

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180719001

# 熔融模拟灰在 *h*-BN 基陶瓷涂层表面的粘附特性

李 锦, 王进卿, 池作和, 张光学, 詹明秀, 王 杰

(中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 针对锅炉燃烧劣质煤过程中存在的结渣问题, 采用料浆法在 20G 钢材表面制备了 *h*-BN 基陶瓷涂层, 对熔融模拟灰在钢片及涂层表面的接触角、铺展系数、粘附功等参数进行研究, 进而分析熔融模拟灰在两种试样表面的粘附特性。结果表明: 涂层表面较为致密, 且与基材嵌合紧密, 涂层附着力等级为 0 级, 耐冲蚀性能较好, 不易脱落。熔融模拟灰在涂层表面的接触角较大、粘附功较小。熔融模拟灰在涂层表面铺展系数较小, 而且随着温度升高, 熔融灰在涂层和钢片表面铺展系数的差值逐渐增大, 在倾斜放置的试样表面, 涂层和钢片铺展系数差值随着角度的增加而增大。通过对试样片截面的 SEM/EDS 分析可知, 涂层对熔渣具有化学不亲和性, 能有效阻止 Pb 的扩散, 表明在钢片表面喷涂涂层能减弱熔融灰的润湿性和结合强度, 提高其防结渣性能。

**关键词:** 燃煤锅炉; 结渣; *h*-BN 基陶瓷涂层; 料浆法; 粘附特性

中图分类号: TG174.46

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)06-0081-09

## Adhesion Properties of Molten Simulated Ash on Surface of *h*-BN-based Ceramic Coating

LI Jin, WANG Jinqing, CHI Zuohe, ZHANG Guangxue, ZHAN Mingxiu, WANG Jie

(College of Metrological Technology and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To solve the slagging problems existing in the boiler burning inferior coal, the *h*-BN-based ceramic coating was prepared on the surface of 20G steel by a slurry method. The experiments on the contact angle, the spreading coefficient and the adhesion work of the molten simulated ash on the steel sheet and the coating surface were carried out, and the adhesion properties of the molten simulated ash on the surface of two types of samples were analyzed. The results show that the surface of the coating is compact, tightly embedded with the substrate. The coating adhesion class is 0, and the anti-erosion performance is better, without easily falling off. The contact angle of the simulated ash on the surface of the *h*-BN-based ceramic coating is larger, and the adhesion work is smaller. Melted simulated ash has a smaller spreading coefficient on the surface of the coating. Moreover, with the increase of temperature, the difference between the spreading coefficient of molten ash on the surface of the coating and steel sheet increases. On the surface of the inclined specimen, the difference between the spread coefficient of the coating and the steel sheet increases with the angle increasing. Through the SEM/EDS analysis of the cross section of the molten ash specimen, the coating has the chemical incompatibility of slag, which can effectively prevent the diffusion of Pb. It is indicated that spraying *h*-BN-based ceramic coating on the surface of 20G steel can reduce the wettability and bonding strength of the molten ash, and improve its anti-slagging performance.

**Keywords:** coal fired boiler; slagging; *h*-BN-based ceramic coating; slurry method; adhesion property

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-11-21

网络出版日期: 2018-11-30 11:01; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20181130.1101.006.html>

通信作者: 王进卿 (1985—), 男 (汉), 实验师, 博士; 研究方向: 锅炉受热面防护材料; E-mail: jqwang@cjlu.edu.cn

基金项目: 浙江省公益技术应用研究项目 (2017C31043); 浙江省大学生科技创新活动计划 (新苗人才计划)

**Fund:** Supported by Public Projects of Zhejiang Province (2017C31043) and Zhejiang University Student Science and Technology Innovation Activity Plan (New Talent Program)

引用格式: 李锦, 王进卿, 池作和, 等. 熔融模拟灰在 *h*-BN 基陶瓷涂层表面的粘附特性[J]. 中国表面工程, 2018, 31(6): 81-89.

LI J, WANG J Q, CHI Z H, et al. Adhesion properties of molten simulated ash on surface of *h*-BN-based ceramic coating[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(6): 81-89.

## 0 引言

我国煤炭储量丰富,但品位高低不等,电厂多燃用低品位的劣质煤,其中约有半数属于易结渣类型<sup>[1-2]</sup>。锅炉受热面结渣不仅会引起锅炉热效率降低、NO<sub>x</sub>排放量增加等问题,结渣严重时甚至会发生过热器爆管、大块灰渣掉落砸坏水冷壁管、炉膛灭火等恶性事故,极大地影响了锅炉的安全、经济运行。目前,减缓锅炉结渣主要采用合理设计燃烧系统和吹灰装置<sup>[3]</sup>、使用添加剂<sup>[4]</sup>、掺烧弱结渣煤种<sup>[5]</sup>等方式,但以上措施并未很好地解决锅炉结渣问题。

近年来,随着涂层技术的发展,研究者将涂层应用于锅炉受热面的防护,但研究多集中在受热面防磨损及腐蚀<sup>[6-10]</sup>,在减缓结渣方面的研究较少,仅有个别文献进行了初步探讨。

