

面向涡轮盘榫槽凹圆弧表面的滚压参数优化

余昶锐 刘良宝 周靖刚 张 函 黄 东 张 宁 李 勋*

北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京,100191

摘要:为解决GH4169高温合金涡轮盘榫槽凹圆弧区域应力集中导致疲劳寿命缩短的问题,研究了滚压参数对加工表面完整性指标和试件疲劳性能的影响规律和机理。研究表明,增大滚压力可显著改善表面质量,提高试件的疲劳性能;增加滚压次数可进一步改善表面质量;提高滚压进给速度会减弱强化效果。滚压力425 N、滚压3次、滚压进给速度1 mm/s时,试件的最大疲劳循环次数为 6.84×10^5 ,较未强化试件提高了1倍。

关键词:滚压强化;GH4169高温合金;涡轮盘榫槽;表面完整性;疲劳寿命

中图分类号:TG376

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization of Roller Burnishing Parameters for Concave Circular-arc Surfaces of Turbine Disk Mortise Grooves

YU Changrui LIU Liangbao ZHOU Jinggang ZHANG Han HUANG Dong
ZHANG Ning LI Xun*

School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing, 100191

Abstract: To address the issues of reduced fatigue life in concave arc regions of GH4169 superalloy turbine disk mortise grooves due to stress concentration, the influences and mechanism of roller burnishing parameters on machined surface integrity indicators and specimen fatigue performance were investigated. The results demonstrate that, increasing the roller burnishing force significantly improves surface quality and enhances the fatigue performance of the specimens. Increasing the number of roller burnishing passes further improves surface quality, while increasing the roller burnishing feed rate diminishes the strengthening effect. Under the conditions of a roller burnishing force of 425 N, three roller burnishing passes, and a feed rate of 1 mm/s, the maximum fatigue cycles of the specimen reached 6.84×10^5 , which is double that of the non-strengthened specimen.

Key words: roller burnishing; GH4169 superalloy; turbine disk mortise groove; surface integrity; fatigue life

0 引言

GH4169高温合金在 $-253 \sim 650$ °C内具有良好的综合性能,常用于航空发动机涡轮盘叶片和榫槽的制造^[1-3]。涡轮盘榫槽是涡轮叶片与涡轮盘连接的关键结构,其“枞树”形轮廓在高速运转中承受离心力、高温及振动^[4],尽管榫槽的圆弧设计降低了应力集中,但榫槽凹圆弧在复合载荷作用下仍是应力显著集中的区域,导致榫槽凹圆弧区域成为疲劳裂纹的易发部位,缩短涡轮盘榫槽凹圆弧部位的疲劳寿命。研究表明,改善材料表面加工质量能有效提高构件的性能和疲劳寿命^[5-7],而优异的材料性能使GH4169高温合金成为典型的难加工材料^[8]。

目前,涡轮盘榫槽加工方法主要包括拉削、铣削、磨削和线切割等^[9-12],加工表面强化方法包括

喷丸强化、激光强化等^[13-14]。YAO等^[15]研究了SA砂轮和CBN砂轮对Inconel 718材料磨削表面完整性的影响,发现相同工艺参数下的SA砂轮磨削效果优于CBN砂轮。LI等^[16-18]设计和优化了榫槽仿形砂轮的结构和磨削加工工艺,采用线切割粗加工、磨削精加工的方式加工出国内首个磨削加工榫槽的涡轮盘。BUREK等^[19]通过优化线切割参数,使Inconel 718榫槽表面重铸层厚度降至 $0.8 \mu\text{m}$,疲劳寿命接近磨削水平。KLOCKE等^[20]采用涂层硬质合金刀具和低温冷却技术,通过高速铣削将GH4169铣削表面的粗糙度 R_a 控制在 $2.5 \mu\text{m}$ 以下,但疲劳性能仍低于磨削工艺。郑楠等^[21]对榫槽裂纹进行失效分析,发现喷丸强化后的断口疲劳源明显减少,疲劳寿命有所提高,但喷丸强化后的试件表现粗糙度明显变大。研究表明激光强化可在涡轮盘榫槽表面及内部产生有利的残余压应力层^[22-24],从而提高涡轮盘表面性

