# 30 mm 厚 Q690D 焊接性能及工艺研究*[1]

王 婷,付学义,张凤明

(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:** Q690D 钢是包钢开发的屈服强度 690 MPa 级微合金化低合金高强钢,具有优良的低温韧性,主要用于工程和矿山机械,钢板调质状态供货。为了掌握该钢种的基本焊接性,合理制定焊接工艺及焊后热处理工艺,使 Q690D 钢焊接接头性能满足工矿产品的使用要求,文章对 30 mm 厚 Q690D 钢板的焊接冷裂纹敏感性、焊接工艺、焊后热处理工艺及焊接接头综合力学性能进行了试验研究及评定。

**关键词:** Q690D; 焊接工艺; 冷裂纹敏感性

**中图分类号:** TG441 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019)03 - 0025 - 05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.03.009

# Study on Welding Performance and Technology of 30 mm Thick Q690D Steel Plate

*Wang Ting, Fu Xue - yi, Zhang Feng - ming*

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

**Abstract:** The Q690D steel is the microalloying low - alloy high - strength steel with the yield strength of 690 MPa grade developed by Baotou Steel. It is with excellent low - temperature toughness, mainly used for engineering and mining machinery as well as the delivery of steel plate is in quenched and tempered condition. In order to grasp its basic weldability, the welding and postweld heat treatment technologies are formulated reasonably to make the performances of its welded joint meet the use requirements of industrial and mineral products. In the paper, the sensitivity of welding cold cracks, welding and postweld heat treatment technologies as well as comprehensive mechanical properites of its welded joint are with experimental study and assessment.

**Key words:** Q690D; welding technology; sensitivity of cold creck

在钢材新产品研发过程中,焊接工艺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]。

## 1 焊接材料和方法

### 1.1 实验材料

试验用调质 Q690D 母材化学成分及力学性能见表 1、表 2。其碳当量公式[2] $CE = w[C] + w[Mn]/6 + (w[Cu] + w[Ni])/15 + (w[Cr] +$

* 收稿日期: 2019 - 03 - 01

作者简介: 王 婷(1991 - ),女,内蒙古乌兰察布市人,助理工程师,现从事焊接工艺研究工作。

$w$[Mo] + $w$[V])/5 = 0.44%。由碳当量值可初步判断Q690D具有一定的淬硬倾向，需焊前进行预热。

表1 Q690D钢板的化学成分(质量分数) %

| 标准 | C | Si | Mn | Nb | V | Ti | Cr | Ni | Mo | B |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GB/T 16270 | ≤0.2 | ≤0.8 | ≤1.8 | ≤0.05 | ≤0.12 | ≤0.05 | ≤1.5 | ≤2.0 | ≤0.7 | ≤0.005 |

表2 Q690D钢板力学性能

| $R_m$/MPa | $R_{p0.2}$/MPa | $A$/% | $KV_2$(-20 ℃)/J |
|---|---|---|---|
| 830 | 750 | 16.5 | 199，198，163 |

### 1.2 焊接方法

试验材料Q690D钢板选用熔化极气体保护焊，保护气体为80% Ar + 20% $CO_2$ 的富氩气体。

## 2 焊接冷裂纹敏感性分析

### 2.1 插销冷裂敏感性试验

插销试验[3]使用HCL-3MC微机自动控制五头插销试验机，选用哈尔滨焊接研究所生产的两种不同扩散氢含量焊丝HS-70、GFM-70进行试验，如表3所示，两种焊丝都为屈服强度690 MPa级高强钢气体保护焊丝。工艺参数为：电流$I$ = 260 ~ 270 A，电压$U$ = 30 ~ 31 V，焊接速度$V$ = 330 mm/min，气体流量15 ~ 20 L/min。不同预热温度及加载条件下Q690D钢插销试验结果见表4。

