

引用格式:胡成伟,曹茜,杨虎,等.大气等离子喷涂 MnO_2/VB_2 共掺杂 NiCr_2O_4 基热辐射涂层的结构与性能[J].材料工程,2025,53(11):215-222.

HU Chengwei, CAO Qian, YANG Hu, et al. Structure and properties of atmospheric plasma sprayed MnO_2/VB_2 co-doped NiCr_2O_4 based thermal radiation coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 215-222.

大气等离子喷涂 MnO_2/VB_2 共掺杂 NiCr_2O_4 基热辐射涂层的 结构与性能

Structure and properties of atmospheric
plasma sprayed MnO_2/VB_2 co-doped
 NiCr_2O_4 based thermal radiation coatings

胡成伟,曹茜,杨虎,程旭东,曾鲜*
(武汉理工大学材料科学与工程学院,武汉 430070)

HU Chengwei, CAO Qian, YANG Hu,
CHENG Xudong, ZENG Xian*
(School of Materials Science and Engineering, Wuhan
University of Technology, Wuhan 430070, China)

摘要:采用大气等离子喷涂法制备不同摩尔比的 MnO_2 和 VB_2 共掺杂 NiCr_2O_4 基红外辐射陶瓷涂层(MV),研究涂层的物相组成、微观结构、红外发射率和抗热震性能。结果表明:相比于 MnO_2 和 VB_2 单掺杂,两者共掺杂 NiCr_2O_4 可以更加有效地提高涂层的红外发射率,其中 MnO_2 和 VB_2 的掺杂比为 1:1 的涂层(MV11)具有最高的发射率,在 $0.75\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波长范围内,MV11 涂层的室温波段发射率为 0.928,在 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$ 时,波段发射率由室温的 0.884 提高到 $1000\ \text{C}$ 的 0.918。这主要因为过渡族金属离子和 B 离子进入尖晶石晶格,使晶格中的氧空位含量升高;在能带隙中引入局部能级,引起晶格畸变,增强自由载流子跃迁吸收和红外晶格振动吸收。此外,在 $25\sim 750\ \text{C}$ 水冷 30 次热循环后涂层出现微裂纹,但相结构没有发生明显变化,发射率略有下降,表明涂层具有良好的抗热震性能。

关键词:金属硼化物;二氧化锰;红外发射率; NiCr_2O_4 涂层;等离子喷涂

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000311 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000311

中图分类号: TG148 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0215-08

Abstract: The MnO_2 and VB_2 co-doped NiCr_2O_4 coatings (MV) with different ratios of moles are prepared by atmospheric plasma spraying (APS), and the phase composition, microstructure, infrared emissivity and thermal shock resistance of the coatings are investigated. The results show that the co-doping of NiCr_2O_4 with MnO_2 and VB_2 can more effectively improve the infrared emissivity of the coatings than the doping of MnO_2 or VB_2 , thus the coating with MnO_2 and VB_2 doping ratio of 1:1 (MV11) has the highest emissivity. In the $0.75\sim 2.5\ \mu\text{m}$ wavelength ranges, the room temperature band emissivity of the MV11 coating is 0.928, and in the $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$, the infrared emissivity of the coating increases from 0.884 at room temperature to 0.918 at $1000\ \text{C}$. It is mainly attributed to the transition metal ions and B ions enter the spinel lattice, increasing the concentration of oxygen vacancy in the lattice, introducing partial energy levels into the bandgap, and causing lattice distortions, enhancing free carrier transition absorption and infrared lattice vibration absorption. In addition, after 30 thermal cycles of water cooling at $25\sim 750\ \text{C}$, microcracks appear in the coating, but the phase structure did not change significantly, and the emissivity decreases slightly, indicating that the coating has good thermal shock resistance.

Key words: metal boride; MnO_2 ; infrared emissivity; NiCr_2O_4 coating; plasma spraying

辐射是真空环境下的唯一传热形式,因此具有高发射率的热辐射涂层材料常用作工业炉窑的内衬材料,用以提高炉子的加热效率,节省能源消耗。除此之外,热辐射涂层也可用作太空环境下火箭、卫星、空间站等飞行器的热端零部件的表面,用以辐射散热,从而保障飞行器的安全性与稳定性^[1-4]。通常,高温环境下使用的高发射率热辐射材料均为陶瓷材料,其中氧化物陶瓷具有高发射率、良好的化学稳定性和耐高温性能等特点,引起研究者们广泛的关注^[5-7]。然而,由于氧化物陶瓷的带隙大,在近红外波段的发射率相对较低。因此,通常采用化学掺杂来提高氧化物陶瓷涂层的红外性能。Yang等^[8]通过掺杂Mn、Fe和Ni过渡族金属元素,将六铝酸盐型LaMgAl₁₁O₁₉涂层的近红外光谱发射率从0.25提高到0.75。Liu等^[9]通过掺杂Ca和Sr碱土金属元素,提高了钙钛矿型LaCrO₃涂层的发射率,其在2.5~10 μm的红外发射率从0.61提高到0.90以上。Zhang等^[10]通过掺杂Cr³⁺对堇青石型Mg₂Al₄Si₅O₁₈涂层的红外性能进行了改性,使其红外发射率提高到0.85以上。然而,值得注意的是,随着环境温度的升高,LaCrO₃和Mg₂Al₄Si₅O₁₈涂层的红外发射率均呈下降趋势。与之对比,尖晶石型NiCr₂O₄涂层的红外发射率随着温度升高呈上升趋势,更适合高温环境中使用。Zeng等^[11]通过大气等离子喷涂(atmospheric plasma spraying, APS)方法,制备了MnO₂和不同金属硼化物MB_x(M=V、Mo、Fe)共掺杂NiCr₂O₄涂层,发现MnO₂和VB₂共掺杂的涂层具有更好的红外辐射性能。本工作采用APS法制备不同摩尔比的MnO₂和VB₂共掺杂NiCr₂O₄基红外辐射陶瓷涂层(MV),研究涂层的物相组成、微观结构、红外发射率和抗热震性能,讨论MnO₂与VB₂的共掺杂摩尔比的影响,对APS法沉积的掺杂NiCr₂O₄涂层的微观

