

引文格式: 秦彬, 王子铭, 于建华, 等. FGH96 涡轮盘榫槽成形磨削加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 74-79.

QIN Bin, WANG Ziming, YU Jianhua, et al. Research on profiled grinding technology of FGH96 turbine disk slot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 74-79.

FGH96 涡轮盘榫槽成形磨削加工技术研究*

秦彬¹, 王子铭², 于建华³, 张渝³, 李勋²

(1. 山东理工大学, 淄博 255000;

2. 北京航空航天大学, 北京 100191;

3. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

[摘要] 榫槽是航空发动机涡轮盘零件上重要的结构特征, 涡轮盘通过榫槽与叶片连接, 因此榫槽的轮廓精度和表面质量直接影响涡轮盘组件的性能和可靠性。通常制造涡轮盘的材料性能优异, 但加工性能极差。利用电镀 CBN 成形砂轮对 FGH96 涡轮盘榫槽进行精密磨削加工试验研究, 结果表明, 采用 600# 电镀 CBN 成形砂轮, 在转速 $n=48000$ r/min、磨削深度 $a_p=0.002$ mm、进给速度 $v_f=100$ mm/min 的条件下, 可以实现 FGH96 涡轮榫槽的精密磨削加工, 加工后榫槽整体轮廓尺寸和表面粗糙度均满足设计要求。同时, 在完成 4 个涡轮盘榫槽的磨削加工后, 砂轮仍具有较好的磨削能力。研究结果充分验证了电镀 CBN 成形砂轮可以实现 FGH96 涡轮盘榫槽的精密磨削加工, 为 FGH96 涡轮盘榫槽的精密加工提供了一种新的工艺方法。

关键词: 榫槽; 电镀 CBN 成形砂轮; 磨削; FGH96; 涡轮盘

Research on Profiled Grinding Technology of FGH96 Turbine Disk Slot

QIN Bin¹, WANG Ziming², YU Jianhua³, ZHANG Yu³, LI Xun²

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China;

3. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

[ABSTRACT] The slot is an important structural feature of aero-engine turbine disk. Turbine disk is connected with blades by slots. Therefore, the profile accuracy and surface quality of the slot directly affect the performance and reliability of turbine disk components. However, the materials of the turbine disk have excellent properties and extremely poor cutting performance. The electroplated CBN profiled grinding wheel is used to carry out precision grinding experiments on FGH96 turbine disk slots. The experimental results show that using 600# electroplated CBN profiled grinding wheel, under the conditions of parameters $n=48000$ r/min, $a_p=0.002$ mm, $v_f=100$ mm/min, can realize the precision grinding of FGH96 turbine slots. The profile dimensions and surface roughness of the machined slots meet the design requirements. At the same time, after grinding four turbine disk slots, the grinding wheel still has good grinding ability. The research results fully verify that the precision grinding of FGH96 turbine disk slots can be realized by electroplated CBN profiled grinding wheel, which provides a new technological method for precision machining of FGH96 turbine disk slots.

Keywords: Slot; Electroplated CBN profiled wheel; Grinding; FGH96; Turbine disk

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.074

* 基金项目: 国家科技重大专项(2018ZX04005001)。

粉末高温合金因具有较好的抗高温力学性能和抗疲劳蠕变性能,逐渐成为航空发动机高温承力动部件的首选材料。与第1代相比,我国第2代粉末高温合金FGH96具有更好的高温抗裂变能力,能够满足航空发动机高推重比、长寿命的要求,已经被广泛应用于制造航空发动机的涡轮盘部件^[1]。优异的材料性能也使粉末高温合金成为典型的难加工材料,尤其是针对涡轮盘枞树形榫槽的加工,机械加工难度更大^[2]。

目前,粉末高温合金涡轮盘榫槽以拉削加工为主^[3-4],拉削加工因其高效率的优势成为榫槽加工的首选方式。德国的Klocke等^[5]通过分析拉刀的磨损机理,提出了硬质合金机加刀齿的拉刀结构,进一步提高了拉刀的使用效率和加工能力,随着高速侧拉的出现,其团队对榫槽进行高速拉削试验,证明了高速拉削比普通拉削加工效率高,加工后榫槽表面质量好^[4]。但拉削加工的劣势也十分明显,如拉刀的尺寸较长、磨损快、成本高、制造周期长、工艺灵活性差等^[6]。

