

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.05.011

煤油流量对HVOF铁基非晶涂层组织与性能的影响*

龚玉兵¹, 王善林¹, 聂贵茂², 李宏祥³, 陈玉华¹

(1. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 南昌 330063; 2. 江西省电力设备总厂, 南昌 330012; 3. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以工业原材料制备的FeCoCrMoCBY非晶粉末为喷涂材料, 采用超音速火焰喷涂(HVOF)制备铁基非晶合金涂层。通过X射线衍射仪(XRD)、差示扫描热仪(DSC)、扫描电子显微镜(SEM)、维氏显微硬度计等测试方法, 探讨煤油流量对涂层显微组织、微观结构及显微硬度的影响, 并分析涂层与316 L不锈钢在1 mol/L HCl溶液中的动态极化特征。结果表明: 涂层与基体结合良好, 呈现典型的层状结构, 非晶含量高, 表现出比316 L不锈钢更高的耐腐蚀性能。其它参数一定时, 煤油流量越高, 涂层致密度越高, 非晶含量先增多后减少, 显微硬度先增大后减小; 当氧气流量为50 m³/L, 煤油流量为26 L/h时, 涂层非晶含量最高, 为99.4%, 孔隙率为1.51%, 自腐蚀电流密度低, 为5.62×10⁻⁶ A/cm², 自腐蚀电位为-0.36 V, 耐腐蚀性能表现最佳。

关键词: 超音速火焰喷涂; 铁基非晶合金涂层; 煤油流量; 显微组织; 耐腐蚀性

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)05-0087-08

Effects of Kerosene Content on Microstructure and Properties of HVOF Fe-based Amorphous Coatings

GONG Yu-bing¹, WANG Shan-lin¹, NIE Gui-mao², LI Hong-xiang³, CHEN Yu-hua¹

(1. National Defence Key Disciplines Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063; 2. Jiangxi Province Electric Power Equipment Factory, Nanchang 330012; 3. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Using the spray materials of FeCoCrMoCBY amorphous powder with industrial raw materials, the Fe-based amorphous coating was fabricated by high velocity oxy-fuel spraying. The effect of kerosene content on microstructure and microhardness of the coatings was investigated by X-ray diffraction, differential scanning calorimetry, scanning electron microscope and vickers microhardness tester, respectively. The corrosion resistance of the coatings was studied by potentiodynamic polarization test in HCl solution of 1 mol/L. The results show that the coatings exhibit good adhesion with the substrate, typical lamellar structure, high amorphous content, and more excellent corrosion resistance than 316 L stainless steel. With the increase of kerosene content, the coating density increases, its amorphous content and microhardness first increase and then decrease when other parameters are fixed. When the oxygen flow is 50 m³/L and kerosene content is 26 L/h, the coating amorphous content attains the highest, which is 99.4%. The porosity is 1.51%, and the low corrosion current density and high corrosion potential are about 5.62×10⁻⁶ A/cm² and -0.36 V, respectively. Thus, the coatings show excellent corrosion resistance.

Keywords: high velocity oxy-fuel; Fe-based amorphous alloy coating; kerosene content; microstructure; corrosion resistance

收稿日期: 2016-04-30; 修回日期: 2016-07-14; 基金项目: *国家自然科学基金(51461031); 江西省教育厅基金(GJJ150733); 江西省科技厅科技合作项目(20161BBH80031)

通讯作者: 王善林(1977—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 铁基非晶材料、特种连接技术; Tel: (0791) 8386 3023; E-mail: slwang70518@nchu.edu.cn

网络出版日期: 2016-09-30 13:52; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160930.1352.002.html>

引文格式: 龚玉兵, 王善林, 聂贵茂, 等. 煤油流量对HVOF铁基非晶涂层组织与性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 87-94. GONG Y B, WANG S L, NIE G M, et al. Effects of kerosene content on microstructure and properties of HVOF Fe-based amorphous coatings[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 87-94.

0 引言

铁基非晶合金是一种类似玻璃结构的新型金属材料，其具有超高的强度及硬度、优异的耐磨耐蚀性能、突出的软磁性性能，且成本较低^[1-3]。但是，制备尺寸受限和断裂脆性，约束了块体铁基非晶合金的工程应用^[4]。然而，铁基非晶涂层可以解决其尺寸和脆性问题，突破其应用瓶颈，其中美国已经研制出高耐蚀的铁基非晶涂层并应用于核废料储罐中^[5-6]。近年来，热喷涂技术是制备铁基非晶涂层最常用的方法，通常包括火焰喷涂^[7]、电弧喷涂^[8]、等离子喷涂^[9]、超音速火焰喷涂(High velocity oxygen fuel, HVOF)^[10]。目前，HVOF制备的涂层具有孔隙率低、氧化物含量相对较少、硬度高等优点，表现出优异的防腐耐磨性能^[11-12]，而被广泛应用在铁基非晶涂层的制备过程中。但是，在实际生产中，存在涂层非晶含量低、致密性不足等主要问题。吴玉萍^[13]采用HVOF分别制备了FeCrSiB和FeCrSiBMn涂层，结果发现，涂层结构致密，孔隙率都为0.65%，但涂层中存在不少 α -Fe(Cr)固溶体及FeB等结晶相。Wang等^[14]采用HVOF制备的铁基非晶涂层中非晶含量高达74.9%，然而孔隙率为1.25%。

