

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.010

航空用不锈钢磨粒流光整加工表面完整性研究

杨范轩¹, 孙玉利¹, 马杰¹, 范武林¹, 赵建社¹, 盛一^{2,3}, 左敦稳¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京星合精密智能制造研究院有限公司, 南京 211106;

3. 南京华测达精密机械有限公司, 南京 211121)

摘要: 为研究磨粒流光整加工不锈钢闭式整体叶环的表面完整性, 通过对电火花制备的不锈钢试样进行加工时间、加工压强及磨料目数的单因素试验, 研究 3 个因素对加工后表面完整性的影响。结果表明: 表面粗糙度 Ra 随着加工时间的增加而降低, 从初始时的 $1.459\ \mu\text{m}$ 降至 60 min 时的 $0.193\ \mu\text{m}$, 降低速率越来越慢, 最后趋于稳定。磨粒流加工有效去除了加工表面再铸层。显微硬度在加工后明显降低, 由 $450\sim 950\ \text{HV}$ 降至 $270\sim 350\ \text{HV}$ 且分布均匀性得到改善。显微硬度随着加工时间的增加整体上呈降低趋势, 并出现了一定的加工硬化现象。在使用不同目数的磨料进行磨粒流加工后, 残余应力由拉应力变为压应力。随着加工时间和加工压强的增加, 试样表面越平整, 抛光效果越好。

关键词: 不锈钢; 闭式整体叶环; 表面完整性; 磨粒流光整加工; 电火花加工

中图分类号: TG580 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)03-0452-09

Study on Surface Integrity of Aviation Stainless Steel in Abrasive Flow Machining

YANG Fanxuan¹, SUN Yuli¹, MA Jie¹, FAN Wulin¹, ZHAO Jianshe¹, SHENG Yi^{2,3}, ZUO Dunwen¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016,

China; 2. Nanjing Xinghe Precision Intelligent Manufacturing Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. Nanjing Huaceda Precision Machinery CO., Ltd., Nanjing 211121, China)

Abstract: To study the surface integrity of the stainless steel closed integral bling in abrasive flow machining, single factor tests of processing time, processing pressure and abrasive mesh size are carried out on the stainless steel samples prepared by electrical discharge machining, and the influence of three factors on the surface integrity after machining is investigated. The surface roughness value Ra decreases with the increase of processing time, from $1.459\ \mu\text{m}$ at the initial time to $0.193\ \mu\text{m}$ at 60 min. The surface roughness decreases at a slower and slower rate, and finally tends to stabilize. The recast layer is effectively removed by abrasive flow machining, and the microhardness decreases from $450\sim 950\ \text{HV}$ to $270\sim 350\ \text{HV}$ after machining, and the distribution uniformity is improved. The microhardness decreases with the increase of processing time, and some work hardening occurs. The residual stress changes from tensile stress to compressive stress after abrasive flow machining with different mesh numbers of abrasives. With the increase of processing time and pressure, the smoother the sample surface is, the better the polishing effect will be.

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(产业前瞻与关键核心技术)(BE2022150); 南京市科技计划项目-国际联合研发项目(202002047); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX21_0190); 南京航空航天大学 2021 年度研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20210504)。

收稿日期: 2022-10-19; **修订日期:** 2022-12-13

通信作者: 孙玉利, 男, 教授, E-mail: sunyuli@nuaa.edu.cn。

引用格式: 杨范轩, 孙玉利, 马杰, 等. 航空用不锈钢磨粒流光整加工表面完整性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 452-460. YANG Fanxuan, SUN Yuli, MA Jie, et al. Study on surface integrity of aviation stainless steel in abrasive flow machining[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 452-460.

Key words: stainless steel; closed integral bling; surface integrity; abrasive flow machining; electric discharge machining

航空发动机是飞机的心脏,被誉为“现代工业皇冠上的璀璨明珠”^[1],其先进性是一个国家综合国防实力的体现。先进航空发动机以高推重比为重要性能指标,而提高推重比的重要方法之一便是减轻质量^[2]。在减轻质量的背景下,以闭式整体叶环为代表的闭式整体构件日益得到广泛应用。整体叶环是在整体叶盘的基础上发展起来的,与分体装配式叶盘相比,能减轻70%的质量,且具有强度高、气动性好、可靠性强等优点^[3-4],已经在第5代战机上广泛应用,也是未来第6代战机的关键核心零部件之一。整体叶环的材料为不锈钢,其毛坯余量大,流道弯曲,加工精度和表面质量要求高,因此属于典型的难加工工件。数控铣削整体叶环时,经常面临加工干涉、刀具磨损严重和颤振控制等难题,因而目前整体叶环面临“难以制造甚至不能制造”的技术难题。正是由于面临现有制造技术的困境,突破新一代整体叶环的高效高精度制造技术成为国内外先进制造领域面临的严峻挑战。

电火花加工具有加工精度高、加工表面质量好且不受材料切削性能限制等优点,且与数控技术结合后可以解决复杂曲面加工中刀具干涉的问题,其柔性得到进一步提高^[5],这使得电火花加工工艺成为不锈钢闭式整体叶环叶间流道加工的首选工艺。然而采用单一电火花加工工艺加工时间长,且电火花加工后会在表面形成再铸层,影响整体叶环的服役寿命,同时电火花加工表面质量提升(特别是 $Ra < 1.5 \mu\text{m}$)会导致加工周期和加工成本成倍增加。因此,针对电火花加工后的闭式整体叶环,后续须通过光整加工改善其表面完整性。

