

S355热轧H型钢SAW焊接接头微观组织与低温冲击性能研究

方革新

马鞍山市人事考试院（市职业技能鉴定指导中心） 安徽马鞍山 243011

摘要：采用埋弧焊（SAW）焊接S355热轧H型钢，利用光学显微镜和扫描电镜观察焊接接头微观组织，按照欧洲标准对焊接接头进行显微硬度测试和低温冲击性能试验，利用SEM观察断口形貌进行分析。结果表明：焊缝区组织主要由针状铁素体+珠光体构成；热影响区由粗晶区、细晶区和不完全重结晶区构成，粗晶区组织主要由粗大的铁素体+珠光体+少量的块状铁素体+粒状贝氏体构成；细晶区组织由细小均匀的铁素体和珠光体构成；不完全重结晶区组织由细小的铁素体、珠光体及原始母材带状组织构成。焊接接头各区域维氏硬度分布均匀，均 $<185\text{HV}10$ 。焊接接头 -40°C 冲击吸收能量在熔合线位置最高，在其他位置均有一定的降低，冲击性能均满足使用要求。

关键词：S355；SAW；显微组织；低温冲击性能

Microstructure and low-temperature impact properties of saw welded joint of S355 hot-rolled H-beam steel

Fang Gexin

Personnel Examination Bureau Of Maanshan (Occupational Skill Testing Authority Of Maanshan) , Maanshan
243011, Anhui, China

Abstract: S355 hot-rolled H-beam was welded by SAW. The microstructure of the welded joint was observed by optical microscope and scanning electron microscope. The microhardness and low temperature impact property of the welded joint were tested according to requirements of European standards, and the fracture morphology was observed by scanning electron microscope. The results show that the microstructure of weld zone is mainly composed of acicular ferrite and pearlite, the microstructure of heat-affected zone (HAZ) is composed of coarse-grained zone, fine-grained zone and incomplete recrystallization zone, the coarse-grained zone is mainly composed of coarse ferrite and pearlite, and a small amount of massive ferrite and granular bainite, the fine-grained zone is composed of fine ferrite and perlite. The microstructure of partially recrystallized zone is composed of fine ferrite, pearlite and banded structure of original base metal. The Vickers hardness of the welded joints is less than $185\text{HV}10$ which uniform distributed in all areas of welded joints, and the impact toughness at -40°C of the welded joints meets the requirements and it is highest at the fusion line position and decreases at all other positions.

Keywords: S355; SAW; microstructure; low-temperature impact performance

作者简介：方革新，高级工程师，主要研究方向为焊接工艺，E-mail：459309040@qq.com。

1 序言

海洋工程结构因其严苛的使用工作环境，对钢材及其焊接接头的强韧性和低温冲击性能等要求严格^[1]。S355热轧H型钢是按照欧洲标准EN 10225：2009《固定式近海结构用可焊接结构钢——交货技术要求》生产的一种海洋结构用焊接结构钢，因其具有的优良的耐候性、耐蚀性和强韧性，所以在海洋结构和严寒地区等工程领域得到广泛应用^[2]。

鉴于海洋工程的重要性和严苛性，选用合适的焊接方法进行焊接结构制造是至关重要的。埋弧焊（SAW）因其生产效率高、焊缝质量高等优点而在海洋结构和船舶制造等领域应用广泛^[3, 4]。本试验采用SAW方法对35.5mm厚的S355热轧H型钢进行焊接，对焊接接头进行微观组织分析、硬度测试、拉伸和低温冲击性能试验。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验母材为S355热轧H型钢，其化学成分和力学性能分别见表1和表2。先选用火焰切割翼缘长度为400mm的S355热轧H型钢，然后使用锯床去除火焰切割造成的热影响区，最后用铣床去除H型钢腹板并将上翼板厚加工到350mm为待焊试样，SAW焊接试板最终尺寸为400mm×350mm×35.5mm。SAW焊接时背面采用临时薄钢带作为焊接衬垫。焊接采用半V形坡口，坡口角度为40°，钝边尺寸为2mm，根部间隙为6mm。试验采用FCAW进行打底焊，填充材料为LW-81K2H，采用SAW进行填充焊和盖面焊，选用Ni1K焊丝和BF-40H焊剂。对试板坡口两侧50mm区域进行打磨清理，露出金属光泽，对焊丝表面各种杂质进行清理操作，BF-40H焊剂在350℃下保温2h烘干备用。

