

# Mo/WC 中高温太阳能选择性吸收涂层的 优化设计及性能评价

闵捷<sup>1</sup>, 程旭东<sup>2</sup>, 王晓波<sup>2</sup>, 张朴<sup>2</sup>, 张运华<sup>1</sup>

(1.湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 武汉 430068;

2.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:**目的 在保证 WC 基热喷涂涂层在高温自然环境中性能稳定的情况下, 研究改进其选择性吸收性能。方法 通过 Mo 来提高 WC 基涂层的选择性吸收性能, 重点评价优化的 Mo/WC 涂层显微结构、选择性吸收性能和耐候性能等。结果 金属粒子 Mo 填充在 WC 陶瓷中的结构特征, 使涂层相结构和高温性能较为稳定, 吸收率高达 0.836~0.890, 但发射率也上升至 0.493~0.594, 选择性吸收性能不佳。经  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  减反层处理后, Mo/WC 涂层的吸收率仍可稳定在 0.77~0.78, 而发射率随着热处理温度的上升呈现先降低后升高的趋势。500 °C 热处理条件下, 吸收效果达到最佳, 此时发射率最小, 低至 0.168。Mo/WC 涂层抗热震及耐盐雾腐蚀性能也有效提高。结论 Mo/WC 涂层选择性吸收性能及自然环境适应性得到有效提高, 并兼具了生产成本和施工便利性等优势, 有利于太阳能清洁能源利用的发展。

**关键词:** Mo/WC 涂层; 选择性吸收; 吸收率; 发射率

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2017)10-0194-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.028

## Optimal Design and Performance Evaluation of Mo/WC Solar Selective Absorption Coating at Medium-High Temperature

MIN Jie<sup>1</sup>, CHENG Xu-dong<sup>2</sup>, WANG Xiao-bo<sup>2</sup>, ZHANG Pu<sup>2</sup>, ZHANG Yun-hua<sup>1</sup>

(1.Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Progressing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve selective absorption properties of WC-based thermal sprayed coating while guaranteeing its stable performance in high-temperature natural environment. The selective absorption properties of the WC-based thermal sprayed coating were improved with Mo. Optimized microstructure, selective absorption properties and weather resistance of Mo/WC coatings were evaluated emphatically. The structural feature of WC ceramic filled with Mo metal particles stabilized phase structure and high temperature performance of the coating, the absorptivity was up to 0.836~0.890, but emissivity rose to 0.493~0.594 and selective absorption properties were poor. After the treatment of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ , the absorptivity of the Mo/WC coating reached a stable level of 0.77~0.78, and emissivity first decreased and then increased as the heat treatment

收稿日期: 2017-05-20; 修订日期: 2017-08-25

Received: 2017-05-20; Revised: 2017-08-25

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目 (Q20161407)

Fund: Supported by the Scientific and Technological Research Projects for Education Department of Hubei Province (Q20161407)

作者简介: 闵捷 (1980—), 男, 博士, 主要研究方向为表面工程。

Biography: MIN Jie(1980—), Male, Doctor, Research focus: surface engineering.

temperature rose. The selective absorption properties were the best and emissivity was as low as 0.168 under the heat treatment condition of 500 °C. Thermal shock resistance and salt fog resistance of Mo/WC coatings were improved effectively as well. The selective absorption properties and adaptability to natural environment of the Mo/WC coating were effectively improved. The Mo/WC coating is beneficial to the development of clean energy solar energy utilization due to lower production cost and construction convenience.

**KEY WORDS:** Mo/WC coatings; selective absorption; absorptivity; emissivity

太阳能热发电是太阳能能源利用的重要方式之一,其市场前景非常广阔。太阳能选择性吸收涂层是太阳能热发电集热器的吸收表面,其工作效率至关重要。太阳能选择性吸收涂层具有吸收率 $\alpha$ (吸收太阳能占太阳辐射能的比例)高和发射率 $\varepsilon$ (涂层辐射能量与同等条件完全黑体辐射能的比值)低的特点,可以增大 0.3~2.5  $\mu\text{m}$  光谱区的能量吸收和降低 2.5~25  $\mu\text{m}$  光谱区的能量损失<sup>[1-2]</sup>。集热器长期工作在 500 °C 以上的高温环境和相当恶劣的自然环境中,而且需避免因添加防护装置而导致的能量吸收损失,这就要求选择性吸收涂层具有优异的综合性能,从而对其材料的设计、制备及性能评价提出了极大的挑战:首先需考虑涂层的选择性吸收性能和耐候性能,再需考虑规模化生产成本及工作现场的生产条件,最后还需考虑在自然环境运行后的涂层修复、再制造等方面因素。

