

# 300M 钢基体上高速火焰喷涂 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳和抗盐雾腐蚀性能

周克崧, 邓春明, 刘 敏, 宋进兵, 邓畅光

(广州有色金属研究院, 广东 广州 510651)

**摘 要:** 以涂层在飞机起落架的应用作为研究背景, 在 300M 超高强钢基体上对替代电镀硬铬的两种高速火焰喷涂 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳和抗中性盐雾腐蚀性能进行了研究。结果表明, 两种有涂层的 300M 钢的疲劳寿命均高于无涂层 300M 钢, 如考虑扣除涂层承受载荷, 有涂层的 300M 钢与无涂层 300M 钢的疲劳寿命相当。喷砂镶嵌在基体表面的刚玉砂粒导致有 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳寿命低于有 WC-17Co 涂层的 300M 钢。两种涂层对基体的疲劳性能都没有负面影响; 两种涂层都提高了 300M 钢的抗盐雾腐蚀性能, 但有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢表现出更好的抗盐雾腐蚀性能。综合比较两种涂层的性能, 高速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层是更好的电镀铬替代涂层。

**关键词:** 300M 钢; 高速火焰喷涂; WC-17Co 涂层; WC-10Co4Cr 涂层; 疲劳; 盐雾腐蚀

**中图分类号:** TG115.5<sup>+</sup>7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2009)04-0671-06

飞机起落架是飞机的关键部件, 在飞机中起承重、缓冲和滑跑滑行制动和操纵等作用。目前现代飞机常用的支架式或摇臂式起落架, 经过几代改进, 其安全性能有了大幅度的提高, 但在使用过程中, 这些起落架会出现较严重的磨损<sup>[1]</sup>。起落架用材——低合金超高强钢耐腐蚀性能差, 在海洋性盐雾条件下很容易发生腐蚀。因此需要对其进行表面处理, 以提高飞机起落架的耐磨耐蚀性能。飞机起落架的表面处理主要采用电镀硬铬, 即六价铬酸盐在阴极沉积形成硬度较高的耐磨耐蚀涂层。其特点是工艺简单, 成本低。然而, 在电镀过程中会排放出大量的含有 Cr<sup>6+</sup> 致癌物质, 导致严重的环境污染。除此之外, 电镀过程中还会导致基体产生氢脆, 使基体的力学性能显著降低<sup>[2]</sup>。开发新型替代涂层一直受到各国政府的重视, 如美国和澳大利亚专门成立了研究替代电镀硬铬的部门, 以推动相关的研究<sup>[3-5]</sup>。

目前, 人们已采用 PVD、CVD 和热喷涂等工艺制备新型环保涂层以替代电镀硬铬<sup>[6,7]</sup>。热喷涂由于可以在大面积基体上快速地沉积硬度较高的耐磨耐蚀涂层而被认为是有可能替代电镀硬铬的工艺。

高速火焰喷涂 (HVOF) 是热喷涂工艺中的一种重要方法。其原理是高压燃气 (通常是丙烷、丙烯、煤油或者氢气等) 与高压氧气或者高压空气等助燃剂

在燃烧室或特殊的喷嘴中燃烧, 所产生的高温高速焰流将注入其中的粉末材料熔化或软化, 并喷射至基体表面而形成涂层。高速火焰喷涂由于适中的焰流温度 (1300~3000 °C) 和较高的焰流速度 (可高达 2000 m/s), 实现了热能和动能的良好结合, 特别适合制备 WC-17Co、WC-10Co4Cr 等金属陶瓷涂层, 所制备的涂层致密, 孔隙率小于 1%; 涂层与基体的结合为机械和半冶金结合, 结合强度较高, 可大于 70 MPa<sup>[8]</sup>。

本实验主要研究了高速火焰喷涂 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层对 300M 低合金超高强钢疲劳性能的影响, 并对有涂层的 300M 钢的抗中性盐雾腐蚀进行了研究, 为替代电镀硬铬涂层提供理论支持。

