

# 焊接热输入对 Fe-Cr-B-C 堆焊合金组织与性能的影响

苏健晖<sup>1,2</sup>, 吴卓伦<sup>2</sup>, 唐彪<sup>1</sup>, 庄明辉<sup>1</sup>, 李冰<sup>1</sup>, 马振<sup>1</sup>, 杨彪<sup>2</sup>

(1. 佳木斯大学材料科学与工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007;

2. 哈尔滨工业大学(威海)特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209)

**[摘要]** 为了研究焊接热输入对高硼铁基堆焊合金组织结构及力学性能的影响,利用 CO<sub>2</sub>/MAG 焊,采用 Fe-Cr-C-B 系金属粉芯焊丝制备高硼铁基堆焊合金,利用力学试验机、硬度仪、光学显微镜、扫描电镜及 X 射线衍射仪等研究了堆焊合金的组织形貌、力学性能及析出相的变化。结果表明:高硼铁基堆焊合金由 (Fe, Cr)、(Fe, Cr)<sub>2</sub>B 和 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 相组成,随着热输入的增加,初晶 (Fe, Cr) 和 (Fe, Cr)<sub>2</sub>B 体积分数增加, (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 相减少,堆焊合金的冲击韧性增加,当热输入为 220.8 kJ/m 时冲击功达到最大 298 J;堆焊合金的宏观硬度取决于 (Fe, Cr)、(Fe, Cr)<sub>2</sub>B 和 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 的体积分数,当热输入为 220.8 kJ/m 时获得堆焊合金的最小洛氏硬度 59 HRC。

**[关键词]** Fe-Cr-B-C 堆焊合金; 焊接热输入; 焊缝组织; 性能

**[中图分类号]** TG455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-1560(2020)03-0036-05

## Effect of Welding Heat Input on Microstructure and Properties of Fe-Cr-B-C Surfacing Alloy

SU Jian-hui<sup>1,2</sup>, WU Zhuo-lun<sup>2</sup>, TANG Biao<sup>1</sup>, ZHUANG Ming-hui<sup>1</sup>, LI Bing<sup>1</sup>, MA Zhen<sup>1</sup>, YANG Biao<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

**Abstract:** For studying the influence of welding heat input on the structure and mechanical properties of high-boron iron-based surfacing alloy, the high-boron iron-based surfacing alloy was prepared by CO<sub>2</sub>/MAG welding system with Fe-Cr-C-B metal powder cored wire. Mechanical testing machine, hardness tester, optical microscope, scanning electron microscope and X-ray diffraction were employed to investigate the microstructure, mechanical properties and precipitation phase of the surfacing alloy. Results showed that the high boron-iron surfacing alloy consisted of (Fe, Cr), (Fe, Cr)<sub>2</sub>B and (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) phases. With the increase of heat input, the volume fraction of primary crystal (Fe, Cr) and (Fe, Cr)<sub>2</sub>B increased, while the (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) phase decreased. As the heat input increased, the impact toughness of the surfacing alloy increased. When the heat input was 220.8 kJ/m, the impact energy reached a maximum of 298 J. Moreover, the microhardness of the surfacing alloy depended on the volume fraction of (Fe, Cr), (Fe, Cr)<sub>2</sub>B and (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B). When the heat input was up to 220.8 kJ/m, the Rockwell hardness of the surfacing alloy declined to the minimum value of 59 HRC.

**Key words:** Fe-Cr-B-C surfacing alloy; welding heat input; weld microstructure; properties

## 0 前言

随着冶金行业对高温耐磨堆焊合金的需求日益增加,传统高铬高碳铁基合金材料因其价格高、高温分解和稳定性差等不足已不能满足修复后使用要求,因此寻求一种新型高温耐磨堆焊材料已迫在眉睫<sup>[1,2]</sup>。Fe-Cr-B-C合金体系是近年来出现的一种新型耐磨材料,性价比高,工艺简单,因合金组织中含有高硬度的

