

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20171215002

$\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 涂层的制备及其红外发射性能

李永甲, 李淑浩, 柯成竹, 程旭东

(武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 通过喷雾造粒和高温焙烧制备 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 粉末后利用等离子喷涂得到一种高红外发射涂层, 并研究了该种涂层的红外发射性能。SEM 观察涂层的表面、断面形貌, 发现涂层与基体结合紧密、无脱落; XRD 对焙烧后的粉末物相组成进行了表征, 主要以 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 为主。对涂层红外波段发射率的测试表明, 在 0.76~2.5 μm 波段的发射率为 0.896、2.5~14 μm 波段发射率为 0.925, 具有优异的红外发射性能。 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 晶胞内的畸变、非对称性以及电子转移跃迁是导致 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 这种材料具有高红外发射率的主要原因。 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 涂层能够经受 37 次“900 $^\circ\text{C}$ ~水冷”热震循环。该种涂层由于其高红外发射性能、优异的耐热震性能和热稳定性能而具有较高的实用价值。

关键词: 红外发射率; $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$; 等离子喷涂; 涂层

中图分类号: TG174.442

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)03-0137-06

Preparation and Infrared Emissivity of $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ Coating

LI Yong-jia, LI Shu-hao, KE Cheng-zhu, CHENG Xu-dong

(Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ coating, a high infrared emitting coating, was prepared via atmospheric plasma spraying after $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ powder was prepared by spray granulation and calcining at high temperature. The infrared emissivity of the coating was studied. The surface and section morphology of the coating were observed by SEM and it is found that the coating is closely combined with the matrix. The phase composition of calcined powder was characterized by XRD, mainly containing $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$. According to test result, infrared emissivity of the $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ coating in the wave band of 0.76~2.5 μm is 0.896 while that in the wave band of 2.5~14 μm is 0.925, which indicates that the coating possesses excellent infrared emission performance. Lattice distortion, asymmetry and electron transfer transition in the $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ structure cell are the main reasons for high infrared emissivity. $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ coating can withstand thermal shock circles of 37 times from 900 $^\circ\text{C}$ to 20 $^\circ\text{C}$ of water. The coating has high practical application value due to its high infrared emissivity, good thermal shock resistance and thermal stability.

Keywords: infrared emissivity; $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$; plasma spraying; coating

0 引言

高红外辐射材料近年来一直是科学研究热点, 其在节能、环保等领域具有极高的应用价值。根据热辐射理论计算, 1 000 $^\circ\text{C}$ 下的黑体在 0.76~14 μm 波段的红外辐射占其全部红外辐射的 98% 以上。由此可以推断, 实际物体红外辐射的

能量绝大部分集中在 0.76~14 μm 波段^[1]。

目前关于高红外发射涂层材料的研究主要集中在尖晶石结构、钙钛矿结构和堇青石结构, 如 Shen Xingmei 等^[2]研究 Sr 掺杂锰酸镧的红外发射率最高可达 0.86, 樊希安^[3]研究堇青石—铁氧体复合材料的红外发射率在 6~20 μm 波段超过 0.8。程

收稿日期: 2017-12-15; 修回日期: 2018-04-11

网络出版日期: 2018-05-09 09:10; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180509.0910.016.html>

通讯作者: 程旭东 (1954—), 男 (汉), 研究员, 博士; 研究方向: 红外、太阳能和热障涂层材料; E-mail: xudong.cheng@whut.edu.cn

引文格式: 李永甲, 李淑浩, 柯成竹, 等. $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 涂层的制备及其红外发射性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 137-142.

LI Y J, LI S H, KE C Z, et al. Preparation and infrared emissivity of $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ coating[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 137-142.