## 1 实验方法

将 300M 低合金钢加工成漏斗形试样, 具体尺寸见文献<sup>[9]</sup>。涂层材料分别为 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 粉末, 其粒度范围均为 5~30 μm。将试样进行超声除油, 采用刚玉砂进行喷砂, 然后再进行超声处理, 以除掉基体表面镶嵌的砂粒。采用 Unique Coat 高速火焰喷涂系统进行喷涂。喷涂工艺参数为: 主燃气压力 0.54 MPa, 次燃气压力 0.40 MPa, 空气压力 0.59 MPa, 喷距 0.15 m, 涂层厚度 150 μm 左右。将涂层用金刚石砂带抛光至 Ra 0.2 μm 以下, 以进行疲劳和盐雾腐

收到初稿日期: 2008-08-31; 收到修改稿日期: 2009-03-18

作者简介: 周克崧, 男, 1941 年生, 教授级高工, 广州有色金属研究院材料表面所, 广东 广州 510651, 电话: 020-37238503, E-mail: kszhou2004@163.com

蚀性能测试，抛光后涂层的厚度为 75 μm。

将抛光处理后的样品在 AMSLER-5100 型疲劳试验机上进行疲劳测试，在室温空气环境下轴向加载，应力比  $R=1$ ，加载频率为 133 Hz，指定疲劳无限寿命为  $10^7$  周次。按照 HB5287-96 标准，采用升降法四级测试疲劳试样的疲劳极限。采用成组法测量试样过载下的疲劳寿命，疲劳过载分别为 840，930，1020 和 1200 MPa。采用 JL SM5910 扫描电镜对疲劳试样的断口进行分析。

将尺寸为  $\Phi 80 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的 300M 钢两端面涂层后四周用环氧树脂封住，采用 MC-952C 型盐雾试验机测试试样的抗中性盐雾腐蚀性能。电化学测量采用 CHI660B 恒电位仪进行动电位极化曲线测试。采用标准三电极体系，参比电极为饱和甘汞电极(SCE)，辅助电极为铂电极，工作电极为 300M 钢以及有涂层的 300M 钢试样，电解质为 3.5%的 NaCl 中性溶液，温度为 25 °C。电化学测试试样的工作面面积为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。除工作面（涂层）外，其余各面均用环氧树脂封住。电化学测试前工作电极均在 25 °C、3.5%的 NaCl 中性溶液中浸泡 0.5 h。动电位扫描范围为  $-1200 \sim 0 \text{ mV}$ （相对于饱和甘汞电极），扫描速率为  $1 \text{ mV/s}$ ，电位为相对于饱和甘汞电极电位。采用 JL SM5910 扫描电镜对盐雾腐蚀试样的剖面进行分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 疲劳极限

图 1 为 300M 钢和分别有 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢的疲劳极限升降曲线。由图可知，两种有涂层的 300M 钢的疲劳极限升降曲线非常相近，均略高于 300M 钢。表 1 为按照 HB5287-96 计算得到的 3 种试样的标准差、变异系数  $C_v$  和不同存活率下的疲劳极限。3 种试样的标准差和变异系数都非常接近，但 300M 钢的疲劳极限都低于有涂层 300M

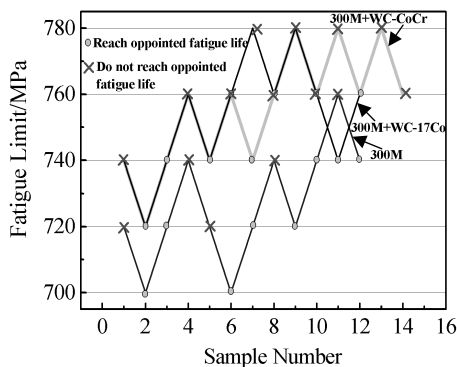


图 1 300M 钢和有涂层 300M 钢的疲劳升降曲线

Fig.1 Fatigue ladder curves for bare and coated 300M steel

表 1 300M 钢和有涂层 300M 钢的标准差、变异系数及在不同存活率下的疲劳极限

Table 1 Fatigue limits, standard variances and variation coefficients for bare and coated 300M steel at different survivabilities

Coat	Fatigue limit/MPa					Standard variance	$C_v$
	$P=$	$P=$	$P=$	$P=$	$P=$		
	50%	90%	95%	99%	99.9%		
— (Substrate)	726	703	697	685	671	15.1	0.021
WC-17Co	753	730	724	712	698	15.1	0.020
WC-10Co4Cr	755	732	726	714	700	15.1	0.020