结构、物相组成、红外辐射性能以及热冲击性能进行分析表征,以更好地理解氧化物和硼化物共掺杂涂层的红外增强机理。

1 实验材料与方法

1.1 粉末的制备

原始粉末选用纯度为99.0%的Cr₂O₃粉末(粒径0.5~1.5 μm)、NiO粉末(粒径0.5~1.5 μm)和MnO₂粉末(1 μm),均购自国药集团中国化学试剂有限公司;纯度99.5%过渡金属硼化物VB₂(1 μm),购自秦皇岛一诺高新材料开发有限公司。MnO₂和VB₂的总质量分数为13%^[11], MnO₂和VB₂的阳离子掺杂摩尔比分别为3:0、2:1、1:1、1:2、0:3,相对应的涂层分别标记为MV30、MV21、MV11、MV12、MV03。将原料粉通过行星球磨机混合均匀,转速为250 r/min,球料比为7:1,混合均匀的粉末在马弗炉中1400 °C焙烧2 h,然后将烧结后的粉末再次放入行星球磨机中球磨12 h,转速为250 r/min,球:料:水=7:1:1.5(质量比),在磨好的浆料中加入实验室自制黏结剂,放入胶磨机中混合0.5 h,然后通过喷雾干燥塔制备成喷涂所需的粉末,选用粒径为45~63 μm的粉末进行等离子喷涂。

1.2 涂层的制备

使用配备机器人手臂的等离子喷涂系统(APS-3000K)在316不锈钢基板(30 mm×40 mm×1 mm)上进行涂层沉积,首先对基板进行超声波清洁、喷砂、预热等预处理,在预处理后的不锈钢基板上喷涂NiCoCrAlY黏结层来提高黏结强度,最后在黏结层表面喷涂红外辐射涂层。大气等离子喷涂参数如表1所示。

表1 大气等离子喷涂参数

Table 1 Atmospheric plasma spraying parameters

Coating	Arc voltage/V	Arc current/A	Spray distance/mm	Powder feed rate/(g·min ⁻¹)	Traverse speed rate/(mm·s ⁻¹)	Argon gas flow/(L·min ⁻¹)	Hydrogen gas flow/(L·min ⁻¹)	Nitrogen gas flow/(L·min ⁻¹)
Bonding	68-70	400	90	22-25	300	40	7-8	1
Ceramic	75-78	500	130	25-30	300	40	13-14	1

1.3 表征

采用X射线衍射仪(XRD-7000)分析粉末和涂层的物相组成,采用扫描电子显微镜(SEM-7800f)观察涂层的表面形貌和截面形貌,利用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR-850, ATR模式)分析涂层中的化学键振动,通过X射线光电子能谱仪(XPS-250Xi)分析涂层中的元素价态,使用紫外-可见-近红外光谱仪(UV-

VIS-NIR)和傅里叶红外光谱仪(FTIR-850)分别测量涂层在室温下0.75~2.5 μm和2.5~25 μm的红外光谱发射率,而涂层在600~1000 °C、2.5~25 μm的高温红外发射率采用TELOPS红外辐射仪测得。为评价涂层的高温使用性能,采用KSY-P高温炉进行热冲击实验,将MV11涂层从室温加热至750 °C,然后放入水中冷却至室温,共重复上述操作30个循环。

2 结果与分析

2.1 物相结构和微观形貌

图 1 为粉末和涂层的 XRD 谱图。由图 1(a) 可知, 所有煅烧后的粉末中都成功生成尖晶石相, 且纯 NiCr_2O_4 粉末和 MV30 粉末表现出单相衍射图谱特征。随着 VB_2 掺杂量的增加, $\text{Ni}_2\text{CrO}_2(\text{BO}_3)$ 和 Cr_2O_3 的衍射峰出现并逐渐增强。然而, 没有发现含 V 的化学物质, 说明 V 元素已进入尖晶石晶体中。图 1(b) 为 APS 沉积涂层的 XRD 谱图。与图 1(a) 相比, $\text{Ni}_2\text{CrO}_2(\text{BO}_3)$ 的衍

