

钛合金磨料流光整加工表面完整性研究

施凯博¹, 孙玉利¹, 余泽², 李国华², 左敦稳¹

(1.南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2.航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610000)

摘要: **目的** 研究磨料流光整加工钛合金格栅表面完整性。**方法** 用电火花加工制备钛合金试样, 通过磨料粒径、加工压力、加工次数的单因素试验, 来研究其对试样表面粗糙度和表面形貌的影响规律, 选用三种初始粗糙度不同的钛合金试样来进行磨料流光整加工效果试验, 对比分析磨料流光整加工对试样表面残余应力的影响, 进行加工次数的单因素试验研究磨料流光整加工过程中其对工件表面显微硬度的影响。**结果** 对于钛合金试样来说, 磨料粒径和加工压力越大, 表面抛光效果越明显, 表面粗糙度就越低。当磨料粒径从 38 μm 增加到 420 μm 时, 相对应的表面粗糙度值 R_a 从 5.815 μm 降低到 0.824 μm ; 当加工压力从 8 MPa 增加到 24 MPa 时, 相对应的表面粗糙度值 R_a 从 4.314 μm 降低到 1.398 μm 。而随着加工次数的增加, 表面粗糙度值 R_a 从整体上呈现下降趋势, 最后趋于稳定, 当加工次数从 10 增加到 80 时, 相对应的表面粗糙度值 R_a 从 5.925 μm 降低到 0.307 μm , 并且最后稳定在 0.300 μm 附近。钛合金试样经磨料流光整加工之后, 表面残余应力由原来的拉应力变成了压应力。随着加工次数的增加, 钛合金试样表面显微硬度整体上呈现先减小后增大的趋势, 当加工次数从 10 增加到 50 时, 显微硬度值从 532.83HV 降到 357.73HV, 当加工次数从 50 增加到 90 时, 显微硬度值从 357.73HV 上升到 393.48HV, 试样表面显微硬度的均匀性也显著增加。**结论** 增大磨料粒径和加工压力或者增加加工次数, 都能降低工件表面粗糙度, 钛合金工件经过磨料流光整加工之后, 表面完整性有较大改善。

关键词: 钛合金; 格栅; 磨料流光整加工; 表面完整性; 表面粗糙度; 残余应力; 显微硬度

中图分类号: TG580.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0080-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.009

Study on the Surface Integrity of Titanium Alloy in Abrasive Flow Machining

SHI Kai-bo¹, SUN Yu-li¹, YU Ze², LI Guo-hua², ZUO Dun-wen¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd, Chengdu 610000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the surface integrity of the titanium alloy grid in abrasive flow machining. The titanium alloy samples were prepared by electric discharge machining. Based on single factor experiments, the effects of abrasive grain

收稿日期: 2019-07-19; 修订日期: 2019-09-12

Received: 2019-07-19; Revised: 2019-09-12

基金项目: 校企合作项目(KFA17978-01); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20170507)

Fund: Supported by the Schools and Enterprises Cooperation Program (KFA17978-01) and Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Graduate Innovation Base (Lab) Open Fund Program (kfj20170507)

作者简介: 施凯博(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为磨料流精密加工。

Biography: SHI Kai-bo (1995—), Male, Master, Research focus: abrasive flow precision machining.

通讯作者: 孙玉利(1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术。

Corresponding author: SUN Yu-li (1970—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision and ultra-precision machining technology.

size, machining pressure and machining times on the surface roughness and surface morphology were discussed. Three kinds of samples with different initial surface roughness were selected to analyse the surface residual stress before and after abrasive flow machining. The single factor experiments were carried out to study the effect of machining times on the surface microhardness of samples. For titanium alloy samples, the larger the abrasive grain size and processing pressure, the more obvious surface polishing effect and the lower the surface roughness. When the abrasive grain size increases from 38 μm to 420 μm , the corresponding surface roughness value R_a decreases from 5.815 μm to 0.824 μm . And when the machining pressure increases from 8 MPa to 24 MPa, the corresponding surface roughness value R_a decreases from 4.314 μm to 1.398 μm . With the increase of machining times, the surface roughness shows a downward trend as a whole, and finally tends to be stable. When the machining times increases from 10 to 80, the corresponding surface roughness value R_a decreases from 5.925 μm to 0.307 μm , and finally stabilizes at about 0.300 μm . After abrasive flow machining, the surface residual stress of titanium alloy changed from tensile stress to compressive stress. With the increase of machining times, the surface microhardness of titanium alloy decreased at first and then increased, and the uniformity of surface microhardness increased significantly. When the machining times increases from 10 to 50, the microhardness value decreases from 532.83HV to 357.73HV. And when the machining times increases from 50 to 90, the microhardness value increases from 357.73HV to 393.48HV. It shows that increasing abrasive grain size, machining pressure and machining times can reduce surface roughness. The surface integrity of titanium alloy workpiece is greatly improved after abrasive flow machining.