钢。疲劳过程中涂层也承受载荷，有涂层的 300M 钢的承载面积约为原基体的 1.05 倍。根据表 1 的结果，不同存活率下有涂层 300M 钢的疲劳极限为 300M 钢的 1.04 倍左右。如考虑涂层的弹性模量 ( $160 \text{ GPa}^{[10]}$ ) 比基体 ( $200 \text{ GPa}$ ) 小，在相同的名义应力下所承受的实际载荷也小。因此考虑扣除涂层承受载荷，有 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢与原基体的疲劳极限基本相同。

### 2.2 过载下的疲劳寿命

图 2 为 300M 钢和有涂层的 300M 钢过载下的  $S\text{-lg}N_f$  单对数曲线疲劳寿命对比。从图 2 中可知，有 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢两者的疲劳寿命相近，均明显高于 300M 钢基体的疲劳寿命。同样考虑到涂层承受应力，因此应扣除涂层面积所承受的应力才能评价涂层对基体疲劳性能的影响。图 3 为考虑扣除涂层承受载荷下有涂层的 300M 钢与 300M 钢基体的疲劳寿命比值。由图 3 可知，有 WC-17Co 涂层的 300M 钢在低疲劳载荷下 ( $< 840 \text{ MPa}$ ) 使基体的疲劳寿命提高，而在高载荷下则降低了基体的疲劳寿命。有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢在全部载荷范围内均使 300M 钢的疲劳寿命略有降低。产生这种现象的原因是基体中残余压应力和前处理作用有关。一方面高速火焰喷涂在 300M 钢表面产生较大的残余压

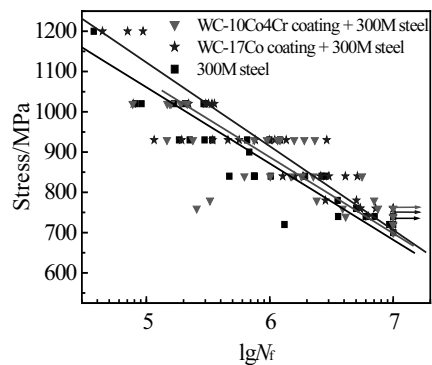


图 2 300M 钢和有涂层的 300M 钢的  $S\text{-lg}N_f$  单对数曲线

Fig.2  $S\text{-lg}N_f$  curves for bare and coated 300M steel

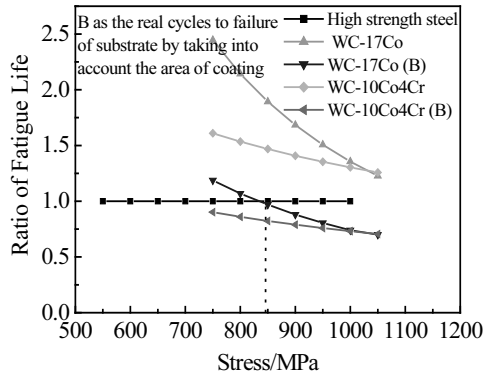


图 3 有涂层的 300M 钢与 300M 钢基体的疲劳寿命的比值  
Fig.3 Ratio of fatigue lives of coated 300M steel to that of bare 300M steel

应力, 抑制裂纹的扩展, 对提高疲劳寿命有利; 另一方面喷砂所造成的损伤和砂粒镶嵌在基体中, 导致喷砂处理对基体的疲劳寿命有明显的负面作用<sup>[11]</sup>。综合考虑, WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层对 300M 钢基体的疲劳寿命没有明显的负面影响。

### 2.3 疲劳失效分析

材料的裂纹源主要有 3 种, 分别为材料内部夹杂、材料表面损伤和材料表面的夹杂。但对于有涂层的 300M 钢除了上述 3 种典型的疲劳裂纹源外, 还多一种情况, 即喷砂镶嵌在基体表面的刚玉颗粒裂纹源。4 种裂纹源的情况如图 4 所示。表 2 为 3 种试样的疲劳主裂纹源的统计。从表中可知, 3 种材料的疲劳裂纹

