

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.017

镍基高温合金蜂窝超声辅助铣削加工毛刺优化研究

陈玉荣¹,高绍武^{2,3},姜旭^{2,3},晏超仁^{2,3},杨浩骏¹,刘萌^{2,3},苏宏华^{1,4},赵建社^{1,4}

(1. 江苏集萃精密制造研究院有限公司,江苏 南京 211800;

2. 江苏航浦国创复材研究院有限公司,江苏 南京 211599;

3. 江苏省先进复合材料技术与装备创新中心,江苏 南京 211599;

4. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016)

摘要:为减小镍基高温合金蜂窝铣削加工毛刺宽度,采用 CUMET 多刃铣刀与 SECO 多刃铣刀开展超声辅助铣削加工试验,对比刀具类型、研究加工参数对毛刺宽度的影响规律。结果表明:相较于 SECO 多刃铣刀,采用 CUMET 多刃铣刀可获得更小的毛刺宽度;通过单因素铣削试验,获得了优化的铣削工艺参数组合,毛刺宽度可降低至 8.97 μm 。

关键词:超声辅助铣削;高温合金;蜂窝;毛刺

中图分类号:TG54 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0087-05

Research on Optimization of Burr in Ultrasonic Assisted Milling of Nickel-based Superalloy Honeycombs

CHEN Yurong¹,GAO Shaowu^{2,3},JIANG Xu^{2,3},YAN Chaoren^{2,3},YANG Haojun¹,LIU Meng^{2,3},SU Honghua^{1,4},ZHAO Jianshe^{1,4}

(1. JITRI Institute of Precision Manufacturing,Nanjing 211800,China;

2. Jiangsu Hangpu National Innovation Composite Research Institute,Nanjing 211599,China;

3. Jiangsu Innovation Center of Advanced Composite Technology and Equipment,Nanjing 211599,China;

4. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210016,China)

Abstract:In order to reduce burr width of nickel-based superalloy honeycomb after milling, ultrasonic assisted milling experiments were conducted by CUMET and SECO multi-edge milling tools, and the tool types were compared and the influence law of milling parameters on burr width was investigated. The results indicate that compared to SECO tools, milling with CUMET tools can achieve smaller burr widths. With single factor milling experiments, an optimized milling process parameter was obtained, with burr width being reduced to 8.97 μm .

Keywords:ultrasonic assisted milling;superalloy;honeycomb;burr

0 引言

镍基高温合金具有良好的耐高温性、抗氧化性、抗腐蚀性和抗疲劳性能,被广泛应用于航空航天领域^[1-4]。镍基高温合金蜂窝封严环是航空发动机低压涡轮转子的重要组成部分^[5-6],是保障航空发动机高效稳定运行的关键密封部件,能够有效减少泄漏,提高发动机的热效率和推力,进而保障飞行器的整体性能^[7-8]。

铣削加工广泛应用于镍基高温合金蜂窝封严环的制造中^[9]。然而,镍基高温合金强度高、加工硬化严重,传统铣削加工中切削力大、刀具磨损快,导致加工成本高、加工质量差^[10-13]。超声辅助铣削加工是将超声振动与传统铣削工艺相结合的复合加工技术,对难加工材料的高效、高质量加

工具有较大的应用潜力^[14-17]。

国内外研究学者针对超声辅助铣削加工已开展大量的研究工作。袁盛旺等^[18]对比研究了传统铣削和超声辅助铣削的力学响应,分析相同工艺参数下传统铣削和超声辅助铣削的刀具磨损状态。结果表明超声辅助铣削可显著减小铣削力,延长刀具寿命,提高加工质量。肖强等^[19]的研究表明,超声振动能有效减小镍基高温合金的铣削力并改善其表面质量;杨文龙等^[20]通过正交试验,从切削力、温度、表面粗糙度和刀具磨损等方面,验证了超声辅助铣削对镍基高温合金切削加工性的积极影响,并进一步优化了加工参数;SUN等^[21]建立了超声辅助铣削模型,发现增大超声振幅能够降低加工应力、提升断屑效果并减小铣削力;SUÁREZ等^[22]研究表明,超声辅助铣削可以

