

550MPa级热轧H型钢冷裂纹敏感性研究

计遥遥¹, 国礼杰², 包忠峰³

1. 马鞍山钢铁股份有限公司技术中心 安徽马鞍山 243000

2. 安徽工业大学材料科学与工程学院 安徽马鞍山 243002

3. 中国工程建设焊接协会 北京 100088

摘要: 针对550MPa级海洋石油平台用热轧H型钢, 通过计算碳当量和冷裂纹敏感系数, 并采用可控热拘束试验和斜Y坡口试验分析其抗裂纹敏感性。计算结果表明: C_E (0.35%) 和 P_{cm} (0.18%) 值低, 该热轧H型钢具有良好的焊接性。可控热拘束试验 (CTS Test) 裂纹试验表明: MERIT[®] JMTM-Ni1 气体保护焊 (GMAW) 实芯焊丝与母材匹配接头具有较好的抗裂纹敏感性, 断面裂纹率为0, 焊缝及热影响区硬度小于325 (HV5), 符合EN 10225—2009标准要求, 也满足海洋工程的使用要求。斜Y坡口焊接裂纹试验表明: 550MPa级热轧H型钢具有较好的抗裂纹敏感性, 其断面裂纹率为0, 符合API RP 2Z—2005标准要求, 满足海洋工程的使用要求。

关键词: 热轧H型钢; 冷裂纹敏感性; 碳当量; 可控热拘束试验; 斜Y坡口

1 序言

焊接冷裂纹在低合金高强度钢焊接研究中是重点研究问题, 它的主要影响因素有熔敷金属的扩散氢含量、焊接拘束应力水平、焊接形成的淬硬组织等^[1-3]。低合金高强钢焊接接头的力学性能优劣受冷裂纹的直接影响, 焊接冷裂纹在低合金高强度钢焊接接头中是一个严重的隐患, 有必要进行冷裂敏感性的研究^[4, 5]。

海洋石油用热轧H型钢大量采用焊接工艺施工, 焊接接头长期承受低温冲击载荷的作用, 服役环境恶劣, 因而提高焊接接头力学性能和可靠性对海洋石油平台的可靠服役至关重要^[6, 7]。本文对海洋石油平台用550MPa级热轧H型钢冷裂纹敏感性进行研究, 以确定钢材焊接性, 为550MPa级热轧H型钢合理焊接工艺, 提高焊接接头性能提供理论指

导, 具有重要的工程应用价值。

2 碳当量与冷裂纹敏感指数计算

碳含量对材料的焊接有重要的影响, 碳当量法 (Calculation of Carbon Equivalents) 是把钢中包括碳在内的合金元素对淬硬、冷裂和脆化的影响折合碳的相当含量, 用以进行焊接性分析的间接试验方法。碳当量越高, 则材料的冷裂敏感性越大, 焊接性越差。选用国际焊接学会 (IIW) 所定义碳当量计算公式计算试验钢的碳当量。

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5} (\%)$$

公式中的元素符号分别为该元素的质量分数, 该式主要适用于中、高强度的非调质低合金高强度钢 ($\sigma_b=500\sim 900\text{MPa}$)。当板厚小于20mm,

胀水箱箱体外形尺寸, 满足图样要求及TB/T 2250关于焊接结构未标注尺寸公差要求; 为满足焊缝致密性, 在膨胀水箱箱体组焊后按图样要求进行水压试验, 待水压缓慢升至100kPa后, 保压5min后检查所有焊缝和连接部位, 未发现渗漏, 检查和验收合格, 满足使用要求。

参考文献:

[1] 刘政军, 徐德昆. 不锈钢焊接及质量控制[M]. 北京:

化学工业出版社, 2009.

[2] 张洪逵, 孟宪伟, 戴忠晨, 等. 不锈钢车体电阻焊焊点修补工艺研究[J]. 金属加工 (热加工), 2013 (6): 49-51.

[3] 巢杰, 杨杰, 吴永福, 等. 小管径水平固定全位置TIG焊接技术[J]. 金属加工 (热加工), 2020 (9): 58-59, 62.

