doi:10.3969/j.issn.1674-7127.2024.03.012

基于大气等离子喷涂的 NiCrSiB 涂层组织结构及性能研究

刘晓飞[1]，王斌利[1]，胡江波[1]，王建锋[1]，李卫军[1]，刘建明[2]

（1. 中国航发动力股份有限公司，西安 710021；
2. 北矿新材科技有限公司，北京 102206）

摘要：针对涂覆在 GH907 合金试样上 NiCrSiB 涂层，采用光学显微镜和拉伸试验机对热处理前后涂层组织结构形貌、拉伸结合强度进行了分析和比对，并对热处理后的涂层开展了涂盐热腐蚀、电偶腐蚀及盐雾腐蚀试验及分析研究。结果表明：大气等离子喷涂态的 NiCrSiB 涂层经热处理后，涂层的结合形式由颗粒堆积的层状物理结合转变为冶金结合，涂层中的孔洞等组织特征明显改善；热处理后涂层厚度在 80～140 μm 内结合强度值相对稳定；涂层涂盐热腐蚀随着时间变化腐蚀速率逐步增大；电偶腐蚀表明涂层的电势比基体材料的电势低；涂层盐雾试验所产生的黄色流痕，主要为盐雾中 Cl^- 与涂层中活泼 Fe 元素在长时间接触中所形成的 $FeCl_3$ 和 $FeCl_2$ 等在涂层表面微孔结构处的聚集产物。

关键词：大气等离子喷涂；NiCrSiB 合金；防腐涂层；盐雾；涂盐热腐蚀

中图分类号：TG174.442　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674-7127(2024)03-0106-07

Study on the Microstructure and Properties of NiCrSiB Coating by Atmospheric Plasma Spraying

LIU Xiaofei[1]，WANG Binli[1]，HU Jiangbo[1]，WANG Jianfeng[1]，LI Weijun[1]，LIU Jianming[2]

（1. AECC Aviation Power Co.，Ltd.，Xi'an 710021，China；
2. BGRIMM Advanced Material Science & Technology Co.，Ltd.，Beijing 102206，China）

Abstract：The microstructure and tensile bond strength of NiCrSiB coating on GH907 alloy samples before and after heat treatment were analyzed and compared by optical microscope and tensile testing machine. The salt-coated hot corrosion，galvanic corrosion and salt fog corrosion of the coatings after heat treatment were analyzed and studied. The results show that the bonding form of NiCrSiB coating is changed from physical bonding of particle accumulation to metallurgical bonding after heat treatment，The microstructure characteristics such as holes in the coating are significantly improved. The tensile bond strength of the coating decreases with the increase of the thickness both before and after heat treatment. After heat treatment，the bonding strength of the coating with a thickness in the range of 80 μm to 140 μm is relatively stable. The salt-coated hot corrosion of coating is proportional to the corrosion time. Galvanic corrosion shows that the potential of the coating is lower than that of the base material. The yellow flow marks produced by the saltfog corrosion test of the coating are mainly the accumulation products of $FeCl_3$ and $FeCl_2$ on the microporous structure of the coating surface，which are formed by the Cl^- ion in the salt spray and the active Fe element in the coating during the long-term contact.

Key words：atmospheric plasma spraying；NiCrSiB alloy；anti corrosion coating；salt fog；salt-coated hot corrosion

收稿日期：2024-10-10

第一作者：刘晓飞(1986-)，男，硕士，高级工程师。E-mail：xfliu_1986@163.com

0　引言

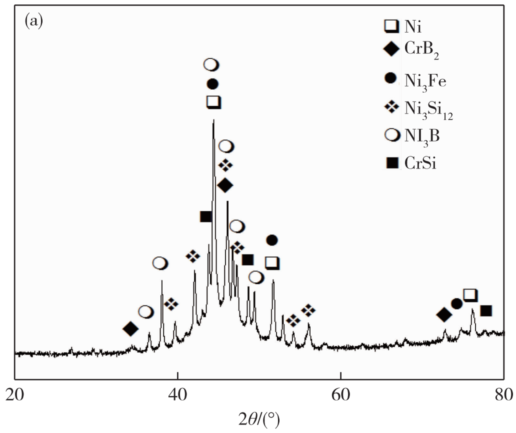
NiCrSiB 是一种常见的镍基合金钎焊粉末材料，主要用于各类高温合金材料焊接粘结剂，因为其优良的可焊接性能，被广泛应用于航空发动机零部件连接技术中[1]。但 NiCrSiB 粉末材料经热喷涂工艺制备涂层，在国内鲜为人采用。GH907 合金是一种以 Fe-Ni-Co 为基体的沉淀强化奥氏体合金，它是一种低温膨胀高温合金。低温膨胀高温合金是指具有高的强度和一定温度范围内低膨胀系数相结合的一类合金材料[2-4]。因为该基体母材优良性能，被广泛应用于航空发动机零部件生产制造中。但该合金材料由于 Cr 元素含量较低，在高温、高湿、高盐海洋大气环境下，其抗海洋环境腐蚀的性能较差[5-7]。

