丸强化后 7B50 铝合金低周疲劳断口形貌分析	46
5.2.1 0.1 mmA 喷丸强化后疲劳断口形貌分析	46
5.2.2 0.2 mmA 喷丸强化后疲劳断口形貌分析	50

5.3 结果分析	53
5.3.1 入射角度对疲劳性能的影响	53
5.3.2 喷丸强度对疲劳性能的影响	54
5.4 本章小结	54
第 6 章 结论与展望	55
6.1 全文总结	55
6.2 展望	56
参考文献	57
攻读学位期间取得的成果及参研项目	67
致谢	68

插图清单

图 1-1 飞机的机身	1
图 1-2 喷丸在各领域的运用	2
图 1-3 表面处理技术方式	3
图 1-4 喷丸处理示意图	4
图 1-5 试验方案技术路线	10
图 2-1 疲劳试样尺寸图	12
图 2-2 低周疲劳试样	12
图 2-3 三维形貌采集	13
图 2-4 残余应力测试图	14
图 2-5 电解抛光示意图	14
图 2-6 MTS 疲劳试验示意图	15
图 2-7 扫描电子显微镜图	16
图 2-8 单弹丸冲击模型	18
图 2-9 单弹丸网格划分模型	19
图 2-10 单弹丸强化残余应力云图	19
图 2-11 单弹丸强化后生成的残余应力云图	19
图 2-12 单弹丸强化等效塑性应变云图	20
图 2-13 单弹丸强化所形成的等效塑性应变曲线图	20
图 2-14 单弹丸喷丸强化后弹坑位移分布云图	21
图 2-15 残余应力仿真结果提取路径图	22
图 3-1 Python 与 ABAQUS 的通信关系	25
图 3-2 GUI 交互界面	27
图 3-3 网格划分结果模型图	29
图 3-4 喷丸模型后处理图	30
图 3-5 不同喷丸处理后粗糙度表面形貌	32
图 3-6 9 组不同喷丸处理后残余应力图	33

图 3-7 模拟喷丸强化试验的残余应力图	34
图 3-8 喷丸试验的极差分析示意图	35
图 4-1 不同喷丸强化工艺下金属表面的形貌特征	39
图 4-2 不同工艺表面的 2D 试验线性剖面	40
图 4-3 不同工艺处理后的表面粗糙度	41
图 4-4 不同喷丸参数横截面微观形貌	42
图 4-5 不同喷丸工艺的显微硬度分布图	43
图 4-6 不同喷丸工艺模拟结果的残余应力分布	44
图 4-7 实验结果的残余应力分布图	44
图 5-2 7B50 铝合金的 SP1(0.1mmA,45°)试样的 SEM 断裂面形貌图	48
图 5-3 7B50 铝合金的 SP2(0.1mmA,60°)试样的 SEM 断裂面形貌图	49
图 5-4 7B50 铝合金的 SP3(0.1mmA,90°)试样的 SEM 断裂面形貌图	50
图 5-5 7B50 铝合金的 SP4(0.2mmA,45°)试样的 SEM 断裂面形貌图	51
图 5-6 7B50 铝合金的 SP5(0.2mmA,60°)试样的 SEM 断裂面形貌图	52
图 5-7 7B50 铝合金的 SP6(0.2mmA,90°)试样的 SEM 断裂面形貌图	53

插表清单

表 2-1 7B50 铝合金化学成分(质量分数/%)	11
表 2-2 不同喷丸工艺参数	13
表 2-3 靶材和弹丸的力学性能参数	17
表 2-4 7B50 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数	17
表 3-1 靶件和丸粒的机械性能参数	30
表 3-2 不同因素及因素水平表	31
表 3-4 喷丸效果的极差分析结果	36
表 4-1 不同喷丸工艺的粗糙度参数平均值	40

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

本研究聚焦表面工程领域的核心改性手段-喷丸强化技术^[1],其在航空航天装备制造领域具有不可替代的工程价值。随着尖端装备服役工况的复杂化演进,工程构件在承受着高温、高压、高应力等复杂条件^[2],其抗疲劳断裂、耐应力腐蚀等关键性能维度面临愈发严苛的工程标准。以航空发动机叶片、起落架结构件为代表的典型承力部件,其表层综合性能的优化已成为提升装备可靠性的技术瓶颈。伴随涡轮制造技术的持续进步,对喷丸强化技术的要求也会不断提升^[3]。如图 1-1 所示。未来,喷丸强化技术将朝着提高处理效率、降低成本、优化环保等方面发展^[4]。为了满足复杂工况和极端条件下的齿轮传动需求,喷丸强化技术还需进一步提高强化效果的稳定性和持久性^[5-7]。环保型弹丸材料和低噪音喷丸技术的研发,足以对喷丸强化过程造成的环境影响降低^[8]。若要提高喷丸强化的质量与效率,可引入先进的传感器及控制系统。凭借这些设备,能够对喷丸过程进行实时监控,并实现智能化调整^[9]。



图 1-1 飞机的机身

传统的材料处理手段,很难满足这些严苛要求。当高速弹丸^[10]撞击材料表面时,会引发一系列明显变化。最初,在强大冲击力的作用下,材料表面会出现塑性变形,进而形成一个个微观凹坑。与此同时,这种撞击使得材料内部产生残余压应力,这一变化有助于提高材料的疲劳强度和延长其使用寿命^[11]。此外,高速

弹丸的撞击还能去除材料表面的氧化皮、锈迹等杂质，从而提高材料的表面粗糙度和清洁度^[12]。撞击过程会使材料的组织结构发生变化，进而提高材料的力学性能和工艺性能。总之，高速弹丸撞击材料表面带来的这些变化在材料加工和性能提升等方面具有重要意义。随着制造业的发展，对各零部件的精度和可靠性要求也越来越高，这促使研究人员不断探索更加先进的喷丸强化技术，以满足不同材料和应用场景的需求^[13]。7B50 铝合金作为一种高强度、高塑性、高热稳定性的优质合金，在众多领域都有着广泛且重要的应用。如图 1-2，在航空航天领域，它是备受青睐的高强度、高塑性铝合金材料，其高饱和固溶工艺对提升合金性能起着关键作用，被广泛应用于飞行器、航空发动机以及导弹等关键部位，为航空航天事业的发展提供坚实的材料支撑^[14]。在船舶领域，该合金可用于船体、甲板以及发动机等重要位置，能够有效提高船舶的性能和耐腐蚀性，确保船舶在各种复杂环境下安全稳定运行。此外，7B50 铝合金在电子、机械、化工等其他领域也有着出色的表现，为这些领域的发展注入了新的活力。在实际应用中，7B50 铝合金构件往往需要承受复杂的载荷和环境条件，容易出现疲劳裂纹和失效^[15]。

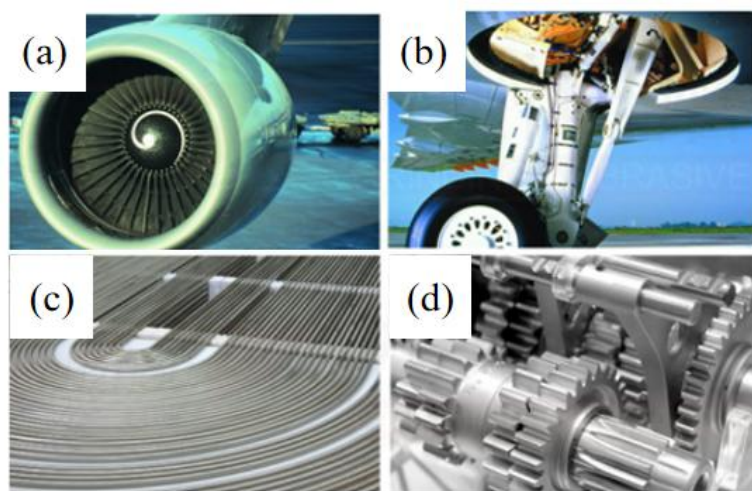


图 1-2 喷丸在各领域的运用：(a)飞机涡轮叶片；(b)飞机起落架；(c)核电 U 型管；(d)齿轮/齿轮轴。

在喷丸工程领域，长期以来的目标都是设计出合理的喷丸参数组合，以此优化并实现理想的喷丸效果。然而，喷丸过程包含众多参数，各参数相互制约，关系复杂。通常人们会凭借工程经验，或采用试验试错的方式，来寻找合理的工艺参数组合，以达到预期喷丸效果^[16]。但试验试错法不仅耗时费力，成本也高；而

且工程经验的积累需要很长时间，对设计和操作人员的专业素养要求也较高。近年来，采用有限元方法对喷丸工艺展开研究的报道屡见不鲜。目前提出的有限元喷丸模型与实际喷丸过程相比，都存在不同程度的简化。这些模型较少同时考虑喷丸强度、入射角度等操作参数对喷丸效果的影响，而操作参数在工业喷丸中非常关键^[17]。在评估喷丸效果时，会采用喷丸后试样的残余应力分布和表面粗糙度等指标。此外，还会通过喷丸实验，验证有限元分析模型对喷丸强度和喷丸效果计算的准确性^[18]。若想更好地改善铝合金的裂纹性能，关键在于正确挑选并合理把控相关喷丸参数。在喷丸设备方面，常见的机型有压力式喷丸机与吸力式喷丸机。压力式喷丸机适宜处理尺寸较大的工件，通过对喷丸压力的调控，能够灵活控制冲击力的大小。而吸力式喷丸机则更适合处理较小的工件，其操作相对更为便捷。在喷丸过程中，所使用的介质种类多样，常用铸钢丸、铝丸及陶瓷丸等。

1.2 喷丸强化技术概述

1.2.1 喷丸工艺研究

喷丸强化是表面处理技术其中的一种，其常用于材料表面的强化处理。常见的表面处理技术方式如图 1-3 所示。在传统喷丸工艺里，通过压缩空气为弹丸赋予一定的初始速度。弹丸获取初速度之后，能够以强烈且高频的状态对材料表面进行撞击。撞击所产生的冲击力超越了工件材料的动态屈服极限，进而在材料表面生成众多微小的凹坑。在多个凹坑形成的进程中，材料表面会被植入残余压应力层，同时工件表面材料的显微结构也会有所变化。经过这一系列的改变后，可以实现提升受喷样件疲劳强度、表面硬度以及耐腐蚀性等性能的目的^[19-21]。

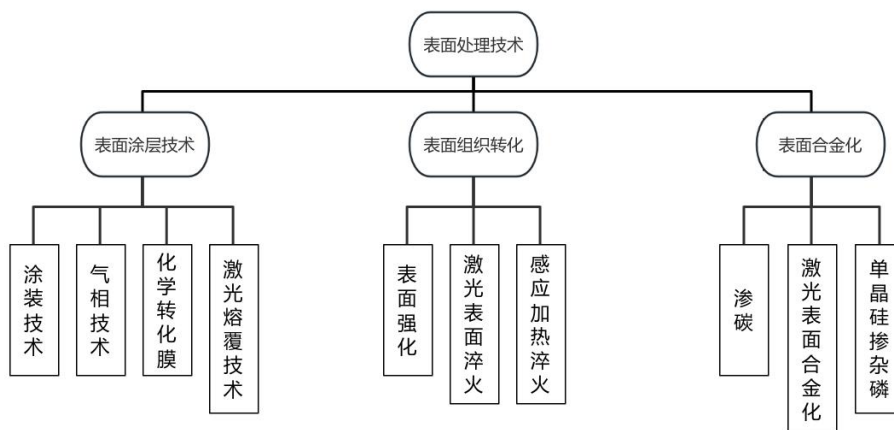


图 1-3 表面处理技术方式

在工程材料范畴内，材料表面具有举足轻重的地位。由于通过主要制造流程往往难以满足某些特定质量要求，材料表面经常需要进行各种表面处理工艺。开展表面处理的原因多种多样，主要涉及改善材料性能、改变物理特性、提升外观质量以及调整尺寸等方面^[22]。目前，为改变材料的表面特性，人们已研发出大量的热处理、机械处理以及化学处理方法。其适用的材料范围广泛，其中包括半导体、金属和陶瓷等各类材料^[23]。零件经过喷丸处理后的表面完整性，会不同程度的提高其质量。表面完整性包含表面处理的多个方面特性，如形貌（如粗糙度）、机械性能（如残余应力）以及其他相关性能^[24]。可发现表面完整性的改变对疲劳强度和疲劳寿命有着显著影响。喷丸处理作为一种冷加工工艺，会使金属表面产生塑性应变^[25]。一般来说，对于对表面硬度和疲劳强度有过高要求的金属零件，常采用喷丸处理工艺。在汽车和航空航天工业领域，喷丸处理作为一种机械表面处理手段被广泛应用^[26-28]。喷丸冲击过程如图 1-4 所示，弹丸通常由钢、陶瓷或玻璃等硬质材料制成，它们会以极快的速度撞击金属表面。撞击之后，弹性应力区域通常会恢复到完全卸载的状态，而塑性变形区域则会留下部分永久变形，正由于其不均匀的弹塑性变形，才形成了压缩残余应力区域^[29-31]。

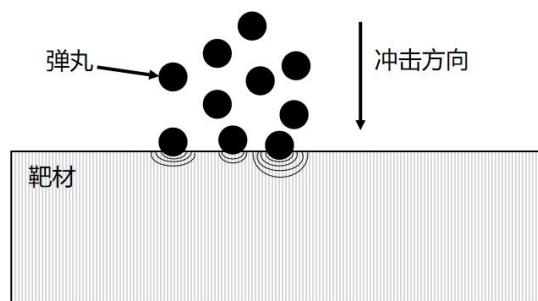


图 1-4 喷丸处理示意图

在机械喷丸工艺实施过程中，受高速弹丸冲击作用，工件表层形貌会产生显著改变。这种动态强化过程虽能提升材料性能，但伴随产生的表面粗糙度加剧现象可能引发微裂纹萌生与应力集中效应，成为制约零部件疲劳强度提升的关键因素^[32]。值得关注的是，表面形貌劣化不仅影响结构件抗疲劳能力，还会对其接触刚度、装配精度及耐腐蚀性能产生系统性不利影响。因此，科学评估喷丸强化效果需建立残余应力分布与表面完整性参数的综合评价体系。从微观组织演变角度分析，喷丸处理后表层材料呈现出硬度梯度升高与晶粒细化等典型特征^[33]。尽管

其结构改变属于材料强化机制，但其对综合性能的贡献度相对有限。因此，本研究构建包含三维形貌表征、表面粗糙度量化、残余应力测试与疲劳寿命预测的多维度分析框架。工艺参数体系则涵盖弹丸介质（涵盖材质特性、几何形态、粒径分布）、动力学参数（冲击速度、入射角度、作用时长）、喷射系统（弹丸流量、喷嘴构型、靶距设定）以及基体材料响应特性等关键变量。需特别指出，表面粗糙度参数、残余压应力层深度及应力幅值作为工艺输出的核心表征量，实质上是多参数耦合作用的综合结果。这些指标间存在显著的交互影响关系，例如过度追求残余应力提升可能导致表面粗糙度超标，而严格控制形貌参数又可能削弱强化效果。通过建立工艺参数-性能指标的定量映射模型，可实现喷丸工艺的协同优化，从而在保证表面完整性的前提下最大限度提升工件的服役性能与使用寿命。

1.2.2 喷丸强化机理

在工业制造领域，动态喷丸处理已成为提升工程构件耐蚀性与抗疲劳特性的主流表面改性技术。该工艺主要通过两种互补机制实现材料强化：宏观应力调控效应与微观组织重构效应^[34]。前者源于处理过程中在材料表层形成的梯度化残余应力分布，后者则涉及晶粒细化和位错密度提升等结构演变。喷丸强化会引发表层材料发生弹塑性复合变形。由于塑性形变层对基体弹性恢复的约束作用，导致变形协调过程中产生自平衡应力体系，最终在材料表层形成具有特定深度的残余压应力层^[35]。该应力场在构件服役阶段可发挥关键保护作用：通过部分抵消外部载荷产生的拉应力分量，有效抑制裂纹萌生并阻滞其扩展路径。研究表明，这种应力重分布机制可使裂纹源由原始表面区域转移至次表层位置^[36]，从而显著延长构件的疲劳失效周期。从力学防护机理角度分析，残余压应力场的存在实质上构建动态能量屏障。当外加交变载荷作用于构件时，该应力屏障能够吸收并分散裂纹尖端的能量集中，通过降低应力强度因子实现裂纹扩展速率的有效控制。这种多尺度的防护效应使得喷丸强化技术成为提升关键零部件服役可靠性的重要工艺手段。应力强化机制主要取决于四个残余应力指标，分别是表面残余压应力值、最大残余压应力值及其所处深度和残余压应力层厚度^[37]。

在高速动能冲击作用下，金属表层经历复杂的力学响应过程。当高密度弹丸流持续作用于工件表面时，材料将产生显著的弹性形变与塑性流动协同效应。这

种动态能量加载促使表层发生多尺度结构演变，晶粒尺寸呈现梯度细化趋势，部分区域可能形成纳米晶结构；晶格畸变能显著累积，位错网络密度^[38]呈现指数级增长。同时伴随形变孪晶等亚稳定相的形成。上述微观结构重构效应可激活多重材料增强机制，由位错缠结网络产生的应变硬化效应以及孪晶界对位错运动的阻滞作用。这些协同作用的微观机制显著改善了表层的机械性能参数，包括硬度、耐磨性和抗疲劳特性。该现象在表面工程领域被定义为显微组织调控强化，与残余应力强化共同构成喷丸技术的核心作用机理。

1.3 喷丸数值模拟研究现状

实现喷丸强化工艺的最优效能，关键在于工艺参数的精准调控与系统优化。传统试验手段虽然能够获得精确数据，但其固有的实施周期冗长、经济成本高昂以及经验依赖性过强等局限性，严重制约该技术的工业化应用进程^[39]。随着计算力学的突破性进展，基于有限元的数值仿真技术已发展成为工艺优化的革命性工具。该技术通过构建多物理场耦合模型，能够系统解析弹丸冲击动力学过程，实现工艺参数的智能寻优，显著缩短研发周期并降低经济投入。研究团队通过算法创新与模型验证的持续迭代，使该数值方法的预测精度与工程适用性获得突破性进展^[40]。当前先进的有限元平台已能准确模拟弹丸群随机冲击效应、材料动态响应特性以及残余应力场演化规律，为建立工艺参数-性能指标的定量关系提供理论支撑。这种数字化技术路线不仅突破传统试错法的效率瓶颈，更通过可视化分析深化对强化机理的认知层次。

Xie 等^[41]建立喷丸有限元模型，通过模型针对 Ti-6Al-4V 材料的表层进行研究，对其残余应力的分布情况进行分析。分析得出结论，残余压余应力会在表层得以形成，并且在次表层区域会出现最大值。Zhang 等^[42]采用数值模拟方法对 17Cr2Ni2MoVNB 钢进行不同喷丸残余的喷丸处理，可改变表面压残余应力分布，表面压残余应力和最大压残余应力深度与喷丸速度呈正比。随着覆盖率的增加，最大压残余应力深度会有增加。Gariépy 等^[43]通过实验对 AA2024-T351 铝合金经过反复随机冲击后存在的性能进行分析，发现由于初始晶体学和工艺引起的非均质性，喷丸后的材料状态在残余应力、局部力学性能、粗糙度和表面损伤方面在表面平面上并不均匀。Wu 等^[44]通过仿真研究覆盖率对 18CrNiMo7-6 钢残余应力

和粗糙度的影响，并不是随着表面覆盖率越高，受喷材料的综合性越好。然而只研究单个参数变化的影响，缺乏系统性的进一步验证。Ali 等^[45]发现经过喷丸处理，合金表面会引起的残余压应力，可以提高合金的疲劳性能。

1.4 喷丸处理后材料表面改性以及疲劳性能的研究现状

随着表面工程技术的快速发展，学界针对动态冲击表面改性对材料性能的调控机制开展了系统性研究。特别是该工艺诱导的应力场形成规律及其与构件耐久性的关联性，已成为近年来的研究重点。该工艺本质上是借助动能冲击引发材料表层动态响应的表面改性过程，其作用机理在于通过高速弹丸流对工件表面实施可控能量加载，诱导表层材料产生塑性形变响应。这种应变诱导效应通过动能-应变能转化机制，在改性层内构建梯度化压应力^[46]分布，从而显著提升构件的抗损伤能力。当前研究聚焦于建立工艺参数（弹丸速度、入射角度、覆盖率）与性能指标（应力场深度、疲劳强度增幅）的映射关系。通过调控冲击能量密度和应变速率，可精确设计材料表层的位错结构演变与残余应力分布特征，这种微观-宏观跨尺度关联机制为优化工艺提供了理论依据。Liu 等^[47]研究研究了喷丸时间和初始表面状态对 12Cr2Ni4A 合金钢表面形貌的影响。分析不同粗糙度参数与喷丸时间的关系，发现随着喷丸强化时间的增加，表面粗糙度参数 R_a 先增大后减小。延长喷丸时间可以降低表面粗糙度，提高表面的承载能力。Ogur^[48]对 7075-T6 铝合金进行疲劳试验，发现喷丸强化可使试样表面附近的浅层压缩残余应力层导致裂纹萌生部位由表层向内部裂纹的转变。有助于提高试件的疲劳性能。Wu 等^[49]发现喷丸强化引起表面塑性变形，导致残余奥氏体转变为马氏体并产生一定程度的晶粒细化。最大残余应力和表面硬度随强度的增加呈线性增加。Xu 等^[50]基于 Wu 等^[49]的研究基础，得出随着喷丸强化强度的提高试样疲劳寿命也随之提高。Rubio 等^[51]的定量分析表明，表面拓扑结构参数主要通过调控裂纹形核阶段来制约材料的耐久性能，其作用权重远超残余应力场的贡献。研究数据显示，当冲击能量超过临界阈值时，虽然极限应力水平下的循环周次保持稳定，但在中高应力区间材料抗疲劳能力呈现显著提升。值得注意的是，喷丸能量密度的优化存在明确窗口：中等强度处理可使疲劳寿命达到峰值，而过度强化反而会因表层微缺陷的增殖导致裂纹早期萌生，揭示了工艺参数非线性效应的本质。高玉魁等

