

## 500 MPa 级 S500QL 调质高强钢板在线 直接淬火 (DQ) 工艺研究及应用

赵国昌 张海军 刘生 石莉 林明新 张萌 程含文  
(河钢集团舞钢公司科技部, 舞钢 462500)

**摘要** 开发了低碳 ( $C \leq 0.12\%$ ) Nb-V 微合金化 S500QL 高强度钢板, 使用 120 t BOF + LF + VD 的洁净钢冶炼工艺, 采用两阶段控制轧制 (第一阶段 950 ~ 1 070 °C 区间轧制, 第二阶段开轧  $\leq 890$  °C、终轧  $\leq 850$  °C) 及轧后以 7 ~ 20 °C/s 的冷速在线直接淬火 (DQ), 经 620 ~ 670 °C, 3 min/(mm · T) 回火生产了 15 ~ 50 mm 钢板。钢板组织为细化的粒状贝氏体 + 少量先共析铁素体, 屈强比  $\leq 0.90$ 、延伸率  $A \geq 19\%$ , -50 °C 下冲击功  $\geq 100$  J, 满足市场需求。对 DQ 工艺钢板进行焊接裂纹敏感性试验及焊接接头性能检验, 结果显示, 采用该工艺生产的钢板具有良好的焊接性能。

**关键词** S500QL 调质高强钢 DQ 塑韧性 焊接性能

## Research and application of on Line Direct-Quenching (DQ) Process for 500 MPa S500QL High Strength Quenching and Tempering Steel Plate

Zhao Guochang, Zhang haijun, Liu Sheng, Shi Li, Lin Mingxin, Zhang Meng and Cheng Hanwen  
(Science and Technology Department, Wuyang Iron and Steel Company, Hebei Iron and Steel Group, Wugang, 462500)

**Abstract** Low carbon ( $C \leq 0.12\%$ ) Nb-V microalloying S500QL high strength steel plate has been developed. And 15 ~ 50 mm steel plate are produced by two-stage controlled rolling (first stage rolling at 950 ~ 1 070 °C, second stage starting rolling at  $\leq 890$  °C and finishing rolling at  $\leq 850$  °C), on-line cooling direct-quenching (DQ) with 7 ~ 20 °C/s after rolling, and tempering at 620 ~ 670 °C for 3 min/(mm · T), clean steel smelting process with 120 t BOF + LF + VD. The steel plate has fine granular bainite + small amount of proeutectoid ferrite with yield-tensile strength ratio  $\leq 0.90$ , elongation  $A \geq 19\%$  and impact energy at -50 °C  $\geq 100$  J to meet the market demand. And the welding crack sensitivity test and the welding joint property test of DQ process steel plate was carried out. The results show that the steel plate produced by this process has good welding property.

**Material Index** High Strength Quenching and Tempering Steel S500QL, DQ, Plastic Toughness, Weldability

低合金调质高强钢广泛应用于水电、工程结构、设备制造等领域。同时, 随着近年来钢结构日趋大型化、高性能化和轻量化, 对钢板提出了更高更新的技术要求, 比如高塑韧性、低屈强比、以及易焊接等。其中, 屈服强度 500 MPa 级别的调质高强钢板市场需求很大, 且对性能要求越来越高。

钢铁行业作为高排放、高能耗行业, 降低成本、提高生产效率是钢铁企业转型的两大目标。DQ 工艺是利用钢板轧后余热在线直接加速冷却的一种有效强韧化手段。与传统的离线淬、回火相比, DQ 工艺有以下优点: 简化工序, 降低成本; 减少合金元素含量, 而钢板强度不下降; 可降低含碳量, 对焊接大有好处<sup>[1,2]</sup>。因而, 在中厚板生产中具有非常广阔的应用前景。

