

等离子喷涂工艺对锅炉管束用 Fe基非晶涂层组织结构和耐蚀性能的影响

高振¹, 郝建民¹, 韩建军², 鲁元², 陈永楠¹, 李世波¹

(1. 长安大学 材料表面强化研究所, 西安 710064; 2. 西安特种设备检验检测院, 西安 710065)

摘要: 目的 研究等离子喷涂功率和喷涂时间对锅炉管束用 Fe 基非晶涂层的相组成、微观组织结构及涂层耐蚀性能的影响。方法 通过 X 射线衍射、扫描电子显微镜和三电极电化学研究进行分析。结果 涂层主要由非晶相组成, 表面较为平整致密; 随着喷涂功率和喷涂时间的增加, 涂层非晶相含量降低, 孔隙率降低, 致密性升高。非晶涂层在 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液和在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中均表现出良好的钝化作用, 在 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液中钝化区较宽, 在 3.5% NaCl 溶液中自腐蚀电流密度较低。随喷涂功率和时间的增加, 阳极极化曲线钝化区加宽, 电流密度降低。结论 喷涂功率升高会导致涂层孔隙率下降, 喷涂时间增加则致使涂层厚度增加, 腐蚀介质渗透到基体的表面路径和阻力增加, 从而可以进一步改善 Fe 基非晶涂层的耐蚀性能。

关键词: 锅炉管束; 等离子喷涂; 非晶涂层; 耐蚀性

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)01-0081-07

Effect of Spray Process on the Microstructure and Corrosion-resistance of Fe-based Amorphous Coatings Obtained by Plasma Spray on the Boiler Tubes

GAO Zhen¹, HAO Jian-min¹, HAN Jian-jun², LU Yuan², CHEN Yong-nan¹, LI Shi-bo¹

(1. Institute of Material Surface Strengthening, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the effects of plasma spray power and time on the phase, microstructure and corrosion-resistance of the amorphous coating on the boiler tubes. **Methods** XRD, SEM and electrochemical polarization research were adopted. **Results** The coating with high fraction of amorphous phase was obtained, which had a flat and compact surface. The amorphous fraction and porosity decreased and the density increased with the increasing spray power and time. The coatings exhibited an excellent ability to resist corrosion with wide passive region in 0.5 mol/L H₂SO₄ and 3.5% NaCl solutions. And the coatings exhibited wider passive region and lower corrosion current density in 0.5 mol/L H₂SO₄ and 3.5% NaCl solutions, respectively. With increase of the spray power and time, the anodic polarization curves of the amorphous coatings were passivated with wider passive region and lower passive current density. **Conclusion** The path and flow resistance that corrosive liquid permeated the substrate were increased, and the corrosion resistance of the coating was improved, owing to the decreased porosity and increased coating thick-

收稿日期: 2014-09-23; 修订日期: 2014-11-30

Received: 2014-09-23; Revised: 2014-11-30

基金项目: 国家质检总局科技计划项目(2013QK111); 长安大学中央高校基金(2014G2310019)

Fund: Supported by the General Administration of Quality Supervision (2013QK111) and the Central College Fund of Chang'an University(2014G2310019)

作者简介: 高振(1989—), 男, 吉林白山人, 硕士研究生, 主要从事材料表面改性研究。

Biography: GAO Zhen(1989—), Male, from Baishan, Jilin, Master graduate student, Research focus: surface modification of materials.

ness with the increasing spray power and time.

