

文章编号: 1004 - 0609(2004)S1 - 0182 - 10

## 热喷涂技术替代电镀硬铬的研究进展<sup>①</sup>

周克崧

(广州有色金属研究院, 广州 510651)

**摘要:** 从热喷涂技术的发展, 高速火焰喷涂(HVOF)涂层的性能, 包括耐磨性、耐蚀性、对基体耐疲劳性的影响, 热喷涂涂层替代电镀硬铬镀层的成本以及应用 4 个方面综述了近年来热喷涂技术替代电镀硬铬的研究进展。指出热喷涂技术已经在航空、冶金、包装印刷和造纸等工业领域部分替代了电镀硬铬工艺; 由于热喷涂技术对于大工件、厚涂层在性能和价格上的优势, 热喷涂技术在其他工业领域的应用也将得到迅速发展。

**关键词:** 热喷涂; 硬铬; 研究进展

## Progress of thermal spray coating of hard Cr instead of plating

ZHOU Ke-song

(Guangzhou Nonferrous Metals Research Institute, Guangzhou 510651, China)

**Abstract:** The progress of thermal spray coating of hard Cr instead of plating was described, including history of thermal spray coating technique, properties (wear resistance, corrosion resistance) of HVOF coatings, effects on the fatigue of substrates, cost and applications. Thermal spray coating has been widely used in aerospace, metallurgy, packaging, printing and paper-making industries instead of traditional plating technique. Owing to the advantage in preparing large-sized and thick coatings, and in low cost, thermal coating can be applied in other industries very fast.

**Key words:** thermal spray coating; hard chromium coatings; HVOF

电镀铬是一种传统的表面电镀技术, 已经应用长达近百年。镀铬层硬度高、耐磨、耐蚀, 并能长期保持表面光亮, 工艺相对比较简单, 成本较低。长期以来, 铬镀层除了作为装饰涂层外, 还广泛用作机械零部件的耐磨和耐蚀涂层, 另外电镀硬铬镀层技术还常常用来修复破损部件。然而, 电镀硬铬过程中产生的  $\text{Cr}^{6+}$  会导致严重的环境污染问题<sup>[1]</sup>。铬本身是不活泼元素, 可以安全地用于日常用品以及人工关节等, 但镀铬工艺使用的是铬酸溶液, 在镀铬过程中会产生大量的氢气, 氢气泡在破裂时会把铬酸溶液喷入空气中, 产生酸雾, 酸雾中含有致癌的  $\text{Cr}^{6+}$ ; 另外, 镀铬过程也会产生大量的有毒废物和含有  $\text{Cr}^{6+}$  的废水。

因此, 各国对镀铬工艺的管制越来越严格。例如, 美国将会把现行的  $\text{Cr}^{6+}$  的空气排放标准从  $0.1 \text{ mg/m}^3$  降低到  $0.005 \sim 0.0005 \text{ mg/m}^3$ 。而据美国

海军部门估计, 单是美国海军在实施该标准后需要一次性投资 2 200 万美元用于更新设备等, 而以后每年要花费 4 600 万美元作为收集、处理等的费用<sup>[2]</sup>。

同时, 电镀硬铬镀层本身还存在其他一些缺点:

1) 电镀硬铬镀层的硬度一般为  $\text{HV}_{0.3} 800 \sim 900$ , 远不及一些陶瓷和金属陶瓷材料的硬度高和耐磨性好, 而且硬铬镀层的硬度在温度升高时会因其内应力的释放而迅速降低, 其工作温度只能低于  $427 \text{ }^\circ\text{C}$ , 因此难以适应现代机械高温、高速的工作要求。

2) 镀铬层内存在微裂纹, 不可避免地会产生穿透性裂纹(如图 1 所示)<sup>[3]</sup>, 导致腐蚀介质从表面渗透至界面而腐蚀基体, 造成镀层表面出现锈斑, 甚至剥落。

① 作者简介: 周克崧(1941-), 男, 教授级高级工程师。

通讯作者: 周克崧, 高工; 电话: 020-37238503; E-mail: KSZhou@public.Guangzhou.gd.cn

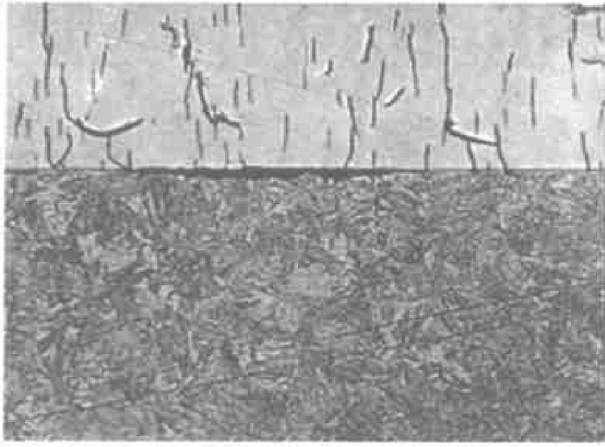


图 1 电镀硬铬涂层中的裂纹

3) 电镀工艺沉积速度慢, 约为  $25 \mu\text{m}/\text{h}$ , 如果要镀  $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$  厚的镀层往往需要十几至二十小时的时间, 不适于厚镀层的使用。

因而, 人们一直努力寻找能替代电镀硬铬的涂层工艺<sup>[4]</sup>。随着近年来涂层技术的不断发展, 已经有一些涂层的使用效果证明比电镀硬铬镀层更清洁、更有效, 甚至成本更低。这些涂层技术包括物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)、激光涂层技术和热喷涂技术等。这些技术中, 热喷涂涂层技术成本基本与电镀硬铬相当, 并且在不断降低, 而电镀硬铬成本则在不断上升。而且, 热喷涂涂层技术在纺织、机械、航空等许多领域已经取得了成功的应用。

## 1 热喷涂技术国内外概况

### 1.1 热喷涂技术的发展

热喷涂技术是一种将涂层材料(粉末或丝材)送入某种热源(电弧、燃烧火焰、等离子体等)中熔化, 并利用高速气流将其喷射到基体材料表面形成覆盖层的工艺。该工艺操作简便、灵活高效, 涂层材料种类繁多, 可以是金属、合金、陶瓷、金属陶瓷或塑料等。近年来高能、高速热喷涂设备的相继问世, 特别是高能等离子喷涂、三阴极等离子喷涂、高速火焰喷涂(HVOF)设备的出现, 使得热喷涂涂层孔隙多、结合强度不高的弱点得以克服, 涂层质量有了质的飞跃, 为热喷涂涂层替代电镀硬铬打下了坚实的技术基础。其中, 三阴极等离子喷涂设备采用轴向送粉, 其喷枪工作原理如图 2 所示。该设备工作状态稳定、沉积效率高, 对于氧化铬涂