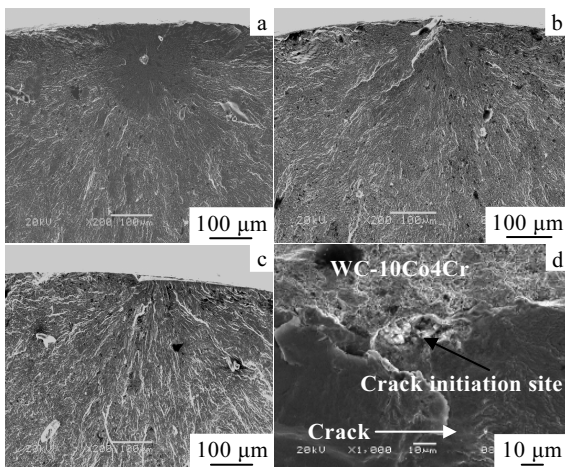


图 4 有涂层的 300M 钢的疲劳断裂裂纹源  
Fig.4 Fatigue crack initiation sites for coated 300M steel: (a) inclusion crack initiation site in substrate, (b) inclusion crack initiation site on substrate surface, (c) non-inclusion crack initiation site on substrate surface, and (d) crack initiation site from embedding of blasted alumina grit on the substrate surface

表 2 300M 钢和有涂层的 300M 钢疲劳主裂纹源统计  
Table 2 Statistics of main crack initiation sites for bare and coated 300M steel

Coat	≤ 840 MPa			> 840 MPa		
	a	b	c	a	b	c
— (Substrate)	88%	6%	6%	68%	16%	16%
WC-10Co4Cr	81.3%	12.5%#	6.2%	66.7%	33.3%#	0
WC-17Co	100%	0	0	100%	0	0

Note: a— inclusion crack initiation site in substrate, b— inclusion crack initiation site on substrate surface, c— non-inclusion crack initiation site on substrate surface, and #— crack initiation site from embedding of blasted alumina grit on the substrate surface

源主要为基体内部的氧化物夹杂, 特别是有 WC-17Co 涂层的 300M 钢的裂纹源全部为内部夹杂。而原基体和有 WC-10Co4Cr 的涂层 300M 钢则有一定比例的裂纹源自 300M 钢表面的夹杂(喷砂或者基体表面夹杂)或表面损伤。

疲劳主裂纹源是上述几种裂纹源竞争的结果。一般来说, 在相同质量的材料内获得的最大夹杂物尺寸相近, 因此在相同表面条件下内部夹杂作为疲劳裂纹源的概率相近<sup>[12]</sup>。当表面夹杂或者损伤成为表面裂纹源时, 则可能使材料的疲劳寿命显著降低, 因此除了对材料表面状况要仔细检查外, 在实际加工中要尽量减少加工对材料所造成的损伤。

对于有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢, 由于喷砂镶嵌在 300M 钢表面的刚玉颗粒疲劳主裂纹源与喷砂有关, 从而造成基体表面的损伤。同时, 这也可以解释在过载下有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢比有 WC-17Co 涂层的 300M 钢的疲劳寿命低的原因。由于刚玉颗粒在基体表面镶嵌而导致有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢的疲劳寿命显著降低, 因此数据统计得到有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢的疲劳寿命比有 WC-17Co 涂层的 300M 钢的疲劳寿命低。

图 5 为两种有涂层疲劳试样的界面。由图 5 中可以发现, 有 WC-17Co 涂层的疲劳试样的界面清洁, 在界面上观察不到明显的氧化铝砂粒; 而有 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳试样界面中发现存在较多的氧化铝砂粒。基体表面的夹杂可能与喷砂的工艺控制有关。由于实验开始没有意识到喷砂对疲劳性能影响的重要性, 有 WC-17Co 涂层的疲劳试样喷砂是采用新刚玉颗粒; 而有 WC-10Co4Cr 涂层疲劳试样是在刚玉砂经多次使用, 发生破碎后对基体表面进行喷砂的, 因此细小的氧化铝颗粒镶嵌在基体表面。虽然喷砂后经过超声处理, 也不能将有 WC-10Co4Cr 涂层的疲劳试样界面的砂粒除掉。因此喷砂工艺的控制是非常重要的。