硼化物硬质相而具有优良的耐磨性<sup>[3-6]</sup>。国内外对该合金体系的元素过渡、硼化物分布模型及磨损机制进行了基础研究。崔世恒等<sup>[7]</sup>和张琦等<sup>[8]</sup>研究发现焊后热处理及变质处理可改善硼化物分布,提高韧性及耐磨性。Shen 等<sup>[9-13]</sup>发现热输入可改变晶粒形貌,直接影响焊接接头组织结构和力学性能。焊接热输入是影响焊接冷却速度的主要因素。采用焊丝对结构件堆焊修复后发现,堆焊层的洛氏硬度和耐磨性出现偏低问

[收稿日期] 2019-09-24

[基金项目] 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2016203);黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(201810222053)资助

[通信作者] 马振(1983-),硕士研究生,主要研究方向为堆焊耐磨材料,电话:13803653264, E-mail:jmsdxmz@163.com

题,主要原因是焊接热输入过大或过小导致的,目前国内尚未对 Fe-Cr-B-C 系金属粉芯焊丝进行系统的研究。实现堆焊耐磨材料的高硬度和耐磨性是材料工作者的目标,本工作采用 Fe-Cr-B-C 系金属粉芯焊丝,通过调整焊接工艺规范,系统研究了焊接热输入对高硼铁基堆焊合金材料的组织结构及力学性能,以获得性能优异的铁基堆焊合金材料。

### 1 试验

母材为 Q235 钢板,抗拉强度为 375 MPa,屈服强度为 235 MPa,母材化学成分见表 1。Fe-B-Cr-C 系金属粉芯焊丝粉体成分的配比见表 2,试验试板加工尺寸为 150 mm×200 mm×10 mm,CO<sub>2</sub>保护气体 15 L/min,焊接示意图如图 1 所示,焊接工艺参数见表 3。焊前将 Q235 用角磨机打磨,去除表面氧化膜,然后用丙酮-酒精混合溶液进行清洗,去除表面油污。试验采用晶闸管控制 CO<sub>2</sub>/MAG 焊机(YD-500 KRIVTA)进行堆焊。采用 OLYMPUS-DSX510 金相显微镜进行金相组织观察。HR-150A 洛氏硬度计检测堆焊层宏观硬度。

表 1 母材化学成分(质量分数) %

元素	C	Mn	Si	S	P	Fe
含量	0.200	0.450	0.300	0.050	0.045	余量

表 2 焊丝粉体成分分配比(质量分数) %

粉体	纯铬	硼铁	碳化硼	钛铁	钨铁
含量	12	8	22	5	8
粉体	雾化铝铁粉	稀土镁	45 硅铁	中碳锰铁	还原铁粉
含量	2	2	1	3	余量

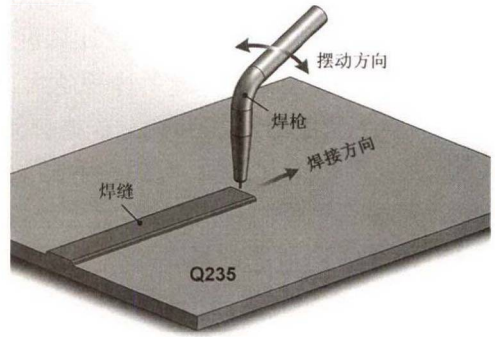


图 1 焊接示意图

表 3 焊接工艺参数

试样编号	焊接热输入 E/(kJ·m <sup>-1</sup> )	电压 U/V	电流 I/A	速度 v <sub>1</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )	送丝速度 v/(m·min <sup>-1</sup> )	焊接效率 η/%
a	100.8	18	140	0.02	2.5	80
b	136.0	20	170	0.02	2.5	80
c	176.0	22	200	0.02	2.5	80
d	220.8	24	230	0.02	2.5	80

XRD 物相分析采用 D/max2500 X 射线衍射仪。熔合比计算采用 Image J 软件,利用图像套索计算熔化母材及整个焊缝区域面积比值。冲击试验依据 GB/T 2650-1989,夏比 V 型缺口,获得室温条下堆焊层的冲击吸收功。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 熔合比计算结果

