

## 80 kg 级低温不预热焊接高强钢的开发

杨俊 何航 张勇伟 邱福祥 李玉路  
(湖南华菱湘潭钢铁有限公司技术质量部,湘潭 411101)

**摘要** 根据各合金元素对材料性能、微观组织及焊接冷裂纹等的影响,结合现有设备和工艺技术条件,设计出 80 kg 级低温不预热焊接高强钢的化学成分。用该开发钢板做低温不预热焊接 Y-形坡口铁研(焊接裂纹)试验发现,空冷 48 h 后没有出现焊接开裂。同时,在 5 ℃、15 ℃及常温下,热输入为 20 kJ/cm 时,采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊及手工电弧焊对试验钢板分别进行了不预热焊接试验,结果表明,该 80 kg 级高强钢板在 5 ℃、15 ℃及常温下不预热焊接接头的抗拉强度 832~857 MPa, -20 ℃焊缝冲击功 55~127 J,满足标准要求。

**关键词** 不预热焊接 80 kg 高强钢 Y-形坡口铁研

## Development of 80 kg Class High Strength Steel of Non-Preheat Welding at Low Temperature

Yang Jun, He Hang, Zhang Yongwei, Qiu Fuxiang and Li Yulu  
(Technical Quality Department, Hunan Valin Xiangtan Iron and Steel Company Limited, Xiangtan 411101)

**Abstract** Based on the influence of each alloy elements on the properties, microstructure and the welding cold crack of materials, and combined with the existing equipment and process technology conditions, the chemical compositions of the 80 kg class high strength steel of non-preheat welding at low temperature are designed. It's found that the Y-groove welding cracking test samples (welding crack) of developed steel plate with low temperature unpreheat welding are not welding crack after air cooling 48 hours. At the same time, the unpreheat welding experiments respectively used for CO<sub>2</sub> gas shielded welding and manual arc welding at 5 ℃, 15 ℃ and room temperature with heat input 20 kJ/cm of test steel. Results show that tensile strength of welding joints of the 80 kg class high strength steel plates unpreheat welding at 5 ℃, 15 ℃ and room temperature is 832~857 MPa and weld seam impact energy at -20 ℃ is 55~127 J to meet the requirement of standard.

**Material Index** Unpreheat Welding, 80 kg High Strength Steel, Y-Groove Welding Cracking Test

随着工程、矿山机械、车辆、船舶、高层建筑、锅炉及压力容器等领域的快速发展,焊接构件也逐渐大型化、轻量化和高强度化。目前,80 kg 级低合金高强钢已经广泛应用于液压支架、港口机械、煤矿机械、起重机、挖掘机等工程机械设备,但是,低合金高强钢使用过程面临焊接冷裂纹、热影响区的软化及脆化等问题<sup>[1-3]</sup>。为了避免焊接裂纹的产生,高强钢焊接时,先进行一定温度的预热,预热温度的高低取决于钢材、焊材、焊件结构形状和拘束度、焊接环境条件等<sup>[4-5]</sup>。如有的煤机企业使用 80 kg 级高强钢的预热温度达到 100 ℃左右甚至更高。

高强钢焊前预热使生产工艺复杂化,也增加了劳动强度,恶化了劳动条件,同时也影响了生产效率,增加了生产成本,而且预热温度控制不当还会影响焊接接头的综合性能<sup>[6-8]</sup>。如果能在不降低强韧性水平的同时,改善这类钢种的焊接性能,实现低温不预热焊接,将给工程机械行业带来巨大的实用价值和经济效益。

### 1 试验方法

试验钢板采用的生产工艺流程为:120 t 转炉-LF 精炼-VD/RH 真空处理-连铸(300 mm×2 270 mm)-加热炉-TMCP(控制控冷)轧制+DQ(Direct Quench, 即直接淬火,在轧制结束后直接从终轧温度进行淬火冷却)-回火。本试验成分主要轧制成 16 mm×3 200 mm、25 mm×3 200 mm、30 mm×3 200 mm 规格, TMCP 轧制+DQ 后,取 30 mm 规格钢板样两块,一块做性能检验用,另一块备用;回火后也取 30 mm 规格钢板样两块,一块做性能检验和 Y-形坡口铁研焊接试验(即焊接冷裂纹试验)用,另一块备用。对试验钢板样加工成 Φ10 mm 圆形拉伸试样检验力学性能,并在试验钢板样上加工三组铁研样,铁研样尺寸(/mm)为:30×80×200(轧向)。铁研样坡口加工成 GB4675.1-84 中的标准试样。

