

引文格式: 朱慧宁, 马小刚, 程海东, 等. 磁针磁力研磨工艺对发动机涡轮叶片表面质量的试验研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(18): 62-68.

ZHU Huining, MA Xiaogang, CHENG Haidong, et al. Experimental study on surface quality of engine turbine blade by magnetic needle magnetic abrasive technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(18): 62-68.

# 磁针磁力研磨工艺对发动机涡轮叶片表面质量的试验研究

朱慧宁, 马小刚, 程海东, 陈 燕, 韩 冰

(辽宁科技大学, 鞍山 114051)

[摘要] 航空燃气涡轮发动机中涡轮叶片表面质量的好坏直接影响发动机的整体性能, 针对目前国内外对涡轮叶片进行表面处理过程中存在的几何精度偏低、质量不稳定等现状, 引入磁针磁力研磨工艺, 并以不同磁针型号、磁极转速及研磨时间为变化因素, 以叶片气膜孔周边毛刺高度、叶片表面粗糙度及残余应力大小为指标通过试验来进行变化因素与指标参数间的规律分析。结果表明, 涡轮叶片表面残余应力由原始拉应力转变为压应力, 压应力值随磁针长度和磁极转速的增加而增加。涡轮叶片表面粗糙度及气膜孔周边毛刺高度经磁针磁力研磨后均得到明显改善。研究结果可为磁针磁力研磨工艺对涡轮叶片表面质量的改善提供参考依据。

关键词: 磁力研磨; 残余应力; 表面质量; 气膜孔冷却; 涡轮叶片

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.18.062



朱慧宁

硕士研究生, 研究方向为磁针磁力研磨技术的工程化应用。

航空发动机涡轮叶片作为航空发动机上的重要组成部分, 长期在高温、高压等恶劣环境下工作<sup>[1]</sup>, 是航空发动机最容易发生故障的部件之一<sup>[2]</sup>。目前, 通过叶片上密布排列的气膜孔进行冷却已经成为最广泛的冷却方式<sup>[3]</sup>, Bunker<sup>[4]</sup>在2006年提到, 提高冷却性能和降低循环过程的气动损失是涡轮冷却技术的两个主要目标。气膜冷却的相关研究一直关注几何参数(孔形、节距等)和气动参数(吹风比、密度比等)对两个指标的影响<sup>[5]</sup>。除了涡轮叶片气膜孔的尺寸精度、表面质量要求, 涡轮叶片气膜孔的形状对冷却效果的影响至关重要<sup>[6-7]</sup>。然而, 电火花和激光加工作为当下最成熟的气膜孔加工技术存在重熔层增厚超标、微裂

纹、气膜孔棱边毛刺残留等缺陷, 涡轮叶片若不经处理则会在使用过程中造成毛刺、熔融积瘤等的脱落, 导致气膜孔局部阻塞, 进而严重影响涡轮发动机的使用寿命<sup>[8-11]</sup>。传统研磨工艺中很难去除气膜孔棱边处重熔层积瘤和毛刺, 水射流、磨粒流等新技术也只能去除部分毛刺或造成化学成分的残留。同时, 残余应力作为一种非稳定状态下而产生的残留应力, 其大小可直接导致工件的翘曲变形及尺寸变化等问题, 是工件因环境应力开裂的主要原因<sup>[12]</sup>, 但涡轮叶片残余应力的研究并无过多参考资料。航空发动机涡轮叶片表面质量、残余应力等的改善研究已成为企业亟须解决的重大问题之一。目前, 磁针磁力研磨应用广泛, 可以去除蒙

皮微孔毛刺、涡轮轴内壁积碳<sup>[12]</sup>、燃油喷嘴积碳<sup>[13]</sup>、提高异形管内表面质量及使用寿命<sup>[14]</sup>等。针对这一企业难题现状及磁针磁力研磨的应用前景,提出采用磁针磁力研磨工艺,在保证涡轮叶片尺寸精度和形状精度的条件下改善其表面质量,降低其残余应力,提高叶片使用寿命。本文以不同磁针型号、磁极转速及研磨时间为影响因素,以叶片气膜孔周边毛刺高度、叶片表面粗糙度及残余应力大小为指标,量化研究各影响因素与指标参数间的规律关系,为磁针磁力研磨工艺对涡轮叶片表面质量的改善提供参考依据。

## 磁针磁力研磨工作原理

### 1 工作原理

图1(a)为磁针磁力研磨加工原理图,在研磨过程中将被加工件置于专用工装夹具上,与按一定比例混合的研磨液和磁针放入适宜容积容器内,利用电机主轴带动磁极旋转从而产生旋转磁场,磁针在旋转磁场的作用下开始运动,此过程中磁针在相互碰撞力、研磨液浮力、惯性力及磁场力等力的共同作用下处于无序运动状态,使磁针与工件之间发生相对运动,无数磁针无序撞击在工件表面达到有效去除毛刺,强化工件表面,改变工件表面的应力状态,提高工件抗腐蚀性的目的。试验装置图如图1(b)所示。

