

喷丸与振动光饰复合处理对 GH4169 高温合金疲劳性能的影响

潘一帆¹, 刘道新², 刘博³, 胡云辉³, 王为³

(1. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000)

(2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

(3. 中航工业西安航空发动机(集团)有限公司, 陕西 西安 710038)

摘要: 对比研究了喷丸和喷丸与振动光饰复合处理对 GH4169 高温合金疲劳性能的影响, 利用扫描电子显微镜、粗糙度仪、显微硬度计、X 射线应力测试仪分析和测试了试样的表面形貌、表层组织、粗糙度、显微硬度、残余应力场, 探讨了表面完整性与疲劳性能的内在联系及作用机制。结果表明: 复合处理对 GH4169 高温合金疲劳性能的改善效果比单独喷丸强化处理更好; 复合处理使 GH4169 高温合金的室温疲劳强度提高了 21.6%; 500 °C 预加热 100 h 处理使复合强化 GH4169 高温合金疲劳强度降低了 6%, 但仍较未喷丸处理状态提高了 14.29%, 即复合处理能够有效改善 GH4169 高温合金室温~500 °C 高温工况下的抗疲劳性能。

关键词: GH4169 高温合金; 喷丸; 振动光饰; 表面完整性; 疲劳

中图分类号: TG146.1+5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)08-2955-08

高温合金具有良好的高温力学性能、耐腐蚀性能, 在航空、航天、能源、石油化工等各个领域应用广泛^[1]。GH4169 高温合金^[2]凭借其优良的综合性能, 已经发展成为目前应用最为广泛的高温合金之一。苛刻的发动机服役工作条件对 GH4169 高温合金的力学性能提出了更高的要求, 因为受到交变载荷、热腐蚀、高温氧化等服役工况因素的影响, 降低了它的使用寿命^[3], 所以, 对 GH4169 高温合金的疲劳性能及其强化技术的研究十分必要。

为了改善金属材料的抗疲劳性能, 喷丸强化、超声冲击强化^[4]、超声滚压强化^[5-7]、深滚压^[8,9]、表面机械研磨^[10-12]等形变强化技术得到较多的研究, 其中喷丸强化由于具有效果显著、操作简单、成本低等优点, 得到了广泛的应用^[13-15]。喷丸强化 (shot peening, SP) 是金属材料表层在弹丸的撞击下产生塑性形变, 表面强度和硬度得到提高, 形成一层冷作硬化层, 同时表层会引入残余压应力场, 因而能够有效提高金属材料的疲劳强度^[16-18]。但是, 喷丸处理会造成金属材料表面粗糙度增大, 过高强度的喷丸处理还会产生开裂、脱层等表面损伤, 不利于疲劳性能的改善。振动光饰 (vibration finishing, VF) 能

够对喷丸处理金属表面光整和去除损伤, 调整表层残余压应力场, 具有改善喷丸强化提升金属基材 (BM) 抗疲劳性能的效果^[19]。

为此, 本实验以 GH4169 高温合金为研究对象, 通过旋转弯曲疲劳试验方法, 研究喷丸与振动光饰复合处理 (SP+VF) 对 GH4169 高温合金疲劳性能的影响规律和作用机理, 探讨喷丸与振动光饰复合处理对 GH4169 高温合金表面完整性的影响规律和对疲劳性能的改善效果, 为发挥喷丸强化与振动光饰复合处理技术在航空制造领域的优势提供依据。

1 实验

试验材料为 GH4169 高温合金, 其化学成分如表 1 所示。采用固溶加时效的热处理制度, 即 960 °C 保温 1 h, 油冷+720 °C 保温 8 h, 以 50 °C/h 速率炉冷至

表 1 GH4169 高温合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of GH4169 superalloy ($\omega/\%$)

C	Si	Cr	Mo	Ti	Fe	Nb	Al	S	Mn	Ni
0.039	0.11	18.6	2.98	0.96	18.9	4.94	0.56	0.001	0.008	Bal.

