

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.05.005

后处理工艺对超音速电弧喷涂 NiCrTi 涂层氧化行为的影响

郑相锋^{1,2}, 崔 崇^{1,2}

(1. 国家能源集团科学技术研究院有限公司, 北京 100070;

2. 国能锅炉压力容器检验有限公司, 北京 100070)

摘 要:采用超音速电弧喷涂技术制备了 NiCrTi 涂层,研究了封孔、表面喷丸+封孔及 NiAl 面层涂覆+封孔等后处理工艺对涂层高温氧化和水冷热震性能的影响。结果表明,仅涂封孔剂的涂层在 700 ℃ 氧化过程中生成了疏松多孔的 Cr 氧化膜,该氧化膜偏厚易剥落;在水冷热震过程中涂层出现严重剥落现象。喷丸+封孔能使 NiCrTi 涂层内部更加致密,表面更加平整,氧化过程中形成了致密且更薄的 Cr 氧化膜,涂层抗氧化性和抗热震性能俱佳。采用 NiAl 面层+封孔后处理时,涂层表面生成了致密的 Al 氧化膜,对 NiCrTi 涂层起到较好的抗氧化保护作用,但由于无法消除涂层内孔隙,涂层在水冷热震测试时依然发生了开裂。综合分析来看,喷丸+封孔后处理工艺对 NiCrTi 涂层高温性能提升最为明显。

关键词:超音速电弧喷涂;NiCrTi 涂层;NiAl 面层;喷丸;封孔

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2023)05-0031-08

Influence of Post Treatments on the Oxidation Behavior of Ultrasonic Arc-sprayed NiCrTi Coatings

ZHENG Xiangfeng^{1,2}, CUI Chong^{1,2}

(1. Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Guoneng Boiler and Pressure Vessel Inspection Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: NiCrTi coatings were made via ultrasonic arc spray technique. The effects of some post treatments, including sealing, surface shot peening + sealing and the overlaying of NiAl top coat + sealing, on the high-temperature oxidation resistance and thermal shock property of the NiCrTi coatings were investigated. The results show that porous Cr oxide film was formed at the sealed-only coating surface in the oxidation process at 700 ℃. The Cr oxide film was thick and easy to spall. In the water-cooling thermal shock process, heavy spallation of the coating took place. Shot peening can make the NiCrTi coating denser and smoother. Dense Cr oxide film was formed at the peened coating in the oxidation process. The peened and sealed coating showed good oxidation resistance and thermal shock property. When applying a NiAl top coat + sealing, dense Al oxide film was formed at the coating surface which well protected the NiCrTi coating against the oxidation. However, the top coating did not decrease the coating's porosity, and the bilayer coating cracked in the water-cooling thermal shock test. Overall, shot peening + sealing process was the best method to improve the high-temperature properties of the NiCrTi coatings.

Key words: ultrasonic arc spray; NiCrTi coating; NiAl top coat; shot peening; sealing

收稿日期: 2022-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3701504); 国家能源集团科学技术研究院有限公司项目(GJ2021Y001)

Fund: Supported by the National Key R & D Plan(2022YFC3701504); CHN Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Project(GJ2021Y001)

作者简介: 郑相锋(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事电站设备性能检测和安全评估研究。

通信作者: 崔崇(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电站设备腐蚀与防护、材料安全评价研究。

引用格式: 郑相锋, 崔崇. 后处理工艺对超音速电弧喷涂 NiCrTi 涂层氧化行为的影响[J]. 有色金属工程, 2023, 13(5): 31-38.

ZHENG Xiangfeng, CUI Chong. Influence of Post Treatments on the Oxidation Behavior of Ultrasonic Arc-sprayed NiCrTi Coatings[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(5): 31-38.

电站锅炉在运行过程中,因工况条件的限制,极易受到高温氧化和腐蚀的影响,引发爆管事故,严重影响电站锅炉的安全运行^[1-2]。国内外针对电站锅炉防护问题进行了大量的技术研究^[3-6]。美国 TAFA 公司针对性地研发了 45CT 型 NiCrTi 系电弧喷涂涂层材料,并已在国内外电站锅炉高温防腐领域发挥了重要作用,能够有效提高电站锅炉受热面管抗高温腐蚀能力。但对于目前经营状况紧张的国内电厂而言,45CT 价格过高。因此,国内相关单位参考 45CT 的化学成分开发了相对廉价的 PS45 型 NiCrTi 材料,并取得了应用。肖宏博等^[7]利用超音速火焰喷涂制备得到了 NiCrTi 涂层,涂层抗氧化耐腐蚀能力与 45CT 涂层相当,具有重要的应用价值。

