

一种稀土高强钢焊接热影响区组织与性能

陆斌^{1,2}, 陈芙蓉¹, 付学义²

(1. 内蒙古工业大学, 呼和浩特, 010051; 2. 内蒙古包钢钢联股份公司, 包头, 014010)

摘要: 机械装备的整体性能和寿命随着高强钢的大量使用而大幅提高, 但性能薄弱区仍然是焊接热影响区。应用恰当的处理技术, 能生成形态、尺寸和分布有益的稀土夹杂物, 在焊接中抑制原奥氏体晶粒长大改善钢的焊接性能。试验制备了一种 0.18%C 的稀土高强钢, 采用 Gleeble-3500 热模拟机模拟 4 种热输入下的热循环过程, 采用光学显微镜观察了试验钢的焊接热影响区显微组织转变, 用冲击试验机测试了焊接热影响区的冲击吸收能量, 测量了不同冷却速度下的原始奥氏体晶粒尺寸的变化。结果表明, 焊接热输入值为 25 kJ/cm 时, HAZ 组织主要为马氏体, 晶粒尺寸细小, 这时的冲击韧性和硬度值最高。当焊接热输入值大于 50 kJ/cm 以上时, 钢中生成了上贝氏体和粒状贝氏体, 晶粒也逐渐长大, 出现了韧性下降和软化。试验钢的 C 含量为 0.18%, 在热循环中焊缝中出现了粗大的马氏体组织, 形成淬硬组织, 未生成针状铁素体组织。

关键词: 高强钢; 稀土; 焊接热影响区; 组织; 力学性能

中图分类号: TG 457.11

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20200407001

0 序言

随着科技进步和经济的发展, 高强钢的应用领域不断扩展, 需求量增长迅猛。低合金高强耐磨钢由于合金成本适中、制造技术成熟、加工性能良好, 被广泛用于矿山机械、采煤、电力及冶金等行业, 逐步用在装载机、挖掘机、采煤刮板输送机、大型矿车等机械的结构件和耐磨件。高强耐磨钢的应用, 加强了装备的薄弱环节, 提高了整体寿命。但因为高强耐磨钢具有较高的强度和硬度, 一般屈服强度可达 800~1 500 MPa, 高强度等级使得该种钢在焊接时稳定性下降、塑韧性变差、冷裂纹倾向加重, 焊接热影响区性能恶化^[1-6]。近年来, 稀土在钢中的作用机理研究取得较大进展, 实践也证明稀土能改善高强钢的焊接性、低温冲击韧性^[7-8], 稀土能提高无取向硅钢的磁性能等, 这些研究拓展了稀土在钢中的应用^[9-12]。由于焊接的热循环作用, 导致粗晶区晶粒粗大, 韧性下降, 成为整个焊接接头的薄弱区, 是高碳当量高强钢焊接接头裂纹及脆性破坏的多发部位^[13-15], 稀土元素在钢中适量添加, 改善了晶界结构和焊接性能, 可发挥独特作用^[16]。

文中开发了一种提高焊接性能的稀土氧化物

冶金技术 (enhanced welding properties via rare earth oxide metallurgy technology, EW-REOMT), 从母材要素入手, 控制钢中氧化物的形态, 使其尺寸细化并弥散分布, 在焊接过程中起到阻止奥氏体晶粒长大, 提高钢的焊接热影响区 (HAZ) 冲击吸收能量, 改善高强度钢板焊接性能, 可加大热输入, 提高焊接生产效率, 对推广普及机器人焊接意义深远^[17]。

1 试验方法

试验材料为含稀土高强耐磨钢板, 化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.18, Si 0.25, Mn 1.33, Cr 0.55, Ni 0.13, Mo 0.17, S 0.001, P 0.010, Nb 0.020, N 0.0031, Ca 0.001, Al 0.024, Ce 0.0020, Fe 余量。金相组织如图 1。

1.1 模拟焊接热影响区组织和性能

将待模拟试样加工成 75 mm × 10.5 mm × 10.5 mm, 使用 Gleeble3500 热模拟机, 按 Rykalin-2D 模型模拟试验钢的焊接热循环过程, 热输入分别为 25, 50, 75 和 100 kJ/cm, 试验参数见表 1。

