

高速电弧喷涂 FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层抗高温冲蚀磨损性能

罗来马¹, 刘少光², 俞佳¹, 赵琪³, 孙乃荣³, 郇剑¹

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310027)

(2. 温州科得力新特材料有限公司, 浙江 温州 325029)

(3. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对超临界锅炉管道的严重冲蚀磨损问题, 采用高速电弧喷涂技术在 20 钢表面制取耐磨涂层, 并研究其高温冲蚀磨损特性。采用场发射扫描电子显微镜和 X 射线能谱分析等方法探讨涂层的冲蚀磨损规律。结果表明, FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层最大冲蚀率出现在冲击角 60°附近, 表现出半塑性冲蚀磨损特征; 其耐高温冲蚀性与 FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层相近, 明显优于 20 钢。

关键词: FeMnCr/Cr₃C₂ 粉芯丝材; 高速电弧喷涂; 抗高温冲蚀磨损

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2010)02-0234-04

超临界锅炉管道在高温高压工况下服役, 受到飞灰和未完全燃烧的煤粒子的冲蚀, 容易引起破坏, 造成严重损失^[1-5], 所以开发新型高效低成本的管道表面防磨材料对于超临界锅炉的发展具有重要意义。Fe-Mn-Cr 系高锰合金具有良好的耐磨性和耐冲蚀性, 不含贵金属元素, 具有成本较低、适用面广等优点。目前, 已经研制出不少无镍、少镍不锈钢, 低温用钢, Fe-Mn-Cr 系高锰奥氏体钢焊丝、焊条等是一种潜在的理想代镍材料^[6]。利用电弧喷涂粉芯丝材方法, 获得 Fe-Mn-Cr 系涂层, 可望在超临界锅炉管道防护领域中发挥其耐磨特性。Fe-Mn-Cr 系作为电弧喷涂粉芯丝材的基本成分, 至今鲜见相关文献报道。

本实验采用自制多功能拉丝系统, 以优质低碳钢作为外皮, 一定粒度的商用 Mn 粉、Cr₃C₂ 粉、Cr 粉等作为粉芯材料, 制成 FeMnCr/Cr₃C₂ 粉芯丝材。以 20 钢作为基材, 通过高速电弧喷涂技术制备喷涂样品, 同时以 FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层和 20 钢作为对比试样, 进行涂层的高温冲蚀磨损试验研究, 探讨其磨损特性

及规律。

1 实验

通过自行研制的轧拔式叠口包丝机和张力式直线拉丝机加工制备 $\Phi 2.4$ mm 的粉芯丝材^[1]。外皮选用优质低碳钢 08F 钢带, 具体成分见表 1。粉芯材料由粒度均为 38~147 μm 的商用 Mn 粉、Cr 粉、Cr₃C₂ 粉、FeSi 粉、少量 Al、RE 及 Ni 粉, 混合后经球磨后制丝。对比材料的粉芯材料粒度为 38~147 μm 的 30%Cr₃C₂、20%Cr、2%FeSi 粉(质量分数)、其余为 Ni, 外皮材料为 08F 钢带。

制成的 $\Phi 2.4$ mm 粉芯丝材的芯粉填充率为 45%。为模拟超临界锅炉水冷壁、省煤器等管道材料, 选取 20 钢作为喷涂层试样的基底, 经表面喷砂清理, 然后用 CAS-400 型高速电弧喷涂机进行电弧喷涂。电弧喷涂气源由空压机提供, 压力为 0.8 MPa, 气体流量 6 m³/min, 喷涂电压 38 V, 喷涂电流 260 A; 涂层厚度为 0.8~1.0 mm。

表 1 粉芯丝材外皮的化学成分

Table 1 Composition of the sheath materials($\omega/\%$)

Material	C	Cr	Mn	Ni	P	S	Fe
08F	0.05-0.11	≤0.10	≤0.25-0.50	≤0.25	≤0.035	≤0.035	Balance

收稿日期: 2009-03-06

基金项目: 浙江省科技厅一般工业项目(2009C31129)资助

作者简介: 罗来马, 男, 1980 年生, 博士生, 浙江大学材料科学与工程系, 浙江 杭州 310027, 电话: 0571-87952853; 通讯作者: 郇剑, 教授, 电话: 0571-87953119, E-mail: metal@zju.edu.cn

高温冲蚀磨损试验在自行研制的增压式分段加热高温冲蚀磨损试验机上进行，其结构如图 1 所示。为使试验条件更接近超临界锅炉管道的工况条件，试验温度参数模拟锅炉管道的实际运行温度，使冲蚀气流温度和试样温度分别与管道的内外介质温度接近，冲蚀磨粒选取比实际飞灰更硬、尺寸更大、速度更快的多角形刚玉砂(图 2)，以缩短试验周期，具体试验参数见表 2。

