



高性能胶接表面粗化加工实验平台 设计与应用

薄其乐¹, 侯博², 李特¹, 刘行健³, 刘海波^{1*}, 王永青¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024; 2. 中国运载火箭技术研究院 航天材料及工艺研究所, 北京 100076;
3. 大连理工大学 机器人与智能系统研究院, 大连 116024)

摘要: 面向航空航天大尺寸胶接构件表面处理需求, 构建了集成工业机器人、主动柔顺力控系统及多模式打磨单元的表面粗化加工实验平台, 开发了具备轨迹规划、动态参数调控和硬件协同控制的软件系统。设计了多层次实验教学内容, 通过铝-铝合金试件实验确定了最优表面粗糙度及纹理方向, 基于响应曲面法优化获得最佳工艺参数组合, 验证了实验平台的有效性。该实验平台不仅可用于机电类专业本科生的实验教学, 也可作为相关领域研究生开展胶接构件粗化加工工艺参数优化的研发平台。

关键词: 高性能胶接; 表面粗化; 实验平台; 工艺参数

中图分类号: TP75 文献标志码: A DOI: 10.12179/1672-4550.20250229

Design and Application of a High-Performance Adhesive Bonding Surface Roughening Experimental Platform

BO Qile¹, HOU Bo², LI Te¹, LIU Xingjian³, LIU Haibo^{1*}, WANG Yongqing¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;
3. Institute of Robotics and Intelligent Systems, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To meet the surface treatment requirements of large-sized adhesive-bonded components in the aerospace industry, an experimental platform for surface roughening was constructed, integrating industrial robots, active compliance force control systems, and multi-modal grinding units. A software system with trajectory planning, dynamic parameter regulation, and hardware coordination control was developed. Multi-level experimental teaching content was designed. Through experiments on aluminum-aluminum alloy specimens, the optimal surface roughness and texture direction were determined. The optimal process parameter combination was obtained through response surface method optimization, which verified the effectiveness of the experimental platform. This platform can not only be used for undergraduate experimental teaching in electromechanical-related majors, but also serve as a research and development platform for postgraduate students in related fields to optimize the roughening processing parameters of bonded components.

Key words: high-performance adhesive bonding; surface roughening; experimental platform; processing parameters

在航空航天等领域, 大尺寸胶接构件已得到广泛应用。胶接表面适度的粗糙度不仅有利于胶粘剂充分渗透, 还可通过分子吸附、机械互锁等多重作用显著提升界面结合强度^[1-2]。然而, 表面微观形貌与胶接性能具有复杂的非线性关联, 为实现最优性能, 必须将表面粗糙度精确控制在最

佳区间内, 并确保纹理取向的一致性^[3-7]。表面微观形貌的形成过程受到砂纸目数、轴向载荷、主轴转速等关键工艺参数的协同影响。通过集成工业机器人、力控执行系统和多模式打磨单元构建表面粗化加工实验平台, 对加工工艺参数进行协同调控, 是实现胶接构件表面形貌精准控制的有

收稿日期: 2025-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(52205449); 大连理工大学研究生教学改革基金项目(JG_2021012)。

作者简介: 薄其乐, 博士, 工程师, 主要从事高性能胶接表面实验方面的研究。E-mail: qlbo@dlut.edu.cn

*通信作者: 刘海波, 博士, 教授, 主要从事大型薄壁件加工方面的研究。E-mail: hbliu@dlut.edu.cn

效途径。

目前, 国内已研制多种工业机器人实验平台。文献 [8] 搭建了三维视觉引导的机器人柔性运动平台, 实现了基于视觉的机器人三维柔性运动控制。文献 [9] 设计了基于图像分割与边缘检测的综合性仿真实验系统, 涵盖机器人正逆运动学与路径规划算法。文献 [10] 开发了数字化制造软硬件实验教学平台, 构建虚实结合的数字孪生教学系统。文献 [11] 研制的新型连续体机器人通用实验平台, 实现了对多段异径线驱动连续体的精准控制。文献 [12] 提出工业机器人与机器视觉技术融合的轮毂窗口去毛刺系统方案, 完成毛刺识别与自动化去除。文献 [13] 开发了集成路径规划、自主导航、视觉识别与抓取功能的移动抓取机器人教学平台。