层(如图 3 所示), 沉积效率可由常规等离子喷涂的 30% 左右提高到 50%, 这可以大大降低成本; 且涂层孔隙率小于 1%, 可以生产出高质量的镜面辊。最新的高速火焰喷涂设备有 JP-5000、SB-500、DJ-2700 等, 工作原理如图 4 所示, 沉积的 WC 涂层如图 5 所示。这些设备的粒子速度高达  $600 \sim 800 \text{ m/s}$ , 沉积碳化物的效率非常高, 而且涂层的孔隙率小于 1%, 结合强度大于  $70 \text{ MPa}$ , 这些特性使得 HVOF 成为最具有吸引力的替代电镀硬铬的方法。此外, 通过适当的冷却方法和仔细控制喷枪的运动, 可以将工件表面的温度控制在  $93 \text{ }^\circ\text{C}$  以下<sup>[5]</sup>, 因此许多对温度敏感的材料也可以用 HVOF 工艺处理。

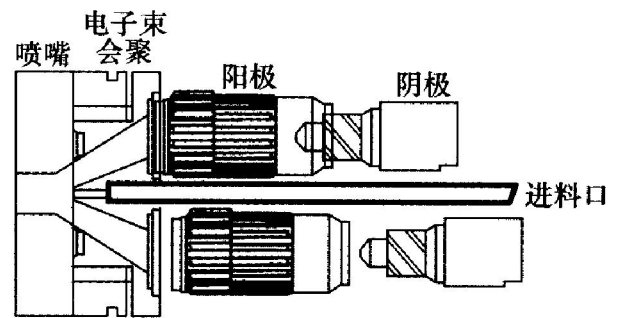
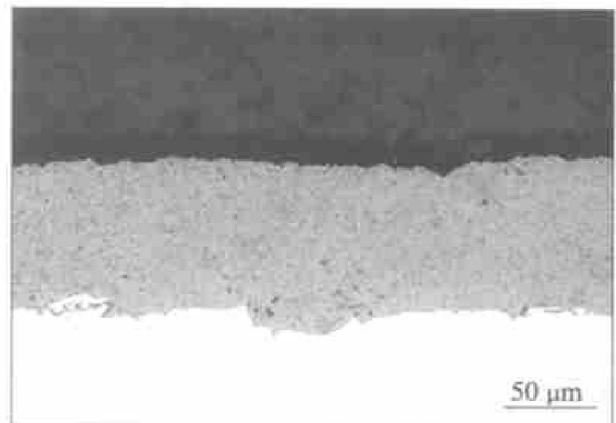


图 2 三阴极等离子喷枪示意图

图 3 三阴极等离子喷涂的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层形貌

近年来采用热喷涂代替镀硬铬从涂层材料、喷涂工艺、涂层性能、涂层后加工工艺及涂层的应用等方面进行了更为全面和深入的研究<sup>[6-24]</sup>, 包括 WC-Co、WC-10Co-4Cr、 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、WC-NiCr、WC-Ni、Tribaloy 400、NiCrBSi、FeCrMo、CoMoCrSi、CoCrNiW、FeNiCr、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  等多种涂层在球阀、瓦楞棍、网纹辊、起落架、泵、纺织机械、石油化工设备和汽车等方面的应用<sup>[9]</sup>。从已经获得的结果来看, 热喷涂涂层不但能达到镀铬层