[52]对 TC18 合金的强化机理进行深入解析。动态喷丸处理促使裂纹起源模式发生根本转变—从表面多源萌生转为次表层单源起始,这种位错重构效应使材料疲劳强度提升约 30%。其本质在于残余压应力场构建的应力屏障效应,有效延缓了裂纹扩展速率。进一步研究,田唐永^[53]针对 TC4 钛合金的微观组织演变展开研究,发现晶粒细化程度与疲劳性能呈正相关。通过位错密度提升和晶界强化机制,纳米晶结构的形成显著增强材料抵抗循环载荷的能力。

综合上述研究成果可知,喷丸强化对材料的表面粗糙度、残余应力以及微观组织结构影响显著。具体而言,材料表面粗糙度越高,应力集中效应在其表面越易产生,进而促使裂纹萌生,导致材料疲劳性能降低;残余压应力则对材料疲劳性能具有积极作用,残余压应力数值越大,材料的疲劳性能越佳;经过喷丸处理后,诸如晶粒细化、高密度位错等现象,对铝合金的疲劳性能同样具有积极影响^[54-56]。就当前情况而言,喷丸强化的数值模拟大多基于有限元模型开展,该模型考虑多种影响喷丸效果的因素。伴随有限元分析软件的发展,离散元方法能够模拟弹丸的无序分布状态。尽管国内外学者针对喷丸强化各工艺参数与喷丸效果之间的影响关系展开研究,但目前研究主要聚焦于残余应力场的仿真或实验研究,针对表面粗糙度影响的研究相对较少。此外,当前研究多集中在块体局部模型上,对结构细节特征的影响考虑不足。对于喷丸强化后的疲劳寿命,主要从材料的表面粗糙度和残余应力等方面展开分析。针对喷丸强化后残余应力对试件疲劳寿命的具体影响,尚缺乏定量计算分析,同时对于喷丸强化后的残余应力松弛现象,也缺乏充分的试验分析。

1.5 本文主要研究内容及章节安排

以 7B50 铝合金作为主要研究对象,探究不同喷丸工艺参数对表面形貌、残余应力、显微硬度和疲劳性能的影响,目的在于通过研究得出喷丸对 7B50 铝合金表面性能和疲劳断裂机理的规律。具体研究内容和章节安排如下。

1.5.1 研究内容

本研究聚焦 7B50 航空铝合金在动态能量冲击改性过程中的表面完整性演变规律及其抗疲劳性能提升机制。技术路线设计包含三个关键阶段:首先建立涵盖弹丸介质特性(粒径分布、冲击速度、入射角度)的多维参数空间,基于材料

本构特性构建自适应有限元模型，通过可视化 GUI 交互平台与 Python 脚本自动化技术实现工艺参数的数字孪生。其次，通过构建表面完整性多参数关联模型（涵盖表面形貌、压缩残余应力场、硬化层深度等指标），阐明了动能冲击参数对材料表层性能的调控机制，量化各工艺变量对预应力分布的影响权重。最终，基于数值模拟结果设计多应力水平疲劳试验矩阵，系统解析循环载荷作用下裂纹萌生机理与断裂模式演变规律。

当前，常规喷丸的弹丸速度能够很好地适配 7B50 铝合金材料，因此选用常规喷丸对其进行处理。本文提出一种针对 7B50 铝合金喷丸表面强化后表面完整性的研究方法，该方法将仿真与实验有机结合。基于 ABAQUS 有限元分析软件，对随机喷丸过程开展建模工作，旨在探究不同喷丸参数对靶材表面形貌、显微硬度以及残余应力场的影响。具体研究内容如下：

(1) 借助 Python 二次开发功能，构建 7B50 铝合金单弹丸与多弹丸喷丸模型。以此为基础，深入研究常规喷丸过程中，不同的喷丸速度、入射角度以及丸粒大小，对 7B50 铝合金靶材残余应力场产生的影响。

(2) 建立随机多弹丸喷丸模型，设定一系列喷丸工艺参数。通过系统研究不同喷丸速度及其入射角度对材料表面完整性的影响规律，进而确定最佳参数组合。

(3) 深入探究表面喷丸处理对材料疲劳性能的影响规律。具体研究在采用不同喷丸工艺以及不同喷丸参数进行喷丸操作时，其表层所产生的残余应力场，对 7B50 铝合金试件疲劳寿命以及断裂机理产生的影响。

1.5.2 章节安排

第 1 章：绪论。本文对研究背景及意义进行简要阐述。针对喷丸强化技术，给出简要概括性说明。对该技术相关领域在国内外的研究进展展开科学梳理，着重阐述喷丸实验和数值模拟领域当下的研究现状。同时，深入挖掘并揭示当前研究中存在的不足之处，进而为本文的研究明确方向与思路。

第 2 章：本章介绍采用 7B50 铝合金为研究对象。试验试样件的制备和研究表面完整性和疲劳性能方法，为后文研究喷丸强化实验提供理论的基础。

第 3 章：本章针对 7B50 铝合金为研究对象，为简化随机喷丸模型的建立过程和对不同工艺参数的喷丸模拟分析，节省喷丸模型前后处理时间。运用综合

评分法对喷丸后的工件表面层残余压应力层深度、表面残余压应力、最大残余压应力值 3 个综合指标的极差值进行评判。明晰喷丸强化机制，选择合适的喷丸参数进行喷丸实验。

第 4 章：本章研究不同喷丸强度和入射角度的喷丸处理对 7B50 铝合金的表面形貌、横截面微观组织结构、显微硬度和残余应力表层微观组织结构的影响规律，并对其残余应力场的分布特征及变化规律深入研究。

第 5 章：关注其对 7B50 铝合金试件疲劳试验的作用。在本章研究里，运用拉-拉疲劳实验方法，对经过喷丸处理的 7B50 铝合金的疲劳性能展开测试。通过结合所获取的疲劳性能数据以及断口形貌特征，深入分析喷丸工艺对 7B50 铝合金疲劳性能产生的影响，以及该材料疲劳失效背后的机理。

第 6 章：对本文涉及的相关研究成果予以总结，并指出其中存在的问题与不足。在此基础上，围绕后续相关研究领域展开合理且具有前瞻性的展望。

综上所述，本文的整体技术路线如图 1-5。基于图示结构，可明确各阶段研究的执行顺序、交互依赖关系及信息传递模式。能直观呈现从问题提出到方案落地的完整推演过程。

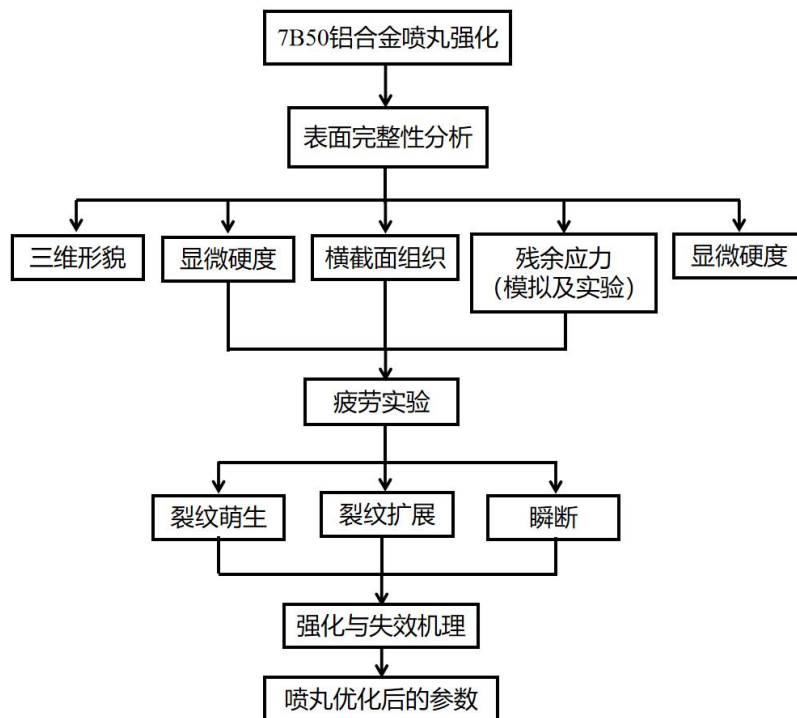


图 1-5 试验方案及技术路线

第 2 章 喷丸模型及实验制备

2.1 引言

喷丸强化技术作为一种高效、经济的表面改性工艺，通过高速弹丸流对材料表面的冲击作用，诱导表层塑性变形并引入残余压应力层，能够显著提升材料的抗疲劳性能、耐腐蚀性及耐磨性。7B50 铝合金在循环载荷下的疲劳失效问题仍是制约其工程应用的关键瓶颈之一。喷丸强化技术通过优化表面完整性参数（如残余应力、显微硬度和粗糙度），可有效抑制疲劳裂纹的萌生与扩展，需系统性研究以指导工艺优化。

目前，喷丸强化的研究多集中于工艺参数对宏观性能的定性分析，而对其微观力学响应机制、多弹丸随机冲击的协同效应以及数值模拟方法的精确性仍存在不足。此外，针对 7B50 铝合金的喷丸强化研究相对匮乏，尤其是动态冲击下的本构行为建模与残余应力场演化的定量关联仍需深入探讨。为此，本章以 7B50 铝合金为研究对象，综合实验制备与数值模拟方法，系统研究喷丸工艺对材料表面形貌及应力场均匀性的影响机制，并通过对应的 6 种喷丸工艺实验件进行疲劳实验测试与断口机理分析，验证喷丸工艺对材料抗疲劳性能的提升效果。

2.2 实验材料制备

2.2.1 实验材料

本文所研究的 7B50 合金的主要成分为 Al、Zn、Mg 和 Cu，其化学成分(质量分数)见表 1,用于表面完整性测试的样件几何规格设定为 96 mm×25 mm×3 mm。疲劳试样参照标准 ISO 12106: 2003 制备。疲劳试验的具体试样尺寸如图 2-1 所示。图 2-2 为 7B50 铝合金的实物图像。

表 2-1 7B50 铝合金化学成分（质量分数/%）

Si	Fe	Zn	Cu	Mn	Mg	Cr	Zr	Al
0.10	0.10	6.48	2.06	0.10	2.24	0.04	0.09	余量

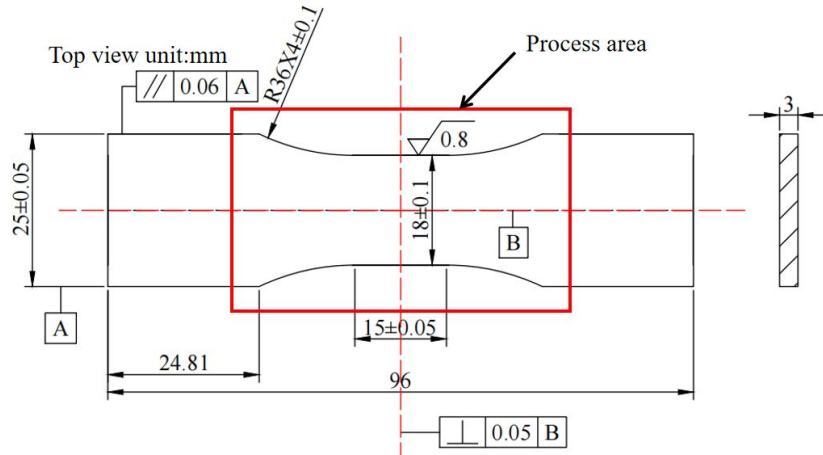


图 2-1 疲劳试样尺寸图

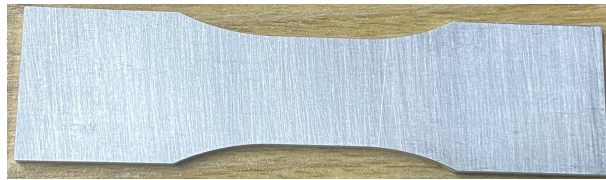


图 2-2 低周疲劳试样

2.2.2 样品制备

针对 7B50 铝合金的微观组织表征需求,实验样本制备流程如下:通过电火花线切割工艺对初始材料进行加工,使样件达到预设尺寸(96 mm×25 mm×3 mm),以满足后续检测标准要求。表面预处理采用梯度研磨工艺,依次使用80#至2000#碳化硅砂纸实施五阶段精磨。表面精加工阶段采用氧化铝悬浮液进行机械抛光,并进行无水乙醇超声净化处理(15 min, 40 kHz)以去除磨抛残留物及有机污染物。最终样本经真空干燥箱(60℃, 2h)完成脱水处理后进行封装储存。

2.3 实验及检测设备

本小节介绍喷丸处理设备、表面形貌检测设备、残余应力检测设备、拉-拉疲劳实验设备以及疲劳断口拍摄设备的仪器型号及操作过程。

(1) 喷丸处理设备

为探究喷丸工艺对 7B50 铝合金的改性效果,本研究采用 ASH230 铸钢丸(硬度 48-52 HRC,直径 0.250-0.425 mm),通过气动数控喷丸机(喷嘴直径 8 mm)对试样进行表面处理。喷丸强度通过 N 型 Almen 试片弧高(mmA)法测定,喷嘴至试样距离固定为 150 mm,覆盖率为 150 %。实验设置 0.1 mmA 与 0.2 mmA 两

种强度，六组工艺参数如表 2-2 所示，重点研究强化层^[57]的粗糙度、硬度、残余应力及疲劳特性演变规律。

表 2-2 不同喷丸工艺参数

工艺编号	不同喷丸参数水平设置		
	喷丸强度(mmA)	弹丸直径(mm)	喷丸角度(°)
SP1	0.1	0.3	45
SP2	0.1	0.3	60
SP3	0.1	0.3	90
SP4	0.2	0.3	45
SP5	0.2	0.3	60
SP6	0.2	0.3	90

(2) 表面检测设备

在 ISO2632/-1985 标准框架下，喷丸表面粗糙度的测量基于 R_a 值（表面峰谷高度的算术均值），其计算方法如公式 2-1 所示。 R_a 作为算术平均粗糙度参数，是喷丸质量判定的重要依据。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f|(x) dx \quad (2-1)$$

式中：为 l 采样长度； x 为采样点处的轮廓偏移量。

如图 2-3 所示，采用 OSL4000 激光共聚焦显微镜对不同喷丸强度的 7B50 铝合金试样进行表面粗糙度^[58]与三维形貌分析。具体参数为：粗糙度检测使用 20 倍镜头，截止波长(λ_c)设定为 0.8 mm，采样次数 n 为 6，保护长度 0.4 mm，取样长度 5.6 mm。

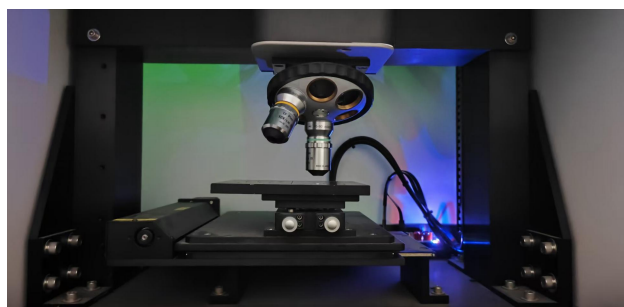


图 2-3 三维形貌采集

(3) 残余应力检测设备

采用加拿大 Proto 公司制造的 X 射线衍射仪（具体型号为 iXRD 300W）测量表面残余应力，如图 2-4 所示。

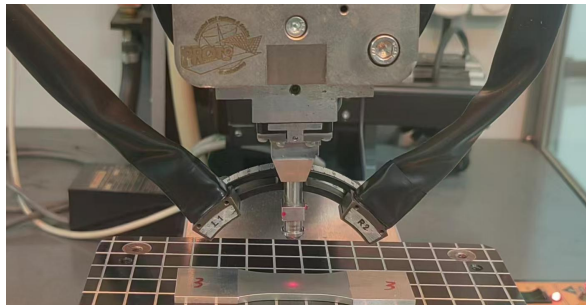


图 2-4 残余应力测试图

采用 8818-V3 电解抛光设备开展抛光实验，参数包括电压 40V、流量 8L/min、时间 3s，电流实测为 2.8-3A。抛光深度通过 Wyko NT9100 光学轮廓仪测量。由于电解抛光过程可能产生应力松弛，残余应力数据需进行补偿校正。实验实物图如图 2-5 所示。



图 2-5 电解抛光示意图

在动能冲击表面改性过程中，冲击介质与受喷基体间的动态相互作用引发多阶段应变响应。该动态响应过程可分为四个特征阶段：初始弹性响应阶段、弹塑性耦合阶段、塑性流动主导阶段以及弹性回弹阶段^[59]。当半径为的球形冲击体以临界动能作用于材料表面时，塑性形变区最大扩展半径可达值。卸载阶段发生的弹性恢复效应会导致压痕深度减小约 15-30%，最终形成具有特征曲率的残余压痕形貌。残余应力表征采用 X 射线衍射技术，其物理基础建立在布拉格衍射定律之上，如式 2-2。当单色 X 射线束与晶体材料相互作用时，入射波在特定晶面族产生相干衍射现象。当相邻晶面反射波的相位差满足 $\Delta\phi=2n\pi$ 条件（或光程差为波长整数倍）时，各晶面的散射波发生建设性干涉，从而在 2θ 角方向形成衍射峰^[60]。其中关键参数包括：衍射角 2θ 表征晶体结构特征，晶面间距 d 反映晶

格畸变程度，波长 λ 由 X 射线源特性决定。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2-2)$$

X 射线衍射法通过对弹性应变的测量来获取应力值。当多晶体受到一定大小的宏观应力 σ 作用时，不同晶粒的同族晶面面间距 d 会随着晶面方位以及应力大小的变化，呈现出规律性改变。依据布拉格方程可知，此时的 2θ 也会出现相应变动。通过结合广义胡克定律与布拉格定律，能够推导出用于测定宏观应力的基本公式，具体如式 2-3 所示：

$$\sigma = KM \quad (2-3)$$

(4) 拉-拉伸疲劳实验设备

本研究依据 GB/T 3075-2020 标准构建轴向循环加载耐久性测试体系，采用 MTS 低频疲劳试验机对比分析原始态与动态强化处理态 7B50 铝合金的抗疲劳特性。实验采用非对称应力控制模式($R=0.1$)，加载波形为正弦曲线，测试频率设定为 40Hz，分别在 300MPa 应力幅值水平下进行室温环境($23\pm 2^\circ\text{C}$)下的低周次疲劳性能评估。其失效标准为试样在标距处完全断裂。实验实物图如图 2-6 所示。

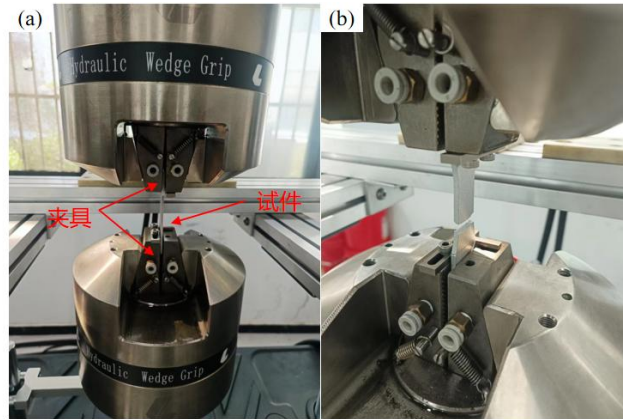


图 2-6 MTS 疲劳试验示意图：(a)疲劳试验的夹持阶段；(b)试件疲劳试验断裂阶段。

(5) 疲劳断口拍摄设备

疲劳实验结束后，需对试验件断口进行线切割，选取断口位置样本。将样本放入无水乙醇中超声清洗，去除杂质与污染物。清洗后，将样本置于烘干箱烘干至干燥。如图 2-7 所示，用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察疲劳断口整体及裂纹源区形貌。探究喷丸前后裂纹源位置与扩展方式，对疲劳试样断口侧面进行化学腐蚀处理，借助 SEM 分析喷丸前后疲劳裂纹在试样表

面的扩展方式，以了解喷丸对疲劳裂纹扩展的影响。



图 2-7 扫描电子显微镜图

2.4 喷丸模型的建立

2.4.1 单喷丸模型

为深入探究喷丸过程参数与执行参数对喷丸效果产生的影响，全面了解喷丸强化过程、优化喷丸工艺以及提升工件性能显得尤为关键。在此情况下，建立喷丸模拟具有显著的现实意义。在本章里，建立单弹丸和多弹丸的有限元模型。需明确，喷丸过程参数是单弹丸模型以及随机喷丸模型重要的输入参数。单弹丸模型主要用来计算弹坑半径和等效塑性应变(PEEQ)阈值，弹坑半径是确定覆盖率与弹丸个数对应关系、为构建多弹丸模型的重要前提^[61]。借助模拟喷丸过程，能深入剖析不同工艺参数对喷丸强化成效的作用，阐释表面粗糙度、表层材料组织和残余压应力等关键因素的作用机理^[62]。