研究表明，喷涂工艺参数对涂层的质量有重要的影响。Liu等^[15]研究了不同氢气流量对等离子喷涂制备铁基非晶涂层的性能影响，结果表明氢气流量越大，涂层晶化程度越高，而耐腐蚀性越好。米鹏博等^[16]发现随等离子喷涂功率增加，涂层晶化程度增加。高振等^[5]发现随喷涂功率和时间的增加，涂层孔隙率下降，而非晶相含量相应减少。Komaki^[17]研究了基板温度对热喷涂制备Fe基非晶涂层的影响，结果表明，基板温度在325~400℃范围，随着温度的升高，非晶相含量增加。可见，研究工艺参数对HVOF制备孔隙率低、非晶含量高的铁基非晶涂层具有重要意义。文中采用HVOF制备铁基非晶合金涂层，研究不同煤油流量对铁基非晶涂层组织与性能的影响，以及在1 mol/L HCl介质下的腐蚀行为。

1 试验材料与方法

试验基体材料为Q235钢，尺寸为100 mm×100 mm×3 mm；喷涂材料为氩气雾化法制备的铁基非晶粉末(中南大学粉末冶金研究所)，其成分为

Fe_{44.72}Co_{8.57}Cr_{14.95}Mo_{26.9}C_{3.2}B_{1.28}Y_{3.01}(质量分数，%)，其形貌如图1所示。粉末大部分为颗粒状，尺寸约为50~70 μm，且表面圆滑，说明非晶粉末具备较好的流动性，有利于热喷涂。喷涂前，使用9060型喷砂机对基体材料进行喷砂处理，喷砂材料为700 μm(24目)的白刚玉，工作压力为0.65 MPa。试验采用HV-80-JP型超音速火焰喷涂设备，其中煤油为燃料，氧气为助燃剂，氮气为送粉气体。喷涂过程中，其它参数不变，改变煤油流量，具体参数如表1所示。不同煤油流量得到的涂层标记为涂层1、2、3和4。

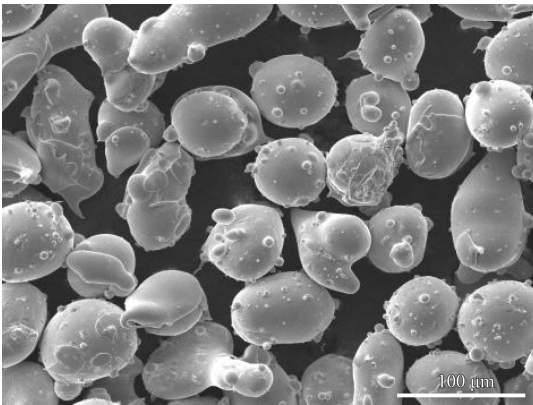


图1 铁基非晶粉末的形貌

Fig. 1 Morphology of the Fe-based amorphous powders

表1 超音速火焰喷涂工艺参数

Table 1 Spraying parameters of HVOF process

Parameters	Levels			
	1	2	3	4
Oxygen flow / (m ³ ·L ⁻¹)	50	50	50	50
Kerosene flow / (L·h ⁻¹)	23	26	29	32
Powder feed rate / (g·min ⁻¹)	72	72	72	72
Spraying distance / mm	380	380	380	380
Gun traverse speed / (m·h ⁻¹)	10	10	10	10

采用Empyrean型X射线衍射仪XRD对喷涂粉末与涂层进行物相分析(Cu靶，衍射角范围20°~90°)；采用404F3型差示扫描热仪DSC对喷涂粉末与涂层进行热分析(从室温加热到1 173 K，升温速率20 K/min，氩气保护)涂层非晶相对含量；采用WT-401MVD型数显显微硬度计测量涂层的硬度分布，加载载荷为100 g，加压时间为10 s，测量间距为0.05 mm；采用SV3400型环境扫描电镜SEM观察喷涂粉末与涂层显微组织及腐蚀后形貌，并使用Image-Pro Plus 6.0软件计算其孔隙率；

试验共测 3 组试样, 然后取平均值。采用 CHI650E 型电化学工作站测试涂层在 1 mol/L 的 HCl 溶液中的动电位极化曲线, 其中试样为工作电极, Pt 电极为辅助电极, 饱和甘汞电极为参比电极。测试前, 将试样在 HCl 溶液中浸泡 30 min 至开路电位稳定; 测试时, 初始电位为 -1.0 V, 终止电位为 1.5 V, 扫描速度为 1 mV/s。

2 结果与讨论

2.1 涂层显微组织与形貌

图2为粉末与涂层的XRD图谱。由图2可知, 涂层与粉末在衍射角 2θ 为 44° 左右均出现明显的“馒头状”漫散射峰, 没有发现衍射峰的存在, 说明粉末在X射线分辨率下为完全非晶态结构, 而煤油流量为 23 L/h, 涂层在漫散射峰上叠加了一些晶化衍射峰, 经标定为 FeO; 煤油流量为 26 L/h, 无任何尖锐的衍射峰存在; 当增加到 29 L/h, 漫散射峰上开始出现较弱的衍射峰, 为 α -Fe; 继续增加到 32 L/h 时, 涂层衍射峰增强, 且数量增多; 表明

