

# 低合金高强钢 Q550D 焊接工艺研究

张凤明, 付学义, 郎荣彪

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**通过采用裂纹敏感指数及预热温度理论计算、斜 Y 型坡口焊接裂纹敏感性试验及钢板焊接工艺性试验相结合的方法, 对比分析不同焊接工艺下接头力学性能及微观金相组织, 确定了采用 JM-100 焊丝及 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> 的富氩气体, 焊接 20 mm 厚 Q550D 钢板, 裂纹敏感指数为 0.28, 最低预热温度为 13 °C, 焊接时无需进行预热处理。焊接热输入量控制在 9.0 ~ 24.8 kJ/cm 之间, 焊接道次间温度控制在 200 °C 以下, 接头各项力学性能指标达到最佳, 且焊缝及热影响区均未出现粗大及异常组织。

**关键词:** Q550D 低合金高强钢; 焊接工艺; 冷裂纹敏感性; 接头组织性能

中图分类号: TG457.11

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)03-0049-05

## Research on Welding Technology of Low Alloy High Strength Steel Q550D

Zhang Feng-ming, Fu Xue-yi, Lang Rong-biao

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,  
Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In this paper, the mechanical properties and metallographic structure of the joint with different welding technologies are compared and analyzed with the theoretical calculations of crack sensitivity index and preheating temperature as well as the methods of inclined Y-groove welding crack sensitivity test combining with operative weldability test of steel plate. Moreover, the JM-100 welding wire and 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> argon-rich gas are determined to be adopted for welding the Q550D steel plate with thickness of 20 mm. The crack sensitivity index is 0.28, minimum preheating temperature is 13 °C and preheating treatment is not needed during welding. The welding heat input is controlled at 9.0 ~ 24.8 kJ/cm, temperature between weld passes is controlled below 200 °C, mechanical properties of joint reach the best and there are no coarse and abnormal structures in weld seam and heat affected zone.

**Key words:** Q550D low alloy high strength steel; welding technology; cold crack sensitivity; microstructure and property of joint

Q550D 钢是包头钢铁(集团)有限责任公司开发的屈服强度为 550 MPa 级低合金高强钢, 钢板经过调质处理后具有优良的低温韧性, 主要用于工程和矿山机械<sup>[1]</sup>。本文根据包钢生产的 20 mm 厚低合金高强钢 Q550D 化学成分及力学性能, 依据焊接性试验方法及焊接工艺评定方法, 采用裂纹敏感指

数及预热温度理论计算、斜 Y 型坡口焊接裂纹敏感性试验及钢板焊接工艺性试验相结合的手段, 进行了试验研究及评定, 确定了采用 JM-100 焊丝焊接 20 mm 厚 Q550D 钢板的焊接工艺参数及窗口, 为工程应用提供数据支撑。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

试验用 20 mm 厚低合金高强钢 Q550D 的钢板

化学成分如表 1 所示。钢板母材的拉伸试样为全厚度板状试样,其轴线垂直于轧向;冲击试样取自钢板轧制面下 2 mm 处,缺口开在钢板的厚度方向。20 mm 厚 Q550D 钢板拉伸及低温冲击性能见表 2。

表 1 Q550D 钢板化学成分

| 牌号    | 板号      | 化学成分(质量分数)/% |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|---------|--------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       |         | C            | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo    | V     | Nb    | Al    | Ti    |
| Q550D | 1004584 | 0.086        | 0.36 | 1.82 | 0.011 | 0.004 | 0.148 | 0.122 | 0.058 | 0.046 | 0.004 | 0.028 | 0.012 |

表 2 Q550D 钢板拉伸、冲击性能及标准要求

| 牌号            | 板号      | 板厚<br>/mm | 力学性能                |                  |        |  |           |     |
|---------------|---------|-----------|---------------------|------------------|--------|--|-----------|-----|
|               |         |           | $R_{el}/\text{MPa}$ | $R_m/\text{MPa}$ | $A/\%$ | $KV_2(-20\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$ |           |     |
| Q550D         | 1004584 | 20        | 645                 | 725              | 16.5   | 218  | 205       | 222 |
| GB/T 16270 要求 |         | $\leq 50$ | $\geq 550$          | 640 ~ 820        | 16.0   |  | $\geq 47$ |     |

