

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170215001

磷酸铝铬封孔处理对热喷涂 WC-12Co 涂层耐蚀性的影响

李 乐^{1,2}, 陈汪林¹, 蔡 飞², 张 林², 张世宏^{1,2}

(1. 安徽工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243000; 2. 安徽工业大学 现代表面工程研究中心, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要: 以磷酸铝铬溶液和 Cr_2O_3 粉末为原料制备了一种封孔剂, 并对 WC-12Co 热喷涂涂层进行封孔处理。利用 XRD、SEM、EDS 以及 TG-DSC 分别对磷酸铝铬的物相、封孔前后涂层表面形貌、固化特性和耐热性能进行检测分析。利用动电位极化电化学测试和热震试验分别对封孔前后涂层的抗腐蚀性和固化后的磷酸铝铬层的抗热震性能进行研究。结果表明: 磷酸铝铬的固化温度在 250 °C 左右, 在 700 °C 内体系无任何热效应发生, 材料具有良好的耐热性能。固化后涂层表面致密, 磷酸铝铬对涂层孔隙具有良好的填充作用, 明显降低了涂层的孔隙率。封孔后的涂层具有较高的自腐蚀电位和较小的腐蚀电流密度, 涂层耐蚀性显著提高。在 450 °C 下进行热震试验, 当热震次数一定时(热循环 100 次), 添加填料的磷酸铝铬层的剥落面积低于未添加填料的磷酸铝铬层, 表现出较高的抗热震性能。

关键词: 磷酸铝铬; 封孔剂; 热喷涂涂层; 耐腐蚀

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)04-0056-08

Effects of Chromium-Aluminum-Phosphate Sealing Treatments on Corrosion Resistance of Thermal Sprayed WC-12Co Coatings

LI Le^{1,2}, CHEN Wang-lin¹, CAI Fei², ZHANG Lin², ZHANG Shi-hong^{1,2}

(1. School of Material Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, Anhui; 2. Research Center of Modern Surface and Interface Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, Anhui)

Abstract: The sealant was prepared with the chromium-aluminum-phosphate and the Cr_2O_3 powder. The chromium-aluminum-phosphate sealants were used to seal the thermal sprayed WC-12Co coatings. XRD, SEM, EDS and TG-DSC were used to examine the phases, surface morphologies, curing characteristics and heat resistance of the WC-12Co coatings with and without chromium-aluminum-phosphate sealant, respectively. Potentiodynamic polarization electrochemical test and thermal shock experiment were also used to examine the corrosion resistance and thermal shock resistance of the WC-12Co coatings with and without chromium-aluminum-phosphate films. The results show that the curing temperature is about 250 °C and the sealant has excellent heat resistance below 700 °C. Besides, the chromium-aluminum-phosphate could fill into the pores, reducing the porosity of the coating. The WC-12Co coatings after sealant treatment show higher corrosion potential and smaller corrosion current density, indicating the improved corrosion resistance. After thermal cycling for 100 times under 450 °C, the spalling areas of the sealant layer with Cr_2O_3 powder were smaller than that of the sealant without Cr_2O_3 filler, which showed better thermal shock resistance for the sealant layer with Cr_2O_3 powder.

Keywords: chromium-aluminum-phosphate; sealant; thermal spraying coatings; corrosion resistance

收稿日期: 2017-02-15; 修回日期: 2017-06-06

网络出版日期: 2017-06-14 12:04; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170614.1204.004.html>

通讯作者: 张世宏(1981—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 表面工程; E-mail: tougaoyouxiang206@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51671002); 安徽省科技攻关项目(1501021065)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51671002) and Key Technology Program of Anhui Province (1501021065)

引文格式: 李乐, 陈汪林, 蔡飞, 等. 磷酸铝铬封孔处理对热喷涂 WC-12Co 涂层耐蚀性的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(4): 56-63.

LI L, CHEN W L, CAI F, et al. Effects of chromium-aluminum-phosphate sealing treatments on corrosion resistance of thermal sprayed WC-12Co coatings[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(4): 56-63.

0 引 言

超音速火焰喷涂(HVOF)技术在表面改性技术中占有重要地位, 利用该技术可制备具有较高的结合力、优异的耐磨性、抗氧化性以及耐蚀性的涂层, 广泛应用于各类轧辊、冶金备件和轴类零件的表面修复^[1-3]。尽管 HVOF 技术制备的涂层较致密, 但是孔隙的产生仍然不可避免^[4-5]。在腐蚀环境中, 腐蚀介质可通过孔隙(尤其是通孔)到达基体表面, 从而与涂层以及基体发生化学或者电化学反应从而使涂层结合力降低甚至导致涂层失效。为了提高涂层的耐腐蚀性, 需要对涂层进行封孔处理。

