

高焓等离子喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的耐磨性 *

陈小明^{1,2}, 周夏凉^{1,2}, 吴燕明^{1,2}, 王 亚¹, 毛鹏展¹, 王莉容¹

(1. 水利部产品质量标准研究所, 杭州 310012; 2. 水利部杭州机械设计研究所, 杭州 310012)

摘 要: 为提高马氏体不锈钢(0Cr13Ni4Mo)的表面硬度及耐磨性能,对不锈钢表面进行高焓等离子喷涂 WC-10Co4Cr 强化,对涂层进行组织观察和物相组成分析,并在不同温度下进行了摩擦磨损试验。研究表明:WC-10Co4Cr 涂层组织致密,主要由 WC 物相构成,另外还有少量的 W_2C 和 $Co_{25}Cr_{25}W_8C_2$ 。在室温和高温(400 ℃)时,WC-10Co4Cr 涂层均具有较低的摩擦因数。室温时,基体的磨损机制主要以粘着磨损和磨粒磨损为主。WC-10Co4Cr 涂层其磨损机制主要以微切削为主。400 ℃条件下,不锈钢基体的磨损机理主要以粘着磨损和剥层为主,磨痕边缘部位主要以磨粒磨损为主。WC-10Co4Cr 涂层试样的磨损机制主要以磨粒磨损为主,伴随有剥层现象出现。

关键词: 高焓等离子喷涂; WC-10Co4Cr; 微观结构; 耐磨性能

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)06-0088-08

Wear Resistance of High Enthalpy Plasma Sprayed WC-10Co4Cr Coating

CHEN Xiao-ming^{1,2}, ZHOU Xia-liang^{1,2}, WU Yan-ming^{1,2}, WANG Ya¹, MAO Peng-zhan¹, WANG Li-rong¹

(1. Standard & Quality Control Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012; 2. Hangzhou Mechanical Design Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310012)

Abstract: To improve the martensitic stainless steel (0Cr13Ni4Mo) surface hardness and wear resistance, the stainless steel was strengthened by high enthalpy plasma spraying WC-10Co4Cr coating. The microstructure and phase composition of the coating were characterized. Wear tests were carried out at different temperatures. Results show that the WC-10Co4Cr coating is density and consists mainly of WC phase, while a small amount of W_2C and $Co_{25}Cr_{25}W_8C_2$ exists in the coating. The WC-10Co4Cr coating has lower friction coefficient both at room temperature and high temperature (400 ℃). At room temperature, the wear mechanism of matrix mainly includes adhesive wear and abrasive wear, and the wear mechanism of WC-10Co4Cr coating mainly includes micro-cutting. Under the condition of 400 ℃, Wear of stainless steel in the center grinding mark is most caused by adhesive wear and peeling, but abrasive wear in the edge area of grinding crack. The wear mechanism of WC-10Co4C sample is abrasive wear with slight peeling.

Keywords: high enthalpy plasma spraying; WC-10Co4Cr; microstructure; wear resistance

0 引 言

0Cr13Ni4Mo 属于马氏体不锈钢,因具有优异的耐蚀性能和良好的机械性能而广泛应用于水利水电、核电、石油机械、阀门等诸多工业领

域^[1]。但是,由于基体表面硬度低、易粘着、耐磨性较差等原因导致其不可在摩擦磨损工况下使用,极大地限制了材料的应用范围^[2]。工业生产中,磨损和腐蚀失效通常起始于材料的表面,为

收稿日期: 2015-06-15; 修回日期: 2015-11-17; 基金项目: * 国际先进农业科学技术计划(948 计划)(201218); 浙江省科学计划项目(2014C31156); 浙江省科学计划项目(2013C31044)

通讯作者: 周夏凉(1987—), 男(汉), 工程师, 硕士; 研究方向: 抗磨耐腐蚀涂层、纳米涂层材料, Tel: (0571) 8808 2819; E-mail: xlzhou16@126.com

网络出版日期: 2015-12-09 08:34; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20151209.0834.004.html>

引文格式: 陈小明, 周夏凉, 吴燕明, 等. 高焓等离子喷涂 WC-10Co4Cr 涂层的耐磨性 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(6): 88-95. Chen X M, Zhou X L, Wu Y M, et al. Wear resistance of high enthalpy plasma sprayed WC-10Co4Cr coating [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(6): 88-95.