用光学金相显微镜观察模拟后试样的显微组织, 测量其原始奥氏体晶粒尺寸, 测定不同焊接热输入模拟条件下各试样的室温 V 形冲击吸收能量和焊接热影响区的 HRC 硬度。

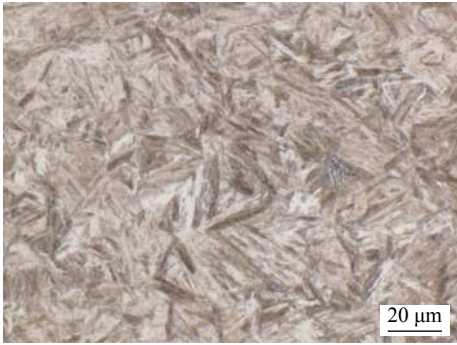


图 1 试验钢显微组织
Fig. 1 Microstructure image of test steel

表 1 焊接热循环试验工艺参数
Table 1 Thermal cycle test parameters for welding

热输入 $E/(kJ \cdot cm^{-1})$	最高加热温度 $T_{max}/^{\circ}C$	高温停留时间 t_H/s	冷却时间 $t_8/s/s$
25	1350	1	18
50	1350	1	74
75	1350	1	165
100	1350	1	295

2 试验结果

2.1 CCT 曲线

经不同冷却速度的热模拟试验,测定高强钢的 CCT 曲线,见图 2.

在 0.5 ~ 50 $^{\circ}C/s$ 的冷却速度范围内,随着冷却速度 (C_R) 的增加,组织由少量多边形铁素体 (QPF)、

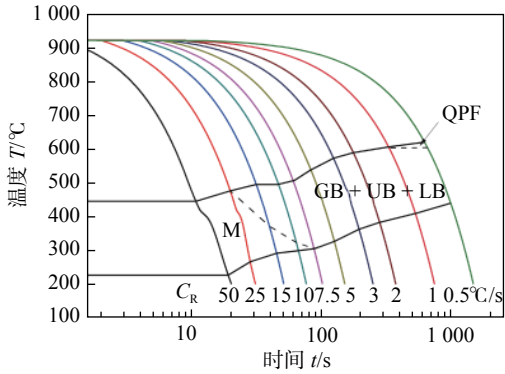


图 2 试验钢的 CCT 曲线
Fig. 2 CCT curves of test steel

上贝氏体 (UB)、下贝氏体 (LB)、粒状贝氏体 (GB) 和马氏体 (M) 组成.

当冷却速度由 0.5 $^{\circ}C/s$ 增加至 1 $^{\circ}C/s$ 时,多边形铁素体 (QPF) 不断减少,直至消失,贝氏体的含量不断增加.当冷却速度处于 1 ~ 7.5 $^{\circ}C/s$ 时,钢中组织全为贝氏体组织,冷却速度越大,钢中下贝氏体 (LB) 组织比例越大,粒状贝氏体 (GB) 组织越少.冷速继续增大,钢中贝氏体 (B) 占比减少,开始出现马氏体 (M) 组织.冷却速度为 25 $^{\circ}C/s$ 时,钢中全部生成了马氏体组织.

