# 低合金高强钢Q890D焊接工艺研究

张凤明,徐 楠,付学义

(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:** 文章采用不同焊接实验参数对Q890D的焊接性进行了研究。通过对比焊接接头综合力学性能及微观金相组织,制定出合理焊接工艺及焊后热处理工艺,使焊接接头性能满足产品的使用要求。同时进行不同工艺参数条件下的熔敷效率、焊道成形性及飞溅量变化研究,对Q890D焊接冷裂纹敏感性、焊接材料熔敷金属力学性能及扩散氢含量进行了测试。

**关键词:** Q890D; 焊接工艺; 冷裂纹敏感性; 扩散氢

**中图分类号:** TG457 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2018)06-0046-05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.06.013

## Study on Welding Technology for Low Alloy High Strength Steel Q890D

*Zhang Feng-ming, Xu Nan, Fu Xue-yi*

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

**Abstract:** In the paper, the weldability of Q890D is studied with different welding experimental parameters. The reasonable welding and post-weld heat treatment processes are worked out through comparing the comprehensive mechanical properties and microscopic metallographic structure of welded joints so that their properties can meet the requirements of using product. Moreover, the deposition efficiency, formability of weld bead and change of spatter amount with different process parameters are studied, the sensitivity of welding cold cracks, mechanical properties of deposited metal for welding material and content of diffusible hydrogen for Q890D are tested.

**Key words:** Q890D; welding technology; sensitivity of cold cracks; diffusible hydrogen

在钢材新产品研发过程中,焊接技术是极其重要的一个环节,钢材焊接性能的优劣会直接影响到产品的使用性能,最终关系到产品是否安全可靠。因此,钢材的焊接性能尤其在低合金高强度级别的钢材中显得日益重要,合适的焊接工艺参数及工艺措施是确保钢材安全可靠使用的关键。

## 1 焊接材料和方法

### 1.1 实验材料

试验用Q890D母材化学成分及力学性能见表1、表2。

**收稿日期:** 2018-03-01

**作者简介:** 张凤明(1987-),男,内蒙古赤峰市人,工程师,现从事焊接工艺研究工作。

表 1　Q890D 化学成分(质量分数)　　%

| 牌号 | 板号 | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo | V | Nb | Als | Ti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Q890D | 2419170100 | 0.119 | 0.298 | 1.67 | 0.011 | 0.003 | 0.288 | 0.386 | 0.265 | 0.071 | 0.044 | 0.026 | 0.016 |

表 2　Q890D 力学性能

| 牌号 | 板号 | 板厚/mm | $R_{el}$ /MPa | $R_m$ /MPa | $A$ /% | $K_{V_2}$/J |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Q890D | 2419170100 | 25 | 944 | 975 | 13.5 | 218205222 |

试验用 Q890D 金相组织见图 1。

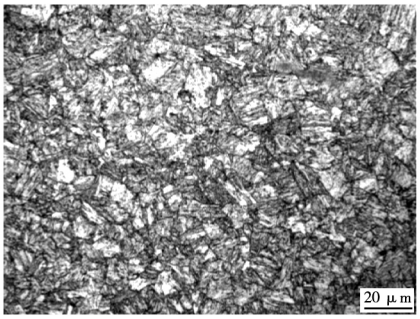



图 1　Q890D 显微组织

试验原始母材金相组织为索氏体。

1.2　焊接实验设备及焊丝

焊机: OTC DIGITAL INVERTER DP500;

摆动式自动焊接小车: HK－100K;

保护气体: 富氩气体(80% Ar + 20% $CO_2$);

焊丝: BHG－5 实心焊丝。

焊丝力学性能见表 3。

表 3　BHG－5 实心焊丝力学性能

| 批号 | 规格/mm | $R_{el}$/MPa | $R_m$/MPa | $A$/% | $K_{V_2}$/J |
|---|---|---|---|---|---|
| 2012－4－1 | 1.2 | ≥890 | ≥940 | ≥11 | ≥40 |