在本节研究里，开展单个弹丸撞击靶材过程模拟。其主要意图是探索多弹丸情形及不同喷丸参数对应力场、表面形貌的作用，得到最佳喷丸参数与不同喷丸速度下的弹坑直径^[63]，为随机喷丸覆盖率计算奠定数据基础。实验采用 1.5 mm×1.5 mm×1 m 的长方体作为靶材，并划分成多个小单元。然而，进一步细分基体单元易引发沙漏问题，可能导致模拟失败。解决办法是把正方体靶材切割成大量小单元，保证单元尺寸远小于弹丸网格，从而消除沙漏问题，提高模拟精度。为使喷丸模拟更符合实际，将喷丸区域网格尺寸确定为 0.02 mm×0.02 mm×0.02 mm。单弹丸冲击靶材表面中心点时，模型具有一定对称性，运用 ABAQUS 模拟时取用模型的 1/2。喷丸强化模拟中，弹丸为铸钢丸，靶材是 7B50 铝合金，

材料主要性能参数见表 2-3。

表 2-3 靶材和弹丸的力学性能参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 γ
7B50 铝合金	2830	71	0.33
铸钢丸	5500	210	0.3

模拟时将铸钢丸设为不可变形的球形刚体。实际喷丸过程中，7B50 铝合金靶材表面不断受到高速弹丸冲击，致使表层出现高应变率塑性变形，此现象属于动态力学范畴。目前，已有诸多学者对这类动态力学行为开展研究，并相继提出不同的材料模型，像 Johnson-Cook 本构模型^[64]、MTS 本构模型^[65]、Zerilli-Armstrong 本构模型^[66]等，以此描述该行为。考虑到 Johnson-Cook 本构模型^[64]（即 J-C 本构模型）相较于其他模型，具有参数较少、形式简洁的特性，更契合喷丸仿真研究。所以，在本文研究里，7B50 铝合金靶材采用的本构模型为 J-C 本构模型^[64]，具体表达式如下：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (2-4)$$

式中： A 为材料的屈服强度，MPa； B 为材料参数，MPa； C 为应变率参数； m 为热软化参数； n 为硬化参数； ε 为等效塑性应变(PEEQ)； σ 为等效流动应力； T_m 和 T_0 分别为材料的熔点和室温； $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变； T 为材料温度； $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。相应的本构模型参数如表 2-4。

表 2-4 7B50 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数

参数	A	B	C	n	m
数值	485	176.1	0.0146	0.416	1.78

喷丸仿真时，利用弹丸冲击试件开展动力显示分析运算。结束后切换到静力分析阶段，推动状态平衡，达成模拟自然时效目的，让有限元仿真模型应力转化为残余应力。

图 2-8 为单弹丸冲击模型。该模拟采用分步计算方法：基于显式动力学算法求解瞬态冲击过程，随后切换至隐式准静态求解模块实现应力松弛平衡，以此等

效实际生产中的自然时效效应，最终将动态应力场转化为稳定的残余应力分布。在边界条件设定方面，沿对称面施加法向位移约束，模型底部实施全自由度固定。接触算法选择方面，鉴于冲击过程中弹丸与靶材的接触区域具有明确的空间定位特性，采用面面接触算法进行精确建模。基于接触界面特征，将具有刚体属性的弹丸表面定义为主控面，而靶材受冲击区域设为从属面，其切向摩擦系数取 0.3。

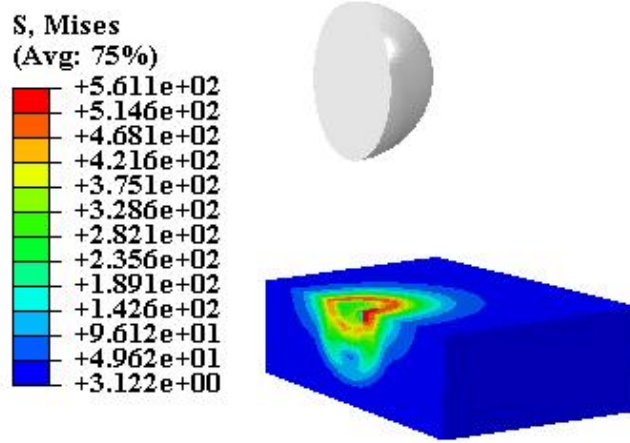


图 2-8 单弹丸冲击模型

(1) 边界条件

结合喷丸的实际状况，需对工件底面实施全约束处理，而弹丸与靶材之间的接触问题，则通过接触对来加以定义。关于喷丸速度，其实质是为弹丸赋予初速度，其初速度的计算公式^[67]为：

$$V = \frac{16.35 \times \rho_s}{1.53 \times M_s + \rho_s} \quad (2-5)$$

式中： V 为初始的弹丸速度(m/s)； M_s 为弹丸流量($M_s=1.5$ kg/min)； ρ_s 为喷丸气压($\rho_s=0.7$ MPa)； D 为弹丸大小。

(2) 网格划分

基于文献^[68]提出的网格收敛性准则，本研究采用 C3D8R 六面体缩减积分单元构建靶材网格系统。对冲击过程中可能存在沙漏效应的问题，可通过网格划分加密策略：在弹丸冲击作用域实施局部细化，将特征尺寸控制为弹丸直径的 10%($d/10$)，随着空间位置远离接触中心，网格密度按指数规律递减。图 2-9 为喷丸强化数值模型的最终离散形态，其网格拓扑结构呈现出典型的辐射状分布特征。

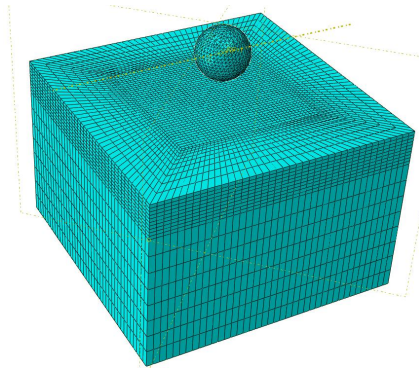


图 2-9 单弹丸网格划分模型

图 2-10 为三维应力云图可视化结果,图 2-11 为沿深度方向的应力剖面曲线。数值模拟结果表明:残余应力沿表面深度方向呈现先升后降的非单调分布规律。定量分析显示,靶材表层($z=0\ \mu\text{m}$)测得残余压应力值为-160 MPa,随着深度增加至次表层($z=10\ \mu\text{m}$)时,残余压应力最大值为-360 MPa,随后呈渐进衰减态势。

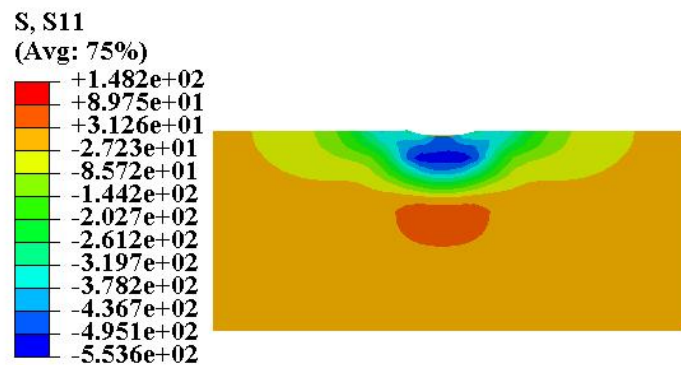


图 2-10 单弹丸强化残余应力云图

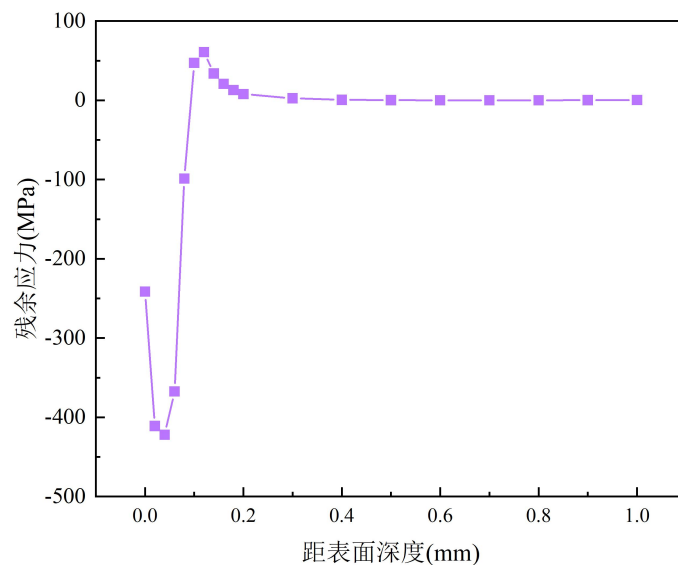


图 2-11 单弹丸强化后生成的残余应力云图

基于图 2-12 的等效塑性应变云图及图 2-13 的深度方向曲线可见，单弹丸喷丸强化后，靶材的最大塑性应变位于次表层而非表层。进一步分析表明，等效塑性应变与残余压应力的分布规律具有协同性，两者在深度方向上均表现为先升高至峰值后逐渐衰减的特征。

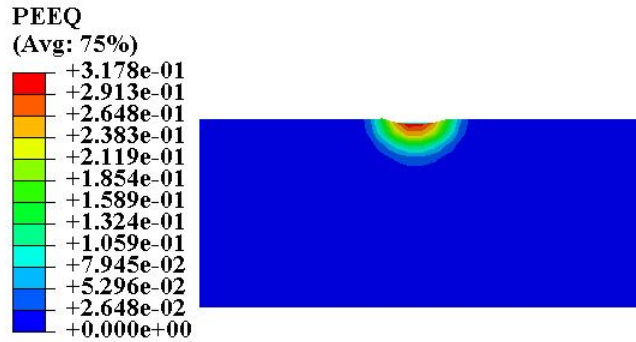


图 2-12 单弹丸强化等效塑性应变云图

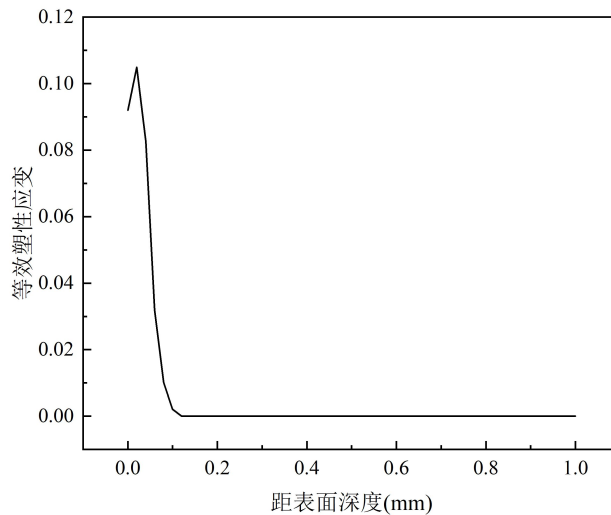


图 2-13 单弹丸强化所形成的等效塑性应变曲线图

单弹丸喷丸强化后的弹坑位移场分布如图 2-14 所示。可看出，弹丸撞击导致靶材表面发生塑性变形，形成显著的凹陷形貌。基于凹坑直径方向的位移场数据提取，可系统评估喷丸速度与弹丸直径对凹坑尺寸的协同影响。

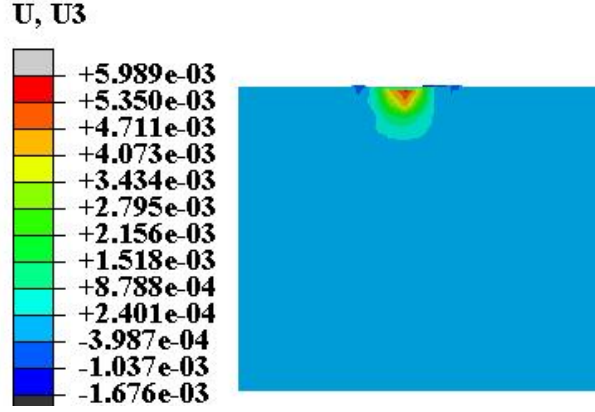


图 2-14 单弹丸喷丸强化后弹坑位移分布云图

2.4.2 随机多喷丸模型

前文基于单弹丸喷丸模型揭示弹坑直径的演化规律，但实际气动喷丸强化需依赖多弹丸随机分布的协同作用。为实现工艺优化目标，本研究结合 ABAQUS/Python 二次开发功能，构建随机多弹丸喷丸自动建模框架，系统分析喷丸参数对靶材表面粗糙度及残余应力分布的调控机制。

(1) 机械喷丸覆盖率的计算

喷丸覆盖率是评估喷丸饱和度的核心指标，通过弹坑总面积与受喷表面积的比值量化。工艺规范要求覆盖率不低于 100%，然而当实测值接近 100%时，残余未覆盖区域难以识别，因此工程上常将 98%覆盖率视为完全覆盖。结合概率理论，可建立覆盖率^[69]与喷丸次数 n 的数学公式，如式 2-6。

$$C_n = \left[1 - (1 - C_i)^n \right] \times 100\% \quad (2-6)$$

式中： C_i 为单次喷丸覆盖率； n 为喷丸次数。

Kirk^[70]提出喷丸覆盖率的解析计算模型，该模型是基于弹丸以恒定流量冲击工件这一假设前提之下构建的，覆盖率计算公式如下：

$$C(N) = \left[1 - \exp\left(-\pi \bar{r}^2 RT\right) \right] \times 100\% \quad (2-7)$$

式中： $\bar{r}$ 为弹坑平均半径； R 为单位面积的弹丸个数； T 为喷丸时间。

Karuppana 等^[71]以弹丸和工件的力学性能作为待定系数，推导得出了另一种喷丸覆盖率的解析计算模型：

$$C(N) = \left[1 - \exp \left(-\frac{3\bar{r}mT}{4Ar^3\rho_s} \right) \right] \times 100\% \quad (2-8)$$

式中： m 为弹丸质量流量； ρ_s 为弹丸密度； A 为工件受喷区域的面积。

(2) 残余应力场提取

为表征喷丸强化层的残余应力场，图 2-15 构建了靶材喷丸区的密集网格模型。路径间隔设置为 4 个网格单元，总共 70 条采样路径。通过对各路径同深度 S11 应力值进行统计平均，获得残余应力的空间分布曲线。研究聚焦于表面表面残余压应力(σ_0)，最大残余压应力(σ_{Max})，最大残余压应力层深(d_m)，残余压应力层深(d_0)的演变规律。

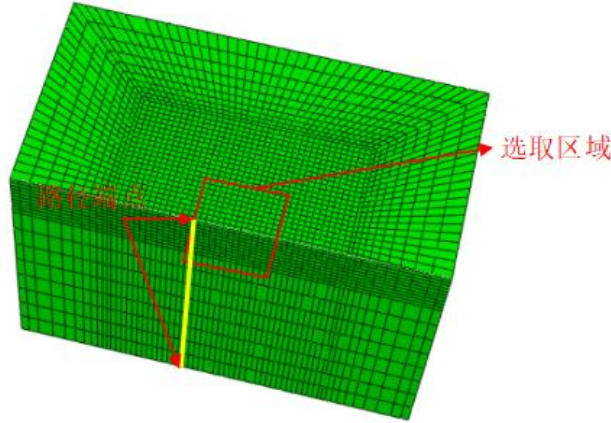


图 2-15 残余应力仿真结果提取路径图

2.5 本章小结

本章对 7B50 铝合金喷丸强化模拟与实验制备研究，主要研究内容及结论如下：

(1) 实验材料与样品制备，明确 7B50 铝合金的化学成分及力学性能，通过电火花线切割、梯度研磨、机械抛光及超声清洗等工艺制备标准检测样件，确保材料表面状态满足后续实验要求。

(2) 基于 Almen 试片法确定喷丸强度，采用六组不同参数，其中喷丸强度采用 0.1 和 0.2 mmA，入射角度采用 45°、60°和 90°一并进行表面强化处理，为后续表面完整性及疲劳性能分析提供基础。

(3) 结合激光共聚焦显微镜与 X 射线衍射仪，定量分析喷丸后的表面粗糙度

(R_a 值) 及残余应力分布规律。结果表明, 喷丸强度增大导致表面粗糙度升高, 残余压应力沿深度方向呈现先增后减的非单调分布特征。

(4) 依据 GB/T 3075-2020 标准, 通过低周疲劳试验对比原始态与喷丸强化态的疲劳寿命。结合 SEM 断口分析发现, 喷丸处理可有效抑制裂纹萌生并改变裂纹扩展路径, 显著提升材料抗疲劳性能。

第 3 章 工艺参数对喷丸强化效果研究

3.1 引言

由喷丸实验会耗费大量的时间。从实验的准备阶段到具体的实施过程，再到数据分析，每一个环节都需要投入相当多的时间，这使得整个优化过程变得极为漫长，严重影响了工作效率。鉴于喷丸实验的这些弊端，故有必要寻求一种有效的喷丸过程数值仿真方法。这种方法可取代实验对喷丸参数进行选择，具体来说就是构建喷丸强化预测模型。通过数值仿真，预测不同参数下的喷丸效果，快速找到最佳的工艺参数组合。本文针对 7B50 铝合金为研究对象，基于 Python 在 ABAQUS 中的二次开发程序，能够构建出随机弹丸冲击靶材的有限元模型，并且可借助正交试验法对仿真结果数据加以处理。旨在探究冲击速度、弹丸直径以及喷丸角度 3 个工艺参数对于残余应力与粗糙度所产生的影响，以期获取到最优的工艺参数组合方案，提升 7B50 铝合金在喷丸强化下的精准性，实现最佳的喷丸成效。不仅可以大大节省时间和资源，还可以降低成本。而获得的工艺参数影响程度可以用于指导实际喷丸过程，从而提高喷丸质量和效率。

3.2 正交试验法

喷丸强化工艺的数值模拟研究现状表明，国内外学者已系统探究速度矢量(v)、入射角(θ)、弹丸属性等单因素调控对残余应力场的孤立影响规律。主流研究方法多基于有限元法构建单颗粒冲击模型，通过参数敏感性分析获取各变量的独立作用系数。然而，现有研究范式存在显著局限性：忽视参数间的交互耦合效应，难以反映实际工况中的多物理场协同作用机制。本研究提出基于析因设计理论的参数优化框架：首先构建考虑应变梯度效应的微观冲击模型，引入正交试验设计(Orthogonal Experimental Design, OED)方法将全因子空间($3^3=27$ 组)降维至典型样本空间，即 $L_9(3^3)$ 正交表。该方法的数学优势体现为计算成本降低。

针对多参数(3 因素 3 水平)喷丸工艺优化难题，正交试验法通过以下框架突破全因子试验限制：1)指标：多目标(表面/最大压应力及深度)，综合评分法归一化；2)因素：可控变量；3)水平：参数离散化。基于正交表规划试验，以 9

组仿真替代 27 组全因子试验，精准定位最优工艺组合。

正交试验设计对于确定仿真模拟方案以及对应的影响目标值具有重要作用，并且能够对试验结果进行分析。在安排本章的仿真试验过程中，选择使用正交试验法。先明确模拟试验的目标值，接着确定影响试验的相关因素以及各因素所选取的水平。随后制定喷丸参数的正交表，挑选出适合模拟试验的仿真模型，开展 ABAQUS 模拟分析工作。对仿真模拟所产生的结果数据进行处理，最终确定最佳喷丸参数组合。由于本章运用的是仿真试验，在模拟分析之前，对模拟试验使用的仿真模型进行实验验证。本章处理试验结果时采用极差分析，主要是因为其分析过程不仅简便，而且直观易懂。

3.3 Python 在 ABAQUS 二次开发与应用

Python 语言作为一种高效脚本语言，被广泛应用于 ABAQUS 的二次开发中^[72]。因此，可以利用 Python 编写好的脚本文件来调用 GUI 工具，进而执行 ABAQUS 脚本命令，以此实现模型的修改。借助 ABAQUS 的 Python 接口，能够运行后缀为“.py”的 Python 文件。从而两者之间可以联系，实现随机喷丸模型的前处理及后续的后处理^[73]。在特定的具体情境当中，的确存在着一种独具特色的数据交互方式，而两者恰巧通过正如图 3-1 所展示的这种方式产生紧密联系的。

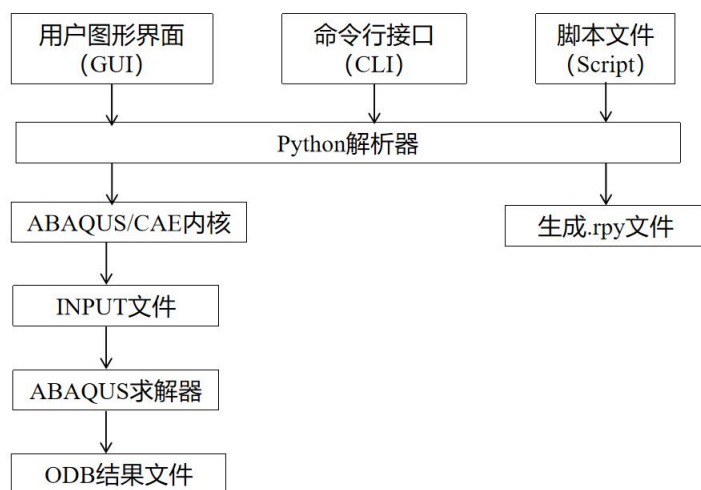


图 3-1 Python 与 ABAQUS 的通信关系

ABAQUS 支持用户以图形界面(Graphical User Interface, GUI)、命令行接口(Command-Line Interface, CLI)或脚本 (.rpy 文件)输入操作指令。Python 解释器

接收指令后,将其传递至 ABAQUS 内核进行处理。内核将指令转换为标准的 INP 文件,交由显式求解器执行数值计算,最终输出后处理所需的计算结果文件。

3.3.1 GUI 交互界面设计

GUI 交互界面设计扮演着至关重要的角色。用户可以通过交互界面调用 MATLAB 软件进行建模,GUI 交互界面不仅能够提高用户的使用体验,还能极大地提升软件的功能性和易用性^[74]。本文设计的图形用户交互界面,是用 Python 语言中的 tkinter 库函数。用它来创建不同的 GUI 界面。