MW 20201015

$C_E(\text{IIW}) < 0.40\%$ 时, 钢材淬硬倾向不大, 焊接性良好, 不需要预热; $C_E(\text{IIW}) = 0.40\% \sim 0.60\%$, 特别是 $> 0.5\%$ 时, 钢材易于淬硬, 焊前需要预热。

本项目所用的热轧H型钢强度级别为550MPa, 其化学成分见表1, $C_E(\text{IIW})$ 为0.35%, 低于上述标准中的碳当量值, 淬硬倾向不大, 焊接性良好。利用Graville图可以看出, SM490YB热轧H型钢含碳量为0.1%, 碳当量为0.35%, 处于易焊接区间范围内, 具有良好的焊接性。

表1 550MPa级热轧H型钢化学成分(质量分数)(%)

C	Si	Mn	P	S	V	Nb
0.10	0.26	1.38	0.016	0.009	0.039	0.001

按照日本工业标准(JIS)中, 日本伊藤等人提出的冷裂纹敏感指数 P_{cm} 公式来计算试验材料的冷裂纹敏感系数。当钢板的 $P_{cm} \leq 0.20\%$ 时, 不需要预热就能防止焊缝根部产生裂纹(在拘束条件下施焊时最易产生的冷裂纹的位置就是焊缝根部)。 P_{cm} 的计算公式基于大量不同化学成分的低合金高强度钢的“小铁研试验”上提出的, 因此, 目前焊接研究中多数采用 P_{cm} 来评估低合金高强度钢焊接的冷裂纹敏感性。

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

根据试验钢的化学成分, 按照上式计算出试验钢的冷裂敏感指数 P_{cm} 为0.18%。

3 可控热拘束试验

经锯切、刨床、磨床加工成待焊试样, 试样上板尺寸为75mm×75mm×24mm, 下板尺寸250mm×100mm×24mm, 表面粗糙度值要求为0.8μm, 符合EN 10225标准要求, 如图1所示。

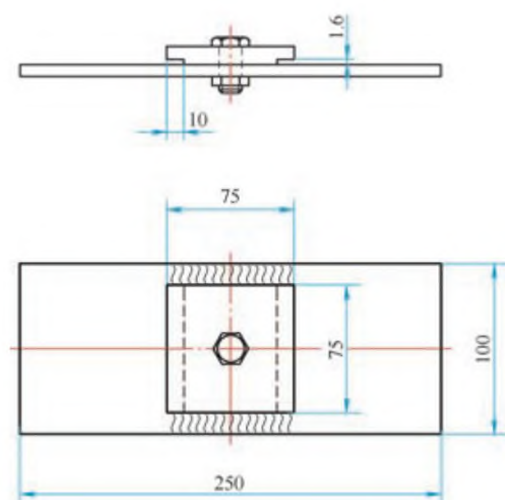


图1 待焊试板尺寸

采用MAG焊, 焊接设备选用Fronius TPS 4000型数字脉冲气体保护焊机。焊接接头强度匹配采用等强匹配原则, 焊接材料选择MERIT® JMTM-Ni1气体保护焊(GMAW)实芯焊丝, 焊丝直径为1.2mm。焊丝的化学成分及熔敷金属力学性能分别见表2和表3。

表2 焊丝的化学成分(质量分数)(%)

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo
0.10	1.15	0.59	0.003	0.009	0.15	1.08	0.02	0.005

表3 熔敷金属的力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率(%)	冲击吸收能量/J(-45℃)
500	580	30	110

焊接试样表面经去油处理、组装后进行焊接。待拘束焊缝焊接结束72h后, 焊接试验焊缝1, 焊后放入水中冷却。试验焊缝1焊接结束72h后, 焊接试验焊缝2, 同样, 焊后放入水中冷却, 具体工艺参数见表4。

表4 可控拘束热裂纹试验焊接工艺

焊接道次	焊接方法	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/mm·s ⁻¹	热输入/kJ·mm ⁻¹
焊缝1	MAG	161~165	25	2.8	1.01~1.04
焊缝2	MAG	165~167	25	2.9	0.96~0.97