在 5 ℃、15 ℃及常温下,采用大西洋 CHW-80C1 焊丝对 Y-形坡口铁研样进行 CO<sub>2</sub> 气体保护焊接及手工电弧焊,热输入为 20 kJ/cm,焊接结束后在室温下

表 1 试验钢的化学成分、碳当量及裂纹敏感系数  
Table 1 Chemical composition, carbon equivalent and crack sensitivity coefficient of experimental steel

化学成分/%													
C	Si	Mn	P	S	Alt	Cr	Nb	Ti	Mo	B	C <sub>eq</sub>	P <sub>cm</sub>	
≤0.07	0.15 ~ 0.30	1.30 ~ 1.70	≤0.012	≤0.005	0.015 ~ 0.055	≤0.50	≤0.05	0.03 ~ 0.05	0.1 ~ 0.4	0.001 ~ 0.002	≤0.40	≤0.20	

表 2 试验钢板 DQ 及 450 ~ 700 °C 回火后的性能  
Table 2 Properties of experimental steel plate after DQ and tempering at 450 ~ 700 °C

80 kg 级钢	回火温度/°C	R <sub>eL</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa	屈强比	A/%	HV 硬度值	-20 °C 冲击功/J
工艺状态	DQ	941	980	0.960	18.8	344	245
	450	883	908	0.972	19.6	315	192
	500	817	848	0.963	19.9	305	199
	550	807	844	0.956	20.5	301	164
	600	806	838	0.962	20.4	304	158
	650	795	821	0.968	20.3	295	195
	700	640	674	0.949	18.2	189	103
标准要求	成品材	≥680	770 ~ 940	-	≥14	-	≥47

空冷 48 h, 要求焊缝不出现裂纹, 焊缝及热影响区性能满足钢种要求。

## 2 试验结果

### 2.1 试验钢成分控制

化学成分和施焊方式决定了焊接热影响区冷裂纹的敏感性<sup>[1,9]</sup>, 所以, 根据各合金元素对材料性能、微观组织及焊接冷裂纹等的影响, 结合现有设备和工艺技术条件, 设计出 80 kg 级低温不预热焊接高强钢的化学成分、碳当量及裂纹敏感系数, 见表 1。

### 2.2 试验钢板性能检验及断口分析

#### 2.2.1 试验钢板不同回火温度下的性能

钢坯经过 TMCP 轧制成钢板, 经 DQ 处理后, 采用 450、500、550、600、650、700 °C 分别对钢板进行回火, 各回火温度下钢板的性能见表 2。由表 2 可知, 700 °C 回火后钢板性能达不到 80 kg 级钢的要求, 其他回火温度下的性能都能满足 80 kg 级钢的要求。

#### 2.2.2 不同回火温度的拉伸断口宏观形貌

试验钢经不同温度回火后的常温拉伸断口宏观形貌均为杯锥状, 为典型的韧性断裂形貌, 其中直接淬火钢颈缩程度最小。450、500、550 °C 三个温度的断口, 随着回火温度升高, 断口直径逐渐减小, 颈缩程度增大, 表明塑性逐渐增加; 600、650 °C 回火的断口直径与 550 °C 回火相差不多, 但存在明显的中间分层开裂现象; 700 °C 回火试样的断口直径增大, 缩颈不明显, 延伸率较低。

#### 2.2.3 拉伸断口的微观形貌

图 1 为试验钢经不同温度回火后的常温拉伸断口微观形貌。图 1(a) 显示, 450 °C 回火试样的断口表现为韧窝与少量准解理的混合型断裂, 对应较低的延伸率。图 1(b) 显示, 500 °C 回火时, 断口韧窝数量增多, 几乎不存在准解理断裂特征, 对应的冲击韧性升高。图 1(c) 显示, 550 °C 回火时, 韧窝明显增多, 准解理面减少, 对应的延伸率较 450 °C 回火明显提高。

从上述拉伸断口分析可知, 试验钢板采用 500 °C 和 550 °C 的温度进行回火, 不仅能得到良好的性能, 而且韧塑性也较好。

### 2.3 试验钢不预热焊接性能及焊接接头断面分析

#### 2.3.1 不预热焊接接头性能

在 5、15 °C 及常温三个温度下, 不预热焊接 Y-形坡口铁研试验空冷 48 h 后, 可以看到焊接实物的焊缝和母材上都没有发现有裂纹。表 3 为焊接接头的冲击和拉伸试验结果, 从表 3 中可以看到, 三个温度的焊态性能都能满足 80kg 级钢的要求, 焊缝和热影