本文采用 NiCrSiB 粉末材料，利用大气等离子喷涂工艺在 GH907 合金表面涂覆一层该涂层，再经过热处理后形成致密耐腐蚀涂层，是将该涂层良好的耐腐蚀性能与 GH907 合金母材高强度和低膨胀系数特性有机地结合。本文针对涂覆有涂层的 GH907 试样，开展热处理前后涂层显微组织结构和拉伸结合强度比对，模拟涂层在海洋服役环境中三个主要腐蚀因素，阐述 NiCrSiB 涂层涂盐热腐蚀、电偶腐蚀的影响规律，分析盐雾环境下涂层与基体的腐蚀行为和机理[8-10]。

1　试样制备及试验方法

1.1　试样制备

试样的基体材料为 GH907 合金，试样尺寸为 100 mm×50 mm×2.0 mm 等几种规格。试样表面涂覆 NiCrSiB 粉末(图 1)，它是一种粉末状的金属细粉，该粉末材料化学成分见表 1。采用大气等离子喷涂工艺制备单层结构涂层，涂层厚度 40～140 μm。采用 Multicoat 大气等离子喷涂 NiCrSiB 涂层主要工艺参数见表 2。



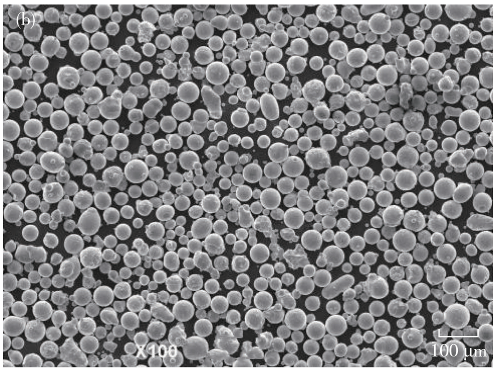


图 1　NiCrSiB 合金粉末 XRD 图谱和 SEM 形貌：(a)XRD 谱；(b)SEM 形貌

Fig. 1　The XRD pattern and SEM morphology of NiCrSiB powder: (a)XRD pattern; (b)SEM morphology

表 1　涂层材料的化学成分

Table 1　The chemical composition of coating　　/%

材料	Ni	Cr	Si	B	Fe	Al	Ti	Zr
NiCrSiB	余量	6.00～8.00	4.00～5.00	2.75～3.50	2.50～3.50	≤0.05	≤0.05	≤0.05

表 2　等离子喷涂 NiCrSiB 主要工艺参数表

Table 2　Main process parameters of plasma spraying NiCrSiB

主要参数	电流/A	电压/V	功率/kW	氩气/nlpm	氢气/nlpm	送粉率/(g·min^{-1})	喷涂距离/mm	走枪速度/(mm·s^{-1})
设定值	500	70	35	50	5	35	140	1

将等离子喷涂制备的试样采用真空炉进行热处理。热处理主要参数：工作真空度＜4×10^{-2} Pa，压升率≤0.35 Pa/h，温度(1 030±10) ℃，保温时间 10～15 min，真空冷却到 900 ℃以下。

1.2　试验方法

将涂覆有涂层的试样沿着试片的横截面进行切割，以切割后的横截面作为检测对象进行镶嵌，并磨制金相试样。通过 GX71 光学显微镜对涂层的显微

组织结构进行测试分析。

对涂覆有涂层的标准试样进行拉伸结合强度测试,涂层表面采用FM-1000弹性胶膜与试验标准件进行对接固化,固化温度190 ℃,保温时间3 h。然后采用JJ-50KN通用电子拉力机相互拉伸试样两端,直至涂层或胶膜断裂。记录断裂时的最大拉伸力值,然后计算涂层结合强度平均值。