目前,叶片类零件常用光整加工技术主要有:手工抛光、砂带磨削^[6]、电化学抛光^[7]和磨粒流光整加工^[8-9]。然而手工抛光效率低、精度差且抛光质量不稳定^[10];砂带磨削加工可达性差,多用于单个叶片和开式整体构件的加工,且存在清根困难的问题;电化学抛光加工精度不够高、试验周期长且环保成本高^[11]。因此,针对不锈钢闭式整体叶环,上述3种光整加工技术均不能得到很好的应用。而磨粒流光整加工具有加工可达性好、不受材料性能限制、加工效率高且绿色环保等优势,特别适用于闭式整体叶环等具有复杂结构流道的工件。

工件上复杂流道的表面完整性直接影响工件的使役性能,而磨粒流光整加工是改善工件表面完整性的重要技术,因此磨粒流光整加工技术对加工表面的影

响是国内外研究的焦点。Peng等^[12]研究磨粒流光整加工工艺对表面粗糙度和残余应力的影响,针对增材制造铝合金工件进行磨粒流光整加工试验,试验结果表明,磨粒流光整加工后表面粗糙度明显降低,从原先的 $13\sim 14 \mu\text{m}$ 降至最终的 $1.8 \mu\text{m}$,残余应力从拉应力 49.3 MPa 转变为压应力 30.5 MPa 。Cheng等^[13]针对磨粒流光整加工整体叶盘中的工艺研发周期长,且缺乏叶身和进/排气边型面精度预测和控制手段的难题,提出一种结合预试验和材料去除率经验模型的预测方法,叶片的最终形状通过“材料去除计算-形状更新-材料去除计算”的迭代方法来获得。Zhang等^[14]针对Ti-6Al-4V钛合金人工关节,搭建了磨粒流光整加工实验平台,设计了曲面仿形流道进行加工,采用响应面法分析了磨粒粒径、磨料浓度、加工时间及交互作用对工件表面粗糙度和表面微观形貌的影响。Wang等^[15]采用超声辅助旋转磨粒流光整加工6061铝合金,研究结果表明:由于超声振动给磨料中的磨粒施加了垂直于工件表面的撞击运动,因而加工表面同时出现了磨粒刻划的切向划痕和法向撞击凹坑,且材料去除率有所提升。余泽等^[16]研究了钛合金电火花加工表面在磨粒流光整加工后的表面完整性,结果表明:磨粒流光整加工能去除电火花加工表面再铸层,消除电火花加工表面的微观缺陷,在加工表面 $100 \mu\text{m}$ 范围内引入残余压应力。此外,磨粒的切削作用和加工硬化使得加工表面硬度比基体材料有所提高。国内外的学者大多从其中一个或两个方面评价磨粒流光整加工表面完整性,少有人从多个方面进行分析,对电火花已加工不锈钢材料表面进行磨粒流光整加工的表面完整性分析也不多见。因此,本文基于磨粒流光整加工技术的原理,以不锈钢小试样为实验对象进行加工试验,揭示了加工面所受压力、加工时长及磨粒目数对表面粗糙度 Ra 、显微硬度、残余应力和表面形貌的影响规律。研究结论为进一步提高复杂内腔的抛光效果提供了理论基础和技术支撑。

1 磨粒流光整加工技术的加工原理及特点

磨粒流光整加工通过使用一种黏弹性的含有大量磨粒的磨料,在压力作用下往复流过工件被加工面,在加工表面产生工件材料的微量去除从而实现表面光整^[17]。黏弹性磨料在压力推动下能够流经一般工具难以接触的零件内腔表面并进行光整

加工,因此相对于传统加工技术,磨粒流光整技术加工可达性好的特性尤为突出。磨粒流光整加工装置主要由上下磨料缸、活塞和夹具组成,整体结构如图1所示。

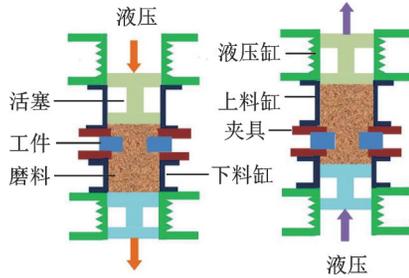


图1 磨粒流加工原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of abrasive flow machining

磨粒流光整加工技术凭借其高加工可达性和高加工质量的工艺特点,在异型孔、薄壁件、复杂型腔和大尺寸复杂曲面零件的光整加工中越来越突显其技术优势,而这类零件的使用寿命对零件的表面完整性十分敏感。表面完整性是加工后零件表面物理性质和几何性质的总称,通常包括粗糙度、宏观缺陷、波纹度、硬度变化、塑性变形和残余应力等^[18]。整体叶环是航空发动机的关键零部件。作为航空航天行业关键零部件的常见失效形式,疲劳、腐蚀通常始于零部件表面,对其表面微观结构和性能十分敏感,因此可以通过改善表面完整性能显著提高零部件的使役性能^[19]。特别是通过近年来对磨粒流加工机理方面一系列的深入研究,发现该方法在高效、减少应力集中、提高表面压应力等“控性”加工方面,有着更加广阔的应用前景。表面完整性的各项表征指标中表面粗糙度 R_a 、显微硬度、残余应力和表面形貌十分具有代表性^[20],这4种典型指标的变化规律能够为磨粒流光整加工提供有效的理论指导。

2 试验设计

为研究加工时间、加工压强和磨料目数对加工后表面完整性的影响规律,开展单因素试验,试验参数如表1所示。磨粒流磨料为碳化硅磨料,目数分别为36、60、180目,性能参数见表2。其中加工1、2、3、4、5号试样时均采用36目磨料,加工压强设为2.3 MPa,用于探究不同加工时间对表面完整性的影响。加工1、6、7、8、9号试样时均采用36目磨料,加工时间为12 min,用于探究不同加工压强对表面完整性的影响。加工1、10、11号试样时加工压强为2.3 MPa,加工时间为12 min,用于探究不同磨料目数对表面完整性的影响。