旭东等人^[4-5]研究镍铬尖晶石 (NiCr_2O_4) 发现, 等离子喷涂制备的 NiCr_2O_4 涂层发射率能够达到 0.88, 且具有优异的耐高温热震性能。随后又在 NiCr_2O_4 中分别掺杂 Ti、Mn、Pr、Te 等过渡金属或稀土元素, 使得镍铬尖晶石晶胞产生缺位和畸变以提高红外发射率, 最终达到 0.91^[6-7]。

图 1 为沿 [001] 方向的 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 晶体结构。 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 晶胞是由沿着 [001] 方向的 Ni/CrO₆ 八面体和 BO_3 平面三角形组成的平面墙堆叠而成^[8-9]。在该晶胞中, 金属离子分别有 4 种不同的占位, 记为 M1、M2、M3 和 M4, 其中 Ni^{2+} 在这 4 个位置的占有率分别为 12%、89%、94% 和 100%^[9-10]。在红外辐射机理中, 材料晶格畸变严重、晶胞对称性低造成的声子吸收和电子转移跃迁造成的电子吸收有利于红外发射率的提升^[11-13]。

由于此前研究中^[6-7]加入稀土元素成本较高, 为了进一步提高红外发射性能, 文中向镍铬尖晶石体系中添加成本较低的氧化硼 (B_2O_3), 获得了类似硼镁铁矿 (Ludwigite) 结构的 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 。该做法目前在国内外鲜有报道, 其涂层具有优异的红外发射率。

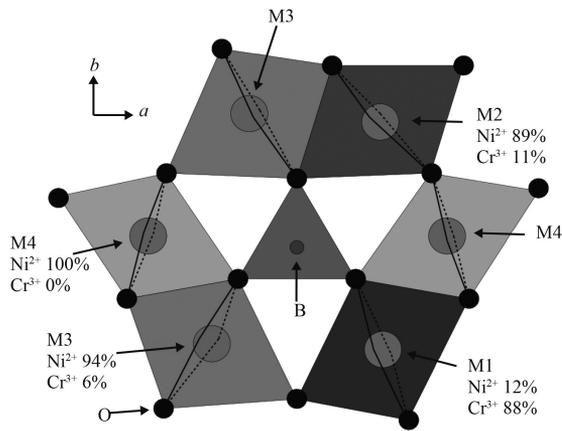


图 1 沿 [001] 方向的 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 晶体结构

Fig.1 Crystal structure of $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ along the [001] direction

1 试验过程与测试方法

采用旋转喷雾造粒制备 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 粉末。所用原始粉末为 NiO (99%, 1~3 μm)、 Cr_2O_3 (99%, 1~3 μm) 和 B_2O_3 (99.9%, 1~3 μm)。按照化学式 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 的元素配比称取相应质量的原始粉末, 加水混合, 倒入浇磨机中循环研磨。在循环过程中加入适量自制的粘结剂 (有机物) 得到

前驱体料浆。将料浆用送料泵送入干燥塔, 得到前驱体粉末。

利用等离子喷涂制备 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 涂层。前驱体粉末于 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 的马弗炉中焙烧 36 h 得到焙烧粉末, 过 56 μm 筛。在 316 L (40 mm×50 mm×3 mm) 基片先喷涂一层打底层 NiCoCrAlY , 然后喷涂焙烧粉末得到 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 高红外辐射涂层。喷涂打底层是为了粗化基片, 增强基片与陶瓷涂层的结合性能。为方便比较, 文中做了 A、B、C、D 这 4 个喷涂试片, 喷涂参数见表 1。

表 1 等离子喷涂工艺参数

Table 1 Parameters of plasma spraying

Parameters	Bonding coating	Ceramic coating
Current / A	420	500
Voltage / V	66	78
Flow rate of Ar / ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	30	30
Flow rate of H_2 / ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	1	5
Flow rate of N_2 / ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	1	4
Speed / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	400	500
Distance / mm	130	90

采用 SEM (JSM-IT300) 观察喷雾造粒制得的粉末及涂层表面和断面形貌。霍尔流量计测量焙烧前后粉末的松装密度和流动性。利用 XRD (D8 Advance) 表征焙烧后粉末的物相组成。由于仪器限制, 无法直接测量 0.76~14 μm 波段发射率, 故分 0.76~2.5 μm 和 2.5~14 μm 两个波段分别测量。紫外-可见-近红外分光光度计 (UV-3600) 测量 0.76~2.5 μm 波段发射率, 红外光谱仪 (Tensor27) 测量 2.5~14 μm 波段发射率。2.5~14 μm 波段高温数据由国家红外及工业电热产品质量监督检验中心 (武汉) 测量。试样在 900 $^{\circ}\text{C}$ 或 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 环境中保温 10 min 后, 置于冷水中快速冷却, 将一次加热保温并冷却过程记为一次热震循环, 重复热震循环直至涂层脱落面积达到 10% 即认为涂层失效。