依据HB 20401—2016《涂盐热腐蚀试验方法》要求,选取规格为40 mm×20 mm×(2～3) mm平板试样4件。先将试样预热至80 ℃左右,然后在试样涂层表面刷涂定量配置的75%Na_2SO_4-25%NaCl饱和水溶液,再用烘干法去除附着在涂层表面熔盐中的水分,反复刷涂、烘干,直至涂层试样表面附着熔盐量达到(2～3) mg/cm^2。试样制备后,可按照氧化试验的流程测试。试样放入炉内后每隔10小时取出缓冷到室温,并在沸水中洗去残留盐分,烘干称重,最后获得热腐蚀动力学数据和曲线。

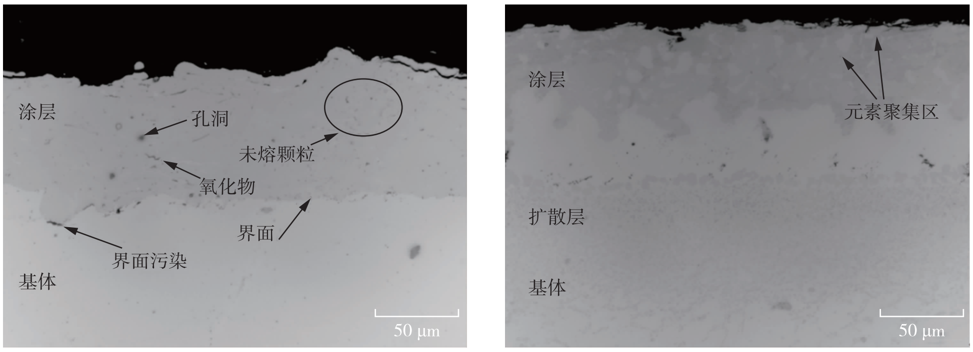
依据HB 5374《不同金属电偶电流测定方法》要求,选用涂覆有涂层的试样和未涂覆涂层的试样进行组合测试。试样规格为110 mm×25 mm×(2～3) mm的平板式样各1件,表面粗糙度R_a＝0.80,棱角处需无毛刺。试样用酒精清洗干净后在干燥器内至少放置7天。

依据GJB 150.11A《军用装备实验室环境试验方案第11部分:盐雾试验》要求,选用规格为100 mm×50 mm×(2～3) mm的平板试样3件,将NaCl溶于电导率≤20 uS/cm的去离子水中,试验所用试剂采用化学纯及以上级别,溶液的pH调整在6.5～7.2。把试验箱的温度调整到(35±2) ℃,把试样被测试面朝上放入试验箱中,试样与垂直方向成15°～30°,保温2 h。连续地将盐雾通入试验箱,在整个试验期间,沉降率均应保持在(1～2) mL/(80 cm^2·h)。

2　试验结果与分析

2.1　NiCrSiB涂层显微组织结构分析

采用等离子喷涂工艺制备的NiCrSiB涂层,由于等离子喷涂工艺是将粉末输送至瞬时温度在10 000 ℃以上的喷枪喷口位置瞬间熔融或半熔融后形成涂层,故喷涂粉末在加速、雾化、撞击扁平化过程中,会存在未熔化颗粒、孔洞以及氧化物等大气等离子喷涂的涂层常见“缺陷”。为了克服涂层内孔洞等带来的外界介质对涂层的影响,采用真空热处理工艺对涂层进行了再重熔,达到降低孔隙、孔洞对涂层完整性影响的目的。图2(a)为采用大气等离子喷涂工艺制备的原始态涂层显微组织结构照片,图2(b)为经真空处理涂层显微组织结构照片。



(a)喷涂原始态涂层　　(b)热处理后涂层

图2　NiCrSiB涂层显微组织

Fig. 2　Microstructures of NiCrSiB coating

图2(a)为采用大气等离子喷涂工艺制备的原始态NiCrSiB涂层为典型的单层结构涂层,涂层组织中孔隙相对较小,其直径小于20 μm且分散,氧化物分散且细小,未见明显的条状和团状氧化物存在,涂层中未见分层、翘起和裂纹,界面存在涂层制备过程中因为吹砂处理引起的砂粒镶嵌所形成的界面污染物,其界面污染小于10%。图2(b)显示,经热处理后喷涂原始态涂层表面的由颗粒堆积形成的波峰明显减小,涂层表层变得更加光滑平整,涂层的孔隙率约1%,涂层相比更致密,涂层中存在元素重新分布与聚集现象,组织结构中接近表层未见大孔洞,但存在微孔结构,基体界面靠近基体一侧存在深度约20～30 μm的扩散层。