表1 S355热轧H型钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	Nb	Ti	V	Al
0.10	0.22	1.40	0.02	0.003	0.03	0.001	0.01	0.01	0.006	—	0.002	0.03	0.015

表2 S355热轧H型钢力学性能

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	屈强比	伸长率 （%）	-40℃平均冲击 吸收能量/J
485~492	347~354	≤0.87	>22	>140

2.2 试验方法

（1）焊接工艺试验 焊接试板如图1所示，根

据EN 10225：2009要求，采用平焊对接。打底焊FCAW采用FRONIUS TPS4000型数字脉冲气体保护焊机，80%CO₂+20%Ar联合保护，气体流量为20L/min，焊前将焊接试板预热至150℃。使用林肯电气NA-3型龙门架式埋弧焊设备进行焊接操作，焊接装配间隙为6mm。焊接过程中，前后焊道间温度保持在150℃左右，FCAW打底焊和SAW填充焊、盖面焊接参数见表3。

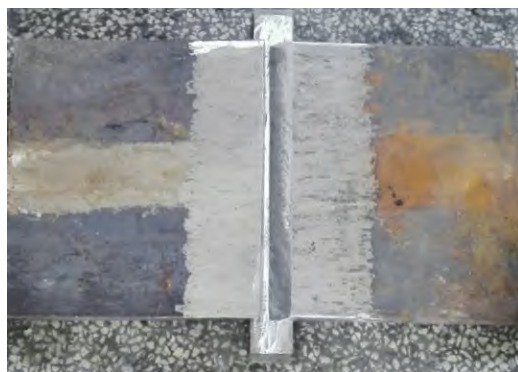


图1 焊接试板

表3 试验用焊接参数

焊接道次	焊接方法	焊丝	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /（mm/s）	热输入 /（kJ/mm）
1~2	FCAW	LW-81K2H	190~210	26.4~26.6	4.3~5.1	0.70~0.91
3~盖面	SAW	Ni1K	540~600	32.0~33.0	5.0~5.6	3.32~3.61

（2）焊接接头微观组织观察 根据EN 10225：2009要求，以H型钢轧制方向所在的平面为观察面对母材取样，焊接接头试样包含接头的各个区域。试样进行打磨、抛光，用4%的HNO₃酒精溶液浸蚀后，采用基恩士VHX-900型体视显微镜和日本电子株式会社JSM-6490LV扫描电子显微镜分别对焊缝、热影响区和母材微观组织进行观察。

（3）焊接接头硬度测试 硬度试样的取样和测试均按照EN 10225：2009要求，在SAW焊接试板上切割80mm×35.5mm×15mm硬度试样，对试样进行金相磨抛并腐蚀出焊缝和热影响区组织后，使用HV-1000TPTA显微硬度仪进行焊接接头硬度测试，加载载荷为98N，加载时间15s。如图2所示，1、2、3测试点平行于焊接接头熔合线，2、4、5、6、7点由熔合线至母材沿水平方向分布。



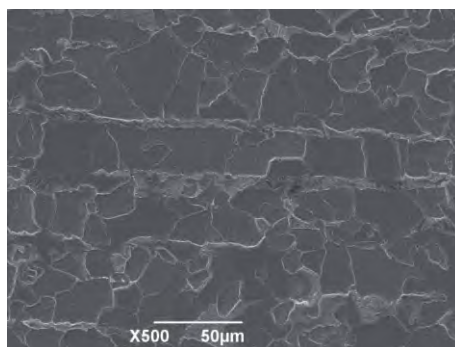
图2 硬度测试位置示意

图3 SAW焊接接头冲击试样取样位置

图4 低温冲击试样加工要求

3.1 焊接接头微观组织

a) 光鏡



b) 扫描电镜

图5 热轧H型钢母材微观组织

54

根据所受热输入影响的大小,由焊缝至母材方向,可将热影响区划分为粗晶区、细晶区和不完全重结晶区3个区域^[5]。图6b所示为焊接热影响区粗晶区组织,主要由粗大的铁素体和珠光体所构成,存在少量的块状铁素体及粒状贝氏体。图6c所示为焊接热影响区细晶区组织,由细小均匀的铁素体和珠光体构成。SAW焊接过程中,母材中的铁素体和珠光体组织全部转变为奥氏体,但是由于相对远离焊缝区最高温度不超过1200℃,奥氏体晶粒细小,因此在冷却过程中转变为细小均匀的铁素体和珠光体组织。图6d所示为焊接热影响区不完全重结晶区的

