

航空发动机整体叶盘磁力研磨光整实验

陈 燕, 周 锐, 牛凤丽, 李 昌

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院 先进磨削技术研究所, 辽宁 鞍山 114051)

摘 要: 磁力研磨工艺抛光整体叶盘时,工件与磁极干涉严重,用径向磁极代替轴向磁极加工可有效避免干涉,但研磨压力小、研磨效率低。通过对磁力研磨径向磁极加工机理和单个研磨粒子的微观受力情况详细分析得到:提高磁场强度变化率可有效增大磁力研磨效率。经有限元模拟分析发现磁极表面沿轴线方向开矩形槽可使磁场强度变化率提高。对镍基高温合金材质整体叶盘进行磁力研磨实验,并对实验数据分析研究得出:以径向磁极为工具的磁力研磨法可实现对整体叶盘的无干涉加工,磁极开矩形槽后磁力研磨效率可提高 31%,叶盘表面粗糙度值由研磨前的 $1.2\mu\text{m}$ 降至 $0.18\mu\text{m}$,验证了磁力研磨工艺对高效、高质量实现整体叶盘表面光整加工的可行性。

关 键 词: 整体叶盘; 加工纹理; 磁力研磨; 径向磁极; 开槽

中图分类号: V261.2⁺5

文献标志码: A

Experiment of surface finishing on aero-engine blisk by magnetic abrasive finishing

CHEN Yan, ZHOU Kun, NIU Feng-li, LI Chang

(Institute of Advanced Grinding Technology, School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning 114051, China)

Abstract: When finishing the blisk with the process of magnetic abrasive finishing, the interference between the workpiece and the magnetic pole is serious. Machining with radial magnetic pole instead of axial magnetic pole can effectively avoid interference, but the finishing pressure and the finishing efficiency are low. By analyzing the mechanism of radial magnetic abrasive finishing and the microscopic forces carried by the single magnetic abrasive particle, it derived that increasing the variance ratio of magnetic field intensity could significantly increase the magnetic abrasive finishing efficiency. With finite element simulation and analysis, it showed that slotting rectangular grooves along the axis direction on the surface of magnetic pole could improve the variance ratio of the magnetic field intensity. Through the magnetic abrasive finishing experiment to nickel-based superalloy blisk and analyzing the experimental data, it was concluded that the magnetic abrasive finishing with radial magnetic pole as the tool can realize finishing the blisk without interference, the magnetic abrasive finishing efficiency can be increased by 31% after the slotting rectangular grooves on the magnetic pole. The surface roughness value of the blisk was reduced from $1.2\mu\text{m}$ to $0.18\mu\text{m}$. It verified the feasibility that the magnetic abrasive finishing can realize finishing the blisk surface with high efficiency and quality.

Key words: blisk; machining surface texture; magnetic abrasive finishing; radial magnetic pole; slotting

收稿日期:2014-04-24

基金项目:国家自然科学基金(51105187)

作者简介:陈燕(1963—),女,四川达州人,教授、硕士生导师,博士,主要从事精密加工和精密测量技术研究。

随着航空航天产业的高速发展,整体叶盘零件的应用越来越广泛且呈现多样化、复杂化的发展趋势.整体叶盘通常由五轴数控铣削完成,不可避免地会在叶片表面产生铣削纹理,需经过进一步磨削处理才能稳定使用.但整体叶盘叶形结构复杂,相邻叶片间气流道间隙窄小^[1];此外,叶片的叶形必须达到某些数学特征的高精度,加工时对叶片表面涉及到的曲面造型具有极高的形状精度要求^[2].以上各因素决定了对叶盘表面完成机械研磨且达到所要求的高精度非常困难.常用的磨削加工方法多属刚性加工,或难以避免干涉,或在加工时易出现表面烧伤、表面完整性降低和形状精度破坏等缺陷^[3].寻求新工艺以实现整体叶盘高精度、高效率的研磨抛光显得尤为必要和紧迫^[4-5].西北工业大学段继豪等设计出柔性磨头自适应抛光技术,可实现对整体叶盘的自适应精密抛光,但叶根的自动抛光却无法完成;南京航空航天大学徐庆等用通道电解的方法加工整体叶盘,加工效率较高,但须对加工轨迹进行大量优化,且不利于工人身体健康^[1].磁力研磨法利用磁性磨粒在磁场的作用下沿磁力线方向聚集形成具有一定刚度的磁性磨粒刷(简称磁力刷),磁粒刷压附工件并相对工件高速旋转从而实现精密抛光.磁性磨粒作为磁力研磨的磨削工具,是由铁粒子和碳化硅经烧结、破碎、筛分而成,碳化硅颗粒微刃均布于铁粒子表面使其兼具导磁性和磨削性两种性能.用该方法加工整体叶盘可充分发挥其柔性、自锐性和自适应性等特点,但干涉严重、加工效率低等问题依然存在^[6-18].