封孔剂封孔是热喷涂涂层常用的行之有效的封孔方法之一, 其具有成本较低、简单易操作等优点。一般用刷子或者喷涂设备将封孔剂涂刷在涂层表面, 随后渗透到涂层孔隙中并经过固化处理形成一层保护膜来隔绝外部腐蚀介质从而实现封孔。与有机封孔剂相比, 无机封孔剂具有良好的耐高温性能, 因此具有良好的应用前景。无机封孔剂中磷酸盐类封孔剂性能优越, 尤其是对 AlPO_4 封孔剂研究较多。研究发现, AlPO_4 封孔剂能够对等离子喷涂氧化涂层进行有效地封孔^[6-7], 从而显著改善其耐蚀性^[8]。Y. Wang^[9]等利用 AlPO_4 封孔剂对 HVOF 铁基非晶态金属涂层进行封孔处理, 发现 AlPO_4 封孔剂具有良好的渗透性并且具有较高的抗点蚀性能。此外, 磷酸盐系列中磷酸铝铬也是一种性能优越的无机粘结剂, 主要是通过向磷酸铝中添加 CrO_3 (铬酸酐)而制得^[10-11]。研究表明, 磷酸铝铬具有较低的固化温度($\leq 250\text{ }^\circ\text{C}$)、较小的固化收缩率、优异的耐热性和热稳定性, 固化后可形成强度较高的无定形网状结构^[10, 12-13], 可作为耐高温无机封孔剂的良好材料。王政阅^[14]等人研究发现, Cr 的加入不仅促进了非晶结构的形成而且加速了磷酸铝的脱水过程, 这都使磷酸铝铬拥有较低的固化温度。目前, 磷酸铝铬作为胶黏剂在透波材料、耐火材料、耐磨材料^[15-16]等领域有广泛的应用, 而很少作为封孔剂应用在热喷涂涂层封孔方面。另外, 在磷酸铝铬中添加填料可改善其耐热和力学等方面的性能^[13, 16], 而 Cr_2O_3 具有硬度大、耐磨性好、化学性质比较稳定以及不易熔融分解等特点是作为填料的理想选择。

除此之外, HVOF 涂层无机封孔剂封孔处理的相关研究也相对较少。封孔剂对热喷涂涂层耐蚀性的提高主要体现在两个方面: ① 封孔剂渗入涂层孔隙起到填充作用; ② 封孔剂在涂层表面固化, 形成一层化学膜隔绝外界腐蚀介质。与孔隙较多的涂层(如等离子喷涂涂层)相比, HVOF 涂层致密, 封孔剂渗入孔隙较难^[17]。这种情况下, 涂层表面形成一层封孔剂化学膜显得尤为重要。

文中采用超音速火焰喷涂技术在 45 钢基体上制备 WC-12Co 涂层, 随后用磷酸铝铬封孔剂对涂层进行封孔处理, 研究封孔处理前后涂层的物相、表面形貌及其耐蚀性能。

1 试验过程

1.1 涂层的制备

采用 HVOF 技术制备 WC-12Co 涂层。试样基材选用经过热轧的 45 钢, 尺寸为 $\Phi 12\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 表面经过除锈、除氧化皮、除油等清洁化处理和喷砂粗化处理, 随后采用 WokaStar@-610 喷枪在试样表面制备厚度约 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的涂层, 孔隙率约为 0.43%。表 1 为涂层的沉积工艺参数。

表 1 超音速火焰喷涂 WC-12Co 涂层的沉积工艺参数
Table 1 Deposition parameters for WC-12Co coating by HVOF

Deposition parameters	Values
Spraying powder	WC-12Co
Oxygen flow / ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	814
Kerosene flow / ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	23.1
Powder feed rate / ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	45×2
Distance / mm	340

1.2 封孔剂的制备及封孔处理

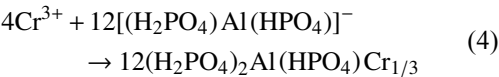
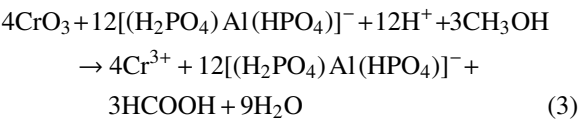
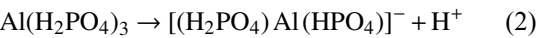
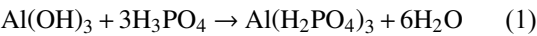
以 H_3PO_4 溶液(分析纯, 85.0%)、 CrO_3 (分析纯, 99.7%)、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ (凝胶, 80%~95%)和 CH_3OH (分析纯, 99.9%)^[18]为主要原料。按照 $\text{CrO}_3 : \text{Al}(\text{OH})_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 1 : 2.5 : 10$ 的质量比, 先将 H_3PO_4 与 CrO_3 在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温水浴锅反应 30 min, 随后加入 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 反应 20 min, 最后加入适量甲醇反应一段时间后制得粘稠的磷酸铬铝粘结剂。待冷却后, 将磷酸铝铬和乙醇按体积比 1 : 2 混合稀释, 记为封孔剂 ACP。随后以 3500 目的 Cr_2O_3 粉末为填料, 将稀释后的磷酸铝铬 ACP 和粉末按质量比 100 : 15 混合均匀, 记为封孔剂 ACP-C。两种封孔剂的成分见表 2。

