

高速火焰喷涂 FeCoCrNiAlTi 高熵合金涂层的耐高温氯腐蚀性能

张学斌^{1,2}, 胡树森¹, 汪友路¹, 代真³,
初希³, 王平⁴, 苏海林¹

(1.合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009; 2.高性能铜合金材料及成形加工教育部工程研究中心, 合肥 230009; 3.中电华创电力技术研究有限公司, 江苏 苏州 215123;
4.合肥科德电力表面技术有限公司, 合肥 230088)

摘要: 目的 提高垃圾焚烧发电锅炉的水冷壁和过热器管等部件的使用寿命, 确定具有最佳耐高温氯腐蚀性能的高熵合金 FeCoCrNiAlTi_x 的成分。方法 采用高速火焰喷涂在 Q235 基体上制备 FeCoCrNiAlTi_x ($x=0$ 、0.4、0.8、1.2、1.6) 高熵合金涂层, 运用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪研究 Ti 含量对涂层形貌和组织结构的影响, 并测试涂层的抗热震性能和耐高温氯腐蚀性能。结果 高速火焰喷涂高熵合金涂层呈典型的层状结构, 随着 Ti 含量的增加, 涂层的孔隙率降低, $x=1.2$ 时涂层的致密度最高, 其孔隙率仅为 0.46%。添加 Ti 后的高熵合金涂层由 FCC 相和 BCC 相组成, 随着 Ti 含量的增加, FCC 相逐渐减少, 涂层主要为 BCC 相。在 800 °C 到常温的循环热震试验中, 高熵合金涂层具有良好的抗热震性能。在 60 h 的高温熔盐腐蚀后, 所有高熵合金涂层相较 Q235 具有显著的耐高温氯腐蚀性能, 对高温腐蚀质量变化进行拟合, 发现其满足幂函数模型。结论 添加适量的 Ti 能够改善 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金涂层的成形质量, 降低涂层的孔隙率, 其中高速火焰喷涂 FeCoCrNiAlTi_{1.2} 涂层的孔隙率最低, 抗热震性能和耐高温氯腐蚀性能最好。

关键词: 高熵合金涂层; FeCoCrNiAlTi; 高温氯腐蚀; 高速火焰喷涂; 组织结构

中图分类号: TB37 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2022)08-0381-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.034

High Temperature Chlorine Corrosion Resistance of FeCoCrNiAlTi High Entropy Alloy Coatings Prepared by High-velocity-oxygen-fuel Spraying

ZHANG Xue-bin^{1,2}, HU Shu-sen¹, WANG You-lu¹, DAI Zhen³,
CHU Xi³, WANG Ping⁴, SU Hai-lin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Engineering Research Center of High Performance Copper Alloy Materials and Processing, Ministry of Education, Hefei 230009, China;
3. China Power Hua Chuang Electricity Technology Research Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215123 China;
4. Hefei Kede Surface Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

收稿日期: 2021-07-06; 修订日期: 2021-11-03

Received: 2021-07-06; Revised: 2021-11-03

作者简介: 张学斌 (1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为金属基/陶瓷基复合材料。

Biography: ZHANG Xue-bin (1974-), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: metal matrix/ceramic matrix composites.

引文格式: 张学斌, 胡树森, 汪有路, 等. 高速火焰喷涂 FeCoCrNiAlTi 高熵合金涂层的耐高温氯腐蚀性能[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 381-386.

ZHANG Xue-bin, HU Shu-sen, WANG You-lu, et al. High Temperature Chlorine Corrosion Resistance of FeCoCrNiAlTi High Entropy Alloy Coatings Prepared by High-velocity-oxygen-fuel Spraying[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 381-386.

