

文章编号:1673-9981(2018)03-0200-05

# WC-10Co-4Cr 对等离子喷涂 Mo 涂层性能的影响

朱霞高,康忠明,戴红亮,朱晖朝,张忠诚

广东省新材料研究所,现代材料表面工程技术国家工程实验室,广东省现代表面工程技术重点实验室,广东 广州 510650

**摘要:**为进一步提高 Mo 涂层耐磨性能,采用等离子喷涂方法在 A3 钢基体上成功制备了 WC-10Co-4Cr 增强的 Mo 基复合涂层,并对涂层的微观组织、物相组成、氧含量、表面硬度、涂层结合强度以及浸油摩擦性能进行了研究.结果表明:涂层致密、孔隙率低,WC-10Co-4Cr 呈条状形态均匀分布在 Mo 涂层中;由于受到 WC-10Co-4Cr 粒子的“夯实”作用,涂层结合强度提高,但浸油摩擦系数略有增大.

**关键词:**等离子喷涂;Mo 基涂层;WC-10Co-4Cr;结合强度

**中图分类号:** TB333

**文献标识码:** A

等离子喷涂具有焰流温度高(高达 15000~33000 °C)、稳定性和可控性好、喷射粒子的速度快,喷涂过程可实现自动控制等特点<sup>[1]</sup>.钼是一种良好的减摩材料,服役过程中能够有效地降低摩擦系数.从二十世纪七十年代开始,国外便开始系统研究等离子喷涂 Mo 涂层,并成功应用于航空、汽车零件等领域中<sup>[2]</sup>.

随着工业的发展,纯 Mo 涂层难以满足不断提高性能的要求.通过在 Mo 粉中加入 WC-10Co-4Cr,以期进一步提高 Mo 涂层减摩抗磨性能.同时,研究了不同添加量的 WC-10Co-4Cr 粉末对涂层的结合

强度、浸油摩擦系数的影响,从而使 Mo 基涂层能够应用于重载、大扭矩工作环境中.

## 1 实验部分

### 1.1 涂层制备

等离子喷涂基体材料为 80 mm×20 mm×4 mm 的 A3 钢板.喷涂前对样品板进行除油和喷砂处理,喷砂压力为 0.35~0.45 MPa.等离子喷涂选用 GTVMF-P-1500 型高能等离子喷涂设备,等离子喷涂工艺参数列于表 1.

表 1 喷涂工艺参数  
Table 1 Spray parameters

编号	电流/A	氩气用量 (L·min <sup>-1</sup> )	氢气用量 (L·min <sup>-1</sup> )	喷涂距离/mm	氧气用量 (L·min <sup>-1</sup> )	w(WC-10Co-4Cr)/%
1#	620	40	9	115	11	10
2#	620	40	9	115	11	20
3#	620	40	9	115	11	30

喷涂粉末为粒度 25~45 μm 的纯 Mo 粉末,图 1 为喷涂用粉显微形貌.从图 1 可见,喷涂粉末细小

均匀(图 1(a)),添加粉末为 WC-10Co-4Cr,其粒度为 5~30 μm(图 1(b)).

收稿日期:2018-05-28

作者简介:朱霞高(1974-),女,山东日照人,硕士,高工.