收稿日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金 (51771155)

作者简介: 潘一帆, 女, 1995 年生, 硕士, 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471000, E-mail: panyifan@725.com.cn

620 °C，保温 8 h，空冷。得到的组织如图 1 所示，基体组织为 γ 相，晶粒分布比较均匀，直径为 10~30 μm ，晶界和晶内有少量的 δ 相析出，同时，晶内存在大量孪晶；力学性能如表 2 所示。试验所用 GH4169 高温合金的疲劳试样形状如图 2 所示，表面完整性测试与分析试样为 $\Phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆片状试样。

根据航空标准 HB/Z26-2002，在优化工艺参数下对 GH4169 高温合金进行喷丸强化处理，使用气动式数控喷丸机处理，课题组前期研究确定的优化工艺参数如下：喷丸强度为 0.30~0.45 mmN，弹丸为 Z300 陶瓷丸，覆盖率为 100%。

振动光饰处理在专用振动光饰机上进行，每次装入试样的数量不大于 12 件。将试样固定在夹具上，在振动光饰容器中加入一定比例的磨料和添加剂，依靠容器的周期性振动，工件和磨料相对运动并相互磨削，最终使工件达到精整抛光的目的。课题组通过前期研究确定的优化工艺参数如下：磨料形状为菱形（中），转速为 300 r/min，电机功率为 1.5 kW，时间为 30 min。

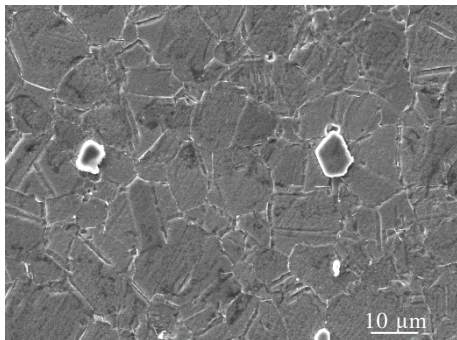


图 1 GH4169 高温合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of GH4169 superalloy

表 2 GH4169 高温合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of GH4169 superalloy

$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$	$\psi/\%$
1130	1400	20	41.5

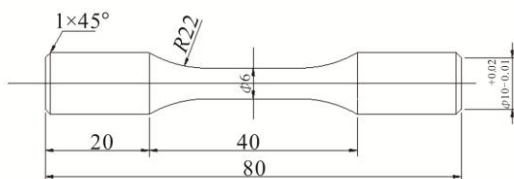


图 2 疲劳试样尺寸

Fig.2 Size of fatigue specimen (mm)

GH4169 高温合金经喷丸与振动光饰复合处理之后试样的表面完整性与基材有明显的不同。采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜分析试样表面形貌和显微组织；采用 TR-300 型粗糙度仪测试表面粗糙度；采用 HV-1000 型显微硬度计测量显微硬度；采用 LXRD-MG 2000 型 X 射线应力测试仪测试残余应力，采用侧倾法，选用 Mn 靶进行辐射，管电压和管电流分别为 35 kV、20 mA，衍射晶面选择 (311) 晶面。

使用 PQ-6 型旋转弯曲疲劳试验机对 GH4169 高温合金进行室温旋转弯曲疲劳试验，转速为 3000 r/min，应力比为 -1。参照标准《GB/T24176-2009/ISO 12107: 2003 金属材料疲劳试验-数据统计方案与分析方法》^[20]，用升降法测 GH4169 高温合金基材及喷丸与振动光饰复合处理试样的疲劳强度，并统计评估喷丸处理和复合处理试样的疲劳寿命，以此为依据确定喷丸及其与振动光饰复合处理对 GH4169 高温合金疲劳抗力的影响规律。

2 结果与讨论

2.1 复合处理对 GH4169 高温合金表面完整性的影响

2.1.1 复合处理对 GH4169 高温合金表面形貌的影响

图 3 为喷丸处理和复合处理后 GH4169 高温合金的表面形貌。由于陶瓷丸密度小、质量轻，再加上喷丸强度较低，所以 GH4169 高温合金喷丸试样表面弹坑丸坑较浅，同时看到试样表面已经没有机械加工的痕迹，说明喷丸覆盖率达到 100%（图 3a）。从图 3b 看到，复合处理试样表面已经看不到弹坑，只存

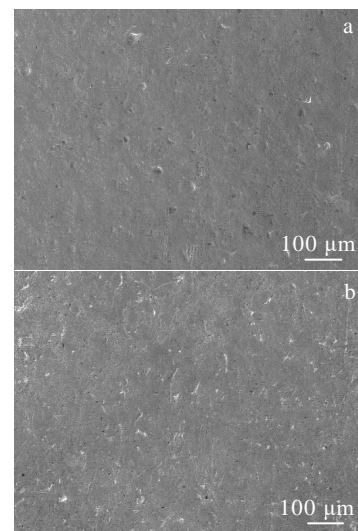


图 3 室温喷丸处理和复合处理后 GH4169 高温合金表面形貌
Fig.3 Surface morphologies of GH4169 superalloy after SP (a) and SP+VF (b) at room temperature