第一作者简介:陈玉荣(1989—),男,江苏盐城人,工程师,博士,研究方向为超声振动辅助加工技术, chenyr@amt-nuaa.com。

显著改善镍基高温合金的表面粗糙度,并提高其抗疲劳性能。

综上所述,相较于传统铣削加工,超声辅助铣削可有效降低铣削力,改善加工表面质量,在蜂窝结构铣削毛刺抑制方面具有较大的应用前景。鉴于国内外在超声辅助铣削加工镍基高温合金蜂窝结构方面的研究较少,本文开展超声辅助铣削镍基高温合金蜂窝结构试验研究,探索加工参数对毛刺宽度的影响规律,优化镍基高温合金蜂窝铣削加工刀具和加工参数,达到抑制铣削毛刺宽度的目的。

1 试验方案设计

1.1 试验材料

试验蜂窝封严环材料为 GH4169 镍基高温合金,单边壁厚为 $32.87\ \mu\text{m}$,蜂窝结构为正六边形。

1.2 试验与检测装置

超声辅助铣削加工高温合金蜂窝的试验装置为德玛吉 DMF180/7 五轴加工中心,采用压板将零件固定安装在五轴加工中心的工作台上,如图 1 所示。



图 1 超声辅助铣削试验装置

铣削使用的刀具分别为 CUMET 直径 10 mm、8 刃多齿铣刀和 SECO 直径 10 mm、8 刃多齿铣刀。

采用三维视频显微镜(左)和手持式显微镜(右)对毛刺进行测量,如图 2 所示,观测并记录加工后的毛刺宽度。三维视频显微镜用于零件线下的毛刺测量;手持式显微镜用于零件在机的毛刺测量。

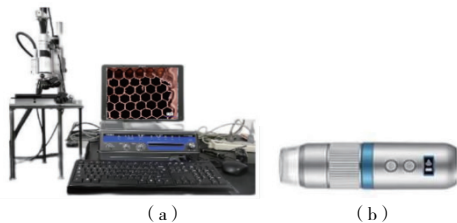


图 2 检测设备

1.3 试验参数

超声辅助铣削试验参数如表 1 所示。

表 1 超声振动辅助铣削试验参数表

项目	参数
铣削速度 $v_s/(\text{m}/\text{min})$	80, 120, 160
每齿进给速度 $f_z/(\text{mm}/\text{z})$	0.050, 0.025
轴向切深 $a_e/\mu\text{m}$	4.0
径向切深 a_p/mm	0.05, 0.10
振幅 $A/\mu\text{m}$	3
谐振频率 f/kHz	17.1

2 结果与讨论

2.1 CUMET 多刃铣刀对毛刺宽度影响

当铣削速度为 $120\text{ m}/\text{min}$, 进给速度为 $0.050\text{ mm}/\text{z}$ 时, 径向切深分别为 0.05 mm 和 0.10 mm 对蜂窝孔口毛刺宽度和形貌的影响分别如图 3 和图 4 所示。当径向切深为 0.05 mm 时, 单边毛刺宽度为 $29.96\ \mu\text{m}$, 蜂窝网格无明显变形; 当径向切深为 0.10 mm 时, 单边毛刺宽度为 $38.13\ \mu\text{m}$, 相比于径向切深 0.05 mm , 蜂窝网格因切削力增大产生变形, 且单边毛刺宽度增大 $8.17\ \mu\text{m}$ 。