表3 焊丝熔敷金属屈服强度及扩散氢含量

| 焊丝牌号 | 焊丝类型 | 焊丝直径/mm | 屈服强度/MPa | 扩散氢含量(水银法)/(mL·100$^{-1}$g$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| HS-70 | 实心 | 1.2 | 690 | 1.56 |
| GFM-70 | 金属粉芯 | 1.2 | 690 | 6.50 |

表4 Q690D钢插销试验结果

| 焊丝牌号 | 预热温度/℃ | 试验应力/MPa | 试验结果 |
|---|---|---|---|
| HS-70 | 60 | 750 | 保载24 h未断裂 |
| | 40 | 750 | 保载113 min断裂 |
| | 20 | 750 | 保载87 min断裂 |
| GFM-70 | 125 | 750 | 保持24 h未断裂 |
| | 100 | 750 | 保持340 min断裂 |
| | 60 | 750 | 保持118 min断裂 |

插销试验结果表明，焊接材料中的扩散氢含量对30 mm厚Q690D钢板冷裂纹的产生有较大的影响，Q690D钢对氢致裂纹有一定的敏感性，在实际焊接生产中应注意选择低氢的焊接材料及焊接方法，严格控制焊接材料中的扩散氢含量。所以实际焊接过程中建议选用HS-70实心焊丝进行焊接且焊前预热温度不低于60 ℃。

### 2.1 焊接热影响区最高硬度试验

焊接热影响区最高硬度试验[4]，试验钢板为30 mm厚Q690D钢板，焊材为实心焊丝HS-70，进行预热60 ℃及室温不预热两种条件下的最高硬试验。工艺参数为：电流$I$ = 270 A，电压$U$ = 30 V，焊接速度$V$ = 330 mm/min，气体流量20 L/min。试板焊后12 h加工硬度试样，并按图1所示进行$HV$(10)测定。试验结果见表5。

表5 焊接热影响区最高硬度试验结果

| 预热情况 | $HV$(10) | $HV_{max}$ |
|---|---|---|
| 不预热 | 260 260 254 249 262 287 322 304 327 302 274 260 243 264 270 | 327 |
| 预热60 ℃ | 260 260 260 242 236 260 306 306 304 304 253 243 245 249 258 | 306 |

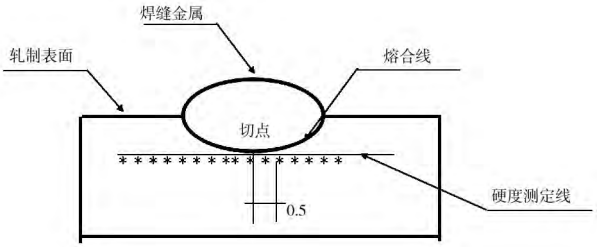



图1 硬度检测位置

试验结果表明，在预热60 ℃及室温不预热条件下焊接，Q690D钢板热影响区最高硬度分别为$HV_{max}$ = 306及$HV_{max}$ = 327，可见Q690D钢板焊接热影响区有一定的淬硬倾向，但淬硬倾向不大。

### 2.2　斜 Y 坡口焊接裂纹试验

斜 Y 坡口焊接裂纹试验[5]（小铁研试验）是一种拘束程度较苛刻的冷裂纹试验方法，主要用于考量焊接热影响区的根部裂纹情况。选用实心焊丝 HS－70，直径 1.2 mm，工艺参数为：电流 $I$ = 260 ~ 280 A，电压 $U$ = 30 ~ 31 V，焊接速度 $V$ = 330 mm/min，气体流量 15 ~20 L/min，预热 60 ℃。试验结果见表 6。

表 6　30 mm 厚 Q690D 斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果

| 焊丝 | 预热温度 /℃ | 表面裂纹率 /% | 断面裂纹率 /% | 根部裂纹率 /% |
|---|---|---|---|---|
| HS－70 | 60 | 0 | 0 | 0 |