在较浅的磨痕，这是因为在振动光饰过程中，大量的磨料与材料相对运动，对喷丸试样表面进行精整抛光，有效地去除了喷丸处理表面的弹坑、开裂等缺陷，使表面更加平整光滑。

2.1.2 复合处理对 GH4169 高温合金表层组织的影响

图 4 为喷丸处理和复合处理之后 GH4169 高温合金的表层金相组织。可以看出，喷丸强化虽然可以引起 GH4169 高温合金材料表层产生塑性变形，但是由于喷丸强度较低 (0.30~0.45 mmN)，所以从 SEM 照片上看，无论单独喷丸处理，还是 SP 与 VF 复合处理对 GH4169 高温合金试样表层组织均无明显的影响。

图 5 为 GH4169 高温合金喷丸和复合处理试样经过 500 °C 处理 100 h 的表层金相组织，与图 4 相比， γ 相的尺寸形态没有发生改变，由此表明经 500 °C 加热处理不会引发 GH4169 高温合金产生相变或晶粒长大现象。

2.1.3 复合处理对 GH4169 高温合金显微硬度的影响

图 6 为喷丸处理和复合处理 GH4169 高温合金试样 500 °C 加热 100 h 前后的显微硬度沿层深分布测试结果。室温状态下 GH4169 高温合金基材的显微硬度为 $HK_{0.245}$ 为 5282 MPa，喷丸处理之后表面显微硬度达到 5821 MPa，明显高于未处理状态，原因是喷丸使 GH4169 高温合金表面形成强化应变层，

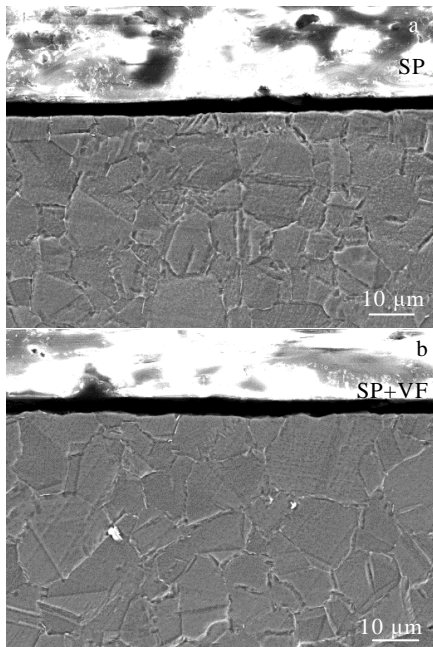


图 4 室温喷丸处理和复合处理后 GH4169 高温合金的表层金相组织

Fig.4 Metallographic structures of surface layer of GH4169 superalloy after SP (a) and SP+VF (b) at room temperature

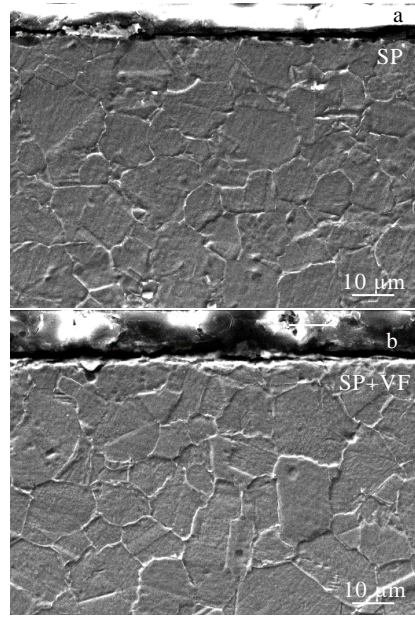


图 5 喷丸处理和复合处理后 GH4169 高温合金经 500 °C ×100 h 热处理的表层金相组织

Fig.5 Metallographic structures of the surface layer of GH4169 superalloy after SP (a) and SP+VF (b) after heat treatment at 500 °C for 100 h

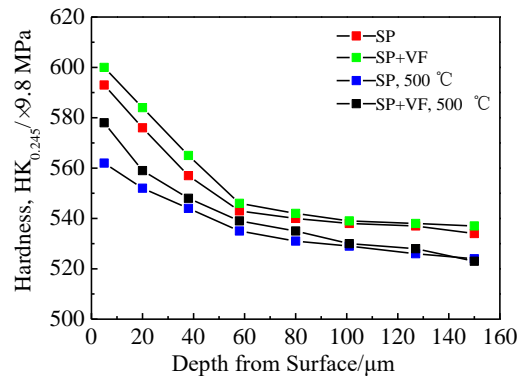


图 6 GH4169 高温合金喷丸处理和复合处理后显微硬度沿层深分布

Fig.6 Microhardness distribution along layer depth of GH4169 superalloy after SP and SP+VF

