

文章编号:1673-9981(2019)03-0211-05

# HVAF 和 HVOF 制备的 WC-10Co-4Cr 涂层性能研究

陈焕涛, 谭 僖, 朱晖朝, 张忠诚, 黄 健, 张小锋

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:**为了提高新一代锂电池辊轧的轧制力,选取适合的 WC-10Co-4Cr 涂层制备工艺.采用 HVOF 和 HVAF 两种方法制备 WC-10Co-4Cr 涂层,并对涂层的微观组织、杯突性能、弯曲性能、结合强度、显微硬度等性能进行了研究,同时分析了影响涂层耐磨性的主要原因.实验结果得出:HVAF 喷涂的 WC-10Co-4Cr 涂层杯突随基本变形能力比 HVOF 强;HVOF 和 HVAF 喷涂的 WC-10Co-4Cr 涂层弯曲折弯韧性好,均无涂层剥落;HVAF 制备的 WC-10Co-4Cr 涂层孔隙率小于 HVOF 制备的,且在显微硬度  $H_v$ 、结合强度、耐磨性的性能方面优于 HVOF.因此,采用 HVAF 的工艺制备 WC-10Co-4Cr 涂层更有利于提高新一代锂电池辊轧的轧制力.

**关键词:** WC-10Co-4Cr 涂层; HVAF; HVOF

**中图分类号:** TG174.444

**文献标识码:** A

随着新能源技术的推广应用,锂离子动力电池产业发展迅速.新一代锂电池生产装备主要通过提高轧辊轧制力来增加极片压实密度,从而达到增加电池极片单位储电量的目的.然而,轧制力的提高使得轧辊表面磨损加剧,过度的磨损将使得生产的极片出现厚度不均匀、压实不均匀,从而影响电池的一致性,所以电极轧辊的耐磨性是影响锂离子电池质量的一个关键因素.

WC-10Co-4Cr 涂层具有高硬度、高结合强度、低孔隙率、优异的耐磨损性能等特点,被广泛应用于航空航天、农业机械、电力等领域的大型装备的关键部件,作为耐磨涂层使用<sup>[1]</sup>.通过对比 High velocity air fuel (HVAF)和 High velocity oxyfuel spraying (HVOF)喷涂工艺,研究了不同工艺对 WC-10Co-4Cr 涂层性能及组织的影响,同时探索了影响 WC-10Co-4Cr 涂层耐磨性的关键因素,以确立合适的喷涂工艺.

## 1 试验部分

### 1.1 试样

实验选用的粉末为 WC-10Co-4Cr 粉末,基体为 45 号钢. WC-10Co-4Cr 粉末的化学成分及粒径分布分别列于表 1 和表 2.

表 1 WC-10Co-4Cr 粉末的化学成分  
Table 1 Chemical composition of WC-10Co-4Cr powder

成分	含量 $w/\%$
C	6
Co	10
Cr	4
Fe	0.3
O	0.2
W	余量

收稿日期:2019-06-21

作者简介:陈焕涛(1989-),男,海南屯昌人,本科,工程师,主要从事材料表面技术研究.

表2 WC-10Co-4Cr 粒径分布

Table 2 Particle size distribution of WC-10Co-4Cr powder

体积含量/%	粒径/ $\mu\text{m}$
Dv(90)	35.0
Dv(50)	16.9
Dv(10)	8.81

## 1.2 试验方法

采用 HVAF 及 HVOF 喷涂工艺,分别进行杯突试验、弯曲试验、涂层结合强度试验、涂层显微硬度试验及涂层的耐磨性的试验. HVAF 及 HVOF 喷涂工艺参数分别列于表 3 和表 4.

表3 HVOF 喷涂的工艺参数

Table 3 Process parameters of supersonic flame spraying (HVOF)

煤油/( $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ )	氧气/( $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ )	燃烧室压/MPa	喷距/mm	送粉量/( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ )
4	910	0	250	110

表4 HVAF 喷涂的工艺参数

Table 4 Process parameters of HVAF spraying

氢气/( $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ )	氮气/( $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ )	空气/( $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ )	喷距/mm	送粉量/( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ )
10	20	70	220	50

杯突试验:采用杯突试验的方法,评判涂层随基体的变形能力.杯突试样的规格为  $76 \text{ mm} \times 44 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$ ,在 GP-TS2000M 万能试验机上用直径 20 钢球从涂层背面杯罩的中心压入杯高 10 mm,压杯速度为 10 mm/min.