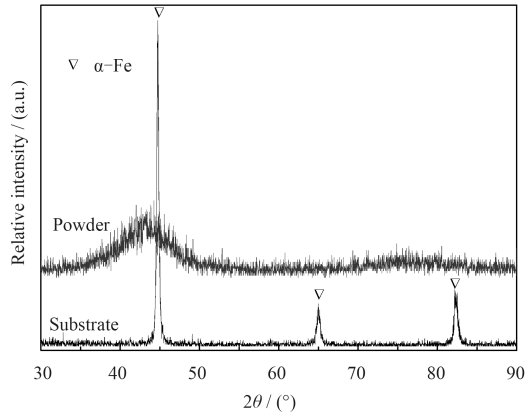
煤油流量 26 L/h 制备的涂层在 XRD 分辨率下为完全非晶态。

煤油流量较低时, 氧气流量相对偏高, 环境中存在过剩的氧气, 使得粉末颗粒表面熔化时发生氧化, 而 Fe 易于氧气反应生成 FeO 氧化物相^[14]。涂层中非晶相一部分源于颗粒内部未熔部分, 另一部分则是 HVOF 提供给熔融颗粒快速冷却而形成^[12]; 随煤油流量增加, 燃烧室压力增加, 温度升高, 喷涂热量增加, 粉末颗粒所吸收的热输入量增加, 涂层冷却速度下降, 当所吸收的热输入量超过临界值, 即冷却速度达不到非晶临界冷却速度时, 熔融颗粒外层直接发生晶化; 安宇龙等^[9, 15]认为较弱的结晶峰反映了非晶相中形成细小晶粒或纳米晶; 温度越高, 涂层不易散热, 导致先前喷涂在基体上的熔滴未来得及冷却, 立刻被后面熔滴加热, 即产生了热处理的作用, 从而先形成的涂层由部分非晶态向晶体转变^[12-13]。

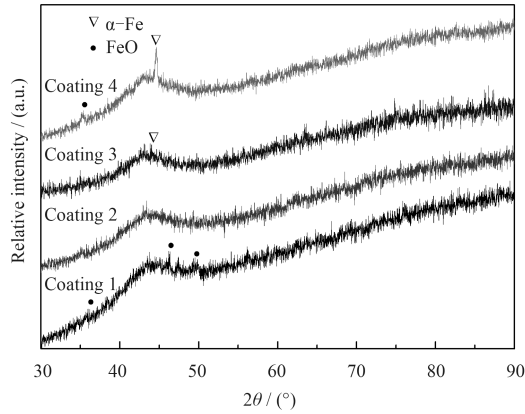
图3为粉末与不同煤油流量下涂层的差热分析(DSC)曲线。从DSC曲线中可以看出, 涂层与粉末在 615 $^\circ\text{C}$ 与 750 $^\circ\text{C}$ 温度区间内均表现出 3 个明显的晶化峰, 反映了它们之间具有很相似的热行为, 且其起始的晶化温度均在 615 $^\circ\text{C}$ 左右, 表明粉末喷涂后的晶体结构基本保持不变。表2列出了粉末与涂层的各种热力学参数, 包括晶化温度 T_x 以及总晶化放热焓 $\Delta H_{x, \text{total}}$ 。从表2中可以看出, 不同煤油流量下, 涂层的焓变总值有明显差异, 说明涂层中非晶含量不同。文中采用的铁基非晶粉末为完全非晶态, 根据涂层中非晶含量 P_{coating} 计算公式:

$$P_{\text{coating}} = \Delta H_{\text{coating}} / \Delta H_{\text{powder}} \times 100\%^{[9]} \quad (1)$$

式中, P_{coating} 为涂层相对粉末的非晶含量百分



(a) Powder and substrate



(b) Coatings

图 2 粉末、基材及涂层的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of the powder, substrate and coatings

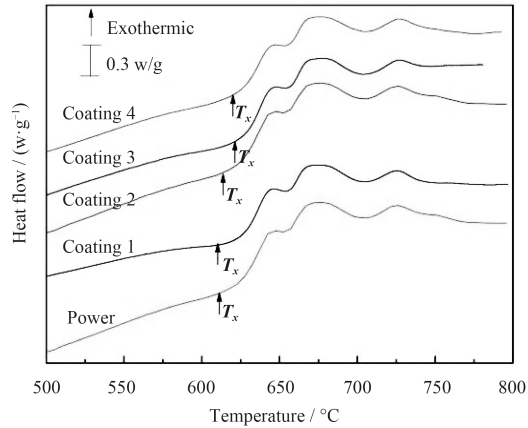


图 3 粉末与涂层的DSC曲线

Fig. 3 DSC curves of the powder and coatings

比, $\Delta H_{\text{coating}}$ 为涂层晶化后释放的总热焓, ΔH_{powder} 为粉末的总热焓。由上述公式可得, 煤油流量为 23、26、29 和 32 L/h 时, 涂层非晶质量分数分别为 82.7%、99.4%、82.4% 和 77.9%。

图 4 为不同煤油流量下涂层表面及横截面 SEM 形貌。由图 4 可以看出, 涂层厚度约为 250 μm , 涂层的截面形貌均呈典型的层片状结构, 涂层与基体结合界面为锯齿状, 即典型的机