KEY WORDS: boiler tubes; plasma spray; amorphous coating; corrosion resistance

锅炉管束烟气的主要腐蚀机制有硫化、氯化、氧化及其协同作用^[1-4]。解决锅炉管束腐蚀问题比较经济有效的方法是采用热喷涂技术制备防腐耐磨涂层,目前热喷涂防护涂层有金属涂层、陶瓷涂层、金属陶瓷复合涂层和金属间化合物涂层^[5-6]。非晶合金材料具有较高的强度、韧性和优异的耐蚀、耐磨等性能^[7-8],采用热喷涂技术能够经济、可靠且大面积制备较好的非晶涂层。目前研究主要集中在 Fe、Ni、Mo、Al 基等非晶合金涂层^[9-11]。由于 Fe 基非晶涂层所表现出的高硬度、强度和优异的耐腐蚀、抗磨损性能及良好的经济性而受到广泛的关注。Kobayashi 等^[12]利用等离子喷涂制备 Fe 基非晶涂层显微硬度达到 1100HV,其涂层耐磨性高于 SUS 基体。Cherigui 等^[13]利用超音速火焰喷涂和大气等离子喷涂制备了 Fe 基非晶涂层,研究了喷涂材料成分对涂层组织结构的影响。程江波等^[14-15]利用高速电弧喷涂制备了 Fe 基非晶纳米晶涂层,涂层的显微硬度为 900 ~ 1050HV,涂层耐磨性是 3Cr13 不锈钢涂层的 3 倍,具有良好的耐冲蚀性能。周正等^[16]利用超音速火焰喷涂技术制备的 Fe 基非晶涂层表现出优异的抗腐蚀性。Peng 等^[17]采用 HVOF 制备了 Fe 基非晶涂层,研究了表面基体粗糙度和涂层厚度对涂层与基体结合

力的影响。非晶涂层具有优异的耐蚀耐磨等性能,能够满足严苛环境下的工作要求,研究非晶涂层性能并将其工程应用具有十分重要的意义。

本文以经济型的 Fe 基非晶合金粉末为研究对象,采用等离子喷涂技术在锅炉管束用钢 T91 上制备了非晶涂层,研究喷涂功率和喷涂时间对非晶涂层组织结构和耐蚀性能的影响。

1 实验

锅炉管束用 Fe 基非晶合金粉末成分见表 1,图 1 为喷涂材料 Fe 基合金粉末 XRD 图谱。由图 1 可知,漫衍射峰非晶包的存在证明合金粉末非晶成分较高。喷涂前将粉末在 200 ℃下烘干 30 min,以提高粉末喷涂时的流动性。基材选用目前我国电站锅炉管束广泛使用的 T91 管材,其化学成分(以质量分数计)为: C 0.08% ~ 0.12%, Mn 0.3% ~ 0.6%, P 0.02%, S 0.01%, Si 0.01%, Cr 8.00%, Mo 0.85% ~ 1.05%, V 0.18%, Nb 0.06% ~ 0.10%, N 0.03% ~ 0.07%, Ni 0.40%, Fe 为余量。试样的尺寸为 15 mm×15 mm×5 mm,等离子喷涂前进行表面除锈、除氧化皮、除油等清洁处理和喷砂粗化活化处理。

表 1 Fe 基喷涂粉末的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the Fe-base spraying powders

元素	Mo	Cr	Ni	P	Si	B	C	Fe
质量分数/%	8.56	15.3	10.83	0.94	5.31	0.56	3.04	余量

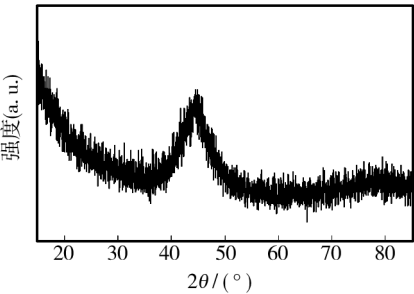


图 1 Fe 基非晶合金粉末 XRD 图谱

Fig.1 XRD spectra of the Fe-base spraying powders

采用 GP-80 型大气等离子喷涂设备进行等离子喷涂,主要参数为:Ar 气流量 40 L/min,Ar 气压力

1.08 MPa,N₂ 气流量 10 L/min,N₂ 气压力 0.5 MPa,喷涂距离 110 mm,送粉率 10 g/min,喷枪移动速度 110 mm/s。主要改变喷涂功率(30 ,35,40 kW)和喷涂时间,得到涂层厚度分别为 0.2 ,0.3 ,0.4 mm。

采用 X 射线衍射仪对非晶合金粉末和非晶涂层进行分析,并计算涂层中非晶相的相对含量。采用扫描电镜观察涂层的截面微观形貌,利用 Image-Pro Plus 图像分析软件对涂层孔隙率进行统计。

采用三电极测试系统(ZAHNER IM6e 型电化学工作站)测定非晶涂层在 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液和在 3.5%(质量分数,后同)NaCl 溶液中的极化曲线,试样采用表面封装方法使裸露涂层面积为 1 cm²,试样

为阳极,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为 1 cm² 的铂片,扫描速度为 10 mV/s。