此利用表面改性技术提高材料的表面性能以及对磨损部位进行修复有利于提高零件的安全稳定性或延长使用寿命,表面改性技术成为推广其应用范围的重要研究方向^[3-5]。

WC-Co 涂层具有高硬度、良好的抗震特性、热膨胀系数小、化学稳定性好及摩擦因数小等特点^[6],是热喷涂技术制备的最具应用价值的碳化物金属陶瓷涂层之一。热喷涂技术具有喷涂材料范围广,基材加热温度较低,设备简单,操作灵活等特点,在国内外已得到较广泛的推广应用^[7-8]。热喷涂制备 WC-Co 系耐磨涂层的方法主要有超音速火焰喷涂和等离子喷涂^[9]。其中最新型的超音速等离子喷涂技术具有参数可调范围宽、焰流速度高、可调温度范围大等特点^[10],具有良好的推广应用前景。王海军^[11]等人研究了超音速等离子与 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层的冲蚀磨损性能,通过对比发现,HEPJet 超音速等离子喷涂的 WC-Co 涂层的质量优于 JP-5000 和 DJ-2700 两种超音速火焰喷涂涂层。近年来大量研究表明,在 WC-Co 粉末中加入一定质量分数的 Cr 不仅使得 WC 颗粒与 Co 粘结相的结合强度显著提高,而且涂层具有更加优异耐腐蚀和耐冲蚀性能^[12-13],但在等离子喷涂 WC-CoCr 涂层的高温耐磨损性能方面还缺乏相关研究。高焓

等离子喷涂技术通过提高电弧电压,增大气体与电弧的接触,使得气体电离更充分,进而提高等离子焰流的热焓值,其最大功率可达 100 kW,具有超音速喷涂、高粉末沉积率的特点,制备成本更低。文中采用高焓等离子喷涂技术在 0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢表面制备 WC-10Co4Cr 涂层,对涂层的组织结构及力学性能进行分析。并利用滑动摩擦磨损试验探究常温(25 ℃)与高温(400 ℃)下涂层的摩擦学性能和磨损机理。

1 材料与方法

1.1 涂层的制备

试验基材为淬火+回火态 0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢,其化学成分见表 1。喷涂试样的尺寸为 100 mm×50 mm×5 mm。喷涂前对试样进行超声清洗除油和刚玉砂喷砂处理以提高涂层与基体的结合强度。涂层材料选用德国 H. C. Statck GmbH 公司生产的微米 WC-10Co4Cr 粉末。颗粒度为 15~45 μm。喷涂前将微米粉末置于烘箱中进行 30 min 干燥处理,烘箱温度为 100 ℃。采用 100HE 型喷枪进行高焓等离子喷涂,具体喷涂工艺参数为:喷涂功率 50 kW,氩气流量 44 L/min,氢气流量 6 L/min,氮气流量 3.5 L/min;送粉转速 2 r/min,喷涂距离 120 mm。

表 1 0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of the 0Cr13Ni4Mo martensitic stainless steel												(w/%)
Element	Cr	Ni	C	Mn	Si	P	S	Mo	Cu	Co	N	Fe
Content	15.0-16.5	4.5-5.5	0.028	0.73	0.30-0.33	0.013	0.002	0.57	0.04	0.03	0.01	Bal.

1.2 涂层的表征与测试

将喷涂后的试样进行线切割加工成 14 mm×14 mm×5 mm 的金相试样和 Φ10 mm×5 mm 的磨损试样。采用德国蔡司 Supra 55 型扫描电子显微镜观察涂层表面及截面的微观形貌,并用能谱仪(EDS)对涂层进行成分分析。用 HXD-1000TMC 型显微硬度计测定从基体和涂层表面的显微硬度值,测定载荷为 300 g,保载时间 15 s。用 WDW-100A 型万能试验机,按照 GB/T 8642-2002 标准测定涂层与基体的结合强度。

用 HT-1000 球-盘式磨损试验机测试基体与涂层的摩擦磨损性能,干摩擦条件,法向载荷 10 N,回转半径 5 mm,转速为 560 r/min,磨损时

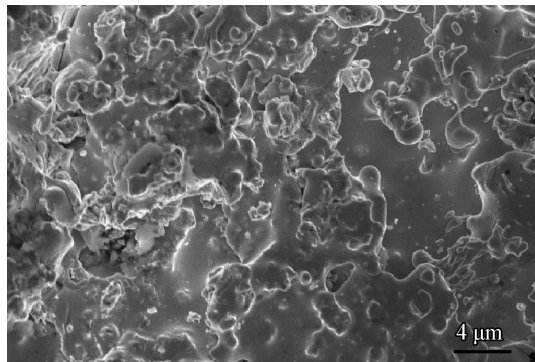
间 150 min。采用直径为 Φ3 mm,表面粗糙度 Ra=0.05 μm,硬度 77 HRC 的 Si₃N₄ 球作为摩擦副。试验条件室温为(25±4) ℃和高温为(400±4) ℃。用 LE225D 型电子分析天平(精确度为 0.01 mg)称量试验前后试样重量以求磨损失重,在两种温度下分别进行 3 次对比试验,3 次失重量的平均值作为此温度下试样的磨损失重量。采用扫描电镜(SEM)对磨痕微观形貌、磨损机理及化学成分进行分析。

