

超音速火焰喷涂金属陶瓷复合涂层的耐磨性能研究

周永宽¹, 康嘉杰^{1,3}, 岳文^{1,3}, 付志强^{1,3}, 梁健², 朱丽娜^{1,3}, 王成彪^{3,4}

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.中国地质科学院勘探技术研究所,河北 廊坊 065000;

3.中国地质大学(北京)郑州研究院,河南 郑州 451283;

4.中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所,河南 郑州 450006)

摘要:为改善深部钻具关键易损构件的耐磨性能,采用超音速火焰喷涂(HVOF)技术在 35CrMo 钢基体上制备了 WC-10Co4Cr 涂层,利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线能谱仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)、显微硬度仪、维氏硬度计和摩擦磨损试验机测试分析了涂层的微观结构、力学性能和摩擦磨损行为。结果表明:利用 HVOF 技术制备的 WC-10Co4Cr 涂层具有致密的微观结构和优异的力学性能,其孔隙率为 $1.3 \pm 0.1\%$,显微硬度为 $1392 \pm 45 \text{HV}_{0.3}$,断裂韧性为 $7.11 \pm 0.10 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;与 35CrMo 钢基体相比,涂层具有更加优异的耐磨性能,并且随着滑动速度的增加,WC-10Co4Cr 涂层的摩擦系数下降、磨损率增大;WC-10Co4Cr 涂层的磨损失效机制主要包括磨粒磨损、粘着磨损和疲劳磨损。

关键词:深部钻探;超音速火焰喷涂;WC-10Co4Cr 涂层;摩擦学性能;磨损机制

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0072-08

Study on wear resistance of HVOF metal ceramic composite coating

ZHOU Yongkuan¹, KANG Jiajie^{1,3}, YUE Wen^{1,3}, FU Zhiqiang^{1,3},

LIANG Jian², ZHU Lina^{1,3}, WANG Chengbiao^{3,4}

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

3.Zhengzhou Institute, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou Henan 451283, China;

4.Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: In order to improve wear resistance of the key wearable parts of deep drilling tools, high velocity oxygen fuel spray (HVOF) technology was used to prepare WC-10Co4Cr coating on 35CrMo steel substrate. The scanning electron microscope (SEM), X-ray energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffractometer (XRD), micro-hardness tester, Vickers hardness tester and friction and wear tester were used to analyze the microstructure, mechanical properties and friction and wear behavior of the coating. The results showed that the WC-10Co4Cr coating prepared by HVOF technology had a dense microstructure and excellent mechanical properties. The porosity of the coating was $1.3 \pm 0.1\%$, with the microhardness of $1392 \pm 45 \text{HV}_{0.3}$, and the fracture toughness of $7.11 \pm 0.10 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Compared with 35CrMo steel substrate, the coating has more excellent wear resistance, and with the increase of sliding speed, the friction coefficient of WC-10Co4Cr coating decreases and the wear rate increases; The wear failure mechanism of coating mainly includes abrasive wear, adhesive wear and fatigue wear.

Key words: deep drilling; high velocity oxygen fuel (HVOF); WC-10Co4Cr coating; tribological property; wear mechanism

收稿日期:2020-02-12 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.011

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题三“高性能薄壁绳索取心钻杆研制”(编号:2018YFC0603403);国家自然科学基金面上项目“深海钻具腐蚀冲蚀磨损失效规律及其防护机理研究”(编号:41772389);装备预研领域基金重点项目“空间用超润滑固体薄膜制备技术”(编号:61409230603);装备预研教育部联合基金青年人才基金项目“发动机缸体强化延寿涂层设计制造技术”(编号:6141A02033120)

作者简介:周永宽,男,汉族,1993 年生,硕士研究生在读,材料工程专业,从事热喷涂层磨损机制的研究,yongkuanz@163.com。

通信作者:康嘉杰,男,汉族,1984 年生,博导,副教授,地质工程专业,博士,从事表面工程、再制造工程和机械摩擦学相关研究工作,北京市海淀区学院路 29 号,kangjiajie@cugb.edu.cn。

引用格式:周永宽,康嘉杰,岳文,等.超音速火焰喷涂金属陶瓷复合涂层的耐磨性能研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):72-79.
ZHOU Yongkuan, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Study on wear resistance of HVOF metal ceramic composite coating[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):72-79.

0 引言

随着我国经济、社会的持续快速发展和人口的持续增长,对地下矿产资源的需求和消耗逐年增加,开展深部钻探工程势在必行。以深地资源勘查开采为目的的钻探工程大多具有钻探深度大、孔内地层状况和钻孔复杂多变等特点,因此对深部钻探装备及技术提出了更高的要求^[1-3]。而钻杆、套管、钻铤和扶正器等钻探装备关键零部件在工作时不可避免地要承受岩石碎屑导致的磨损作用,严重影响钻进效率和作业安全。因此需要采用先进的表面工程技术对钻探装备关键零部件进行表面强化,在其表面制备具有优异耐磨性能的涂层,以达到避免磨损失效、延长使用时间、保障钻采作业安全的目的^[4-6]。