KEY WORDS: titanium alloy; grille; abrasive flow machining; surface integrity; surface roughness; residual stress; microhardness

格栅零件是隐形战机上至关重要的核心部件之一,它的主要作用是将入射电磁波的大部分能量反射到雷达无法接收的方向上,形成雷达屏障^[1-3]。另外,钛合金具有强度高、抗蚀性好、耐高温等一系列优良的性能,因此被广泛应用于航空、航天、船舶、医疗器械等领域。格栅工件为六边形双曲面结构,中心区域阵列分布有菱形孔,孔的轴线与面垂直。格栅工件的材料为钛合金,属于难加工材料。钛合金格栅常用的加工方法有电火花加工^[4-5]和激光加工^[6-7],而这两种加工方式都是利用产生的热能进行材料的去除,因此格栅内孔在加工后表面会产生再铸层^[8],再铸层的内部含有微裂纹,严重影响了格栅的使用性能和疲劳性能。因此,经电火花加工或者激光加工后的表面需要后续处理,以去除再铸层。磨料流光整加工作为钛合金格栅加工的最后一道工序,要求去除格栅内孔表面电火花加工产生的再铸层,并实现内孔的抛光,改善其表面完整性。

磨料流加工技术是将一种含有磨粒的粘弹体介质,在压力作用下往复流经工件表面进行光整加工的方法,它能方便又高效地实现再铸层的去除以及内孔的抛光。张利等^[9]以表面粗糙度和表面形貌为评价指标,提出了一种基于气体补偿的磨料流加工方法,最终得到的钛合金工件表面粗糙度 R_a 小于 0.3 μm 。Mitchell Howard 等^[10]针对钛合金材料,以表面粗糙度、材料去除以及峰高减少量为评价指标,对磨料流加工因素的相互作用和影响进行了系统研究。Sato T 等^[11]以表面粗糙度为评价指标,针对钛合金航空航天部件的内部通道,对磨料流加工模型进行了验证,实验结果与理论曲线相吻合。国内外学者主要是对磨料流光整加工钛合金零件前后表面粗糙度、表面微观形貌和材料

去除率进行了研究,而表面完整性包括了其他一些参量,例如显微硬度和残余应力,这些都是影响工件使用性能和疲劳性能的主要因素,但国内外学者对其研究较少。因此,本文针对钛合金格栅零件,通过制备钛合金试样,开展磨料流光整加工钛合金表面完整性研究,研究加工参数对表面粗糙度的影响规律,并对比分析工件在加工前后显微硬度和残余应力的变化情况。

1 试验设计

为研究磨料粒径、加工压力和加工次数对表面粗糙度和表面形貌的影响规律,分别进行磨料粒径、加工压力和加工次数的单因素试验。磨料粒径的单因素试验相关参数如表 1 所示,加工压力的单因素试验相关参数如表 2 所示,加工次数单因素试验相关参数如表 3 所示。加工设备选用 PCMA-250 磨料流机床,磨料选择实验室常用的 SiC 磨料,磨粒含量为 40%,使用添加剂将磨料的黏度调节至 1200 Pa·s (30.3 $^{\circ}\text{C}$),试验中黏度用博勒飞黏度计 DVT2 测得。采用三丰 SJ-210 粗糙度仪进行表面粗糙度的测量,测量方向与磨料流光整加工方向一致,每个试样测 3 个点,取平均值。由于再铸层是熔融材料在基体表面形成的淬火铸造组织,内部多含有微裂纹和孔洞,因此无法准确地测量出表面残余应力值,只能定性地分析其在加工前后的变化情况。为研究磨料流光整加工对工件表面残余应力的影响,进行加工效果试验。选用 3 种初始条件不同的钛合金试样,试验相关参数为:磨料粒径 80 μm ,加工压力 10 MPa,加工次数 40 次。测量表面残余应力选用的仪器是便携式 X 射线残余应力分