不同于上述实验平台集中于工业机器人的多轴运动控制算法、轨迹规划等, 高性能胶接表面粗化加工实验平台以工业机器人多轴协同、轨迹规划为基础, 核心目标是通过力控系统 with 工艺参数(如法向压力、纹理方向)的深度融合, 实现“工艺驱动控制”的工程思维训练, 强调机器人对表面粗糙度、加工一致性等质量指标的动态响应。因此, 本文面向胶接构件表面可控粗化加工需求, 将工业机器人、主动柔顺力控执行系统、多模式打磨单元集成, 设计了高性能胶接表面粗化加工实验平台, 开发了表面粗化加工软件系统, 面向不同层次学生设计递进式实验教学内容, 并进行了实验应用验证。

1 实验平台硬件设计

粗化加工实验平台采用模块化架构设计, 由工业机器人、主动柔顺力控执行系统、多模式打磨单元及智能控制软件 4 大核心模块构成, 如图 1 所示。系统以库卡 KR120R2500 型工业机器人为主体架构, 具备离线轨迹规划与动态路径优化功能, 为粗化加工提供空间运动基准。力控执行系统采用闭环控制架构, 由六维力传感器、阻抗控制算法、力控执行器、伺服调压阀及力控控制器组成。其中, 力控执行器内部集成传感单元, 通过工业以太网通信协议(Ethernet for control automation technology, EtherCAT)总线将末端执行器的实时数据回传至力控控制器。经 PID 算法处理后, 系统通过精密伺服阀动态调节气路压力, 实现法向接触力(控制精度 $\leq \pm 2$ N)与切向位移补偿(精度 ≤ 0.02 mm)的动态平衡。多模式打磨单元采用双工位可切换设计, 通过标准化转接工装与力控系统集成, 如图 2 所示。该打磨单元包含以下两种工作模式。

1) 直线纹理打磨: 配备无级调速电机(0~8000 r/min), 通过等概率随机轨迹生成各向同性圆形表面纹理。

2) 圆形纹理打磨: 搭载 $\Phi 50$ mm \times 200 mm 接触轮, 结合机器人 TCP 速度控制形成 0.1~0.5 mm 间距的定向条纹, 可精确调控表面粗糙度至 Ra 2.5~12.5 μ m, 满足不同胶接界面的粗化需求。