待试验焊缝完成后放置72h, 沿焊接方向把试验焊缝等分, 分别标记为1#~6#, 采用线切割方法进行加工, 试样经打磨抛光后, 放到4%的硝酸酒精中腐蚀。腐蚀好的试样利用体视显微镜(MHT-1100UVA)和光学显微镜(Olympus PME3)采集宏观和微观金相照片。

按照EN 10225—2009要求测量其断面裂纹高度, 按照下面的断面裂纹率计算公式分别计算出6个断面裂纹率, 然后求出其平均值。

$$C_1 = \frac{\sum L_1}{S_1} \times 100 \quad (\%)$$

$$C_2 = \frac{\sum L_2}{S_2} \times 100 \quad (\%)$$

式中 C_1 ——上板裂纹率(%) ;

C_2 ——下板裂纹率(%) ;

S_1 ——上板断裂面积(mm²) ;

S_2 ——下板断裂面积(mm²) ;

$\sum L_1$ ——上板裂纹等效长度之和(mm) ;

$\sum L_2$ ——下板裂纹等效长度之和(mm) 。

根据EN 10225—2009要求，在全自动维氏硬度计（Wilson VH3100，美国Buehler）上分别测量焊接热影响区和焊缝硬度。试验选择的载荷为5kg（HV5），加载时间为15s。

所有试样的横截面都未发现气孔、未熔合等缺陷。选用MERIT® JMTM-Ni1焊丝试验在1kJ/mm热输入条件下，图2为可控热拘束试样焊缝断面宏观形貌，裂纹统计结果见表5。所有试样横截面都未发现断面裂纹，断面裂纹率为0，说明母材及匹配接头都具有较好的抗裂纹敏感性，可以满足实际生产过程中的使用要求。

表5 可控热拘束试验（CTS）裂纹率统计

试样编号	ΣL_1 /mm	S_1 /mm	C_1 (%)	ΣL_2 /mm	S_2 /mm	C_2 (%)	裂纹
CTS1	0	13.68	0	0	16.39	0	无
CTS2	0	13.35	0	0	17.06	0	无
CTS3	0	14.28	0	0	17.63	0	无
CTS4	0	14.69	0	0	18.55	0	无
CTS5	0	15.06	0	0	18.23	0	无
CTS6	0	15.29	0	0	18.39	0	无