能,但该方法的工艺参数优化非常复杂。

涡轮盘榫槽凹圆弧结构表面的强化加工有喷丸强化、激光强化、滚压强化等。喷丸强化对榫槽凹圆弧处的强化效果较差,还会大幅增大榫槽的表面粗糙度,破坏榫槽与叶片榫齿的配合精度,难以满足设计精度的要求^[25-26]。榫槽凹圆弧的结构尺寸较小,激光束在狭小空间内难以精确垂直入射,且凹圆弧处无法稳定施加约束层(如水膜),因此,激光很难实现榫槽凹圆弧处的精准强化加工^[27-28]。滚压强化不仅能减小表面粗糙度,还能在零件表面引入较大的残余压应力,使零件的耐腐蚀性、耐磨性和抗疲劳性能得到明显改善,且设计特定的装置便能精确加工榫槽凹圆弧区域^[29]。

本文采用滚压强化加工榫槽凹圆弧表面,深入研究滚压参数对GH4169高温合金涡轮盘榫槽凹圆弧表面完整性的影响规律和机理,并基于滚压力、滚压次数、滚压进给速度等参数对试件疲劳性能的影响规律优化滚压加工参数,提高试件的疲劳性能,为涡轮盘榫槽的强化工艺提供参考。

1 试验方法与条件

1.1 试验材料

试验材料为高温合金GH4169,其力学性能如表1所示^[30]。

表1 高温合金GH4169的常温(25℃)力学性能

Tab.1 Mechanical properties of superalloy GH4169 at room temperature(25℃)

弹性模量 E / GPa	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	硬度 HV
205	1220	1440	425

1.2 榫槽结构等效试件

如图1所示,涡轮盘榫槽结构复杂且尺寸较小,不便于直接装夹在工作台上进行滚压强化和疲劳性能测试,因此,根据涡轮盘榫槽的结构特征和载荷分布特点,设计平板状榫槽的等效结构试件,如图2所示。等效结构试件优化中,调整榫槽,使其型面夹角的角平分线水平,并确保型面夹

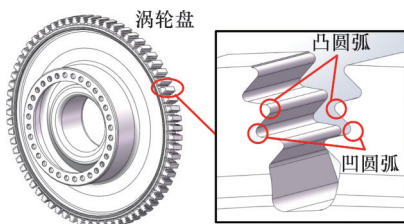


图1 涡轮盘榫槽凹圆弧结构示意图

Fig.1 Schematic of turbine disk tenon-groove concave arc

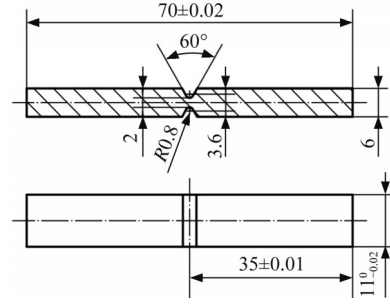


图2 等效试件结构图

Fig.2 Equivalent specimen structure schematic

角保持60°。先平磨长方体试件的6个面,再采用线切割在试件2个宽侧面的中间粗加工V形槽,最后使用电镀CBN磨削砂轮对V形槽进行两次磨削加工。

1.3 试件滚压方法

滚压强化采用直接装夹式滚压工具,滚压工具实物及滚压强化现场如图3所示。

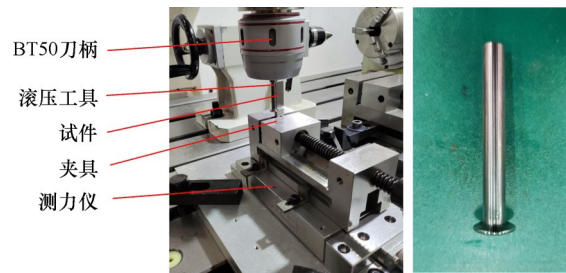


图3 滚压工具实物及滚压强化现场图

Fig.3 Roller burnishing tools and on-site images of the roller burnishing process