使得 GH4169 高温合金表层硬度增大。表层硬度随深度的增大呈现梯度递减的变化规律，最后达到与基材硬度接近。从图中可以看出，喷丸处理造成的加工硬化作用主要体现在层深 100 μm 的范围内。复合处理较单独喷丸处理的表层显微硬度有所增加，但增加量小，这是因为振动光饰过程中，磨料与试样表面相互作用，对表面进行精整抛光，使表层塑性变形程度略微增大，同时使表面残余压应力值进一步增大。500 °C 加热处理 100 h 之后，复合处理 GH4169 高温合金和单独喷丸试样表层硬度均有所降低，这是因为

加热处理使 GH4169 高温合金试样点缺陷和位错被激活，空位迁移、位错运动使空位浓度和位错密度降低，表面残余压应力有所松弛，由此使得表面硬度有所下降。

2.1.4 复合处理对 GH4169 高温合金表面粗糙度的影响

图 7 为 GH4169 高温合金喷丸处理和复合处理之后各个状态下试样的表面粗糙度。可以看出，室温状态下复合处理试样的表面粗糙度比喷丸处理的减小了 0.142 μm；500 °C 加热 100 h 处理之后，复合处理比喷丸处理减小了 0.067 μm。这说明振动光饰处理起到了有效的整平作用，改善了喷丸处理后 GH4169 高温合金试样表面留下的弹坑、脱层、褶皱等缺陷，降低试样的表面粗糙度，减少表面应力集中现象和疲劳裂纹萌生的概率，对提高 GH4169 高温合金的疲劳性能有一定的积极作用。

2.1.5 复合处理对 GH4169 高温合金残余应力的影响

图 8 为喷丸处理和复合处理 GH4169 高温合金室温状态和 500 °C 加热 100 h 处理之后的表面残余压应力测试结果。可以看到，VF 处理对进一步提高 GH4169 高温合金的残余压应力数值效果较为明显，这对进一步提高 GH4169 高温合金材料的疲劳性能十分有益。喷丸处理与复合处理试样经过 500 °C 加热 100 h 处理之后表面残余压应力分别降低了 13% 和 12%。即 500 °C 高温处理会导致 GH4169 高温合金试样表面的残余压应力松弛，但松弛量不大。

2.2 喷丸与振动光饰复合处理对 GH4169 高温合金疲劳性能的影响

2.2.1 GH4169 高温合金基材的疲劳性能

用升降法测试 GH4169 高温合金基材的室温疲劳强度，即疲劳寿命为 10⁶ 循环周次下试样不发生失效的最高应力水平。取 12 根基材试样，第 1 根试样

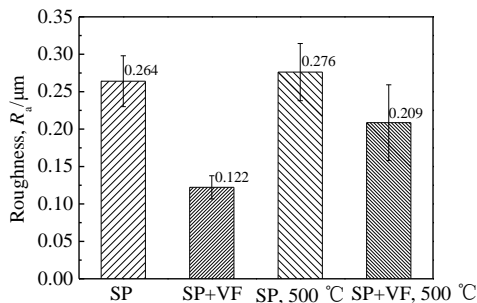


图 7 GH4169 高温合金喷丸处理和复合处理后各个状态下的表面粗糙度

Fig.7 Surface roughness of GH4169 superalloy after SP and SP+VF

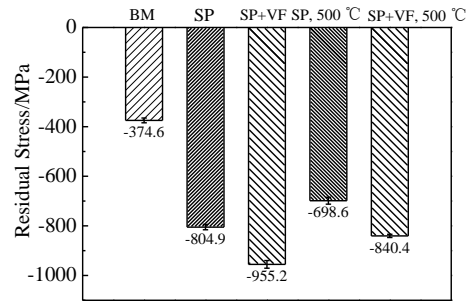


图 8 GH4169 高温合金喷丸处理和复合处理后各个状态下的表面残余压应力

Fig.8 Surface residual compressive stress in various states on the surface of GH4169 superalloy after SP and SP+VF

应力水平为 650 MPa，应力增量为 30 MPa，结果如图 9 所示。从图 9 可以看出，12 根有效试样中有 6 根试样失效，6 根试样通过，有三级应力水平包含通过的试样，将这三级应力水平按升序进行排列，自由度 $\nu=6-1=5$ ， f_i 为排列后第 i 级应力水平通过的试样个数，相关数据汇总到表 3 中。