表1 单因素试验参数

Table 1 Single factor test parameters

试样号	磨料目数/目	加工压强/ MPa	加工时间/ min
1	36	2.3	12
2	36	2.3	24
3	36	2.3	36
4	36	2.3	48
5	36	2.3	60
6	36	1.7	12
7	36	2.0	12
8	36	2.6	12
9	36	2.9	12
10	60	2.3	12
11	180	2.3	12

表2 磨料介质的性能参数

Table 2 Performance parameters of abrasive media

试样号	磨料 目数/目	流动 指数 n	磨粒 含量/%	粘度/ (Pa·s)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	36	0.35	54	10 670	1 841.6
2	60	0.37	54	10 270	1 841.6
3	180	0.39	54	9 992	1 841.6

磨粒流光整加工试验采用自行搭建的试验装置,装置实物图如图2所示。图3(a)所示为磨粒流光整加工不锈钢试样的夹具示意图,夹具由底座、支撑环、上压盖、夹紧定位管和台阶连接管组成。其中底座与支撑环之间、支撑环与上压盖之间以及上压盖与夹紧定位管之间均为间隙配合,台阶连接管通过螺纹连接在底座上,旋紧夹紧定位管与台阶连接管之间的螺纹实现试样的夹紧与定位,夹具实物图如图2所示。图3(b)所示为磨粒流加工前的不锈钢试样,其牌号为15-5 PH,该种牌号材料性能如表3所示,图3中的待加工面由电火花技术加工至表面粗糙度 R_a 为1.4~1.6 μm 。为确保整个待加工面在加工过程中都能被抛光到,设计时将待加工面的长度略小于夹紧定位管的直径。为测量待加工面的显微硬度时试样能平稳地放在测试平台上,将试样底面设计成与待加工面平行的平面。试验采用图4所示的SiC黏弹性磨料,加工方式为上下往复式加工。

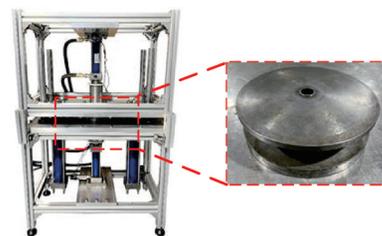
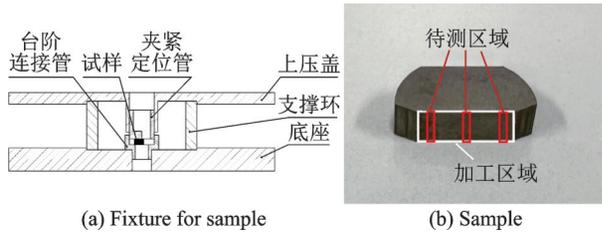


图2 磨粒流加工试验装置

Fig.2 Abrasive flow machining test device



(a) Fixture for sample

(b) Sample

图 3 试样夹具及试样示意图

Fig.3 Schematic diagram of sample fixture and sample

表 3 15-5 PH 不锈钢主要性能

Table 3 15-5 PH stainless steel main properties

抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	伸长率 δ /%	收缩率 ψ /%	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
550	200	40	55	7 810



图 4 试验用磨料

Fig.4 Abrasive media used in tests

试样加工完成后,从表面粗糙度、显微硬度、残余应力和表面形貌 4 个方面评价工件的表面完整性。

(1) 使用 SJ-210 粗糙度仪(日本三丰)测量试样加工前后的表面粗糙度 Ra 值,测量方向与磨粒流光整加工方向一致。试样表面粗糙度 Ra 值在 0.1~2.0 之间,根据 GB/T 1031-2009,宜选用取样长度 $l_r=0.8$ mm,评定长度 $l_n=5\times l_r=4$ mm,每个试样表面测量左侧、中间及右侧 3 处,每处测量 3 次,取平均值。

(2) 使用 HXS-1000AK 显微硬度仪(上海尚光)测量试样加工前后的显微硬度,测量加工面时选用 0.49 N 的载荷,加载时间为 14 s。加工前,使用 GP-1 金相试样抛光机将一个备用试样的侧面抛光至镜面,在试样中心区域测量 6 个点,取平均值。加工后,在试样加工面上沿长边方向测量 3 个点的维氏硬度,取平均值。

(3) 使用 D8 Advance X 射线衍射仪(德国布鲁克)测量试样加工前后的残余应力,测量点为试样中心。

(4) 使用 UP-lambda 三维形貌仪(美国艾泰克)拍摄试样加工前后的表面形貌,拍摄位置为试样中心。

3 试验结果与分析

3.1 加工参数对表面粗糙度的影响

以加工时间为单因素试验的 5 个试验件加工前粗糙度 Ra 的平均值作为加工时间为 0 min 时的粗糙度 Ra 值,获得加工时间对表面粗糙度的影响规律,如图 5 所示。在使用 36 目磨料和加工压强为 2.3 MPa 的条件下,随着加工时间的增加,试样中间的表面粗糙度 Ra 从初始时的 1.459 μm 降至 60 min 时的 0.193 μm ,表面粗糙度呈现明显的下降趋势,其中 0~12 min 内表面粗糙度下降得很快,12~60 min 内表面粗糙度降低速度越来越慢,48 min 后粗糙度变化不明显,表面粗糙度下降率能更清晰地反映出上述情况,如图 6 所示。这是由于试样加工前粗糙度较大,试样表面存在大量的凸起,加工前期,磨粒划擦去除了试样表面的凸起,因而前期粗糙度降低得快。表面的凸起去除后,表面粗糙度达到一个较低的值,继续加工后表面粗糙度逼近该目数磨料加工的极限值,因而后期粗糙度降低速度变慢。因此,在实际加工中需要结合具体工件的技术要求来选定合适的加工时间。