本文结合实际工程需求, 采用轧后在线淬火

(DQ) + 回火工艺, 成功开发出 15 ~ 50 mm 厚具有良好力学性能及焊接性能的 500 MPa 级调质高强钢板。试生产及批量生产的钢板性能稳定, 缓解了公司淬火资源紧张的现状, 提高了产品在市场中的竞争力, 具有较大的经济效益。

### 1 技术要求

试验的钢种采用 S500QL, 结合市场需求厚度设定为 15 ~ 50 mm。其钢板化学成分要求见表 1, 力学性能要求见表 2, 需同时满足交货态及模拟焊后热处理态的性能要求。

该技术指标较 EN10025-6:2004 标准要求更为严格, 主要体现在: (1) 较高的低温韧性。由标准要求的 -40 °C Akv 均值  $\geq 27$  J, 单值  $\geq 19$  J 提高至 -50 °C Akv 均值  $\geq 100$  J, 单值  $\geq 70$  J; 同时需加做 1/2 处冲击性能。冲击指标是本研究的重要难点。(2) 高延伸

表 1 S500QL 钢板的化学成分要求/%  
Table 1 Chemical composition requirements of S500QL steel plate/%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Ti	Nb	B	Pcm
≤0.20	≤0.80	≤1.70	≤0.020	≤0.010	≤2.0	≤1.50	≤0.50	≤0.70	≤0.12	≤0.05	≤0.06	≤0.0020	≤0.23

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

表 2 S500QL 钢板的力学性能和工艺要求  
Table 2 Mechanical and technological properties requirements of S500QL steel plate

拉伸试验			冲击试验			180°冷弯试验
R <sub>el</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa	A/%	屈强比	温度/℃	KV <sub>2</sub> /J	b=2a
≥500	590~770	≥19	≤0.90	-50	均值≥100 单值≥70	D=3a 完好

表 3 S500QL 钢板化学成分控制范围/%  
Table 3 Range of control for chemical composition of S500QL steel plate/%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Pcm
≤0.12	0.15~0.40	1.30~1.50	≤0.015	≤0.003	0.30~0.50	0.15~0.35	0.10~0.30	0.02~0.05	0.02~0.05	≤0.22

率。由 A≥17% 提高至 A≥19%。(3)低屈强比。屈强比≤0.90,对于调质钢薄规格钢板来说,生产难度较大。(4)高焊接性能。焊接裂纹敏感性 Pcm≤0.23%。

典型的模拟焊后热处理制度为:(580±15)℃,保温时间 8 h,装炉温度≤400℃,升温速度 50~80℃/h,降温速度 50~80℃/h,降温至 400℃以下,在空气中自然冷却。

## 2 成分及工艺设计原理

### 2.1 化学成分设计

钢板的化学成分设计思路为:(1)采取低碳设计,一是 C 元素强烈影响钢的焊接性能。当 C 含量较低时,即使碳当量较高,钢仍具有优良的焊接性能<sup>[3]</sup>。二是 C 原子为间隙固溶强化作用,降低间隙固溶强化可降低屈强比。(2)为保证强度及淬透性,添加适量的 Ni、Cr、Mo 元素,其中 Cr-Ni 复合可显著提高钢的淬透性,且 Ni 可降低钢中位错运动阻力,使应力松弛从而提高钢基体的韧度,Ni 还可显著提高钢的冲击韧性<sup>[4]</sup>;Mo 元素可推迟珠光体转变,对贝氏体转变影响较小,是贝氏体钢的主要合金元素。(3)为保证控轧控冷效果,添加微量强碳化物形成元素 Nb、V。(4)为降低钢板回火脆性以及保证钢的低温韧性,尽可能降低 P、S 及 As、Sn、Sb 等杂质元素含量。具体化学成分控制范围见表 3。

### 2.2 冶炼工艺

采用 BOF+LF+VD 的洁净钢冶炼工艺。初炼炉容量 110~120 t,铁水占比≥75%。LF 过程使用精炼渣,精炼渣主要成分为 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO。LF 过程白渣精炼时间≥30 min、VD 真空脱气时间≥20 min。浇铸过热度控制在 10~30℃,同时采用电