模拟用户对不同喷丸参数的需求,在交互界面上做了几个主要参数输入框。鉴于 GUI 界面设计的整段代码比较多,每行代码都解释的话,过于复杂。在此情况下,只仅仅选取其中的一些具有关键意义的核心部分来进行深入地分析。选取的代码会包含 GUI 界面的整体框架、每个窗口创建的介绍、重设和运行两个功能按钮的设定及前处理的任务提交等方面。经过上述的各部分整合,本文的 GUI 界面也就可以正常运行使用。

```
01 root = tk.Tk()root.title("参数输入界面")

02 label1 = tk.Label(root, text = "随机喷丸模型参数输入界面")

03 label2 = tk.Label(root, text = "靶材尺寸",foreground = 'black',font = 20)

04 label3 = tk.Label(root, text = "撞击区域边长:")

05 label4 = tk.Label(root, text = "厚度:",foreground = 'red',font = 10)

06 label5 = tk.Label(root, text = "喷丸参数",font = 20)

07 label3 = tk.Label(root,text = "喷丸速度:",foreground = 'red',font = 10)

08 with open('paras.py','w',encoding = 'utf -8') as f: f.write(string)messagebox .

button = tk.Button(root, text = "运行",command = generation)
```

如上重要代码所示。由第 1 行的代码表示,第 2 行设定随机喷丸模型的参数输入界面为标题。第 3 至 7 行代码是创建面板,只展示五个参数的赋值并没全展

示。第 8 行将改好参数的脚本文件生成并存在同一文件夹中。

3.3.2 交互界面功能

为有效地提高建模和仿真效率，减少人力劳动。本文利用 `tkinter` 库为喷丸强化设计一个定制的交互式图形用户界面，使用户能够按要求精确输入试验参数，并为 ABAQUS 二次开发过程生成必要的脚本。脚本文件中，可定义修改的参数，以便自己随时修改和调用未定义的参数。在图形用户界面后台的脚本文件中，可清楚地观察到每个部分的功能。根据在交互界面中输入的参数，只需点击“生成”按钮，脚本就会在后台自动运行，快速生成扩展名为“.py”的脚本文件。该脚本文件对 ABAQUS 的进一步开发非常重要。

3.3.3 交互界面介绍

本文设计的图形用户界面交互界面如图 3-2 所示。该交互界面有八个主要变量：目标方形的长度和厚度，目标和弹丸属性为密度、杨氏模量、泊松比，以及喷丸参数为喷丸速度、弹丸尺寸和喷丸角度。交互式界面包括目标尺寸、强化参数和材料属性的数字输入字段，可根据用户要求进行定制。交互式界面可自动快速生成所需的“.py”脚本文件，为模型的后处理奠定基础。

参数输入界面

随机喷丸模型参数输入界面

靶材尺寸

撞击区域边长: 厚度:

喷丸参数

喷丸速度: 角度:

直径: 小球个数:

靶材属性

密度: 弹性模量: 泊松比:

弹丸属性

密度: 弹性模量: 泊松比:

重设 运行

图 3-2 GUI 交互界面

3.4 随机喷丸仿真模型脚本的创建

本研究采用分层架构设计思想，通过功能与接口标准化提升软件的适应能力。

为避免在最终喷丸模拟模型文件的脚本生成过程中出现错误而浪费时间，建议在创建每个模块后进行充分的测试和验证工作，以确保脚本的正确性和可靠性^[75-76]。对创建的脚本进行优化和改进，以提高测试效率，确保仿真模型达到预期结果。

3.4.1 模型预处理脚本的建立

(1) 设置材料属性

丸粒属性

```
01 mdb.models['Model-1'].Material('Mat_ball')
```

```
02 mdb.models['Model-1'].materials['Mat_ball'].Density()
```

靶材属性

```
01 mdb.models['Model-1'].Material('Mat_plat')
```

```
02 mdb.models['Model-1'].materials['Mat_plat'].Density()
```

上述代码旨在丸粒和目标的材料参数。首先创建两个材料属性库，即“丸粒”和“靶材”，然后利用图形用户界面的交互界面输入丸粒和靶材的材料参数。

(2) 创建分析步

```
01 mdb.models['Model-1'].ExplicitDynamicsStep(name='Step-1', previous='Initial', timePeriod=3e-4, quadBulkViscosity=0.04)
```

```
02 session.viewports['Viewport:1'].assemblyDisplay.setValues(step='Step-1')
```

本段代码分为 3 个分析步：Initial、Step-1、quadBulkViscosity。并对 Step-1 分析步的响应时间间隔设定为 0.0003。对分析步 quadBulkViscosity 弹丸网格划分单元尺寸设计为 0.04。

(3) 创建边界

```
01 mdb.models['Model-1'].DisplacementBC(name='BC-'+str(i),
createStepName='Initial')
```

该代码旨在建立球的边界条件，球在强化区域内受到约束，而目标的周围和底面则受到完全约束，从而模拟强化目标的实际约束状态。这样就能更好地实现模拟冲击过程的真实性。

(4) 网格划分

```
01 p = mdb.models['Model-1'].parts['plat']
02 p.seedEdgeByBias(biasMethod = SINGLE, end1Edges = pickedEdges1,
end2Edges = pickedEdges2, minSize = 0.04, maxSize = 0.4, constraint = FINER)
```

(5) Submission of mandates

```
01 mdb.jobs['Job-10'].submit(consistencyChecking = OFF, datacheckJob = True)
02 session.mdbData.summary()
```

该代码用于创建 Job 10 模型文件、提交作业并将生成的文件输入 ABAQUS 求解器。即构建随机喷丸强化模型脚本文件的所有预处理步骤都已完成，图 3-3 为生成的网格划分结果模型图。

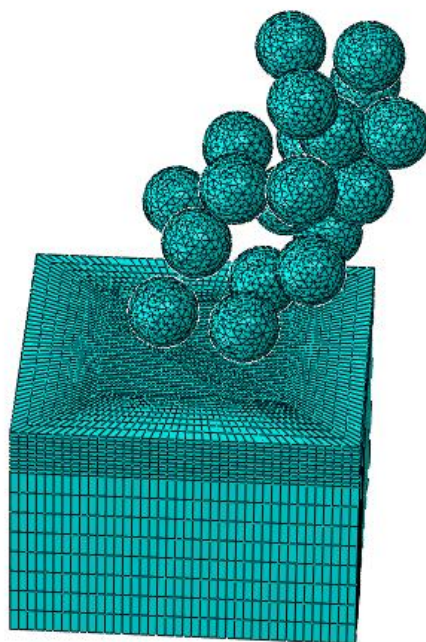


图 3-3 网格划分结果模型图

3.4.2 喷丸强化模拟后处理分析

点击“作业”模块中的监视器即可查看后处理结果。本文编写的前处理脚本仅能实现参数建模和提交计算，而等效应力云、目标表面变形和粗糙度等计算结果可在可视化模块中查看，如图 3-4 所示。

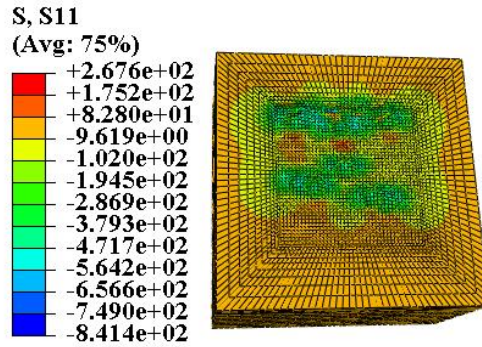


图 3-4 喷丸模型后处理图

3.4.3 随机喷丸强化仿真

本文采用的正交试验法，由设计的 GUI 交互界面，输入不同的喷丸参数，再凭借运行状态下的脚本，生成与之对应的喷丸模型，从而进一步展开研究并分析模拟试验。

3.4.4 有限元模型的喷丸强化参数化

靶材为 7B50 铝合金，弹丸为铸造钢丸，靶材和丸粒的机械性能见表 3-1。

表 3-1 靶件和丸粒的机械性能参数

材料	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量 E/GPa	泊松比 γ
7B50 铝合金	2830	71	0.33
铸钢丸	5500	210	0.3

本文中，靶材表面受弹丸冲击产生弹性变形，因此采用约翰逊-库克本构模型，参数取自相关参考文献^[77]。为了便于研究，将喷射覆盖率设定为 150%。靶材尺寸为 2 mm×2 mm×1 mm，网格密度对分析结果有显著影响。为提升计算结果的精确程度，在弹丸发生碰撞的区域，必须对网格予以充分细化处理，以此精准获取残余应力场。鉴于喷涂工件表面的中心区域会与弹丸产生接触，所以有必要对工件表面接触区域的网格进行细化操作^[78]。针对工件底面，采用固定位移边界条件。而对于弹丸属性的设置，则以弹丸的球心作为基准点。

3.5 喷丸工艺正交试验研究

正交试验方法是一种在最少试验次数内确定喷丸强化参数最佳组合的方法，能够为工艺提供最高参考。模拟试验结束后，通过极性分析对试验结果进行分析。

明确工艺参数对喷丸强化的影响以及参数之间的相互作用,从而实现喷丸强化工艺参数的最佳组合。可以得出影响喷丸强化效果的主要参数,并将其作为后续试验的指导^[79]。

在 GUI 交互界面中对喷丸模型进行预处理,利用喷丸模型通过正交试验方法进行模拟试验研究。并对喷丸强化模拟结果数据进行统一分析和处理,提出试验工艺方案的最佳喷丸强化参数组合。

3.5.1 喷丸参数影响程度的正交试验分析

评估喷丸强化效果的重要指标包括工件表面因弹丸冲击而产生的残余压应力的大小以及压应力层的深度。残余压应力和压应力层的数值越厚,材料强化的效果越好。具体的评价指标定义为表面残余压应力值 $X_1(\sigma_s)$ 、残余压应力层深度 $X_2(d_0)$ 和最大残余压应力值 $X_3(\sigma_m)$ 。所选的三个目标值越大,综合评价得分就越高,表面的机械性能就越好,从而使工件的抗疲劳性能得到有效提升^[80]。

3.5.2 喷丸强化参数的选择和模拟正交试验

在喷丸强化过程中,影响残余应力的因素繁杂多样。在本文正交试验里,仅挑选出对喷丸强化效果具有关键影响的三个因素,并针对每个因素,设置三个不同层级。其三个因素为喷丸冲击速度 $A(m/s)$ 、弹丸直径 $B(mm)$ 以及喷丸冲击角度 $C(^{\circ})$ 。为深入探究影响喷丸强化效果的因素,本研究运用正交试验法,设计并开展 9 组模拟实验。具体的实验设计方案详见表 3-2。

表 3-2 不同因素及因素水平表

水平	喷丸参数各对应不同的水平值		
	喷丸冲击速度 $A(m/s)$	弹丸直径 $B(mm)$	弹丸冲击角度 $C(^{\circ})$
水平 1	60	0.3	45
水平 2	80	0.4	60
水平 3	100	0.5	90

图 3-5 呈现出喷丸强化后的表面粗糙度形态。从该图能够看出,颗粒直径、喷丸速度以及角度对粗糙度影响显著。当喷丸速度处于 60 m/s 时,在图 3-5(a)和图 3-5(b)中入射角为 45° 和 90° 的条件下,图 3-5(a)中材料表面形成了大量不规则的较大凹坑,而图 3-5(b)受到入射角为 90° 的影响,只存在大量均匀的小凹坑,

且相对光滑。出现这一现象的原因可能在于，当入射角较大时，弹丸速度的法向分量会变小，进而使得冲击力变小，所形成的弹坑也就相对较浅。此外，弹丸的切向速度越大，其作用于材料表面所产生的冲击力就越大。相应地，材料表面的粗糙度值也就越小。与之相反，当入射角较小时，冲击力会增大，这会导致材料表面甚至底层产生裂纹，最终使得材料表面受到严重破坏。

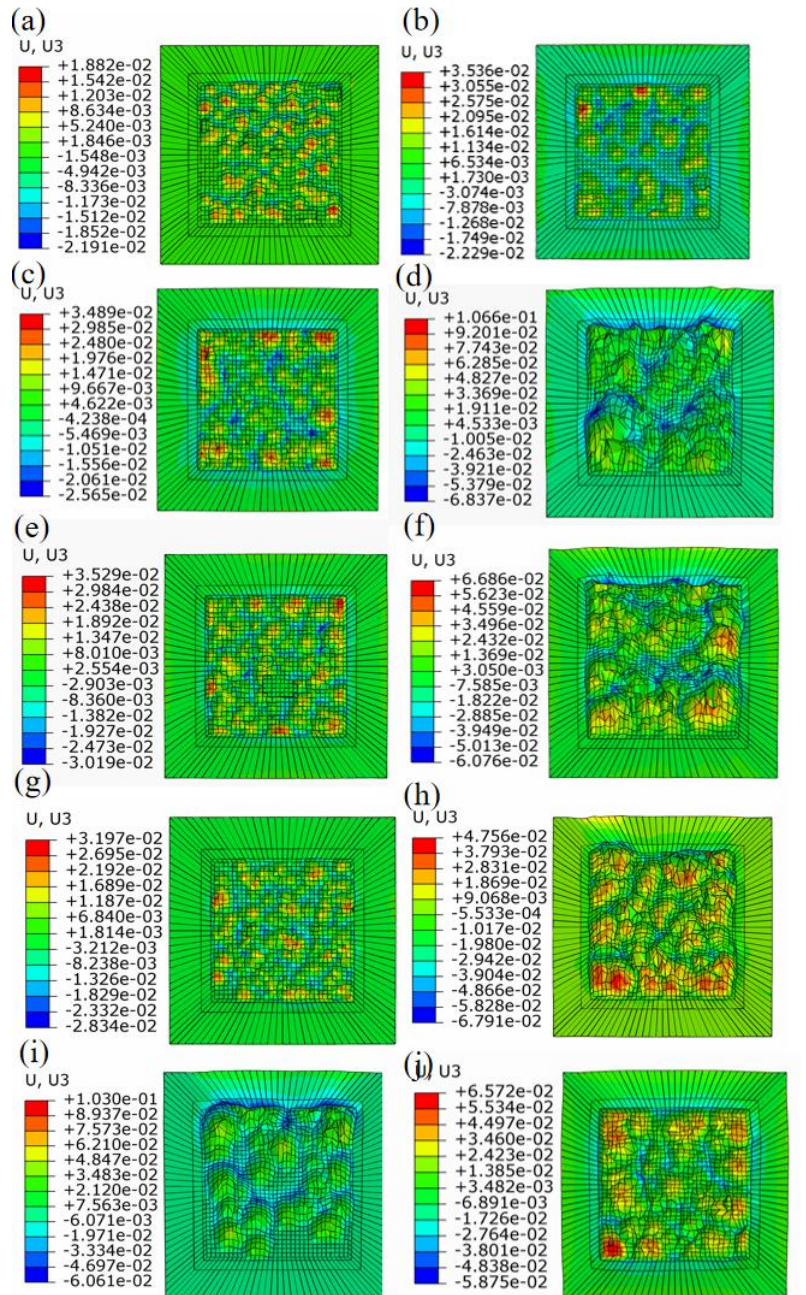


图 3-5 不同喷丸处理后粗糙度表面形貌

试验编号：(a)试样 1；(b)试样 2；(c)试样 3；(d)试样 4；(e)试样 5；(f)试样 6；(g)试样 7；(h)试样 8；(i)试样 9；(j)最佳解决方案组合。

图 3-6 和图 3-7 显示，当改变喷丸参数时，最大残余压应力、残余压应力层深度和表面残余压应力都有一定程度的增加。随着弹丸直径的增加，所获得的最大残余压应力的深度变化不大，但最大残余压应力却在不断增加。这种情况可归因于几个方面。其一，当弹丸直径增大时，弹丸与目标材料之间的接触面积会增大，从而吸收更多的能量，导致残余压缩应力场的深度增加。其二，弹丸直径^[81-82]的增大可能导致冲击力的增强，也是最大压缩残余应力持续上升的原因之一。

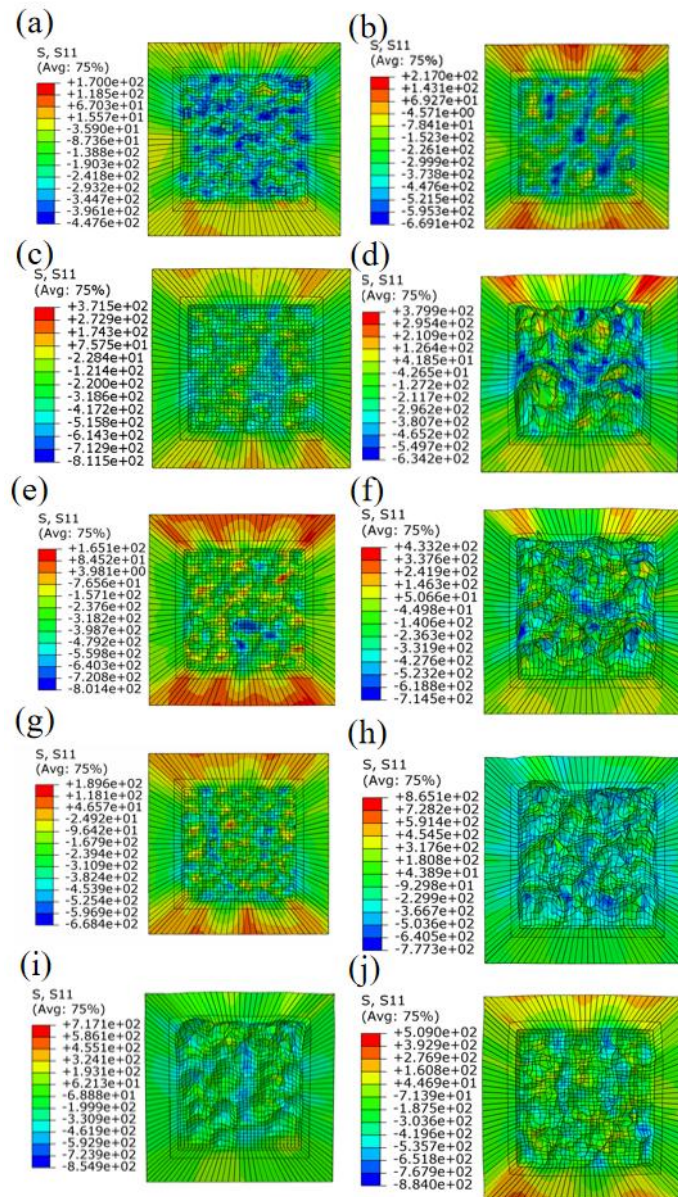


图 3-6 9 组不同喷丸处理后残余应力图

试验编号：(a)试样 1；(b)试样 2；(c)试样 3；(d)试样 4；(e)试样 5；(f)试样 6；(g)试样 7；(h)试样 8；(i)试样 9；(j)最佳解决方案组合。

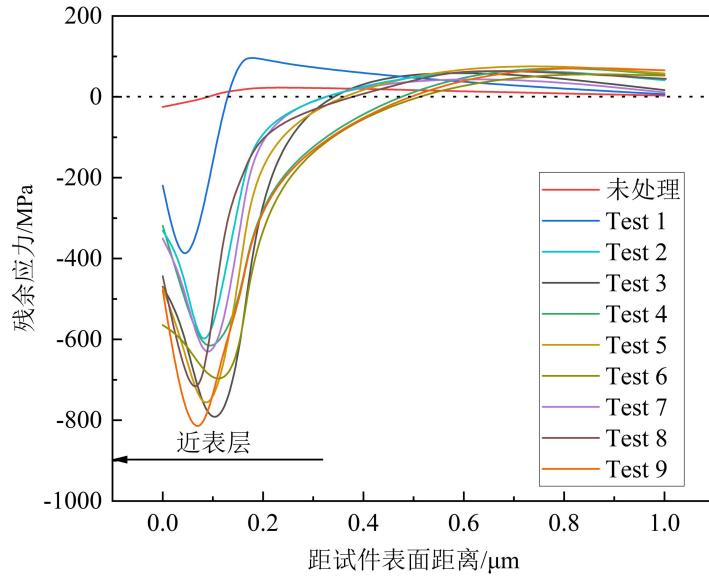


图 3-7 模拟喷丸强化试验的残余应力图

试验编号：(a)试样 1；(b)试样 2；(c)试样 3；(d)试样 4；(e)试样 5；(f)试样 6；(g)试样 7；(h)试样 8；(i)试样 9；(j)最佳解决方案组合。

正交表 $L_9(3^3)$ 是根据 3 因素 3 水平正交试验方法设计的。表 3-3 列出了正交试验表 $L_9(3^3)$ 和模拟结果数据^[83]。

表 3-3 综合评分正交试验表

试验编号	不同的喷丸强化参数设定			评估指标			评价值
	A(m/s)	B(mm)	C(°)	σ_s	d_0	σ_m	
1	60	0.3	45	-219.604	0.127	-447.605	16.683
2	60	0.4	60	-331.467	0.246	-674.595	25.158
3	60	0.5	90	-469.941	0.423	-811.52	32.047
4	80	0.3	45	-319.307	0.449	-634.743	23.862
5	80	0.4	60	-473.028	0.319	-801.483	31.871
6	80	0.5	90	-564.845	0.495	-714.545	31.997
7	100	0.3	45	-350.708	0.203	-668.423	25.483
8	100	0.4	60	-443.829	0.375	-777.329	30.538
9	100	0.5	90	-479.236	0.436	-854.917	33.365