2 结果与分析

2.1 喷涂参数对涂层相组成的影响

图 2 为不同参数下制备的非晶涂层的 X 射线衍射图谱。由图 2a 可以观察到,不同喷涂功率下制备的涂层均有明显宽化的漫衍射峰,为典型的非晶态结构,同时也出现少量的表征晶体结构的尖锐峰,说明非晶涂层主要由非晶相构成。同时,未发现氧化物的存在,表明涂层沉积过程中没有氧化物生成。随着喷涂功率的提高,晶体峰强度在增强。由图 2b 可以观察到涂层均有明显的非晶包存在,为典型的非晶态结构,同时也有少量尖锐峰出现,说明获得了主要由非晶相构成的非晶涂层。研究中也未发现氧化物相的标志峰,表明涂层中没有氧化物存在。

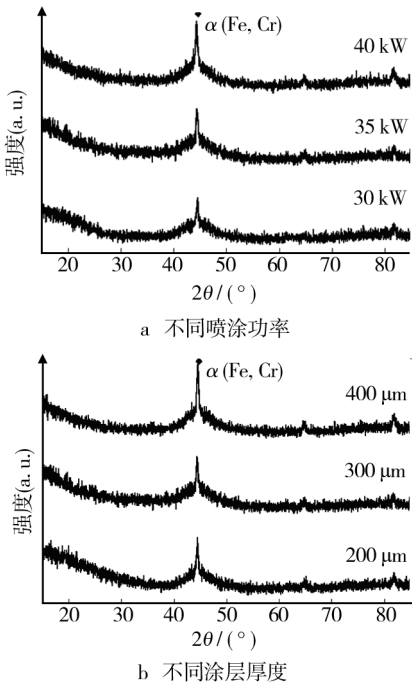


图 2 非晶涂层 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectra of the amorphous coating under different (a) spray power and (b) coating thickness

图 3 为喷涂功率和喷涂时间对涂层非晶相相对含量的影响。由图 3a 可知,当喷涂功率为 30 kW 时,非晶涂层非晶成分相对含量约为 70%,当喷涂功率为 40 kW 时,非晶涂层非晶成分相对含量约为 60%,随喷涂功率的升高,涂层非晶相对含量减少。由图

3b 可知,当涂层厚度为 200 μm 时,涂层中非晶成分相对含量约为 66%,当涂层厚度为 400 μm 时,涂层中非晶成分相对含量约为 62%,随喷涂时间的增加,涂层非晶成分相对含量减少。研究表明,喷涂功率对涂层非晶成分含量影响比较大,喷涂时间对涂层非晶成分含量影响较小。

非晶成分相对含量随喷涂功率和喷涂时间变化的原因,主要是非晶态结构的回复再结晶^[16]。喷涂功率升高,等离子弧能量升高,喷涂时间增加,初始喷涂制备的涂层获得回复和再结晶所需能量,组织和结构发生变化,由非晶态结构转变为晶态结构。

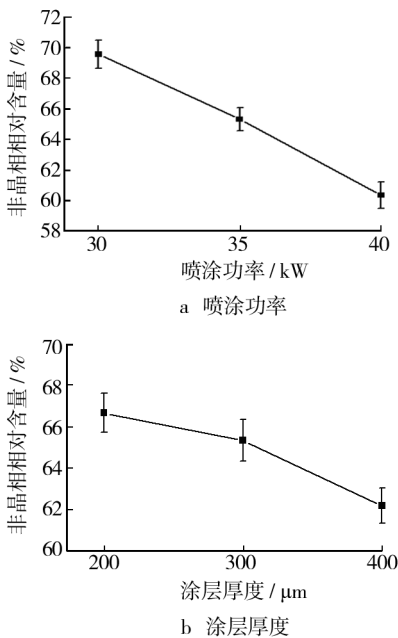


图 3 喷涂参数对涂层非晶含量的影响

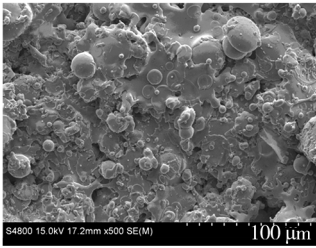
Fig. 3 Effect of spray parameters on the amorphous fraction of coatings

