

高强度船体用钢焊接性研究

陈延清^{1,2}, 杜则裕², 张飞虎¹, 董现春¹, 张永强¹

(1.首钢技术研究院, 北京 100041; 2.天津大学 材料学院, 天津 300072)

摘要:采用热模拟试验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-CCCT图), 获得焊接工艺特征参数 $t_{8/5}$ 从3.5~2 500 s范围内的组织变化规律。利用热模拟技术进行了高强度船体用钢焊接热影响区组织、性能的模拟研究, 结果表明, 粗晶热影响区存在着脆化现象, 随着焊接热输入的增加, 粗晶热影响区奥氏体晶粒粗化, 脆化加剧。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:焊接性; 热模拟; 粗晶热影响区; 高强度船体用钢

中图分类号: U671.81

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2007)06-0110-10

Study on weldability of the high strength ship steel

CHEN Yan-qing^{1,2}, DU Ze-yu², ZHANG Fei-hu¹, DONG Xian-chun¹, ZHANG Yong-qiang¹

(1. Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100041, China; 2. School of Material Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The continuous cooling transforming curve of the High Strength Ship Steel was measured by thermal simulated technology. It was obtained that the regular pattern of the microstructures transforming with $t_{8/5}$ from 3.5 second to 2500 second. The microstructures and properties in heat affect zone of the High Strength Ship Steel was studied by thermal simulated technique. The result shows that coarse grain heat affect zone (CGHAZ) becomes brittle. With the welding heat input increasing, the austenite grain coarsening and the brittle of CGHAZ are being aggravated. The hardenability and susceptibility to hydrogen crack of the High Strength Ship Steel is lower.

Key words: weldability; thermal simulated; coarse grain heat affect zone; high strength ship steel

0 前言

船舶制造业是一个综合性的工业部门, 船用钢铁材料使用量大、形状多样, 有板材、型材、棒材、管材、锻件和铸件等, 分别应用于制造船体、轮机、轴系、管系、压力容器等结构。在船体重量中, 钢材占90%, 其中板材占钢材的70%~80%。据统计, 建造一艘10万载重吨油轮需要钢材16 000 t; 20万载重吨油轮需24 000 t 钢材; 30万载重吨油轮需钢材40 000 t。以上的钢材需要量均为船舶的设计用量, 未考虑钢材的实际利用率。目前我国船舶的钢材利用率在85%~88%。我国造船行业每年需要船体用板材150万t左右。

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, 以适应船舶大型化、轻量化的发展趋势。随着造船业的发展, 高强度钢船体用钢需求不断增加。目前, 我国造船行业高强度钢船体用钢用量已占船体用钢需求量30%以上^[1]。

船体用钢是船舶制造的主要原料, 由于事关航运安全, 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船级社(DNV)、美国船级社(ABS)、英国船级社(LR)、德国船级社(GL)、法国船级社(NV)、中国船级社(CCS)、日本船级社(NK)、韩国船

收稿日期: 2007-06-04

作者简介: 陈延清(1967—), 山东邹城人, 高级工程师, 硕士, 主要从事金属材料焊接性、焊接工艺研究以及焊接材料的开发研究工作。

级社(KR)等八国船级社的认证,目前以上高強度船体用钢已大批量生产,产品质量得到用户的好评。

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、研究了焊接热影响区组织和性能的变化规律。

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 315MPa 级至 390 MPa 级,冲击韧性按等级不同分别要求 0℃~-60℃冲击吸收功。GB712-2000《船体用结构钢》对高强度船体用钢的化学成分技术要求见表 1,力学性能技术要求见表 2。

表 1 高强度钢板化学成分技术要求									%
ω(C)	ω(Si)	ω(Mn)	ω(P)	ω(S)	ω(Nb)	ω(V)	ω(Al ₀)	ω(Ti)	备注
≤0.18	≤0.50	0.90~1.60	≤0.035	≤0.035	0.02~0.05	0.05~0.10	≥0.015	≤0.02	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,其总和含量不大于 0.12%

表 2 高强度钢板力学性能技术要求								
	屈服强度 σ _s /MPa	抗拉强度 σ _t /MPa	延伸率 δ/%	试验温度 t/℃	冲击功 W/J			
					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可焊性,首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,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。

3 高强度船体用钢焊接连续冷却转变曲线(SH-CCT)的测定

表 3 试验用钢板化学成分										%
规格 φ/mm	ω(C)	ω(Si)	ω(Mn)	ω(P)	ω(S)	ω(Al ₀)	微合金化元素	C _{eq}	P _{cm}	
16	0.13	0.35	1.34	0.011	0.010	0.036 8	微量	0.364	0.219	

注: 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。

表 4 试验用钢的力学性能								
板厚 δ/mm	拉伸试验(纵/横)			冲击吸收功(纵/横)				
	σ _s /MPa	σ _t /MPa	δ ₅ /%	20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
16	365/370	500/505	33.5/29.5	217/101	197/75	201/56	131/43	93/33

采用试验设备为 Gleeb2000 热模拟机和 Formastor-Digital 全自动相变仪,设计了 11 种不同冷却速度,测得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。

由图可知:

(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 s≤t_{8/5}<20 s 时,热影响区粗晶区发生的