2 结果与讨论

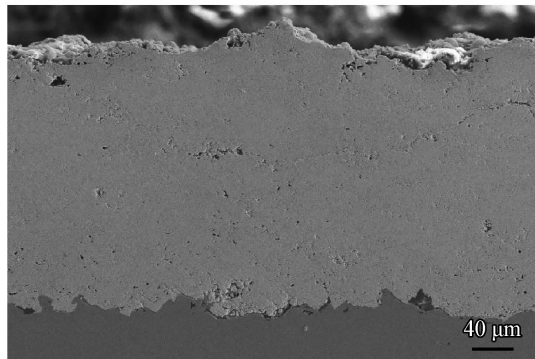
2.1 表面形态与组织结构

图 1 为 WC-10Co4Cr 涂层表面形貌。由图

可以看出 WC-10Co4Cr 粉末颗粒在喷射到基体后,大部分颗粒充分变形,成扁平状沉积在基体表面,呈菜花型或薄饼状,此现象表明在前期的喷涂过程中,粉末颗粒在高速焰流中充分熔融,具有良好的变形能力和填充缝隙的能力,而且不同颗粒间的结合作用好,形成的涂层均匀致密,不同层之间的结合能力提高。



(a) Surface



(b) Cross section

图 1 WC-10Co4Cr 涂层的表面和截面形貌

Fig. 1 Surface and cross section morphologies of the WC-10Co4Cr coating

同时,仔细分析涂层显微组织可以发现其具快速凝固组织的典型结构,即在涂层组织中存在部分饱和固溶体,如晶粒细小,碳化物分解减少和亚稳定相的生成等。这些组织特征均可以保证涂层优良的化学、物理和力学特性。当涂层中固溶体含量较高时,材料硬度和耐磨性能均有提高。而细小的无偏析组织也使涂层强度升高。另外,喷涂粒子飞行速度和温度越高,涂层粒子变形越充分,也使涂层具有高致密度。对涂层的截面进行测量,其厚度约为 220 μm 。通过图 2 的 EDS 分析数据结果可知,涂层的成分含有微量的氧元素,说过涂层粉末在等离子喷涂过程中有氧化现象。

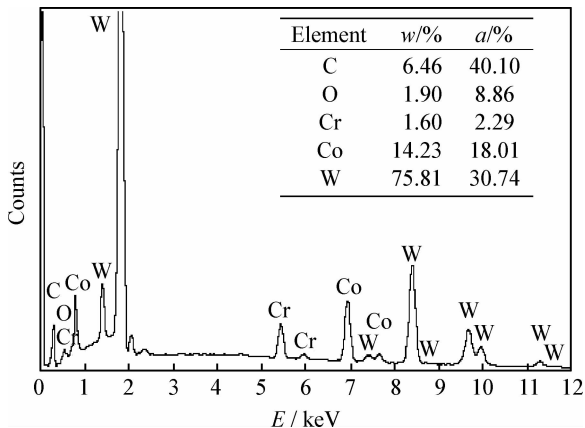


图 2 WC-10Co4Cr 涂层的能谱分析
EDS analysis of the WC-10Co4Cr coating

通过 X 射线衍射分析发现,高熔等离子喷涂 WC-10Co4Cr 涂层主要由 WC 相构成,但也存在少量的 W_2C 和 $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{W}_8\text{C}_2$,说明 WC-10Co4Cr 粉末在等离子喷涂的过程中会发生脱碳现象^[14]。在热喷涂过程中,对脱碳造成影响的主要因素包括喷涂粉末的性质、喷涂粒子速度、粉末粒子达到的温度喷涂气氛等。喷涂粉末的性质主要有:粉末相组成、粉末形貌和大小和 WC 颗粒尺寸。在高熔等离子喷涂过程中,粘结相熔化时,一部分 WC 颗粒被完全包裹,一部分 WC 颗粒的边缘裸露在粘结相外。裸露的 WC 发生熔化,熔化的 WC 颗粒一部分迅速与液态粘结相混合,在喷射到基体后快速冷却过程中产生非晶相,当 M_6C 和 M_{12}C 形核能力足够时,复杂的晶粒相形成。裸露在粘结相外表的 WC 颗粒边缘遇到空气中 O_2 时,会被氧化成 CO_2 ,而当 C 来不及补充时,便形成了 W_2C ^[15]。

2.2 显微硬度

WC-10Co-4Cr 涂层及基体的显微硬度如表 2 所示。WC-10Co4Cr 涂层平均显微硬度为 1 274.6 $\text{HV}_{0.3}$,基体的平均显微硬度为 356.6 $\text{HV}_{0.3}$ 。涂层的显微硬度是基体的 3.57 倍。WC-10Co4Cr 粉末本身含 CoCr 粘结相较多,在等离子喷涂过程中易于熔融粘结,由于粒子速度快,形成的涂层孔隙率较低,涂层致密。并且在喷涂过程中,脱碳分解程度较低,碳损失量较少,所以更易获得较高硬度的涂层。通常材料的硬度越高,其磨粒磨损性能越好,由以上结果分析可知,WC-10Co4Cr 涂层的平均硬度均高于基体的表面硬度,有利于提高基体的耐磨性能。涂层的