## 2　焊接实验结果与分析

2.1　焊接工艺参数影响

2.1.1　焊接电流与焊道成形

焊接工艺参数,主要是焊接电流、焊接电压,对焊道成形、飞溅量的影响非常显著。在合适的焊接电流、电压下,焊道的宽、高比例适中且成形美观,飞溅量也最小,焊丝的熔敷效率也比较高。当焊接电流偏小时,焊道相对高而狭窄,熔深较浅;焊接电流偏大时,焊道宽而扁平,熔深较大。DP－500 焊机不同焊接电流与焊道成形的关系见图 2。

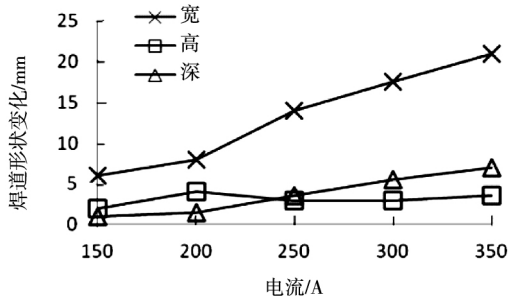



图 2　不同焊接电流与焊道成形的关系

图 2 为 BHG－5 焊丝在焊接速度、焊丝干伸长度固定不变时,通过调节电流大小,从而得到电流与焊道成形的关系曲线。由图可知,随着电流的增大,工件上的电弧力和热输入均增大,热源位址下移,焊缝的熔深增大,熔深与焊接电流接近于正比关系;随着电流的增大,焊丝熔化量近与正比例额定增加,所以焊缝余高增大,当电流大于 250 A 时焊缝余高趋于不变;随着电流增大,相应的一元化调节电压增大,电弧功率增加、热输入增加,焊缝熔宽增大。

2.1.2　焊接电流与飞溅率

焊接过程中熔化的金属飞向熔池之外,飞到熔池之外的金属为飞溅。随着飞溅率的增加不但降低了焊接生产效率,也影响了焊接质量。所以焊接过程中尽量降低飞溅的影响。

实验采用 BHG－5 焊丝,焊接速度 $V$ = 53.3 cm/min,保护气体: 富氩气体(80% Ar + 20% $CO_2$),气流量为 20 L/min,焊丝干伸长度为 18 mm。不同的焊接电流与焊接飞溅关系变化见图 3。

由图 3 可知,随着电流的增加飞溅率开始增加,当电流增加到 200～210 A 时焊丝飞溅率达到最高,随后随着电流增加飞溅率开始下降,当电流达到 280 A 左右时,飞溅率趋于平稳。

在实际焊接过程中,焊接电流都存在一个临界

值，即熔滴射流过渡的最小电流值，在电流临界值时，熔滴飞溅降至最低，此时熔敷率达到最高。熔滴射流过渡临界值约为 330 A，飞溅率降低到 0.3%，熔敷率高达 99.7%。

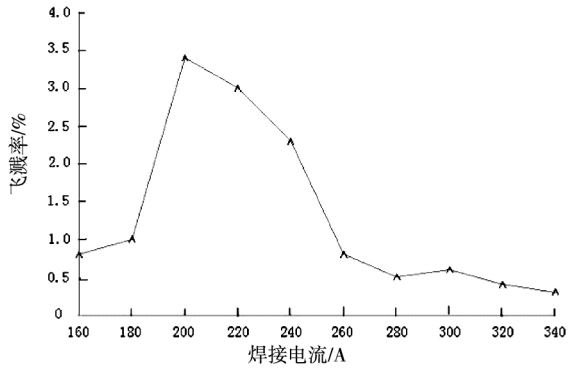



图3 一元化调节状态下焊接电流与飞溅率

## 2.2 熔敷金属性能测定及扩散氢测定

### 2.2.1 焊丝熔敷金属力学性能测试

焊接实验开始前，要对选用的焊丝进行熔敷金属的力学性能测试。本次测试工艺参数为：焊接电流 $I$ = 250 A，焊接电压 $U$ = 26.5 V，焊接速度 $V$ = 33.3 cm/min，热输入量 $E$ = 11.9 kJ/cm，气体流量 20 L/min，焊接试验后所测得焊丝熔敷金属力学性能实际值见表 4。

