

高强度船体用钢焊接连续冷却转变曲线的测定

首钢技术研究院(北京市 100041)
天津大学材料科学与工程学院(300072)

陈延清 王敬礼 张飞虎 董现春 张永强
杜则裕

摘要 采用热模拟技术测定出首钢研制开发的高强度船体用钢焊接连续冷却转变曲线(SH-CCT图),获得了高强度船体用钢焊接粗晶区热影响区组织变化规律,结果表明,首钢生产的高强度船体用钢淬硬倾向和冷裂敏感性较低。

关键词: 热模拟 粗晶区热影响区 高强度船体用钢 连续冷却转变曲线
中图分类号: TG406

0 前言

随着船舶吨位的大型化,造船业已感到普通强度船体用钢的强度难以满足船舶大型化、轻量化的要求。因为强度低,就必须增加板材的厚度,这样不仅增加了制造过程中的加工焊接难度和成本,又增加了船体自重、降低了载重量。因此,提出了大量使用高强度船体用钢的要求。目前,中国造船行业高强度船体用钢量已占船体钢需求量的30%以上^[1]。

船体用钢是船舶制造的主要材料,由于事关船运安全,世界各国对船体用钢都有严格要求,船体用钢必须经过有关的船级社认可,才能生产和使用,焊接适用性试验是船级社认证企业生产船体用钢资格过程中必须考察的试验内容之一。首钢开发的32、36两个强度

级别的A、D两个质量等级的高强度船体用钢以及A、B、D三个质量等级普通强度船体用钢均已经通过了挪威等九国船级社的认证,年产量达100万吨。

为了全面、真实、客观地了解首钢生产的高强度船体用钢A36、D36的焊接性,以D36为例,测定了高强度船体用钢的焊接连续冷却曲线(SH-CCT曲线)、评价了其冷裂敏感性和焊接热影响区的最高硬度。

1 高强度船体用钢的技术条件

高强度船体用钢有较高的强韧性要求,屈服强度从315 MPa级至390 MPa级,冲击初度按等级不同分别要求0℃、-20℃、-40℃、-60℃时的冲击吸收功。GB712—2000《船体用结构钢》标准中对高强度船体用钢的化学成分和力学性能要求分别见表1和表2。

表1 高强钢板化学成分技术要求(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Als	Ti	Fe
≤0.18	≤0.50	0.90~1.60	≤0.035	≤0.035	0.02~0.05	0.05~0.10	≥0.015	≤0.02	余量

注:Nb、V、Ti等微量元素可单独加入或混合加入。单独加入时,其含量不低于规定的下限。混合加入时,其总含量不大于0.12%。

表2 高强钢板力学性能技术要求

钢级	屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$	冲击吸收功 A_{kv}/J				
				试验温度 $T/^\circ\text{C}$	纵向		横向	
					平均值	允许一个值	平均值	允许一个值
A32	≥315	440~570	≥22	0	≥31	≥21.7	≥22	≥15.4
D32				-20				
A36	≥355	490~630	≥21	0	≥34	≥23.8	≥24	≥16.8
D36				-20				

2 试验用钢的化学成分及性能

为了提高高强船体用钢的综合性能及焊接性,首

收稿日期:2008-01-08

钢高强度船体用钢采用微合金化技术,充分发挥合金元素的沉淀强化、细化晶粒作用,同时降低磷、硫元素等杂质元素的含量,提高钢的纯净度,确保钢的冲击性能。

随机选取首钢中厚板厂生产的一炉高强度船体用

钢 D36 为试样,板厚 16 mm,测定了高强度船体用钢的焊接连续冷却转变曲线,进行了高强度船体用钢热影响区组织、性能变化规律的研究。试验用钢的化学成分见表 3,其力学性能见表 4。

表 3 试验用钢的化学成分(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	Al _i	微合金化元素	Fe
0.13	0.35	1.34	0.011	0.010	0.036 8	微量	余量

表 4 试验用钢的力学性能

拉伸试验(纵/横)			冲击吸收功 A _{KV} /J(纵/横)				
R _d /MPa	R _m /MPa	A(%)	20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
365/370	500/505	33.5/29.5	217/101	197/75	201/56	131/43	93/33