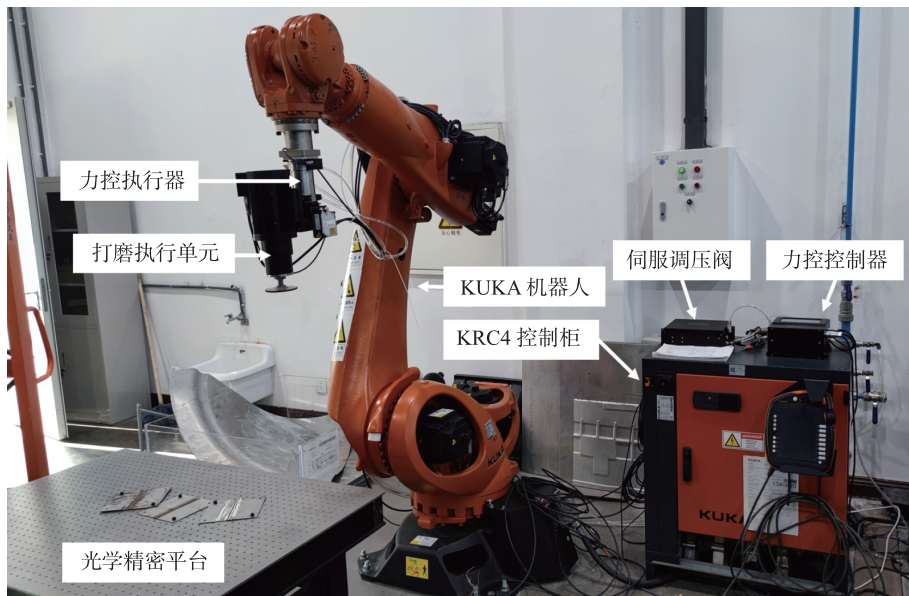


图 1 胶接表面粗化加工实验平台实物图

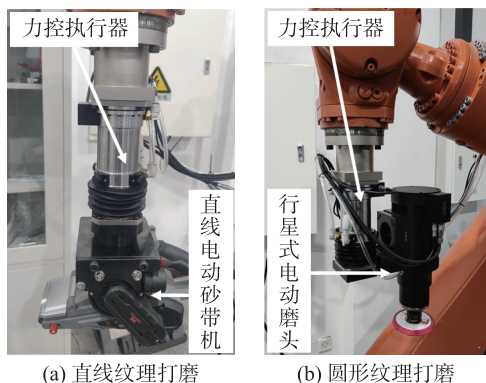


图 2 力控执行系统与多模式打磨单元实物图

2 实验平台软件开发

2.1 软件功能规划

由于胶接构件的实际外廓型与理论外廓型存在显著偏差，机器人运动轨迹规划必须以构件的实际外廓型数据为基准。在进行粗化加工时，需对下压力、主轴转速、进给速度等工艺参数实施动态闭环调控。基于上述工艺需求，所开发的软件系统架构如图 3 所示，包括 4 个模块。

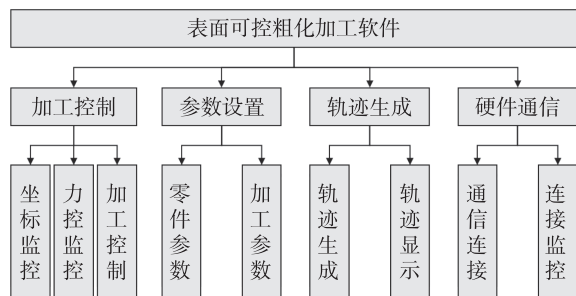


图 3 胶接表面粗化加工实验软件系统架构图

1) 加工控制模块。核心功能包括：机器人位姿数据实时采集、打磨进度状态实时监控与可视化、加工指令的解析与下发、加工运动的启停控制与急停保护。

2) 参数设置模块。核心功能包括：零件样式与参数信息输入或读取、加工工艺参数输入、当前零件坐标定位。

3) 轨迹生成模块。核心功能包括：基于零件参数信息的打磨轨迹规划、加工行距和步长规划、轨迹点生成预览、打磨轨迹程序传输等。

4) 硬件通信模块。核心功能包括：软件系统与机器人通信、软件系统与力控执行系统通信以及通信信息的查看。

2.2 上位机与机器人系统通信

软件系统部署于工控机平台，网络通信架构

采用 EtherCAT 总线协议实现机器人本体、打磨执行单元与多源传感器的实时协同控制，重点聚焦工业级通信协议在复杂机电系统闭环控制中的集成应用。软件系统利用 Windows API 函数与工业机器人进行 Socket 通信，在机器人程序内运行 Ethernet KRL 命令进行数据交换。Ethernet KRL 提供了相应函数用于机器人系统与上位机间的数据交换。机器人系统利用这些函数将要发送的数据写入数据存储单元，再将数据存储单元里的数据以 XML 文件规定的格式发送给上位机，机器人在接收上位机数据后也以 XML 文件形式从数据存储单元中读取数据。

XML 文件配置了机器人进行 Socket 通信的各项要求，包括 IP 地址与端口、客户端/服务端、接收/发送数据格式等。机器人接收上位机控制数据(包括工件运动点坐标、目标下压力、打磨主轴启停及转速等)，解析后控制机器人运动或进行其他逻辑运算，并通过 EtherCAT 总线控制打磨执行单元。机器人将实时运行状态信号(机器人实时坐标、运动速度、力控执行系统实际下压力和浮动坐标点等)等发送给工控机，工控机对机器人发送的数据进行解析，实时监测机器人的坐标信息及相关状态。完整的通信架构如图 4 所示。