前期利用 HVOF 工艺制备的 P2712 (Co/WC 基)涂层,在 500 °C 以上的自然环境中成分稳定、耐候性能较好,规模化生产成本低,对工作现场的生产条件要求少,涂层修复、再制造便利<sup>[3-5]</sup>,但选择性吸收性能不稳定<sup>[6]</sup>。本研究通过添加 Mo 来提高该涂层的选择性吸收性能。先制备多孔、多相特征结构的 Mo/WC 涂层,再在其表面涂覆 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> 减反层。重点评价优化的 Mo/WC 涂层显微结构、选择性吸收性能、耐候性能等,分析 Mo 对涂层综合性能的影响规律。

1 实验

以 Mo 和 WC 粉末为主要原料,采用喷雾造粒法制备出不同质量配比的 5 种团聚型粉末,见表 1。采

用超音速喷涂技术在不锈钢基片上制备约 30  $\mu\text{m}$  厚度的 Mo/WC 金属陶瓷层。先以四氯化锡和异丙醇铝为前驱体,制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> 复合溶胶,再在陶瓷层表面涂覆并热处理,制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SnO<sub>2</sub> 减反层。

2 测试

用岛津 UV3600 型 UV-Vis-NIR 分光光度计和 Tensor 27 型 BRUKER 红外光谱仪,分别测定涂层表面在 0.3~2.5  $\mu\text{m}$  和 2.5~25  $\mu\text{m}$  光谱区的积分球全反射率 $\rho_s(\lambda)$ ,利用式(1)和式(2)计算其在各自光谱区的吸收率和发射率<sup>[6]</sup>。

$$\alpha = \frac{\int_{0.3}^{2.5} [1 - \rho_s(\lambda)] \cdot E_s(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3}^{2.5} E_s(\lambda) d\lambda}$$

(1)

$$\varepsilon_{293\text{K}} = \frac{\int_{2.5}^{25} [1 - \rho(\lambda)] \cdot E_{b(293\text{K})}(\lambda) d\lambda}{\int_{2.5}^{25} E_{b(293\text{K})} d\lambda}$$

(2)

其中, $\rho_s(\lambda)$ 为单色光反射率, $E_s(\lambda)$ 为太阳辐射强度, $E_b$ 为黑体辐射强度。

采用 S4800 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 及能谱仪 (EDS) 进行微观形貌和成分含量分析,采用 Rigaku D/Max-RB 转靶 X 射线衍射 (XRD) 仪进行物相测试分析。将涂层试样块放入马弗炉中,升温至 550 °C,并保温 15 min,取出空冷至室温,重复此操作 100 次后,评价涂层的抗热震性能。采用艾默生 C 型盐雾试验箱对涂层试样进行盐雾试验,腐蚀液为 3.5%NaCl 溶液,试验时间 400 h,试验后评价涂层的耐腐蚀性能。

3 测试结果及分析

3.1 Mo/WC 涂层形貌

图 1、2 分别为 2、3 号粉末制备的 Mo/WC 涂层 SEM 图(2 号粉末及涂层表现出较优的选择性吸收性能,故对其做重点分析)。从低倍图中可以看出涂层的结构致密,表面略有起伏。局部放大后的高倍图显示涂层中存在着堆垛孔隙、丘状凸起及夹杂的未熔粉末。这是因为大部分球形颗粒在与基体撞击后发生了

表 1 5 种不同配比的团聚粉末

Tab.1 Agglomerated powders of different mass fractions

粉末编号	wt%	
	Mo	WC
1号	100	0
2号	80	20
3号	60	40
4号	40	60
5号	0	100

明显变形,各颗粒相互搭接在一起,未熔融变形的颗粒造成涂层表面凸凹不平,涂层整体呈层状堆叠结构。其中,2号粉末制得涂层的层状结构明显,颗粒铺展较好,且相互搭接,涂层致密度高。而3号粉末制得涂层的孔洞较多,表面有网状裂纹和较大凸起。原因是2号粉末制得涂层的Mo含量较高,Mo的热导率较高,达到 $138\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,而且Mo的塑性较好,其颗粒在喷涂过程中易熔融,能够在基体上展开形成表面致密的涂层。而3号粉末制得涂层的WC含量较高,WC硬度很高,难以在基体表面相互堆叠铺展,并且在快速冷却过程中,由于内应力过大及其自身脆性,会产生如图2b所示的网状裂纹和孔洞。