射峰消失, 表明在 APS 沉积过程中, 在高温等离子体火焰的加热作用下, B 元素进一步溶解到尖晶石晶体中。此外, Cr_2O_3 的衍射峰仍然保留在 MV11、MV12 和 MV03 涂层中, 且衍射峰强度逐渐增强。分析认为, 可能与 V 原子在八面体间隙位置部分置换取代 Cr 原子, 导致 Cr 原子以 Cr_2O_3 的形式析出有关。由图 1(b) 的放大图可以看出, 掺杂后涂层的衍射峰显示出左移倾向, 表明由于 Mn、V 和 B 的掺杂原子溶解到晶格中而发生了晶格膨胀畸变, 使得晶格常数变大。其中, MV11 涂层由于衍射角最小, 而具有最大的晶格畸变。

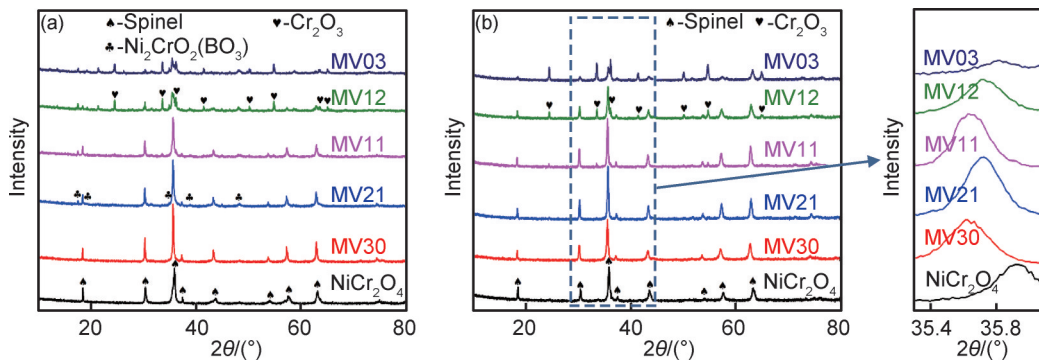


图 1 粉末(a)和涂层(b)XRD谱图

Fig.1 XRD patterns of powder(a) and coatings(b)

MV11 涂层表面和横截面的微观形貌, 如图 2 所示。由图 2(a) 可以看到, 涂层表面粗糙且存在微孔, 这是由 APS 沉积过程中熔滴的不充分熔化以及不完全重叠造成的。这些微孔可以认为是理想的黑体辐射源, 增加了投影深度和散射面积, 有利于提高涂层的红外辐射吸收和发射^[12-13]。MV11 涂层的横截面形

貌如图 2(b) 所示, 涂层自下而上包括黏结层和陶瓷层, 陶瓷层和黏结层的厚度分别为 $50 \sim 60 \mu\text{m}$ 和 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 。涂层内部同样存在少量微孔, 这是由等离子喷涂过程中材料熔化不充分造成的。适量的微孔存在可以有效地缓解高温下涂层的热应力, 提高抗热震性能, 从而增加涂层的使用寿命。

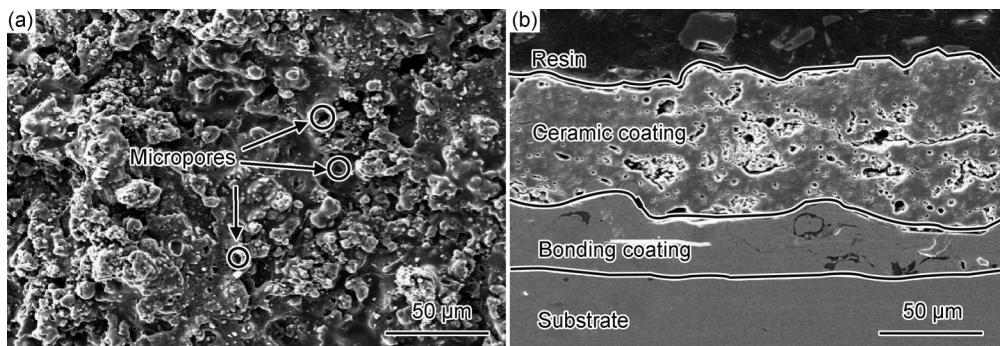


图 2 MV11 涂层表面(a)和横截面(b)微观形貌

Fig.2 Micro morphologies of surface(a) and cross-section(b) of MV11 coatings

2.2 FT-IR 分析

图 3 为涂层的红外吸收光谱。可知在 $4000 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 范围内, 所有样品在 3427 cm^{-1} 和 1637 cm^{-1} 处的吸收峰可归因于 O—H 键在 H_2O 中的伸缩振

动^[14]。在 $400 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 范围内, 掺杂 VB_2 的样品在 1222 cm^{-1} 和 855 cm^{-1} 附近的波段振动吸收峰是由 B—O—B 键拉伸振动造成的^[15], 614 cm^{-1} 和 501 cm^{-1} 分别对应尖晶石结构中的四面体和八面体的伸缩振