拉伸试验数据如图 3 所示,其结合强度达 65 MPa,涂层与基体结合良好。

表 2 基体与 WC-10Co4Cr 涂层的硬度
Table 2 Micro hardness of the matrix and WC-10 Co4Cr coating (HV_{0.1})

Sample	WC-10Co4Cr coating	Matrix
1	1 179	361.7
2	1 353	385.3
3	910	342.8
4	1 225	335.0
5	1 202	358.3
6	1 487	385.4
7	1 326	351.8
8	1 552	332.7
Average value	1 274.6	356.6

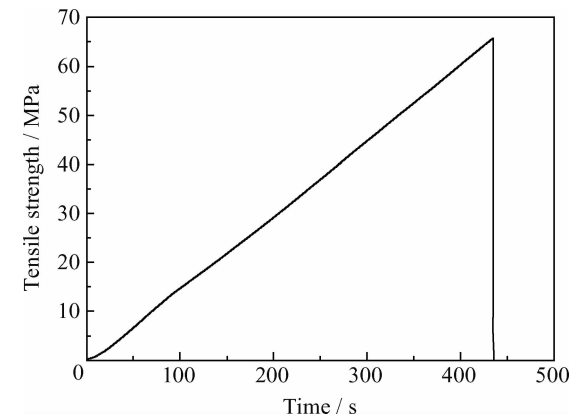


图 3 WC-10Co4Cr 涂层的结合强度随时间的变化
Fig.3 Variation of the tensile strength of the WC - 10Co4Cr coating and matrix with time

2.3 室温下涂层的摩擦学性能

室温条件下对不锈钢基体和 WC-10Co4Cr 涂层分别进行干摩擦测试,摩擦因数随时间变化曲线如图 4 所示。摩擦磨损曲线出现明显的两个阶段,即跑和阶段和稳定阶段。摩擦初期,两条曲线的摩擦因数随时间急剧增加到某一值,这是因为摩擦副 Si₃N₄ 球与试样表面刚接触时,试样表面存在许多微凸体,实际接触面积远远小于名义接触面积,在微观应力的作用下微凸体的形变使得摩擦阻力增加^[16]。WC-10Co4Cr 涂层表面接触面积随时间变化逐渐增大,30 min 后摩擦

因数趋于稳定,平均摩擦因数为 0.7 左右。不锈钢基体的摩擦因数在稳定摩擦阶段的平均摩擦因数为 1.1 左右。可以发现,热喷涂试样具有更低的摩擦因数,同时摩擦因数的振幅较低这是因为 WC-10Co4Cr 涂层表面粗糙度较马氏体不锈钢基体要小^[17]。

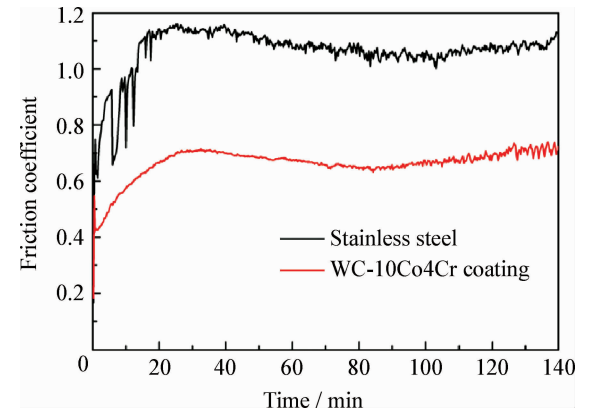


图 4 马氏体不锈钢基体与 WC-10Co4Cr 涂层在室温下的摩擦因数
Fig.4 Friction coefficient of the martensitic stainless steel matrix and WC - 10Co4Cr coating at room temperature

表 3 为 WC-10Co4Cr 喷涂试样和基体的室温磨损失重。马氏体不锈钢基体失重最多,平均磨损失重量为 21.75 mg,WC-10Co4Cr 涂层平均磨损失重为 0.78 mg。设不锈钢基体的磨损率为 1,以失重量为基准,则热喷涂后试样的相对磨损率仅为 0.035 76。由此可见,基体的耐磨性能得到极大的改善。

室温下热喷涂 WC-10Co4Cr 涂层具备优异的抗滑动磨损性能的主要原因为:众所周知,材料

表 3 不同试样室温下的磨损量和相对磨损率
Table 3 Wear volume and relative wear rate of the samples at room temperature

Sample	Weight loss/mg	Average value/mg	Relative wear rate
Matrix	21.62	21.75	1
	21.83		
	21.80		
WC-10Co4Cr coating	0.85	0.78	0.035 76
	0.73		
	0.76		