ABSTRACT: The furnace wall cooling surface and super heater tube of waste incineration power generation boiler are strongly corroded by high temperature chlorine. In view of the excellent high temperature oxidation resistance of high entropy alloy, the high temperature chlorine corrosion resistance of FeCoCrNiAlTi_x ($x=0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6$) high entropy alloy coating was studied. In terms of the method, the FeCoCrNiAlTi_x high entropy alloy coating was prepared by high-velocity-oxygen-fuel spraying on the Q235 substrate, and the effect of Ti content on the morphology and structure of the coating was studied by scanning electron microscope and X-ray diffractometer, the thermal shock resistance and high temperature chlorine corrosion resistance of the coating were tested. The results show that the high entropy alloy coating presents a typical layered structure. With the increase of Ti content, the porosity of the coating decreases continuously. The highest density of the coating is obtained when Ti content is $\text{FeCoCrNiAlTi}_{1.2}$, while the porosity is only 0.46%. The high entropy alloy coating without Ti is composed of FCC phase and BCC phase; with the increase of Ti content, the FCC phase decreases gradually and the coating structure is mainly composed of BCC phase. High entropy alloy coatings have good thermal shock resistance in cyclic thermal shock tests from 800 °C to room temperature. Furthermore, the high entropy alloy coatings have remarkable resistance to high temperature chlorine corrosion in high temperature molten salt environment, and the relationship between the mass change of the coatings and time is satisfied with the power function. Comprehensive analysis shows that the addition of an appropriate amount of Ti can improve the forming quality of FeCoCrNiAlTi_x coating and reduce the porosity of the coating. Among them, the porosity of $\text{FeCoCrNiAlTi}_{1.2}$ coating is the lowest, and the thermal shock resistance as well as high temperature chlorine corrosion resistance are the best.

KEY WORDS: high entropy alloy coating; FeCoCrNiAlTi ; high temperature chlorine corrosion; high-velocity-oxygen-fuel; microstructure

垃圾焚烧发电作为新型的环保项目,具有可持续发展的潜能,但垃圾焚烧过程会对锅炉和管道造成严重的高温腐蚀。目前的研究认为,Cl 是引起的垃圾焚烧锅炉高温腐蚀的主要因素,主要因为以不同形态存在的氯元素^[1],如单质 Cl_2 、 Cl^- 和金属氯盐分别可以诱发氯的活性腐蚀、电化学腐蚀和熔盐腐蚀等多种类型的金属腐蚀^[2-5]。垃圾焚烧锅炉中的 Cl 主要来源为塑料(PVC)中的有机氯盐和厨余垃圾中的无机氯盐^[1]。对于垃圾焚烧锅炉中的高温氯腐蚀问题,如何减缓锅炉管道的高温腐蚀,保护和延长过热器管和水冷壁等部件的使用寿命,成为了目前阻碍垃圾焚烧发电发展的难题之一。

高熵合金因其在物理化学上独特的“四大效应”和优异的耐磨性、耐腐蚀性和抗氧化性能,而具有广泛的应用前景^[6-8]。其中, FeCoCrNiAl 系列高熵合金涂层为发展较早、研究体系比较完备的高熵合金涂层^[9-11]。由于 FeCoCrNiAl 系列的高熵合金涂层在高温下能够形成致密的氧化膜,能够有效提高涂层的抗氧化性能^[12]。

在此基础上,崔文元等^[13]使用激光熔覆在 Ti6Al4V 基底上制备了 $\text{FeCoCrNiAlTi}_{0.5}$ 高熵合金涂层,并对其微观结构和高温氧化行为展开了研究,在 700、800 °C 下的氧化试验表明,高熵合金涂层比 Ti6Al4V 基体具有更好的抗氧化性。Martin 等^[14]采用高速火焰喷涂获得了高致密度和低氧化程度的 FeCoCrNiAlTi 涂层,并对涂层的相结构和耐磨损性能进行了研究,并在较大的温度范围内研究了 $\text{FeCoCrNiAlTi}_{0.5}$ 涂层的耐磨性。研究发现,当温度高于 800 °C 时,涂层表面会形成致密的氧化层,对基体产生保护作用,耐磨性得到显著提高^[15]。Hsu 等^[16-17]

的研究结果也表明,热喷涂 $\text{Fe}_{0.2}\text{Co}_{0.6}\text{Cr}_x\text{Ni-SiAlTi}_y$ 高熵合金涂层在 1 100 °C 时具有良好的抗氧化性。Ham 等^[18]研究了钛含量对 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金在 1 100 °C 下抗氧化性能的影响,结果表明,氧化试验后,合金的表面成分主要为 Al_2O_3 , FeCoCrNiAlTi_x 相对 FeCoCrNiAl 具有更强的抗氧化性能。可见,添加 Ti 能够促进表面致密氧化膜的形成,能进一步提高涂层的抗热腐蚀性能。