采用 LEICA DMLM 金相显微镜对喷涂层表面和横截面进行金相观察分析，浸蚀液为 4%HNO₃ 乙醇溶液。用 EVERONE MH-5 显微硬度计选区测试涂层表面显微硬度值，载荷 1 N，加载时间 15 s。

采用美国 FEI 公司的 SIRION 场发射扫描电子显微镜(FESEM)以及 X 射线能谱色谱仪(EDS)对涂层高温冲蚀形貌和成分进行分析。用感量 0.01 mg 岛津物理分析天平记录冲蚀失重，根据实测的涂层密度转换成体积损失，以单位质量磨粒冲蚀造成的体积损失表征冲蚀率。每个冲击角的冲蚀率由 5 个试样的平均值得到，以冲蚀率和冲击角度为坐标轴获得高温冲蚀磨损特征曲线。

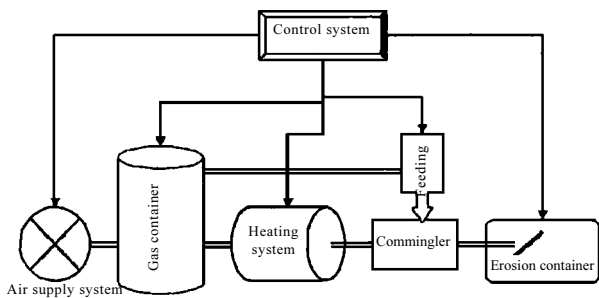


图 1 增压式分段加热高温冲蚀磨损试验机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the pressurized separate-heating high temperature erosion test facility

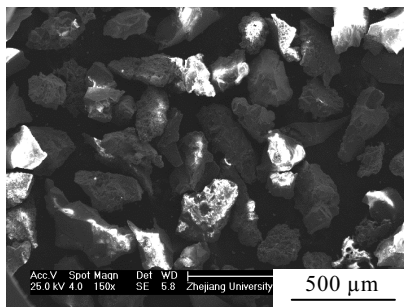


图 2 角形刚玉砂的SEM照片

Fig.2 SEM morphology of Al₂O₃ particles used as abrasive

表2 高温冲蚀磨损试验条件

Table 2 High temperature erosion test conditions

Test conditions	Test parameters
Carrier gas	Air
Gas pressure /MPa	0.5
Gas velocity /m·s ⁻¹	42
Gas temperature /°C	900
Sample temperature /°C	400
Impact angle /(°)	15-90
Erosive testing time /s	10
Abrasive quantity /g	300
Abrasive size /μm	150~180
Abrasive	Multangular alumina

2 结果与讨论

2.1 涂层组织和性能

图 3a 为 FeMnCr/Cr₃C₂ 喷涂层横截面金相照片。呈现明显层叠显微组织，层与层之间结合良好，组织致密，未观察到粗大孔隙、微裂纹等缺陷。图 3b 为喷涂层与基体的结合界面金相照片。可见涂层与基体结合良好，无大的孔隙。

表 3 为 FeMnCr/Cr₃C₂ 和 FeCrNi/Cr₃C₂ 显微硬度平均值与标准方差和结合强度测试结果。FeMnCr/Cr₃C₂ 显微硬度值与 FeCrNi/Cr₃C₂ 相近；从结合强度测试结果发现，FeMnCr/Cr₃C₂ 与 FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层结合强度值相近。因此，硬度值和结合强度值都达到了无须过渡层的单层结构实际生产的要求值。

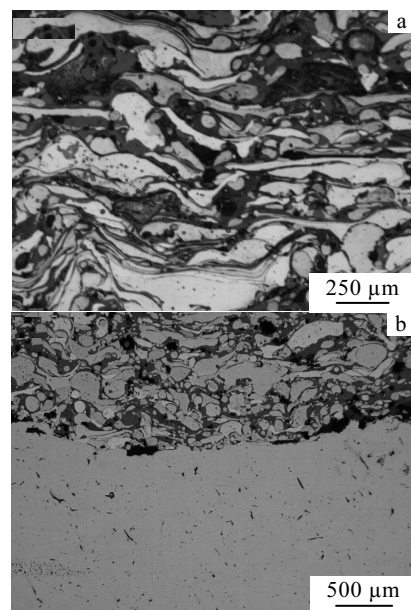


图 3 FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层的金相组织

Fig.3 Metallographs of FeMnCr/Cr₃C₂ coatings: (a)cross-section and (b)bond interface

