

海上风电用S460钢焊接性能研究

黄传清¹, 毛凌波², 胡战¹

1. 宝钢湛江钢铁有限公司 广东湛江 524072

2. 广东工业大学 广东广州 510006

摘要: 为了研究海上风电用钢的焊接接头性能,以S460钢为研究对象,采用焊接热模拟方法对其焊接热影响区粗晶区进行了热模拟,建立了连续冷却组织转变图,并对粗晶区不同热输入的热影响区组织与性能特征进行了研究。结果表明:S460钢对焊接热输入具有较好的适应性,焊接接头具有优良的综合性能,热影响区具有较低的淬硬性,可以满足大容量风电用高性能厚板大热输入焊接的技术要求。

关键词: S460钢; 焊接热输入; 焊接热模拟; 连续冷却组织转变图; 热影响区

Research on welding performance of S460 steel for offshore wind power

HUANG Chuanqing¹, MAO Lingbo², HU Zhan¹

1. Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524072, Guangdong, China

2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China

Abstract: In order to study the welding joint performance of steel for offshore wind power, this work takes S460 steel as the research object, and uses welding thermal simulation method to simulate the coarse grain zone in its welding heat affected zone. Continuous Cooling Transformation Diagram are established, and the microstructure and performance characteristics of the heat affected zone with different line energies in the coarse grain zone are studied. The research results indicate that S460 steel has good adaptability to welding wire energy, welding joints have excellent comprehensive performance, and the heat affected zone has low hardenability, which can meet the technical requirements of high-performance thick plate large wire energy welding for large capacity wind power.

Keywords: S460 steel; weld energy input; welding thermal simulation; Continuous Cooling Transformation Diagram; heat affected zone

1 序言

在材料的焊接过程中,焊缝两侧的各个不同位置经历着不同的热过程,距焊缝边界越近,其加热的峰值温度越高,加热速度和冷却速度也越大。焊接热影响区各个部位所经历的焊接热循环,实质上是各自在进行着一个特殊的热处理过程^[1]。这种特殊热处理过程将使焊接接头中的母材微观组织产

生变化,并使其性能发生改变。尤其是焊接热影响区中的粗晶区,随着焊接热输入的增大,在高温阶段奥氏体显著粗化,在后续冷却过程中得到粗大组织,从而发生脆化,常成为焊接接头中最薄弱的部位。在低合金高强度结构钢焊接时,因为焊接热影响区粗晶区的组织及过冷奥氏体的转变在很大程度上决定了焊接区的性能,所以研究钢种在焊接热循

基金项目:广东省促进经济高质量发展专项资金海洋经济发展资助项目(GDOE[2019]A08号)。

环作用下热影响区粗晶区的组织和性能变化特征,对于深入了解焊接接头性能以及防止焊接裂纹的产生是十分重要的^[2]。

本项目以S460钢为研究对象,采用焊接热模拟方法对其焊接热影响区粗晶区进行热模拟,建立连续冷却组织转变图,并对不同热循环条件下的模拟热影响区粗晶区组织与性能特征进行研究。

2 试验材料和测试工艺

试验钢板采用工业性试制的S460钢,化学成分为: $w_C=0.088\%$ 、 $w_{Si}=0.078\%$ 、 $w_{Mn}=1.55\%$ 、 $w_P=0.014\%$ 、 $w_S=0.005\%$ 、 $w_{Cu}=0.276\%$ 、 $w_{Ti}=0.014\%$ 、Ni、Nb和Mo元素适量。焊接热模拟试验在Gleeble3800热模拟试验机上进行,焊接连续冷却组织转变图测试试样取自厚度为60mm的试验钢板,钢板状态为TMCP,试样尺寸 $\phi 6\text{mm} \times 90\text{mm}$ (轧向取样);焊接热影响区模拟试样尺寸为 $11\text{mm} \times 11\text{mm} \times 90\text{mm}$ (横向取样)。