良好的耐磨性要求表层摩擦因数小一些。另外，磨损性能并非金属材料的固有特性，它与一些机械性能相关，其中硬度是影响磨损性能的重要参数。根据 Archard 磨损公式^[18]：

$$v = \frac{kWx}{H} \tag{1}$$

其中 W 为载荷，N； x 为滑动距离，m； H 为磨损表面硬度，HV； k 为磨损系数。由于喷涂后的表面硬度得到很大的提高（从 356.6 HV_{0.3} 提高到 1 274.6 HV_{0.3}），有助于材料抗磨损性能。同时涂层的摩擦因数下降了 0.4，也表明改性涂层的耐磨性能优于马氏体不锈钢。

图 5 是马氏体不锈钢基体和高焓等离子喷涂 WC-10Co4Cr 涂层试样的表面磨痕形貌。从图 5(a)(b)可以看出：基体磨损后表面粗糙，呈现出典型的塑性变形特性，表现为粘着和犁屑磨

损，形成沿滑动方向的犁沟。因此，马氏体不锈钢基体在室温（25℃）时的磨损机制主要以粘着磨损和磨粒磨损为主。高焓等离子技术制备的 WC-10Co4Cr 涂层在低倍放大情况下几乎看不到磨痕的形貌，高倍形貌下可以发现，涂层的磨损面要比基体的光滑平整，没有颗粒脱落和粘着现象发生，磨痕宽度和深度也有所降低，进一步表明涂层具有良好的抗磨性能。WC-10Co4Cr 涂层磨损机理以微切削为主。在磨损过程中，CoCr 粘结相由于硬度较低，因此首先被切削和挤压。随着后期的不断磨损，粘结相被切削掉，使得 WC 硬质颗粒相裸露出来。在图 5(d)中可以明显看到裸露在外的灰白色的 WC 硬质颗粒。裸露的 WC 颗粒在外界的反复撞击与挤压下发生破碎，并与粘结相剥离，最后脱落，造成了涂层的磨损。

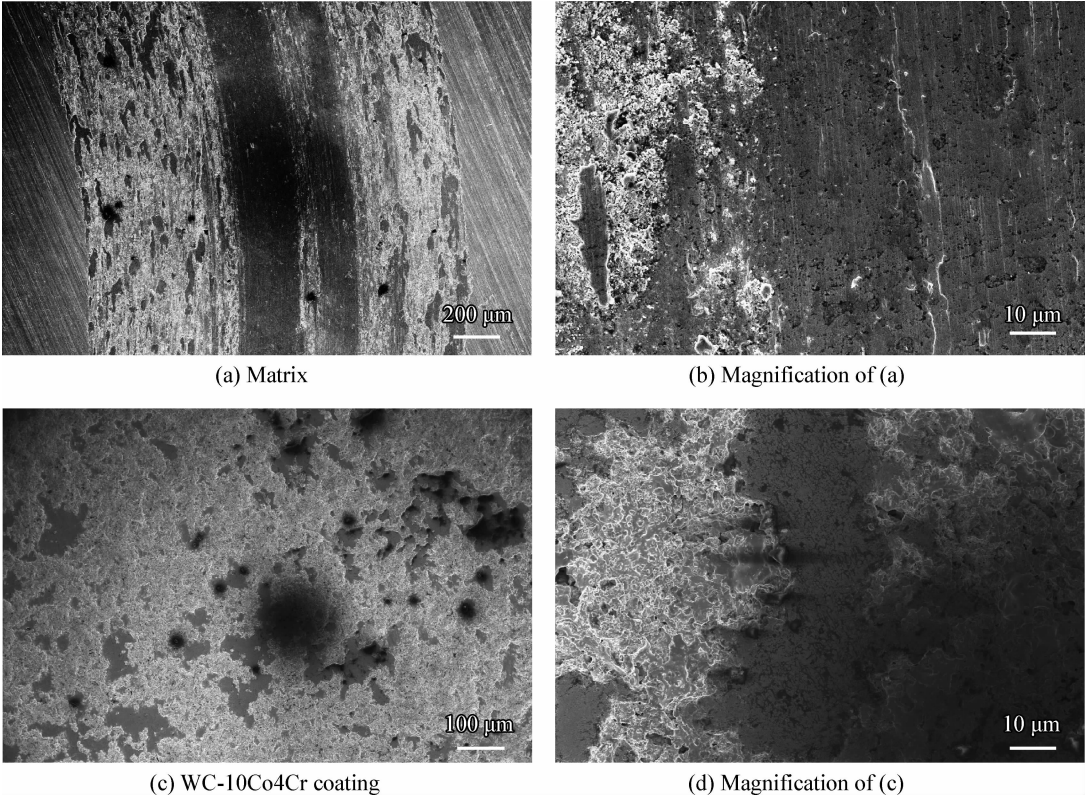


图 5 基体和 WC-10Co4Cr 涂层在室温下的表面磨痕形貌

Fig. 5 Grinding crack morphologies of the matrix and WC-10Co4Cr coating at room temperature

