

重型燃气轮机透平叶片榫齿磨削缺陷检测与工艺改进

宋金榜 魏绍明

(中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 上海 200131)

摘要 重型燃气轮机透平叶片轮廓复杂且对尺寸精度与表面完整性要求极高,在榫齿磨削时常出现振纹、磨削烧伤及线性裂纹等缺陷。针对某型重型燃气轮机透平动叶片生产过程中出现的大面积荧光密集点状显示异常,揭示了缺陷的微观特征与成因。通过对整个生产流程的过程追溯,定位了冷却液交叉污染质量问题,提出并实施了冷却液彻底更换与系统清洁、增加热处理隔离垫片、工艺方案和参数调整等针对性改进措施。改进后批次工件经热冲击荧光检测,不再出现密集点状显示,磨削表面质量及尺寸精度均达到技术规范要求。

关键词 重型燃气轮机;透平叶片;榫齿磨削;工艺改进

中图分类号 TK473;TG132.3⁺²

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250424

Defect Analysis and Process Improvement of Turbine Blade Tenon Teeth Grinding for Heavy Duty Gas Turbines

SONG Jinbang, WEI Shaoming

(China United Gas Turbine Technology Co., Ltd., Shanghai 200131)

Abstract: Defects such as vibration marks, grinding burns and linear cracks often occur in turbine blades for heavy-duty gas turbines due to the complex blade profiles and extremely high requirements for dimensional accuracy and surface integrity. In view of large area of fluorescent dense dot-like indication anomalies that appear during the production of a certain type of heavy-duty gas turbine turbine rotor blade, the micro characteristics and causes were revealed. Through a process traceability of entire production process, the problem of cross-contamination of coolant was identified. Targeted improvement measures including complete coolant replacement and system cleaning, adding heat treatment isolation gaskets, and adjusting the process plan and parameters were proposed and implemented. The batch of workpieces after improvement is free of dense dot-like indication, which passes the thermal shock fluorescent inspection, and the grinding surface quality and dimensional accuracy meet the technical specifications.

Key Words: Heavy Duty Gas Turbine, Turbine Blades, Tenon Teeth Grinding, Process Improvement

重型燃气轮机因其联合循环发电效率高、污染排放少、投资成本低、建设周期短、用地与用水量少等优势,已成为我国不可或缺的战略能源装备。在高温高压、振动载荷、高温氧化、交变应力场及燃气腐蚀等复杂严酷环境下长期服役时,透平叶片作为重型燃气轮机的核心部件,需承受蠕变、疲劳及腐蚀引起的微观结构演变,因此其制造质量是提升机组服役性能与延长使用寿命的关键^[1-2]。

镍基高温合金凭借优异的室温与高温力学性能、出色的抗氧化与耐腐蚀能力,以及良好的抗疲劳、抗蠕变性能与组织稳定性,在燃气轮机透平叶片中得到

广泛应用^[3-4]。铸造镍基高温合金叶片的榫齿加工多采用“缓进-强磨”组合工艺,先以高精度成形金刚石滚轮修正砂轮,再以成型砂轮对毛坯铸件进行精磨。随着合金中强化相含量的增加,材料高温持久强度、抗剪切性能和抗磨蚀能力显著提升,但加工难度也大幅增加。该工艺以大切深、大接触面积为特征,加工过程易出现振动、热量积聚,常导致磨削面烧伤、裂纹产生,引起砂轮磨损严重及表面完整性下降等问题^[5-8]。

在国内某型重型燃气轮机透平动叶片的生产中,时效强化型镍基铸造高温合金具有优异的中高温综合

收稿日期:2025-11-16;修订日期:2025-12-08

第一作者:宋金榜,男,1990年出生,工程师,E-mail:songjinbang@spic.com.cn

通信作者:魏绍明,男,1986年出生,高级工程师,E-mail:weishaoming@spic.com.cn

引用格式:宋金榜,魏绍明. 重型燃气轮机透平叶片榫齿磨削缺陷检测与工艺改进[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(3):431-435.

