

喷丸、喷砂与 HVOF WC-17Co 涂层表面完整性对 TC18 钛合金疲劳性能的影响

杜东兴¹, 刘道新¹, 孟保利², 张晓化¹

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072; 2. 西安飞机国际航空制造股份有限公司, 西安 710089)

摘要: 为了探讨喷丸、喷砂与 HVOF WC-17Co 涂层表面完整性对 Ti5Al5Mo5V1Cr1Fe (TC18) 钛合金疲劳性能的影响规律和作用机制, 利用 X 射线衍射仪 (XRD)、表面粗糙度仪、显微硬度计、扫描电子显微镜 (SEM) 以及 X 射线应力测试仪等分析了喷丸、喷砂及其复合超音速火焰喷涂 (HVOF) WC-17Co 涂层的表面完整性, 利用旋转弯曲疲劳试验机研究了上述表面处理对 TC18 钛合金疲劳性能的影响规律。结果表明, 喷丸预处理比喷砂预处理能够使 TC18 钛合金表面获得更好的表面完整性, 因而显著提高了 TC18 钛合金的疲劳抗力, 而喷砂处理对 TC18 钛合金疲劳抗力无明显影响。喷丸后进行 HVOF WC-17Co 涂层处理使 TC18 钛合金疲劳寿命提高 6 倍, 原因归于喷丸层内仍保留数值较大、分布较深的残余压应力, 有效延缓疲劳裂纹的萌生和早期扩展。喷砂后进行 HVOF WC-17Co 涂层处理使 TC18 钛合金疲劳抗力显著降低, 原因是 HVOF 过程的高温效应使喷砂层内残余压应力场松弛, 使喷砂表面缺口效应和损伤的不利影响作用突显, 加之 WC-17Co 涂层韧性低、表面粗糙度大、存在孔洞型缺陷, 不利于抗疲劳性能。

关键词: TC18 钛合金; 表面完整性; 超音速火焰喷涂 (HVOF); 疲劳性能

doi: 10.3969/j.issn.1005-5053.2013.5.003

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2013)05-0013-09

Ti5Al5Mo5V1Cr1Fe (TC18) 超高强度钛合金兼有 $\alpha + \beta$ 钛合金和 β 钛合金的综合性能, 强度高、韧性好, 焊接性能优, 特别适用于制造飞机起落架等关键部件^[1, 2]。然而, 钛合金最大的缺点是耐磨性能差, 由此限制了其在摩擦磨损工况下的应用。

超音速火焰喷涂 (HVOF) WC-Co 涂层技术, 可以很好地改善金属材料的耐磨性, 根除了传统电镀硬铬层固有的网状裂纹缺陷和氢脆隐患^[3, 4], 因而受到航空发达国家的高度重视, 并得到了广泛应用^[5-9]。喷砂表面粗化处理是提高 HVOF 涂层结合强度的重要手段, 然而研究表明^[10-13], 喷砂过程中常常因砂粒嵌入基材表面或造成表面尖锐性缺口而导致基材的疲劳性能显著下降。喷丸强化能引入表面残余压应力而显著提高金属材料的疲劳性

能^[14, 15], 同时也可适当使基材表面粗糙度增大而改善涂层与基材的结合强度。因此, 用喷丸取代喷砂前处理用于钛合金航空零部件表面 HVOF WC-Co 涂层制备, 可望获得良好的耐磨和抗疲劳综合性能^[3, 16]。

材料的疲劳抗力与其表面完整性有密切的关系, 特别是钛合金对表面完整性及表面缺口应力集中十分敏感, 且强度越高, 钛合金表面缺口敏感性越高^[17]。因此喷丸、喷砂与涂层对钛合金疲劳行为的影响应归于这些表面处理对钛合金表面完整性的综合影响。目前人们关注更多的是机械加工表面完整性对材料及结构疲劳抗力的影响^[18, 19], 研究表明^[20-22]喷丸处理表面完整性对金属疲劳性能有十分重要的影响, 然而关于喷丸、喷砂与涂层复合处理表面完整性对钛合金疲劳抗力的研究工作尚较少见报道。

因此, 本工作研究喷丸、喷砂及其与 HVOF WC-17Co 涂层复合处理表面完整性对 TC18 超高强度钛合金疲劳性能的影响规律, 探讨作用机制, 拟为 HVOF WC-Co 技术在超高强度钛合金航空结构件上的应用提供依据。

收稿日期: 2013-03-11; 修订日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51171154, 51101127)

作者简介: 杜东兴 (1984—), 男, 博士研究生, 主要从事材料的环境损伤及表面工程技术研究, (E-mail) ddx4142@126.com

通讯作者: 刘道新, 男, 教授, (E-mail) liudaox@nwpu.edu.cn.

1 试验材料与研究方法

1.1 试验材料与试样

试验研究用 TC18 超高强度钛合金,其化学成分(质量分数/%) Al 5.1, V 5.14, Cr 5.06, Fe 0.93, C 0.98, O 0.021, N 0.15, H 0.02, 余量为 Ti。热处理制度为: 840℃/1h, 炉冷; 750℃/1h, 空冷; 600℃/2h, 空冷。抗拉强度 $\sigma_b = 1220\text{MPa}$, 屈服强度 $\sigma_{0.2} = 1160\text{MPa}$, 断后伸长率 $\delta_5 = 17.0\%$, 断面收缩率 $\psi = 48.2\%$ 。喷涂