磁搅拌技术,其电流 400~420 A,频率 4~6 Hz。通过以上措施,提高铸坯的内部质量,减少钢中夹杂物,减轻中心偏析。

### 2.3 轧制工艺

采用 300 mm×2 400 mm 的钢坯,在舞钢 4 100 mm 四辊可逆热轧机轧制生产。钢坯加热及轧制工艺如下:

(1)钢坯加热保证烧匀烧透,加热温度控制适当,避免温度过高造成奥氏体组织偏大,同时避免温度过低导致存在未溶的 Nb、V 碳化物。

(2)采用两阶段控制轧制。粗轧阶段:在再结晶区轧制,两道次之间和轧制后发生静态回复或再结晶,使得原始奥氏体晶粒得到细化。变形量及轧制温度的配合是影响奥氏体细化效果的重要因素。本阶段采用抢温轧制,保证高温大压下量,轧制温度 950~1 070℃。精轧阶段:在未再结晶区轧制,进一步使奥氏体扁平化。合理分配道次压下量,充分破碎奥氏体晶粒,同时保证将轧制力渗透至钢板心部,以实现钢坯微孔疏松等缺陷的最大限度啮合。

(3)在线淬火(DQ)。轧后控制冷却是获得理想组织的重要因素之一。采用稍低的人水温度以获得少量细化的先共析铁素体组织(F),一是高韧性 F 可保证钢板较高的低温冲击要求以及降低钢板的屈强比,二是先相变的 F 可分割原奥氏体晶粒,避免相变过程中大块状贝氏体恶性组织的生成。随后采用 ACC 设备实现加速冷却达到钢板淬火的效果,精轧阶段具体的轧制工艺及 DQ 冷却工艺参数见表 4。

### 2.4 回火热处理工艺

回火主要目的是提高淬火钢板的塑韧性,降低

表 4 S500QL 钢板轧制和直接淬火工艺参数

Table 4 Rolling and direct-quenching process parameters of S500QL steel plate

原钢厚 度/mm	精轧道 次数	开轧温 度/℃	终轧温 度/℃	入水温 度/℃	返红温 度/℃	冷却速度 /(℃·s <sup>-1</sup> )
≤200	5~10	≤890	≤850	≤800	≤450	7~20

脆性,同时降低强硬度,另一目的是降低残余内应力。回火是在 A<sub>1</sub> 线以下很宽的温度范围内进行的热处理,钢板的性能也可以在很宽的范围内变化,因此,回火热处理是调整钢板性能以满足使用要求的重要手段<sup>[5]</sup>。根据钢板不同厚度及轧制、冷却效果,相应调整回火温度和保温时间,以使得低碳贝氏体组织分解充分。钢板回火工艺范围:620~670℃,保温时间 3 min/(mm·T)(T 为钢板厚度)。

### 3 生产结果与分析讨论

通过低碳、合金元素效应以及优化炼钢工艺,采用两阶段控制轧制及轧后在线淬火(DQ),并结合适当的回火热处理工艺。成功开发出了厚度 15 mm~

50 mm 的低屈强比、高塑韧性的高性能 S500QL 钢板。力学性能完全满足技术要求,实物质量优良。

#### 3.1 力学性能

选取 4 个不同厚度规格的钢板试样 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>,按照 EN10025-1:2004 标准取样进行不同试样状态的力学性能检验,对于板厚 30 mm~50 mm 的钢板加做板厚 1/2 处冲击。试样的检验状态如表 5 所示。

室温拉伸试验执行标准 EN ISO 6892-1:2016,检验结果见表 6。整体来说,钢板拉伸性能完全满足技术要求。对于薄板来说(见 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>试样),强度富余量大,但塑性和屈强比稍差,2<sup>#</sup>DQ 态的延伸率甚至低于标准,回火后有个别值刚刚满足要求。对比之下,高的回火温度下薄板更易获得高塑性和低屈强比。而对于厚板来说(见 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>试样),强度略低,尤其是 670℃回火+模焊态的抗拉强度接近技术要求下限。所以稍低回火温度下厚板的综合力学性能更优。