张孝忠等<sup>[11-12]</sup>观察分析煤灰在奥氏体钢和涂镍钢表面的熔融形态及接触角变化,分析煤灰的熔融特性和在材料表面的粘附特性。结果表明:在同一温度下,煤灰在涂镍钢表面的接触角比在奥氏体钢表面大,在1150~1190℃内,准东煤灰在涂镍钢表面的粘附功增长缓慢,说明涂镍钢减弱了该温度区间的结渣性。Hiroshi Naganuma等<sup>[13]</sup>在受热面表面热喷涂Ni基陶瓷涂层,通过对熔融灰接触角的测量,分析陶瓷涂层表面与渣层的粘附特性。钢材表面喷涂Ni基涂层后,灰渣与管壁的粘附力降低,而且粘附功低于钢材表面粘附功。熔渣在涂Ni钢材表面的润湿性较差,且微观形貌分析表明,Ni基涂层能阻止受热面钢材中的Fe元素扩散至渣层,从而降低钢材表面与灰渣的粘附力<sup>[14-15]</sup>,说明Ni基涂层能够有效防止结渣。

可见,现有防结渣涂层研究多集中在热喷涂,但是该技术具有明显的缺点:喷涂作业环境差、粉尘污染严重、喷涂材料利用率低、热效率低等,且涂层的防结渣性能并未进行实炉验证。笔者前期将六方氮化硼(*h*-BN)超细粉体作为陶瓷骨料,钾水玻璃作为粘结剂,按一定比例混合制成料浆,通过喷涂等方式涂覆在金属表面,然后经过一定温度加热使其在金属表面烧结制备*h*-BN基陶瓷涂层。该技术具有工艺简单、操作方便、不会对基体产生热影响等优点。笔者及其合作者<sup>[16-17]</sup>对该涂层的防结渣情况进行了实炉验证,结果显示喷涂涂层后锅炉的结渣情况明显改善。虽然取

得了一定的工程应用效果,但是灰渣在涂层表面的粘附特性尚不明确,这一定程度上影响该涂层的后续推广应用。

文中采用料浆法在20G钢表面制备*h*-BN基陶瓷涂层,通过实验观察分析熔融模拟灰在涂层和氧化钢片表面的接触角、铺展系数、粘附功等参数,对模拟灰在试样表面的粘附特性进行研究,并对试样片-模拟灰截面进行微观形貌分析,探讨*h*-BN基陶瓷涂层的防结渣机理。

## 1 试验

### 1.1 涂层试样制备

文中选用的钢材为电站锅炉水冷壁常用的20G钢,并将20G钢加工成尺寸约20 mm×20 mm×2 mm的薄片。采用210~420 μm(40~70目)石英砂对试样钢片进行喷砂处理,使其除锈等级达到Sa2.5-3(参照“GB8923-88涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级<sup>[18]</sup>”),以去除表面油渍并增加涂料在其表面的附着力。

*h*-BN基陶瓷涂层采用料浆法制备,将陶瓷骨料及粘结剂钾水玻璃按照一定的配比混合,并添加一定量的助剂,使用搅拌器进行搅拌。搅拌30 min后,使用行星式球磨机研磨24 h,得到悬浮浆料,经过滤后,制得复合陶瓷涂层浆料。其化学组成见表1。

表1 涂层浆料化学组成

Table 1 Chemical composition of coating slurry (w/%)					
Raw material	<i>h</i> -BN	Graphite	Potassiumsilic	Water	Additives
Content	12	1	18	65	5

采用喷涂法将涂层浆料涂覆于经喷砂处理后的试样片表面,经室温干燥后放入恒温箱中,在85℃下干燥2 h。随后将干燥后的试样放入马弗炉中进行高温固化,以3℃/min的升温速率加热至450℃后保温6 h,随炉冷却至室温后取出。

### 1.2 钢片试样制备

由于实际过程中受热面表面与熔融灰产生粘附作用的是钢材经过高温氧化形成的氧化膜层,因此在制备钢片试样时,将其放入马弗炉中进行高温氧化,温度450℃,氧化时间24 h,使其表面形成一层致密的氧化膜,进而更符合实际情况。

### 1.3 涂层附着力及耐磨性测试

涂层在锅炉内部的使用环境恶劣, 需要涂层与钢材间有较强的结合力和良好的抗冲蚀性能。附着力是指涂层与钢材通过物理和化学作用相结合的能力, 是评价涂层性能的重要指标。

涂层的附着力测试根据 GB/T 9286-1998<sup>[19]</sup> 进行。采用 QFH 系列百格刀对涂层做格阵图形并穿透, 划格完成的涂层附着力等级按六级分类, 其中 0 级为切割边缘完全光滑且涂层无脱落, 随着级数增加, 涂层脱落面积增大。

采用冲蚀磨损试验测试涂层的耐磨性及抗冲刷性能, 根据 ASTM G76-07<sup>[20]</sup> 标准搭建实验台。试验将煤灰混合压缩空气后经喷嘴喷出, 试样固定在正对喷嘴 10 mm 处, 压缩空气流速为 16 m/s, 煤灰流量为 20 g/min, 将涂层试样片冲蚀至钢材后终止试验。采用失重法来表征试样的抗冲蚀性能, 定义试样的单位面积失重量为  $\Delta A_i$ :

$$\Delta A_i = \frac{A_i - A_0}{A} \quad (1)$$

式中,  $A_i$  为第  $i$  次冲蚀后试样的质量,  $A$  为试样表面积。

### 1.4 接触角测量

润湿性是指液体在固体表面上铺展的能力或倾向性, 通常用接触角来表征润湿性的好坏<sup>[21]</sup>。接触角是指在固、液、气三相交点处, 气液界面的切线穿过液体与固液交界线之间的夹角, 用  $\theta$  表示。固体表面接触角如图 1 所示。