目前针对高熵合金涂层的研究主要集中于耐氧化和耐高温摩擦磨损性能,对于该类涂层耐高温氯腐蚀性能的研究相对较少,且未见到关于 Ti 元素对涂层耐高温氯腐蚀性能影响的相关报道。本文在已有研究的基础上,采用高速火焰喷涂在 Q235 基材上喷涂 FeCoCrNiAlTi_x ($x=0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6$) 高熵合金涂层,研究不同 Ti 含量对高熵合金涂层组织结构和耐高温腐蚀性能的影响。

1 试验

1.1 样品制备

本试验以 Q235 作为喷涂基材,尺寸为 20 mm×20 mm×3 mm,其主要成分见表 1。喷涂前,需对 Q235 钢材表面进行清理,并喷砂预处理。采用惰性气雾化 FeCoCrNiAl 高熵合金球形粉(300 目)和高纯 Ti 粉(500 目),按照 FeCoCrNiAlTi_x 摩尔比 $x=0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6$ 比例(简称为 $\text{Ti}0, \text{Ti}0.4, \text{Ti}0.8, \text{Ti}1.2, \text{Ti}1.6$)球磨 4 h,混合均匀。高速火焰喷枪型号为 CP-1000,主要燃料气为乙炔和氧气,燃气压力为 0.45 MPa,压

缩空气压力为 0.4~0.6 MPa, 喷涂距离为 180 mm。

表 1 Q235 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Q235 steel

wt. %					
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.13	0.25	0.39	0.008	0.014	Bal.

1.2 结构表征及性能测试

采用 PANalytical X-Pert PRO MPD 型 X 射线衍射仪对涂层物相进行分析, 靶材为铜靶, 工作电压为 40 kV, 工作电流为 40 mA。使用日立 SU8020 冷场发射扫描电镜和配套能谱仪观察高熵合金涂层的微观结构和元素组成。采用 MH-3L 显微硬度计测试涂层的显微硬度, 载荷为 500 g, 保压时间为 15 s。采用高温熔盐腐蚀模拟实际腐蚀环境^[19-20]。在涂层表面均匀涂覆 KCl : Na₂SO₄ 摩尔比为 1 : 1 的混合盐溶液, 涂盐量为 3 mg/cm²。烘干后, 在 650 ℃下保温 60 h, 并记录涂层的质量变化。

2 结果与讨论

2.1 涂层的组织结构

高速火焰喷涂 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金涂层截面的显微形貌如图 1 所示。由图 1 可以看出, 不同成分 FeCoCrNiAlTi_x 涂层横截面的显微组织均呈现明显的层状结构, 涂层的厚度约为 500 μm。涂层内主要存在 2 种不同的相, 经能谱分析发现, 图中颜色较深的衬度为金属氧化物。氧化物的产生主要是由于高速火

焰喷涂时, 熔融的粉末颗粒在压缩空气的驱动下, 高速飞行撞击到基体或涂层表面, 颗粒瞬间扁平化, 并凝固成层状结构。粒子在飞行和凝固过程中, 不可避免地与压缩空气反应, 生成氧化物^[21]。由图 1 可知, 氧化物的含量随喷涂粉末中 Ti 粉含量的增加而增加。有研究表明, 热喷涂涂层中氧化物的含量与喷涂粉末的粒径尺寸有关, 粉末粒径越小, 越容易生成氧化物^[22]。涂层内的孔洞为闭孔, 与外界不连通, 使用 Photoshop 图像处理软件计算涂层的孔隙率。结果表明, Ti0 涂层的孔隙率最高, 为 2.65%, 随着 Ti 含量的增加, 孔隙的数量和尺寸均有降低, Ti1.2 涂层的致密度最高, 其孔隙率仅为 0.46%。

FeCoCrNiAlTi_x 涂层表面的显微形貌如图 2 所示。由于高速火焰喷涂是由无数高速运动的熔融金属颗粒组成的金属束流, 涂层表面呈现层状堆积, 并有明显的溅射现象。随着钛含量的增加, 表面飞溅逐渐减少。Ti1.2 涂层表面的成形质量最高, 无明显缺陷表面较为平整; 但 Ti 含量继续增加到 Ti1.6 时, 涂层的成形质量则又明显下降, 表面存在较多未熔的颗粒。故通过添加适量的 Ti 能够提高涂层的沉积率, 改善涂层的成形质量, 降低涂层的孔隙率。