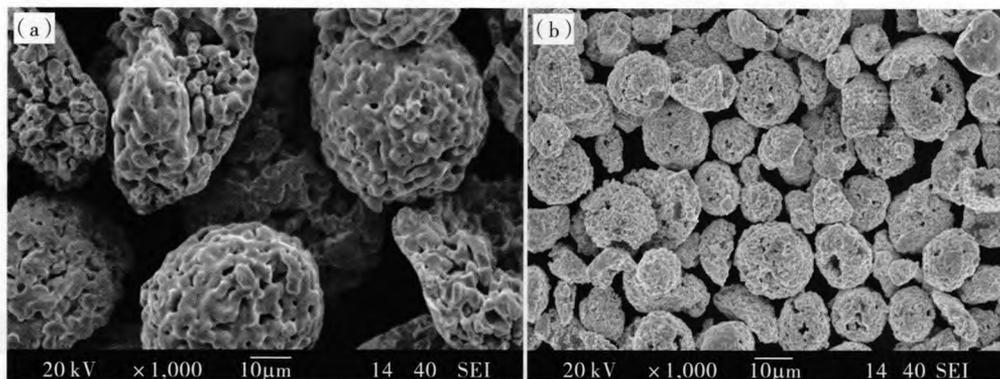


图 1 喷涂用粉显微形貌

(a)Mo 粉末;(b)WC-10Co-4Cr 粉末

Fig. 1 Morphology of Mo and WC-10Co-4Cr powders

(a)Mo powders;(b)WC-10Co-4Cr powders

## 1.2 方法

结合强度测试用 GP-TS2000M 万能试验机测定,试样尺寸为直径 25.4 mm×38 mm. 首先喷涂 0.25 mm 厚的涂层,用 E7 胶和对偶件粘结在一起,在 100 °C 的保温箱内保温 3 h,然后以 1 mm/min 的速度进行结合强度的检测。

浸油摩擦磨损试验用美国 CETR UMT-3 摩擦磨损试验机,摩擦磨损样品为直径 25 mm×6 mm 的圆片,Mo 基涂层厚度为 0.35 mm,在润滑油中浸泡 3 h,取出后擦干表面残余润滑油,然后放入摩擦磨损试验机中进行对磨试验. 摩擦磨损实验的对磨销材料为淬火态 GCr15,磨损直径为 16 mm,转速 100 r/min,载荷压力 8 kg,摩擦磨损时间 30 min.

用 JSM5910 SEM 扫描电子显微镜观察涂层组织结构,用 D/MAX-RC 型 X 射线衍射仪器分析涂层的物相组成,通过氧氮测定仪测试 Mo 基涂层中氧含量,用 HSRD-45 型电动表面洛氏硬度计测量涂层硬度 HR15N,主试验力 15 kg·f,金刚石压头,总试验力保载时间 2~6 s.

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 涂层的组织结构

图 2 为添加了三种不同含量 WC-10Co-4Cr 的 Mo 基复合涂层的显微形貌. 从图 2 可以看到:三种涂层与基体结合界面平整、无明显缺陷,表现出较好的结合状态;涂层均由近表面的疏松结构区和内部

致密区构成,疏松结构区内粒子结合相对较差,但存在裂纹较少,致密区扁平粒子之间结合良好,并伴随有白色条带均匀分布其中;随着 WC-10Co-4Cr 添加量的增加,白色条带量也随之增多,此白色带状物质为熔化后铺展开来的 WC-10Co-4Cr 粒子,其较大的宽厚比说明喷涂过程中粒子熔化充分,这有利于形成高质量的涂层。

涂层孔隙率检测结果显示,三种涂层的孔隙率均为 3.6%,处于较低水平,表明涂层有较高的力学性能。

对涂层做 XRD 分析(图 3),发现涂层内部除 Mo 外,还有 MoO<sub>2</sub> 及 WC 相. XRD 图谱中的 MoO<sub>2</sub> 即是 Mo 在等离子喷涂过程中氧化的产物<sup>[3-4]</sup>. 实际上 MoO<sub>2</sub> 有着较高的硬度,涂层中存在适量的 MoO<sub>2</sub> 相有利于提高涂层的抗磨性能. 由 WC-10Co-4Cr 提供的 WC 一方面在喷涂过程中对已沉积涂层起到了夯实作用,使涂层致密、结合良好;另一方面,WC 还与 MoO<sub>2</sub> 共同起到增强作用,弥补了单一 Mo 涂层在服役过程中减摩效果好但是抗磨性能不足的缺点。