2.3 人机界面开发

根据上述软件功能，基于 C++语言和 QT 软件框架开发了胶接表面粗化加工实验软件系统人机界面，如图 5 所示。

3 粗化加工实验教学设计与应用

基于本实验平台，设计了铝合金胶接试件粗化加工实验和基于响应面法的工艺参数优化实验。其中，本科生主要完成铝合金胶接试件粗化加工实验。在该实验中，学生主要操作本实验平台完成胶接试件打磨，并通过剪切试验确定最佳表面粗糙度和纹理。实验内容涵盖工业机器人示教、运动轨迹编程、加工工艺参数设置、表面粗糙度检测和胶接性能检测等。研究生在完成铝合金胶接试件粗化加工实验的基础上，根据确定的最佳表面粗糙度范围和纹理方向确定最佳工艺参数，并进行验证。通过设置“基础运动控制—工艺参数耦合分析—表面质量评价”递进式内容，形成从设备操作到工艺优化的完整工程能力培养链条。

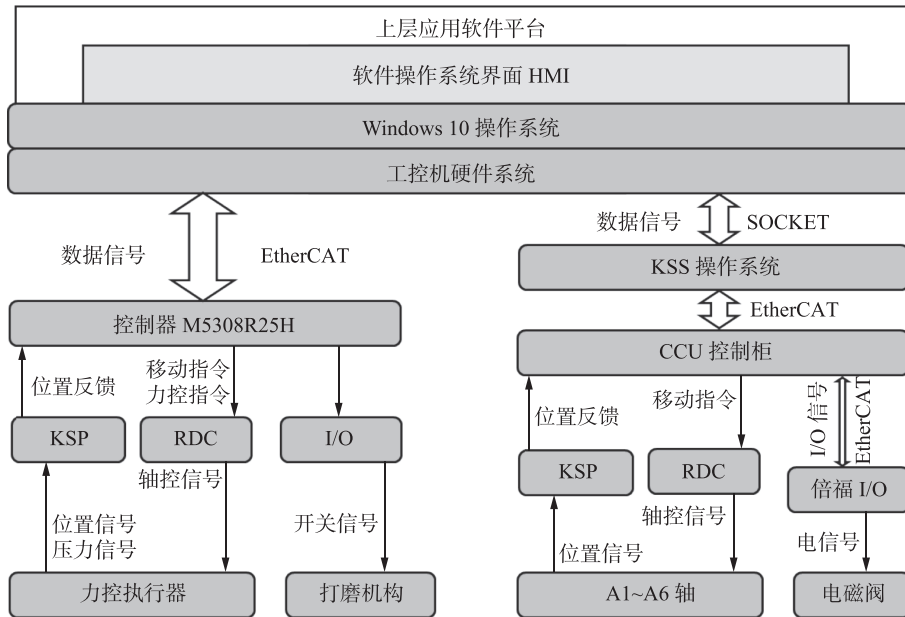


图 4 上位机与机器人系统数据通讯架构图

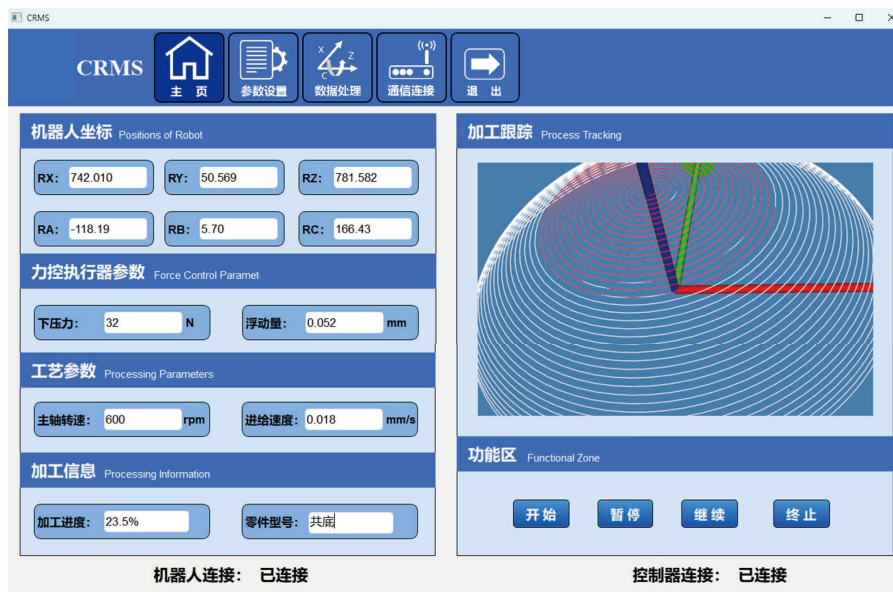


图 5 胶接表面粗化加工软件系统人机界面

3.1 铝合金胶接试件粗化加工实验