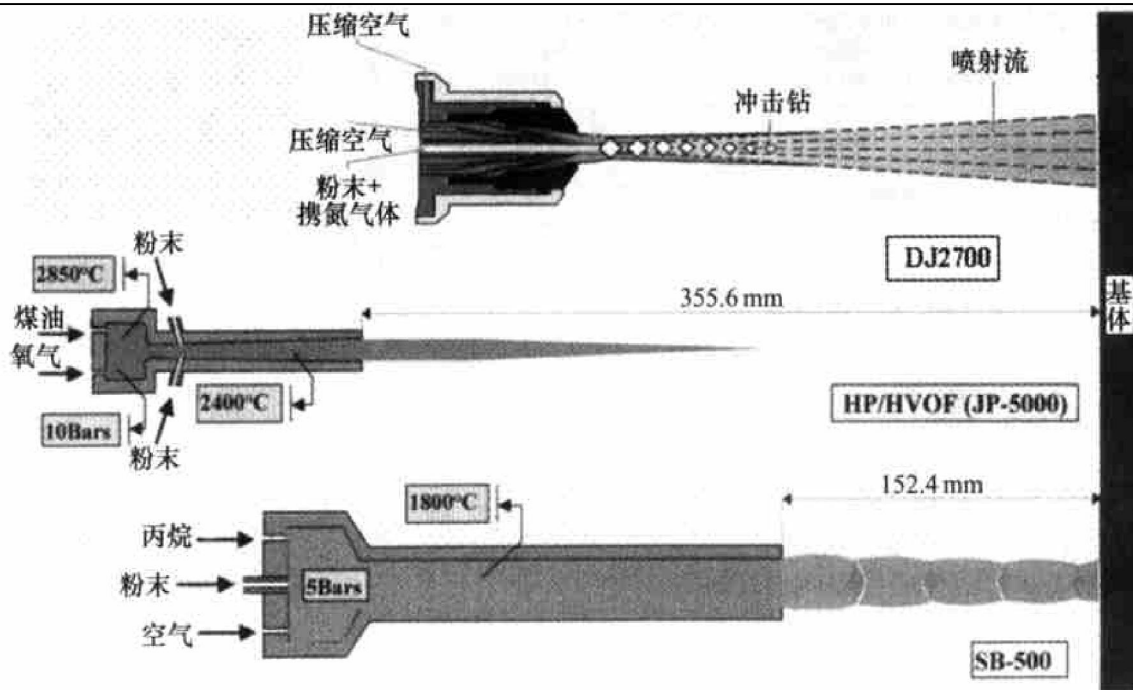


图4 三种HVOF喷枪的工作原理图

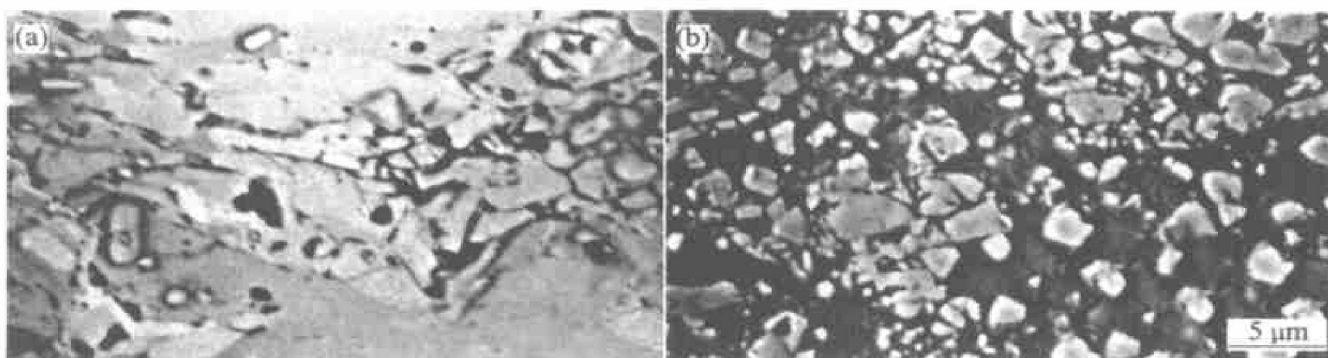


图5 等离子喷涂(a)和HVOF(b) WC涂层形貌比较

的镜面粗糙度，而且在硬度及耐磨性能等方面还大大超过镀铬层，完全可以在一些应用中取代硬铬，特别是一些大型工件在有严重磨损并有腐蚀的场合<sup>[5, 10]</sup>。近几年，美国和加拿大两国组成了联合研究小组，美国负责研究美国国防部的维修站的硬铬替代问题，而加拿大方面负责研究商业和军用飞机起落架的电镀硬铬替代问题。目前两国的研究已经取得了重大进展，材料试验已经完成，部分项目已经完成了试飞。该研究的最终目的是在商业公司和军事部门广泛推广HVOF技术，以取代电镀硬铬工艺。

根据有关的数据及资料，将HVOF和镀铬工艺特点总结如表1。

### 1.2 HVOF涂层的性能

由于不同的部件所应用的环境不同，受到的机械载荷不同，腐蚀和磨损的机理也千差万别，同时

表1 HVOF和镀铬工艺特点比较

项目	HVOF	硬铬
设备费用	低	高
工作空间要求	小	大
涂层厚度	均匀，可以很厚	不均匀，有限制
化学溶液控制	不需要	严格
废物处理问题	不需要	必需
工艺步骤	3	6-8
沉积速率	非常快	非常低
工件尺寸限制	无	有
机动性	好	差
现场修复能力	强	差

还要考虑涂层的成本问题，因而对于不同的应用领域，必须考虑采用不同的涂层材料来取代电镀硬铬镀层。

#### 1) 耐磨性

涂层耐磨性是一项非常重要的指标。对涂层的各种耐磨性有非常详细的研究报道<sup>[6, 11-14]</sup>。

如图 6 所示, 在涂层耐磨粒磨损试验中只有 NiCrMo 涂层稍逊于电镀硬铬镀层, 而 WC-Co/NiCrMo 涂层的耐磨性则是电镀硬铬镀层耐磨性的 2.5 倍多<sup>[6]</sup>。

Reignier 等的研究结果如图 7 所示, 测试采用 ASTM G65 标准, 磨料为 200 μm 石英。由图可见, 用 HVOF 方法喷涂的 WC-CoCr 涂层的磨损量平均只有电镀硬铬的 20%~25%<sup>[11]</sup>。

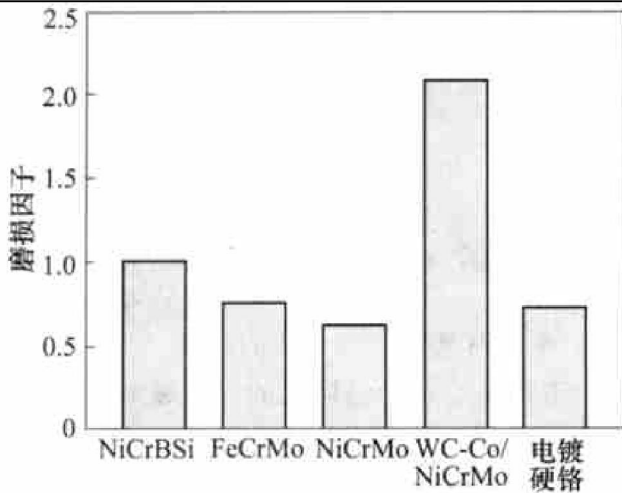


图 6 各种涂层耐磨粒磨损性的比较

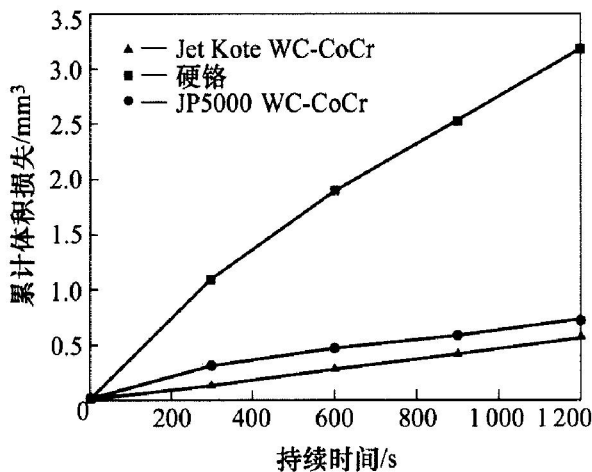


图 7 涂层的磨损量比较

抗粘着磨损性对于作为滑动轴承和内燃机的气缸运动面保护涂层具有重要的意义。Mitch 等<sup>[6]</sup>研究结果表明: NiCrMo、FeCrMo、WC-Co/NiCrMo 涂层的耐磨性均好于电镀硬铬, 而其中 WC-Co/NiCrMo 涂层的耐磨性最佳。

2) 耐蚀性

主要包括 3 种腐蚀实验: ASTM B117 盐雾实验、GM9540P/B 循环腐蚀实验以及大气腐蚀实验。前两种实验在盐雾腐蚀箱中进行, 而大气腐蚀实验则在靠近

海边的地方进行, 并且每周给试样喷洒盐水。

图 8 所示是 AerMet 100 钢表面的硬铬涂层以及 HVOF 涂层在 500 h 和 1 000 h 盐雾实验后的形貌<sup>[24]</sup>。可以看出, WC-10Co4Cr 涂层的耐蚀性要优于电镀硬铬。Wasserman 等<sup>[13]</sup>的研究证明等离子喷涂和 HVOF 制备的 WC-Co、WC-CoCr 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等涂层的耐盐雾腐蚀性能要明显优于电镀硬铬, 如图 9 所示。Parker<sup>[15]</sup>的研究表明, HVOF WC-17Co 涂层的耐盐雾腐蚀能力强于电镀硬铬。Nestler 等<sup>[16]</sup>的航空起落架盐雾腐蚀实验结果表明 HVOF WC-CoCr 涂层经 750 h 盐雾腐蚀后, 未发生腐蚀, 其耐蚀性要优于电镀硬铬, 如图 10 所示。