2.1 S460钢焊接连续冷却组织转变图绘制

试样在加热和冷却过程中,随着温度的变化,一方面随温度变化试样要膨胀或收缩,另一方面当发生相变时,同样会引起试样体积的变化并释放相变热。Gleeble3800的数据采集系统,以时间为同一基轴随时记录温度与试样直径的变化,通过应变仪测量试样直径的变化来间接地判断相变的发生。模拟焊接热循环的典型曲线如图1所示,其中, T_{peak} 为峰值温度, t_{peak} 为试样从室温加热到峰值温度所需的时间, t_{1000} 为从峰值温度冷却到 1000°C 的时间, 800°C 冷却至 500°C 时间为 $t_{8/5}$ ^[3]。在 $200\sim 1000^\circ\text{C}$ 内试样以同一冷却速度冷却,从而在膨胀曲线分析时可以根据切线法进行相变点的确定,其中, $T_p=1350^\circ\text{C}$, $t_{8/5}$ 选择3s、5s、7s、15s、25s、45s、70s、100s、200s、300s、500s和1200s。

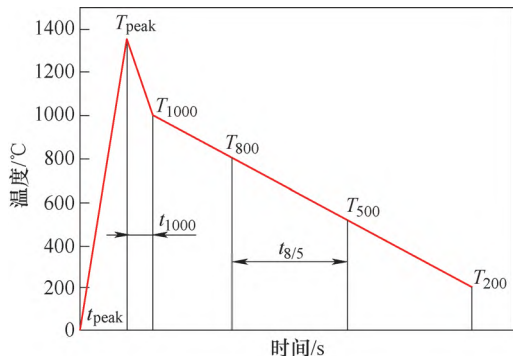


图1 SH-CCT测试用焊接热循环曲线

将焊接连续冷却组织转变图测试试样沿热电偶处所在的横截面切开,磨平抛光后采用3%的硝酸酒精腐蚀,然后在光学显微镜下观察不同热循环条件下的金相组织特征。维氏硬度试验在FV-700型试验机上进行,选择10kg(98N)的载荷,在金相试样沿半径1/4处进行硬度检测,每个试样平均检测3点,取其平均值。

2.2 S460钢焊接热影响区模拟

在S460钢的焊接热模拟试验研究中,模拟厚度60mm钢板所经历的焊接热过程,加热速度为 200°C/s ,高温停留时间为5s,峰值温度为 1350°C , $t_{8/5}$ 选择10s、20s、33s、45s和100s,相当于60mm试板在层间温度为 150°C 时热输入为 17kJ/cm 、 34kJ/cm 、 56kJ/cm 、 76kJ/cm 、 113kJ/cm ,基本涵盖了从小热输入到大热输入范围。同一个程序做4个试样,经焊接热循环模拟后,将其中3个试样加工成标准V型缺口冲击试样,进行冲击性能试验;将另一个试样沿热电偶所在的横截面切开,按常规金相检测方法对模拟焊接热影响区的组织进行观察和分析。

硬度检测在FV-700硬度计上进行,该硬度计通过计算机实现检测点位置的精确控制,并通过显示屏对检测点进行硬度值测定,硬度检测时载荷为98N,每个试样测试3点,取3点的平均值作为该模拟规范条件下焊接热影响区的硬度。将热模拟试样加工成 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ 的标准冲击试样,冲击缺口为V型,在 -40°C 低温下进行冲击试验。

3 试验结果与分析

3.1 S460钢焊接连续冷却组织转变图

根据不同冷却速度测定的热膨胀曲线确定相变点,再结合金相组织与维氏硬度结果,可以绘制出S460钢的焊接连续冷却组织转变图。S460钢的金相组织、焊接连续冷却组织转变图和硬度曲线分别如图2~图4所示。

由图2可知,S460钢基材的显微组织是贝氏体+铁素体;在极快的冷却条件下($t_{8/5}=3\sim 5\text{s}$),没有得到完全的马氏体组织,组织为马氏体+贝氏体;在快速冷却或小热输入时($t_{8/5}=7\sim 15\text{s}$),所得组织主要为具有板条特征的贝氏体。随着热输入的增加,贝氏体板条特征变得不明显。 $t_{8/5}>100\text{s}$ 时开始形成铁素体组织, $t_{8/5}>200\text{s}$ 时开始形成珠光体组织,在较宽的热输入范围内($t_{8/5}=3\sim 1200\text{s}$)均