该部分实验主要面向机电类本科生和硕士生开设。实验目标是确定满足最佳胶接性能的表面粗糙度范围和纹理分布。实验过程中, 学生将胶接试件固定在工作台上, 并利用示教和力控执行系统确定机器人运行点位和顺序, 形成机器人控制程序; 基于材料去除机理(赫兹接触理论和磨料磨损模型)选取粗化加工工艺参数; 利用本平台进行铝合金试件粗化加工实验, 并通过剪切实验确定最佳表面粗糙度和纹理。

为验证纹理方向对胶接强度的影响, 设计直

线 0°纹理、直线 90°纹理和圆形纹理。每种纹理方向加工 5 组不同的粗糙度, 每组粗糙度加工 20 片试件。打磨完成后采用粗糙度测量仪测量表面粗糙度。将铝合金试件两两相对并涂覆胶接剂, 经胶接固化后得到单搭试件。采用拉伸试验机进行剪切实验, 如图 6 所示。

不同纹理方向下各试件胶接强度如图 7 所示。直线 0°纹理试件的剪切强度高于直线 90°纹理和圆形纹理试件, 这是因为当表面纹理方向垂直于受力方向时易产生应力集中, 降低了剪切强度。另外当粗糙度过大或过小时, 剪切强度均会

降低。最佳纹理方向为平行于受力方向，表面粗糙度为 Ra 3.68 μm 。

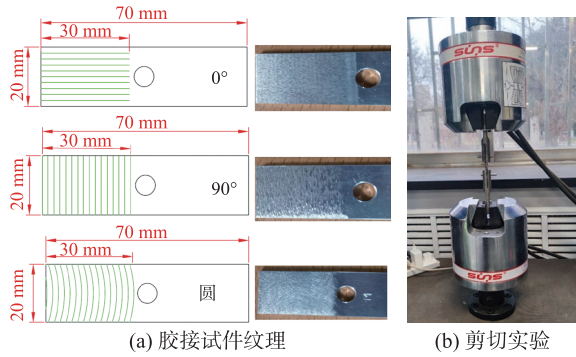
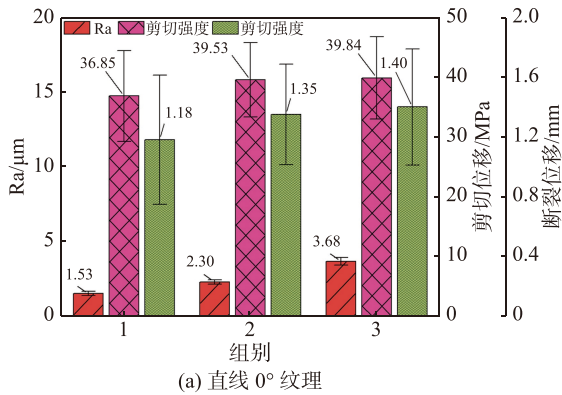
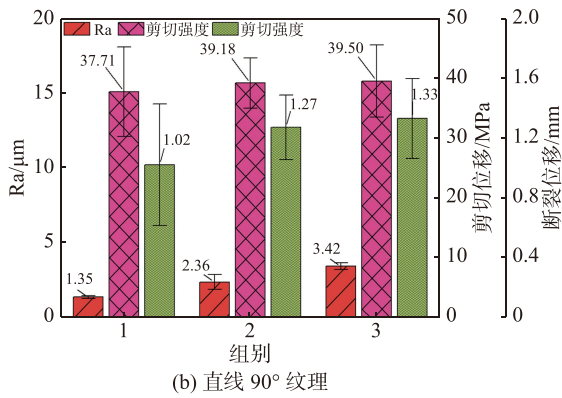