表 2 两种磷酸铝铬封孔剂的成分

Table 2 Composition of two chromium-aluminum-phosphate sealants

Sealants	Composition
ACP	Chromium-aluminum-phosphate+C ₂ H ₆ O
ACP-C	Chromium-aluminum-phosphate+C ₂ H ₆ O+Cr ₂ O ₃

其中，该磷酸铝铬基体合成反应的原理方程式如下所示^[18]：



封孔处理过程如下：① 封孔处理前将涂层试样表面进行化学去油、超声波清洗等预处理；② 采用涂刷的方法将制备好的封孔剂(密度为 1.16 g/mL)均匀涂覆在涂层试样表面；③ 室温下放置 12 h；④ 固化处理，固化工艺如图 1 所示。

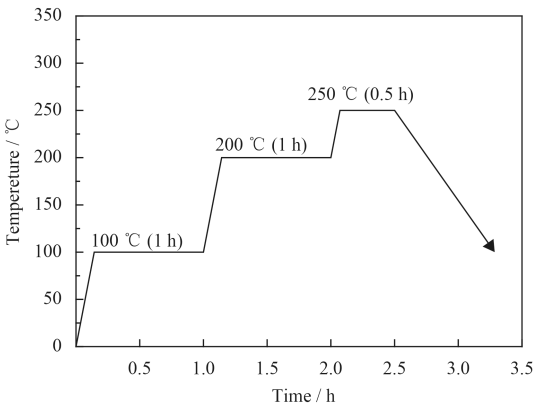


图 1 固化工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of curing process

1.3 试验方法

通过 TG-DSC(德国耐驰，STA-499 型)检测两种磷酸铝铬封孔剂的固化行为。空气气氛下，升温速率为 5 ℃/min，从室温升温到 1 000 ℃。

将分别装有两种封孔剂溶液的坩埚置于马弗炉中，温度设置为 250 ℃(固化温度)保温 8 h 制得粉体。采用 X 射线衍射仪(XRD; Japan Rigaku Ultima IV, Cu-Kα)分析两种封孔剂粉末以及封孔前

后涂层试样的相组成。扫描速率为 20°/min，测试角度范围 20°~80°。

采用扫描电子显微镜(SEM; Phnom xl)观察封孔前后涂层的表面微观形貌，并用扫描电子显微镜配套的能谱分析仪(EDS)进行表面微区成分分析。另外，采用台阶仪(KLA-Tencor P-7)分别对每种涂层试样表面的 10 个随机区域进行表面粗糙度测量，并计算其平均值。

利用动电位极化电化学测试涂层的抗腐蚀性能，试验仪器为 CHI604D 型电化学工作站。采用标准的三电极模式，其中待测试样为工作电极，饱和甘汞电极为参比电极，铂电极为辅助电极。试样测试区域为 1 cm²，扫描速度为 1 mV/s。腐蚀介质为质量分数 3.5 %的 NaCl 溶液。

利用热震试验测试磷酸铝铬层的抗热震性能。将马弗炉加热到预定温度(450 ℃)，然后将两种封孔涂层试样置于坩埚内，放入恒温区，保温 10 min 后迅速取出，置于室温自来水中水淬冷却至室温，用吹风机吹干，再置于炉中，完成 1 个热震周期。反复进行以上热震测试，100 次后，用扫描电子显微镜(SEM)观察热震后试样的表面形貌，再随机选出对应的 10 个区域，并用 ImageTool 图像分析软件测量计算磷酸铝铬层的剥落面积百分比(每个区域测定 2 次，取其平均值)，来表征和比较两种磷酸铝铬层的抗热震性能。

2 结果与分析

2.1 热分析

分别对未加填料(ACP)和添加 Cr₂O₃ 填料(ACP-C)的磷酸铝铬溶液在不同温度范围内进行 TG-DSC 分析，结果见图 2。二者的 DSC 曲线在 500 ℃之前基本相似，均在 90 ℃左右有一个吸热峰，同时 TG 曲线在对应的温度附近有较大的失重，这是由于磷酸铝铬封孔剂中乙醇在 90 ℃挥发所致；在 200 ℃左右又出现较强的吸收峰，通过 TG 曲线发现有一定的质量损失，主要是磷酸铝铬发生交联固化反应而引起的脱水^[12-13, 19]；体系固化后，随温度的继续升高，在 700 ℃内未出现明显的吸收峰或放热峰，说明体系中无任何化学和物理变化发生，材料具有良好的耐高温性能。从 ACP 和 ACP-C 相似的 DSC 曲线来看，可判定 Cr₂O₃ 填料对磷酸铝铬的固化反应无太大影响。

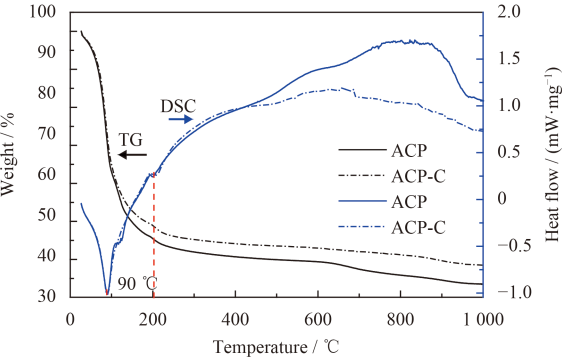


图 2 ACP 和 ACP-C 封孔剂的 TG-DSC 图谱
Fig.2 TG-DSC spectra of the ACP and ACP-C sealants

