

NiAl/NiCoCrAlY/8YSZ 复合喷涂层的 微观结构与性能研究

付伟^{1,2}, 黄国胜², 程旭东¹, 邵刚勤¹

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070;

2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266101)

摘要: **目的** 提高金属/陶瓷隔热涂层体系在海洋环境下的耐腐蚀性能。**方法** 利用冷喷涂方法制备 NiAl 复合打底层和 NiCoCrAlY 粘结层, 与等离子喷涂制备的 8YSZ 陶瓷层构成适用于海洋环境的多层结构耐蚀隔热涂层体系。利用 FE-SEM 分别观察喷涂态粘结层和陶瓷层的表面、横截面形貌, 通过 EDS 分析涂层元素分布; 利用 XRD 分析表征涂层的物相组成; 借助万能材料试验机, 采用拉伸法测试涂层结合强度; 利用热循环试验和焰流冲刷试验测试涂层的耐高温性能。**结果** 微观分析表明, 冷喷涂制备的 NiAl 复合打底层和 NiCoCrAlY 粘结层形貌致密, 涂层材料未发生明显氧化, 颗粒变形程度不一, 粘结层与基体间的结合强度约为 18.4 MPa, 粘结层与 8YSZ 陶瓷层界面结合紧密。陶瓷层物相结构和成分稳定, 涂层经 12 次热震循环和 1000 个周期的高温焰流冲击后, 表面未出现开裂、起皮和脱落。**结论** 采用冷喷涂法和等离子喷涂法联合制备的耐蚀隔热复合涂层体系具备良好的耐热性和耐腐蚀性。冷喷涂制备的金属涂层结构致密, 孔隙率低, 与陶瓷层结合良好, 能够有效提高涂层体系在腐蚀性环境中的耐蚀性能。NiAl 复合涂层可以缓解 NiCoCrAlY 粘结层和铝合金基材间的热匹配问题, 增强涂层的结合性能。

关键词: 冷喷涂; 耐腐蚀; 结合强度; 抗热震性; 高温焰流冲刷

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)04-0061-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.04.009

Microstructure and Properties of NiAl/NiCoCrAlY/8YSZ Composite Coatings

FU Wei^{1,2}, HUANG Guo-sheng², CHENG Xu-dong¹, SHAO Gang-qin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Qingdao Branch of Luoyang Ship

Materials Research Institute, Qingdao 266101, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the corrosion resistance of metal/ceramic thermal insulation coatings in marine environment. NiAl composite coating and NiCoCrAlY bonding layer were prepared by cold spraying and formed to a multi-layer structure corrosion resistant and heat insulating coating system suitable for marine environment with 8YSZ ceramic coating prepared by plasma spraying. The surface and cross-section microstructure of bonding layer and ceramic layer were observed by

收稿日期: 2018-12-06; 修订日期: 2019-02-12

Received: 2018-12-06; Revised: 2019-02-12

作者简介: 付伟 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: FU Wei (1992—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 黄国胜 (1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事表面工程和腐蚀防护研究。邮箱: huanggs@sunrui.net

Corresponding author: HUANG Guo-sheng (1977—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: surface engineering and corrosion protection. E-mail: huanggs@sunrui.net

field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), and the elements distribution was analyzed by energy dispersive spectral (EDS). The phase compositions of coatings were characterized by X-ray diffraction (XRD). Bonding strength test was carried out by tensile test with universal material testing machine. Thermal cycle test and high temperature flame erosion test were used to investigate the high temperature resistance of the coating. Microscopic analysis showed that the morphology of NiAl composite coating and NiCoCrAlY bonding layer was compact, there was few obvious oxidation observed in the coating and the degree of particle deformation was different. Bonding strength between bonding layer and matrix was about 18.4 MPa. The interface of bonding layer and 8YSZ ceramic layer was closely bonded. The components of the ceramic layer were stable. No cracking, peeling or shedding occurred on the coating surface after 12 thermal shock tests and 1000 cycles of high temperature flame erosion. The composite coating prepared by cold spray and plasma spray has excellent thermal resistance and corrosion resistance. The metal coating prepared by cold spray has compact structure, low porosity and good bonding with ceramic layer, which can effectively improve the corrosion resistance of the coating system in corrosive environment. NiAl composite coating can alleviate the thermal matching problem between NiCoCrAlY layer and aluminum alloy substrate, thus enhancing bonding performance of the coating.