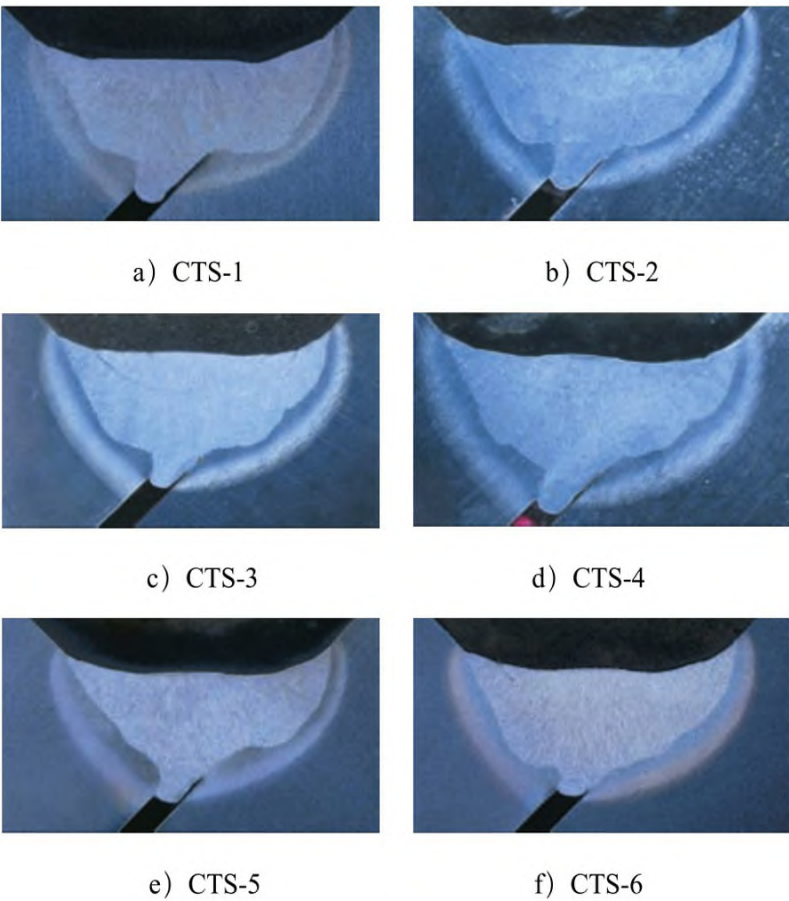


图2 可控热拘束试样焊缝断面宏观形貌

表6是试验用热轧H型钢CTS试验硬度测试结果，焊缝硬度在217~246HV；焊接热影响区硬度在213~310HV，平均硬度接近300（HV5）。相对于母材（160~170HV10），焊接热影响区硬度明显提高，说明焊接热循环导致焊接接头性能的变化。虽然焊接热循环过程中焊接热影响区硬度上升，但是

整个接头硬度小于325（HV5），满足EN 10225—2009标准要求。

表6 CTS焊接接头2#、5#试样硬度测试结果

试样编号		HAZ（HV5）		焊缝（HV5）	
		硬度值	平均	硬度值	平均
焊缝1	顶部	213, 281, 312, 311, 306	293	217, 234, 226	226
	底部	307, 302, 296, 300, 303			
焊缝2	顶部	310, 314, 313, 315, 287	299	246, 235, 234	238
	底部	315, 312, 244, 288, 296			

4 斜Y坡口试验

根据标准API RP 2Z—2005中给出的试件形状和尺寸，对斜Y坡口焊接裂纹试验的试件进行加工。用锯床、铣床机械切削加工制成尺寸为200mm×75mm×24mm（厚度方向）的焊接试板，其中200mm方向为焊道方向，75mm方向为钢板的轧制方向。试验焊缝长80mm，坡口形式为斜Y形，焊脚高度为厚度的1/2。两侧拘束焊缝长度为60mm，坡口形式为X形，焊脚高度为厚度的1/2。装配间隙为2mm。

试验采用MAG焊，焊接设备选用Fronius TPS4000型数字脉冲气体保护焊机。根据等强匹配原则，焊接材料选择MERIT® JMTM-Ni1气体保护焊（GMAW）实芯焊丝，直径为1.2mm。

待拘束焊缝焊接结束48h后，焊接试验焊缝，具体工艺参数见表7。

表7 斜Y坡口试验焊接参数

焊接道次	焊接方法	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/mm·s ⁻¹	热输入/kJ·mm ⁻¹
固定焊缝	MAG	158~165	25	3.8~4.1	0.67~0.76
试验焊缝	MAG	240~245	25	4.5	0.92~1.02

待试验焊缝完成后放置48h，经磁粉检测仪后观察试验焊缝表面，所有焊板均未出现表面裂纹和根部裂纹，试验焊缝未出现表面裂纹。

断面裂纹的计算需要对试板进行解剖，每个试板横剖成5段，沿焊接方向把试验焊缝等分，分别标记为1#~5#。采用线切割方法进行加工，试样经打磨

抛光后，放到4%的硝酸酒精中腐蚀，腐蚀好的试样利用体视显微镜和光学显微镜采集宏观和微观金相照片。按照API RP 2Z—2005标准要求测量其断面裂纹高度，按照断面裂纹率计算公式分别计算出5个断面裂纹率，然后求出其平均值。

$$C_s = \frac{H_c}{S} \times 100 (\%)$$

式中 C_s ——断面裂纹率 (%)；

H_c ——断面裂纹高度 (mm)；

H ——试验中焊缝的最小厚度 (mm)。

每个试样经研磨、抛光、腐蚀后，测量计算焊缝及热影响区裂纹率，试样的5个横截面都未发现气孔、夹杂等宏观缺陷。所有试样横截面都未发现断面裂纹，断面裂纹率为0，统计结果见表8。说明母材及匹配接头都具有较好的抗裂纹敏感性，满足API RP 2Z—2005标准要求，也满足海洋工程的使用要求。