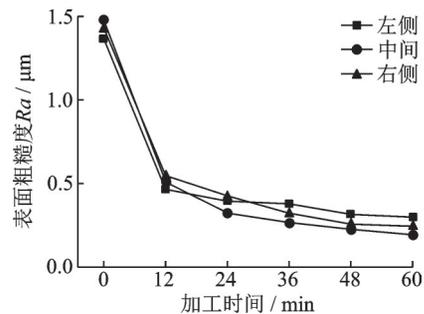


图 5 加工时间对表面粗糙度的影响

Fig.5 Influence of processing time on surface roughness

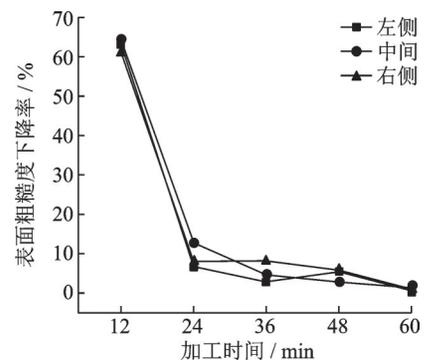


图 6 加工时间对表面粗糙度下降率的影响

Fig.6 Influence of processing time on surface roughness reduction rate

图 7 所示为加工压强对表面粗糙度的影响规律图。在使用 36 目磨料和加工时间为 12 min 的条件下,随着加工压强的提高,试样表面粗糙度总体上呈现出降低的趋势,加工压强为 1.7 MPa 时试样加工后的表面粗糙度最大,为 0.8 μm 左右,加工压

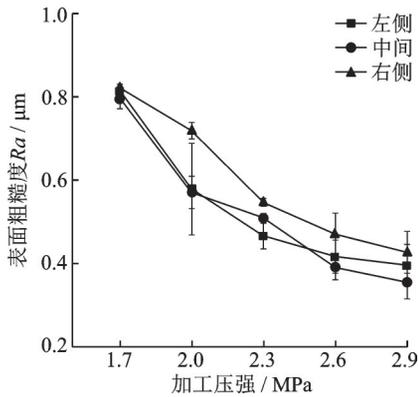


图7 加工压强对表面粗糙度的影响

Fig.7 Influence of processing pressure on surface roughness

强为 2.9 MPa 时试样加工后的表面粗糙度最小,为 0.45 μm 左右。根据式(1)的 Preston 方程^[21],其他条件一定时,压强增大,材料去除量随之增大,因而加工压强越大时能去除更多表面的凸起,从而得到更低的粗糙度值。但是,因受 SiC 磨料粒径的限制,加工压强与粗糙度的变化曲线将趋于水平^[22],同时过大的加工压强也容易造成过抛、划痕等加工缺陷。因此,在实际加工中可以适当地提高加工压强以提高加工效率。

$$\Delta z = \int_0^t k_p v p dt \quad (1)$$

式中: Δz 为材料去除量; k_p 为 Preston 常数; v 为工件表面处磨粒与工件表面之间的相对速度; p 为工件表面处的压强; t 为磨粒流光整加工时间。

同时,从图7中可以看出,工件表面粗糙度随加工压强的增大而降低,但左侧、中间、右侧粗糙度降低速率却并不相同。由高分子流变学知识可知,在管道中运动的黏弹性磨料在越靠近管壁处流速越低,并在管道中心处达到流速最大值,反映在式(1)即为工件待加工面中间处磨料流速最大,左侧和右侧磨料流速较小,因此加工面中间处粗糙度值下降较快,在加工压强为 2.9 MPa 时最为明显。同时,因为各工件的初始表面粗糙度存在一定的差异,测量工件加工前后的粗糙度时不可避免地存在一定误差,所以在加工压强为 2.3 MPa 时,左侧粗糙度比中间和右侧粗糙度低。

图8所示为磨料目数对表面粗糙度的影响规律图。加工压强为 2.3 MPa,加工时间为 12 min 时,36 目磨料加工后试样的粗糙度低于 60 目磨料,这是由于 36 目磨料的粒径大,相同条件下材料去除多,因而粗糙度值更低。而 180 目磨料加工后试样的粗糙度值却低于 60 目磨料,这是因为 180 目磨料粒径小,粘度低,因而其流动性好,加工时单个行程时间短,即 Preston 方程中 180 目磨料中磨粒与工件表面之间的相对速度 v 更大^[23],相同时间内加工了多个行程,从而导致了 180 目磨料加工后试样

的粗糙度较低。同时,还需要注意到 180 目时,同一工件不同位置粗糙度差距较大,其原因除了前文提到的测量时存在的误差外,还可以由高分子材料的次级流动理论解释,即高分子流体从圆形管道向非圆形管道内流动时,靠近边界的流体受到挤压,在流体的黏弹力和惯性力的共同作用下,产生了平行于边界的偏移,导致了叠加在主流上的二次流动^[24]。安装工件处流道形状变化剧烈,180 目的黏弹性磨料容易在此出现局部环流、湍流,使同一工件不同位置处的磨料速度和压力产生不可忽视的差异,从而引起各处材料去除量不同最终导致加工结束后不同位置粗糙度差异明显。