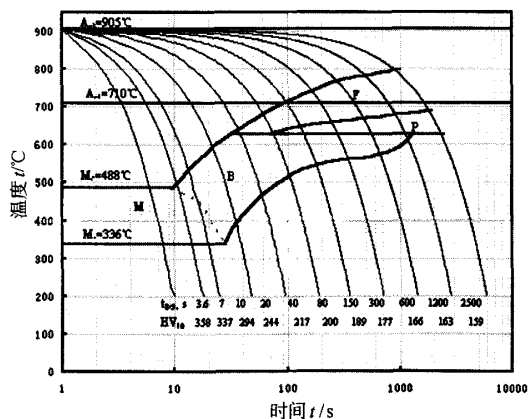
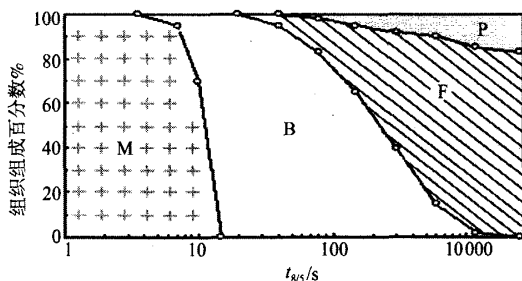
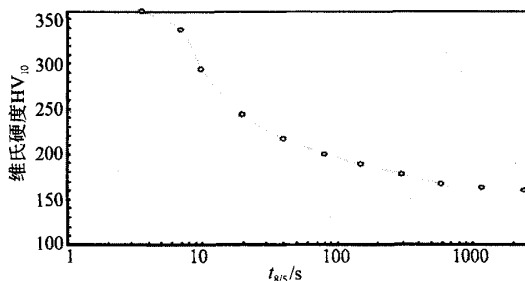


图 1 高强度船体用钢焊接连续冷却转变曲线

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

是 M 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; $80 \text{ s} \leq t_{8/5} < 1200 \text{ s}$ 时, 发生的是 F、B 和 P 的相变; $t_{8/5} > 1200 \text{ s}$ 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, 即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 $HV_{10}=358$, 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获得淬硬组织和冷裂纹的产生。

(3) 在常用电弧焊所用 $20 \sim 45 \text{ kJ/cm}$ 热输入范围内, 对应的焊接特征参数 $t_{8/5}=20 \sim 100 \text{ s}$, 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 $200 \sim 244$ 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 高强度船体用钢焊接热影响区组织性能变化规律的研究

4.1 焊接热输入对高强度船体用钢焊接热影响区粗晶区组织和性能的影响

焊接热输入设定为 10 kJ/cm 、 14 kJ/cm 、 20 kJ/cm 、 35 kJ/cm 、 45 kJ/cm 、 65 kJ/cm , 对应的焊接特征参数 $t_{8/5}$ 为 5 s 、 10 s 、 20 s 、 60 s 、 100 s 、 200 s , 以模拟常规焊接工艺范围和极端焊接工艺条件。高强度船体用钢经过峰值温度 1340°C 奥氏体化后, 不同焊接热输入一次热循环后的模拟试样, 进行了系列温度夏比 V 型缺口冲击试验、常温维氏硬度检测和金相组织分析, 试验结果见表 5、表 6、图 4~图 7。

表 5 为高强度船体用钢熔合线附近粗晶区不同热输入一次模拟热循环试样系列温度冲击试验数据, 表中数据表明, 热输入为 10 kJ/cm 、 14 kJ/cm 、 35 kJ/cm 时, 高强度船体用钢熔合线附近粗晶区冲击吸收功达到了钢板的技术指标要求; 热输入为 45 kJ/cm 、 65 kJ/cm 时, 粗晶区冲击吸收功的平均值达到了钢板的技术指标要求, 单个值偏低, 热输入为 20 kJ/cm 时, 粗晶区冲击吸收功无论是平均值还是单个值均未达到钢板的技术指标要求。表 5 中各组数据比较稳定, 说明只要选择合适的焊接工艺规范, 高强度船体用钢熔合线附近粗晶区的冲击韧性是能够满足母材的要求。

图 4 为不同焊接热输入一次热循环模拟热影响区粗晶区的金相组织。图中可见, 高强度船体用钢母材原始组织为铁素体+珠光体呈轧制条带状分布, 经过热模拟加热到 1340°C 时, 组织完全转变为奥氏体。经焊接热循环后, 随着焊接热输入的增大, 冷却时组织发生明显变化, 焊接热输入为 10 kJ/cm 时得到的主要是马氏体组织+少量贝氏体组织; 焊接热输入为 14 kJ/cm 时得到的是马氏体+贝氏体组织; 焊接热输入为 20 kJ/cm 时得到的主要是贝氏体组织; 焊接热输入为 35 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时得到的是以贝

