

# 粉末合金FGH95喷丸强化对高温缺口疲劳性能的影响

王欣<sup>1,2</sup>, 王科昌<sup>3</sup>, 罗学昆<sup>1,2</sup>, 曾召军<sup>3</sup>, 王旭青<sup>1,4</sup>, 汤智慧<sup>1,2</sup>

- (1. 中国航发北京航空材料研究院表面工程研究所, 北京 100095;  
2. 中国航发北京航空材料研究院航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095;  
3. 中国航发南方工业有限公司科技工程部, 株洲 412002;  
4. 中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

**[摘要]** 为提高粉末合金材料轮盘应力集中结构的缺口疲劳性能,采用铸钢弹丸、陶瓷弹丸和复合喷丸的方法对粉末合金缺口旋转弯曲疲劳试样进行喷丸强化,通过白光干涉表面形貌分析、配合电化学腐蚀的X射线衍射残余应力场分析、显微硬度梯度研究评价喷丸强化层状态;采用高温旋转弯曲缺口(结构应力集中系数 $K_t=1.7$ )疲劳寿命进行对比分析。结果表明,喷丸强化在FGH95合金表面形成强化层:表面粗糙度 $R_a=0.9\sim 1.5\mu\text{m}$ , Kurtosis值 $R_{ku}$ 接近3的表面轮廓;表面压应力在 $-800\sim -1150\text{MPa}$ ,压应力场深度达到 $120\sim 250\mu\text{m}$ ;相比于基体硬度的 $480\sim 510\text{HV}_{0.2}$ ,喷丸后表面硬度上升到 $575\sim 625\text{HV}_{0.2}$ ,硬化层深度达到 $175\sim 250\mu\text{m}$ 。采用首次喷铸钢丸大强度、第二次喷陶瓷丸小强度的二次喷丸工艺方法时,表层残余压应力场数值大,表面硬化程度高且硬化层深度大,表面粗糙度较小且弹坑底部圆滑,疲劳强化效果最佳, $550\text{MPa}/650^\circ\text{C}$ 中值疲劳寿命估计量较原始提高20倍以上。

**关键词:** 粉末合金; 喷丸; 表面形貌; 残余应力; 硬度梯度; 高温缺口疲劳

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.23/24.040



王欣

博士研究生,高级工程师,主要研究方向为航空发动机关键零件抗疲劳表面强化研究,发表论文30余篇。

镍基粉末合金具有良好的高温强度和氧化抗力<sup>[1]</sup>,是新型航空发动机涡轮盘的主要材料。FGH95合金是我国研制的第一代粉末合金<sup>[2]</sup>,研究大都集中在颗粒特性<sup>[3]</sup>、相热稳定性<sup>[4]</sup>、热处理制度<sup>[5]</sup>等材料研制层面上。作为涡轮盘材料,其疲劳性能是影响服役可靠性的重要性能,杨健等<sup>[6]</sup>对比了FGH98、FGH95和FGH96合金的高温疲劳裂纹扩展性能,认为新型合金疲劳裂纹扩展性能更佳;侯学勤等<sup>[7-8]</sup>研究了FGH95合金高低周复合疲劳行为与断口并进行了量化分析;Zhang等<sup>[9]</sup>研究了FGH95的热机械疲劳,并进行了寿命预测。

疲劳性能受到表面完整性影响

巨大,即在基体材料稳定的前提下,不同的表面完整性状态有完全不同的疲劳性能<sup>[10-11]</sup>,且对于后续的服役可靠性起到重要作用,但表面状态对粉末合金疲劳性能的影响研究相对较少。冯引利等<sup>[12]</sup>研究认为表面加工对低循环疲劳寿命的影响程度为30%~40%,说明不佳的表面状态足以“吃掉”所有疲劳裕度。

同时,对轮盘结构,喷丸强化和机械加工是最典型的两种表面状态<sup>[13]</sup>,强度关键部位通常采取喷丸强化提高疲劳裕度。由失效案例可知,应力集中结构是航空器关键承力件疲劳失效的主要部位,而表面状态对于应力集中结构疲劳性能影响显著<sup>[14-16]</sup>。