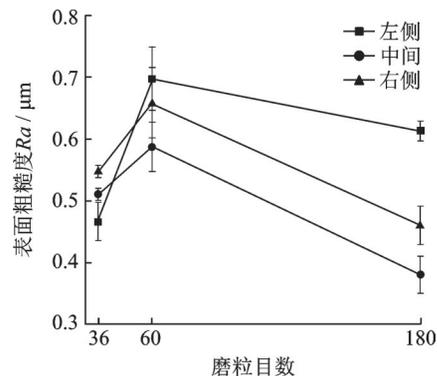


图8 磨料目数对表面粗糙度的影响

Fig.8 Influence of abrasive mesh number on surface roughness

3.2 加工参数对显微硬度的影响

试样加工前后的显微硬度均值及标准差如图9所示,试样加工前的显微硬度较大,分布在 450~950 HV 之间,这是因为试样加工前表面有一层电火花加工形成的再铸层,再铸层是熔融材料在材料加工表面形成的淬火铸造组织,其硬度比较大。从图9中还可以看出,加工前不同试样之间、同一试样不同测量位置之间显微硬度差别很大,这是由于电火花加工时放电不稳定,形成的再铸层分布不均匀。而加工后 11 个试样的显微硬度均有明显的下降,集中分布在 270~350 HV 之间,这是因为磨粒流加工过程去除了工件表面的再铸层,去除完成后工件表面为硬度较为均匀的基体材料。此外,加工后同一试样不同测量位置之间显微硬度差别也变得很小,说明磨粒流加工能够改善电火花加工试样显微硬度分布的均匀性。

表4为备用试样侧面抛光至镜面后的显微硬度测量数据,由于测量位置在试样侧面中心区域,离电火花加工面较远,可以认为此时测量的是不锈钢基体的显微硬度,为 289.3 HV。图10所示为加工时间对显微硬度的影响规律图。由图10可以看出,加工 24 min 后的显微硬度值最大,为 344.7 HV,加工 60 min 后的显微硬度值最小,为 303.7 HV,在

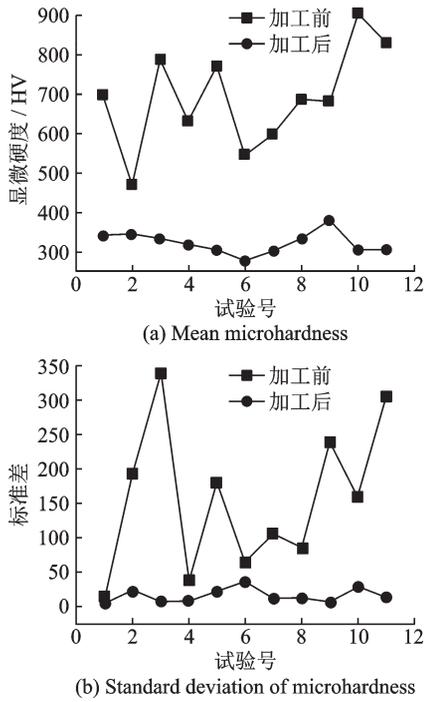


图 9 加工前后显微硬度折线图

Fig.9 Microhardness line chart before and after processing

使用 36 目磨料和加工压强为 2.3 MPa 的条件下,显微硬度随着加工时间先增大后减小,整体趋势为显微硬度随着加工时间的增加而减小,越来越接近试样基体的显微硬度值。分析认为:随着加工时间的增加,较硬的再铸层逐渐被去除,因而显微硬度整体上呈下降趋势并接近于基体的硬度。在加工至 60 min 时,试样的显微硬度值依然比基体的大,这是因为磨粒在加工时受到的径向力对加工表面有加工硬化的作用。24 min 时的显微硬度不符合整体趋势,原因有:(1)该试样初始显微硬度较大;(2)加工时间较短时,试样表面的再铸层还未被完全去除,再铸层分布不均匀。

表 4 试样侧面抛光后显微硬度值

Table 4 Microhardness of the sample after side polishing

测量位置	点1	点2	点3	点4	点5	点6	均值
显微硬度/HV	305.4	297.1	285.4	291.2	269.1	287.3	289.3

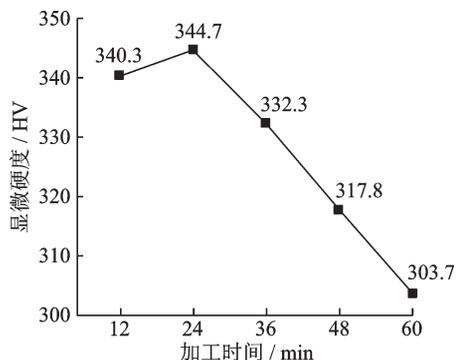


图 10 加工时间对显微硬度的影响

Fig.10 Influence of processing time on microhardness

3.3 加工参数对残余应力的影响

图 11 所示为使用 36 目、60 目、180 目的磨料磨粒流光整加工前后不锈钢试样的残余应力分布情况。电火花加工后,加工表面均为残余拉应力。磨粒流加工结束后,工件表面残余应力由拉应力转变为了压应力。原因在于,磨粒流加工时,工件表面受到剧烈的摩擦和挤压作用,磨料在去除工件表面材料的同时,也施加了较大的垂直于工件表面的法向压力,使得工件表面金属发生塑性变形,最终工件表面呈现出压应力。

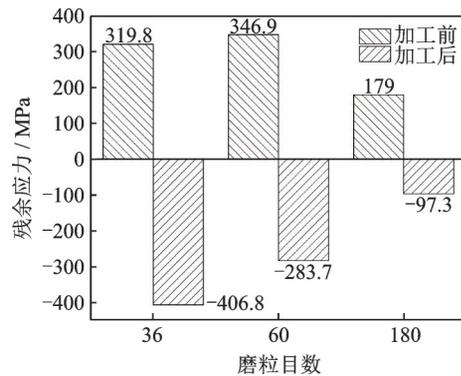


图 11 试样加工前后残余应力

Fig.11 Residual stress of sample before and after processing

这种残余应力的变化说明磨粒流加工可以改善残余应力分布,从而提高工件疲劳寿命。从图 11 中还可以看出,磨粒流加工后,36 目磨料的残余压应力最大,60 目其次,180 目最小,且 180 目磨料加工后的残余应力比 36 目和 60 目小得多,这说明不同粒径的磨料对残余应力变化影响很大。分析认为:残余应力变化幅度主要受磨料流动性影响。在磨粒含量一定时,磨粒目数越大,流动性越好,36 目、60 目、180 目磨料的流动性逐渐增强^[25]。流动性越好的磨料在加工时磨料塑性变形损耗的能量越多,弹性变形储存的能量越少,导致磨料对加工区域表面的法向压力越小,加工后工件表面残余应力变化越小。