表 3 中， S_i 指第 i 级应力水平， f_i 指第 i 级应力水平下的指定事件的数目。由表 3 可以得到， $A = \sum_{i=0}^l i f_i = 7$ ， $B = \sum_{i=0}^l i^2 f_i = 11$ ， $C = \sum_{i=0}^l f_i = 6$ ， $D = \frac{BC - A^2}{C^2} = 0.472$ 。

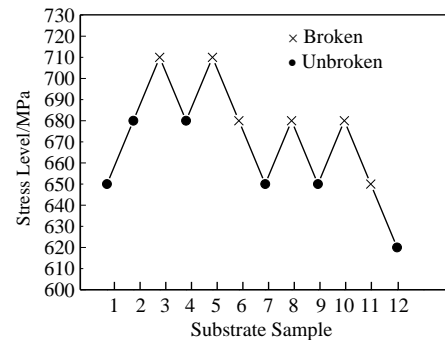


图 9 GH4169 高温合金基材的室温疲劳试验结果

Fig.9 Fatigue test results of GH4169 superalloy substrate samples at room temperature

表 3 GH4169 高温合金基材室温疲劳载荷升降图数据分析

Table 3 Analysis of fatigue load rise and fall diagram of GH4169 superalloy substrate at room temperature

i	S_i/MPa	f_i	if_i	$i^2 f_i$
0	620	1	0	0
1	650	3	3	3
2	680	2	4	8
Total		6	7	11

得到疲劳强度的均值和标准偏差如式 (1) 和式 (2) 所示：

$$\mu_y = S_0 + d \left(\frac{A \pm 1}{C} \right) = 620 + 30 \times \left(\frac{7}{6} + \frac{1}{2} \right) = 670 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\sigma_y = 1.62d(D + 0.029) = 1.62 \times 30 \times (0.472 + 0.029) = 24.35 \text{ MPa} \quad (2)$$

其中, S_0 为第一级应力水平, d 为应力增量, y 为 10^6 循环周次下的疲劳强度, μ_y 为 y 的平均值, σ_y 为 y 的标准偏差。

假定疲劳强度符合正态分布, 10% 的失效概率的疲劳强度的下极限根据公式计算, 置信度为 90% 时, 相关系数 $k_{(p, 1-\alpha, v)}$ 取 2.494, 得到式 (3) 如下:

$$y_{(p, 1-\alpha)} = \mu_y - k_{(p, 1-\alpha, v)} \sigma_y = 670 - 2.494 \times 24.3486 = 609.3 \text{ MPa} \quad (3)$$

其中, $k_{(p, 1-\alpha, v)}$ 为正态分布的单边误差限。

通过以上分析计算得出, 90% 置信度, 10% 失效概率下, GH4169 高温合金基材的疲劳强度为 609.3 MPa。

图 10 为 GH4169 高温合金基材的疲劳断口形貌。从低倍形貌上看, 断口包括裂纹萌生与起始缓慢扩展的平坦区、凹凸不平的快速扩展区和瞬时剪切断裂区 3 部分。疲劳裂纹从试样表面萌生, 这是旋转弯曲疲劳载荷下金属材料基材发生失效的主要特征之一, 因为最大交变应力在试样表面。疲劳源区周围可见裂纹扩展形成的河流状准解理花样, 扩展区微观形貌表现为穿晶准解理断裂特征, 并伴有疲劳条带存在, 瞬断区表现为典型的韧窝断裂特征。

2.2.2 复合处理 GH4169 高温合金的疲劳性能

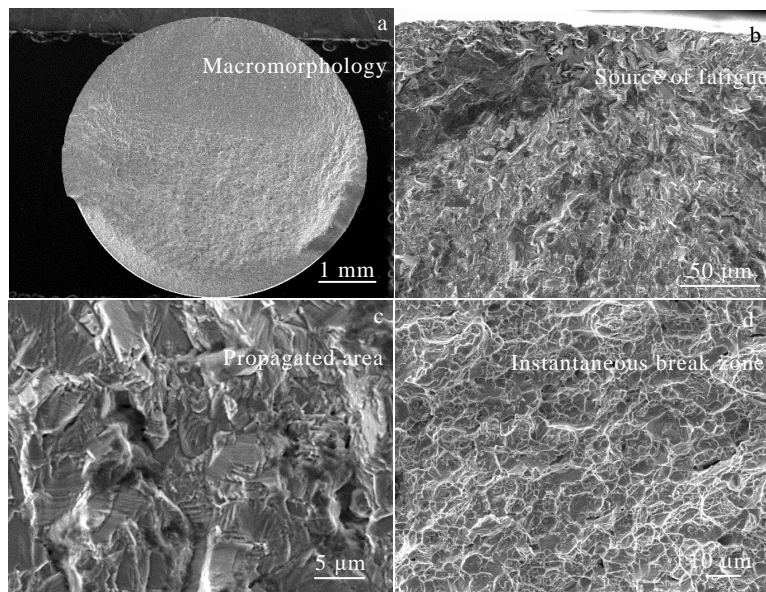


图 10 GH4169 高温合金基材的疲劳断口形貌 (应力水平 $S=680 \text{ MPa}$, 循环周次 $N=497\ 016$)

