

工程机械用 960QT 钢焊接粗晶区组织及性能研究

刘旭辉^{1,3} 张波² 肖爱达³ 欧玲² 郝春晖²

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004; 2 湖南工业大学冶金与材料工程学院, 株洲 412000; 3 湖南华菱涟源钢铁有限公司技术中心, 娄底 417009)

摘要 采用热模拟技术研究了 960QT 高强钢不同 $t_{8/5}$ 条件下热影响区粗晶区 (CGHAZ) 的组织 and 性能, 获得热影响区连续冷却转变曲线。得到的结果为: $t_{8/5}$ 在 3~6 s, 硬度值变化不大, CGHAZ 组织为板条马氏体。 $t_{8/5} = 10$ s, 可见板条贝氏体, 随着 $t_{8/5}$ 的增加, 组织中板条贝氏体逐渐增加, 而板条马氏体逐渐减少, CGHAZ 显微硬度逐渐降低。当 $t_{8/5}$ 达到 150 s 后, 组织中出现粒状贝氏体, 显微硬度进一步降低。当 $t_{8/5} > 600$ s 后, 显微组织以粒状贝氏体为主。利用实测热影响区 $t_{8/5}$ 数据, 建立了 960QT 钢 $t_{8/5}$ 值与线能量 (E) 的关系式。 $t_{8/5}$ 为 30 s 时, 粗晶区显微硬度 (325 HV1) 与母材相当 (330 HV1)。焊接时应控制热输入, 使 $t_{8/5}$ 小于 30 s, 不预热条件下线能量应小于 1.4 kJ/mm。

关键词 960QT 钢 焊接热模拟 热影响区粗晶区 显微组织 硬度

Study on Structure and Performance of Coarse Grained Heat Affected Zone (CGHAZ) of Machinery Steel 960QT

Liu Xuhui^{1,3}, Zhang Bo², Xiao Aida³, Ou Ling² and Hao Chunhui²

(1 The State Key Lab of Rolling and Automation of Northeastern University, Shenyang 11004;
2 School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000;
3 Technical Center, Hunan Hualing Lianyuan Iron & Steel Co., Ltd., Loudi 417009)

Abstract The microstructure and property of the coarse grained heat affected zone (CGHAZ) of 960QT steel was studied under $t_{8/5}$ by using thermal simulation technology, and the continuous cooling transformation curve of the heat affected zone (SH-CCT diagram) was acquired. The results show that, the microstructure of the CGHAZ consists of lath martensite and the hardness values change little as $t_{8/5}$ is 3~6 s. When $t_{8/5} = 10$ s, lath bainite appears. With the increase of $t_{8/5}$, the lath martensite reduces and lath bainite increases, and the microhardness of CGHAZ gradually reduces. When $t_{8/5}$ reaches 150 s, granular bainite in structure is found the microhardness is further reduced. As $t_{8/5} > 600$ s, the CGHAZ mainly consists of granular bainite. Based on the measured heat affected zone $t_{8/5}$, the relationship between $t_{8/5}$ values and heat input E of steel 960QT is established. As $t_{8/5}$ is 30 s, the microhardness of CGHAZ (325 HV1) is equal to the base metal (330 HV1). So the heat input should be controlled to ensure that $t_{8/5}$ is less than 30 s. Under non-preheating conditions, the heat input should be less than 1.4 kJ/mm.

Material Index Steel 960QT, Welding Thermal Simulation, Coarse Grained Heat Affected Zone (CGHAZ), Microstructure, Hardness

随着工程机械向大型化、轻量化与高能效的方向发展, 高强工程机械用钢的强度级别不断增加, 对屈服强度为 960 MPa 级别的高强钢的需求也日益增大^[1]。焊接性能是影响高强钢作为焊接结构件的关键因素, 深入研究焊接性对其工程化应用具有重要意义。