SONG J B, WEI S M. Defect analysis and process improvement of turbine blade tenon teeth grinding for heavy duty gas turbines[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(3): 431-435.

性能和抗疲劳特性,但其高合金化特征易引发凝固偏析,导致塑性变形阻力大、机械加工性能差,加工硬化与切削力显著增大。同时,该合金导热性较差,热量难以迅速散失。近期某批次透平动叶片榫齿磨削后,经热冲击荧光检测发现叶片均出现密集点状荧光显示,且无法消除。本研究对榫齿部位的荧光显示位置进行显微组织分析,并对整个生产流程展开质量追溯。基于观察与追溯结果,制定并验证工艺改进方案,有效消除密集点状荧光现象,旨在为相关生产提供参考。

1 榫齿磨削表面完整性分析

磨削加工是通过砂轮上数量众多磨粒的共同作用来实现对工件材料的去除。磨削过程分为划擦阶段、犁耕阶段以及磨屑生成阶段,在此过程中磨粒切削刃与工件的切削深度逐渐增大然后迅速减小,见图1。

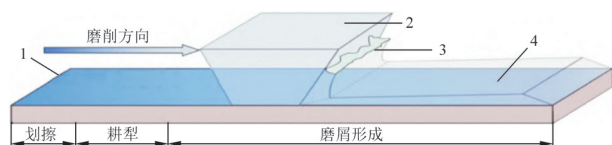


图1 单颗磨粒磨削过程^[9]

Fig.1 Grinding process of a single abrasive particle^[9]

1. 已加工表面 2. 磨粒 3. 磨屑 4. 工件

磨削过程中磨粒的切削作用是一个多重非线性的力热耦合过程,过程中的力和热主要来源于磨削区域内未变形材料的挤压、剪切、扭转等复合变形抗力,以及磨粒与工件的摩擦效应。力和温度是磨削过程中最重要的物理量,其变化直接影响加工精度、表面完整性和砂轮磨料磨损等,是造成强化相剥落、磨削面烧伤和裂纹等线性缺陷的直接原因。RUZZI R等^[10]采用SiC砂轮开展了铬镍铁合金磨削参数试验,发现当砂轮线速度增大,两方向的磨削力都减小,磨削方向对磨削力和比磨削能有显著影响。MIAO Q等^[11]开展了DD6涡轮叶片榫齿磨削试验,得出当磨削过程趋于榫齿目标轮廓时,磨削参数对磨削力的影响更大。张帅奇等^[12]通过开展DD5镍基单晶高温合金缓进给磨削试验,得出磨削深度对磨削力和磨削温度的影响最为显著,砂轮线速度次之,工件进给速度影响最小。

对于缓进给磨削力的量化评估,国内外研究者通过试验积累了大量数据,得出了通用的量化数学模型为:

$$F'_n = K_n v_s^{a_n} v_w^{\beta_n} a_p^{\gamma_n} \quad (1)$$

$$F'_t = K_t v_s^{a_t} v_w^{\beta_t} a_p^{\gamma_t}$$

式中, F'_n 为单位宽度法向磨削力,N/mm; F'_t 为单位宽度切向磨削力,N/mm; K 为常系数; v_s 为砂轮线速度,m/s; v_w 为工件进给速度,mm/min; a_p 为切深,mm。

杨长勇等^[13]通过开展CBN砂轮磨削K418试验研究,拟合出了陶瓷结合剂CBN砂轮磨削K418镍基铸造高温合金时磨削力的经验公式,相关系数 $R=0.985$,拟合效果较好。

$$F'_n = 2.74 v_s^{-0.57} v_w^{1.09} a_p^{0.98} \quad (2)$$

$$F'_t = 3.42 v_s^{-0.67} v_w^{0.85} a_p^{0.91} \quad (3)$$

张帅奇等^[12]采用半人工热电偶测温法在线测量了DD5平面磨削温度,基于试验数据建立了磨削参数与磨削温度 T 的经验回归公式为:

$$T = 34.808 v_s^{0.126} v_w^{0.105} a_p^{0.165} \quad (4)$$

拟合相关系数为0.945。相比于普通平面磨削,缓进给成形磨削的温度场分布更为复杂,如参数选择不合理、冷却液不满足要求或者冷却效果不佳等,极易产生烧伤等问题。奚欣欣等^[14]利用CAE技术分析了叶片榫头磨削的温度场。发现磨削温度齿顶要比齿根部位高出30%~40%,磨削温度和磨削深度、工件进给速度、砂轮线速度呈正相关关系。金璐^[15]在DZ22B铸造高温合金叶片榫齿磨削的基础上,开展了叶片榫齿成形磨削温度场以及磨削烧伤研究,建立了叶片榫齿结构磨削温度仿真模型,探讨了磨削烧伤临界条件。对于水基磨削液,造成膜沸腾现象的温度为100~130℃。当磨削液冷却失效时,磨削温度会急剧升高,试验过程中温度从65℃上升至1200℃,工件表面出现严重烧伤和裂纹。

2 榫齿磨削后产生的荧光缺陷

重型燃气轮机透平叶片磨削过程中,常出现的表面完整性问题包括振纹、烧伤、线性显示和加工后显现的铸件缺陷。在某型重型燃机第四级动叶榫齿磨削后,经过热冲击和荧光检测发现榫齿表面出现了大量密集点状显示,见图2,其中检测采用水洗型荧光剂渗透,渗透剂为ZL-67,三级灵敏度。通过目视检查可以看出,缺陷呈非明显的缩松特征,也非线性分布,为众多亮点构成,已超出规范技术要求。经超声清洗及百洁布擦拭后,点状荧光仍未消除。其中,关于榫齿磨削后的荧光检测要求缺陷的最大尺寸为0.6 mm,最大缺陷数不超过3个(20 mm×20 mm范围内)。

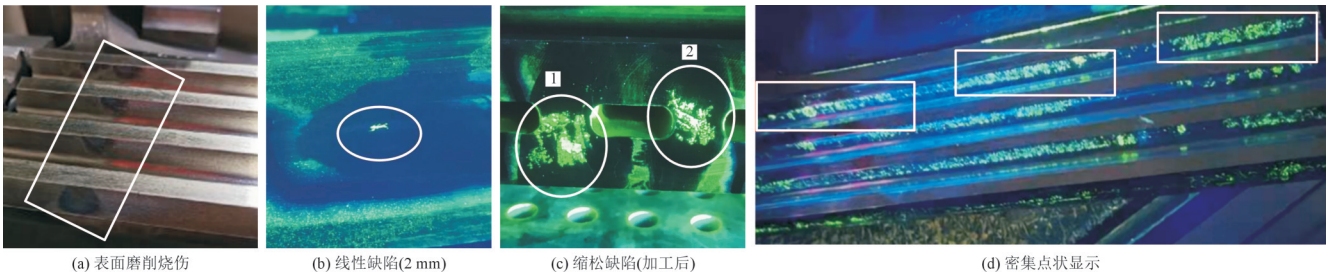


图2 榫齿磨削荧光显示问题及密集点状显示

Fig.2 Fluorescent indication defects during tooth grinding and dense dot-like indication

3 加工材料与工艺方案

3.1 加工材料

叶片材料为时效强化型镍基铸造高温合金,具有优异的中高温综合性能和抗疲劳特性,其中Ti、Al、W等元素含量较高,具有高合金化特征。热处理制度为热等静压、固溶($1\,250\pm 10$) $^{\circ}\text{C}$ +双时效[一次时效($1\,050\pm 10$) $^{\circ}\text{C}$,二次时效为(850 ± 10) $^{\circ}\text{C}$],在氩气保护下空冷。高合金化易导致凝固偏析,使合金塑性变形阻力大、机械加工性能差,加工硬化与切削力显著增大。同时,该合金导热性较低,热量难以迅速散失。