2.2　涂层厚度对结合强度的影响分析

为了验证热处理前后涂层厚度对涂层结合强度的影响,开展了不同厚度的喷涂态和热处理态涂层结合强度试验。表3为不同厚度喷涂态和热处理态拉伸结合强度,图3为热处理前后不同厚度的拉伸

结合强度。

表 3　不同厚度喷涂态与热处理态涂层结合强度

Table 3　Bond strength of original and heat-treated coatings with different thickness

涂层厚度/μm	40	60	80	100	120	140
涂层热处理态/MPa	66.84	66.63	61.58	60.96	60.99	47.04
涂层原始态/MPa	41.5	38.7	37.8	36.2	34.6	29.7

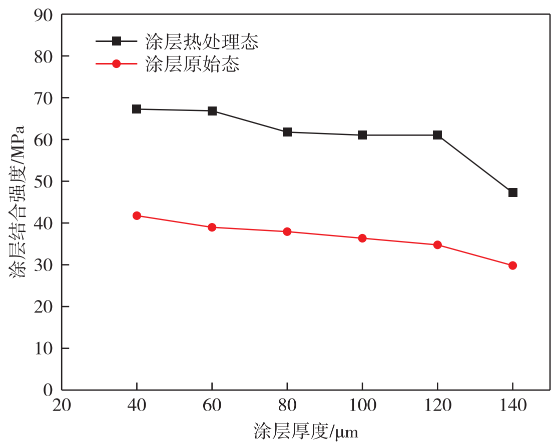


图 3　热处理前后不同涂层厚度结合强度比对图

Fig. 3　Bond strength of different coating thicknesses before and after heat treatment

图 3 热处理前后不同厚度的拉伸结合强度对比结果显示，原始态 NiCrSiB 涂层随着涂层厚度的增加，其拉伸结合强度值呈均匀缓慢下降趋势，总体变化幅度较小，接近最大设计值 140 μm 时，最低结合强度值约 30 MPa。热处理后涂层拉伸结合强度相比原始态涂层结合强度有明显的升高，提升约 20 MPa，并且随着涂层厚度增加，拉伸结合强度值呈逐步下降趋势，接近厚度最大设计值 140 μm 时，涂层拉伸结合强度值急剧下降。说明超出或接近极限涂层厚度对拉伸结合强度有明显影响，特别是对热处理后影响更大。因此，需要控制涂层的最大设计厚度。从图 3 中还可以看出，在热处理后涂层厚度在 80～140 μm，涂层的拉伸结合强度总体变化幅度较小，因此这个区间内的涂层厚度在热处理后结合强度值趋于相对稳定，是设计要素中首选的涂层厚度范围。

2.3　涂盐热腐蚀试验影响分析

对涂层试样进行涂盐热腐蚀试验，试验温度 700 ℃，试验时间 100 h。表 4 为涂层试样涂盐腐蚀试验结果，图 4 为涂层试样涂盐热腐蚀动力学曲线图。

表 4　涂层试样涂盐腐蚀试验结果

Table 4　Salt-coated hot corrosion test results of coating samples

试验时间/h	腐蚀增量/(g · m^{-2})				
	TY-12-1	TY-12-2	TY-12-3	TY-12-4	平均值
20	4.190 7	4.629 0	3.678 4	3.722 0	4.055 0
40	4.267 5	4.782 0	3.908 3	3.875 5	4.208 3
60	4.152 2	4.629 0	4.138 3	4.067 3	4.246 7
80	4.421 3	4.858 5	4.253 2	4.029 0	4.390 5
100	4.613 6	5.202 8	4.559 7	4.527 8	4.726 0