因此,研究喷丸和磨削加工两种表面状态对于FGH95合金应力集中结构疲劳性能的影响,优化表面强化工艺,对强化工艺的应用和涡轮盘的服役寿命与安全性提高有一定的技术支持作用。

## 试验及方法

试验采用FGH95合金热等静压盘坯,沿径向下料,元素含量以及具体制造工艺见文献[17]。选择应力集中系数 $K_t=1.7$ 的旋转弯曲疲劳试样模拟轮盘特定应力集中结构,如图1所示。试样加工过程包含顶针孔加工-粗车-精车-螺纹磨等工序。喷丸过程符合HB/Z 26-2011<sup>[18]</sup>,采用了两种强度的铸钢丸一次喷丸、陶瓷丸一次喷丸和复合喷丸等4种方法,与原始磨削状态一道形成了5种

表面完整性状态,对比分析表面完整性与疲劳性能关系,如表1所示。表1中,TC15弹丸名义直径为0.15mm,ZG60弹丸名义直径为0.60mm。

采用以下3个方面表面完整性分析表征:(1)表面形貌,反映弹塑性形变的最终结果;(2)残余应力,反映弹塑性形变中的表面弹性能;(3)硬度,反映弹塑性形变中的塑性作用(加工硬化)。在方块(无应力集中)试样上,采用Phase-shift MicroXam白光干涉仪完成了表面形貌表征;采用PROTO Lxrd型X射线衍射残余应力测试仪配合电化学剥层测试了残余应力梯度;针对截面试样,采用FM-700数控显微硬度计分析了硬度梯度。采用旋转弯曲疲劳试验机分析了喷丸及原始磨削状态的疲劳寿命,每工艺组完成试

样6件,按HB/Z 112-1986<sup>[19]</sup>的方法取中值疲劳寿命估计量作为工艺组疲劳寿命对比依据。采用的频率为83Hz,温度650℃,首先选择的最大应力为550MPa,若550MPa下达到 $1 \times 10^7$ 周次未发生断裂(越出),则将应力增大到700MPa进一步对比寿命和疲劳强化效果。

## 结果与讨论

### 1 表面完整性

5个工艺状态下的表面形貌如图2所示,平均粗糙度 $R_a$ 和Kurtosis值 $R_{ku}$ 随喷丸强度的变化规律如图3所示,可知:(1)弹坑尺寸与弹丸尺寸正相关;(2)二次喷丸显著降低了平均粗糙度参数;(3)喷丸后,代表轮廓底部圆度的Kurtosis值接近于3,说明喷丸形成的弹坑底部圆度较好,而磨削加工后,Kurtosis值<sup>[20]</sup>为6.2,刀痕底部圆度不佳。

5个状态下的残余应力梯度如图4所示,可知:(1)喷丸后FGH95合金表面存在残余压应力层;(2)无论是二次喷丸还是一次喷丸,采用陶瓷丸小强度喷丸作为最终喷丸方法,则表面残余压应力数值较大,达到-1000MPa以上,铸钢丸大强度作为最终喷丸方法时,表面残余应力数值较小,为-820MPa左右;(3)工艺1喷丸后残余压应力数值随喷丸强度单调下降,表面达到最大残余压应力-1054MPa,工艺2~4喷丸后残余应力数值随深度呈现先增大后减小的经典“倒钩”分布,最大残余应力出现在60 $\mu$ m深度,数值分别为-1000MPa、-1040MPa和-1050MPa,与工艺1相当;(4)残余应力深度随喷丸强度增大而增大,工艺1~4的残余压应力场深度约为120 $\mu$ m、180 $\mu$ m、270 $\mu$ m和270 $\mu$ m。此外,对比工艺3和工艺4的残余应力场可知,第2次喷丸提高了表面到最大残余压应力深度范围内的应力值,而对大于最大残余压应力深度范