随着线切割技术的发展,精密线切割技术也慢慢被应用到涡轮盘榫槽的加工中^[7]。Klocke等^[5,8-10]深入研究了精密线切割技术在榫槽加工方面的应用问题,通过对现有设备的改造与升级,增加专用的控制系统,得到了较好的试验结果。精密线切割后的榫槽轮廓度能够达到 ± 0.1 mm,但榫槽表面粗糙度较大,在某些范围内,试件的疲劳性能与拉削加工完成的试件基本相当^[11]。郭伟彬等^[12]利用电火花加工粉末高温合金FGH96材料,通过SEM微观分析发现,夹杂物是造成粉末高温合金疲劳寿命降低的主要原因。

虽然精密线切割过程基本不受切削力的影响,但加工完成后,粉末高温合金榫槽表面会出现不同程度的重铸层,会影响高温承力动部件抗疲劳性能^[11],也限制了精密线切割技术在粉末高温合金涡轮盘榫槽领域的发展。随着高速精密磨削技术的发展,罗·罗公司的Aspinwall等^[13]明确指出拉削加工涡轮盘榫槽的缺点,提出利用超硬磨料砂轮对Udimet 720榫槽进行磨削加工,发现刀具磨损小、表面粗糙度低,证明了成形砂轮进行榫槽精密磨削加工可行性。美国的Curtis等^[14]提出了利用杯型砂轮进行榫槽结构成形磨削加工的原理性工艺方法,但是并未采用这种方法进行实际榫槽的磨削验证性试验。

通过以上研究成果可以发现,各种涡轮盘榫槽加工方法有不同的优缺点,也表明成型砂轮对榫槽加工的可能性,但是针对FGH96涡轮盘榫槽成形磨削加工方法及其加工精度的研究还很少。本文利用电镀CBN成形砂轮针对线切割粗加工后的榫槽进行精密磨削加工,通过单侧轮廓局部成形磨削榫槽试验验证该加工工艺方

式实现FGH96涡轮盘榫槽加工的可行性,为粉末冶金高温合金榫槽的精密加工提供了灵活、便捷且行之有效的工艺方法。

1 涡轮盘榫槽的成形磨削加工过程

1.1 榫槽结构分析

涡轮盘是典型的回转体结构。榫槽均匀分布在涡轮盘上,由直线段、凸圆弧、凹圆弧组成,如图1所示。在涡轮盘工作过程中,榫槽榫齿的下表面主要承受来自叶片的拉力,其表面有严格的质量要求。榫齿的齿根容易受应力集中影响而产生断裂,为了保证发动机的使用寿命,榫槽的轮廓精度和表面质量就变得至关重要。

1.2 砂轮结构设计

由图1可以看出,榫槽的曲面结构复杂、空间小,限制了刀具的退刀、进刀。因为榫槽的榫齿结构形状完全相同,成形砂轮可以根据榫齿的结构进行设计,其结构如图2所示,砂轮的轮廓与榫槽的局部轮廓完全一致。

1.3 榫槽成形磨削加工过程

榫槽进行精密磨削加工前,采用线切割的方式对榫槽进行粗加工,去除大量多余的材料。线切割加工后的榫槽表面质量较差,表面有重铸层存在,成形磨削需要把重铸层去除,并保证榫槽的表面质量和轮廓精度达到