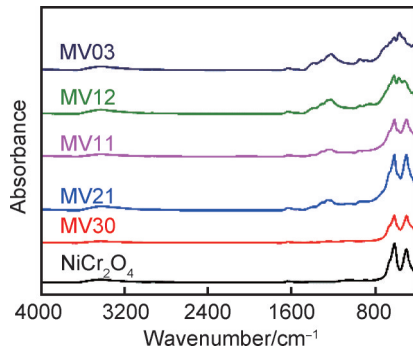


图3 样品FT-IR谱图

Fig.3 FT-IR spectra of samples

动,说明成功合成尖晶石结构^[16]。除此之外,MV12和MV03样品在 570 cm^{-1} 和 442 cm^{-1} 处有两个明显的振动吸收峰,分别对应于 Cr_2O_3 的Cr—O键伸缩振动,此与XRD结果相一致^[17]。

2.3 XPS分析

为研究涂层中各元素的化学状态,MV11涂层的XPS谱图如图4所示。可知Cr元素在 $2p_{3/2}$ 出现结合能

为 576.6 eV 的电子峰,与 Cr_2O_3 中 $\text{Cr}2p$ 的电子结合能(576.6 eV)相一致, $\text{Ni}2p$ 谱图中 855.7 eV 和 861.6 eV 处的峰分别属于 $\text{Ni}^{2+}2p_{3/2}$ 和卫星饱和峰,说明Ni元素主要以+2价存在,Cr元素主要以+3价存在,此与原料中元素价态相比未发生变化。在图4(c)中, 641.9 eV 和 652.9 eV 处观察到 $\text{Mn}2p_{3/2}$ 和 $\text{Mn}2p_{1/2}$ 自旋轨道耦合的两个主峰, $\text{Mn}2p_{3/2}$ 峰在 639.8 、 642.1 eV 和 646.0 eV 处分别对应 Mn^{2+} 、 Mn^{3+} 和 Mn^{4+} ^[18]。图4(d)中 516.6 eV 处峰值为 $\text{V}2p_{3/2}$ 峰,说明钒主要以+5价存在于涂层中^[11]。B1s的XPS谱图如图4(e)所示,在 191.4 eV 处的峰证明硼以 B^{3+} 存在于涂层当中。O1s的XPS谱图如图4(f)所示,由以 532.1 、 531.0 eV 和 529.9 eV 为中心的3个亚峰组成,结合能相对最高的 $\text{O}1_{\text{abs}}$ 峰为 532.1 eV 对应于涂层表面的吸附氧,剩余两个峰分别为氧空位 O_I (531.2 eV)和晶格氧 O_{II} (530.1 eV)^[19]。表2列出涂层中O1s光谱中3种氧的含量,可以看出掺杂后的涂层中氧空位含量的含量都有所增加,且呈现先增加后减少的趋势,其中MV11涂层的氧空位含量最高。