涂层的微观组织形貌及显微硬度:试样规格为  $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 3.65 \text{ mm}$ ,用 DMIRM 徕卡显微镜分析涂层界面结合、孔隙率、涂层分布等微观组织结构,用 MH-5D 显微硬度计测量涂层维氏显微硬度,载荷 300 g、加载时间 15 s.

涂层结合强度试验:试样规格为直径  $25.4 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$ ,喷涂涂层厚度 0.23 mm,用 E-7 高温结构胶把涂层和对偶件粘结起来,并在烘干箱温度  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  固化 3 h,用 GP-TS2000M 万能试验机测试结合强度测试,加载速度为 1 mm/min,分析涂层与基体结合性能.

弯曲试验:弯曲试样规格为  $76 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$ ,在 GP-TS2000M 万能试验机上用直径 12.7 mm 的棒朝涂层反面弯曲  $90^\circ$ ,分析涂层弯曲涂层剥落状态.

涂层的耐磨性的试验:耐磨试样的规格为  $76 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3.65 \text{ mm}$ ,采用 180 号砂纸,在载荷 30 N 下与涂层摩擦磨损,分析涂层质量损失和磨损形貌.

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 微观形貌及结合强度

用 LEICA 5000DMIRM 大型倒置式金相显微镜观察涂层微观形貌,图 1 为 HVOF 和 HVAF 工艺制备的涂层微观形貌.从图 1(e)和(f)可见,HVOF 和 HVAF 两种工艺制备的 WC-10Co-4Cr 涂层分布均匀、没有界面污染、界面结合较好.从图 1(h)和(i)可见:HVOF 工艺喷涂制备的 WC-10Co-4Cr 涂层分布点状细小的微孔,孔隙率在  $0.8\% \sim 0.9\%$ ;而 HVAF 工艺喷涂的 WC-10Co-4Cr 涂层有少量的微孔,孔隙率在  $0.2\% \sim 0.4\%$ .因此,HVAF 工艺喷涂的 WC-10Co-4Cr 涂层比 HVOF 工艺的更加致密.

WC-10Co-4Cr 涂层的结合强度测试结果列于表 5.从表 5 测试结果分析可以得知,HVAF 制备的 WC-10Co-4Cr 涂层结合强度略优于 HVOF 制备的 WC-10Co-4Cr 涂层,且两种工艺的 WC-10Co-4Cr 涂层结合强度均超过 70 MPa.