2.2 焊接热影响区组织

观察试样热模拟试验后的 OM 显微组织转变过程,如图 3 所示.在焊接热影响区范围内,当冷却

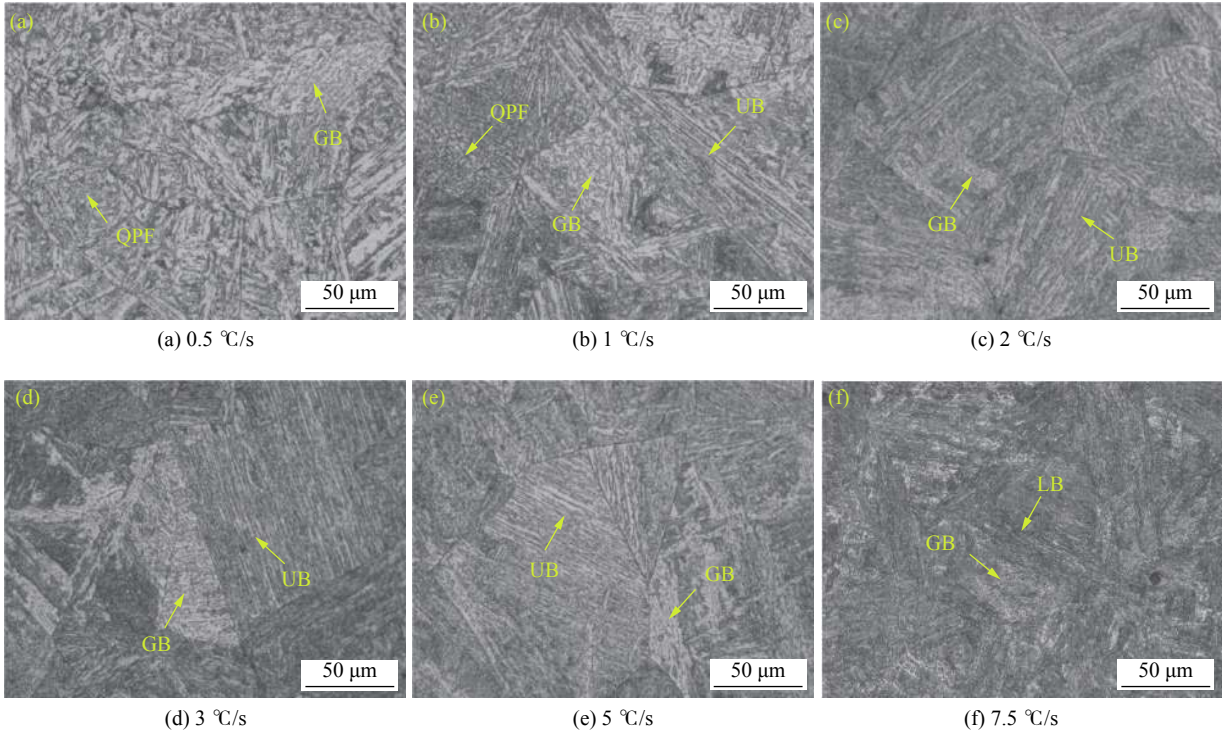


图 3 不同冷却速度下的显微组织 (低速)
Fig. 3 OM images at different cooling rates. (a) 0.5 $^{\circ}C/s$; (b) 1 $^{\circ}C/s$; (c) 2 $^{\circ}C/s$; (d) 3 $^{\circ}C/s$; (e) 5 $^{\circ}C/s$; (f) 7.5 $^{\circ}C/s$

速度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, HAZ 的组织主要为粒状贝氏体 (GB) 和少量多边形铁素体 (QPF); 当冷却速度增加到 $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, 组织主要为粒状贝氏体 (GB), 多边形铁素体和少量上贝氏体 (UB); 当冷却速度增加至 $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 时, 组织主要为粒状贝氏体 (GB) 和上贝氏体组

织 (UB), 且随着冷却速度的增加, 上贝氏体组织也逐渐增加; 冷却速度增加到 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 钢中开始出现下贝氏体组织 (LB); 继续增大冷却速度 (图 4), 钢中开始出现马氏体 (M). 当冷却速度达到 $25\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, HAZ 下贝氏体组织基本消失, 此时均为马氏体组织 (M).

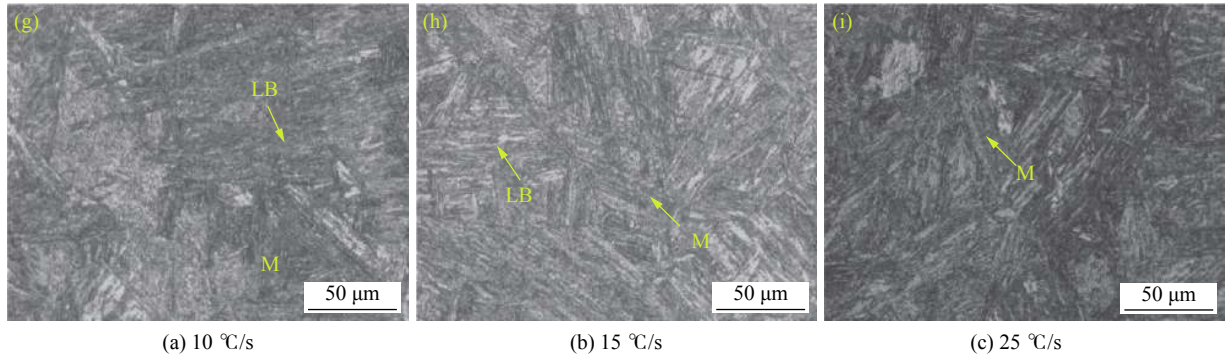


图 4 不同冷却速度下的显微组织 (高速)