KEY WORDS: cold spray; corrosion resistance; bonding strength; property of thermal shock resistance; high temperature flame erosion

随着人类对海洋的开发越来越深入,金属材料在海洋环境中的应用日益广泛,铝合金作为一种轻质高强度的结构材料,在海上平台、大型舰船的建造中有着许多应用^[1-2]。铝合金本身耐热性能较差,为提高铝合金材料在高温条件下的使用性能,常用的方法是在铝合金基材表面涂覆热障涂层。热障涂层是一种高温材料防护系统,常用于燃气轮机、航空发动机涡轮叶片、燃烧室部件等结构材料表面,以提高部件的高温容限、工作效率及服役寿命^[3-5]。常用的 MCrAlY+YSZ 热障涂层体系能够基本满足普通大气环境下的使用要求,但用作海洋大气条件下铝合金隔热体系时,由于高温和腐蚀性气氛的共同作用,涂层极易被腐蚀而导致失效^[6-7]。因此,设计相应的耐蚀涂层体系及其制备工艺,同时满足热膨胀性能、隔热性能等,是海洋环境中耐蚀隔热涂层需要迫切解决的技术难题。

冷喷涂技术是近年来发展较快的一种涂层制备新技术,该方法利用超音速气流将喷涂粉末加速到 300~1000 m/s 以上,形成高速粒子流,颗粒在完全固态下撞击基体,通过颗粒撞击发生的剧烈塑性变形在基体表面沉积形成涂层^[8-9]。冷喷涂技术主要有以下特点^[10-12]: 1) 不存在氧化、合金烧损和晶粒长大现象; 2) 对基体热损伤小,残余应力极低; 3) 可喷涂热敏感材料和活性金属材料; 4) 涂层具有压应力性质,致密性高,可制备高结合强度厚涂层; 5) 喷涂纳米材料时,不发生熔化和相变。董彩常等^[13]和陈东等^[14]利用冷喷涂制备的铝涂层孔隙率很低,在海水中的电化学腐蚀速率随时间快速降低,耐中性盐雾腐蚀性强,可对基体形成有效防护。D. Lahiri 等^[15]利用冷喷涂在 6061 铝合金表面制备了 $\text{Al}_{90.05}\text{Y}_{4.4}\text{Ni}_{4.3}\text{Co}_{0.9}\text{Sc}_{0.35}$ 非晶涂层,研究发现,涂层致密度达到 98%,耐磨性相对基材提升了 600%。动电位极化测试表明,非晶

涂层的耐腐蚀性为 6061 铝基体的 5 倍。特别是冷喷涂制备的涂层,以压应力为主,在热震条件下的残余应力易清除。因此,将冷喷涂应用于海洋环境下的耐蚀隔热涂层制备具有良好的前景。

文中针对铝合金表面隔热涂层在海洋环境下耐腐蚀性较差的问题,分别采用低压冷喷涂制备打底层、高压冷喷涂制备中间粘结层和等离子喷涂制备表面陶瓷涂层,形成适合海洋环境中应用的耐蚀隔热涂层体系。对涂层的主要性能进行表征和分析,为冷喷涂技术在海洋防腐领域的应用提供一定的理论支持。

1 实验方法

1.1 材料

基体材料为 5083 铝合金,试样尺寸 80 mm×50 mm×5 mm。冷喷涂 Ni 粉和 Al 粉由北矿新材提供,NiCoCrAlY 粉末和等离子喷涂氧化钇稳定的氧化锆(8YSZ)粉末分别采用美国 Sulzer Metco 公司生产的 Amdry 997 和 204B-NS。Al 粉粒径为 15~65 μm ,颗粒呈不规则的椭球形,少数颗粒之间存在相互粘结; Ni 粉粒径为 10~30 μm ,颗粒呈比较规则的球形; NiCoCrAlY 粉末为准球形颗粒,大颗粒表面有一些小颗粒粘附,粉末粒径为 15~40 μm ; 8YSZ 粉末球形度良好,颗粒大小分布均匀,大部分颗粒粒径在 50 μm 左右。

1.2 涂层制备

采用冷喷涂法制备 NiAl 复合打底层和 NiCoCrAlY 粘结层,其中 NiAl 层的喷涂粉末为 Ni 粉和 Al 粉(Al 粉质量分数为 30%)经机械法混合而成,冷喷涂设备为 PS-1000 冷喷涂系统(等离子技研公司,日本),

所采用的工艺参数见表 1。采用等离子喷涂制备表面的 YSZ 陶瓷层, 设备为 JPS-8000 (九江等离子技术有限公司, 中国), 设备功率为 42 kW, 陶瓷层厚度控制在 230 μm 左右, 其他工艺参数见表 2。

表 1 冷喷涂工艺参数
Tab.1 Cold spray process parameters

Materials	Gas temperature/℃	Gas pressure/MPa	Traverse speed/(mm·s ⁻¹)	Spraying distance/mm	Powder feed rate/(g·min ⁻¹)	Coating thickness/μm
NiAl	450	3.0	400	20	25	110
NiCoCrAlY	950	5.0	100	20	60	250