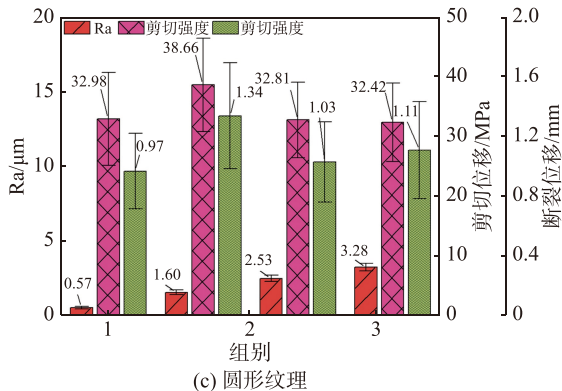
图 6 胶接试件纹理与剪切实验图



(a) 直线 0° 纹理



(b) 直线 90° 纹理



(c) 圆形纹理

图 7 胶接试件剪切实验结果对比图

3.2 基于响应面法的工艺参数优化

研究生在完成上述实验的基础上，进行本部分实验操作。实验目标是确定满足目标表面粗糙度范围和纹理分布的加工工艺参数。基于获得的目标表面粗糙度和纹理方向，以打磨倾角 θ 、下压力 F_N 、主轴转速 n 和进给速度 v 为自变量，以表面粗糙度平均值 Ra_{avg} 为响应变量，采用响应面法对打磨工艺参数进行优化。实验设置与结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 响应面法分析因素及层次

水平	倾角/ (°)	下压力/ N	主轴转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
+1	6	35	1000	25
-1	4	25	500	15

表 2 响应面实验设计及结果

编号	倾角/ (°)	下压力/ N	主轴转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均粗糙度/ μm
1	4	25	500	15	3.1858
2	6	25	500	15	3.8439
3	4	35	500	15	4.0119
4	6	35	500	15	4.5159
5	4	25	1000	15	3.8945
6	6	25	1000	15	4.8363
7	4	35	1000	15	4.9596
8	6	35	1000	15	5.7042
9	4	25	500	25	2.9081
10	6	25	500	25	3.4144
11	4	35	500	25	3.5139
12	6	35	500	25	3.9214
13	4	25	1000	25	3.4080
14	6	25	1000	25	4.1549
15	4	35	1000	25	4.2818
16	6	35	1000	25	4.9293
17	3	30	750	20	3.2423
18	7	30	750	20	4.5187
19	5	20	750	20	3.1899
20	5	40	750	20	4.6968
21	5	30	250	20	3.1322
22	5	30	1250	20	4.7375
23	5	30	750	10	5.1549

使用二次多项式拟合 Ra_{avg} ，得到方差如表 3 所示。 Ra_{avg} 的整体模型具有较强显著性，证明模

型拟合数据能力较好。依据 F 值, 各打磨参数对 Ra_{avg} 的影响程度排序为: $n > F_N > \theta > v$ 。为此, 选择较低的转速和进给速度, 以保证打磨表面粗糙度均匀性。