### 2 磁针受力分析

磁针在磁场中被磁化同样会产生磁场形成明显的N极和S极。图2为磁针在磁场中磁化示意图,可知磁针总是顺着磁感线的方向排布<sup>[15]</sup>。假设磁极盘上磁极与磁针间距为 $l_1$ ,磁极强度为 $m_a$ ,磁针磁极强度为 $m_b$ ,则

$$H_{m_a} = \frac{m_b}{4\pi\mu_0 l_1^2} \quad (1)$$

$$H_{m_b} = \frac{m_a}{4\pi\mu_0 l_1^2} \quad (2)$$

其中, $H_{m_a}$ 为磁极所处位置磁场强度;

$H_{m_b}$ 为磁针所处位置磁场强度; $\mu_0$ 为真空导磁率。

则可得磁针公转时在磁场力中所受的磁场力为

$$F = m_b H_{m_b} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可知磁针在磁场中受力的大小与磁针质量及磁场强度有关。

### 3 磁针去除机理分析

由于磁针的复杂运动,磁针与工

件的接触形式有很多,目前磁针与工件接触方式有碰撞、划擦和翻滚。由于磁针与工件之间不断地碰撞、划擦、翻滚,使得工件表面的毛刺发生塑性变形,发生塑性变形的毛刺再经磁针的碰撞、划擦、翻滚就很容易从工件表面脱落,从而达到去毛刺的效果。图3是磁针去除毛刺的机理图,要想去除毛刺,磁针与工件之间就会存在相对运动,即工件与磁针之间存

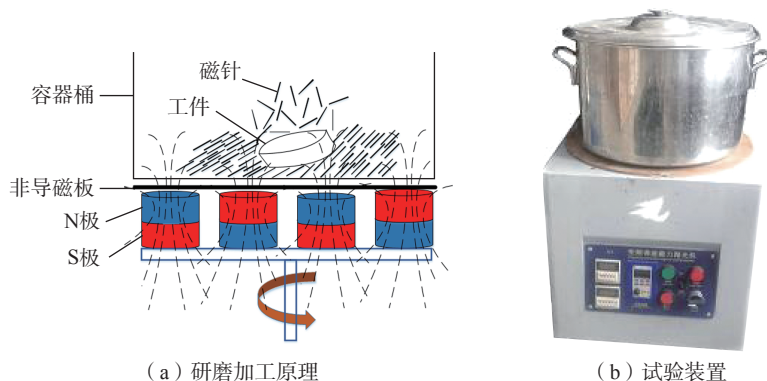


图1 磁针磁力研磨加工原理及试验装置

Fig.1 Magnetic abrasive machining with magnetic needle and test device

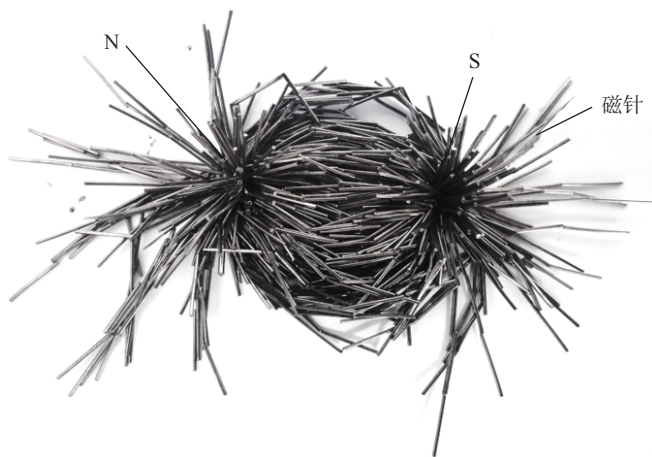


图2 磁针在磁场中磁化示意图

Fig.2 Magnetization of magnetic needle in magnetic field

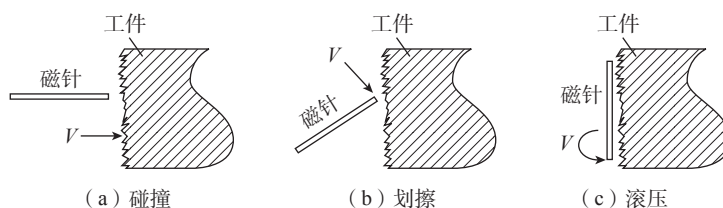


图3 磁针去除毛刺示意图

Fig.3 Schematic diagram of magnetic needle deburring

在速度差。

### 磁针磁力研磨试验参数

试验研究对象为某型号航空发动机涡轮叶片,材料为 DD6 单晶镍基合金,叶片示意图如图 4 所示。采用水基研磨液,在研磨过程中有散热作用,防止温度过高导致磁场强度下降。磁针直径要大于气膜孔孔径,防止研磨过程中磁针进入气膜孔内部造成堵塞。具体试验参数见表 1。