试验用 Q550D 钢板显微组织为典型的回火索氏体,见图 1。

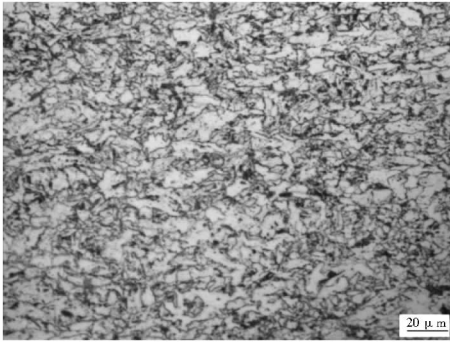


图 1 Q550D 钢板显微组织

由表 1、表 2 可知,试验用 20 mm 厚 Q550D 钢

板的化学成分、力学性能均满足 GB/T 16270—2009 标准要求<sup>[2]</sup>,且钢板的力学性能余量较大。

### 1.2 焊接试验设备及焊丝

本试验采用的焊接设备为 OTC - DP500 焊机和 HK - 100K 型摆动式自动焊接小车,焊接保护气体采用 80% Ar + 20% CO<sub>2</sub> 的富氩气体,气体流量控制在 15 ~ 20 L/min 之间,试验焊丝选用 JM - 100 实心焊丝,焊丝详细力学性能见表 3。

由表 3 可知,本试验按照等强匹配焊丝选用原则,焊接试验选用的焊丝抗拉强度、屈服强度均与母材等级相当,焊丝的断后伸长率及低温冲击功也满足低合金高强钢 Q550D 钢板焊接试验要求。试验选用的 JM - 100 实心焊丝熔敷金属扩散氢含量为 2.65 ml/100 g,属于超低氢型焊丝,小于标准要求的 5 mL/100 g,满足焊接试验要求。

表 3 JM - 100 实心焊丝力学性能

| 试验焊丝     | 直径/mm | 批号           | $R_{el}/\text{MPa}$ | $R_m/\text{MPa}$ | $A/\%$ | $KV_2(-20\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$ |     |     |
|----------|-------|--------------|---------------------|------------------|--------|--|-----|-----|
| JM - 100 | 1.2   | 2012 - 4 - 1 | 655                 | 730              | 23     | 106  | 110 | 120 |

## 2 试验结果及分析

### 2.1 裂纹敏感指数及预热温度理论计算

对 Q550D 钢板碳当量、焊接裂纹敏感指数及理论预热温度<sup>[3]</sup>进行理论计算分析。

碳当量:

$$CE = \omega(C) + \omega(\text{Mn})/6 + [\omega(\text{Cu}) + \omega(\text{Ni})]/15 + (\omega(\text{Cr}) + \omega(\text{Mo}) + \omega(\text{V}))/5$$

裂纹敏感指数:

$$P_{cm} = \omega(C) + \omega(\text{Si})/30 + [\omega(\text{Mn}) + \omega(\text{Cu}) + \omega(\text{Cr})]/20 + \omega(\text{Ni})/60 + \omega(\text{Mo})/15 + \omega(\text{V})/10 + 5\omega(\text{B})$$

冷裂纹敏感性:

$$P_w = P_{cm} + 100 \times H_{DM}/60 + h/600 \text{ 或}$$

$$P_w = P_{cm} + 100 \times H_{DM}/60 + R/40\ 000$$

式中:  $H_{DM}$  为熔敷金属中扩散氢含量, mL/100 g;  $h$  为板厚, 20 mm;  $R$  为焊缝拉伸拘束度, 15 kN/cm。

最低预热温度:

$$T = 1\ 440P_w - 392$$

由理论计算公式计算得到的 Q550D 钢板碳当量  $CE = 0.45$ , 裂纹敏感指数  $P_w = 0.28$ , 最低预热温度  $T = 13\ ^\circ\text{C}$ 。包钢生产的 Q550D 具有较低的裂纹