2.2 喷涂参数对涂层结构的影响

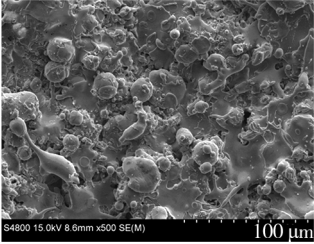
图 4 为不同喷涂功率下制备非晶涂层的表面形貌。对比不同功率下试样表面的微观形貌,可以发现喷涂粉末随喷涂功率升高的熔化情况变好,球形熔滴数量减少,熔滴铺展面积增大,熔滴之间搭接更紧密。

图 5 为不同喷涂参数制备的非晶涂层截面形貌。可以观察到,涂层由变形良好的片状颗粒相互堆叠而成,呈典型的层状组织结构,结构致密,没有较大聚集型孔隙和明显宏观裂纹存在;同时,随着喷涂功率的升高,涂层中的颗粒变形程度提高,涂层中的孔隙减少,涂层致密度提高,因此涂层孔隙率降低。涂层与基体结合紧密,主要以机械结合为主。

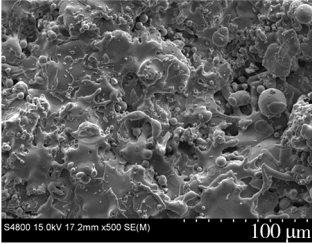
图 6 为不同喷涂时间时非晶涂层截面形貌。随



a 30 kW



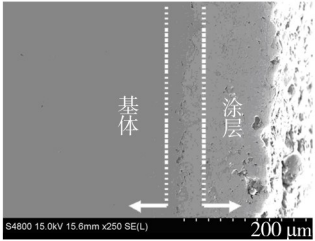
b 35 kW



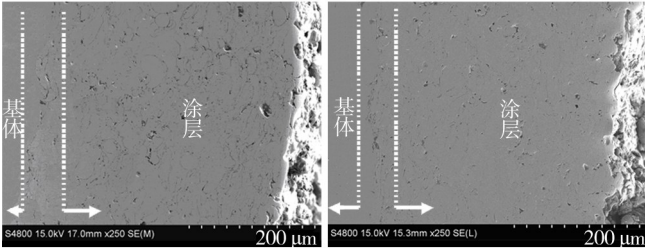
c 40 kW

图 4 不同功率参数下涂层表面 SEM 形貌

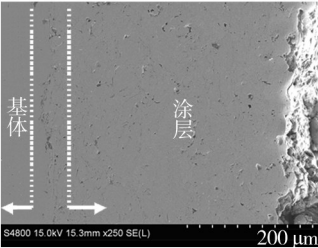
Fig. 4 SEM images of the surface of amorphous coating under different spray parameters



a 200 μm



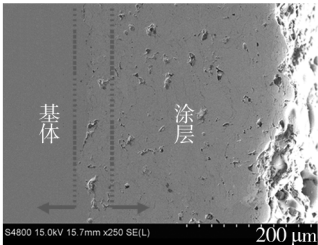
b 300 μm



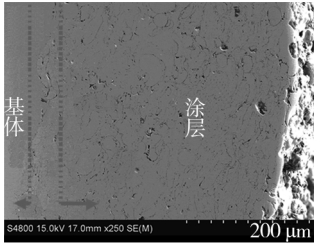
c 400 μm

图 6 不同喷涂时间下涂层截面 SEM 形貌

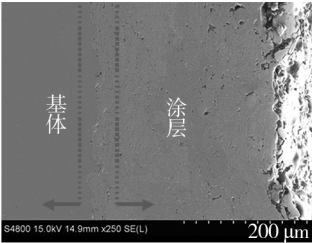
Fig. 6 SEM images of the cross-section of amorphous coating after different spray times



a 30 kW



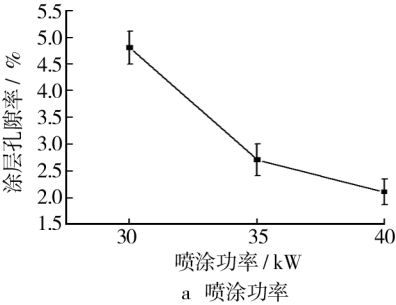
b 35 kW



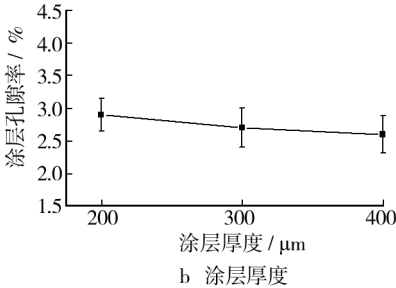
c 40 kW

图 5 不同功率参数下涂层截面 SEM 形貌图

Fig. 5 SEM images of the cross-section of amorphous coating under different spray power