3 高强度船体用钢焊接连续冷却转变曲线(SH-CCT)的测定

采用试验设备为 Gleebl2000 热模拟机和 Formastor-Digital 全自动相变仪,设计了 11 种不同冷却速度,测定了高强度船体用钢的焊接连续冷却转变曲线(SH-CCT 图),如图 1 所示。焊接特征参数 $t_{8/5}$ 与 HAZ 组织组成关系如图 2 所示,焊接特征参数 $t_{8/5}$ 与 HAZ 硬度关系如图 3 所示。

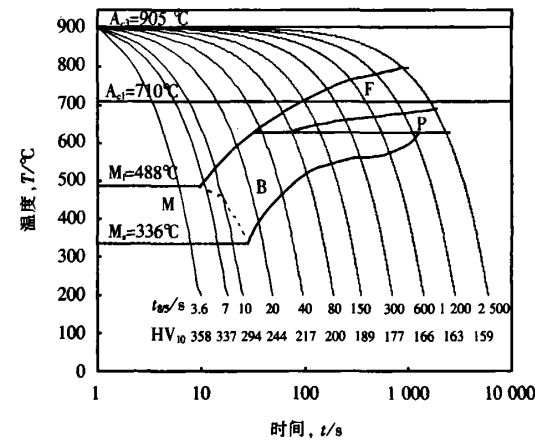


图 1 高强度船体用钢焊接连续冷却转变曲线

由图 1、图 2、图 3,可得出以下结论:

(1) 随着焊接热输入的增加,焊后冷却速度由快变慢,高强度船体用钢热影响区粗晶区可能发生了 M、M+B、B、B+F、B+F+P 以及 F+P 六种不同类型的组织转变; $t_{8/5} < 7$ s 时,热影响区粗晶区发生的是 100% 的 M 相变; $7 \leq t_{8/5} < 20$ s 时,热影响区粗晶区发生的是 M

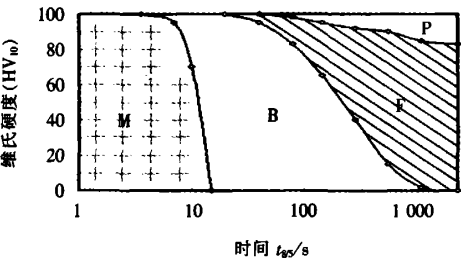


图 2 焊接特征参数 $t_{8/5}$ 与组织之间的关系

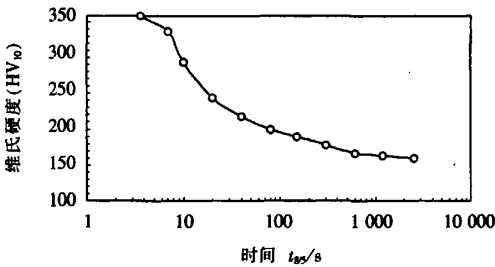


图 3 焊接特征参数 $t_{8/5}$ 与硬度之间的关系

和 B 的相变; $20 \text{ s} \leq t_{8/5} < 40 \text{ s}$ 时,发生的是 100% 的 B 相变; $40 \text{ s} \leq t_{8/5} < 80 \text{ s}$ 时,发生的是 B 和 F 的相变; $80 \text{ s} \leq t_{8/5} < 1\,200 \text{ s}$ 时,发生的是 F、B 和 P 的相变; $t_{8/5} > 1\,200 \text{ s}$ 时,发生的是 F 和 P 的相变。

(2) 随着 $t_{8/5}$ 的逐渐增加或焊接热输入的增大,也就是焊后冷却速度的降低,模拟粗晶区的维氏硬度逐渐降低,但都高于母材,说明高强度船体用钢热影响区中粗晶区不存在软化现象。高强度船体用钢热影响区粗晶区的最高硬度值为 HV₁₀358,为减少淬硬倾向和冷裂纹敏感性,在采用小热输入极限条件焊接时,应采用焊前预热或焊后缓冷等特殊措施来避免淬硬组织和冷

裂纹的产生。

(3) 在常用电弧焊所用 20~45 kJ/cm 热输入范围内,对应的焊接特征参数 $t_{0.5}$ 为 20~100 s,热影响区粗晶区发生的 B、B+F、B+F+P 三种组织类型的转变,硬度值在 200~244 之间,低于国际焊接学会提出的具有焊接冷裂纹倾向的临界硬度值 350。因此,16 mm 厚高强度船体用钢在采用常用焊接方法施焊时冷裂纹敏感性较低。