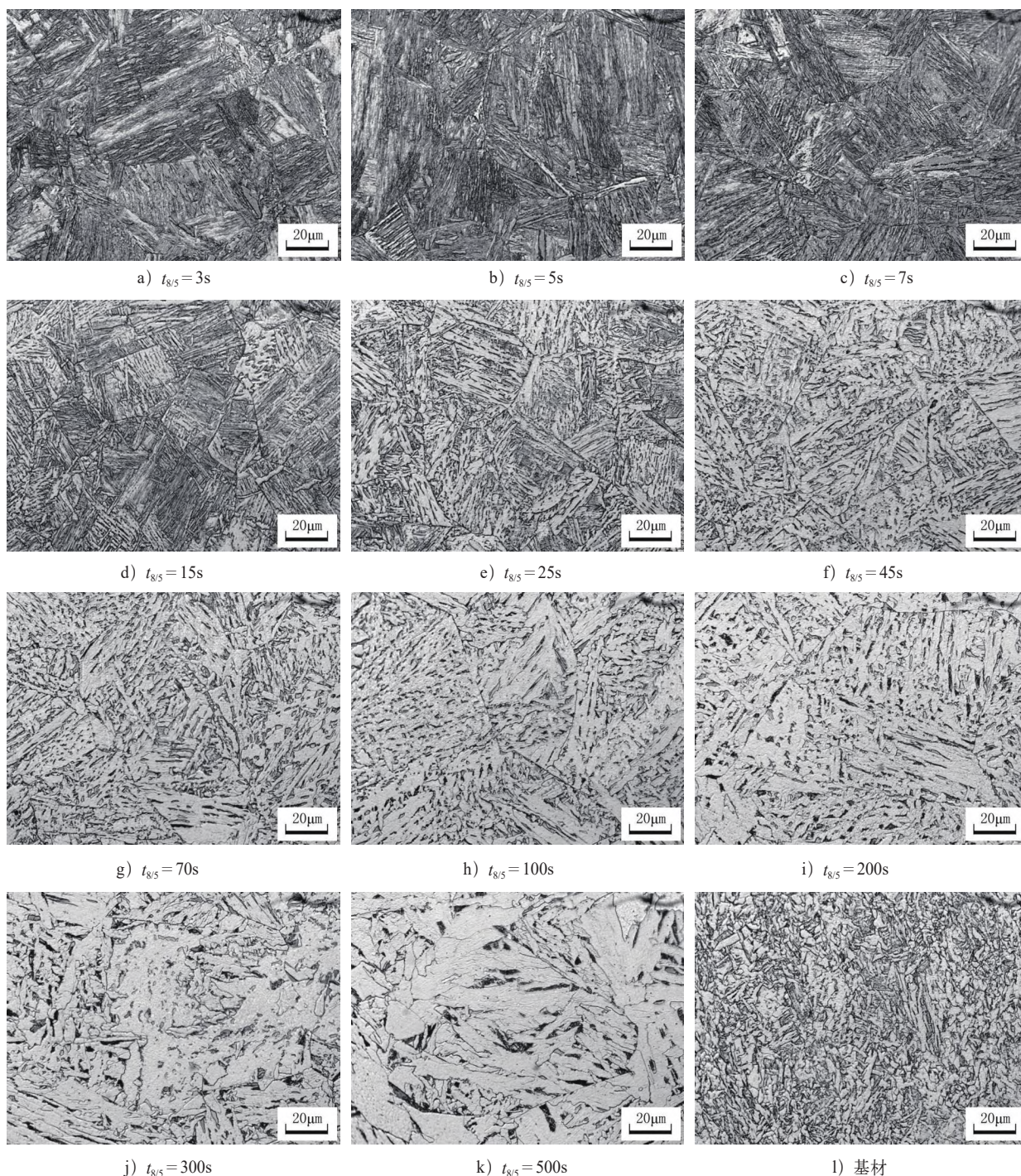


图2 S460钢焊接试样金相组织

有贝氏体组织产生。

焊接连续冷却组织转变图可以提供最佳冷却速度或冷却时间范围，确保焊接热影响区获得理想的组织和性能，即确定钢种适宜的焊接热输入范围或实际冷却时间最佳范围^[4]。当通过调整焊接参数仍不能实现最佳的冷却速度或冷却时间时，预热、缓冷、后热或焊后热处理等是比较有效的工艺措施。