表4 BHG－5 焊丝熔敷金属力学性能

| $R_{el}$/MPa | $R_m$/MPa | $A$/% | $K_{V_2}$/J |
|---|---|---|---|
| 955 | 985 | 15 | 94 76 88 |

由表 4 可知，测试结果与焊丝质量保证书所列性能数据相差别不大，测试结果满足标准要求，本次实验选用焊丝各项力学满足低合金高强钢 Q890D 焊接实验要求。

### 2.2.2 熔敷金属扩散氢含量测定

实际测试中，使用 MF－1 型水银法扩散氢测定仪，按照 GB/T 3965—1995《熔敷金属中扩散氢测定方法》[1] 进行测试。工艺参数为：电流 $I$ = 280 A，电压 $U$ = 30.4 V，焊接速度 $V$ = 33.3 cm/min，热输入量 $E$ = 15.3 kJ/cm，气体流量 20 L/min，焊接环境温度 20 ℃，湿度 10% RH，仪器测量分辨率 0.01 mL。试验后测量结果见表 5。

表5 BHG－5 熔敷金属扩散氢含量

| 规格/mm | $H_{DM}$/(mL·g$^{-1}$) | 等级 |
|---|---|---|
| Φ1.2 | 0.025 8 | 超低氢型 |

注：熔敷金属扩散氢含量：$H_{DM}$ ≤0.05 mL/g 属于超低氢型。

测试结果表明，本实验所采用的焊丝扩散氢含量属于超低氢型，满足焊接实验要求。Q890D 钢板焊接热影响区有淬硬倾向，对氢致裂纹有敏感性。因此焊接时应优先选择低氢的焊接材料及焊接工艺，且焊后及时进行消氢处理。

## 2.3 焊前预热温度计算

### 2.3.1 理论预热温度

工艺研究中涉及的焊接性计算[2]，如碳当量及焊接裂纹敏感指数等计算公式说明如下：

碳当量：$CE = w(C) + w(Mn)/6 + [w(Cu) + w(Ni)]/15 + [w(Cr) + w(Mo) + w(V)]/5$

冷裂纹敏感系数：$P_{cm} = w(C) + w(Si)/30 + [w(Mn) + w(Cu) + w(Cr)]/20 + w(Ni)/60 + w(Mo)/15 + w(V)/10 + 5w(B)$

冷裂纹敏感性：$P_w = P_{cm} + 100H_{DM}/60 + h/600$ 或 $P_w = P_{cm} + 100H_{DM}/60 + R/40\,000$

式中：$H_{DM}$—— 熔敷金属中扩散氢含量，mL/g；

$h$—— 板厚，mm；

$R$—— 焊缝拉伸拘束度，kN/cm。

最低预热温度：$T = 1\,440P_w - 392$

根据上述公式计算后：Q890D 的碳当量 $CE$ = 0.56%；冷裂纹敏感性 $P_w$ = 0.35；最低预热温度 $T$ = 1440$P_w$ − 392 = 112 ℃。

由理论计算而得到的 Q890D 焊接最低预热温度为 112 ℃。

### 2.3.2 实际预热温度验证

本实验所采用验证方法为：斜 Y 坡口焊接裂纹试验[3]，具体试验条件见表 6。

表6 斜 Y 坡口焊接裂纹试验焊接条件

| 焊丝 | 直径/mm | 焊接电流/A | 电弧电压/V | 焊接速度/(cm·min$^{-1}$) | 保护气体 | 气体流量/(L·min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| BHG－5 | 1.2 | 250 | 26.5 | 33.3 | 80% Ar + 20% $CO_2$ | 20 |

斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果见表 7。

表 7　斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果

| 编号 | 预热温度 /℃ | 表面裂纹率 /% | 断面裂纹率 /% | 根部裂纹率 /% |
|---|---|---|---|---|
| 1# | 18 | 100 | 100 | 100 |
| 2# | 80 | 5 | 0 | 5 |
| 3# | 100 | 2 | 0 | 0 |
| 4# | 120 | 0 | 0 | 0 |