试验采用广州广精精密仪器 JB-8E 表面粗糙度仪来检测研磨前后涡轮叶片表面粗糙度,取样长度为 4mm;研磨前后表面形貌采用日本 VHX-500F 超景深显微镜进行观察;残余应力场采用荷兰的 X'Pert Powder 残余应力测试分析系统,测试条件: C $\mu$  靶 K-a 波段,靶电压 30kV,靶电流 25mA,布格拉角 145°,曝光时间 9s。

### 试验结果与讨论

#### 1 气膜孔周边毛刺高度

采用 JB-8E 表面粗糙度仪检测研磨前叶片表面粗糙度  $R_a=0.5\mu\text{m}$ ,超景深显微镜观察叶片气膜孔周边毛刺原始高度为  $43.9\mu\text{m}$ ,采用 X'Pert Powder 测的叶片原始表面残余应力为 324.7MPa。本试验方案如表 2 所示,方案分为 4 组,研究了磁极转速、磁针长度、磁针直径及研磨时间对气膜孔周边毛刺的变化,不同影响因素下研磨前后气膜孔周边毛刺高度的变化如图 5 所示。当磁极转速为 400r/min 时,毛刺高度  $h$  由原始  $43.9\mu\text{m}$  变为研磨后  $34.5\mu\text{m}$ ,变化量  $\Delta h$  较小,这是由于磁极转速小,磁针研磨压力较小,因而毛刺去除量小;当磁极转速为 800r/min,毛刺高度变化量  $\Delta h$  为  $20.2\mu\text{m}$ ;当磁极转速为 1200r/min 时,  $\Delta h$  为  $28.3\mu\text{m}$ 。随着磁极转速的增加,磁针获得的研磨压力也增加,因而毛刺去除量也不断增大。

图 6 为选用  $\phi 0.3\text{mm} \times 5\text{mm}$  型号磁针、磁极转速 800r/min、磁针长度 5mm、研磨时间 8min 条件下,利用超景深显微镜拍摄的三维表面形貌图,在气膜孔棱边画一条线 AB,表示 A 到 B 区域的毛刺平均高度,数值为  $27.4\mu\text{m}$ 。在磁极转速 800r/min、研磨时间 8min 条件下,通过对比  $\phi 0.3\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$  和  $\phi 1.0\text{mm} \times 5\text{mm}$  3 种不同直径、同长度的磁针磁力研磨前后毛刺高度的变化,得到磁针直径越大,毛刺去除量越大。图 7 为在方案 4 条件下研磨前后气膜孔二维表面形貌图,可知  $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$  型号的磁针研磨表面最好。利用  $\phi 0.3\text{mm} \times 5\text{mm}$  磁针加工工件表面时,由于单个磁针质量较

小,所获动能小,研磨力度不够,因而毛刺去除量少,效果不明显;而磁针直径为  $\phi 1.0\text{mm}$  时,直径大,质量大,研磨压力变大,此时毛刺去除量明显增大,但对工件表面形貌造成一定的损伤。

在方案 3 条件下,先后利用  $\phi 0.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ 、 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、 $\phi 0.5\text{mm} \times 7\text{mm}$  3 种同直径、不同长度磁针对涡轮叶片表面进行研磨加工,得出  $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$  磁针研磨毛刺高度去除量最大。这是由于长度 3mm 磁针在旋转磁场中速度较低,研磨压力不足,撞击毛刺次数较少,研磨不充分,因而毛刺去除量较少;长度 7mm 磁针研磨工件表面毛刺去除量少是由于磁针太长,在旋转磁场的作用下翻滚次数较少,对毛刺划擦次数

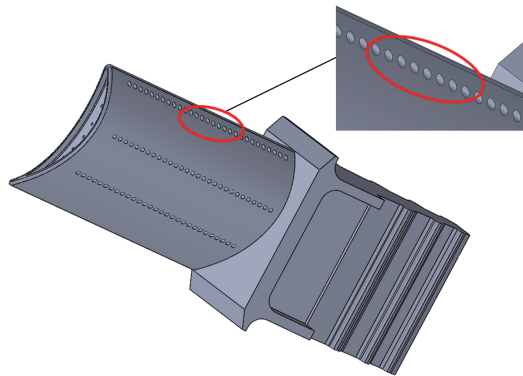


图 4 叶片示意图  
Fig.4 Blade diagram

表 1 试验工艺参数

Table 1 Parameters of test process

工件材料	旋转磁场转速 / ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	研磨时间 / min	水基研磨液 / mL	磁针直径 / mm	磁针长度 / mm
DD6 单晶 镍基合金	400, 800, 1200	2, 5, 8	500	0.3, 0.5, 1.0	3, 5, 7