制定合理的焊接工艺规范，关键的问题是控制冷却速度或冷却时间。在一般的情况下，当冷却速度太快或冷却时间太短时，容易产生冷裂纹，而当冷却速度太慢或冷却时间太长时，往往使热影响区发生软化或粗化，使韧性变差。因此，根据S460钢焊接连续冷却组织转变图（见图3）和硬度曲线（见图4）可知，在快速冷却或小热输入时（ $t_{8/5}=7\sim$

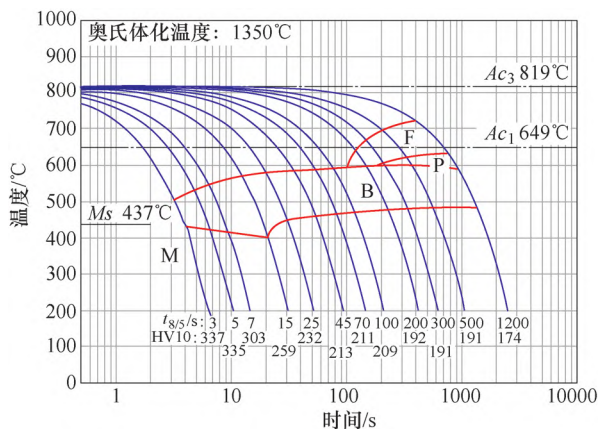


图3 S460钢焊接连续冷却组织转变图

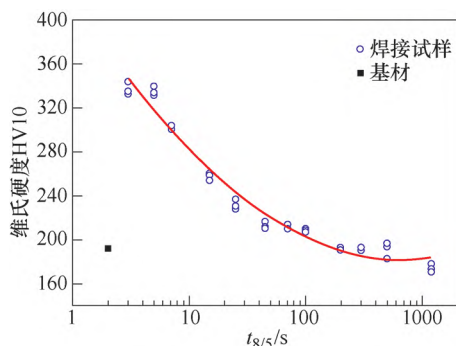


图4 S460钢焊接连续冷却组织转变图试样维氏硬度曲线

15s), 维氏硬度平均值为259~303HV10, 说明钢种焊接热影响区淬硬倾向低, 有助于提高钢板抗冷裂纹能力, 因此确定冷却时间的下限, 即 $t_{8/5}$ 为7s, 根据大规范焊接不软化要求, 确定冷却时间的上限, 基材硬度平均值为192HV10, 在 $t_{8/5} \leq 500$ s时, 焊接热影响区粗晶区硬度平均值高于或与基材持平, 因此大致确定实际冷却时间 $t_{8/5} = 7 \sim 500$ s。除了保证焊接热影响区不发生软化, 还应保证焊接热影响区不发生脆化, 因此需要进一步进行焊接热影响区模拟试验。

3.2 S460钢模拟焊接热影响区韧性特征

不同热输入的模拟焊接热影响区粗晶区的冲击性能如图5所示。在 $t_{8/5} = 10$ s时, -40°C 平均冲击吸收能量可达到175J以上, 随着 $t_{8/5}$ 的增大, 粗晶区的冲击吸收能量略呈下降趋势, 当 $t_{8/5}$ 达到100s时, -40°C 平均冲击吸收能量仍保持较高水平, 为89J。冲击性能试验结果说明, 在 $t_{8/5} = 10 \sim 100$ s (60mm试板热输入为17~113kJ/cm) 的焊接参数条件下, S460钢焊接粗晶区具有较高的低温冲击性能, 冲击吸收能量可达到89J以上, 对热输入具有较好的适应性。