WC 系金属陶瓷涂层是一种耐磨涂层,它由 WC 硬质相提供强度和硬度,由金属粘结相提供韧性和塑性,故同时具备了陶瓷和金属材料的优点。超音速火焰喷涂(High Velocity Oxygen Fuel,简称 HVOF)具有粒子飞行速度高、沉积温度低、沉积速度快以及结合强度高优点,所以在制备 WC 系金属陶瓷耐磨涂层中显出了独特优势。利用 HVOF 喷涂技术制备的 WC 系金属陶瓷涂层显著抑制了粉末的氧化和脱碳,因此获得了高的硬度、致密性和耐磨性,在矿山、钻井等装备的表面防护领域得到了广泛应用^[7-12]。

为了探究 WC 系涂层对关键零部件的耐磨防护作用,李松林等^[13]对 HVOF 制备的 WC-10CoCr 涂层进行了滑动摩擦磨损试验。发现在相同试验条件下,WC-10CoCr 涂层的摩擦系数(约 0.8)高于不锈钢(1Cr18Ni9Ti)的摩擦系数(约 0.5),磨损体积损失量为不锈钢基体的 1/146,具有优异的耐滑动磨损性能。在滑动磨损过程中失效形式首先是粘结相的脱落,然后是 WC 颗粒的磨损。

外部的摩擦条件会对涂层的摩擦磨损性能产生较大影响。Hong S 等^[14]探究了温度对 HVOF 喷涂纳米结构 WC-CoCr 涂层干滑动摩擦磨损行为的影响。发现随着试验温度的升高,涂层的磨损率增加。室温下涂层的滑动磨损机理为粘结相挤压变形,200℃时为碳化物颗粒剥落、轻度氧化磨损和粘着磨损,以及 500℃时为粘着磨损、疲劳磨损和氧化磨损。耿哲等^[15]对 HVOF 制备的 WC-17Co 涂层在不同载荷下的摩擦磨损行为进行了研究,发现随着载荷的增加摩擦系数下降,这是由于载荷增加促

进了氧化物的形成,氧化物具有减摩作用导致的。

此外,多项研究发现,WC 系涂层的耐磨性取决于多种因素,例如粉末的形态、碳化物颗粒的尺寸以及在粘结相中的分布状态等^[16-17]。纳米级别 WC 颗粒粉末制备成的 WC 系金属陶瓷涂层磨损性能优异,但是随着碳化物尺寸的减小涂层的脆性会增加从而耐磨性降低^[18-21]。因此将微米级别与纳米级别的 WC 颗粒粉末混合制成双峰粉末,采用超音速火焰喷涂制备的双峰涂层不仅可以保证涂层的耐磨性,还可以有效减轻脱碳^[22]。

本研究针对深部钻探装备关键零部件的磨损失效问题,通过 HVOF 技术喷涂了双峰结构的 WC-10Co4Cr 涂层,分析了涂层的相组成、微观结构、孔隙率、显微硬度、断裂韧性以及结合强度,开展了不同滑动速度下的滑动摩擦磨损试验,对涂层的耐磨性能等进行了分析,探讨了 HVOF 喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的滑动磨损行为。

1 试验

1.1 涂层制备

选择了商用 WC-10Co4Cr 双峰复合粉末作为原料,其中 $w(\text{WC})=86\%$, $w(\text{Co})=10\%$, $w(\text{Cr})=4\%$,粉末粒径 15~45 μm ,粉末均采用团聚烧结工艺制备。粉末中微米 WC 颗粒和纳米 WC 颗粒的质量比为 7:3,微米 WC 颗粒尺寸为 0.7~1.3 μm ,纳米 WC 颗粒尺寸为 70~200 nm。基体材料为 35CrMo 钢,试样尺寸分为 40 mm×20 mm×5 mm(金相试样基体)、20 mm×20 mm×5 mm(摩擦试样基体)。为了改善基体表面喷涂层的应力状态,对基体进行了 1 mm×45°倒角。

使用配备有 GTV HVOF K2 喷枪的 GTV MF-P-HVOF-FP-K 2000 HVOF 系统进行喷涂。以航空煤油作为燃料,氧气作为助燃气体,氮气作为送粉载气,HVOF 喷涂工艺参数如表 1 所示。获得的 WC-10Co4Cr 涂层厚度为 200~300 μm 。喷涂前,将 35CrMo 钢试片在超声清洗设备中分别用丙酮分析纯和乙醇分析纯各清洗 30 min,以实现除油和脱水。而后进行喷砂粗化处理,喷砂材料为刚玉,尺寸为 0.3 mm,喷砂的距离和角度分别为 300 mm 和 70°。

1.2 涂层表征

使用灰度法测量涂层的孔隙率,并利用

表1 HVOF喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的工艺参数

| 工艺参数 | 送粉率/ (g·min ⁻¹) | 喷涂距 离/mm | 氧气流量/ (L·min ⁻¹) | 煤油流量/ (L·min ⁻¹) | 氮气流量/ (L·min ⁻¹) |
|------|--------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 数值 | 100 | 420 | 90 | 26 | 9 |

ImageJ2x 软件评估孔隙率值。采用场发射扫描电子显微镜(MERLIN Compact, ZEISS, Germany)观察 WC-10Co4Cr 粉末和涂层的微观形貌,并使用 X 射线能谱仪(EDS)分析涂层的化学成分。利用 X 射线衍射仪(XRD, AXS D-8, Bruker, Germany)进行相组成表征, Cu K α , 扫描速度 4°/min, 2 θ 范围 20°~90°。根据《热喷涂抗拉结合强度的测定》(GB 8642-2002), 使用 INSTRON5985 型万能材料试验机, 通过对偶件拉伸法测试涂层的结合强度, 以 1 mm/min 的速率拉伸样品, 结合强度取自 5 组平行样品的平均值。