本文通过用径向磁极代替轴向磁极加工以避免干涉碰撞,同时在磁极表面开矩形槽来提高磁力研磨效率.利用3-D超景深显微镜观察工件表面形貌,用表面粗糙度测量仪测量叶片表面粗糙度值.目前的实验结果表明:该方法比其他加工技术更能有效地降低整体叶盘叶片表面粗糙度值,提高零件的表面质量和加工效率.加工叶根区域时换用轴向磁极研磨压力较大,加工工艺略有差别,本文不再做进一步介绍.

1 径向磁力研磨机理及效率分析

1.1 径向磁力研磨机理分析

磁力研磨光整工艺的基本原理是磁性磨粒受到磁场力作用,会沿磁力线方向有规律地排列,形成磁粒刷仿形压附在工件表面,同时磁粒刷会在工件表面产生一定的研磨压力.当磁极带动磁粒

刷高速旋转时,磁性磨粒在工件表面产生挤压、摩擦,从而实现工件表面的研磨抛光.

综合分析整体叶盘的结构复杂性和磁力研磨的工艺特点,本文打破磁力研磨常用轴向磁极加工的研磨定式,用径向磁极代替轴向磁极进行研磨,原因是径向磁极磁力线沿半径方向分布,磁性磨粒在磁极侧面圆周聚集成刷,既可实现研磨加工又能很好地避免产生干涉.如图1所示为径向磁力研磨机理,将整体叶盘固定在回转工作台上,径向磁极靠近叶片表面并与其保持1~2 mm的加工间隙,将磁性磨粒与油性研磨液均匀混合后添加到加工间隙内.受磁极磁场作用,磁性磨粒会在加工间隙内沿着磁力线方向整齐排列聚集在磁极圆周表面,形成具有一定刚性的磁粒刷压附在叶片表面上.当磁极高速旋转时,磁场力作用抑制了磁性磨粒因离心力的作用向外飞散,使磁粒刷的刚性得到保持.与此同时,磁粒刷与叶片表面产生相对进给运动,从而实现整体叶盘的研磨抛光.

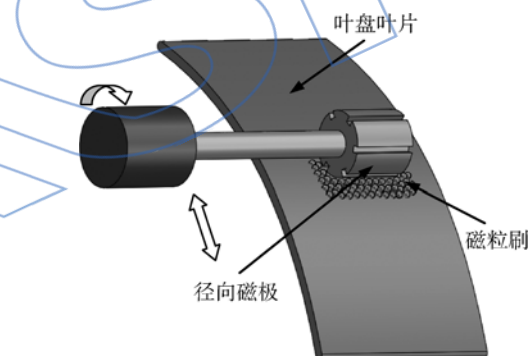


图1 径向磁力研磨机理

Fig. 1 Mechanism of radial magnetic abrasive finishing

径向磁力研磨加工时,磁极无论是做进给或者旋转运动,均是在机械手臂的带动下不断调整姿态,使磁极轴线始终与叶片表面保持近似平行,不会出现加工工具与工件表面干涉碰撞的现象,干涉问题最终得到解决.但该方法与轴向磁力研磨加工相比,研磨压力明显减小,研磨效率相对较低.

1.2 磁性磨粒微观受力

图2为径向磁力研磨时,单个磁性磨粒在研磨加工过程中的微观受力情况.由于磁性磨粒形状不规则,特将其简化为质点.相邻磁性磨粒间的相互作用力与磁场力相比较小,可忽略不计.图中向下的虚线表示磁场磁力线,横向的虚线表示垂直磁力线.

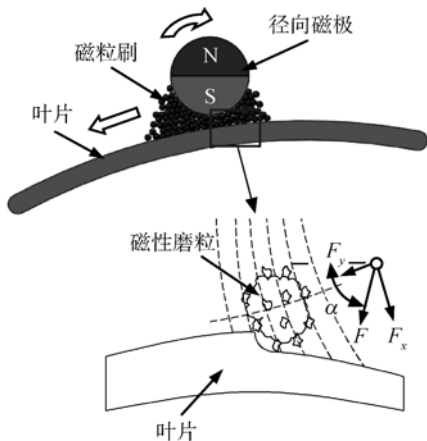


图 2 单个磁性磨粒受力分析示意图
Fig. 2 Sketch of force analysis for single magnetic abrasive particle

假设沿磁力线方向为 x 方向,与磁力线垂直的方向为 y 方向,则单个磁性磨粒在磁场中所受到的磁场力 F 可分解为沿磁力线方向的力 F_x 和垂直磁力线方向的力 F_y ,由于沿磁力线方向和垂直磁力线方向的磁场分布不均匀,因此磁场强度 H 对 x, y 方向的偏导数均不为零,由此可得

$$F_x = V\chi H \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

$$F_y = V\chi H \frac{\partial H}{\partial y} \quad (2)$$

式中 V 为磁性磨粒的体积 (m^3); χ 为磁性磨粒的磁化率; H 为磨粒所在磁场中所处位置的磁场强度 (A/m); $\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}$ 为 x, y 方向磁场强度变化率.