析仪 μ -X360n, 每个试样选择加工表面中心处为测量点。为研究在磨料流光整加工过程中工件表面显微硬度的变化情况, 进行加工次数的单因素试验。在相关参数与粗糙度影响规律的试验中, 加工次数的单因素试验参数一致, 如表 3 所示。采用 ZHVST-1000D 维氏硬度计测量试样表面的显微硬度, 设定试验力为 9.80 N, 每个试样沿磨料流光整加工方向均匀取 5 个点为测量点。

表 1 磨料粒径单因素试验参数
Tab.1 Single factor experiment parameters
of abrasive grain size

No.	Abrasive grain size/ μm	Machining pressure/MPa	Machining times
1	38	8	30
2	80	8	30
3	180	8	30
4	320	8	30
5	420	8	30

表 2 加工压力单因素试验参数
Tab.2 Single factor experiment parameters
of machining pressure

No.	Abrasive grain size/ μm	Machining pressure/MPa	Machining times
1	80	8	30
2	80	12	30
3	80	16	30
4	80	20	30
5	80	24	30

表 3 加工次数单因素试验参数
Tab.3 Single factor experiment parameters
of machining pressure

No.	Abrasive grain size/ μm	Machining pressure/MPa	Machining times
1	180	8	10
2	180	8	20
3	180	8	30
4	180	8	40
5	180	8	50
6	180	8	60
7	180	8	70
8	180	8	80
9	180	8	90

用电火花加工制备钛合金试样, 如图 1 所示, 矩形框内为电火花加工表面。夹具示意图如图 2 所示, 底座 1、支撑环 2 和顶盖 3 之间采用间隙配合方便拆装。底座 1 和定位管 6、螺帽 5 和定位管 6 之间通过螺纹配合。工件 7 和定位管 6 之间采用过渡配合, 夹具材料为调质处理后的 45 钢, 采用上下往复式加工。

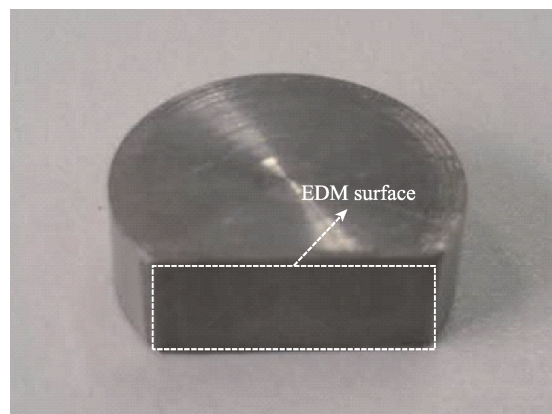


图 1 钛合金试样
Fig.1 Sample of titanium alloy

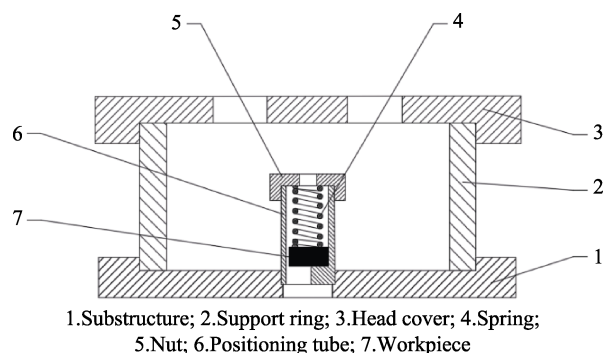


图 2 试样夹具示意图
Fig.2 Schematic diagram of sample fixture

2 结果及分析

2.1 表面粗糙度试验分析

2.1.1 磨料粒径对表面粗糙度的影响

磨料粒径对表面粗糙度的影响规律如图 3 所示, 当磨料粒径为 38、80、180、320、420 μm 时, 其对应的表面粗糙度值 Ra 分别为 5.815、4.314、2.627、1.036、0.824 μm , 表明在其他加工条件一致的情况下, 随着

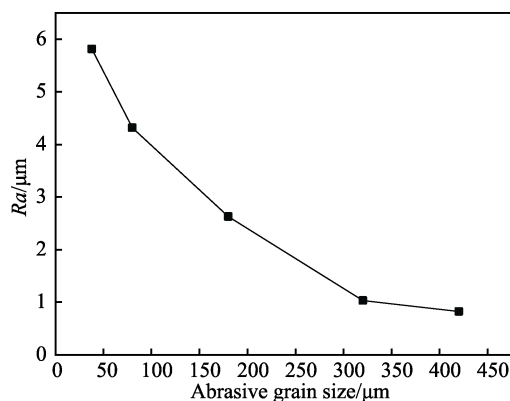


图 3 磨料粒径对表面粗糙度 Ra 的影响
Fig.3 Effect of abrasive grain size on surface roughness Ra