3.4 加工参数对表面形貌的影响

图 12 所示为不锈钢试样在使用 36 目磨料和加工压强为 2.3 MPa 的条件下,加工不同时间的表面形貌图。从图 12 中可以看出,加工前材料表面存在大量的凸起和凹坑,加工时间为 12 min 时,试样表面出现了磨粒划过的痕迹,但仍存在大量的凹坑,说明 0~12 min 时,磨粒主要在去除试样表面的凸起。加工时间为 36 min 时,试样表面更为平整,磨粒划痕更明显,凹坑与 12 min 相比明显减少,加工时间为 60 min 时,试样表面进一步平整,磨粒的划痕几乎布满整个图像区域,凹坑基本去除,说明 12~60 min 时磨粒在对整个试样表面进行材料去除。

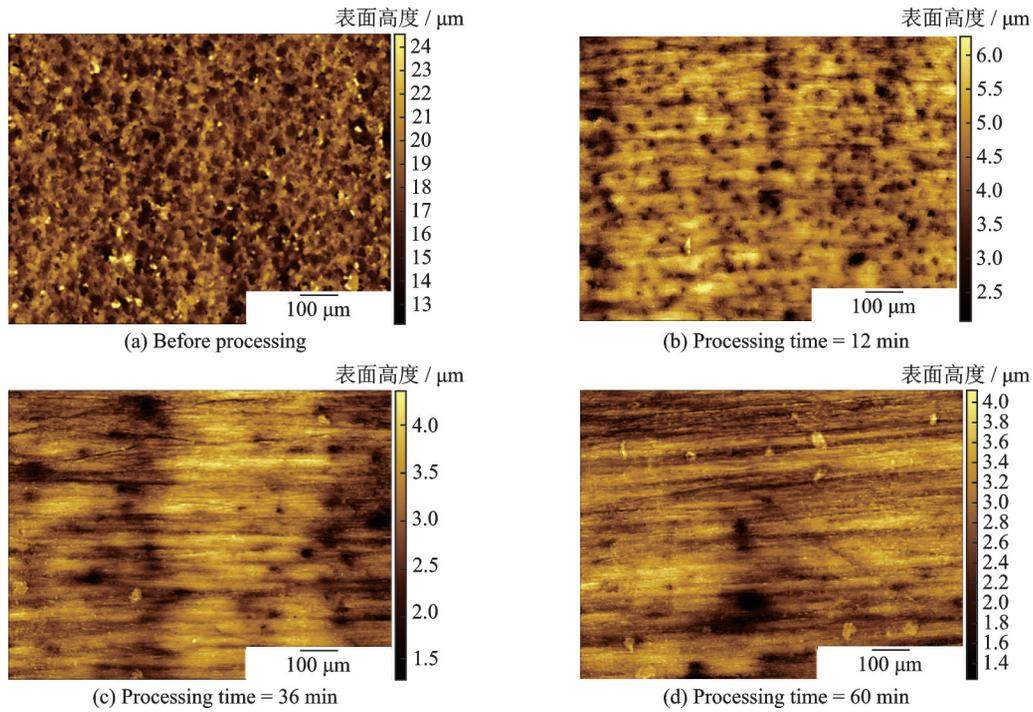


图12 加工时间对表面形貌的影响

Fig.12 Influence of processing time on surface morphology

图13所示为不锈钢试样在使用36目磨料和加工时间为12 min的条件下,采用不同加工压强的表面形貌图。从图13中可以看出加工压强分别为1.7、2.3和2.9 MPa,加工时间为12 min时,试样表面都还存在大量的凹坑。三者中,1.7 MPa的凹坑最多,2.3 MPa其次,2.9 MPa最少。根据式(1)的Preston方程,其他条件一定时,压强越大,材料去除越多,因而2.9 MPa的表面形貌最好。

图14所示为不锈钢试样在加工压强为2.3 MPa和加工时间为12 min的条件下,使用不同

目数的磨料进行加工的表面形貌图。由图14可以看出,采用36、60和180目的磨料加工12 min时,试样表面都还存在大量的凹坑。其中,60目磨料的凹坑最多,36目和180目磨料的凹坑相对较少,凹坑四周较为平整。36目磨料与60目磨料在加工单个循环用时相差不多,而36目磨料的粒径比60目大,单个磨粒切削深度更深,去除了更多的材料,因而表面形貌更好。而180目磨料粒径小,粘度低,因而其流动性好,加工时单个行程时间短,相同时间内加工了多个行程,更多的磨粒参与到了试