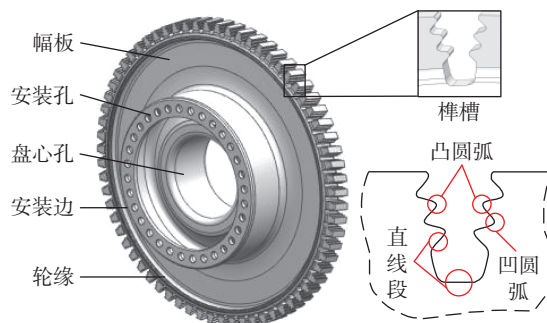


图1 涡轮盘和榫槽结构

Fig.1 Structure of turbine disk and slot



图2 电镀CBN成形砂轮

Fig.2 Electroplated CBN profiled grinding wheel

设计要求。榫槽线切割粗加工后,需要预留 0.1 mm 左右的加工余量,榫槽加工的工艺过程如图 3 所示。

加工过程中切削液需对砂轮和磨削区进行充分润滑和冷却,因此成形砂轮各处的直径均小于对应榫槽位置的宽度。为了保证榫槽两侧轮廓的对称性,砂轮采用“自下而上”多次平移的运动轨迹,且砂轮轮廓在磨削榫槽单侧轮廓时有相应的重叠,完成对榫槽两侧轮廓的精密磨削,运动轨迹如图 4 所示。

2 榫槽磨削验证试验

为了保证叶片榫头与榫槽的连接空隙以及涡轮盘的运转稳定性,榫槽的轮廓精度要求达到 0.012 mm,表面粗糙度 R_a 要求不大于 0.8 μm 。而要保证磨削精度,砂轮的选择是至关重要的,砂轮粒度号不同,磨粒尺寸

不一样,会对磨削加工表面粗糙度具有较大的影响,因此需要通过具体试验得到满足榫槽设计要求的砂轮粒度。

2.1 试验材料和砂轮

试验材料为粉末冶金高温合金 FGH96,其化学成分和力学性能如表 1 和 2 所示,材料的微观组织如图 5 所示。

试验使用的砂轮是电镀 CBN 棒状砂轮,砂轮的基体材料是硬质合金,磨粒通过电镀的方式附着在基体上,砂轮长 50 mm,直径为 $\Phi 6$ mm,磨削刃部分长 18 mm,如图 6 所示。

2.2 试验设备

试验中砂轮的线速度对于超硬磨料砂轮的磨削效果和磨削比至关重要,足够的线速度是保证零件特征结构进行精密加工的基础。普通机床的转速无法满足砂轮加工的要求,试验设备中需要附加高速主轴,主轴最高转速为 60000 r/min,功率为 1.5 kW,如图 7 所示。同时,加工过程中采用 Blasog grind HC 10 巴索全合成高速磨削油对磨削过程进行冷却和润滑,冷却液的出口压力为 4.5 MPa,流量为 80 L/min。

2.3 试验结果与分析

磨削加工中,砂轮的粒度是影响磨削表面粗糙度的关键因素,而在可行的磨削参数范围内,选择较高的转速、较小的进给速度和磨削深度会形成较小的表面粗糙度,因此采用表 3 中所示的磨削参数,并利用不同粒度号的电镀 CBN 砂轮对 FGH96 进行磨削试验,可以看出,表面粗糙度 R_a 和 R_z (R_a 表示轮廓算术平均偏差; R_z 表示微观不平度十点高度)均随着粒度号的增大而减小。当砂轮粒度号从 250# 增加至 400# 时, R_a 由 4.21 μm 降至 1.55 μm , R_z 由 23.33 μm 降至 8.98 μm ,砂轮粒度对表面粗糙度有明显影响;当砂轮粒度号从 400# 增加到 700# 时, R_a 由 1.55 μm 降至 0.54 μm , R_z 由 8.98 μm 降至 4.03 μm ,粒度号对表面粗糙度的影响趋势降低。当粒度号增大时,砂轮表面的磨粒变小,密度增大,砂轮在磨削表面留下沟痕就越浅,表面粗糙度减小。由试验结

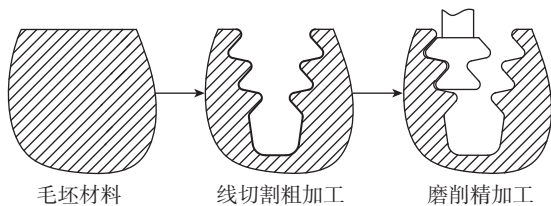
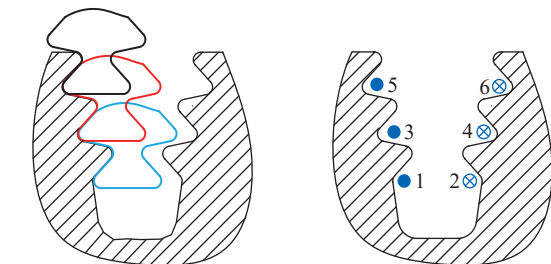