表 2 粉末与涂层的热力学参数

Table 2 Thermal parameters of the powder and coatings			
Samples	$T_x / ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{x, \text{total}} / (\text{w} \cdot \text{g}^{-1})$	Amorphous rate / %
Powder	616	100.9	100
Coating 1	615	83.44	82.7
Coating 2	618	100.3	99.4
Coating 3	622	83.19	82.4
Coating 4	621	78.65	77.9

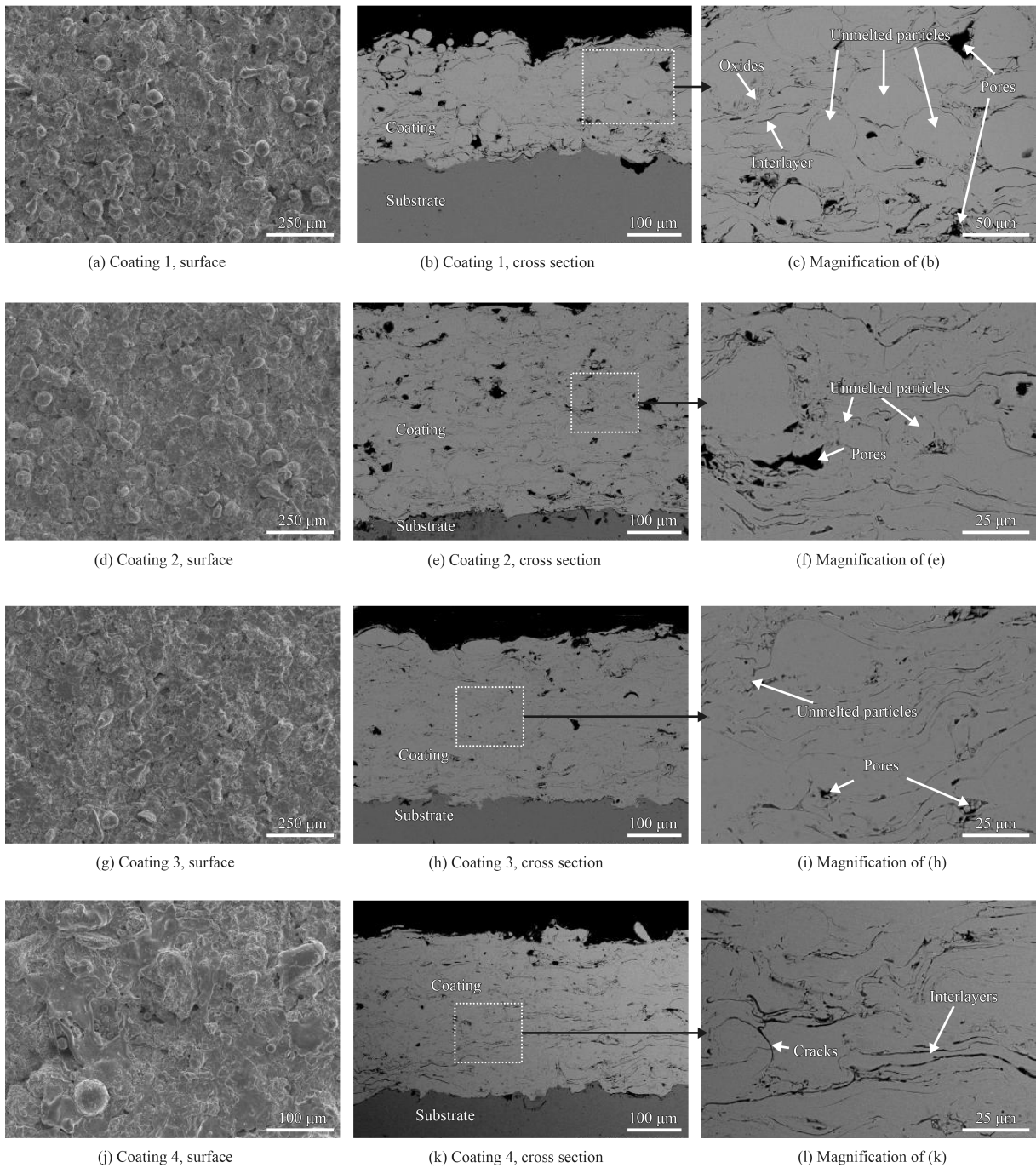


图 4 涂层表面及横截面形貌

Fig. 4 Surface and cross section morphologies of the coatings

械咬合，涂层与基体界面结合较好，未见明显的孔洞、裂纹等缺陷。说明该喷涂工艺达到了一定效果，喷涂前对基体的粗化处理较好，基体表面有一定的粗糙度，喷涂的粒子与基体间有牢靠的接触咬合。随煤油流量的增加，涂层中未熔颗粒减少，孔隙率减少，依次为1.89%、1.51%、1.19%和0.98%。煤油流量为23 L/h，涂层中未熔颗粒最多，致密度最差；煤油流量为26 L/h，涂层中的孔隙大多数出现在未熔及半熔状态下的颗粒附近；煤油流量为29 L/h，涂层孔隙率明显减少，颗粒间结合状态良好；煤油流量为32 L/h，涂层孔隙最少，致密度最高，颗粒呈明显的扁平状且相互搭接成明显的层状结构，但出现微裂纹。

HVOF喷涂阶段，粉末被送入燃烧室前侧，受热立即变成熔融态或半熔融态，由高速火焰气流将其快速喷到经预处理的基体表面，然后极快冷却凝固，形成涂层。煤油流量为23 L/h，燃烧室温度低，喷涂粉末颗粒吸收的热量不足，导致颗粒