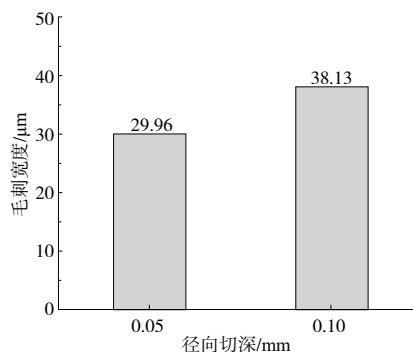


图 3 CUMET 多刃铣刀径向切深对蜂窝毛刺宽度的影响

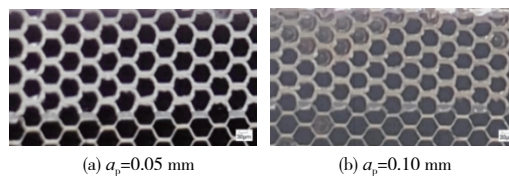


图 4 CUMET 多刃铣刀径向切深对蜂窝毛刺形貌的影响

当进给速度为 $0.050\text{ mm}/\text{z}$ 、径向切深为 0.05 mm 时, 铣削速度分别为 $80\text{ m}/\text{min}$ 、 $120\text{ m}/\text{min}$ 和 $160\text{ m}/\text{min}$, 对蜂窝孔口毛刺宽度和形貌的影响分别如图 5 和图 6 所示。当铣削速度为 $80\text{ m}/\text{min}$ 时, 单边毛刺宽度为 $19.88\ \mu\text{m}$; 当铣削速度为 $120\text{ m}/\text{min}$ 时, 单边毛刺宽度为 $29.96\ \mu\text{m}$; 当铣削速度为 $160\text{ m}/\text{min}$ 时, 单边毛刺宽度为 $37.6\ \mu\text{m}$; 对比不同铣削速度下的蜂窝孔口毛刺宽度可以看

出,铣削速度越大,蜂窝孔口产生的毛刺越大,且不同速度下的蜂窝均未产生明显变形。

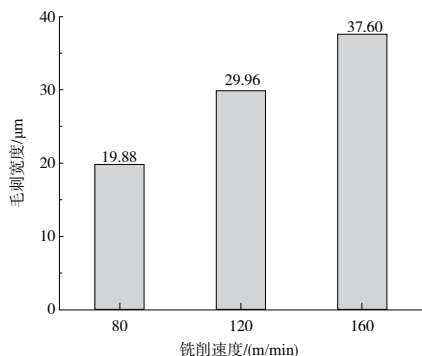


图5 CUMET多刃铣刀铣削速度对蜂窝毛刺宽度的影响

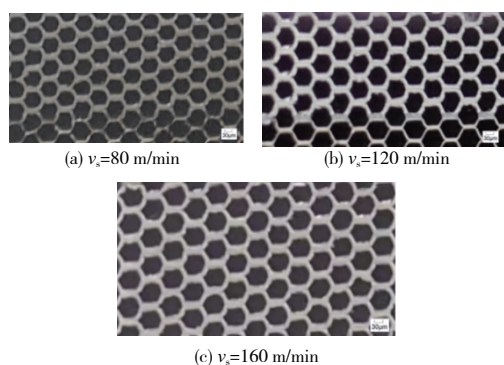


图6 CUMET多刃铣刀铣削速度对蜂窝毛刺形貌的影响

当铣削速度为 120 m/min、径向切深为 0.05 mm 时,进给速度分别为 0.025 mm/z 和 0.050 mm/z 对蜂窝孔口毛刺宽度和形貌的影响分别如图 7 和图 8 所示。当进给速度为 0.025 mm/z 时,单边毛刺宽度为 8.97 μm;当每齿进给速度为 0.050 mm/z 时,单边毛刺宽度为 29.96 μm。图 7 中可看出进给速度为 0.050 mm/z 时的毛刺宽度明显大于进给速度为 0.025 mm/z 时的毛刺宽度。因此,进给速度越大,毛刺越大。