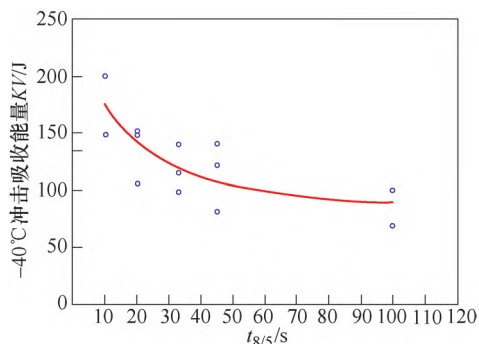


图5 S460钢不同热输入焊接热模拟样品的冲击性能

3.3 S460钢模拟焊接热影响区硬度特征

不同热输入条件下S460钢焊接粗晶区模拟试样的硬度曲线如图6所示。由图6可知, 基材的维氏硬度平均值为192HV10, 当 $t_{8/5} = 10$ s时, 粗晶区的硬度平均值为230HV10, 说明S460钢焊接热影响区淬硬倾向小。随着模拟热输入的增加, 粗晶区硬度值呈下降趋势。 $t_{8/5} = 10 \sim 100$ s时, 粗晶区的维氏硬度平均值为185~230HV10, 高于或基本与基材持平, 粗晶区未出现明显软化现象。

硬度试验说明, S460钢焊接影响区具有较低的淬硬倾向, 有助于提高钢板的抗焊接冷裂纹能力。在较大热输入 (60mm试板热输入为113kJ/cm) 焊接时, 粗晶区未发生明显软化现象, 从强度角度来看, 60mm试板S460钢对热输入范围具有较好的适应性。

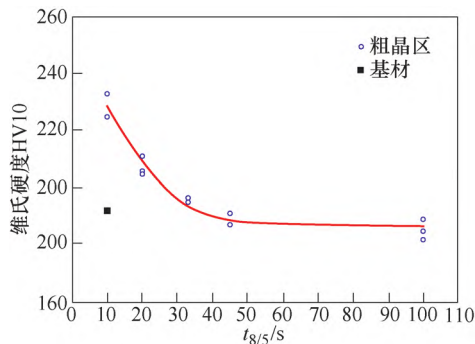


图6 S460钢不同热输入热模拟试样硬度曲线

3.4 S460钢模拟焊接热影响区的金相组织

不同焊接热输入条件下模拟焊接热影响区的金相组织如图7所示。由图7可知, 在 $t_{8/5} = 10 \sim 100$ s的热输入范围内, 焊接热影响区粗晶区主要为贝氏体组织。 $t_{8/5} = 10 \sim 20$ s时, 贝氏体条特征明显。随着热输入增加, 贝氏体条特征不明显。S460钢焊接热影响区粗晶区在 $t_{8/5} = 10 \sim 100$ s的热输入范围内主要发生中温转变。