表5 WC-10Co-4Cr 涂层的结合强度

Table 5 Bonding strength of WC-10Co-4Cr coating

工艺	强度/MPa	平均强度/MPa
HVOF	75,76,78	76.3
HVAF	78,77,80	78.3

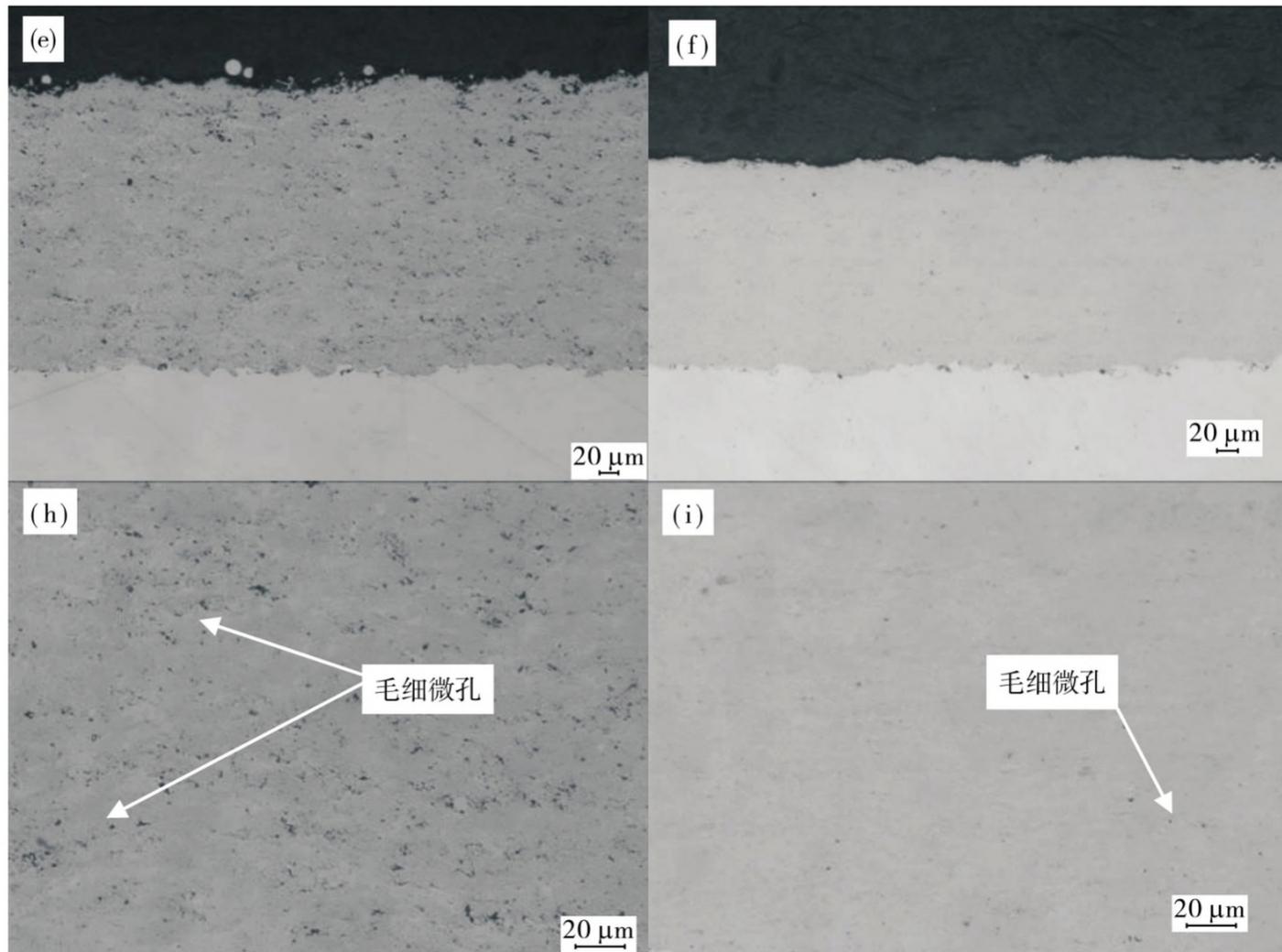


图 1 涂层的微观形貌图

(e) HVOF 制备涂层的截面形貌;(h)HVOF 制备涂层的表面形貌;(f)HVAF 制备涂层的截面形貌;  
(i)HVAF 制备涂层的表面形貌

Fig. 2 Microstructure and morphology of coatings

(e)cross-section morphology of coatings prepared by HOVF;(h)surface morphology of coatings prepared by HVOF;  
(f)cross-section morphology of coatings prepared by HOAF;(i)surface morphology of coatings prepared by HVAF;

## 2.2 杯突试验

图 2 为涂层杯突测试结果.从图 2 可以观察到,经杯突试验后,两种喷涂工艺制备的涂层都形成了毛细裂纹和龟裂纹,涂层没有产生剥落,但是 HVOF 工艺制备的 WC-10Co-4Cr 涂层片状翘起较

多.所以表明,HVAF 工艺所制备的 WC-10Co-4Cr 涂层的杯突性能稍好,发生翘起时 HVOF 工艺制备的涂层会先于 HVAF 工艺的形成剥离态的片状涂层,表明 HVAF 工艺制备的 WC-10Co-4Cr 涂层比 HVOF 工艺的随基体变形能力强<sup>[2]</sup>.