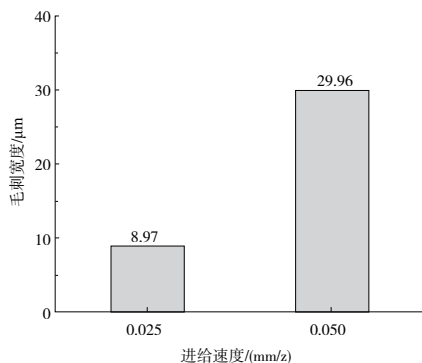


图7 CUMET多刃铣刀进给速度(每齿)对蜂窝毛刺宽度的影响

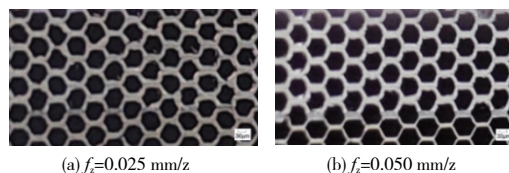


图8 CUMET多刃铣刀进给速度(每齿)对蜂窝毛刺形貌的影响

2.2 SECO多刃铣刀对毛刺宽度影响

采用 SECO 多刃铣刀进行蜂窝铣削试验。当铣削速度为 120 m/min、进给速度为 0.050 mm/z 时,径向切深分别为 0.05 mm 和 0.10 mm 对蜂窝孔口毛刺宽度和形貌的影响分别如图 9 和图 10 所示。当径向切深为 0.05 mm 时,单边毛刺宽度为 61.8 μm;当径向切深为 0.10 mm 时,单边毛刺宽度为 71.36 μm。对比不同径向切深下产生的毛刺宽度可知,切深越大,毛刺越大,且径向切深为 0.10 mm 时,蜂窝产生严重变形。

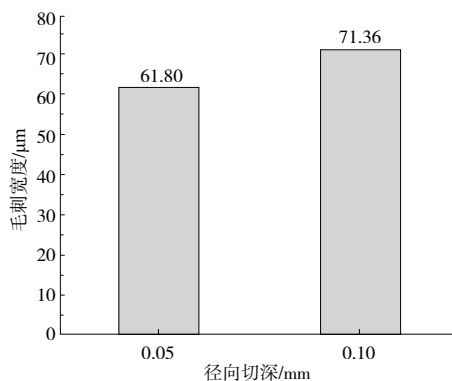


图9 SECO多刃铣刀径向切深对蜂窝毛刺宽度的影响

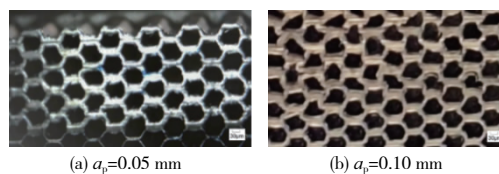


图10 SECO多刃铣刀径向切深对蜂窝毛刺形貌的影响

当进给速度为 0.050 mm/z, 径向切深为 0.05 mm 时,铣削速度分别为 80 m/min、120 m/min 和 160 m/min 对蜂窝孔口毛刺宽度和形貌的影响分别如图 11 和图 12 所示。当铣削速度为 80 m/min 时,单边毛刺宽度为 51.32 μm;当铣削速度为 120 m/min 时,单边毛刺宽度为 61.8 μm;当铣削速度为 160 m/min 时,单边毛刺宽度为 66.03 μm;对比不同铣削速度下的蜂窝孔口毛刺宽度可以看出,铣削速度越大,蜂窝孔口产生的毛

刺越大,且不同铣削速度下,蜂窝无明显变形。

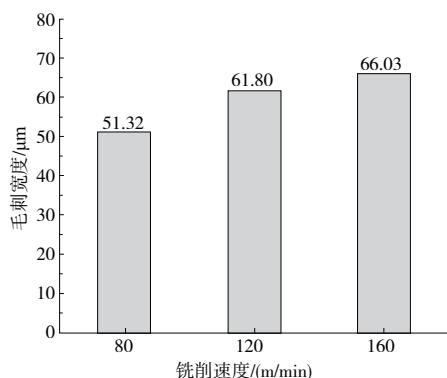


图 11 SECO 多刃铣刀铣削速度对蜂窝孔口毛刺宽度的影响

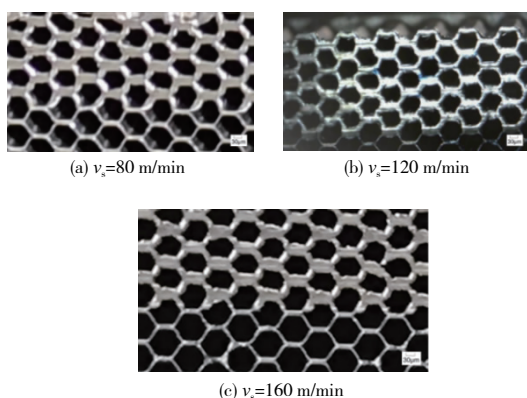


图 12 SECO 多刃铣刀铣削速度对蜂窝孔口毛刺形貌的影响

当铣削速度为 120 m/min、径向切深为 0.05 mm 时,进给速度分别为 0.025 mm/z 和 0.050 mm/z 对蜂窝孔口毛刺宽度和形貌的影响分别如图 13 和图 14 所示。当进给速度为 0.025 mm/z 时,单边毛刺宽度为 57.76 μm;当进给速度为 0.050 mm/z 时,单边毛刺宽度为 61.8 μm。由图 13 可以看出,每齿进给速度越大,毛刺越大,不同每齿进给速度条件下蜂窝无明显变形。