微观组织,不完全重结晶区由两部分所构成,一部分是受SAW焊接热循环热影响获得的细小均匀的铁素体与珠光体,另一部分为母材中未发生相变的原始铁素体和珠光体组织,该部分组织依然保存有明显的带状组织特点。

3.2 焊接接头的硬度和低温冲击性能

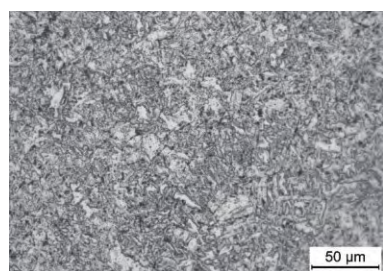
焊接接头的硬度测试结果见表4。由表4可知,热影响区内平行于熔合线的1、2、3点硬度值略高于母材方向4、5、6、7点硬度值,SAW焊接接头的维氏硬度分布较均匀,均位于145~185HV10之间,符合EN 10225:2009焊接工艺评定标准的要求。

表4 焊接接头的硬度值 (HV10)

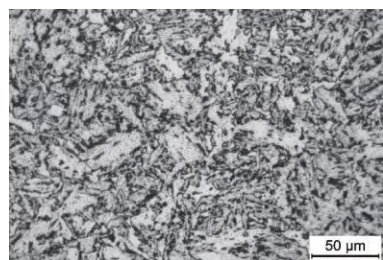
位置	1	2	3	4	5	6	7
A	154.1	151.2	148.9	149.8	146.3	148.5	148.1
B	164.7	164.3	170.0	167.9	158.1	160.1	154.6
C	176.6	176.5	181.7	172.5	164.5	156.5	158.2
D	174.5	176.1	171.8	169.5	161.9	153.6	153.4

母材-40℃低温冲击吸收能量为143J,焊接接头-40℃低温冲击吸收能量见表5。由表5可知,SAW焊接接头-40℃低温冲击吸收能量符合EN 10225:2009的要求,SAW焊接接头在熔合线内2mm位置冲击吸收能量低于母材,占母材冲击吸收能量的33.53%;SAW焊接接头顶部的熔合线位置(FL)冲击吸收能量低于母材,占母材冲击吸收能量的38.24%;SAW焊接接头顶、中间和底部的熔合线外5mm位置冲击吸收能量低于母材,分别占母材冲击吸收能量的44.12%、53.53%和68.23%。

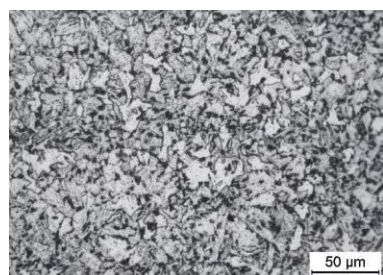
冲击吸收能量在熔合线位置最高,在其他位置均有一定的降低,并且熔合线内2mm位置冲击吸收能量要高于熔合线外2mm位置,熔合线外2mm和熔合线外5mm位置冲击吸收能量最低。这主要是由于埋弧焊缝组织和熔合线附近组织由先析出的针状铁素体及部分珠光体构成,大量针状铁素体的存在有利于提升低温冲击性能。顶部盖面焊焊缝熔合线内2mm位置冲击吸收能量显著低于中部填充焊焊缝和底部打底焊焊缝,这主要是底部和中部的打底焊、填充焊焊缝组织会受到上层焊道焊接热输入的影响,焊缝组织晶粒细化,因而其韧性优于盖面焊焊缝组织。