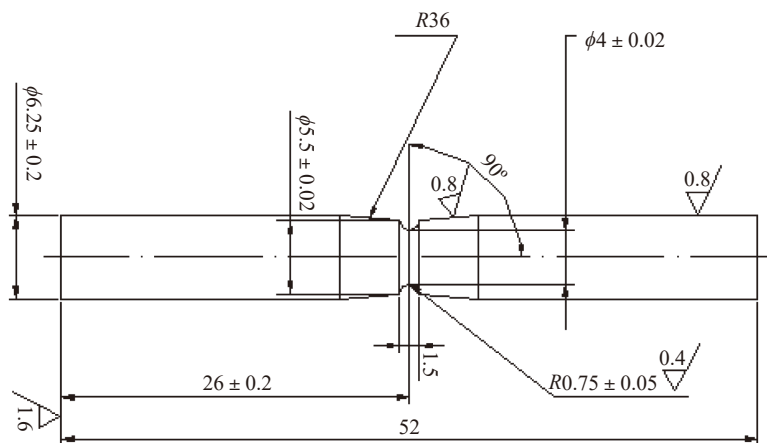


图1 应力集中系数 $K_t=1.7$ 的旋转弯曲疲劳试样

Fig.1 Rotating-bending fatigue sample with stress concentration factor  $K_t=1.7$

表1 喷丸工艺

Table 1 Shot peening process

编号	第1次喷丸			第2次喷丸		
	弹丸	强度/mmA	覆盖率/%	弹丸	强度/mmA	覆盖率/%
1	TC15	0.07	125	—	—	—
2	ZG60	0.17	125	—	—	—
3	ZG60	0.21	125	—	—	—
4	ZG60	0.21	125	TC15	0.07	125
原始	—	—	—	—	—	—