2 结果与讨论

2.1 粉末流动性与 SEM 表征

焙烧前后粉末的松装密度与流动性见表 2。从表 2 中可以看出, 焙烧后的粉末流动性大幅度降低, 松装密度增加。虽然焙烧后粉末流动性降低了 76.24%, 但仍能够满足等离子喷涂的要求, 不会造成送料管阻塞。

表2 粉末焙烧前后松装密度和流动性

Table 2 Fluidity and apparent density of precursor and calcined powders

Powder	Fluidity / (s·(50g) ⁻¹)	Apparent density / (g·cm ⁻³)
Precursor powder	66.5	0.320 6
Calcined powder	117.2	0.739 2

图2是焙烧前和焙烧后粉末的SEM形貌。图3是涂层的表面和断面SEM形貌。对比图2(a)和图2(b), 焙烧前粉末球形度较高、表面较为密实, 而焙烧后粉末由于粘结剂分解和物质发生化学反应出现塌陷与收缩, 表面变得十分粗糙, 这是导致流动性严重降低的主要原因。粉末粒径大

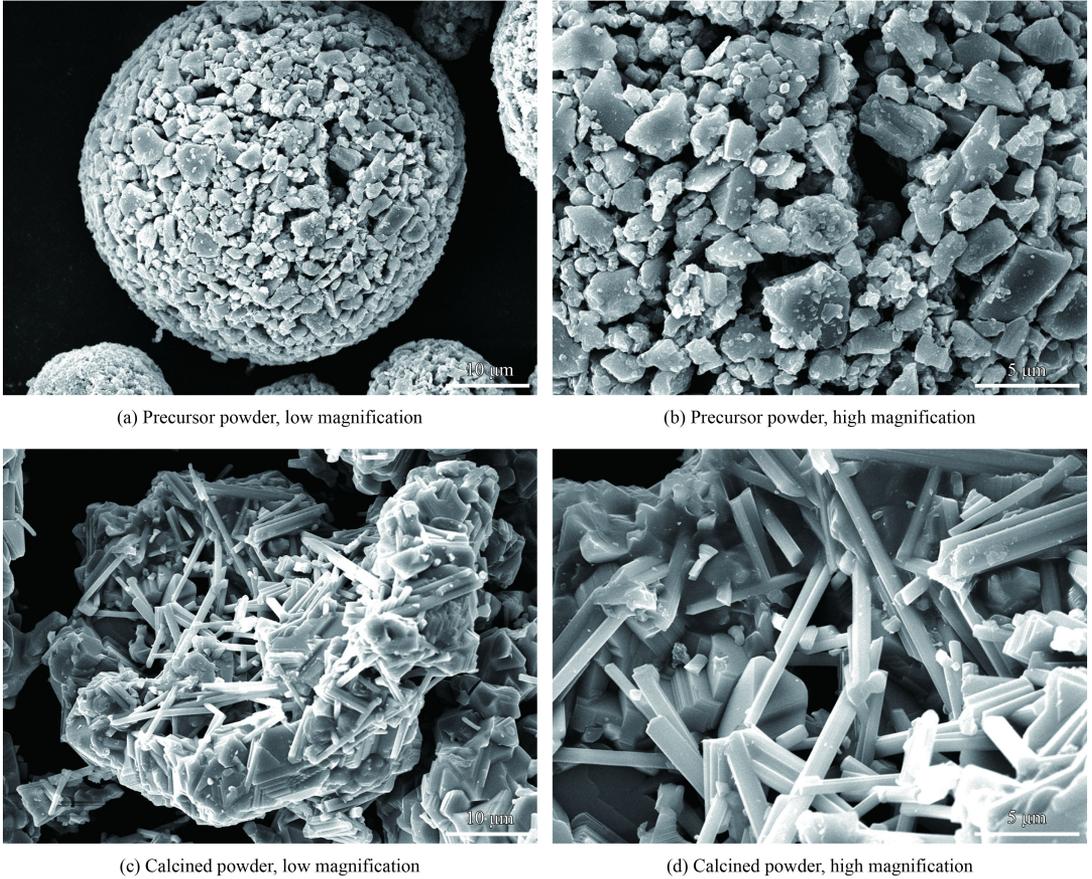


图2 焙烧前后粉末表面的SEM形貌

Fig.2 SEM images of precursor and calcined powders

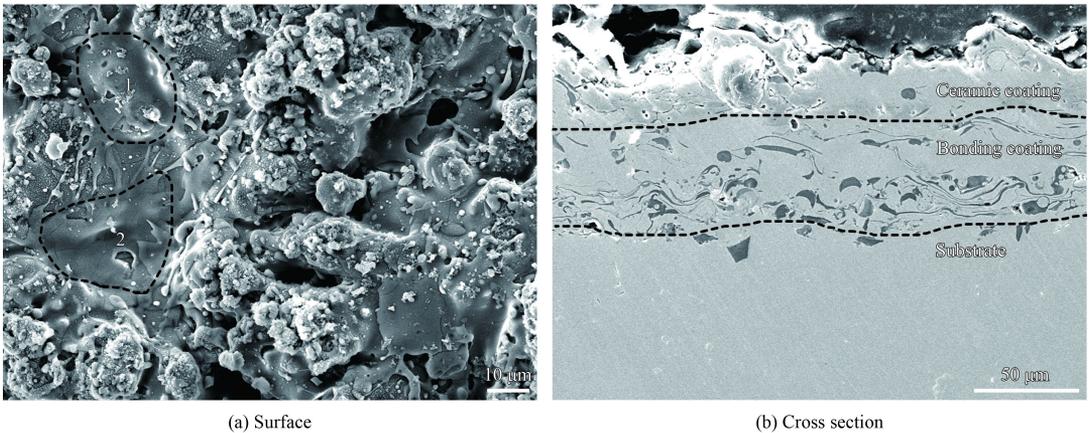


图3 涂层表面和断面SEM形貌

Fig.3 Surface and cross section SEM images of the coating

约在 30~40 μm 的范围内。从图 2(d) 焙烧后粉末表面 SEM 形貌可以看出, 原始粉末发生固相反应, 生成了很多长条状的规则晶体, 在长条状晶体后面还有些许块状晶体。

