

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.015

镍基高温合金蜂窝磨削加工毛刺优化研究

高绍武^{1,2}, 陈玉荣³, 姜旭^{1,2}, 晏超仁^{1,2}, 刘萌^{1,2}, 杨浩骏³, 傅玉灿^{1,2}, 苏宏华³

(1. 江苏航浦国创复材研究院有限公司, 江苏 南京 211599;

2. 江苏省先进复合材料技术与装备创新中心, 江苏 南京 211599;

3. 江苏集萃精密制造研究院有限公司, 江苏 南京 211806)

摘要:为提高镍基高温合金蜂窝磨削加工质量,对比研究普通磨削与超声辅助磨削条件下磨削参数和砂轮组织对毛刺尺寸的影响规律。研究结果表明:相较于普通磨削,超声辅助磨削可有效降低镍基高温合金蜂窝毛刺尺寸,对于焊接边尤为显著;相较于白刚玉砂轮,采用陶瓷结合剂 CBN 砂轮可获得更小的毛刺尺寸;通过磨削试验,获得优化的工艺参数组合。

关键词:超声辅助磨削;高温合金;蜂窝;毛刺

中图分类号:TG580.6 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0079-05

Research on Grinding Burr Optimization of Nickel-based Superalloy Honeycomb

GAO Shaowu^{1,2}, CHEN Yurong³, JIANG Xu^{1,2}, YAN Chaoren^{1,2}, LIU Meng^{1,2},YANG Haojun³, FU Yucan^{1,2}, SU Honghua³

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

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

3. JITRI Institute of Precision Manufacturing, Nanjing 211806, China)

Abstract:To improve the grinding quality of nickel based superalloy honeycomb, a comparative study was conducted on the influence of grinding parameters and wheel structure on burr size under conventional grinding and ultrasonic assisted grinding. The research results show that compared with ordinary grinding, ultrasonic assisted grinding can effectively reduce the burr size of nickel-based superalloy honeycomb, especially for welding edges. Compared to white corundum grinding wheel, employing ceramic bond CBN grinding wheels can achieve smaller burr size. Through grinding experiments, optimized process parameter is obtained.

Keywords:ultrasonic assisted grinding; superalloy; honeycomb; burr

0 引言

蜂窝结构比强度、比刚度高,隔热及降噪性能优异,是航空发动机转子封严环的理想结构^[1]。蜂窝封严环组件是低压涡轮转子的一部分,与高压涡轮转子篦齿配合,形成密封腔体,共同起密封作用^[2]。镍基高温合金具有良好的耐高温性、抗氧化性、抗腐蚀性和热疲劳性能^[3-6],被广泛用于航空航天等高端装备领域。采用镍基高温合金的蜂窝结构可大幅提升航空发动机的高温密封性能,有效减少泄漏并提高转子稳定性。

镍基高温合金具备优异力学性能的同时,是典型的难加工材料^[7-10]。镍基高温合金蜂窝结构局部刚性弱,在磨削加工过程中,易产生较大的翻

边和毛刺,降低发动机汽封效果,毛刺脱落会进一步降低发动机的安全性及使用寿命^[11-12]。

对于如何抑制镍基高温合金磨削加工毛刺,国内外研究学者开展了大量的研究工作。黄文科等^[13]建立了镍基高温合金磨削出口毛刺二维有限元模型,发现毛刺尺寸由宽度和高度组成,二者对磨削深度敏感,深度越大毛刺尺寸越大。WANG 等^[14]基于有限元与实验,探讨毛刺形成原理、形貌转变临界条件,经正交试验获得抑制毛刺的合适参数区间。

超声辅助磨削可有效降低磨削力,提高磨削加工质量^[15-18],在抑制磨削毛刺方面具有较大的应用潜力。王晨旭等^[19]发现超声辅助磨削能降低磨削力并延长砂轮寿命。王儒康等^[20]发现提