使用显微硬度仪(MICROMET-6030, Buehler, America)测量涂层的显微硬度, 载荷 2.94 N, 保载时间 15 s。为了确保数据的稳定性, 显微硬度值是 5 个测量点的平均值。利用 HV-5 型维氏硬度计测量涂层的断裂韧性, 载荷 49 N, 保载时间 15 s, 并将 20 次测量的平均值作为涂层的有效断裂韧性值。利用共聚焦显微镜(OLS4000, OLYMPUS, Japan)测量涂层的表面粗糙度(R_a)值。

根据 Evans 和 Wilshaw 模型计算涂层断裂韧性^[23-24], 如式(1)所示。取 10 次测量值的平均值作为涂层的有效显微硬度和断裂韧性。

$$K_{IC} = \frac{0.079P}{a^{3/2}} \lg \frac{4.5a}{c} \quad (1)$$

式中: K_{IC} ——断裂韧性, MPa·m^{1/2}; P ——加载力, N; a ——维氏压痕对角线长度的一半, m; c ——压痕中心到裂纹尖端长度, m。式(1)的适用范围是 $0.6 \leq c/a < 4.5$ 。

1.3 滑动摩擦磨损试验

使用 CETR-UMT-5 型摩擦磨损试验机对双峰涂层进行滑动磨损试验, 试验仪器见图 1。涂层经研磨抛光后粗糙度 $< 0.8 \mu\text{m}$ 。滑动摩擦副采用 $\varnothing 12.7 \text{ mm}$ 的 Si_3N_4 球, 摩擦形式为往复式摩擦, 法向载荷为 30 N, 磨痕长度为 5 mm, 滑动速度分别为 0.1、0.15、0.2 m/s。利用共聚焦显微镜(OLS4000, OLYMPUS, Japan)测试涂层磨痕的三维形貌, 利用场发射扫描电子显微镜(MERLIN

Compact, ZEISS, Germany)和 X 射线能谱仪(EDS)观察与测试磨痕的微观形貌和化学成分, 以分析涂层的磨损机制。

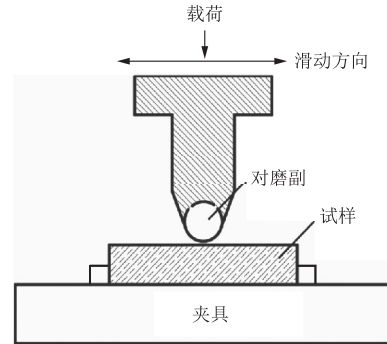


图1 UMT-5 摩擦磨损试验机原理图

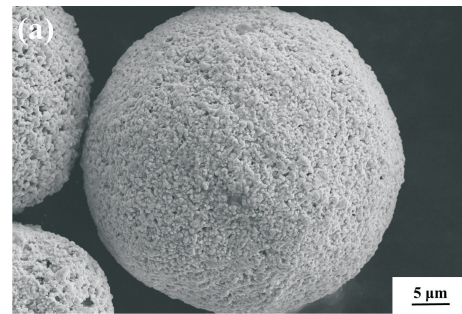
Fig.1 Principle of UMT-5 type friction and wear test machine

2 结果与讨论

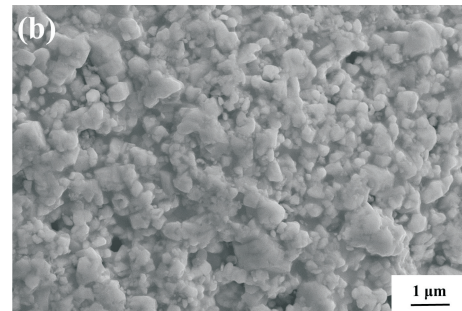
2.1 涂层特征

2.1.1 微观形貌

图 2(a)为 WC-10Co4Cr 粉末的整体微观形貌, 由图可见, 粉末呈球状或椭球状, 粉末的流动性良好, 便于喷涂过程中粉末的熔融与变形^[25]。图 2(b)为粉末的局部微观形貌, WC 颗粒是具有棱角的块状, 通过 CoCr 粘结相结合在一起, 纳米 WC 颗粒弥散分布在微米 WC 颗粒周围。



(a) 整体微观形貌



(b) 局部微观形貌

图2 WC-10Co4Cr 粉末的显微形貌

Fig.2 SEM images of WC-10Co4Cr powders

图 3 为 WC-10Co4Cr 涂层截面整体和局部的微观形貌。涂层与基体的结合方式为机械咬合,由于对基体进行了喷砂预处理,涂层与基体结合处呈现锯齿状,无明显的裂纹,结合良好。从图 3(b)中可以看到涂层内部组织均匀,WC 颗粒基本上保持原有的多边形结构,纳米 WC 颗粒分散在微米 WC 颗粒的间隙或部分聚集在粘结相中。利用灰度法测得涂层的孔隙率为 $1.3 \pm 0.1\%$,说明粉末颗粒 HVOF 喷涂过程中熔融良好,形成了致密的涂层结构。