试件焊后放置 48 h，进行表面和断面裂纹检查，30 mm 厚 Q690D 钢板采用实心焊丝 HS－70 在预热温度 60 ℃条件下焊接，试件表面裂纹率、断面裂纹率、根部裂纹率均为零。

综合 30 mm 厚 Q690D 钢焊接热影响区最高硬度试验、斜 Y 坡口焊接裂纹试验结果，可以得出，Q690D 钢板焊接热影响区有一定的淬硬倾向。30 mm厚度 Q690D 钢板采用实心焊丝富氩混合气体保护焊，在拘束条件较苛刻条件下（如点固焊、打底焊等），为防止产生焊接冷裂纹，预热温度不应低于 60 ℃。由于煤矿机械多采用厚板多层多道焊，一方面结构的拘束应力较大，另一方面多道焊接过程中存在着氢的积累和聚集问题，两方面因素均增大氢致裂纹产生倾向，因此实际产品焊接时应优先选择低氢的焊接材料及焊接工艺，焊后建议及时进行消氢处理。

## 3　Q690D 钢焊接工艺研究

本试验 Q690D 钢焊接工艺试板尺寸为30 mm × 150 mm × 300 mm，坡口形式为 60°对称 X 型坡口。采用直径为 1.2 mm 的 HS－70 焊丝、80% Ar + 20% $CO_2$ 气体保护焊，进行了不同焊接热输入量及不同焊道间温度的对接接头焊接试验，分别对 Q690D 钢板焊接接头的力学性能和微观组织进行了试验和分析。HS－70焊丝熔敷金属力学性能见表 7；不同焊接热输入量及不同焊道间温度焊接条件见表 8。

表 7　实心焊丝 HS－70 熔敷金属力学性能

| $R_m$ /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | $A$/ % | $KV_2$（－20 ℃） /J | $KV_2$（－40 ℃） /J |
|---|---|---|---|---|
| 750 | 690 | 21.5 | 158 135 106 | 101 109 102 |

### 3.1　不同焊接热输入的力学性能

焊接前将坡口及坡口附近母材清理干净，采用表 8 四种不同热输入规范进行试板焊接，焊缝金属力学试验结果见表 9。

表 8　试板焊接条件

| 编号 | 焊接电流/A | 电弧电压/V | 焊接速度/（mm·min$^{-1}$） | 预热温度/℃ | 道间温度/℃ | 热输入量/（kJ·mm$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 230 | 25 | 330 | 60 | 150 | 1.0 |
| 2# | 270 | 30 | 330 | 60 | 150 | 1.5 |
| 3# | 320 | 33 | 330 | 60 | 150 | 1.9 |
| 4# | 320 | 33 | 270 | 60 | 150 | 2.3 |
| 5# | 270 | 30 | 330 | 60 | 200 | 1.5 |