表 2 试验方案及试验条件

Table 2 Test scheme and test conditions

试验方案	试验条件
方案 1	磁针型号 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ , 研磨时间 8min
方案 2	磁针长度 5mm, 磁极转速 800r/min, 研磨时间 8min
方案 3	磁针直径 $\phi 0.5\text{mm}$ , 磁极转速 800r/min, 研磨时间 8min
方案 4	磁针型号 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ , 磁极转速 800r/min

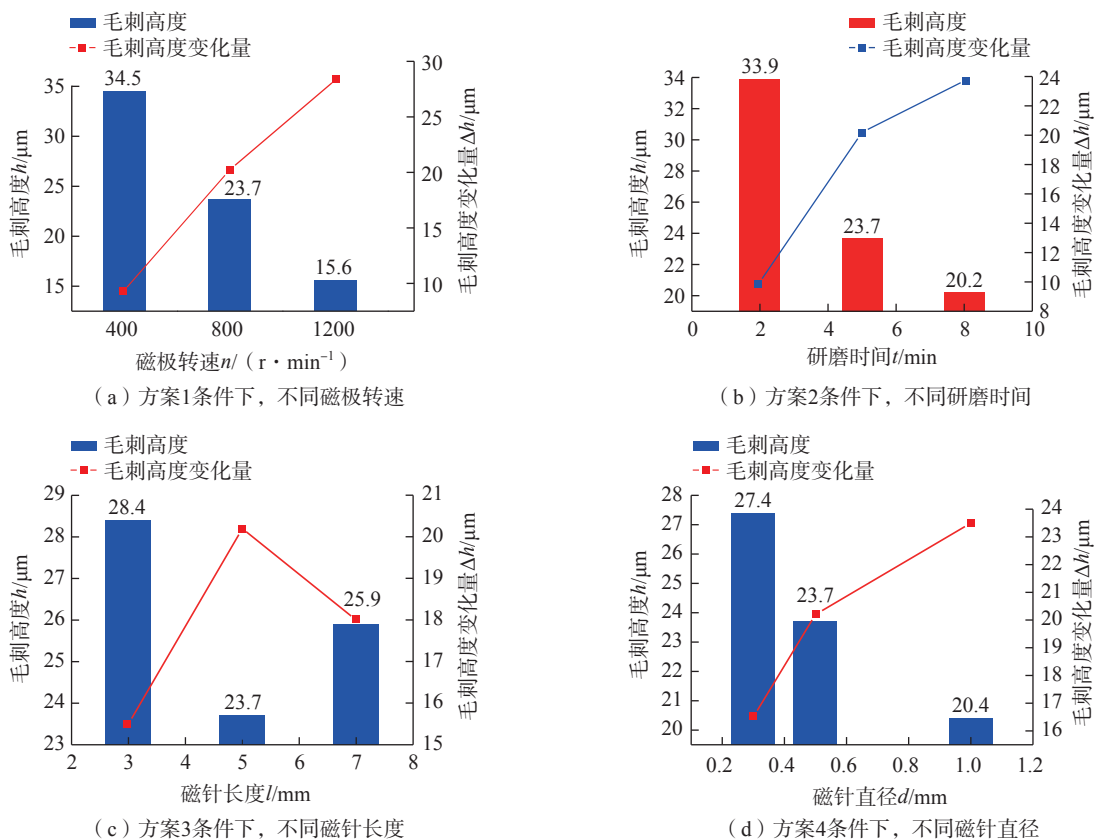


图5 不同试验条件下毛刺高度变化图

Fig.5 Variation diagram of burr height under different test conditions

少,因而毛刺去除率较低。

在方案4条件下,研磨时间分别为2min、5min、8min时,从表3数据可得出随着时间的增加,磁针与工件碰撞、划擦的次数增加,因而毛刺高度去除量大大增加。

## 2 表面粗糙度分析

表3为不同影响因素下研磨前后涡轮叶片表面粗糙度的变化,原始表面粗糙度  $R_a$  为  $0.5\mu\text{m}$ 。由表3可知,表面粗糙度随着磁针长度增加呈先降低后增加趋势。在磁场转速  $800\text{r}/\text{min}$ 、磁针型号  $\phi 0.5\text{mm} \times 3\text{mm}$  条件下研磨5min,表面粗糙度  $R_a$  变为  $0.28\mu\text{m}$ ,变化量  $\Delta R_a$  为  $0.22\mu\text{m}$ 。 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$  型号磁针研磨后表面粗糙度最低,对比原始表面粗糙度值变化最大,表面质量最好。