2.2 XRD 物相分析

图 3 为两种磷酸铝铬封孔剂粉体及封孔前后涂层的 X 射线衍射谱。图 3(a)中可以发现 ACP 粉体在 20°~30°出现强烈的漫散衍射峰, 说明 250 °C 下固化后的 ACP 主要由磷酸铝铬非晶相组成。与 ACP 相比, ACP-C 中添加有 Cr₂O₃ 填料, 因此存在 Cr₂O₃ 衍射峰。此外, ACP 和 ACP-C 的漫散衍

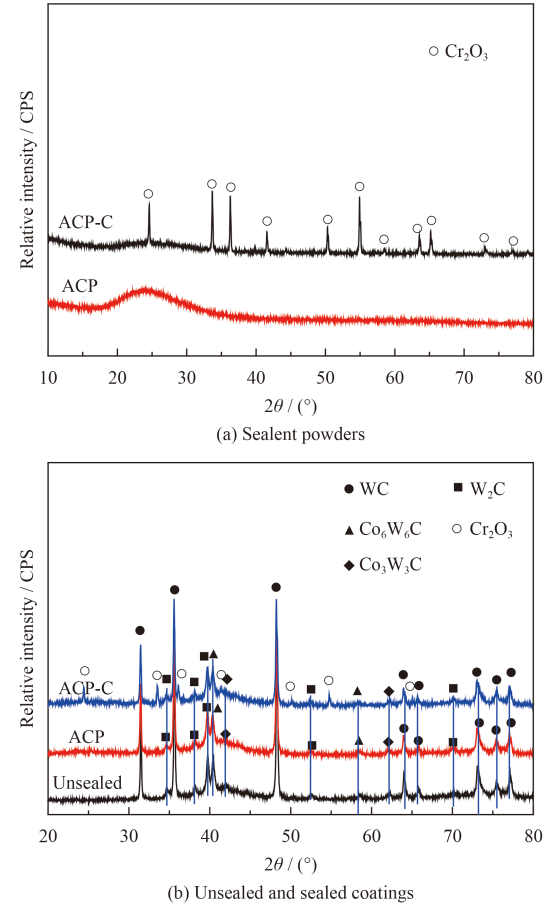


图 3 封孔剂粉体和封孔前后涂层的 X 射线衍射图谱
Fig.3 XRD patterns of sealent powders, the unsealed and sealed coatings

射峰基本一致, 说明 Cr₂O₃ 填料的添加并没有影响磷酸铝铬非晶相的形成。

图 3(b)中发现 ACP 封孔的涂层的衍射峰与未封孔涂层基本相同, 没有其它物相的出现, 说明磷酸铝铬固化后能够在 WC-12Co 涂层表面很好地形成非晶相。ACP-C 中由于添加 Cr₂O₃ 填料, 其封孔涂层的衍射图谱中出现 Cr₂O₃ 峰, 其它峰型也与未封孔涂层基本一致。综上所述, 磷酸铝铬能够在 WC-12Co 涂层表面很好地形成非晶相。

2.3 WC-12Co 涂层封孔前后表面 SEM 观察

图 4 为封孔前后涂层表面背散射形貌像, 检测点 EDS 成分如表 3 所示。

如图 4(a)所示, 为热喷涂涂层表面形貌, 可看到部分熔融的颗粒附近存在许多孔隙。对图 4(a)中位置 1 进行能谱分析, 其主要元素为 C、W、Co 和 O, 通过推算可知确是 WC-12Co 涂层并含有一些含 O 的杂质, 这是因为涂层表面存在少量的氧化。

如图 4(b)所示, 经过磷酸铝铬封孔剂封孔处理的涂层表面呈现灰色和白亮色两种衬度, EDS 检测发现, 白亮色区域富含 C、W、Co 等元素而 P 元素很少, 而灰色区域除了富含 C、W、Co 等元素外, 还含有大量的 P、Al、Cr 元素, 表明涂层表面有磷酸铝铬的存在。由于磷酸铝铬封孔剂中元素原子序数较 WC-12Co 涂层中元素原子序数小, 因此, 涂层中灰色区域对应封孔剂, 而白亮色区域对应 WC-12Co, 这一分析结果跟 EDS 检测结果一致。从表面形貌来看, 封孔涂层表面更为光滑, 且没有明显粗大的孔隙, 涂层表面很致密。

如图 4(c)所示, 添加 Cr₂O₃ 的封孔涂层表面颜色衬度跟磷酸铝铬相似, 只是弥散分布的白色区域面积更多。图 4(d)为 ACP-C 封孔涂层表面的局部高倍放大图, 通过 EDS 分析发现, 这些弥散的白亮颗粒为 Cr₂O₃ 颗粒。由于 Cr₂O₃ 极其稳定, 难溶于酸, 很难与磷酸发生反应, 同时其具有极高的熔点, 固化温度不足以使 Cr₂O₃ 发生熔融分解及元素扩散, 因此以弥散的形式分布于体系中。封孔处理后磷酸铝铬封孔剂可以很好地渗透到涂层的孔隙中起到填充作用, 并且磷酸铝铬具有较低的固化收缩率。由于磷酸铝铬固化后为非晶态, 降低了相变过程中产生的应力应变, 从