不同成分的 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金涂层对应的 X 射线衍射图见图 3。Ti0 涂层主要由 FCC 和 BCC 结构组成, 主要是由于喷涂过程中高温作用下 Al 元素的消耗, 使得原来的 BCC 相部分转变为 FCC 相。随着 Ti 含量的增加, 涂层中的 FCC 相逐渐减少, Ti1.6 涂层几乎无 FCC 相存在, 说明添加 Ti 可以抑制 BCC 相向 FCC 相的转变。

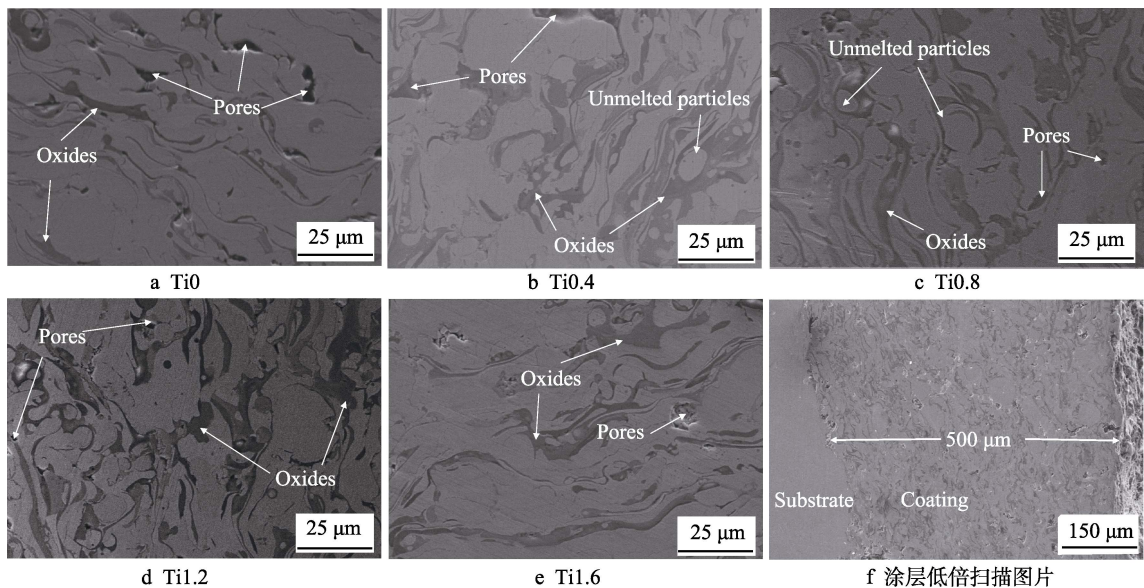


图 1 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金涂层截面的显微形貌
Fig.1 Cross section morphology of FeCoCrNiAlTi_x coating: a) Ti0; b) Ti0.4; c) Ti0.8; d) Ti1.2; e) Ti1.6; f) low magnification micrograph of the coating