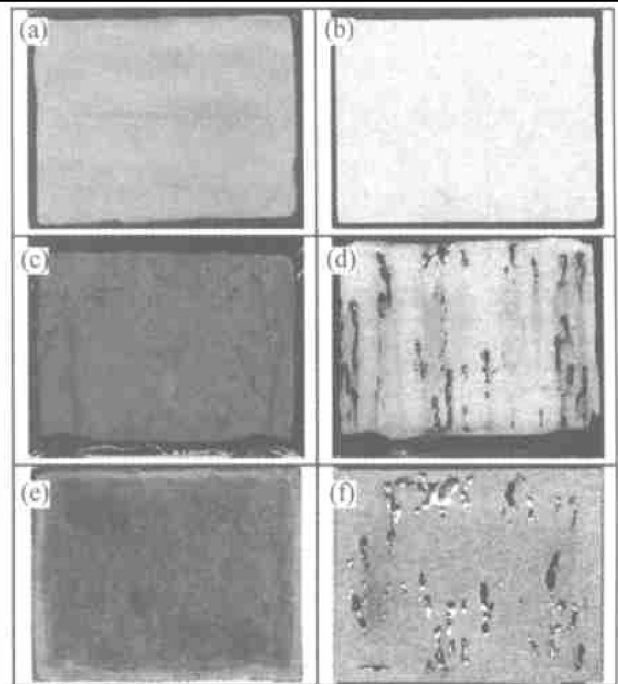


图 8 涂层盐雾实验结果

- (a) —WC-CoCr, 0 h; (b) —电镀硬铬, 0 h;
- (c) —WC-CoCr, 500 h; (d) —电镀硬铬, 500 h;
- (e) —WC-CoCr, 1 000 h; (f) —电镀硬铬, 1 000 h

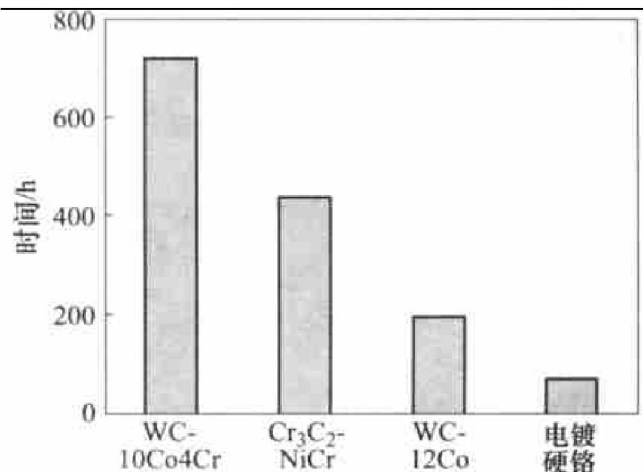


图 9 几种 HVOF 涂层和电镀硬铬盐雾实验比较 (涂层厚度 100 μm; 实验 ASTM B117-90 ISO9277)

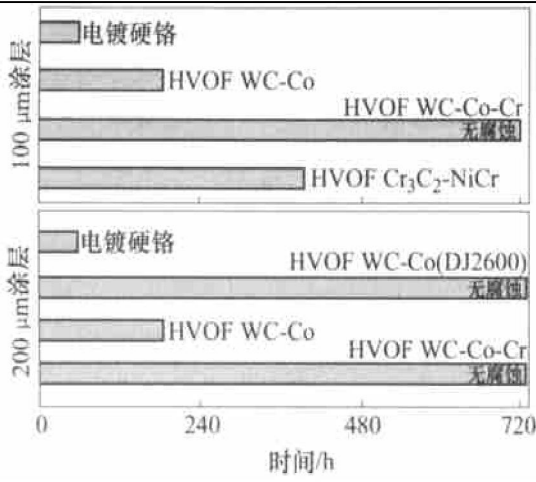


图 10 盐雾腐蚀实验结果

在经过 18 个月的大气腐蚀实验之后, WC-Co 涂层几乎没有腐蚀, 如图 11 所示<sup>[7]</sup>。

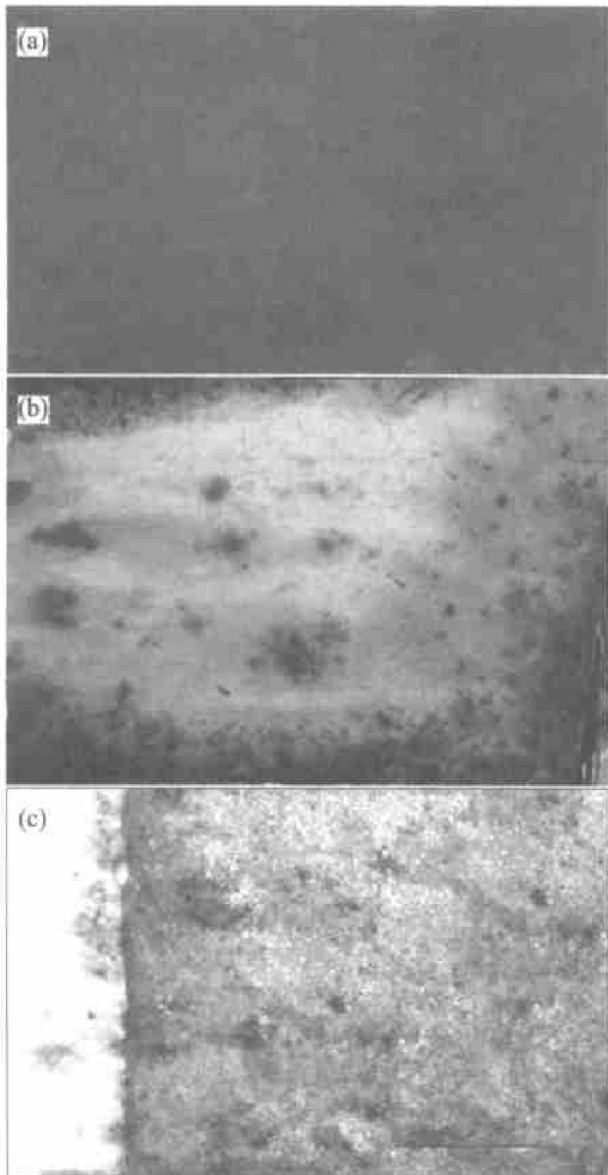


图 11 涂层大气腐蚀实验结果

(a) —WC-Co; (b) —T400; (c) —硬铬

图 12 所示为 4340 钢表面的硬铬涂层、HVOF WC-Co 涂层和 HVOF Tribaloy 400 涂层在经过 GM9540P/B 循环腐蚀实验后的涂层表现等级。可见, HVOF WC-Co 涂层的耐蚀性稍好于电镀硬铬镀层<sup>[7]</sup>。