出现未熔现象较严重，颗粒间难于紧密结合，涂层孔隙率高。煤油流量增加，燃烧室温度升高，喷涂热量增加，颗粒所吸收的热输入量增加，熔化更充分，且获得的速度更快，熔融态颗粒加速喷撞在基体表面产生塑性变形；若颗粒熔化状态不佳，喷射在基体上的颗粒不能发生塑性变形，在沉积过程中，未能充分变形的颗粒相互搭接后易出现孔隙。温度升高，涂层中内应力增大，应力集中产生裂纹^[16]。

图5为涂层1不同区域的EDS能谱。由图5(a)可以发现，涂层中大部分为灰白色区域，且与喷涂粉末成分相近，即为非晶相^[18]；颗粒变形层之间的暗灰色区域含氧量较高，即为氧化物。对涂层中颗粒变形层进行了EDS成分分析，线扫描方向沿A到B，如图5(b)。从EDS线性扫描的结果可发现变形层界面的氧元素含量有明显的差别，且变形层间距越宽氧含量越高，表明这种界面成分含有氧化物，变形层结合越紧密氧化程度越低。

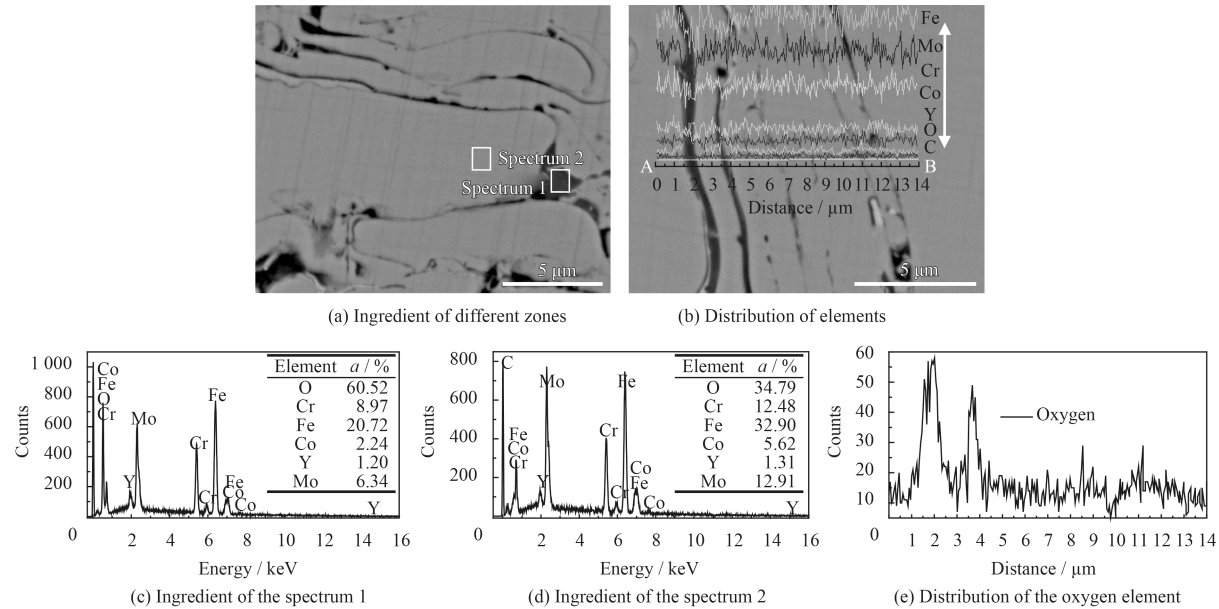


图 5 涂层1不同区域的能谱分析

Fig. 5 EDS spectra of different zones in coating 1

2.2 涂层显微硬度与腐蚀性能

图6为4种涂层横截面的显微硬度。可以看出，随着煤油流量的增加，涂层显微硬度先增加后减小，且煤油流量从23 L/h到26 L/h，硬度值增加显著，而从26 L/h到29 L/h，增加缓慢。煤油流量为23 L/h时，涂层硬度最小，仅为627 HV_{0.1}，当煤油流量增加到29 L/h，涂层硬度最大，最大值可

达1 139 HV_{0.1}。煤油流量为23 L/h，涂层中未熔颗粒最多，孔隙率最大，且氧化相较多，故涂层硬度低；随煤油流量的增加，涂层中颗粒熔化较好，涂层致密度增加，且煤油流量为26 L/h，涂层非晶含量最高，故涂层硬度明显增加；煤油流量为29 L/h，涂层非晶含量降低，但致密度增加，且非晶相中形成了细小晶粒或纳米晶，因晶粒细