敏感指数及预热温度, 工程应用较为广泛。

## 2.2 斜 Y 型坡口焊接冷裂纹敏感性试验

20 mm 厚 Q550D 钢板斜 Y 型坡口焊接冷裂纹敏感性试验试样加工尺寸及试验方法依据标准《焊接性试验斜 Y 型坡口焊接裂纹试验方法》<sup>[4]</sup> 进行, 试验具体焊接条件及参数见表 4, 试验焊板焊后放置 48 h, 进行焊缝表面裂纹率、断面裂纹率和根部裂纹率肉眼、磁粉探伤检查分析, Q550D 焊板斜 Y 型坡口焊接裂纹试验结果见表 5, 试样焊缝断面及根部断面照片见图 2。

表 4 Q550D 斜 Y 型坡口焊接裂纹试验焊接条件

| 焊丝     | 直径<br>/mm | 焊接电流<br>/A | 电弧电压<br>/V | 焊接速度<br>/(cm · min <sup>-1</sup> ) | 保护气体                         | 气体流量<br>/(L · min <sup>-1</sup> ) |
|--------|-----------|------------|------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| JM-100 | 1.2       | 250        | 28.5       | 33.3                               | 80% Ar + 20% CO <sub>2</sub> | 20                                |

表 5 Q550D 斜 Y 型坡口焊接裂纹试验结果

| 编号 | 预热温度/°C | 表面裂纹率/% | 断面裂纹率/% | 根部裂纹率/% |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1# | 25      | 0       | 0       | 0       |
| 2# | 60      | 0       | 0       | 0       |
| 3# | 100     | 0       | 0       | 0       |

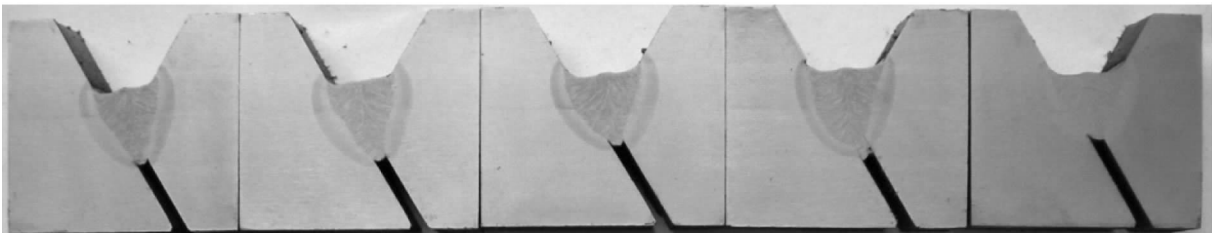


图 2 室温斜 Y 型坡口试样焊缝断面及根部断面照片

焊件斜 Y 型坡口焊接冷裂纹敏感性试验是一种拘束程度较苛刻的冷裂纹试验方法, 其根部焊缝的应力集中系数高达 4.7, 主要用于考核焊接热影响区的根部裂纹情况<sup>[5]</sup>。由表 5 和图 2 可知, Q550D 焊板在室温 (25 °C) 不预热时进行焊接, 焊缝表面、断面、根部均未出现裂纹, Q550D 钢材的冷裂纹敏感性较低, 在室温状态下进行焊接时, 不会出现表面、断面、根部冷裂纹缺陷, 焊接时可无需进行预热。

## 2.3 Q550D 钢板焊接工艺研究

焊接热输入量及焊接道次间温度变化将影响焊接热循环过程, 此过程对焊接接头焊缝金属和热影响区的组织和力学性能带来影响。为了掌握焊接热

输入量对 Q550D 钢板焊接接头力学性能的影响, 本试验针对不同的热输入与接头组织、性能关系进行对比分析。

Q550D 焊接方式采用 X 型坡口双面对接焊, X 型坡口角度为 30°, 钝变量为 2 mm。焊接前将坡口及坡口附近母材油污、铁锈等清理干净, 保护气体流量在 15 ~ 20 L/min 之间, 焊丝干伸长度在 12 ~ 18 mm 之间, 焊接道次间温度控制在 200 °C 以下。试验不同焊接热输入量分别为 9.0 kJ/cm、15.3 kJ/cm、20.5 kJ/cm、24.8 kJ/cm。Q550D 焊接工艺试验条件见表 6, 不同热输入条件下 Q550D 接头力学性能见表 7。