试验通过3个滚压参数控制滚压效果:①调节滚压工具与工件的过盈量来调控滚压力 F_r ;②控制主轴转速来确保滚压头线速度 v_s 与滚压进给速度 v_f 一致,从而调控 v_t ;③通过数控程序循环执行次数控制滚压次数 n_r 。过大的滚压力影响机床精度,降低涡轮盘榫槽的整体加工质量。滚压次数过大影响滚压工具的精度及零件的加工效率。常用的机床主轴最低转速为1 r/min。综合以上因素,选取的试验滚压强化参数如表2所示。为确保实验遵循单一变量原则,每个试件在加工后更换全新的滚压工具。

为减小滚压过程中的摩擦磨损,滚压强化和磨削加工均使用切削油进行冷却和润滑。此外,为充分体现滚压参数对加工表面完整性和疲劳寿命的影响,以滚压力、滚压次数、滚压进给速度为单一变量,选取滚压强化后的表面粗糙度、亚表面显微硬度、表面残余应力和表层金相组织为关键评估指标,通过分析上述指标的变化揭示不同滚压参数对试件疲劳寿命的影响规律和机理。

表2 滚压强化参数

Tab.2 Roller burnishing parameters

序号	滚压力 F_r/N	滚压进给速度 $v_f/(mm \cdot s^{-1})$	滚压次数 n_r
1	0	0	0
2	225	1	3
3	425	1	3
4	675	1	3
5	675	1	1
6	675	2	3
8	675	3	3

2 滚压表面完整性分析

2.1 表面形貌与粗糙度

采用超景深显微镜观测试件槽底的表面形貌;采用三维白光干涉表面形貌仪对槽底区域进行扫描成像,对涡轮盘榫槽进行曲面弯曲矫正,并观测加工表面粗糙度。为保证观测精度,试验前使用无水乙醇超声清洗试件表面。不同滚压参数处理后的试件槽底凹圆弧表面形貌如图4所示,滚压参数对加工试件表面粗糙度的影响如图5所示。

由图4a可看出,未滚压强化的试件槽底凹圆弧表面存在明显的磨削加工痕迹,CBN磨粒形成的平行纹理及几何峰谷清晰可见。由图4b、图4c、图5a可看出,滚压力 F_r 从225 N增大至675 N时,表层材料的塑性变形程度增大,磨削产生的峰谷结构逐渐被压平,表面质量得到显著改善,表面粗糙度 R_z 从 $5.34 \mu m$ 减小至 $1.41 \mu m$, R_a 从 $0.68 \mu m$ 减小至 $0.19 \mu m$ 。这是因为滚压力增大提高了表面单位面积的载荷,超过材料屈服极限时,塑性流动充分填充微观缺陷,表面质量得到改善。对比图4c、图4d可知,滚压次数 n_r 在试验范围内对表面质量的影响不明显。由图4c、图4e、图5c可看出,滚压进给速度 v_f 增大导致表面质量下降。这是因为随着滚压进给速度 v_f 的增大,滚压力 F_r 在试件表面单位面积的载荷作用时间缩短、做功量减小,滚压强化的效果减弱,表面形貌随之变差。

2.2 亚表面显微硬度与表面残余应力

采用显微硬度测量仪和纳米材料力学性能综合测试设备,针对不同塑性变形层深度的试件进行亚表面显微硬度的测量,试验最大加载力为50 mN,加载、卸载时间均为20 s,保载时间均为10 s。使用X射线衍射应力仪检测加工表面残余应力。滚压参数对试件亚表面显微硬度和表面残余应力的影响如图6所示。