由表3可知,叶片表面粗糙度随着磁针直径增加先降低再增加。在  $\phi 0.3\text{mm} \times 5\text{mm}$  磁针条件下,表

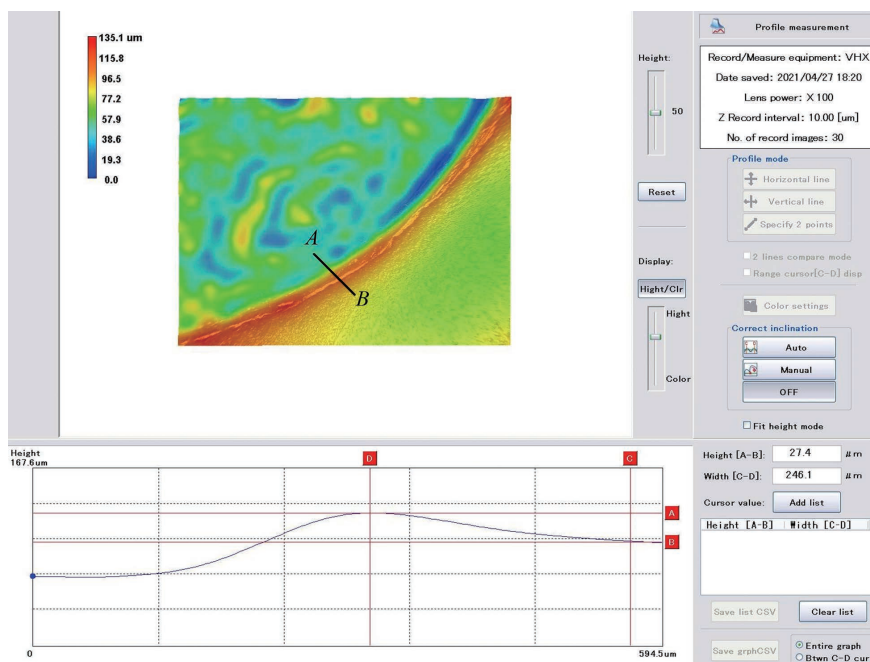


图6 研磨表面毛刺高度图

Fig.6 Figure of burr height on grinding surface

面粗糙度  $R_a$  为  $0.29\mu\text{m}$ ,对比原始表面粗糙度降低了  $0.21\mu\text{m}$ ;当采

用  $\phi 1.0\text{mm} \times 5\text{mm}$  磁针研磨后,表面粗糙度  $R_a$  为  $0.80\mu\text{m}$ ,变化量  $\Delta R_a$

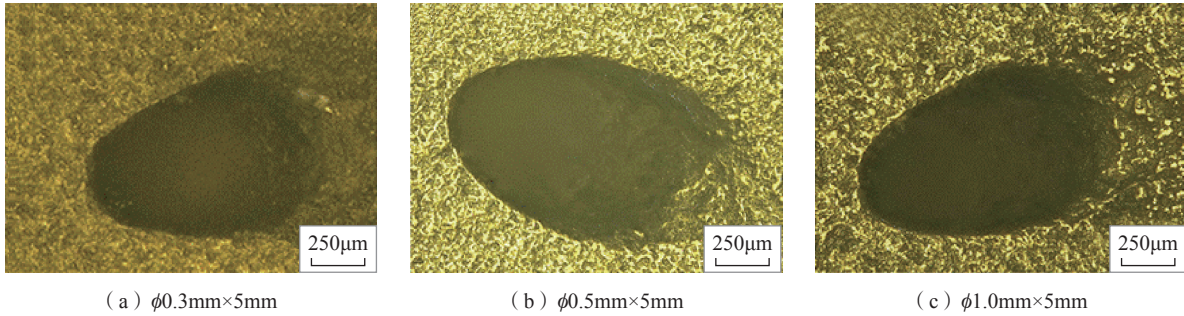


图7 磁针不同直径下研磨5min后表面形貌对比图

Fig.7 Comparison of morphology after grinding for 5min with different needle diameters

表3 不同方案下表面粗糙度对比

Table 3 Comparisons of surface roughness under different schemes

试验条件	方案1			方案2			方案3			方案4		
	磁极转速 $n / (r \cdot \min^{-1})$			磁针直径 $d / \text{mm}$			磁针长度 $l / \text{mm}$			研磨时间 $t / \text{min}$		
	400	800	1200	0.3	0.5	1.0	3	5	7	2	5	8
$R_a / \mu\text{m}$	0.29	0.21	0.35	0.29	0.2	0.8	0.28	0.21	0.28	0.32	0.21	0.16
$\Delta R_a / \mu\text{m}$	0.21	0.29	0.15	0.21	0.3	-0.3	0.22	0.29	0.22	0.18	0.29	0.32