4 高强度船体用钢抗裂性评价

4.1 裂纹敏感性评估

钢的化学成分对焊接热影响区的淬硬及冷裂倾向有直接的影响,尤其碳是影响低合金钢裂纹敏感性最显著的元素,因此常用碳当量来评估钢的裂纹敏感性。碳当量是把钢中合金元素按其淬硬(冷裂、脆化等)的影响程度折合成碳的相当含量,碳当量反映了钢种化学成分对硬化程度的影响。对于中、高强度的非调质低合金高强度钢,常用国际焊接学会(IIW)推荐的公式和日本提出的焊接冷裂纹敏感性当量 P_{cm} 来判断钢的焊接性优劣^[2]:

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$
$$P_{cm} = C + (Mn + Cu + Cr)/20 + Si/30 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

按以上计算公式计算,16 mm 厚高强船体用钢的碳当量 $C_{eq}=0.364\%$, $P_{cm}=0.219\%$ 。

在 Graville 焊接性评价图上,高强度船体用钢处于第 II 区即可焊区(图 4)。日本焊接协会规定 $P_{cm} \leq 0.20\%$ 作为评定低焊接冷裂纹敏感性高强度钢焊接性的指标

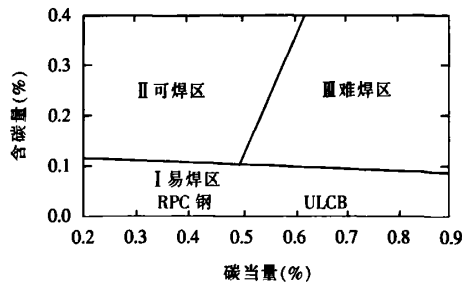


图 4 Graville 焊接性评价图

之一,高强度船体用钢接近低焊接冷裂纹敏感性钢。

4.2 焊接热影响区最高硬度试验

焊接热影响区最高硬度试验是国际上通用的评定钢材冷裂倾向的试验方法,用于间接判断被焊钢的淬硬倾向和冷裂敏感性,该试验只适用于焊条电弧焊。试验是按照标准 GB4675.5—84《焊接热影响区最高硬度试验方法》规定进行的,该试验是依靠单道表面堆焊,相对于实际的多道焊接其热影响区硬度值偏高,最高硬度值越高,材料的淬硬性越大,冷裂敏感性也越大,当热影响区最高硬度超过 HV₁₀350 时,焊接时应考虑预热。

试板厚度为 16 mm,厚度方向无需加工,测试结果如图 5 所示,图中 0 点的位置为焊道底部与熔合线的切点。从图中可以看出,碳当量为 0.364% 的高强度船体用钢焊接热影响区的最高硬度 VH₁₀ 为 237,远低于 HV₁₀350,说明高强度船体用钢焊接热影响区的淬硬倾向和裂纹敏感性较小。

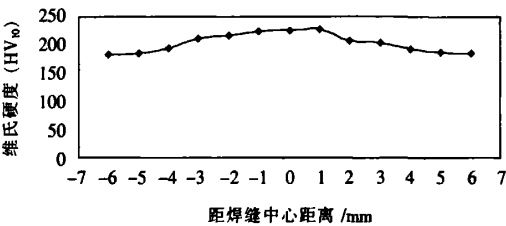


图 5 高强度船体用钢焊接热影响区最高硬度

4.3 斜 Y 坡口冷裂纹敏感性试验

斜 Y 坡口冷裂纹敏感性试验主要用于评定碳钢和低合金高强钢焊接热影响区对冷裂纹敏感性以及钢种的淬硬倾向。钢种的淬硬倾向和对冷裂纹的敏感性主要取决于钢种的化学成分、板厚、焊接工艺和冷却条件,在钢种确定的情况下,板厚对试验结果影响最大,钢板越厚产生冷裂纹的可能性越大,因此选用首钢目前生产最厚规格 D36($\delta=40$ mm) 的高强度船体用钢进行了该试验,试验用钢板的化学成分见表 5。

试验是按照 GB4675.1—84《斜 Y 坡口焊接裂纹试验方法》进行的,试验结果见表 6。表中数据表明,40 mm 厚高强度船体用钢在选用低氢型碱性电焊条进行焊条电弧焊时,在高温高湿环境下冷裂纹敏感性较低。