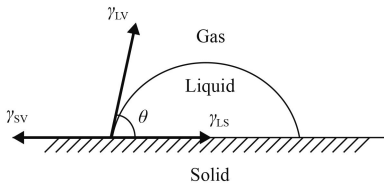


图 1 固体表面接触角示意图

Fig.1 Contact angle of solid surface

在理想平面上, 液体对固体的润湿性由固体的表面自由能决定, 满足 Young 氏方程<sup>[22]</sup>。

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2)$$

式中  $\gamma_{sv}$ 、 $\gamma_{lv}$  和  $\gamma_{sl}$  分别表示固气相, 液气相和固液相之间的表面张力。

在通常情况下, 实际应用的固体表面并不是光滑、均匀的理想平面, 而是有一定粗糙度的真实表面。在粗糙表面无法测得平衡状态下的真实接触角, 此时测量得到的为表观接触角, 因此在实际情况下测量的接触角和表面张力不满足 Young 氏方程。Wenzel 对 Young 氏方程进行了修正, 提出了 Wenzel 方程<sup>[23]</sup>:

$$\cos \theta_w = \frac{r(\gamma_{sv} - \gamma_{ls})}{\gamma_{lv}} = r \cos \theta \quad (3)$$

式中,  $\theta$  为真实接触角, 定义为实际固液接触面积与表观固液接触面积之比;  $\theta_w$  为表观接触角;  $r$  为表面粗糙度。经过试样表面粗糙度测定, 喷涂涂层钢片的表面粗糙度  $R_a$  为 1.26, 氧化钢片的表面粗糙度  $R_a$  为 1.27。

煤灰灰渣熔点较高, 多数都在 1000 °C 以上, 而锅炉中水冷壁和涂层的耐热温度都低于该值。在高温下钢材或涂层表面状态改变会对接触角测量产生一定影响, 因此, 文中采用熔点较低 (380 °C) 的模拟灰, 使试验温度不高于基材和涂层的耐热温度, 以模拟实际熔融灰在水冷壁表面的润湿过程。模拟灰成分见表 2。

表 2 模拟灰的成分

Table 2 Composition of simulated ash (w/%)			
Composition	SiO <sub>2</sub>	PbO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Content	30	60	10

在试验过程中, 将模拟灰压制成  $\Phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的圆柱体, 并将其置于试样片上。试样片分别采用 1.1 和 1.2 节的方法制备。将试样片和模拟灰柱放入高温电炉内随炉升温, 采用 CCD 摄像头记录灰柱形状变化情况和对应温度, 最后将拍摄的图像用 Image-Pro Plus 6.0 软件进行处理计算得到模拟灰的表观接触角。

### 1.5 粘附功计算

接触角能直接反应液体对固体的润湿程度, 而固液两相之间的结合强度可由粘附功的大小来表示。粘附功是指将已接触的固相和液相分离成两个表面所需要做的功, 用符号  $W_a$ 。由于直接测量粘附功大小比较麻烦, 且技术尚不成熟, 通过测量接触角的值来计算求得粘附功。粘附功  $W_a$  下式计算:



$$Wa = \gamma_{LV}(1 + \cos\theta) \quad (4)$$

表面张力的选取采用 Shigeru Fujino 等人对该模拟灰的研究数据<sup>[24]</sup>, 如表 3 所示。

表 3 模拟灰表面张力数据<sup>[24]</sup>

Table 3 Surface tension data of molten ash

Name	Surface tension at 1123 K / ( $10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Temperature correction coefficient / ( $10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
PbO <sub>2</sub> -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> glass	190	1.5

## 1.6 铺展系数计算

铺展系数也可以用来表征液体对固体的润湿性。文中通过熔融灰在水平和倾斜放置试样的铺展系数对熔融灰的润湿性进行研究。模拟灰在水平壁面上的铺展系数可表示为<sup>[25]</sup>:

$$\beta = d/D \quad (5)$$

其中,  $d$  为液滴动态直径,  $D$  为初始灰柱直径。模拟灰在倾斜壁面上的铺展系数<sup>[26]</sup>可表示为:

$$\beta = L/D \quad (6)$$

其中,  $L$  为液滴沿壁面的总铺展长度,  $D$  为初始灰柱直径。

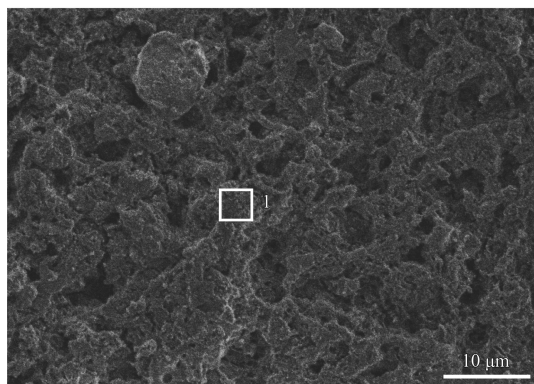
## 1.7 形貌及成分分析

采用场发射扫描电子显微镜 (Zeiss Supra 55S)、X 射线能量色谱 (OXFORD X-Max 20) 和 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku D/max2500PC) 对涂层表面形貌、相结构及经过静态接触角实验的熔滴-试样片截面进行形貌及成分分析。