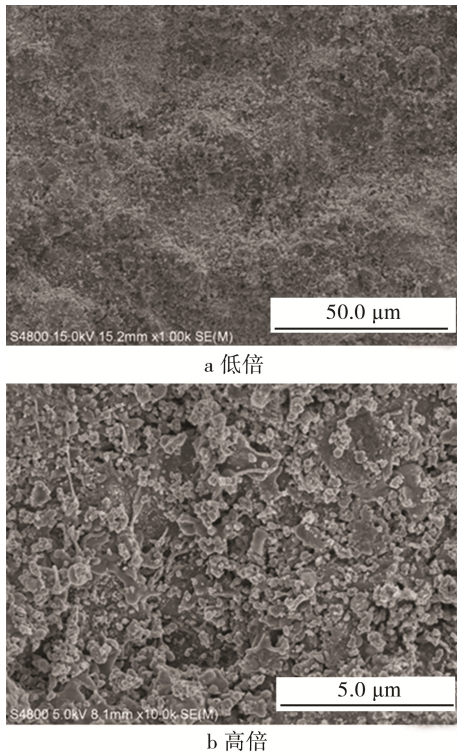


图1 2号粉末制备的涂层表面 SEM 图  
Fig.1 SEM images of coating surface made from 2<sup>#</sup> powder:  
a) low magnification, b) high magnification

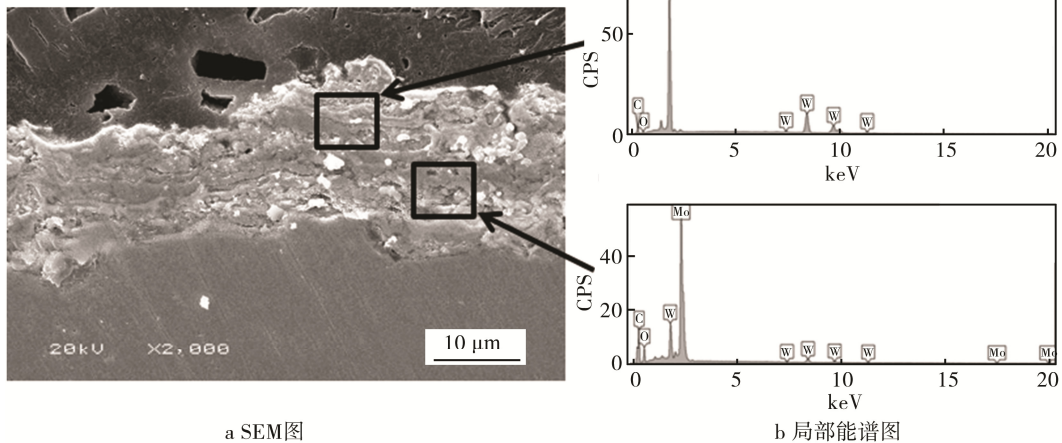


图3 2号涂层的断面 SEM 及局部能谱图  
Fig.3 SEM image (a) and partial EDS (b) of 2<sup>#</sup> coating cross-section

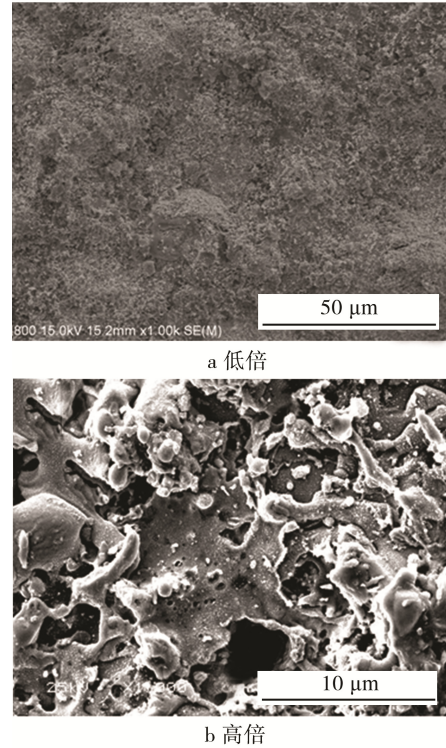


图2 3号粉末制备的涂层表面 SEM 图  
Fig.2 SEM images of coating surface made from 3<sup>#</sup> powder a)  
low magnification, b) high magnification

图3为2号粉末制得Mo/WC涂层的断面SEM图。从图中可以看出,涂层呈明显的层状结构,层与层之间结合非常致密,孔洞较少,但每一层内部的孔洞相对较多。这类内部的孔洞一方面可以起到减缓热应力的作用,提升涂层热震性能,但其也会加速腐蚀液的渗入,导致涂层的耐腐蚀性能降低。结合图3的局部能谱图,可知图谱所处位置为金属Mo颗粒,周围的组织为WC,各组分含量符合原始粉末的质量比。