根据实验结果可知，当预热温度低于 100 ℃时，焊缝表面出现 2% 裂纹；当预热温度高于 120 ℃时，焊缝不会产生裂纹。结合理论计算预热温度，最终确定 Q890D 焊接最低预热温度为 120 ℃。

### 2.4　Q890D 焊接工艺

#### 2.4.1　不同焊接工艺的力学性能

Q890D 焊接方式采用 X 型坡口，双面对接自动焊接，焊接前将坡口及坡口附近母材清理干净。焊接对比实验不变量为：气体流量 20 L/min，焊丝干伸长度为 18 mm，板厚 25 mm。焊后试样力学性能见表 8。

表 8　不同热输入条件 Q890D 力学性能

| 编号 | $I$ /A | $U$ /V | 焊接速度 /(cm·min$^{-1}$) | $E$ /(kJ·cm$^{-1}$) | $R_{el}$ /MPa | $R_m$ /MPa | $A$ /% | 焊缝 $K_{V_2}$ /J | 热影响区 $K_{V_2}$/J | 断裂位置 | 冷弯 $D=2.5a$ $a=180°$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 230 | 23.9 | 46.7 | 7.1 | 920,926 | 999,994 | 19 18 | 176,167,160 | 103,83,178 | 母材 | 合格 |
| 2# | 230 | 23.9 | 33.3 | 9.9 | 926,929 | 997,996 | 18 18 | 179,172,178 | 134,194,160 | 母材 | 合格 |
| 3# | 280 | 30.4 | 33.3 | 15.3 | 918,915 | 991,982 | 17 17 | 172,163,187 | 163,169,177 | 母材 | 合格 |
| 4# | 280 | 30.4 | 31.6 | 16.1 | 869,861 | 957,966 | 9 9 | 176,184,163 | 167,183,165 | 热区 | 合格 |

由表 8 数据可知，当焊接热输入量 $E$ 在 7.1 ~ 15.3 kJ/cm 范围时，拉伸断裂位置均为母材，各项力学性能指标符合焊接要求；当焊接热输入量 $E$ 大于 16.1 kJ /cm 时，断裂位置为热影响区，抗拉强度、屈服强度、延伸等都降低。过大的线能量会造成热影响区性能不稳定，导致热影响区增大，拉伸试验时热影响区位置容易发生断裂，导致抗拉强度降低；过小的线能量，就必须多道次焊接，增大道间焊接缺陷的危险，容易在焊缝处出现夹杂等，并且降低了生产效率。

#### 2.4.2　不同焊接工艺接头显微组织

Q890D 在所研究热输入量范围内的接头组织见图 4。焊缝组织为(B + F 少)，过热区组织为 B，正火区组织为 B，不完全相变区组织为(B + S)。

对比不同热输入下的显微组织可知，Q890D 焊接热输入量在 7.1 ~ 15.3 kJ/cm 时，焊缝及热影响区组织没有大的变化，焊缝处金相组织均为贝氏体和铁素体；过热区均为贝氏体；正火区均为贝氏体；不完全相变区均为贝氏体和索氏体。焊缝中心熔合良好，显微组织无夹杂及缺陷。

