

低合金调质高强钢 STRENX1100E 焊接工艺研究

张晓刚

太原重型机械集团有限公司, 山西 太原 030024

DOI:10.61369/ME.2026020034

摘 要 : 为了满足大型起重机伸缩臂研制需求, 针对低合金调质高强钢 STRENX1100E 进行焊接性分析, 对焊接接头的力学性能和显微组织进行了研究。试验表明: 按该焊接工艺执行, STRENX1100E 钢板的焊接接头具有良好的力学性能, 能够满足我公司大型起重机伸缩臂的性能要求。

关 键 词 : 低合金调质高强钢; 力学性能; 显微组织; 大型起重机伸缩臂

Research on the Welding Process of Low Alloy Quenched and Tempered High-Strength Steel STRENX1100E

Zhang Xiaogang

Taiyuan Heavy Machinery Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030024

Abstract : To meet the requirements for the development of the telescopic arm of large cranes, the weldability of low-alloy quenched and tempered high-strength steel STRENX1100E was analyzed. The mechanical properties and microstructure of the welded joints were studied. The tests showed that, when this welding process was carried out, the welded joints of STRENX1100E steel plates had good mechanical properties and could meet the performance requirements of our company's large crane telescopic arms.

Keywords : low-alloy quenched and tempered high-strength steel; mechanical properties; microstructure; large crane telescopic arm

引言

我公司研发的大吨位伸缩臂起重机, 为了减轻车体自重, 提高整车结构强度, 关键结构件均采用高强钢材料。对起吊重物的关键受力件伸缩臂, 采用高强钢 STRENX1100E, 减轻了伸缩臂自重, 同时提高了结构稳定性。高强钢 STRENX1100E 为进口的瑞典 SSAB 公司的超高强钢板, 具有很高的强度和良好的韧性。

低合金调质高强钢是一种含碳量和合金元素都比较低而强度高的工程结构用钢, 随着工程结构向轻量化和大型化发展, 低合金调质钢因综合力学性能优异和经济效率显著而被广泛应用于机械工程领域。

本文对 STRENX1100E 钢板进行焊接工艺研究, 分析材料焊接性能。针对调整钢焊接易出现的冷裂纹、焊接接头综合性能弱化的问题, 制定了科学的焊接工艺方案并进行了焊接工艺试验和力学性能分析, 保证了大型起重机伸缩臂的制造。

一、STRENX1100E 钢焊接性分析

结构设计, 选取板厚 9mm 为焊接试验板, 材料的化学成分和力学性能分别见表 1 和表 2。

STRENX1100E 钢板属于低合金调质钢, 依据起重机伸缩臂

表 1 STRENX1100E 钢板化学成分实测值 (质量分数) %

名称	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	B
STRENX1100E	0.17	0.20	1.17	0.011	0.001	0.5	0.01	0.6	0.44	0.001

表 2 STRENX1100E 钢板力学性能

名称	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 (%)	-40°C 冲击功 KV2(J) 平均值
STRENX1100E	标准	1100	1250-1550	10
	实测	1192	1446	12

依据国际焊接学会推荐的碳当量公式： $CE(IIW)=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Cu+Ni)/15$ 计算，该钢板的碳当量为：0.594%，该材料 $CE>0.4\%$ 。依据日本JIS标准规定碳当量公式： $CE(JIS)=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14$ 计算，该钢板的碳当量为：0.60%。说明钢材易淬硬，焊接性较差，焊接时需预热才能防止焊接裂纹^[1]。

按照合金元素冷裂纹敏感指标 $P_{cm}=C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B[1]$ 计算，冷裂敏感指数为：0.296%，说明钢材有冷裂敏感性。

按照预热温度公式：

$T_0=324P_{cm}+17.7[H]+0.14\sigma_b+4.72\delta-214$,

计算得知：预热温度 $T_0=108^{\circ}C$

调质钢焊接时，当热影响区温度超过母材的回火温度，其机械性能将发生变化，要尽量限制焊接过程热量对母材的影响。在制定焊接工艺时，必须解决冷裂纹问题。

表3 焊丝化学成分实测值（质量分数）%

名称	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
ER120S-G	0.12	0.65	1.83	0.009	0.008	0.119	0.38	2.46	0.49