Fig.10 Fatigue fracture morphologies of GH4169 superalloy substrate (stress level=680 MPa, cycle number=497 016):

(a) macromorphology, (b) source of fatigue, (c) propagated area, and (d) instantaneous break zone

通过升降法计算得到, 在 90% 置信度, 10% 失效概率下, GH4169 高温合金复合处理之后的疲劳强度为 740.8 MPa, 与基材的疲劳强度 (609.237 MPa) 相比提高了 21.6%。说明复合处理获得了显著的强化效果, 有效提高了 GH4169 高温合金的抗疲劳性能。500 °C 加热 100 h 后, 复合处理 GH4169 高温合金的疲劳强度为 696.3 MPa, 与加热处理前的疲劳强度 (740.8 MPa) 相比降低了 6%: 与 GH4169 高温合金基材的疲劳强度 (609.3 MPa) 相比提高了 14.29%。由此表明 500 °C 加热 100 h 会削弱复合强化提高高温合金疲劳性能的效果, 这与高温使复合处

理过程中引入的残余压应力松弛有关。但削弱程度较小, 依然明显高于基材的疲劳强度, 即复合强化处理仍然能够提高 500 °C 高温工况条件下 GH4169 高温合金的疲劳性能。

图 11 是复合处理 GH4169 高温合金室温和 500 °C 加热 100 h 处理试样的疲劳断口形貌。从低倍形貌可以观察到疲劳裂纹慢速扩展区占断口面积比例较高, 说明复合处理使 GH4169 高温合金疲劳裂纹慢速扩展区增大, 疲劳抗力提高。由于复合处理在 GH4169 高温合金表层引入残余压应力, 部分抵消外加疲劳拉应力, 使试样所受的最大有效拉应力的位置

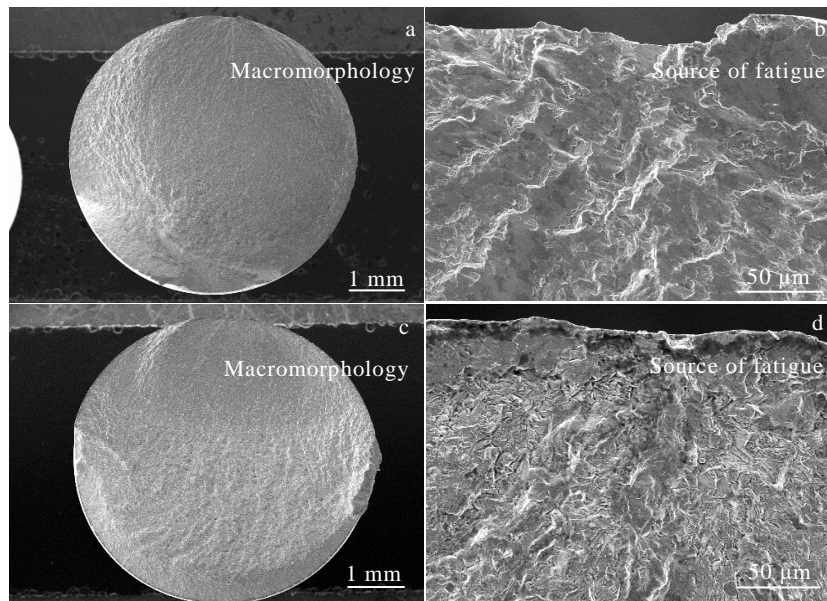


图 11 喷丸与振动光饰复合处理 GH4169 高温合金的疲劳断口形貌

Fig.11 Fatigue fracture morphologies of GH4169 superalloy after SP+VF (a, b) and SP+VF, 500 °C (c, d)

从试样表面转移至次表面，室温下疲劳源内移约 70 μm，500 °C 加热 100 h 的疲劳试样裂纹萌生于试样表面以下 48 μm 左右的位置，这是表面残余压应力场驱动的结果。因为 500 °C 加热 100 h 会使复合处理引入的残余压应力部分释放，最大应力的位置会向表面转移，所以疲劳源内移尺寸减小。疲劳源区与主断口基本在同一个平面内，这是裂纹萌生在 GH4169 高温合金内部（处于平面应变状态）的缘故。