表 5 焊接冷裂纹敏感性试验用钢 D36 化学成分(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	微合金化元素	Al ₁	Fe
0.15	0.36	1.32	0.012	0.005	微量	0.035 9	余量

表6 高强度船体用钢 D36($\delta=40$ mm)

室温下裂纹试验结果

编号	环境温度 $T/^\circ\text{C}$	环境湿度 (%)	间隙 B/mm	裂纹率(%)	
				表面	断面
11	32	72	1.95	0	8
12	32	72	1.90	0	5
13	32	72	2.0	0	2

5 结 论

(1) 采用 Formastor - Digital 全自动相变仪和 Gleeble - 2000 热模拟实验机测定出高强度船体用钢焊接连续冷却转变曲线(SH - CCT 图),获得焊接工艺特征参数 $t_{8/5}$ 从 3.5 s 到 2 500 s 范围内的组织变化规律。在常用的焊接参数 $t_{8/5} = 10 \sim 100$ s 条件下,下限 $t_{8/5}$ 参

数焊接时得到贝氏体和马氏体组织;上限 $t_{8/5}$ 参数焊接时得到贝氏体、先共析铁素体和少量珠光体组织;中限焊接参数条件下获得贝氏体组织。

(2) 焊接热影响区最高硬度和斜 Y 型坡口焊接冷裂纹试验结果表明,首钢生产的高强度船体用钢焊接热影响区的淬硬倾向和焊接冷裂纹敏感性较低。

参 考 文 献

- [1] 牛琳霞. 我国船舶用钢的需求分析[J]. 武钢技术, 2006, 44 (5): 48 - 50.
- [2] 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 298 - 300.

作者简介: 陈延清, 1967 年出生, 硕士研究生, 高级工程师。主要从事金属材料焊接性、焊接工艺研究以及焊接材料开发工作。

药芯焊丝焊接工艺性分析

中北大学焊接材料技术中心(太原市 030051) 王 宝 杨 林
太原理工大学焊接材料研究所(030024) 王 勇

摘要 药芯焊丝的焊接工艺性是焊丝质量的一个重要方面, 目前尚没有科学可行的方法对药芯焊丝的焊接工艺性进行评价。仅凭经验很难对焊接工艺性做出准确判断。药芯焊丝的焊接工艺性决定于熔滴过渡形态, 细熔滴过渡时焊接过程比较稳定, 是理想的过渡形态。在电流一定的条件下, 不同的药芯焊丝形成细熔滴过渡形态所对应的焊接电压不相同, 它反映了某种焊丝形成细颗粒过渡的趋势大小。短路概率越小, 短路时间 T_1 的频率越少, 可认定某种焊丝细熔滴过渡倾向越大, 焊接工艺性越好。

关键词: 药芯焊丝 焊接电弧物理 熔滴过渡 焊接工艺性

中图分类号: TG422.1

0 前 言

药芯焊丝的焊接工艺性是焊丝质量的一个重要方面, 它不仅影响焊接时的操作, 而且对焊接冶金性能有直接的影响, 药芯焊丝工艺性的优劣往往成为该产品是否具有市场竞争力的决定性因素。但是, 目前尚没有科学可行的方法对药芯焊丝工艺性进行评价。依靠人的直觉来判断, 往往受到人的经验的局限, 很难对焊接工艺性做出准确评价。

在弧焊条件下, 无论是焊条还是焊丝, 其焊接工艺性都取决于熔滴过渡形态^[1], 应该说明, 这里所说的工艺性当然是指那些与电弧物理特性有关的如熔滴过渡特征、电弧稳定性、飞溅、熔化效率等。药芯焊丝常见的熔滴过渡形态有排斥过渡、表面张力过渡和细颗粒过渡, 细熔滴过渡时焊接过程比较稳定, 是理想的熔滴过渡形式^[2-4]。在 CO_2 焊条件下, 随着电参数的增大, 药芯焊丝熔滴过渡形态从排斥过渡转变为表面张力过渡, 直到形成细颗粒过渡。但是不同的药芯焊丝形成某种熔滴过渡形态所对应的焊接参数不相同, 这正是每种焊丝本身的电弧物理特性差异的表现, 在一定的

收稿日期: 2007 - 07 - 31