由于使用丝材作为原料的喷涂效率高,超音速电弧喷涂已成为很多领域优选的低成本厚涂层工业技术^[8-9],是目前制备 NiCrTi 涂层的重要方法。汪刘应等^[8]研究了超音速电弧喷涂工艺对 PS45 型 NiCrTi 涂层显微组织的影响,发现喷涂电压升高,粒子熔化越充分,其涂层界面多重分形谱宽越小,涂层与基体结合界面均匀性越好。由于超音速电弧喷涂涂层是由微小熔融颗粒交错堆叠而成的层状组织,喷涂过程中难免产生氧化物以及气孔等夹杂,故涂层间难免存在一些孔隙缺陷,结合强度偏低。孔隙等缺陷的存在容易使电弧喷涂 NiCrTi 涂层在高温下性能显著降低,例如涂层的高温氧化增重明显加剧,在热震条件下涂层容易发生剥落失效等,严重影响涂层的使用寿命^[10]。使用封孔剂对涂层进行封孔是降低孔隙率的有效方法之一,通过封孔剂对涂层中的通孔进行填充可以有效阻隔外界氧气或腐

蚀介质的侵入,进而提升涂层使用寿命^[11-13]。喷丸处理也是一种重要的提升金属涂层致密度的方法^[14-15],可以作为提高 NiCrTi 涂层致密化的手段。另外,也可以通过在 NiCrTi 涂层表面喷涂一层更抗氧化的面层来提升涂层整体高温性能。然而,目前文献未见此类后处理工艺对 NiCrTi 涂层高温行为影响的相关报道。

为此,本文将针对性地开展封孔、喷丸、面层涂覆对 NiCrTi 涂层高温氧化行为影响的研究,用于指导提升 NiCrTi 涂层高温使用寿命后处理工艺的优选。

1 试验

使用 PS45 型 NiCrTi 丝材(丝材直径:1.6 mm,名义成分:Ni-45Cr-1Ti)作为原料,采用超音速电弧喷涂制备 NiCrTi 涂层,喷涂工艺参数见表 1。为提升 NiCrTi 涂层性能,对涂层进行后处理,包括封孔、喷丸或面层喷涂;几种后处理工艺也可以相互组合。其中封孔后处理是通过封孔剂渗透至涂层中与外界连通的孔隙中提升涂层致密性,封孔工艺过程为:喷涂后的试样经超声清洗并烘干后,在涂层上均匀涂刷封孔剂,每间隔 1 min 刷 1 次,共刷 3 次,室温静置干燥 24 h。喷丸后处理是采用高硬度钢丸对 NiCrTi 涂层表面进行高速撞击夯实,提升涂层致密度和表面平整性。面层后处理是采用超音速电弧工艺在 NiCrTi 涂层上喷涂 NiAl 丝材以形成 NiAl 面层,NiAl 丝材直径为 2.0 mm,名义成分为 Ni-10Al,喷涂工艺见表 1。表 2 为本研究使用的样品种类,涂层样品经过了仅封孔、喷丸+封孔或 NiAl+封孔等后处理。

表 1 超音速电弧喷涂工艺参数

Table 1 Process parameters of ultrasonic arc spray

Materials	Voltage/V	Current/A	Fuel gas flux/(L·min ⁻¹)	Forced air flux/(L·min ⁻¹)	Wire feeding rate/(mm·s ⁻¹)
NiCrTi	38	210	170	1 300	30
NiAl	34	200	150	1 200	30

表 2 样品描述

Table 2 Description of samples

Samples No.	Post treatments of NiCrTi coatings
1	Only sealing
2	Shot peening+sealing
3	NiAl+sealing

对涂层试样进行了高温氧化和热震试验。高温氧化是将试样放入 700 ℃ 大气电炉中进行加热,累计加热时间 240 h。在高温氧化试验中,对样品的

重量变化进行了称量记录,绘制出高温氧化增重曲线,用于评价涂层抗高温氧化性能。在高温氧化增重曲线中,为方便比较,对数据进行归一化处理,将氧化前样品重量计为 1。热震试验是将试样在 700 ℃ 电炉中保温 10 min 后迅速放入 20 ℃ 的水中进行急冷,冷却至水温后再次放入炉子加热,如此反复循环,热震总次数 60 次。在热震试验冷却阶段,观察并记录试样表面翘起、开裂以及颜色变化,通过评定涂层表面变化测评涂层的抗热震性能。使用光

学显微镜记录涂层表面变化,记录时固定仪器的采光量和色差,以便半定量研究涂层不同后处理对表面氧化颜色的影响。高温氧化及热震试验后,对涂层样品进行金相镶样和磨抛,使用 SEM 对样品的横截面组织进行观察和分析。

2 结果与分析

典型的超音速电弧喷涂 NiCrTi 涂层显微组织如图 1 所示。在喷涂过程中, NiCrTi 丝材在超音速电弧焰流中熔化形成高速飞行的熔融颗粒,熔融颗粒在基材表面沉积时经过撞击、变形、冷却、堆叠等过程,使涂层形成了典型的板状堆叠组织结构。由于是在大气环境中喷涂,熔融颗粒表面会发生氧化,进而使涂层中生成内氧化物;经能谱分析发现,该内氧化物富含 Cr 元素,可能是氧化铬或镍铬复合氧化物。NiCrTi 涂层中还不可避免地存在孔隙和微裂纹等缺陷,这些缺陷主要分布于内氧化物或熔融颗粒界面处;其中一些孔隙和微裂纹与外界环境连通,高温情况下外界氧气容易快速进入 NiCrTi 涂层。为提升该涂层的高温使用寿命,可以对涂层进行一定的后处理以提升其抗氧化性。