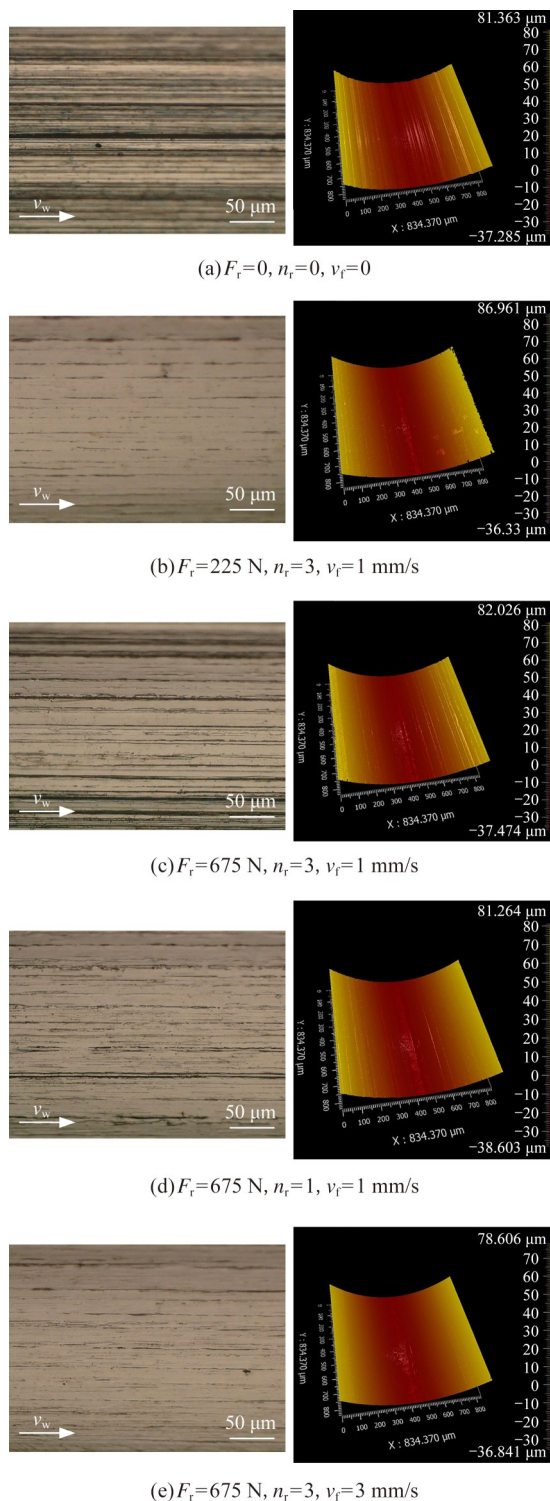
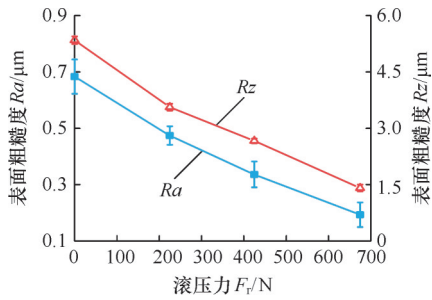


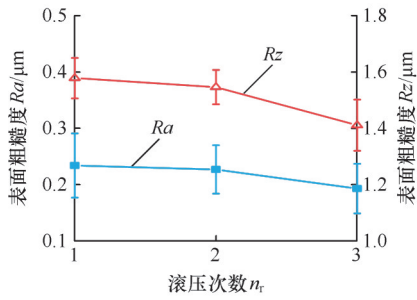
图4 表面形貌观测结果

Fig.4 Surface topography observation results

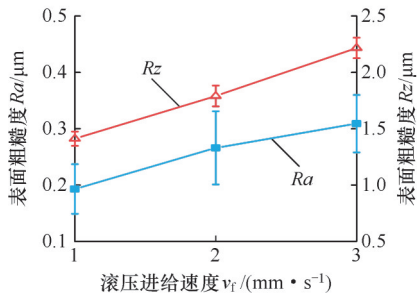
由图6可看出,表面残余应力在加工过程中均表现为压应力。滚压力 F_r 对试件亚表面显微硬度和表面残余应力 σ_{H1} 均有显著影响,且随 F_r 的增大,显微硬度和 σ_{H1} 增大。这是由于 F_r 增大导致试件表面塑性变形程度加大,使晶粒变得细小,亚表面显微硬度增大,表面残余应力 σ_{H1} 增大。随着滚压次数 n_r 增大,亚表面显微硬度和 σ_{H1} 均呈现增大趋势且增幅逐渐减小。这是因为随着 n_r 的增



(a) 滚压力 F_r 的影响 ($n_r=3, v_r=1 \text{ mm/s}$)



(b) 滚压次数 n_r 的影响 ($F_r=675 \text{ N}, v_r=1 \text{ mm/s}$)



(c) 滚压进给速度 v_r 的影响 ($F_r=675 \text{ N}, n_r=3$)