Fig. 4 OM images at different cooling rates. (g) $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (h) $15\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; (i) $25\text{ }^{\circ}\text{C/s}$

图 5 为不同焊接热输入条件下显微组织. 图 4a 是试验钢母材组织马氏体 (M). 焊接热输入为 25 kJ/cm 时 HAZ 组织主要为马氏体 (M), 并含有少量下贝氏体 (LB). 焊接热输入为 50 kJ/cm 时

HAZ 出现了上贝氏体 (UB) 组织, 以及部分粒状贝氏体 (GB). 进一步增加焊接热输入至 $75\sim 100\text{ kJ/cm}$, HAZ 组织类型未变化, 但粒状贝氏体所占比例有所增加.

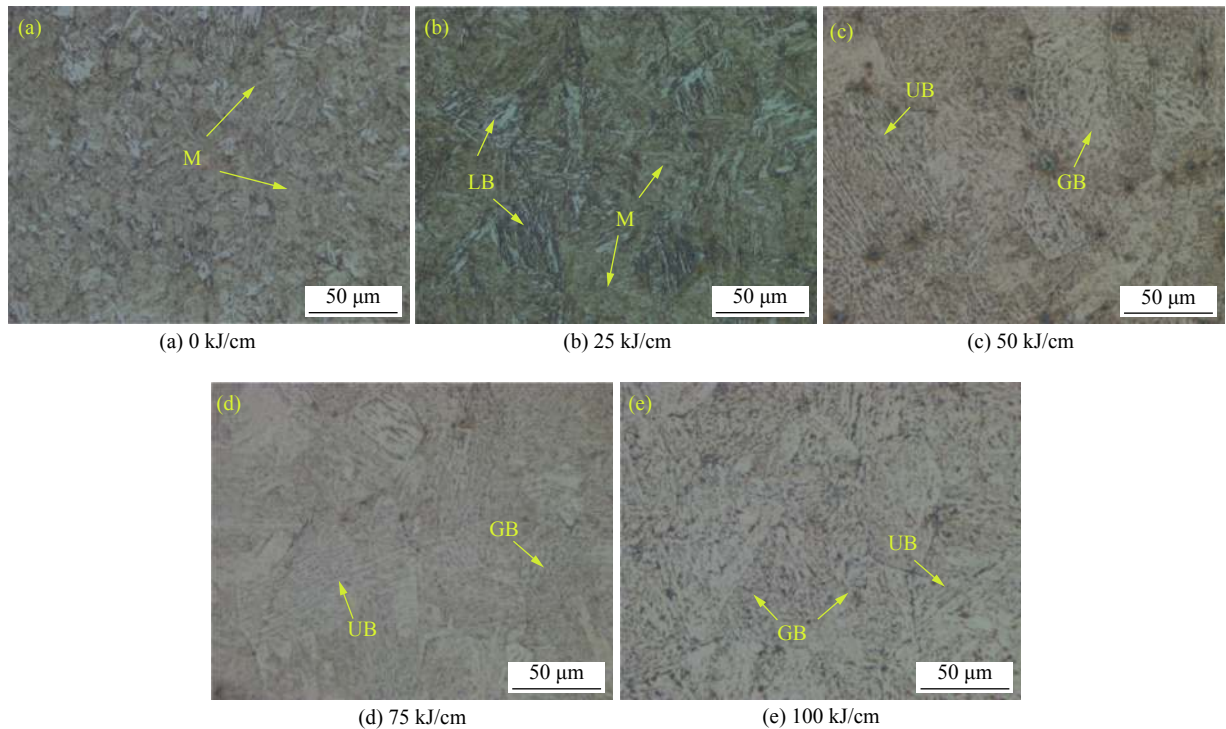


图 5 不同焊接热输入条件下显微组织

Fig. 5 OM images with different welding heat input. (a) 0 kJ/cm ; (b) 25 kJ/cm ; (c) 50 kJ/cm ; (d) 75 kJ/cm ; (e) 100 kJ/cm

2.3 焊接热影响区力学性能

钢材的冲击韧性主要与组织类型、晶粒尺寸、夹杂物或析出相的种类、分布、数量和尺寸等有关.