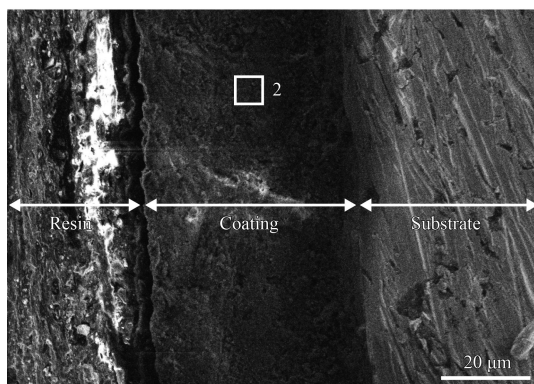
## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层形貌及相结构

图 2(a) 为 450 °C 烧结后  $h$ -BN 基陶瓷涂层表面形貌, 由于料浆中水玻璃烧结后呈玻璃质, 能够紧密粘结超细陶瓷粉体骨料, 因此涂层表面较为致密。图 2(b) 为 450 °C 烧结后陶瓷涂层截面形貌, 从图中可以看出, 涂层厚度约 30  $\mu\text{m}$ , 涂层与基材之间相互嵌合紧密, 两者形成冶金镶嵌结构, 因此涂层不易剥落。对图 2 所示的区域 1 和区域 2 进行 EDS 分析, 结果如表 4 所示, 可以看出, 涂层表面及截面的元素组分基本相同。图 3 为  $h$ -BN 基陶瓷涂层的 XRD 衍射图谱, 由图可知, 涂层主要由  $h$ -BN 和石墨构成, 经 450 °C 烧结后并未生成其他晶体。



(a) Surface



(b) Cross section

图 2 450 °C 烧结后  $h$ -BN 基陶瓷涂层形貌

Fig.2 Morphologies of  $h$ -BN-based ceramic coating after sintering at 450 °C

表 4  $h$ -BN 基陶瓷涂层表面与截面 EDS 分析

Table 4 EDS analysis of the surface and cross section of  $h$ -BN-based ceramic coating (a/%)

Region	B	N	O	Si	K	C
1	43.91	33.37	14.87	2.64	1.02	4.18
2	44.23	33.57	13.73	3.27	1.13	4.06

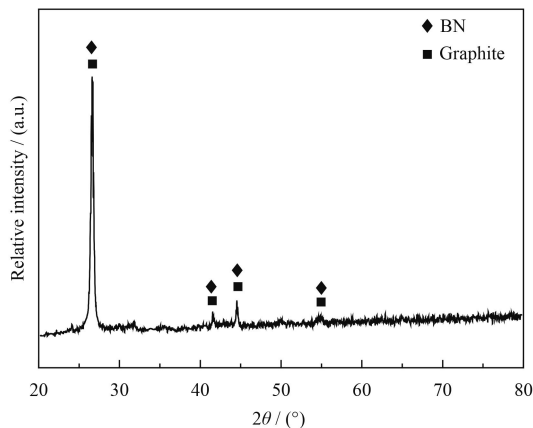


图 3  $h$ -BN 基陶瓷涂层的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of  $h$ -BN-based ceramic coating

### 2.2 涂层附着力及耐磨性

*h*-BN 基陶瓷涂层附着力测试结果如图 4 所示, 可知涂层的附着力等级为 0 级, 说明涂层与基体具有良好的结合强度。



图 4 涂层划痕处形貌

Fig.4 Morphology of scratches on the coating

涂层与钢材在室温下的单位面积失重量如图 5 所示。分别对钢材和涂层试样的失重曲线进行拟合, 结果如图所示。

钢材试样:

$$y = 0.0013x - 0.0017 \quad (7)$$

涂层试样:

$$y = 0.0015x + 0.0078 \quad (8)$$

可以看出, 涂层在室温下的抗磨损性能仅比钢材低 15.3%, 说明涂层具有较好的耐冲蚀磨损性能。

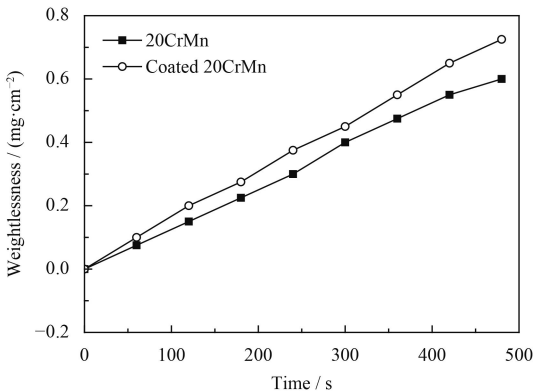


图 5 涂层与钢材在室温下单位面积失重量变化

Fig.5 Variation of weight loss per unit area of coating and substrate at room temperature

### 2.3 接触角

熔融灰在氧化钢片及涂层表面上形态随温度

的变化如图 6 所示。在温度较低时, 熔融灰在两种表面的形态差别不大。当温度升高至 420 °C, 熔融灰在氧化钢片及涂层表面的形态差别开始显现。之后随着温度的升高, 熔融灰在氧化钢片表面的润湿程度明显高于涂层表面。