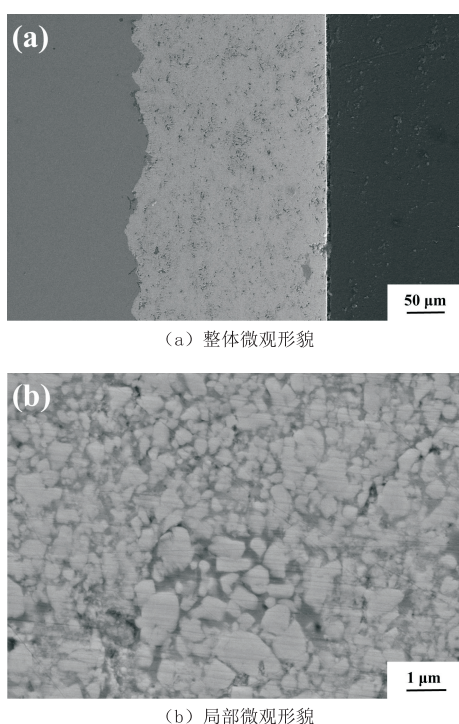


图 3 WC-10Co4Cr 涂层的截面微观形貌
Fig.3 SEM images of WC-10Co4Cr coating

2.1.2 物相组成

WC-10Co4Cr 粉末及涂层的相组成如图 4 所示,粉末的主要相是 WC 相,另外在衍射图谱中还可看到有少量的 Co 相和 $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 相存在, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ 相是在烧结过程中 WC 溶解于 Co 相中形成的^[10]。涂层的主要成分也是 WC,同时存在少量的 W_2C 相,表明在 HVOF 喷涂过程中 WC 发生了脱碳与分解。但 W_2C 峰强度较小,说明 WC 的脱碳与分解程度较轻。研究表明 WC 颗粒尺寸越小粉末的比表面积越大,表面能越大,因此在 HVOF 喷涂过程中更容易被氧化与分解。衍射图谱中没有 Co 相衍射峰的出现,是因为快速冷却过程中生成了 Co-

W-C 非晶相使 Co 相的衍射峰消失^[26-27]。

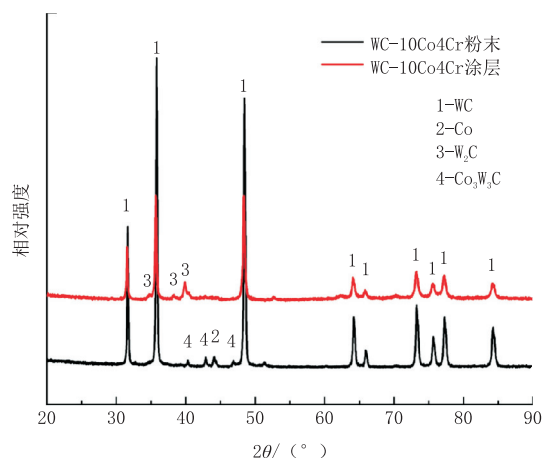


图 4 WC-10Co4Cr 粉末和涂层的 XRD 图谱
Fig.4 XRD pattern of WC-10Co4Cr powder and coating

2.1.3 力学性能

表 2 为 WC-10Co4Cr 涂层的孔隙率、显微硬度、结合强度以及断裂韧性。涂层的显微硬度($1392 \pm 45 \text{ HV}_{0.3}$)明显高于 35CrMo 钢基体($278 \pm 25 \text{ HV}_{0.3}$)的显微硬度。涂层中 WC 硬质相的比表面积越大,分布越均匀,涂层的显微硬度就越高。此外,纳米 WC 颗粒均匀分布在微米 WC 颗粒周围,起到弥散强化的作用。WC-10Co4Cr 涂层的平均结合强度为 70.6 MPa,说明涂层与基体结合状态良好。WC-10Co4Cr 涂层的断裂韧性为 $7.11 \pm 0.10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,由于纳米颗粒的均匀分布,减小了粘结相自由程,因此具有良好的韧性^[28]。

表 2 WC-10Co4Cr 涂层的显微硬度、结合强度及断裂韧性
Table 2 Microhardness, bonding strength and fracture toughness of WC-10Co4Cr coating

| 显微硬度($\text{HV}_{0.3}$) | 结合强度/MPa | 断裂韧性/ $(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$ |
|---------------------------|----------|---|
| 1392 ± 45 | 70.6 | 7.11 ± 0.10 |

2.2 涂层的摩擦学特性

2.2.1 摩擦系数

涂层在不同滑动速度下的摩擦系数曲线如图 5 所示。在滑动磨损试验初期摩擦系数急剧上升,到达峰值后迅速下降,这是由于涂层与对磨副的接触面存在微凸体等,导致两者接触面积较小,因此摩擦系数上升;而随着磨损的进行,接触面逐渐平整化,摩擦系数逐渐降低进入稳态阶段。进入稳态阶段后,涂层的摩擦系数在一定范围内上下波动,这是由于在对磨副的剪切作用下,CoCr 粘结相首先被磨粒

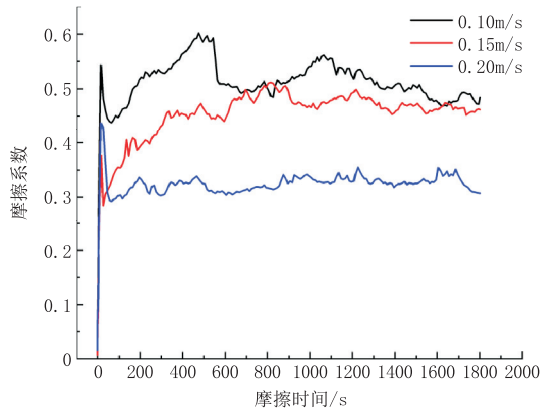


图5 WC-10Co4Cr涂层在不同滑动速度下的摩擦系数
Fig.5 Friction coefficient of WC-10Co4Cr coating at different sliding speeds