注：表中焊接电流及电弧电压为平均值；试板打底焊均采用 230 A、25 V；试板焊后进行 250 ℃保温 2 h 消氢处理。

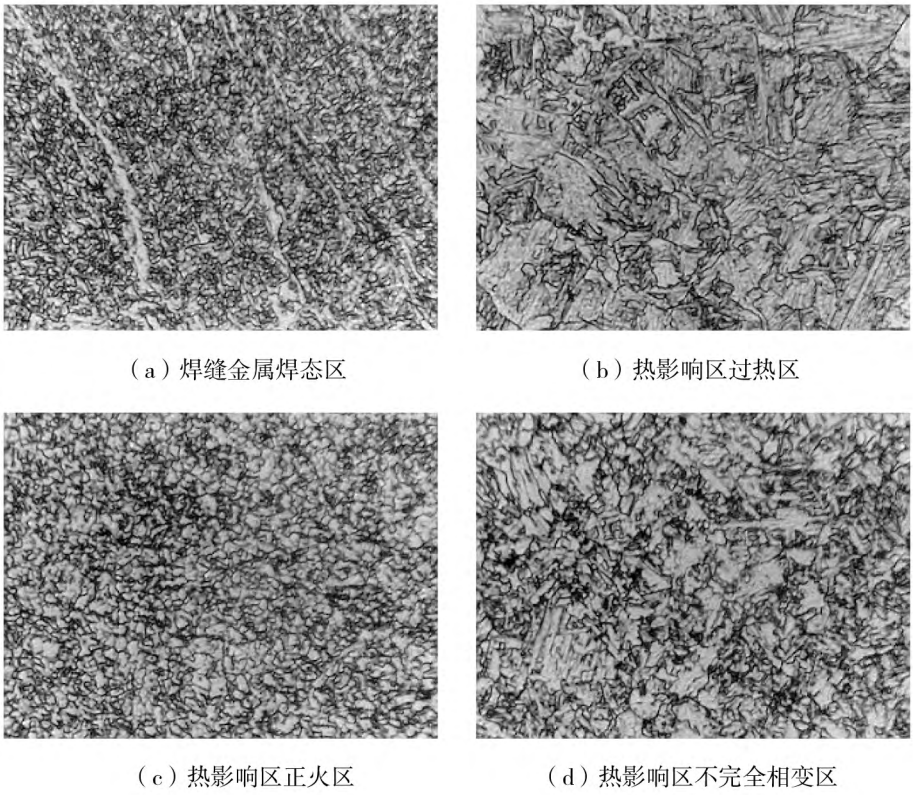
表 9　不同热输入条件 Q690D 力学性能

| 编号 | $E$ /（kJ·mm$^{-1}$） | $R_{el}$ /MPa | $R_m$ /MPa | $A$/% | 焊缝 $KV_2$（－20 ℃） /J | 热影响区 $KV_2$（－20 ℃） /J | 接头侧弯 $D = 3a$，180° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1# | 1.0 | 815 | 775 | 21.5 | 148 149 146 | 200 190 187 | 合格 |
| 2# | 1.5 | 790 | 720 | 23.0 | 164 163 150 | 154 166 119 | 合格 |
| 3# | 1.9 | 780 | 690 | 21.0 | 137 133 141 | 86 149 178 | 合格 |
| 4# | 2.3 | 750 | 670 | 23.0 | 129 129 136 | 70 184 180 | 合格 |

试验结果表明：焊接热输入量在1.0～2.3 kJ/mm范围内，随着热输入量增加，焊接接头焊缝金属强度有所降低，抗拉强度由815 MPa降低到750 MPa，屈服强度由775 MPa降低到670 MPa，焊接接头冲击韧性比较稳定，$KV_2$（－20 ℃）保持在120 J以上。由此可知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，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。

### 3.2 不同焊接热输入的显微组织

Q690D在所研究热输入量范围内接头各区域的组织变化不大。选取热输入量为2.3 kJ/mm时焊接接头各部位微观组织见图2。



（a）焊缝金属焊态区　（b）热影响区过热区

（c）热影响区正火区　（d）热影响区不完全相变区

图2 热输入量为2.3 kJ/mm时焊接接头各部位微观组织（×400）

由图2可知，焊缝金属组织均为少量先共析铁素体＋贝氏体，热影响区过热区组织均为粒状贝氏体，热影响区正火区组织均为贝氏体，呈细等轴晶，热影响区不完全相变区组织为贝氏体＋铁素体。焊缝中心熔合良好，显微组织无夹杂及缺陷。

### 3.3 焊道间温度对焊接接头力学性能的影响

两种不同焊道间温度焊接条件下，Q690D钢焊接接头焊缝金属拉伸及焊接接头低温冲击试验结果见表10。

表10 焊道间温度对焊接接头力学性能的影响

| 编号 | 预热温度/℃ | $R_m$/MPa | $R_{p0.2}$/MPa | $A$/% | 焊缝中 $KV_2$（－20 ℃）/J | 热影响区 $KV_2$（－20 ℃）/J |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2# | 150 | 790 | 720 | 23.0 | 164 163 150 | 154 166 119 |
| 5# | 200 | 760 | 700 | 21.5 | 104 96 127 | 76 163 170 |