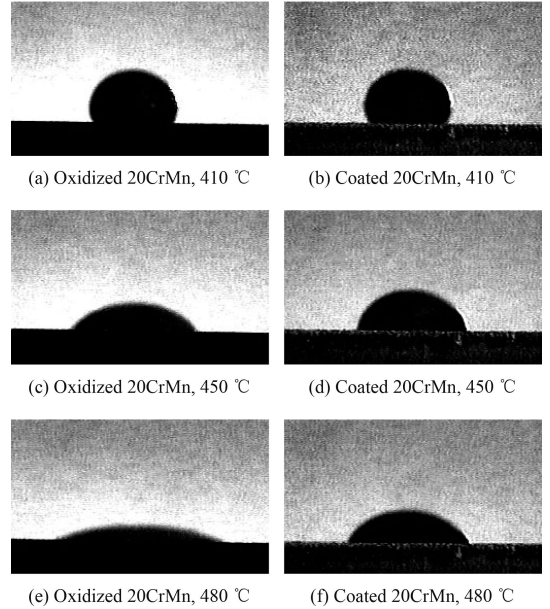


图 6 熔融灰在钢片和涂层表面形态随温度的变化

Fig.6 Morphologies of molten ash varied with temperature on the surface of steel sheet and coating

熔融灰在氧化钢片和涂层表面接触角随温度变化如图 7 所示。由图可知, 当温度大于 420 °C 时, 熔融灰在涂层表面的接触角较小。之后随着温度的升高, 熔融灰在涂层表面和氧化钢片表面的接触面差值逐渐增大。在 480 °C 时, 熔融灰在氧化钢片表面的接触角为 26.16°, 在涂层表面的

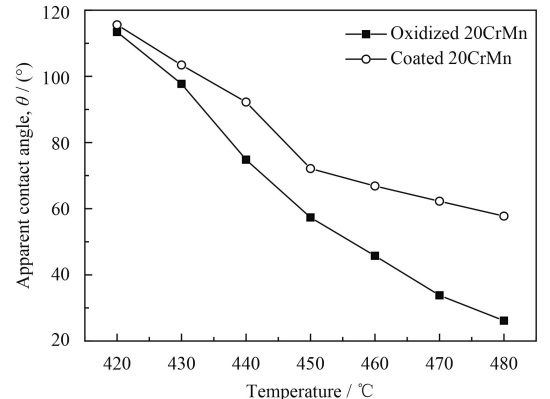


图 7 熔融灰在钢片和涂层表面的接触角随温度的变化

Fig.7 Contact angles of molten ash on the surface of steel sheet and coating varied with temperature

接触角为  $57.75^\circ$ ，两者相差  $31.59^\circ$ ，说明在一定温度区间内，熔融灰在涂层表面的润湿性较差。

## 2.4 粘附功

图 8 为粘附功随温度变化情况。由图可知，熔融灰的粘附功随温度升高逐渐增大，在同一温度下，熔融灰渣在涂层表面的粘附功较小，粘结强度低。在  $480^\circ\text{C}$  时，熔滴在氧化钢片表面的粘附功为  $350\text{ mN/m}^2$ ，而在涂层表面的粘附功为  $283\text{ mN/m}^2$ ，说明熔融灰与涂层的结合强度较低，灰渣易于清除。

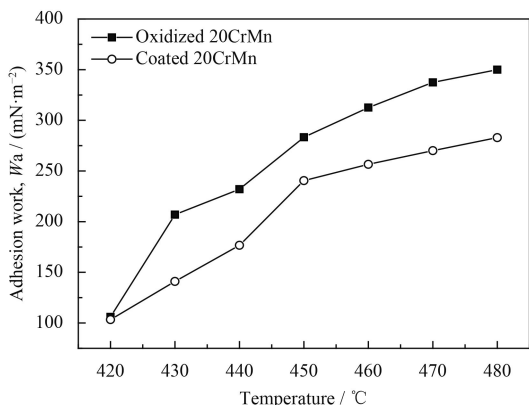


图 8 粘附功随温度变化情况

Fig.8 Variation of adhesion work with temperature

## 2.5 铺展系数

图 9 为熔融灰在水平试样表面铺展系数随温度的变化情况。可以看出，随着温度的升高，铺展系数增大，熔融灰在钢片和涂层表面铺展系数的差值也随温度增大。在温度超过  $450^\circ\text{C}$  后，熔融灰在钢片表面的铺展趋势随温度升高趋于平

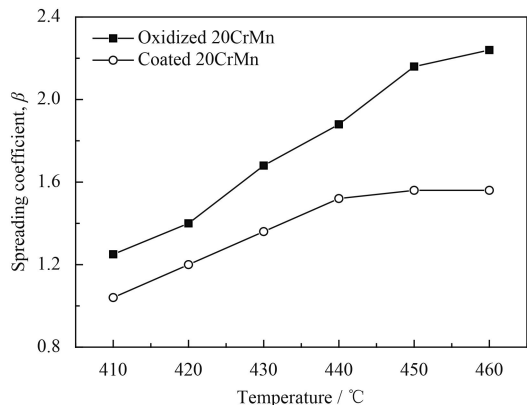


图 9 熔融灰在水平试样表面铺展系数随温度的变化

Fig.9 Variation of spreading coefficient of molten ash with temperature on horizontal specimen

缓，在  $460^\circ\text{C}$  时达到 2.24，而此时涂层表面基本已达到铺展平衡，不再铺展，铺展系数保持在 1.56。表明喷涂涂层减弱了熔融灰的润湿能力。

图 10 为熔融灰在倾斜试样片表面铺展系数随温度的变化情况。熔融灰在倾斜角为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  的氧化钢片和涂层表面上的铺展系数均随温度的升高增大，且在同一温度下，熔融灰在涂层表面上的铺展系数比钢片表面小。熔融灰在倾斜放置两种试样表面的铺展系数差值也随温度升高增大，在  $450^\circ\text{C}$  时， $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  倾角下的铺展系数差值分别为 0.48、1.13 和 1.61，说明熔融灰在涂层表面的润湿性较差。