在焊接过程中, 由于 HAZ 经历了快速加热、高温停留及冷却过程, 组织和性能会发生变化, 使得 HAZ 成为焊接结构件韧性的薄弱区.

不同焊接热输入条件下, V 形夏比冲击吸收能量 (20 °C) 如图 6 所示. 不同焊接热输入焊接热影响区的硬度见图 7.

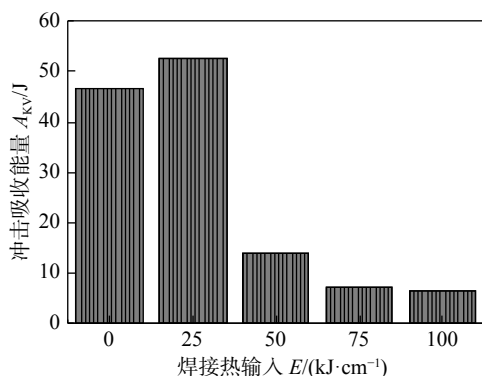


图 6 不同焊接热输入条件的夏比冲击吸收能量

Fig. 6 Impact absorbed energy with different heat input

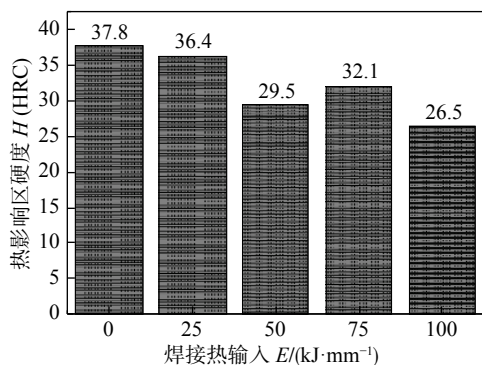


图 7 不同焊接热输入焊接热影响区硬度 (HRC)

Fig. 7 Hardness in HAZ with different heat input

当焊接热输入为 0 和 25 kJ/cm 时, 试样 HAZ 硬度较高; 进一步增加焊接热输入, HAZ 硬度降低. 焊接热输入对 HAZ 冲击韧性和硬度的影响趋势一致.

2.4 焊接热影响区原始奥氏体晶粒

不同焊接热输入试样原始奥氏体晶粒的平均尺寸如图 8. 焊接热输入为 0 kJ/cm 时, 原奥氏体晶粒尺寸大多数分布在 10 ~ 30 μm , 平均尺寸为 20.4 μm .

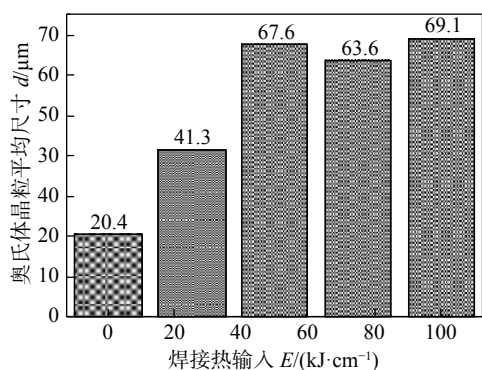


图 8 不同焊接热输入原始奥氏体晶粒平均尺寸

Fig. 8 Average original austenite size with different heat input

当焊接热输入值增加至 25 kJ/cm 时, HAZ 原奥氏体晶粒尺寸明显增加, 以 20 ~ 50 μm 为主, 平均尺寸为 41.3 μm . 当焊接热输入值为 50 kJ/cm 时, HAZ 原奥氏体晶粒尺寸继续增加, 主要分布在 50 ~ 90 μm , 平均尺寸为 67.6 μm . 继续增加焊接热输入至 75 和 100 kJ/cm 时, HAZ 原奥氏体晶粒的平均尺寸增加幅度趋缓.

