

1 100 MPa 级重型机械超高强吊臂钢焊接性能研究

李浩¹, 薛越¹, 戴鑫¹, 张军¹, 柳婕¹, 黄利²

1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂, 内蒙古包头 014010;
2. 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 Gleeble - 3800 试验机进行焊接过程热模拟, 得出了 Q1100D 钢冷却过程中的 CCT 曲线。采用斜 Y 坡口焊接冷裂纹试验、金相分析和力学性能测试等方法, 对不同热输入下焊接接头组织与性能进行了检测, 结果表明包钢 Q1100D 重型机械超高强吊臂钢具有较好的抗冷裂性能。小热输入条件下可以实现室温下不预热焊接; 较大热输入条件下, 表面和断面未见冷裂纹, 说明 Q1100D 钢板具有较好的抗冷裂性能。接头综合力学性能与组织性能评价结果表明, 14 mm 厚 Q1100D 钢板在 1.05 kJ/mm 的热输入下, 焊接接头力学性能(拉伸、弯曲、冲击)处于最优状态。

关键词: 高强度钢; 焊接性; 热输入; 金相组织

中图分类号: TG457.11

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2023)05 - 0066 - 05

Study on Welding Performances of 1 100 MPa Grade Ultra High Strength Steel for Lifting Arm of Heavy Machinery

Li Hao¹, Xue Yue¹, Dai Xin¹, Zhang Jun¹, Liu Jie¹, Huang Li²

1. CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The continuous cooling transformation (CCT) curves of Q1100D steel in cooling process are obtained through the thermal simulation of welding process with Gleeble - 3800 testing machine. The microstructure and properties of welded joints under different heat inputs are tested with such methods as the Y - slit welding cold crack test, metallographic analysis and mechanical performance test. The results showed that the ultra high strength steel Q1100D for lifting arm of heavy machinery of Baotou Steel was with better cold check resistance. It could be welded without preheating at room temperature with the condition of a little heat input; with the condition of greater heat input, cold cracks are not observed on the surface and cross section, which indicates that Q1100D steel plate is with good cold check resistance. The evaluation results of comprehensive mechanical and structure properties of the joint indicate that the Q1100D steel plate with thickness of 14 mm is with optimum mechanical properties (tensile, bending and impact) of welded joint under heat input of 1.05 kJ/mm.

Key words: high strength steel; weldability; heat input; metallographic structure

收稿日期: 2023 - 08 - 12

作者简介: 李浩(1971 -), 男, 河北省保定市人, 高级工程师, 现从事板材生产管理、板材控制技术和新产品研究工作。

随着中国制造业的飞速发展,对起重机、矿山机械、挖掘机、载重汽车、推土机等重型机械的需求日渐增大。机械设备向大型化、轻量化发展,对机械设备所使用钢材的强度及焊接性能提出了更高的要求。起重机作为重要的机械设备,随着起吊重量的增加,所采用的吊臂钢的强度也逐渐增大。从 550 MPa 逐渐提高到 890 MPa,甚至 1 100 MPa 以上^[1-3]。超高强度钢板的使用能够极大的减轻吊臂重量,更好的适应各种作业条件,延长重型机械的使用寿命^[4]。同时也对材料的焊接性能提出了更高的要求。

包钢研发的吊臂用 Q1100D 钢板,其生产工艺路线为热机械处理技术(TMCP) + 调质处理。吊臂用 Q1100D 钢板除具有高强度高硬度外,还需要适当的韧性,因此恰当的 C、Mn 配比非常重要,在添加提高淬透性的 Cr、Mo、Ni 等元素进行固溶强化以提高基体强度的基础上,采用 Nb、V、Ti 微合金化,结合 TMCP 技术得到细化的轧态组织,为后续热处理

获得良好的性能奠定基础^[5-6]。其热处理工艺为将钢加热至奥氏体化,随后进行淬火、低温回火处理获得强韧性良好的回火马氏体组织。由于包钢白云鄂博矿含有丰富的稀土,稀土元素具有球化夹杂物、净化钢质、细化晶粒、提高韧性等诸多优点,为了进一步提高钢材的综合性能,对钢进行稀土微合金化处理。

本文对包钢 Q1100D 钢板的焊接冷裂纹敏感性、焊接工艺及焊接接头组织、性能等进行试验研究,为制订合理焊接工艺提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 母材选择