高强钢经高温热循环后, 热影响区尤其是粗晶区晶粒粗化、生成马氏体-奥氏体 (M-A) 组元等, 降低焊接接头的冲击韧性^[2-6]。热影响区的韧性与 M-

A 组元的数量、形态、尺寸以及分布有着密切的关系。研究表明, 一般随着 M-A 组元数量的增加, 热影响区的脆性转变温度升高, 脆性增加^[7-12]。

本试验通过热模拟方法研究 960QT 高强钢热影响区粗晶区的组织和性能, 获得热影响区连续冷却转变曲线 (SH-CCT 图), 并建立 960QT 钢 $t_{8/5}$ (焊接后熔池从 800 °C 冷却到 500 °C 的时间) 值与线能量 E 的关系, 优化焊接线能量输入范围, 为实际工程机械构件焊接工艺提供参考。

表 1 960QT 钢化学成分/%

Table 1 Chemical components of steel 960QT /%						
C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ti
0.12 ~ 0.18	0.15 ~ 0.35	1.05 ~ 1.25	0.25 ~ 0.35	0.20 ~ 0.40	0.02 ~ 0.03	0.05 ~ 0.07

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters				
电流/A	电压/V	焊接时间/s	焊接速度/(mm · min ⁻¹)	线能量/(kJ · mm ⁻¹)
220	23.2	79	265.8	1.15

1 试验方法

试验采用钢厂生产的 8 mm 厚 960QT 低合金钢,主要化学成分见表 1。热处理工艺为淬火 + 高温回火。

利用差热分析法来确定 960QT 钢的相变温度 Ac_1 和 Ac_3 。将样品从室温加热到 1 000 °C,加热速度为 0.05 °C/s,保温时间为 15 min,测得升温过程中相变温度 Ac_1 、 Ac_3 。由膨胀法测得降温时的马氏体转变温度。

在 MMS-200 热力模拟试验机上进行焊接热影响区粗晶区热模拟试验,用热膨胀法测定试验钢的相变转变温度。样品为 $\Phi 6$ mm × 80 mm 的圆棒。以 100 °C/s 的速度加热至 1 320 °C,保温 1 s 后,以不同冷却速度冷却,设定 $t_{8/5}$ 时间分别为 3、4、6、10、20、30、60、150、300、600、1 000 s。

热模拟后的样品制样后利用 Leica 金相显微镜进行组织观察。利用维氏硬度计测量显微硬度,设置加载力为 1 kg,保持时间为 15 s。

在热模拟试验的基础上选取参数进行实际焊接试验(表 2),板厚 8 mm,焊丝直径为 1.2 mm 的 JM-120 焊丝,采用气体保护焊。

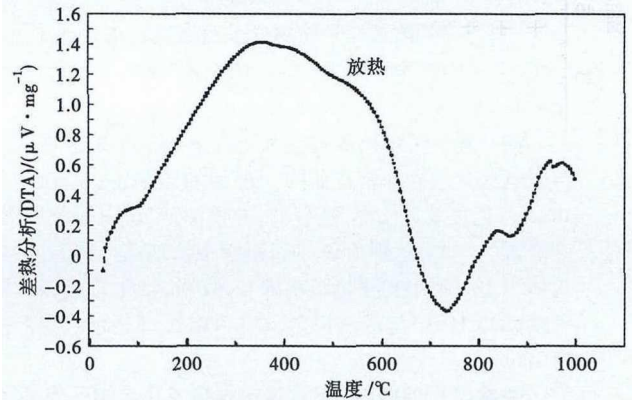


图 1 960QT 钢的差热分析(DTA)曲线
Fig. 1 Differential thermal analysis curve of steel 960QT

2 结果与分析

2.1 临界相变点的测定

差热分析测得 DTA(Differential Thermal Analysis) 曲线如图 1 所示,从图 1 中拐点处得到 960QT 钢的 Ac_1 和 Ac_3 分别为 733 °C 和 868 °C。在热模拟机上利用膨胀法测得马氏体相变点 Ms 为 450 °C。