冲击试验执行标准 EN ISO 148-1:2016,检验结

表 5 钢板回火和模拟焊后热处理

Table 5 Steel plate tempering and simulated heat treatment after welding

状态	轧制	回火			模拟焊后热处理		
		温度/℃	时间/[min·(mm·T) <sup>-1</sup> ]	冷却方式	温度/℃	时间/h	升降温速率/(℃·h <sup>-1</sup> )
A	DQ	-	-	-	-	-	-
B	DQ	620	3	空冷	-	-	-
C	DQ	620	3	空冷	580	8	50~80
D	DQ	670	3	空冷	-	-	-
E	DQ	670	3	空冷	580	8	50~80

表 6 钢板室温拉伸试验结果

Table 6 Results of tensile test of steel plate at room temperature

试样	板厚/mm	试样状态	位置	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	屈强比
1 <sup>#</sup>	15	A	全厚度	615	721	18.5	0.85
				606	671	19.0	0.90
				594	659	20.5	0.90
				589	659	19.0	0.89
				574	647	21.0	0.89
2 <sup>#</sup>	24	A	全厚度	628	715	14.6	0.87
				618	686	19.0	0.90
				582	655	19.5	0.89
				599	662	20.0	0.90
				570	640	21.0	0.89
3 <sup>#</sup>	38	A	1/4	579	672	20.0	0.86
				589	669	21.5	0.88
				574	657	20.0	0.87
				577	648	22.0	0.89
				545	623	21.0	0.87
4 <sup>#</sup>	50	A	1/4	558	667	20.0	0.84
				579	661	20.5	0.88
				568	654	21.0	0.87
				550	634	21.5	0.87
				513	607	22.0	0.85

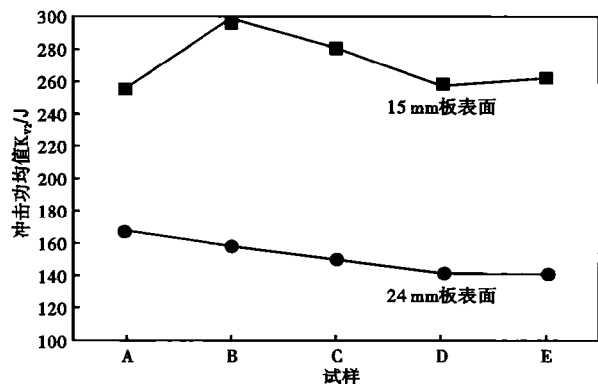


图 1 15~24 mm 板 -50℃ 冲击试验结果

Fig. 1 Results of impact test of 15~24 mm plate at -50℃ low temperature

果见图 1、2。钢板的低温冲击韧性高,相对稳定。EN10025-6:2004 标准要求的 1/4 处冲击功均在 240 J 以上,而厚板(3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>)加做的板厚 1/2 处的冲击功较板厚 1/4 稍低,但相较于技术要求的 100 J 仍有一定的富余量。