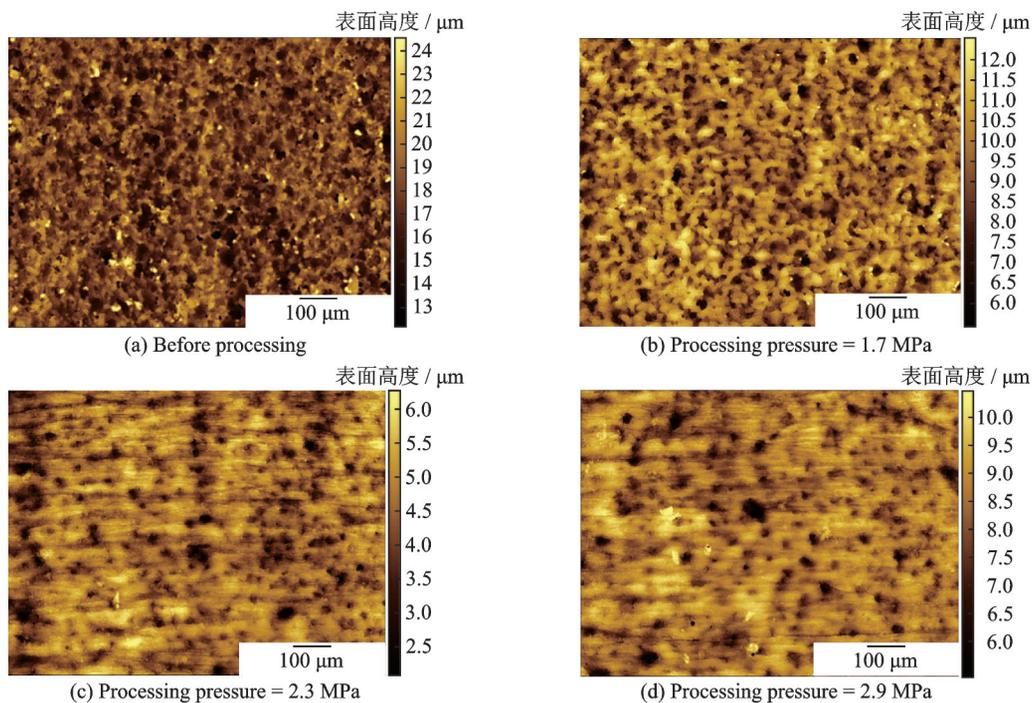


图13 加工压强对表面形貌的影响

Fig.13 Influence of processing pressure on surface morphology

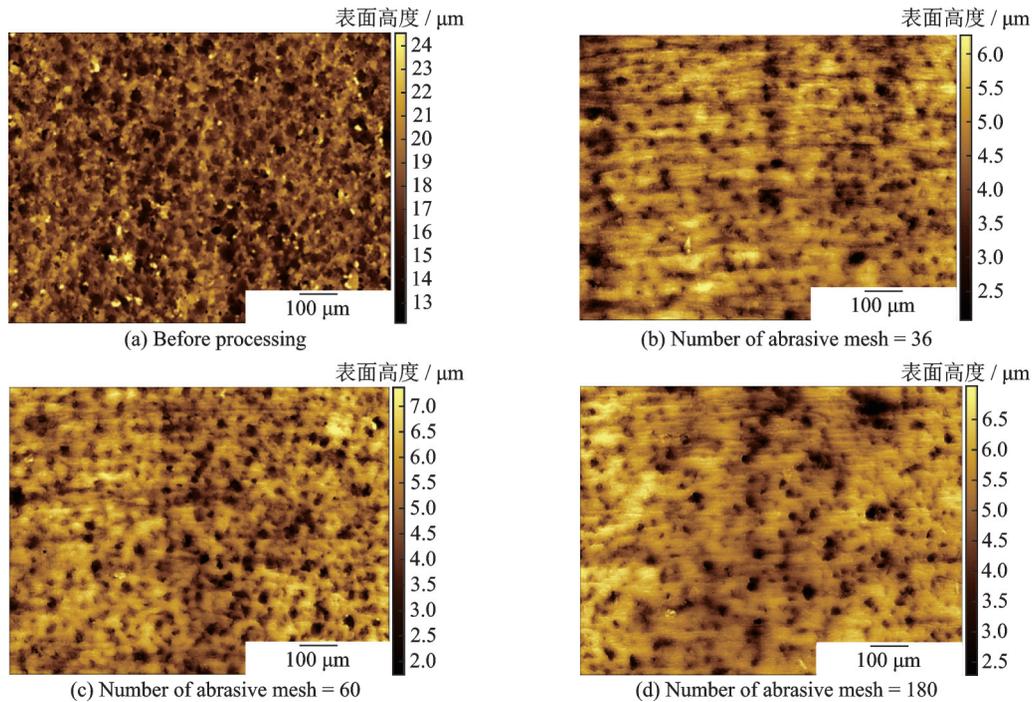


图14 磨料目数对表面形貌的影响

Fig.14 Influence of abrasive mesh number on surface morphology

样表面的材料去除,因此加工后也得到了相对较好的表面形貌。

4 结 论

针对电火花制备的不锈钢试样进行磨粒流光整加工试验,得到以下结论:

(1)不锈钢试样加工后表面粗糙度随着加工时间的增加而降低,降低速率越来越慢,最后趋于稳定。试样加工后表面粗糙度随着加工压强的增大而降低。

(2)不锈钢试样在磨粒流光整加工后,显微硬度值明显降低,显微硬度分布均匀性得到改善。不锈钢试样的显微硬度随着加工时间的增加整体上呈降低的趋势,并出现了一定的加工硬化现象。

(3)不锈钢试样表面的残余拉应力在使用不同目数的磨料加工后均转变为残余压应力,有利于提高零件的服役性能。

(4)试样加工前表面存在大量的凸起和凹坑,随着加工时间和加工压强的增加,试样表面越平整,抛光效果越好。

(5)综合比较不同目数磨料对工件表面完整性的影响后发现,180目磨料的加工性能最好,其次是36目磨料,60目磨料加工性能最差。后续加工同类工件时,建议选用36目磨料,在2.9 MPa加工压强下进行加工。

参考文献:

[1] 韩铖. 民用涡扇发动机自抗扰控制及参数优化研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
HAN Cheng. Research on active disturbance rejection

control system and parameter optimization of civil turbofan engine[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019.