试验选材为 Q1100D 钢板,板厚 14 mm,板材状态为调质态(Q + T)。Q1100D 钢板母材化学成分和力学性能见表 1 和表 2。母材金相组织为回火马氏体,见图 1。

表 1 Q1100D 钢板母材化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Al _s	B	Nb + V + Ni + Cr + Mo	%
0.16	0.21	1.15	0.011	0.001 2	0.040	0.001 3	适量	

表 2 Q1100D 钢板母材力学性能

抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A/%	-20 °C 冲击 吸收功 KV_2 /J
1 397	1 305	11	138

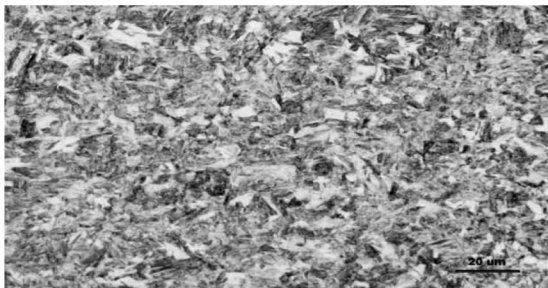


图 1 Q1100D 钢板母材金相组织

$A \geq 15\%$, $KV_2 \geq 90$ J(-50 °C)。

1.3 焊接 CCT 曲线测定

为研究 Q1100D 钢板的焊接性能,进行 SH - CCT 曲线的测定。按照标准 YB/T 5126—2018《钢的临界点测定膨胀法》选择金相法和膨胀法的方式测 SH - CCT 曲线,试验机为 Gleeble - 3800,试验辅助硬度检测完善 SH - CCT 曲线。在板厚 1/4 处取加工试样,根据试验机夹具尺寸要求加工试样,见图 2^[9]。

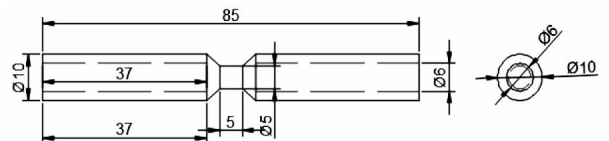


图 2 CCT 曲线测定试样

1.2 焊接材料选择

根据母材的强度级别,焊材选择目前强度级别最高的 ER120S - G,属于低强匹配^[7-8]。ER120S - G 是实心焊丝,规格为 $\Phi 1.2$ mm。该焊丝熔敷金属力学性能: $R_{el} \geq 989$ MPa, $R_m \geq 1 013$ MPa,

采用热膨胀法测平衡临界温度 A_{c1} 、 A_{c3} ,测出钢板的 A_{c1} 为 694 °C, A_{c3} 为 901 °C。通过 Gleeble - 3800 试验机进行焊接过程热模拟,并得出冷却过程中的 CCT 曲线,见图 3。

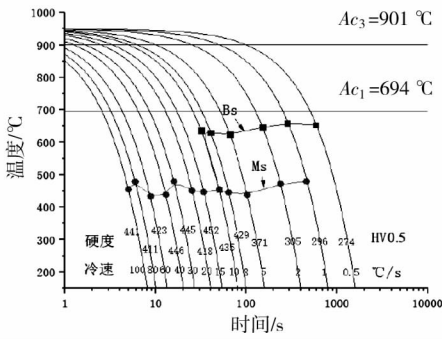


图 3 Q1100D 钢板 SH - CCT 曲线

图中实测点由膨胀曲线测得, CCT 曲线由实测点拟合而成。不同冷速下的金相组织如图 4 所示。通过金相组织和 SH - CCT 曲线可以看出,在冷速为 $0.5\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,金相组织中只存在贝氏体,说明组织在冷却过程中仅发生贝氏体的转变;在冷速为 $1\sim 10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 区间时,金相组织中存在贝氏体和马氏体,说明组织在冷却过程中先发生贝氏体的转变,而后发生马氏体的转变;在冷速 $15\sim 80\text{ }^\circ\text{C/s}$ 区间时,金相组织中只存在马氏体,说明组织在冷却过程中仅发生马氏体的转变。