表 6 Q550D 钢板焊接试验条件

| 试样编号 | 焊接电流<br>/A | 电弧电压<br>/V | 焊接速度<br>/( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ) | 预热温度<br>/°C | 道间温度<br>/°C | 热输入量<br>/( $\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) |
|------|------------|------------|--|-------------|-------------|---|
| H-1# | 230        | 23.9       | 36.7   | 室温          | $\leq 200$  | 9.0   |
| H-2# | 280        | 30.4       | 33.3   | 室温          | $\leq 200$  | 15.3  |
| H-3# | 330        | 34.5       | 33.3   | 室温          | $\leq 200$  | 20.5  |
| H-4# | 370        | 37.3       | 33.3   | 室温          | $\leq 200$  | 24.8  |

表 7 不同热输入条件下 Q550D 接头力学性能

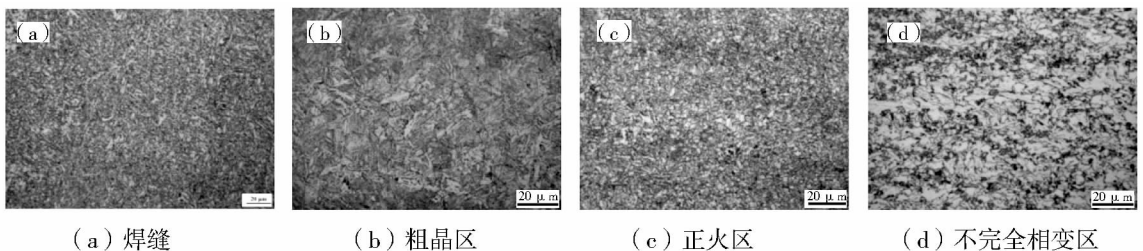
| 试样<br>编号 | $R_{el}$<br>/MPa | $R_m$<br>/MPa | $A$<br>/% | 焊缝 $KV_2(-20^\circ\text{C})$<br>/J |     |     | 热影响区 $KV_2(-20^\circ\text{C})$<br>/J |     |     | 断裂<br>位置 | 接头侧弯<br>( $D = 2.5a$ ,<br>$\alpha = 180^\circ$ ) |
|----------|------------------|---------------|-----------|------------------------------------|-----|-----|--------------------------------------|-----|-----|----------|--|
| H-1#     | 630              | 722           | 38.0      | 182                                | 186 | 181 | 188                                  | 178 | 192 | 母材       | 合格   |
| H-2#     | 625              | 727           | 20.0      | 158                                | 182 | 162 | 159                                  | 184 | 167 | 母材       | 合格   |
| H-3#     | 621              | 727           | 21.3      | 169                                | 150 | 142 | 172                                  | 150 | 142 | 母材       | 合格   |
| H-4#     | 625              | 728           | 18.3      | 142                                | 152 | 138 | 150                                  | 147 | 146 | 母材       | 合格   |

由表 7 数据可知,当焊接热输入量在 9.0 ~ 24.8 kJ/cm 范围时,接头抗拉强度在 722 ~ 728 MPa 之间,屈服强度在 621 ~ 630 MPa 之间,接头强度随着热输入量的增加变化不大,且拉伸断裂位置均为母材。随着热输入量的增加,零下 20 °C 焊缝及热影响区冲击功均呈现下降的趋势,相对于焊接热输入量 9.0 kJ/cm,当焊接热输入量提高到 24.8 kJ/cm 时,零下 20 °C 焊缝及热影响区冲击功平均值分别降低 23 J 和 25 J 左右。过大的热输入量会造成热影响区性能不稳定,导致热影响区宽度增大、组织长大,接头的强度、韧性均会降低;过小的热输入量,就必须多道次焊接,容易在焊缝处产生焊接缺陷,并且降低了生产效率。试验的 20 mm 厚 Q550D 钢板焊接热输入量在 9.0 ~ 24.8 kJ/cm 范围时,接头各项力学性能指标符合焊接要求,且接头侧弯 ( $D = 2.5a, \alpha = 180^\circ$ ) 试验也满足要求。