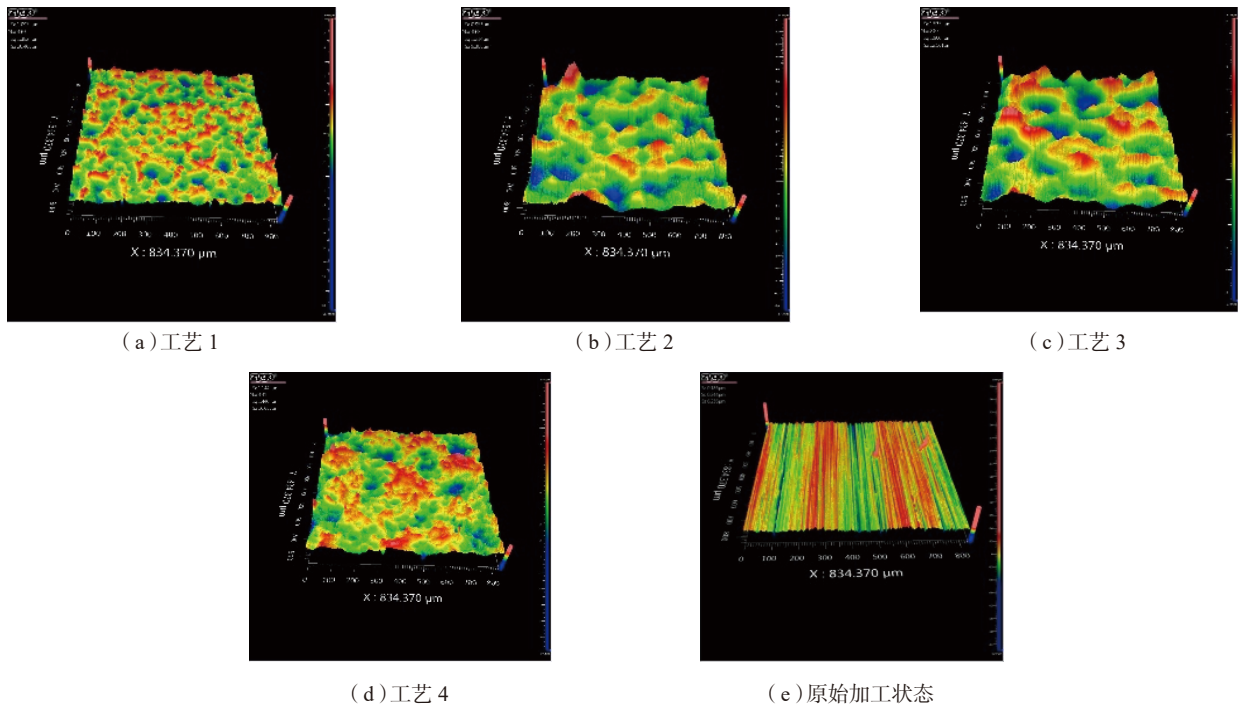


图2 喷丸和磨削表面形貌

Fig.2 Surface profile of shot peening and grinding

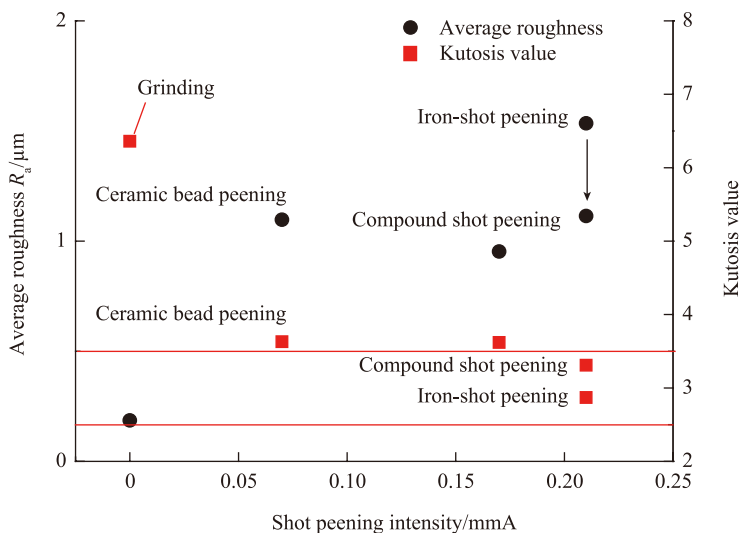


图3 平均粗糙度和Kutosis值与喷丸强度关系图

Fig.3 Relationship of average roughness and Kutosis value with shot peening intensity

围,第2次喷丸对残余应力无可见影响。

5个工艺状态下的表面硬度梯度如图5所示,可知:(1)基体硬度约为480~510HV<sub>0.2</sub>,喷丸后FGH95合金的硬度显著提高,形成表面硬化层;(2)不同工艺喷丸后硬化层表面硬度接近,大致硬度范围为580~610HV<sub>0.2</sub>;(3)硬化层的深度随

喷丸强度增大而增大,以基体硬度上限510HV<sub>0.2</sub>为准,工艺1~4的硬化层深度约为120μm、150μm、240μm和240μm。此外,对比硬化层和残余压应力深度可知,硬化层深度略小于残余压应力深度。

## 2 疲劳性能

图6为喷丸和原始状态Kt=1.7试样在550MPa/600℃条件下的中值

疲劳寿命估计量。可见,原始试样的估计量为 $5 \times 10^5$ 周次,喷丸后寿命均大于该寿命,说明上述4种喷丸参数均有疲劳强度提高的效果。工艺1陶瓷弹丸喷丸后估计量为 $2 \times 10^6$ 周次,提高4倍左右;工艺2铸钢丸喷丸后估计量为 $5 \times 10^6$ 周次,提高达到10倍,试验组6件试样中3件超过 $10^7$ 周次;工艺3的铸钢丸喷丸和工艺4的复合喷丸后估计量均 $>10^7$ 周次,提高幅度更大,所有试验组6件试样寿命均 $>10^7$ 周次。同样,可以认为原始和工艺1~2喷丸试样 $10^7$ 周次条件疲劳极限 $<550$ MPa,而工艺3~4组的条件疲劳极限 $>550$ MPa。

为了进一步确定喷丸的疲劳强化效果,继续使用图6中 $10^7$ 周次不断的试样(工艺2组3件,工艺3~4组均为6件),将试验应力增大到700MPa,在 $10^7$ 周次以内均发生断裂,中值疲劳寿命估计量如图7所示。可见,工艺2和工艺3试样寿命接近,达到40000周次左右,而工艺4的试样寿命达到 $2 \times 10^5$ 周次,提高