从涂层的表面形貌 (图 3(a)) 中可以看出, 涂层表面有许多 1~10 μm 的孔洞, 虚线 1、2 区域是液相物质覆盖于涂层上冷却凝固后形成的, 焙烧时未参与反应的 B_2O_3 在等离子火焰中融化形成无定形态 B_2O_3 ^[14]。图 3(b) 中, 基体、打底层和陶瓷层分层明显, 内部有一些孔洞, 涂层间结合密实, 没有剥离, 制备的陶瓷层厚度在 20~30 μm 之间。

2.2 XRD 分析

图 4 是焙烧后粉末的 XRD 图谱。分析结果表明粉末经焙烧后形成了大量的 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 和少许 NiCr_2O_4 。 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 和 NiCr_2O_4 晶体形状分别为长条状和块状, 这与图 2(b) 中的粉末表面 SEM 结果相吻合。但对比 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ (PDF 82-1025) 标准图谱, 在焙烧后粉末 XRD 图谱中部分衍射峰出现了轻微偏移, 如实际衍射峰 35.78° 和标准衍射峰 35.47° 的偏移。这是由于在焙烧形成 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 的过程中出现了少量的 $\text{Ni}_x\text{Cr}_y\text{BO}_5$ 或 $\text{Ni}_x\text{Cr}_y\text{BO}_4$ 杂相^[9]。这些杂相由于金属离子占位不完全或者氧空位的出现造成了晶面间距变化, 使得衍射峰发生偏移。