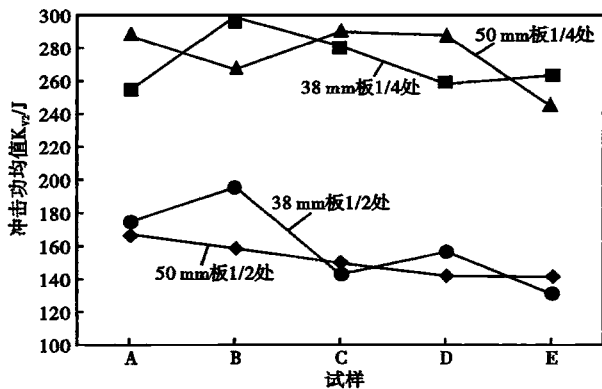


图 2 38 ~ 50 mm 板 -50 °C 冲击试验结果

Fig. 2 Results of impact test of 38 ~ 50 mm plate at -50 °C low temperature

表 7 钢板室温弯曲试验结果

Table 7 Bending test results of steel plate at room temperature

试样	板厚/mm	试样状态	180°弯曲试验 b = 2a
1#	15	B	D = 3a 完好
		D	D = 3a 完好
2#	24	B	D = 3a 完好
		D	D = 3a 完好
3#	38	B	D = 3a 完好
		D	D = 3a 完好
4#	50	B	D = 3a 完好
		D	D = 3a 完好

对于同一状态下不同回火温度的钢板(如 B 和 D、C 和 E), 620 °C 回火时冲击功值相对较高。采用 670 °C 回火韧性降低, 说明第二相已经开始长大。

弯曲试验是体现钢板工艺性能的重要指标, 钢板按照 EN ISO 7438:2016 进行室温弯曲试验, 检验状态为交货态, 即淬火(DQ) + 回火态。具体试验结果见表 7。由表 7 可知, 试验钢板具有优异的工艺加工性能。

结合以上分析, DQ 生产的 S500QL 钢板, 交货态和模焊态具有优异的综合力学性能和工艺性能, 能满足高性能钢板良好的塑韧性、低屈强比的技术要求。

### 3.2 金相组织

对钢板 620 °C 回火后的试样进行组织观察。具体结果见图 3。钢板组织为粒状贝氏体 + 少量先共析铁素体。组织沿轧制方向被拉长, 这是由于第二阶段轧制在奥氏体未再结晶区变形, 变形过程中奥氏体不发生再结晶, 晶粒随变形被压扁。

从组织构成来看, 1#、2# 薄板组织较为均匀, 厚度方向无差异。3#、4# 厚板组织(见图 3) 1/2 处铁素体含量较 1/4 处增多, 主要是近表面处的冷速较快, 中心处的冷速较慢所导致。贝氏体团和铁素体组织

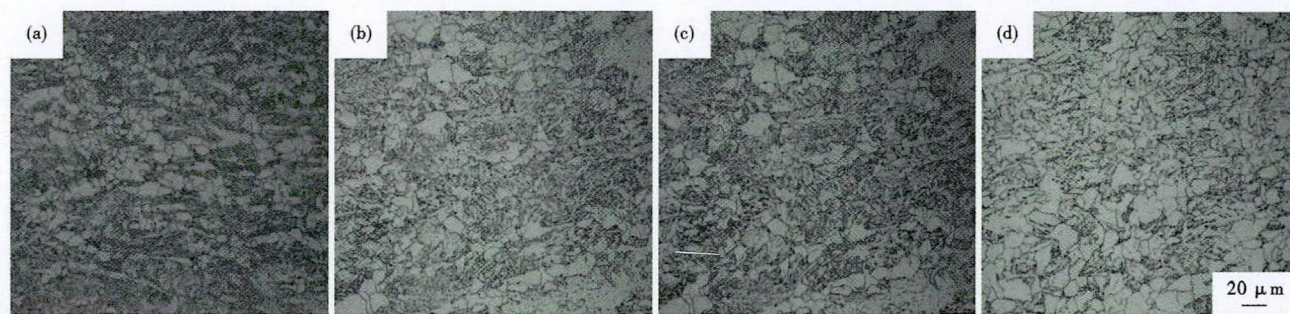


图 3 38 mm 钢板 1/4 处(a) 和 1/2 处(b), 以及 50 mm 钢板 1/4 处(c) 和 1/2 处(d) DQ + 620 °C 回火的金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of DQ + 620 °C tempering 38 mm plate at 1/4 (a) and at 1/2 (b); and 50 mm plate at 1/4 (c) and at 1/2 (d)