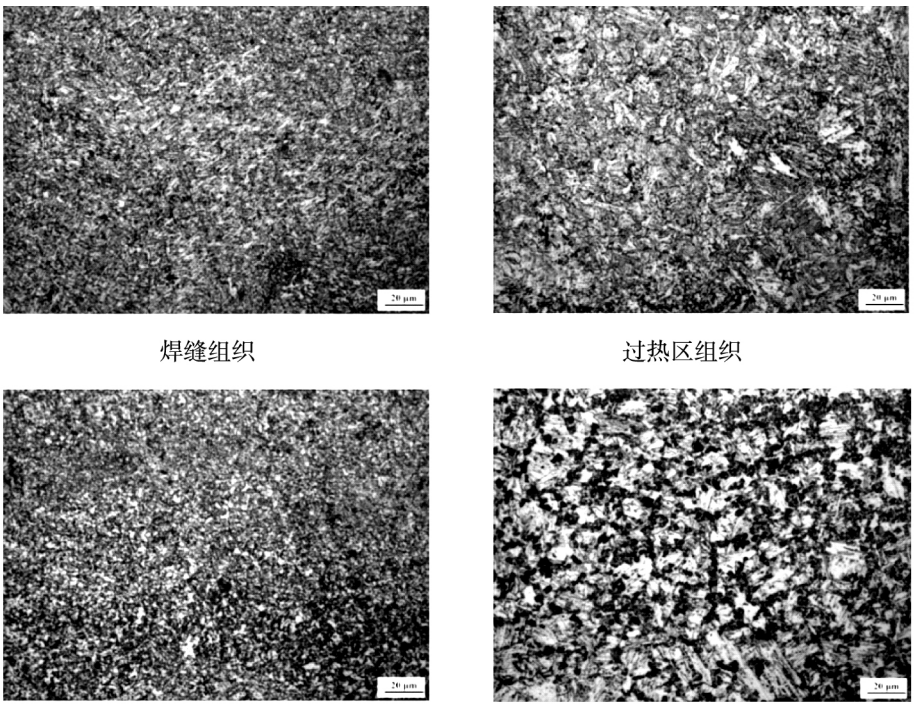
#### 2.4.3　焊接道间温度对性能影响

根据理论计算最低预热温度及实际生产中道间温度，选取两组实验温度为：130 ℃、190 ℃进行相同焊接工艺参数实验对比，具体试验结果见表 9。

表 9　不同道间温度力学性能

| 编号 | 道间温度 /℃ | $I$ /A | $U$ /V | 焊接速度 /(cm·min$^{-1}$) | $E$ /(kJ·cm$^{-1}$) | $R_{el}$ /MPa | $R_m$ /MPa | $A$ /% | 焊缝 $K_{V_2}$ /J | 热影响区 $K_{V_2}$ /J |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 130 | 230 | 23.9 | 33.3 | 9.9 | 926 929 | 997,996 | 18,18 | 179,172,178 | 134,194,160 |
| 2# | 190 | 230 | 23.9 | 33.3 | 9.9 | 923,923 | 992,991 | 15,11 | 168,141,90 | 116,178,172 |

由表 9 数据可知，当焊接道间温度为 130 ℃时，各项力学性能指标符合焊接要求。当焊接道间温度为 190 ℃时，抗拉强度、屈服强度变化不大，但延伸率及冲击性能有所下降。所以，焊接时应严格控制道间温度，应保证道间温度在 120 ℃ ~ 190 ℃范围内，从而使 Q890D 焊接接头的综合性能优良。



焊缝组织　　过热区组织

正火区组织　　不完全相变区组织

**图4　热输入量在7.1～15.3 kJ/cm范围内接头组织**

2.5　Q890D焊后热处理工艺

对比试验的焊接工艺均为 $I$ = 230 A，$V$ = 33.3 cm/min，电压一元化调节；焊后热处理温度分别为：250 ℃、400 ℃、500 ℃，保温时间为2 h，具体试验结果见表10。

**表10　不同焊后热处理工艺的力学性能**

| 编号 | 保温温度/℃ | $R_{el}$/MPa | $R_m$/MPa | $A$/% | 焊缝 $K_{V_2}$/J | 热影响区 $K_{V_2}$/J |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 250 | 937,944 | 1 013,1 007 | 18.5,18.5 | 110,179,185 | 110,172,154 |
| 2# | 500 | 903,914 | 988，978 | 16.5,15.0 | 148,145,144 | 171,157,168 |
| 3# | 400 | 923,930 | 999,1 004 | 17.0,17.5 | 151,173,103 | 147,152,172 |

由表10数据可知，当焊后热处理温度为400 ℃或500 ℃热处理时，接头抗拉强度、屈服强度均有下降，热处理温度为250 ℃时接头性能最好。所以，Q890D焊后热处理温度不宜超过400 ℃，以保证母材及焊接接头力学性能。

