

150mm超厚板多丝高效焊接技术

屠涛雄¹, 严汉光², 赵永状³, 易武强¹

1. 武汉天高熔接股份有限公司 湖北武汉 430056

2. 广船国际有限公司 广东广州 510000

3. 新大洋造船有限公司 江苏扬州 225000

摘要: 对150mm超厚板多丝高效焊接技术进行研究分析, 通过合理的坡口设计, 以及焊接工艺与焊接材料的匹配, 保证了Q355D钢板在采用大热输入的焊接条件下, 焊缝及热影响区性能满足标准要求。

关键词: 超厚板; 大热输入; 多丝焊; 高效焊

1 序言

近年来, 在造船、建筑、桥梁、石油化工及海洋平台等领域, 随着焊接结构的大型化和大跨度化, 焊接效率决定了总制造成本, 因此, 在中厚板焊接领域气电立焊、埋弧焊、电渣焊等大热输入焊接方法已相继得到了广泛应用^[1]。但是, 对于厚板焊接一直是困扰制造厂家的难题, 如焊接周期长、焊接道层多、需要反复翻转等问题。本文介绍了加合金粉填充的多丝埋弧焊接工艺, 采用大热输入焊接提高焊接效率的同时, 保证焊接接头的力学性能^[2], 实现了150mm超厚板的高效焊接。

2 工艺介绍

150mm超厚板多丝埋弧焊高效焊接技术采用特殊阶梯形坡口, 中间留20mm的钝边, 对接焊缝坡口如图1所示。

采用大直径焊丝 ($\phi 4.8\text{mm}/\phi 6.4\text{mm}$) 的三丝埋弧焊, 前丝直流 ($\phi 4.8\text{mm}$), 焊枪前倾角 15° , 中丝和后丝交流 ($\phi 6.4\text{mm}$), 中枪垂直, 焊枪后倾角 15° 。前丝与中丝间隔35mm, 中丝与后丝间隔75mm, 焊丝分布如图2所示。

3 试验材料、设备及方法

试验用钢板材质为Q355D, 符合GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》的规定。试板尺寸为150mm×200mm×1000mm, 引弧板100mm×100mm, 收弧板400mm×100mm。为了提高焊接效率, 焊接前填充了特殊研制的合金

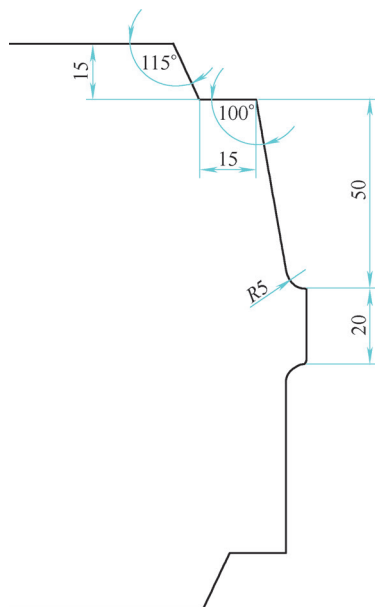


图1 焊接坡口

粉, 颗粒度为80~100目 (0.18~0.15mm)。焊剂为特种高效埋弧焊剂, 焊剂颗粒度为12~80目 (1.7~0.18mm)。焊接材料化学成分见表1~表3。焊机型号为林肯DC1500+AC1200+AC1200埋弧焊机, 焊接参数见表4, 热输入高达600kJ/cm。焊前对母材Q355D板进行待焊接区清理并对引弧端350~400mm长的焊缝及两侧100mm范围内预热100~150℃。焊缝外观如图3所示。

通过对以上焊接接头进行超声波检测, 均未发现任何超标缺陷, 接头宏观金相显示熔合情况良好。

4 工艺特点

1) 坡口采用U形+阶梯状坡口，U形坡口更有利于增加熔深，阶梯状坡口有利于第一道焊缝的排渣、脱渣。由于第一道深熔大热输入焊接，熔渣多且厚，所以第一道阶梯给予熔渣体积空间，能有效防止焊缝夹渣。焊道布置如图4所示。

2) 为防止在大热输入焊接条件下的烧穿情况发生，焊接第一道前，在背面焊缝处贴特质柔性衬垫以防止烧穿。柔性衬垫外部采用玻璃纤维材质包裹，内部填充高熔点衬垫材质物料，柔性衬垫外观如图5所示。柔性衬垫的特点是能很好地与背面焊缝贴合，并具有较高熔点，即使在第一道焊透的条件下仍能有效地衬托住铁液，防止烧穿。