第一作者简介:高绍武(1991—),男,安徽合肥人,工程师,博士,研究方向为难加工材料/结构高效精密加工技术, shwgao@nuaa.edu.cn。

高振动频率可有效降低磨削力和表面粗糙度,而振幅变化影响较小。韩璐等^[21]发现超声辅助磨削能增大高温合金表面层显微硬度、残余压应力及晶粒细化层厚度。TAWAKOLI 等^[22]发现超声振动可降低砂轮磨损、磨削力和表面粗糙度,提升磨削效果。

综上所述,超声辅助磨削可降低磨削力并改善表面完整性,但其对镍基高温合金蜂窝封严环毛刺形成机制及控制研究匮乏。本文通过对比试验揭示超声辅助磨削(ultrasonic assisted grinding, UAG)与普通磨削(conventional grinding, CG)对毛刺形貌的影响规律,提出毛刺抑制策略,为提升航空密封件加工精度提供试验支撑。

1 试验条件

试验材料为 GH4169 镍基高温合金正六边形蜂窝封严环,单个蜂窝晶格单边壁厚为 $32.87\ \mu\text{m}$,焊接边壁厚为 $102.72\ \mu\text{m}$,如图 1 所示。

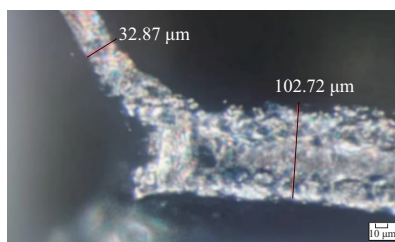


图 1 未加工前蜂窝壁厚

试验采用的砂轮直径为 $10\ \text{mm}$,分别为 80 目白刚玉砂轮和 230 目 CBN 砂轮。采用单点金刚石修整笔对砂轮进行修整,修整深度 $5\ \mu\text{m}$,修整进给速度 $50\ \text{mm/min}$ 。

试验在德玛吉 DMF180/7 五轴加工中心上开展,采用压板将零件固定安装于加工中心的工作台,砂轮通过弹簧夹头装夹于 UVSHSK63A 超声刀柄上,如图 2 所示。

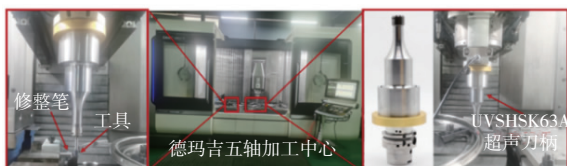


图 2 超声辅助磨削试验装置

采用三维视频显微镜和手持式显微镜对毛刺进行测量,观测并记录加工后的毛刺尺寸,如图 3 所示。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。

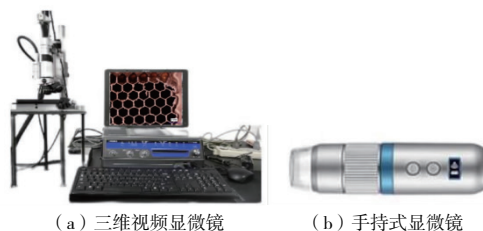


图 3 毛刺检测设备

2 磨削参数对毛刺尺寸的影响规律分析

对比研究不同磨削速度(砂轮外径线速度)、进给速度、磨削深度和宽度下,普通磨削和超声辅助磨削(振幅 $6\ \mu\text{m}$,频率 $20\ \text{kHz}$)的毛刺尺寸差异,采用 80 目白刚玉砂轮,加工参数如表 1 所示。

表 1 磨削工艺参数表

工艺参数	数值
磨削速度 $v_s/(m/s)$	3.14、4.18、5.23、6.28
进给速度 $v_w/(mm/min)$	100、400、700、1 000
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	2、5、8、11、14
磨削宽度 a_c/mm	0.2、0.6、1.0