幅度明显大于工艺2和工艺3。亦由此可知,工艺3和4的疲劳强度应在550~700MPa。

由疲劳性能结果可知,4个喷丸

工艺实施后中值疲劳寿命估计量均高于原始状态,疲劳强化效果从大到小依次为工艺4、3、2、1。

表面形变强化利用微观弹塑性

形变引入疲劳强化机制,主要有以下3个方面变化。

首先,残余应力强化机制是目前公认的强化效果,利用宏观残余压应力(弹性形变)缓和外加应力载荷作用。采用工艺4复合喷丸后,近表层残余压应力数值明显增大,对于缓和外载作用大于铸钢丸一次喷丸。

其次,组织强化机制利用材料应变硬化原理,利用表层组织的塑性下降“换得”表面微观弹性强度提高(加工硬化),使得在更大交变外载作用下不易屈服,在本研究中体现为表层硬度上升;该机制虽然在国外相关喷丸标准<sup>[21]</sup>中未予以说明,但在我国许多学者的工作中也得到越来越多认可<sup>[22]</sup>。采用工艺4复合喷丸后,表层硬度与其他喷丸方法接近,且深度很大。

最后是表面形貌变化机制,该机制对疲劳性能影响说法不一。在一些文献<sup>[23]</sup>中认为是不利的,即表面粗糙度 $R_a$ 上升导致疲劳弱化,但部分文献<sup>[24-25]</sup>认为对表面形貌影响为弹坑底部圆滑化与粗糙度增大竞争作用的结果。本研究分析的Kurtosis值<sup>[20]</sup>表示轮廓底部是否尖锐,借用来衡量喷丸弹坑底部圆滑程度,即:

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[ \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right]$$