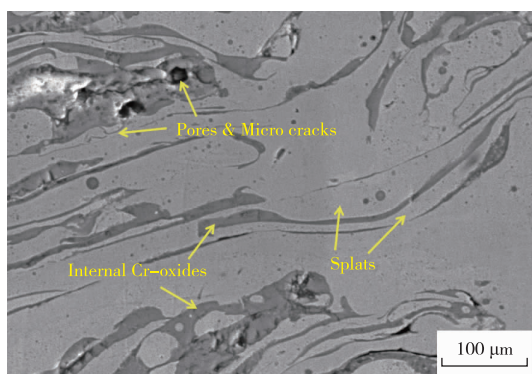


图 1 典型的超音速电弧喷涂 NiCrTi 涂层显微组织

Fig. 1 Typical microstructure image of ultrasonic arc sprayed NiCrTi coating

图 2 为经过三种后处理(仅封孔、喷丸+封孔、NiAl+封孔)涂层显微组织示意图。在 NiCrTi 涂层板状颗粒堆叠组织中(图 2a),通过封孔剂在孔隙及微裂纹等缺陷中的渗透和填充,可以降低涂层的孔隙率,一定程度上可以阻隔氧气的快速渗透。图 2(b)为经过喷丸处理的涂层组织结构示意图,喷丸使得涂层表面及内部更加致密,孔隙率降低。当在 NiCrTi 涂层上喷涂 NiAl 面层后(图 2c),可以获得 NiCrTi/NiAl 双层涂层,在 NiAl 面层中

存在 Al 的内氧化物和孔隙,利用 NiAl 更强的抗氧化性对 NiCrTi 涂层形成高温防护,提升其使用寿命。

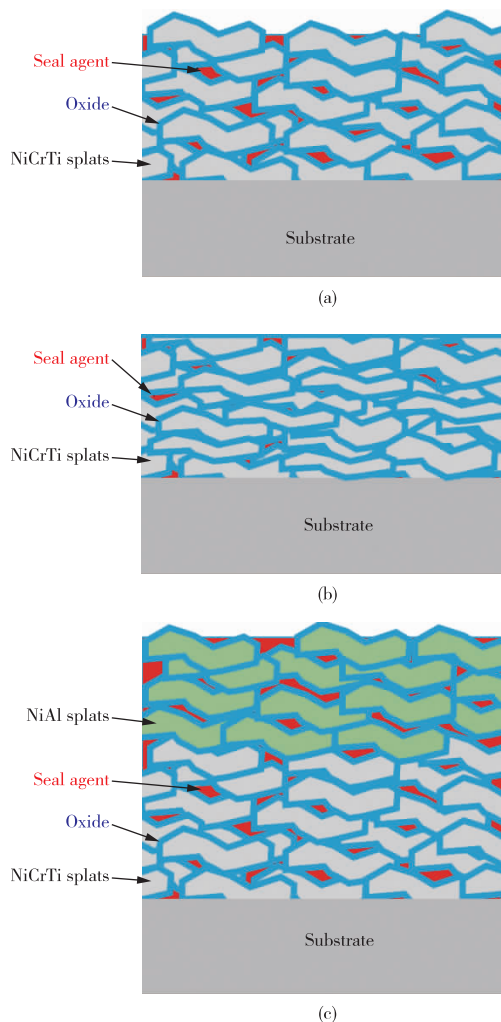


图 2 典型的后处理涂层显微组织示意图:

(a) 仅封孔; (b) 喷丸+封孔; (c) NiAl+封孔

Fig. 2 Schematic drawing of typical coating microstructure with post treatments: (a) Only sealing; (b) Shot peening+sealing; (c) NiAl+sealing

经过 700 °C 炉式高温氧化后,由于生成的氧化物种类及氧化程度不同,不同后处理工艺下涂层表面存在颜色差异。氧化 10 h 后(图 3a),喷涂 NiAl 面层的涂层颜色发绿,这是因为 NiAl 面层表面生成了 Al 的氧化物缘故(可能为氧化铝或镍铝尖晶石);其他后处理工艺下涂层颜色为灰黑色,这是因为 NiCrTi 涂层表面生成了 Cr 的氧化物(可能为氧化铬或镍铬复合氧化物)。随着氧化时间的延长(图 3b),涂层表面氧化物厚度增加, NiAl+封孔涂层由浅绿转变为深绿,仅封孔和喷丸+封孔涂层的颜色也更深。