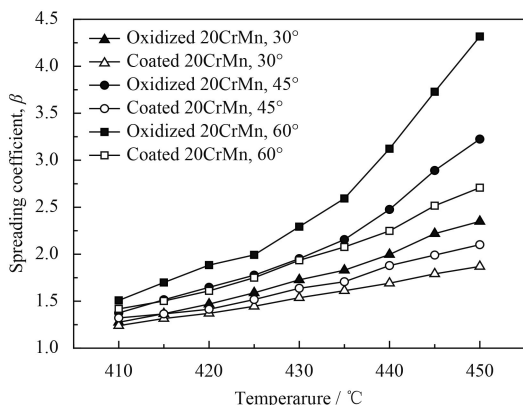


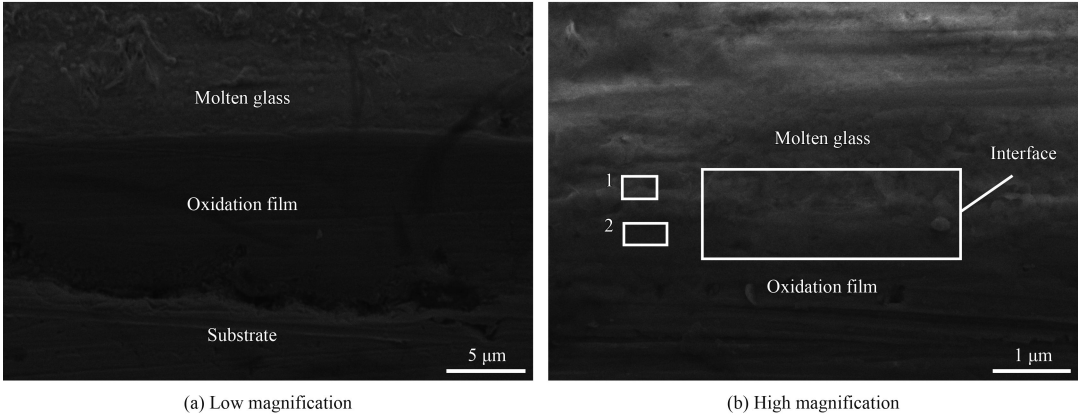
图 10 熔融灰在不同倾斜角试样表面的铺展系数随温度的变化  
Fig.10 Variation of spreading coefficient of molten ash with temperature on the specimens with different tilt angles

熔融灰在带倾角试样上的铺展过程中受重力和表面张力作用，而表面张力对熔融灰的铺展主要起阻碍作用。由图 10 可知，试样片倾斜角为  $30^\circ$  时，熔融灰的表面张力起主要作用，因此其在试样片上的铺展系数随温度的增长趋势较为平缓。随着倾斜角度的增加，重力沿斜面的分量增大，向下铺展的趋势增强，最终的铺展系数也随之增大。因此，熔融灰在倾斜角为  $45^\circ$  和  $60^\circ$  试样片上的铺展系数明显较大。

## 2.6 熔融灰-试样片截面 SEM/EDS 分析

图 11 和图 12 分别为为熔融灰-氧化钢片和熔融灰-喷涂涂层钢片截面的微观形貌，由图可看出熔融灰与氧化钢片的交界面比较模糊。经 EDS 分析可知(表 5)，位于氧化层处的区域 2 存在较高含量的 Pb 元素，而 Pb 为熔融灰的主要成分，说明熔融灰中的成分已经扩散至氧化膜内，形成扩散



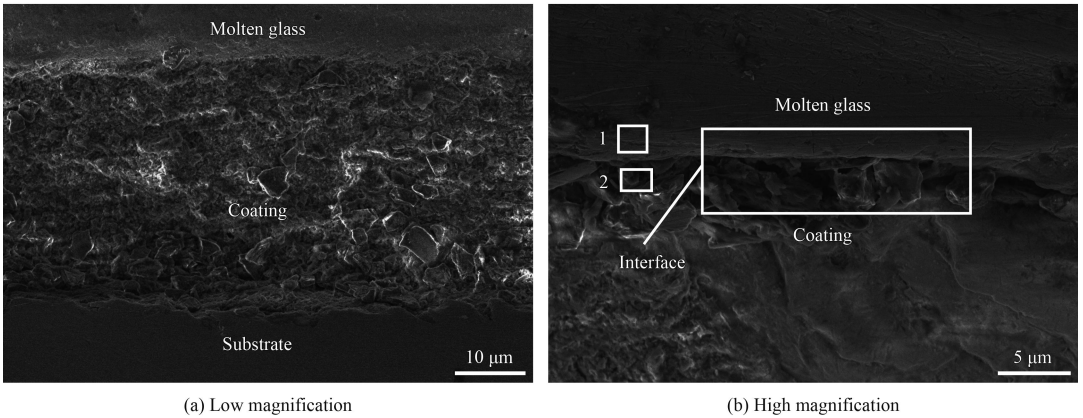


(a) Low magnification

(b) High magnification

图 11 熔融灰-氧化钢片的截面微观形貌

Fig.11 Cross sectional morphologies of oxidized steel sheet-molten ash



(a) Low magnification

(b) High magnification

图 12 熔融灰-喷涂涂层钢片截面微观形貌

Fig.12 Cross sectional morphologies of coating-molten ash

结合, 较机械结合更难清除。

从图 12 可以看出, 熔融灰与涂层分界明显, 并且根据 EDS 分析 (表 6), 位于涂层处的区域 2 检测到的 Pb 含量较少, 原子数分数仅有 2.8%, 说明涂层能有效阻止 Pb 的扩散, 减弱其扩散结合, 使涂层表面的熔融灰易于清除。