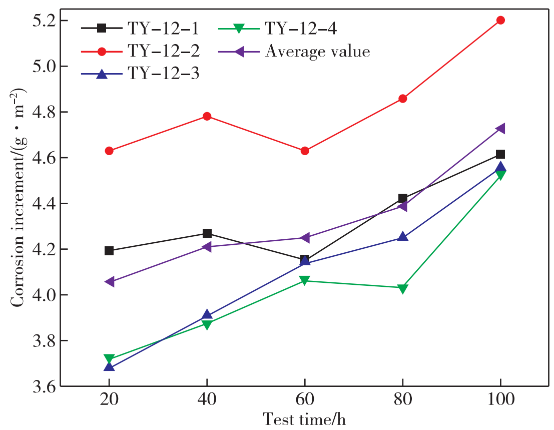


图 4　涂层试样 700 ℃涂盐热腐蚀动力学曲线

Fig. 4　Salt-coated hot corrosion kinetics curves of coating sample at 700 ℃

表 4 和图 4 显示，涂覆有 NiCrSiB 涂层试样在 700 ℃随着腐蚀时间的增加，虽然不同试样的腐蚀后增重值不同，但均呈现逐步增大趋势。从试样外观上可以看出，试样初始呈金属光泽，20～100 h 后涂层表面呈灰黑色(图 5)。但经过 100 h 涂盐热腐蚀试验后，试样表面涂层未出现起皱、开裂、翘皮、脱落等现象，表明涂覆有 NiCrSiB 涂层试样抗腐蚀性能良好，能够满足相关要求。

2.4　涂层电偶腐蚀性能影响分析

图 6 为涂覆有涂层的试样与未涂覆涂层 GH907 原始试样形成的腐蚀电流密度图。

图 6 显示，经过 20 h 电偶腐蚀试验后，合金裸材表面出现轻微锈蚀，涂层表面无明显变化(图 7)。经计算得到平均腐蚀电流密度为 0.82 μA/cm^2，试

验结果表明带涂层试样的电势比基体材料的电势低。裸露的 GH907 材料中存在 Fe 元素，容易在电解腐蚀液中失去电子形成氧化反应，生成 Fe^{3+} 或 Fe^{2+} 的铁离子，而涂层中所含有的 Cr 和 Ni 元素具有很好的抗腐蚀性，可以对 GH907 基材起到有效抗电偶腐蚀防护作用。

(a)试样初始态　(b)100 h后试样表面状态

图 5　涂层试样 700 ℃涂盐热腐蚀表面状态

Fig. 5　Surface state of coated sample subjected to salt hot corrosion at 700 ℃

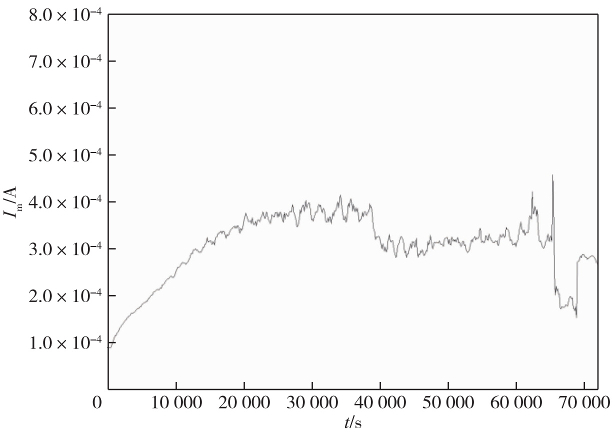


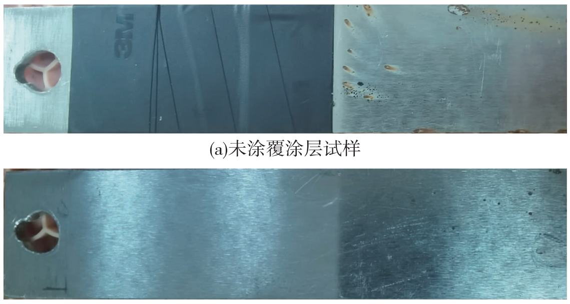
图 6　涂层试样腐蚀电流密度

Fig. 6　Corrosion current density of coating sample

2.5　涂层盐雾试验影响分析

涂层试样经过 1 000 h 盐雾试验后，对样品外观表面进行检查，试验表面出现不同程度的黄色流痕(图 8)。为了进一步探明黄色留痕的结构特性，将盐雾腐蚀后黄色流痕区域以及正常区域涂层表面进行显微组织和能谱分析。