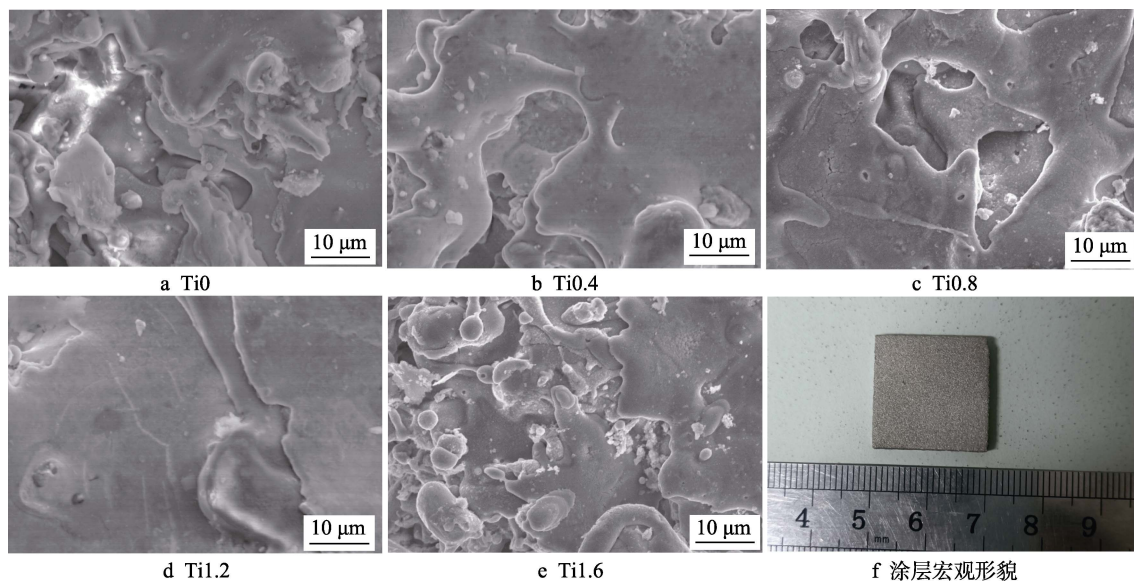
图2 FeCoCrNiAlTi_x高熵合金涂层表面形貌

Fig.2 Surface morphology of FeCoCrNiAlTi_x coating: a) Ti0; b) Ti0.4; c) Ti0.8; d) Ti1.2; e) Ti1.6; f) macroscopic morphology of coatings

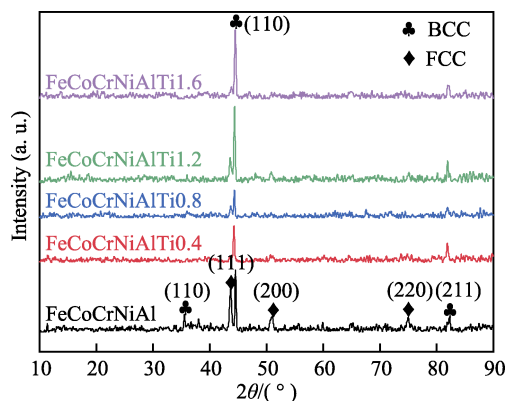


图3 FeCoCrNiAlTi_x高熵合金涂层的X射线衍射图

Fig.3 XRD patterns of FeCoCrNiAlTi_x coatings

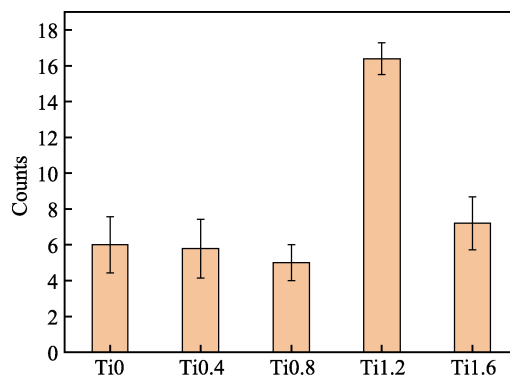


图4 FeCoCrNiAlTi_x高熵合金涂层的抗热震性能

Fig.4 Thermal shock resistance of FeCoCrNiAlTi_x coating

2.2 抗热震性能测试

FeCoCrNiAlTi_x高熵合金涂层800℃到常温的抗热震性能的测试结果如图4所示。图4纵坐标表示各涂层在循环热震试验中涂层完全脱落的平均最大次数。由图4可知,Ti1.2的抗热震性能最好,平均为17次;Ti0.8的抗热震性能最差,平均为5次。涂层主要的失效形式是沿着涂层与基体的界面脱落,脱落后基体呈严重的氧化色。引起涂层热震失效的主要因素有:高温氧化影响了涂层与基体界面的结合状态,高温下的氧化气氛沿界面渗入,随着热循环次数的增加,氧化现象越来越严重,加快了涂层的脱落速度;涂层与基体之间的热膨胀系数不同,在冷热变化中产生局部应力,当局部应力超过涂层材料的强度极限时,涂层会产生裂纹,直至脱落^[23];涂层内部的界面、微孔和夹杂等缺陷处,也会产生应力集中,成为裂纹的形核与扩展源。

2.3 涂层的耐高温氯腐蚀性能

采用高温熔盐腐蚀测试不同涂层在650℃下的耐高温氯腐蚀性能。由于Q235耐氧化性和耐腐蚀性能较差,试样基体部分氧化严重程度明显高于涂层部分。高温氯腐蚀前后涂层形貌变化情况如图5所示,Q235试样发生严重的腐蚀和氧化,而高熵合金涂层表面未发现明显的腐蚀和氧化。