WC-17Co 涂层用粉末粒径范围为 $5.5 \sim 45\mu\text{m}$ 。

1.2 研究方法

1.2.1 喷砂、喷丸与 WC-17Co 涂层喷涂方法

TC18 钛合金试件喷砂处理选用 120 目白刚玉沙粒,砂粒微观形貌如图 1 所示,通过控制喷砂流量和压力,使钛合金试件表面粗糙度 Ra 大致达到 $1.0\mu\text{m}$ 。喷丸处理选用 S110 铸钢丸,喷丸强度为 0.20mmA ,覆盖率为 100%。WC-17Co 涂层喷涂工艺参数如表 1 所示^[3]。

表 1 HVOF 喷涂工艺参数
Table 1 Spray parameters of HVOF

Powder feed Rate/(kg/h)	Carrier gas pressure/MPa	Oxygen pressure/MPa	Combustion gas	Combustion gas pressure/MPa	Spray distance/mm	Gun traverse speed/(mm/s)	Specimen rotation/(r/min)	Temperature of substrate/℃
4	1.4	1.5	Propane	1.4	300	200	3000	< 150

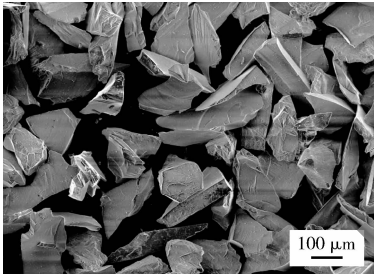


图 1 砂粒的微观形貌
Fig. 1 The microstructure of grit

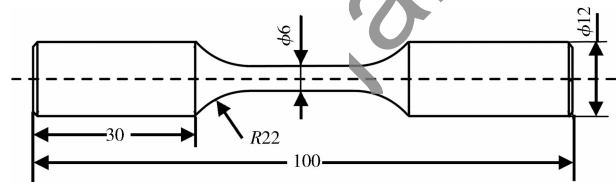


图 2 疲劳试样尺寸^[3](单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of fatigue specimen size^[3](unit mm)

1.2.2 表面完整性分析与测试方法

表面完整性分析与测试试样几何尺寸为 $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 10\text{mm}$, WC-17Co 涂层厚度控制为 $200 \sim 220\mu\text{m}$ 。表面完整性评价包括表面粗糙度、表面残余应力分布、表面硬度与微观组织结构等的测试及分析。

利用 SJ-301 型粗糙度仪测量表面粗糙度 Ra 值。使用 HV-1000 型显微硬度计测量硬度,选用 Knoop 压头,载荷 0.98N ,保载时间 20s 。残余应力

测试选用 D/MAX2200PC 型微机辅助 X 射线应力分析仪,扫描方式为固定 Ψ_0 法, Ψ_0 取 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$,选择半高法定峰,其它测试条件为:选用 Cu ($K\alpha$) 靶辐射,管电压为 40kV ,管电流为 30mA ,采用平行光束,照射面积为 $2 \times 2\text{mm}^2$ 。Ti 应力常数选择 -277MPa/deg ,衍射晶面为 (213); WC 的应力常数选择 -1050MPa/deg ,衍射晶面为 (301)。采用剥层法测试残余应力沿层深的分布。利用 JSM-6390A 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察分析涂层结构及表面形态特征,利用 SEM 自带的能谱仪 (EDS) 进行成分分析。涂层的韧性利用自制的多冲试验机进行评价,冲头为直径 5mm 的硬质合金球,载荷和冲击次数根据需求进行调整,冲击频率为 20Hz ^[23]。

1.2.3 疲劳试验方法

为模拟飞机关键零部件承受交变弯曲疲劳的工况条件,本工作采用 PQ-6 型旋转弯曲疲劳试验机进行试验。频率为 50Hz ,应力比 R 为 -1 ,室温大气环境。疲劳试样的形状和几何尺寸如图 2 所示。疲劳试样表面 HVOF WC-17Co 涂层厚度控制为 $55 \sim 65\mu\text{m}$ 。利用 JSM-6390A 型扫描电子显微镜观察分析疲劳试样断口特征。

2 试验结果与讨论

2.1 喷砂、喷丸预处理与涂层的表面完整性

图 3a ~ e 为 TC18 钛合金基材 (BM) 表面、喷砂

(GB)表面、喷丸(SP)表面,及喷砂后 HVOF 涂层(GB+H)表面和喷丸后 HVOF 涂层(SP+H)表面的 SEM 形貌。可以看到,GB 与 SP 表面形貌具有很大的差异性,GB 表面(图 3b)主要存在多棱角、尖锐