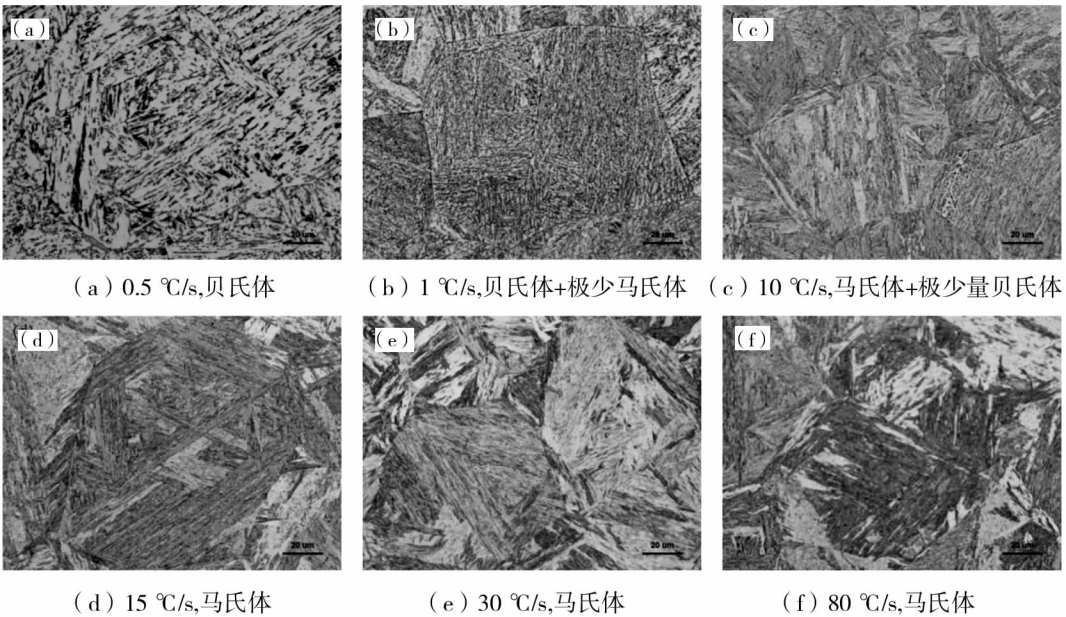


图 4 不同冷速下金相组织

1.4 斜 Y 型坡口焊接裂纹敏感性试验

斜 Y 型坡口焊接裂纹敏感性试验方法俗称小铁研试验,是一种常用的定性评定材料裂纹倾向的试验方法。试样形状和尺寸如图 5 所示。试验先按照图 5 组装试板,然后双面焊接拘束焊缝,并且在焊接过程中要求不产生角变形和未焊透等影响焊接质量的缺陷。

1.4.1 打底焊工艺铁研试验

根部焊道为应力集中位置,铁研试验通常评价打底焊工艺,焊接工艺条件见表 3,本次试验打底焊热输入 0.66 kJ/mm 。在不预热条件下对 14 mm 厚的 Q1100D 钢板进行焊接裂纹试验,焊后的试样冷却并静置 48 h 后,采用表面渗透探伤观察试样焊缝表面和内部裂纹情况,并计算相应的裂纹率。

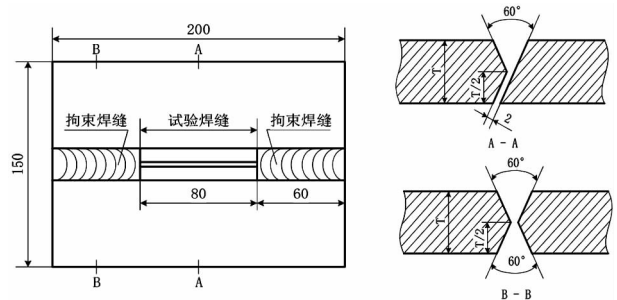


图 5 斜 Y 型坡口裂纹试件示意图

1.4.2 不同热输入铁研试验

基于打底焊工艺(热输入 0.66 kJ/mm)铁研试验结果,确定热输入对打底焊抗裂性的影响。选用 14 mm 厚 Q1100D 钢板,增加 0.79 kJ/mm 和 1.05 kJ/mm 热输入的铁研试验。不同热输入的焊