a 喷涂功率



b 涂层厚度

图 7 喷涂参数对涂层孔隙率影响

Fig. 7 Effect of spray parameters on the amorphous porosity of coatings

喷涂时间增加,分别获得厚度为 200,300,400 μm 的非晶涂层,可以发现不同厚度的涂层结构致密,没有聚集性的孔隙和宏观裂纹的存在;随喷涂时间的增加,涂层致密性略有提高。

图 7 为不同喷涂参数对非晶涂层孔隙率的影响。由图 7a 可知,当喷涂功率从 30 kW 增加到 40 kW,涂层孔隙率降低了 60%;由图 7b 可知,当涂层厚度从 200 μm 增加到 400 μm 时,涂层的孔隙率降低约 10.3%。研究表明,喷涂功率对涂层中孔隙率影响较

大,喷涂时间对涂层孔隙率的影响相对较小。

功率较低时,粉末颗粒熔化不充分,当撞击基体/涂层时会被熔滴所包裹而镶嵌在涂层中;当与基体/涂层撞击被反弹时,影响后续熔融颗粒的运动。在此情况下减弱了涂层与基体或涂层与涂层之间的粘结,涂层的致密性会降低,孔隙率会随之提高。喷涂颗粒的变形程度对涂层的致密度和孔隙率都有较大影响。孔隙形成的主要原因是熔融颗粒在凝固时不能将孔

隙填充,涂层中熔化不充分时,颗粒的存在会加剧孔隙的产生。随着喷涂功率的升高,等离子弧能量升高,喷涂颗粒熔化程度变好,未熔融和半熔融颗粒出现机率减少。另外,由于功率的增加,工作气体会更加剧烈快速地膨胀,从而会获得更大的焰流速度,带动熔融颗粒以高速撞击基体形成涂层,有助于熔滴与基体/涂层紧密结合,改善涂层与基体之间的结合力。此外,随喷涂时间增加,后喷涂的粒子能够对先沉积的粒子之间存在的孔隙进行填充和覆盖,有利于降低涂层孔隙率。同时后续喷涂的熔滴还可对先沉积的粒子产生撞击作用,促使粒子扁平化,从而降低孔隙率。随喷涂时间增加,涂层厚度增加,撞击到涂层表面的颗粒数增多,输入到涂层表面的能量增多,对涂层孔隙的覆盖和填充作用增多,涂层的致密性得到提高。

2.3 喷涂参数对涂层耐腐蚀的影响

图 8 为非晶涂层在 3.5% NaCl 和 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液中的电化学极化曲线。Fe 基非晶合金涂层在 NaCl 和 H₂SO₄ 溶液中存在明显的钝化现象,且在 H₂SO₄ 溶液中涂层的钝化区更宽,在 NaCl 溶液中涂层腐蚀电流密度更低。表 2 为非晶涂层在 NaCl 和 H₂SO₄ 溶液中的腐蚀电位和腐蚀电流密度。由表 2 可知,不同喷涂参数制备的非晶涂层在 NaCl 和 H₂SO₄ 电解质溶液中随着喷涂功率的升高和喷涂时间的延长,非晶涂层腐蚀电位升高,腐蚀电流密度降

低。图 8a 和图 8b 分别为不同喷涂功率和喷涂时间下制备的非晶涂层在 NaCl 溶液中的电化学极化曲线,在电位增加的初始阶段,非晶涂层在自腐蚀电位下即可形成钝化膜进入钝化状态,未出现活性溶解阶段,电流密度稳定,为涂层的钝化区间;极化曲线维持稳定之后随电位升高涂层钝化膜逐渐被破坏,体系电流密度增大,涂层进入过钝化阶段;随着喷涂功能和时间的增加,非晶涂层极化曲线表现为自腐蚀电位正向移动,致钝电流密度减低,钝化区加宽。图 8c 和图 8d 分别为不同喷涂功率和喷涂时间下制备的非晶涂层在 H₂SO₄ 溶液中的电化学极化曲线,在电位增加的初始阶段非晶涂层有活性溶解阶段,之后随电位升高电流密度迅速下降,非晶涂层生成钝化膜进入钝化阶段,并维持较宽区域的钝化区,随电位继续升高钝化膜被破坏,非晶涂层迅速进入二次钝化阶段,存在一个较窄的钝化区间;同时,随喷涂功率和喷涂时间增加,非晶涂层更容易生成钝化膜进入钝化状态,钝化区加宽,致钝电流密度降低。