### 2.2 涂层的性能

对不同 WC-10Co-4Cr 添加量的 Mo 基涂层进行氧含量、硬度、结合强度、浸油摩擦系数分析,结果列于表 2. 由表 2 可知,1# 试样表面硬度最低,3# 试样硬度最高. 随着 WC-10Co-4Cr 添加量的增加,涂层的硬度逐渐增高. 这是由于 WC-10Co-4Cr 颗粒随着 Mo 粉同时送入等离子射流之中,在飞行的过程中持续受热,WC-10Co-4Cr 颗粒中的 Co 和 Cr 变

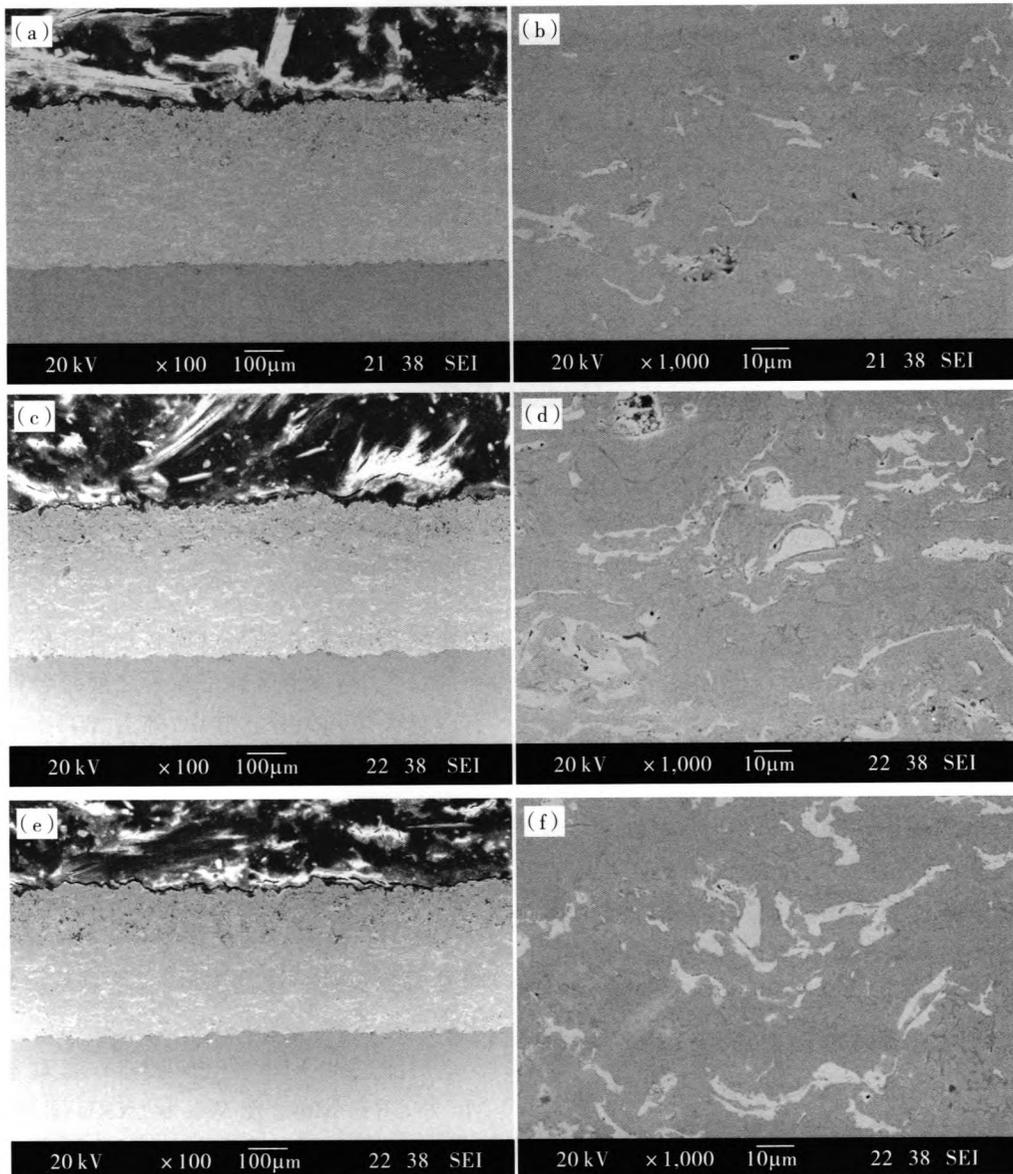


图2 添加不同量 WC-10Co-4Cr 的 Mo 基涂层的显微形貌

(a),(b)1# 样品涂层的低倍和高倍 SEM 图像;(c),(d)2# 样品涂层的低倍和高倍 SEM 图像;  
(e),(f)3# 样品涂层的低倍和高倍 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of Mo based coatings with different WC-10Co-4Cr additive amount

(a),(b)low and high times SEM images of 1# sample;(c),(d)low and high times SEM images of 2# sample;  
(e),(f)low and high times SEM images of of 3# sample