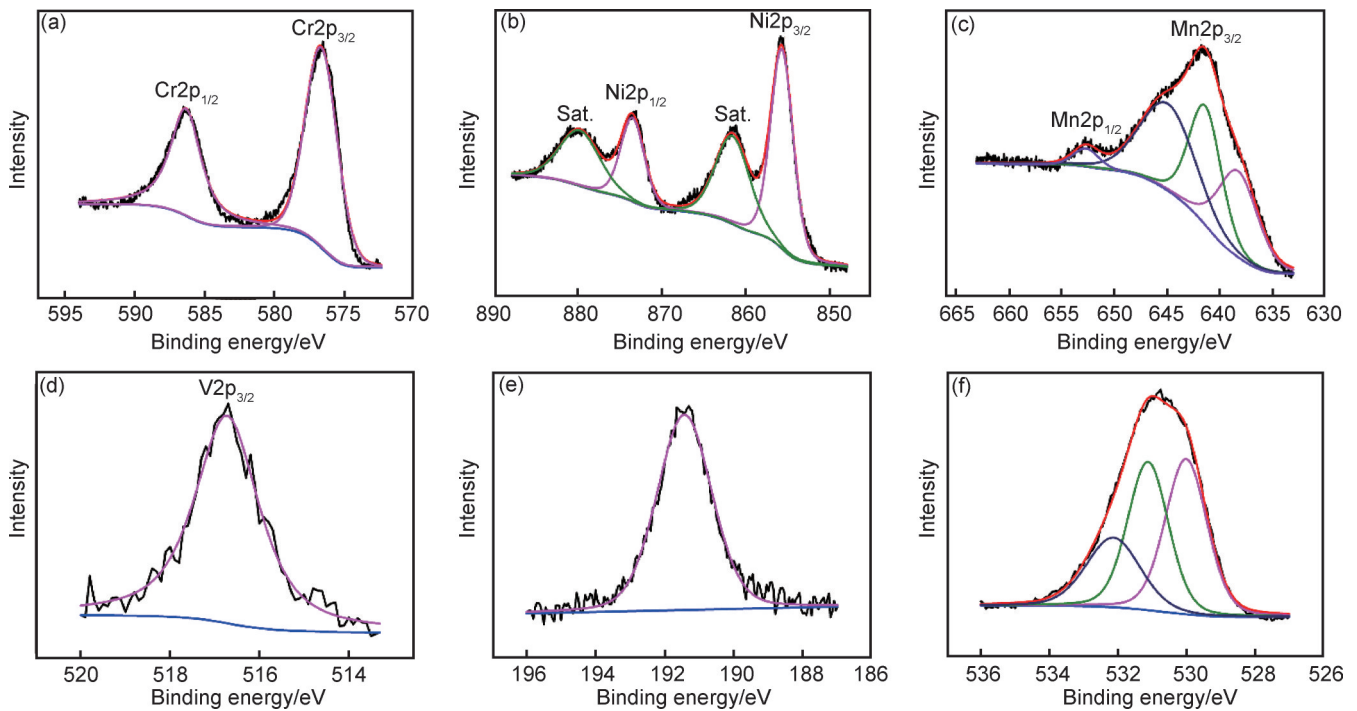


图4 MV11涂层XPS谱图 (a)Cr2p;(b)Ni2p;(c)Mn2p;(d)V2p;(e)B1s;(f)O1s

Fig.4 XPS spectra of MV11 coatings (a)Cr2p;(b)Ni2p;(c)Mn2p;(d)V2p;(e)B1s;(f)O1s

2.4 红外辐射性能

图5为样品在室温下 $0.75\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$ 的红外光谱发射率,计算后的红外发射率值见表3。可以看出,掺杂可以有效提高涂层近红外和中红外波段的发射率,相比 MnO_2 和 VB_2 单掺杂涂层, MnO_2 和

VB_2 共掺杂涂层在近红外和中红外波段有更高的红外发射率。Zeng等^[11]研究表明,涂层的红外发射率与涂层厚度、表面粗糙度、温度和化学成分有关。由于本工作采用相同喷涂制备工艺,涂层厚度和表面粗糙度对红外发射率的影响可以忽略,因此,化学成分是影

表 2 样品中各 O1s 态含量

Table 2 Content of each O1s state in samples

Sample	Mole fraction/%		
	O _{abs}	O _I	O _{II}
NiCr ₂ O ₄	19.27	37.02	43.71
MV30	21.07	38.31	40.62
MV21	21.00	39.36	39.64
MV11	20.85	40.04	39.11
MV12	20.92	38.79	40.29
MV03	20.11	38.29	41.60

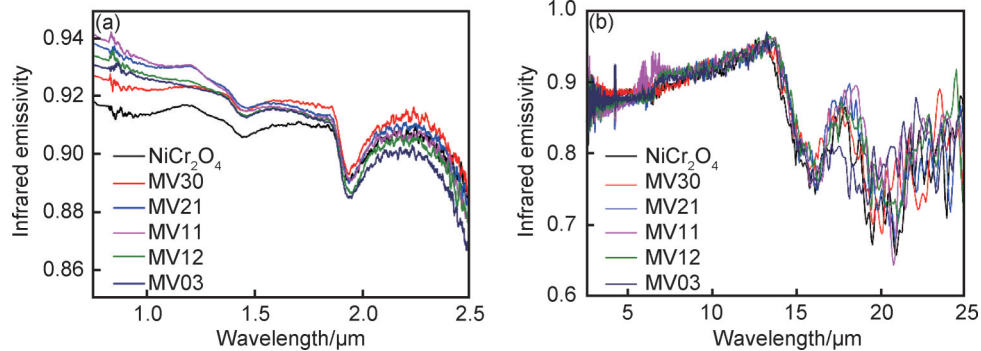


图 5 涂层在不同波长范围内的室温红外发射率

(a)0.75 ~ 2.5 μm; (b)2.5 ~ 25 μm

Fig.5 Room temperature infrared emissivity of coatings at different wavelength ranges

(a)0.75-2.5 μm; (b)2.5-25 μm

表 3 涂层的红外发射率

Table 3 Infrared emissivity of coatings

Wavelength range/μm	NiCr ₂ O ₄	MV30	MV21	MV11	MV12	MV03
0.75-2.5	0.915	0.923	0.926	0.928	0.925	0.923
2.5-25	0.865	0.874	0.878	0.884	0.880	0.874

图 6 为不同 Mn/V 掺杂浓度涂层的能级带隙。由图 6 可知,纯 NiCr₂O₄、MV30、MV21、MV11、MV12 和 MV03 涂层的禁带宽度分别为 1.811、1.799、1.716、1.623、1.769 eV 和 1.795 eV,掺杂后 MV 涂层的禁带宽度相比于纯 NiCr₂O₄ 涂层都有所降低,且随着 MnO₂ 和 VB₂ 摩尔比的降低,涂层的禁带宽度先减少后增加。一方面,根据晶体场理论和离子八面体择位能大小推断,具有低价态的 Ni²⁺、Mn²⁺ 和 B³⁺ 倾向于占据尖晶石的四面体位置,而具有高价态的 Cr³⁺、Mn³⁺、Mn⁴⁺ 和 V⁵⁺ 更倾向于占据八面体间隙。因为高价态的 V⁵⁺、Mn⁴⁺ 和 B³⁺ 掺杂后分别取代尖晶石结构八面体间隙上的 Cr³⁺ 和四面体间隙上的 Ni²⁺,从而形成氧空位引入杂质能级,使禁带宽度减小。另一方面,根据 XRD 结果可知,随着 MnO₂ 和 VB₂ 摩尔比的降低,涂层逐渐由单相结构转变为两相结构,即有 Cr₂O₃ 析出,而氧化铬