为了能够准确反应出涂层的质量变化情况,通过无涂层的Q235试样作为对照组,分别计算出不同腐蚀时间下Q235的平均氧化速率 v_t ,代入式(1)计算出涂层的实际质量变化(Δw)情况。

$$\Delta w = \frac{\Delta m - S_0 \times v_t}{S_c} \quad (1)$$

式中: Δm 为试样的质量变化,mg; S_c 为涂层面积, cm^2 ; S_0 试样无涂层部分的氧化面积, cm^2 。不同涂层在高温氯腐蚀60h的实际质量变化情况如图6所示。

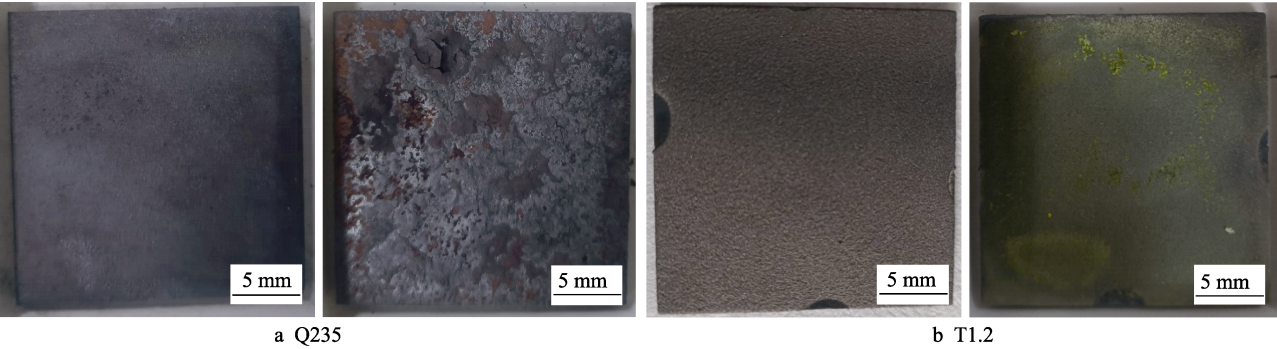


图 5 涂层高温氯腐蚀试验前后对比
Fig.5 Comparison of coating before and after high temperature chlorine corrosion test

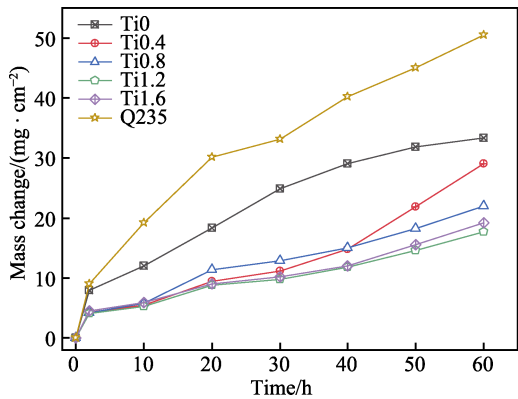


图 6 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金涂层和 Q235 高温氯腐蚀 60 h 的质量变化
Fig.6 High temperature chloride corrosion results of FeCoCrNiAlTi_x coating and Q235 for 60 h

由图 6 可知,在高温氯盐腐蚀的环境下,涂层的质量逐渐增加,但所有涂层的质量变化均明显小于无涂层防护的 Q235 的质量变化,故涂层具有良好的耐高温氯腐蚀性能。再将质量变化和时间按照式(2)进行幂函数拟合^[24-25]:

$$\Delta w = K \times t^n \tag{2}$$

式中: t 为腐蚀时间, h; K 、 n 是比例系数。 K 值可表示腐蚀发生的严重程度, K 值越大, 腐蚀越严重。 n 值表示腐蚀的发展趋势, $n > 1$ 代表腐蚀速率不断增加; $n = 1$ 代表腐蚀速率不变; $n < 1$ 代表腐蚀速率不断减小。不同涂层的拟合结果见表 2。

表 2 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金涂层的拟合结果
Tab.3 The fitting results of FeCoCrNiAlTi_x coating and Q235

Coatings	K	n	R^2
Ti0	4.254	0.510	0.989
Ti0.4	0.288	1.111	0.952
Ti0.8	1.601	0.627	0.980
Ti1.2	1.420	0.598	0.967
Ti1.6	1.433	0.611	0.953
Q235	6.084	0.513	0.997