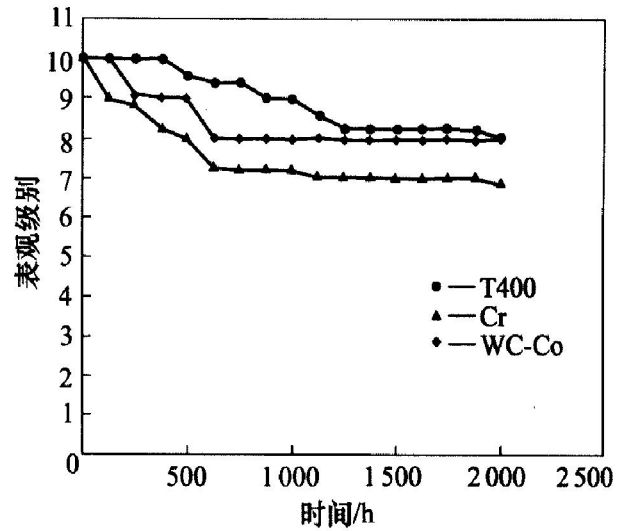


图 12 涂层循环腐蚀实验(GM9540P/B)结果

### 3) 涂层对基体耐疲劳性的影响

对于许多电镀硬铬镀层的应用领域来说, 所镀的部件对疲劳特性非常敏感, 特别是对于在航空工业中应用的系统, 如飞机起落架和液压传动装置, 直接关系到整个系统的安全。因此在用 HVOF 涂层替代电镀硬铬镀层之前, 必须研究清楚 HVOF 涂层对基体的耐疲劳特性的影响。众所周知, 电镀硬铬镀层中存在拉应力, 因此会对基体的耐疲劳特性有非常不利的影响, 在设计疲劳敏感部件时是一个必须加以考虑的重要因素。但是, 对于 HVOF 涂层来说, 通过精确控制沉积工艺, 可以确保沉积的 HVOF 涂层处于压应力状态。实验结果表明, HVOF 涂层对于基体的耐疲劳特性影响比电镀硬铬要小<sup>[2, 5, 15-18]</sup>。

Parker 进行了电镀硬铬试样和 HVOF 喷涂试样的室温高周(HCF)和低周(LCF)疲劳实验, 如图 13 所示, 两种实验结果一致, HVOF 试样的疲劳强度有一些降低, 而电镀硬铬试样则有明显降低, 说明应用 HVOF 涂层对疲劳寿命的影响将会比电镀硬铬小<sup>[2]</sup>。Legg 的研究也表明, 航空用 4340 钢电镀硬铬镀层和 HVOF WC-Co 涂层的疲劳曲线中, 相同厚度的 WC-Co 涂层与电镀硬铬镀层比较, WC-Co 疲劳特性要优于电镀硬铬镀层<sup>[5]</sup>, 如图 14 所示。

### 1.3 热喷涂涂层替代电镀硬铬镀层的成本分析

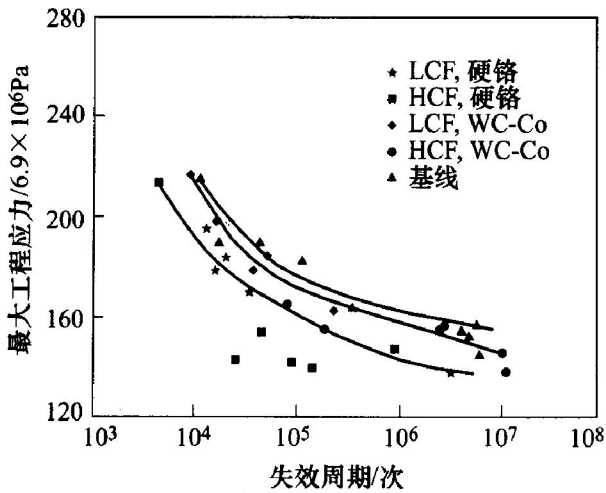


图 13 4340 钢电镀硬铬和 HVOF WC-Co 涂层的疲劳曲线

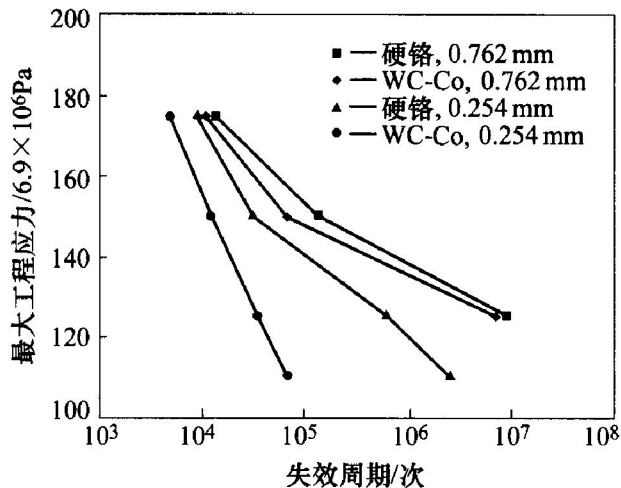


图 14 4340 钢电镀硬铬和喷涂 WC-Co 涂层 (不同涂层厚度) 的疲劳曲线

对于 HVOF 涂层替代电镀硬铬镀层的成本分析, 已经有一些研究<sup>[7, 19]</sup>。图 15 所示是喷涂  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  的成本与电镀硬铬的比较, 由图 15 可知在沉积比较厚的涂层方面, 热喷涂技术有优势。对于航空工业来说, 采用 HVOF 涂层替代电镀硬铬镀层后, 减少成本主要来自于不需要用热处理解决氢脆问题, 同时还减少了生产时间以及库存费用。这样对于飞机起落架等大型部件来说节省的成本非常明显<sup>[8]</sup>。如根据美国 Jacksonville 海军航空站所作的研究, 该站每年有大约 20 000 件工件需要电镀硬铬, 其中, 大概 14 000 件可以用 HVOF 涂层来替代, 如果 HVOF 技术完全应用后, 在 15 年内, 每年大约可以节省几百万美元<sup>[7]</sup>。根据 Sulzer Metco 公司所做的用 HVOF 处理波音 737 飞机起落架的劳动时间和工时分析, 通过使用 HVOF 技术, 可以大大缩短生产时间, 这主要得益于涂层沉积时间的缩短和不需要镀铬所需的长时间烘烤工序<sup>[7]</sup>。

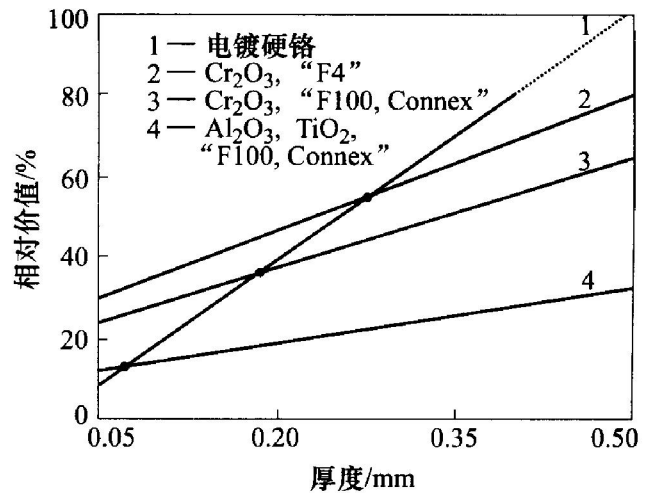


图 15 热喷涂与电镀硬铬成本比较

如果考虑到采用热喷涂技术替代电镀硬铬导致的因部件寿命提高而带来的益处, 那么热喷涂技术的相对成本会更低。

#### 1.4 采用热喷涂代替镀铬的应用情况

已经证明, 热喷涂涂层在以下一些应用领域可以完全替代电镀硬铬镀层。

##### 1.4.1 航空工业: 飞机起落架、主旋翼轴等

由于热喷涂涂层在耐磨性、耐蚀性及对基体疲劳性能的影响等多方面比电镀硬铬有优势, 能够提高部件的使用寿命和安全性, 而航空工业对于航空安全性的要求非常高, 因此在航空领域, 热喷涂技术替代电镀硬铬受到极大的关注。