设总的磁场强度变化率为 $\frac{\partial H}{\partial l}$, 则有

$$\frac{\partial H}{\partial l} = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

则磁性磨粒在磁场作用下所受到的磁场力 F 可表示为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = V\chi H \frac{\partial H}{\partial l} \quad (4)$$

式中磁场力 F 不仅使磁性磨粒大量聚集形成具有一定刚度的磁粒刷,而且多个磁场力相互叠加共同作用使磁粒刷紧密压附在工件表面产生引起磨削效果的研磨压力 P 和周向力 F_t . 径向研磨时磁粒刷对工件表面所产生的研磨压力 P 和周向力 F_t 可表示为

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_m}\right) = F \sin \alpha \quad (5)$$

$$F_t = F \cos \alpha \quad (6)$$

式中 μ_m 为磁性磨粒的相对磁导率; μ_0 为空气的

相对磁导率; B 为磁场与导磁材料作用面处的磁感应强度 (T), $B = H\mu_0$; α 为磁场力方向与水平方向的夹角.

研磨压力 P 使磁性磨粒压入工件,周向力 F_t 使磁粒刷保持足够的刚度摩擦工件,相当于切削加工中的切向力,可实现工件表面的材料去除. 径向磁极加工时,磁粒刷在某一点处的材料去除量和研磨压力之间的关系可表示为

$$R(x, y) = kP(x, y)v(x, y) \quad (7)$$

式中 $R(x, y)$ 为磁粒刷在某加工点处的材料去除量 (mg); k 为与加工条件相关的比例常数; $P(x, y)$ 为磁粒刷作用在工件上的研磨压力 (N); $v(x, y)$ 为磁粒刷与工件之间的相对运动速度 (mm/s).

由式(7)可知,在允许的范围内,研磨压力 P 越大,磁性磨粒对整体叶盘表面的磨削力越大,单位时间工件材料去除量越大,工件的研磨效率也越高. 因此,增大研磨压力 P 是提高径向研磨效率的关键手段^[7]. 由式(5)分析得到研磨压力 P 与磁性磨粒的相对磁导率 μ_m 正相关并与磁感应强度 B 的平方和磁场力 F 成正比,因此可通过增大磁场力 F 、磁性磨粒的相对磁导率 μ_m 和磁感应强度 B 的方法增大研磨压力 P . 但是当磁极尺寸碍于干涉问题被限制以后,外部磁场达到饱和,磁感应强度 B 和磁性磨粒的相对磁导率 μ_m 在该条件下均达到极限状态,通过增大磁感应强度 B 和磨粒相对磁导率 μ_m 来提高研磨效率的方法并不可取. 因此,只能通过提高磁场力 F 来增大研磨压力 P . 将式(4)代入式(5)推得

$$P = V\chi H \frac{\partial H}{\partial l} \sin \alpha \quad (8)$$

由式(8)分析得到:可通过增大磁场强度变化率 $\partial H/\partial l$ 的方法增大研磨压力 P ,进而提高整体叶盘的研磨效率. 由此,本文提出在径向磁极表面沿轴向开多个凹槽以改变磁极表面磁场分布,增大磁场强度梯度和磁场强度变化率.

1.3 磁极开槽形状与比例

典型磁极开槽方式有矩形槽和 V 形槽,用 Ansys 软件模拟分析径向磁极开槽前和开不同槽时磁场的变化情况如图 3 所示,图中中心圆为径向磁极端面,外圆为磁介质即空气层,观察磁极周围磁场发现磁极开槽前后磁场变化明显,开槽形状不同,磁场分布也不相同. 图 3(a)为磁极开槽前磁场分布,最大磁感应强度在磁极两侧对称分布并向中间递减,图 3(b)和图 3(c)分别为磁极开矩形槽和 V 形槽时的磁场分布,图中磁极开槽后

最大磁感应强度散乱分布在所开槽的两侧槽肩, 局部磁感应强度较大.

形槽比开 V 形槽局部磁感应强度大, 且磁场变化更为剧烈, 平均磁感应强度变化率较大.