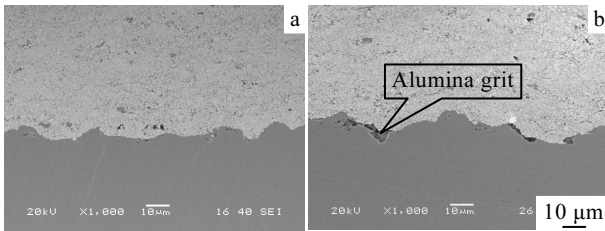


图 5 两种有涂层疲劳试样的界面

Fig.5 Interface state for two coated fatigue specimens: (a) coated with WC-17Co and (b) coated with WC-10Co4Cr

表 3 为 3 种过载下两种有 WC 涂层的 300M 钢的平均疲劳寿命对比。由表可知，氧化铝夹杂作为裂纹源的平均疲劳寿命明显低于其他情况的疲劳寿命。如不统计喷砂镶嵌的刚玉颗粒作为主裂纹源的疲劳寿命，则在 840 和 1020 MPa 应力下有 WC-17Co 涂层的 300M 钢比有 WC-17Co4Cr 涂层的平均疲劳寿命略高；而在 930 MPa 应力下前者的平均疲劳寿命略低。与两种有涂层 300M 钢在过载下疲劳寿命不同，两种有 WC 涂层的 300M 钢的疲劳极限几乎相同。这是由于升降法获得材料的疲劳极限时只需统计疲劳应力，在数据统计和处理中根本没有涉及材料的疲劳寿命。

表 3 有 WC 涂层的 300M 钢的平均寿命对比

Table 3 Comparisons of average fatigue lives for HVOF WC coated 300M steel

Load	WC-17Co coating + 300M steel			WC-10Co4Cr coating +300M steel		
	840 MPa	930 MPa	1020 MPa	840 MPa	930 MPa	1020 MPa
A	2 794 300	878 380	269 466	2 026 133	1 139 177	156 250
B	—	—	—	2 432 360	1 336 700	185 833
C	—	—	—	623 200	44 785	126 666

Note: A—— stands for average fatigue lives; B—— for average fatigue lives statistics from inclusion in 300M substrate as crack initiator; C—— for average fatigue lives statistics from alumina inclusion as crack initiator in 300M substrate.

图 6 为疲劳裂纹在 WC 涂层中的扩展照片，图中箭头所示为裂纹扩展路径。裂纹首先在 WC 涂层的表面形成，然后往涂层内部弯曲扩展，并在界面上裂纹发生偏斜，转向沿界面扩展或在界面上往涂层方向发

生偏斜，从而导致涂层与基体发生分离，形成无支撑涂层。WC 涂层中的裂纹在界面处偏转向界面方向，对基体的疲劳寿命没有影响。

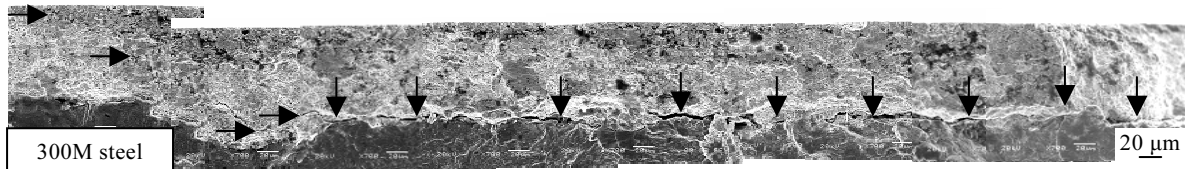


图 6 裂纹在 WC 涂层界面附近的扩展 (S=930 MPa, N<sub>f</sub>=238 300)

Fig.6 Propagation of cracks near WC coating interface (S=930 MPa, N<sub>f</sub>=238 300)

## 2.4 抗腐蚀性能

### 2.4.1 抗盐雾腐蚀行为

图 7 为两种 HVOF WC 涂层处理 300M 钢及基体在不同盐雾腐蚀时间的腐蚀评级。盐雾腐蚀 24 h，300M 钢即发生明显的腐蚀，说明了 300M 钢的抗化学腐蚀能力差。涂层处理后 300M 钢的抗盐雾腐蚀能力均明显提高。涂层的抗腐蚀能力顺序依次为：WC-10Co4Cr 涂层 + 300M 钢 > WC-17Co 涂层 + 300M 钢 > 300M 钢。