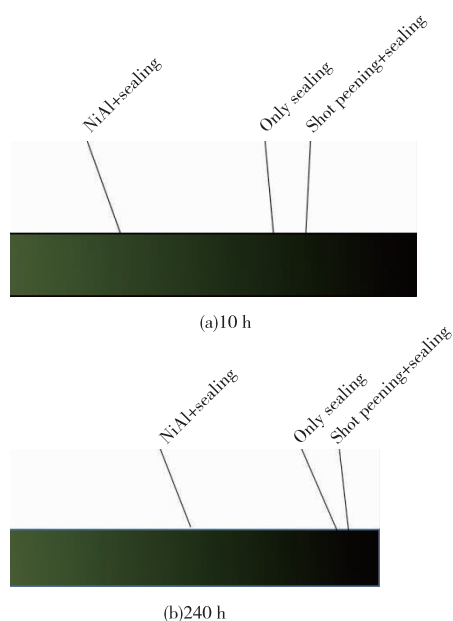
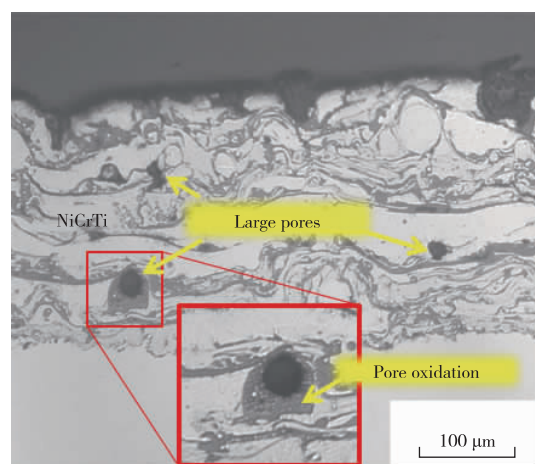


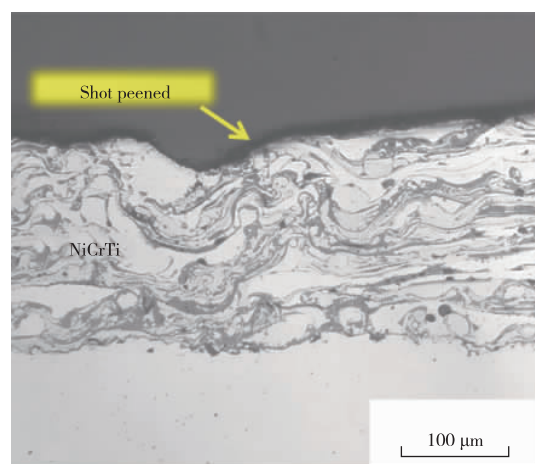
图 3 不同后处理工艺下涂层经过 700 °C 高温氧化后表面颜色变化:(a)10 h;(b)240 h
Fig. 3 Surface color changes of the coatings with different post treatments after oxidation at 700 °C for (a)10 h;(b)240 h

图 4(a)为经过 240 h 高温氧化后的 NiCrTi 涂层横截面显微组织(仅使用封孔后处理),可以看出涂层表面和内部存在氧化现象,涂层表面相对粗糙。涂层内大孔隙处出现“孔隙氧化”现象,即外界氧气渗透进入了涂层内部孔隙,进而在孔隙表面生成明显氧化物。相对而言,进行喷丸的涂层在高温氧化后表现出更为致密的显微结构,未见明显大孔隙,且涂层表面更加平滑(图 4b),这是因为喷丸可使涂层发生较高的塑性形变,产生夯实致密化效果。图 4(c)为 NiCrTi/NiAl 双层涂层显微组织,NiAl 面层与 NiCrTi 底层展示出相似的内氧化组织,也存在大孔隙结构。但在双层涂层内部的孔隙中,尤其是在 NiCrTi 底层的大孔隙中未见“孔隙氧化”现象,这说明 NiAl 涂层起到了良好的抗氧化性,氧化主要发生在 NiAl 面层表面上。

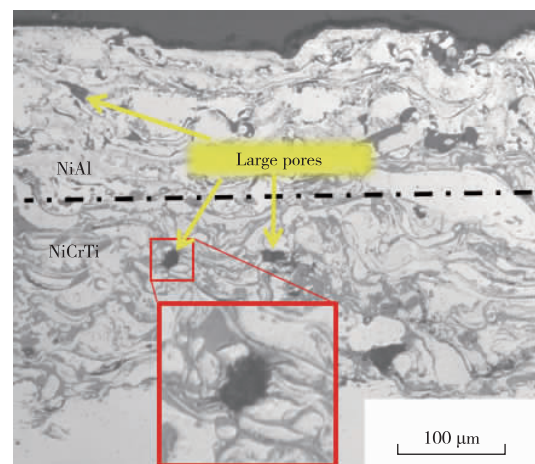
由图 5(a)可以看出,仅涂封孔剂的 NiCrTi 涂层表面生成了较厚 Cr 的氧化物膜,该氧化膜较为疏松,涂层表面存在氧化膜剥落现象。这说明仅涂封孔剂的涂层氧化速度较快,生成的表面氧化膜致密度低、增厚速率快,该氧化膜容易在生长应力作用下发生局部剥落。当进行表面喷丸处理后(图 5b),NiCrTi 涂层表面的 Cr 氧化膜的厚度明显减薄,氧化膜更加致密连续,说明喷丸显著提升了涂层的抗