图 3 榫槽加工工艺过程
Fig.3 Machining process of slot



(a) 榫槽单面轮廓的磨削工艺 (b) 砂轮运动轨迹
注: 1~9代表走刀顺序; “●” “⊗”代表走刀方向。

图 4 榫槽单面轮廓的磨削工艺与砂轮运动轨迹
Fig.4 Grinding technology of single-sided profile of slot and motion track of grinding wheel

表 1 FGH96 的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of FGH96 (mass fraction)

Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Zr	C	Ni
16.20	13.10	4.03	4.06	2.18	3.66	0.71	0.035	0.04	余量

表 2 FGH96 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of FGH96

温度/ $^{\circ}\text{C}$	屈服强度 σ_y /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%	收缩率 ψ /%
20	1106	1520	22.2	30.3

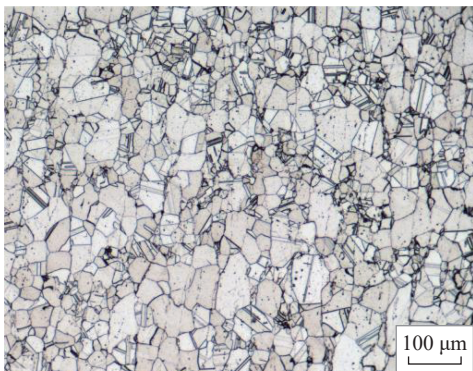


图5 FGH96 材料组织

Fig.5 Material microstructure of FGH96

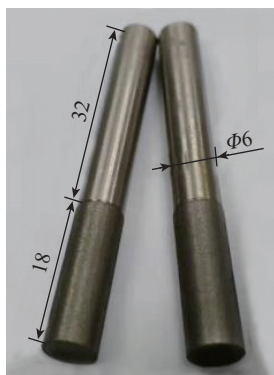


图6 电镀 CBN 砂轮 (mm)

Fig.6 Electroplated CBN grinding wheel (mm)

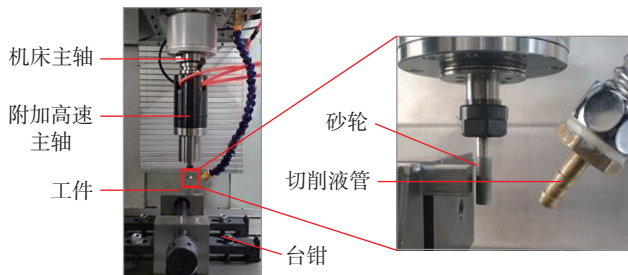


图7 高速主轴机床附件及磨削加工过程

Fig.7 High speed spindle and grinding process

果可知,为了满足 $R_a=0.8 \mu\text{m}$ 的要求,可以使用 600# 电镀 CBN 砂轮进行最后的精密磨削。

3 榫槽磨削试验

3.1 砂轮对刀

在榫槽的精密磨削过程中,榫槽的磨削基准选择和位置测量是一项十分重要工作,成形砂轮与榫槽粗加工后的相对位置如果出现偏差,会影响榫槽的加工效率,甚至会出现砂轮初始磨削量过大,造成砂轮和工件损坏,因此,加工前需要准确测量砂轮与榫槽加工基准之间的位置关系。本试验通过采用精密对刀块辅助对刀的方式,来保证两者相关位置的准确性。

线切割加工时保证试块的外轮廓与榫槽轮廓存在一定的关系。砂轮缓慢靠近精密对刀块,当砂轮与精密量块有轻微接触,确定砂轮与榫槽轮廓位置关系,依次完成图 8 中位置 1~3 的基准选取。根据砂轮的结构尺寸,得到砂轮编程基准点与榫槽之间的位置关系。