表8 斜Y形焊接裂纹试验结果

编号	裂纹深度/mm	最小焊缝厚度/mm	热输入/kJ·mm ⁻¹	断面裂纹率 (%)	平均断面裂纹率 (%)
1	0	8.12	0.92~1.02	0	0
2		10.01			
3		11.35			
4		11.07			
5		10.14			

大量实践和理论研究证明，钢种的淬硬倾向、焊接接头含氢量及其分布以及接头所承受的拘束应力三方面原因共同作用引起焊接冷裂纹^[8]。

在本项目的冷裂纹敏感性试验中，选择低氢型药芯焊丝，可以把接头的氢含量控制在较低的范围内。因此本项目中的“碳当量法”“可控热拘束试验 (CTS Test)”和“斜Y坡口试验”中试验钢焊接冷裂纹敏感性主要取决于接头区的淬硬倾向和拘束应力，而这两个因素主要受合金成分和焊接参数的影响。

根据材料的化学成分，计算出550MPa级热轧H型钢碳当量和裂纹敏感系数分别为0.35%和0.18%，间接试验方法证明，550MPa级热轧H型钢淬硬倾向不大。在24mm板厚约束下，焊接热输入为1kJ/mm无预热条件下，可控热拘束试验和斜Y坡口焊接裂纹试验的焊接接头断面裂纹率均为0，说明

该钢种冷裂纹敏感性较小，满足实际生产过程中的使用要求。

5 结束语

对550MPa级热轧H型钢进行冷裂纹敏感性试验。主要结论如下。

1) 根据材料的化学成分对碳当量与裂纹敏感系数进行理论计算，计算结果表明 C_E (0.35%) 和 P_{cm} (0.18%) 值低，材料具有良好的焊接性。

2) 可控热拘束试验 (CTS Test) 裂纹试验表明：MERIT® JMTM-Ni1气体保护焊 (GMAW) 实芯焊丝与母材匹配接头具有较好的抗裂纹敏感性，断面裂纹率为0，焊缝及热影响区硬度小于325 (HV5)，符合EN 10225—2009标准要求，满足海洋工程的使用要求。

3) 斜Y坡口焊接裂纹试验表明：该550MPa级热轧H型钢具有较好的抗裂纹敏感性，其断面裂纹率为0，符合API RP 2Z—2005标准要求，满足海洋工程的使用要求。

参考文献：

- [1] 袁中涛.700MPa级低合金高强度钢焊接接头组织及性能研究[D].安徽工业大学，2013.
- [2] 吴保桥，邢军，张建，等.具有良好低温韧性的热轧S355ML H型钢的焊接冷裂纹敏感性[J].热处理，2018，33 (5)：33-36.
- [3] 魏守盼，李柏松，黄华强. Q690D低合金调质高强度钢焊接冷裂纹敏感性研究[J].金属加工 (热加工)，2019 (12)：12-14.
- [4] 滕彬，李小宇，雷振，等.低合金高强钢激光-电弧复合热源焊接冷裂纹敏感性分析[J].焊接学报，2010 (11)：61-64.
- [5] 彭春涛.激光-MAG复合热源焊焊接钢裂纹敏感性研究[J].金属加工 (热加工)，2020 (3)：19-21.
- [6] 万志健，尹孝辉，高银银.严寒地区海洋石油平台用热轧H型钢焊接接头的组织和性能[J].热处理，2016，31 (5)：11-16.
- [7] 邢军，吴保桥，张建，等.海洋石油平台用热轧H型钢 FCAW焊接接头组织与性能[J].安徽冶金科技职业学院学报，2020 (3)：1-5.
- [8] 贺龙威，温志刚，靳伟亮，等.海洋石油钻井平台用30CrMo钢焊接性分析[J].焊接技术，2019 (5)：16-18.

MW 20200920