3.2 工艺方案

针对叶片榫齿与盘榫槽的配合特性,榫齿区域受力复杂,对加工精度和表面完整性均有较高要求。选用高精度强力缓进给磨削工艺,对齿形区域进行精加工。选用MGC260三轴数控强力磨床,加工过程中以铸件6点基准面及叶根两侧顶针孔进行精准定位,见图3。选用SiC材质砂轮,兼顾切削效率与表面质量。

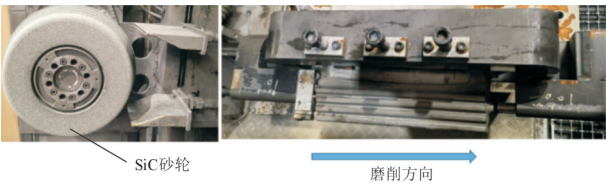


图3 叶片榫齿磨削工艺方案

Fig.3 Process scheme of tooth grinding

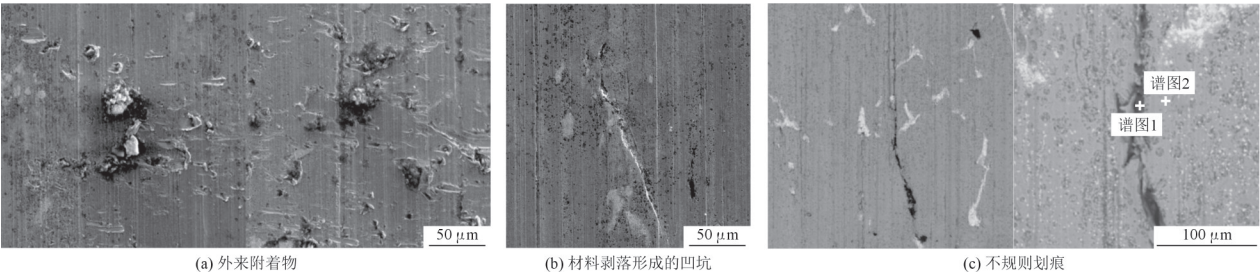


图5 零件表面SEM观察

Fig.5 SEM images of surface of component

4.2 结果分析与讨论

从图5可以看出,零件表面存在比较明显的外来物

4 缺陷分析

4.1 工艺试验结果

密集点状荧光显示既不同于榫齿磨削时常见的线性裂纹,也非典型的烧伤特征和铸件缺陷,其分布不规则,难以仅凭表面观察判定成因。采用Leica-DM4000M光学显微镜与VEGA3 TESCAN场发射扫描电镜(加速电压为20 kV)对齿形显示区域进行显微组织分析。

(1)低倍观察 采用光学显微镜观察比较明显的叶根齿形荧光显示部位,结果见图4。可以看出,部分特征可能为划痕,部分特征为区域点状缺陷(非铸件疏松、气孔等),可能为外来附着物或凹坑。

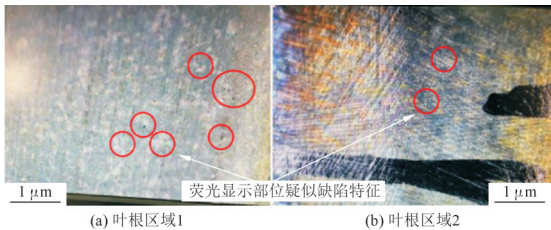


图4 荧光显示区域低倍分析

Fig.4 Low-magnification analysis of fluorescent indication area

(2)高倍观察 从榫齿试块中,挑选荧光显示比较集中的区域,进行扫描电镜观察,见图5。可以看出,荧光显示区域存在部分外来附着物、大量材料剥落形成的微小凹坑、部分划痕等缺陷特征。