采用超音速喷涂技术制备的涂层,其涂层存在的孔隙主要有深入到基体的通孔和在涂层内部或表面

的盲孔两种。前者会对涂层的抗腐蚀性能带来负面影响,长时间使用在中高温条件下,甚至会导致涂层失效;后者能够降低涂层组分在受热过程中因膨胀系数不同而形成的热应力,提升涂层的抗热震性能。原始组分粉末在超音速喷涂过程中,大部分粒子受热变形,极少部分喷涂粒子组分会被氧化成氧化物<sup>[7]</sup>。受热粒子的大小、形状有差异,导致其飞行速度、轨迹及所处温度不同。温度较低、速度较慢的颗粒不会变形,在凝固的过程中只是保持固有的形状,从而形成凸起部分,熔融效果不佳的颗粒产生气体,且来不及从涂层内部析出,在凝固后形成气孔;速度较快、熔融(半熔融)效果较好的颗粒则会在与基体的碰撞中,由球状变成扁平状而铺展开,这种类型的扁平状颗粒会随机分布在基体上,导致各组分颗粒之间存在孔隙。同时,在熔融颗粒凝固收缩的过程中,随着自身体积的减少,如果没有后续的熔融颗粒来补充,层与层内部也会形成孔隙。

### 3.2 Mo/WC 涂层的 XRD

对复合粉末及相应涂层样品进行物相分析,图 4 为 2 号粉末及其制得涂层的对比 XRD 图,图 5 为不同组分涂层的 XRD 图。从图 4 中可以看出,2 号粉末与其相应涂层的成分基本一致,但是粉末的衍射峰强度大于涂层的衍射峰强度。这是由于原始粉末在受热过程中,其熔融颗粒在基体上的冷却速度过快,导致晶粒来不及长大,从而表现为相对较弱的衍射峰。图 5 显示 WC 的衍射峰强度随 WC 含量的减少而降低。除此之外,图 4 和图 5 还表现出了较宽的衍射峰特征。分析认为一方面是由于超音速喷涂过程中冷却速度过快导致晶粒来不及长大,另一方面是受热产生的残余应力可能会导致晶格内部出现部分缺陷。基于以上条件,一个晶粒可以由多个亚晶粒组成,在外力作用下,各个亚晶粒的生长方向又不尽不同,从而导致了主要成分的衍射峰宽化。