堆焊层表面渗透着色和断面观察,未发现气孔、夹渣和未焊透等缺欠,焊缝成型较好。不同焊接热输入下单道堆焊缝宏观形貌如图 2。

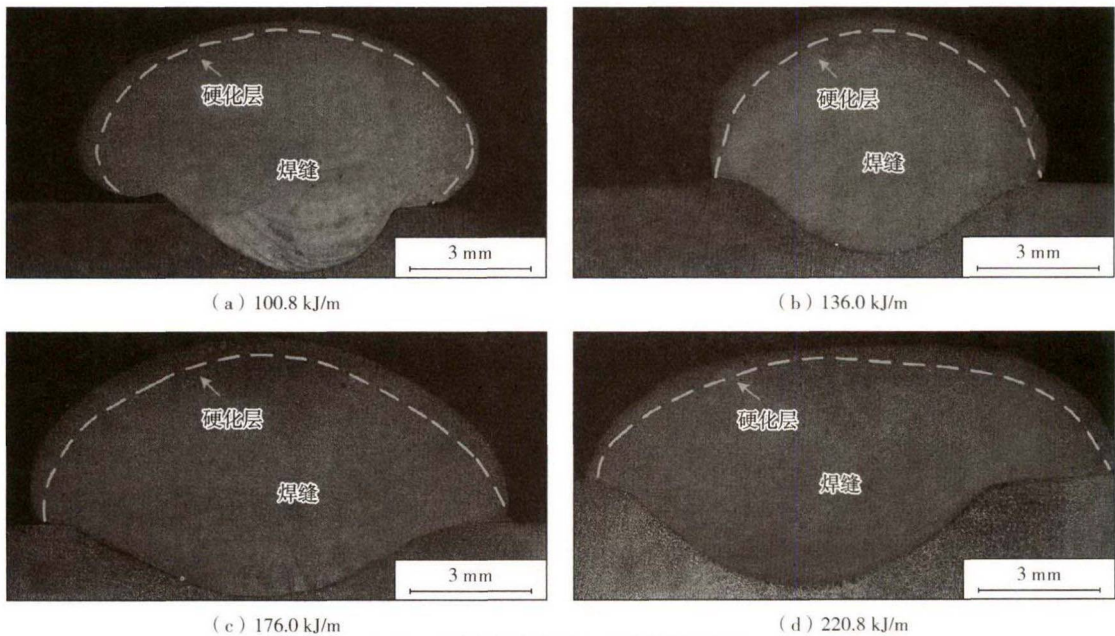


图 2 不同焊接热输入下的焊缝成形

由图 2 可知,不同焊接热输入下基材熔化体积差别较大。通过 Image J 软件对其熔合比计算见图 3,结果表明,随着焊接热输入增加焊缝的体积越大,熔深越深,熔合比变大。热输入为 100.8 kJ/m 时,熔合比约 13%,焊接冷却速度较快,形成具有颜色差异的焊缝见图 2a,2b,2c,即碳含量低的底部焊缝,碳含量高的中部及顶部焊缝,这是由于熔池中熔化母材金属来不及充分地扩散和流动即快速凝固而形成成分偏析所致。热输入增加至 176.0 kJ/m 时,此现象仍然存在,但焊缝颜色趋于一致,形成硼和碳含量低的焊缝。

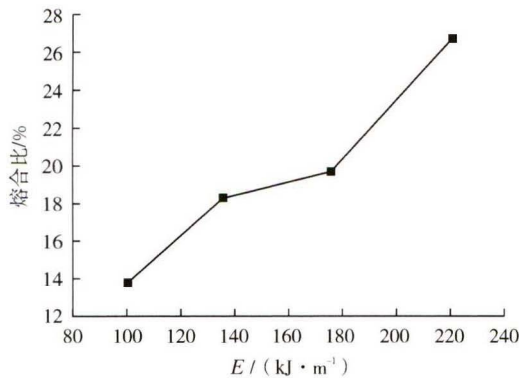


图 3 不同焊接热输入下的熔合比

热输入增加至 220.8 kJ/m 时,熔化比最大,达到 27%,熔池温度较高,高温停留时间变长,熔化的基材向焊缝中过渡的量增加,并有充足的时间扩散和流动,稀释堆焊层的有效含量,形成硼和碳含量偏低的焊缝组织。