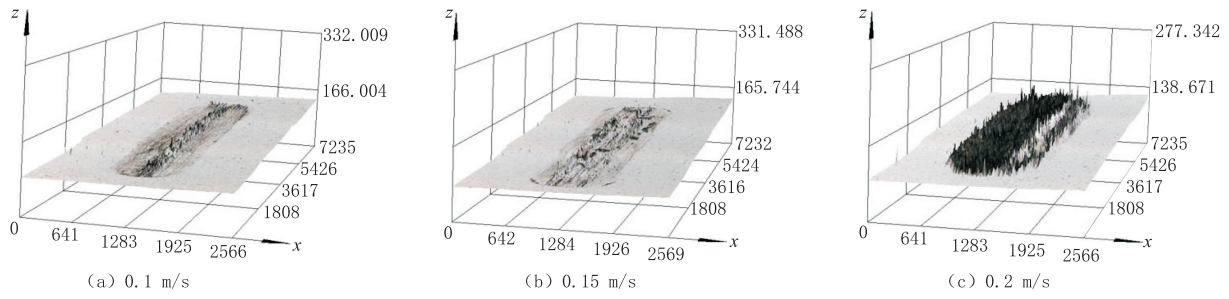


图6 WC-10Co4Cr涂层在不同滑动速度下的磨痕形貌
Fig.6 Wear morphologies of WC-10Co4Cr coating at different sliding speeds

图7为不同滑动速度下,摩擦磨损试验进行30 min后35CrMo钢基体与WC-10Co4Cr涂层的磨损体积,对比发现WC-10Co4Cr涂层的磨损体积远小于35CrMo钢基体的磨损体积,表明涂层具有良好的耐滑动磨损性能。

2.2.3 磨损失效机制分析

WC-10Co4Cr涂层在不同滑动速度下的磨痕宽度如图8所示,可以发现随着滑动速度的增大,涂层磨痕的宽度增大,磨痕表面越来越粗糙。对磨痕进行EDS线扫描,发现随着滑动速度的增大,涂层磨痕表面的O含量增加,表明氧化现象加剧。这是由于在摩擦过程中滑动速度越快涂层产热越严重,涂层越容易氧化^[14]。

涂层在0.1 m/s滑动速度时磨痕较窄且较浅,未观察到明显的塑性变形,磨痕表面以微犁沟和微剥落坑为主。在滑动磨损过程中 Si_3N_4 对磨副首先对CoCr粘结相进行磨损,粘结相硬度较低,因而很容易被对磨副移除^[29]。当粘结相移除后,WC硬质颗粒暴露出来与对磨副发生摩擦,进而发生部分脱落。在0.15 m/s滑动速度下,涂层磨痕表面可观察

微观切削,接着WC硬质相暴露出来,此时摩擦主要发生在WC硬质相和摩擦副间,而部分剥落的WC颗粒转化为磨粒导致摩擦系数出现波动^[13]。随着滑动速度的增大,平均摩擦系数降低,这是由于随着滑动速度的增大,摩擦产生的热效应更加显著,生成的氧化产物具有一定的减摩作用^[19],故摩擦系数降低。

2.2.2 磨痕三维形貌

WC-10Co4Cr涂层在不同滑动速度下的磨痕三维形貌如图6所示。随着滑动速度的增大,单位时间对磨副划过的次数增加,涂层的磨损量增加,磨痕更深。

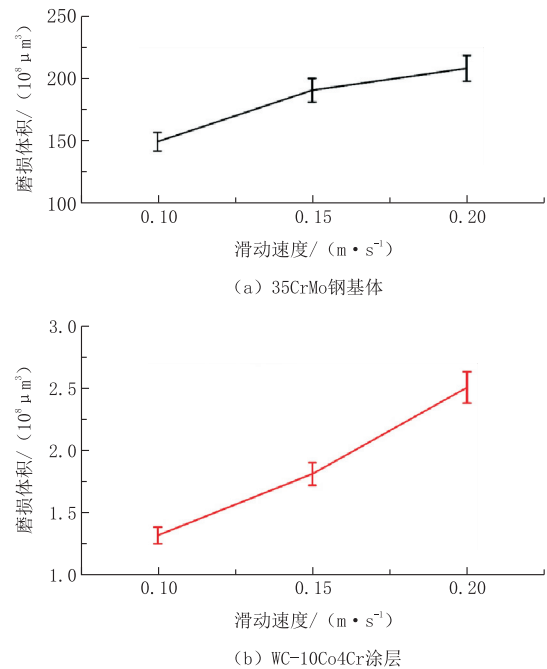


图7 35CrMo钢基体与WC-10Co4Cr涂层的磨损体积
Fig.7 Wear volume of 35CrMo steel substrate and WC-10Co4Cr coating