由表 2 的拟合结果可知,所有拟合方程的相关系

数 R^2 值均大于 0.95, 拟合程度较高, 说明高熵合金涂层的高温氯腐蚀的质量变化符合幂函数发展规律。由于 Ti0.4 涂层的 n 值大于 1, 代表腐蚀速率在不断增大, 推测涂层在高温氯腐蚀中产生裂纹或缺陷已失去防护能力, 而其余涂层的 n 值均小于 1。由 K 值大小可以认为, 涂层腐蚀的严重程度为: $\text{Ti1.2} < \text{Ti1.6} < \text{Ti0.8} < \text{Ti0} < \text{Q235}$ 。

3 结论

- 1) 采用高速火焰喷涂工艺制备了 FeCoCrNiAlTi_x 高熵合金涂层, 涂层具有明显的层状结构。
- 2) 随着 Ti 含量的增加, 涂层由 FCC+BCC 相转变为单一的 BCC 相, Ti1.2 涂层的孔隙率最低, 表面成形质量最好。在 800 ℃ 下的循环热震试验中, 涂层 Ti1.2 的抗热震性能最好, 平均达到 17 次。
- 3) 涂层在高温氯腐蚀试验中的质量变化满足幂函数模型, 所有涂层相较 Q235 具有良好的耐高温腐蚀性能, 高速火焰喷涂 Ti1.2 涂层为所有试验涂层中综合性能最好的耐高温氯腐蚀涂层。

参考文献:

[1] MA Wen-chao, WENGA T, FRANDSEN F J, et al. The Fate of Chlorine during MSW Incineration: Vaporization, Transformation, Deposition, Corrosion and Remedies[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 76: 100789.

[2] SADEGHI E, MARKOCSAN N, JOSHI S. Advances in Corrosion-Resistant Thermal Spray Coatings for Renewable Energy Power Plants: Part II—Effect of Environment and Outlook[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(8): 1789-1850.

[3] NIELSEN H P, FRANDSEN F J, DAM-JOHANSEN K, et al. The Implications of Chlorine-Associated Corrosion on the Operation of Biomass-Fired Boilers[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(3): 283-298.