表 5 熔融灰与氧化钢片交界面处 EDS 分析

Table 5 EDS analysis of the interface between oxidized steel sheet and melted (a/%)

Region	Pb	B	Si	O	Fe
1	17.9	27.2	1.3	51.3	2.3
2	10.1	0	0.8	70.6	18.5

表 6 熔融灰与喷涂涂层钢片交界面处 EDS 分析

Table 6 EDS analysis of the interface between coating sheet and melted ash (a/%)

Region	Pb	B	Si	O	C	K	N
1	10.5	25.4	1.4	62.7			
2	2.8	30.4	11.0	13.4	3.2	1.7	12.3

### 2.7 *h*-BN 基陶瓷涂层防熔融灰粘附机制分析

通过图 7 和图 9 熔融灰在试样片表面接触角和铺展系数随温度的变化可以看出熔融灰在涂层表面润湿性较差, 且铺展缓慢, 说明涂层表面具有较低的表面自由能, 使涂层不易被熔融灰润湿。粘附功计算结果表明熔融灰与涂层间的粘附功较小, 粘结强度较低。

涂层的主要成分为 *h*-BN, 该物质呈现化学惰性, 并且耐熔渣侵蚀, 不易与熔融灰发生化学反应。通过对熔融灰-试样片截面 SEM/EDS 分析可知, 熔融灰与氧化钢片交界面模糊, 并且在氧化钢片的氧化层处检测到模拟灰成分 Pb, 说明灰渣与氧化钢片已产生扩散结合, 增强了两者的结合强度。涂层与熔融灰分界明显且涂层区域含 Pb 量较少, 说明涂层表面烧结后较为致密且具有化学不亲和性, 能够阻止熔融灰的渗透, 减弱熔融灰与涂层的结合强度, 使灰渣更容易清除。

### 3 结论

(1) 涂层表面较为致密, 并且与基材嵌合紧密, 两者形成冶金镶嵌结构, 涂层的附着力等级为 0 级, 与基体具有良好的结合强度, 涂层不易脱落。涂层在室温下的抗磨损性能仅比钢材低 15.3%, 说明涂层具有较好的抗磨损性能。

(2) 同一温度下, 熔融灰在涂层表面的接触角较大, 在 480 °C 时, 熔融灰在涂层表面和氧化钢片表面的接触角相差 32°, 而且熔融灰在涂层表面的粘附功较小, 说明在钢片表面喷涂陶瓷涂层, 能够降低熔融灰的润湿性及熔融灰与试样的结合强度。

(3) 熔融灰在水平和倾斜放置的涂层表面的铺展系数均较小, 而且随着温度升高, 熔融灰在涂层和钢片表面铺展系数的差值逐渐增大。在 30°、45°和 60°倾角下, 熔融灰在涂层和钢片的差值分别为 0.48、1.13、1.61, 说明熔融灰在喷涂涂层钢片表面较难铺展润湿。

(4) 涂层烧结后具有较低的表面能, 对熔渣具有化学不亲和性, 因此不易被熔融灰润湿且能够有效阻止熔融灰中 Pb 的扩散, 减弱熔融灰与基体的结合强度, 使熔融灰易于清除。

### 参考文献

- [1] 杨卫娟. 电站锅炉变负荷引起的水冷壁渣层热应力和吹灰在线模糊优化运行的基础理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.  
YANG W J. Thermal stress of slag on walltube created by boiler load shift and theory reasearch on fuzzy online optimization of boiler sootblow[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003 (in Chinese).
- [2] 张杰, 胡善涛, 周斌. 神木煤结渣过程的试验研究[J]. *能源工程*, 2011(2): 13-15.  
ZHANG J, HU S T, ZHOU B. The experimental study on the slagging process of Shenmu coal[J]. *Energy Engineering*, 2011(2): 13-15 (in Chinese).
- [3] 王顶辉, 王桂芳, 姚伟. 大型煤粉锅炉的防结渣措施[J]. *热力发电*, 2007(2): 31-33.  
WANG D H, WANG G F, YAO W. Preventive measures for slagging inlarge - scale pulverized coal boilers[J]. *Thermal Power Generation*, 2007(2): 31-33 (in Chinese).
- [4] 李宇航, 张喜来, 张森. 准东煤防结渣添加剂应用试验[J]. *热力发电*, 2017(9): 141-146.  
LI Y H, ZHANG X L, ZHANG S. Experimental study on additives applied to against slagging of Zhundong coal[J].

*Thermal Power*, 2017(9): 141-146 (in Chinese).