由表3可知, Ra_{avg} 所有项均具有一定的显著性, 因此保留所有项, 得到 Ra_{avg} :

$$Ra_{avg} = -2.86150 + 1.01925\theta + 0.201341F_N + 7.69267e^{-3}n - 8.47175e^{-2}v - 6.869e^{-3}\theta \cdot F_N + 2.51e^{-4}\theta \cdot n - 6.754e^{-3}\theta \cdot v + 4.9e^{-5}F_N \cdot n - 1.675e^{-3}F_N \cdot v - 4.105e^{-5}n \cdot v - 5.453e^{-2}\theta^2 - 1.5527e^{-3}F_N^2 - 6.551e^{-7}n^2 + 3.4768e^{-3}v^2 \quad (1)$$

表3 表面粗糙度平均值方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	13.0800	14	0.9344	217.33	<0.0001
θ	2.4800	1	2.4800	576.01	<0.0001
F_N	3.5300	1	3.5300	821.32	<0.0001
n	4.2200	1	4.2200	981.55	<0.0001
v	2.1900	1	2.1900	510.06	<0.0001
θF_N	0.0189	1	0.0189	4.39	0.0535
θn	0.0631	1	0.0631	14.68	0.0016
θv	0.0182	1	0.0182	4.24	0.0572
$F_N n$	0.0588	1	0.0588	13.69	0.0021
$F_N v$	0.0281	1	0.0281	6.53	0.0220
nv	0.0421	1	0.0421	9.80	0.0069
θ^2	0.0816	1	0.0816	18.97	0.0006
F_N^2	0.0413	1	0.0413	9.61	0.0073
n^2	0.0460	1	0.0460	10.69	0.0052
v^2	0.2072	1	0.2072	48.20	<0.0001
残差	0.0645	15	0.0043	—	—
失拟项	0.0486	10	0.0049	1.53	0.3337
纯失误	0.0159	5	0.0032	—	—
总误差	13.1500	29	—	—	—

将模型结果与原数值比较, 得到 Ra_{avg} 的校正决定系数为0.9905。考虑到过大的进给速度易造成加工振颤, 选取进给速度 $v = 20$ mm/s。较低的转速会造成法向磨削力和切向磨削力过大, 选取主轴转速 $n = 600$ r/min。基于前述选择, 分别绘制打

磨倾角 θ 与下压力 F_N 对 Ra_{avg} 的响应曲面, 如图8所示。综合考虑不同 θ 和 F_N 在 Ra_{avg} 的影响, 当 $\theta = 4.3^\circ$ 、 $F_N = 31$ N时, Ra_{avg} 接近目标表面粗糙度 $3.68 \mu\text{m}$ 。最终参数为倾角 $\theta = 4.3^\circ$, 下压力 $F_N = 31$ N, 主轴转速 $n = 600$ r/min, 进给速度 $v = 20$ mm/s。