图 9 为盐雾试验后存在黄色流痕区域与周边正常区域的涂层组织及能谱图谱。图 9(a)、(b)、(c)为盐雾试验后黄色流痕区域的能谱图，从图中可见涂层表面存在明显的孔洞，孔洞内部和边缘存在高亮区域和深色区域。图 9(a)是高亮区域的能谱分析，该区域是以 O、Cl、Fe、Ni 等元素为主。除了 O 和 Cl 元素外，其他元素均与涂层成分元素基本一致，说明涂层中的元素在长时间的盐雾试验中发生了腐蚀等反应，相对活泼的 Fe 元素与 O 和 Cl 元素形成了铁的氧化和腐蚀产物。图 9(b)是深色区域的能谱分析，从分析结果显示，该区域主要是 O、Ni、Fe 等元素，同时还存在少量的 Si、Cr 等元素。主要金属元素均与涂层中元素基本一致，说明涂层在盐雾过程中，也形成了铁的氧化物。图 9(c)为黄色区域内规则高亮部位，能谱显示该区域 Cr 元素高达 88.84%，并呈现明显的表面规则矩形物质 Cr 元素的相或组织，该现象的存在进一步验证了图 2(b)热处理后显微组织中存在明显的元素聚集。图 9(d)为正常区域，该区域与图 9(b)深色区域的能谱成分十分接近，为涂层的主要成分以及铁的氧化物。



(a)未涂覆涂层试样

(b)涂覆有涂层试样

图 7　涂层电偶腐蚀试样外观形貌

Fig. 7　Appearance and morphology of coating galvanic corrosion specimens

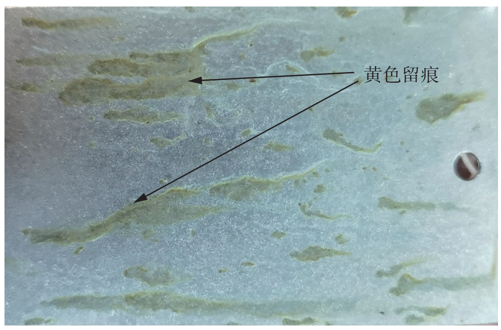
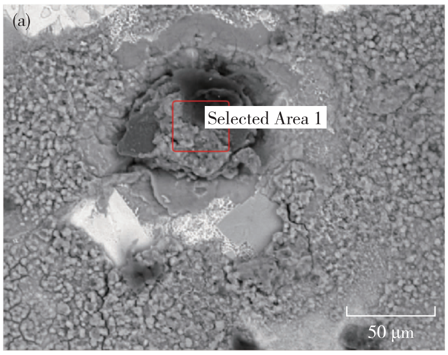


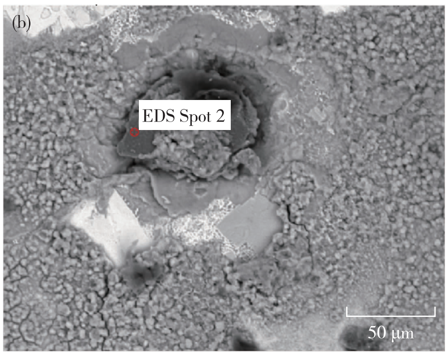
图 8　涂层 1 000 h 盐雾后试样外观黄色留痕形貌

Fig. 8　The appearance of the sample shows a yellow trace morphology after 1 000 h of salt spray coating

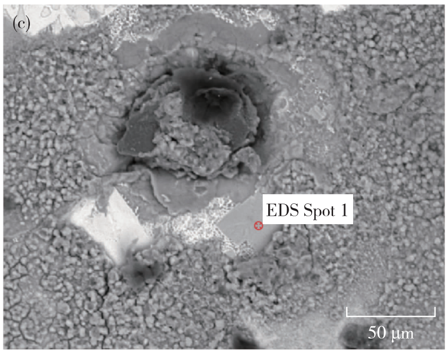
盐雾对金属的腐蚀，主要是导电的盐溶液渗入金属内部发生电化学反应，形成“低电位金属-电解质溶液-高电位杂质”微电池系统，发生电子转移，作