磨料粒径的增大, 工件表面粗糙度有较明显的下降趋势。图 4a—c 为试样在 3 种磨料粒径加工条件下的表面形貌, 可以清晰地看到磨料粒径越大, “橘皮纹”状再铸层的去除效果越明显。出现这种规律的原因之一, 是根据文献[12]的结论, 颗粒粒径由 $0.5\ \mu\text{m}$ 增加到 $40\ \mu\text{m}$ 时, 浆料黏度随之降低, 因而在本试验中, 磨料粒径的增大会导致磨料黏度降低, 而磨料黏度越低, 磨料的流速和动压就越大。根据 Preston 模型, 即

公式 (1), 磨料流速越大, 单位时间内的材料去除深度越深, 对工件表面的磨削作用就越强, 因而抛光效果越明显。另一个原因是, 磨料粒径越大, 单个磨粒切削深度越深, 抛光效果也越明显, 粗糙度就越低。

$$D_t = KvP \quad (1)$$

其中, D_t 表示单位时间内的材料去除深度, v 表示磨料流速, P 表示材料所受压力, K 表示其他所有因素的作用相关系数。

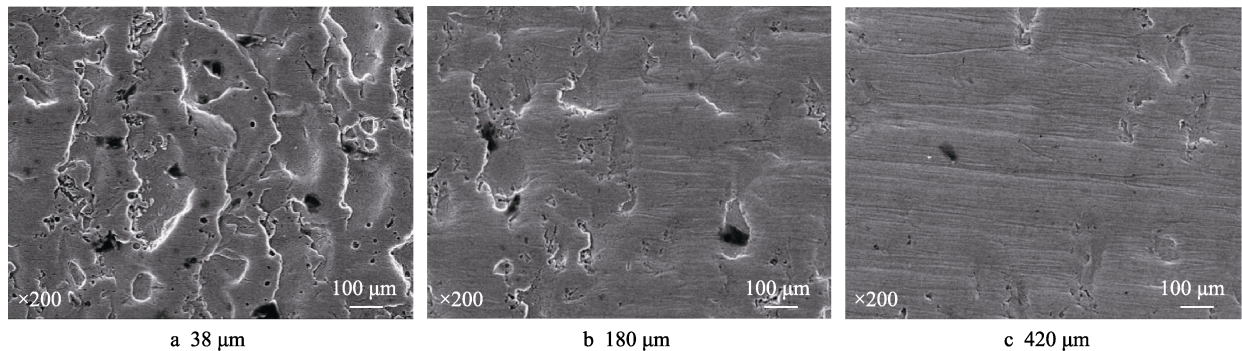


图 4 磨料粒径对表面形貌的影响
Fig.4 Effect of abrasive grain size on surface morphology

2.1.2 加工压力对表面粗糙度的影响

加工压力对表面粗糙度的影响规律如图 5 所示, 当加工压力为 8、12、16、20、24 MPa 时, 其对应的表面粗糙度值分别为 4.314、3.008、2.326、1.707、1.398 μm 。表明在其他加工条件一致的情况下, 随着加工压力的增大, 工件的表面粗糙度有较明显的下降。图 6a—c 为试样在 3 种加工压力下的表面形貌, 可以发现加工压力越大, 再铸层的去除效果越明显。这是因为加工压力越大, 不仅使试样表面所受的压力越大, 而且使磨料获得的初始速度越大, 根据公式(1), 单位时间内的材料去除深度就越深, 因而抛光效果越明显。