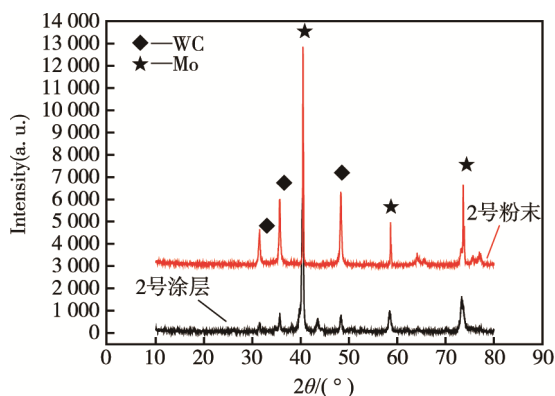


图 4 2 号粉末及涂层的对比 XRD 图

Fig.4 Comparison XRD image of 2<sup>#</sup> powder and coating

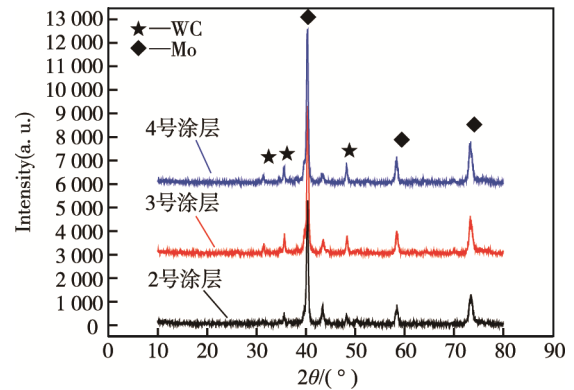


图 5 不同质量配比涂层的 XRD 图

Fig.5 XRD image of coatings of different mass fractions

Mo 和 WC 在高温条件下容易被氧化,本研究选用超音速喷涂技术,可以保证 Mo 和 WC 组分各自的特性,使 Mo/WC 涂层体现出选择性吸收性能<sup>[8]</sup>。在常规大气环境下,利用超音速喷涂技术制备 Mo/WC 涂层时,因为熔融粒子的飞行速度很大,其在空气中暴露的时间非常短<sup>[9]</sup>,导致涂层中的氧化物含量很少,大部分小金属颗粒 Mo 被分散到 WC 陶瓷中,形成了金属陶瓷复合涂层。通过对应的局部元素能谱(图 3)分析可知,金属粒子 Mo 作为填充粒子,悬浮在 WC 陶瓷中。这种类型的涂层微观结构、相结构和性能较为稳定,其一方面有利于涂层在高温下的耐候性能,另一方面有利于不同波长的入射光在层内形成不同效果的干涉、折射和反射,从而优化选择性吸收性能<sup>[10]</sup>。

### 3.3 Mo/WC 涂层选择性吸收性能

图 6 为不同质量配比粉末制备的 Mo/WC 涂层在 0.3 ~ 2.5 μm 光谱区的反射图谱。由图可见,单色光波长 < 1.0 μm 时,反射率近似在 0.10 左右;随着单色光波长的增大,单色光发射率逐渐增大。经积分计算,5 种 Mo/WC 涂层的吸收率集中在 0.836 ~ 0.890 之间,并且随着金属 Mo 配比的增大而降低。另外,整个可见近红外光谱区的反射曲线基本为线性,说明并未出现光波干涉效应。涂层吸收的趋势与之前通过理论计算得到的 Mo 与 WC 的消光系数较为一致<sup>[11]</sup>。

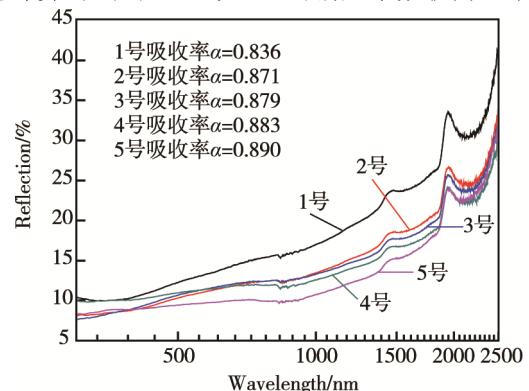


图 6 不同质量配比粉末制备的涂层的吸收率

Fig.6 Absorptivity of different coatings



图7为不同质量配比粉末制得的Mo/WC在2.5~25  $\mu\text{m}$  光谱区的反射图谱。从图中可以看出,各单色光的发射率都比较大,且随着单色光波长的增大而增大。经积分计算,5种Mo/WC涂层的发射率集中在0.493~0.594之间,并且随着Mo含量的增大而降低。5种涂层的发射率都明显偏高,主要是因为Mo/WC涂层都未经减反层处理<sup>[12]</sup>。而纯WC涂层的发射率最高,一方面是由于WC陶瓷颗粒的红外辐射性能强于金属Mo粒子红外辐射性能,另一方面是由于金属Mo含量增大可以使涂层获得相对较为平整的表面结构,适当降低孔隙率及粗糙度,从而使涂层的发射率也相应降低。

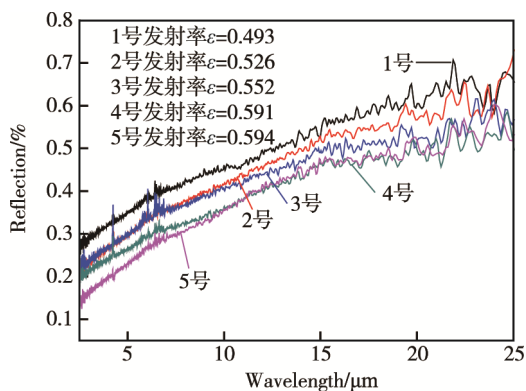


图7 不同质量配比粉末制备的涂层的发射率  
Fig.7 Emissivity of different coatings

### 3.4 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 减反层处理

利用超音速喷涂技术制备的Mo/WC涂层吸收率较高,但同时发射率也较大,涂层的总体选择性吸收性能不佳<sup>[13]</sup>。考虑到Mo/WC吸收层的结构特点,后续需在Mo/WC涂层表面制备出在可见-近红外光谱区具有高透过、对红外光谱区辐射具有高反射的选择性透过膜,亦称为减反层。 $\text{SnO}_2$ 具有特殊的禁带宽度( $E_g=3.6\sim 4.0\text{ eV}$ <sup>[14]</sup>),是很好的选择性透过材料,而 $\text{SnO}_2$ 膜层在0.3~2.5  $\mu\text{m}$ 波段范围内透明,在中远-红外波段范围内反射太阳能光谱,具有优异的光学性能<sup>[14]</sup>。但在实际应用过程中, $\text{SnO}_2$ 溶胶对Mo/WC涂层有一定的腐蚀作用。