2.2 显微组织及硬度分析

不同 $t_{8/5}$ 条件下 960QT 钢热影响区金相组织及比例分别如图 2 和图 3 所示。不同 $t_{8/5}$ 条件下,模拟

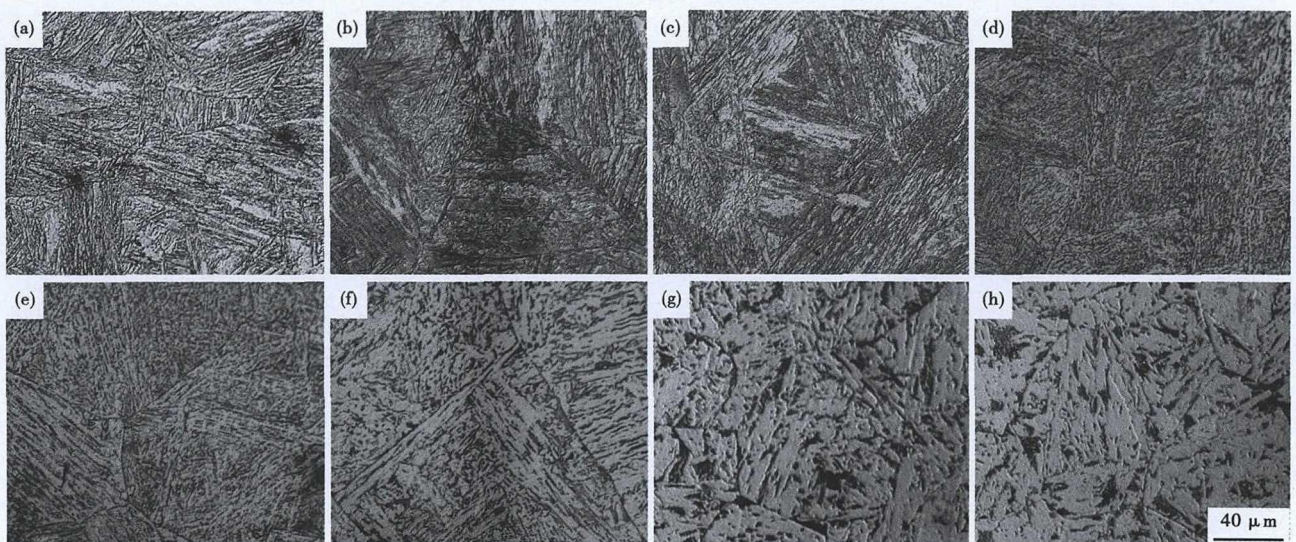


图 2 960QT 钢 $t_{8/5}$ 3 s(a),6 s(b),10 s(c),30 s(d),60 s(e),150 s(f),600 s(g)和1 000 s(h)时热影响区粗晶区的组织形貌
Fig. 2 Morphology of structure of CGHAZ for steel 960QT with $t_{8/5}$ (a) 3 s, (b) 6 s, (c) 10 s, (d) 30 s, (e) 60 s, (f) 150 s, (g) 600 s and (h) 1 000 s

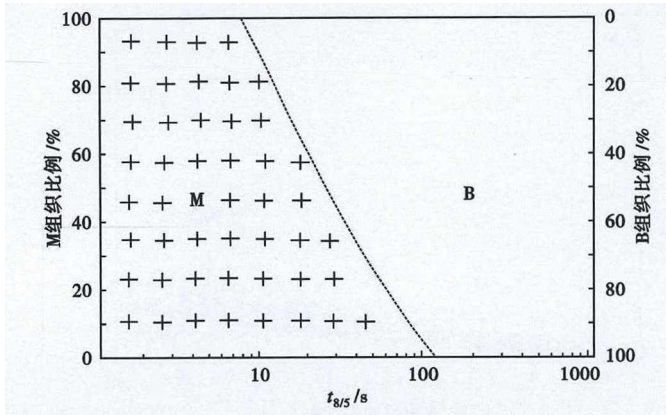


图 3 $t_{8/5}$ 对 960QT 钢热影响区粗晶区组织百分比的影响
Fig.3 Effect of $t_{8/5}$ on percentage of CGHAZ of steel 960QT