表 2 等离子喷涂工艺参数
Tab.2 Plasma spray process parameters

Voltage/V	Current/A	Flow rate of Ar/(L·min ⁻¹)	Flow rate of H ₂ /(L·min ⁻¹)	Flow rate of carrier gas (N ₂)/(L·min ⁻¹)	Powder feed rate/(g·min ⁻¹)
73	600	50	6	5	20

1.3 涂层性能测试

采用德国蔡司公司生产的 ZEISS ULTRA 55 型场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 观察涂层表面和横截面的微观形貌, 同时利用电镜自带的能谱仪 (EDS) 对涂层进行元素分析, 操作电压为 20 keV。采用 X 射线衍射仪 (XRD, 德国 Bruker 公司生产的 D8 Advance 型) 进行物相测试, Cu 靶, 扫描步长为 0.013°, 数据分析采用 Jade 软件。

将粘结层试样 (未喷涂陶瓷层) 加工成直径 φ25 mm 的圆片, 表面经超声波清洗、吹干之后, 用 E-7 高温结构胶将试片与表面经喷砂处理的加载块粘结。固化完全后, 按照 GB/T 8642—2002 《热喷涂抗拉结合强度的测定》的要求, 在 CMT 5105 万能材料试验机上用拉伸法检测涂层与基体间的静态结合强度值, 加载速率为 1.8 mm/min。试样数量为 3 个。

抗热震性能测试中, 先将涂层试样置于 SOH-1000F 高温加热炉中加热至 400 ℃, 保温 30 min, 然后取出, 用去离子水冲刷表面 15 s, 观察并记录试样表面特征, 然后放入炉中加热, 如此循环 12 个周期。试验完成后, 利用涂层宏观形貌变化和 SEM 观察评价涂层抗热震性。

耐高温焰流冲刷试验中, 采用氧-乙炔焊炬对涂层表面进行热冲刷腐蚀, 火焰焰心温度约为 2200 ℃, 冲刷角度为 45°。在长度 15 cm 的试样上以 1.25 cm/s 的速度移动焊炬作往复运动, 每 10 个周期后测量表面温度, 温度低于 450 ℃后观察试样表面状态, 并称取试样的质量, 一直进行到 1000 个周期。试验结束后, 对涂层表面进行形貌观察和元素分析。

2 结果与讨论

2.1 涂层微观形貌和成分分析

粘结层 (在喷涂陶瓷面层之前) 的表面形貌及

EDS 元素分析结果如图 1a、b 所示。可以看到, 涂层表面呈现为典型的冷喷涂涂层形貌, 涂层由充分变形的片状颗粒紧密堆积在一起所形成。整个涂层非常致密, 表面看不到明显的缺陷, 涂层分布均匀, 有少数孔隙存在, 也有部分颗粒变形程度较小, 以颗粒状嵌在涂层当中。这部分颗粒由于是在涂层形成后期沉积, 仅靠自身速度撞击而变形, 没有后续颗粒的冲击夯实作用, 因而变形较小。EDS 分析中, 粉末中的主要元素 Ni、Co、Cr、Al 都可以检测到, 镍元素含量最高, 而钇元素因含量过低未能被检测, 少量氧元素的存在可能是涂层制备后表面被氧化所致。

等离子喷涂的 8YSZ 陶瓷面层形貌及 EDS 元素分析结果如图 1c、d 所示。制备的陶瓷涂层表面粗糙不平, 涂层中的平坦部位相对致密和光滑。该部分由粉末颗粒在高温下充分熔化后沉积而成, 涂层表面还有许多破碎的球形颗粒和一些形状不规则的小颗粒, 这些颗粒是由熔滴在撞击过程中发生破裂和飞溅形成的。从陶瓷面层的形貌中还可以看到一些裂纹的存在, 这些裂纹的产生是由于沉积的液态颗粒在快速冷却时受到的收缩应力高于材料的抗拉强度所致, 裂纹的存在有助于减小涂层中的残余应力^[16]。EDS 分析表明, 陶瓷层主要成分为锆和氧, 还存在少量的钇元素和铪元素, 与原始粉末的成分一致。

抛光后的涂层横截面形貌如图 2 所示, 可以直观地看到, 涂层分为明显的三层, 分别为 NiAl 层、CoNiCrAlY 层和 8YSZ 陶瓷层。由图 2b 可以看到, NiAl 复合打底层和铝基体的结合非常紧密, NiAl 层底部有部分颗粒零散嵌入到铝基体中, EDS 分析表明这些嵌入的颗粒为镍元素。中间的 NiCoCrAlY 层非常致密, 孔隙率很小, 几乎看不到明显缺陷存在, 与镍铝复合层的结合情况也很好。表明高压冷喷涂条件下, 粉末颗粒获得的加速更大, 高速撞击产生的变形就更大, 后沉积颗粒对先沉积涂层的夯实作用更强, 导致涂层中绝大多数颗粒发生充分变形而紧密结合,