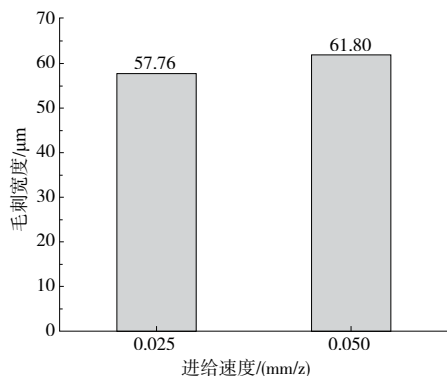


图 13 SECO 多刃铣刀进给速度(每齿)对蜂窝毛刺宽度的影响

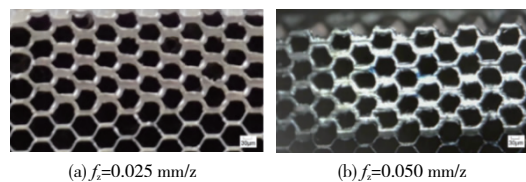


图 14 SECO 多刃铣刀进给速度(每齿)对蜂窝毛刺形貌的影响

在相同切削参数下,相较于 SECO 多刃铣刀加工蜂窝后的毛刺宽度及蜂窝表面,CUMET 多刃铣刀加工后蜂窝产生的毛刺宽度明显小于 SECO 多刃铣刀产生的毛刺。同时,采用 CUMET 多刃铣刀加工的蜂窝变形较小。当铣削参数为铣削速度 120 m/min、径向切深 0.05 mm、进给速度 0.025 mm/z 时,铣削加工产生的毛刺较小,单边毛刺宽度为 8.97 μm。

3 结语

本文开展了面向 GH4169 镍基高温合金蜂窝的超声振动辅助铣削加工毛刺优化研究,得到以下结论:

1) 相比于 SECO 多刃铣刀,CUMET 多刃铣刀更适用于高温合金蜂窝加工,加工后蜂窝产生的毛刺较小,且结构无明显变形;

2) 铣削加工蜂窝时,应通过减小铣削深度来控制毛刺宽度和蜂窝变形;在考虑实际加工效率时,采用 CUMET 多刃铣刀,铣削参数为铣削速度 120 m/min、径向切深 0.050 mm、进给速度 0.025 mm/z 时,可获得较小的铣削毛刺,单边毛刺宽度仅为 8.97 μm。

参考文献:

- [1] 梅屹峰,戚东辉,王文旗. 高温合金 GH4169 铣削表面粗糙度工艺参数优化研究[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(6): 42-46, 52.
- [2] 钟明君,于浩,王子若,等. 镍基高温合金的研究进展及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2025, 54(10): 1-9.
- [3] 刘百玲,赖勋卿,马海东,等. GH625 高温合金车削残余应力仿真及试验研究[J]. 工具技术, 2025, 59(3): 79-84.
- [4] 张敏,胡高峰,辛文东,等. 镍基高温合金切削加工研究现状及发展趋势[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(6): 172-178.
- [5] 苏国征,孙丹,郁丽,等. 封严环蜂窝结构哈氏合金材料等效杨氏模量[J]. 航空发动机, 2024, 50(6): 107-112.
- [6] WANG L, HU X Y, LI H S, et al. Experimental