电化学极化实验表明非晶涂层在 3.5% NaCl 和 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液腐蚀环境中表现出优异的抗腐蚀性能。非晶合金因具有单相结构、成分均匀和较高活性极易形成钝化膜,在极低的电位下可以进入钝化状态,钝化作用的产生与涂层中含有的 Cr、Mo、Ni 等金属元素有关,这些元素的存在有利于涂层表面生成一层耐蚀氧化保护膜^[18]。因此该试验制备的 Fe 基非

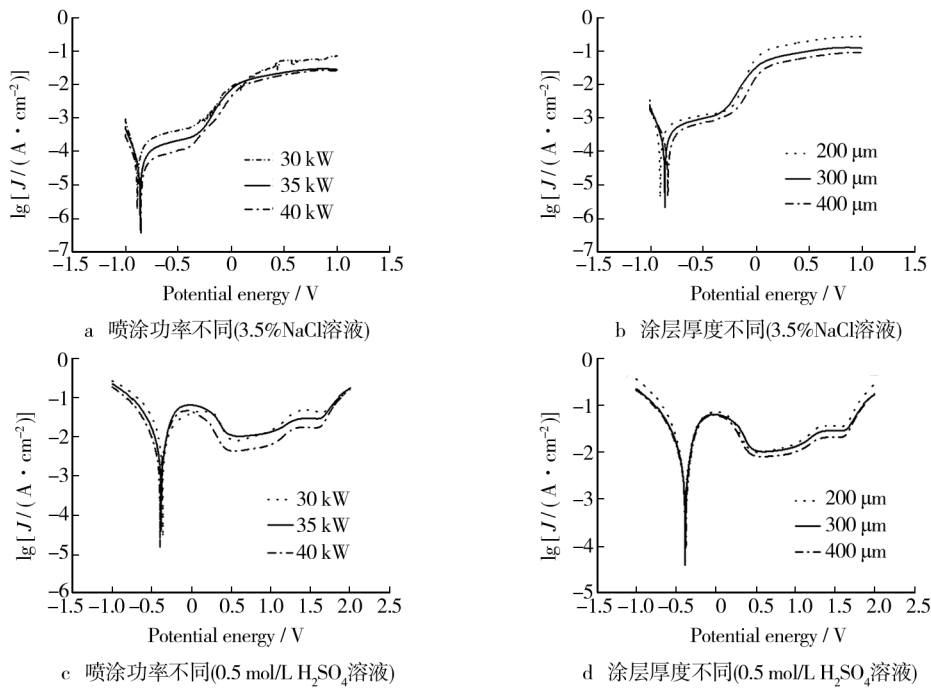


图 8 非晶涂层在 NaCl 和 H₂SO₄ 溶液中的电化学极化曲线

Fig. 8 Polarization curves of the amorphous coating in 0.5 mol/L H₂SO₄ and 3.5% NaCl solutions

表 2 非晶涂层在 NaCl 和 H₂SO₄ 溶液中的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Tab.2 Corrosion potential and current density of the amorphous coating in H₂SO₄ and NaCl solutions

电解质溶液	电化学参数	喷涂功率/kW			涂层厚度/ μm		
		30	35	40	200	300	400
3.5% NaCl	自腐蚀电位/mV	-895	-869	-858	-903	-869	-829
	腐蚀电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	40.4	35.0	30.8	45.8	35.0	33.3
0.5 mol/L H ₂ SO ₄	自腐蚀电位/mV	-400	-389	-378	-396	-389	-379
	腐蚀电流密度/ $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	3460	2480	1710	2690	2480	1980