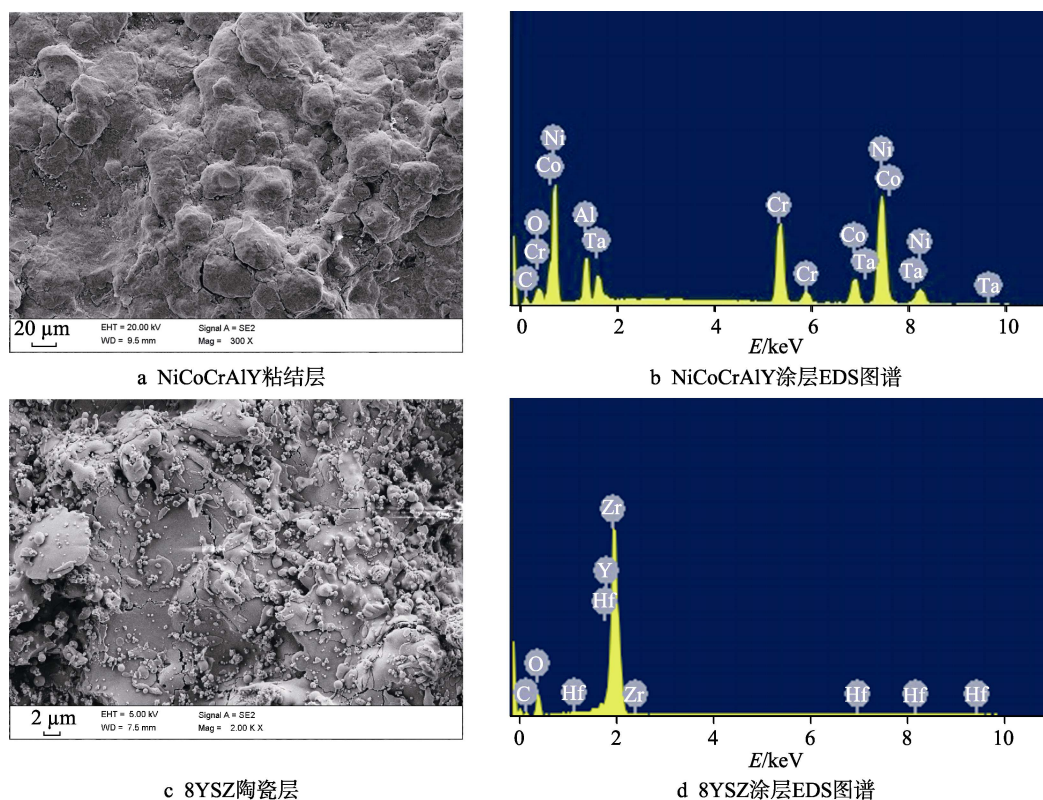


图1 涂层表面 SEM 形貌及 EDS 图谱

Fig.1 Surface SEM image and EDS analysis of different coatings: a) NiCoCrAlY bonding coating; b) EDS spectra of a; c) 8YSZ ceramic coating; d) EDS spectra of c

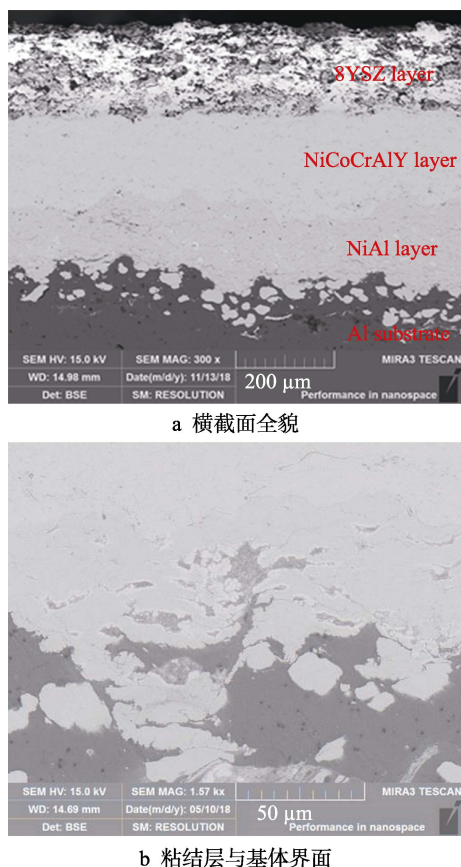


图2 耐蚀隔热涂层横截面形貌

Fig.2 Cross-section morphology of the coating: a) entire cross section; b) interface between bonding layer and substrate

整个粘结层的厚度约为 300 μm 。表面的陶瓷层则表现出典型的热喷涂层状结构特征,涂层之间结合较为紧密,部分位置存在孔隙,陶瓷层与粘结层的结合相对较好,二者界面处有一层很薄的氧化物层的存在,此氧化层是涂层中应力集中较大的部位,硬度和脆性较大,往往是导致涂层失效的薄弱环节。也有研究表明,该氧化层的存在能够阻碍热量向基材传递,减小粘结层和基材受到的热载荷作用。