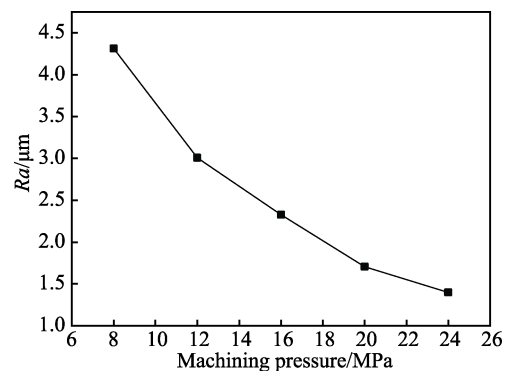


图 5 加工压力对表面粗糙度 Ra 的影响
Fig.5 Effect of machining pressure on surface roughness Ra

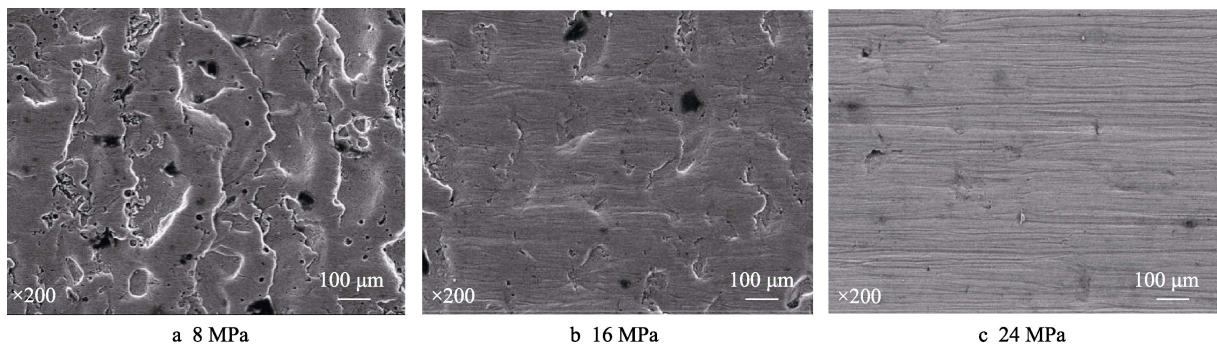


图 6 加工压力对表面形貌的影响
Fig.6 Effect of machining pressure on surface morphology

2.1.3 加工次数对表面粗糙度的影响

加工次数对表面粗糙度的影响规律如图 7 所示, 当

加工次数为 10、20、30、40、50、60、70、80、90 次时, 其对应的表面粗糙度值 Ra 分别为 5.925、4.410、

2.908、1.497、0.613、0.403、0.343、0.314、0.307 μm ，表面粗糙度在初始阶段下降较缓，之后下降速度显著增快，大概在 60 次以后下降速度明显减缓，直至最后无明显变化。出现这种现象的主要原因是：在加工过程中，磨料与工件之间摩擦产生的热量大部分被磨料所吸收，导致磨料的温度上升，磨料流光整加工所用到的磨料介质是一种假塑性非牛顿流体，它的黏度会随着温度的上升而下降，黏度下降导致加工过程中磨料的流速上升，从而增强抛光效果。不考虑其他因素的影响，工件最终可以达到的表面粗糙度水平主要取决于 SiC 磨粒的大小，因而最后阶段表面粗糙度趋于一个稳定值。图 8a—d 为试样在各加工阶段的表面形貌，可以看出，随着加工次数的增加，电火花加工产生的“橘皮纹”状再铸层逐渐被去除，加工效果明显，试样表面产生均匀纹路，纹路为挤压过程中磨粒