响涂层在相同温度下红外性能的关键因素。众所周知,0.75~2.5 μm 波段的发射率主要受杂质能级吸收和自由载流子吸收的共同作用。涂层禁带宽度(E_g) 可以用 Tauc 方程来计算^[20]:

$$\alpha E_p = k(E_p - E_g)^m \quad (1)$$

式中:α 为吸光度;E_p 为光子能量,E_p=hν,其中 h 为普朗克常量,ν 为光的频率,在直接跃迁中为 1/2,在间接跃迁中为 2;k 为常数;m 为特征指数。将 E_p 外推到 αE_p=0 时,切线与横坐标的交点是 E_g 相对应的吸收边能量。

的禁带宽度约为 3.5 eV,远大于纯尖晶石的禁带宽度,从而使涂层的综合禁带宽度增加。而未掺杂的涂层也存在氧空位,其主要和烧结过程中的晶格畸变和热波动引起有关^[21]。

一般而言,0.75~2.5 μm 波段的吸收与杂质能级吸收有关。氧空位含量增加有利于减小禁带宽度,促进载流子从杂质能级向导带或价带的跃迁,故 MV11 涂层在 0.75~2.5 μm 波段的发射率最高为 0.928。而中远红外波段的发射率主要取决于晶格振动吸收。杂质元素 V、Mn、B 的离子半径与基相元素 Cr、Ni 的离子半径不同,因此掺杂导致晶格畸变,MnO₂ 和 VB₂ 共掺杂可以增加晶格的混乱度,故 MV11 涂层的偏移角度最大,即 MnO₂ 和 VB₂ 掺杂比例为 1:1 时引起的晶格畸变程度最大,MV11 涂层在此波段具有最高的红外发射率 0.884。