较为细小, 无明显偏析及夹杂物, 这为钢板的性能均匀提供了良好的组织基础。

## 4 焊接性能

焊接性能是结构用钢板的关键评价指标。焊接试样采用 DQ + 620 °C 回火生产、综合性能良好的 50 mm 厚度钢板(第 3 节 4# B 状态), 进行斜 Y 型抗裂试验和手工电弧焊 X 型坡口对接试验, 以探究焊接裂纹敏感性和焊接接头力学性能, 为用户应用和产品销售提供数据和技术支持。

### 4.1 试验焊材

选用日本神钢低温焊材 NB-2 进行试验, 焊材化学成分如表 8 所示, 力学性能如表 9 所示。

### 4.2 抗裂性试验

通过斜 Y 型坡口焊接裂纹实验考察钢材和焊

表 8 熔敷金属化学成分/%

Table 8 Chemical composition of deposited metal/%

C	Mn	Si	S	P	Ni
0.06	0.89	0.45	0.006	0.01	2.41

表 9 熔敷金属的力学性能和工艺性能

Table 9 Mechanical and Technological Properties of deposited metals

牌号	拉伸试验			冲击试验	
	屈服强度 ( $R_{eL}$ )/MPa	抗拉强度 ( $R_m$ )/MPa	断后伸长 率(A)/%	温度 /°C	冲击功 ( $K_{v2}$ )/J
NB-2	≥470	560~610	≥27	-60	≥120

表 10 焊条电弧焊抗裂性试验结果

Table 10 Results of welding rod arc welding crack resistance test

编号	焊接参数	间隙/mm	预热温度	表面裂纹率/%	根部裂纹率/%	断面裂纹率/%
1	160A, (24 ± 2) V	2.0	室温	0	0	-
2	(150 ± 10) mm/min	2.1	室温	0	-	0

表 11 试板焊接工艺参数

Table 11 Welding process parameters of test plate

焊接位置	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/( $cm \cdot min^{-1}$ )	线能量/( $kJ \cdot cm^{-1}$ )	温度/°C	湿度/%	预热温度/°C	层间温度/°C
打底	140	25	10	21	22	40	50	70
填充	150	26	13.5	17.3	22	40	50	70
盖面	150	26	16	14.6	22	40	50	70

材的裂纹敏感性,并确定采用焊条电弧焊焊接时合适的预热温度,试验按“GB2675.1-84 焊接性试验斜 Y 型坡口焊接裂纹试验方法”进行,共焊 2 组。

室温下焊接,焊条经 360 °C 烘干,保温 1 h,焊板未预热、未后热。焊后焊件放置 48 h 以后观察裂纹,先观察表面裂纹,再分别敲断观察根部裂纹、机械解剖观察断面裂纹。DQ 钢板焊条电弧焊抗裂性试验结果如表 10 所示。试验焊缝处未出现裂纹,表明 DQ 工艺生产的钢板抗冷裂性能较好,同时经试验该钢板焊接不需要预热。