的划擦痕迹，且纹路方向与磨料运动方向一致。

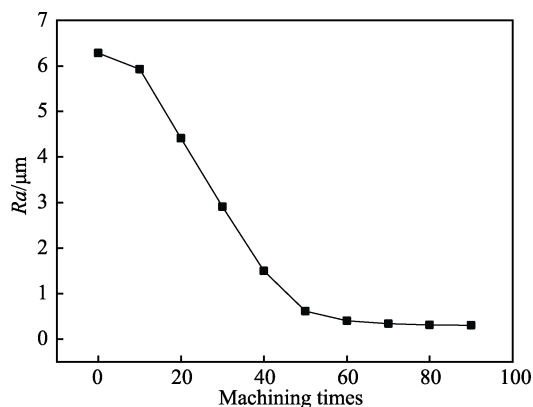


图 7 加工次数对表面粗糙度 Ra 的影响
Fig.7 Effect of machining times on surface roughness Ra

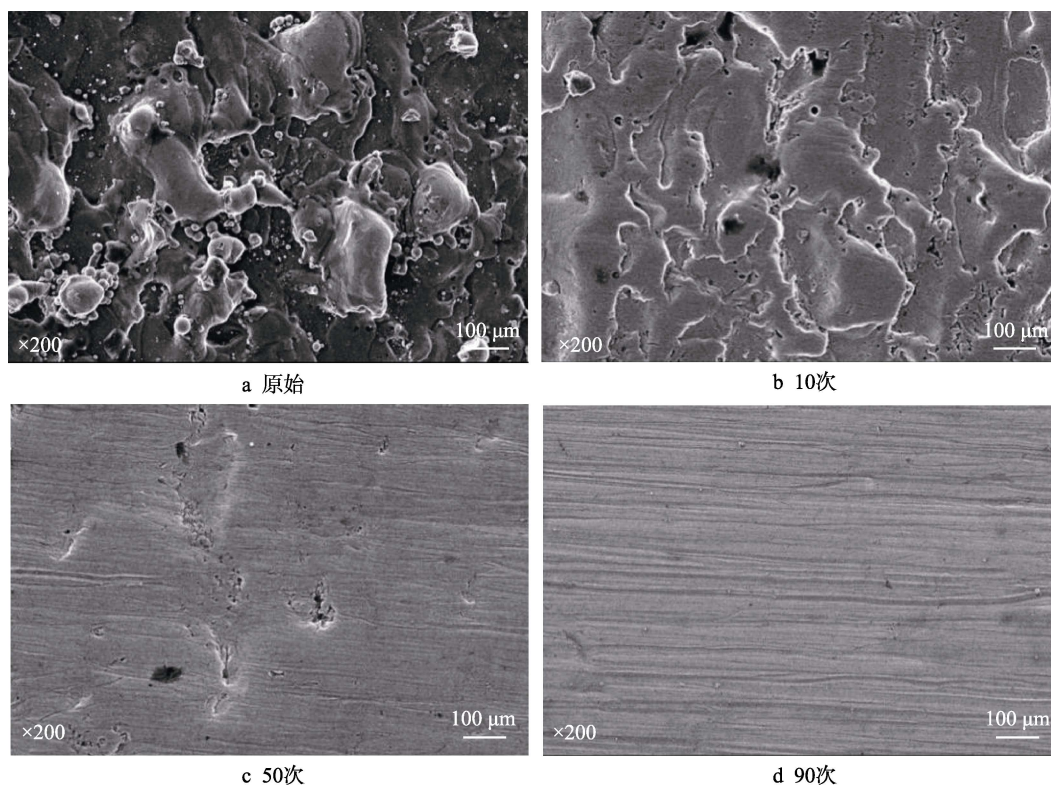


图 8 加工次数对表面形貌的影响

Fig.8 Effect of machining times on surface morphology: a) initial surface morphology, b) surface morphology when the machining times is 10, c) surface morphology when the machining times is 50, d) surface morphology when the machining times is 80

2.2 残余应力试验分析

对于电火花加工表面形成残余应力的原因，现阶段主要有两种解释：一是电火花加工时，工件加工表面会产生较大的温度梯度，这种温度梯度会形成热应力；二是在骤热骤冷状态下，接触微区发生相变，从而形成相变应力^[13]。热应力的存在会使得工件表面产生残余拉应力的趋势，而相变应力会松弛这种拉应

力，并可能向残余压应力转换^[14]。

磨料流光整加工前后的试样编号分别为 A1、B1、C1 和 A2、B2、C2。从表 4 测量结果可知，磨料流光整加工前，试样 A1、B1、C1 表面呈现为残余拉应力，而磨料流光整加工之后，试样 A2、B2 和 C2 表面残余应力在磨料流介质流动方向和垂直方向都变成压应力，这与彭灿等人^[15]对磨料流加工后残余应力变化的研究结果一致。分析认为：在磨料流光整加工

过程中,磨粒在磨料介质的压力作用下对工件待加工表面往复挤压,工件表面的晶粒组织由于其塑性,也随之往复移动,并在工件与磨粒刃尖接触点附近形成赫兹型应力场,从而导致工件表面形成残余压应力。

表 4 加工前后试样表面残余应力
Tab.4 Surface residual stress of the sample before and after processing

Sample No.	$Ra/\mu\text{m}$	Normal stress/MPa	Shear stress/MPa
A1	1.6	57	176
B1	3.2	114	52
C1	6.3	34	78
A2	0.384	-24	-105
B2	0.527	-52	-40
C2	1.425	-27	-98

2.3 显微硬度试验分析

每个试样 5 个点的测量值取平均数,得到图 9 显微硬度随加工次数的变化规律,可以看出试样表面的显微硬度总体上呈现出先下降后上升的趋势。分析认为:试样经过电火花加工后表面产生了再铸层,再铸层是熔融材料在材料加工表面形成的淬火铸造组织,硬度较高,随着加工次数的增加,再铸层逐渐被去除,因此显微硬度呈现下降趋势;随着加工次数的进一步增加,再铸层被完全去除,表层材料在磨削力的作用下发生塑性变形、位错,表层硬度变大,出现加工硬化现象,因此显微硬度呈现上升趋势。根据每个试样 5 个点的测量值,可以得到图 9 的显微硬度标准差变化折线图,从图 9 可以看出,试样表面显微硬度测量值的标准差随加工次数的增加而减小,这表明试样表面显微硬度的均匀性在变好。出现这种现象的原因是:电火花加工后,试样表面存在放电凹坑,因此硬度波动较大,而随着加工次数的增加,原先厚度不均匀的再铸层逐渐被去除,直至出现光滑的表面。图 10 为其中 3 种加工次数下显微硬度分布情况,可以更清晰地