为 $-0.3\mu\text{m}$ ,这是由于磁针直径过大,在磁针撞击、翻滚、划擦工件表面时磨削痕迹较为明显,因而表面粗糙度有所增加。

同样,叶片表面粗糙度随磁极转速增加呈先降低后增大趋势,这是由于当磁极转速为 $400\text{r}/\text{min}$ 时,磁极转速较小,磁针获得的动能就小,磁针撞击工件表面的力越小,仅去除部分毛刺,即工件表面粗糙度有所降低;当磁极转速为 $1200\text{r}/\text{min}$ 时,由于磁极转速较大,磁针获得的动能就大,磁针撞击工件表面的力越大,造成工件表面磁针击打过的痕迹较为明显,因此工件表面粗糙度增加。

### 3 残余应力分析

在相同磁场转速 $800\text{r}/\text{min}$ 、研磨 $8\text{min}$ 时,分别对比了 $\phi 0.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ 、 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、 $\phi 0.5\text{mm} \times 7\text{mm}$  3种不同磁针长度和 $\phi 0.3\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、 $\phi 1.0\text{mm} \times 5\text{mm}$  3种不同磁针直径对叶片残余应力的影响。由图8(a)可得采用3种不同磁针长度研磨后,工件表面的残余应力随着磁针长度的增加由

原始的拉应力 $324.7\text{MPa}$ 变为压应力 $83.5\text{MPa}$ ,同时随磁针长度的增加,残余压应力的值也随之增大。

图8(b)为3种不同磁针直径下研磨后残余应力图,叶片表面残余应力值由原始拉应力 $324.7\text{MPa}$ 变为压应力 $110.1\text{MPa}$ ,其数值随磁针直径的增大而增大。

如图8(c)所示,当磁针型号同为 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ,研磨时间为 $8\text{min}$ ,磁场转速分别为 $400\text{r}/\text{min}$ 、 $800\text{r}/\text{min}$ 、 $1200\text{r}/\text{min}$ 时,叶片表面残余应力由原始拉应力 $324.7\text{MPa}$ 变为压应力 $141.8\text{MPa}$ 。在磁场转速为 $400\text{r}/\text{min}$ 时,残余应力仍然为拉应力,这是由于磁场转速小,磁针所获动能不足,研磨压力不够因而残余应力变化不大。随着磁场转速增加,残余应力变化值相应越大。

如图8(d)所示,磁极转速为 $800\text{r}/\text{min}$ 、磁针型号 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、研磨 $8\text{min}$ 后,表面残余应力由原始拉应力 $324.7\text{MPa}$ 变为压应力 $132.8\text{MPa}$ 。这是由于随着研磨时间的增加,磁针击打工件次数也随之增加,

工件内部晶格间碰撞次数增大,释放残余应力,随着研磨时间增加,表面残余应力也呈增大趋势。

由前文综合分析可知,当磁场转速 $800\text{r}/\text{min}$ 、磁针型号 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、研磨时间 $8\text{min}$ 时,叶片表面质量最好。采用XPert Powder残余应力测试分析系统所测叶片表面应力变化值。叶片表面残余应力由原始的拉应力 $(324.7 \pm 56.9)\text{MPa}$ 变为压应力 $(132.8 \pm 26.9)\text{MPa}$ ,可有效提高叶片抗疲劳强度,提高其服役寿命(图9)。

### 结论

(1)以不同磁针型号、磁极转速及研磨时间为影响因素,以叶片气膜孔周边毛刺高度、叶片表面粗糙度及残余应力大小为指标,通过试验得到各影响因素与指标参数间的量化规律关系,可为磁针磁力研磨工艺对涡轮叶片表面质量的改善提供参考依据。

(2)通过磁针磁力研磨试验数据可得,当磁场转速为 $800\text{r}/\text{min}$ ,磁针型号为 $\phi 0.5\text{mm} \times 5\text{mm}$ ,研磨时间