对喷丸强化模拟进行后处理分析，以获得弹丸组撞击靶材表面凹坑部分沿水平方向的粗糙度以及沿深度方向的残余应力值。分别绘制了残余应力随深度方向

的变化曲线，收集并获得了表面残余压应力值 σ_s 、残余压应力层深度 d_0 和残余压应力最大值 σ_m 的数据结果。

3.5.3 结果分析

在此次模拟试验当中，由于四个目标的量纲各不相同，直接把这四个数据进行叠加操作，是无法对每组参数实现的喷丸效果展开评估的。因而，首要任务是针对各个目标值实施无量纲化处理。先分别找出各个目标的最大值，随后用该最大值分别去除以每组试验值，接着乘以 100。通过这样的操作，就能将各组试验值转变为无量纲的百分制数值。本次采用的是正交试验结果处理方法里的百分制加权综合评分模式。加权综合平均值 X 的计算式在式(3-1)中给出。在此操作过程里，根据每个目标对于喷丸效果的重要程度，确定对应的加权系数，并开展加权求和运算。借助这种方式，能够把多目标评价指标转化成一个综合的单目标评价指标。根据各目标在喷丸强化效果里的重要程度，来确定对应的加权系数。其中，对于表面残余压应力值 $X_1(\sigma_s)$ 、残余压应力层深度 $X_2(d_0)$ 、最大残余压应力值 $X_3(\sigma_m)$ ，其加权系数值均设定为 25%。即 $C_1=25\%$ ， $C_2=25\%$ ， $C_3=25\%$ 。

$$X = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 \quad (3-1)$$

研究变量之间的相互关系和综合指数的评估，以确定工艺参数的最佳组合，从而获得最理想的喷丸强化效果。采用极性分析方法来分析正交试验得出的结果数据。喷丸试验的极差分析如图 3-8 所示。

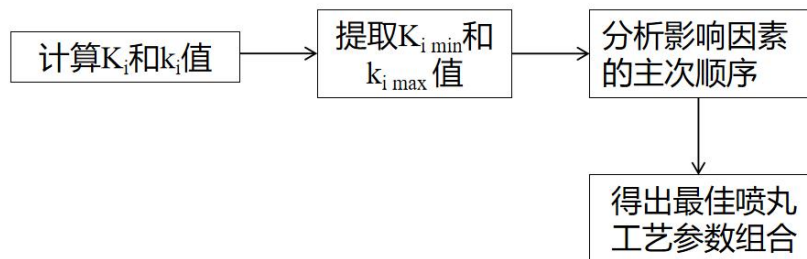


图 3-8 喷丸试验的极差分析示意图

在本次研究中，基于上述极差分析法，旨在明确表 3-3 里各因素对残余压应力层深度、表面残余压应力值、最大残余应力值等喷丸效果影响的主次顺序。为获取表 3-3 中各因素与综合指标评价之间的关联，进而探究不同喷丸参数的影响程度。在针对正交试验的极差结果进行分析的过程中，计划分别选取每组参数组合方案下，由 ABAQUS 输出的三个指标结果作为评价指标，以此来确定各因素

的主次关系。喷丸效果极差值的计算公式如下：

$$\begin{cases} \Delta j = |k_{ij\max} - k_{ij\min}| \\ k_{ij} = K_{ij} / 3 \end{cases} \quad (3-2)$$

式中： i 分别为表 3-3 中的各因素水平（其中 $i=1、2、3$ ）； j 分别为表 3-3 中的各因素编号（其中 $j=1、2、3$ ）； K_i -评价指标数值； k_{ij} -评价指标平均数值。

根据公式(3-2)，在一组数据中，测试指标的最大值与最小值之间的差值被视为测试指标的最大值与最小值之间的差值。不同喷丸工艺参数对强化效果的影响程度可通过该差值的大小来衡量。当差值较小时，影响相对较弱。反之，如果差值较大，则表明该因素对喷丸强化效果有重大影响。通过极差分析，可以确定能产生最佳值的三个因素的水平组合。

表 3-4 喷丸效果的极差分析结果

工况(K_j)	喷丸冲击速度 A(m/s)	弹丸直径 B(mm)	弹丸冲击角度 C(°)
K_1	73.888	66.028	79.218
K_2	87.73	87.567	82.385
K_3	89.386	97.409	89.401
k_1	24.629	22.009	26.406
k_2	29.243	29.189	27.462
k_3	29.795	32.47	29.8
极差	5.166	10.461	3.394
主次顺序	$B > A > C$		
最优水平	A_3	B_3	C_3
最佳喷丸参数组合	$A_3B_3C_3$		

如表 3-4 所示，根据极差值的综合评价，本研究选取残余压应力层深度 d_0 、表面残余压应力值 σ_s 以及最大残余压应力值 σ_m 这三个评价指标。基于上述极差分析方法，旨在明确表 3-4 里各因素，对残余压应力层深度 d_0 、表面残余压应力值 σ_s 以及最大残余压应力值 σ_m 喷丸强化效果影响的主次关系^[84]，弹丸直径 B 对三

项指标的极差值最大为 10.461，喷丸速度 A 次之为 5.166，冲击角度 C 最小为 3.394。即三种影响参数对于喷丸效果的影响程度为： $B > A > C$ 。

3.6 本章小结

本章基于正交实验法研究方法，以 7B50 铝合金为研究对象，结合 Johnson-Cook(J-C)本构模型的模型参数，进行 Python 在 ABAQUS 二次开发设计 GUI 用户界面，采用数值模拟的方法计算分析不同喷丸参数(喷丸冲击速度 $A(\text{m/s})$ 、弹丸直径 $B(\text{mm})$ 、弹丸冲击角度 $C(^{\circ})$)，并结合 7B50 铝合金材料表面残余压应力值 $X_1(\sigma_s)$ 、残余压应力层深度 $X_2(d_0)$ 、最大残余压应力值 $X_3(\sigma_m)$ 。得出以下结论：

(1) 通过详细地分析可得知，在本文所选取的喷丸工艺参数以及取值范围中，冲击角度取 90° 时得到的平面最为均匀。

(2) 通过借助极差值，能够总结出三种影响参数对于喷丸效果的影响程度为： $B > A > C$ ，由强到弱的顺序依次为冲击速度、丸粒大小、冲击角度。

(3) 由喷丸参数的改变，喷丸处理得以对 7B50 铝合金靶材的表面性能进行改善，然而并非喷丸强度和强化效果始终呈正比关系。喷丸强化的部分特定因素发挥主导性的作用，能够让表面完整性变得更具综合性与参考性。

第4章 喷丸强化后 7B50 铝合金的表面质量研究

4.1 引言

为增强这种铝合金的抗疲劳性能，表面喷丸处理被证明是一种高效的增强手段。该技术利用高速弹丸对材料表面施加冲击，不仅在表面引入有益的残余压缩应力，促进晶粒细化，还显著提高材料的疲劳寿命^[85]。喷丸处理优化材料的表面微观结构，实现应力的均匀分布，减少应力集中现象，有效降低裂纹的生成风险。同时，残余压缩应力的存在有效地延缓了裂纹的扩展，从而提高材料对疲劳裂纹的抵抗能力^[86]。喷丸强化效果及其对材料产生的影响，很大程度上取决于工艺参数，例如弹丸直径、弹丸速度、靶材以及弹丸入射角度等。想要成功实施喷丸工艺，对这些工艺参数进行精准控制必不可少。

本文以 7B50 铝合金为研究对象，进行不同喷丸强度和入射角度的表面强化和仿真相结合的方式。并通过表面粗糙度、表面形貌、显微硬度和残余应力等表征喷丸强化对 7B50 合金表面完整性的影响。

4.2 喷丸强化对 7B50 铝合金表面特征的影响

在喷丸处理过程中，具有高能量的弹丸以强大冲击力撞击金属材料表面。这一冲击致使金属材料表面出现大量凹坑，而这些凹坑最终促使金属材料表面粗糙度形成。当表面粗糙度增大时，会引发一系列负面效应。会致使残余应力呈现不均匀的分布状态。还会显著增加出现缺口效应的可能性。而这两种情况的出现，都极有可能致使材料发生疲劳失效。故在实际的工程应用之中，对工件经过喷丸处理后的表面形貌和粗糙度进行深入探究是极为必要的。

4.2.1 喷丸后的表面形貌

为能够直观喷丸强化过程前后试样表面轮廓发生的具体变化情况，试样的表面形貌是借助白光干涉测试的方式获取的。白光干涉测试作为一种极为先进的光学非接触式表面形貌测量方法，在不与试样表面直接接触的前提下，能够测量出试样表面的微观形貌特征。采用压电精密位移平台促进物镜的垂直位移，通过分析干涉条纹和最大光强来确定被测工件表面的相对高度。

图 4-1 为喷丸前后 7B50 铝合金的表面三维轮廓形貌。其中, 图 4-1(a)和(e)分别是未喷丸试样试验与模拟的表面三维轮廓。在进行喷丸强化处理前, 试样经打磨与抛光, 表面较为平整光滑, 仔细观察能看到纵向较为规整的磨刀痕迹。图 4-1(b)-(g)呈现的是喷丸处理后的情况。可以发现, 试样的表面形貌发生了明显改变。在喷丸工艺的作用下, 原本连续的磨削痕迹被弹丸打断。此时, 试样表面出现显著凹坑, 凹坑边缘呈凸起状。其由于弹丸高速撞击试样表面, 致使表层材料发生强烈塑性变形。

在喷丸强度为 0.1 mmA 的相同条件下, 对图 4-1(b)和图 4-1(d)的喷丸效果进行对比分析。可以看出, 图 4-1(b)中以 45°喷丸角度处理后的喷丸效果明显不及图 4-1(d)中以 90°喷丸角度的效果。原因在于图 4-1(d)中可发现更多的塑性变形, 例如有许多红色部分(代表应力集中)。对图(d)和图 4-1(g)的喷丸效果进行对比, 图 4-1(g)中谷值相对的减小, 峰值也变得相对不尖锐。较小喷丸强度会进一步影响导致更光滑的表面, 出现的弹坑会变得平缓。

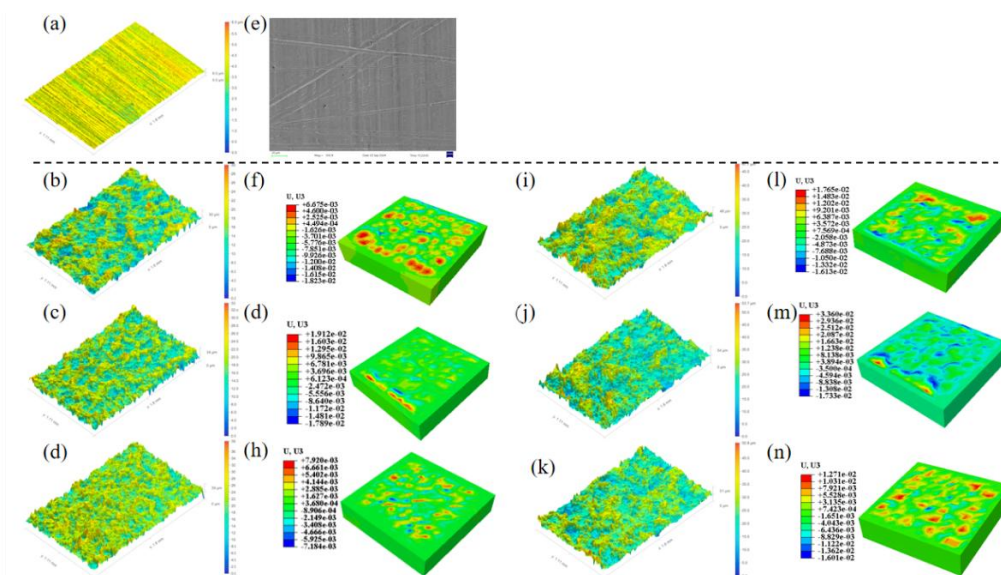


图 4-1 不同喷丸强化工艺下金属表面的形貌特征实验测量结果: (a)未处理试样; (b)SP1; (c)SP2; (d)SP3; (i)SP4; (j) SP5; (k)SP6; 模拟测量结果: (e)未处理试样的 SEM 表面; (f)SP1; (d)SP2; (h) SP3; (l) SP4; (m)SP5; (n)SP6。

如图 4-2 可见, 从宏观层面观察, 试样表面呈现出浅小且均匀分布的弹坑痕迹, 其分布极为匀称。这种表面状态能有效防止因机械加工刀痕导致疲劳裂纹加速产生, 原因是均匀分布的弹坑痕迹可分散应力, 可在材料表面引入残余压应力,

降低应力集中系数，对于一些关键零部件的制造，减少其因疲劳裂纹萌生带来的失效风险，从而提升试样的疲劳寿命和使用性能^[87]。

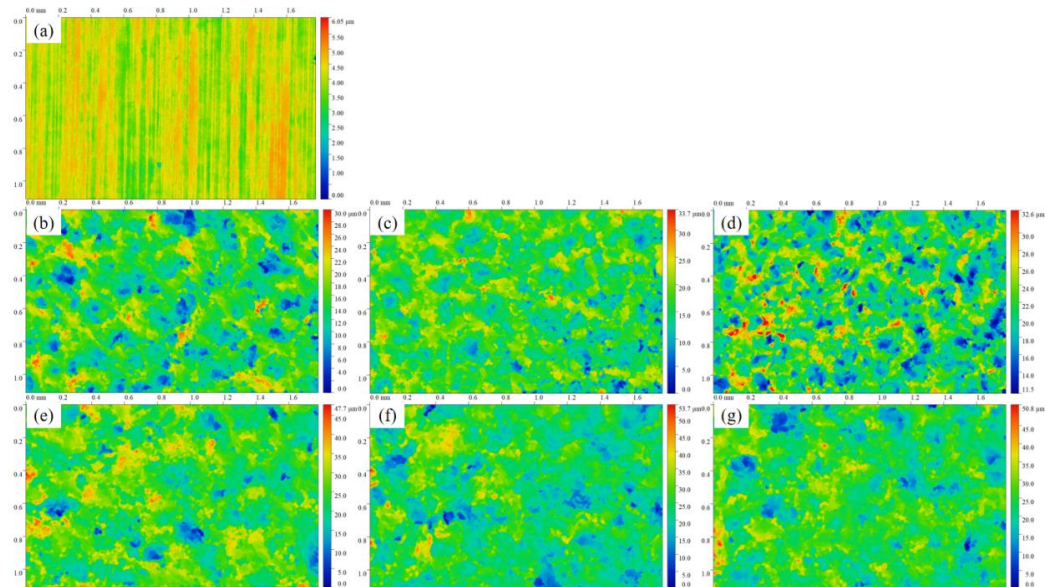


图 4-2 不同工艺表面的 2D 试验线性剖面：(a)未处理试样；(b)SP1；(c)SP2；(d)SP3；(e)SP4，
(f)SP5；(g)SP6。

4.2.2 表面粗糙度

未处理和喷丸试样的不同表面粗糙度参数的平均值如表 4-1 所示。

表 4-1 不同喷丸工艺的粗糙度参数平均值

样品	$R_a(\mu\text{m})$	$R_q(\mu\text{m})$	$R_z(\mu\text{m})$
未经处理件	0.3	0.324	1.344
SP1	1.051	1.297	10.251
SP2	1.415	1.944	8.072
SP3	0.947	1.34	9.484
SP4	1.211	0.608	14.008
SP5	1.218	1.519	16.7322
SP6	0.524	1.491	16.177

表面粗糙度参数为算术平均高度，公式如 4-1。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (4-1)$$

式中：为 l 采样长度， x 为采样点处的轮廓偏移量。

R_q 是均方根的粗糙度，公式如 4-2。

$$R_q = \sqrt{\frac{\int_0^l [f(x)]^2}{l}} \quad (4-2)$$

式中： l 为采样长度， x 为采样点处的轮廓偏移量。

图 4-3 为不同工艺后的表面粗糙度。未经处理的试样表面光滑，未见缺陷。喷丸后，试样表面变得不均匀，在试样表面观察到许多不同大小的凹坑。在相同的喷丸强度条件下，当 SP1 的 45° 增加到 SP2 的 60° 时，表面粗糙度从 $1.051 \mu\text{m}$ 增加到 $1.415 \mu\text{m}$ 。可见，喷丸角度对表面粗糙度有很大的影响。当喷丸强度为 0.1 mmA 和 0.2 mmA ，SP6 比 SP3 弹坑均匀，表面粗糙度分别为 $0.524 \mu\text{m}$ 和 $0.947 \mu\text{m}$ ，比初始状态都有所增加，表面出现严重的塑性变形，导致表面变得更粗糙。这一情况说明，喷丸强度对表面粗糙度影响很大。在特定区间内，提高喷丸强度，可有效降低零件表面粗糙度。随着表面粗糙度下降，表面质量明显提高。较低的表面粗糙度表明零件表面更光滑、平整，对材料的性能和使用寿命有积极作用。

在其他相同条件下，当喷丸角度为 60° 时，其表面粗糙度大于 45° 和 90° 时的表面粗糙度。因为随着喷丸角的增加，弹丸速度的法向分量减小，导致冲击力减少，陨石坑变浅。

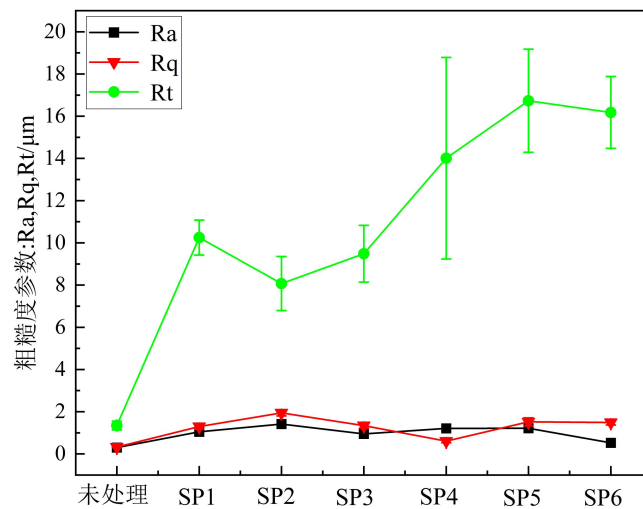


图 4-3 不同工艺处理后的表面粗糙度

4.3 横截面微观组织形貌

图 4-4 为的是在不同喷丸压力条件下，7B50 铝合金经喷丸处理后的横截面微观形貌特征。其中，图 4-4(a)展示的是未经喷丸处理的试样横截面形貌。其截面靠近表面边缘区域，轮廓线平滑。晶界清晰可辨，形态较为规整且趋近于直线状态。

在图 4-4(b)-(d)铝合金的表层，分别形成厚度为 $7\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$ 以及 $9\mu\text{m}$ 的塑性变形层。而图 4-4(e-g)则是当喷丸压力提升至 0.2MPa 时的情形。合金表面的塑性变形程度以及晶粒细化程度均显著提高，塑性变形层的厚度分别达到 $9\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ 。喷丸压力的提高直接作用于弹丸冲击动力学特性，其速度与冲击力的协同增强显著改变材料的微观响应机制。弹丸高速撞击合金表面后，能量通过接触界面诱发表层晶粒的塑性流动，并在应力波传播作用下向内部扩散，形成由高密度位错主导的晶粒细化区。随喷丸压力提升，细化层深度与晶粒尺寸梯度分布特征更加显著，如图 4-4(e)-(g)。截面形貌分析显示，高能冲击导致材料边缘轮廓出现非均匀畸变，表面起伏幅度随压力增加而加剧，其形貌演化规律与表面粗糙度参数的实验测试结果高度吻合。

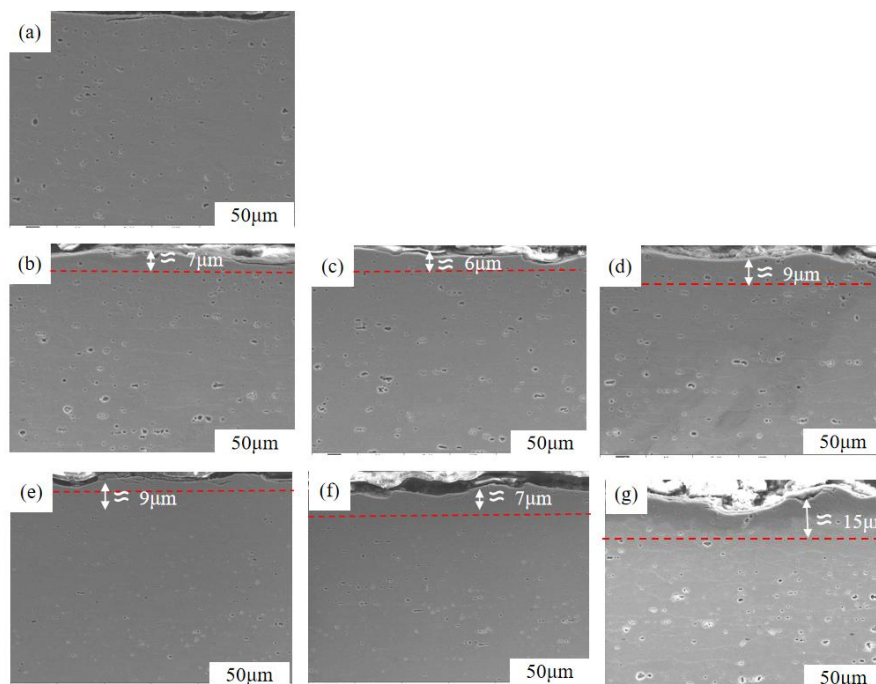


图 4-4 不同喷丸参数横截面微观形貌：(a)未处理试样；(b)SP1；(c)SP2；(d) SP3；(e)SP4；(f)SP5；(g)SP6。

4.4 硬度分布

对 7B50 铝合金喷丸强化工件硬化层厚度的影响如图 4-5 所示。对于未处理的部件，材料的近表面与内部之间的硬度基本相同，平均硬度约为 179.13HV。由于塑性变形和由此产生的微观结构细化和残余应力，喷丸处理增加近表面材料的硬度。0.1mmA、45°喷丸样品的表面硬度为 221.5HV，比未处理材料高 23.65%，经 60°喷丸角度处理后，样品的表面硬度为 213.53HV，比未处理材料高 19.2%。与 45°喷丸处理和 60°喷丸处理相比，90°的喷丸角度处理可以进一步提高近表面材料的硬度。在恒定的喷丸角度为 90°的情况下，SP3 和 SP6 的表面硬度具有可比性，后者的表面测量值约为 233HV。