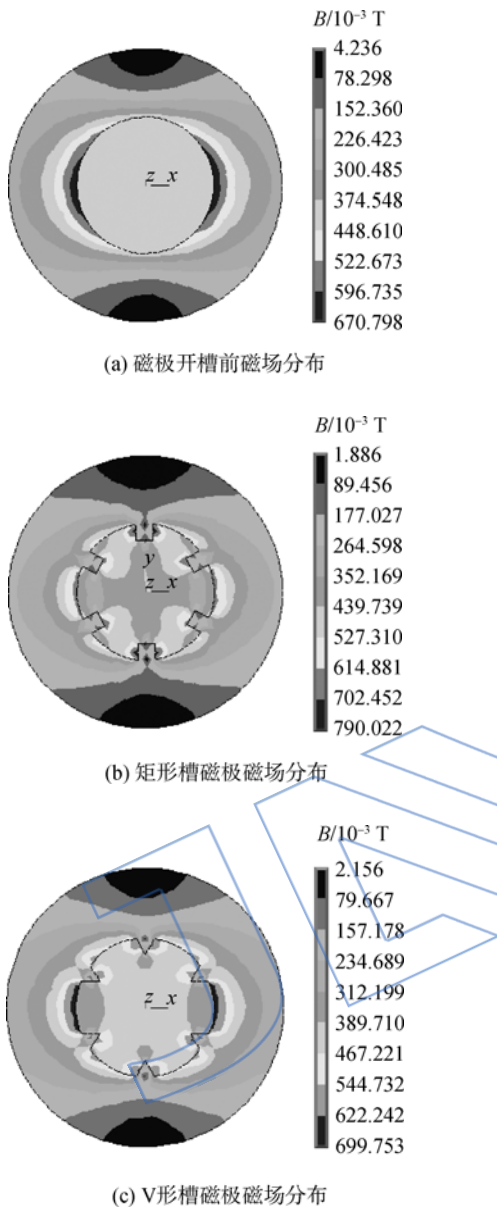


图 3 磁极开槽前后磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution before and after slotting on magnetic pole

由于磁力研磨时磁极与工件之间通常保留 1 mm 左右的加工间隙, 因此距磁极表面 1 mm 处设定路径, 求得该路径上磁感应强度合矢量变化情况如图 4 所示. 图中以曲线波峰、波谷的数量和变化幅度表示平均磁感应强度变化率的大小. 磁极开槽前, 除去磁感应强度最大处磁场变化较为剧烈, 其他区域磁感应强度无明显变化, 平均磁场变化率较小; 磁极开槽后, 整个磁极圆周区域均有明显的局部磁感应强度变化. 且比较发现: 磁极开矩

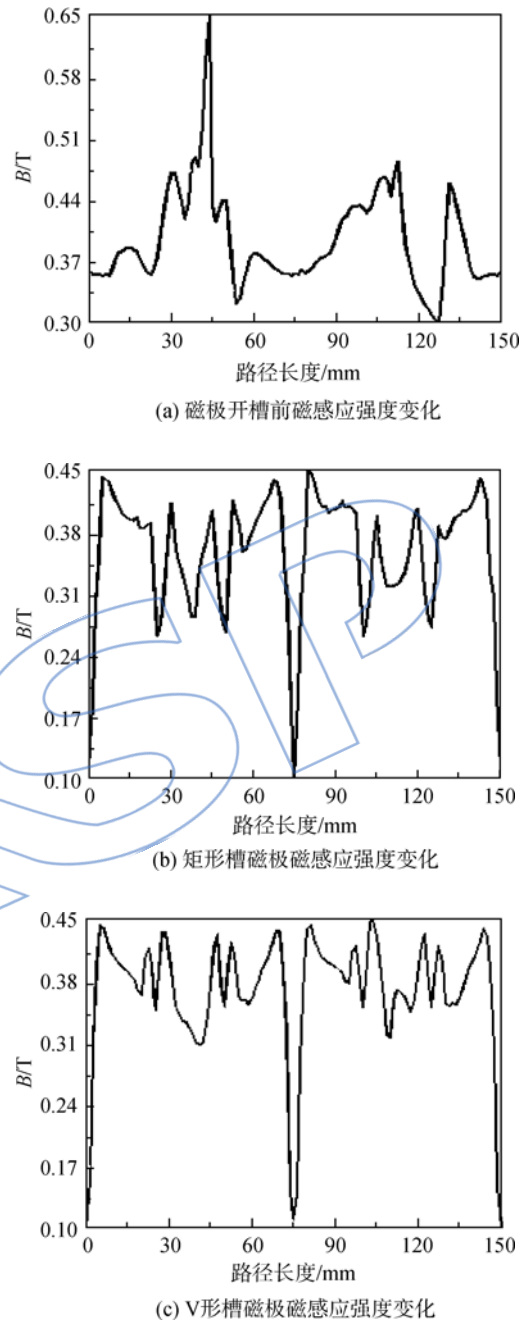


图 4 磁极表面 1 mm 处磁感应强度变化

Fig. 4 Variation of magnetic induction of 1 mm apart from the magnetic pole surface

形槽表面开矩形槽时, 槽不同的宽深比也会影响径向磁极的磁感应强度和研磨压力的大小, 根据有限元分析模拟数值计算得到磁极开矩形槽时不同宽深比的局部磁感应强度 B 和研磨压力 P 大小如表 1 所示. 比较发现当磁极表面所开矩形槽的宽深比为 1:1 时, 磁极的局部磁感应强度最大为 0.80 T, 研磨压力为 0.318 N.