2.2 物相分析

图3是粘结层和陶瓷层表面 XRD 衍射分析图谱及物相分析结果。由图 3a 可见,粘结层的主要物相均是 NiCoCrAlY 粉末中各合金元素形成的金属间化合物,金属氧化物仅检测到 $\text{CrO}_{0.87}$ 物相。说明在涂层沉积过程中,金属基本没有发生氧化现象,部分镍元素在涂层中仍然以单质相形式存在。由于钇元素含量极低,未能检测到含钇的物相。

由图 3b 可以看到,表面陶瓷涂层的主晶相为四方 $\text{t-Zr}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{1.95}$ 相,其次是单斜相氧化锆 (m-ZrO_2)。通常纯的 ZrO_2 粉末常温稳定态是单斜相,在温度达到 1173 $^{\circ}\text{C}$ 以后,会迅速向四方相氧化锆 (t-ZrO_2) 转变,降温时则会发生相反的相转变^[17]。本实验中,等离子喷涂制备的涂层保持了 $\text{t-Zr}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{1.95}$ 四方相结构,与氧化钇的稳定作用有关。 Y_2O_3 对 ZrO_2 的稳定机制是 Y^{3+} 取代了 Zr^{4+} 的位置,在晶体点阵中形成氧空位,分布在氧化锆中 Zr^{4+} 周围的空位降低了局部氧-

氧间的排斥力,使配位层发生了较大的畸变,从而促进了室温四方相的稳定^[18]。

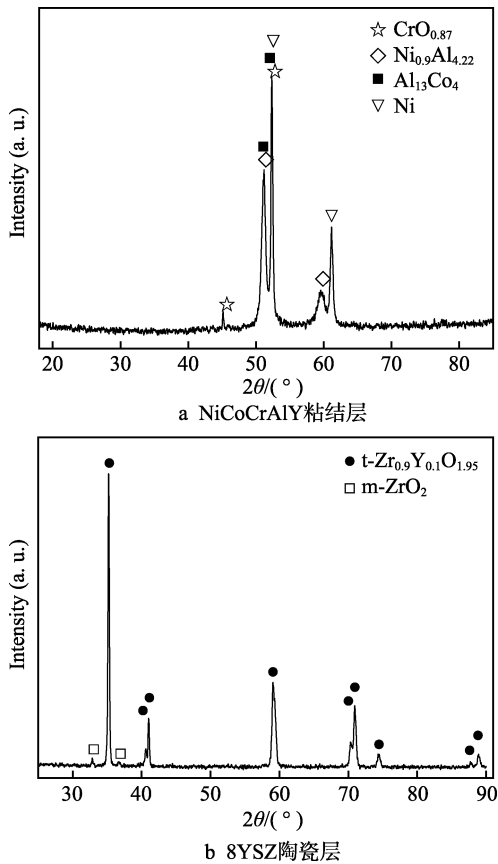


图 3 涂层表面 XRD 分析图谱
Fig.3 XRD spectra of different coatings: a) NiCoCrAlY bonding coating; b) 8YSZ ceramic coating

2.3 结合强度测试

涂层与基体间的结合强度是决定涂层性能的重要指标,结合性能的好坏对耐蚀隔热涂层的隔热性能和抗氧化腐蚀能力都有很大影响。试验测得涂层结合强度值见表 3,3 个试样的平均结合强度为 18.4 MPa。测试中,试样断裂均发生在涂层与基体的界面处,说明涂层内聚强度大于涂层与基体间的结合强度。拉脱面微观形貌如图 4 所示,从断裂面上可以看到,大部分颗粒发生变形、扁平化的程度较高,但也存在一些变形程度不大的颗粒,它们以原始粉末颗粒的形态嵌在涂层中,与周围涂层形成结合。经 EDS 分析发现,变形较大的颗粒主要是铝,而那些嵌在涂层中的颗粒则主要是镍。分析认为,出现这种现象主要与镍、铝颗粒的硬度有关。冷喷涂过程中,镍颗粒和铝颗粒高速撞击铝合金基材,由于镍的硬度较大,会导致撞击后基材铝合金发生较大的变形,而镍本身则变形程度较小,试样断面上的弹坑状形貌也可以印证这一点。铝颗粒与基材硬度相当,因此会发生较大的变形,部分铝颗粒边缘甚至发生了射流现象。冷喷涂 NiAl 复合打底层的加入可以缓解 NiCoCrAlY 粘结层与铝基