## 2.2 XRD 相分析

不同焊接热输入条件下堆焊合金材料 XRD 谱如图 4 所示,结合金相组织以及 High Score 软件分析,Fe-Cr-B-C 铁基堆焊合金的物相组成为 (Fe, Cr)、(Fe, Cr)<sub>2</sub>B 和 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B),与标准 PDF 卡片相对应的峰位相对应。由图 4 可知,随着热输入的增加 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 相的衍射峰峰强变弱, (Fe, Cr) 和 (Fe, Cr)<sub>2</sub>B 相的衍射峰峰强变强变锐,主要是由于高硼 Fe-Cr-B-C 铁基堆焊合金中物相 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 和 (Fe, Cr)<sub>2</sub>B 的衍射峰强度与合金体系中的 B、C 的含量有关, (Fe, Cr)<sub>2</sub>B 相的衍射峰强取决于 B 含量变化, (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 相的衍射峰强由 C 含量决定。随着焊接热输入的增加焊接熔合比变大,大量熔化的 Q235 基材稀释 Fe-Cr-B-C 铁基堆焊合金体系中合金元素含量。当热输入增加至 220.8 kJ/m 时,熔合比最大 27%,高硼堆焊合金中的硼、碳含量显著降低,使堆焊合金中的 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 相体积分数降低,初晶 (Fe, Cr) 和

(Fe, Cr)<sub>2</sub>B 相增加,使 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(C, B) 相的衍射峰变弱, (Fe, Cr) 和 (Fe, Cr)<sub>2</sub>B 相的衍射峰峰强变强变锐。

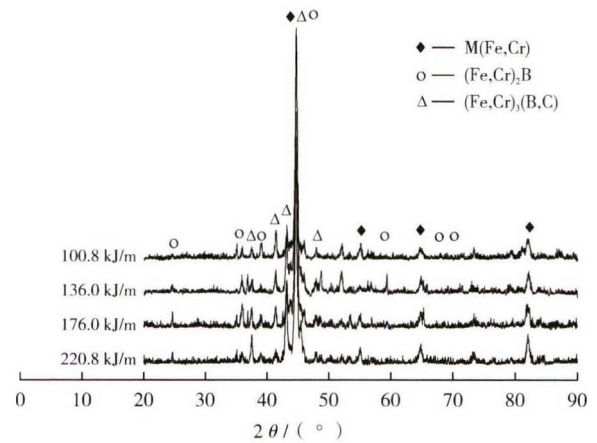


图 4 堆焊合金的 XRD 谱

## 2.3 堆焊合金组织的影响

不同焊接热输入堆焊合金材料截面金相显微组织如图 5 所示。随着焊接热输入的增加,熔合比变大,基材熔化增多,稀释堆焊合金有效成分,降低堆焊合金中的硼和碳的含量,焊缝中出现不同的组织形貌。不同焊接热输条件下,堆焊层的显微组织均有 (Fe, Cr)、(Fe, Cr)<sub>2</sub>B 和 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(B, C) 相组成。

当热输入为 100.8 kJ/m 时,熔合比较小,少量熔化的基材融入焊缝,较快的冷却速度使得焊缝顶部中的硼含量接近共晶成分合金,碳含量略有降低。随着焊接熔池冷却开始,发生共晶转变:  $L \rightarrow \gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_2\text{B}$ ,析出呈亮白色细棒状的初晶  $\text{Fe}_2\text{B}$  相,主要是焊接冷却速度过快,不能提供足够的硼元素所致。焊接熔池继续冷却,发生共析反应:  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_2\text{B}$ , B 和 C 向奥氏体晶界扩散,析出菊花状的  $\text{Fe}_3(\text{B, C})$  [14]。