表 1 矩形槽不同宽深比时的研磨压力

Table 1 Finishing pressure of different width and depth ratio of rectangular grooves

矩形槽宽深比	磁感应强度 B/T	研磨压力 P/N
3 : 1	0.72	0.237
2 : 1	0.70	0.223
1 : 1	0.80	0.318
1 : 2	0.65	0.197
1 : 3	0.66	0.204

由于磁感应强度分布不均,磁极产生局部聚磁效果,使得磁性磨粒更容易聚集成团,当工件与磁极间隙一定时,磁性磨粒聚集得越多,该点处的局部研磨压力越大;其次,槽肩处磁场强度变化越大,越不均匀,磁场强度梯度增大,磁场强度变化率增大.由式(8),磁场强度变化率增大使研磨压力 P 产生增量 ΔP,则单位时间某点处材料去除量 R 变为

$$R(x, y) = k[P(x, y) + \Delta P(x, y)]v(x, y) \quad (9)$$

最后,由图 3 中模拟数据显示,磁极开矩形槽以后最大磁感应强度由 0.68 T 增大至 0.80 T,增量值为 0.12 T,代入式(5)计算得到磁极开槽前后局部最大研磨压力分别为 $P_1 = 0.231 \text{ N}$, $P_2 = 0.318 \text{ N}$.由式(7)推导得出研磨效率提高为

$$\Delta\eta = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times 100\% = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100\% = 38\% \quad (10)$$

将 P_1, P_2 代入式(10)计算得到在磁极表面开矩形槽后,磁力研磨法对整体叶盘的研磨效率理论上可提高 38%.

2 磁力研磨加工实验

2.1 实验装置

本实验研究中使用的磁力研磨法加工整体叶盘的装置主体结构如图 5 所示,整个装置主要由六自由度机械手和径向磁力研磨机构组成.在加工整体叶盘时,整体叶盘经定位后固定在回转工作台上,调速电动机通过软轴把动力传递给磁力研磨系统,经内部锥齿轮改变传动方向使径向磁极产生高速旋转运动;同时通过控制机械手臂不断调整磁极的姿态来避免磁极与工件发生干涉碰撞;磁极带动磁粒刷做旋转和矩形往复的复合运

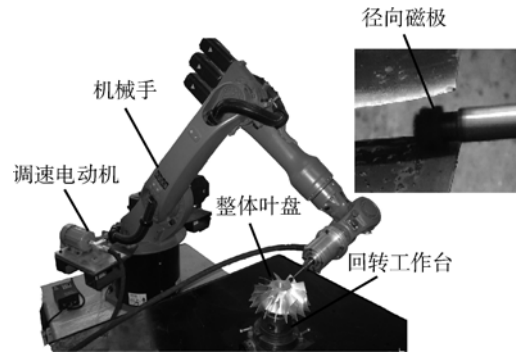


图 5 实验装置图

Fig. 5 Sketch of experimental device

动,实现对整体叶盘叶片表面的研磨抛光.该装置结构简单,操作方便,并且能够对整体叶盘表面起到良好研磨抛光效果.

2.2 实验条件

本实验的实验对象为镍基高温合金 GH4169 整体叶盘;抛光装置的磁极转速为 1500 r/min,磁极沿叶片表面的进给速度为 1 mm/s;磁极圆周与叶片表面之间的加工间隙为 1 mm;磁性磨粒采用粒径为 45 μm 的碳化硅与粒径为 75 μm 的铁粒子烧结而成,经破碎筛分后取粒径为 150 μm 的烧结磁性磨粒 5 g;油性研磨液 2 mL;3 种径向磁铁采用强磁性材料钕铁硼制成,分别为不开槽磁极、矩形槽磁极和 V 形槽磁极;加工时间均为 45 min,具体实验参数如表 2 所示.

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

参数	数值及说明
工件种类	整体叶盘
工件材质	镍基高温合金(GH4169)
磁性磨粒质量/g	5
油性研磨液体积/mL	2
磁极尺寸/mm	φ8×50
磁极转速/(r/min)	1500
进给速度/(mm/s)	1
加工间隙/mm	1
加工时间/min	45

3 实验结果分析

3.1 表面粗糙度和研磨效率分析

分别用不开槽磁极和开槽磁极研磨加工整体

叶盘 45 min, 用表面粗糙度测量仪测得叶片表面粗糙度值随加工时间的变化关系如图 6 所示. 从图中看出研磨前 5 min, 研磨效率均较高, 这是因为初始加工阶段, 工件表面纹理较深, 波峰波谷明显, 磁力研磨存在的尖点效应使工件表面的波峰被优先去除, 与波谷高度趋于一致, 表面粗糙度值下降速度较快; 加工 5 min 后, 由于表面纹理的波峰已被明显去除, 剩余待加工的波峰宽度增大, 需被去除的材料增多, 尖点效应逐渐减弱甚至消失, 因此磁极开槽前磁力研磨加工叶片表面, 表面粗糙度值的变化率逐渐趋于缓慢. 而在磁极表面开槽后局部磁场强度增大, 聚磁效果明显. 且磁场变化率增大使得磁力研磨压力增大, 工件表面去除率提高. 磁场强度梯度增大, 磁性磨料在加工间隙内更替更加频繁, 翻滚、摩擦加剧. 此外, 开槽后磁粒刷与磁极间摩擦阻力增大, 磨粒对磁极的附着作用增强, 因此在以后的 40 min 开槽磁极研磨效率明显优于不开槽磁极, 且矩形槽磁极的研磨效率高于 V 形槽磁极.