[2] 梁春华, 李宏新, 凌瑶. 先进航空涡扇发动机风扇/压气机的先进结构与新材料[J]. 航空制造技术, 2007, 50(1): 60-63.

LIANG Chunhua, LI Hongxin, LING Yao. Advanced structure and new materials of advanced aeronautical turbofan engine fan/compressor[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, 50(1): 60-63.

[3] 徐志刚. 高涵道比涡扇发动机的关键制造技术[J]. 航空制造技术, 2009, 52(2): 44-47.

XU Zhigang. Key manufacture technologies of high-bypass ratio turbofan aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(2): 44-47.

[4] 黄春峰. 航空发动机整体叶盘结构及发展趋势[J]. 现代零部件, 2005, 3(4): 96-98.

HUANG Chunfeng. Structure and development trend of aero-engine integral blisk[J]. Modern Components, 2005, 3(4): 96-98.

[5] 吴彦农, 赵建社, 唐兰剑, 等. 闭式复杂流道类零件数控电火花加工电极设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2430-2433.

WU Yannong, ZHAO Jianshe, TANG Lanjian, et al. Design method of NC-EDM electrode for components with closed complex flow channel[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(20): 2430-2433.

[6] 肖贵坚, 张友栋, 黄云, 等. 基于灰色关联法的航发叶片机器人砂带磨削精度控制技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(9): 63-70.

XIAO Guijian, ZHANG Youdong, HUANG Yun, et al. Robotic belt grinding accuracy control technology of aero-engine blade based on grey correlation method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020,

- 63(9): 63-70.
- [7] 张晓博,朱栋.长窄型薄壁叶片的套料电解加工[J].中国机械工程,2022,33(7):797-803,810.
ZHANG Xiaobo, ZHU Dong. Research on electrochemical trepanning for long thin-walled blade[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(7):797-803,810.
- [8] FU Y Z, GAO H, YAN Q S, et al. An efficient approach to improving the finishing properties of abrasive flow machining with the analyses of initial surface texture of workpiece[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(7): 2417-2432.
- [9] FU Y Z, WANG X P, GAO H, et al. Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5/6/7/8): 1725-1735.
- [10] 余加伟.六轴四工位抛光机自适应恒压力磨削关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
YU Jiawei. Research of adaptive and constant pressure grinding on six axis four station polishing machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [11] 杜攀.异形通道结构精密电解加工技术工程应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
DU Pan. Research on application of precise ECM technology for irregular channel structures [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [12] PENG C, FU Y, WEI H, et al. Study on improvement of surface roughness and induced residual stress for additively manufactured metal parts by abrasive flow machining[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 386-389.
- [13] CHENG K, SHAO Y Z, BODENHORST R, et al. Modeling and simulation of material removal rates and profile accuracy control in abrasive flow machining of the integrally bladed rotor blade and experimental perspectives [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(12): 121020.
- [14] ZHANG L, HUANG Y, CHEN G, et al. Experimental study of coverage constraint abrasive flow machining of titanium alloy artificial joint surface[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(13): 2399-2409.
- [15] WANG Q Y, VOHRA M S, BAI S, et al. Rotary ultrasonic-assisted abrasive flow finishing and its fundamental performance in Al6061 machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(367): 473-481.
- [16] YU Z, ZUO D W, SUN Y L, et al. Study on the improvement of the surface integrity and efficiency of electrical-discharge-machined TC4 titanium alloy via abrasive flow machining[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2020, 235(6/7): 1197-1211.
- [17] SAMBHARIA J, MALI H S. Recent developments in abrasive flow finishing process: A review of current research and future prospects[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(2): 388-399.
- [18] 何柏林,邓海鹏.表面完整性研究现状及发展趋势[J].表面技术,2015,44(9):140-146,152.
HE Bolin, DENG Haipeng. Current situation and development trend of surface integrity research[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 140-146, 152.
- [19] 宋迎东,凌晨,张磊成,等.航空发动机和燃气轮机热端部件热腐蚀-疲劳研究进展[J].南京航空航天大学学报,2022,54(5):771-788.
SONG Yingdong, LING Chen, ZHANG Leicheng, et al. Research progress on thermal corrosion-fatigue of hot end components of aero-engine and gas turbine [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 771-788.
- [20] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等.超精密加工领域科学技术发展研究[J].机械工程学报,2010,46(15): 161-177.
YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifan, et al. Research on the development of science and technology in the field of ultra-precision machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [21] CHENG K, SHAO Y Z, JADVA M, et al. Development of the improved Preston equation for abrasive flow machining of aerofoil structures and components [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(9): 1397-1404.
- [22] 蔡智杰,刘薇娜,高彬彬,等.共轨管微小孔磨粒流抛光实验研究与表面粗糙度预测[J].机械科学与技术,2017,36(11):1722-1728.
CAI Zhijie, LIU Weina, GAO Binbin, et al. Experimental study and surface roughness prediction of common-rail micro-hole abrasive flow polishing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(11): 1722-1728.
- [23] 施凯博,孙玉利,余泽,等.钛合金磨料流光整加工表面完整性研究[J].表面技术,2019,48(10): 80-85,138.
SHI Kaibo, SUN Yuli, YU Ze, et al. Study on surface integrity of abrasive flow finishing of titanium alloy [J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 80-85, 138.
- [24] 郑强.高分子流变学[M].北京:科学出版社,2020: 38-48.
ZHENG Qiang. Polymer rheology [M]. Beijing: Science Press, 2020: 38-48.
- [25] 刘洋,李俊焯,苏宁宁,等.磨粒流抛光弯管的数值模拟与试验优化[J].机械设计与制造,2021,365(7): 137-140.
LIU Yang, LI Junye, SU Ningning, et al. Numerical simulation and experimental optimization of abrasive flow polishing elbow [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, 365(7): 137-140.