成液态,WC 细小的颗粒包裹在小液滴之中,撞击到基体表面瞬间扁平后凝固,因此 WC 细小的颗粒以片状一层一层弥散分布在涂层之中,提高了涂层的硬度.另外,WC-10Co-4Cr 颗粒借助等离子射流喷出时获得一定的速度,撞击在已沉积涂层上,撞击过程中粒子的动能转变为沉积粒子的形变能和内能,随着 WC-10Co-4Cr 颗粒冲击次数的增多,沉积涂层形变程度增大,涂层粒子之间的间隙被挤压缩小甚

至闭合的几率越大,从而达到缩孔和止裂的效果,增强了涂层与基体的机械咬合,增加了涂层内部层与层之间的内聚力,使涂层的硬度以及结合强度均逐渐提高.涂层中含氧量的逐渐减少,则是由于随着 WC-10Co-4Cr 含量的逐渐增加,相应 Mo 含量逐渐减少,涂层中生成的  $\text{MoO}_2$  含量也逐渐减少,而由 XRD 结果可知涂层中只有  $\text{MoO}_2$  相含氧,因此涂层中总的含氧量也逐渐降低.

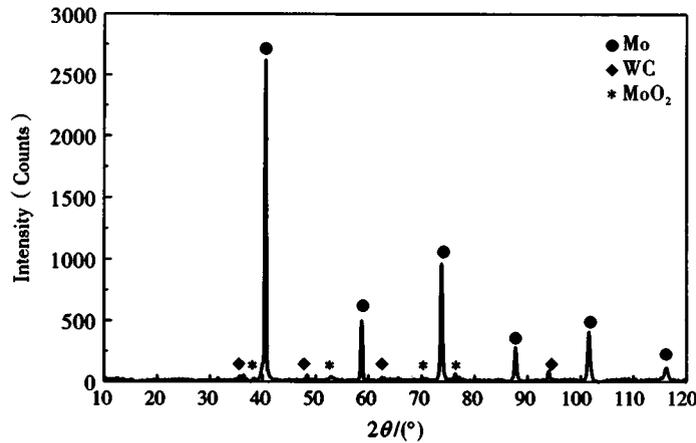


图 3 Mo 基复合涂层 XRD 图谱  
Fig. 3 XRD analysis of Mo based coating

表 2 Mo 基复合涂层的性能  
Table 2 Properties of Mo-base coatings

编号	涂层含氧量 w/%	硬度值	结合强度/MPa	平均浸油摩擦系数
1 #	1.93	81	36	0.1126
2 #	1.81	82	42	0.1137
3 #	1.67	85	58	0.1194

图 4 为 Mo 基复合涂层浸油摩擦系数曲线图。由表 3 可知,1 # 试样的平均摩擦系数为 0.1126, 2 # 试样的平均摩擦系数为 0.1137, 3 # 试样的平均摩擦系数为 0.1194。从图 4 可见,在整个摩擦磨损过程中摩擦系数逐渐增加,但增加幅度很小。这是因