### 2.4.2 盐雾腐蚀机制分析

图 8 为两种有 WC 涂层的 300M 钢及基体在中性 NaCl 溶液中的电化学极化曲线。图中表明，基体的腐

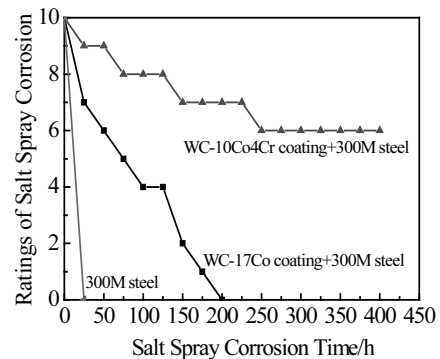


图 7 300M 钢和有涂层 300M 钢的盐雾腐蚀评级

Fig.7 Ratings of salt spray corrosion for bare and coated 300M steel

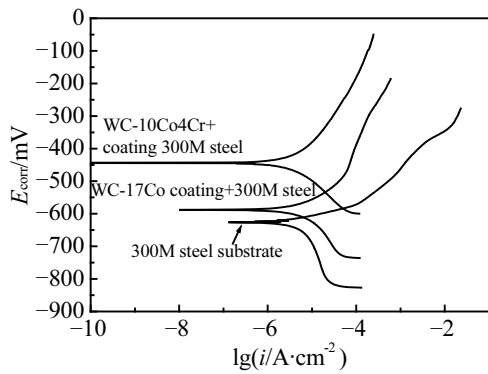


图8 300M 钢和有涂层 300M 钢的极化曲线

Fig.8 Polarization curves for bare and coated 300M steel

蚀电位最低,为 $-626$  mV。经 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层处理后,腐蚀电位分别升到 $-588$  和 $-444$  mV。而 WC-Co 中引入少量的铬可提高涂层的抗腐蚀能力。通过对 Tafel 区拟合可知,涂层的腐蚀电流密度  $i_{\text{WC-10Co4Cr}} < i_{\text{WC-17Co}}$ , 腐蚀电流密度和腐蚀速度成正比,因此,有 WC-10Co4Cr 涂层的材料较有 WC-17Co 涂层的 300M 钢抗电化学腐蚀能力强。

图 9 为 400 h 盐雾腐蚀后断面的 SEM 照片。从图中可以发现,有 WC-17Co 涂层的 300M 钢中的基体都有明显的腐蚀,而有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢中的基体仍保持良好状态。说明在 400 h 盐雾腐蚀下,前者的腐蚀介质即已扩散到界面,导致基体腐蚀。当腐蚀介质通过粘结相扩散到界面时,由于基体的腐蚀电位更低,基体优先腐蚀。WC-10Co4Cr 涂层比 WC-17Co 涂层的抗化学腐蚀能力强,这是由于引入的 Cr 形成了  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  陶瓷钝化相,提高了粘结相的电化学腐蚀电位,延缓了腐蚀介质向基体扩散<sup>[13]</sup>。

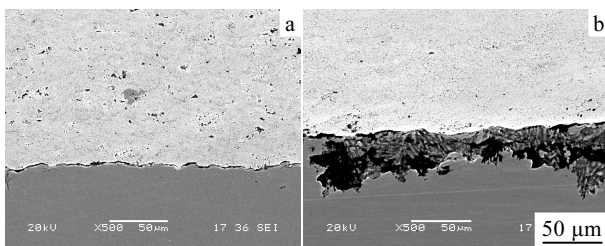


图9 涂层经 400 h 盐雾腐蚀后剖面的 SEM 照片

Fig.9 Cross-sectional SEM image after salt spray corrosion for 400 h: (a) WC-10Co4Cr coating and (b) WC-17Co coating

### 3 结论

1) 有 WC-17Co 和 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢的疲劳极限比 300M 钢略有升高。如考虑涂层承受载