表 5 高强度船体用钢粗晶区一次模拟热循环试样系列温度冲击试验数据

t_{85}/s	线能量 $Q/kJ\cdot cm^{-1}$	冲击吸收功 W/J				
		28℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
5	10	67,70,64(平均 67)	44,64,38(平均 49)	44,28,48(平均 40)	20,24,20(平均 21)	16,16,12(平均 15)
10	15	65,50,75(平均 63)	—	20,38,18(平均 25)	10,18,16(平均 15)	17,11,17(平均 15)
20	20	68,60,83(平均 70)	—	18,30,12(平均 20)	10,8,10(平均 9)	6,14,12(平均 10)
60	35	80,68,56(平均 68)	—	44,22,45(平均 37)	10,10,11(平均 10)	10,6,8(平均 8)
100	45	58,56,76(平均 63)	—	14,38,24(平均 25)	10,8,20(平均 13)	8,6,6(平均 7)
200	65	52,70,66(平均 63)	—	16,32,39(平均 29)	8,16,10(平均 11)	8,10,4(平均 7)

表 6 高强度船体用钢粗晶区一次模拟热循环试样硬度试验数据

$T_m/℃$	热输入 $Q/kJ\cdot cm^{-1}$					
	10℃	14℃	20℃	35℃	45℃	60℃
1 340	278,281,301	270,264,277	238,225,215	202,216,204	208,211,207	188,190,196
	平均 287	平均 270	平均 226	平均 207	平均 209	平均 191

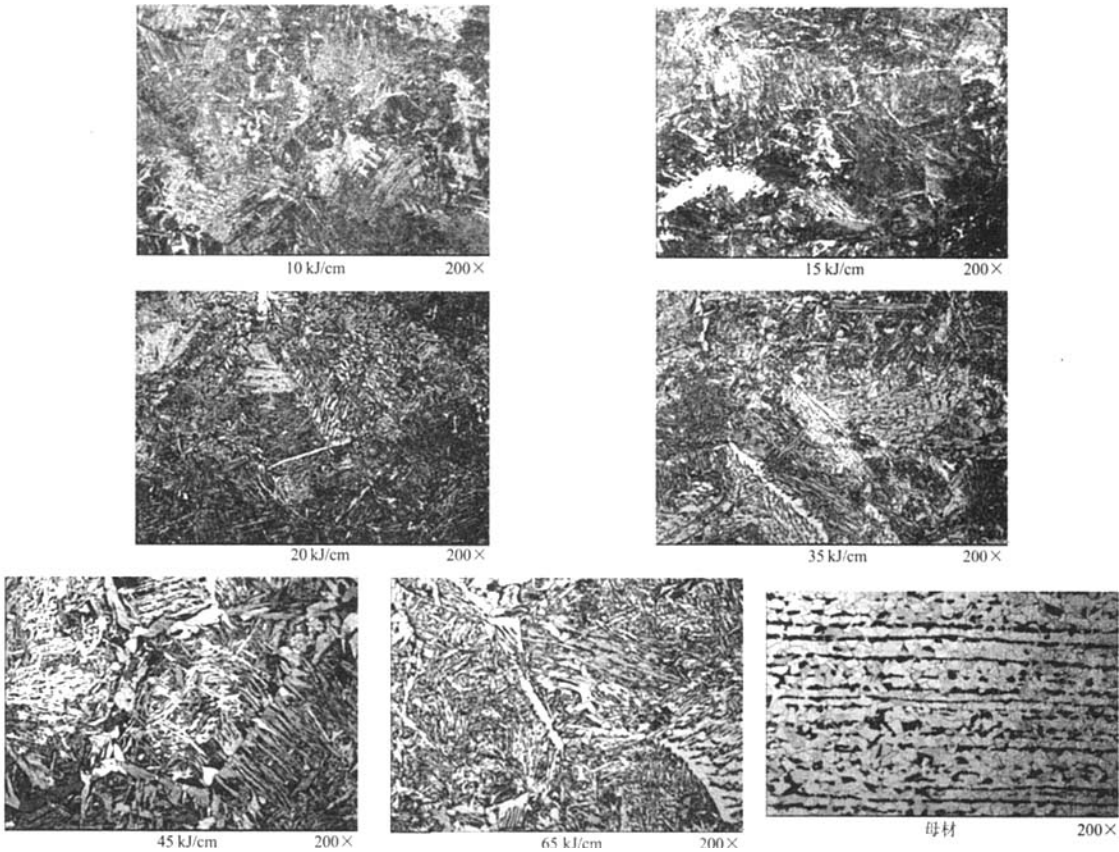


图 4 高强度船体用钢一次热循环模拟焊接热影响区粗晶区金相组织(峰温 1 340℃)

氏体为主,沿奥氏体晶界析出少量的先共析铁素体;焊接热输入为 65 kJ/cm 时得到的是以贝氏体+先共析铁素体,以及极少量的珠光体组织。由图中还可以看到,在峰值温度 1 340℃条件下,随着焊接热输入增加,奥氏体晶粒长大比较严重,奥氏体晶粒明显粗化,模拟后二次组织中的板条束也比较明显,而且