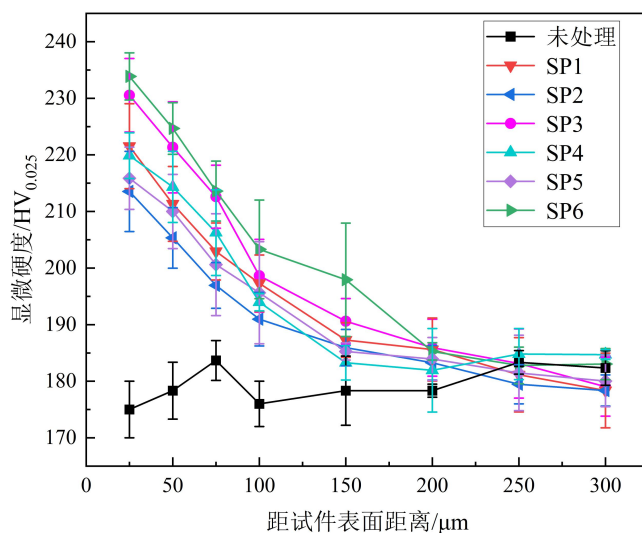


图 4-5 不同喷丸工艺的显微硬度分布图

4.5 残余应力分布

图 4-6 为 7B50 铝合金在不同工艺试验条件下的残余应力分布情况。经观察发现，未经处理的试样所引入的表面压应力接近 ± 20 MPa。采用不同喷丸强度的铸钢进行喷丸处理后，试样表面均出现残余压缩应力。在经过不同工艺处理的试样喷丸表面附近，引入较大的残余应力，并呈现出勺式残余应力场。随着深度的增加，残余压应力呈现出先增大后减小的趋势，在材料内部较深位置逐渐向残余拉应力过渡。

在相同 90°入射角条件下，喷丸强度 0.02 mmA 比 0.1 mmA 的表面残余应力增加 43.913 MPa，最大残余应力为 481.235 MPa，最大残余应力层深度为 10

0 μm ，为屈服强度的 89.79%。在相同的 0.2 mmA 喷丸强度条件下，随着入射角从 45° 增加到 60° ，表面残余应力减小，最大残余应力增大。

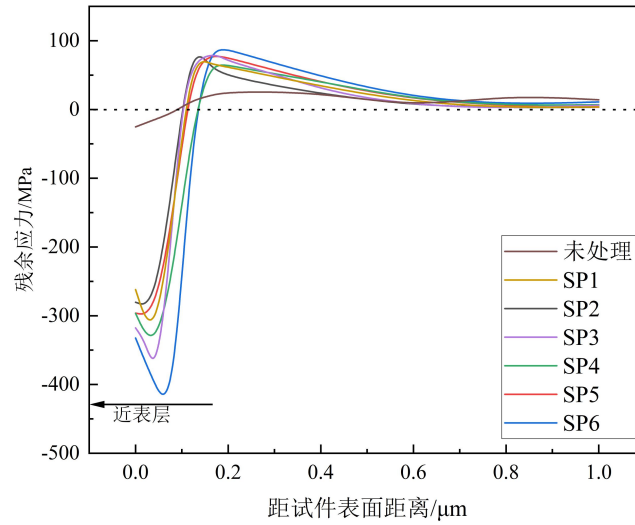


图 4-6 不同喷丸工艺模拟结果的残余应力分布

图 4-7 为 9 组实验结果的残余应力曲线。可看到，未处理试样内存在被引入其中的表面压应力。此表面压应力的产生，可能因为在材料的制备和加工过程中，其不可避免地会受到各类外力的作用以及环境因素的干扰。

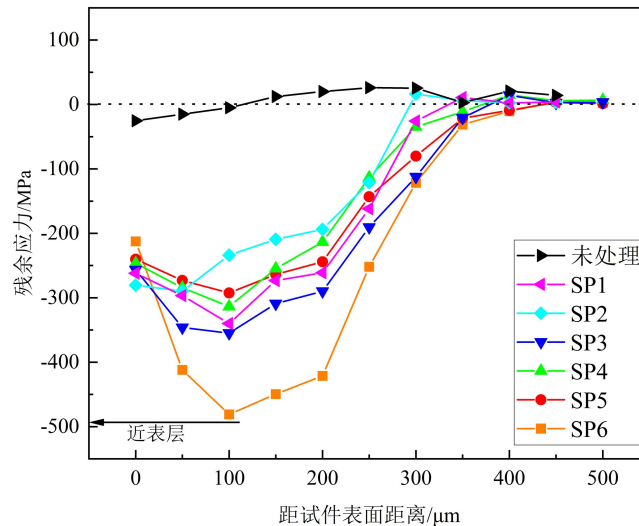


图 4-7 实验结果的残余应力分布图

对比图 4-6 和图 4-79 组实验与仿真的残余应力分布曲线。可观察到，未喷丸处理试样的表面残余应力在实验与仿真中均呈现中性状态，实验测得应力值围绕零值附近波动（-23~+23 MPa），与仿真结果（-15~+20 MPa）高度吻合。对于最优参数组合 SP6（0.2 mmA， 90° ），仿真预测 SP6 的最大表面残余压应力

为 448MPa，与实验测得峰值 481MPa 的差异仅为 33MPa，相对误差为 6.86%，表明仿真模型能够精确表征高喷丸强度下的残余应力分布规律。原因是实际弹丸分布不均造成的实验随机性和检测点位置不固定，会准确地影响精度和稳定性的结果，以及残余应力测量技术的局限性和误差。

4.6 本章小结

本文研究未经喷丸处理和不同喷丸工艺处理的 7B50 铝合金的表面完整性和疲劳性能，采用两种喷丸强度和三种喷丸入射角度。结合本研究得到的实验结果和相应的分析，可得出以下结论：

(1)喷丸处理引起的表面塑性变形导致表面附近微观结构发生变化喷丸强化细化材料表面晶粒并增加表面粗糙度。与未处理的试样相比，在相同的 90°的喷丸角度条件下，0.1 mmA 和 0.2 mmA 强度的试样喷丸处理后的 R_a 值分别增加 209.78%和 74%。

(2)喷丸可使 7B50 铝合金表面产生一定程度的塑性变形，细化晶粒,提高硬度,采用两种强度及 90°的喷丸角度情况下，喷丸强化处理的试样分别产生厚度为 89 μm 和 110 μm 的加工硬化层。通过喷丸强化后的表面区域产生有益效果的残余压应力层 210 μm 。受影响区域的深度为 45 μm ，最大残余应力值为 449 MPa。

(3)经 0.1 mmA 和 0.2 mmA 的喷丸强度处理，随喷丸角度从 45°升至 90°，最大压缩残余应力值出现先减少后显著增加的情况，并在 90°的喷丸角度时，得到的最大压缩残余应力值为 481 MPa。可知喷丸角度对残余应力值有着重要的影响。

第 5 章 喷丸强化后 7B50 铝合金的疲劳性能研究

5.1 引言

在材料科学范畴内，材料的表面状态对其力学性能具有决定性影响，特别是材料的疲劳性能，在很大程度上受制于表面状态。在本项研究中，由第 4 章所作针对常规机械喷丸处理对 7B50 铝合金所引发的表面改性特征展开剖析。尽管喷丸强化技术在提高铝合金疲劳性能方面取得成果，但针对 7B50 铝合金其特定材料，喷丸强化后其疲劳性能的具体变化规律，以及喷丸参数与疲劳性能之间的内在关联，仍存在诸多尚未明确的问题。对不同的喷丸强度以及入射角度，如何相互作用并影响 7B50 铝合金的疲劳行为，还需要进一步研究。本章针对不同喷丸强度及入射角度对 7B50 铝合金表面强化处理后低周疲劳性能的影响，旨在进一步阐述表面塑性强化作用下 7B50 铝合金低周疲劳的损伤机理并在不同喷丸强度以及入射角度中找到能够有效改善 7B50 铝合金的疲劳寿命的最优喷丸参数。

5.2 喷丸强化后 7B50 铝合金低周疲劳断口形貌分析

5.2.1 0.1mmA 喷丸强化后疲劳断口形貌分析

本文选取固定载荷应力振幅 300 MPa，应力比 0.1，频率 40HZ。并对 0.1 mmA 喷丸强度，不同入射角度处理后的断裂面进行比较分析。用扫描电子显微镜拍摄 7B50 铝合金的未喷丸和喷丸强化试样的疲劳断裂断口的断裂形态，可以发现，所有试样的宏观疲劳断裂断口形貌均呈现典型的 3 个区域：疲劳源区、疲劳扩展区、瞬断区。

图 5-1 为 7B50 铝合金低周疲劳（ $\sigma_a=300$ MPa， 5.7445×10^4 周次）未处理试样的断口形貌图。如图 5-1(a)所示，裂纹源位于试样表面，稳定裂纹扩展区存在明暗相间的“河流花样”，而内部的瞬断区则显得粗糙不平。导致这种特征产生的主要原因是：当疲劳裂纹扩展到后期，剩余的材料无法承受循环往复的载荷，导致材料直接撕裂。此外，图中清晰可见放射状棱线从裂纹源区指向裂纹扩展区，裂纹扩展的方向是从试样表面指向内部。

为进一步探究表面疲劳裂纹的萌生原因，本文对疲劳裂纹源进行放大观察，如图 5-1(b)。可发现，其区域与稳定裂纹扩展区有明显的界限，此区域显得较为光亮但粗糙，且遍布放射状撕裂棱。因为疲劳裂纹在不同晶粒内生成和扩展的过程中，相邻晶粒内的疲劳裂纹在扩展过程中，由于晶体取向和晶界的原因，在汇合时会导致不同断裂面相互交错形成台阶，最终形成撕裂棱^[88]。对裂纹源的 II 区域研究，如图 5-1(d)，发现在裂纹源附近存在韧窝，其缺陷附近伴随着高低不平的粗糙撕裂棱，表明疲劳裂纹是在试样表面缺陷处萌生^[89]。

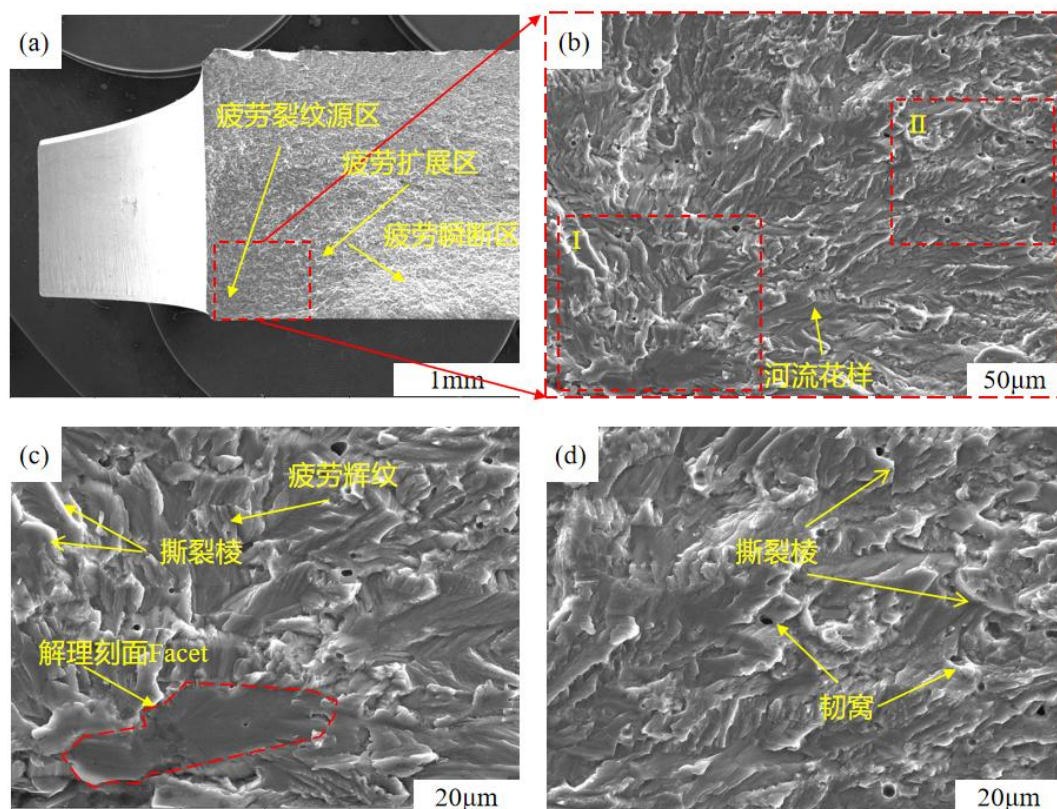


图 5-1 7B50 铝合金的未处理试样的 SEM 断裂面形貌图

对图 5-2 所示的 SP1（喷丸强度为 0.1 mmA，入射角度为 45°）喷丸处理试件的低周疲劳断口形貌展开观察（ $\sigma_a=300$ MPa， 5.5712×10^4 周次），图 5-2(a)能够发现，裂纹源仍位于表面，但稳定扩展区“河流花样”间距增大，表明喷丸引入的残余压应力减缓裂纹扩展速率。瞬断区面积缩小，韧性断裂占比略有提升。图 5-2(b)为裂纹源区，与未处理试样相比，撕裂棱密度降低，韧窝数量增加。喷丸处理部分弥补表面缺陷，但入射角度 45°导致残余压应力分布不均，未能完全抑制裂纹萌生。当进一步放大裂纹源内的 I 区域进行仔细观察，图 5-2(c)为扩展区微观形貌稳定扩展区解理刻面减少，出现细小韧窝和弯曲裂纹路径，反映喷丸处

理后晶粒细化^[90], 裂纹扩展需绕过强化区域, 消耗更多能量。可以看到靠近试样表面分布着尺寸不同的撕裂棱。图 5-2(d)为瞬断区, 仍以解理断裂为主, 但刻面尺寸减小, 局部可见撕裂棱与韧窝交错, 表明残余压应力虽延缓扩展, 但未改变最终断裂模式。

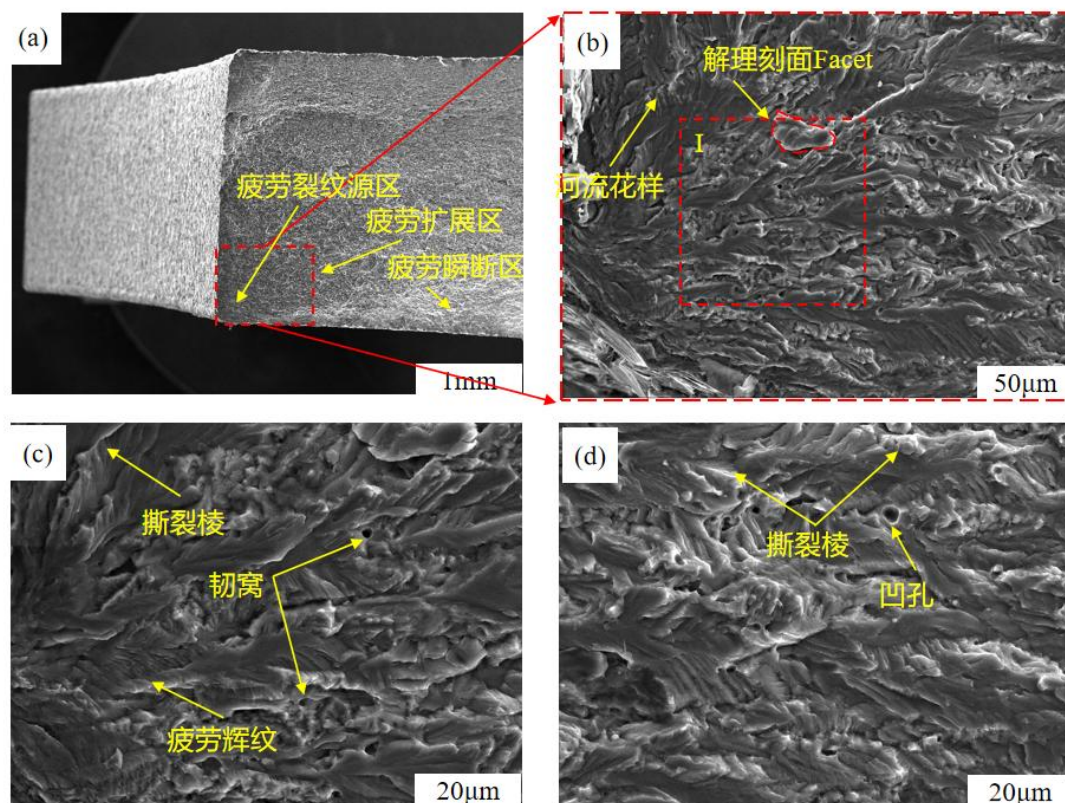


图 5-2 7B50 铝合金的 SP1(0.1 mmA, 45°)试样的 SEM 断裂面形貌图: 图(c)为图(b)中疲劳源 I 的放大图, 图(d)为瞬断区放大图。

如图 5-3 所示, 为 SP2 (喷丸强度为 0.1 mmA, 入射角度为 60°) 喷丸处理试件的低周疲劳断口形貌展开观察 ($\sigma_a=300$ MPa, 4.988×10^4 周次), 从图 5-3(a)能够发现裂纹源位于试样表面, 扩展区以大面积解理刻面为主, 表明断裂模式^[91]以脆性解理主导。与未处理试样(图 5-1(a))相比, 放射状棱线分布密集且方向紊乱, 反映裂纹扩展路径受喷丸残余应力场和晶粒取向的双重影响。值得注意的是, 喷丸处理未能有效覆盖表面缺陷(如加工划痕或微孔洞), 入射角度 60°导致弹丸倾斜撞击, 表面塑性变形层分布不均, 部分区域残余拉应力残留, 加剧了裂纹源处的应力集中。其参数组合的疲劳寿命显著低于未处理试样, 验证不当喷丸参数可能劣化材料性能。

图 5-3(b)为裂纹源区的高倍放大图像, 显示裂纹萌生于表面缺陷处。源区呈

现大尺寸解理刻面，刻面边缘平直且呈阶梯状排列，符合典型解理断裂特征。刻面尺寸显著大于未处理试样，说明入射角度 60° 导致喷丸能量集中于局部区域，残余压应力分布不均，未能有效抑制晶粒解理。表面缺陷处可见少量浅韧窝，但整体塑性变形能力受限，表明残余压应力虽部分缓解应力集中，但入射角度不当仍使裂纹优先在薄弱区域萌生。其揭示低强度(0.1 mmA)与高角度(60°)的协同负效应，喷丸能量不足以覆盖表面缺陷，反而因倾斜撞击引发局部损伤。

图 5-3(c)为图 5-3(b)的进一步放大，聚焦裂纹源I区的微观形貌。刻面边缘存在放射状撕裂棱，撕裂棱由相邻晶粒内裂纹扩展方向不一致引起，晶界阻碍导致断裂面错位。裂纹源附近见细小韧窝，但数量稀少且深度较浅，说明局部塑性变形能力有限，断裂仍以脆性模式主导。图 5-3(d)为瞬断区的高倍形貌，该区域呈现大范围解理台阶与少量浅韧窝^[92]共存的特征。SP2 试样的瞬断区形貌反映喷丸强度不足(0.1mmA)与入射角度失配(60°)的协同负面影响。表面强化效果有限，残余应力分布不均，最终引发以解理主导的脆性断裂模式。

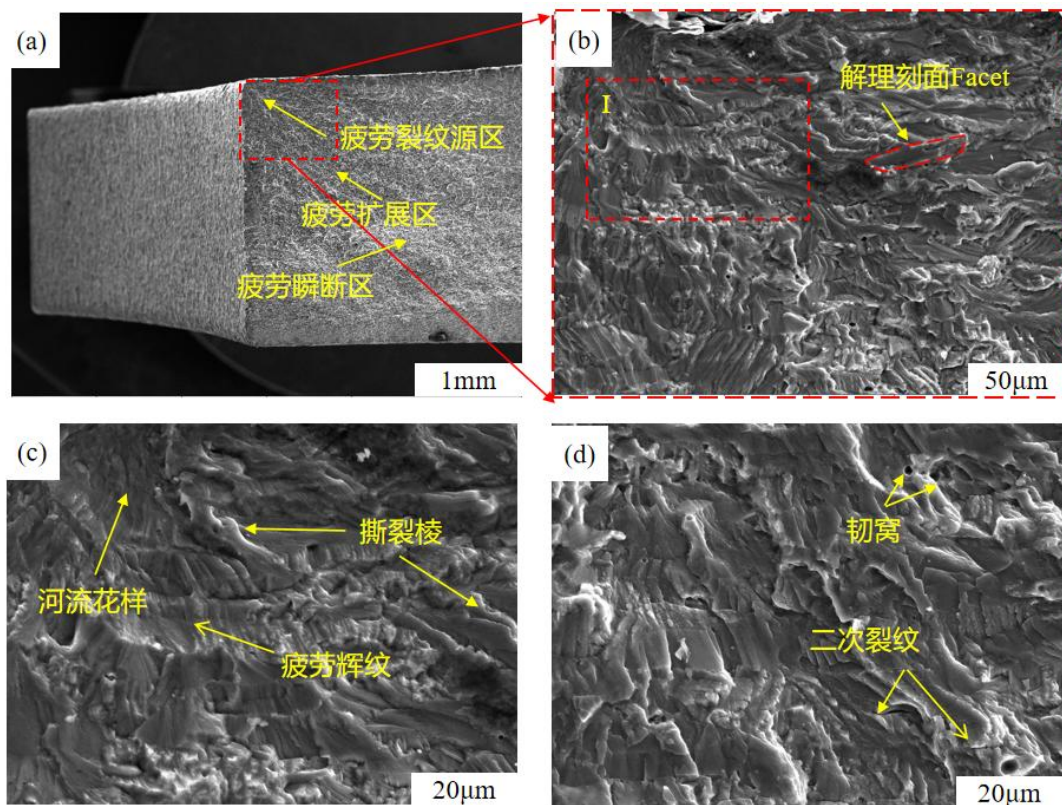


图 5-3 7B50 铝合金的 SP2(0.1 mmA, 60°)试样的 SEM 断裂面形貌图：图(c)为图(b)中疲劳源 I 的放大图，图(d)为瞬断区放大图。