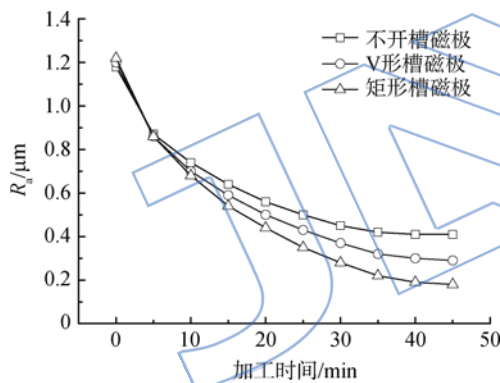


图 6 表面粗糙度值与加工时间的关系

Fig. 6 Surface roughness varying with finishing time

由图 6 可知, 用矩形槽磁极加工整体叶盘, 加工时间为 45 min, 叶片表面粗糙度值由 $R_a = 1.2 \mu\text{m}$ 降至 $R_a = 0.18 \mu\text{m}$, 且在 $R_a = 0.18 \mu\text{m}$ 左右趋于稳定; 用不开槽磁极加工时, 相同时间内工件表面粗糙度值仅被降至 $R_a = 0.40 \mu\text{m}$, 且下降速度逐渐减小. 可以证明对磁极表面开矩形槽可提高径向磁力研磨对整体叶盘的研磨效率. 通常用曲线的下降斜率代表磁力研磨效率, 则磁极开槽前后磁力研磨效率可分别表示为 η_1, η_2 , 由于研磨过程的起始阶段研磨效率均较高, 且最终均达到稳定状态, 因此取中间加工过程作为有效研磨效率进行对比, 计算得到实际研磨效率提高为

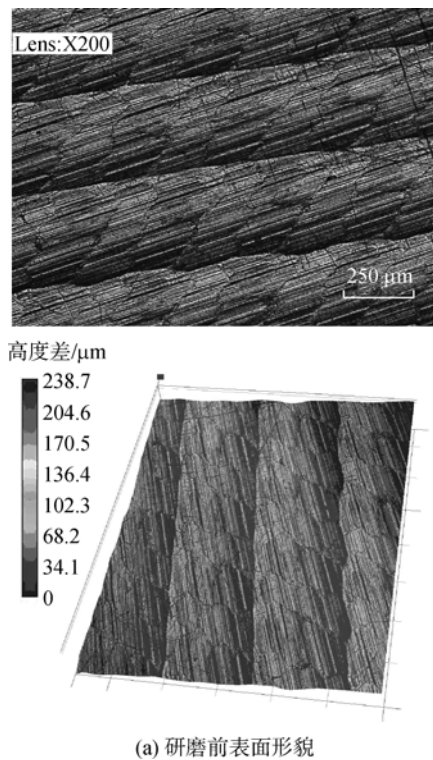
$$\Delta\eta = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} \quad (11)$$

将图 6 中各段曲线斜率分别代入式(11)求得平均斜率变化为 0.31, 即磁力研磨效率实际提高了 31%, 实验值与理论计算值相比有所减小, 这是由于在磁性磨粒微观受力中, 磁场力作用被重新分解为沿曲面法线的研磨压力 P 和沿曲面切线的周向力 F_t . 由式(5)、式(6)根据正弦、余弦曲线变化规律, 当 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时, $\sin \alpha$ 增大, $\cos \alpha$ 会相应减小, 因此磁极开槽后, 当磁性磨粒对工件的研磨压力 P 增大时, 周向力 F_t 必然会减小. 当 F_t 减小到一定程度, 难以克服磁粒刷与工件之间的摩擦阻力, 就会出现磁性磨粒脱离磁极束缚而滞留在工件表面的现象, 不仅影响磁力研磨效率而且会使磁极遭到急剧磨损. 因此, 开矩形槽时应合理控制开矩形槽的宽深比和开矩形槽大小, 在保证周向力 F_t 能够克服磁粒刷与工件之间摩擦阻力的前提下, 尽可能增大研磨压力 P .

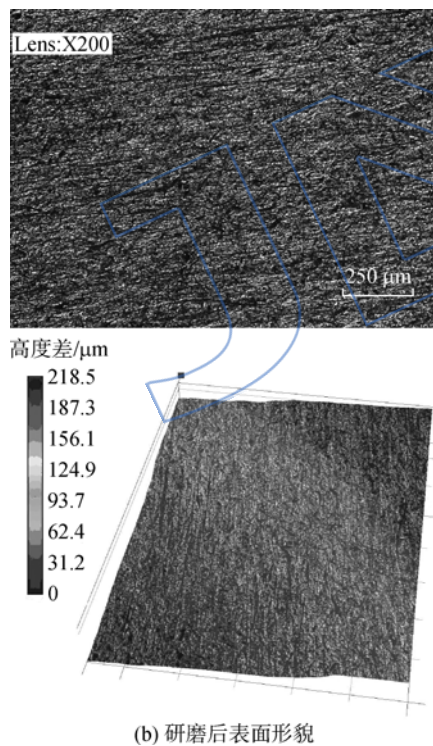
3.2 叶片表面形貌分析

如图 7 所示为整体叶盘经显微镜 200 倍放大后叶片的原始表面和研磨 45 min 后叶片表面形貌变化情况对比. 通过对比图 7(a)和图 7(b)可以看出, 研磨前铣削纹理清晰可见, 叶片表面整体轮廓模糊; 经磁力研磨 45 min 后, 整体叶盘叶片表面的微小裂纹被基本消除, 铣削纹理变浅或消失, 表面质量变得更加细密、均匀, 叶片表面整体轮廓清晰, 数学特征更加明显, 表面质量得到明显提高.