2.1 磨削速度对毛刺尺寸的影响规律

当进给速度为 $400\ \text{mm/min}$ 、磨削宽度为 $0.2\ \text{mm}$ 、磨削深度为 $5\ \mu\text{m}$ 、磨削速度从 $3.14\ \text{m/s}$ 增大到 $6.28\ \text{m/s}$ 时,磨削速度对毛刺尺寸的影响如图 4 所示。

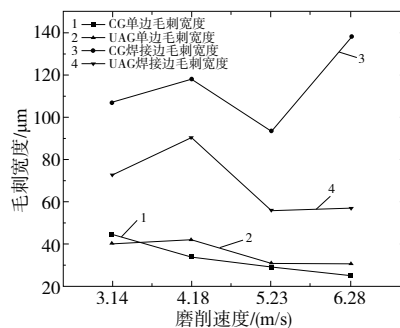


图 4 磨削速度对毛刺的影响

由图 4 可知,随磨削速度增大,普通磨削和超声辅助磨削后的单边毛刺尺寸,分别从 $44.42\ \mu\text{m}$ 和 $40.34\ \mu\text{m}$ 减至 $25.1\ \mu\text{m}$ 和 $30.7\ \mu\text{m}$,毛刺呈减小趋势。单边处两磨削方法相差不大,最大相差 $8\ \mu\text{m}$ 。焊接边处,超声辅助磨削的毛刺明显小于普通磨削。

2.2 进给速度对毛刺尺寸的影响规律

当磨削速度为 $5.23\ \text{m/s}$ 、磨削宽度为 $0.2\ \text{mm}$ 、

磨削深度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、进给速度从 400 mm/min 增大到 $1\text{ }000\text{ mm/min}$ 时,进给速度对毛刺的影响如图 5 所示。

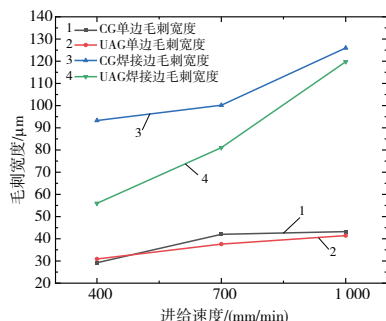


图 5 进给速度对毛刺的影响

由图 5 可知,随进给速度增大,单边与焊接边的普通磨削和超声辅助磨削后的毛刺宽度均呈增大趋势。单边两种磨削的毛刺宽度分别从 $29.21\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30.89\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $43.23\text{ }\mu\text{m}$ 和 $41.42\text{ }\mu\text{m}$, 低进给速度时,超声辅助磨削的焊接边毛刺宽度明显更小。

2.3 磨削深度对毛刺尺寸的影响规律

当磨削速度为 5.23 m/s 、磨削宽度为 0.2 mm 、进给速度为 100 mm/min 、磨削深度从 $2\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $14\text{ }\mu\text{m}$ 时,磨削深度对毛刺的影响如图 6 所示。

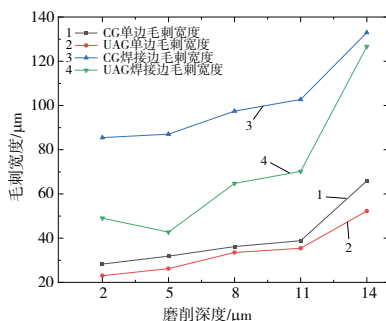


图 6 磨削深度对毛刺的影响

由图 6 可知,随磨削深度增大,单边和焊接边的毛刺宽度都增大,普通磨削和超声辅助磨削的毛刺宽度分别从 $28.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $23\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $65.9\text{ }\mu\text{m}$ 和 $52.6\text{ }\mu\text{m}$ 。超声辅助磨削的毛刺宽度更小,磨削深度为 $14\text{ }\mu\text{m}$ 时,二者单边毛刺宽度相差最大,达 $13.6\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.4 磨削宽度对毛刺尺寸的影响规律