3 分析讨论

3.1 焊接热影响区韧性下降及软化

试验钢在焊接热循环过程中, HAZ 在高温区域会停留一段时间, HAZ 过热区的温度将达到 1350 °C 左右, 奥氏体晶粒由于过热严重粗化, 甚至发生局部软化和脆化的现象, 粗大的晶粒会导致其冲击韧性下降. 通过分析热模拟后 HAZ 组织与性能, 焊接热输入为 0 ~ 25 kJ/cm 时, HAZ 冲击韧性和硬度值最高, HAZ 组织为马氏体和少量下贝氏体, 而且晶粒尺寸相对细小. 当焊接热输入大于 50 kJ/cm 时, 钢中生成了上贝氏体、粒状贝氏体, 且晶粒也逐渐长大, 结果极大地降低了 HAZ 冲击韧性. 同时, HAZ 硬度也下降, 导致试验钢 HAZ 出现软化现象. 因此, 在实际应用中对高强耐磨钢焊接接头组织与性能的控制非常重要.

3.2 热影响区中无针状铁素体

大量研究表明, HSLA 钢的焊缝力学性能与焊缝组织密切相关, 针状铁素体 (AF) 的增加, 焊缝的强度和韧性均提高. 试验用钢即使冷却速度减小到 0.5 °C/s, 钢中仍未生成针状铁素体组织, 这是因为 AF 是中温转变产物, 在 650 ~ 500 °C 之间形成, 一般碳含量控制在 0.05% ~ 0.15% 范围, 随着碳当量的增加, 焊缝中出现了粗大的马氏体组织, 易形成淬硬组织, 试验用钢碳含量为 0.18%, 不具备诱导针状铁素体的条件, 焊后组织多为马氏体和贝氏体组织.

4 结论

(1) 试验钢添加了 20×10^{-6} 稀土 Ce, 使用 Gleeble 3500 焊接热模拟机模拟了 4 种热输入下的热循环, 焊接热输入值为 25 kJ/cm 时, HAZ 冲击韧性和硬度值最高, 当焊接热输入值大于 50 kJ/cm 以上时, HAZ 出现韧性下降和软化.

(2) 焊接热输入值为 25 kJ/cm 时, HAZ 组织主要为马氏体, 晶粒尺寸细小. 当焊接热输入值大于 50 kJ/cm 时, 钢中生成了上贝氏体和粒状贝氏体,

晶粒也逐渐长大。

(3) 热模拟发现, 钢中未生成针状铁素体组织, 未发挥出钢中稀土夹杂物对焊接的有益作用, 这是因为试验钢的 C 含量为 0.18% 时, 在热循环中焊缝中出现了粗大的马氏体组织, 易形成淬硬组织, 不具备诱导针状铁素体的条件。