表4 焊丝熔敷金属力学性能实测值

名称	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 (%)	-40℃冲击功 KV2(J) 平均值
ER120S-G	893	959	15.5	63.2

（三）焊接工艺参数

焊接低合金调质钢时，影响冷裂纹和热影响区脆化的关键点是焊接时的冷却速度。冷却速度主要由焊接热输入决定，同时又受到预热及焊件散热条件的影响。快速冷却对防止脆化有利，但对防止冷裂纹不利。反之，减缓冷却可防止冷裂纹，却易引起热影响区的脆化。热影响区软化主要受焊接热输入的影响。因此为了确保焊缝的强度、韧性，不宜采用过大的焊接热输入，焊接操作上不用横向摆动，采取多层多道施焊。

焊接试验

（1）焊接试件组对尺寸：9X300X500，V型对接，单面焊双面成型（图1）；焊材选用 ER120S-G 实心焊丝，焊丝直径为 $\Phi 1.2mm$ ；焊机：KRII500；电源极性：直流反接；保护气体：20%CO₂+80%Ar混合气体；

坡口型式：V型50°；钝边尺寸：0；组对间隙：2mm；

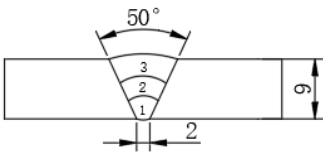


图1

（2）焊前清理坡口周围50mm范围内油污、铁锈、水分及其他杂质，坡口打磨出金属光泽。

（3）采取多层多道焊接方法，焊前预热100~120℃，预热范围：坡口两侧各75mm。焊丝干伸出度15~20mm，采用 ER120S-G，焊道层间温度 $\leq 170^{\circ}C$ ，焊后立即用石棉布包裹焊缝

二、STRENX1100E 钢板焊接工艺

（一）焊接方法

选用能量密度集中的焊接方法，结合我公司的设备情况，选用混合气体保护焊 MAG。

（二）焊接材料

由于该调质钢焊后不进行热处理，故在选择焊接材料时要求焊缝金属在焊态下具有接近母材的力学性能。选择强度级别比母材略低的焊材有利于防止冷裂纹,改善热影响区的冷裂倾向。目前，与该材料力学性能接近、技术成熟的焊材为 ER120S-G 级别。因此，按照低强原则选用意大利 FILEUR $\Phi 1.2mm$ ER120S-G 焊丝。焊丝化学成分和熔敷金属的力学性能分别见表3和表4。

至室温。焊接工艺参数见表5。焊接线能量：0.95~1.3KJ/mm。

表5 试件焊接工艺参数表

焊道	焊接方法	焊材规格 (mm)	电流强度 (A)	电弧电压 (V)	焊接速度 (mm/min)
打底	135	$\Phi 1.2$	100~110	18~20	100~110
填充	135	$\Phi 1.2$	240~260	26~28	320~330
盖面	135	$\Phi 1.2$	260~280	28~30	340~350
保护气体	Ar80%+CO ₂ 20%		气体流量 (L/min)		20

四、试验结果及分析

（一）试样的位置及截取^[2]

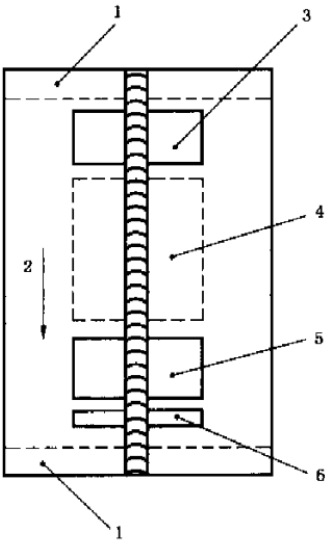


图2

试件进行 UT 探伤，避开缺欠部位，从合格的部位截取试样。取样位置说明：1—去除 25mm；2—焊接方向；3—该部位，一个拉伸试样，弯曲试样；4—该部位，三个 VWT 冲击试样，三个 VHT 冲击试样；5—该部位，一个拉伸试样；6—该部位，一个金相试样，一个硬度试样。