当磨削速度为 5.23 m/s 、磨削深度为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、进给速度为 400 mm/min 、磨削宽度从 0.2 mm 增大到 1.0 mm 时,磨削宽度对毛刺影响如图 7 所示。

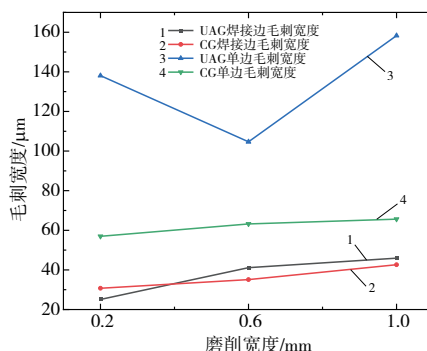


图 7 磨削宽度对毛刺的影响

由图 7 可知,随磨削宽度增大,普通磨削和超声辅助磨削后的毛刺宽度总体呈增大趋势,单边毛刺宽度分别从 $29.21\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30.73\text{ }\mu\text{m}$ 增至 $45.93\text{ }\mu\text{m}$ 和 $42.63\text{ }\mu\text{m}$ 。焊接边超声辅助磨削的毛刺宽度明显更小,二者单边差距较小,最大相差 $6\text{ }\mu\text{m}$ 。

上述研究表明,在不同磨削速度、进给速度、磨削深度和磨削宽度条件下,超声辅助磨削的毛刺宽度均小于普通磨削,说明该工艺更利于镍基高温合金蜂窝加工,能显著降低毛刺宽度。

3 超声辅助磨削工艺参数优化

为优选适用于镍基高温合金蜂窝超声辅助磨削的砂轮,采用陶瓷结合剂 CBN 砂轮做进一步试验,实验组号及工艺参数如表 2 所示。陶瓷结合剂 CBN 砂轮与白刚玉砂轮在相同磨削参数及工艺条件下的单边和焊接边毛刺宽度大小对比,如图 8 和图 9 所示。

表 2 实验组号及工艺参数表

组号	磨削速度/ (m/s)	进给速度/ (mm/min)	磨削宽度/ mm	磨削深度/ μm
1	5.23	100	0.2	2
2	5.23	100	0.2	5
3	5.23	100	0.2	8
4	5.23	100	0.2	11
5	5.23	100	0.2	14
6	5.23	400	0.2	5
7	5.23	700	0.2	5
8	5.23	1 000	0.2	5
9	3.14	400	0.2	5
10	4.18	400	0.2	5
11	6.28	400	0.2	5
12	5.23	400	0.6	5
13	5.23	400	1.0	5

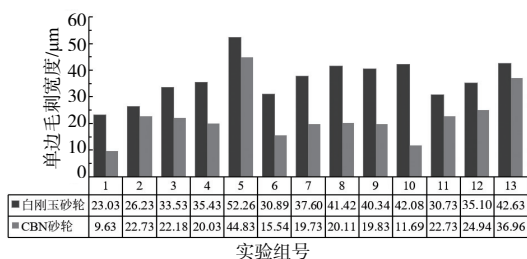


图8 单边毛刺宽度对比

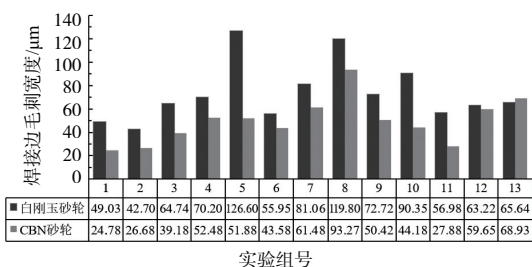


图9 焊接边毛刺宽度对比

从图8和图9中可以看出,相比于白刚玉砂轮,陶瓷结合剂CBN砂轮磨削后的蜂窝会产生更小的毛刺,单边毛刺宽度可减小5.9%~40.5%;焊接边毛刺宽度可减小2.2%~32.6%。由对比的试验结果可知,陶瓷结合剂CBN砂轮更适合镍基高温合金蜂窝的磨削加工;在综合考虑加工效率和毛刺宽度大小的条件下,选取磨削速度5.23 m/s、进给速度400 mm/min、磨削宽度0.2 mm、磨削深度5 μm为较优磨削参数组合。图10为此参数下的蜂窝表面形貌。