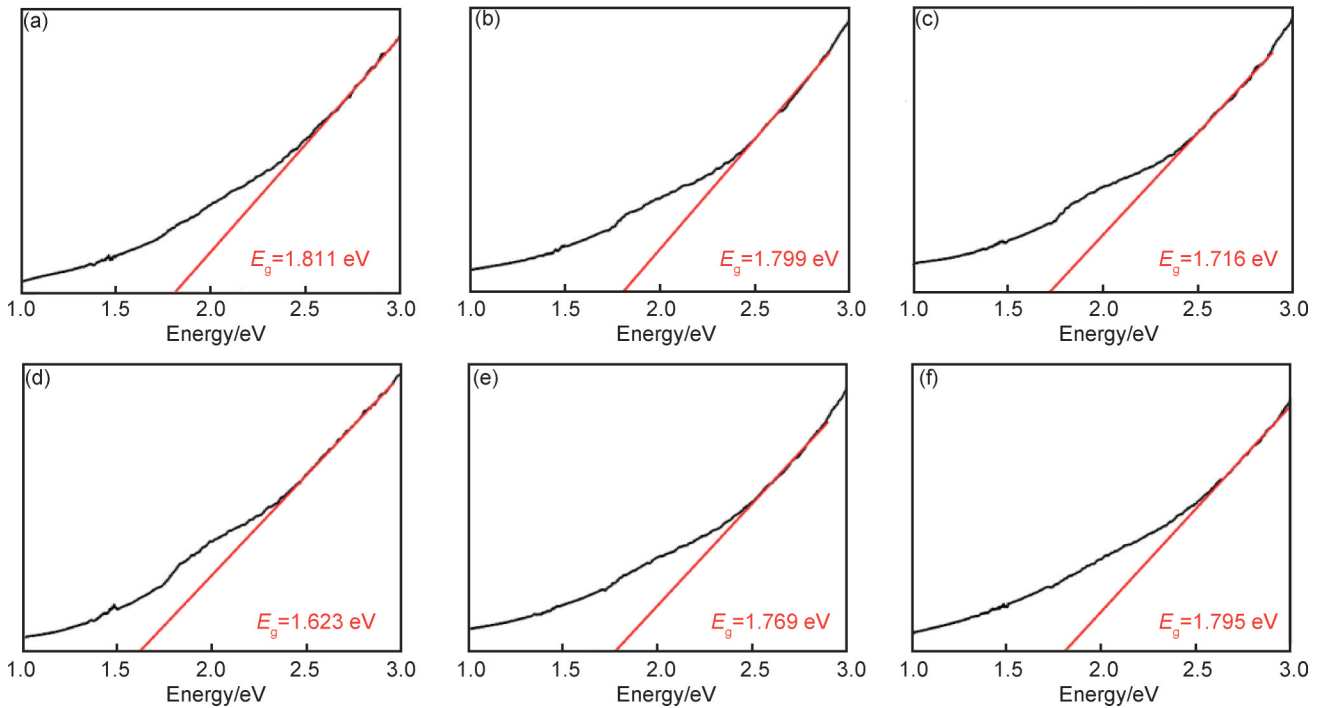


图6 涂层的带隙

(a)NiCr₂O₄; (b)MV30; (c)MV21; (d)MV11; (e)MV12; (f)MV03

Fig.6 Bandgap of coatings

(a)NiCr₂O₄; (b)MV30; (c)MV21; (d)MV11; (e)MV12; (f)MV03

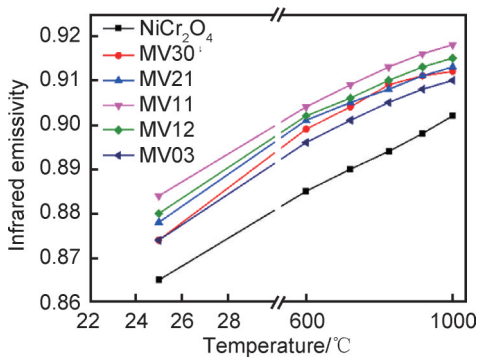


图7 涂层在不同温度下的红外发射率

Fig.7 Infrared emissivity of coatings at different temperatures

涂层在 2.5~25 μm 范围内不同温度下的红外发

射率如图7所示。可知,从室温到1000 °C时,所有涂层的红外发射率均随温度的升高而显著提升。这是因为温度越高,晶格振动越强,越有利于提高红外发射率。MV11涂层在不同温度下皆具有较高发射率,其在1000 °C的红外发射率提升至0.918。

2.5 热震实验结果

MV11涂层热震后的SEM图,如图8所示。从放大图可以看出,与热震前的MV11涂层相比(图2),涂层表面仅出现少量的微裂纹,未见剥离现象。MV11涂层热震后的XRD谱图,如图9所示。可以看出,30次水热循环后涂层的相组成没有明显的变化。图10为MV11涂层在不同温度下热震前后的红外发射率。

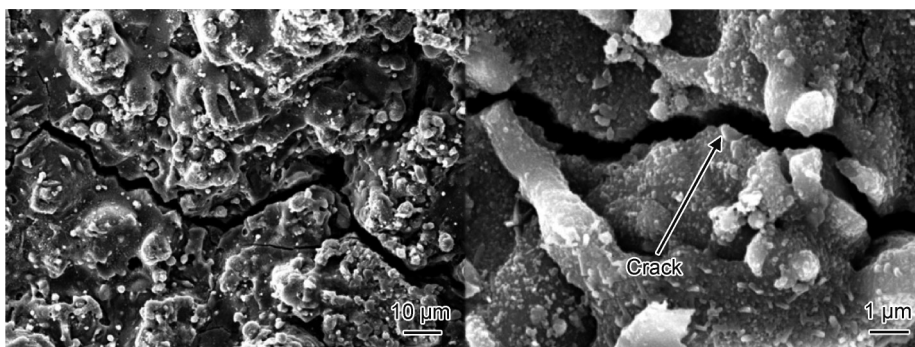


图8 MV11涂层热震后SEM图

Fig.8 SEM images of MV11 coatings after thermal shock

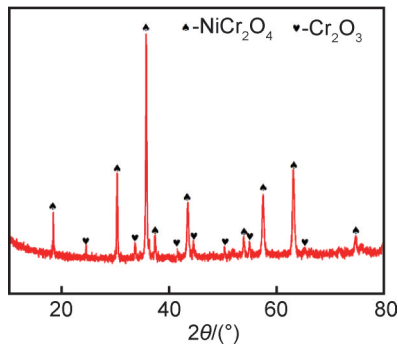


图9 MV11涂层热震后XRD谱图

Fig.9 XRD pattern of MV11 coatings after thermal shock

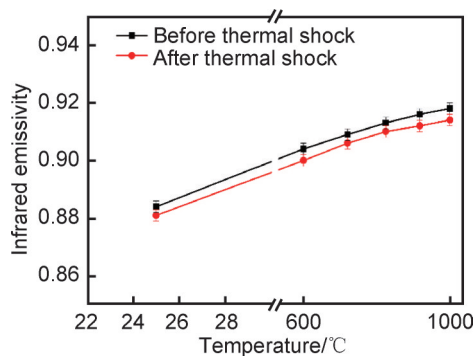


图10 MV11涂层在不同温度下热震前后红外发射率

Fig.10 Infrared emissivity of MV11 coatings before and after thermal shock at different temperatures

可知热震后涂层的红外发射率略有下降,表明MV11涂层具有良好的抗热震性能。

3 结论

(1)相比于 MnO_2 和 VB_2 单掺杂,在 $0.75\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$ 的全波段范围内,两者共掺杂 NiCr_2O_4 可以更有效地提高涂层的红外发射率。这主要是由于 MnO_2 和 VB_2 共掺杂可以使涂层晶格中氧空位含量升高,禁带宽度减小,从而增强自由载流子的跃迁吸收,提高近红外波段的发射率。

(2)中远红外波段的发射率提高,主要归因于杂质原子溶入晶格产生晶格畸变,促进晶格振动吸收。其中MV11涂层因具有最高的氧空位含量和最大的晶格畸变,从而具有最好的红外辐射性能。

(3)在30个水冷热循环后,MV11涂层没有出现明显的剥落,且相结构未发生变化,表面仅出现少量微裂纹,热震后涂层的红外发射率略有下降,表明MV11涂层具有良好的抗热震性能。

参考文献

[1] WANG G, CHEN Z, PAN Z, et al. Development and properties

of infrared high radiation energy-saving coatings for industrial furnace [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 252(2): 022058.