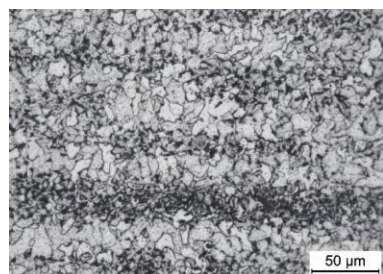
a) 焊缝区



b) 粗晶区



c) 细晶区



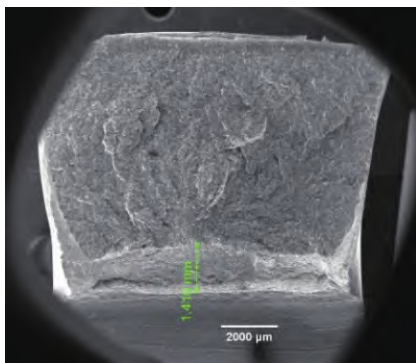
d) 不完全重结晶区

图6 焊接接头盖面焊显微组织

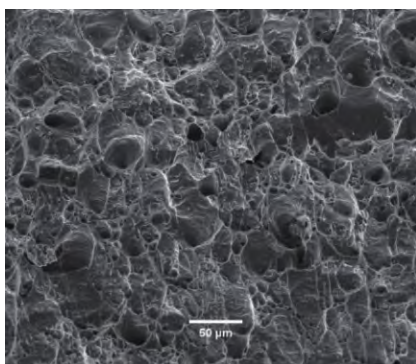
表5 焊接接头-40℃冲击吸收能量 (J)

位置	FL-2	FL	FL+2	FL+5
顶部	57	65	190	75
中部	184	253	156	91
底部	193	273	181	116

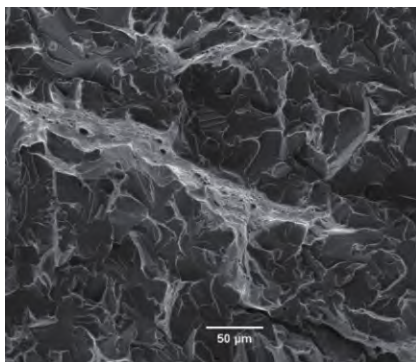
图7所示为焊接接头中部填缝焊焊缝熔合线内2mm位置-40℃低温冲击断口形貌。由图7a可知,熔合线内2mm位置冲击断口纤维区约1.410mm,放射区面积占断口面积的80%以上;由图7b可观察到,纤维区主要为大小不等的韧窝和少量准解理;由图7c可知,放射区主要是解理和准解理构成,可见比较明显的撕裂棱和二次裂纹。



a) 宏观断口



b) 纤维区



c) 放射区

图7 熔合线内2mm位置冲击断口形貌

4 结束语

对热轧H型钢进行埋弧焊工艺试验,所获得焊接接头满足EN 10225:2009的使用要求。接头焊缝区组织主要由针状铁素体+珠光体构成,焊接热影响区主要是铁素体+珠光体组织,不同的是热影响区粗晶区中的先共析铁素体晶粒粗大,并含有少量的粒状贝氏体;热影响区细晶区组织相对细小均匀,热影响区不完全重结晶区保留了母材的带状组织特征。焊接接头各位置的硬度<185HV10,-40℃冲击吸收能量>50J,在试样底部熔合线位置冲击吸收能量最高,达到273J。

参考文献:

- [1] 狄国标,刘振宇,郝利强,等.海洋平台用钢的生产现状及发展趋势[J].机械工程材料,2008,32(8):1-3.
- [2] 张志慧,马永福,叶高旗,等.S355K2热轧H型钢低温冲击性能的研究与改进[J].热加工工艺,2022,51(21):95-101.
- [3] 白晓科,孙爱丽,王旭.海洋工程用S355NL低温厚钢板焊接试验研究[J].金属加工(热加工),2024(1):47-51.
- [4] 宋晓辉,李楠楠,周明阳,等.预热温度对S355钢L型焊接接头温度场、应力场、应变场和微观组织的影响研究[J].热加工工艺,2019,48(9):198-203.
- [5] GAO W, WANG D, CHENG F, et al. Microstructural and mechanical performance of underwater wet welded S355 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 333-340.

MW 20240607