(a)



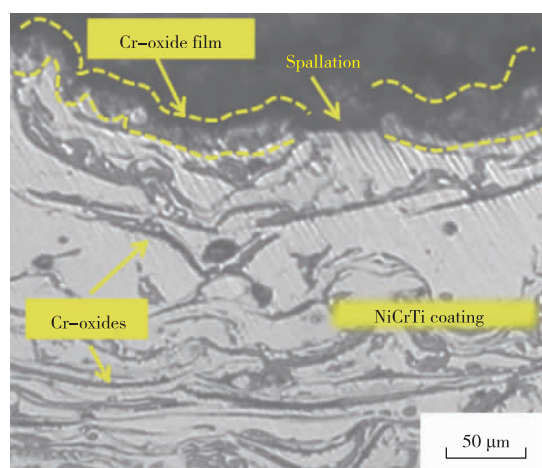
(b)



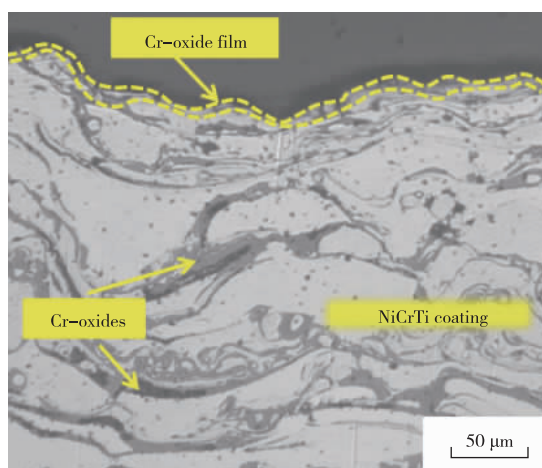
(c)

图 4 不同后处理涂层经过 240 h 高温氧化的横截面显微组织:(a)仅封孔;(b)喷丸+封孔;(c)NiAl+封孔

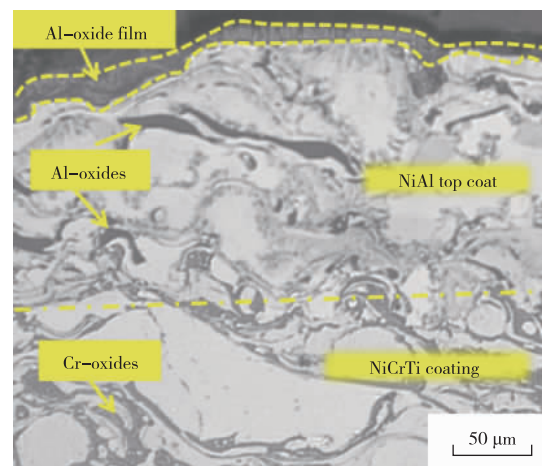
Fig. 4 Cross-sectional microstructure in coatings after 240-hour high-temperature oxidation with different post treatments:(a)Only sealing;(b)Shot peening+sealing;(c)NiAl+sealing



(a)



(b)

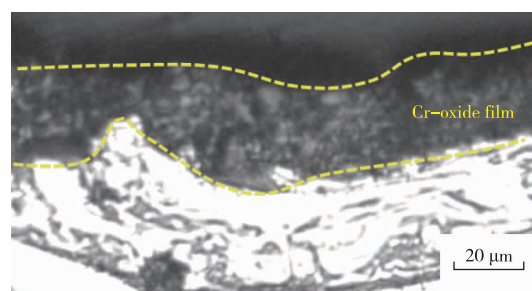


(c)

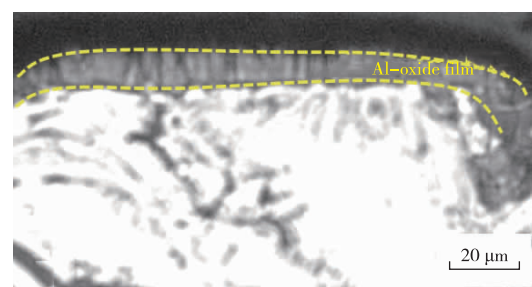
图 5 不同后处理涂层经过 240 h 高温氧化后的表层显微组织:(a)仅封孔;(b)喷丸+封孔;(c)NiAl+封孔

Fig. 5 Near-surface microstructure in coatings after 240-hour high-temperature oxidation with different post treatments: (a) Only sealing; (b) Shot peening+sealing; (c) NiAl+sealing