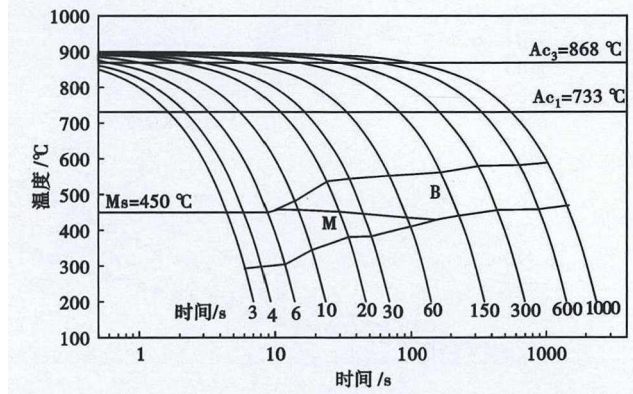


图 5 960QT 钢的焊接 SH-CCT 图
Fig.5 Weld SH-CCT diagram of steel 960QT

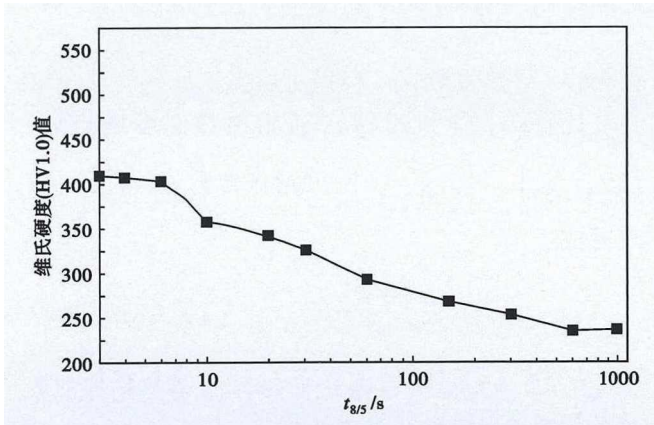


图 4 $t_{8/5}$ 对 960QT 钢热影响区粗晶区维氏硬度的影响
Fig.4 Effect of $t_{8/5}$ on Vickers hardness of CGHAZ of steel 960QT

焊接热影响区粗晶区的硬度变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, $t_{8/5}$ 在 3 ~ 6 s 时, 冷却速度很快, 硬度值几乎不变。 $t_{8/5}$ 为 3 s 时, 硬度最高, 达 409 HV1。由图 2(a ~ b) 可见, 晶粒尺寸相对较小, 组织为典型的板条马氏体。 $t_{8/5}$ 增加至 10 s, 如图 2(c) 所示, 主要为板条马氏体, 同时可见少量的板条贝氏体。结合图 3 分析可知, 随着 $t_{8/5}$ 的增加, 粗晶区组织中板条马氏体逐渐减少, 板条贝氏体逐渐增加, 对应图 4 中热影响区粗晶区显微硬度逐渐降低。当 $t_{8/5}$ 在 60 s 时, 晶粒尺寸增大, 以板条贝氏体为主, 硬度降为 293 HV1, 组织出现软化。当 $t_{8/5} = 150$ s 时, 图 2(f) 可见粒状贝氏体, 显微硬度进一步降低。当 $t_{8/5} > 600$ s 后, 显微组织以粒状贝氏体为主, 显微硬度变化不大。粒状贝氏体中弥散的颗粒状小岛 M-A 组元处容易形成微裂纹, 降低焊接热影响区的冲击韧性^[3,6-7]。此外, $t_{8/5} = 30$ s 时的维氏硬度值为 325 HV1, 与基材 (330 HV1) 接近。焊接时应控制热输入, 使 $t_{8/5}$ 小于 30 s, 以保证焊接接头的强度。

2.3 SH-CCT 图的建立

利用热模拟测得各 $t_{8/5}$ 条件下的热膨胀曲线, 确定相变温度, 得到试验用钢的 SH-CCT 曲线, 如图 5 所示。结合图 3 粗晶区组织分析结果, 随着 $t_{8/5}$ 的增大, 960QT 调质钢发生了 M、M+B 和 B 共 3 种类型的组织转变。当 $t_{8/5}$ 小于 6 s 时, 热影响区粗晶区发生完全的 M 转变; 当 $t_{8/5}$ 在 10 ~ 60 s 时, 粗晶区发生 M+B 相变; 当 $t_{8/5}$ 大于 150 s 时, 发生 B 转变。

2.4 $t_{8/5}$ 与线能量之间的关系研究

为了将 960QT 钢的 SH-CCT 图更方便的应用于实际焊接, 利用经验公式将 $t_{8/5}$ 与线能量及预热温度联系起来。

根据稻垣道夫等人建立的经验公式:

$$t_{8/5} = \frac{KE^n}{\beta(T - T_0)^2 \left[1 + \frac{2}{\pi} \text{tg}^{-1} \left(\frac{\delta - \delta_0}{\alpha} \right) \right]} \quad (1)$$