附着。分析可能是叶片在加工过程中经历榫齿磨削、叶根端面和叶顶铣加工、热冲击($1\,080\,^{\circ}\text{C}$,保温15 min,

空冷)和超声清洗工序。分析整个工艺过程,机械加工中对榫齿的夹持和运输所造成的外来附着物通过超声清洗和百洁布擦拭等工序可以完全去除,不会影响荧光检测结果。热处理过程中,榫齿与工装直接接触,经 1 080 ℃ 的高温处理后,榫齿表面光滑,工装表面的一些金属颗粒与榫齿表面产生类似扩散焊的效果,附着在零件表面,通过常规清洗难以去除,以致影响荧光检测结果。

叶片中 γ' -Ni₃(Al, Ti)相和难熔金属(Ta+W+Mo)含量较高。Al和Ti是 γ' 相的主要形成元素,W、Mo主要进入 γ 相起到固溶强化作用,同时也促进形成碳化物相。合金的铸态组织中碳化物类型主要为初生MC型碳化物和次生的 $M_{23}C_6$ 型碳化物,碳化物的形貌复杂。

图6为合金铸态典型微观组织形貌^[16]。可以看出,合金枝晶粗大,在晶间有大量残余液相形成的共晶组织。枝晶干析出的 γ 相更细小更规则,枝晶间存在共晶组织,且出现较多块状碳化物。

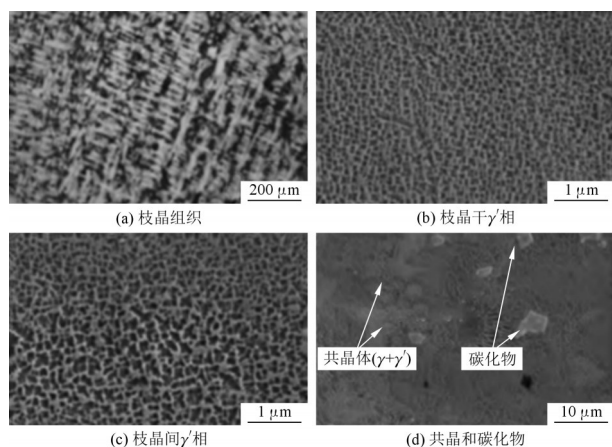


图6 合金的显微组织^[16]

Fig.6 Microstructure of alloy^[16]

从图5b和图5c可以看出,凹坑附近存在多处白色碳化物,凹坑处有明显碳化物剥落痕迹。可以看出,白色的碳化物为富含Hf、Ta和Ti的MC型碳化物。碳化物相的存在一方面通过阻碍晶界移动强化晶界,能显著提高合金的强度、硬度和抗蠕变性能,但同时具有脆、硬的特点,榫齿磨削加工过程中的切削力和温度较高,如果加工过程中参数设置不合理,散热和排屑状况较差,在磨粒的滑擦、犁耕和切削作用下,碳化物易剥落。因此,图5b中的凹坑应为加工过程中碳化物剥落产生,尺寸达到荧光显示级别。

对划痕中段和基体位置分别进行能谱分析,见表1。可以看出,与基体相比,划痕位置Al含量明显增高,初步判断划痕处存在Al₂O₃砂粒残留。此次磨削采用SiC砂轮,整个工艺过程中不存在Al₂O₃相关物质。对整个生产工序进行质量追溯,发现加工零件前采用Al₂O₃材质砂轮加工了其他叶片零件且未更换冷却液。

划痕走向沿着磨削方向分布,因此划痕产生的原因为过程中混入了部分Al₂O₃砂粒,随SiC砂轮一起运动挤压零件基体表面,在砂轮表面砂粒的综合作用下,产生了基本沿磨削方向且不完全规则的划痕。

表1 划痕处能谱分析结果

谱图	w _B	
	1(划痕)	2(基体)
C	15.41	—
O	43.76	7.48
Al	30.04	6.69
Ti	2.40	0.78
Cr	1.08	12.39
Co	—	11.40
Ni	7.31	52.86
W	—	8.4

综上,产生密集点状荧光显示的原因包括外来物附着、碳化物相剥落和混入Al₂O₃砂粒造成的划痕,其中主要为磨削工艺参数不合理造成的大量碳化物相剥落,尺寸达到荧光显示级别。