体间的物理性能及热匹配问题,增强涂层与基体间的结合,其本身也具有较好的耐腐蚀性,因而可以提高整个涂层体系的耐热性和耐腐蚀性。

表 3 涂层结合强度

Tab.3 Bonding strength of the coating

Sample	Maximum load/kN	Bonding strength/MPa
1#	7.94	16.2
2#	11.39	23.2
3#	7.72	15.7

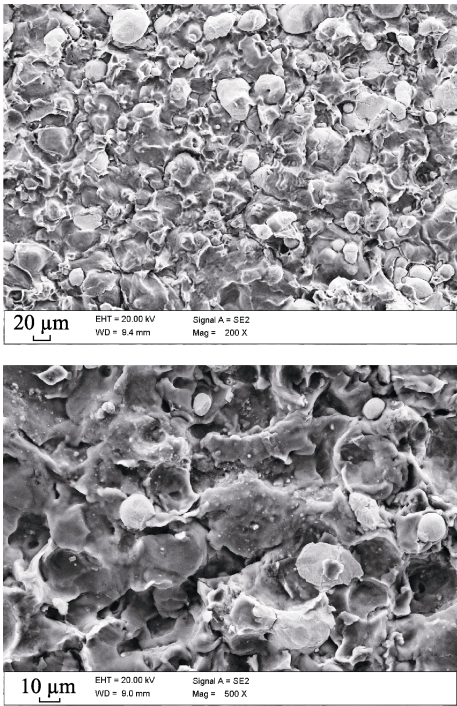


图 4 涂层结合强度测试断面形貌
Fig.4 SEM image of coating cross section after bonding strength test

2.4 涂层抗热震性能测试

抗热震性能是涂层在高温条件下服役的重要性能指标,尤其是在高低温交变的环境中,涂层抗热震性能的强弱直接决定了涂层的服役效果和使用寿命。本实验采用先高温加热、再淬水急冷的方法测试涂层的抗热震性能。涂层经历 12 次热震循环测试后,表面未发生明显变化,除边角位置有一些涂层发生局部脱落外,主体涂层部分未见起皮、鼓泡等破坏现象,涂层在热震试验中产生破坏的面积比远小于 5%。
图 5 为涂层经历热震后的 SEM 形貌及 EDS 分析图谱。由微观形貌可以看到,相对喷涂态涂层,热震试验后的涂层表面未发生明显改变,仍是由粗糙区域和光滑区域组成的复杂形貌,表面仍能看到部分网状微裂纹的存在。有研究表明,涂层中存在适当的孔隙和微裂纹时,可以降低涂层的弹性模量^[19],松弛涂层的热应力,减缓宏观裂纹的形成^[20],从而有效提高涂

层的抗热震性能。在经历热震试验后,陶瓷涂层未发生明显破坏,表面网状微裂纹的存在是重要原因。热震试验前后,对8YSZ陶瓷涂层表面分别进行EDS元素面扫描,对比分析发现,涂层表面的元素种类和含量在热震试验前后基本一致,表明涂层在热震试验过程中并没有发生明显氧化,说明涂层热稳定性高,耐热性能良好。本研究中,陶瓷涂层在经历12次热震循环后,表面并未发生明显的脱落及裂纹扩展等破坏现象,主要的原因:一是8YSZ陶瓷涂层本身具有良好的热稳定性,二是本实验所采用的热震峰值温度不高。

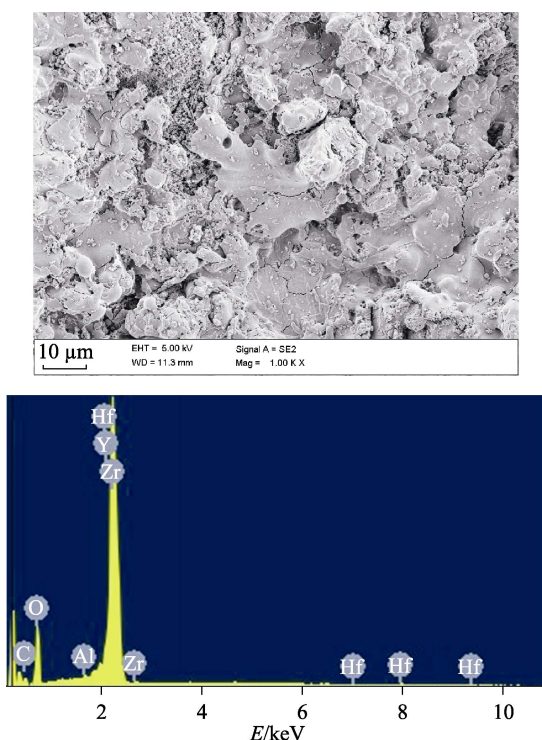


图5 热震试验后陶瓷层形貌及EDS成分分析
Fig.5 SEM image and EDS analysis of 8YSZ ceramic coating after thermal shock test