Q550D 焊接热输入量分别为 9.0 kJ/cm 和

24.8 kJ/cm 时,对应的焊缝、粗晶区、正火区、不完全相变区金相组织见图 3、图 4。

由图 3、图 4 可知,试验板材焊缝中心熔合良好,显微组织无焊接缺陷,Q550D 焊接采用热输入量分别为 9.0 kJ/cm 和 24.8 kJ/cm 时,焊缝及热影响区的组织形态相同,不存在异常组织。焊缝处组织均为贝氏体和铁素体;粗晶区组织均为贝氏体,该区组织较粗大但在接头中存在范围较窄,对接头性能影响不大;正火区组织均为贝氏体,该区在焊接高温热循环的作用下奥氏体化,随后空冷得到均匀、细小的贝氏体组织;不完全相变区组织均为贝氏体和索氏体,该区组织在焊接热循环作用下,部分组织奥氏体化后冷却过程中形成了贝氏体,部分组织没有发生转变,保留母材索氏体组织。焊接热输入量分别为 9.0 kJ/cm 和 24.8 kJ/cm,焊缝及热影响区组织较细,保证了接头力学性能满足使用要求。

图 3 Q550D 焊接接头组织形态 ( $E = 9.0 \text{ kJ/cm}$ )

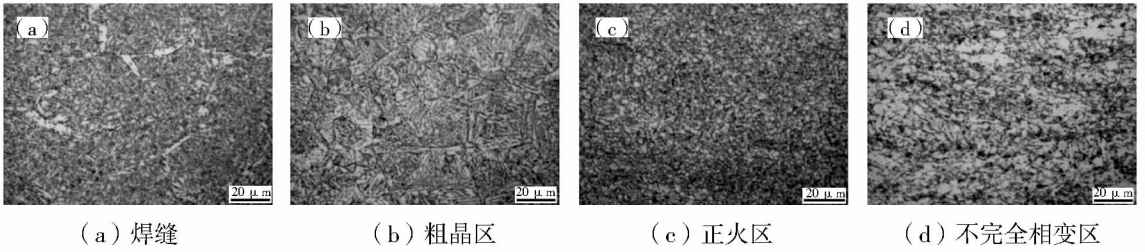


图4 Q550D 焊接接头组织形态(  $E = 24.8 \text{ kJ/cm}$  )

### 3 结论

(1) Q550D 钢板裂纹敏感指数  $P_w = 0.28$ , 最低预热温度  $T = 13 \text{ }^\circ\text{C}$ , 在室温不预热时, 钢材的冷裂纹敏感性较低, 常温焊接时, 不会出现冷裂纹, 焊后钢板焊缝表面、断面、根部均未出现裂纹。

(2) 采用 JM-100 焊丝焊接 Q550D 钢板, 焊接热输入量  $E$  在  $9.0 \sim 24.8 \text{ kJ/cm}$  范围时, 随着热输入量的增加, 焊缝及热影响区零下  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  低温冲击功呈现下降的趋势, 接头各项力学性能满足使用要求。焊缝及热影响区组织没有大的变化, 焊缝处组织为贝氏体和铁素体; 粗晶区组织为贝氏体; 正火区组织为贝氏体; 不完全相变区组织均为贝氏体和索氏体, 不存在异常组织。

(3) 采用 JM-100 焊丝焊接  $20 \text{ mm}$  厚 Q550D 钢板焊接工艺: 焊接电流为  $230 \sim 370 \text{ A}$ , 焊接电压为  $23.9 \sim 37.3 \text{ V}$ , 焊接速度为  $33 \sim 37 \text{ cm/min}$ , 焊接

热输入  $9.0 \sim 24.8 \text{ kJ/cm}$ , 气体流量为  $20 \text{ L/min}$ , 道间温度不大于  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] 孙电强, 李玉谦, 成慧梅, 等. 冷却工艺对 Q550D 钢组织性能的影响[J]. 轧钢, 2019, 36(1): 41-43.
- [2] GB/T 16270—2009, 高强度结构用调质钢板[S].
- [3] 张凤明, 徐楠, 付学义. 低合金高强钢 Q890D 焊接工艺研究[J]. 包钢科技, 2018, 44(6): 46-50.
- [4] GB 4675.1—84, 焊接性试验斜 Y 型坡口焊接裂纹试验方法[S].
- [5] 张凤明, 付学义. 耐候桥梁钢 Q370qNH、Q420qNH 焊接工艺研究[J]. 包钢科技, 2020, 46(5): 59-63.