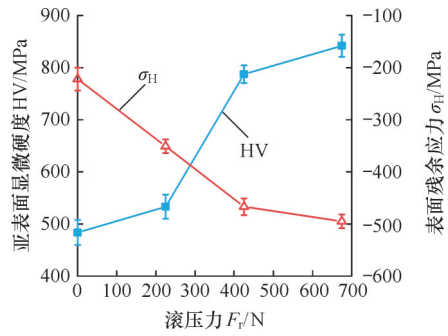
图5 滚压参数对表面粗糙度的影响
Fig.5 Effect of rolling parameters on surface roughness

大, 试件表层晶粒的扭曲变形程度逐渐积累, 组织再次变形弯曲的程度减小, 滚压强化的效果因此减弱。随着 v_r 的提高, 亚表面显微硬度和 σ_{H1} 呈现降低的趋势。这是因为 v_r 的增大会导致滚压头在单位面积的载荷作用时间缩短, F_r 的做功量也相应减少, 试件滚压强化效果减弱。

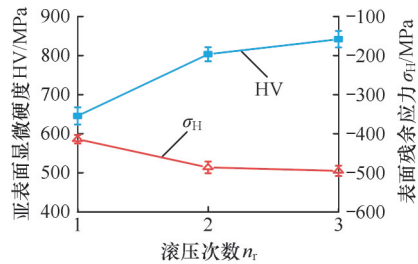
2.3 表层金相组织

在加工试件槽底最底端处进行线切割取样并制成金相镶嵌试样, 扫描电子显微镜(SEM)观测到的金相组织如图7所示。

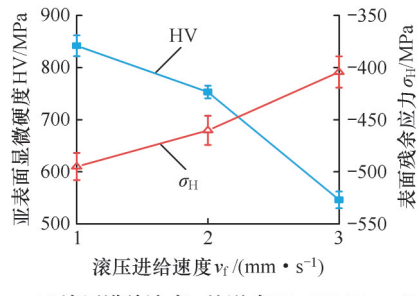
实验结果表明, 滚压强化可显著改变试件亚表层微观组织的形貌, 形貌改变具体表现为晶粒沿滚压进给速度方向纤维化拉长、晶粒弯曲畸变、晶粒细化等现象。相较于单纯磨削试件, 滚压试件表层塑性变形程度显著提高。如图7a所示, 磨削试件仅形成 $6.22 \mu\text{m}$ 的塑性变形层, 而滚压试件最小变形层深度达 $13.54 \mu\text{m}$ 。不同滚压参数对变形层的影响规律如下: 随着滚压力 F_r 的增



(a) 滚压力 F_r 的影响 ($n_r=3, v_r=1 \text{ mm/s}$)



(b) 滚压次数 n_r 的影响 ($F_r=675 \text{ N}, v_r=1 \text{ mm/s}$)



(c) 滚压进给速度 v_r 的影响 ($F_r=675 \text{ N}, n_r=3$)

图6 滚压参数对亚表面显微硬度与表面残余应力的影响
Fig.6 Effect of rolling parameters on subsurface microhardness and surface residual stress

大, 试件表面塑性变形层逐渐增大; F_r 增大至 425 N 时, 塑性变形层明显增大, 厚度达 $53.79 \mu\text{m}$, 此时材料表层发生了显著的塑性变形, 变形层组织由表及里呈梯度变化, 最表层晶粒沿进给方向被剧烈拉长并发生破碎; 随着变形层深度的增加, 晶粒的拉长程度逐渐减弱。 F_r 增大至 675 N 时, 塑性变形程度继续增大, 塑性变形层厚度超过 $80 \mu\text{m}$, 晶粒明显被拉长, 纤维化程度和破碎程度较高。观察图7d、图7e发现, 随着滚压次数 n_r 的增大, 试件表面塑性变形层厚度增加。观察图7e、图7f发现, 随着滚压进给速度 v_r 的增大, 试件表面塑性变形层厚度减小。

3 试件疲劳性能分析

疲劳寿命测试采用GPS100高频疲劳试验机进行测试。疲劳寿命测试加载正弦波形的应力载荷。试件装夹时, 确保夹具中对齐、无偏载, 并确保试件垂直方向装夹, 避免产生侧向撕裂, 干扰