3.2 榫槽表面检测

试验采用棒状砂轮的优选参数对试块进行粗磨与精磨。粗磨参数: 400#, $n=48000 \text{ r/min}$, $a_p=0.005 \text{ mm}$, $v_f=200 \text{ mm/min}$ 。精磨参数: 600#, $n=48000 \text{ r/min}$, $a_p=0.002 \text{ mm}$, $v_f=100 \text{ mm/min}$ 。为了更加接近实际加工,加工路径如图 4 所示,实际加工如图 9 所示。

线切割可以去除大量的多余材料,并能够保证榫槽的轮廓精度,但线切割后的榫槽表面质量较差,如图 10 所示。从 SEM 图中可以看出,榫槽的表面存在重铸层,厚度接近 0.02 mm 。由于切削凹陷和重铸层堆积问题,对表面粗糙度产生了影响,表面粗糙度 R_a 为 $3.2 \mu\text{m}$ 。

榫槽磨削完成后,线切割留下的加工缺陷和重铸层已经去除,表面整齐均匀。磨削后没有发生组织变化,晶粒也没有因为剪切拉伸而产生纤维变形,如图 11 所示。

对成形砂轮加工后的榫槽表面使用共聚焦显微镜

表3 磨削加工条件和表面粗糙度测量结果

Table 3 Grinding conditions and measurement results of surface roughness

编号	砂轮粒度 /#	转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $v_f /$ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	磨削深度 a_p / mm	表面粗糙度	
					$R_a / \mu\text{m}$	$R_z / \mu\text{m}$
1	250	48000	100	0.002	4.21	23.33
2	300	48000	100	0.002	3.01	16.86
3	400	48000	100	0.002	1.55	8.98
4	600	48000	100	0.002	0.63	4.02
5	700	48000	100	0.002	0.54	4.03

测量,如图 12 所示。表面的加工沟痕深度均匀,表面平整、无磨屑堆积,榫槽的表面粗糙度 R_a 为 $0.56 \mu\text{m}$,与前期试验结果接近,满足实际加工要求。

试验过程中,如果切削液不能对砂轮和磨削区域进行充分冷却、润滑,会导致切屑黏附在砂轮表面,使砂轮失去了磨削能力,造成榫槽表面出现缺陷,如图 13 所示。

3.3 榫槽的尺寸精度检测

榫槽的轮廓结构主要包括齿面中心连线的倾斜角度、齿顶圆弧、齿根圆弧、对齿齿距等,其中榫槽的齿距精度直接影响叶片与榫槽的配合稳定性。其设计要求分别为上榫齿 6.55 mm 、下榫齿 3.34 mm ,公差要求为 $\pm 0.03 \text{ mm}$ 。为了能够准确测量上、下榫齿的齿距,利用高精度量块(精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$)对标准棒外圆面间的距离进行测量,如图 14 所示。对上榫齿齿距、下榫齿齿距分别测量 3 次,得到如表 4 所示的结果。可以看出,上榫齿齿距和下榫齿齿距的变动范围在 $6 \mu\text{m}$ 左右,证明榫