的砂粒撞击坑,而 SP 表面(图 3c)以球形丸坑为主。两种表面预处理后的喷涂表面并无明显的差异,涂层表面存在一定量的孔洞。

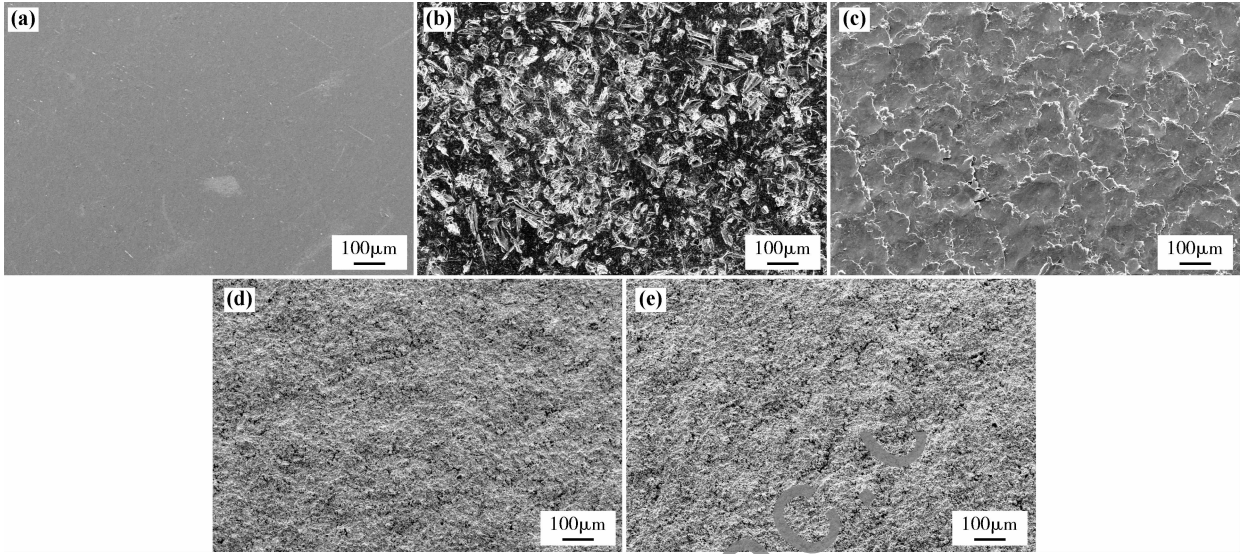


图 3 不同表面处理状态下表面 SEM 形貌

Fig. 3 SEM micrographs under different surface treatment status

(a) BM; (b) GB; (c) SP; (d) GB+H; (e) SP+H

图 4 所示为 TC18 钛合金 BM 表面、GB 表面、SP 表面,及 GB+H 表面和 SP+H 表面的粗糙度 Ra 测试结果,可以看到 SP 处理的表面粗糙度大于 GB 处理,但是表面喷砂与喷丸预处理后 HVOF 涂层试样的表面粗糙度接近。

合金疲劳抗力的降低。

图 6 所示为喷砂与喷丸处理后分别喷涂 WC-17Co 涂层试样的剖面组织微观形貌。可以看出,涂层大部分区域较为致密,但也存在尺寸不同的孔洞,涂层孔隙率大约为 0.6%。涂层与钛合金基材的界面结构表明,喷丸表面比较平整,坑较浅,坑底曲率半径较大;喷砂表面存在曲率较小,深度较大的凹坑,且有孔洞存在,这显然不利于基材疲劳性能。此外,喷砂处理对钛合金基材组织无明显改变,然而,喷丸处理则使 TC18 钛合金表面晶粒细化,晶粒取向改变(向平行表面方向倾斜)。

图 7 所示为对图 6a 中 A 处的 EDS 能谱分析结果,可以看到,A 处的主要成分为 Al 和 O,这表明喷砂试样表面有氧化铝砂粒嵌入。这也是大部分材料经过热喷涂处理后疲劳性能下降的主要原因之一^[7,8]。

图 8 所示分别为喷丸与喷砂处理及其表面 HVOF WC-17Co 涂层试样残余应力沿层深分布的测试结果。可以看到,喷丸与喷砂处理均在 TC18 钛合金表面引入了残余压应力场,但是二者的分布规律有所不同。喷丸表面获得的残余压应力数值更大,分布层深也较大,且最大残余压应力(388.9MPa)处于次表层 75 μm 处;喷砂试样最大残余压应力(289.8MPa)处于极表面,沿层深呈梯度趋势降低。喷丸试样极表

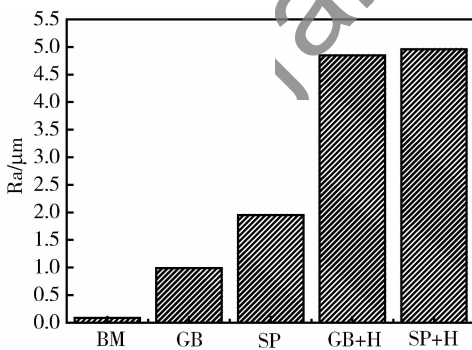


图 4 不同表面处理状态下表面粗糙度值

Fig. 4 Surface roughness of different surface treatments

图 5 所示为喷砂与喷丸处理试样轮廓曲线。虽然图 4 表明喷丸表面粗糙度要高于喷砂表面,但是从图 5 中明显看到,喷丸表面凹坑处曲率半径较大(图 5b),而喷砂表面凹坑处曲率半径较小(图 5d),即喷砂表面应力集中程度更高,由于 TC18 钛合金表面缺口敏感性高,所以喷砂处理更容易造成 TC18