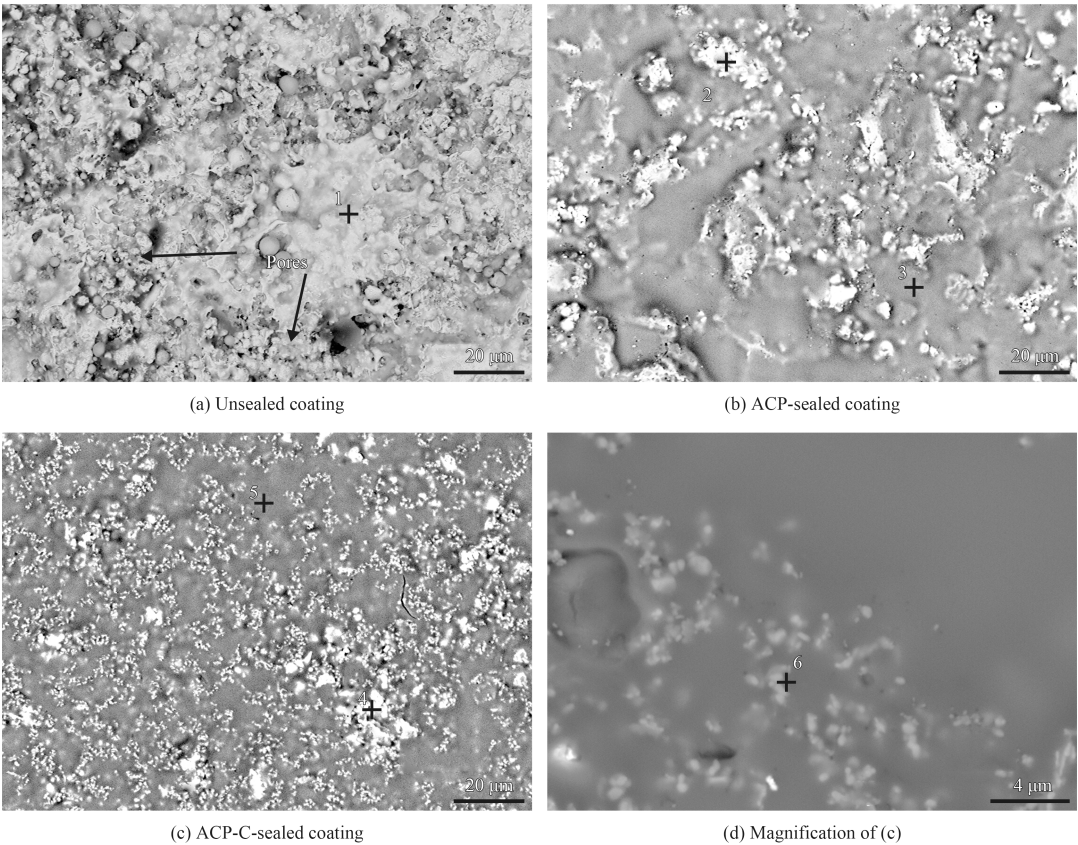


图 4 涂层封孔前后的表面微观形貌

Fig.4 Morphologies of unsealed and sealed coatings

表 3 封孔前后涂层 EDS 分析

Table 3 EDS analysis of unsealed, ACP-sealed coating and ACP-C-sealed coating

(a/%)							
No.	C	O	W	Co	P	Al	Cr
1	72.1	7.7	18.4	1.8			
2	41.1	37.0	18.1		3.9		
3	43.2	45.8	2.3	0.7	6.2	1.1	0.7
4	49.2	22.9	23.3	2.5	2.1		
5	43.9	45.6	1.5		6.9	1.1	1.0
6	15.5	61.8	1.3		5.1	1.0	15.3

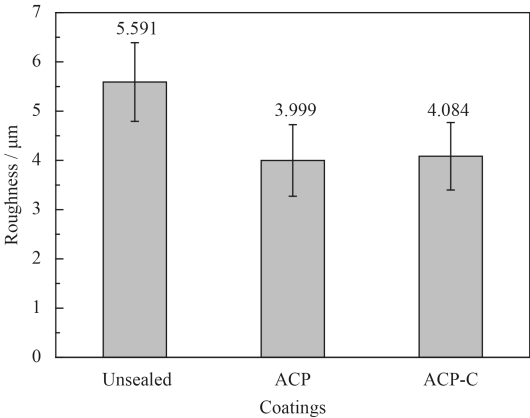


图 5 封孔前后涂层表面粗糙度

Fig.5 Roughness of unsealed and sealed coatings

而减少了固化后的磷酸铝铬可能产生的裂纹，增加了体系的连续性^[14]。

图 5 为热喷涂涂层封孔前后的平均粗糙度 (S_a)。从图中看出，未封孔的 WC-12Co 涂层、ACP 封孔的涂层以及 ACP-C 封孔的涂层的粗糙度分别为 5.591、3.999 和 4.084 μm 。显然，封孔后涂层粗糙度降低，降低了约 28%。这是因为 ACP 和 ACP-C 封孔剂具有良好的流动性，可以有效地渗入并填充涂层的低凹处，从而降低表面粗糙度。