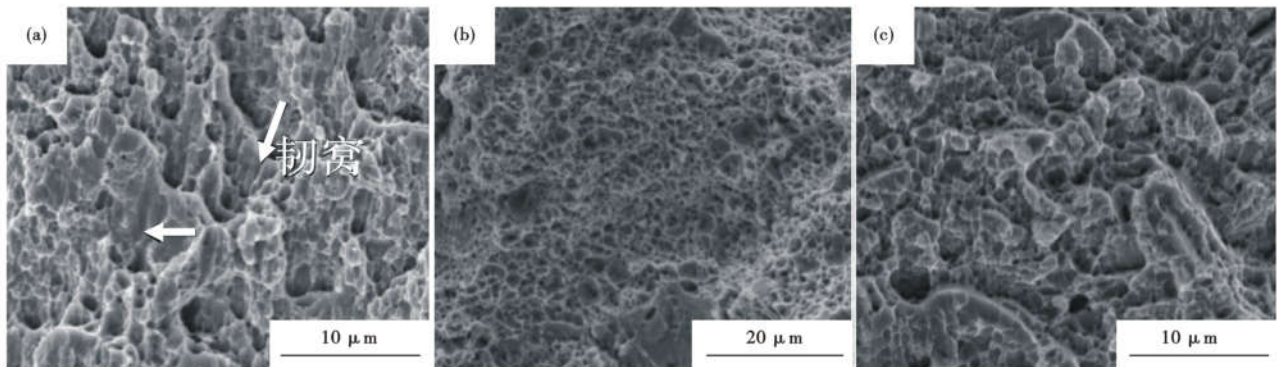


图 1 试验钢(a) 450 °C、(b)500 °C、(c)550 °C 回火试样拉伸断口的微观形貌

Fig. 1 Morphology of microstructure of tensile fracture of test steel tempering at 450 °C (a), 500 °C (b) and 550 °C (c)

表 3 试验钢焊接接头冲击及拉伸试验结果  
Table 3 Test results of impact and tensile of welding joints of test steel

80 kg 级钢	试样编号	焊接温度/℃	试样状态	抗拉强度/MPa	断裂位置	(-20℃)冲击功/J	说明
工艺状态	1	5	焊态	857	母材	70,78,55	焊缝 HAZ
	2		焊态	841	母材	145,192,182	
	3	15	焊态	861	母材	85,76,78	焊缝 HAZ
	4		焊态	832	母材	274,276,261	
	5	常温	焊态	836	母材	127,106,93	焊缝 HAZ
	6		焊态	843	母材	248,227,179	
标准要求	-	-	-	770~940	-	≥47	-

注:表中 HAZ 即 heat affected zone(热影响区)

响区的 -20℃ 低温冲击都比较好。

### 2.3.2 不预热焊接接头断面宏观形貌

将 5、15℃、常温三个温度下的不预热手工焊实物接头切开,观察断面宏观形貌,可看到,所有断面均没有出现裂纹,焊缝和母材结合良好。观察将 5、15℃、常温三个温度下的不预热气保焊实物接头切开,观察断面宏观形貌,可看到,焊接接头断面除了在焊缝根部存在短小的未熔合现象外,没有出现热影响区和焊缝中扩展的裂纹,焊缝和母材结合良好。

手工焊和气保焊实物接头断面宏观形貌的区别应该源于气保焊焊接速度比手工焊快,从而使得焊缝根部存在短小的未熔合现象。

## 3 分析讨论

### 3.1 不同焊接方法对焊接热影响区附近低倍组织影响

图 2 为手工焊和气保焊焊接接头热影响区附近的低倍组织。从图 2 可以看到,整个焊接接头明显

分为 3 个区域,即焊缝区、热影响区、母材区。焊缝组织呈柱状,柱状晶粒沿着母材热影响区晶粒表面外延,并向焊缝中心生长。焊缝与母材的颜色差异较大,尤其是气保焊焊缝颜色与母材对比度较高。从图 2 还可看到,热影响区中,离焊缝中心越远,热影响区组织呈现阶梯变化趋势,与手工焊相比,气体保护焊热影响区较窄,宽度只有 1 133 μm,且热影响区组织较细小,这主要是由于气保焊焊接速度快,熔池较小,热量比较集中,焊缝与母材的熔合比较小,形成的热影响区窄。