硼主要分布在硼化物中,碳分布于基体,铬广泛分布于硼化物和基体中,由于铬合金元素的偏析程度最小,铬既可固溶于 Fe 基体中形成 (Fe, Cr),又可固溶于硼化物中形成 (Fe, Cr)<sub>2</sub>B 和 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(B, C),有利于堆焊合金材料的强化。综上可知,热输入小时堆焊合金材料的组织为 (Fe, Cr) + 细棒状 (Fe, Cr)<sub>2</sub>B + 大量的菊花状 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(B, C)。

热输入为 136.0 kJ/m 时,熔合比为 18%,冷却速度变慢,堆焊合金中硼和碳含量降低,形成亚共晶成分合金,堆焊层组织为黑色椭圆状的 (Fe, Cr) + 大量的菊花状 (Fe, Cr)<sub>3</sub>(B, C) + (Fe, Cr)<sub>2</sub>B。焊接热输入增加至 220.8 kJ/m,熔池温度升高,高温停留时间变长,熔化的基材向堆焊合金中过渡量增加,堆焊合金中的硼和碳的含量进步降低,使堆焊层形成大量的亮白初晶

(Fe,Cr)和鱼骨状 $Fe_2B+Fe$ ,少量的 $(Fe,Cr)_3(B,C)$ ,增

加了堆焊合金材料的韧性。

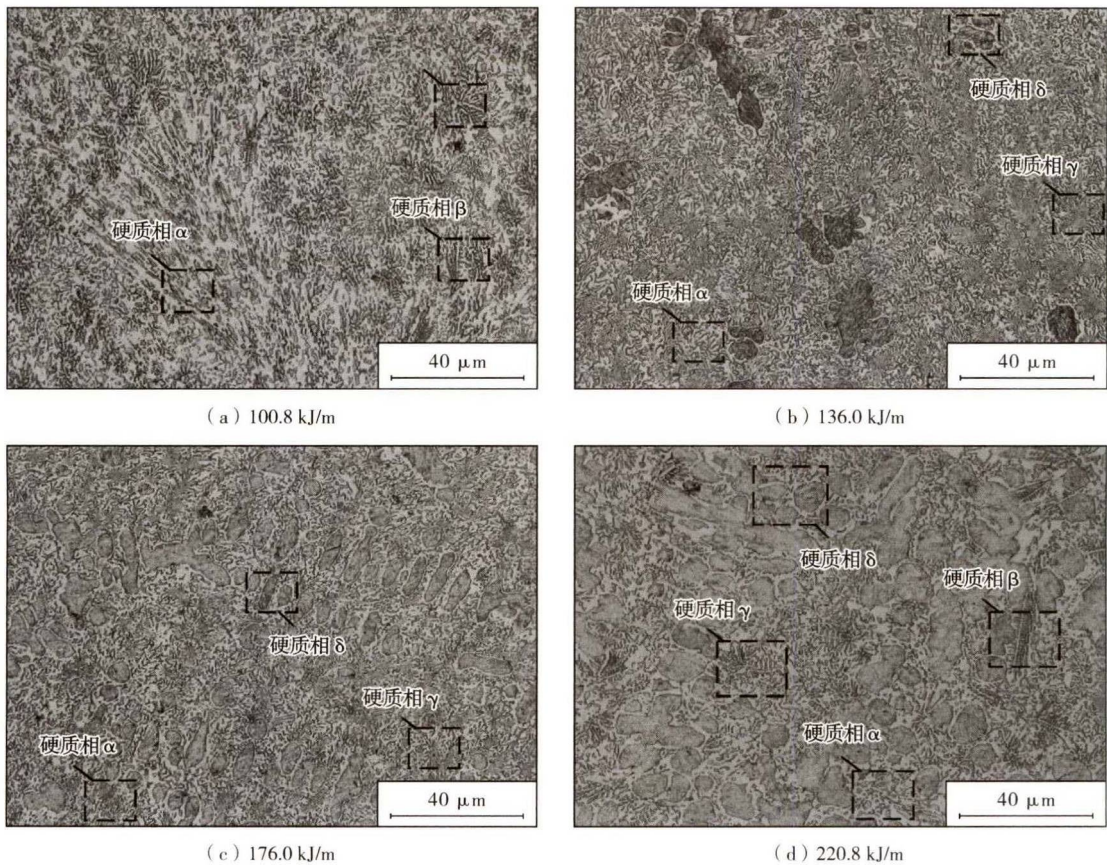


图5 不同焊接热输入下的熔覆层金相组织

### 2.4 冲击性能

不同焊接热输入条件下堆焊层的冲击性能结果如表4所示。由表4可知,焊接热输入对堆焊层的冲击韧性影响显著,随着焊接热输入的增加堆焊层的冲击功值显著增加,冲击功值的变化主要和堆焊合金材料中 $(Fe,Cr)$ , $(Fe,Cr)_2B$ 和 $(Fe,Cr)_3(B,C)$ 相的体积分数有关。