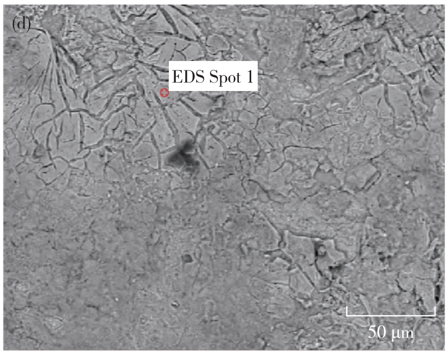
Element	Weight/%	MDL	Atomic/%	Error/%
O K	26.03	0.21	46.04	10.33
F K	0.95	0.3	1.41	20.36
Al K	2.97	0.17	2.37	8.07
Si K	2.92	0.16	2.94	10.00
C K	25.68	0.16	26.94	7.61
K K	0.70	0.2	0.50	19.94
Ca K	0.96	0.23	0.68	15.11
Fe K	15.31	0.42	7.76	4.08
Co K	3.38	0.49	1.62	11.65
Ni K	18.66	0.61	9.00	4.08
Mo L	2.46	0.4	0.73	13.92



Element	Weight/%	MDL	Atomic/%	Error/%
C K	3.03	0.98	7.10	25.78
O K	28.35	0.12	49.82	9.22
Na K	7.15	0.18	8.74	11.38
Si K	7.68	0.11	7.69	7.55
Cr K	9.48	0.2	5.13	3.80
Fe K	11.98	0.26	6.03	3.89
Co K	2.11	0.34	1.00	14.15
Ni K	30.22	0.38	14.48	3.05



Element	Weight/%	MDL	Atomic/%	Error/%
C K	1.14	0.89	4.40	46.94
O K	3.71	0.18	10.72	10.17
Al K	0.87	0.14	1.49	14.38
Cr K	88.84	0.24	78.95	2.03
Mn K	1.44	0.89	1.21	16.17
Fe K	1.87	0.39	1.54	12.27
Ni K	2.12	0.47	1.67	16.05



Element	Weight/%	MDL	Atomic/%	Error/%
C K	2.00	1.2	5.58	36.84
O K	20.32	0.14	42.47	9.52
Na K	4.11	0.22	5.98	13.16
Si K	5.47	0.13	6.52	8.42
Cr K	6.00	0.26	3.86	5.01
Mn K	0.42	0.3	0.26	33.17
Fe K	6.72	0.29	4.03	5.53
Co K	2.04	0.37	1.16	12.75
Ni K	52.91	0.41	30.15	2.64

图 9　盐雾试验后黄色留痕区域涂层组织及能谱分析：(a)黄色区域内高亮部位；(b)黄色区域内深色部位；(c)黄色区域内规则高亮部位；(d)正常区域

Fig. 9　Microstructure and EDS analysis of yellow flow mark on coating after salt fog test: (a) Highlight in yellow area; (b) Dark part in yellow area; (c) Regular highlight in yellow area; (d) Normal area

为阳极的金属出现溶解，形成新的化合物及腐蚀物。盐雾腐蚀破坏过程中起主要作用的是 Cl^-，它具有很强的穿透能力，容易穿透金属氧化物层进入金属内部，破坏金属的钝态。同时 Cl^- 具有很小的水合能，容易被吸附在金属表面。而涂层中铁元素最为活泼，Cl^- 先与涂层中铁元素发生反应，形成 $FeCl_3$ 和 $FeCl_2$，暗红色的 $FeCl_3$ 与黄色的 $FeCl_2$ 在涂层表面微孔结构处聚集(图 10)，并与微孔处 FeO 等氧化物共同形成黄色流痕。至于涂层热处理后 Cr 元素的析出或聚集，及其对涂层的耐腐蚀性的影响，将在未来研究中进一步探讨。

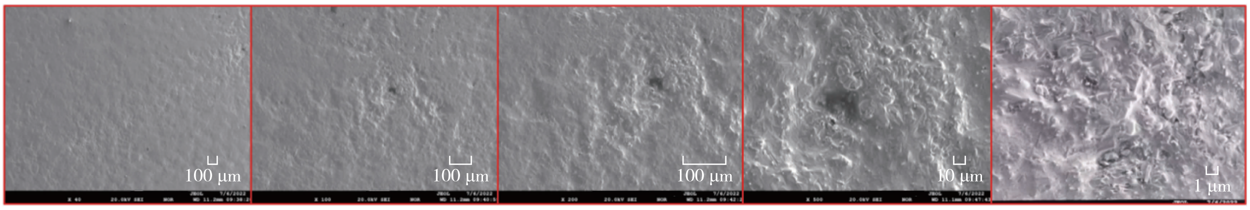


图 10 不同放大倍数的涂层表面微孔结构图片

Fig. 10 Microporous structure on coating surface at different magnification

3 结论

1)大气等离子喷涂态的 NiCrSiB 涂层经热处理后,涂层与基体的结合形式由颗粒堆积的层状物理结合转变为冶金结合,涂层中的孔洞等组织特征明显改善。热处理前后涂层的拉伸结合强度随厚度的变化均呈下降趋势,热处理后涂层厚度在 80～140 μm 的结合强度值相对稳定。