### 3.2 不同焊接方法对焊缝断面微观组织影响

图 3 为不同焊接方

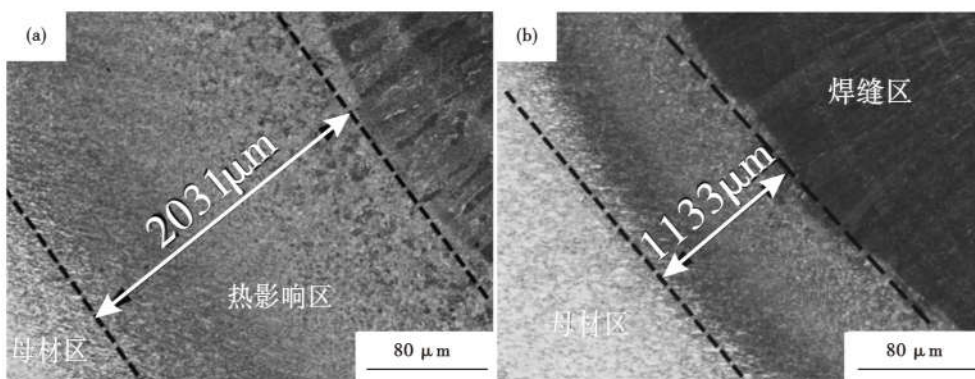


图 2 热影响区附近的低倍金相组织:(a)手工电弧焊和(b)气体保护焊  
Fig.2 Macrostructure of near heat affected zone:(a) manual arc welding and (b) gas shielded welding

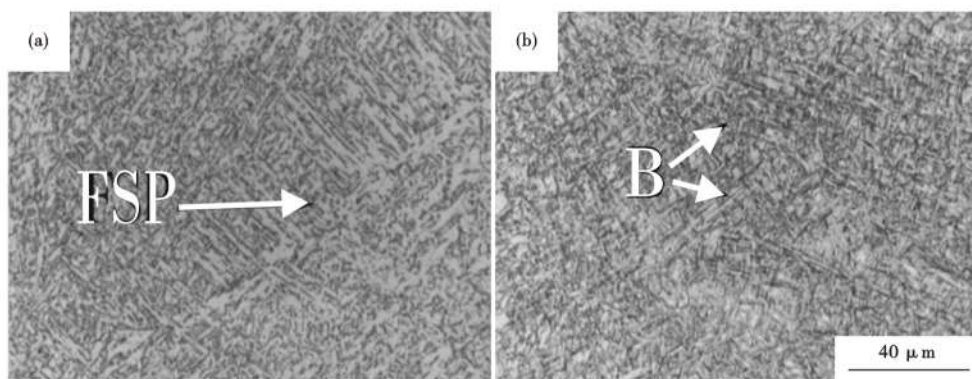


图 3 Y-形坡口铁研试样焊缝的金相组织:(a)手工电弧焊和(b)气体保护焊  
Fig.3 Microstructure of weld of Y-groove welding cracking test samples:(a) manual arc welding and (b) gas shielded welding

法的铁研试样焊缝金相组织。图 3(a) 为手工电弧焊, 焊缝组织为针状铁素体(AF)、沿晶界分布的先共析铁素体(PF)和侧板条铁素体(FSP)。图 3(b) 气体保护焊, 焊缝组织较手工焊细小, 为短杆状贝氏体(B)和针状铁素体混合组织, 贝氏体板条方向一致, 尤其是在靠近熔合区部位焊缝组织存在大量的贝氏体组织。

图 4 为不同焊接方法的铁研试样焊缝扫描电镜组织照片。图 4(a) 为手工电弧焊, 焊缝中的先共析铁素体沿奥氏体晶界呈网状析出, 而侧板条铁素体板条相互平行, 由晶界向奥氏体晶界生长, 板条铁素体板条之间分布着长条状珠光体。先共析铁素体和侧板条铁素体的位错密度较低, 抵抗塑性变形抗力和裂纹扩展能力低, 当焊缝受焊接拉应力时, 裂纹优先在这些组织上扩展。由图 4(b) 为气体保护焊, 焊缝中的板条状贝氏体呈长条状分布, 板条之间相互平行, 板条之间存在粗大的长条状 MA 组元或碳化物, 强化作用较弱, 裂纹很容易沿着这个方向扩展。