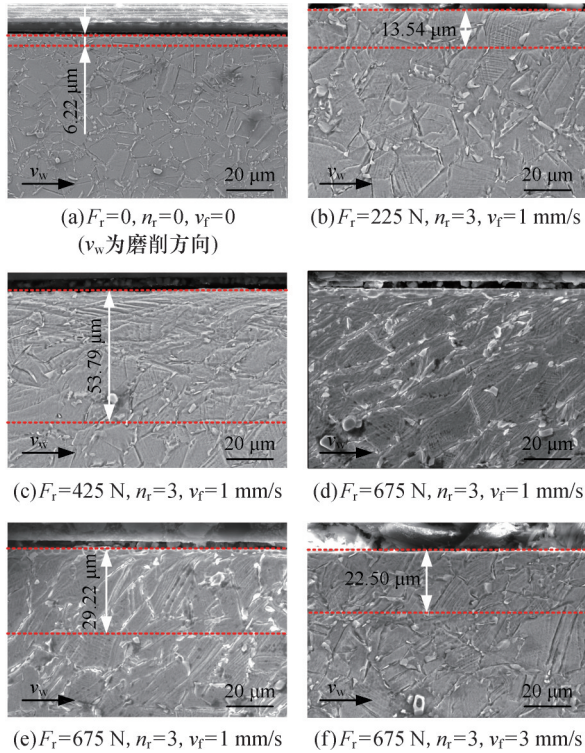


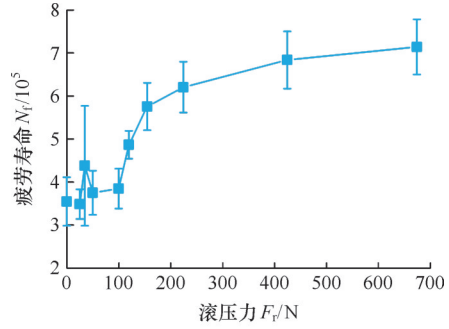
图7 表层金相组织观测结果

Fig.7 Surface layer metallographic observation results

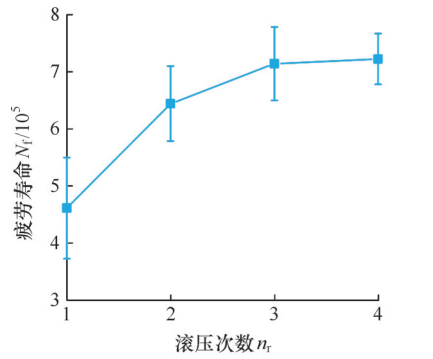
测试结果。试件拉断时即终止疲劳试验。

滚压参数对试件疲劳寿命的影响规律如图8所示。由图8a可看出,随着滚压力 F_r 增大,疲劳寿命 N_f 先缓慢增大再快速增大,最后增速变缓。 F_r 从0增至100 N时, N_f 仅增加 3.59×10^4 ,此时表面粗糙度较大且加工硬化程度较低; F_r 从100 N增至425 N时,试件表面塑性变形程度显著增大,几何峰谷压平,表面粗糙度减小,表面残余压应力和亚表面显微硬度增大,表面质量显著改善, N_f 增幅达到 2.99×10^5 ; F_r 从425 N增至675 N时,滚压强化的效果减弱, N_f 增幅仅有 3.05×10^4 。由图8b可看出, $F_r=675$ N, $v_r=1$ mm/s时,随着 n_r 的增大, N_f 呈现先快后慢的增长趋势。滚压次数 n_r 从1增至2时, N_f 增加了 1.82×10^5 ,这是因为表面塑性变形程度增大时,表面粗糙度减小,显微硬度和残余压应力增大;滚压次数 n_r 从3增至4时, N_f 仅增加 8.22×10^3 ,这是因为表面组织塑性变形程度积累导致重复滚压强化效果衰减。由图8c可看出, $F_r=675$ N, $n_r=3$ 时, N_f 随 v_r 的增大单调递减, v_r 由1 mm/s增至3 mm/s时, N_f 减小 2.32×10^5 ,这是因为 v_r 增大导致单位时间内 F_r 做功量减少,使塑性变形层深度减小、残余压应力降低,显微硬度明显减小,疲劳寿命随之缩短。