3) 焊丝纵向排列，前丝直流与中丝交流共熔池，因热输入较大、熔池长，故为不互相干扰，应与后丝交流间隔35mm。前丝采用 $\phi 4.8\text{mm}$ 焊丝，并

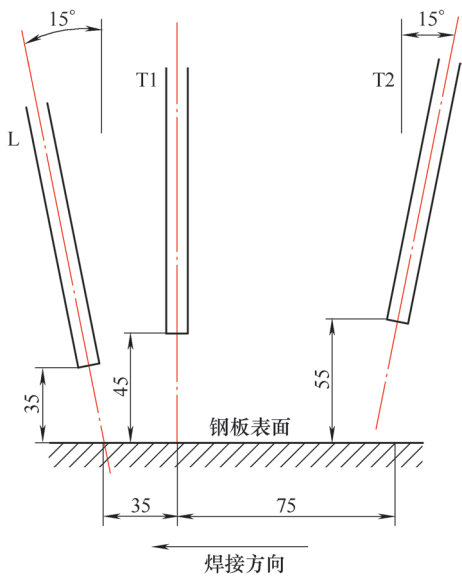


图2 焊丝分布

表1 埋弧焊丝化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti
0.08	0.073	1.80	0.015	0.008	0.35	0.12

表2 埋弧焊剂化学成分（质量分数） (%)

CaO+MgO	MnO+Al ₂ O ₃	SiO ₂ +TiO ₂	CaF ₂	Fe	P	S
20~25	5~10	20~25	5~10	40~50	0.018	0.009

表3 合金粉化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Ti	Ni
0.08	0.09	4.0	0.008	0.006	1.5	0.11

表4 150mm厚钢板焊接参数

焊道	前丝L		中丝T1		后丝T2		焊接速度 /cm·min ⁻¹	热输入 /kJ·cm ⁻¹	备注
	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接电流/A	电弧电压/V			
根部	1480	35	1150	40	1150	45	15	600	前两丝间距35mm， 后两丝间距75mm； 盖面时后两丝分别往 坡口两边方向偏离前 丝3~5mm
填充	1200	35	1100	45	1100	45	40	212	
盖面	1300	35	1100	45	1100	45	40	217	



图3 焊缝外观

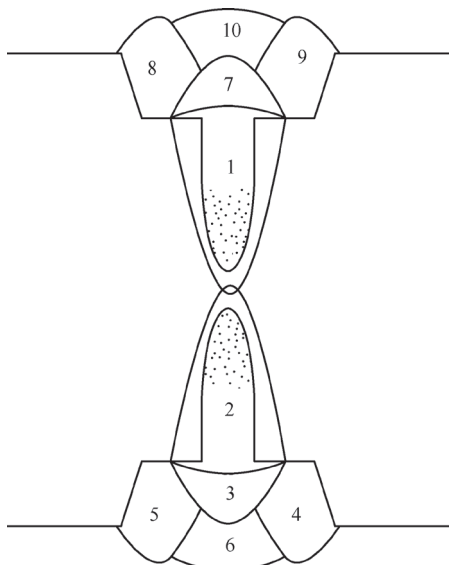


图4 焊道布置

注：1~9代表焊接顺序。



图5 柔性衬垫外观

且前倾 15° ，可以获得较大的熔深，熔透钝边。中丝采用 $\phi 6.4\text{mm}$ 焊丝，后倾角 15° ，后两根焊丝间隔 75mm ，在增大熔敷量的同时，焊丝后倾可以获得较大的熔宽，一道盖面^[2]。

4) 在第一道采用高达 600kJ/cm 的深熔大热输入焊缝中加入一定量的合金粉，首先，能一定程度上增大熔覆效率；其次，由于合金粉的吸热及匀化作用，分散了第一根焊丝大电流的电流密度，一定程度上减小了钢板承受的大电流密度，对减小焊接接头热影响区的性能恶化有积极作用；最后，通过在

合金粉中加入适量的细化组织晶粒元素，对提升焊缝冲击韧度有积极作用。

5) 大热输入焊接工艺，不同的钢种，由于成分以及轧制状态不同，因此热输入对热影响区韧性的影响也不同。对于Q355级热轧、正火状态的钢材，合金元素少，碳含量高，一般情况下，当采用小热输入方法焊接时，冷却速度较快，易得到上贝氏体组织，晶粒比较细小，接头性能良好；相反，当采用大热输入方法焊接时，冷却速度较慢，晶粒粗大，将严重降低热影响区韧性。总体来说，这类钢材采用大热输入方法焊接时，如果选用的焊材和焊接参数不当，将容易产生接头冲击韧度不合格的问题。