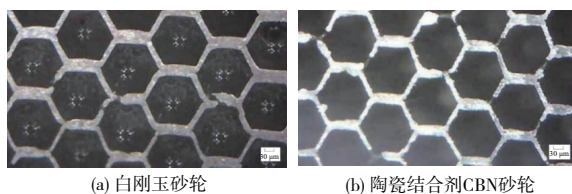


图10 不同砂轮磨削蜂窝表面形貌

图10(a)为白刚玉砂轮磨削后的表面形貌,通过测量可知其单边的毛刺宽度为30.89 μm,焊接边的毛刺宽度为55.95 μm;图10(b)为陶瓷结合剂CBN砂轮磨削后的表面形貌,通过测量可知其单边的毛刺宽度为15.54 μm,焊接边的毛刺宽度为43.58 μm。

综上所述,陶瓷结合剂CBN砂轮更适合用于超声辅助磨削,当磨削速度为5.23 m/s、进给速度为400 mm/min、磨削宽度为0.2 mm、磨削深度为5 μm时,既可保证高效磨削镍基高温合金蜂窝,

亦能得到较低的毛刺宽度,从而获得理想的表面质量。

4 结语

本文开展了面向GH4169镍基高温合金蜂窝的磨削加工毛刺优化研究,得到以下结论:

1) 相比于普通磨削加工,超声辅助磨削加工可改善磨削后产生的毛刺宽度;

2) 相比于白刚玉砂轮,陶瓷结合剂CBN砂轮更有益于高温合金蜂窝材料的磨削加工;

3) 当超声辅助磨削参数为磨削速度5.23 m/s、进给速度400 mm/min、磨削宽度0.2 mm、磨削深度5 μm时,可得到镍基高温合金蜂窝较小的毛刺尺寸,蜂窝单边的毛刺宽度为15.54 μm,焊接边的毛刺宽度为43.58 μm。

参考文献:

- [1] 岳喜山. 钛合金蜂窝夹层结构制造及其力热性能研究[D]. 西安:西北工业大学,2020.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张宁波,温斯涵,张景琪,等. 镍基高温合金增材制造技术及其在航天领域应用进展[J]. 航天制造技术,2024(2):7-15.
- [5] 吴宇,陈冰清,刘伟,等. 增材制造镍基高温合金在航空发动机与燃气轮机中的研究应用进展[J]. 航空材料学报,2024,44(1):31-45.
- [6] 吕绍瑜. 镍基高温合金高速铣削加工表面完整性研究[D]. 济南:山东大学,2013.
- [7] 齐旭东,杜连明,王蕾,等. 镍基高温合金微细电火花加工实验研究[J]. 电加工与模具,2024(6):8-12.
- [8] PIMENOV D Y, DA SILVA L R R, MACHADO A R, et al. A comprehensive review of machinability of difficult-to-machine alloys with advanced lubricating and cooling techniques[J]. Tribology International, 2024,196:109677.
- [9] 高铭昌,蒋永翔,孙宏昌,等. 不同硬质合金刀具车削GH4169时刀具性能的对比试验研究[J]. 工具技术,2024,58(10):31-37.
- [10] 黄文科. 镍基高温合金磨削毛刺形成机理及尺寸规律研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2024.
- [11] 卢晓红,武文毅,王文韬,等. 镍基高温合金Inconel718微铣削毛刺试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2015(1):1-3.
- [12] XIANG D H, WU B F, YAO Y L, et al. Ultrasonic