接工艺条件见表4。不同热输入铁研试验为不预热条件下进行焊接裂纹试验,焊后的试件冷却并静置

48 h后,采用表面渗透探伤观察试样焊缝表面和内部裂纹情况,并计算相应的裂纹率。

表3 斜Y坡口裂纹试验焊接工艺参数

焊丝	焊接电流 I /A	电弧电压 U /V	保护气体	气体流量 Q /(L·min ⁻¹)	焊接速度 v /(mm·s ⁻¹)	热输入 E /(kJ·mm ⁻¹)	温度 /°C	湿度 /%
ER120S-G	220	20	80% Ar + 20% CO ₂	25	6.67	0.66	23	30

表4 不同热输入焊接工艺条件

热输入 E /(kJ·mm ⁻¹)	焊丝	电流 I /A	电压 U /V	保护气体	气体流量 Q /(L·min ⁻¹)	焊接速度 v /(mm·s ⁻¹)	温度 /°C	湿度 /%
0.66	ER120S-G	220	20	80% Ar + 20% CO ₂	25	6.67	23	30
0.79	ER120S-G	240	22	80% Ar + 20% CO ₂	25	6.67	23	30
1.05	ER120S-G	260	27	80% Ar + 20% CO ₂	25	6.67	23	30

2 试验结果及分析

2.1 焊接裂纹敏感性分析

在不预热的条件下对14 mm厚的Q1100D钢板进行小热输入(0.66 kJ/m)焊接裂纹试验,表面裂纹率和断面裂纹率均为零,说明Q1100D钢板具有较好的抗冷裂性能,可以在室温下不预热焊接。

在不预热条件下对14 mm厚的Q1100D钢板进行不同热输入的铁研试验,结果表明,热输入为0.66 kJ/mm和0.79 kJ/mm时,表面裂纹率和断面裂纹率均为零,热输入为1.05 kJ/mm时,表面和断面未发现冷裂纹,但焊缝出现热裂纹,说明14 mm厚Q1100D钢板具有较好的抗冷裂性能,但在工程应用中应注意避免热裂纹。

较大热输入(1.05 kJ/mm)铁研试验结果表明14 mm厚Q1100D钢板表面裂纹率为零,断面裂纹率为9%。从形貌特征来判断,出现的裂纹不是冷

裂纹,而是典型的结晶裂纹。分析其产生原因为较大热输入焊接接头的深宽比和熔合比较大,在大拘束的条件下,焊缝凝固收缩的焊接应力较大,将焊缝中心最后凝固的部位拉裂,由于深宽比较大,焊缝纵向焊接拉应力增大,导致焊缝柱状晶晶界被拉裂。

2.2 焊接工艺及接头组织、性能分析

2.2.1 热输入对焊接接头性能影响

试验选择5种焊接热输入进行焊接接头组织、性能试验,研究热输入对焊接接头组织、性能的影响。

不同热输入焊接接头力学性能试验结果见表5。在0.66~1.29 kJ/mm的热输入下焊缝、熔合区、热影响区具有较好的冲击韧性,远远大于母材要求的27 J。随着热输入增加焊缝中心和熔合线的冲击吸收功有上升的趋势,热影响区冲击吸收功总体呈现先下降后上升的规律。接头具有较高的抗拉强度,强度均在1 000 MPa以上。

表5 不同热输入焊接接头力学性能试验结果

热输入 E /(kJ·mm ⁻¹)	-20 °C 冲击吸收功 KV_2 /J			接头拉伸试验	
	焊缝中心	熔合区	热影响区	R_m /MPa	断裂位置
0.66	52	61	89	1 136	焊缝
				1 182	熔合区
0.79	55	69	93	1 114	焊缝
				1 073	焊缝
1.05	65	79	77	1 043	焊缝
				1 014	焊缝
1.16	61	73	89	1 091	焊缝
				1 042	焊缝
1.29	69	96	103	1 078	焊缝
				1 036	焊缝