氧化性。在 NiCrTi/NiAl 双层涂层表面则生成了 Al 的氧化膜(图 5c),虽然 NiAl 面层并未经过喷丸处理,但表面的氧化膜致密且连续,该氧化膜厚度略高于喷丸的 NiCrTi 涂层的 Cr 氧化膜(图 5b),但明显低于仅封孔的 NiCrTi 涂层氧化膜厚度(图 5a)。由此可见,喷丸和喷涂 NiAl 面层后处理均可以显著提升 NiCrTi 涂层的抗氧化性。图 6 对比了典型的 Cr 氧化膜(仅封孔涂层表面)和 Al 氧化膜(NiAl 面层表面)的显微组织,可以看到,Cr 氧化膜致密度相对较差,厚度也明显高于 Al 氧化膜。



(a)



(b)

图 6 典型的氧化膜组织:(a)Cr 的氧化膜;(b)Al 的氧化膜

Fig. 6 Typical oxide film morphology: (a) Cr-oxide film; (b) Al-oxide film

使用喷丸和 NiAl 面层后处理提升涂层抗氧化性的结论也被氧化增重曲线所证实。如图 7 所示,仅封孔的涂层氧化增重速度最快,采用 NiAl 面层的氧化速度居中,而喷丸处理的最低。这与图 5 显微组织观察到的涂层表面氧化膜增厚规律一致。综合来看,喷丸后处理涂层的氧化速度最低,可以作为 NiCrTi 涂层抗氧化性的优选方案。

除了长时抗氧化性,后处理工艺对 NiCrTi 涂层的抗热震性能也有很大影响。如图 8(a)所示,经过 60 次水冷热震试验后,仅封孔的涂层出现严重的涂层剥落现象,造成涂层厚度减少。这可能是因为使用的封孔剂在 700 °C 高温下发生了烧蚀,失去封孔作用,同时 NiCrTi 涂层表面生成的 Cr 氧化膜致密度较差,氧气易渗透进入涂层,造成涂层内部严重

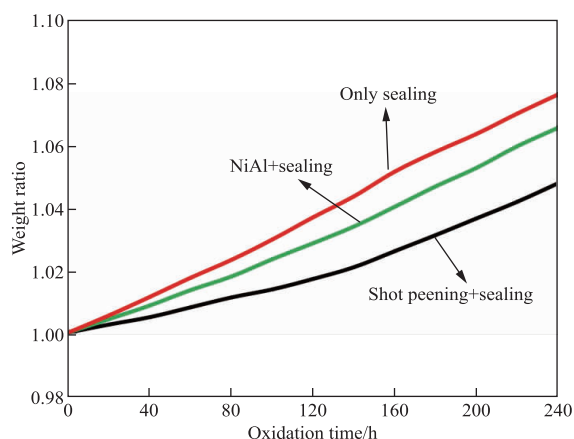
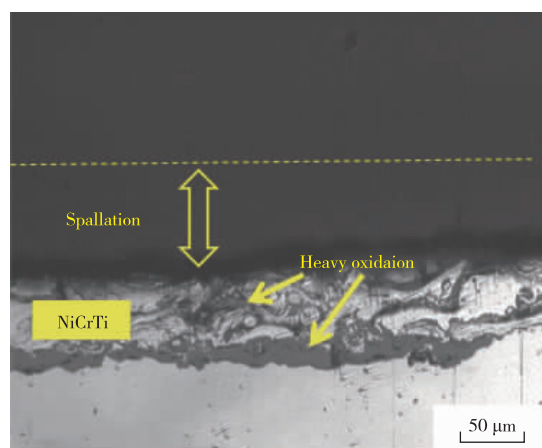


图 7 不同后处理涂层 700 °C 高温氧化增重曲线

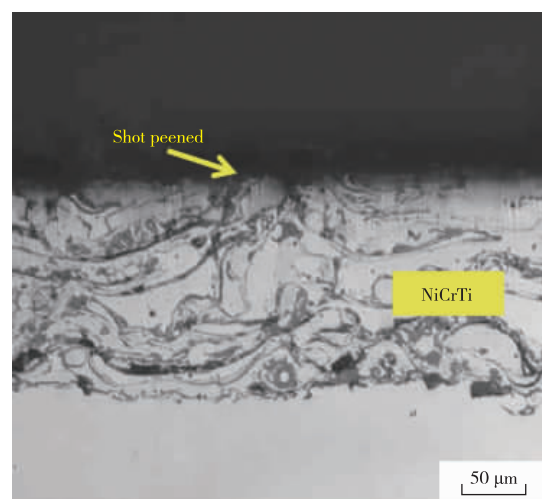
Fig. 7 Weight gain curves of coatings in high-temperature oxidation with different post treatments