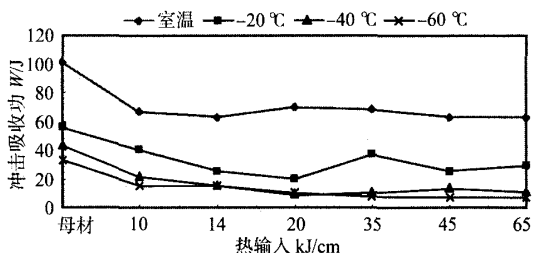


图5 高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区冲击韧性与焊接热输入之间的关系

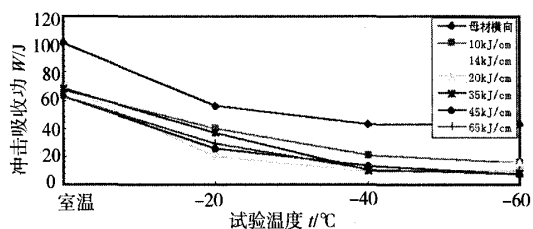


图6 高强度船体用钢一次循环模拟热影响区粗晶区的冲击韧性与试验温度之间的关系

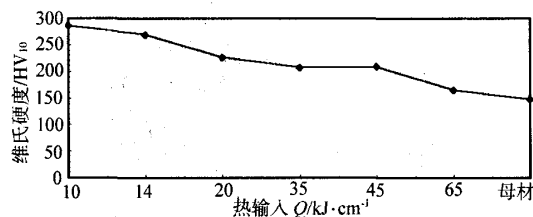


图7 高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区的硬度与焊接热输入之间的关系

方向性越来越强。

图5为高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区冲击韧性与焊接热输入之间的关系。从图中可以看到,常温下,模拟热影响区粗晶区的韧性随着焊接热输入的增加变化不大;低温下,模拟热影响区粗晶区的韧性随着焊接热输入的增加呈下降的趋势,这是因为随着焊接热输入的增加,焊后冷却速度变慢,1100℃以上高温停留时间逐渐增加,奥氏体晶粒长大更严重。图6是高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区的冲击韧性与试验温度之间的关系。由图中曲线可清楚地看到,高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区冲击韧性与母材相比有所下降,这是因为经过1340℃奥氏体化后,奥氏体晶粒严重长大和粗化,导致冷却后得到的二次组织也很粗大。

表6为高强度船体用钢粗晶区一次模拟热循环试样硬度测试结果,图7是模拟焊接热影响区粗晶区的维氏硬度与焊接热输入之间的关系。由表6和

图7中看出,随着焊接热输入的增加,模拟粗晶区的维氏硬度由硬变软,这是因为焊接热输入的增加,焊后冷却速度变慢,获得的二次组织由硬的马氏体、贝氏体逐渐过渡到铁素体和珠光体,图4可清晰地看到这一变化。

4.2 高强度船体用钢焊接热影响区不同区域的组织和性能

试验参数为:峰值温度设定为1340℃、1100℃、880℃。峰值温度1340℃是模拟焊接热影响区中靠近熔合线的粗晶区部位,该部位通常是焊接接头中组织最粗大,性能最薄弱的区域。峰值温度1100℃是模拟焊接热影响区中离开熔合线一定距离的位置,仍属于粗晶区,但组织粗化程度明显减小,用以对比粗晶区组织粗化程度对性能的影响。峰值温度880℃是模拟焊接热影响区中临界区(双相区)的组织,在该温度下母材中发生了部分奥氏体相变,也是热影响区中容易出问题的一个区域^[2]。焊接热输入设定为焊条电弧焊、气保护焊和埋弧自动焊常用的热输入14 kJ/cm、35 kJ/cm、45 kJ/cm,以模拟常规的焊接工艺条件,对应的焊接特征参数 $t_{8/5}=10$ s、60 s、100 s。

对各工艺条件下一次热循环模拟试样,进行了-20℃、-40℃低温夏比V型缺口冲击试验、常温维氏硬度检测和金相组织分析,结果见表7、表8以及图8~图11。表7为高强度船体用钢焊接热影响区不同区域的不同热输入一次热循环在-20℃、-40℃下的冲击试验数据。由表7可知,在常用焊接方法的常用焊接热输入范围内,高强度船体用钢焊接热影响区各区域的冲击韧性是能够满足钢板性能的技术指标要求的,表中数据还表明,高强度船体用钢的焊接热影响区随着峰值温度的降低,其韧性呈增加趋势。

图8为高强度船体用钢焊接热影响区峰值温度为1100℃区域经一次热循环后的金相组织。加热到1100℃时,母材组织已全部奥氏体化,由于峰值温度降低,高温停留时间短,奥氏体晶粒尺寸比峰值温度为1340℃时要小得多。在冷却过程中,热输入为14 kJ/cm时,得到的主要是贝氏体和少量马氏体组织;热输入为35 kJ/cm时,得到的是贝氏体+铁素体+少量的珠光体组织;热输入为45 kJ/cm时,得到的是铁素体+珠光体+贝氏体组织。

图9为高强度船体用钢焊接热影响区峰值温

表 7 高强度船体用钢热影响区不同区域一次模拟热循环试样系列温度冲击试验数据

试验温度 t/℃	14 kJ/cm			35 kJ/cm			45 kJ/cm		
	1 340 ℃	1 100 ℃	880 ℃	1 340 ℃	1 100 ℃	880 ℃	1 340 ℃	1 100 ℃	880 ℃
-20	20,38,18 平均 25	50,56,48 平均 51	22,52,62 平均 45	44,22,45 平均 37	48,40,40 平均 43	86,76,82 平均 81	14,38,24 平均 25	42,52,36 平均 43	100,88,88 平均 92
-40	10,18,16 平均 15	43,48,24 平均 38	42,33,34 平均 36	10,10,11 平均 10	32,16,20 平均 23	77,74,58 平均 70	10,8,20 平均 13	38,32,35 平均 35	70,68,57 平均 65