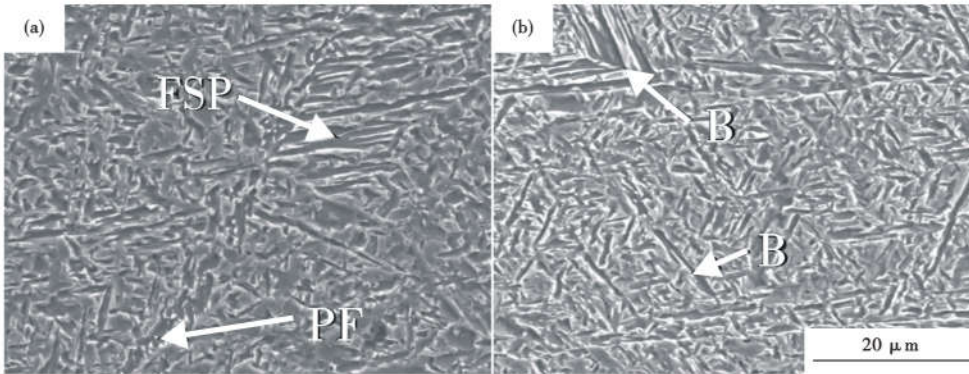


图 4 试验钢 Y-形坡口铁研试样焊缝显微组织:(a)手工电弧焊和(b)气体保护焊,SEM  
Fig. 4 Microstructure of weld seam of test steel Y-groove welding cracking test samples (a) manual arc welding and (b) gas shielded welding, SEM

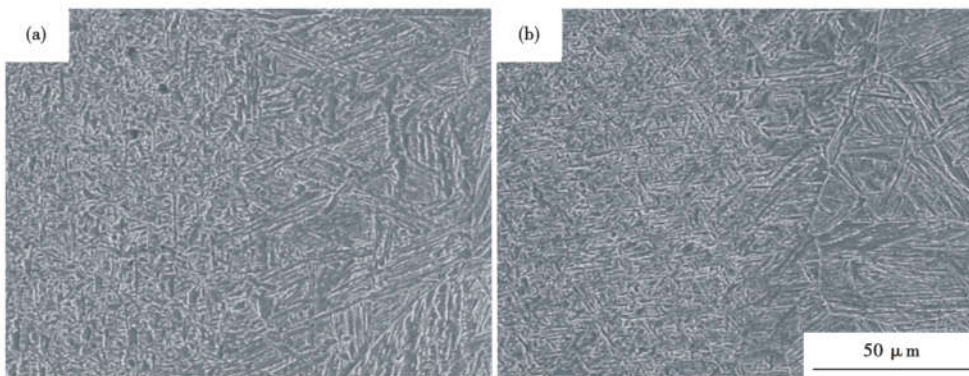


图 5 试验钢 Y-形坡口铁研试样焊接接头熔合区显微组织:(a)手工电弧焊和(b)气体保护焊  
Fig. 5 Microstructure of weld joint fusion zone of Y-groove welding cracking test samples: (a) manual arc welding and (b) gas shielded welding

### 3.3 不同焊接方法对焊缝接头微观组织影响

图 5 为不同焊接方法的铁研试样焊接接头熔合区的金相照片。图 5(a) 显示, 手工电弧焊熔合区靠近热影响区一侧为板条贝氏体组织, 靠近焊缝一侧为针状铁素体组织。由于气体保护焊热输入较小, 冷却速率快, 因此靠近热影响区一侧奥氏体晶粒较细小并形成大量的马氏体, 如图 5(b) 所示, 气体保护焊靠近热影响区一侧为贝氏体和马氏体混合组织, 靠近焊缝形成大量贝氏体组织。

### 3.4 不同环境温度对焊缝组织影响

图 6 为不同环境温度下手工电弧焊铁研试样的焊缝金相组织。图 6(a) 环境温度为常温, 其焊缝组织为针状铁素体(AF)和少量的先共析铁素体(PF)混合组织。图 6(b) 环境温度为 15 °C, 其焊缝为针状铁素体、板条贝氏体(B)和侧板条铁素体(FSP)混合组织, 贝氏体含量较高, 呈板条状, 且板条方向一致, 为小角度晶界, 与针状铁素体互相交织连锁的分布状态有明显的区别。图 6(c) 环境温度为 5 °C, 其焊缝组织细小, 除了针状铁素体外, 还存在大量的

上贝氏体(Bu)和板条状贝氏体(B)。

从对图 6 分析可知, 不预热焊接时, 环境温度越低, 得到的焊缝组织越细小, 热影响区粗晶区的奥氏体晶粒也越细小, 且环境温度越低, 焊缝组织中的贝氏体含量也越多, 热影响区粗晶区组织中的马氏体含量也更多。