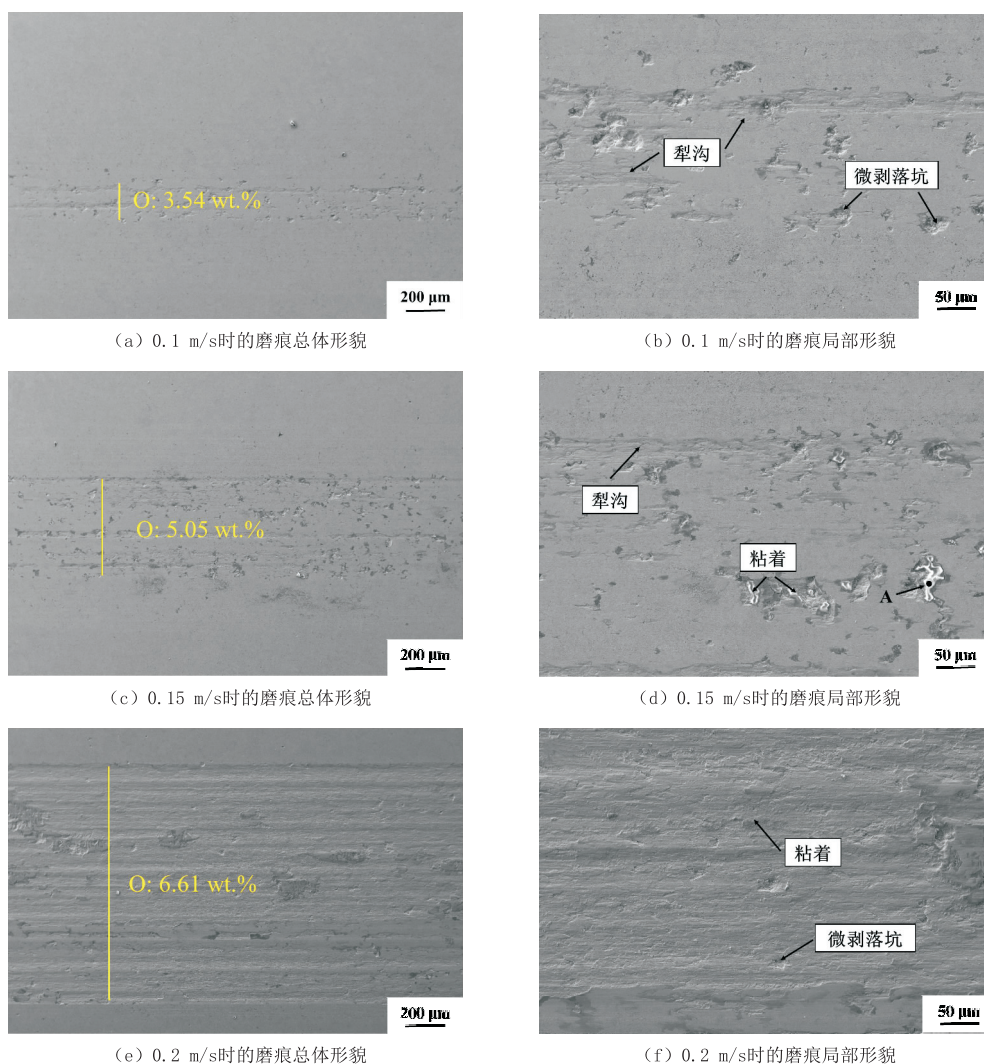


图 8 WC-10Co4Cr 涂层在不同滑动速度下的磨损形貌

Fig.8 Wear morphologies of WC-10Co4Cr coating at different sliding speeds

到粘着特征,表明随着滑动速度的增大,热效应明显,从而发生粘着磨损^[30]。同时磨损过程中剥落的 WC 颗粒一部分被对磨副挤出,另一部分充当接触表面的三体研磨颗粒从而加剧涂层的磨损。因此在 0.15 m/s 滑动速度下涂层磨损失效机制主要以磨粒磨损和粘着磨损为主。在 0.2 m/s 滑动速度时,可以观察到涂层发生剥落现象。这是由于在滑动摩擦磨损过程中产生了剪切应力,涂层在剪切应力的反复作用下发生疲劳磨损导致剥落。此外,可以观察到涂层发生了更加严重的粘着磨损。因此在 0.2 m/s 滑动速度下涂层的磨损失效形式除磨粒磨损和粘着磨损外,还包括疲劳磨损导致的涂层剥落。对图 8(d)中标记 A 处打 EDS,元素含量见表 3。可以发现标记 A 处的涂层表面有 Si₃N₄ 对磨副上的材

料转移现象。因此涂层在不同滑动速度下的摩擦磨损失效机制包括 3 种:磨粒磨损、粘着磨损和疲劳磨损。

表 3 图 8(d)中标记 A 处的元素含量
Table 3 Element content at A marked in Fig.8 (d)

| 元素 | C | W | Co | Cr | Si | N | O | 总计 |
|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-----|
| 质量百分比 | 9.63 | 46.87 | 4.72 | 1.88 | 5.35 | 1.88 | 29.66 | 100 |
| 原子百分比 | 23.92 | 7.61 | 2.39 | 1.08 | 5.69 | 4.01 | 55.31 | 100 |

3 结论

(1)利用 HVOF 喷涂制备的 WC-10Co4Cr 涂层具有致密的微观结构和优异的力学性能,其孔隙率为 $1.3 \pm 0.1\%$,显微硬度为 $1392 \pm 45 \text{ HV}_{0.3}$,断裂韧性为 $7.11 \pm 0.10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