2.5 焰流冲刷腐蚀试验

在承受热冲击的过程中,涂层与基体、不同涂层界面附近会产生很大的热应力梯度,极易导致涂层破坏,因此涂层的抗热冲击性表征是评价耐蚀隔热涂层性能的重要指标。图6为热冲击试验前后的涂层形貌图,表4为涂层在整个测试过程中3块试板的平均质量损失情况。从整个试验过程来看,在热冲刷过程中,试样表面的颜色变化非常轻微,初期有部分灰色物质变成白色,在大约10个周期冲刷后,试样显得更加洁净。在之后的焰流冲刷过程中,直至最后1000次热冲刷循环结束,涂层表面均未出现起泡、开裂等现象,说明该涂层抗热冲击性能良好。试样表面局部发黑,是因为氧乙炔未燃烧充分,所产生的炭黑吸附在涂层表面所致。

从表4中可以看到,试板质量呈先降低后增加的



a 试验前



b 1000周期后

图6 热冲击试验前后试样表面形貌
Fig.6 Surface morphology of coatings before and after thermal shock test: a) before test; b) after 1000 cycles

表4 烧蚀过程中3个试样平均质量损失率
Tab.4 Average weight loss rate of three samples during erosion

Cycles	Average weight loss rate/%	Cycles	Average weight loss rate/%
10	0.45	300	0.22
20	0.67	400	-0.19
50	1.13	500	-0.32
100	0.88	800	-0.34
200	0.54	1000	-0.35

趋势。焰流冲刷初期,试样表面残留的杂质和清洗过程中残留的有机物较多,前期这些物质被烧损,导致了试板质量的减小,初期看到的试样表面有部分灰色物质变成白色可以印证这一观点。之后试板质量的增加,则是涂层中部分元素被氧化而导致的。由相关研究^[21]可知,在高温和有氧条件下,热障涂层中NiCoCrAlY粘结层内的Al、Cr等活性元素会发生不同程度的氧化,生成致密氧化膜来防止涂层和基体被进一步氧化。本次焰流冲刷试验中,涂层试样在高温下产生了氧化质量增加现象,但涂层整体质量增加的速率较小,说明涂层抗高温氧化性能较好,具有较强的高温稳定性。

3 结论

文中利用冷喷涂法和等离子喷涂法制备了NiAl/NiCoCrAlY/8YSZ复合结构耐蚀隔热涂层,通过对涂层的主要性能进行研究和分析,可以得出如下结论:

1) 采用高压冷喷涂制备的 NiCoCrAlY 粘结层非常致密, 颗粒变形充分, 没有发生氧化现象, 与 NiAl 复合打底层和表面 8YSZ 陶瓷层均结合紧密。

2) 涂层与基体的界面处, 由于镍、铝粉末相较于铝合金基材硬度不同, 导致铝颗粒变形更大, NiAl 层的加入可以缓解 NiCoCrAlY 粘结层与铝基材的热匹配问题, 增强涂层结合特性。

3) 涂层耐热性良好, 经 12 次热震循环试验和 1000 个周期的高温焰流冲击后, 涂层未出现起皮、脱落等破坏。

参考文献:

- [1] 高安江, 岳亮. 南海海洋大气环境下铝合金腐蚀与防护研究[J]. 世界有色金属, 2017(4): 15-17.
GAO An-jiang, YUE Liang. Study on aluminum alloy corrosion and protection under the south sea atmospheric environment[J]. World nonferrous metals, 2017(4): 15-17.
- [2] 齐忠原, 巫瑞智, 王国军, 等. 铝合金在船舶和海洋工程中的应用[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(1): 12-18.
QI Zhong-yuan, WU Rui-zhi, WANG Guo-jun, et al. Application of aluminum alloys in shipping and ocean engineering[J]. Light alloy fabrication technology, 2016, 44(1): 12-18.
- [3] KUMAR D, PANDEY K N, DAS D K. Thermal cyclic resistance behavior of inconel 800 super alloy substrate with thermal barrier coatings by plasma spraying[J]. Materials today: proceedings, 2015, 2(4-5): 3156-3160.
- [4] 梁明德, 于继平, 张鑫, 等. 高温热障涂层陶瓷层材料研究进展[J]. 热喷涂技术, 2013(2): 1-9.
LIANG Ming-de, YU Ji-ping, ZHANG Xin, et al. Progress in ceramic materials for high temperature thermal barrier coatings[J]. Thermal spray technology, 2013(2): 1-9.
- [5] AZADI M, FARRAHI G H, WINTER G, et al. Experimental fatigue lifetime of coated and uncoated aluminum alloy under isothermal and thermo-mechanical loadings[J]. Ceramics international, 2013, 39(8): 9099-9107.
- [6] 郑军林, 李亚楠. 舰船高温防护涂层技术研究进展[J]. 材料开发与应用, 2015(6): 99-102.
ZHENG Jun-lin, LI Ya-nan. Review on high temperature protective coating technology for ships[J]. Development and application of materials, 2015(6): 99-102.
- [7] 张波, 方志刚, 李向阳, 等. 铝合金船舶的腐蚀防护技术现状与展望[J]. 中国材料进展, 2014(7): 414-417.
ZHANG Bo, FANG Zhi-gang, LI Xiang-yang, et al. Status and prospect of corrosion protection technology about aluminum alloy ship[J]. Materials China, 2014(7): 414-417.
- [8] KLINKOV S V, KOSAREV V F, SOVA A A, et al. Calculation of particle parameters for cold spraying of metal-ceramic mixtures[J]. Journal of thermal spray technology, 2009, 18(5): 944-956.
- [9] 王存龙, 杨森, 马冰, 等. 冷喷涂技术及其在零件修复与功能涂层制备中的应用[J]. 焊接技术, 2013(8): 1-5.
WANG Cun-long, YANG Sen, MA Bing, et al. Cold spray technology and its application in parts renewal and preparation of functional coating[J]. Welding technology, 2013(8): 1-5.
- [10] RICHER P, ZÚÑIGA A, YANDOUZI M, et al. CoNiCrAlY microstructural changes induced during cold gas dynamic spraying[J]. Surface and coatings technology, 2008, 203(3): 364-371.
- [11] STOLTENHOFF T, KREYE H, RICHTER H J. An analysis of the cold spray process and its coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2002, 11(4): 542-550.
- [12] CHEN C, XIE Y, VERDY C, et al. Numerical investigation of transient coating build-up and heat transfer in cold spray[J]. Surface and coatings technology, 2017, 326: 355-365.
- [13] 董彩常, 王洪仁, 黄国胜, 等. 冷喷涂铝涂层在海水中的腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(2): 90-93.
DONG Cai-chang, WANG Hong-ren, HUANG Guo-sheng, et al. Corrosion behavior of cold-sprayed aluminum coating in seawater[J]. Corrosion science and protection technology, 2010, 22(2): 90-93.
- [14] 陈东, 李忠盛, 吴护林, 等. 冷喷涂纯铝涂层耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 174-179.
CHEN Dong, LI Zhong-sheng, WU Hu-lin, et al. Corrosion resistance of cold sprayed pure Al coating[J]. Surface technology, 2016, 45(12): 174-179.
- [15] LAHIRI D, GILL P K, SCUDINO S, et al. Cold sprayed aluminum based glassy coating: synthesis, wear and corrosion properties[J]. Surface and coatings technology, 2013, 232: 33-40.
- [16] LI C J, OHMORI A. Relationships between the microstructure and properties of thermally sprayed deposits[J]. Journal of thermal spray technology, 2002, 11(3): 365-374.
- [17] 王继东, 王智慧. 等离子喷涂 CeO₂-Y₂O₃ 稳定 ZrO₂ 陶瓷涂层耐高温铁水热震研究[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 10-13.
WANG Ji-dong, WANG Zhi-hui. The thermal molten iron resistance performance of plasma sprayed ZrO₂ stability of CeO₂-Y₂O₃ ceramic coating[J]. China surface engineering, 2010, 23(3): 10-13.
- [18] 钱扬保, 张伟刚. 大气等离子喷涂 ZrSiO₄ 涂层的物相转变行为[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(8): 1103-1108.
QIAN Yang-bao, ZHANG Wei-gang. Phase-transformation behavior of plasma-sprayed ZrSiO₄ coating materials[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2008, 36(8): 1103-1108.
- [19] 陈涛, 惠宇, 胥佳颖, 等. 纳米 8YSZ 粉的热处理对等离子喷涂涂层热震性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(2): 189-198.
CHEN Tao, HUI Yu, XU Jia-ying, et al. Effect of heat treatment of nano 8YSZ powder on thermal shock lifetime of plasma sprayed coating[J]. Journal of the Chinese society of rare earths, 2016, 34(2): 189-198.
- [20] 马东林, 贺毅, 王兰, 等. 等离子喷涂氧化铝涂层的热震性能及微观组织特征[J]. 热加工工艺, 2011, 40(4): 102-105.
MA Dong-lin, HE Yi, WANG Lan, et al. Thermal shock resistance and microstructure character of alumina coatings fabricated by plasma spraying[J]. Hot working technology, 2011, 40(4): 102-105.
- [21] 甄东霞, 王钊, 勾俊峰, 等. 稀土改性 NiCoCrAlY 层对 YSZ 和 LZ/YSZ 热障涂层高温性能的影响[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(4): 14-22.
ZHEN Dong-xia, WANG You, GOU Jun-feng, et al. Effect of rare earth modified NiCoCrAlY coating on the properties of YSZ and LZ/YSZ TBC by high temperature oxidation test[J]. Thermal spray technology, 2016, 8(4): 14-22.