### 4.3 焊接接头性能

#### 4.3.1 焊接工艺

采用焊条电弧焊,接头形式为平板对接,焊接坡口形式为非对称 X 型。50 mm 钢板焊接道次示意图,见图 4。焊接工艺参数,见表 11。焊后 200 °C 保

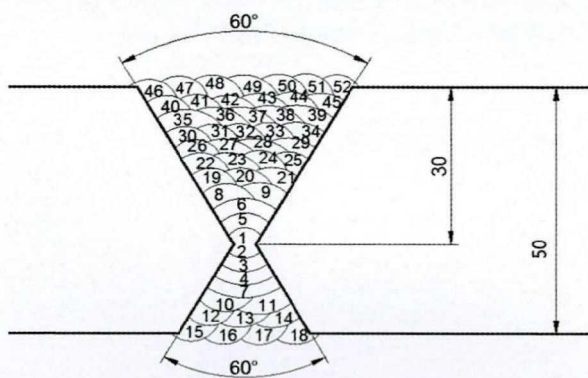


图 4 50 mm 试板焊接道次示意图

Fig. 4 50 mm test plate welding pass diagram

温 1 h,缓冷以消除焊接应力。

#### 4.3.2 焊接接头力学试验

分别按照 EN ISO4136、EN ISO9016、EN ISO9015-1、EN ISO5173 标准进行焊缝破坏性拉伸、冲击、硬度及冷弯性能检验。

拉伸及弯曲试验结果见表 12。屈服强度超下限 50 MPa 以上,抗拉强度处于中线水平,延伸率及屈强比均满足更严的技术要求。弯曲性能全部合格。

图 5 为钢板焊接接头各部位板厚 1/4 及 1/2 处 -50 °C 夏比 V 型缺口冲击试验结果,大部分冲击功大于 200 J,最大

表 12 焊接接头拉伸、弯曲试验结果

Table 12 Tensile and bending test results of welded joints

室温拉伸性能				180°弯曲性能	
屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	延伸率/%	断裂位置	b = 2a
550	656	0.839	21.5	母材	D = 3a 完好
571	657	0.869	23	母材	D = 3a 完好

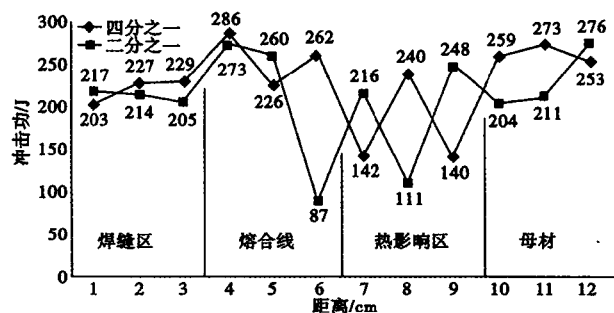


图 5 焊接接头冲击试验结果

Fig. 5 Results of impact test for welded joints

值 286 J,在熔合线及热影响区出现个别低值(87J),但都满足了加严技术要求。整体来看,试验钢板焊接接头各部位的冲击韧性富余量较大。

焊接接头硬度测试点得出,上表面融合线硬度最高,热影响区有个别高值,最大值 HV10 = 268,最小值 HV10 = 175,大部分区域 HV10 在 200 左右波动,整体硬度值平稳正常,完全满足使用要求。