荷和弹性模量的影响,则两种涂层对 300M 钢的疲劳极限没有不良影响,涂层对基体的疲劳寿命也没有明显的负面影响。

2) 喷砂镶嵌在 300M 钢表面的氧化铝颗粒成为主疲劳裂纹源,导致有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢比有 WC-17Co 涂层的 300M 钢的统计疲劳寿命低。

3) WC 涂层明显提高了 300M 钢抗中性盐雾腐蚀性能。而有 WC-10Co4Cr 涂层的 300M 钢表现出更好的抗盐雾腐蚀性能。

4) 综合比较两种 WC 涂层的疲劳和抗中性盐雾腐蚀性能,高速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层是更好的电镀硬铬替代材料。

### 参考文献 References

- [1] Wang Xiaoping(王晓平). *Aviation Engineering & Maintenance*(航空工程与维修)[J], 2001, 4: 15
- [2] Nascimento M P, Souza R C, Pigatin W L *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2001, 23(7): 607
- [3] Sartwell B D, Natishan P M, Singer I L *et al.* *Proceedings of AESF Aerospace/Airline Plating & Metal Finishing Forum*[C]. San Antonio: The American Electroplaters and Surface Finishers Society, 1998: 341
- [4] Sartwell B D, Bretz P E. *Advanced Materials Processes*[J], 1999, 156(2): 25
- [5] Wasserman Ch, Boecking R, Gufstasson S. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*[C]. Ohio, Materials Park: ASM International, 2001: 69
- [6] Yi Ming. *Anti-Corrosion*[J], 2003(9): 45
- [7] Zhou Kesong(周克崧). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14(1): 182
- [8] Erning U, Nestler M C, Tauchert G *et al.* *Proceedings of UTSC'99*[C]. Dusseldorf: German Welding Society, 1999: 462
- [9] Deng Chunming(邓春明), Zhou Kesong(周克崧) *et al.* *Mechanical Engineering Materials*(机械工程材料)[J], 2006, 30(9): 44
- [10] Qiao Yunfei. *Mechanical and Tribological Properties of Thermally Sprayed WC-17Co Coatings*[D]. New Jersey: Steven Institute of Technology, 2001
- [11] Padilla K, Valasquez A, Berrios A J A *et al.* *Surface and Coating Technology*[J], 2002, 150(2~3): 151
- [12] Murakami Y, Usuki H. *Transaction of Japan Society of Mechanical Engineering*[J], 1989, A 55(510): 213
- [13] Deng Chunming(邓春明), Zhou Kesong(周克崧) *et al.* *Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 2007, 22(3): 33

## Characterizations of Fatigue and Salt Spray Corrosion Resistance of HVAF Sprayed WC-17Co and WC-10Co4Cr Coatings on the Substrate of 300M Steel

Zhou Kesong, Deng Chunming, Liu Min, Song Jinbing, Deng Changguang  
(Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals, Guangzhou 510651, China)

**Abstract:** The fatigue and neutral salt spray corrosion resistance for bare and coated high strength steel were investigated in this paper. The results indicated that WC-17Co and WC-10Co4Cr coatings led to significant increase of fatigue resistance compared with the substrate. There were also comparably similar cycles to failure for the bare and the coated substrates even though the stress which was WC-based coatings shouldered was taken into account. The lower cycles to the failure for WC-10Co4Cr coated substrate than those for WC-17Co coated substrate were attributed to embedding of blasted alumina grit on the substrate surface, which resulted in the great decrease of the cycles to failure. Both WC coatings produced no negative effect on the fatigue performance of 300M steel. The neutral salt spray corrosion resistance for 300M steel substrate was significantly improved after coating process, especially for WC-10Co4Cr coating. As a conclusion, HVAF WC-10Co4Cr coated high strength steel exhibited better performances in both fatigue and neutral salt spray corrosion resistance than that of the substrate, and WC-10Co4Cr coating was a better candidate to chrome plating.

**Key words:** high strength steel; high velocity air fuel; WC-17Co coating; WC-10Co4Cr coating; fatigue; neutral salt spray corrosion

---

Biography: Zhou Kesong, Professor, The Centre of Materials and Surface Engineering, Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals, Guangzhou 510651, P. R. China, Tel: 0086-20-37238503, E-mail: kszhou2004@163.com