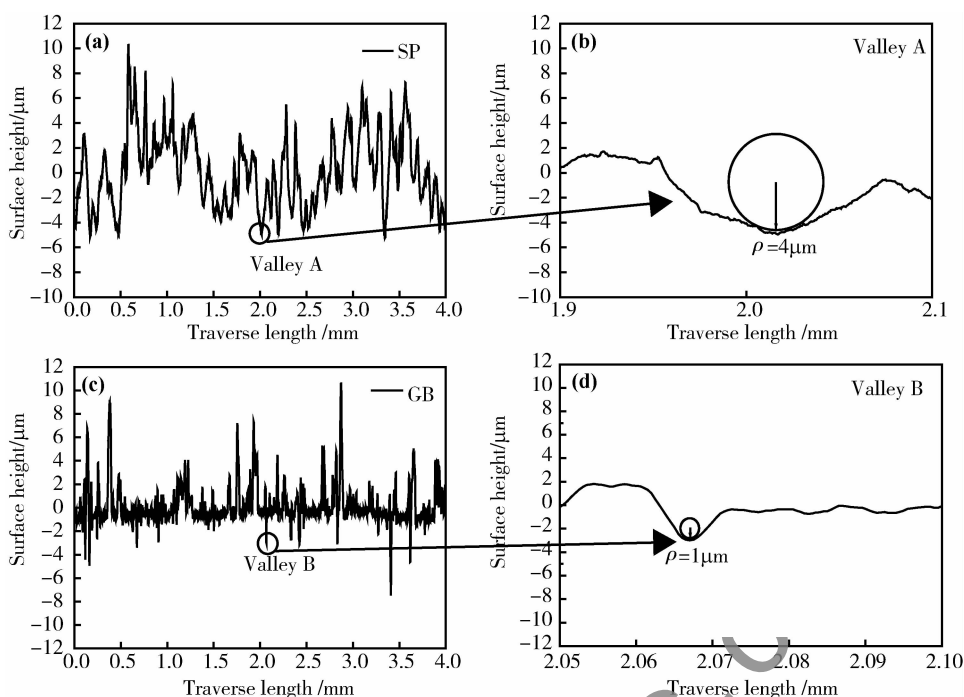


图 5 喷丸和喷砂处理 TC18 试样表面的轮廓曲线 (a) 喷丸表面轮廓; (b) 喷丸轮廓谷 A; (c) 喷砂表面轮廓; (d) 喷砂表面轮廓谷 B

Fig. 5 Surface profile curves of SP and GB pretreatment of TC18 specimens (a) surface profile of SP; (b) valley A of SP; (c) surface profile of GB; (d) valley B of GB

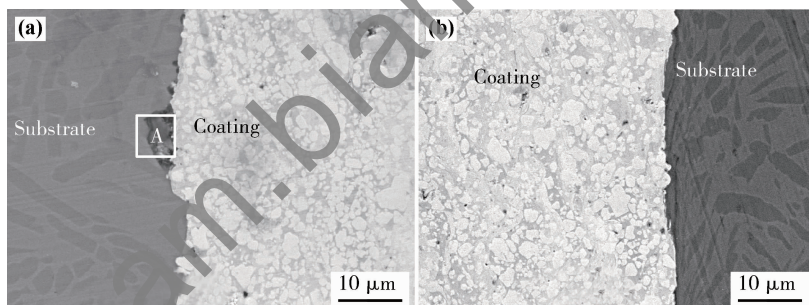


图 6 喷砂与喷丸处理后喷涂 WC-17Co 涂层剖面微观形貌:

(a) 喷砂处理后喷涂 WC-17Co 涂层; (b) 喷丸处理后喷涂 WC-17Co 涂层

Fig. 6 Section micro-morphology of WC-17Co coating after GB and SP pretreatment;

(a) GB pretreatment sprayed WC-17Co coating; (b) SP pretreatment sprayed WC-17Co coating

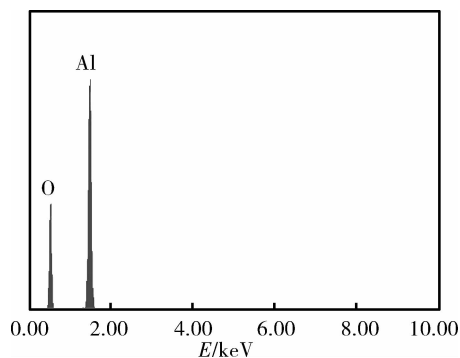


图 7 与 6a 中 A 处对应的 EDS

Fig. 7 EDS of point A in Fig. 6 a

面残余压应力数值(182.8MPa)反而较喷砂试样表面残余压应力数值小。从图 8b 可以看出,喷丸、喷砂处理后喷涂 WC-17Co 涂层试样的残余应力场分布规律较为一致。喷丸处理试样表面 HVOF 喷涂 WC-17Co 涂层,涂层极表面为残余拉应力状态,拉应力数值为 40.77MPa,次表层则为与表面平衡的残余压应力分布;涂层更深处受喷丸试样表面残余压应力场的影响呈现压应力分布,压应力数值沿层深逐步增大;在涂层与钛合金基材界面处残余压应力约为 121.3MPa,比单纯喷丸处理试样表面残余压应力(数值为 182.8MPa)有所降低,这显然是由于

HVOF 过程中高速火焰及粒子流 (速度可达 650m/s) 对喷丸试样表面的加热效应导致的表面残余压应力松弛的缘故^[12]; 然而, 喷丸层内部仍然保留高达 338.4MPa 的残余压应力。喷砂处理试样表面 HVOF 喷涂 WC-17Co 涂层, 涂层极表面为残余压应力状态, 压应力数值较小 (14.4MPa), 次表层逐步转变为与表面平衡的残余拉应力分布; 涂层更深处受

喷砂试样表面残余压应力场的影响仍然呈现压应力分布; 在涂层与钛合金基材界面处残余压应力约为 179.4MPa, 比单纯喷砂处理试样表面残余压应力 (289.8 MPa) 明显降低, 同时喷砂处理层内的残余压应力也严重松弛, 分布深度比喷丸处理试样明显小, 这与喷砂表面特殊的轮廓结构 (图 5c) 造成的残余压应力易于松弛有直接关系。