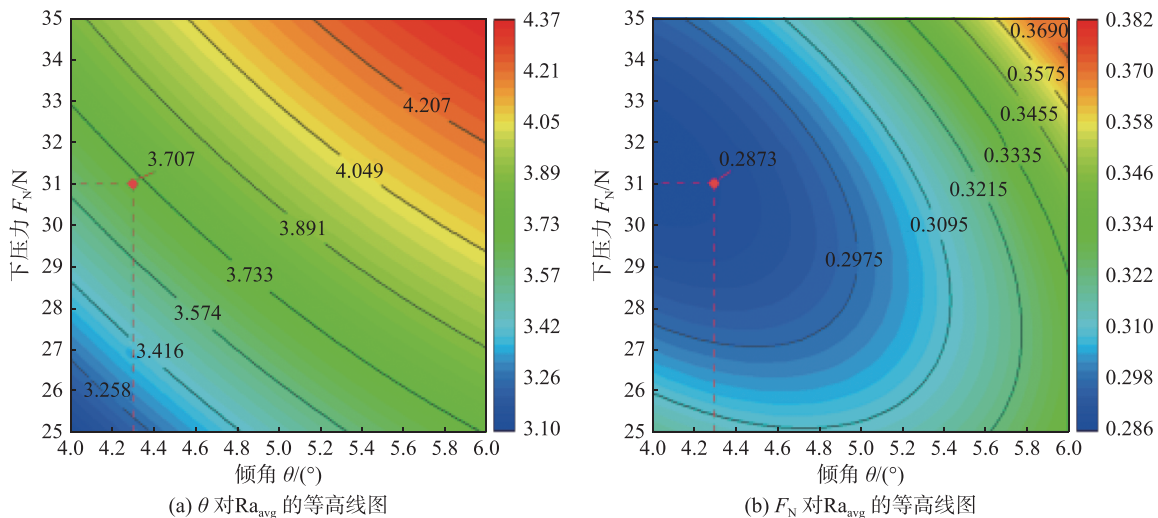


图8 θ 和 F_N 对 Ra_{avg} 的等高线图

4 结束语

面向航空航天领域大尺寸胶接构件可控粗化加工需求,将工业机器人、柔顺力控执行系统、多模式打磨单元及集成,设计了表面粗化加工实验平台硬件结构。基于 C++语言和 QT 软件框架开发了表面粗化加工实验平台软件系统。本实验平台不仅可用于机电类专业的实验教学,也可作为大尺寸胶接构件粗化加工工艺参数优化算法的研发平台。

同时本文设计了递进式实验教学内容,基于铝-铝合金时间打磨和胶接剪切实验,确定了最佳表面粗糙度范围和纹理方向,基于响应曲面方法优化了打磨工艺参数。该平台有效支撑“理论教学—工艺验证—参数优化”的全链条研发需求。

参考文献

- [1] Da SILVA L F M, ÖCHSNER A, ADAMS R D. Handbook of adhesion technology[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] BANEJA M D, DE SOUSA F S M, DA SILVA L F M, et al. Effects of temperature and loading rate on the mechanical properties of a high temperature epoxy adhesive[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011, 25(18): 2461–2474.
- [3] REIS M L, ANDRADE B, WATANABE M M, et al. Influence of temperature on the bending stiffness and tensile-shear strength of composite-metal joints[J]. The Journal of Adhesion, 2018, 94(14): 1122–1136.
- [4] NGUYEN T C, YU B, ZHAO X L, et al. Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures[J]. Composite Structures, 2011, 93(6): 1604–1612.
- [5] KWON D J, KIM J H, KIM Y J, et al. Comparison of interfacial adhesion of hybrid materials of aluminum/carbon fiber reinforced epoxy composites with different surface roughness[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 170: 11–18.
- [6] ARENAS REINA J M, NARBÓN PRIETO J J, GARCÍA C A. Influence of the surface finish on the shear strength of structural adhesive joints and application criteria in manufacturing processes[J]. The Journal of Adhesion, 2009, 85(6): 324–340.
- [7] PASTEWKA L, ROBBINS M O. Contact between rough surfaces and a criterion for macroscopic adhesion[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3298–3303.
- [8] 王郑拓,林志伟,徐冠华. 三维视觉引导的机器人柔性运动平台研制[J]. 实验科学与技术, 2025, DOI: 10.12179/1672-4550.20240561.
- [9] 司鹏举,付主木,冀保峰,等. 新工科背景下机器人工程专业综合性仿真实验设计[J]. 实验科学与技术, 2025, 23(1): 24–28.
- [10] 刘银华,张振东,段振霞. 面向教研一体化的数字化制造实验教学平台搭建与探索[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(3): 140–144.
- [11] 杜付鑫,崔维一,程天宇,等. 连续体机器人通用实验平台的设计与应用[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(2): 37–43.
- [12] 郭万金,叶敏,张志峰,等. 机器人去毛刺路径规划仿真实验教学设计:以轮毂窗口去毛刺为例[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(12): 111–118.
- [13] 孙明晓,王潇,胡军,等. 基于自主移动抓取机器人的多功能实验教学平台设计[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(4): 140–146.

编辑 王燕