本研究选择在 $\text{SnO}_2$ 中添加耐腐蚀的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,以 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 作为减反层。一方面是因为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的折射率为1.76,与 $\text{SnO}_2$ 的折射率非常接近,两种不同成分的透过膜之间不会造成太大的能量损耗;另一方面是 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜既可以防止提拉过程中 $\text{SnO}_2$ 溶胶对涂层的腐蚀,也可以起到对涂层的封孔作用,提升Mo/WC涂层的耐腐蚀性能。

使用常规工艺制备 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 选择性透过膜,再对其进行不同温度下的热处理。图8、9为2号粉末制得涂层经 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 减反层处理后的吸收率和

发射率图谱,表2为所得复合涂层的吸收率和发射率计算结果。从中可知,不同热处理温度下,涂层的吸收率大致相同。涂层主要通过光干涉效应来提高吸收率,当Mo/WC厚度大致相同时,其吸收率也近似相等。此外,光干涉效应导致涂层在0.3~2.5  $\mu\text{m}$ 光谱区的吸收率较高,而 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 本征吸收都非常小<sup>[14]</sup>,几乎可以忽略,说明热处理温度对吸收率无太大影响。

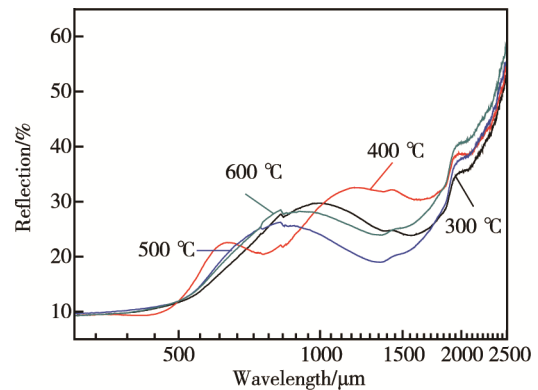


图8 2号涂层减反层处理后的吸收率  
Fig.8 Absorptivity of 2# coatings of different mass fractions

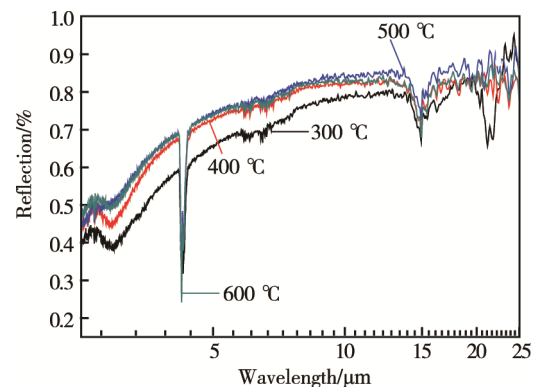


图9 2号涂层减反层处理后的发射率  
Fig.9 Coatings of different mass fractions

由表2可见,经减反层处理的2号粉末制得涂层的反射率在500  $^{\circ}\text{C}$ 热处理条件下最低,且随着热处理温度的上升先降低再升高。这是因为经过热处理后, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$ 从非晶态转化为晶态,且晶粒尺寸随着热处理温度的升高而增大。其中,经300  $^{\circ}\text{C}$ 热处理后的薄膜中存在着非晶成分,具有较高的红外辐射性能,

表2 不同热处理温度的涂层吸收率和发射率  
Tab.2 Absorptivity and emissivity at different thermal treatment temperature for 2# coatings

温度/ $^{\circ}\text{C}$	吸收率	发射率
300	0.786	0.298
400	0.778	0.191
500	0.776	0.168
600	0.787	0.188

此时发射率最高。随着热处理温度的升高,薄膜结晶程度提高,热处理温度上升到 500 °C 时,薄膜基本是由柱状晶粒组成,颗粒尺寸较为合适,薄膜较为致密,基本无缺陷,此时具有较低的红外辐射性能,发射率最低。热处理温度上升到 600 °C 时,晶粒继续长大,从而破坏了薄膜表面的柱状晶结构,使薄膜表面不对称性增大,不利于薄膜的光学性能。