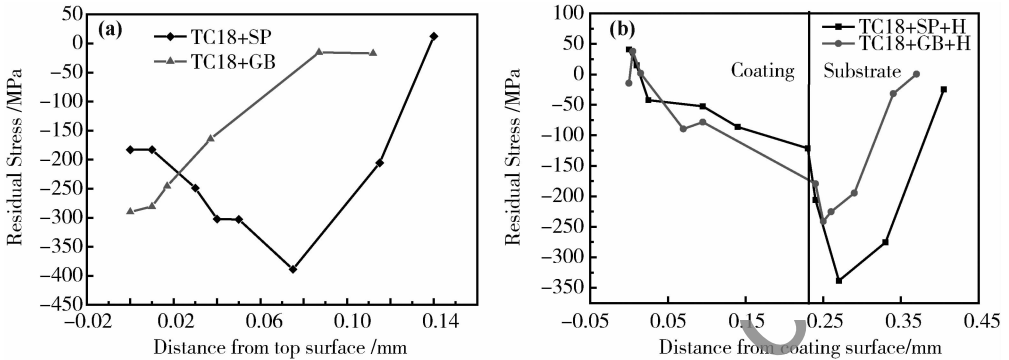


图 8 喷丸 (a) 与喷砂 (a) 处理及其喷涂 WC-17Co 涂层复合试样残余应力沿层深分布

Fig. 8 Residual stress distribution along perpendicular to surface of WC-17Co coating and pretreatment of GB (a) and SP (b)

图 9 所示为 TC18 钛合金各种表面状态试样表层的硬度测试结果。可以看到, 喷砂并未造成钛合金表面明显加工硬化现象 (图 6a)。SP 则使钛合金表面硬度有所提高 (即产生加工硬化^[14])。喷砂和喷丸预处理后进行 HVOF WC-17Co 涂层制备, 涂层使钛合金表面硬度提高 3 倍。

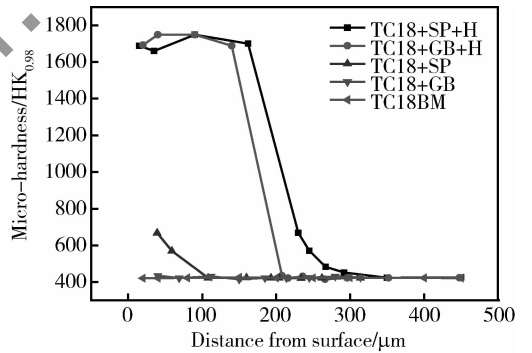


图 9 不同表面状态下的表层硬度测试结果

Fig. 9 Test results of the surface hardness for different surface status

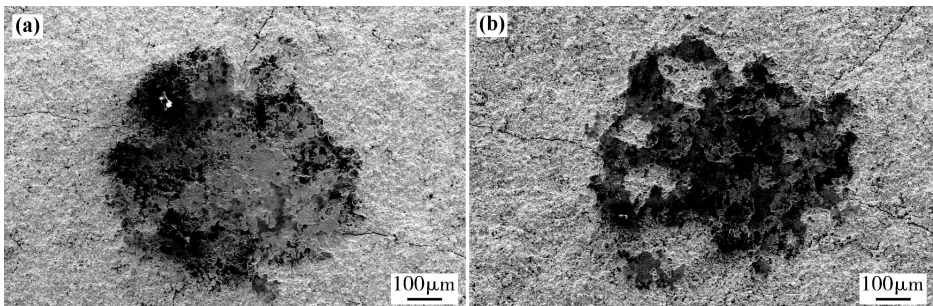


图 10 涂层多次冲击实验结果 (a)GB + H; (b)SP + H

Fig. 10 The experiment results of repeated impact for the coatings (a)GB + H; (b)SP + H

2.2 表面处理对 TC18 钛合金疲劳寿命的影响

图 11 所示为不同表面状态的 TC18 钛合金试

样在 650MPa 最大循环应力水平下的疲劳寿命对比柱状图。可以看到, 喷丸处理能够显著提高 TC18

钛合金的疲劳抗力;喷砂处理对钛合金基材疲劳抗力无显著影响。TC18 钛合金表面喷丸处理后进行HVOF 喷涂 WC-17Co 涂层,试样的中值疲劳寿命较基材提高约 6 倍,但是喷砂处理后 HVOF 喷涂 WC-17Co 涂层试样疲劳寿命降低的十分严重。

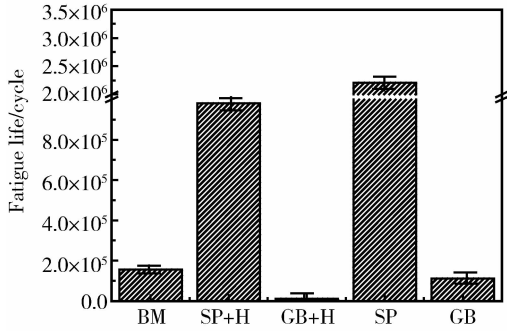


图 11 不同表面状态 TC18 试样在 650MPa 最大循环应力下疲劳寿命对比

Fig. 11 Fatigue life comparison of TC18 specimens with different surface state at 650MPa max-cyclic stress level

2.3 疲劳断口特征

图 12 所示为不同表面状态的 TC18 钛合金疲

劳试样断口形貌特征。可以看到,TC18 钛合金基材试样 (BM) 疲劳裂纹源位于外加循环应力幅最大的表面处,为单疲劳源 (图 12a)。TC18 钛合金喷砂试样 (GB) 疲劳裂纹源同样位于外加循环应力幅最大的表面处,也为单疲劳源 (图 12b)。TC18 钛合金喷丸试样 (SP) 疲劳裂纹源则转移到表层以下约 100 μ m 处,为单疲劳源 (图 12c),断口上裂纹慢速扩展区所占比例较大,表明其疲劳裂纹萌生较难,疲劳裂纹扩展阻力较大,寿命较长。TC18 钛合金喷砂后 HVOF 喷涂 WC-17Co 涂层试样 (GB + H) 疲劳裂纹源位于表面处,为多疲劳源 (图 12d),不同疲劳裂纹交汇即形成台阶特征,由此说明该试样疲劳裂纹十分容易萌生,疲劳抗力低,寿命短 (已进入低周疲劳范畴)。由于 WC-17Co 涂层硬度高、韧性低,且有孔洞缺陷,因此涂层易于发生疲劳破坏^[18],由此诱导 TC18 钛合金基材疲劳裂纹的萌生。TC18 钛合金喷丸后 HVOF WC-17Co 涂层试样 (SP + H) 疲劳裂纹源位于基材次表面 75 μ m 处,为单疲劳源 (图 12e),裂纹扩展较为充分,由此说明该试样疲劳裂纹萌生比喷砂处理后 HVOF WC-17Co 涂层试样的裂纹萌生难,因而其疲劳寿命较长。