（二）拉伸、冲击试验结果

按照 GB/T 19869.1-2002/ISO 15614-1:2004 焊接工艺评定试验标准，焊接接头的力学性能结构见表 6。从表 6 中得知，两组试验的抗拉值分别为 1030MPa、1050MPa，断在焊缝。接头强度满足伸缩臂设计要求值。

冲击试验采用 JB-300B 冲击试验机 0833。冲击试样尺寸为 7.5X10X55，从冲击试验结果得知，-40℃低温冲击时，当缺口开在接头焊缝上时，冲击功分别为 48J、54J、56J，平均值为 52.7J；当缺口开在接头热影响区时，冲击功分别为 86J、100J、86J，平

表 6 STRENX1100E 焊接接头力学性能表

室温拉伸试验		-40℃冲击试验 KV2(J)					
抗拉强度 (MPa)	断裂位置	焊缝		热影响区			
1030	断在焊缝	48	54	56	86	100	86
1050	断在焊缝						

（三）硬度试验结果

硬度试验采用 VH-3 型维氏硬度计 30719，测量位置为母材左上部、右上部、左下部、右下部，热影响区左上部、右上部、左下部、右下部，焊缝上部、下部。测试结果见表 7。

位置	上部							下部						
	左			右			平均值	左			右			平均值
母材	373	359	324	390	386	361	365	359	352	359	396	399	394	376
热影响	408	401	352	378	327	321	365	321	310	317	324	328	302	317
焊缝	313, 312, 309						319	324, 318, 319						320

从表 7 可知，距焊缝上部母材硬度平均值为 HV365，下部母材硬度平均值为 HV376，母材硬度平均值为 HV371；距焊缝上部热影响区硬度平均值为 HV365，下部热影响区硬度平均值为 HV317；焊缝上部硬度平均值为 HV319，焊缝根部硬度平均值为 HV320。从测量数据得知，焊缝区的硬度略低，热影响区上部硬度与母材硬度基本相同，热影响区下部由于采用多层多道施焊，后道焊缝对前道焊缝有回火作用，硬度值略低。本试验条件下，未出现明显的热影响区软化和脆化问题。

（四）显微组织分析

STRENX1100E 钢板焊接接头的显微组织见表 8。母材组织主要为回火索氏体，晶粒度为 7.5；热影响区组织主要为回火索氏体，晶粒度为 5.5；焊缝组织，主要为粒状贝氏体 + 少量铁素体，晶粒度为 6.5。在本试验工艺参数条件下，焊缝区组织粒状贝氏体具有较高的强度和高的韧性，少量铁素体组织的存在，使焊缝区硬度略低于母材。热影响区组织回火索氏体，具有高韧性、高强度的特点，因此，热影响区的冲击试验值较高，硬度值与母材硬

度值基本一致。说明制定的焊接工艺合理。

表 8 STRENX1100E 钢板焊接接头组织表

部件	组织	晶粒度
母材	回火索氏体	7.5
热影响区	回火索氏体	5.5
焊缝	粒状贝氏体 + 少量铁素体	6.5

五、结论

（一）按照本焊接工艺焊接 STRENX1100E 钢，焊接接头各项力学性能均能达到相关标准要求，具有良好的强度和韧性，满足了设计要求。

（二）按照此焊接工艺，我公司生产的多台 500t 及以上吨位伸缩臂起重机，经过长期的吊装性能试验及现场使用，吊装过程安全可靠，伸缩臂制造满足设计要求。

参考文献

[1] 陈祝年. 焊接工程师手册（第 2 版）. 机械工业出版社，2016：191-201，923-927，992-998.
[2] 中国国家标准化管理委员会 . 钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验 GB/T19869.1-2005/ISO15614-1:2004.1-21.