2.4 400℃下涂层的摩擦学性能

图 6 为未处理的马氏体不锈钢试样和经过热喷涂处理后的试样在 400℃干摩擦条件下的摩擦因数随时间变化的关系曲线。如图中所示，

在初始跑合阶段（大约为 3 min），基材的摩擦因数随对磨时间逐渐增大到 0.9 左右。20 min 后不锈钢基体开始进入稳定磨损阶段，稳定阶段的摩擦因数约在 0.95 左右。经热喷涂处理后试样

的摩擦因数在跑和阶段随打磨时间急剧增加,摩擦因数从 0.3 增大到 0.8 左右。随着时间,摩擦磨损曲线呈规律性变化。从摩擦因数的变化情况来看,在马氏体不锈钢基体上进行热喷涂 WC-10Co4Cr 大幅降低了基体的摩擦因数。

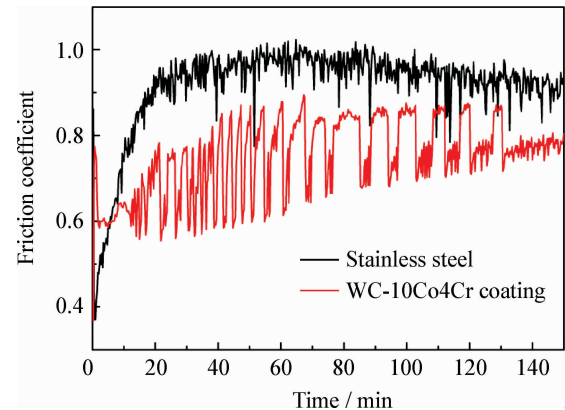


图 6 马氏体不锈钢基体与 WC-10Co4Cr 涂层在 400 ℃ 下的摩擦因数
Fig. 6 Friction coefficient of the martensitic stainless steel matrix and WC-10Co4Cr coating at 400 ℃

表 4 为 WC-10Co4Cr 喷涂试样和基体在 400 ℃ 下的磨损失重。马氏体不锈钢基体的平均

失重量为 28.32 mg, WC-10Co4Cr 涂层磨损后平均失重量为 1.60 mg。设不锈钢基体的磨损率为 1, 以失重量为基准, 则 400 ℃ 下涂层的相对磨损率为 0.056 50。由此可见, 在 400 ℃ 下涂层对基体的耐磨性能仍有较大的改善, 但相对于室温条件下, 涂层的抗磨损性能有所下降。

表 4 不同试样在 400 ℃ 下的磨损量和相对磨损率
Table 4 Wear volume and relative wear rate of the samples at 400 ℃

Samples	Weight loss/ mg	Average value/ mg	Relative wear rate
Matrix	27.80	28.32	1
	28.01		
	29.15		
WC-10Co4Cr coating	1.54	1.60	0.056 50
	1.65		
	1.62		