- [2] SHIRSHENVA E V, SHIRSHENVA P S. Zinc oxide aluminum doped slabs for heat-eliminating coatings of spacecrafts [J]. Acta Astronautica, 2019, 163: 107-111.
- [3] ZHOU Y C, WANG Y M, ZHANG H J, et al. Al_2O_3 /reduced graphene oxide double-layer radiative coating for efficient heat dissipation [J]. Materials & Design, 2018, 157: 130-140.
- [4] 吴洋. 红外辐射材料及其应用 [J]. 佛山陶瓷, 2018, 28(5): 1-4.
- WU Y. Infrared radiating materials and applications [J]. Foshan Ceramics, 2018, 28(5): 1-4.
- [5] WU B Z, CHEN H, SUN S, et al. Advances in oxide ceramic tritium resistant coatings [J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 132-140.
- [6] OUDDANE B, SABRI K, RAIS A, et al. Structural refinement and vibrational study of $\text{MgCr}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ spinel ferrites [J]. Physica B, 2016, 501: 38-44.
- [7] JAGADEESHA V, ANUPAMAA V, KUMAR R, et al. Evidence of structural damage in Sm and Gd co-doped Mn-Zn ferrite ceramics due to high-energy gamma irradiation [J]. Ceramics International, 2016, 42: 15933-15939.
- [8] YANG D G, HU T S, LUO A, et al. Research on the radiation mechanism of highly radioactive materials [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 25(1): 40-43.
- [9] LIU L, ZHANG S, MA Z, et al. Effects of Ca^{2+} - Sr^{2+} doping on the infrared emissivity of LaCrO_3 [J]. Ceramics International, 2020, 46: 19738-19742.
- [10] ZHANG H P, WANG Y M, HU Y L, et al. Preparation, microstructure, and thermophysical properties of Cr^{3+} -modified cordierite high emissivity ceramic for metal thermal protection [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 22(2): 72-75.
- [11] ZENG X, LIU Z Y, TONG X, et al. Preparation and infrared emissivity of metal borides (metal=V, Mo, Fe) and MnO_2 co-doped NiCr_2O_4 coatings [J]. Ceramics International, 2022, 48(4): 5581-5589.
- [12] YU H J, XU G Y, SHEN X M, et al. Effects of size, shape and floatage of Cu particles on the low infrared emissivity coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 66(3): 161-166.
- [13] NG H W, GAN Z A. A finite element analysis technique for predicting as-sprayed residual stresses generated by the plasma spray coating process [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41(3): 1235-1254.
- [14] PANTEA G, ALI A S, SHAMIM R. Cerium containing pH-responsive microcapsule for smart coating application: characterization and corrosion study [J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 427(13): 127-820.
- [15] SAUDI H, ZAKALY H, ZAKALY, et al. Fabrication, FTIR, physical characteristics and photon shielding efficacy of CeO_2 /sand reinforced borate glasses: experimental and simulation studies [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2008, 75(14): 38-43.
- [16] NANDHINI J, HARSHIL S, BHATTACHARYA S. Factors influencing phase formation and band gap studies of a novel multi-component high entropy $(\text{Co}, \text{Cu}, \text{Mg}, \text{Ni}, \text{Zn})_2\text{TiO}_4$ orthotitanate

- spinel[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2021, 888 (13): 161-390.
- [17] LI Y J, OUYANG T, WANG X H, et al. Effect of boron on enhancing infrared emissivity of Ni-Cr system coating[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 89 (8): 20-26.
- [18] LU Y T, CHIEN Y, LIU C, et al. Active site-engineered bifunctional electrocatalysts of ternary spinel oxides, $M_{0.1}Ni_{0.9}Co_2O_4$ (M : Mn, Fe, Cu, Zn) for the air electrode of rechargeable zinc-air batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5 (3): 21016-21026.
- [19] WANG X, DI Q G, WANG X L, et al. Effect of oxygen vacancies on photoluminescence and electrical properties of (200) oriented fluorine-doped SnO_2 films[J]. Materials Science and Engineering: B, 2019, 250 (7): 452-465.
- [20] MAO J W, DING S Y, LI Y J, et al. Preparation and investigation of $MoSi_2/SiC$ coating with high infrared emissivity at high temperature[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 326 (3): 564-578.
- [21] ZHANG J, BAI H, WEI W, et al. The effect of microstructure on the middle and short waveband emissivity of CuO-doped $Cu_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ spinel[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2019, 787(23): 638-648.
-
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52006159, 52473280)
收稿日期:2023-05-08; **录用日期:**2023-05-24
通讯作者:曾鲜(1987—),女,副教授,博士,研究方向为功能陶瓷,联系地址:湖北省武汉市洪山区武汉理工大学马房山校区(430070), E-mail: zengxian9925@163.com
- (本文责编:王 晶)