表 8 高强度船体用钢热影响区不同区域一次模拟热循环试样硬度试验数据

14 kJ/cm			35 kJ/cm			45 kJ/cm		
1 340 ℃	1 100 ℃	880 ℃	1 340 ℃	1 100 ℃	880 ℃	1 340 ℃	1 100 ℃	880 ℃
270,264,277 平均 270	223,233,230 平均 229	186,199,204 平均 196	202,216,204 平均 207	171,175,192 平均 179	179,172,177 平均 176	208,211,207 平均 209	175,197,194 平均 189	166,185,176 平均 176

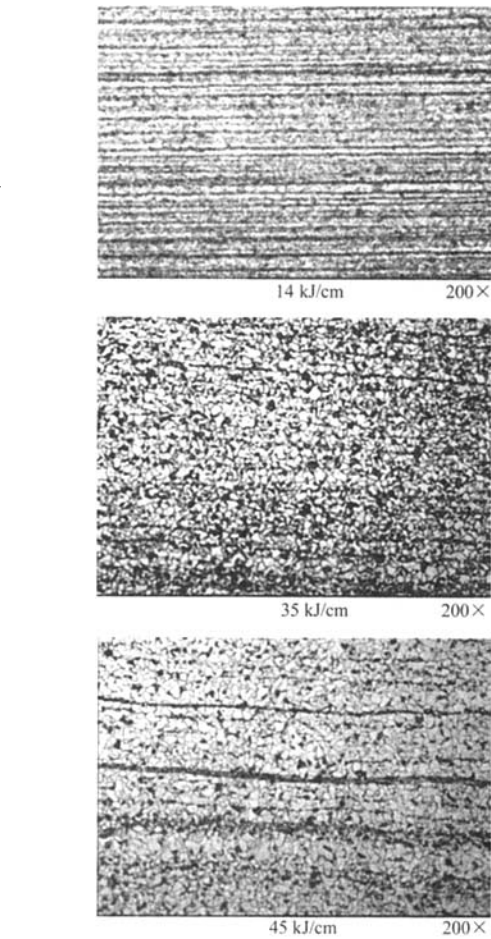


图 8 高强度船体用钢模拟焊接热影响区金相组织(峰值温度 1 100 ℃)
度为 880 ℃区域经一次热循环后的金相组织。热影响区中峰值温度为 880 ℃区域,经历的是最高温度

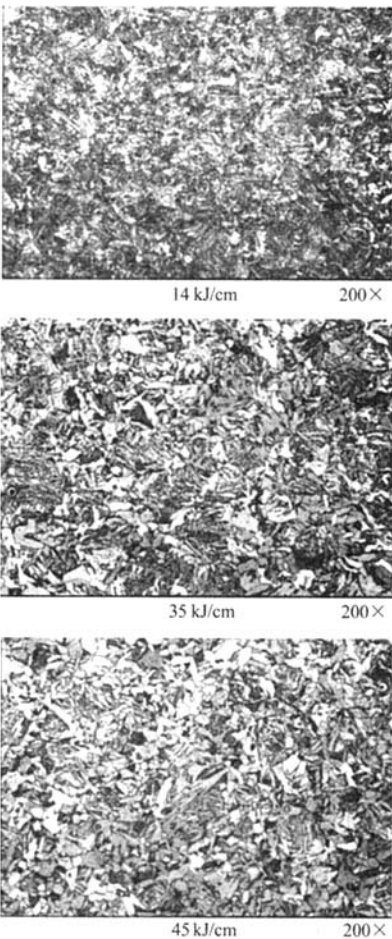


图 9 高强度船体用钢模拟焊接热影响区金相组织(峰值温度 880 ℃)
为 880 ℃的热循环,此时母材中部分组织发生了奥氏体化,其中珠光体全部转变为奥氏体,铁素体部

2007 IFWT
Shanghai China

船舶焊接国际论坛论文集

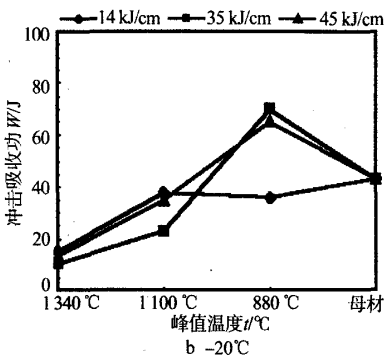
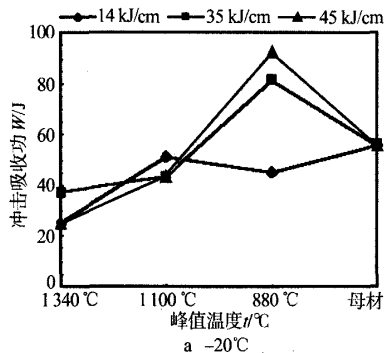