图 8 是马氏体不锈钢基材和高焓等离子喷涂 WC-10Co4Cr 涂层处理后的试样 400 ℃ 干摩

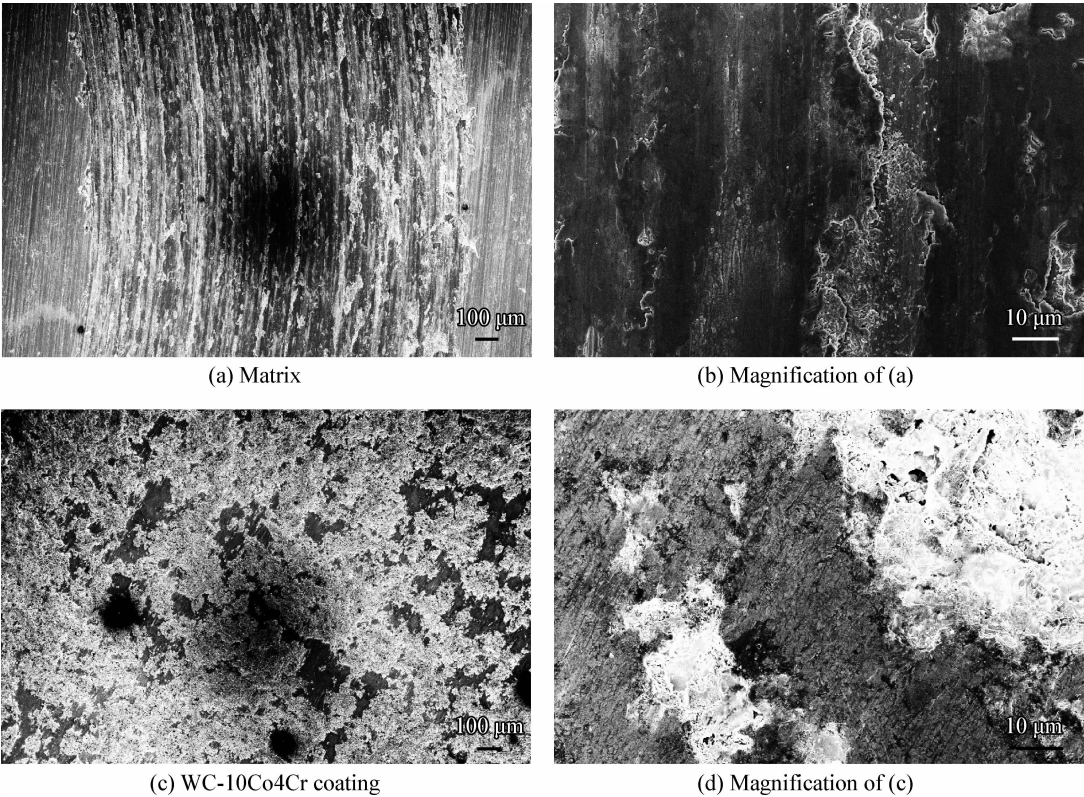


图 8 基体和 WC-10Co4Cr 涂层在 400 ℃ 下的表面磨痕形貌

Fig. 8 Grinding crack morphologies of the matrix and WC-10Co4Cr coating at 400 ℃

擦条件下的表面磨痕形貌。从图 8(a)(b)中可以看出磨痕表面形貌明显分为两部分,其中磨痕中心部分主要为层状结构,这是由于在 400 ℃时不锈钢发生明显软化,粘着趋势上升,以剥层的方式不断脱落磨屑,经过持续的热压结和冷焊被胶合在一起,形成磨痕中心部位层状的磨削结合体。磨痕的边缘区域主要为磨粒磨损引起的犁沟。这可能是由于在 400 ℃时不锈钢被不断氧化,形成 Fe_2O_3 硬质颗粒^[19],在持续磨损过程中由于无法与磨削胶合在一起,被挤压到磨痕的边缘部位,引起磨粒磨损的发生。由图 8(c)(d)可以看出,在 400 ℃下的摩擦磨损试验后,热喷涂处理后试样表面出现磨削的痕迹,还存在存在凹坑。随着温度的升高,其粘着趋势上升不明显,磨屑生成少。与基体相比,涂层中 WC、 W_2C 等硬质相搭建的耐磨骨架相对结实。表面生成的氧化膜层韧性好,不易破裂产生大量磨粒,降低了磨粒磨损发生的几率。但在高温条件下,涂层的相界面更容易弱化,抗高温断裂的抗力降低,在载荷的不断作用下,涂层中的孔隙、微裂纹等缺陷或者界面处容易产生显微裂纹并扩展,导致涂层的局部剥落,进而形成了凹坑。

3 结 论

(1) 利用高焓等离子在马氏体不锈钢基体成功制备微米级 WC-10Co4Cr 涂层,涂层结构致密与基体结合良好,涂层的硬度 1 274.6 HV_{0.3},较基体提高了 3.57 倍。

(2) 室温下,WC-10Co4Cr 涂层具有较低的摩擦因数,涂层与不锈钢基体的相对磨损率为 0.035 76。基体的磨损机制主要以粘着磨损和磨粒磨损为主。WC-10Co4Cr 涂层其磨损机制主要以微切削为主。

(3) 400 ℃条件下,WC-10Co4Cr 涂层仍具有较低的摩擦因数,涂层与不锈钢基体的相对磨损率为 0.056 50。不锈钢基体磨痕中心位置主要以粘着磨损和剥层为主,磨痕边缘部位主要以磨粒磨损为主。WC-10Co4Cr 涂层试样的磨损机制以磨粒磨损为主,并伴随有剥层现象。

参考文献

[1] 马素媛,陈瑞,贺笑春,等. 0Cr13Ni4Mo 马氏体不锈钢表层的喷丸强化 [J]. 金属学报, 2005, 41(1): 28-32.
Ma S Y, Chen R, He X C, et al. Shot peening induced

strengthening of the surface layer of martensite stainless steel 0Cr13Ni4Mo [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41 (1): 28-32 (in Chinese).

[2] 周克崧,邓春明,刘敏. 超音速火焰喷涂 WC 涂层替代电镀锌:疲劳和摩擦磨损性能 [J]. 中国工程科学, 2009, 11(10): 48-53.
Zhou K S, Deng C M, Liu M. WC coatings as candidate to hard chrome plating characterization of fatigue and friction and wear [J]. Engineering Sciences, 2009, 11(10): 48-53 (in Chinese).