表 3 FeMnCr/Cr₃C₂ 和 FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层性能对比
Table 3 Properties comparison of FeMnCr/Cr₃C₂ and FeCrNi/Cr₃C₂ coatings

Coatings	Hardness /GPa	Bond strength /GPa
FeMnCr/Cr ₃ C ₂	3.96±0.28	24
FeCrNi/Cr ₃ C ₂	4.23±0.33	26

2.2 冲击角对喷涂涂层冲蚀率的影响

图 4 为在表 2 中的试验条件下冲击角对 FeMnCr/Cr₃C₂、FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层和 20 钢冲蚀率的影响。由图可知，20 钢最大冲蚀率出现在冲击角 15°附近，随着冲击角的增大，冲蚀率不断减小，表现为典型的塑性冲蚀磨损特征。FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层的冲蚀率的峰值则出现在 60°附近，表现出半塑性的冲蚀磨损特征，不论是高冲击角还是低冲击角，耐冲蚀性能都明显优于 20 钢。3 种材料中，FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层和 FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层冲蚀率相近，在同一个水平上。FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层其冲蚀率的峰值也出现在冲击角 60°附近，冲蚀特征与 FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层相似。

2.3 FeMnCr/Cr₃C₂ 高温冲蚀磨损规律

图 5 为 FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层和 20 钢在不同冲击角下的冲蚀磨损表面形貌。由图 5a, 5b, 5c 可以看出，20 钢在低冲击角时多角形刚玉磨粒容易发生犁耕和切削作用，由于没有硬质相阻止磨粒滑动，20 钢在 30°冲击角下的冲蚀率很大，随着冲击角增加，犁耕和切削

作用减弱，磨粒以切入 20 钢表面和挤压表层形成裂纹破坏为主，部分区域出现破碎的磨粒切开表层并整体压入，使其周围产生严重的疲劳剥落，如图 5c 所示，与有关报道结果一致^[1, 5]。EDS 分析结果表明，图 5c 所示的嵌入颗粒为 Al₂O₃ 磨粒。从图 5d 可发现，30°冲击角下，FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层磨损机制为犁沟和微切削破坏形式，但是与 20 钢相比，犁沟和微切削痕迹变小，程度减轻。当冲击角为 60°时，也能看到明显的犁削和切削(图 5e)，但是切削后其周围剥落程度比 30°冲击角时大，增大了冲蚀磨损破坏程度。从图 5f 发现，FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层 90°冲击角下，受冲蚀颗粒的挤压程度明显比 20 钢轻。