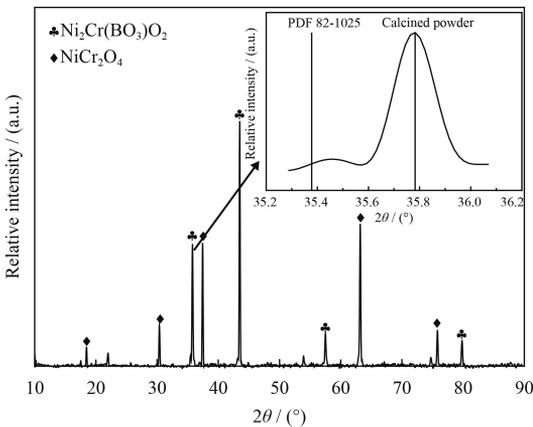


图 4 焙烧后粉末 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of calcined powder

2.3 红外辐射性能分析

2.3.1 近红外波段光谱

图 5 为试样 A 在 0.76~2.5 μm 波段的红外吸收图谱。由基尔霍夫定律可知, 物体的红外吸收

率等于其红外发射率, 故图 5 的红外吸收图谱也就是涂层的红外发射图谱。 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 涂层的发射率从 0.76 μm 附近的 0.94 逐渐降低至 2.5 μm 附近的 0.88, 且这一波段发射率都在 0.88 以上, 通过 Origin 软件求得 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 涂层在 0.76~2.5 μm 波段的平均发射率为 0.894。因此 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$ 在近红外波段具有优异的红外发射性能。

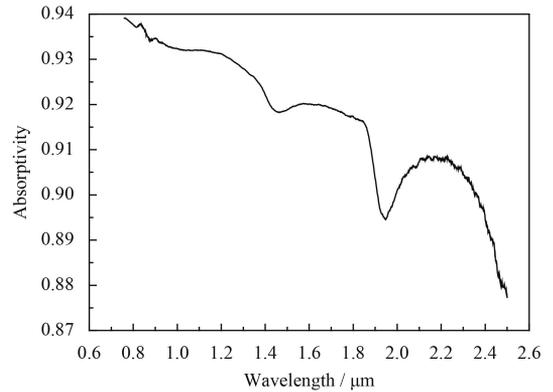


图 5 试片 A 在 0.76~2.5 μm 波段的红外吸收图谱

Fig.5 Infrared absorption spectrum of coating A in wave band from 0.76~2.5 μm

2.3.2 中远红外波段光谱

图 6 是同一涂层试样 A 在 2.5~14 μm 波段的红外发射图谱。从图谱中可以看出该波段明显分为两个阶段, 即 2.5~8 μm 波段和 8~14 μm 波段。2.5~8 μm 波段的发射率值在 0.88~0.90 之间波动, 而 8~14 μm 波段的发射率数值上升了一个台阶, 达到了 0.94~0.96, 用 Origin 软件计算得到 2.5~14 μm 波段的平均发射率为 0.928。可见 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2$

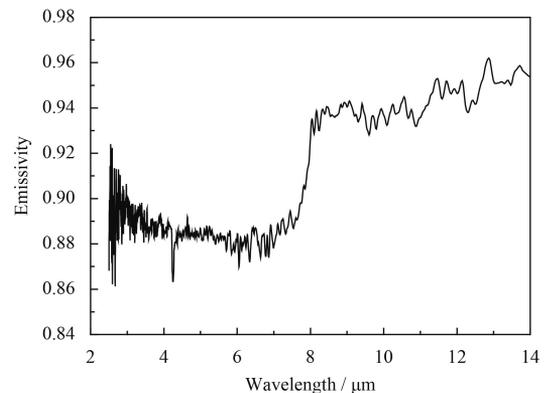


图 6 试片 A 在 2.5~14 μm 波段的红外发射图谱

Fig.6 Infrared emission spectrum of coating A in wave band of 2.5~14 μm

在中远红外波段同样具有极其优异的红外发射性能。

2.3.3 红外发射率结果分析

表3是4个喷涂试片在两个波段的发射率计算结果。引言部分给出了 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 的晶体结构,由于 Ni^{2+} 和 Cr^{3+} 半径不同,且各八面体中心(即M1、M2、M3和M4)的金属占位比例不同,这将在 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 晶体中造成相当大的晶格畸变、降低晶胞对称性,使得 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 对红外辐射具有较强的声子吸收^[10-11]。在 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 中金属离子会出现价态变化, $2\text{Me}^{3+}=\text{Me}^{2+}+\text{Me}^{4+}$,发生电子转移跃迁^[15];另一方面,平面基团 BO_3 中硼原子外有4个电子,其中3个电子分别与3个O原子形成共价键,游离的电子便很容易发生电子转移跃迁^[16],这使得 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 对红外辐射具有较强的电子吸收。因此,综合数据分析, $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 是一种在0.76~14 μm 波段优异的高红外发射材料。