式中: E - 线能量/($\text{J} \cdot \text{cm}^{-1}$); I - 电流/A; U - 电压/V; v - 焊接速度/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); δ - 板厚/mm; T_0 - 被焊件的初始温度/ $^{\circ}\text{C}$; K - 焊接线能量系数, 取 0.345; n - 焊接线能量指数, 取 1.7; β - 接头系数, 取 1; δ_0 - 厚板补偿项, 取 13; α - 板厚修正系数, 取 3.5; T - 冷却区间的温度特征值, T 取 600°C 。

利用 D. Vwer (乌威) 的理论经验公式, 先确定临界板厚。

$$\delta_{cr} = \sqrt{\frac{0.043 - 4.3 \times 10^{-5} T_0}{0.67 - 5.0 \times 10^{-4} T_0} \eta E \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right)} \quad (2)$$

由公式(2), 取 $E = 12 \text{ kJ/cm}$, $\eta = 0.85$, $T_0 = 100^{\circ}\text{C}$, 算得临界板厚 $\delta_{cr} = 8.25 \text{ mm}$ 。本试验采用板厚小于 δ_{cr} , 因此符合二维传热条件。

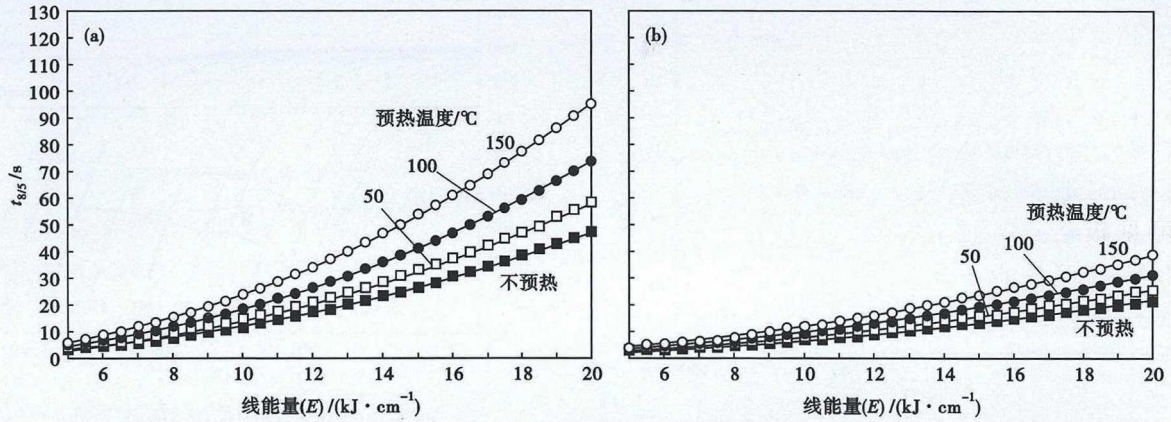


图 6 不同预热温度下经验公式计算的线能量与 $t_{8/5}$ 的关系曲线:(a)D. Vwer 公式;(b)稻垣道夫公式

Fig. 6 Relationship curve between line energy and $t_{8/5}$ calculated by different empirical formulas: (a) D. Vwer equation; (b) 稻垣道夫 equation

表 3 960QT 钢 $t_{8/5}$ 实测值与计算值

Table 3 Measured and calculated values of $t_{8/5}$ of steel 960QT

线能量(E)/ (kJ·cm ⁻¹)	预热温度 (T ₀)/°C	实测值	稻垣道夫 公式	D·Vwer 薄板公式	修正 公式
1.00	0	16.4	6.6	11.8	15.8
1.10	0	19.2	7.8	14.3	19.2
1.24	0	32.1	9.7	18.3	33.3
1.30	0	26.85	10.4	20.0	26.8
1.35	0	28.3	11.1	21.6	28.9
1.30	120	37.4	16.2	34.4	35.2
1.40	80	40.0	18.4	32.7	37.3
1.40	100	39.9	18.4	36.0	39.0
1.40	120	43.0	18.4	39.9	40.8
1.60	120	50.7	23.1	52.1	53.3
1.76	100	59.0	26.9	56.3	61.0