其中, $R_q$ 为均方根粗糙度, $l_r$ 为取样

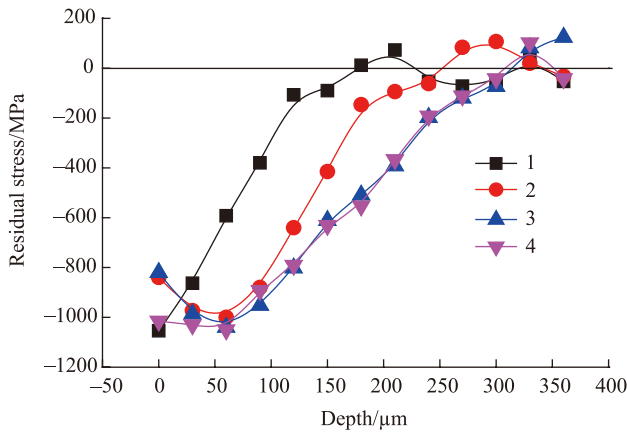


图4 喷丸残余应力场

Fig.4 Shot peening residual stress profile

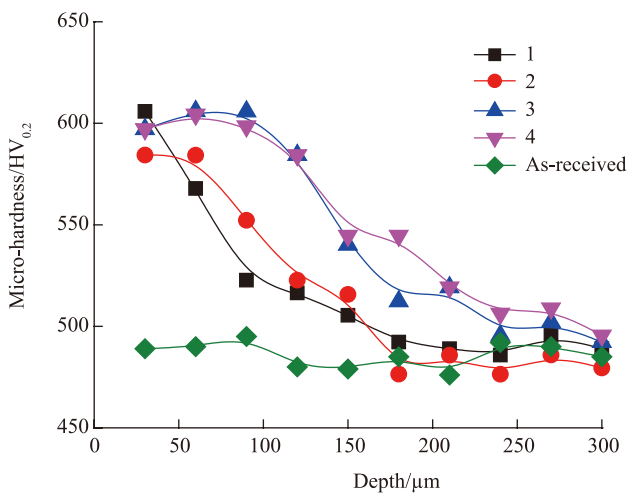


图5 喷丸显微硬度场

Fig.5 Shot peening micro-hardness profile

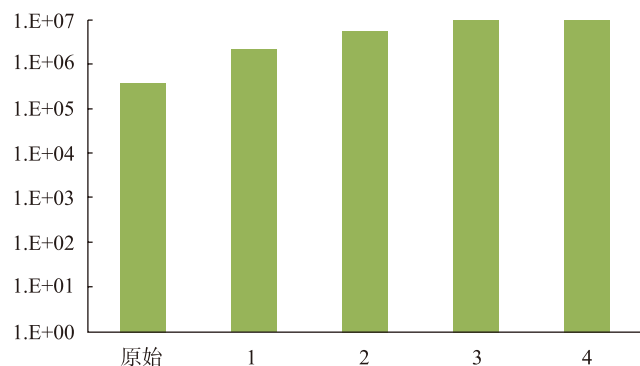


图6 550MPa/650°C下喷丸和原始应力集中系数Kt=1.7试样中值疲劳寿命估计量

Fig.6 Median fatigue life estimations of shot peening initial samples at 550MPa/650°C with stress-concentration coefficient Kt=1.7

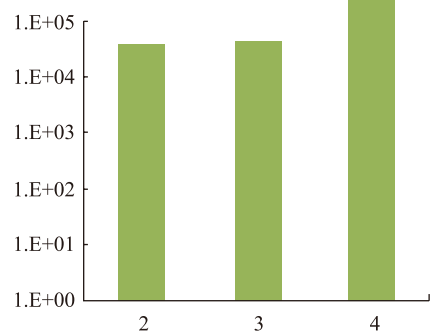


图7 700MPa/650°C下喷丸工艺2-4应力集中系数Kt=1.7试样中值疲劳寿命估计量

Fig.7 Median fatigue life estimations of shot peening No.2-4 samples at 700MPa/650°C with stress-concentration coefficient Kt=1.7

长度,  $Z(x)$  为滤波后轮廓曲线。

4 个工艺喷丸后, Kurtosis 值趋近于 3, 说明喷丸后弹坑轮廓接近正态分布, 底部圆滑; 机械磨削后, 该值达到 6 以上, 说明磨削后刀痕底部尖锐。尖锐的底部刀痕显著提高了微观应力集中, 对疲劳性能不利; 而喷丸形成的圆滑的弹坑底部应作为一种强化机制。

在本研究中, 采用工艺 4 的二次喷丸表层残余压应力场数值大, 表面硬化程度高且硬化层深度大, 表面粗糙度较小且弹坑底部圆滑, 因此, 疲劳强化效果最佳。对比工艺 4, 工艺 1~2 残余应力和硬化层深度小, 工艺 3 粗糙度相对较大, 因此, 强化效果不如工艺 4。

也应该说明, 工艺 4 强度很大, 在某些轮盘结构实施时还需要注意变形问题。

## 结论

(1) 喷丸强化在 FGH95 合金表面形成强化层。表面粗糙度  $R_a=0.9\sim 1.5\mu\text{m}$ , Kurtosis 值  $R_{ku}$  接近 3 的表面轮廓; 表面压应力在  $-800\sim -1150\text{MPa}$ , 压应力场深度达到  $120\sim 250\mu\text{m}$ ; 表面硬度达到  $575\sim 625\text{HV}_{0.2}$ , 硬化层深度达到  $175\sim 250\mu\text{m}$ 。

(2) 采用首次喷铸钢丸大强度、第 2 次喷陶瓷丸小强度的二次喷丸工艺方法表层残余压应力场数值大, 表面硬化程度高且硬化层深度大, 表面粗糙度较小且弹坑底部圆滑, 疲劳强化效果最佳。

## 参考文献

[1] 邹金文, 汪武祥. 粉末高温合金研究进展与应用[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3):244-250.  
ZOU Jinwen, WANG Wuxiang. Development and application of P/M superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 244-250.  
[2] 胡本芙, 章守华. 镍基粉末高温合

金 FGH95 涡轮盘材料研究[J]. 材料热处理学报, 1997(3): 28-36.

HU Benfu, ZHANG Shouhua. Study on a Nickel base superalloy FGH95 of a turbine disc[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 1997(3): 28-36.

[3] 陈焕明, 胡本芙, 李慧英, 等. 等离子旋转电极雾化 FGH95 高温合金粉末颗粒凝固组织特征[J]. 金属学报, 2003, 39(1): 30-34.

CHEN Huanming, HU Benfu, LI Huiying, et al. Microstructure characteristics of FGH95 superalloy powders prepared by PREP[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(1): 30-34.