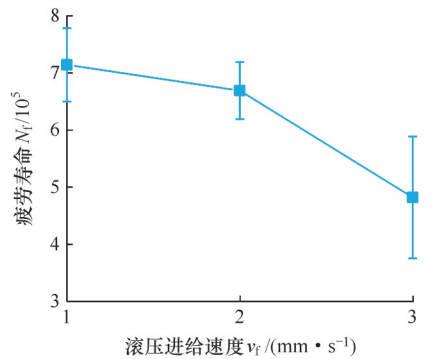
综上所述,在各项滚压参数中,滚压力 F_r 对



(a) 滚压力 F_r 的影响($n_r=3, v_r=1$ mm/s)



(b) 滚压次数 n_r 的影响($F_r=675$ N, $v_r=1$ mm/s)



(c) 滚压进给速度 v_r 的影响($F_r=675$ N, $n_r=3$)

图8 滚压参数对试件疲劳寿命的影响

Fig8 Effect of rolling parameters on specimen fatigue life

试件疲劳性能的影响最大,且 F_r 在试验范围内增大时, N_f 也增大,但提升的幅度随着 F_r 的增大而逐渐减小;滚压次数 n_r 的增大能够使 N_f 小幅度增大;滚压进给速度 v_r 的增大会使 N_f 减小。考虑到机床加工精度及零件加工效率的要求,优化滚压工艺参数如下:滚压力 $F_r=425$ N,滚压次数 $n_r=3$,滚压进给速度 $v_r=1$ mm/s,此时试件的疲劳寿命达到 $N_f=6.84 \times 10^5$,是未经滚压强化试件的2倍。

4 结论

1) 试验参数范围内,滚压力 F_r 对表面完整性的影响最显著。随着 F_r 的增大,表面粗糙度显著减小,显微硬度、塑性变形层厚度也随之增大,残

余压应力显著增大;滚压次数 n_r 的增大能进一步改善表面质量,但其影响程度相对较小;滚压进给速度 v_f 的增大使 F_r 单位面积的作用时间缩短,导致塑性变形层厚度减小,表面粗糙度增大,显微硬度和残余压应力减小。

2)滚压强化后,榫槽试件的疲劳寿命得到显著延长。试验参数范围内,试件的疲劳寿命受滚压力 F_r 的影响最大,并且随着 F_r 的增大,试件的疲劳性能提高, F_r 从100 N增至425 N时,疲劳寿命提升最显著。试件的疲劳寿命 N_f 随滚压次数 n_r 的增大单调递增,随滚压进给速度 v_f 的增大单调递减。

3)由试件疲劳实验结果得出,当滚压参数为滚压力 $F_r=425$ N,滚压次数 $n_r=3$,滚压进给速度 $v_f=1$ mm/s时,榫槽试件的疲劳性能最佳,其疲劳寿命达到 6.84×10^5 ,是未强化试件的2倍。

参考文献:

- [1] 杜金辉, 吕旭东, 董建新, 等. 国内变形高温合金研制进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1115-1132.
DU Jinhui, LYU Xudong, DONG Jianxin, et al. Research Progress of Wrought Superalloys in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(9): 1115-1132.
- [2] 蒋倩, 蒋立鹤, 黄云峰, 等. 镍基高温合金热处理工艺研究进展[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(6): 127-130.
JIANG Qian, JIANG Lihe, HUANG Yunfeng, et al. Research Progress on Heat Treatment Process of Nickel-based Super-alloys[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56(6): 127-130.
- [3] ZHAO Wang, HE Weifeng, LIANG Xiaoqing, et al. Enhancing Elevated-temperature Fretting Wear Performance of GH4169 by Tuning Wear Mechanism through Laser Shock Peening[J]. Tribology International, 2024, 192: 109215.
- [4] 李先国, 孙伦业, 高鑫, 等. 涡轮盘榫槽电火花线切割加工质量研究[J]. 机械工程师, 2024(3): 55-58.
LI Xianguo, SUN Lunye, GAO Xin, et al. Research on EDM Wire-cutting Quality of Turbine Disk Dovetail Slots[J]. Mechanical Engineer, 2024(3): 55-58.
- [5] 吴重军. 碳化硅磨削微观损伤机理及其高性能磨削技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
WU Chongjun. Study on Micro-damage Mechanism and High-performance Grinding Technology of Silicon Carbide[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [6] XUE Kai, CHEN Peng, LIU Wenbo, et al. Geometric Structures for Sialon Ceramic Solid End Mills and Its Performance in High-speed Milling of Nickel-based Superalloys[J]. Coatings, 2023, 13(9): 1483.
- [7] DHALE S R, DESHMUKH B B. WEDM with Different Diameter Wire Electrodes on Inconel 718: Improved Dimensional Deviation, Wire Consumption and Surface Quality[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 72: 896-903.
- [8] CHEN Mingsong, CHEN Quan, LOU Yumin, et al. Effect of Cooling Recrystallization Annealing Treatment on Properties of an Initial Aged Deformed GH4169 Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 831: 142232.
- [9] LI Lubin, WU Mingyang, LIU Li. The Research on the Cutting Test of Ni-based Superalloy GH4169 and Optimization of Process Parameters under High Pressure Cooling[J]. Integrated Ferroelectrics, 2021, 218(1): 83-96.
- [10] LI Gensheng, XIAN Chao, XIN Hongmin. Study on Cutting Chip in Milling GH4169 with Indexable Disc Cutter[J]. Materials, 2021, 14(11): 3135.
- [11] YIN Xiaoming, LI Xun, LIU Yihang, et al. Surface Integrity and Fatigue Life of Inconel 718 by Ultrasonic Peening Milling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 1392-1409.
- [12] 丁文锋, 李本凯, 傅玉灿, 等. 涡轮盘榫槽加工技术现状与展望[J]. 中国机械工程, 2021, 32(23): 2785-2798.
DING Wenfeng, LI Benkai, FU Yucan, et al. Research Status and Development Prospect of Machining Technology for Turbine Disc Slots[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(23): 2785-2798.
- [13] 任小平. 高温合金 GH4169 车削加工表面完整性及抗疲劳加工工艺研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
REN Xiaoping. Research on Surface Integrity and Anti-fatigue Machining Process in Turning of Superalloy GH4169[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [14] 朱然. 平顶光束多点激光冲击薄壁件的强化与变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHU Ran. Research on Strengthening and Deformation of Thin-walled Parts by Multi-point Laser Shock Peening with Flat-Top Beam[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [15] YAO C F, JIN Q C, HUANG X C, et al. Research on Surface Integrity of Grinding Inconel718[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(5): 1019-1030.
- [16] LI Xun, QIN Bin, WANG Ziming, et al. Grinding of Fir Tree Slots of Powder Metallurgy Superalloy FGH96 Using Profiled Electroplated CBN Wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(1): 311-317.
- [17] WANG Haining, LI Xun, WANG Ziming, et al. Influence of Electroplated CBN Wheel Wear on Grinding Surface Morphology of Powder Metallurgy Superalloy FGH96[J]. Materials, 2020, 13(4): 1005.
- [18] WANG Ziming, WANG Haining, LI Xun, et al. Surface Integrity of Powder Metallurgy Superalloy FGH96 Affected by Grinding with Electroplated CBN Wheel[J]. Procedia CIRP, 2020, 87: 204-209.
- [19] BUREK J, BABIARZ R, BUK J, et al. The Accuracy of Finishing WEDM of Inconel 718 Turbine Disc Fir Tree Slots[J]. Materials, 2021, 14(3): 562.
- [20] KLOCKE F, VOGTEL P, GIERLINGS S, et al. Broaching of Inconel 718 with Cemented Carbide[J]. Production Engineering, 2013, 7(6): 593-600.
- [21] 郑楠, 于广娜, 刘晓哲, 等. 涡轮盘榫槽裂纹失效分析及喷丸强化改进[J]. 金属热处理, 2019, 44(3): 237-241.
ZHENG Nan, YU Guangna, LIU Xiaozhe, et al. Crack Failure Analysis and Shot Peening Improvement for Turbine Disc Mortise[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(3): 237-241.
- [22] 瞿祥明. 直升机涡轮盘榫槽激光冲击强化抗高温微动疲劳研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
QU Xiangming. Research on Anti-high-temperature Fretting Fatigue of Helicopter Turbine Disk Dovetail Slot by Laser Shock Peening[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.