图 5-4 为 SP3 (喷丸强度为 0.1 mmA, 入射角度为 90°)喷丸处理 7B50 铝合

金低周疲劳断口形貌图，疲劳寿命为 6.1626×10^4 周次。图 5-4(a) 同样清楚地观察到明亮的疲劳裂纹源区以及周围的放射性撕裂棱。裂纹源仍位于表面，但稳定扩展区韧窝密集，解理刻面尺寸显著减小。垂直入射角度(90°)使残余压应力均匀分布，有效抑制裂纹萌生。

图 5-4(b) 同样清楚地观察到表面缺陷被喷丸塑性变形层覆盖，裂纹源区韧窝增多，撕裂棱细密，表明喷丸处理提升表面抗裂纹萌生能力。图 5-4(c) 扩展区微观形貌裂纹扩展路径迂曲，韧窝与细小解理刻面交替分布，反映晶粒细化和残余压应力协同作用，使裂纹频繁改变方向。图 5-4(d) 瞬断区解理刻面占比降低，韧窝与撕裂棱共存，说明喷丸处理虽未改变断裂模式，但显著提升材料韧性。

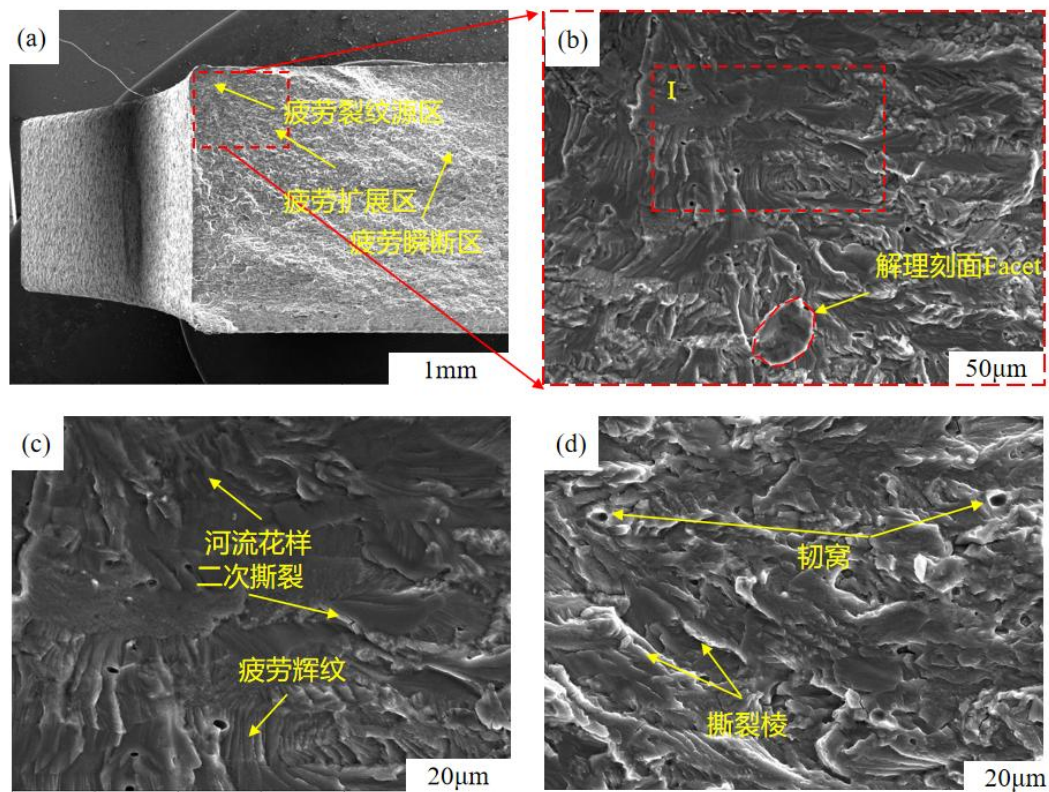


图 5-4 7B50 铝合金的 SP3(0.1 mmA, 90°) 试样的 SEM 断裂面形貌图：图(c)为图(b)中疲劳源 I 的放大图，图(d)为瞬断区放大图。

5.2.2 0.2mmA 喷丸强化后疲劳断口形貌分析

本研究在恒定载荷条件下设定应力幅值为 300 MPa，采用应力比 0.1、加载频率 40 Hz 的循环载荷参数，对经 0.2 mmA 喷丸强度不同入射角工艺处理的试样开展断口形貌对比分析。通过显微观察并研究了喷丸入射角变化对其疲劳断裂机制的影响规律。

图 5-5 为 SP4（喷丸强度为 0.2 mmA，入射角度为 45°）喷丸处理 7B50 铝合金低周疲劳断口形貌图，疲劳寿命 6.0121×10^4 周次。图 5-5(a) 为整体断口形貌，裂纹源区解理刻面减少，稳定扩展区韧窝分布均匀，喷丸强度提升(0.2 mmA)增强了表面塑性变形层厚度，但 45° 的入射角度限制应力均匀性。

图 5-5(b) 裂纹源放大图，其表面缺陷被部分消除，韧窝尺寸减小且分布密集，表明高喷丸强度有效缓解应力集中，但入射角度仍导致局部残余拉应力残留。图 5-5(c) 为扩展区图裂纹扩展路径呈波浪形，韧窝与解理刻面交替出现，反映高喷丸强度下晶粒细化效果显著，但角度参数未达最优。图 5-5(d) 为 SP3 的瞬断区，其解理刻面尺寸小于未处理试样，局部韧窝增多，说明喷丸强度提升对改善韧性断裂有积极作用。

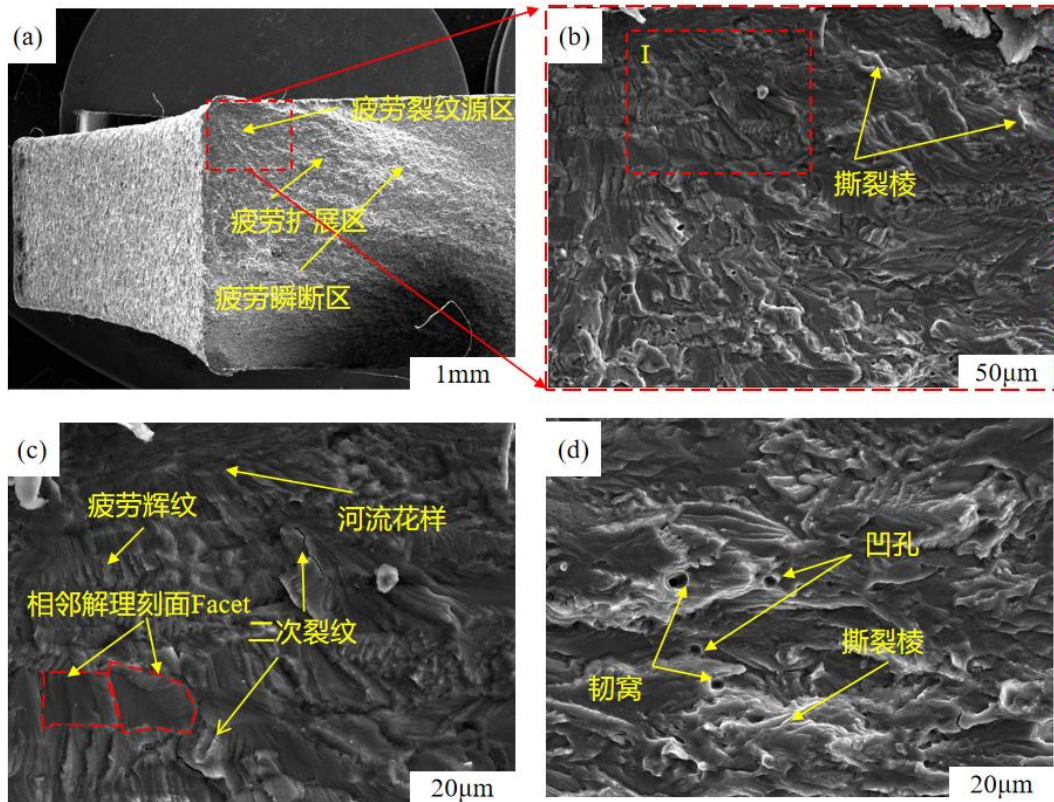


图 5-5 7B50 铝合金的 SP4(0.2 mmA, 45°)试样的 SEM 断裂面形貌图：图(c)为图(b)中疲劳源 I 的放大图，图(d)为瞬断区放大图。

图 5-6 为 SP5（喷丸强度为 0.2 mmA，入射角度为 60°）喷丸处理 7B50 铝合金低周疲劳断口形貌图，疲劳寿命为 5.8096×10^4 周次。由图 5-6(a) 整体断口可知，裂纹源区解理刻面密集，扩展区放射状棱线紊乱，高喷丸强度与 60° 入射角度叠加导致局部过喷，晶界弱化加速断裂。

图 5-6(b)为裂纹源区图，表面出现多重裂纹源 I，解理刻面尺寸增大，表明残余拉应力集中区域增多，疲劳寿命显著降低。图 5-6(c)为 SP5 的扩展区微观形貌，裂纹路径平直，解理刻面占据主导，仅局部区域存在细小韧窝，说明喷丸能量集中于表面，未能有效改善内部晶粒抗解理能力。图 5-6(d)为 SP5 的瞬断区特征，瞬断区呈现大范围解理台阶，韧窝极少，断裂模式完全脆性化，参数组合不当导致性能严重劣化。

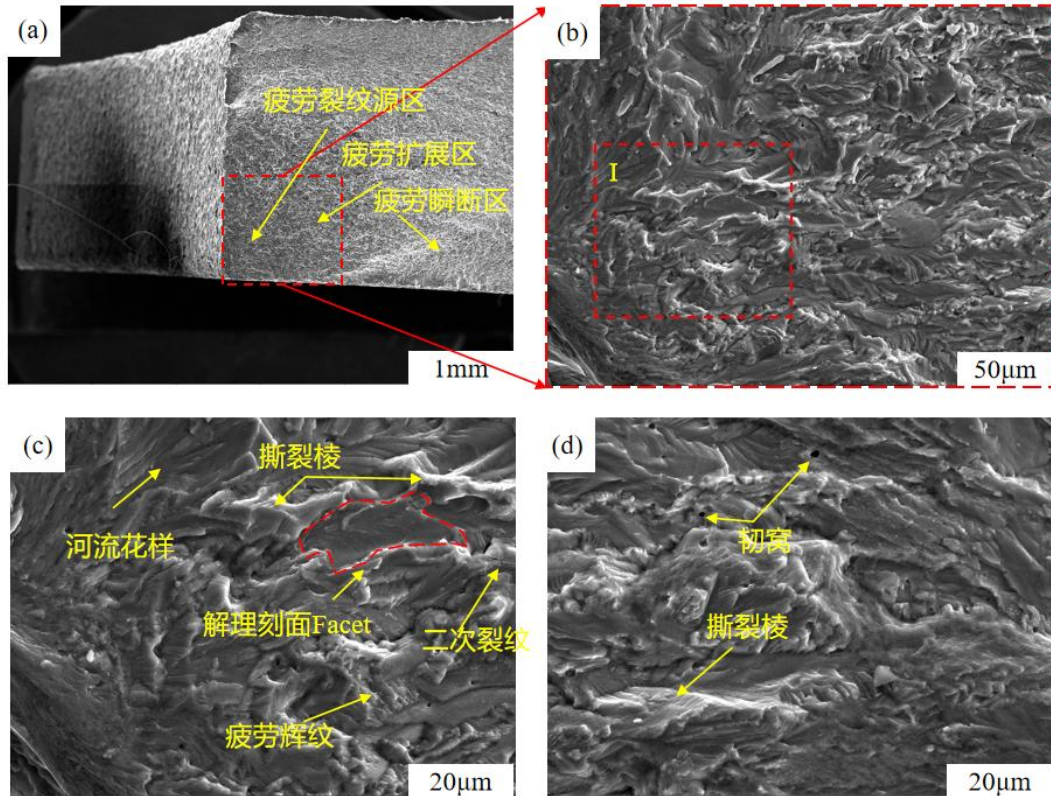


图 5-6 7B50 铝合金的 SP5(0.2 mmA, 60°)试样的 SEM 断裂面形貌图：图(c)为图(b)中疲劳源 I 的放大图，图(d)为瞬断区放大图。

图 5-7(a)为喷丸参数为 0.2 mmA, 90°入射角度的试样整体断口形貌。裂纹源区解理刻面最小，稳定扩展区韧窝密集，疲劳寿命最优（ 6.4392×10^4 周次）。垂直入射角度与高强度协同作用，残余压应力均匀分布，显著延缓裂纹扩展。

对裂纹源区放大观察，如图 5-7(b)所示，裂纹源 I 区韧窝密集，解理刻面边缘圆滑，表明喷丸完全覆盖表面缺陷，应力集中显著缓解。图 5-7(c)为图 5-7(b)疲劳源 I 微观形貌，裂纹源 I 区韧窝密集，解理刻面边缘圆滑，表明喷丸完全覆盖表面缺陷，应力集中显著缓解。

图 5-7(d)为图 5-7(b)中 II 区的形貌，由于喷丸处理导致的晶粒细化和残余压

应力场迫使裂纹频繁改变方向，绕过强化晶粒或沿晶界分叉，延缓扩展速率。在局部高应力集中区域，仍可观察到少量解理刻面。说明喷丸处理虽未完全消除脆性断裂，但通过塑性变形层显著提升材料的抗解理能力。扩展区未发现明显的放射状二次裂纹现象，说明垂直入射角度(90°)和高喷丸强度(0.2 mmA)协同作用，抑制晶界弱化效应，残余压应力分布均匀，降低沿晶断裂风险。

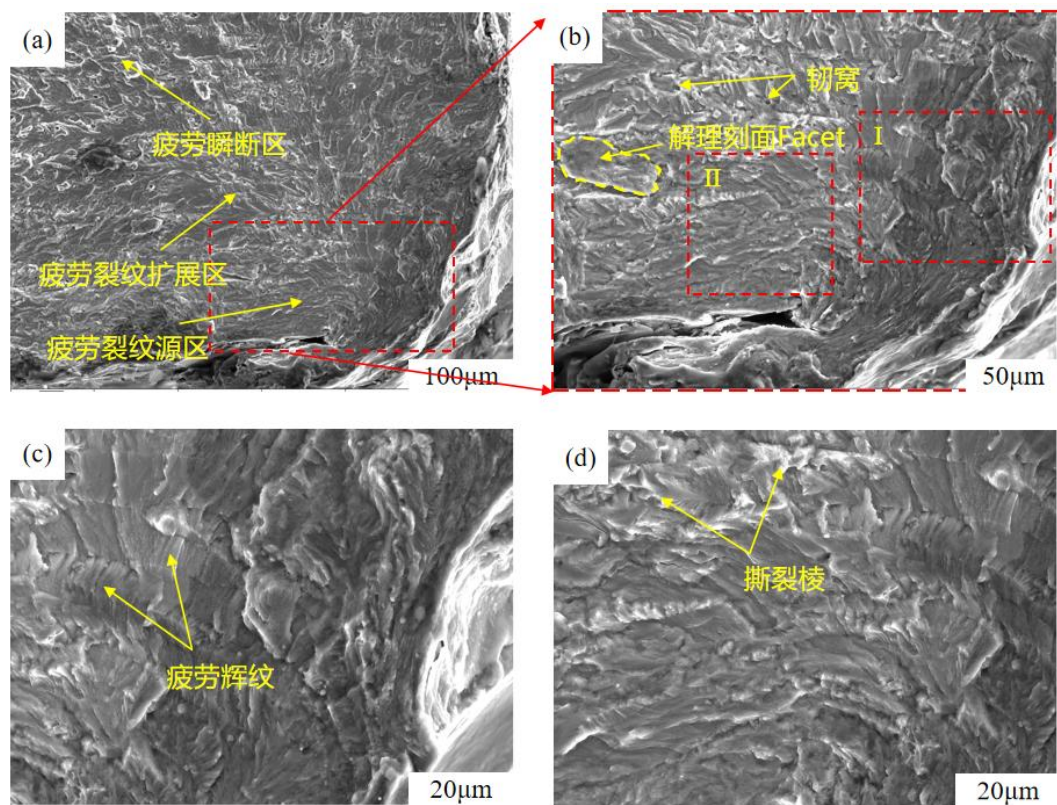


图 5-7 7B50 铝合金的 SP6(0.2 mmA , 90°)试样的 SEM 断裂面形貌图：图(c)为图(b)中疲劳源 I 的放大图，图(d)为图(b)中疲劳源 II 的放大图。

5.3 结果分析

通过系统分析未处理及不同喷丸参数下 7B50 铝合金试样的疲劳断口形貌，揭示了喷丸参数对疲劳性能的调控机制。

5.3.1 入射角度对疲劳性能的影响

入射角度是调控喷丸强化效果的关键参数，显著影响残余应力分布均匀性及裂纹萌生与扩展行为。研究表明，垂直入射角度(90°)通过弹丸垂直撞击试样表面，使塑性变形层和残余压应力均匀覆盖表面缺陷（如加工划痕、微孔洞），有效抑制裂纹萌生。同时，均匀的残余压应力场迫使裂纹扩展路径迂曲，显著增

加扩展能耗，从而提升疲劳寿命。相比之下，倾斜入射角度(45° 、 60°)导致残余应力分布不均，局部区域残留拉应力，加剧应力集中。SP2 试样(0.1 mmA ， 60°)因弹丸倾斜撞击，表面缺陷未被完全覆盖，裂纹优先在薄弱区域萌生，疲劳寿命甚至低于未处理试样。SP5 试样(0.2 mmA ， 60°)因局部过喷引发晶界弱化，进一步加速裂纹扩展，验证入射角度对疲劳性能的敏感性。

5.3.2 喷丸强度对疲劳性能的影响

喷丸强度直接决定表面塑性变形层厚度和晶粒细化程度，是提升材料抗疲劳性能的另一核心因素。SP6 试样(0.2 mmA ， 90°)为最优参数组合。而低喷丸强度(0.1 mmA)因能量不足，无法有效消除表面缺陷（如 SP2 试样表面残留划痕），且塑性变形层较薄，残余压应力分布深度有限，导致裂纹萌生抗力不足。值得注意的是，喷丸强度需与入射角度协同优化。SP5 试样(0.2 mmA ， 60°)虽强度较高，但因入射角度不当引发局部过喷，晶界弱化反而劣化性能，表明强度提升需配合合理角度方能实现强化效果最大化。

5.4 本章小结

本章研究不同喷丸强度和入射角度下机械喷丸处理 7B50 铝合金的低周疲劳性能，以前一章的表面特征为基础，进一步研究喷丸处理的试件断裂形貌微观特征。得主要研究结论如下：

(1) 表面塑性强化处理试样的疲劳裂纹源均位于试样表面。对于本文研究的 6 种表面强化塑性工艺，喷丸强度为 0.2 mmA ，入射角度 90° 的试样的低周疲劳性能强于其它喷丸强度的试样。

(2) 当喷丸强度为 0.2 mmA ，入射角度为 90° 时，机械喷丸处理试样的低周性能改善效果最好。但喷丸强度为 0.2 mmA ，入射角度为 45° 和 60° 时，机械喷丸处理试样的低周疲劳性能仍优于未处理试样。

(3) 表面塑性强化处理没有改变 7B50 铝合金低周疲劳的断裂模式，试样的疲劳断口仍呈现解理断裂和韧性断裂混合断裂模式。不同喷丸强度和表面塑性强化处理工艺在试样内部产生的残余拉应力不同，导致试样裂纹源内部解理刻面 facet 的尺寸产生差别。

第 6 章 结论与展望

6.1 全文总结

在实际服役过程中，铝合金零部件往往承受着复杂的交变载荷作用，疲劳失效成为限制其使用寿命和可靠性的关键因素。疲劳破坏通常起始于零件表面的微小缺陷或应力集中区域，这些部位在交变载荷循环作用下逐渐形成裂纹，并不断扩展直至零件发生断裂。对于 7B50 铝合金零部件而言，疲劳失效不仅可能导致设备故障，还可能引发严重的安全事故，在航空航天等关键领域尤其如此。因此，为使喷丸强化参数设计更加合理，符合实际工况要求，深入研究如何提高 7B50 铝合金的疲劳性能，对于保障零部件的长期稳定运行和安全性具有极其重要的现实意义。

本研究以喷丸工艺参数（喷丸强度、入射角）为变量，系统研究其对 7B50 铝合金表面完整性（粗糙度、微观组织、硬度）及低周疲劳性能的影响。通过实验验证与理论建模，揭示了喷丸参数对硬化层深度、残余应力场分布及疲劳裂纹萌生抗力的调控规律。构建喷丸强化模型，运用数值模拟手段获取模拟表面的粗糙度和残余应力分布数据，并与实验数据进行对比研究。并对喷丸工艺处理后疲劳性能的进行分析，研究 7B50 铝合金材料在不同喷丸强度和入射角度喷丸处理后疲劳断裂形貌。得到以下结论：