- longitudinal – torsional vibration – assisted cutting of Nomex[®] honeycomb – core composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1521-1530.
- [13] 黄文科, 曾鑫, 周胜. 镍基高温合金磨削出口毛刺的有限元分析[J]. 制造技术与机床, 2024(2): 129-135.
- [14] WANG H H, CHEN J, WANG C G, et al. Burr formation mechanism and morphological transformation critical conditions in grinding of nickel – based superalloy honeycomb cores[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(11): 434-451.
- [15] 童国顺. 超声辅助磨削镍基高温合金 GH4169 磨削温度、磨削力及残余应力研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- [16] ZHANG C D, CHEN T, DUAN Z Y, et al. Investigation on ultrasonic-assisted grinding of characteristics of C/SiC composites by brazed and electroplated diamond wheels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(5): 2171-2186.
- [17] 吴东江, 蔡昕彤, 李正, 等. C_t/C-SiC 烧蚀行为及激光复合超声磨削可行性研究[J]. 表面技术, 2024, 53(4): 162-174.
- [18] 许超, 袁信满, 关艳英, 等. 超声加工技术的应用及发展趋势[J]. 金属加工(冷加工), 2022(9): 1-6.
- [19] 王晨旭, 徐念伟, 张园, 等. 超声辅助磨削 GH4169 高温合金工艺研究[J]. 电加工与模具, 2022(1): 55-60.
- [20] 王儒康, 苏宏华, 何静远, 等. 超声振动辅助磨削 SiC_t/SiC 复合材料的频率和振幅影响研究[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4): 97-100.
- [21] 韩璐, 康仁科, 张园, 等. GH4169 超声辅助磨削表面完整性研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(5): 46-51.
- [22] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B, RASIFARD A. Wear behavior of a vitrified bond CBN wheel by ultrasonic – assisted creep feed profile grinding of inconel 718 [J]. Advanced Materials Research, 2011, 325: 122-127.

收稿日期: 2025 – 02 – 18

(上接第 34 页)

- [10] SONG K W, ZE Z, HU W, et al. Online self-adaptive proportional – integral – derivative control for brushless DC motor based on variable universe fuzzy inference system optimized by genetic algorithm[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 236(10): 5127-5142.
- [11] DENG L W, SUO H F, REN H N. Research on tension control system of winding machine based on fuzzy PID algorithm[C]//2021 40th Chinese Control Conference (CCC). Shanghai, China: IEEE, 2021: 2442-2447.
- [12] LU J S, CHENG M Y, SU K H, et al. Wire tension control of an automatic motor winding machine: an iterative learning sliding mode control approach [J]. Robotics and Computer – Integrated Manufacturing, 2018, 50: 50-62.
- [13] BOUCHIBA B, BOUSSERHANE I K, FELLAH M K, et al. Artificial neural network sliding mode control for multi – machine web winding system [J]. Revue Roumaine des Sciences Techniques, Serie Electrotechnique et Energetique, 2017, 62(1): 109-113.
- [14] 吴少斌. 基于 PLC 的玻纤缠绕机自动化控制系统设计[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- [15] 王浩源. 四轴联动高速缠绕机时间最优进给速度规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [16] 赵海峰. 复合材料压力容器缠绕及 UV 固化控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [17] 付杰, 秦长江, 胡自化, 等. 高效全自动数控缠绕机的设计开发[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 85-93.
- [18] 杨德盛. 新型托盘缠绕机回转台的结构优化研究[J]. 中国机械, 2025(1): 28-31.
- [19] 陈东方, 郭松, 任俊伟, 等. 高速缠绕程序编程方法研究[J]. 纤维复合材料, 2025, 42(1): 14-22.
- [20] 贾英锋, 任林. 数控纤维缠绕机的机械机构设计分析[J]. 产品可靠性报告, 2024(5): 85-86.
- [21] 任海昆. 橡胶挠性接管缠绕控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.

收稿日期: 2023 – 11 – 03