[4] 李红宇, 宋西平, 王艳丽, 等. FGH95 合金中  $\gamma'$  相稳定性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(1): 64-67.

LI Hongyu, SONG Xiping, WANG Yanli, et al. Stability of  $\gamma'$  phase in FGH95 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(1): 64-67.

[5] WEI M, JIAN T, ZHANG F G, et al. Microstructure, properties and heat treatment process of powder metallurgy superalloy FGH95[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2006, 13(5): 65-68.

[6] 杨健, 董建新, 张麦仑, 等. 新型镍基粉末高温合金 FGH98 的高温疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 金属学报, 2013, 49(1): 71-80.

YANG Jian, DONG Jianxin, ZHANG Maicang, et al. High temperature fatigue crack growth behavior of a novel powder metallurgy superalloy FGH98[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(1): 71-80

[7] 侯学勤, 刘新灵, 陶春虎. FGH95 合金高低周复合疲劳行为[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13(4):201-207.

HOU Xueqin, LIU Xinling, TAO Chunhu. Combined fatigue behavior of low-and-high cycle stresses for FGH95 alloy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2008, 13(4): 201-207.

[8] HOU X Q, FAN J J, WANG Z B. Quantitative analysis on fatigue fracture of FGH95 alloy[J]. Journal of Iron & Steel Research, 2011(S): 470-473.

[9] ZHANG G D, LIU S L, HE Y H, et al. Life prediction of thermomechanical fatigue in PM superalloy FGH95[J]. Failure Analysis & Prevention, 2008, 3(1): 54-58.

[10] XU Z, DUNLEAVEY J, ANTAR

M, et al. The influence of shot peening on the fatigue response of Ti-6Al-4V surfaces subject to different machining processes[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111(6): 196-207.

[11] KLOTZ T, DELBERGUE D, BOCHER P, et al. Surface characteristics and fatigue behavior of shot peened inconel 718[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 110: 1-5.

[12] 冯引利, 杨健, 吴长波. 考虑表面加工状态的粉末盘低循环疲劳寿命分析[J]. 航空动力学报, 2018, 33(2): 265-272.

FENG Yinli, YANG Jian, WU Changbo. Low cycle fatigue life analysis of powder metallurgy superalloy disk considering surface processing condition[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(2): 265-272.

[13] 王欣, 胡云辉, 王晓峰, 等. 喷丸强化对 FGH96 粉末高温合金疲劳性能应力集中敏感性的影响[J]. 航空制造技术, 2017, 60(13): 48-53.

WANG Xin, HU Yunhui, WANG Xiaofeng, et al. Effect of shot peening on fatigue performance stress-concentration sensitivity of FGH96 powder metallurgy superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(13): 48-53.

[14] 李旭东. 粉末高温合金 FGH96 的高温缺口疲劳研究[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(4): 1-4.

LI Xudong. Notch fatigue behavior of P/M superalloy FGH96 at elevated temperature[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(4): 1-4.

[15] 王欣, 李旭东, 宋颖刚, 等. 三种典型发动机用材料疲劳极限应力集中敏感性及其影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 102-107.

WANG Xin, LI Xudong, SONG Yinggang, et al. Effect of shot peening on fatigue limit stress concentration sensitivity of 3 kinds of typical materials for aeroengine[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(6): 102-107.

[16] 王欣, 胡云辉, 曾惠元, 等. 结构应力集中和表面完整性对 17-4PH 钢轴向疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 111-116.

WANG Xin, HU Yunhui, ZENG Huiyuan, et al. Effects of structural stress concentration and surface integrity on axial fatigue property of 17-4PH steel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 111-116.