参考文献

- [1] 李少峰, 马成勇, 宋志刚, 等. 800 MPa 级高强钢焊接接头组织及力学性能 [J]. 焊接学报, 2020, 41(5): 91–96.
Li Shaofeng, Ma Chengyong, Song Zhigang, *et al.* Study on the welding joint microstructure and mechanical properties of 800 MPa grade high stress steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(5): 91–96.
- [2] 张洪涛, 桑健, 王琪晨, 等. TATM700 钢等离子-MIG 复合焊接工艺 [J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 25–30.
Zhang Hongtao, Sang Jian, Wang Qichen, *et al.* Research on plasma-MIG hybrid welding process of TATM700 steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 25–30.
- [3] Yang L, Jiang X H, Wang X H. Study on welding process performance of HG70D high strength steel plate[J]. China Welding, 2018, 27(3): 59–64.
- [4] 张元杰, 彭云, 马成勇, 等. Q890 高强钢焊接淬硬倾向和冷裂纹敏感性 [J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 53–56.
Zhang Yuanjie, Peng Yun, Ma Chengyong, *et al.* Harden quenching tendency and cold cracking susceptibility of Q890 steel during welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 53–56.
- [5] 苏小虎, 栗卓新, 李红, 等. 高强钢金属芯焊丝 E120C-K4 熔敷金属粗晶区显微组织对冲击韧性的影响 [J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 48–53.
Su Xiaohu, Li Zhuoxin, Li Hong, *et al.* Microstructure to properties of coarse grained heat affected zone in deposited weld metal of metal cored wire E120C-K4 SU[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 48–53.
- [6] 张继魁, 辛莹, 张曼曼. 汽车大梁用低合金高强度钢板性能与发展 [J]. 汽车工艺与材料, 2004(6): 42–46.
Zhang Jikui, Xin Ying, Zhang Manman. Property and development of high strength low alloy hot rolled steel sheet for truck frame use[J]. Automobile Technology & Material, 2004(6): 42–46.
- [7] 陆斌, 陈芙蓉, 智建国, 等. 应用稀土氧化物冶金技术改善高强钢焊接性能 [J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1206–1216.
Lu Bin, Chen Furong, Zhi Jianguo, *et al.* Enhanced welding properties of high strength steel via rare earth oxide metallurgy technology[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1206–1216.
- [8] 安同邦, 田志凌, 单际国, 等. 保护气对 1 000 MPa 级熔敷金属组织及力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2015, 51(12): 1489–1499.
An Tongbang, Tian Zhiling, Shan Jiguo, *et al.* Effect of shielding gas on microstructure and performance of 1 000 MPa grade deposited metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(12): 1489–1499.
- [9] 陆斌, 张军, 张文博, 等. 稀土耐磨钢绿色产品设计与研发 [J]. 包钢科技, 2019, 45(6): 6–9, 17.
Lu Bin, Zhang Jun, Zhang Wenbo, *et al.* Design and research for green products of wear-resistant steel with rare earth[J]. Sci. and Tech. of Baotou steel, 2019, 45(6): 6–9, 17.
- [10] 陈付红, 丁伟, 黄威, 等. 国外先进公司工程机械用高强钢发展现状 [J]. 上海金属, 2015(1): 47–51.
Chen Fuhong, Ding Wei, Huang Wei, *et al.* Developmet status of foreign high strength steel for engineering machinery[J]. Shanghai Metal, 2015(1): 47–51.
- [11] Lan L, Qiu C, Zhao D, *et al.* Microstructural characteristics and toughness of the simulated coarse grained heat affected zone of high strength low carbon bainitic steel[J]. Material Science & Engineering: A, 2011, 529(1): 192–200.
- [12] 张文博, 樊立峰, 陆斌, 等. 稀土 La 在包钢 CSP 无取向电工钢中的应用研究 [J]. 包钢科技, 2019, 45(6): 85–90.
Zhang Wenbo, Fan Lifeng, Lu Bin, *et al.* Application research on rare earth La in CSP non-oriented electrical steel of Baotou steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2019, 45(6): 85–90.
- [13] Kim S, Kang D, Kim T W, *et al.* Fatigue crack growth behavior of the simulated HAZ of 800 MPa grade high-performance steel[J]. Material Science & Engineering: A, 2011, 528(6): 2331–2338.
- [14] Lambert-Perlade A, Gourgues A F, Pineau A. Austenite to bainite phase transformation in the heat-affected zone of a high strength low alloy steel[J]. Acta Mater, 2004, 52(8): 2337–2348.
- [15] Shome M, Gupta O P, Mohanty O N. Effect of simulate thermal cycles on the microstructure of the heat-affected zone in HSAL-80 and HSLA-100 steel plates[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(3): 985–996.
- [16] 王龙妹. 稀土在低合金及合金钢中的应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
Wang Longmei. Application of rare earth in low alloy and alloy steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.
- [17] 余圣甫, 杨可, 雷毅, 等. 大热输入焊接高强度低合金钢热影响区的晶粒细化 [J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 17–19.
Yu Shengfu, Yang Ke, Lei Yi, *et al.* Grain refinement of heat affected zone of high strength low alloy steel by large heat input welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(3): 17–19.

第一作者简介: 陆斌, 1977 年出生, 博士研究生, 高级工程师; 主要从事稀土在钢中应用研究; 发表论文 20 余篇; Email: lubinbt@126.com.
通信作者简介: 陈芙蓉, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: cfr7075@163.com.