1) 波音飞机有 100 多个部位已经使用 HVOF 涂层;

2) 波音 767-400 飞机起落架现在使用 HVOF WC-CoCr 涂层替代硬铬涂层;

3) 空中客车 A380 设计使用 HVOF WC-CoCr 涂层;

4) 波音公司现在的维修指南容许用 HVOF WC-Co 涂层和 WC-CoCr 涂层来修复飞机起落架原来镀铬的部件, 厚度可达 0.38 mm;

5) Delta 在自有的飞机维修车间中已经使用 HVOF WC-CoCr 涂层来维修起落架;

6) Messier-Dowty 已经安装了 HVOF 设备用于生产和维修起落架部件;

7) 美国军方的飞机, 包括 F-16、C-5、E-2C、P-3、C-130 飞机以及 F-35 联合战斗机上的起落架和其他一些部件都将考虑使用 HVOF 涂层替代电镀硬铬;

8) 直升机主旋翼轴的耐磨强化: 直升机的旋

翼产生升力使飞机升空并进行飞行，主旋翼轴除了传递扭矩外还需负担整机的质量，是十分关键的部件，该轴表面可以采用 WC-Co 涂层来进行防护和强化。

9) 大于 76.2 mm 的内孔部位，可以用热喷涂技术来替代电镀硬铬，如 CH-53 飞机的叶片调节器，可以等离子喷涂 T400 涂层；Messier-Dowty 用 HVOF 修复 CF-18 起落架的内六角部位；Parker 公司使用热喷涂技术替代镀铬来生产新的驱动器。

图 16 所示是采用 HVOF 技术喷涂飞机起落架部件的情形<sup>[4]</sup>。

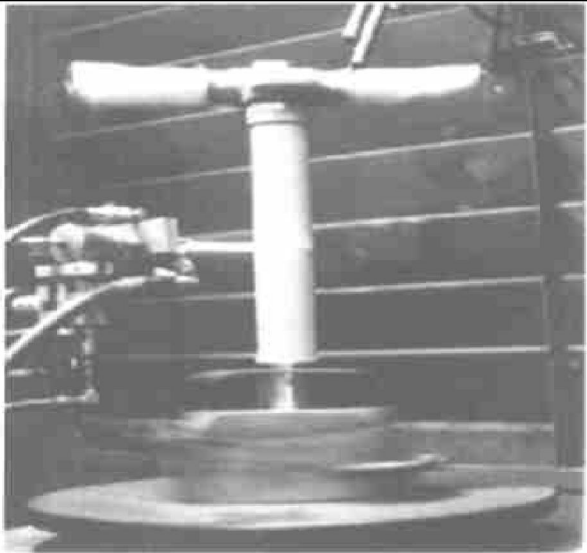


图 16 用 HVOF 技术喷涂波音 737 飞机起落架部件

### 1.4.2 钢铁工业: 磨辊和其他连续工作辊, 如连铸辊, 连铸机的结晶器等

#### 1) 连铸结晶器

目前钢铁工业的技术发展已经走向连铸连轧的方向，因为这种工艺生产效率高、质量好、生产成本低，所以已占世界钢生产能力的 75% 以上，其中日本达 100%，我国 2002 年也达到 94%。而这种工艺中的一个关键部件就是结晶器，现在大部分的结晶器材料使用磷铜、银铜和铬锆铜，这些材料在高温下受到钢液的侵蚀及凝固钢坯的摩擦，使得结晶器很容易损坏，为此，现在的结晶器电镀铬、镍铁或镍钴等合金涂层，性能有所改善。但镀层在高温下硬度仍会下降较多，寿命仍不够理想，过钢量达 8 000 t；日本现采用热喷涂复合涂层的结晶器过钢量提高到 18 500 t，提高了一倍多。广州有色金属研究院和钢铁研究总院去年也承接了有关的“八六三”课题，开展了我国的热喷涂复合涂层结晶器的研究。

钢铁工业连铸机的结晶器如图 17 所示，其表

面原采用电镀铬，但是镀铬层在高温下硬度下降很快，因而由于高温及磨损导致寿命很短，影响到连铸机的生产效率和铸坯质量。日、美等国研究采用热喷涂涂层代替镀铬层，并取得了十分明显的效果，用自熔合金涂层并辅以增强涂层与基体结合的技术措施(如镀镍、喷涂粘结底层等)后，涂层连铸模的耐用性为镀铬层的 2 倍以上。日本的三岛光产已喷涂了上万块的结晶器铜板用于工业生产。

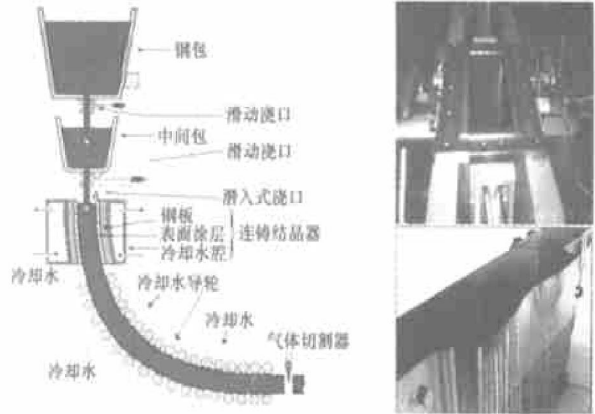


图 17 连铸结晶器

#### 2) 支承辊、导辊、夹紧辊

连续铸造生产线中的支承辊、导辊、夹紧辊等部件常因各种应力及冷热疲劳等因素的影响，在辊面圆周方向上产生大的裂纹而导致辊破坏失效。采用自熔合金强化辊面后，涂层在使用过程中在其晶粒边界上产生裂纹传播速度非常小的微细裂纹，大大延长了连铸辊的寿命，也防止了铸材表面缺陷的发生，提高了铸材的质量。