#### 4.4 焊接接头金相组织

焊接各区域二分之一处金相组织如图 6。焊缝及各区域组织主要为粒状贝氏体。在熔合线与过热

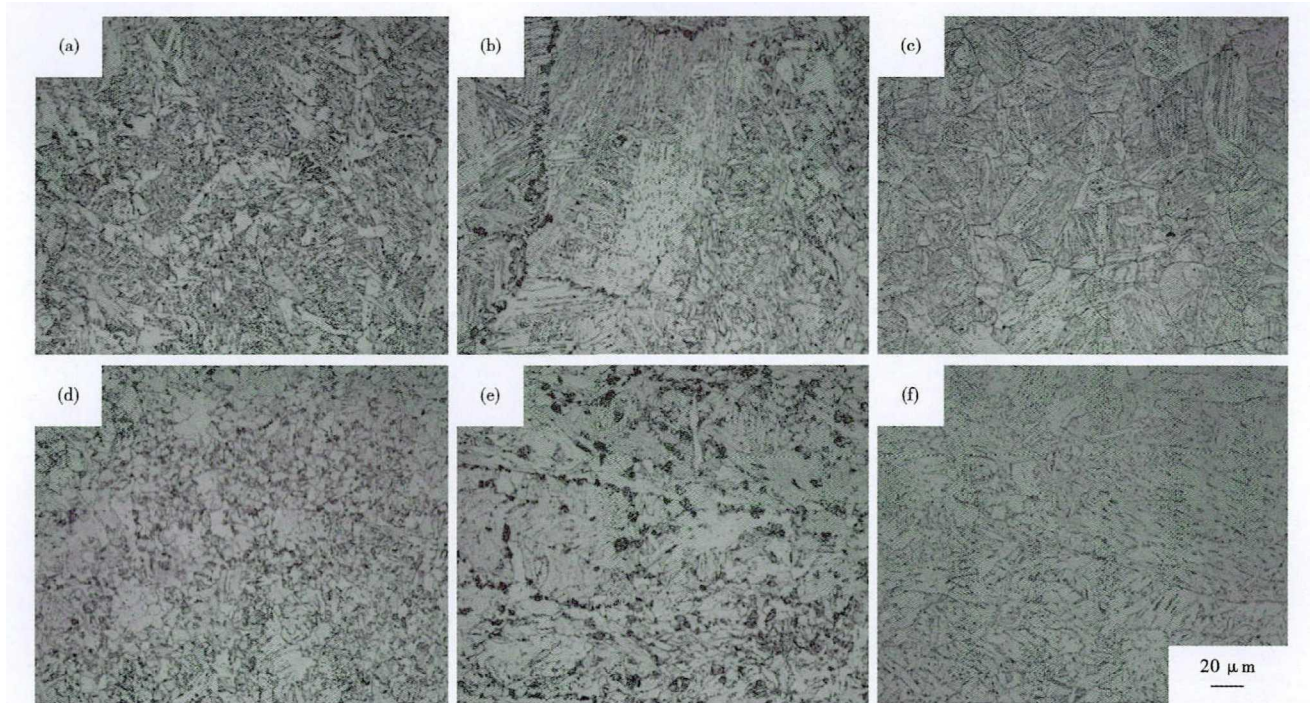


图 6 焊接区域金相组织:(a)焊缝中心;(b)熔合线;(c)过热区;(d)正火区;(e)部分相变区和(f)母材

Fig. 6 Metallographic structure of welding area:(a) welding seam center;(b) fusion line;(c) superheating area;(d) normalizing area;(e) part phase transformation area;(f) base metal

区晶粒发生了长大现象,冷却后得到的组织较为粗大,致使此位置韧性稍低。

## 5 结论

(1)通过制定合理的化学成分和生产工艺,采用控轧后在线淬火,配合合适的回火热处理工艺,成功开发出板厚 15 ~ 50 mm 的 S500QL 调质高强钢板。

(2)钢板具有优异的交货态及模焊态综合力学性能,除满足通用技术标准外,同时满足了良好低温韧性 - 50 ℃ 下冲击功均值  $\geq 100$  J, 单值  $\geq 70$  J (特别为含板厚 1/2 处、高延伸率  $A \geq 19\%$ 、低屈强比  $\leq 0.90$  的特殊要求)。

(3)钢板组织为粒状贝氏体 + 少量先共析铁素体,组织均匀细小,无明显偏析及夹杂物。

(4)研发的 500 MPa 级 DQ + 回火钢板抗冷裂性能良好,试验表明该钢板焊接不需要预热。

(5)本研究开发的 500 MPa 级 DQ + 回火钢板焊接接头拉伸、冲击、冷弯及硬度各项性能良好,完全满足用户的技术要求。

## 参考文献

- [1]小指軍夫. 制御圧延-制御冷却[M]. 日本:地人書館,1997.
- [2]沈继刚,李宏图. 轧后直接淬火技术在高强度中厚板生产中的应用[J]. 宽厚板,2010,16(5):14-17.
- [3]贺信莱,尚成嘉,杨善武,等. 高性能低碳贝氏体钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [4]戴起勋. 金属材料学[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [5]Zhong N, Wang X D, Rong Y H. Enhancement of the Mechanical Properties of a Nb-Microalloyed Advanced High-Strength Steel Treated by Quenching-Partitioning-Tempering Process[J]. Materials Science and Engineering,2009,A56(1-2):111-116.

赵国昌(1969-),男,总经理,1993年武汉钢铁学院(本科)毕业,冶金技术管理。E-mail:wggulu@163.com

收稿日期:2020-11-29