表4 不同热输入堆焊层冲击韧性

热输入 $E/(kJ \cdot m^{-1})$	冲击温度/℃	冲击功 $A_{KV}/J$
100.8	20	144
136.0	20	180
176.0	20	175
220.8	20	298

焊接热输入的增加使 $(Fe,Cr)_3(B,C)$ 的体积分数降低,初晶 $(Fe,Cr)$ 增加,堆焊合金冲击性能增加。焊接热输入从100.8kJ/m增加至220.8 kJ/m时,堆焊合金材料中 $(Fe,Cr)_3(B,C)$ 的体积分数降低,初晶 $(Fe,Cr)$ 继续增加,堆焊合金材料的冲击吸收能量提高了106.9%。由此可见,堆焊合金材料的冲击韧性主要

由初晶 $(Fe,Cr)$ 的体积分数决定,当焊接热输入为220.8 kJ/m时复合堆焊层的冲击性能优异。

### 2.5 硬度测试结果

随着焊接热输入的增加,4种焊接输入条件下堆焊层顶部的洛氏硬度平均值分别为68,65,63,59 HRC,呈下降趋势,主要是由于随焊接热输入的增加,熔化的母材增多,对焊缝的稀释作用增强,不同程度上降低了堆焊层中硼和碳的含量,形成不同含量、不同形貌的硼碳化合物。当热输入为100.8 kJ/m时,形成了硼含量为近共晶合金成分的显微组织。当热输入为136.0,176.0,220.8 kJ/m时,形成硼含量为亚共晶合金成分的显微组织,导致了不同热输入条件下堆焊层顶部的硬度变化。同时,根据Hall-Petch公式<sup>[15]</sup>: $H=H_0+Kd^{-1/2}$ 得,焊接热输入对堆焊层的硬度有一定影响,热输入过大使焊缝组织尺寸变得粗大,硬度值降低。