2.4 腐蚀性能

将封孔前后 WC-12Co 涂层在 3.5%NaCl 溶液中进行电化学极化曲线测试，结果如图 6 所示，其相关拟合的腐蚀电位(E_{corr} , V)和腐蚀电流密度(I_{corr} , $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)如表 4 所示。

通常，腐蚀电位越大，腐蚀电流密度越小，表明耐蚀性越好。由表 4 可以看出，未封孔涂层

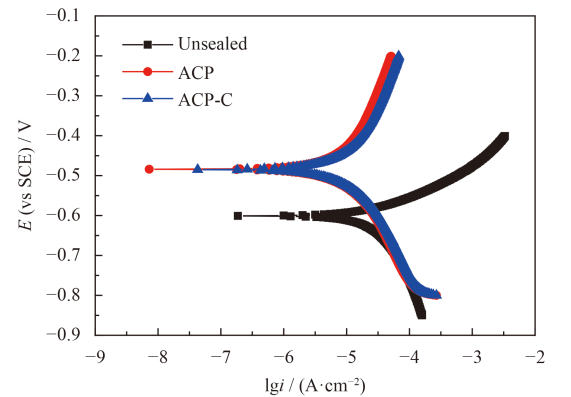


图 6 WC-12Co 涂层在 3.5% NaCl 溶液中封孔前后的塔菲尔极化曲线

Fig.6 Tafel polarisation curves of the WC-12Co coatings before and after sealing in 3.5% NaCl solution

表 4 涂层在 3.5% NaCl 溶液中封孔前后的腐蚀数据

Table 4 Tafel polarisation data of the coatings before and after sealing in 3.5% NaCl solution

Samples	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$I_{\text{corr}} / (10^{-6} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Unsealed coating	-0.601	28.320
ACP-sealed coating	-0.484	8.499
ACP-C-sealed coating	-0.485	9.888

的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别约为-0.601 V 和 $2.832 \times 10^{-5} \text{ A} / \text{cm}^2$ 。用 ACP 对涂层进行封孔后, 涂层腐蚀电位增加到-0.484 V, 腐蚀电流密度降到 $8.499 \times 10^{-6} \text{ A} / \text{cm}^2$ 。而用 ACP-C 对涂层进行封孔后, 涂层的腐蚀电位增加到-0.485 V, 腐蚀电流密度降至 $9.888 \times 10^{-6} \text{ A} / \text{cm}^2$ 。从自腐蚀电位来看, 未封孔试样较封孔试样具有更高的腐蚀倾向, 说明封孔后涂层具有更优异的耐蚀性能; ACP 和 ACP-C 封孔的涂层耐蚀性基本相同。

另外, 腐蚀速率与自腐蚀电流密度呈正比^[20]。从自腐蚀电流密度来看, 用 ACP 和 ACP-C 封孔涂层的自腐蚀电流密度分别为未封孔涂层电流密度的 30%和 35%, 说明封孔后的涂层腐蚀速率较低, 具有更优异的耐蚀性能。根据腐蚀结果, 分别用两种封孔剂封孔后涂层的耐蚀性相差不大, 说明 Cr_2O_3 填料的加入对封孔剂耐蚀性能的影响不大。

另外, 封孔后涂层的耐蚀性能得到明显提高, 其主要原因在于封孔后, 封孔剂渗入涂层的孔隙中, 降低了涂层的孔隙率, 阻碍腐蚀介质渗入孔隙, 从而提高了涂层的耐蚀性能。

2.5 磷酸铝铬层抗热震性能

图 7 为两种封孔剂(ACP 和 ACP-C)封孔的涂层在 450 ℃下热震 100 次后磷酸铝铬层的表面形貌图。由图可看出, ACP-C 的剥落面积明显低于 ACP 的剥落面积。热震后在两种封孔涂层表面随机选取 10 个区域, 并利用 ImageTool 图像分析软件分别对这些区域的磷酸铝铬层剥落面积进行定量测量, 测得 ACP 和 ACP-C 的平均剥落面积百分比分别为 14.2%和 10.9%, 说明 ACP-C 较 ACP 具有较高的抗热震性能。这主要是由于 Cr_2O_3 填料的加入对固化后的磷酸铝铬层起到了强化作用。磷酸铝铬在固化过程中, 有水分子和乙醇逸出, 使材料中留下许多孔洞, 降低了磷酸铝铬的连续性。 Cr_2O_3 填料的加入则可填充到这些孔洞中从而减少材料的缺陷, 其连续性和致密度增加, 同时降低了磷酸铝铬的固化收缩率; 另外, 弥散分布的 Cr_2O_3 颗粒尺寸小, 比表面积大, 其表面不同状态的羟基和不饱和残键能与磷酸铝铬基体形成较高的粘接力, 界面强度高, 在应力作用下