D. Vwer 的二维传热经验公式为:

$$\delta_{cr} = (0.043 - 4.3 \times 10^{-5} T_0) \cdot \frac{\eta^2 E^2}{\delta^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] F_2 \quad (3)$$

图 6 给出了按 D. Vwer 二维传热公式和稻垣道夫公式计算的不同预热温度下 $t_{8/5}$ 与线能量的关系曲线。采用热电偶对热输入为不同热输入及不同预热温度条件下 960QT 钢实际焊接接头冷却时间 $t_{8/5}$ 进行实测,其测量结果见表 3。

由于各级别低合金高强钢成分组织差异,其热容系数和热导系数也不相同。将热影响区实测 $t_{8/5}$ 值与计算值进行比较,发现实测结果与 D. Vwer 薄板公式计算结果最为相近。

根据表 3,960QT 钢实测的热影响区 $t_{8/5}$ 的结果,与 D·Vwer 薄板公式较为接近。

薄板焊接时二维传热公式为:

$$t_{8/5} = \frac{(E/\delta)^2}{4\pi\lambda c_p} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: λ - 导热系数; c_p - 容积比热容。

比较式(3)和式(4),初始预热温度确定后, $\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2$ 可看作常数 C 。公式(4)可写成:

$$t_{8/5} = f(T_0) \frac{\eta^2 E^2}{\delta^2} C F_2 \quad (5)$$

$f(T_0)$ 为与材料导热 λ 、比热容 c_p 等热物理常数相关的关于温度的函数表达式。

对表 3 中的数据进行拟合,推导出 960QT 钢的 $t_{8/5}$ 值与线能量 E 的关系式如下:

$$t_{8/5} = (0.0576 - 1.57 \times 10^{-4} T_0) \cdot \frac{\eta^2 E^2}{\delta^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] F_2 \quad (6)$$

根据式(6), $t_{8/5}$ 小于 30 s 时,不预热条件下线能量应控制小于 1.4 kJ/cm。

2.5 热模拟粗晶区与实际焊接接头粗晶区组织和硬度对比

选取 $t_{8/5}$ 为 20 s,利用推导出来的公式(6)计算得到线能量为 1.15 kJ/mm,对 960QT 钢进行实际焊接试验。实际焊接粗晶区平均 HV1 硬度为 340.1,与 $t_{8/5} = 20$ s 时热模拟结果(硬度 343.9 HV1)相近。图 7 为热模拟和实际焊接接头的粗晶区组织对比。由图 7(a)和(b)可见,均为板条马氏体+板条贝氏体。可见, $t_{8/5} = 20$ s 时热模拟粗晶区和实际焊接接头粗晶区组织和硬度一致,表明本文推导出来的 $t_{8/5}$ 和线能量的计算公式是可行的。

3 结论

(1)通过焊接热模拟试验,建立了960QT钢的

焊接热影响区连续冷却转变曲线(SH-CCT 图)。 $t_{8/5}$ 在 3~6 s 时,冷却速度很快,硬度值变化不大,晶粒尺寸相对较小,组织为典型的板条马氏体。 $t_{8/5} = 10$ s 可见板条贝氏体。随着 $t_{8/5}$ 的增加,热影响区粗晶区显微硬度逐渐降低,晶粒尺寸增大,对应组织中板条贝氏体逐渐增加,板条马氏体逐渐减少。 $t_{8/5} = 150$ s 粒状贝氏体的出现使显微硬度进一步降低。当 $t_{8/5} > 600$ s 后,显微组织以粒状贝氏体为主,显微硬度变化不大。

(2) 利用实测得到的热影响区 $t_{8/5}$ 数据,建立了 960QT 钢 $t_{8/5}$ 值与线能量 E 的关系式如下:

$$t_{8/5} = (0.0576 - 1.57 \times 10^{-4} T_0) \frac{\eta^2 E^2}{\delta^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] F_2$$