氧化。在冷热循环热应力作用下,内部严重氧化的涂层发生了开裂剥落。当使用喷丸或涂覆 NiAl 面层时,涂层未出现明显剥落,这和此两种后处理改善涂层表层和内部组织,以及提升涂层抗氧化性有关。由图 8(b)可以看出,经过喷丸处理的 NiCrTi 涂层依然保持致密结构,涂层无剥落产生,这和该涂层表面可形成薄氧化膜及涂层具有高致密度相关,裂纹不易在该致密涂层中生成。由于 NiAl 涂层表面可以生成抗氧化性氧化铝膜, NiCrTi/NiAl 双层涂层(图 8c)表现出了优于仅封孔 NiCrTi 涂层的抗热震性(图 8a);但由于涂层依然存在较高孔隙率且封孔剂高温发生烧蚀,该双层涂层内也出现了纵向粗裂纹,但未造成涂层剥落。综合来看,使用喷丸后处理工艺是提升 NiCrTi 高温抗氧化性和抗热震性的最佳方案。

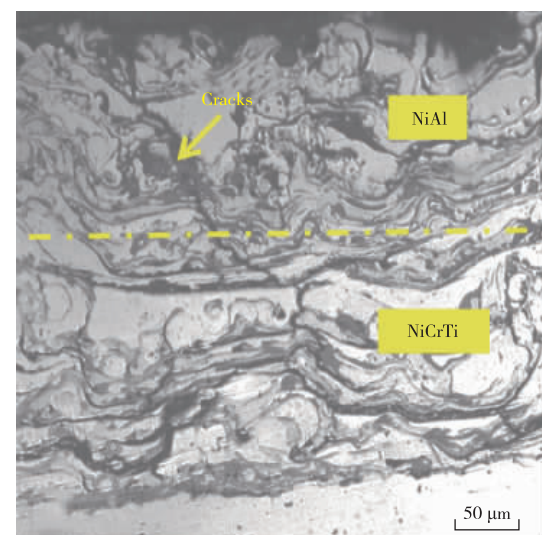
图 9 为超音速电弧喷涂 NiCrTi 涂层的高温氧化失效机理示意图。在高温环境中,原本填充在涂层孔隙中的封孔剂会发生烧蚀,涂层中孔隙和微裂纹重新与外界环境连通。由于该 NiCrTi 涂层表面生成的 Cr 氧化物膜并不致密,抗氧化性不足,氧气可以穿透该氧化膜后通过涂层内部孔隙等缺陷渗透进入涂层,进而导致涂层内部孔隙或微界面处发生严重氧化。孔隙或微界面氧化导致涂层中不均匀热应力的增加,在热震考核条件下,粗裂纹容易沿着这些孔隙缺陷萌生和扩展,进而导致涂层开裂甚至剥落。当采用喷丸后处理工艺后, NiCrTi 涂层内部的孔隙缺陷得到有效消除,表面也更加平整,高温环境中表面氧化膜可有效阻隔氧气渗透,因此有效降低了涂层内部的氧化速度和裂纹萌生几率,在长时氧化或水冷热震考核中涂层整体性能得到提升。采用



(a)



(b)



(c)

图 8 不同后处理涂层经过 60 次热震后的横截面组织:(a)仅封孔;(b)喷丸+封孔;(c)NiAl+封孔

Fig. 8 Cross-sectional microstructure in coatings after 60-time thermal shock testing with different post treatments: (a) Only sealing; (b) Shot peening+sealing; (c) NiAl+sealing

NiAl 面层后处理工艺则是通过在表面形成更加致密的氧化铝膜提升了涂层抗氧化性,降低了 NiCrTi 底层内氧化速度。

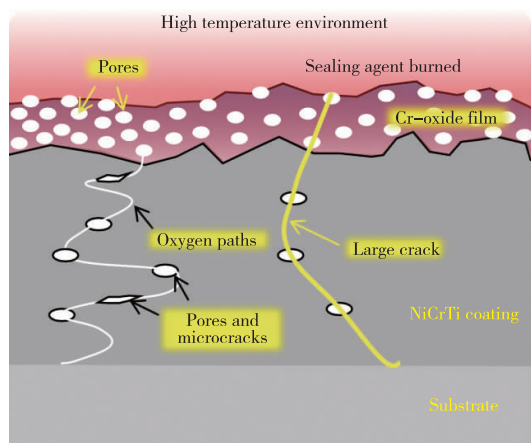


图9 NiCrTi 涂层高温氧化失效机理

Fig. 9 Failure mechanism of NiCrTi coatings in high-temperature oxidation process

3 结论

1) 超音速电弧喷涂制备的 NiCrTi 涂层存在内氧化和孔隙结构,封孔涂层在高温环境中氧化最为严重,这是因为封孔剂在 700 °C 高温下发生了烧蚀,且该涂层表面生成的 Cr 的氧化膜并不致密,未能有效阻隔氧气向内渗透。涂层中孔隙或微界面氧化导致涂层中不均匀热应力增加,在热震考核条件下,粗裂纹容易沿着这些孔隙缺陷萌生和扩展,进而导致涂层开裂甚至剥落。