叶片原始表面是经过铣削加工完成, 由于铣削刀具作用面窄及相邻刀轨之间行距的存在, 必然导致等残留高度的产生. 大量等残留高度相互叠加形成规律性的波峰和波谷, 加上铣削过程中产生的微裂纹使得工件表面的加工纹理更为清晰, 局部区域微裂纹明显, 这种表面形貌也直接导致叶面轮廓模糊不清, 形状精度较差; 用径向磁力研磨法对整体叶盘原始表面光整加工后, 其尖点效应使叶片表面高凸部分被优先去除, 这样因残留高度所产生的波峰、波谷高度差被有效降低, 表面加工纹理得到明显改善. 叶片的表面加工形貌变得更加细密、均匀, 叶面轮廓清晰, 形状精度得到提高, 叶盘工作时气流运行通畅、气动效率得到明显提高, 工作性能更加稳定.



(a) 研磨前表面形貌



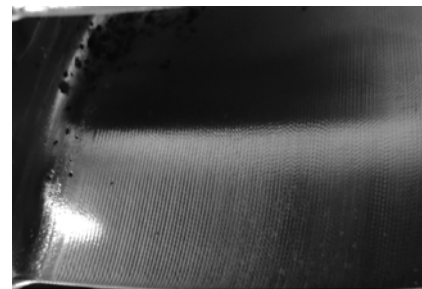
(b) 研磨后表面形貌

图 7 研磨前后叶片表面纹理变化情况

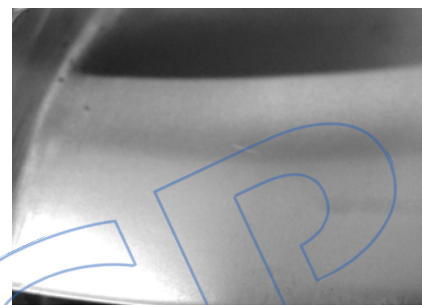
Fig.7 Variation of blade surface texture before and after finishing

图 8 为整体叶盘叶片研磨前和经 45 min 研磨后的实物效果对比. 从图 8(a)中可以看出研磨前叶片表面颜色灰暗,加工纹理清晰;图 8(b)经过磁力研磨光整加工后,整体叶盘叶片表面较为

光亮,加工纹理得到明显去除,进一步验证了磁力研磨法对整体叶盘表面抛光效果显著.



(a) 研磨前叶片表面效果



(b) 研磨后叶片表面效果

图 8 整体叶盘研磨前后效果

Fig.8 Finishing effect of the blisk before and after finishing

4 结 论

本文针对形状结构复杂整体叶盘的研磨抛光这一加工难题,提出利用非传统的磁力研磨加工方法进行光整处理.利用径向磁极代替轴向磁极以避免磁极与工件发生干涉,同时在磁极表面开槽,达到提高磁力研磨效率和研磨质量的目的,以实验结果为依据加以分析,得到如下结论:

1) 六自由度机械手与径向磁力研磨工艺相结合,可在有效避免磁力研磨装置与工件发生干涉碰撞的前提下,利用磁力研磨柔性加工的特性实现对整体叶盘零件的均匀余量抛光.

2) 磁力研磨工艺加工整体叶盘时,与不开槽磁极相比,在磁极表面沿轴向开若干矩形槽可有效增大研磨压力,使整体叶盘的研磨效率提高 31%左右,开矩形槽时的最佳宽深比为 1 : 1.

3) 经磁力研磨工艺加工后,整体叶盘的表面缺陷如铣削纹理、微裂纹等均被有效去除;整体叶盘的表面粗糙度值被有效降至 $R_a = 0.18 \mu\text{m}$ 左右,表面形貌变得更加细密、均匀,工件的使用性能和抗疲劳强度显著提高.

参考文献:

- [1] 徐庆,朱荻,许正扬,等.整体叶盘通道电解加工电极多维运动轨迹优化[J].航空学报,2011,32(8):1548-1554.
XU Qing,ZHU Di,XU Zhengyang,et al. Optimization of cathode multidimensional movement path in electrochemical machining of blisk channel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2011,32(8):1548-1554. (in Chinese)
- [2] 白斌,白广忱,童晓晨,等.整体叶盘结构失谐振动的国内外研究现状[J].航空动力学报,2014,29(1):91-103.
BAI Bin,BAI Guangchen,TONG Xiaochen,et al. Research on vibration problem of integral mistuned bladed disk assemblies[J]. Journal of Aerospace Power,2014,29(1):91-103. (in Chinese)
- [3] 黄新春,张定华,姚倡锋,等.镍基高温合金 GH4169 磨削参数对表面完整性的影响[J].航空动力学报,2013,28(3):621-628.
HUANG Xinchun,ZHANG Dinghua,YAO Changfeng,et al. Effects of grinding parameters on surface integrity of GH4169 nickel-based superalloy[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(3):621-628. (in Chinese)
- [4] 赵世田.自由曲面加工刀具路径轨迹规划算法研究[D].南京:南京航空航天大学,2011.
- [5] 吴立强,尹泽勇,蔡显新.航空发动机涡轮叶片的多学科设计优化[J].航空动力学报,2005,20(5):795-801.
WU Liqiang,YIN Zeyong,CAI Xianxin. MDO technology applied to the aero engine turbine blade design[J]. Journal of Aerospace Power,2005,20(5):795-801. (in Chinese)
- [6] 杨旭静,谢晖,盛晓敏,等.提高自由曲面数控加工精度的技术研究[J].湖南大学学报,2002,29(5):82-83.
YANG Xujing,XIE Hui,SHENG Xiaomin,et al. Research on improving surface NC machining accuracy[J]. Journal of Hunan University,2002,29(5):82-83. (in Chinese)
- [7] 陈燕,巨东英.磁研磨装置设计中的磁力线分析[J].制造技术与机床,2005(8):101-103.
CHEN Yan,JU Dongying. Analysis of magnetic line for design of magnetic abrasive machining device[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool,2005(8):101-103. (in Chinese)
- [8] 陈燕.磁研磨法在自由曲面模具型腔抛光中的应用[J].模具制造,2004(7):61-63.
CHEN Yan. Application of magnetic abrasive finishing on free-form surface polishing of the mold cavity[J]. Mold Manufacturing,2004(7):61-63. (in Chinese)
- [9] 郭龙文,杨能阁,陈燕.磁力研磨工艺对整体叶盘表面完整性的影响[J].中国表面工程,2013,26(3):10-14.
GUO Longwen,YANG Nengge,CHEN Yan. Influence of magnetic abrasive finishing technology on surface integrity of vane-integrated disk [J]. China Surface Engineering,2013,26(3):10-14. (in Chinese)
- [10] 赵鹏兵,史耀耀,宁立群.整体叶盘高效强力复合铣 A 轴高精度控制技术[J].航空学报,2013,34(7):1706-1715.
ZHAO Pengbing,SHI Yaoyao,NING Liqun. Technology research on high-precision control of A-axis in efficient and powerful milling machine for blisk manufacturing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2013,34(7):1706-1715. (in Chinese)
- [11] 武志彬,徐鸿钧,姚正军,等.高效磨削时磨削热问题的研究[J].农业机械学报,2001,32(4):99-101.
WU Zhibin,XU Hongjun,YAO Zhengjun,et al. The choke point and its counter measures of high efficiency grinding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2001,32(4):99-101. (in Chinese)
- [12] 陈燕,刘昭前,王显康.超声振动辅助磁力研磨加工研究[J].农业机械学报,2013,44(10):294-298.
CHEN Yan,LIU Zhaoqian,WANG Xiankang. Ultrasonic vibration-assisted magnetic abrasive finishing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(10):294-298. (in Chinese)
- [13] 段继豪,史耀耀,李小彪,等.整体叶盘柔性磨头自适应抛光实现方法[J].航空学报,2011,32(5):934-939.
DUAN Jihao,SHI Yaoyao,LI Xiaobiao,et al. Adaptive polishing for blisk by flexible grinding head [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2011,32(5):934-939. (in Chinese)
- [14] 洪杰,刘书国,张大义,等.小型短寿命涡扇发动机涡轮叶片疲劳失效分析[J].航空动力学报,2012,27(3):604-609.
HONG Jie,LIU Shuguo,ZHANG Dayi,et al. Fatigue failure analysis of turbine blade in miniature short-life turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power,2012,27(3):604-609. (in Chinese)
- [15] Liu Z Q,CHEN Yuanmin,LI Y J,et al. Comprehensive performance evaluation of the magnetic abrasive particles [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2013,68(1/2/3/4):631-640.
- [16] 肖作义,赵玉刚,吴文权.基于反求工程和磁粒研磨的模具精加工技术[J].农业机械学报,2005,36(1):108-110.
XIAO Zuoyi,ZHAO Yugang,WU Wenquan. Finishing machining technology of mould and die based on the magnetic abrasive finishing and reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(1):108-110. (in Chinese)
- [17] 李军利.镍基高温合金整体叶轮高效加工应用基础研究[D].上海:上海交通大学,2012.
LI Junli. Fundamental study on application of high efficiency machining of nickel-based superalloy integrated impeller [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2012. (in Chinese)
- [18] 王明海,李晓鹏.叶片型面曲率属性对数控铣削加工过程的影响[J].航空动力学报,2013,28(1):25-31.
WANG Haiming,LI Xiaopeng. Effect of curvature attribute of free form surface on CNC milling process[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(1):25-31. (in Chinese)