实际焊接表明, $t_{8/5}$ 为 20 s 时热模拟和利用该公式计算出来的对应线能量 $E = 1.15$ kJ/mm 时粗晶区的组织和硬度是一致的。

参考文献

- [1] 李 扬, 刘汉武, 杜云慧, 等. 汽车用先进高强钢的应用现状和发展方向[J]. 材料导报, 2011, 25(13):101-104.
- [2] 刘政军, 芦延鹏, 苏允海, 等. 纵向磁场对 WQ960 钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(4):379-383.
- [3] 杨 林, 宋岱岳, 刘 洋, 等. 退火对 BWELDY960QL 焊接接头组织与性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(2):161-165.
- [4] 陈 伟, 闫强军, 张仪杰. 高强度工程机械用钢 Q960E 焊接试验研究[J]. 宽厚板, 2018, 24(1):7-9.
- [5] 王芝玲, 委福祥, 于跟喜. 强度匹配对 WELDOX960 钢焊接接头组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(5):175-177.
- [6] 许 红, 李亚江, 马群双, 等. 液压支架用 Q890/Q960 高强钢焊接裂纹敏感性研究[J]. 现代焊接, 2014, 31(6):30-33.
- [7] 王芝玲. 强度匹配对 WELDOX960 钢焊接接头组织与性能的影响[C]//中国职协 2015 年度优秀科研成果获奖论文集. 2015.
- [8] 田德允, 张瑞成, 翁志刚, 等. 微合金高强钢焊接热影响区中粒状贝氏体微观结构的实验研究[J]. 金属学报, 2000, 36(2):181-186.
- [9] 崔 冰. 工程机械用 960MPa 级高强钢焊接热影响区组织与性能研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2016.
- [10] 曹志民, 张贵锋, 张建明, 等. Q690C 粒状贝氏体钢 MAG 焊接接头中 M-A 组元的演变及其对热影响区冲击韧度的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20):84-92.
- [11] 王爱华. 焊接材料对海洋平台用高强钢接头组织和低温韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15):178-180.
- [12] 许 冰, 陈春焕, 陈增有, 等. WELDOX960E 高强钢 MAG 焊接接头组织形态与力学性能研究[J]. 制造技术与机床, 2013, 42(12):60-63.

刘旭辉(1974-),男,博士生(东北大学),高级工程师,2000年东北大学(本科)毕业,产品研发与工艺研究。

E-mail:fg211@163.com

收稿日期:2018-08-08

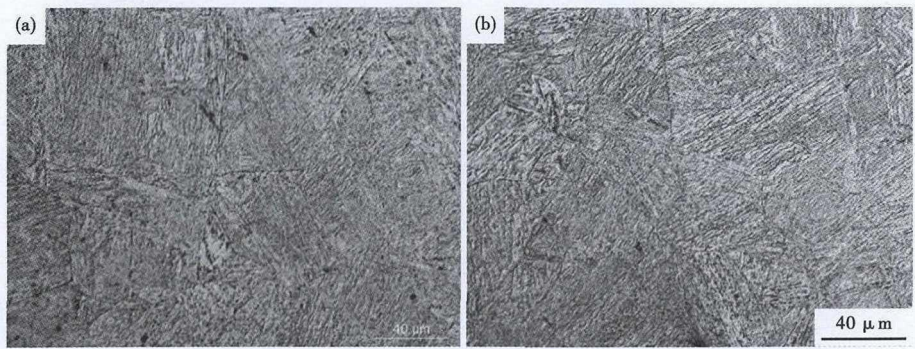


图 7 热模拟试样 (a) $t_{8/5}$ 20 s, HV1 值 343.9 和实际焊接 (b) E 1.15 kJ/mm, HV1 值 340.1 热影响区粗晶区显微组织

Fig. 7 Microstructure of CGHAZ in thermal simulation samples (a) $t_{8/5}$ 20 s, HV1 value 343.9 and actual welding (b) E 1.15 kJ/mm, HV1 value 340.1

(3) 根据 SH-CCT 图,当 $t_{8/5}$ 为 150 s 时,出现粒状贝氏体,会导致冲击韧性的降低,应予以避免。当 $t_{8/5}$ 为 30 s 时,粗晶区显微 HV1 硬度值为 325 与母材相当(HV1 硬度值为 330),对应的组织为板条马氏体+板条贝氏体。焊接时应控制热输入,使 $t_{8/5}$ 小于 30 s,以保证焊接接头的强度。结合推导的 960QT 钢 $t_{8/5}$ 值与线能量 E 的关系表达式,不预热条件下线能量应小于 1.4 kJ/mm。