(2)与 35CrMo 钢基体相比,涂层具有更加优异的耐磨损性能,并且随着滑动速度的增加,WC-10Co4Cr 涂层的摩擦系数下降、磨损率增大。

(3)不同滑动速度下 WC-10Co4Cr 涂层的磨损失效形式存在差异,但总体上其磨损失效机制主要包括磨粒磨损、粘着磨损及疲劳磨损引起的表面剥落。

参考文献(References):

- [1] 王达,赵国隆,左汝强,等.地质钻探工程的发展历程与展望—回顾探矿工程事业70年[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(9):1-31.
WANG Da, ZHAO Guolong, ZUO Ruqiang, et al. The development and outlook of geological drilling engineering—To review the 70th anniversary of exploration engineering[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(9):1-31.
- [2] 刘凡柏,高鹏举,任启伟,等.4000m 交流变频电驱岩心钻机的研制及其在地热井的工程应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):40-46.
LIU Fanbai, GAO Pengju, REN Qiwei, et al. Development and application of 4000m AC frequency-conversion core drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(10):40-46.
- [3] 吉胜军.深部钻探作业关键设备选择原则与配置优化[J].机电工程技术,2018,47(9):167-169.
JI Shengjun. Selection principles and configuration optimization of key equipment in deep drilling operation[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2018,47(9):167-169.
- [4] 孙孝刚,卢忠友.岩心钻探烧钻事故分析及实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):28-32.
SUN Xiaogang, LU Zhongyou. Analysis and practice of bit-burnt accident in core drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):28-32.
- [5] 钱程远,王瑜,张凯,等.井下动力钻具轴承发展现状调研[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(2):46-51.
QIAN Chengyuan, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Research on the development status of bearing for downhole motor[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(2):46-51.
- [6] 徐滨士,朱绍华,等.表面工程的理论与技术[M].北京:国防工业出版社,2010.
XU Binshi, ZHU Shaohua, et al. Theories and technologies on surface engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [7] Bolelli G, Bonferroni B, Coletta G, et al. Wear and corrosion behaviour of HVOF WC-CoCr/CVD DLC hybrid coating systems deposited onto aluminium substrate[J]. Surface & Coatings Technology, 2011,205(17-18):4211-4220.
- [8] HONG S, WU Y P, GAO W W, et al. Slurry erosion-corrosion resistance and microbial corrosion electrochemical characteristics of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating for offshore hydraulic machinery[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2018,74:7-13.
- [9] 崔晓宇,王成彪,康嘉杰,等.热喷涂金属陶瓷涂层复合磨损失效机制[J].材料导报,2016,30(8):75-79.
CUI Xiaoyu, WANG Chengbiao, KANG Jiajie, et al. Composite wear failure mechanisms of thermally sprayed cermet coatings[J]. Materials Review, 2016,30(8):75-79.
- [10] 陈小明,周夏凉,吴燕明,等.超音速火焰喷涂微、纳米结构 WC-10Co4Cr 涂层及其性能[J].金属热处理,2016,41(5):52-56.
CHEN Xiaoming, ZHOU Xialiang, WU Yanming, et al. Properties of micro and nano structured WC-10Co4Cr coatings by HVOF spray[J]. Heat Treatment of Metals, 2016,41(5):52-56.
- [11] Nieto A, Kim J, Penkov OV, et al. Elevated temperature wear behavior of thermally sprayed WC-Co/nanodiamond composite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2017,315:283-293.
- [12] MA N, GUO L, CHENG Z X, et al. Improvement on mechanical properties and wear resistance of HVOF sprayed WC-12Co coatings by optimizing feedstock structure[J]. Applied Surface Science, 2014,320:364-371.
- [13] 李松林,向锦涛,周伍喜,等.超音速火焰喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的耐滑动磨损行为[J].中国有色金属学报,2015,22(5):1371-1376.
LI Songlin, XIANG Jintao, ZHOU Wuxi, et al. Sliding wear behavior of high-velocity oxy-fuel sprayed WC-10Co4Cr coatings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015,22(5):1371-1376.
- [14] HONG S, WU Y P, WANG B, et al. The effect of temperature on the dry sliding wear behavior of HVOF sprayed nanostructured WC-CoCr coatings [J]. Ceramics International, 2016,43(1):458-462.
- [15] 耿哲,段德莉,刘阳,等.摩擦条件对超音速火焰喷涂 WC-17Co 涂层摩擦磨损性能的影响[J].热喷涂技术,2014,6(2):45-51.
GENG Zhe, DUAN Deli, LIU Yang, et al. The effect of tribological conditions on the friction and wear performance of HVOF spraying WC-17Co coating [J]. Thermal Spray Technology, 2014,6(2):45-51.
- [16] Kamdi Z, Shipway P H, Voisey K T, et al. Abrasive wear behaviour of conventional and large-particle tungsten carbide-based cermet coatings as a function of abrasive size and type [J]. Wear, 2011,271(9-10):1264-1272.
- [17] WANG Q, CHEN Z H, DING Z X. Performance of abrasive wear of WC-12Co coatings sprayed by HVOF [J]. Tribology International, 2009,42(7):1046-1051.
- [18] Guilemany J M, Dosta S, Nin J, et al. Study of the Properties of WC-Co Nanostructured Coatings Sprayed by High-Velocity Oxyfuel [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005,14(3):405-413.
- [19] MI P B, WANG T, YE F. Influences of the compositions and mechanical properties of HVOF sprayed bimodal WC-Co coating on its high temperature wear performance [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2017,69:158-163.
- [20] 丁彰雄,陈伟,王群,等.HVOF 制备的多峰 WC-12Co 涂层摩擦磨损特性[J].摩擦学学报,2011,31(5):425-430.
DING Zhangxiong, CHEN Wei, WANG Qun, et al. Friction