晶涂层在硫化和氯化环境中抗腐蚀性能优异,具备着抵抗局部腐蚀的性能,对锅炉管束能起到很好的保护作用。

由于热喷涂涂层的形成特点,涂层中粒子搭接存在着孔隙、微裂纹以及少量淬态结晶核,外界的腐蚀介质主要是通过涂层的孔隙和裂纹造成对被保护基体的腐蚀破坏,因此涂层的孔隙率是影响涂层抗腐蚀性能的主要因素。喷涂功率的升高,喷涂粉末熔化情况更好,涂层组织更加致密,孔隙率下降,涂层致钝电流密度降低,钝化区加宽,如图 8a 和图 8c 所示。随喷涂时间增长,涂层厚度增加,涂层中的孔隙得到有效的填充,和微裂纹不再相互贯穿,腐蚀介质不能通过涂层中的孔隙和裂纹渗透到基体表面,因此,涂层厚度增加致钝电流密度下降,钝化区加宽,如图 8b 和图 8d 所示。研究表明随喷涂功率和喷涂时间的增加,涂层致钝电流密度降低,腐蚀电位较高,钝化区加宽,涂层耐蚀性提高。

3 结 论

1) 不同喷涂参数下制备的涂层主要成分相均是非晶相。随喷涂功率和时间的增加,涂层非晶相含量降低,涂层组织致密,孔隙率降低。

2) 非晶涂层在 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液和在 3.5% NaCl 溶液中均表现出优异的抗腐蚀性能,在 H₂SO₄ 溶液中钝化区较宽,在 NaCl 溶液中腐蚀电流密度较低。随喷涂功率和时间的增加,钝化区增宽,腐蚀电位趋于正向移动,腐蚀电流密度降低,涂层抗腐蚀性能提高。非晶成分含量轻微的变化对涂层耐蚀性能影响不大。本文制备的非晶涂层可以满足锅炉管束烟气侧工作环境要求,在硫化和氯化环境中能够表现出良好的抗腐蚀性能。

参考文献

[1] 李凤瑞,池作和,周昊. 大容量锅炉烟气侧高温腐蚀爆管的特点及对策[J]. 中国电力,1998,31(5):73—74.
LI Feng-rui,CHI Zuo-he,ZHOU Hao. Features and Countermeasures of High-temperature Tube Corrosion-bursting on the Flue Gas Side of Large Size Boilers[J]. Electric Power, 1998,31(5):73—74.

[2] 李守信,阎维平,方立军. 电站锅炉受热面高温氯腐蚀的机理探讨[J]. 锅炉制造,1999,4:19—22.
LI Shou-xin,YAN Wei-ping,FANG Li-jun. The Mechanism of the High Temperature Chloridization Corrosion on the Heat Transfer Surface of Utility Boiler[J]. Boiler Manufacturing,1999,4:19—22.

[3] 王卜谦,税正荣. 用于燃气锅炉低碳钢耐冲蚀-腐蚀磨损的双热喷涂层[J]. 中国表面工程,2001,2:43—47.
WANG Bu-qian,SHUI Zheng-rong. Thermal Sprayed Dual-layer Coatings for Steel Protection against Corrosion at Power Boilers[J]. China Surface Engineering,2001,2:43—47.

[4] NOBUO O. A Thermodynamic Approach on Vapor-condensation of Corrosive Salts from Flue Gas on Boiler Tubes in Waste Incinerators [J]. Corrosion Science, 2008, 50: 1627—1636.

[5] 朱子新,徐滨士,徐向阳,等. 电站锅炉管道高温冲蚀磨损和涂层防护技术[J]. 中国电力,2001,12(34):16—18.
ZHU Zi-xin,XU Bin-shi,XU Xiang-yang, et al. High Temperature Erosion Wear Behavior and Thermal Spraying Protection of Utility Boiler Tubes[J]. Electric Power,2001,12(34):16—18.

[6] 刘鹏飞,陶凯,周香林,等. 锅炉“四管”用耐磨耐蚀涂层研究进展[J]. 表面技术,2007,36(1):75—77.
LIU Peng-fei,TAO Kai,ZHOU Xiang-lin, et al. Research Progress in Wear and Corrosion Resistance Coating of Boiler Tubes[J]. Surface Technology,2007,36(1):75—77.