5 工艺改进

(1)外来物附着 在热冲击处理环节,于叶根齿形与工装夹具之间增设高温陶瓷垫片,防止叶片与工装直接接触;陶瓷垫片具有优异耐高温和绝缘性能,可有效隔离外来污染,保证热处理后叶片表面清洁。

(2)混入Al₂O₃砂粒造成划痕 在叶片磨削前彻底更换冷却液,清除循环系统管路、过滤器及过滤布等处残留的砂粒和杂质;关注循环水泵压力,以保证冷却剂流速,改善热量传递效率,降低工件表面温度。

(3)碳化物剥落 加工过程中造成的碳化物剥落为此次密集荧光点状显示的主要原因,工艺方案和参数的不合理造成的磨削力和温度与材料不适配是主要因素。为了合理调控磨削过程中的力和温度,可以制定工艺改进方案。

已有研究表明,对于镍基高温合金缓进给磨削过程中的切削力,切削深度和进给速度呈现正相关关系且切削深度的影响作用最为显著,砂轮线速度呈现负相关;对于磨削温度,磨削深度、工件进给速度、砂轮线速度均呈正相关。因此,为了在保证零件表面完整性要求的同时兼顾效率,工艺改进主要调整切削深度和进给速度。

改进前工艺方案见表2,其中粗加工采用电火花快走丝工艺,半精加工和精加工采用MGC260美盖勒磨床缓进给磨削。

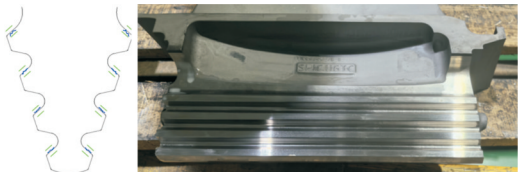
改进后的工艺方案见表3,半精加工采用电火花慢走丝工艺,精加工采用MGC260磨床缓进给磨削,下调切削深度和进给率数值。优化磨削参数后,磨削工序

表2 改进前工艺方案和磨削参数

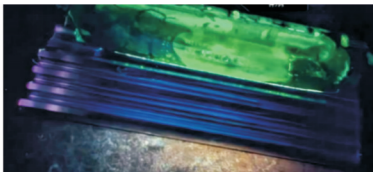
Tab.2 Process scheme and grinding parameters before improvement

加工类型	单边加工余量/mm	切削深度/mm	线速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	进给速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
粗加工	1.6~0.8		电火花快走丝	—
半精加工	0.8~0.3	0.2	15	90
精加工	0.3~0	0.1	15	90

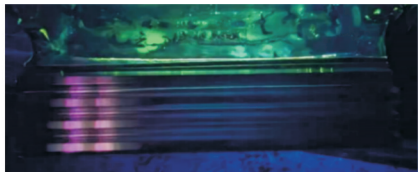
的工时会延长,工艺效率会明显降低,因此为了调控生产节拍,避免零件积压在榫齿缓进给磨削工序,采用电火花慢走丝来实现半精加工工序。其中,电火花慢走丝的轮廓精度可以达到0.003 mm以下,表面影响层可控制在0.03 mm以内,在电火花慢走丝后设置约0.4 mm的加工余量,可以满足下一步磨削精加工的尺寸要求和表面完整性要求。



(a) 榫齿轮廓检测结果



(b) 榫齿荧光检测结果(内弧面)



(c) 榫齿荧光检测结果(背弧面)

图7 工艺改进后零件尺寸和荧光检测结果

Fig.7 Dimensions of components and fluorescence detection results after improvement