- investigation on the machining performance of honeycomb seal structures by using electrochemical discharge machining [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 124: 226-239.
- [7] 王洪明. 航空发动机低压涡轮转子故障分析[J]. 装备机械, 2019(3): 62-64, 72.
- [8] 杨立光, 任连生, 王荣, 等. 蜂窝密封组件电火花加工工艺的研究[C]//2012年全国电火花成形加工技术研讨会交流文集. 北京: 北京迪蒙数控技术有限责任公司, 北京市电加工研究所, 2012: 82-85.
- [9] 陈飞. GH4169 高温合金激光-超声振动耦合辅助微铣削工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [10] 郑伟. 铣削镍基合金 Inconel718 时涂层刀具切削性能及失效机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [11] LÓPEZ DE LACALLE L N, PÉREZ J, LLORENTE J I, et al. Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100(1/2/3): 1-11.
- [12] LI X B, LIU X L, YUE C X, et al. Systematic review on tool breakage monitoring techniques in machining operations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 176: 103882.
- [13] FAN W, JI W, WANG L H, et al. A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(11): 2863-2879.
- [14] ZHAO G L, ZHAO B, DING W F, et al. Nontraditional energy-assisted mechanical machining of difficult-to-cut materials and components in aerospace community: a comparative analysis [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(2): 022007.
- [15] 袁中行, 方斌, 李德芄. 超声振动辅助铣削研究进展[J]. 电加工与模具, 2020(2): 1-9, 18.
- [16] 杨阳. 超声辅助铣削钛合金曲面加工机理及试验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
- [17] 冯真鹏. 超声辅助铣削镍合金铣削力和表面完整性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [18] 袁盛旺, 周何情. GH4169 高温合金超声辅助切削试验研究[J]. 工具技术, 2024, 58(6): 55-60.
- [19] 肖强, 冯真鹏, 刘锁强. 超声辅助铣削镍基高温合金铣削力建模及实验研究[J]. 制造技术与机床, 2023(11): 47-52.
- [20] 杨文龙, 谭延林, 罗剑锋. 超声振动辅助铣削镍基高温合金 GH4169 的切削性能研究[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(6): 34-41.
- [21] SUN J, LI P Y, ZHANG S, et al. Simulation and experimental study of ultrasonic vibration - assisted milling of GH4169 high - temperature alloy [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 73: 403-413.
- [22] SUÁREZ A, VEIGA F, DE LACALLE L N L, et al. Effects of ultrasonics - assisted face milling on surface integrity and fatigue life of Ni-alloy 718[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(11): 5076-5086.

收稿日期: 2025 - 02 - 25

(上接第 86 页)

- [5] 宋飞虎, 王梦柯, 尹静, 等. 基于数字孪生控制的精密机床热误差模型[J]. 机电工程, 2023, 40(3): 391-398.
- [6] 周琳丰. 面向缩短热机时间的数控机床主轴热误差快速辨识方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [7] 赵亮, 王孟超, 雷默涵, 等. 精密镗床进给轴差异化主动冷却方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(2): 91-100.
- [8] 刘德行, 刘腾, 褚亚强, 等. 基于热-流-固耦合建模的精密机床主轴差异冷却策略优化[J]. 河北工业大学学报, 2023, 52(4): 16-23.
- [9] 尹静, 宋飞虎, 王梦柯, 等. 机床稳健性温度敏感点选择及热误差建模[J]. 机床与液压, 2023, 51(11): 162-167.
- [10] LU Y L, SHEVTSHENKO E, WANG Y. Physics-based compressive sensing to enable digital twins of additive manufacturing processes[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2021, 21(3): 031009.
- [11] 何全文, 刘刚, 庄凯, 等. 某型号立式加工中心主轴冷却器系统热流固耦合热态特性分析[J]. 机械工程师, 2023(8): 85-88, 92.
- [12] 李太松. 加工中心丝杠冷却结构的设计与试验[J]. 机械制造, 2022, 60(11): 45-48, 60.
- [13] 李毅, 陈国华, 夏铭, 等. 电主轴冷却系统设计与仿真优化[J]. 工程设计学报, 2023, 30(1): 39-47.
- [14] 马新朝. 单因素分析法在核电设备管道典型焊接问题处理流程中的应用[J]. 电焊机, 2023, 53(12): 126-132.
- [15] 陶文铨. 传热学[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2024.
- [16] 周振涛. 电主轴热态特性与冷却优化建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [17] 王豪, 黄为彬, 方兵. 考虑结合面特性影响的机床整机有限元静力学分析模型[J]. 机电工程, 2024, 41(4): 732-738.
- [18] 孙浩雄. 虑及环境温度的精密卧加空间热误差仿真分析及测试方法[D]. 天津: 天津大学, 2023.

收稿日期: 2024 - 02 - 23