2.2.2 焊接接头金相组织

在热输入为 1.05 kJ/mm 的焊接条件下的焊接接头金相组织见图6,焊缝组织为针状铁素体+贝

氏体,过热区组织为粗大的马氏体+贝氏体,正火区组织为细小的马氏体+贝氏体,不完全正火区组织为贝氏体+珠光体+铁素体+回火索氏体。

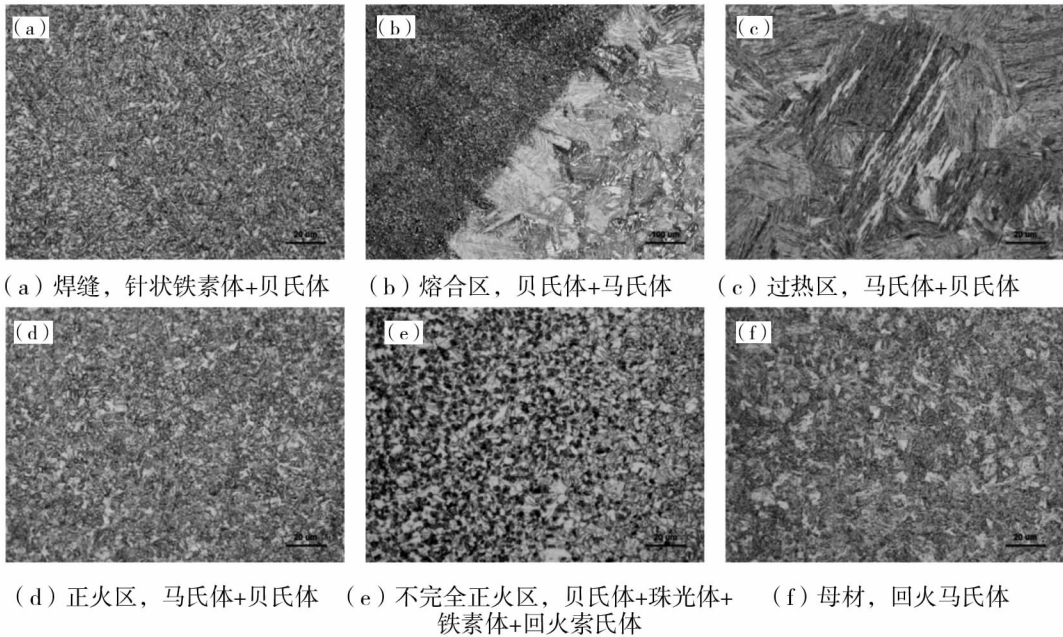


图6 14 mm厚 Q1100D 钢板焊接接头金相组织

3 结论

(1)测定 Q1100D 钢 SH - CCT 曲线,同时结合金相组织,可以得出,在冷速从 $0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 提高至 $80 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,金相组织从只存在贝氏体到只存在马氏体变化。

(2)斜 Y 坡口裂纹敏感性试验结果表明, Q1100D 钢板具有较好的抗冷裂性能,在热输入为 0.66 kJ/mm 、 0.79 kJ/mm 条件下可以实现室温下不预热焊接。

(3)不同热输入焊接接头力学性能试验结果表明,在 $0.66 \sim 1.29 \text{ kJ/mm}$ 的热输入下 Q1100D 钢板焊接接头均具有良好的拉伸、弯曲、冲击性能。

参 考 文 献

- [1] 温长飞,邓想涛,王昭东,等. 超高强钢 Q1100 的 SH - CCT 曲线及粗晶热影响区组织和性能[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(6):809 - 813.
- [2] 刘成,龚小寒,鄢梦琪. 回火温度对工程机械用 1 000 MPa 级高强钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(14):233 - 235.
- [3] 刘丽华,邓想涛,刘涛,等. 南钢高级别结构用钢板 Q960/Q1100 的研制与开发[J]. 轧钢,2013,30(2):57 - 61.
- [4] 田青超,许轲,翟国丽,等. 高强韧吊臂用管焊接接头的组织与性能[J]. 钢管,2017,46(2):7 - 11.
- [5] 郑江鹏,初铭强,张书彦,等. 1 000 MPa 级工程机械高强钢焊接性及接头组织性能[J]. 热加工工艺,2021,50(1):121 - 125.
- [6] 康健,卢峰,王昭东,等. 工程机械用 960 MPa 级调质钢板的淬火工艺研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32(1):52 - 55.
- [7] 汤亨强,柳美玲,柴立涛,等. 焊接工艺对 DP780 钢板焊缝形貌和组织性能的影响[J]. 轧钢,2022,39(1):50 - 55.
- [8] Lan L, Qiu C, Song H, et al. Correlation of Martensite - austenite Constituent and Cleavage Crack Initiation in Welding Heataffected Zone of Low Carbon Bainitic Steel [J]. Materials Letters, 2014,125(1):86 - 88.
- [9] 曾芳英. 新型超高强钢 WELDOX1100 焊接评定[J]. 金属加工,2014(6):47 - 49.