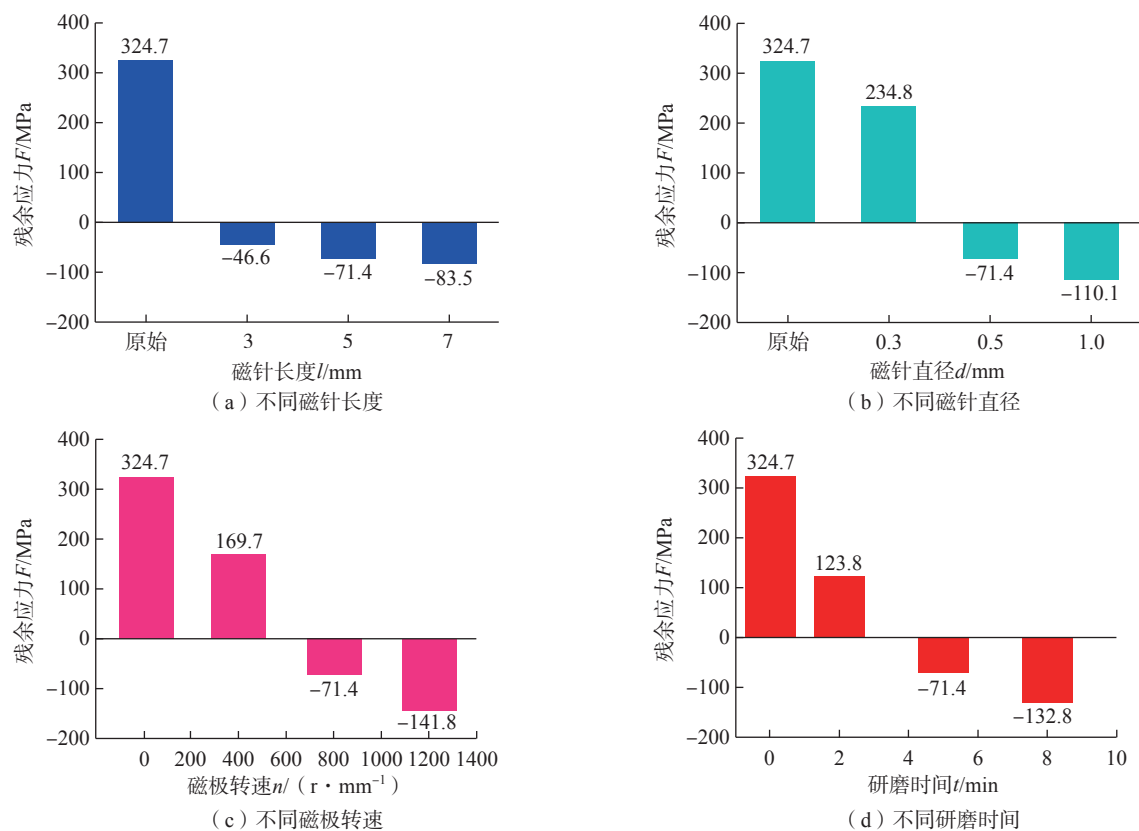


图8 不同因素下表面残余应力变化

Fig.8 Variation of residual stress under different factors

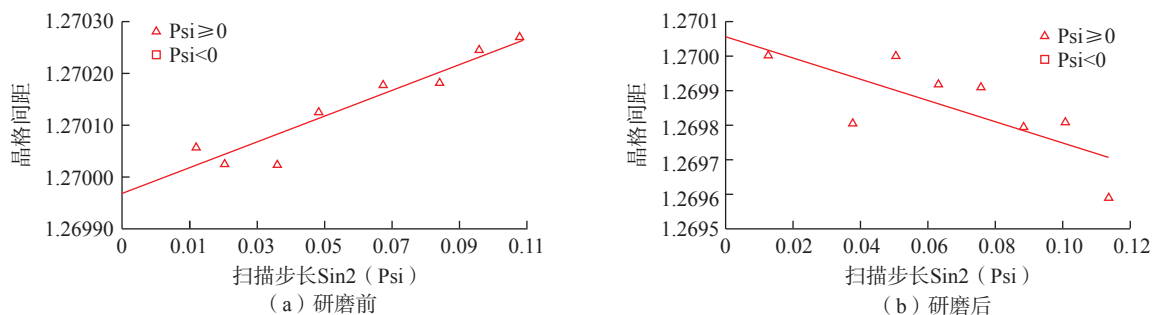


图9 研磨前后残余应力变化曲线图(Phi=0°)

Fig.9 Residual stress curve before and after grinding (Phi=0°)

为8min时,涡轮叶片气膜孔周边毛刺基本得到去除,毛刺高度由原始的43.9 $\mu\text{m}$ 变为20.2 $\mu\text{m}$ ;表面粗糙度 $R_a$ 也由原始的0.5 $\mu\text{m}$ 下降到了0.16 $\mu\text{m}$ ,表面质量得到了明显改善;磁针磁力研磨工艺可使涡轮叶片表面残余应力得以释放,并由原先拉应力变为压应力,可有效提高叶片抗疲劳强度,提高其服役寿命。

### 参考文献

- [1] 陈荣章. 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望[J]. 航空制造技术, 2002, 45(2): 19-23.
- [2] CHEN Rongzhang. Review and prospect of developments of cast superalloys and technology of aeroengine turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 45(2): 19-23.
- [2] 《航空发动机设计手册》总编委会.

《航空发动机设计手册》第十册涡轮分册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

General Editorial Board of Aeroengine Design Manual. Aeroengine design manual volume 10 turbine volume[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.

[3] 郭永丰, 张国伟, 王力, 等. 高温合金IN718上气膜冷却孔电火花加工试验[J]. 航空动力学报, 2016, 31(2): 266-273.

GUO Yongfeng, ZHANG Guowei, WANG Li, et al. Experiment on electric discharge

machining of cooling holes in superalloy IN718[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(2): 266-273.