为涂层的孔隙率相差不大,浸油之后涂层孔隙存储的油量相差不大,在对磨销往复运动的压力下,孔隙内油溢出到磨损表面会形成一层油膜,因此摩擦系数数值相差不大。

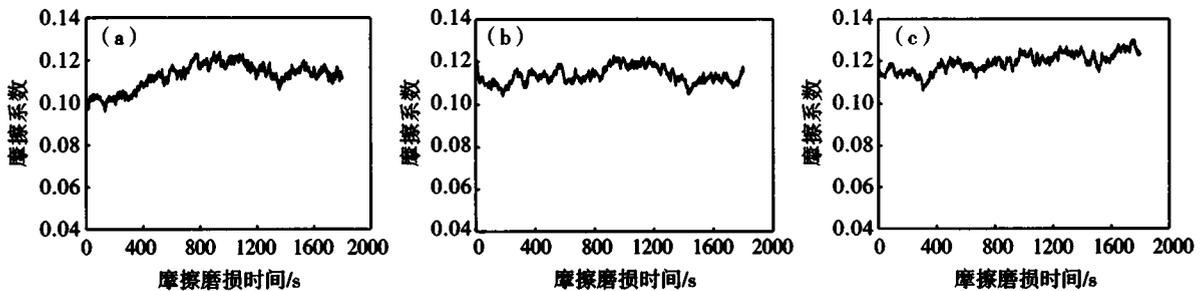


图 4 不同 WC-10Co-4Cr 添加量 Mo 基涂层的浸油摩擦系数  
(a)1 # 样品;(b)2 # 样品;(c)3 # 样品

Fig. 4 Friction coefficient after oil immersion of Mo-base coatings with different WC-10Co-4Cr additive amount  
(a)1 # sample;(b)2 # sample;(c)3 # sample

### 3 结 论

采用等离子喷涂方法,添加 WC-10Co-4Cr 颗粒

制备 Mo 基复合涂层。随着 WC-10Co-4Cr 粉末添加量的增加,涂层孔隙率变化不大、氧含量逐渐降低;表面硬度及浸油摩擦系数逐渐增加,但增加幅度很小;结合强度大大提高,使 Mo 基涂层能够应用于重

载、大扭矩工作环境中。

**参考文献:**

- [1] 戴达煌,刘敏,余志明,等. 薄膜与涂层现代表面技术 [M]. 长沙:中南大学出版社,2007:63.  
[2] 姜超平. 钼系等离子涂层在工程机械中的应用[J]. 养护

机械与施工技术,2005,22(5):45-46.

- [3] 姜超平,陈宏,郝建民. 等离子喷涂钼的氧化行为与性能分析[J]. 铸造技术,2009,30(7):915-917.  
[4] 陈志坤,张忠诚,朱晖朝,等. 过程氧化对等离子喷涂 Mo 涂层耐磨性能的影响[J]. 材料导报,2013,27(12): 95-97.

## **Influence of WC-10Co-4Cr addition on properties of plasma sprayed Mo coatings**

ZHU Xiagao, KANG Zhongming, DAI Hongliang, ZHU Huichao, ZHANG Zhongcheng

*Guangdong Institute of New Materials, National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, The Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China*

**Abstract:** WC-10Co-4Cr reinforced Mo based coatings have been successfully deposited on A3 steel via plasma spraying technique for further improvement of the coatings' wear resistance. The composite coatings' microstructure, phase composition, oxygen content, hardness, bonding strength and the oil immersion friction behaviors have been studied. Results showed that this kind of Mo based coatings exhibited a low porosity with lamella shaped WC-10Co-4Cr uniformly distributed in the coatings. Due to the compaction effect of the WC-10Co-4Cr particles, the high bonding strength has been increased but the friction coefficient of the coatings after oil immersion increased reversely.

**Key words:** plasma spray; Mo based coatings; WC-10Co-4Cr; bonding strength