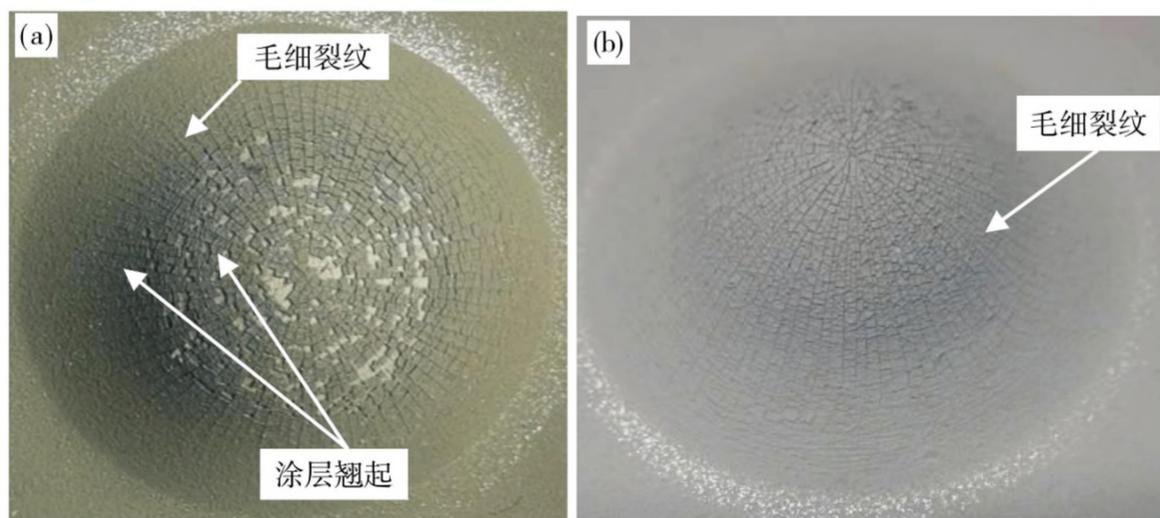


图 2 涂层杯突测试结果

(a)HVAF;(b)HVOF

Fig. 2 Cup test results

### 2.3 弯曲试验

图3为弯曲试验结果.从图3可以发现,二种工艺制备的涂层均有毛细裂纹,但涂层均没有产生剥离.表明,HVOF和HVOF工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层的抗弯曲性能接近,反映出涂层弯折韧性较好.

### 2.4 涂层的显微硬度

对所制备的涂层进行维氏显微硬度测试,其结果列于表6.由表6可知,HVOF工艺比HVOF工艺制备的WC涂层的显微硬度高,两种工艺制备涂层的显微硬度值稳定在1000~1400之间.这主要是涂层微观组织的致密性影响了涂层的显微硬度.

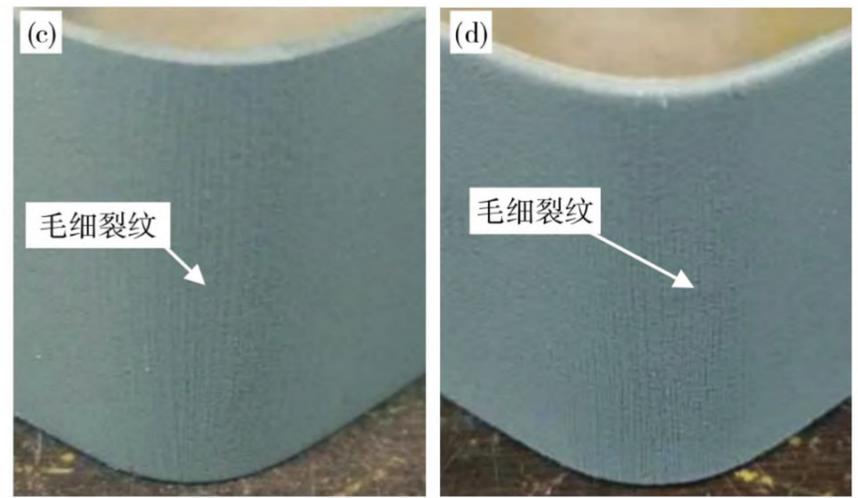


图3 弯曲试验结果  
(c)HVOF;(d)HVOF

Fig.3 Bend Test results

表6 涂层维氏显微硬度值

Table 6 Microhardness of coated Vivtorinox

工艺	硬度值(Hv0.3)	平均值
HVOF	1219,1221,1245,1230,1240,1192,1089,1216,1213,1204	1206.9
HVOF	1301,1368,1326,1249,1300,1287,1225,1202,1340,1382	1298.0

### 2.5 涂层的耐磨性

图4为WC-10Co-4Cr轮式摩擦磨损试验质量损失量图.从图4的涂层质量损失比分析可得知,HVOF工艺的涂层损失量在2~4mg,HVOF工艺的损失量在4~7mg.HVOF工艺喷涂的WC-10Co-4Cr涂层的损失量大于HVOF工艺的,主要是因为HVOF涂层的微观组织更致密些,使得涂层的硬度高并耐磨损.