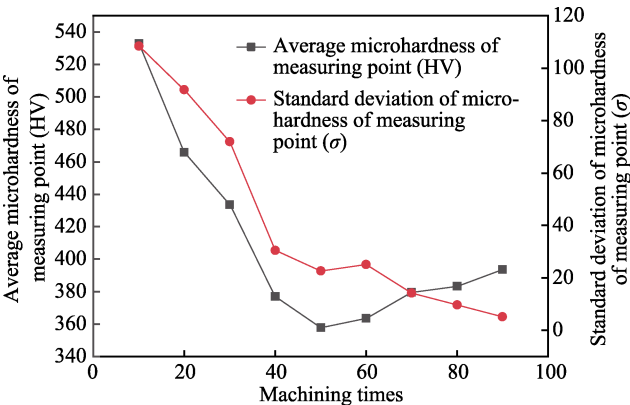


图 9 加工次数对显微硬度的影响
Fig.9 Effect of machining times on microhardness

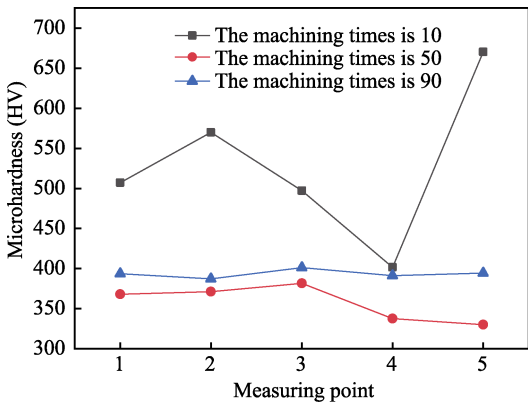


图 10 不同加工次数下的显微硬度分布情况
Fig.10 Distribution of microhardness under different machining times

看出,随着加工次数的增加,试样表面显微硬度的均匀性有较大改善。

3 结论

- 1) 对于钛合金试样来说,磨料粒径和加工压力越大,内孔抛光效果越明显,表面粗糙度就越低。而随着加工次数的增加,表面粗糙度从整体上呈现下降趋势,最后趋于稳定。
- 2) 钛合金试样在经历磨料流光整加工之后,表面残余应力由原来的拉应力变成了压应力,这将大大提高工件的疲劳寿命。
- 3) 随着加工次数的增加,钛合金试样的表面显微硬度从整体上呈现先减小后增大的趋势,并产生加工硬化现象。此外,试样表面显微硬度的均匀性也大大增强。

参考文献:

[1] 张乐,周洲,许晓平. 进气道进口格栅电磁散射特性及试验验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(3): 361-369.
ZHANG Le, ZHOU Zhou, XU Xiao-ping. Electromagnetic scattering characteristics and experimental verification of inlet grille[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49(3): 361-369.

[2] 蒋诗才,邢丽英,李斌太,等. 格栅结构吸波性能探索研究[J]. 航空材料学报, 2006(3): 196-198.
JIANG Shi-cai, XING Li-ying, LI Bin-tai, et al. Study on wave-absorbing properties advanced stiffened grid structure[J]. Journal of aeronautical materials, 2006(3): 196-198.

[3] CHEN M, PEI Y, FANG D. Design, fabrication, and characterization of lightweight and broadband microwave absorbing structure reinforced by two dimensional composite lattice[J]. Applied physics A, 2012, 108(1): 75-80.

(下转第 138 页)