#### 3) 加工辊

冷轧生产线中的加工辊(如张紧辊、导辊和矫直辊等)要求其表面耐磨，在使用过程中表面粗糙度的变化要小，具有恒定的夹持力。该辊一般采用表面镀铬，但其耐磨性不够，影响其使用寿命。而在其表面热喷涂 WC-Co 涂层，再经过特殊处理后，其表面粗糙度的变化十分缓慢，表面夹持力不易下降。实验表明，经这种特殊处理的涂层辊的耐用性为镀铬辊的 5~ 10 倍。

### 1.4.3 造纸、包装和印刷工业: 柔板印刷用网纹辊、造纸机械用辊等

#### 1) 网纹辊

柔板印刷是一种先进的印刷工艺，在欧美发达国家柔板印刷已占 50% 以上，近年来柔板印刷在我国也得到了飞速发展。网纹辊是柔版印刷机的关键部件。传统的网纹辊采用表面镀铬工艺，辊的耐磨

性能不好,而且只能刻蚀 100~200 线/英寸的低线数网纹,因而其印刷质量不好。先进的柔印机网纹辊采用等离子喷涂的高密度(孔隙度小于 1%)、高硬度( $HV_{0.3} 1\ 200\sim 1\ 300$ )氧化铬陶瓷涂层进行强化,抛光后涂层的粗糙度可以达到  $R_a=0.1\ \mu\text{m}$ ;随后用激光器在陶瓷涂层上进行雕刻,刻的网线线数可以达到 1 600 线/英寸的高数值,而且网孔形状和容积更均匀、更精确,传墨量可以提高 15%,大大提高了印刷质量<sup>[21]</sup>。同时,由于氧化铬涂层的耐磨性能十分优异,其寿命比镀铬层提高 20 倍以上。图 18 和 19 所示分别为陶瓷网纹辊激光雕刻设备和雕刻完成的陶瓷网纹辊。广州有色金属研究院已经建立了一套这样的生产线,年生产能力达 400  $\text{m}^2$ 。



图 18 陶瓷网纹辊激光雕刻设备

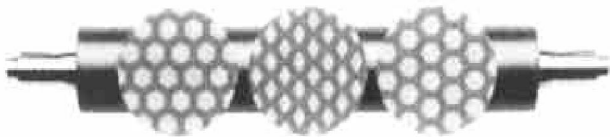


图 19 激光雕刻陶瓷网纹辊

## 2) 瓦楞辊

随着我国国民经济的高速发展,工业产品的包装用纸需求大幅上升。目前国内用于生产包装纸箱用瓦楞纸的瓦楞辊一年就需要约 8 000 对,价值达 6 亿人民币。生产包装纸箱用瓦楞纸的瓦楞辊辊面齿部,由于在运行过程中受到纸板及外来硬粒子的磨擦和磨损,要求具有较高的硬度和较好的耐磨性能。瓦楞辊一般由碳钢或合金钢等材料制成,通过采用低温碳化或氮化和激光或高频表面淬火处理,使其表面形成一层硬化层;此外,一般还在硬化层上镀上一层硬铬来进一步提高瓦楞辊表面的耐磨性。瓦楞辊虽经上述处理,但仍不能满足生产上不断提高的性能要求。近年来,美国、日本、德国等工业发达国家开展了热喷涂涂层在瓦楞辊上的应用研究,并已有多项专利技术问世。这些技术采用 HVOF 方法在瓦楞辊表面制备一层碳化物金属陶

瓷涂层,如 WC-Co、WC-NiCr 等,碳化物金属陶瓷硬度高( $HV\ 1\ 000\sim 1\ 250$ ),具有优良的耐磨性。磨损实验结果表明,HVOF WC-Co 涂层的磨耗率仅为镀铬层的 1/3,氮化处理的 1/5。因此,HVOF WC-Co 涂层在瓦楞辊上的应用可获得十分显著的效果。据有关资料报导,国外采用热喷涂涂层强化的瓦楞辊,其工作寿命最高已达到制造瓦楞纸上亿米的程度。同时,由于碳化物涂层硬度高,不易磨损,瓦楞辊齿型的齿顶和齿底的半径可以设计得更小,这样可以提高纸板的坚固度,并且节省了芯纸,降低了成本(如图 20 和 21 所示)。

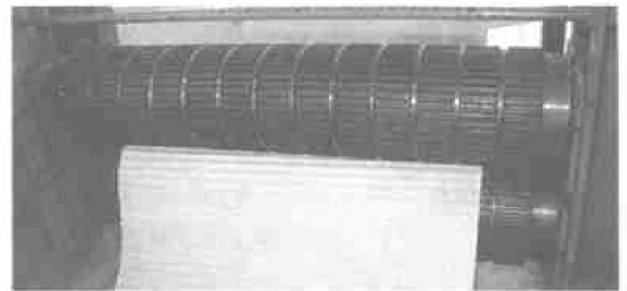


图 20 瓦楞辊

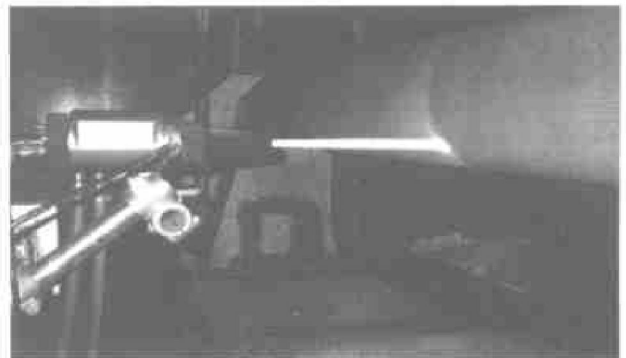


图 21 瓦楞辊喷涂 WC 涂层

## 3) 光泽压光辊

用于化妆品和药品等的高级纸容器白板纸,其重要性能是白纸光泽和印刷适应性。为了获得这种性能,要进行高岭土及碳酸钙涂覆的涂工处理,光泽压光辊就是实现这一功能的辊件。压光辊具有代表性的特点是表面的镜面光泽性能,它对纸板的白纸光泽品质的影响极大。由于涂覆带来的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  等微小粒子及刮板对辊面的擦伤,使镜面性降低,必须频繁地对辊面进行净化作业,一般镀铬辊 6~10 个月必须更换新辊,造成维修费用的增加和中断生产的影响。为了提高辊面的镜面维持能力,采用喷涂 WC 金属陶瓷涂层并进行镜面加工( $R_{a,\text{max}}=0.5\sim 0.2\ \mu\text{m}$ )来替代过去一直采用的电镀硬铬层。应用的结果是,在可以定期使用刮板并取消辊面净化操作的同时,可长期维持表面镜面状

态。此外,近年来为改善压光辊的所谓“熨斗”效果,其操作温度有从150~160℃提高到300℃左右的倾向,在该温度下硬质镀铬层已不能维持其原有硬度,而WC金属陶瓷的硬度不会降低,可继续发挥优良的耐磨性。压光辊现场连续运行时间为2~3年以上,表面光泽能维持为白纸光泽度约70点。