[4] SHINATA Y. Accelerated Oxidation Rate of Chromium

- Induced by Sodium Chloride[J]. *Oxidation of Metals*, 1987, 27(5-6): 315-332.
- [5] NIEMI J, KINNUNEN H, LINDBERG D, et al. Interactions of PBCL 2 with Alkali Salts in Ash Deposits and Effects on Boiler Corrosion[J]. *Energy & Fuels: an American Chemical Society Journal*, 2018, 32(8): 8519-8529.
- [6] QIU Xing-wu. Microstructure, Hardness and Corrosion Resistance of $\text{Al}_2\text{CoCrCuFeNiTi}_x$ High-Entropy Alloy Coatings Prepared by Rapid Solidification[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 735: 359-364.
- [7] CHEN Jian, ZHOU Xue-yang, WANG Wei-li, et al. A Review on Fundamental of High Entropy Alloys with Promising High-Temperature Properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 760: 15-30.
- [8] MIRACLE D B, SENKOV O N. A Critical Review of High Entropy Alloys and Related Concepts[J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448-511.
- [9] MEGHWAL A, ANUPAM A, MURTY B S, et al. Thermal Spray High-Entropy Alloy Coatings: A Review[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, 29(5): 857-893.
- [10] SRIVASTAVA M, JADHAV M, CHETHAN, et al. Synthesis and Properties of High Velocity Oxy-Fuel Sprayed $\text{FeCoCrNi}_2\text{Al}$ High Entropy Alloy Coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 378: 124950.
- [11] JIANG Y Q, LI J, JUAN Y F, et al. Evolution in Microstructure and Corrosion Behavior of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 775: 1-14.
- [12] CHENG Jie, WU Yu-ping, SHEN Wei, et al. A Study on Hot Corrosion Performance of High Velocity Arc-Sprayed $\text{FeCrNiAlMnB/Cr}_3\text{C}_2$ Coating Exposed to $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4$ and $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{NaCl}$ [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 397: 126015.
- [13] CUI Wen-yuan, LI Wei, CHEN Wei-ting, et al. Laser Metal Deposition of an $\text{AlCoCrFeNiTi}_{0.5}$ High-Entropy Alloy Coating on a $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ Substrate: Microstructure and Oxidation Behavior[J]. *Crystals*, 2020, 10(8): 638.
- [14] LÖBEL M, LINDNER T, MEHNER T, et al. Microstructure and Wear Resistance of AlCoCrFeNiTi High-Entropy Alloy Coatings Produced by HVOF[J]. *Coatings*, 2017, 7(9): 144.
- [15] LÖBEL M, LINDNER T, LAMPKE T. High-Temperature Wear Behaviour of $\text{AlCoCrFeNiTi}_{0.5}$ Coatings Produced by HVOF[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 403: 126379.
- [16] HSU W L, MURAKAMI H, ARAKI H, et al. A Study of $\text{NiCo}_{0.6}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_x\text{SiAlTi}_y$ High-Entropy Alloys for Applications as a High-Temperature Protective Coating and a Bond Coat in Thermal Barrier Coating Systems[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(9): C524-C531.
- [17] HSU W L, YANG Ya-chu, CHEN C Y, et al. Thermal Sprayed High-Entropy $\text{NiCo}_{0.6}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_{1.5}\text{SiAlTi}_{0.2}$ Coating with Improved Mechanical Properties and Oxidation Resistance[J]. *Intermetallics*, 2017, 89: 105-110.
- [18] HAM G S, KIM Y K, NA Y S, et al. Effect of Ti Addition on the Microstructure and High-Temperature Oxidation Property of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy[J]. *Metals and Materials International*, 2021, 27(1): 156-165.
- [19] 章亚林, 毛晓飞, 刘光明, 等. 不同 Ni、Cr 含量镍基涂层在模拟烟气中的热腐蚀行为[J]. *表面技术*, 2017, 46(9): 191-196.
- ZHANG Ya-lin, MAO Xiao-fei, LIU Guang-ming, et al. Hot Corrosion Behavior of Ni-Based Coating with Various Ni and Cr Content in Simulated Fuel Gas[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(9): 191-196.
- [20] 杨波, 李茂东, 刘康生, 等. 超音速喷涂 45CT 涂层在 $\text{KCl}+\text{K}_2\text{SO}_4+\text{Na}_2\text{SO}_4$ 熔融盐中的热腐蚀行为[J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 178-183.
- YANG Bo, LI Mao-dong, LIU Kang-sheng, et al. Hot Corrosion Behavior of 45CT Coating Prepared by HVOF in $\text{KCl}+\text{K}_2\text{SO}_4+\text{Na}_2\text{SO}_4$ Molten Salt[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2): 178-183.
- [21] 姬梅梅, 朱时珍, 马壮. 航空航天用金属表面热防护涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(1): 253-266.
- JI Mei-mei, ZHU Shi-zhen, MA Zhuang. Advances in the Research of Thermal Protective Coatings on Aerospace Metal Surface[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(1): 253-266.
- [22] ANUPAM A, KOTTADA R S, KASHYAP S, et al. Understanding the Microstructural Evolution of High Entropy Alloy Coatings Manufactured by Atmospheric Plasma Spray Processing[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 505: 144117.
- [23] 李旭强, 汤鹏君, 姜欣, 等. 20%NiCr-80% Cr_3C_2 涂层抗热冲击和抗氧化性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(3): 180-188.
- LI Xu-qiang, TANG Peng-jun, JIANG Xin, et al. Thermal Shock Resistance and Antioxidant Properties of 20%NiCr-80% Cr_3C_2 Coating[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(3): 180-188.
- [24] 赵雅萱, 王少刚, 叶庆丰, 等. 高 Cr 含量镍基合金涂层的电弧喷涂制备及其抗氧化性能研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(1): 21-26.
- ZHAO Ya-xuan, WANG Shao-gang, YE Qing-feng, et al. Preparation and Oxidation Resistance of Ni-Based Alloy Coating with High Cr Content by Electric Arc Spraying[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(1): 21-26.
- [25] 江旭东, 周治文, 许征兵, 等. FeAlMoCrC 和 FeAlNiMoCrC 涂层在 700℃氧化行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(9): 3225-3234.
- JIANG Xu-dong, ZHOU Zhi-wen, XU Zheng-bing, et al. Oxidation Behavior of FeAlMoCrC and FeAlNiMoCrC Coatings at 700 °C [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(9): 3225-3234.

责任编辑：刘世忠