图 10 高强度船体用钢热影响区的冲击韧性与峰值温度的关系

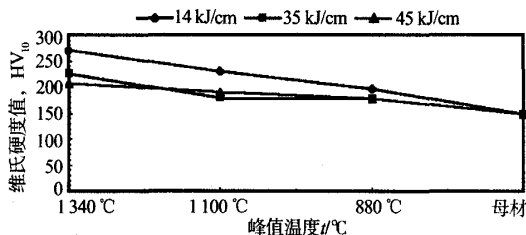


图 11 高强度船体用钢热影响区不同区域的硬度与峰值温度和热输入之间的关系

分转变为奥氏体。冷却过程中,奥氏体发生相变,热输入为 14 kJ/cm 时,奥氏体转变为贝氏体,未相变的原铁素体组织被保留下来;热输入为 35 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时,奥氏体转变为铁素体+珠光体,未相变的原铁素体组织被保留下来。该模拟规范生成的组织在光学显微镜下不易分辨,需通过维氏硬度值来加以验证。从图中还可以看到,该区域经过一次热循环后铁素体晶粒比原始母材的晶粒细化。

高强度船体用钢焊接热影响冲击韧性与峰值温度之间的关系如图 10 所示。由图中可直观地看到,随着峰值温度的降低,冲击韧性明显增高,靠近熔合线处峰值温度为 1340 °C 的粗晶区是热影响区中最薄弱的环节,熔合线附近的粗晶区很窄,因为峰

值温度为 1100 °C 距熔合线一定距离的粗晶区的冲击韧性与母材的冲击韧性相差不多。峰值温度为 880 °C 的两相区的冲击韧性,在热输入 14 kJ/cm 时,低于母材的冲击吸收功,但降低得不多;在热输入为 35 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时,优于母材的冲击,说明高强度船体用钢的两相区不存在明显的脆化倾向。

表 8 为高强度船体用钢热影响区不同区域一次模拟热循环试维氏样硬度试验数据,图 11 为高强度船体用钢焊接热影响不同区域的硬度与峰值温度和热输入之间的关系。表 8 中的数据和图 11 中的曲线表明,高强度船体用钢热影响区的硬度随着峰值温度的降低而逐渐降低,随着热输入的增加,硬度也呈下降趋势,而且各区域的硬度均高于母材的硬度,说明高强度船体用钢热影响区不存在软化区。

4.3 两次热循环后高强度船体用钢焊接热影响区组织和性能的变化

首钢生产的高强度船体用钢厚度为 8~40 mm,属于中厚板,中厚板、尤其是最大规格的钢板在实际焊接生产中,很少采用单道焊,一般采用多层多道焊,也就是说热影响中同一个区域往往要经历几次相近或不同的热循环,因此进行多层焊的热模拟试验对高强度船体用钢更具有实际意义。设计峰温为 1340 °C+1340 °C、1340 °C+880 °C,模拟多道焊热影响区的典型部位,焊接热输入设定为 14 kJ/cm、35 kJ/cm、45 kJ/cm,对应的焊接特征参数 $t_{9/5}$ 为 10 s、60 s、100 s。

对各工艺条件下两次热循环模拟试样,进行了 -20 °C、-40 °C 低温夏比 V 型缺口冲击试验、常温维氏硬度检测和金相组织分析,结果见表 9、表 10 和图 12、图 13、图 14。表 9 为高强度船体用钢焊接热影响区粗晶区经过两次热循环模拟试样 -20 °C、-40 °C 低温冲击试验数据。表中数据表明,高强度船体用钢热影响区中靠近熔合线处的粗晶区经过两次 1340 °C 的高温热循环后,在任何热输入的条件下,此区的冲击韧性都不满足钢板性能的技术要求;经过一次 1340 °C 的高温循环,再经过一次 880 °C 的循环后,此区的韧性得到改善,能够满足钢板性能的技术要求。

图 12 为高强度船体用钢热影响区粗晶区两次热循环试样的金相组织。图 11a 为经过两次 1340 °C 的高温热循环后的金相组织,经过两次高温热循环后,各热输入条件下获得的金相组织与一次热循环条件下获得的组织类型一样,只是奥氏体晶粒较一

表 9 高强度船体用钢焊接热影响区粗晶区两次热循环冲击试验数据

试验温度 <i>t</i> /℃	<i>t</i> ₈₅ =10 s		<i>t</i> ₈₅ =60 s		<i>t</i> ₈₅ =100 s	
	1 340 ℃+1 340 ℃	1 340 ℃+880 ℃	1 340 ℃+1 340 ℃	1 340 ℃+880 ℃	1 340 ℃+1 340 ℃	1 340 ℃+880 ℃
-20	28,23,20 平均 24	62,66,46 平均 58	16,12,11 平均 13	49,61,68 平均 59	20,23,20 平均 21	82,80,86 平均 83
-40	9,16,11 平均 12	48,24,46 平均 39	14,10,27 平均 17	49,58,60 平均 56	11,10,13 平均 11	70,70,60 平均 67