- [17] 王旭青, 罗学军. 复杂形状 FGH95 粉末盘形件固溶处理组织及性能研究[J]. 材料工程, 2009(S1): 61–63.
- WANG Xuqing, LUO Xuejun. Study on micro-structure and properties of complicated shape disk of FGH95 PM superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(S1): 61–63.
- [18] HB/Z 26–2011, 航空零件喷丸工艺[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2011.
- HB/Z 26–2011, Shot peening of aircraft parts [S]. Beijing: AVIC China Aero-polytechnology Establishment, 2011
- [19] HB/Z 112–1986, 材料疲劳试验统计方法[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 1986
- HB/Z 112–1986, Statistical method of material fatigue test[S]. Beijing: AVIC China Aero-polytechnology Establishment, 1986.
- [20] DAVIM J P. Surface Integrity in machining [M]. London: Springer, 2010.
- [21] AMS–S–13165, Shot Peening of Metal Parts[S]. Pennsylvania: Society of Auto Engineering, 1997.
- [22] 王仁智. 喷丸强化的基本原理与调控正 / 切断裂模式的疲劳断裂抗力机制图[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 1–9.
- WANG Renzhi. Basic principle of shot peening and mechanism map of adjusting and controlling normal tensile/shear fatigue fracture resistance[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 1–9.
- [23] 吴瑛, 雷丽萍, 曾攀. 喷丸对 H13 钢单边带缺口试样疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 117–126.
- WU Ying, LEI Liping, ZENG Pan. Effect of shot peening on fatigue crack propagation behavior of single notched H13 steel specimens [J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 117–126.
- [24] 王欣, 尤宏德, 李嘉荣, 等. 陶瓷弹丸喷丸强化对 DD6 单晶高温合金表面完整性的影响[J]. 材料工程, 2014, 21(4): 53–57.
- WANG Xin, YOU Hongde, LI Jiarong, et al. Influence of ceramic-shot-peening on surface integrity of DD6 single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 21(4): 53–57.
- [25] LI J K, YAO M, WANG D, et al. An analysis of stress concentrations caused by shot peening and its application in predicting fatigue strength[J]. Fatigue Fracture Engineering Materials Structure, 1992, 15(12): 1271–1279.

通讯作者: 王欣, E-mail: rasheed990918@163.com。

## Effect of Shot-Peening on High-Temperature Notched Fatigue Property of FGH95 Powder Metallurgy Superalloy

WANG Xin<sup>1,2</sup>, WANG Kechang<sup>3</sup>, LUO Xuekun<sup>1,2</sup>, ZENG Zhaojun<sup>3</sup>, WANG Xuqing<sup>1,4</sup>,  
TANG Zhihui<sup>1,2</sup>

- ( 1. Surface Engineering Institution, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;  
2. Aviation Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection on Aviation Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;  
3. Scientific and Technical Engineering Department, AECC South Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412002, China;  
4. National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China )

**[ABSTRACT]** To promote the fatigue property of the disk's stress-concentration structure made by powder metallurgy superalloy, cast-iron shots, ceramic beads and the compound of the two kinds of shots are employed to peen the PM notched fatigue sample. Strengthening layer is characterized by surface profile analysis using white light interfere, residual stress measurement with X-ray diffraction and electrochemical corrosion, and micro-hardness profile research. Fatigue strengthening effect is compared with high-temperature notched (structure stress-concentration coefficient  $K_t=1.7$ ) fatigue life of rotating-bending mode. The results show that strengthening layer is introduced by shot peening on the surface of FGH95 alloy. After shot peening, the surface average roughness and Kurtosis value are 0.9–1.5 $\mu\text{m}$  and close to 3 respectively. Surface residual stress is about  $-800 - -1150\text{MPa}$ , and the depth is 120–250 $\mu\text{m}$ . Moreover, compared with the as-received hardness 480–510HV<sub>0.2</sub>, the peening surface hardness increased to 575–625HV<sub>0.2</sub>, and the hardness layer depth is 175–250 $\mu\text{m}$ . The double shot peening method, firstly using the cast-iron shot in big intensity and secondly using the ceramic shot in small intensity, brings the maximum residual compressive stress, the highest hardness and biggest depth on the surface, and the smaller roughness with smooth bottom of crater, which obtains the best fatigue strengthening effect. The median fatigue life estimations of the double shot peening at 550MPa/650 $^{\circ}\text{C}$  is 20 times higher than original one.

**Keywords:** Powder metallurgy superalloy; Shot peening; Surface profile; Residual stress; Hardness profile; High-temperature notched fatigue

(责任编辑 古系)