5 焊剂特点

1) 焊剂主要熔渣为 $\text{MgO}+\text{SiO}_2+\text{TiO}+\text{CaF}_2$ 体系，碱度值为1.5，能获得大热输入条件下良好的焊接工艺性能。

2) 焊剂中合金比例接近40%，合金成分主要为Mn、Si、Ti、Fe。因焊接热输入较大，熔池合金会有一定烧损，通过焊剂中的Mn、Si过渡，保证焊缝的合金成分，使焊接接头拥有一定的强度与韧性。Ti-B系细化铁素体组织晶粒是十分明显的，通过焊丝和焊剂过渡Ti与B共同作用，可细化熔池组织晶粒。同时，B原子半径小，可以离散到焊接接头热影响区，细化热影响区晶粒。Fe主要是过渡到熔池，增加焊接熔敷量。

6 性能试验及结果分析

对 $150\text{mm}+150\text{mm}$ 的对接接头进行力学性能试验，焊接接头性能检测依据GB 50661—2011《钢结构焊接规范》要求进行，检测内容为：焊接接头化学成分、拉伸性能、低温冲击性能、宏观金相及硬度。

6.1 焊缝化学成分

焊缝化学成分检测使用X射线荧光光谱仪进行分析，结果见表5。

表5 焊缝化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Ti	Ni	B
0.08	0.13	1.51	0.012	0.017	0.61	0.28	0.006

测试结果表明：焊缝化学成分合格，尤其是通过合金粉和焊剂向焊缝金属中过渡了部分Ti、B、Ni元素，有细化组织晶粒、提高焊接接头韧性的作用。

6.2 焊接接头力学性能

焊接接头力学性能试验依据GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》以及GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》，检测结果见表6，均满足GB 50661—2011标准要求。

表6 焊接接头力学性能

抗拉强度/MPa	断裂位置	4r侧弯180°
528	母材	合格
525	母材	合格
528	母材	合格
518	母材	合格

6.3 接头冲击性能

焊接接头冲击吸收能量试验依据GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》，取样依据GB 50661—2011规定，如图6所示，检测结果见表7。

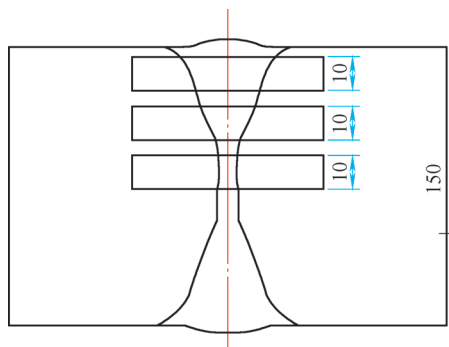


图6 冲击试样取样

表7 -20℃低温冲击试验结果 (J)

取样位置	焊缝金属	热影响区	标准要求
焊缝表面	60、58、56	138、87、92	≥34
1/4板厚	58、62、55	99、125、108	
1/2板厚	71、58、66	88、106、115	

测试结果表明：焊缝及热影响区冲击吸收能量满足GB 50661—2011《钢结构焊接规范》要求，且焊接接头具有良好的低温韧性储备。

6.4 接头宏观金相

150mm+150mm对接接头宏观金相如图7所示，焊接接头熔合良好，无夹渣、咬边、未熔合等缺陷。

6.5 接头硬度

接头硬度试验依据GB/T 2654—2008《焊



图7 150mm+150mm接头宏观金相

接接头硬度试验方法》，检测结果见表8，均≤350HV10。

表8 焊接接头硬度 (HV)

母材 (左)	热影响区 (左)	焊缝	热影响区 (右)	母材 (右)	标准
165~175	175~195	189~204	180~191	161~169	≤350

7 结束语

1) 对150mm超厚板对接焊缝多丝埋弧焊坡口及焊接工艺设计，能够实现大热输入条件下的全熔透焊接。

2) 高效深熔三丝埋弧焊，配合特殊成分设计的焊接材料和填充材料，保证在高达600kJ/cm热输入下，焊接接头各项指标能达到GB 50661—2011《钢结构焊接规范》对Q355D钢板焊接接头的技术要求。

参考文献：

- [1] 宋峰雨，李艳梅，王平，等.大热输入焊接接头组织性能研究[J].内蒙古工业大学学报，2017，36(1)：6-9.
- [2] 屠涛雄，李华，赵永状.70mm厚板高效焊接工艺及接头性能研究[J].金属加工（热加工），2020(9)：12-15.

MW 20210815