- [5] 潘世汉, 陈勤根, 陈晓勇. 准东高碱煤特性分析及防止锅炉结渣的对策措施[J]. *能源工程*, 2016, 180(1): 71-76.  
PAN S H, CHEN Q G, CHEN X Y. Characteristic analysis of higher-sodium coal of the eastern Jungarand countermeasures for preventing boiler slagging[J]. *Energy Engineering*, 2016, 180(1): 71-76 (in Chinese).
- [6] JOO H G, ZHANG D Q, GAO L X. Corrosion resistance of tungsten carbide-based cermet coatings formed by sinter-brazing[J]. *Inderscience Publishers*, 2014, 8(4): 380-391.
- [7] 高振. T91 和 304H 锅炉管束用非晶合金涂层制备及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.  
GAO Z. Study on prepare and properties of amorphous alloy coatings on the T91 and 304H boiler tubes[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015 (in Chinese).
- [8] SINGH G, GOYAL K, BHATIA R. Hot corrosion studies of plasma-sprayed chromium oxide coatings on boiler tube steel at 850 °C in simulated boiler environment[J]. *Iranian Journal of Science & Technology Transactions of Mechanical Engineering*, 2017: 1-11.
- [9] 华隽石, 王进卿, 池作和. 锅炉受热面复合陶瓷涂层抗高温腐蚀性能试验研究[J]. *电站系统工程*, 2016(1): 9-11, 16.  
HUA J S, WANG J Q, CHI Z H. Experimental study on corrosion resistance of high temperature composite ceramic coating used in boiler heating surface[J]. *Power System Engineering*, 2016(1): 9-11, 16 (in Chinese).
- [10] 强学才, 郭琳, 王洪亮. 制备新型高温受热面防磨涂层的实验研究[J]. *热能动力工程*, 2016(5): 76-81, 153.  
QIANG X C, GUO L, WANG H L. Experimental study of the preparation of a new type high-temperature heating surface abrasion-preventive coating[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2016(5): 76-81, 153 (in Chinese).
- [11] 刘威. 高碱煤燃烧特性实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
LIU W. Experimental study of high-alkali coal on combustion characteristic[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015 (in Chinese).
- [12] 冯帅, 张忠孝, 乌晓江. 高碱煤灰渣在涂镍钢表面的粘附特性研究[J]. *锅炉技术*, 2015, 46(2): 8-12.  
FENG S, ZHANG Z X WU X J. The adhesion properties of high alkali ashon the surface of nickel plated steel[J]. *Boiler Technology*, 2015, 46(2): 8-12 (in Chinese).
- [13] NAGANUMA H, IKEDA N, KAWAI T. Control of ash deposition in pulverized coal fired boiler[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2): 2709-2716.
- [14] NAGANUMA H, IKEDA N, ITO T. Control of ash deposition in solid fuel fired boiler[J]. *Fuel Processing Techno-*



- logy, 2013, 105: 77-81.
- [15] CHEN J, NINOMIYA Y, NAGANUMA H. Development of thermal spraying materials through several corrosion tests for heat exchanger tube of incinerators[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 141: 216-224.
- [16] 王进卿, 袁益超, 黄国强, 等. 燃煤锅炉防结渣复合陶瓷涂层技术应用[J]. *热力发电*, 2017, 46(6): 75-79, 87.  
WANG J Q, YUAN Y C, HUANG G Q, et al. Application of anti-slagging composite ceramic coating in coal-fired boilers[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(6): 75-79, 87 (in Chinese).
- [17] 王进卿, 袁益超, 池作和, 等. 防结渣复合陶瓷涂层在燃用准东煤锅炉上的应用研究[J]. *动力工程学报*, 2017, 37(1): 12-17.  
WANG J Q, YUAN Y Q, CHI Z H, et al. Application of anti-slagging composite ceramic coating in a zhundong coal-fired boiler[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2017, 37(1): 12-17 (in Chinese).
- [18] 国家质量技术监督局. 色漆和清漆漆膜的划格试验: GB/T 9286-1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.  
The Quality and Technology Supervision Bureau. Paints and varnishes-Cross cut test for films: GB/T 9286-1998[S]. Beijing: China Standards Press, 1998 (in Chinese).
- [19] ASTM G76-07. Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets[P]. 2013-07-01.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 涂装前钢材表面锈蚀等级和除锈等级: GB/T 8923.1-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Corrosion grade and rust grade of steel surface before coating: GB/T 8923.1-2011[S]. Beijing: China Standards Press, 2011 (in Chinese).
- [21] 张谦. 脉冲镀铜-化学镀银法制备金属基超疏水表面[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(5): 1-8.  
ZHANG Q. Fabrication of superhydrophobic surface on metallic substrate by pulse Cu electroplating and silver plating[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(5): 1-8 (in Chinese).
- [22] YOUNG T. An essay on the cohesion of fluids[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 95: 65-85.
- [23] 朱瑶, 赵振国. 界面化学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.  
ZHU Y, ZHAO Z G. Base of interface chemistry[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 1996 (in Chinese).
- [24] FUJINO S, HWANG C, MORINAQA K. Density, surface tension, and viscosity of PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> glass melts[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, 87(1): 10-16.
- [25] 郭亚丽, 陈桂影, 沈胜强. 盐水液滴撞击固体壁面接触特性实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2015(7): 1547-1552.  
GUO Y L, CHEN G Y, SHEN S Q. Experimental Research on contact characteristics after droplet impacting onto solid surface[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015(7): 1547-1552 (in Chinese).
- [26] 郑志伟, 李大树, 仇性启, 等. 柴油液滴撞击倾斜壁面碰撞速度效应数值分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 323-330.  
ZHENG Z W, LI D S, QIU X Q, et al. Numerical analysis of effect of impacting velocity on diesel droplet impacting on inclined surface[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 323-330 (in Chinese).