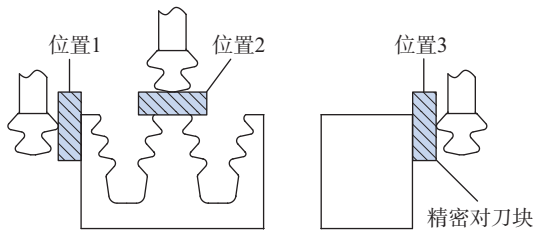


图 8 榫槽磨削加工的基准选取
Fig.8 Selection of grinding datum for slot

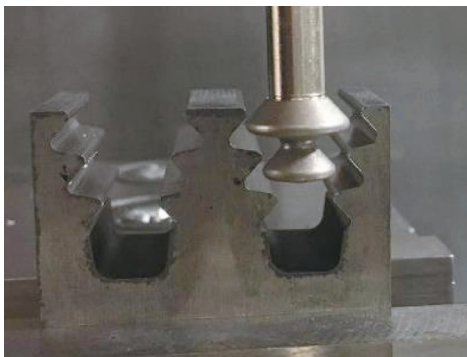


图 9 榫槽成形磨削加工
Fig.9 Profiled grinding of slot

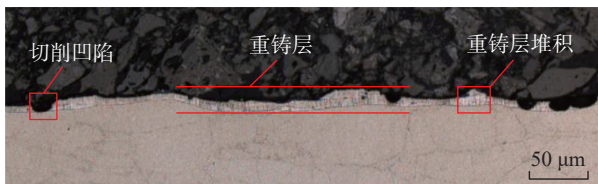


图 10 FGH96 线切割后的表面组织
Fig.10 Microstructure of FGH96 machined by wire-EDM

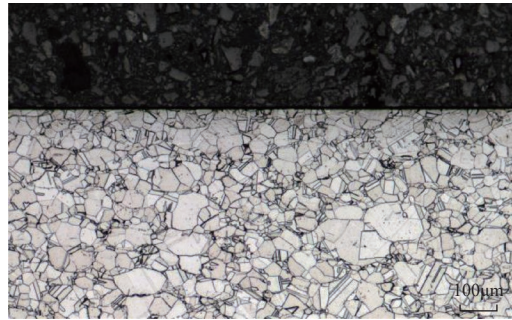


图 11 FGH96 磨削后的表面组织
Fig.11 Surface structure of FGH96 after grinding

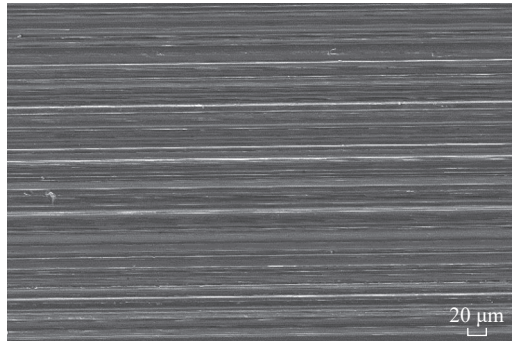
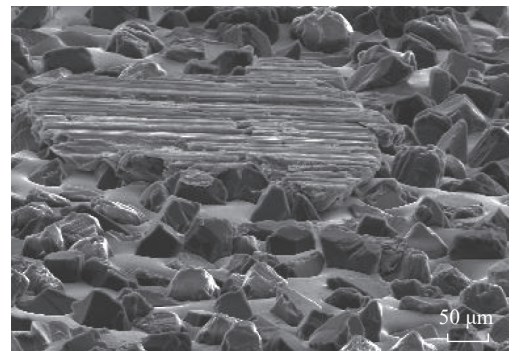
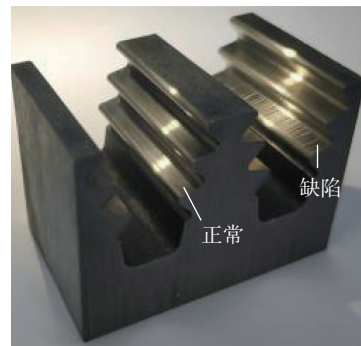


图 12 榫齿表面的微观形貌 ($R_a=0.56 \mu\text{m}$)
Fig.12 Micromorphology of slot surface ($R_a=0.56 \mu\text{m}$)



(a) 砂轮切屑堆积



(b) 榫槽表面缺陷

图 13 砂轮切屑堆积和榫槽表面缺陷
Fig.13 Chip accumulation of grinding wheel and grinding defects of slot

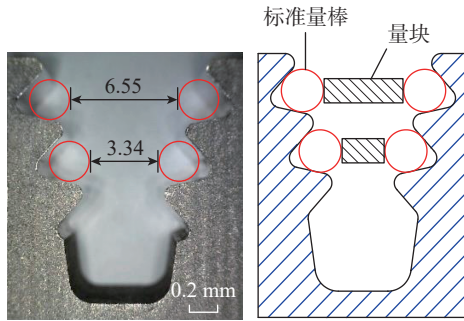


图 14 榫槽宽度的量棒测量方式 (mm)
Fig.14 Gauge rod measurement (mm)

表 4 榫槽轮廓测量

Table 4 Results of slot contour measurement mm

测量位置	实际测量值			设计要求
	实测值 1	实测值 2	实测值 3	
上榫齿齿距	6.560	6.565	6.564	6.55 ± 0.03
下榫齿齿距	3.345	3.350	3.352	3.34 ± 0.03