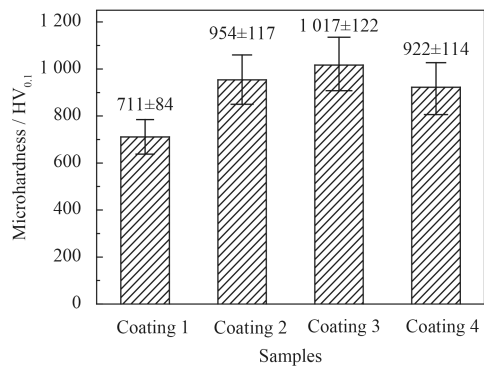


图6 涂层横截面的显微硬度

Fig. 6 Microhardness of the coating cross section

小，晶界较多，将阻碍位错运动，对涂层具有强化作用^[18]，故涂层呈现较高的硬度。煤油流量继续增加到32 L/h时，温度升高，为晶粒长大及生成提供了条件，非晶相快速转变为晶化相，导致硬度发生改变。Yang等^[19]认为涂层在纳米晶晶界强化作用下，硬度增加；当环境温度超过晶化温度，晶粒经过长大变粗，晶界强化减弱，涂层硬度降低。

图7为4种涂层及316 L不锈钢分别在1 mol/L HCl溶液中的动电位极化曲线。可以看出，涂层都表现出较明显的钝化特征，钝化膜破裂电位相近，约为1.1 V，表明该非晶粉末制备的涂层抵抗局部腐蚀性能强。涂层腐蚀电流密度随着腐蚀电位升高而缓慢升高，极化曲线中0至0.5 V区间腐蚀电流并没有明显的变化，说明此时形成的了稳定钝化膜。

由图7得到的腐蚀电化学参数如表3所示。可以看出，涂层2自腐蚀电流密度最低，为 5.62×10^{-6} A/cm²，其次为涂层4，为 2.45×10^{-5} A/cm²，涂

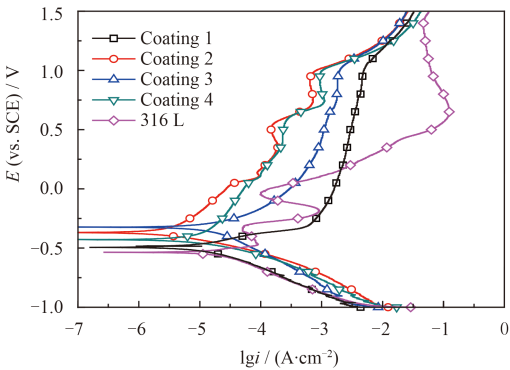


图7 涂层在1 mol/L HCl溶液中的动电位极化曲线

Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves of the coatings in HCl solution of 1 mol/L

表3 电化学参数

Table 3 Electrochemical parameters		
Samples	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$J_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Coating 1	-0.49	4.88×10^{-5}
Coating 2	-0.36	5.62×10^{-6}
Coating 3	-0.33	4.28×10^{-5}
Coating 4	-0.41	2.45×10^{-5}
316 L	-0.54	7.76×10^{-5}

层3及涂层1自腐蚀电流密度最高，分别为 4.28×10^{-5} 、 4.88×10^{-5} A/cm²。此外，4种涂层自腐蚀电位分别为-0.49、-0.36、-0.33和-0.41 V，涂层1自腐蚀电位比其它涂层低，故发生腐蚀的倾向高。而316 L自腐蚀电位仅为-0.54 V，低于涂层，表明其发生腐蚀的倾向最高；且未见明显的钝化区间，在较低的电位就出现了活性溶解，表明其在1 mol/L HCl溶液中耐蚀性能不如涂层。

图8为4种涂层电化学测试后SEM形貌(箭头所指黑色区域为腐蚀坑)。由图8可以看出，涂层1腐蚀最严重，腐蚀大多发生在未熔颗粒之间的孔隙处；其次，涂层3腐蚀较严重，基本发生在颗粒中；涂层4腐蚀状况较好，腐蚀发生在未熔颗粒与熔化颗粒的交界处；涂层2表面良好，基本未被腐蚀，其结果与图7一致。

涂层合金成分中含有较高的Cr(15%)元素，以及含有较高的Mo(27%)元素，Cr能够保证形成钝化膜，Mo促进钝化膜的生成，此外合金中的Co、B、Y同样增强钝化膜的稳定性，阻碍腐蚀的进一步扩散^[20-21]，故涂层具有较强的耐腐蚀性能。Wang等^[22]研究了Cr元素对Fe基非晶合金抗腐蚀性能的影响，证实适量Cr对提高Fe非晶合金抗腐蚀性能有显著作用。煤油流量为23 L/h，涂层未熔颗粒多，孔隙率最高，且多为贯穿孔，孔隙的存在，使得生成的钝化膜不能连成一体，从而无法阻碍腐蚀介质与基体进一步接触；孔隙处贫Cr以及贯穿孔多为涂层抗腐蚀能力差的主要原因^[22-23]。煤油流量为26 L/h，虽然涂层孔隙率较高，但非晶含量最高，其表面原子活性高，且孔隙多为孤立的，使得涂层表面整体生成钝化膜的能力强、速度快，且钝化膜的厚度及稳定性与涂层非晶含量及结构密切相关，即使钝化膜遭到破坏，也会迅速形成^[12, 19]，因此，其耐腐蚀性能最好。煤油流量为29 L/h，虽然涂层非晶含量较低，但孔隙率较