表3 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 涂层的红外发射率

Wave band / μm	A	B	C	D	Average value
0.76~2.5	0.894	0.900	0.896	0.893	0.896
2.5~14	0.928	0.924	0.926	0.924	0.925

涂层的表面SEM形貌(图3(a))显示,涂层表面有许多孔径为1~10 μm 的孔洞,其大小与红外辐射波长相匹配,可以被视为理想的黑体辐射源,对涂层红外发射率的提高具有积极作用^[14,17]。另外,涂层表面的无定形态 B_2O_3 (图3(a)区域1、2)本身红外发射率较高,其覆盖于涂层表面,进一步提升涂层的红外发射率^[14]。

由于条件的限制,只能测量2.5~14 μm 波段的高温红外发射率(表4)。随着温度增加至1000 $^\circ\text{C}$,涂层在2.5~14 μm 的发射率逐渐降低至0.902,降低了2.49%。涂层在高温环境下依旧能保持较高

表4 高温下 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 涂层的红外发射率

Table 4 Infrared emissivity of $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ coatings at high temperature

Temperature / $^\circ\text{C}$	Infrared emissivity (2.5~14 μm)
Room temperature	0.925
600	0.905
800	0.904
1 000	0.902

的发射性能。

2.4 热震性能

以涂层脱落面积达到10%所需次数对涂层热震性能进行表征。将热震试片拍照后利用Image J软件计算脱落面积。热震试验结果见表5。

表5 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 涂层热震试验结果

Temperature / $^\circ\text{C}$	10% of abscission area / times	Infrared emissivity	
		0.76~2.5 μm	2.5~14 μm
900	37	0.878	0.898
1 000	12	0.879	0.897

热震后涂层分散脱落呈斑点状,斑点直径一般不超过0.5 mm。脱落斑点最开始出现在试片4个角落,随后逐渐向中间扩散。直到脱落面积达到总面积的10%,900 $^\circ\text{C}$ 和1 000 $^\circ\text{C}$ 热震试片中间脱落部分占全部脱落的平均比例为14.22%和17.71%,表明涂层即使脱落,其中间主体部分依旧能保证较好的完整性。

涂层能承受37次“900 $^\circ\text{C}$ ~水冷”热震试验,远大于11次“1 000 $^\circ\text{C}$ ~水冷”热震试验。测量红外发射率,“900 $^\circ\text{C}$ ~水冷”热震后涂层在0.76~2.5 μm 波段和2.5~14 μm 波段的常温平均发射率为0.878和0.898,相对于热震前发射率分别只降低了2.01%和2.92%。

3 结论

(1) 喷雾造粒制备的 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 粉末流动性良好,高温焙烧后由于粘结剂分解在粉末表面留下许多孔洞,粉末表面变得更加粗糙,流动性降低,但依旧能够满足等离子喷涂的要求,不会阻塞设备。焙烧后粉末的组成主要是 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$,制备的涂层与基体结合较为紧密、无脱落。

(2) $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 涂层在0.76~2.5 μm 波段的发射率为0.896,在2.5~14 μm 波段的发射率为0.925,且1000 $^\circ\text{C}$ 的环境下发射率仅下降2.49%,是一种极其优秀的高红外发射材料。由于 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 晶胞内较为严重的晶格畸变以及活跃的电子跃迁造成 $\text{Ni}_2\text{Cr}(\text{BO}_3)_2\text{O}_2$ 这一材料对红外辐射产生强烈的声子吸收和电子吸收,使其具有较高的红外发射率。涂层表面大量的孔径为1~10 μm 的孔洞可以被看作理想的黑体辐射源以及覆盖于