表 10 高强度船体用钢焊接热影响区粗晶区两次热循环硬度试验数据

热输入 循环方式	14 kJ/cm		35 kJ/cm		45 kJ/cm	
	1 340 ℃+1 340 ℃	1 340 ℃+880 ℃	1 340 ℃+1 340 ℃	1 340 ℃+880 ℃	1 340 ℃+1 340 ℃	1 340 ℃+880 ℃
硬度值	160,250,267 平均 259	213,201,207 平均 207	220,206,204 平均 211	168,191,158 平均 172	210,215,197 平均 207	174,173,188 平均 178

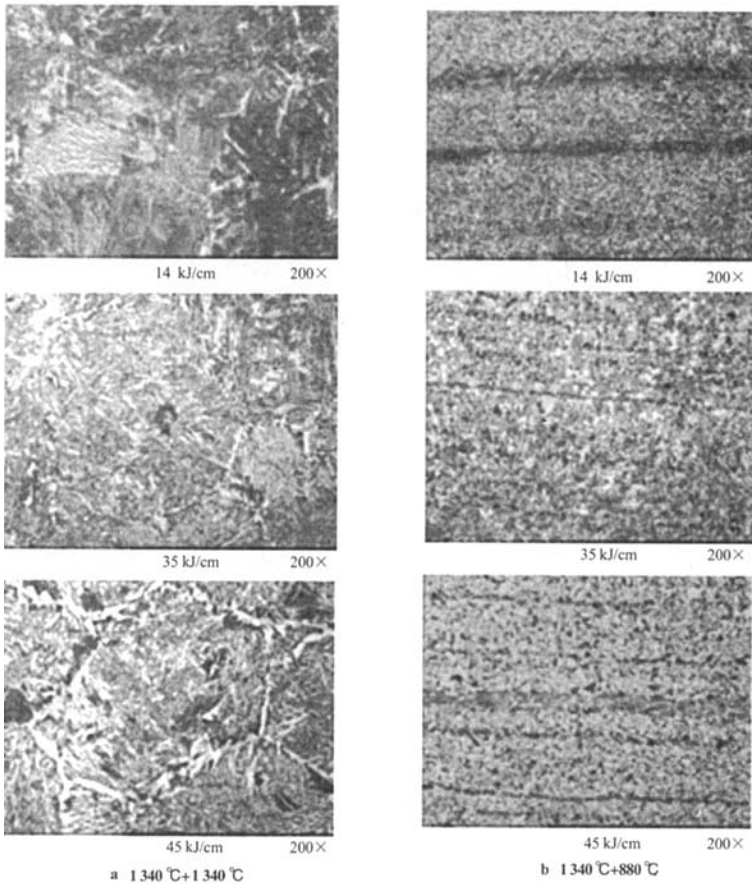


图 12 高强度船体用钢热影响区粗晶区两次热循环试样的金相组织

次循环的晶粒更粗大。图 11b 为靠近熔合线附近的粗晶区先经过一次 1 340 ℃ 的高温热循环,再经过一次 880 ℃ 的热循环后的金相组织,各热输入条件下经过第一次 1 340 ℃ 的高温热循环,冷却后得到

的金相组织如图 4 所示,再次加热到 880 ℃ 时,马氏体和贝氏体又奥氏体化,再次冷却时,热输入为 14 kJ/cm 时,得到贝氏体组织,热输入为 35 kJ/cm 和 45 kJ/cm 时,冷却后得到的是铁素体+珠光体组

2007 IFWT
Shanghai China

船舶焊接国际论坛论文集

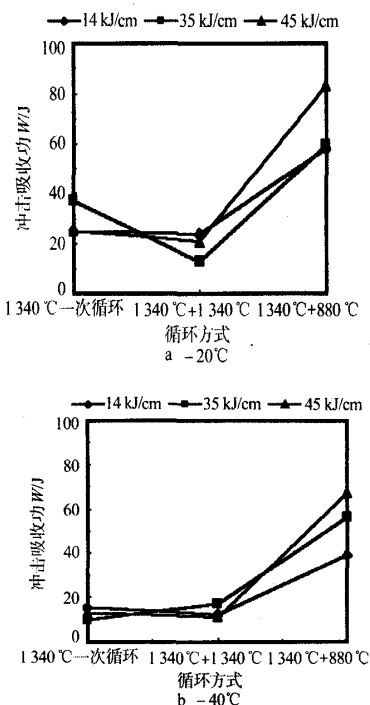


图 13 高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区的冲击韧性 with 循环方式之间的关系

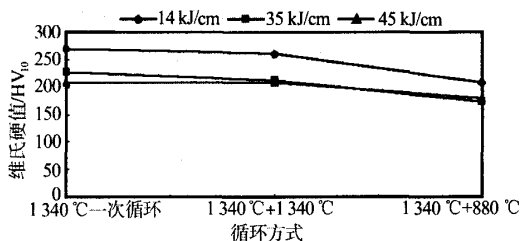


图 14 高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区的硬度与循环方式之间的关系

织,该热循环条件下模拟规范得到贝氏体和铁素体组织在光学显微镜下不易分辨,需通过维氏硬度值来加以验证。

高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区的冲击韧性 with 循环方式之间的关系如图 13 所示。从图中可看到,高强度船体用钢靠近熔合线处的粗晶区经历两次 1340℃高温热循环后冲击韧性,较只经过一次 1340℃高温热循环韧性有所降低,先经过一次 1340℃高温热循环,再经过一次 880℃热循环后冲击吸收功高于只经过一次 1340℃高温热循环的冲击吸收功。得到上述结果的原因是:高强度船体用钢靠近熔合线的粗晶区经过两次 1340℃高温热循