图5为摩擦磨损试验WC-10Co-4Cr涂层的表面形貌.从图5可以发现,WC-10Co-4Cr涂层表面的磨损磨痕是以犁沟的形式为主.这主要是有颗粒在涂层表面往复运动形成了凹坑,产生磨损粒子,造

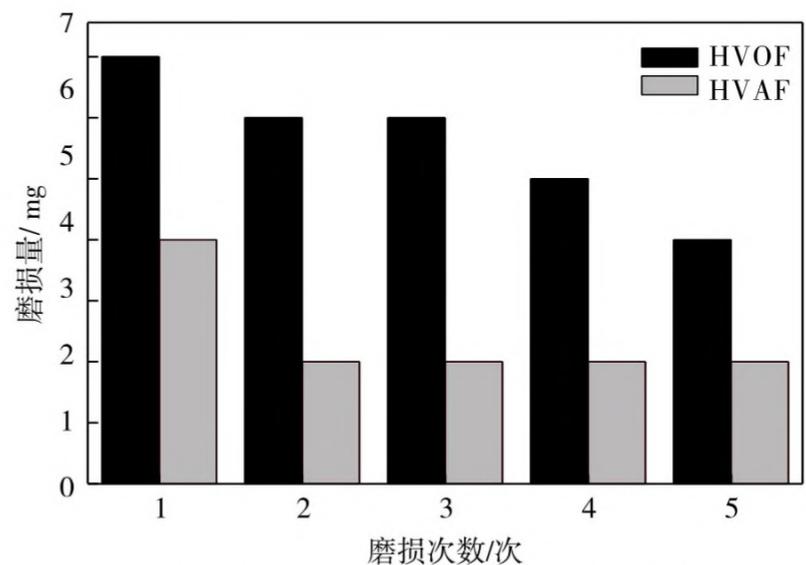


图4 WC-10Co-4Cr轮式摩擦磨损试验质量损失量

Fig.4 Quality loss in WC-10Co-4Cr wheel friction and wear test

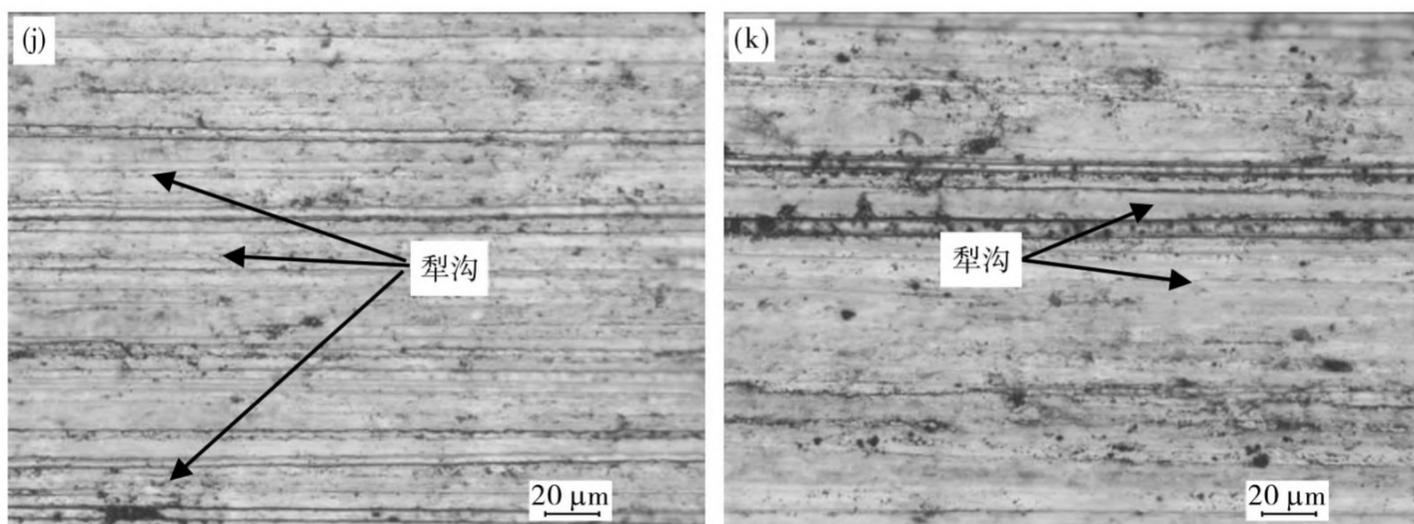


图5 摩擦磨损试验WC-10Co-4Cr涂层的表面形貌

(j)HVOF;(k)HVOF

Fig.5 Surface morphology of WC-10Co-4Cr coating in friction and wear test

成犁沟,所以涂层的磨损模式是磨粒磨损<sup>[3]</sup>.出现颗粒状的粒子主要是粉末喷涂态在撞击基体时,未充分熔融的粒子夹杂在长条状层状组织里面,当发生磨损有外力拉拽涂层中粒子时,就会发生微小粒子剥落.WC-10Co-4Cr涂层的耐磨性主要是粉末本身含有WC硬质相<sup>[4]</sup>,从而得出粉末粒子充分融化铺展是影响涂层耐磨性的主要原因之一.

### 3 结 论

(1)涂层经弯曲试验和杯突试验后,出现细长的毛细裂纹;HVOF喷涂工艺比HVAF喷涂工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层的杯突性能稍差,HVOF喷涂工艺与HVAF喷涂工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层的折弯性能相近.

(2)HVAF工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层的显微硬度高于HVOF工艺的,两种涂层显微硬度HV<sub>0.3</sub>值整体均在1000~1400之间.

(3)HVAF工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层比HVOF工艺得更致密,也是HVAF工艺制备的涂层的显微硬度值比HVOF工艺高的原因之一.

(4)HVAF工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层的结合强度比HVOF工艺的稍高些,两种工艺制备的涂层的结合强度均超过70 MPa.

(5)HVAF工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层耐磨性比HVOF工艺的更好,主要是因为HVAF工艺的熔融的更充分,WC-10Co-4Cr涂层更致密,显微硬度更高.

(6)HVAF工艺及HVOF工艺制备的WC-10Co-4Cr涂层的磨损模式主要是犁沟式的磨粒磨损.

#### 参考文献:

- [1] 程正明,刘敏,邓春明,等. 喷距对低温超音速火焰喷涂钛涂层显微结构与性能的影响[J]. 表面技术,2014,43(2):13-17.
- [2] 王伟. HVAF喷涂粘结层与APS喷涂陶瓷层热障涂层体系热力学性能研究[J]. 东方汽轮机,2018(6): 62-68.
- [3] 孙江勇,曾良. 先进喷涂技术制备316L不锈钢涂层的结构与性能研究[J]. 硬质合金,2018(4):95-100