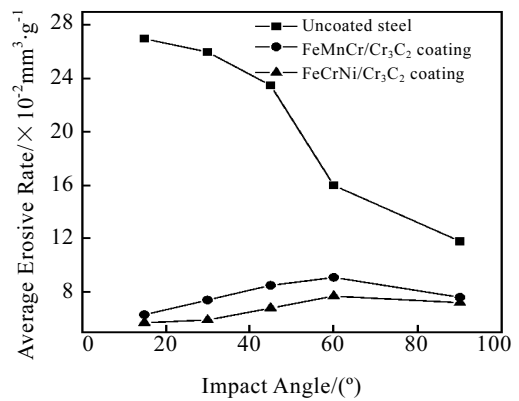


图 4 高温冲蚀磨损特性比较

Fig.4 High-temperature erosion rates

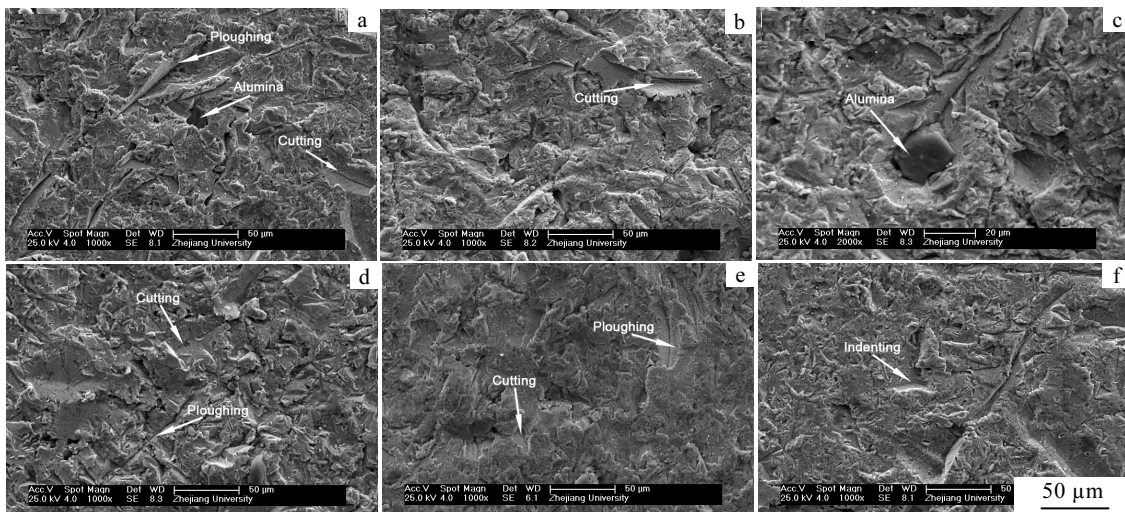


图 5 不同冲击角下 20 钢和 FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层的冲蚀磨损形貌

Fig.5 SEM morphology of FeMnCr/Cr₃C₂ and 20 steel after erosion test at different impact angles: (a) 20 steel at 30°, (b) 20 steel at 60°, (c) 20 steel at 90°, (d) FeMnCr/Cr₃C₂ at 30°, (e) FeMnCr/ Cr₃C₂ at 60°, and (f) FeMnCr/ Cr₃C₂ at 90°

综上所述, 不论是高冲击角还是低冲击角, FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层具有良好的抗冲蚀磨损性能。其主要原因为: 加入适量的 Cr₃C₂ 增强颗粒, 提高了涂层表面硬度, 有较好抵抗磨粒的犁沟和切削作用; 同时冲蚀形貌中, 未观察到增强颗粒的剥落迹象, 降低了涂层的冲蚀破坏。

3 结 论

1) FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层显微硬度为 (3.96 ± 0.28) GPa, 结合强度为 24 GPa, 均与 FeCrNi/Cr₃C₂ 涂层相近。达到了电弧喷涂无粘结层单层实际生产的要求值。

2) FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层最大冲蚀率出现在冲击角 60° 附近, 表现出半脆性冲蚀磨损特征。不论是高冲击角还是低冲击角, 耐高温冲蚀性与 FeCrNi/Cr₃C₂ 相近, 且明显优于 20 钢。

3) FeMnCr/Cr₃C₂ 涂层磨损机制以犁沟和微切削破坏形式为主, 但是与 20 钢相比, 犁沟和微切削痕迹细小, 程度减轻。

参考文献 References

- [1] Liu Shaoguang *et al.* *Wear*[J], 2007, 262: 555
- [2] Tabakoff W. *Wear*[J], 1995, 186-187: 224
- [3] Xu Weipu(徐维普) *et al.* *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2004, 27(2): 43
- [4] Xu Weipu *et al.* *Journal of University of Science and Technology Beijing*[J], 2005, 12(4): 340
- [5] Liu Shaoguang(刘少光) *et al.* *Journal of Power Engineering* (动力工程)[J], 2006, 26(6): 908
- [6] Zhang Zengzhi(张增志). *Austenitic Manganese Steel*(耐磨高锰钢)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 54

High-Temperature Erosion Behavior of High-Velocity Arc-Spraying FeMnCr/Cr₃C₂ Coatings

Luo Laima¹, Liu Shaoguang², Yu Jia¹, Zhao Qi³, Sun Nairong³, Li Jian¹

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2. Wenzhou Cadre New Special Material CO. LTD, Wenzhou 325029, China)

(3. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: FeMnCr/Cr₃C₂ cored wire was developed for building up the erosion-resistant coatings of super-critical boiler pipes by means of High-Velocity Arc Spraying. The high-temperature erosion behaviors at different impact angles of FeMnCr/Cr₃C₂ coatings were studied and compared with those of FeCrNi/Cr₃C₂ coatings and 20 steel by optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersion spectrum analysis. Results show that FeMnCr/Cr₃C₂ coatings have the maximum erosive rate when the impact angle is about 60° due to the semi-brittleness erosion mechanism for FeMnCr/Cr₃C₂ coatings. The erosion resistance of FeMnCr/Cr₃C₂ coatings is closed to that of FeCrNi/Cr₃C₂ coatings, and obviously better than that of 20 steel.

Key words: FeMnCr/Cr₃C₂ cored wire; high-velocity arc spraying; high-temperature erosion resistance

Corresponding author: Luo Laima, Candidate for Ph. D., Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China, Tel: 0086-571-87952853; Li Jian, Professor, 0086-571-87953119, E-mail: metal@zju.edu.cn