经减反层处理的 2 号粉末制得涂层经 500 °C 热处理后的表面形貌和断面形貌如图 10、11 所示。图 10 显示,低倍条件下,可以观察到涂层表面整体完整光滑,未出现裂纹;高倍条件下,可以观察到涂层的颗粒为柱状结构,形成了典型的光学陷阱。特定波长的入射光在这些柱状晶粒之间进行多次反射,能够增加对太阳辐射能的吸收。在图 11 中可以观察到不锈钢基片与薄膜之间的界面,其减反层的厚度为 250 nm 左右,此时的吸收效果最佳。

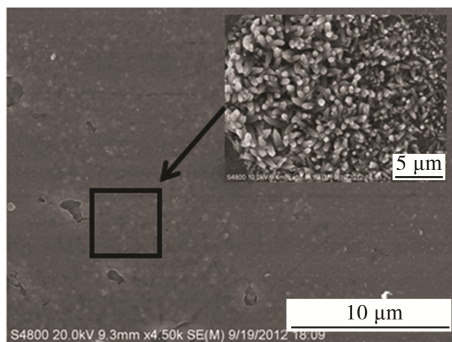


图 10 2 号涂层减反层处理后的表面 SEM 图

Fig.10 SEM image of surface after 2<sup>#</sup> coating antireflection layer treatment

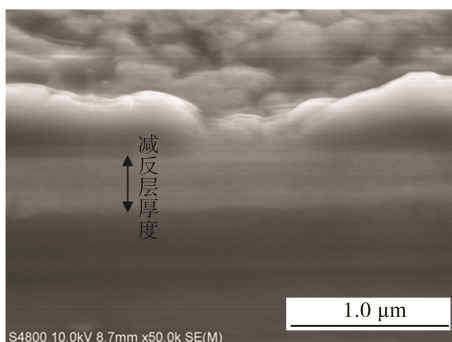


图 11 2 号涂层减反层处理后的断面 SEM 图

Fig.11 SEM image of cross-section after 2<sup>#</sup> coating antireflection layer treatment

### 3.5 Mo/WC 复合涂层的耐候性能

100 次热震实验结果显示 2 号粉末制得的 Mo/WC 复合涂层结构完整,表面无明显变化,涂层的性能几乎无衰减。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  减反层对涂层的高温稳定性能有积极作用<sup>[15]</sup>。未经  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  减反层处理的 Mo/WC 涂层,金属 Mo 在 300 °C 以上条件下容

易发生氧化;经  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  减反层处理后的 Mo/WC 涂层,涂层表面被  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  复合薄膜保护,在使用过程中隔断了大气中氧与涂层的直接接触,也阻止了 Mo 的氧化反应。

400 h 的盐雾腐蚀实验结果显示,2 号粉末制得的 Mo/WC 涂层表面形貌无明显变化。超音速喷涂技术制备的涂层本身存在着孔隙,其中大部分是盲孔,腐蚀液只能从少量的通孔渗入到基体,具有较好的耐盐雾腐蚀性能。涂层经  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  减反层处理之后,一方面减少了其中的通孔量,可提升 Mo/WC 涂层的耐腐蚀性能<sup>[16]</sup>;另一方面,添加的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  对涂层中的孔隙起到了封孔和保护作用,腐蚀液难以通过  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组织进入基体,且  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的耐腐蚀性能优良,进一步提高了复合涂层的耐腐蚀性能。

## 4 结论

金属粒子 Mo 填充在 WC 陶瓷中的结构特征,使其涂层相结构和高温性能较为稳定,吸收率高达 0.836 ~ 0.890,但发射率也上升至 0.493 ~ 0.594,选择性吸收性能不佳。经  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$  减反层处理后,Mo/WC 涂层的吸收率仍可稳定在 0.77 ~ 0.78,而发射率随着热处理温度的上升呈现先降低后升高的趋势。500 °C 热处理条件下,达到最佳的吸收效果,此时发射率最小,低至 0.168。Mo/WC 涂层抗热震及耐盐雾腐蚀性能也有效提高,并兼具了生产成本和施工便利性等优势,有利于太阳能清洁能源利用的发展。

### 参考文献:

- [1] 熊德华,陈炜,李宏,等. 太阳能光热转化选择性吸收涂层研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(9): 50-56.  
XIONG De-hua, CHEN Wei, LI Hong, et al. Recent Progress in Solar-thermal Selective Absorber Coatings [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(9): 50-56.
- [2] GONG Dian-qing, LIU Hui-dong, LUO Gan, et al. Thermal Aging Test of AlCrNO-based Solar Selective Absorbing Coatings Prepared by Cathodic Arc Plating [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015(136): 167-171.
- [3] 程旭东,李光磊,闵捷,等. 等离子喷涂与溶胶-凝胶法复合制备中高温太阳能选择性吸收涂层[J]. 材料保护, 2011, 44(7): 8-10.  
CHENG Xu-dong, LI Guang-lei, MIN Jie, et al. Preparation of Medium-high Temperature Solar Selective Absorbing Composite Coatings by Plasma Spraying and Sol-Gel Process[J]. Materials Protection, 2011, 44 (7): 8-10.
- [4] 陈伟,丁彰雄,高荣义,等. HVOF 制备 WC-12Co 太阳能选择性吸收涂层性能的研究[J]. 热喷涂技术, 2011(2): 40-46.