- and wear characteristics of multimodal WC - 12Co coatings deposited by HVOF[J]. Tribology, 2011, 31(5):425-430.
- [21] MI P B, ZHAO H J, WANG N T, et al. Sliding wear behavior of HVOF sprayed WC-(nano-WC-Co) coating at elevated temperatures [J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 206:1-6.
- [22] Guilemany J M, Dosta S, Miguel J R. The enhancement of the properties of WC-Co HVOF coatings through the use of nanostructured and microstructured feedstock powders [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(3-4):1180-1190.
- [23] Evans A G, Wilshaw T R. Quasi-static solid particle damage in brittle solids-I. Observations analysis and implications [J]. Acta Metallurgica, 1976, 24(10):939-956.
- [24] Lekatou A, Sioulas D, Karantzalis A E, et al. A comparative study on the microstructure and surface property evaluation of coatings produced from nanostructured and conventional WC-Co powders HVOF-sprayed on Al7075 [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 276:539-556.
- [25] 姬寿长, 李争显, 杜继红, 等. Ti6Al4V 合金表面超音速火焰喷涂 WC-12Co 涂层组织及相分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11):2005-2009.
- JI Shouchang, LI Zhengxian, DU Jihong, et al. Microstructure and phase analysis of WC-12Co coating on Ti6Al4V alloy surface by HVOF [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(11):2005-2009.
- [26] LIU X B, KANG J J, YUE W, et al. Performance evaluation of HVOF sprayed WC-10Co4Cr coatings under slurry erosion [J]. Surface Engineering, 2019, 35(9):816-825.
- [27] 罗虞霞, 高峰, 王大锋. 双尺度 WC-CoCr 涂层的组织结构分析 [J]. 热喷涂技术, 2018, 10(3):33-38.
- LUO Yuxia, GAO Feng, WANG Dafeng. Morphology of the WC-CoCr coatings with micro-nano composite structure [J]. Thermal Spray Technology, 2018, 10(3):33-38.
- [28] 王大锋, 张波萍, 贾成厂, 等. 超音速火焰喷涂技术制备的双峰 WC-CoCr 涂层磨粒磨损特性 [J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(2):118-127.
- WANG Dafeng, ZHANG Boping, JIA Chengchang, et al. Abrasive wear behavior of bimodal WC-CoCr coatings sprayed by high velocity oxy-fuel [J]. Powder Metallurgy Technology, 2017, 35(2):118-127.
- [29] 周永宽, 康嘉杰, 岳文, 等. HVOF 喷涂 WC 系金属陶瓷涂层腐蚀磨损行为研究现状 [J]. 金属热处理, 2019, 44(7):211-217.
- ZHOU Yongkuan, KANG Jiajie, YUE Wen, et al. Research status of corrosion and wear behaviors of HVOF sprayed WC based metal cermet coatings [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(7):211-217.
- [30] Federici M, Menapace C, Moscatelli A, et al. Pin-on-disc study of a friction material dry sliding against HVOF coated discs at room temperature and 300°C [J]. Tribology International, 2017, 115:89-99.

(编辑 韩丽丽)

专题征稿

“干热岩钻探技术与装备”专题

我国干热岩资源潜力巨大,据中国地质调查局 2015 年调查结果显示,我国干热岩资源量折合 856 万亿 t 标准煤。在 4 月 16 日召开的 2020 年全国地质调查工作会议上部署的 2020 年 9 方面的重点工作中,第一条就是“加强包括清洁能源在内的战略性矿产资源调查评价,增强支撑服务国家能源资源安全保障能力”。其中地热资源(含干热岩资源)的调查是能源矿产地质调查中的重中之重。

干热岩作为储量巨大的清洁能源,具有广阔的开发前景,也吸引了大量的科研和资金投入。近年来,除中国地质调查局重点部署了多个干热岩勘查与试采项目外,众多大学、科研院所、地勘单位等积极开展相关研究及勘查评价、试采示范工作。

为给下一步的干热岩勘探开发工作提供技术支撑,我刊拟在近期组织“干热岩钻探技术与装备”专题报道,以展示近年来我国在干热岩钻探方面的研究成果和高温高压钻探装备研发进展,总结干热岩钻探施工经验和体会。专题内容包括(但不限于):

- 相关理论研究成果;
- 专用装备与器具的研制;

- 钻井施工技术;
- 高温钻井液;
- 井控技术、压裂技术等

稿件要求:参见《探矿工程(岩土钻掘工程)》投稿指南:

http://jour.tkgc.net/ch/first_menu.aspx?parent_id=20150106042322001

论文提交截止时间:2020 年 7 月 31 日

投稿网址:www.tkgc.net

投稿流程:探矿工程在线(www.tkgc.net)→作者登录→注册→登录→按提示上传稿件(注:选择栏目时请选“干热岩钻探专题”)。

欢迎广大科研人员 and 工程技术人员投稿!

联系人:王建华(396981878@qq.com, 13903167926, 0316-2394776)

李 艺(617140994@qq.com, 18515466615, 010-68320471)

《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部

2020 年 4 月