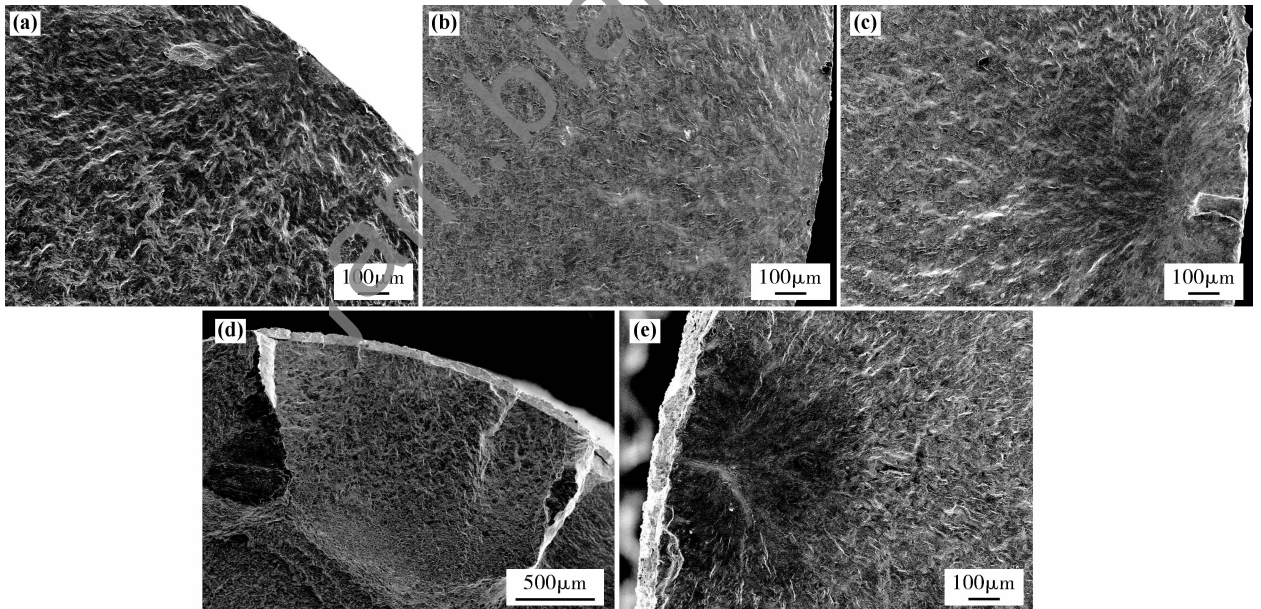


图 12 宏观断口形貌及疲劳源微观形貌 (a) BM 裂纹源区;(b) GB 裂纹源区;(c) SP 裂纹源区;(d) GB + H 裂纹源区;(e) SP + H 裂纹源区

Fig. 12 Morphology of fracture and crack initiation sites (a) crack initiation sites of BM; (b) crack initiation sites of GB; (c) crack initiation sites of SP; (d) crack initiation sites of GB + H; (e) crack initiation sites of SP + H

2.4 分析与讨论

喷丸与喷砂处理对钛合金疲劳性能影响结果的差异性可归因于它们对钛合金表面完整性影响规律

的不同。图 11 结果表明,喷砂处理对 TC18 钛合金基材疲劳抗力无显著影响,喷丸处理能够显著提高 TC18 钛合金的疲劳寿命。喷丸与喷砂处理均能在

基材表面引入残余压应力场(图 8a),残余压应力能够延缓疲劳裂纹萌生过程和抑制裂纹早期扩展^[13-15],有利于提高疲劳抗力。喷砂处理对 TC18 钛合金疲劳寿命无明显影响归因于喷砂造成 TC18 钛合金表面尖锐性缺口,引起应力集中,促进疲劳裂纹萌生,降低了基材的疲劳抗力,该作用抵消了喷砂引入表面残余压应力的有利作用。喷丸处理之所以能显著提高钛合金疲劳抗力归于喷丸引入数值较大、分布较深的残余压应力对疲劳裂纹萌生的延缓及对疲劳短裂纹扩展的阻止作用(促进裂纹闭合),此外,喷丸造成的表面加工硬化及组织细化对延缓疲劳裂纹的萌生也有有利影响,喷丸造成的表面粗糙度增大及表面损伤虽然不利于抗疲劳性能,但其作用低于有利因素的作用。即本文实验条件下喷丸处理比喷砂处理使 TC18 钛合金表面完整性能得到更明显的改善,故表现出更高的疲劳抗力。