[7] GOSTIN P F. Comparison of the Corrosion of Bulk Amorphous Steel with Conventional Steel[J]. Corrosion Science,

- 2010,52:273—281.
- [8] EUGEN A. Metallic Glasses from "Alchemy" to Pure Science: Present and Future of Design, Processing and Applications of Glassy Metals[J]. Materials and Design, 2012, 35:518—556.
- [9] 王爱萍,常新春,侯万良,等. 镍基非晶合金涂层的制备与腐蚀性能[J]. 金属学报, 2006, 42(5):537—539.
WANG Ai-ping, CHANG Xin-chun, HOU Wan-liang, et al. Preparation and Corrosion Properties of Ni-based Amorphous Alloy Coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(5):537—539.
- [10] 张志彬,梁秀兵,陈永雄. 热喷涂工艺制备铝基非晶态合金材料研究进展[J]. 材料工程, 2012(2):86—90.
ZHANG Zhi-bin, LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong. Research Progress of Al-based Amorphous Alloy Materials Prepared by Thermal Spraying Process[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(2):86—90.
- [11] JIANG Chao-ping, XING Ya-zhe, ZHANG Feng-ying, et al. Microstructure and Corrosion Resistance of Fe/Mo Composite Amorphous Coatings Prepared by Air Plasma Spraying[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(7):657—662.
- [12] KOBAYASHI A. Mechanical Property of Fe-base Metallic Glass Coating Formed by Gas Tunnel Type Plasma Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202:2513—2518.
- [13] CHERIGUI M. Structure of Amorphous Iron-based Coatings Processed by HVOF and APS Thermally Spraying[J]. Material Chemistry and Physics, 2004, 85:113—119.
- [14] CHENG Jiang-bo. Formation and Properties of Fe-based Amorphous/Nanocrystalline Alloy Coating Prepared by Wire Arc Spraying Process[J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2009, 355:1673—1678.
- [15] 程江波,梁秀兵,徐滨士. 铁基非晶纳米晶涂层组织及耐冲蚀性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(12):2141—2145.
CHENG Jiang-bo, LIANG Xiu-bing, XU Bin-shi. Microstructure and Erosion Resistance of Fe-based Amorphous/Nanocrystalline Coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(12):2141—2145.
- [16] ZHOU Z, WANG L. Formation and Corrosion Behavior of Fe-based Amorphous Metallic Coating by HVOF Thermal Spraying[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 204:563—570.
- [17] PENG Y. On the Bonding Strength in Thermally Sprayed Fe-based Amorphous Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 218:17—22.
- [18] 向兴华,穆晓冬,李建三. Fe基非晶合金涂层的磨损与电化学腐蚀特征[J]. 材料热处理学报, 2003, 24(4):59—62.
XIANG Xing-hua, MU Xiao-dong, LI Jian-san. Investigation of Wear and Electrochemistry Corrosion Characteristics of Fe-base Amorphous Alloy Coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2003, 24(4):59—62.
-
- (上接第80页)
- ZHANG Wei-ping, LIU Zhong-hua, ZOU Long-jiang, et al. Effect of Processing Parameters on Microstructure of NiCrTiC Coating by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(3):369—373.
- [10] 朱刚贤,张安峰,李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(1):296—301.
ZHU Gang-xian, ZHANG An-feng, LI Di-chen. Effect of Process Parameters on Surface Smoothness in Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1):296—301.
- [11] 何星华,戈晓岚,许晓静,等. TC4钛合金表面氧化锆催化渗硼工艺的优化[J]. 中国表面工程, 2013, 26(6):52—56.
HE Xing-hua, GE Xiao-lan, XU Xiao-jing, et al. Optimization of Zirconium Oxide Infiltration Process on Surface of TC4 Titanium Alloy[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(6):52—56.
- [12] LI Jun, ZHANG Xuan-jun, WANG Hui-ping. Microstructure and Mechanical Properties of Ni-based Composite Coatings Reinforced by in situ Synthesized TiB₂+TiC by Laser Cladding[J]. International Journal of Minerals, 2013, 20(1):57—64.
- [13] STEEN W M, MAZUMDER J. Laser Surface Treatment[J]. Laser Material Processing, 2010, 31(6):295—347.
- [14] ZHANG Ke-min, ZOU Jian-xin, LI Jun. Synthesis of Y₂O₃ Particle Enhanced Ni/TiC Composite on TC4 Ti Alloy by Laser Cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22:1817—1823.
- [15] 王志坚,董世运,徐滨士. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2):315—319.
WANG Zhi-jian, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, et al. Effect of Laser Cladding Processing Parameters on Metal Forming Efficiency and Geometry[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2):315—319.