2)NiCrSiB 涂层试样在 700 ℃涂盐热腐蚀试验中,随着时间的逐步延长,涂层腐蚀速率逐步增大趋势。同时电偶腐蚀表明涂层的电势比基体材料的电势低,涂层中的 Cr、Ni 等耐腐蚀元素能够很好地起到对 GH907 母材的防护作用。

3)NiCrSiB 涂层盐雾试验后所形成的黄色流痕,主要为盐雾中 Cl^- 与涂层中活泼 Fe 元素在长时间接触中所形成的 $FeCl_3$ 和 $FeCl_2$ 以及氧化物在涂层表面微孔结构处的聚集产物。

参考文献

[1] 秦建,龙伟民,路全彬,等.金刚石/NiCrBSi 钎涂接头组织与耐磨性能分析[J].材料导报,2020(36):457-461.
QIN J,LONG W M,LU Q B,et al. Microstructure and wear properties of diamond/NiCrBSi composite brazing coating[J]. Materials Review,2020(36):457-461.

[2] 苗小锋,李正秋,汪云程. Si 元素对 CoCrAlY 涂层组织及性能的影响[J].热喷涂技术,2018,10(3):23-26,18.
MIAO X F,LI Z Q,WANG Y C. Effect of Si elements on microstructure and properties of CoCrAlY coatings[J]. Thermal Spray Technology,2018,10(3):23-26,18.

[3] 张绍维.低膨胀高温合金的发展与应用[J].航空制造工程,1994(9):5-8.
ZHANG S W. Development and application of low-expansion superalloys[J]. Aviation Maintenance & Engineering,1994(9):5-8.

[4] 任先京,张淑婷,杜开平,等. Si 对 MCrAlY 涂层高温性能的影响[J].热喷涂技术,2016,8(1):11-16,43.
REN X J,ZHANG S T,DU K P,et al. Effect of Si on high temperature performance of MCrAlY coatings[J]. Thermal Spray Technology,2016,8(1):11-16,43.

[5] 赵宏璐,王理,韩振宇,等. GH907 合金防护涂层耐腐蚀性能研究[J].航空发动机,2011,37(2):42-43.
ZHAO H L,WANG L,HAN Z Y,et al. Study on corrosion resistance performance of protective coatings for GH907 alloy[J]. Aeroengine,2011,37(2):42-43.

[6] 刘英坤,陈和兴,余志明,等. NiCoCrAlY 涂层的抗中性盐雾腐蚀性能[J].机械工程材料,2008,32(10):52-59.
LIU Y K,CHEN H X,YU Z M,et al. Salt spray corrosion performance of NiCoCrAlY coating[J]. Materials for Mechanical Engineering,2008,32(10):52-59.

[7] 林筠,刘栋,罗文飞,等.铜铝聚苯酯封严涂层耐腐蚀性能和可磨耗性能研究[J].热喷涂技术,2023,15(2):27-33.
LIN J,LIU D,LUO W F,et al. Study on the corrosion resistance and abradability of copper aluminium polyphenylene ester seater coating[J]. Thermal Spraying Technology,2023,15(2):27-33.

[8] 付金良,王梦琪,马登潘,等. Fe0.5CrMnAlCu 高熵合金及涂层的组织与性能[J].有色金属工程,2024,14(1):9-15.
FU J L,WANG M Q,MA D P,et al. Microstructure and properties of Fe0.5CrMnAlCu high entropy alloy and coating[J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(1):9-15.

[9] XU F,TAN Y,SUN H,et al. Corrosion behavior and mechanism of NiCrAl-NiC abradable sealing coating system in NaCl solution[J]. Materials Chemistry and Physics,2024,316:129059. DOI:10.1016/j.matchemphys.2024.129059.

[10] 房永超,李姝,刘振,等.镍石墨涂层酸性盐雾腐蚀后的组织结构与性能转变[J].有色金属工程,2024,14(7):24-32.
FANG Y C,LI S,LIU Z,et al. Microstructure and properties transformation of Ni-C coatings after acid salt spray corrosion[J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(7):24-32.