6 结 论

(1)通过显微分析,明确了外来物附着、 Al_2O_3 砂粒挤压划痕以及碳化物剥落多重成因。
(2)通过生产过程质量追溯,定位了冷却液交叉污染、工艺参数不合理等根本问题。
(3)提出并实施了冷却液更换与系统清洁、热处理增加隔离垫片和改进工艺方案和磨削参数等综合性工艺改进措施。
(4)工艺改进后的实践证明,改进后叶片榫齿区不再出现密集点状荧光缺陷,加工表面质量和尺寸精度均达到规范要求。经过叶片首件批和批生产验证,磨削后的榫齿表面均能满足技术要求,工艺改进方案稳定有效,且加工效率提升了50%,在提升质量的同时效率也得到明显提升。

参 考 文 献

[1] 帅三三,李石磊,玄伟东,等.重型燃气轮机涡轮叶片材料及制造技术研究进展[J].热力透平,2022,51(3):161-169.
[2] 范学领,李定骏,吕伯文,等.国之重器,十载砥砺——重型燃气轮机制造基础研究进展[J].中国基础科学,2018,20(2):32-40.
[3] 郭建亭.高温合金在能源工业领域中的应用现状与发展[J].金属学报,2010,46(5):513-527.
[4] 张健,王莉,谢光,等.镍基单晶高温合金的研发进展[J].金属学报,2023,59(9):1 109-1 124.

表3 改进后的工艺方案和磨削参数

Tab.3 Process plan and grinding parameters after improvement

加工类型	单边加工余量/mm	切削深度/mm	线速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	进给速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
粗加工	1.6~0.8	—	电火花快走丝	—
半精加工	0.8~0.4	—	电火花慢走丝	—
精加工	0.4~0	0.05	15	60

工艺改进后,叶片经热冲击荧光检测(3级灵敏度),未出现密集点状荧光显示;榫齿轮廓度 $\leq \pm 0.05 \text{ mm}$;表面粗糙度 $Ra < 1.6 \mu\text{m}$;零件磨削表面完整性及尺寸精度均满足技术规范要求,见图7。采用改进后工艺方案开展了叶片首批25件和批生产100件,发现加工后的零件均未出现此次研究的大面积点状荧光显示,且零件加工效率由每班1件提升至1.5件,改进方案稳定有效,提升了质量和效率。

[5] 崔慧然,冯相如,任建伟.燃气轮机涡轮叶片制造工艺现状及发展方向[J].铸造,2022,71(2):143-150.
[6] 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):2 785-2 798.
[7] 姜雪梅,赵鹏飞.航空发动机关键转动部件加工技术[J].航空制造技术,2014(7):44-48.
[8] 刘颖,徐佳玉,肖贵坚,等.高温合金磨削热力耦合及其对表面完整性的影响研究现状[J].表面技术,2023,52(3):1-18.
[9] 田霖,傅玉灿,杨路,等.基于速度效应的高温合金高速超高速磨削成屑过程及磨削力研究[J].机械工程学报,2013,49(9):169-177.
[10] RUZZI R, SIL V R, SIL V L, et al. Influence of grinding parameters on Inconel 625 surface grinding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020,55:174-185.
[11] MIAO Q, DING W F, KUANG W J, et al. Grinding force and surface quality in creep feed profile grinding of turbine blade root of nickel-based superalloy with microcrystalline alumina abrasive wheels [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021,34(2):576-585.
[12] 张帅奇,杨忠学,张长春,等.DD5镍基单晶高温合金缓进磨削力和温度实验研究[J].航空工程进展,2021,12(4):80-89.
[13] 杨长勇,徐九华,顾坤坤,等.陶瓷CBN砂轮磨削镍基铸造高温合金K418磨削力研究[J].机械科学与技术,2014,33(5):657-661.
[14] 奚欣欣,陈涛,丁文锋.TiAl合金低压涡轮叶片榫头磨削温度场研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2020,40(5):17-22.
[15] 金璐.镍基高温合金复杂曲面成型磨削温度场及其功率监控研究[D].长沙:湖南大学,2023.
[16] 安宁,袁晓飞,牛永吉,等.Mar-M247铸造高温合金平衡析出相热力学计算与分析[J].航空材料学报,2018,38(6):19-28.

(编辑:彭瑾)