[4] BUNKER R S. Gas turbine heat transfer: 10 remaining hot gas path challenges[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. Barcelona, 2008.

[5] BOGARD D G, THOLE K A. Gas turbine film cooling[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 249-270.

[6] 朱惠人, 许都纯, 刘松龄, 等. 气膜孔形状对流量系数影响的实验研究[J]. 推进技术, 1998, 19(1): 42-45.

ZHU Huiren, XU Duchun, LIU Songling, et al. The investigation in the effects of film cooling holes shape on discharge coefficient[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(1): 42-45.

[7] 王呈, 刘涛, 穆轩, 等. 航空发动机叶片气膜孔测量技术研究[J]. 计测技术, 2012, 32(5): 27-30.

WANG Cheng, LIU Tao, MU Xuan, et al. Research on aero engine blade film hole measuring technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2012, 32(5): 27-30.

[8] 陈燕, 周锟, 牛凤丽, 等. 航空发动机整体叶盘磁力研磨光整实验[J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2323-2330.

CHEN Yan, ZHOU Kun, NIU Fengli, et al. Experiment of surface finishing on aero-engine

blisk by magnetic abrasive finishing[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(10): 2323-2330.

[9] 吕兴国, 韩冰, 陈燕. 基于磁力研磨法对微型槽的精密研磨研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(14): 93-96, 101.

LÜ Xingguo, HAN Bing, CHEN Yan. Study on micro groove polishing based on magnetic abrasive finishing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(14): 93-96, 101.

[10] 刘凯, 张宝诚, 宋文超, 等. 加工工艺对航空发动机燃油喷嘴性能的影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(1): 55-59.

LIU Kai, ZHANG Baocheng, SONG Wenchao, et al. Investigation of effect of machining quality on characteristics for aero-engine fuel injector[J]. Aeroengine, 2012, 38(1): 55-59.

[11] 周君辉, 张靖周. 气膜孔局部堵塞对叶片压力面冲击-扰流柱-气膜结构综合冷却效率的影响[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2729-2738.

ZHOU Junhui, ZHANG Jingzhou. Effects of partial blockage inside film holes on overall cooling effectiveness of an integrated impingement-fin-film cooling configuration on blade pressure side[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2729-2738.

[12] 陈燕, 胡玉刚, 巫昌海, 等. 磁针磁力研磨去除涡轮轴内壁积碳[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 259-266.

CHEN Yan, HU Yugang, WU Changhai,

et al. Removal of carbon deposition on the inner wall of turbo shaft by magnetic needle grinding[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 259-266.

[13] 徐会, 康仁科, 陈燕. 磁力研磨法去除燃油喷嘴积碳的试验研究[J]. 航空学报, 2020, 41(2): 60-71.

XU Hui, KANG Renke, CHEN Yan. Experimental study on removing carbon from fuel nozzles by magnetic grinding[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(2): 60-71.

[14] 周传强, 韩冰, 马学东, 等. SUS316异形管件内表面磁针磁力研磨的试验研究[J]. 现代制造工程, 2019(10): 1-5.

ZHOU Chuanqiang, HAN Bing, MA Xuedong, et al. Study on the magnetic abrasive finishing of the inner surface of SUS316 irregular tubular by magnetic needles[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(10): 1-5.

[15] WU J Z, ZOU Y H, SUGIYAMA H. Study on ultra-precision magnetic abrasive finishing process using low frequency alternating magnetic field[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 386: 50-59.

通讯作者: 马小刚, 讲师, 博士, 研究方向为复杂工件表面特种加工、工程结构数字化建模及仿真模拟设计。

## Experimental Study on Surface Quality of Engine Turbine Blade by Magnetic Needle Magnetic Abrasive Technology

ZHU Huining, MA Xiaogang, CHENG Haidong, CHEN Yan, HAN Bing  
(University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**[ABSTRACT]** The surface quality of turbine blade in aviation gas turbine engine directly affects the overall performance of the engine. In view of the low geometric accuracy and unstable quality in the surface treatment of turbine blade at home and abroad, the magnetic abrasive technology with magnetic needle is introduced, and different types of magnetic needle, rotating speed of magnetic pole and grinding time are taken as variable factors. The surface roughness and residual stress of the blade are taken as the indexes, and the law between the change factors and the index parameters is analyzed through experiments. The results show that the residual stress on the surface of turbine blade changes from original tensile stress to compressive stress, and the compressive stress increases with the increase of magnetic needle length and magnetic pole speed. The surface roughness of turbine blade and the burr height around the gas film hole are improved obviously by magnetic needle grinding. The research results can provide a reference for improving the surface quality of turbine blade by magnetic needle grinding process.

**Keywords:** Magnetic grinding; Residual stress; Surface quality; Film hole cooling; Turbine blade

(责编 阳光)