(1) 随着喷丸强度增加，表面残余压应力层深度显著提高（最大达 $100\ \mu\text{m}$ ），但过小的喷丸角度（如 45° 和 60° ）会导致表面粗糙度（ R_a 值）急剧增大，同时引发局部微裂纹，影响表面均匀性。当入射角度为 90° （垂直喷丸）时，表面塑性变形更均匀，残余压应力分布最优。非垂直角度（如 45° 和 60° ）则因切向分力导致表层晶粒取向偏转，位错密度分布呈现各向异性，影响疲劳裂纹萌生抗性。

(2) 喷丸强度为 $0.2\ \text{mmA}$ 、入射角度 90° 时，试样疲劳寿命较未喷丸试样提升，主要归因于高梯度残余压应力场抑制裂纹萌生，并通过细化表层晶粒延缓裂纹扩展。

(3) 喷丸强度与入射角度需协同优化，低强度($0.1\ \text{mmA}$)结合非垂直角度时，

表面粗糙度虽低，但残余压应力层浅薄，疲劳性能提升有限。高强度(0.2 mmA)垂直喷丸虽显著增强疲劳抗力，但需权衡表面损伤风险。

6.2 展望

本文对不同喷丸强度和入射角度喷丸强化后的表面进行内流场分析及多场耦合分析，并对数值模拟结果进行试验验证。针对喷丸后的铝合金材料研究，有待深入研究的地方众多，主要集中在以下几个方面：

(1) 可结合分子动力学(Molecular Dynamics, MD)模拟喷丸过程中弹丸与材料表面的原子级碰撞行为，揭示位错形核、滑移带形成的初始机制。通过晶体塑性有限元(Crystal Plasticity Finite Element Method, CPFEM)模拟介观尺度晶粒变形与应力集中演化，建立微观位错密度与宏观残余应力分布的定量映射关系。

(2) 本文的研究仅基于静态疲劳测试，其对相关现象和规律进行一定探索。然而，实际应用场景往往更为复杂严苛。未来研究可着重探究喷丸强化试样在腐蚀-疲劳、高温-疲劳等多场耦合环境下的性能退化机制。在航空航天领域，零部件常处于极端工况，多场耦合作用会加速材料性能退化。研究其机制，能深入了解材料在复杂条件下的失效过程，为航空航天等极端工况应用提供全面且可靠的数据支撑。

参考文献

- [1] 方杰, 陈平, 高攀, 等. 2024 铝合金喷丸残余应力松弛规律研究[J]. 机械强度, 2022, 44(4): 808-812.
- [2] 吴吉展, 朱才朝, 魏沛堂, 等. 航空齿轮钢强化工艺与表面完整性关联规律研究[J]. 表面技术, 2024, 53(01): 153-168.
- [3] 翟傲霜, 黄啸, 王欣, 等. 基于位错密度理论的喷丸强化诱导 7050 铝合金组织细化数值模拟[J]. 中国表面工程, 2023, 36(2): 114-124.
- [4] 秦真波, 吴忠, 胡文彬. 表面工程技术的应用及其研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2192-2216.
- [5] 孙一帆, 胡国杰, 刘梦金, 等. 喷丸强化对 2024 铝合金/钛合金铆接件微动疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 381-393.
- [6] 李开发, 王成, 汪森辉, 等. 表面形貌对 TC4 钛合金喷丸强化效果的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(4): 89-96.
- [7] 张明杰, 黄利军, 李恒正, 等. 基于有限元仿真的钛合金翼形件锻造过程[J]. 锻压技术, 2016, 41(11): 32-38.
- [8] 陈地发, 刘怀举, 张秀华, 林勤杰, 潘江松. 18CrNiMo7-6 齿轮弯曲疲劳强度影响因素试验研究[J]. 机械工程学报, 1-11.
- [9] 刘明霞, 王冬, 张文康, 等. 喷丸强化对 17-4PH 不锈钢室温及高温疲劳性能的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22124-22129.
- [10] 何国旗, 吴旭, 谢远昊, 等. 喷丸角度对螺旋锥齿轮轮齿残余应力分布的影响[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(02): 112-120.
- [11] Su K, Zhang J, Cui G, et al. Effects of sealing and prior shot peening treatments on fatigue behavior of sulphuric acid anodic oxidation coated 6082-T6 aluminium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 183108251.
- [12] Madariaga A, Vázquez E, Foster D, et al. Depth-resolved mechanical behaviour of shot peened 7050-T7451 aluminium surfaces using in-situ synchrotron X-ray diffraction[J]. Materials Science & Engineering A, 2024, 909146817-146817.

-
- [13]吴明阳, 侯德新, 吴石, 等. 基于有限元仿真的钛合金喷丸技术应用综述[J]. 工具技术, 2024, 58(08): 3-8.
- [14]Ludian T, Wagner L. Effect of age-hardening conditions on high-cycle fatigue performance of mechanically surface treated Al 2024[J].Materials Science & Engineering A, 2006, 468210-213.
- [15]Benedetti M, Fontanari V, Scardi P, et al.Reverse bending fatigue of shot peened 7075-T651 aluminium alloy: The role of residual stress relaxation[J].International Journal of Fatigue, 2008, 31(8): 1225-1236.
- [16]Zielecki, Władysław, Trzepieciński, et al.Load capacity of single-lap adhesive joints made of 2024-T3 aluminium alloy sheets after shot peening[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, (prepublish): 1-16.
- [17]Zhang J, Lu S, Wu T, et al.An evaluation on SP surface property by means of combined FEM-DEM shot dynamics simulation[J].Advances in Engineering Software, 2018, 115283-296.
- [18]Gariépy A, Larose S, Perron C, et al.Shot peening and peen forming finite element modelling – Towards a quantitative method[J].International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(20): 2859-2877.
- [19]Korkmaz S, CetinH M, SimsirH, et al.Effect of Shot-Peening Process and Nanoparticle-Added Lubricant on the Tribological Performance of Aluminium-Based Sliding Bearing Material[J].Lubrication Science, 2024, 36(8): 621-644.
- [20]Kowalczyk A, Pura J, Sotniczuk A, et al.Effect of bulk and surface mechanical treatments on the tribological properties of Ti-13Nb-13Zr alloy for biomedical applications[J].Tribology International, 2025, 206110605-110605.
- [21]Negahban A, Shamsi M, Sedighi M. In vitro corrosion behavior of Magnesium/2.5%HA biocomposites under different shot peening parameters[J].Materials Chemistry and Physics ,2025, 334130493-130493.

- [22]李丹阳, 殷凤仕, 王晓明, 等.镍基高温合金修复强化技术研究现状及发展趋势[J].表面技术, 2020, 49(08): 105-122.
- [23]Siahpour P, Amegadzie M, Shakerin S, et al.Ultrasonic pulsed waterjet peening of Ti-6Al-4 V manufactured by laser powder bed fusion[J].Surface & Coatings Technology, 2025, 501131931-131931.
- [24]Tobola D, Chandran P, Morgiel J, et al.Microstructural dependence of tribological properties of Ti-6Al-4V ELI alloy after slide burnishing / shot peening and low-temperature gas nitriding[J].Surface & Coatings Technology, 2025, 501131941-131941.
- [25]Zhaoruo B, Feng F, Shulong F, et al.Application of governable high-coverage ultrasonic peening method on hole edge chamfer[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, (prepublish): 1-14.
- [26]Karpov D I, Em T V, Nikolaeva P E, et al.Residual Stresses in Steel Plates after Shot-Blast Treatment: A High-Resolution Neutron Diffraction Study[J].Physics of Metals and Metallography, 2025, 125(12): 1486-1494.
- [27]Xiujie C, Xincheng X, Yupeng Z, et al.Tungsten carbide coating prepared by ultrasonic shot peening to improve the wear properties of magnesium alloys[J].Journal of Materials Research and Technology, 2023, 262451-2464.
- [28]Chengyu W, Zhengda Z, Jianjun J, et al.Experimental and simulation study of multi-region peen forming and mechanical property[J].Journal of Manufacturing Processes, 2022, 84198-215.
- [29]T. W, J.B. W, X.J. Z, et al.A study on energy conversion behavior of single-shot elastic-plastic impact during shot peen forming[J].International Journal of Impact Engineering, 2023, 176
- [30]胡斌, 李龙. T2铜合金小孔构件激光喷丸强化数值模拟与实验研究[J].塑性工程学报, 2025, 32(01): 132-138.
- [31]王业辉. TC4钛合金超声喷丸强化残余应力数值模拟分析[J].航空发动机, 2019, 45(03): 58-64. 2019. 03.010.

-
- [32] Wang C, Kim T. Computational fatigue analysis of the Almen strip treated with double-sided shot peening and its experimental verification[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, (prepublish):1-13.
- [33] Hu H, Tang G, Cheng Z, et al.Co-Cr₃C₂ coating incorporating grain refinement and dislocation density gradient to enhance wear resistance of 24CrNiMo steel[J].Wear, 2025, 564-565205752-205752.
- [34] Srivastava M, Hloch S, Gubeljak N, et al.Surface integrity and residual stress analysis of pulsed water jet peened stainless steel surfaces[J].Measurement, 2019, 14381-92.
- [35] Wu W, Deng L, Yang X, et al.Modelling hydrogen permeation in gradient-structured steel fabricated by severe shot peening[J].International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 106631-643.
- [36] Ji D, Chen H, Zhang J, et al.Influence of micro-shot peening and traditional shot peening on fatigue performance and fracture behaviors of Ti-6Al-4V alloy[J].International Journal of Fatigue, 2025, 194108837-108837.
- [37] Wu K, Li K, Hao L, et al.Simulation and experimental study of shot peening strengthening technology for turbine disk fir-tree slots[J].Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1014178744-178744.
- [38] Xiong Y, Qian S, Shan H, et al.Understanding the recrystallization and phase transformation of gradient nanostructured M50 steel under the athermal effect of electrical pulses[J].Materials Characterization, 2023, 203.
- [39] Wang Q, Ma Y, Fu X, et al.Numerical simulation study of combined shot peening and laser shock peening on surface integrity of Ti-6Al-4V titanium alloy[J].Surface & Coatings Technology, 2024, 487130997.
- [40] Zhang X, Wei D, Liu X, et al.Effect of compressive residual stress and surface morphology introduced by shot peening on the improvement of fretting fatigue life of TC4[J].International Journal of Fatigue, 2025, 194108835-108835.
- [41] Xie C, Zhang J, xiong C, et al. Investigation on experiments and numerical

- p modelling of the residual stress distribution in deformed surface layer of Ti – 6Al – 4V after shot peening[J].
- Materials & Design*
- , 2012, 41: 314-318.
- [42]Zhang Y, Lai F, Qu S, et al. Effect of shot peening on residual stress distribution and tribological behaviors of 17Cr2Ni2MoVNB steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 386: 125497.
- [43]Gariépy A, Bridier F, Hoseini M, et al. Experimental and numerical investigation of material heterogeneity in shot peened aluminium alloy AA2024-T351[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 219: 15-30.
- [44]Wu J, Liu H, Wei P, et al. Effect of shot peening coverage on residual stress and surface roughness of 18CrNiMo7-6 steel[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 183: 105785.
- [45]Ali, A., et al., The effect of controlled shot peening on the fatigue behaviour of 2024-T3 aluminium friction stir welds. *International Journal of Fatigue*, 2007. 29(8): 1531-1545.
- [46]Zhao X, Gu K, Zhang M, et al.Evolution of surface gradient hardening layer of AISI 304 stainless steel induced by cryogenic conventional shot peening[J].*Materials Science & Engineering A*, 2025, 925147919-147919.
- [47]Liu H, Dong H, Tang J, et al. Numerical modeling and experimental verification of surface roughness of 12Cr2Ni4A alloy steel generated by shot peening[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 422: 127538.
- [48]Oguri K. Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP)[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(8): 1395-1399.
- [49]Wu J, Wei P, Liu H, et al. Effect of shot peening intensity on surface integrity of 18CrNiMo7-6 steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 421: 127194.
- [50]Xu C, Wang X, Geng Y, et al. Effect of shot peening on the surface integrity and fatigue property of gear steel 16Cr3NiWMoVNB at room temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 172: 107668.

-
- [51]Moreno-Rubio M, Erena D, Vázquez J, et al. Study of the shot peening surface roughness in fretting[J]. Tribology International, 2024, 193: 109444.
- [52]高玉魁. TC18超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, (11): 1209-1212.
- [53]田唐永. TC4钛合金喷丸强化组织与性能研究[D]. 大连理工大学, 2012.
- [54]Yu W, Xing S, Zhu W, et al. Effect of the conventional shot peening and multiple shot peening on microstructure and residual stress of TC17 titanium alloy[J].Surface & Coatings Technology, 2024, 493(P2): 131284-131284.
- [55]Forouzanmehr M, Kashyzadeh R K, Laad M. Effects of ring indentation, punching, and shot peening treatments on fatigue crack retardation considering modified J-integrals: A comparative study[J].Engineering Failure Analysis, 2025, 170109282-109282.
- [56]Huang H, Liang K, Cui B, et al. Analysis of wear resistance deterioration at elevated temperature of medium carbon alloy steel treated by composite strengthening method of nitriding and microshot peening[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 171109416-109416.
- [57]Maleki E, Shamsaei N. A comprehensive study on the effects of surface post-processing on fatigue performance of additively manufactured AlSi10Mg: An augmented machine learning perspective on experimental observations[J]. Additive Manufacturing, 2024, 86104179.
- [58]Bai Z, Feng F, Xiong X, et al. Improvement of surface integrity and precision by ultrasonic peening hole edge chamfer of aluminum 7050[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1015178904-178904.
- [59]乔志伟. GH3625 镍基合金喷丸强化研究[D]; 上海交通大学, 2021. 000181.
- [60]Zhan C, Yang W. A high efficient surface-based method for predicting part distortions in machining and shot peening[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 119125-143.
- [61]Khajeian A, Mahmoudi A, Seifi R. On the prediction of corrosion fatigue in the

- presence of residual stresses[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 169109211-109211.
- [62]FujinoM, TsujiT, TakahashiK. Fatigue life improvement by shot peening for pre-fatigue tested carburized steel[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2024, 47(10): 3848-3857.
- [63]Ralls M A, John M ,Misra M, et al.Exploring the effect of shot peening coverage on the stress corrosion cracking resistance of austenitic stainless steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024,136(2): 1-26.
- [64]Jianqiang Z, Kun C, Zhiyuan X , et al.Modelling residual stress and residual work hardening induced by surface mechanical attrition treatment[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 233.
- [65]Xujun Z, Lei L, Zhiming S, et al.Effect of Shot Peening on Surface Damage Evolution Behavior of Cu-19Ni Alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2023, 38(1): 212-221.
- [66]Umapathi A, Swaroop S. Mechanical properties of a laser peened Ti-6Al-4V[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 119105568-105568.
- [67]邓明明, 彭归浠, 郑明, 等. 基于FEM-DEM的粗糙表面喷丸数值模拟与试验研究 [J]. 机械传动, 2021, 45(07): 156-60.
- [68]王淼. 喷丸强化钛合金叶片表面完整性与变形的模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2022. 002456.
- [69]Kirk D, Abyaneh M Y. Theoretical basis of shot peening coverage control[J]. Shot Peener(USA), 1995, 9(2): 28-30.
- [70]Kirk D. Theoretical principles of shot peening coverage[J]. The Shot Peener, 2005, (2): 19.
- [71]Karuppanan S, Romero J S, Rios E, et al. A Theoretical and Experimental Investigation into the Development of Coverage in Shot Peening[M]. Shot Peening, 2006.137424-109.

- [72]Zhang P, Gao Y, Yue X, et al. Study on the fatigue performance and Residual Stress of subsurface fluid flow of 2519a aluminum alloy based on water jet peening[J]. Vacuum, 2024: 113648.
- [73]Li C, Chen S. The effect of chipbreaker parameters on the cutting temperature of Inconel 718 alloy based on the secondary development of Abaqus[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2541(1): 012043.
- [74]Prema V, Uma Rao K. Interactive graphical user interface (GUI) for wind speed prediction using wavelet and artificial neural network[J]. Journal of The Institution of Engineers (India): Series B, 2018, 99: 467-477.
- [75]Oostrom M T, Colby S M, Metz T O. DEIMoS GUI: An Open-Source User Interface for a High-Dimensional Mass Spectrometry Data Processing Tool[J]. Journal of Chemical Information and Modeling, 2024. 113448.
- [76]Dodo Y, Arif K, Alyami M, et al. Estimation of compressive strength of waste concrete utilizing fly ash/slag in concrete with interpretable approaches: optimization and graphical user interface (GUI)[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 4598.
- [77]Liu Y G, Li H M, Li M Q. Roles for shot dimension, air pressure and duration in the fabrication of nanocrystalline surface layer in TC17 alloy via high energy shot peening[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 562-570.
- [78]Cao Y, Niu T, Gai P, et al. Numerical simulation for investigating the impact of shot peening process parameters via surface reconstruction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(5): 2721-2734.
- [79]Jiang S, Gao M, Wang J, et al. Analysis and multi-objective optimization design of sinusoidal DSEM with two different excitation modes based on Gray-Fuzzy-Taguchi method[J]. Computers and Electrical Engineering, 2024, 117: 109251.
- [80]Yao S L, Wang G Y, Yu H, et al. Influence of submerged micro-abrasive waterjet peening on surface integrity and fatigue performance of TA19 titanium alloy[J].

- International Journal of Fatigue, 2022, 164: 107076.
- [81]Zhao J, Tang J, Zhou W, et al. Comprehensive experimental study of shot peening on the surface integrity evolution of 12Cr2Ni4A high-strength steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(1): 143-164.
- [82]Zhang S, Leng Z, Gu H, et al. Simulation and experiment research on the surface deformation and residual stress of fractal rough surface single-shot peening[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 6891.
- [83]Ma Z, Chen T, Wang Z, et al. Analysis of residual stress of gear tooth root after shot peening process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(5): 2147-2160.
- [84]Roshith P. The influence of compressive residual stress on metallurgical and mechanical properties of materials exposed to shot peening: a review[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2024, 63(2): 373-413.
- [85]Zhang J, Lu S, Wu T, et al. An evaluation on SP surface property by means of combined FEM-DEM shot dynamics simulation[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 115: 283-296.
- [86]Su K, Zhang J, Lu L, et al. Corrosion-fatigue property of anodic oxidation coated 6082-T6 aluminium alloy: Effect of substrate residual stress and microstructure beneath coating-substrate interface[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 175: 107803.
- [87]Liu H, Dong H, Tang J, et al. Numerical modeling and experimental verification of surface roughness of 12Cr2Ni4A alloy steel generated by shot peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 422: 127538.
- [88]Sadeghi H, Jiang J ,Hu Y , et al.The scaling of laser peen forming: A two-experiment finite similitude approach[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 1311451-1465.
- [89]Ferreira N, Jesus J ,Ferreira J , et al. Effect of bead characteristics on the fatigue

life of shot peened Al 7475-T7351 specimens[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 134:105521-105521.

[90] Song Z, Bian K, Yao W, et al. Influence of Ultrasonic Shot Peening on the Microstructure and Fatigue Behavior of Inconel 718 Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025: 1-8.

[91] 翟傲霜, 黄啸, 王欣, 等. 基于位错密度理论的喷丸强化诱导7050铝合金组织细化数值模拟[J]. 中国表面工程, 2023, 36(02): 114-124.

[92] 吕成, 何勇辉, 郭赛赛, 等. 高应变幅值下喷丸316奥氏体不锈钢低周疲劳性能[J]. 热加工工艺, 2023, 52(02): 106-111.

攻读学位期间取得的成果及参研项目

一、论文

- [1] Anheng Wang, **Shangqi Duan**, Wei Zhang, et al. Process Optimisation for Orthogonal Testing of Shot Peening Based on Secondary Development of ABAQUS[J]. Manufacturing Technology, 2025, 25(2): 252-264. (EI 源期刊)

二、专利

- [1] 喷丸强化工艺可视化分析软件。(软著号:2024SR1514018)

致谢

行文至此，掩卷长思。回首三载研学之路，恰似春华秋实，有求索之艰，亦得收获之喜。值此论文付梓之际，谨向所有予我启迪、助我成长的师长亲友，致以最诚挚的谢忱。

一谢师恩似海。承蒙恩师不弃愚钝，三载春风化雨。论文选题时高屋建瓴之点拨，实验遇挫时鞭辟入里之分析，撰写困顿时醍醐灌顶之提点，皆成我研学路上指路明灯。先生博观约取之学术风范，润物无声之人格魅力，当为学生终身治学为人之圭臬。

二谢同窗情谊。幸得师兄及课题组诸位同门倾囊相授，实验台前切磋琢磨，研讨会上砥砺思想。尤记攻坚时刻，诸君夙兴夜寐相与协作；困顿之际，同侪推心置腹共克时艰。更难忘 2022 级机械研究生全体同窗，寒窗共读时相勉之谊，运动场间相竞之趣，此间少年意气，必将长存心间。

三谢椿萱厚爱。双亲廿载育才之恩，非寸管所能尽述。每至人生转折，父母皆以无言支持予我选择自由；每逢困顿迷茫，家人总以温暖港湾容我整装待发。惟愿不负所期，以寸草之心报三春晖光。

四谢岁月馈赠。求学廿载，得遇良师诤友无数，诸般际遇皆成养分。特别感谢评审专家拨冗斧正，感谢学院提供优质平台，更感谢这个伟大时代赋予的求知机遇。前路虽远，行则将至；世事虽艰，做则必成。愿以此刻为始，怀感恩之心，持进取之志，继续在机械工程领域躬耕不辍。

尚德敏学 唯实惟新