- [4] 王枫,朱晖朝,陈志坤,邓春明. 采用HVAF与HVOF工艺制备的NiCr-25%Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>涂层的结构和性能表征[J]. 材料研究与应用,2010,4(3):202-206.

## Research on the performance of WC-10Co-4Cr coatings by HVOF and HVAF

CHEN Huantao, TAN Xi, ZHU Huichao, ZHANG Zhongcheng, HUANG Jian, ZHANG Xiaofeng  
National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, The Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510650, China

**Abstract:** In order to improve the rolling force of the new generation lithium battery roll rolling, suitable WC-10Co-4Cr coating preparation process was selected. The WC-10Co-4Cr coating was prepared by high velocity air fuel (HVAF) and high velocity oxyfuel spraying (HVOF) and the microstructure, cupping properties, bending properties, bonding strength, microhardness and other properties of the coating were studied, and the main factors affecting the wear resistance of the coating were analyzed. The experimental results show that the cupping ability of WC-10Co-4Cr coating sprayed by HVAF is stronger than that of HVOF. The bending and bending toughness of WC-10Co-4Cr sprayed by HVOF and HVAF did not peel off. The porosity of WC-10Co-4Cr coating prepared by HVAF is less than that of HVOF, and it is superior to HVOF in microhardness, bonding strength and wear resistance. Therefore, preparation of WC-10Co-4Cr coating by HVAF process is more conducive to improving the rolling force of the new generation lithium battery roll rolling.

**Key words:** WC-10Co-4Cr coating; high velocity oxygen fuel (HVAF); high velocity oxyfuel spraying (HVOF)