[3] 解明祥,张世宏,李明喜,等. 超音速火焰喷涂 Cr_3C_2 -25NiCr 涂层高温摩擦磨损性能 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33(S2): 129-133.
Xie M X, Zhang S H, Li M X, et al. High temperature wear resistance of HVOF sprayed Cr_3C_2 -25NiCr coating [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(S2): 129-133 (in Chinese).

[4] 郑毅,郑卫刚,吕松. 超音速火焰喷涂碳化钨涂层与电镀硬铬镀层的对比研究 [J]. 机械制造, 2013, 51(8): 86-88.
Zhen Y, Zhen W G, Lv S. Study on HVOF-deposited WC coating as alternative for hard chromium plating [J]. Machinery, 2013, 51(8): 86-88 (in Chinese).

[5] 王海军. 热喷涂材料及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 122-135.
Wang H J. Thermal spray materials and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 122-135 (in Chinese).

[6] Han B O, Lavernia E J, Lee Z, et al. Deformation behavior of bimodal nanostructured 5083 Al alloys [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2005, 36(4): 957-965.

[7] 王世兴,袁涛,詹华,等. 不同结构等离子喷涂热障涂层的性能研究 [J]. 表面技术, 2013, 42(1): 21-24, 28.
Wang S X, Yuan T, Zhan H, et al. Research on properties of plasma sprayed thermal barrier coatings with different microstructure [J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 21-24, 28 (in Chinese).

[8] 崔永静,王长亮,汤智慧,等. 超音速火焰喷涂 WC-17Co 涂层微观结构与性能研究 [J]. 材料工程, 2011(11): 85-88, 96.
Cui Y J, Wang C L, Tang Z H, et al. Microstructure and performance of WC-10Co coatings fabricated by high velocity oxy-fuel spraying [J]. Journal of Materials Engineering, 2011(11): 85-88, 96 (in Chinese).

[9] 王永兵,刘湘,祁文军,等. 热喷涂技术的发展和应 [J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(7): 52-55.
Wang Y B, Liu X, Qi W J, et al. Development and application of thermal spraying [J]. Electroplating and Finishing, 2007, 26(7): 52-55 (in Chinese).

[10] 谢兆钱,王海军,郭永明,等. 超音速等离子喷涂超细 WC-12Co 涂层的性能 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(5): 54-58.
Xie Z B, Wang H J, Guo Y M. Performance of ultrafine

WC-12Co coatings sprayed supersonic plasma spraying [J]. China Surface Engineering, 2010, 23(5): 54-58 (in Chinese).

[11] 王海军, 蔡江, 韩志海. 超音速等离子与 HVOF 喷涂 WC-Co 涂层的冲蚀磨损性能研究 [J]. 材料工程, 2005(4): 50-54.

Wang H J, Cai J, Han Z H. Study on erosion wear of WC-Co coatings prepared by supersonic plasma spray and HVOF spray [J]. Journal of Materials Engineering, 2005(4): 50-54 (in Chinese).

[12] 黄新春, 朱佳, 冀晓鹏, 等. WC-10Co-4Cr 粉末及涂层性能研究 [J]. 热喷涂技术, 2010, 2(2): 7-10.

Huang X Q, Zhu J, Ji X J, et al. Study on properties of WC-10Co-4Cr powder and coating [J]. Thermal Spray Technology, 2010, 2(2): 7-10 (in Chinese).

[13] 张光华, 李曙, 刘阳, 等. HVOF 喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层的砂浆冲蚀行为 [J]. 中国表面工程, 2007, 20(4): 16-22, 28.

Zhang G H, Li S, Liu Y, et al. Slurry erosion behavior of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coatings [J]. China Surface Engineering, 2007, 20(4): 16-22, 28 (in Chinese).

[14] 李淑青, 巩水利, 李其连. 等离子与激光复合热源喷涂 WC-CoCr 涂层组织性能研究 [J]. 核技术, 2010, 33(12): 913-917.

Li S Q, Gong S L, Li Q L. Microstructures and performances of the WC-10Co4Cr coatings deposited by laser hybrid plasma spraying technology [J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(12): 913-917(in Chinese).

[15] Harada Y. Recent development of thermal spraying technology and its applications [J]. Materia Japans, 1992, 31(5): 413-421.

[16] Bhushan B. Introduction to tribology [J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1976, 13(1): 76-81.

[17] Xiu-Yan L I, Tang B, Wang H, et al. Zr-N surface alloying layers fabricated in pure titanium substrates by plasma surface alloying [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(6): 1628-1632.

[18] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.

[19] 史培阳, 刘承军, 姜茂发. 冷却制度对 430 不锈钢氧化层结构的影响 [J]. 工业加热, 2011, 40(2): 49-51.

Shi P Y, Liu C J, Jiang M M. Effect of cooling condition on structure of 430 stainless steel [J]. Industrial Heating, 2011, 40(2): 49-51 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)