2.2.3 喷丸与复合处理 GH4169 高温合金疲劳性能的对比

分别取 4 根单独喷丸处理和复合处理的 GH4169 高温合金试样，在最大应力 800 MPa 试验条件下进行室温疲劳试验，疲劳寿命试验结果如表 4 所示。可以看到，复合处理试样的平均疲劳寿命大于喷丸处理试样的平均疲劳寿命，但是数据的分散程度较大，因此参照标准《GB/T24176-2009/ISO 12107: 2003 金

表 4 4 根喷丸及其与振动光饰复合处理 GH4169 高温合金试样的疲劳寿命

Table 4 Fatigue life of four GH4169 superalloy samples after SP, and SP+VF

Max stress of 800 MPa	Lifetime after SP/Cycle	Lifetime after SP+VF/Cycle
Sample 1	400950	669324
Sample 2	755834	519154
Sample 3	294204	421002
Sample 4	249311	555443
Average	425075	541231

属材料疲劳试验-数据统计方案与分析方法》处理数据。计算得出，在 90% 置信度，10% 失效概率下，GH4169 高温合金喷丸处理后的疲劳寿命为 56780 周次，复合处理后的疲劳寿命为 258583 周次，提高了约 3.5 倍，说明复合处理对 GH4169 高温合金疲劳性能的改善十分显著。振动光饰既降低了喷丸处理表面的粗糙度，去除了表面存在的损伤等缺陷，又引入了表面残余压应力，所以复合处理是一种比喷丸处理更有效的表面强化手段。

2.3 复合处理 GH4169 高温合金表面完整性与疲劳性能的相关性

疲劳试验结果表明，复合处理能够显著提高 GH4169 高温合金的疲劳性能，这与复合处理改善 GH4169 高温合金的表面完整性有密切联系。喷丸会造成表面粗糙度增大，产生局部应力集中，在疲劳载荷下产生疲劳源，诱发疲劳开裂以致断裂失效。振动光饰可以使表面更加平整，并改善表面残余应力状态。复合处理引起的 GH4169 高温合金材料表层组织改善能够提高其抗疲劳性能，特别是疲劳裂纹的萌生寿命。同时，喷丸导致的 GH4169 高温合金材料表层位错密度增加使得材料表层硬度增大，阻碍了裂纹在材料表面萌生，改善抗疲劳性能。复合处理会在 GH4169 高温合金材料表层引入一定数值的残余压应力，抵消部分外加拉应力，使有效拉应力降低，从而降低了疲劳裂纹的萌生推动力；同时材料所受最大有效拉应力的位置由材料表面转移至次表面，导致疲劳源的位置由材料表面转移至次表面，这些均阻止了疲

劳裂纹的萌生和早期扩展。此外, 只要疲劳裂纹的深度未超过复合强化处理引入的残余压应力场的深度, 裂纹尖端附近区域仍存在残余压应力场中, 由此使得疲劳裂纹的临界张开应力增大, 即残余压应力的“闭合效应”, 由此阻止或延缓疲劳裂纹的扩展。因此, 合理的喷丸与振动光饰复合处理能够显著提高 GH4169 高温合金的抗疲劳性能。

采用 500 °C 加热 100 h 对 GH4169 高温合金试样进行处理, 虽然使其表层残余压应力有所降低 (图 8)、硬度有所下降 (图 6), 但降低程度并不显著, 而其他表面完整性因素 (表面形态、粗糙度、组织结构等) 无明显变化, 而复合改性层残余压应力场是提高疲劳抗力的主导因素^[21], 故 500 °C 加热 100 h 处理后复合强化 GH4169 高温合金的疲劳抗力仍然比基材疲劳抗力显著增大, 由此表明, 即使在 500 °C 工况下, 喷丸与振动光饰复合处理仍然能够显著提高 GH4169 高温合金的疲劳抗力。

3 结 论

1) 在 90% 置信度, 10% 失效概率下, GH4169 高温合金基材的疲劳强度为 609.3 MPa, 喷丸与振动光饰复合处理 GH4169 高温合金的疲劳强度为 740.8 MPa, 比基材提高了 21.6%, 即复合处理显著提高了 GH4169 高温合金的抗疲劳性能。

2) 采用 500 °C 预加热 100 h 处理模拟压气机高温工况, 使复合处理的 GH4169 高温合金疲劳强度降低为 696.3 MPa, 比加热处理前降低了 6%, 但仍比基材提高了 14.29%。即在 500 °C 高温工况下, 复合处理仍然能够有效提高 GH4169 高温合金的抗疲劳性能。