- XI Ming-zhe, YU Gang. Numerical simulation for the transient temperature field of 3D moving laser molten pool[J]. Chinese journal of lasers, 2004, 31(12): 1527-1532.
- [16] TANI G, FORTUNATO A, ASCARI A, et al. Laser surface hardening of martensitic stainless steel hollow parts [J]. CIRP annals- manufacturing technology, 2010, 59(1): 207-210.
- [17] 谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相硬化温度场数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 111601.
- TAN Wen-dan, PANG Ming, JIANG Guo-ye, et al. Numerical simulation of laser transformation hardening temperature field of high-enhanced diesel engine valve seat[J]. Laser & optoelectronics progress, 2018, 55(11): 111601.
- [18] 李荣德, 张子慧, 向青春, 等. Niyama 判据预测大型铸钢件旋回破碎机横梁缩孔疏松缺陷[J]. 铸造技术, 2015(5): 1196-1200.
- LI Rong-de, ZHANG Zi-hui, XIANG Qing-chun, et al. Prediction of shrinkage and porosity of crossbeam used for large scale steel casting gyratory crusher by Niyama criterion[J]. Foundry technology, 2015(5): 1196-1200.
- [19] 刘利刚, 杨庆祥, 李强, 等. 利用 Niyama 判据预测离心铸造轧辊缩孔疏松缺陷[J]. 铸造技术, 2009, 30(12): 1580-1582.
- LIU Li-gang, YANG Qing-xiang, LI Qiang, et al. Prediction of shrinkage cavity and porosity in centrifugal cast rollers by niyama criterion[J]. Foundry technology, 2009, 30(12): 1580-1582.
- [20] DERAKHSHAN E D, YAZDIAN N, CRAFT B, et al. Numerical simulation and experimental validation of residual stress and welding distortion induced by laser-based welding processes of thin structural steel plates in butt joint configuration[J]. Optics & laser technology, 2018, 104: 170-182.
-
- (上接第 85 页)
- [4] 赵建社, 郁子欣, 周旭娇, 等. 基于灰色理论的钛合金电火花加工工艺参数优化试验[J]. 中国机械工程, 2015, 26(14): 1877-1882.
- ZHAO Jian-she, YU Zi-xin, ZHOU Xu-jiao, et al. Experiments of parameter optimization of EDM titanium alloy based on gray relation theory[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(14): 1877-1882.
- [5] 万符荣, 吴强, 徐琳俊, 等. 钛合金格栅网板群孔电火花成形加工工艺研究[J]. 电加工与模具, 2018(1): 11-16.
- WAN Fu-rong, WU Qiang, XU Lin-jun, et al. Study on sinking electro-discharge machining processing of holes on the titanium alloy grille board[J]. Electrical machining and mould, 2018(1): 11-16.
- [6] LEITZ K H, KOCH H, OTTO A, et al. Numerical simulation of process dynamics during laser beam drilling with short pulses[J]. Applied physics A: Materials science & processing, 2012, 106(4): 885-891.
- [7] HIROFUMI Hidai, YOUSUKE Kuroki, SOUTA Matsusaka, et al. Curved drilling via inner hole laser reflection[J]. Precision engineering, 2016, 46: 96-103.
- [8] 刘发展, 曲宁松, 朱增伟. 无再铸层异型孔的电火花-电解组合加工研究[J]. 电加工与模具, 2010(2): 33-37.
- LIU Fa-zhan, QU Ning-song, ZHU Zeng-wei. Research on EDM-ECM combined process for machining holes without recast layer[J]. Electric machining and mould, 2010(2): 33-37.
- [9] ZHANG Li, WANG Jin-shun, TAN Da-peng, et al. Gas compensation-based abrasive flow processing method for complex titanium alloy surfaces[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 92: 9-12.
- [10] HOWARD M, CHENG K. An integrated systematic investigation of the process variables on surface generation in abrasive flow machining of titanium alloy 6Al4V[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of engineering manufacture, 2014, 228(11): 1419-1431.
- [11] SATO T, WAN S, ANG Y J. Study of process characteristics of abrasive flow machining (AFM) for Ti-6Al-4V and validation with process model[J]. Advanced materials research, 2013, 797: 411-416.
- [12] 解玉鹏, 宫勋, 郎成. SiC 颗粒含量和粒径对浆料黏度的影响[J]. 吉林化工学院学报, 2015, 32(8): 63-66.
- XIE Yu-peng, GONG Xun, LANG Cheng. Effects of SiC particle content and size on slurry viscosity[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2015, 32(8): 63-66.
- [13] 夏劲武, 徐家文, 赵建社. 电火花加工表面质量的研究及进展[J]. 电加工与模具, 2008(6): 11-15.
- XIA Jin-wu, XU Jia-wen, ZHAO Jian-she. Research and development of surface quality machined by EDM[J]. Electric machining and mould, 2008(6): 11-15.
- [14] 胡肖强, 严立. 电火花强化表面的残余应力探讨[J]. 电加工, 1988(4): 8-11.
- HU Xiao-qiang, YAN Li. Discussion on residual stress of electrical spark deposition surfaces[J]. Electric machining, 1988(4): 8-11.
- [15] 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.