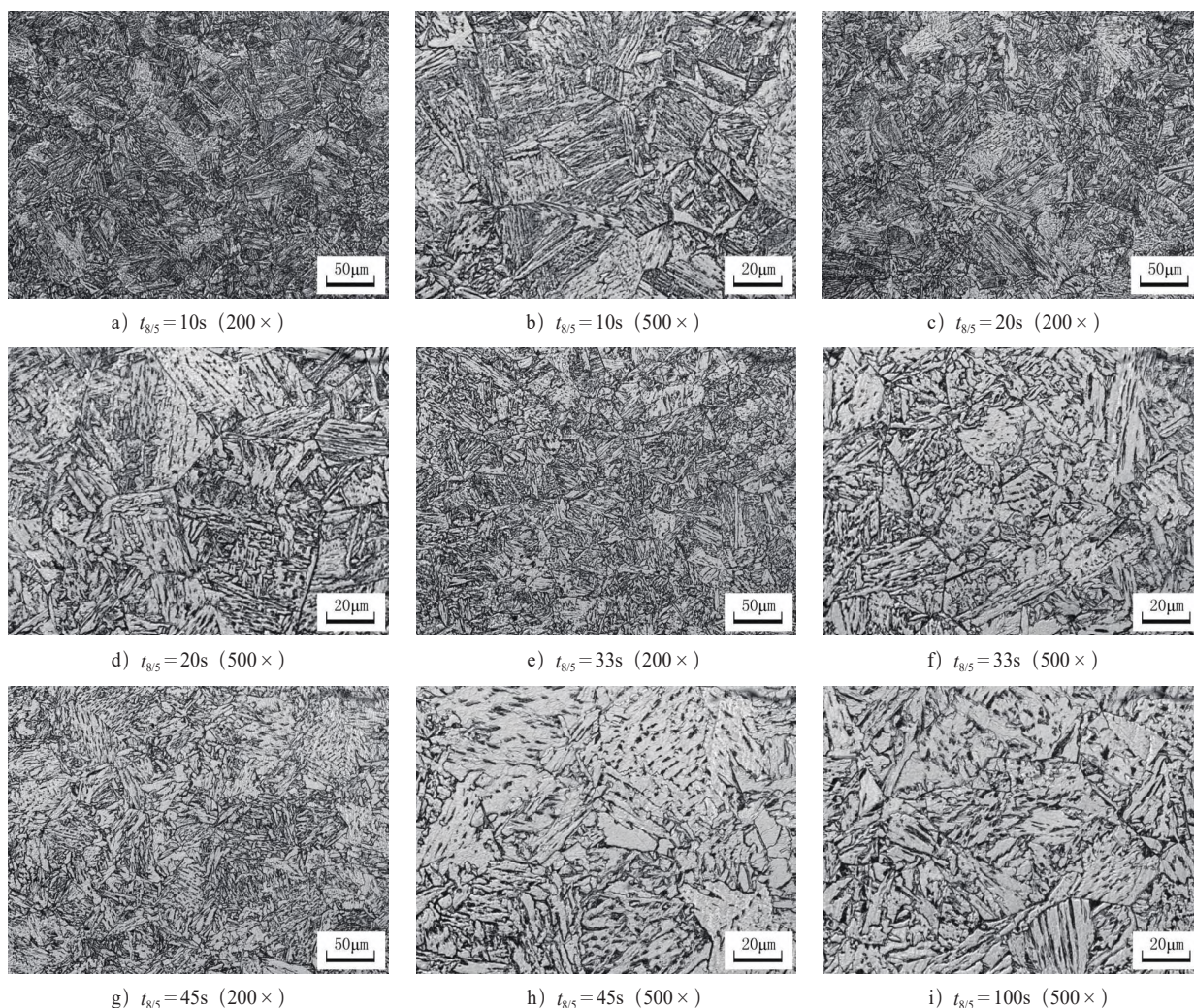


图7 S460钢不同热输入焊接热模拟试样金相组织

4 结束语

通过焊接热影响区粗晶区连续冷却组织转变图测试及不同热循环条件下的热模拟试验,对S460钢焊接热影响区粗晶区的组织、性能变化进行了研究和分析,可得出如下结论。

1) S460钢对焊接热输入具有较好的适应性。模拟焊接热影响区粗晶区当 $t_{8/5} = 10 \sim 100s$ 时,具有较高的低温冲击性能, $-40^{\circ}C$ 冲击吸收能量 $\geq 89J$,相当于60mm试板热输入 $17 \sim 113kJ/cm$ 。

2) S460钢焊接热影响区具有较低的淬硬性, $t_{8/5} = 3s$ 时,粗晶区平均硬度值337HV10, $t_{8/5} = 10 \sim 100s$ 时,粗晶区维氏硬度平均值为185~230HV10,粗晶区未出现明显软化现象。

3) S460钢焊接热影响区粗晶区 $t_{8/5}$ 在 $10 \sim 100s$ 内发生中温转变,组织主要为贝氏体。

参考文献:

- [1] 李光, 徐学利, 张骁勇, 等. X100管线钢焊接热影响区不同区域的显微组织与冲击韧性[J]. 机械材料, 2023, 47 (9) : 41-45.
- [2] 王树明, 张兵兵, 智敏. 低合金高强度钢的焊接性研究[J]. 金属加工 (热加工), 2011 (18) : 44-45.
- [3] 王春生, 周振丰. 低合金奥-贝球铁焊接峰值温度 (T_m) 对热影响区组织与力学性能的影响[J]. 吉林工业大学学报, 1997 (1) : 28-32.
- [4] 木热迪尔·夏克尔, 黄安国, 康旭强, 等. 低合金钢焊接热影响区组织比例计算及预测[J]. 材料开发与应用, 2023, 38 (5) : 44-50.

MW 20240820