喷丸和喷砂^[24-28]预处理后进行 HVOF WC-17Co 涂层处理对 TC18 钛合金疲劳性能的影响差异同样归于它们对钛合金表面完整性影响的不同。残余应力场测试结果表明,喷丸、喷砂后 HVOF WC-17Co 涂层试样表层均存在较大的残余压应力场,不同的是喷丸后 HVOF WC-17Co 涂层试样表面喷丸层内保留了数值较大、分布较深的残余压应力(图 8b),同时喷丸未造成钛合金基材表面严重的缺口效应和损伤,涂层与钛合金基材界面结合较好。喷丸和 WC-17Co 涂层复合处理使 TC18 钛合金表面完整性得到了明显的改善,故能够获得较高的疲劳抗力。喷砂后 HVOF WC-17Co 涂层试样表面不仅残余压应力数值较低、层深较浅,而且喷砂处理的 TC18 钛合金表面还会嵌入砂粒,破坏基材表面完整性,同时,WC-17Co 涂层硬度高(图 9),韧性低(图 10),且有微孔缺陷,由此使得该试样的疲劳抗力明显低于钛合金基材。

3 结论

(1)喷丸、喷砂及 HVOF WC-17Co 涂层对 TC18 超高强度钛合金疲劳性能影响的显著差异归于这三种表面处理对 TC18 钛合金表面完整性的不同改变。

(2)由于喷丸在 TC18 钛合金表面引入数值较大、分布较深的残余压应力场,有效延缓疲劳裂纹萌生和早期扩展,其有利作用明显大于对 TC18 钛合金表面完整性的不利影响,故使 TC18 钛合金疲劳抗力显著提高。喷砂引入的表面残余压应力场数值

较小、分布较浅,对疲劳抗力的有利影响与喷砂造成的表面缺口效应对疲劳性能的不利影响彼此抵消,因而对 TC18 钛合金疲劳抗力无显著改变。

(3)喷丸后进行 HVOF WC-17Co 涂层处理使 TC18 钛合金基材中值疲劳寿命约提高 6 倍,主要原因归于喷丸层内保留数值较大、分布较深的残余压应力。喷砂后进行 HVOF WC-17Co 涂层处理使 TC18 钛合金疲劳抗力显著降低,其原因是 HVOF 过程的高温效应使喷砂引入的表面残余压应力场严重松弛,使喷砂造成的表面缺口效应和损伤的不利影响突显,加之 WC-17Co 涂层硬度高、韧性低、表面粗糙度大,涂层与钛合金基材界面存在孔洞型缺陷,不利于疲劳性能的缘故。

参考文献:

- [1] 高玉魁. TC18 超高强度钛合金喷丸残余压应力场的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(11): 1209 - 1212.
(GAO Y K. Residual compressive stress field in TC18 ultra-high strength titanium alloy by shot peening[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(11): 1209 - 1212.)
- [2] 官杰,刘建荣,雷家峰,等. TC18 钛合金的组织与性能与热处理制度的关系[J]. 材料研究学报, 2009, 23(1): 77 - 82.
(GUAN J, LIU J R, LEI J F, *et al.* The relationship of heat treatment-microstructures-mechanical properties of the TC18 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(1): 77 - 82.)
- [3] DU D X, LIU D X, MENG B L, *et al.* Effects of pretreatment and HVOF sprayed cermet coating on fatigue properties of TC21 titanium alloy[J]. Sci China Tech Sci, 2013, 56(4): 1029 - 1037.
- [4] 汤智慧,王长亮,项兴嘉,等. 电镀硬铬工艺对 TC6 钛合金性能的影响研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(4): 49 - 52.
(TANG Z H, WANG C L, GONG X J, *et al.* Effects of hard chromium electroplating on performance of TC6 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(4): 49 - 52.)
- [5] OLIVEIRA F, HERNANDEZ L, BERRIOS J A, *et al.* Corrosion-fatigue properties of a 4340 steel coated with Colmonoy 88 alloy, applied by HVOF thermal spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2001(140): 128 - 135.
- [6] NASCIMENTO M P, SOUZA R C, PIGATIN W L, *et al.* Effects of surface treatments on the fatigue strength of AISI 4340 aeronautical steel[J]. International Journal of Fa-