由表 10 可以看出，焊道间温度为 150 ℃时，焊接接头焊缝金属拉伸强度、屈服强度、延伸率、焊接接头冲击韧性等指标较高；道间温度为 200 ℃时，各指标均有所降低，但降低幅度不大。试验结果表明，焊道间温度对 Q690D 焊接接头的力学性能有一定影响，控制焊道间温度在 150 ~ 200 ℃范围内，Q690D 钢焊接接头的综合性能优良。

### 3.4　焊后热处理工艺对接头力学性能的影响

焊后分别进行 250 ℃、480 ℃及 680 ℃保温 2 h 炉冷至 150 ℃后空冷三种不同参数的焊后处理，其焊接接头力学性能见表 11。

表 11　焊后热处理对焊接接头力学性能的影响

| 焊后热处理条件 | $R_m$ /MPa | $R_{el}$ /MPa | $A$ /% | 焊缝中心 $KV_2$(－20 ℃) /J | 热影响区 $KV_2$(－20℃) /J |
|---|---|---|---|---|---|
| 250 ℃×2 h | 790 | 720 | 23.0 | 164 163 150 | 154 166 119 |
| 480 ℃×2 h | 770 | 705 | 22.0 | 145 130 96 | 189 147 216 |
| 680 ℃×2 h | 725 | 665 | 21.5 | 104 75 141 | 24 33 31 |

由表 11 数据可知，焊后采用 250 ℃保温 2 h 消氢处理，焊接接头焊缝金属冲击韧性和焊缝金属的强度及塑性指标最高；采用 480 ℃保温 2 h 处理后，焊缝金属冲击韧性有所降低，热影响区的冲击韧性有所提高，焊缝金属的强度及塑性指标有所降低，降低幅度不大；采用 680 ℃保温 2 h 处理后，焊接接头焊缝金属的冲击韧性有所下降，但幅度不大，保持在 100 J 以上，而热影响区冲击韧性大幅下降，$KV_2$(－20 ℃) 均值仅有 29 J，焊缝金属的强度及塑性指标有一定程度的降低。试验结果表明，Q690D 钢焊后热处理温度不宜超过 480 ℃。

## 4　结论

(1) Q690D 钢板焊接热影响区对氢致裂纹有一定的敏感性，在实际生产中应严格控制焊接材料中的扩散氢含量，选择 HS－70 焊丝进行焊接，焊后建议进行 250 ℃、2 h 消氢处理；30 mm 厚度 Q690D 钢板采用实心焊丝富氩混合气体保护焊，预热温度不低于 60 ℃。

(2) 焊接 30 mm 厚 Q690D 钢板最佳焊接工艺范围为，电流：220 ~ 330 A，电压：24 ~ 32 V，焊接速度为 270 ~ 400 mm/min，热输入量 1.0 ~ 2.3 kJ/mm，焊道间温度 150 ~ 200 ℃。

(3) Q690D 钢焊接接头焊后热处理温度不宜超过 480 ℃。鉴于 Q690D 钢调质处理回火温度为 480 ℃，建议其焊后热处理温度不应超过 480 ℃，以保证母材性能及焊接接头力学性能。

## 参　考　文　献

[1] 张凤明，付学义. 低合金高强钢 Q890D 焊接工艺研究[J]. 包钢科技，2018，44(6)：46－46.

[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 9446—1988，焊接用插销冷裂纹试验方法[S].

[4] GB/T 4675.5—1984，焊接热影响区最高硬度试验[S].

[5] GB/ 4675.1—84，斜 Y 型坡口焊接裂纹试验方法[S].