槽的尺寸稳定性较好,榫槽的齿距精度完全满足设计要求。测量值的微小变化主要受到两侧标准圆棒的圆度误差、机床直线轴的运动误差的影响,在加工、测量过程中很难避免。

4 结论

(1) 针对线切割粗加工后的涡轮盘榫槽,采用电镀 CBN 成形砂轮能够实现榫槽的精密磨削加工,磨削加工后榫槽轮廓的关键尺寸和表面粗糙度能够满足设计要求。

(2) 与线切割加工相比,FGH96 榫槽磨削加工后的表面没有重铸层,能够避免因重铸层内部存在裂纹而影响榫槽的疲劳性能的加工质量问题。

(3) 采用 400# 电镀 CBN 砂轮粗磨、600# 电镀 CBN 砂轮精磨的工艺方法能够满足涡轮盘榫槽的加工表面质量要求,精磨后榫槽的表面粗糙度 R_a 可以达到 $0.56 \mu\text{m}$,榫槽的关键结构尺寸完全满足设计要求,从而实现 FGH96 涡轮盘榫槽的精密、低成本加工,为新型号航空发动机涡轮盘的快速研制提供一种行之有效的工艺方法。

参考文献

[1] WANG Y, WANG X, ZHONG B, et al. Estimation of fatigue parameters in total strain life equation for powder metallurgy superalloy FGH96 and other metallic materials[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 122: 116–124.

[2] MIAO J, POLLOCK T M, JONES J W. Crystallographic fatigue crack initiation in nickel-based superalloy René 88DT at elevated temperature[J]. Acta Materialia, 2009, 57(20): 5964–5974.

[3] WANG G, WANG N, SUN S, et al. Design method of turbine fir-tree blade root tenon slot broach[J]. Advanced Materials Research, 2011, 305: 177–180.

[4] VOGTEL P, KLOCKE F, LUNG D. High performance machining of profiled slots in nickel-based-superalloys[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 54–59.

[5] KLOCKE F, DOEBBELER B, SEIMANN M, et al. Towards high productive roughing of profiled grooves in nickel based alloys[C]// Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul: ASME Turbo Expo, 2016: 56475.

[6] OZTURK O, BUDAK E. Modeling of broaching process for improved tool design[C]//Proceedings of the ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Washington: ASME, 2003: 42304.

[7] KLOCKE F, KLINK A, VESELOVAC D, et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes[J]. CIRP Annals, 2014, 63(2): 703–726.

[8] KLOCKE F, WELLING D, KLINK A, et al. Evaluation of advanced wire-EDM capabilities for the manufacture of fir tree slots in inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 430–435.

[9] KLOCKE F, WELLING D, KLINK A, et al. Quality assessment through in-process monitoring of wire-EDM for fir tree slot production[J]. Procedia CIRP, 2014, 24: 97–102.

[10] KLOCKE F, WELLING D, DIECKMANN J, et al. Developments in wire-EDM for the manufacturing of fir tree slots in turbine discs made of inconel 718[J]. Key Engineering Materials, 2012, 504–506: 1177–1182.

[11] WELLING D. Results of surface integrity and fatigue study of wire-EDM compared to broaching and grinding for demanding jet engine components made of inconel 718[J]. Procedia CIRP, 2014, 13(1): 339–344.

[12] 郭伟彬, 郭永丰, 钟斌. 电火花加工粉末高温合金 FGH96 表面微缺口技术研究[J]. 电加工与模具, 2008(3): 24–26.

GUO Weibin, GUO Yongfeng, ZHONG Bin. The study of EDM technology on surface micro defects of the P/M superalloy FGH96[J]. Electromachining & Mould, 2008(3): 24–26.

[13] ASPINWALL D K, SOO S L, CURTIS D T, et al. Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 335–338.

[14] CURTIS D T, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Electrochemical superabrasive machining of a nickel-based aeroengine alloy using mounted grinding points[J]. CIRP Annals, 2009, 58(1): 173–176.

通讯作者: 李勋, 副教授, 博士, 研究方向为精密机械制造。

(责编 七七)