环,较只经过一次 1340℃高温热循环,组织晶粒度进一步粗化;先经过一次 1340℃高温热循环,再经过一次 1340℃热循环,组织晶粒较只经过一次 1340℃高温热循环细化,韧性得到了改善。同时说明,高强度船体用钢适合多层多道焊,而且第二层或第二道要与第一层或第一道错开来焊,也就是说,要避免靠近熔合线处的粗晶区经历两次同样的 1340℃高温热循环。

表 10 为高强度船体用钢焊接热影响区粗晶区两次热循环硬度试验数据,图 14 为高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区的硬度与循环方式之间的关系。表 10 中的数据表明,随着焊接热输入的增加,硬度呈下降的趋势。图 14 中的曲线说明高强度船体用钢模拟热影响区粗晶区经历两次 1340℃高温热循环后的硬度与经过一次 1340℃高温热循环后的硬度相当,这是因为冷却后得到的组织是一样的;经过一次 1340℃高温热循环后,再经过一次 880℃热循环,硬度比只经过一次 1340℃高温热循环的硬度有所下降,这是因为只经过一次 1340℃高温热循环后,得到的是马氏体+贝氏体组织,而经过一次 1340℃高温热循环后,再经过一次 880℃热循环,得到的是铁素体+珠光体组织。

5 高强度船体用钢抗裂性评价

5.1 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对淬硬(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:

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5$$

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

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(见图 15)。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之一,高强度船体用钢接近低焊接冷裂纹敏感性钢。

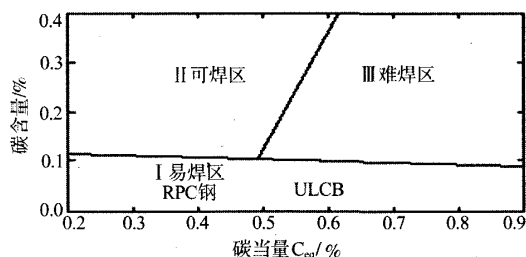


图 15 Graville 焊接性评价

5.2 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,该试验只适用于手工电弧焊接。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 HV350 时,焊接时应考虑预热。

试板厚度为 16 mm,厚度方向无需加工,测试结果见图 16,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 HV10 为 237,远低于 HV350,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。

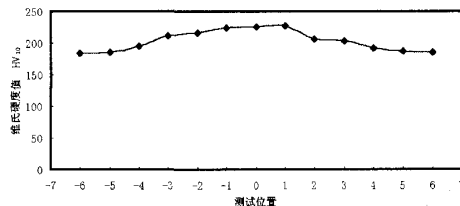


图 16 高强度船体用钢焊接热影响区最高硬度

5.3 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 11。

表 11 焊接冷裂纹敏感性试验用钢化学成分

规格	板厚 δ /mm	$\omega(\text{C})/\%$	$\omega(\text{Si})/\%$	$\omega(\text{Mn})/\%$	$\omega(\text{P})/\%$	$\omega(\text{S})/\%$	$\omega(\text{Al})/\%$	微合金化元素	$C_{eq}/\%$	$P_{cm}/\%$
D36	40	0.15	0.35	1.32	0.012	0.005	0.035 9	微量	0.381	0.234

试验是按着 GB4675.1-84《斜 Y 坡口焊接裂纹试验方法》进行的,试验记录及试验结果见表 12。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手工焊接时,在高温高湿环境下冷裂纹敏感性较低。

表 12 高强度船体用钢裂纹试验结果

板厚	编号	环境温度	环境湿度	间隙	试板温度	裂纹率/%
δ /mm		$t/^\circ\text{C}$	%	d /mm	$t/^\circ\text{C}$	表面 断面
40	11	32	72	1.95	室温	0 8
	12	32	72	1.90	室温	0 5
	13	32	72	2.00	室温	0 2

6 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 3.5~2 500 s 范围内的组织变化规律。在常用的焊接规范 $t_{8/5}=10\sim100$ s 条件下,下限 $t_{8/5}$ 规范焊接时得到贝氏体和马氏体组织;上限 $t_{8/5}$ 规范焊接时得到贝氏体、先共析铁素体和少量珠光体组织;中限

焊接规范条件获得贝氏体组织。

(2)首钢生产的高强度船体用钢靠近熔合线的粗晶区(CGHAZ)是整个热影响区中最薄弱的区域,随着加热峰值温度的降低,组织的粗化程度减弱,韧性得到改善。在常用焊接热输入的范围,焊接热影响区中的两相区没有脆化倾向,整个热影响区也不存在软化区。

(3)首钢生产的高强度船体用钢适于多层多道焊,但第二层或第二道的施焊时一定要避免第一层或第一道熔合线附近的粗晶区重复峰值温度高达 1 340 $^\circ\text{C}$ 的热循环。

(4)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] 刘大庆,何海情.纵观船舶用钢板市场供需[R].中国远洋航务公告,2000.
- [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,1988.

收稿日期:2007-06-04