3) 在 800 MPa 最大应力水平试验条件下, 在 90% 置信度, 10% 失效概率下, 喷丸处理 GH4169 高温合金疲劳寿命为 56 780 周次, 复合处理 GH4169 高温合金的疲劳寿命为 258 583 周次, 提高了约 3.5 倍, 表明振动光饰能够提高喷丸强化高温合金的抗疲劳性能, 原因归于振动光饰降低了喷丸处理 GH4169 高温合金表面粗糙度, 除去喷丸损伤层, 提高了表面残余压应力。

参考文献 References

[1] Guo Jianting(郭建亭). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(5): 513
 [2] Xie Xishan(谢锡善), Dong Jianxin(董建新), Fu Shuhong(付书红) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学

报)[J], 2010, 46(11): 1289
 [3] Zhou H, Ro Y, Harada H *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 381(1-2): 20
 [4] Dekhtyar A I. *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 641: 348
 [5] Nalla R K. *Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 355(1-2): 216
 [6] Altenberger I, Nalla R K, Sano Y *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2018, 44: 292
 [7] Ao Ni, Liu Daoxin, Zhang Xiaohua *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 361: 35
 [8] Ao Ni, Liu Daoxin, Xu Xingchen *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 742: 820
 [9] Xu Xingchen, Liu Daoxin, Zhang Xiaohua *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2019, 125: 237
 [10] Roland T, Rehrig D, Lu K *et al. Scripta Materialia*[J], 2006, 54(11): 1949
 [11] James M, Sankara Narayanan, Chu P K *et al. Frontiers of Materials Science*[J], 2013, 7(3): 285
 [12] Rajabi M, Miresmaeili R, Aliofkhaeizadeh M. *Materials Research Express*[J], 2019, 6(6): 065 003
 [13] Zhan Ke(詹科). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013
 [14] Zhang P, Lindemann J. *Scripta Materialia*[J], 2005, 52(6): 485
 [15] Tekeli S. *Materials Letters*[J], 2002, 57(3): 604
 [16] Li Shiping(李世平), Liu Daoxin(刘道新), Li Ruihong(李瑞鸿) *et al. Mechanical Science and Technology*(机械科学与技术)[J], 2011, 30(9): 1418
 [17] Gao Yukui(高玉魁). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2004, 33(9): 1000
 [18] Zhao Yuanxing(赵远兴), Liu Daoxin(刘道新), Guan Yanying(关艳英) *et al. Weapons Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2014, 37(4): 15
 [19] Mao Jianbo(毛建波), Sha Aixing(沙爱星), Fu Weihua(付伟华). *Mechanical Engineer*(机械工程师)[J], 2006(11): 64
 [20] *2003 Statistical Scheme and Analysis Method of Fatigue Test Data of Metal Materials*. GB/T 24176-2009/ISO 12107[S]. 2009
 [21] Xia Mingli(夏明莉), Liu Daoxin(刘道新), Du Dongxing(杜东兴) *et al. Mechanical Science and Technology*(机械科学与技术)[J], 2012, 31(8): 1349

Effect of Shot Peening Combined Vibration Finishing on Fatigue Behavior of GH4169 Superalloy

Pan Yifan¹, Liu Daoxin², Liu Bo³, Hu Yunhui³, Wang Wei³

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China)

(2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Aero Engine Corporation of China Xi'an Aero-engine LTD, Xi'an 710038, China)

Abstract: The effects of shot peening and shot peening combined vibration finishing on the fatigue properties of GH4169 superalloy were studied contrastively. The surface morphology, surface structure, roughness, microhardness and residual stress field of the sample were analyzed by scanning electron microscope, roughness profiler, microhardness tester, and X-ray stress tester, and the internal relationship and mechanism of surface integrity and fatigue performance were discussed. The results show that the composite treatment is better than single shot peening treatment in improving the fatigue performance of GH4169 superalloy. The composite treatment increases the room temperature fatigue strength of GH4169 superalloy by 21.6%. Preheating at 500 °C for 100 h reduces the fatigue strength of composite strengthened GH4169 superalloy by 6%, but it is still 14.29% higher than that of the base material. That is to say, the composite treatment can effectively improve the fatigue resistance of GH4169 superalloy under working conditions from room temperature to 500 °C.

Key words: GH4169 superalloy; shot peening; vibration finishing; surface integrity; fatigue

Corresponding author: Pan Yifan, Master, Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, P. R. China, E-mail: panyifan@725.com.cn