- tigue, 2001(23): 607 – 618.
- [7] GONZALEZ-HERMOSILLA W A, CHICOT D, LESAGE J, *et al.* Effect of substrate roughness on the fatigue behavior of a SAE 1045 steel coated with a WC-10Co-4Cr cermet, deposited by HVOF thermal spray[J]. *Material Science and Engineering (A)*, 2010(527): 6551 – 6561.
- [8] IBRAHIM A, BERNDT C C. Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC-Co coatings and hard chrome plating [J]. *Materials Science and Engineering (A)*, 2007(456): 114 – 119.
- [9] VOORWALD H J C, SOUZA R C, PIGATIN W L, *et al.* Evaluation of WC-17Co and WC-10Co-4Cr thermal spray coatings by HVOF on the fatigue and corrosion strength of AISI 4340 steel [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005(190): 155 – 164.
- [10] SAVARIMUTHU A C, TABER H F, MEGAT I, *et al.* Sliding wear behavior of tungsten carbide thermal spray coatings for replacement of chromium electroplate in aircraft applications[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001(10): 502 – 510.
- [11] 邓春明, 刘敏, 周克崧, 等. 300M 钢超音速火焰喷涂 WC/17Co 涂层的疲劳性能[J]. *航空材料学报*, 2007, 27(4): 14 – 18.
(DENG C M, LIU M, ZHOU K S, *et al.* Fatigue property of HVOF sprayed WC/17Co coating on 300M steel[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2007, 27(4): 14 – 18.)
- [12] PUCHI CABRERA E S, BERRIOS-ORITZ J A, DA-SILVA J, *et al.* Fatigue behavior of a 4140 steel coated with a Colmonoy 88 alloy applied by HVOF [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003(172): 128 – 138.
- [13] WIELAGE B, WANK A, POKHMURSKA H, *et al.* Development and trends in HVOF spraying technology [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006(201): 2032 – 2037.
- [14] ZHANG X H, LIU D X. Effect of shot peening on fretting fatigue of Ti811 alloy at elevated temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009(31): 889 – 893.
- [15] ZHANG X H, LIU D X, TAN H B, *et al.* Effect of TiN/Ti composite coating and shot peening on fretting fatigue behavior of TC17 alloy at 350°C [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203: 2315 – 2321.
- [16] COSTA M Y P, VENDITTI M L R, VOORWALD H J C, *et al.* Effect of WC-10% Co-4% Cr coating on the Ti-6Al-4V alloy fatigue strength[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 507: 29 – 36.
- [17] 王春雨, 席文君. TC18 钛合金冲击缺口敏感性研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(4): 663 – 666.
(WANG C Y, XI W J. Investigation on notch sensitivity of TC18 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(4): 663 – 666.)
- [18] JAVIDI A, RIEGER U, EICHLSEDER W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30: 2050 – 2055.
- [19] ULUTAN D, OZEL T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51: 250 – 280.
- [20] 高玉魁, 刘天琦, 殷源发, 等. 表面完整性对 30CrMnSiNi2A 钢疲劳极限的影响 [J]. *航空材料学报*, 2002, 22(2): 21 – 23.
(GAO Y K, LIU T Q, YIN Y F, *et al.* Influence of surface integrity on fatigue limit for 30CrMnSiNi2A steel [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2002, 22(2): 21 – 23.)
- [21] FRIJA M, HASSINE T, FATHALLAH R, *et al.* Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity [J]. *Materials Science and Engineering (A)*, 2006, 426(1 – 2): 173 – 180.
- [22] MYLONAS G I, LABEAS G. Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: Residual stress, surface roughness and cold work prediction [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(19): 4480 – 4494.
- [23] 王小锋, 刘道新, 唐长斌, 等. 小能量多冲法对物理气相沉积膜层机械性能的评价 [J]. *机械科学与技术*, 2008, 27(4): 451 – 455.
(WANG X F, LIU D X, TANG C B, *et al.* Evaluation of mechanical properties of physical vapour deposited coatings using impact test with low energy [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008, 27(4): 451 – 455.)
- [24] 刘道新, 何家文. 喷丸强化因素对 Ti 合金微动疲劳抗力的作用 [J]. *金属学报*, 2001, 37(2): 156 – 160.
(LIU D X, HE J W. Effect of shot peening factors on fretting fatigue resistance titanium alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(2): 156 – 160.)
- [25] 王文智. 工程金属材料/零件的表面完整性及其断裂抗力 [J]. *中国表面工程*, 2011, 24(5): 55 – 57.
(WANG W Z. Surface integrity and fracture resistance of engineering metallic materials and components [J]. *China Surface Engineering*, 2011, 24(5): 55 – 57.)
- [26] LIU D X, TANG B, ZHU X D, *et al.* Improvement of the fretting fatigue and fretting wear of Ti6Al4V by duplex surface modification [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 116 – 119(1): 234 – 238.
- [27] 李瑞鸿, 刘道新, 张炜, 等. 喷丸强化与表面完整性对

300M 钢疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1418 - 1423.

(LI R H, LIU D X, ZHANG W, *et al.* Influence of shot peening and surface integrity on the fatigue properties of 300M steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1418 - 1423.)

[28] 张志远, 支希哲, 闫五柱, 等 2024 铝合金预拉伸板喷

丸强化前后疲劳寿命的分布及可靠度模型研究[J] 航空材料学报, 2012, 32(4): 92 - 96.

(ZHANG Z Y, ZHI X Z, YAN W Z, *et al.* Effect of shot peening on fatigue life and reliability model of prestretching aluminum alloy 2024 [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(4): 92 - 96.

Effects of Surface Integrity of Shot Peening, Grit Blasting and HVOF Sprayed WC-17Co Coating on Fatigue Properties of TC18 Titanium Alloy

DU Dong-xing¹, LIU Dao-xin¹, MENG Bao-li², ZHANG Xiao-hua¹

(1. College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Xi'an Aircraft International Corporation, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to investigate the effect of surface integrity of shot peening (SP), grit blasting (GB) and HVOF sprayed WC-17Co coating on the fatigue behavior of Ti5Al5Mo5V1Cr1Fe (TC18) alloy, the surface integrity of the surface treatment was evaluated by using X-ray diffraction (XRD), surface roughness meter, microscopic hardness tester, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray stress test instrument. The fatigue property of TC18 alloy influenced by above surface treatment was studied by using rotating bending fatigue test machine. The result indicates that the surface integrity after SP treatment is better than that after GB process. Therefore, the fatigue life of TC18 titanium alloy increases dramatically by SP, but there is no significant change of fatigue life by GB treated TC18 alloy. The fatigue life of HVOF WC-17Co coated TC18 alloy with SP pretreatment is increased six times larger than that of the alloy substrate. This is attributed to the retained large residual compressive stress in the SP layer. The crack initiation and earlier propagation are delayed by the residual compressive stress. However, the fatigue life of HVOF WC-17Co coated TC18 alloy with GB pretreatment is obviously decreased. This is due to the low toughness, large surface roughness, and pore defects of WC-17Co coating. The relaxation of residual compressive stress influenced by the HVOF high temperature process and the notch effect in GB layer are also the reasons.

Key words: TC18 titanium alloy; surface integrity; HVOF; fatigue property