2) 采用 NiAl+封孔后处理时,涂层表面生成了致密的 Al 的氧化膜,对 NiCrTi 涂层起到较好的抗氧化保护作用,但由于无法消除涂层内孔隙,涂层在水冷热震测试时依然发生了开裂。

3) 当采用喷丸+封孔后处理工艺后, NiCrTi 涂层内部的孔隙缺陷得到有效消除,表面也更加平整,高温环境中表面氧化膜可有效阻隔氧气渗透,因此有效降低了涂层内部的氧化速度和裂纹萌生几率。综合来看,使用喷丸后处理工艺是提升 NiCrTi 高温抗氧化性和抗热震性的最佳方案。

参考文献:

[1] 孙立德. 300 MW 火电燃煤机组锅炉运行及安全性能研究[J]. 科技与企业, 2014(2): 263. .
SUN Lide. Study on the operation and safety performance of 300 MW coal fired boiler[J]. Science-Technology Enterprise, 2014(2): 263.

[2] 徐滨士,刘世参,张振学,等. 电站锅炉水冷壁管道热腐蚀及高速电弧喷涂防护新技术[J]. 中国电力, 2000(3): 13-16.
XU binshi, LIU Shican, ZHANG Zhenxue, et al. Thermal corrosion of water wall tubes of utility boiler and high speed electric arc spraying protective technique[J]. Electric Power, 2000(3): 13-16.

[3] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(4): 1-22.
LI Changjiu. Applications, research progresses and future challenges of thermal spray technology [J]. Thermal Spray Technology, 2018, 10(4): 1-22.

[4] LISCANO S, GIL L, STAIA M H. Effect of sealing treatment on the corrosion resistance of thermal-sprayed ceramic coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2004(188): 135-139.

[5] JIANG C, WANG J, HAN J, et al. Effect of laser remelting on the microstructure and corrosion resistance of plasma sprayed Fe-based coating [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2015, 30(4): 804-807.

[6] MORGAN E J. Thermal spraying for boiler tube protection[J]. Welding & Metal Fabrication, 1992(1/2): 25-31.

[7] 肖宏博,邱质彬,谢明均,等. NiCrTi 系高温防硫腐蚀喷涂材料 45CT 与 PS45 的对比研究[J]. 华电技术, 2012, 34(10): 18-20, 24, 77.
XIAO Hongbo, QIU Zhibin, XIE Mingjun, et al. Comparative study on properties of NiCrTi series high-temperature anti-sulphur corrosion spray painting materials 45CT and PS45 [J]. Huadian Technology, 2012, 34(10): 18-20, 24, 77.

[8] 汪刘应,王汉功,华绍春,等. 用分形理论研究超音速电弧喷涂 PS45 涂层结合强度与喷涂电压的关系[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(2): 291-294.
WANG Liuying, WANG Hangong, HUA Shaochun, et al. Study of the bond strength of PS45 alloy coatings prepared by high velocity arc spray and processing parameters on fractal theory[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(2): 291-294.

[9] 周永涛,王汉功,胡重庆,等. 超音速电弧喷涂 Ti-Al 涂层耐磨性及工艺研究[J]. 中国表面工程, 2004, 17(5): 41-44.
ZHOU Yongtao, WANG Hangong, HU Chongqing, et al. Research on wear-resistance of Ti-Al coating produced by supersonic arc spraying [J]. China Surface Engineering, 2004, 17(5): 41-44.

[10] 王佳杰,许建平,于久灏,等. 电弧喷涂 PS45 涂层抗高

- 温氧化性及抗热震性[J]. 焊接, 2019(12):18-21,66.
- WANG Jiajie, XU Jianping, YU Jiu hao, et al. Resistance to high temperature oxidation and thermal shock of PS45 coating by arc spraying [J]. Wear, 2019(12):18-21,66.
- [11] 薄相峰,侯顺利,张效林,等. 造纸设备防腐涂层封孔剂的研究[J]. 西南造纸, 2005, 34(4):26-27.
- BO Xiangfeng, HOU Shunli, ZHANG Xiaolin, et al. Study on sealing agent for anticorrosion coating of paper making equipment [J]. Southwest Pulp and Paper, 2005, 34(4):26-27.
- [12] LISCANO S, GIL L, STAIA M H. Effect of sealing treatment on the corrosion resistance of thermal-sprayed ceramic coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 188:135-139.
- [13] XU Y Y, LIN B L, LU J T. Morphology and corrosion resistance of composite coatings obtained by phosphating and molybdate post-sealing on galvanized steel [C]//Changsha: International Conference of Nonferrous Materials'2007, 2007.
- [14] MORIDI A, HASSANI-GANGARAJ S M, VEZZUS, et al. Fatigue behavior of cold spray coatings; the effect of conventional and severe shot peening as pre-/post-treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283:247-254.
- [15] YE Z, LIU D, LI C, et al. Effect of shot peening and plasma electrolytic oxidation on the intergranular corrosion behavior of 7A85 aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014, 27(4): 705-713.

(编辑 崔 颖)