### 3 结论

(1)高硼铁基堆焊合金的性能主要受 $(Fe,Cr)$ 和 $(Fe,Cr)_2B$ 和 $(Fe,Cr)_3(C,B)$ 相含量影响;随着焊接热

输入的增加,堆焊层中的(Fe,Cr)<sub>3</sub>(C,B)含量减少,初晶(Fe,Cr)和(Fe,Cr)<sub>2</sub>B含量增加。

(2)随着焊接热输入的增加,堆焊复合板的冲击韧性增加,当热输入为 220.8 kJ/m 时堆焊复合板的冲击功达到最大 298 J。

(3)随着热输入的增加焊缝熔合比增加,堆焊层中硼和碳的含量不同程度的降低,堆焊合金表面的洛氏硬度降低,当热输入为 220.8 kJ/m 时堆焊层硬度最小,为 59 HRC。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 李 凯. 耐高温耐磨衬板合金的研究[D]. 天津:河北工业大学, 2011:2-6.
- [ 2 ] 张小明, 田 锋. 日本超高温结构用金属材料的研究现状[J]. 中国材料进展, 2007, 26(7):12-15.
- [ 3 ] 王志胜, 陈 祥, 李言祥. 高硼耐磨合金的变质处理[J]. 铸造, 2017, 66(6):603-608.
- [ 4 ] 蒲小聪. 高温金属基复合材料的研究进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(10):118-121.
- [ 5 ] 仲增埔. 金属间化合物高温结构材料[J]. 材料研究学报, 1990, 4(2):132-142.
- [ 6 ] 宗 琳, 刘政军. 含硼铁基耐磨复合材料的研制[J]. 热加工工艺, 2012, 41(2):116-118.
- [ 7 ] 崔世恒, 吴承玲, 苑振涛. 淬火温度对含硼铁基耐磨合金组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018(8):126-128.
- [ 8 ] 张 琦, 李润霞, 郑开宏. Ti 变质处理对高硼铁基合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(03):502-505.
- [ 9 ] SHEN Y, LENG J, WANG C. On the heterogeneous microstructure development in the welded joint of 12MnNiVR pressure vessel steel subjected to high heat input electrogas welding[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(8):1747-1752.
- [ 10 ] ZHANG H, WANG D, XUE P, et al. Microstructural evolution and pitting corrosion behavior of friction stir welded joint of high nitrogen stainless steel[J]. Materials & Design, 2016, 110:802-810.
- [ 11 ] LIU X, CHUNG K F, HO H C, et al. Mechanical behavior of high strength S690-QT steel welded sections with various heat input energy[J]. Engineering Structures, 2018, 175:245-256.
- [ 12 ] LI H L, LIU D, YAN Y T, et al. Effects of heat input on arc stability and weld quality in underwater wet flux-cored arc welding of E40 steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31:833-843.
- [ 13 ] CHEN J, KONG Q, WANG J, et al. Preparation of high wear-resisting superamphiphobic robust film by self-assembled monolayer surface reaction [J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 117:20-28.
- [ 14 ] 庄明辉. 高硼铁基堆焊合金组织结构形成机理及耐磨性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017: 4-7.
- [ 15 ] WANG J T, ZHANG Y K, CHEN J F, et al. Effects of laser shock peening on stress corrosion behavior of 7075 aluminum alloy laser welded joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 647:7-14.

[ 编 校 : 魏 兆 军 ]

### ( 上 接 第 26 页 )

- [ 2 ] KURSTEN B, DRUYTS F. Methodology to make a robust estimation of the carbon steel overpack life time with respect to the Belgian Supercontainer design[J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 379(1):91-96.
- [ 3 ] SEETHARAM S C, CLEALL P J, THOMAS H R. Modeling some aspects of ion migration in a compacted bentonitic clay[J]. Engineering Geology, 2006, 85(1/2):221-228.
- [ 4 ] 苏 艳, 舒 畅, 罗来正, 等. 航空有机涂层的老化失效规律的电化学表征[J]. 表面技术, 2011, 40(6):18-22.
- [ 5 ] 杨奔奔, 申春森, 徐 颖, 等. 纳米有机涂层在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱研究[J]. 材料保护, 2017, 50(6):18-21.
- [ 6 ] 马少妹, 陈 燕, 徐家燕, 等. 磷酸盐替代环氧富锌涂料中的锌粉制备环氧锌粉底漆[J]. 表面技术, 2011, 40(3):98-101.
- [ 7 ] 张鉴清, 曹楚南. 电化学阻抗谱方法研究评价有机涂层[J]. 腐蚀与防护, 1998, 19(3):99-104.
- [ 8 ] 楼 森, 芦玉峰, 周 萌, 等. Zn, Al 合金涂层在膨润土中的加速腐蚀实验研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5):32-34.
- [ 9 ] 沈 忠, 韩小元, 张永浩, 等. 亚硝酸钠对膨润土中 16MnR 钢的缓蚀效果[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(4):322-325.
- [ 10 ] 卢 飞, 芦玉峰, 杨 欢, 等. 轻集料混凝土凝结对纳米富锌有机涂层性能的影响[J]. 涂料工业, 2014, 44(1):24-27.

[ 编 校 : 郑 霞 ]