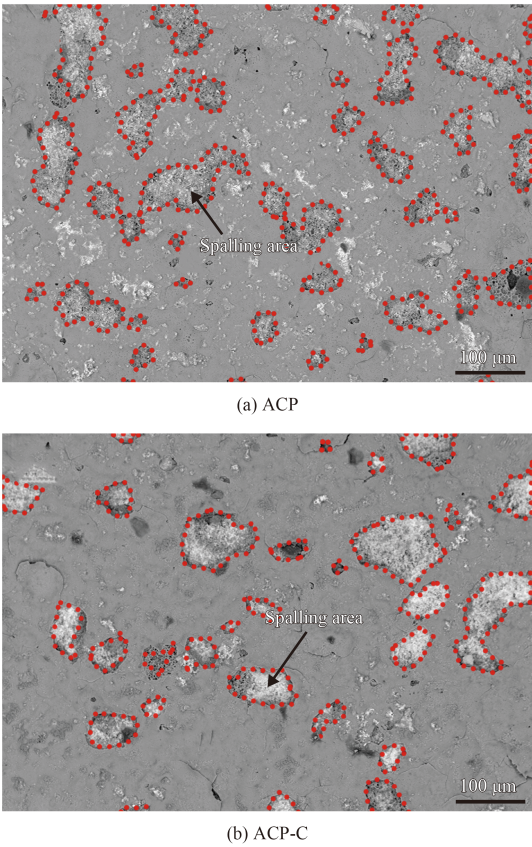


图 7 封孔涂层在 450 ℃下热震 100 次后的表面形貌

Fig.7 Morphologies of sealed coatings after thermal shock of 100 times at 450 ℃

会产生更多的裂纹来吸收更多的能量,提高了磷酸铝铬层的力学性能^[13, 21],从而其抗热震性得到了提高。

3 结 论

(1) 磷酸铝铬的固化温度在 250 ℃左右,在 700 ℃内体系无任何热效应发生,材料具有良好的耐热性能。

(2) 固化后磷酸铝铬能够在 WC-12Co 涂层表面很好地形成非晶相,降低了相变过程中产生的应力应变,从而减少了裂纹的产生,增加了体系的连续性。

(3) 封孔处理后,磷酸铝铬对涂层孔隙具有良好的填充作用,明显降低了涂层孔隙率。涂层的自腐蚀电位增加,腐蚀电流密度降低,涂层的耐腐蚀性能提高。

(4) 封孔涂层在 450 ℃下热震 100 次后,ACP 和 ACP-C 的平均剥落面积百分比分别为 14.2% 和 10.9%,ACP-C 的剥落面积明显低于 ACP 的剥落面积。 Cr_2O_3 填料的加入对固化后的磷酸铝铬层具有良好的强化作用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] WANG Q, CHEN Z H, DING Z X. Performance of abrasive wear of WC-12Co coatings sprayed by HVOF[J]. *Tribology International*, 2009, 42: 1046-1051.
- [3] WANG G, XING C, TAO F, et al. Enhancement in the corrosion resistance of WC coatings by adding a Fe-based alloy in simulated seawater[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 305: 62-66.
- [4] AL-MUTAIRIA S, HASHMIA M S J, YILBAS B S, et al. Microstructural characterization of HVOF/plasma thermal spray of micro/nano WC-12% Co powders[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 264: 175-186.
- [5] BOLELLI G, LUSVARGHI L, GIOVANARDI R. A comparison between the corrosion resistances of some HVOF-sprayed metal alloy coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202: 4793-4809.
- [6] VIPPOLA M, AHMANIEMI S, KERÄNEN J, et al. Aluminum phosphate sealed alumina coating: characterization of microstructure[J]. *Materials Science & Engineering*, 2002, 22: 1-8.
- [7] AHMANIEMI S, VUORISTO P, MÄNTYLÄ T, et al. Improved sealing treatments for thick thermal barrier coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2002, 151-152: 412-417.
- [8] LISCANO S, GILA L, STAIA M H. Effect of sealing treatment on the corrosion resistance of thermal-sprayed ceramic coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2004, 188-189: 135-139.
- [9] WANG Y, JIANG S L, ZHENG Y G. Effect of porosity sealing treatments on the corrosion resistance of high-velocity oxy-fuel (HVOF)-sprayed Fe-based amorphous metallic coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 206: 1307-1318.
- [10] 孙寅, 霍冀川, 雷永林. 磷酸铝铝粘结剂的制备及其热处理中的相变[J]. *材料导报*, 2011, 25(10): 98-101.
SUN Y, HUO J C, LEI Y L. Preparation of chromium-aluminum-phosphate binder and phase evolution during heat treatment[J]. *Materials Reviews*, 2011, 25(10): 98-101 (in Chinese).
- [11] 纪柱. 含铬的磷酸盐[J]. *无机盐工业*, 2005, 37(8): 8-11.
JI Z. Chromium-containing phosphate[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2005, 37(8): 8-11 (in Chinese).
- [12] 杨猛, 霍冀川, 雷永林, 等. 氧化铜-磷酸铝铝粘结剂制备及热处理相变研究[J]. *非金属矿*, 2014, 37(5): 43-45.
YANG M, HUO J C, LEI Y L, et al. Preparation of copper oxide-aluminum-chromium-phosphate binder and phase evolution research during heat treatment[J]. *Non-Metallic Mines*, 2014, 37(5): 43-45 (in Chinese).
- [13] 田帅, 霍冀川, 雷永林, 等. ZnO及填料对磷酸铝铝基复合材料性能的影响[J]. *功能材料*, 2013, 7(44): 979-982.
TIAN S, HUO J C, LEI Y L, et al. The influence of zinc oxide and fillers on the properties of aluminum-chromium-phosphate matrix composite[J]. *Function Materials*, 2013, 7(44): 979-982 (in Chinese).
- [14] 王政阅, 徐明霞, 梁辉, 等. 磷酸铝铝粘结剂固化机理的研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(1): 565-568.
WANG Z Y, XU M X, LANG H, et al. Studies on the curing mechanism of aluminum-chromium-phosphate binder[J]. *Rare Metal Materials & Engineering*, 2008, 37(1): 565-568 (in Chinese).
- [15] PITAK Y N, CHURILOVA Y V. The effect of aluminum phosphate binder on the crystallization of mullite-silica fibers[J]. *Refractories & Industrial Ceramics*, 2004, 45(4): 275.
- [16] 王珏, 刘晓东, 于倩, 等. 磷酸铝铬溶液对 Al_2O_3 - ZrO_2 - SiO_2 耐磨体系的影响[J]. *黑龙江科学*, 2015, 6(4): 12-15.
WANG Y, LIU X D, YU Q, et al. The effects of chrome alu-