## 2 热喷涂涂层替代电镀硬铬的前景展望

随着人们对生活环境的要求越来越高,对工业环保的要求也会越来越严格。目前电镀硬铬所产生的 $\text{Cr}^{6+}$ 离子及其废水、废气的排放一定会受到越来越严格的控制,这将在很大程度上制约传统电镀硬铬工艺的发展和运用。目前,热喷涂技术已经在航空、冶金、包装印刷和造纸等工业领域部分替代了电镀硬铬工艺,而且在其他工业领域的应用进展也很快。从目前的情况看,采用先进热喷涂技术制备的涂层替代电镀硬铬对于一些大工件、厚涂层而言,无论在性能上,还是在经济上都有一定的优势。当然,对于一些小型、形状复杂的大批量工件,电镀仍然有它的优势,热喷涂技术暂时无法替代它,这可能需要考虑采用其他的工艺方法,如物理气相沉积等。要实现热喷涂技术代替电镀硬铬工艺还有很多工作要做,除了要解决相关的技术问题外,还需要相关工业、企业的密切配合。因此,如果能够得到政府部门的指导和经济上的支持,再加上相关工业、企业的协助,那么实现热喷涂技术替代电镀硬铬的进程将会大大加快。

### 参考文献

- [1] Bodger B E, Emery W A, Sommerville D A. An example of the decision making process for the evaluation of tungsten carbide thermal spray process as replacements for electrodeposited chrome plating [A]. Proceedings of the American Electroplaters and Surface Finishers Society (AESF) 33rd Aerospace/Airline Plating and Metal Finishing Forum [C]. Burlingame CA: The American Electroplaters and Surface Finishers Society, 1997.
- [2] Sartwell B D, Natishan P M, Singer I L, et al. Replacement of chromium electroplating using HVOF thermal spray coatings [A]. Proceedings of AESF Aerospace/Airline Plating & Metal Finishing Forum '98 [C]. USA: The American Electroplaters and Surface Finishers Society, 1998.
- [3] Irons G, Kratochvil W. Thermal spray alternatives for electroplated chrome [J]. Journal of Thermal Spray, 1996, 5(1): 41-44.
- [4] Sartwell S, Bretz P E. HVOF thermal spray coatings replace hard chrome [J]. Advanced Materials Processes, 1999(8): 25.
- [5] Legg K O. Overview of Chromium and Cadmium Alternative Technologies. Surface Modification Technologies XV [M]. UK: ASM International, 2002.
- [6] Dorfman M R, Nestler M, Nicoll A. Hard chromium coatings outdated [J]. Sulzer Technical Review, 1997(1): 20-23.
- [7] Legg K, Sartwell B. Hard chrome alternatives team update—improving performance while reducing cost [A]. AESF/EPA 2000 Conference for Environmental Excellence [C]. USA: The American Electroplaters and Surface Finishers Society, 2000.
- [8] Sartwell B D, Legg K, Bretz P E. Status of HCAT/JG-PP on replacement of hard chrome plating with HVOF thermal spray coatings on landing gear [A]. Proceedings of AESF Aerospace Plating and Metal Finishing Forum '2000 [C]. USA: The American Electroplaters and Surface Finishers Society, 2000.
- [9] Sartwell B D. Thermal spray coatings as alternative to hard chrome plating [J]. Welding, 2000(7): 39.
- [10] Bodger B E, Somerville D A, Emery W A, et al. The evaluation of tungsten carbide thermal spray coatings as replacements for electrodeposited chrome plating on aircraft landing gear [J]. Plating and Surface Finishing, 1997, 84(9): 25.
- [11] Reignier C, Sturgeon A, Lee D, et al. HVOF sprayed WC-Co-Cr as a generic coating type for replacement of hard chrome plating [A]. Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002 [C]. Essen, Germany: ASM International, 2002.
- [12] Savarimuthu A C, Megat I, Taber H F, et al. Sliding wear behavior as a criterion for replacement of chromium electroplate by tungsten carbide thermal spray coatings in aircraft applications [A]. Proceedings of the First International Thermal Spray Conference 2000 [C]. Montreal, Canada: ASM International, 2000.
- [13] Wasserman Ch, Roland B, Gustafsson S. Replacement of hard chrome plating in printing machinery [A]. Thermal Spray 2001: New Surfaces for a New Millennium. Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2001 [C]. Ohio, USA: ASM International, 2001.
- [14] Erning U, Nestler D C, Tauchert G. HVOF coatings

- for hard chrome replacement-properties and applications [A]. Proceedings of the United Thermal Spray Conference '99[C]. Dusseldorf: ASM International, 1999.
- [15] Parker D S. Case study: application of HVOF sprayed coatings for replacement of chrome plating on navy P-3 aircraft hydraulic components and landing gear [A]. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference [C]. Nice, France: ASM International, 1998.
- [16] Nestler M C, Prenzel G, Seitz T. HVOF spraying vs hard chrome plating-coating characteristics and aircraft applications [A]. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference [C]. Nice, France: ASM International, 1998.
- [17] Randolph J. HVOF facility qualification at an airline importance and benefits for landing gear applications [A]. International Thermal Spray Conference 2002 [C]. Essen, Germany: ASM Thermal Spray Society, 2002.
- [18] McGrann R T R, Shadley J R, Rybicki E F, et al. Evaluation of residual stresses and fatigue life of tungsten carbide thermal spray coated aircraft landing gear materials [A]. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference [C]. Nice, France: ASM International, 1998.
- [19] Duhamel J P, Chen Y M, Reby J, et al. APS and HVOF coatings alternative to hard chromium, a tribological approach [A]. Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference [C]. Nice, France: ASM International, 1998.
- [20] Schroeder M, Unger R. Thermal spray coatings replace hard chrome [J]. Advanced Materials Processes, 1997 (8): 19.
- [21] Pawlowski L. Technology of thermally sprayed anilox rolls, state of the art, problems and perspectives [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1999, 5(3): 317.
- [22] Streeter J, Sampson E R. Hard chrome replacement and other thermal spray applications in the Chilean navy [A]. Proceedings of the First International Thermal Spray Conference 2000 [C]. Montreal, Canada: ASM International, 2000.
- [23] McGrann R T R, Rybicki E F, Shadley J R, et al. Evaluation of residual stresses and fatigue life of tungsten carbide thermal spray coated aircraft landing gear materials [A]. Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century. International Thermal Spray Conference [C]. Nice, France: ASM International, 1998.
- [24] Dudzinski D, Au P, Legoux J G, et al. Salt fog corrosion resistance of HVOF WC-10Co-4Cr coated and electrolytic hard chrome plated aerMet 100 and 300M steel alloys [A]. International Thermal Spray Conference 2002 [C]. Essen, Germany: ASM Thermal Spray Society, 2002.

(编辑 杨 兵)