涂层表面发射率较高的无定形态 B_2O_3 对涂层的红外发射率都具有积极影响。

(3) $Ni_2Cr(BO_3)O_2$ 涂层能在“900℃~水冷”热震循环 37 次, 抗热震性能良好。热震后在 0.76~2.5 μm 波段和 2.5~14 μm 波段的常温平均发射率为 0.878 和 0.898。结合其高红外发射性能和优秀的热震性能, 认为 $Ni_2Cr(BO_3)O_2$ 涂层具备较高的实用价值。

参考文献

- [1] 布丛郝, 贺刚, 李江涛. (Ca, Cr) 共掺 YAG 陶瓷的红外辐射性能研究[J]. 无机材料学报, 2016, 31(10): 1094-1098.
BU C H, HE G, LI J T. Infrared emission property of (Ca, Cr) Co-doped YAG ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2016, 31(10): 1094-1098 (in Chinese).
- [2] SHEN X M, LI L S, WU X R, et al. Infrared emissivity of Sr doped lanthanum manganites in coating form[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(31): 8116-8119.
- [3] 樊希安, 张坚义, 陆磊, 等. 堇青石-铁氧体基复合节能涂层的结构与红外辐射性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 7(42): 891-896.
FAN X A, ZHANG J Y, LU L, et al. Microstructure and infrared radiation properties of cordierite-ferrite based energy-saving composite coating[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 7(42): 891-896 (in Chinese).
- [4] CHENG X D, DUAN W, CHEN W, et al. Infrared radiation coatings fabricated by plasma spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 3(18): 448-450.
- [5] 程旭东, 李丹虹, 王晋春. $NiCr$ 尖晶石型高温红外辐射涂层材料的制备和研究[J]. 涂料工业, 2006, 36(1): 24-26.
CHENG X D, LI D H, WANG J C. Preparation and study of $NiCr$ spinel high temperature infrared radiation coating material[J]. Paint & Coatings Industry, 2006, 36(1): 24-26 (in Chinese).
- [6] CHENG X D, MIN J, ZHU Z Q, et al. Preparation of high emissivity $NiCr_2O_4$ powders with a spinel structure by spray drying[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(2): 173-178.
- [7] ZHU Z Q, CHENG X D, YE W P. Synthesis of $NiCr_2O_4$ spinel coatings with high emissivity by plasma spraying[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(3): 266-270.
- [8] KNYAZEV Y V, IVANOVA N B, KAZAK N V, et al. Crystal structure and magnetic properties of Mn substituted ludwigite $Co_3O_2BO_3$ [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(6): 923-927.
- [9] 李航空. $MgO-In_2O_3-B_2O_3$ 体系的相关关系、新相结构及其性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
LI H K. Crystal structure and properties of new compounds and phase relations in $MgO-In_2O_3-B_2O_3$ system[D]. Changsha: Central South University, 2014 (in Chinese).
- [10] LI H K, WANG L, CAI G M, et al. Synthesis and crystal structure of a novel ludwigite borate: Mg_2InBO_5 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 575: 104-108.
- [11] HAN Z, LIU J, LI X, et al. Ca^{2+} -doped $LaCrO_3$: A novel energy-saving material with high infrared emissivity[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2014, 97(9): 2705-2708.
- [12] ZHANG S Y, CAO Q X, MA X H, et al. Effects of sintering temperatures on the infrared emissivity of $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(18): 7036-7038.
- [13] HUANG J P, FAN C L, SONG G P, et al. Enhanced infrared emissivity of CeO_2 coatings by La doping[J]. Applied Surface Science, 2013, 280: 605-609.
- [14] HE X D, LI Y B, WANG L D, et al. High emissivity coatings for high temperature application: Progress and prospect[J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 5120-5129.
- [15] MENG S H, CHEN H B, HU J H, et al. Radiative properties characterization of ZrB_2-SiC -based ultrahigh temperature ceramic at high temperature[J]. Materials and Design, 2011, 32(1): 377-381.
- [16] MOSHKINA E, SOFRONOVA S, VELIGZHANIN A, et al. Magnetism and structure of Ni_2MnBO_5 ludwigite[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 402: 69-75.
- [17] YUAN H P, LI J G, SHEN Q, et al. Preparation and microstructure of porous ZrB_2 ceramics using reactive spark plasma sintering method[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2015, 30(3): 512-515.

(责任编辑: 王文宇)