minum phosphate solution on the Al₂O₃-ZrO₂-SiO₂ wear-able system[J]. Heilongjiang Science, 2015, 6(4): 12-15 (in Chinese).

[17] ZENG Z S, SAKODAA N, TAJIRIA T, et al. Structure and corrosion behavior of 316 L stainless steel coatings formed by HVOF spraying with and without sealing[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 203: 284-290.

[18] 陈宁, 高祀建, 霍冀川, 等. 不同固化剂对磷酸铝铬固化行为的影响[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(6): 1347-1353.

CHEN N, GAO S J, HUO J C, et al. Effect of different curing agents on aluminum chromium phosphates curing behavior[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(6): 1347-1353 (in Chinese).

[19] 杨小波, 黄玉东, 张杰, 等. 磷酸盐基耐热复合材料的制备与性能[J]. 化学与黏合, 2005, 27(2): 67-70.

YANG X B, HUANG Y D, ZHANG J, et al. Preparation and properties of phosphate base heat-resisting composites[J]. Chemistry and Adhesion, 2005, 27(2): 67-70 (in Chinese).

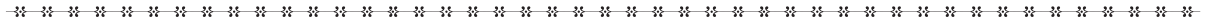
[20] 张鹏杰, 吴玉程, 曹玉杰, 等. 前处理工艺对NdFeB表面真空蒸镀Al薄膜结构及性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 49-59.

ZHANG P J, WU Y C, CAO Y J, et al. Effects of pretreatment technologies on structure and properties of Al coatings on sintered NdFeB substrates via vacuum evaporation[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 49-59 (in Chinese).

[21] 刘正海, 王海滨, 霍冀川, 等. 高硅氧纤维布增强磷酸铝铬复合材料的性能研究[J]. 非金属矿, 2012, 35(2): 36-38.

LIU Z H, WANG H B, HUO J C, et al. Properties of high silica cloth reinforced phosphate of chrome-alumina matrix composite[J]. Non-Metallic Mines, 2012, 35(2): 36-38 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)



• 本刊讯 •

2017 中国生物材料大会将在南昌召开

由中国生物材料学会(CSBM)、中国生物医学工程学会生物材料分会(CSBME-BMB)和华东交通大学共同主办的“2017 中国生物材料大会”将于 2017 年 10 月 27-29 日在南昌举行。

这是中国生物界两年一次的盛会, 这次大会将邀请行业内的资深专家学者就生物材料科学与产业的研究热点、发展前沿进行深入交流和讨论。会议以“生物医用材料创新研发与产业化”为主题, 包括 6 个大会报告、24 个专题报告会、4 个专题研讨会及论坛和墙报等组织形式。

涉及的专题报告会包括: 新型生物医用金属材料及应用、生物医用复合材料、海洋生物材料、生物材料表面/界面、生物功能界面的构筑及应用、先进载体材料及转化医学、生物医学材料的生物相容性评价等方面。

会议网址: <http://clxy.ecjtu.edu.cn/meeting2017/Action/TouristMain>

论文需要在线投递摘要, 经盲评及学术委员会审定后, 于 2017 年 8 月 15 日前通知作者, 决定论文接收形式: 口头报告或墙报。摘要在线投稿截止日期: 2017 年 7 月 30 日; 在线提前注册截止日期: 2017 年 9 月 26 日。

(本刊编辑部 供稿)