## 3　结论

（1）影响焊道成形和飞溅率的重要参数为焊接电流，所以本实验使用的DP－500焊机和BHG－5焊丝匹配的最佳电流范围为：230～280 A。

（2）根据等强匹配原则，选用焊丝BHG－5焊接Q890D，接头熔合情况良好，无宏观缺陷，各项力学指标及扩散氢含量，能够满足低合金高强钢Q890D焊接实验要求。

（3）焊接冷裂纹敏感性试验研究表明：Q890D钢板焊接热影响区对氢致裂纹有的敏感性，在实际生产中应严格控制焊接材料中的扩散氢含量，选择低氢的焊接方法，预热温度不低于120 ℃。

（下转第54页）

(2) 热轧酸洗汽车大梁钢 BT610L 力学性能控制稳定,经酸洗工序后屈服强度与抗拉强度分别提高 50 ~ 76 MPa、43 ~ 68 MPa,延伸率下降 1% ~ 2%,热轧酸洗板性能满足标准要求。

(3) 酸洗工序之前要经过拉矫工序,钢板会产生一定的加工硬化作用,在 20 ℃、0 ℃、- 20 ℃、- 40 ℃、- 60 ℃不同系列温度下,酸洗板的冲击功要比热轧板的冲击功值分别降低 22.9%、28.3%、19.5%、21.6%、26.4%,且冲击断口形貌均为韧窝状断口。

(4) 结合包钢稀土钢板材厂酸洗机组全流程生产设备特点,开发试制的汽车大梁钢 BT610L 热轧酸洗板能够满足汽车生产厂家的使用。

## 参 考 文 献

[1] 陈永和,周铭,顾卫伟. 国内外酸洗热轧板的生产及发展[J]. 上海金属,2007,(5):71 - 81.

[2] 孟延军. 轧钢基础知识[M]. 北京: 冶金工业出版社,2005.

[3] 陈连生,那顺桑,狄国标,等. 热轧冷却工艺对 Nb - Ti 微合金双相钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢,2007,28(5):10 - 12.

[4] 代晓莉,范建文,谢瑞萍,等. Nb - Ti 微合金化钢板的试制[J]. 轧钢,2005,22(1):11 - 13.

[5] 焦金华. 薄板坯连铸连轧生产 X70 管线钢的生产试验[J]. 轧钢,2008,25(1):52 - 54.

[6] 刘现翠,苏兰海,李忠富,等. 宝钢 2030 酸洗机组中拉矫机和平整机的延伸率分配[J]. 北京科技大学学报,2005,27(5):609 - 612.

[7] Q/BG 56—2014,汽车结构用热连轧钢带和钢板[S].

(上接第 50 页)

(4) 25 mm 厚度 Q890D 钢板最佳焊接工艺范围: 电流 230 ~ 280 A,电压 23.9 ~ 30.4 V,焊接速度为 33.3 ~ 46.7cm/min,热输入 $E$ = 7.1 ~ 15.3 kJ/cm,富氩混合气体保护焊,气体流量为 20 L/min; 抗拉强度大于 990 MPa,屈服强度大于 920 MPa,延伸大于 17%,焊缝冲击大于 170 J,热影响区冲击大于 140 J。随着热输入量增加,焊接接头焊缝金属强度有所降低,延伸降低明显,焊接接头冲击韧性比较稳定。

(5) 焊接道间温度应控制在 120 ~ 190 ℃范围,焊后接头各项力学性能指标符合要求。当焊接道间温度高于 200 ℃时,各指标均有小幅度降低,但延伸率及冲击性能下降明显。

(6) 焊后热处理工艺试验结果表明: Q890D 焊后热处理最佳温度为 250 ~ 300 ℃,最高热处理温度不宜超过 400 ℃,以保证母材性能及焊接接头力学性能。

## 参 考 文 献

[1] GB/T 3969—1995,熔敷金属扩散氢测定方法[S].

[2] 曹良裕,魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用[J]. 材料开发与应用,1999,14(1):39 - 43.

[3] GB/T 4675.1—1984,斜 Y 型坡口焊接裂纹试验方法[S].