- CHEN Wei, DING Zhang-xiong, GAO Rong-yi, et al. Performance Study of WC-12Co Solar Selective Absorbing Coatings Deposited by HVOF[J]. Thermal Spray Technology, 2011(2): 40-46.
- [5] GONG Dian-qing, CHENG Xu-dong, WANG Ke. The Impact of Annealing Temperature on the Optical Performance of Cr-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Produced by Plasma Spraying as Solar Energy Selective Absorber Coating[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S1): 315-318.
- [6] WANG Xiao-bo, OUYANG Tao-yuan, DUAN Xiao-hua, et al. Improved Solar Absorptance of WC/Co Solar Selective Absorbing Coating with Multimodal WC Particles[J]. Metals, 2017, 137(7): 1-10.
- [7] 罗干. HVOF 与 APS 制备 Ni-Mo 基非真空中高温太阳能选择性吸收涂层[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- LUO Gan. Study on Ni-Mo Based Non-vacuum Mid-High Temperature Solar Selective Absorbing Coatings Prepared by HVOF and APS[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [8] 丁坤英, 韩永梅, 李娜. 超音速火焰喷涂参数对 WC-Co 涂层性能的影响[J]. 焊接技术, 2007, 36(6): 52-54.
- DING Kun-ying, HAN Yong-mei, LI Na. Effect of HVOF Spraying Parameters on Properties of WC-Co Coating[J]. Welding Technology, 2007, 36(6): 52-54.
- [9] 王志健, 田欣利, 胡仲翔. 超音速火焰喷涂理论与技术的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(3): 63-66.
- WANG Zhi-jian, TIAN Xin-li, HU Zhong-xiang. Developments of Theory and Technology of Hypersonic Oxy-fuel Spraying[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2002, 25(3): 63-66.
- [10] 闫军锋, 张志勇, 邓周虎, 等. SnO<sub>2</sub>:(Sb,In)透明导电薄膜的制备及其性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007(35): 81-84.
- YAN Jun-feng, ZHANG Zhi-yong, DENG Zhou-hu, et al. Preparation and Characterization of SnO<sub>2</sub>:(Sb,In) Transparent and Conducting Thin Film[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2007(35): 81-84.
- [11] 黄伟胜. 溶胶-凝胶法制备 SnO<sub>2</sub>:Sb 光学薄膜[J]. 中国陶瓷工业, 2011, 18(4): 39-42.
- HUANG Wei-sheng. The Preparation of SnO<sub>2</sub>:Sb Optical Thin Film by Sol-Gel Processing[J]. China Ceramic Industry, 2011, 18(4): 39-42.
- [12] 王辉, 程旭东, 万倩. Ni-Mo 太阳光谱选择性吸收涂层的制备与性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 47-50.
- WANG Hui, CHENG Xu-dong, WAN Qian. Study on Preparation and Performance of Ni-Mo Solar Selective Absorption Coatings[J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 47-50.
- [13] 万倩, 程旭东, 王辉, 等. NiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 太阳能选择性吸收薄膜的制备与性能研究[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 21-25.
- WAN Qian, CHENG Xu-dong, WANG Hui, et al. Study on Preparation and Properties of NiO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Solar Selective Absorption Films[J]. Surface Technology, 2011, 40(2): 21-25.
- [14] 李光磊. 等离子喷涂法与 Sol-Gel 法复合制备中高温太阳能选择性吸收涂层的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- LI Guang-lei. Study of Mid-high Temperature Solar Selective Absorbing Coatings Preparation by Plasma Spraying and Sol-Gel[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [15] TOOR F, GUNERATNE A C, TEMCHENKO M. Metal-dielectric Frequency-selective Surface for High Performance Solar Window Coatings[J]. Photonic & Phononic Properties of Engineered Nanostructures VI, 2016, 9756: 97561S.
- [16] ZHU Zhen-qi, CHENG Xu-dong, LI Guang-lei. Synthesis of Cr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Cermet Selective Surfaces Coated by SnO<sub>2</sub> Thin Film by Air Plasma Spraying[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(S1): 272-275.