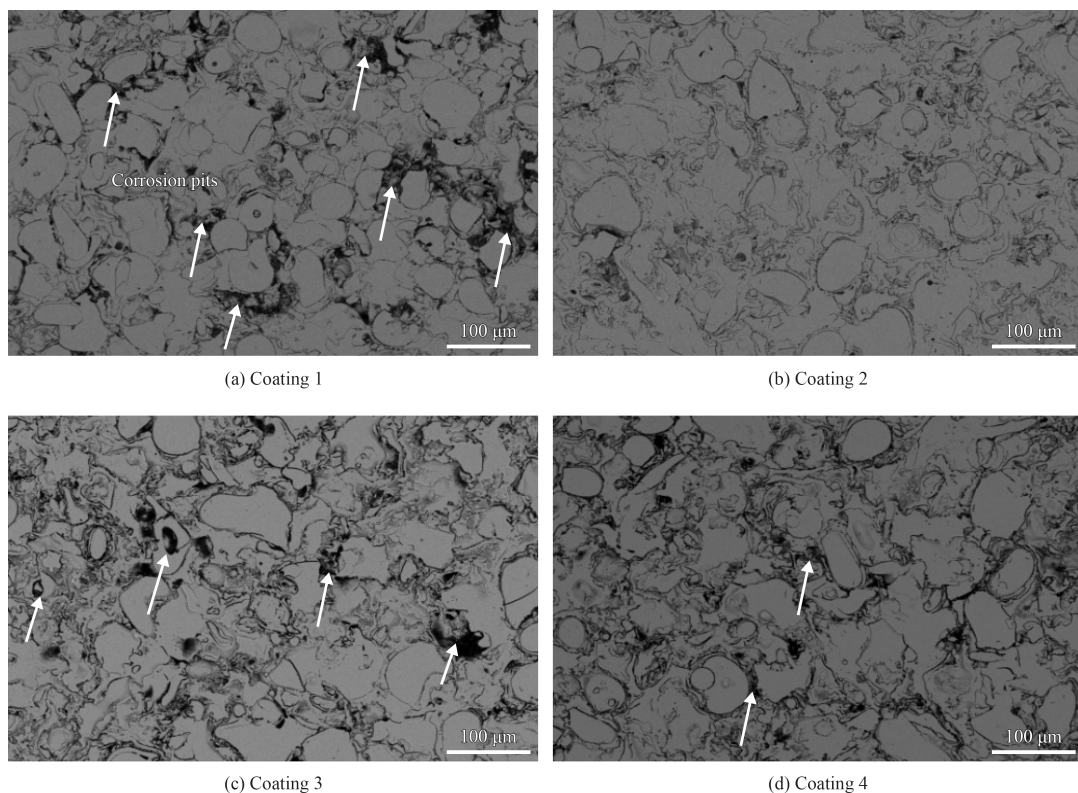


图8 涂层在1 mol/L的HCl溶液中电化学测试后表面形貌

Fig. 8 Surface morphologies of the coatings after electrochemical measurement in 1 mol/L HCl solution

低, 且析出纳米晶, 对涂层抗腐蚀能力具有一定的作用^[24]。煤油流量为32 L/h, 涂层非晶含量最低, 但涂层中大部分为非晶, 且孔隙率最低, 涂层结构致密, 缝隙腐蚀不易发生, 其表面容易形成稳定且致密的钝化膜^[25], 故涂层腐蚀速率较低。

3 结 论

(1) 基于工业原材料, 通过HVOF技术成功制备了铁基非晶合金涂层, 涂层与基体结合良好, 显典型的层状结构, 非晶含量高, 与316 L不锈钢相比, 在1 mol/L的HCl溶液中表现出优异的耐腐蚀性。

(2) 其它参数一定, 随煤油流量增加, 由于温度升高, 涂层热输入量增加, 孔隙率减少, 致密度提高; 因氧化物及 α -Fe的析出, 非晶含量呈现先增多后减少的趋势, 显微硬度先增大后减小, 最高可达1 139 HV_{0.1}。

(3) 其它参数一定, 当氧气流量为50 m³/L, 煤油流量为26 L/h时, 涂层非晶含量最高, 可达99.4%, 因非晶对涂层钝化膜的形成起主要作用, 耐腐蚀性能表现最强。

参考文献

- [1] WANG S L, YI S. The corrosion behavior of Fe-based bulk metallic glasses in a sulfuric solution at 70 °C[J]. *Intermetallics*, 2010, 18(10): 1950-1953.
- [2] 王一禾, 杨膺善. 非晶态合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 185-190.
WANG Y H, YANG Y S. Amorphous alloys[M]. Beijing: Metallurgical Press, 1989: 185-190 (in Chinese).
- [3] BARON A, SZEWIECZEK D, NAWRAT G. Corrosion of amorphous and nanocrystalline Fe-based alloys and its influence on their magnetic behavior[J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(18): 5690-5695.
- [4] 魏丹丹, 陈庆军, 高雯雯, 等. 铁基大块非晶合金的发展现状[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(S1): 80-85.
WEI D D, CHEN Q J, GAO J W, et al. Current status of Fe-based bulk amorphous alloy research[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(S1): 80-85 (in Chinese).
- [5] 高振, 郝建民, 韩建军, 等. 等离子喷涂工艺对锅炉管用Fe基非晶涂层组织结构和耐蚀性能的影响[J]. *表面技术*, 2015, 44(1): 81-87.
GAO Z, HAO J M, HAN J J, et al. Effect of spray process on the microstructure and corrosion-resistance of Fe-based amorphous coatings obtained by plasma spray on the boiler tubes[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(1): 81-87 (in

- Chinese).
- [6] 王林磊, 梁秀兵, 陈永雄, 等. Fe基非晶纳米晶涂层在油润滑条件下的耐磨损性能[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 45-49.
- WANG L L, LIANG X B, CHEN Y X, et al. Anti-wear properties of Fe-based amorphous and nanocrystalline coating under oil lubrication[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(5): 45-49 (in Chinese).
- [7] MIURA H, ISA S, OMURO K. Production of amorphous Iron-Nickel based alloys by flame-spray quenching and coatings on metal substrates[J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1984, 25(4): 284-291.
- [8] 傅斌友, 贺定勇, 赵力东, 等. 电弧喷涂铁基非晶涂层的结构与性能[J]. 焊接学报, 2009, 34(4): 53-59.
- FU B Y, HE D Y, ZHAO L D, et al. Microstructure and properties of arc sprayed coatings containing Fe-based amorphous phase[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 34(4): 53-59 (in Chinese).
- [9] 安宇龙, 赵晓琴, 周惠娣, 等. 大气等离子喷涂制备制备 Fe基非晶涂层及微观结构表征[J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 64-69.
- AN Y L, ZHAO X Q, ZHOU H D, et al. Preparation and microstructure characterization of atmosphere plasma sprayed Fe-based amorphous coating[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(5): 64-69 (in Chinese).
- [10] WANG S L, CHENG J C, YI S. Corrosion resistance of Fe-based amorphous metallic matrix coating fabricated by HVOF thermal spraying[J]. Transactions Nonferrous of Metals Society of China, 2014, 24: 146-151.
- [11] 马青华. 超音速火焰喷涂制备微晶镍基耐蚀合金涂层[J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 25-29.
- MA Q H. Microcrystal nickel-based corrosion-resistant alloy coating prepared by high velocity oxygen fuel[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(4): 25-29 (in Chinese).
- [12] ZHOU Z, WANG L, WANG F C. Formation and corrosion behavior of Fe-based amorphous metallic coatings by HVOF thermal spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204: 563-570.
- [13] 秦玉娇, 吴玉萍, 郑玉贵, 等. 超音速火焰喷涂FeCrSiB涂层的腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 103-109.
- QIN Y J, WU Y P, ZHENG Y G, et al. Corrosion behavior of FeCrSiB alloy coatings prepared by HVOF thermal spraying[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 103-109 (in Chinese).
- [14] WANG Y, JIANG S L, ZHENG Y G, et al. Effect of processing parameters on the microstructures and corrosion behaviour of high-velocity oxy-fuel (HVOF) sprayed Fe-based amorphous metallic coatings[J]. Materials and Corrosion, 2013, 64(9): 801-900.
- [15] LIU G, AN Y L, GUO Z H, et al. Structure and corrosion behavior of iron-based metallic glass coatings prepared by LPPS[J]. Applied Surface Science, 2015, 258: 5382-5386.
- [16] 米鹏博, 何继宁, 阎殿然, 等. 等离子喷涂制备铁基非晶涂层及其耐磨性[J]. 金属热处理, 2015, 40(3): 15-19.
- MI P B, HE J N, YAN D R, et al. Fe-based amorphous coating prepared by plasma spraying process and its wear resistance[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(3): 15-19 (in Chinese).
- [17] KOMAKI M, MIMURA T, TSUJII S, et al. Influence of substrate temperature on the structure and cohesive/adhesive strength of Fe-Co-Si-B-Nb metallic glass coating films produced by thermal spraying[J]. Materials Transactions, 2012, 53: 2151-2159.
- [18] ZHANG C, CHAN K C, WU Y, et al. Pitting initiation in Fe-based amorphous coatings[J]. Acta Materialia, 2012, 60: 4152-4159.
- [19] YANG Y, ZHANG C, PENG Y, et al. Effects of crystallization on the corrosion resistance of Fe-based amorphous coatings[J]. Corrosion Science, 2012, 59: 10-19.
- [20] WANG Z M, MA Y T, WANG J Q. Influence of yttrium as a minority alloying element on the corrosion behavior in Fe-based bulk metallic glasses[J]. Electrochimica Acta, 2008, 54: 261-269.
- [21] 王勇, 郑玉贵, 王建强, 等. 铁基非晶涂层在NaCl和H₂SO₄溶液中的钝化行为[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 49-56.
- WANG Y, ZHENG Y G, WANG J Q, et al. Passivation behavior of Fe-based amorphous metallic coating in NaCl and H₂SO₄ solutions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(1): 49-56 (in Chinese).
- [22] WANG S L, LI H X, YI S. Effects of Cr contents in Fe-based bulk metallic glasses on the glass forming ability and the corrosion resistance[J]. Materials Chemistry & Physics, 2009, 113(2/3): 878-883.
- [23] ZHANG S D, ZHANG W L, WANG S G, et al. Characterisation of three-dimensional porosity in an Fe-based amorphous coating and its correlation with corrosion behaviour[J]. Corrosion Science, 2015, 93: 211-221.
- [24] CHENG J B, WANG Z H, XU B S, et al. Wear and corrosion behaviors of FeCrBSiNbW amorphous/nanocrystalline coating prepared by arc spraying process[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(5): 1025-1031.
- [25] GUO R Q, ZHANG C, YANG Y, et al. Corrosion and wear resistance of a Fe-based amorphous coating in underground environment[J]. Intermetallics, 2012, 30: 94-99.