## 4 结论

(1) 通过性能及拉伸断口分析可知, 试验钢采用 500 °C 和 550 °C 的温度进行回火, 都能满足 80 kg 级钢的性能要求, 同时, 还具有良好的塑性和韧性; 且试验钢板在 5、15 °C 及常温三个环境温度下采用手工电弧焊和气体保护焊进行不预热 Y-形坡口

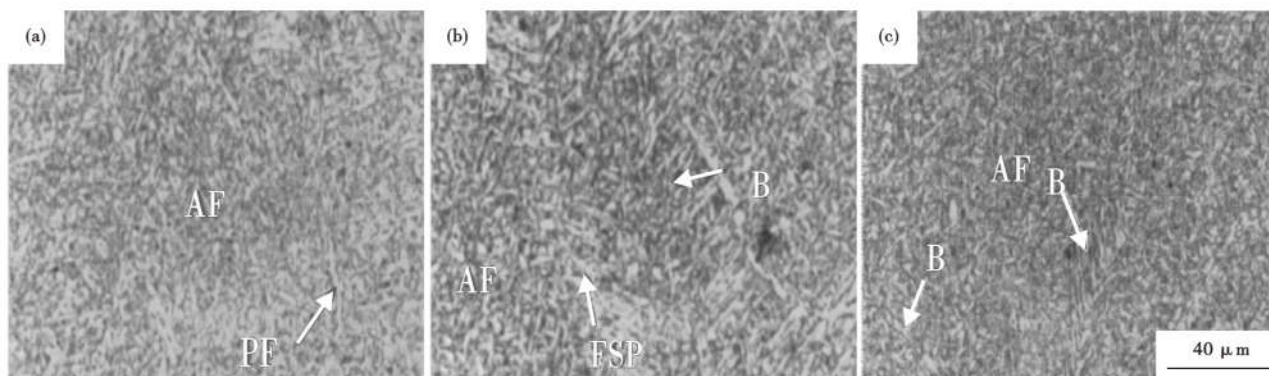


图 6 不同环境温度下手工电弧焊铁研试样的焊缝粗晶区金相组织:(a)常温,(b)15℃,(c)5℃

Fig. 6 Microstructure of coarse grain area in weld seam of Y-groove welding cracking test samples with manual arc welding at different ambient temperatures:(a) normal temperature,(b)15 °C and (c)5 °C

铁研试验,空冷 48 h 后铁研试样都没有出现焊接裂纹,说明通过本试验设计的成分和工艺开发出来的试验钢能实现低温不预热焊接。

(2)低温不预热焊接时,不同的焊接方法得到的焊接断面组织不同。气体保护焊因其焊接速度快,熔池较小,热量比较集中,焊缝与母材的熔合比较小,所形成的热影响区明显比手工电弧焊所形成的热影响区窄,且气体保护焊的焊接组织比手工电

弧焊细小,在靠近熔合区部位焊缝组织存在大量的贝氏体组织。

(3)不同环境温度下低温不预热焊接的焊缝和热影响区微观组织也不同。不预热焊接时,环境温度越低,得到的焊缝组织越细小,热影响区粗晶区的奥氏体晶粒也越细小,且环境温度越低,焊缝组织中的贝氏体含量也越多,热影响区粗晶区组织中的马氏体含量也更多。

参考文献

[1] Czuryca E J. Advances in High Strength Steel Technology for Naval Hull Construction[J]. Key Engineering Materials,1993,84-85 :491-520.

[2] Garcia C I, Lis A K, Pytel S M, et al. Ultra-Low Carbon Bainitic Plate Steels;Processing, Microstructure and Properties[J]. Iron and Steel-maker,1991,18(10):97-106.

[3] Simth N J, McGrath J T, Gianetto J A, et al. Microstructure/Mechanical Property Relationships of Sub-Merged arc Welds in HSLA 80 steel [J]. Welding Journal,1989,68(3):120-122.

[4] Gianetto J A, Smith N J, McGrath J T, et al. Effect of Composition and Energy Input on Structure and Properties of High-Strength weld Materials[C]. Aws 71st Annual meeting, USA,1990.

[5] Bhole S D, Fox A G. Influence of GTA Welding Thermal Cycles on HSLA-100 Steel Plate[J]. Canadian Metallurgical Quarterly,1996,35(2):151-158.

[6] 刘利云. Q550 材质夏季不预热焊接可行性试验的探讨[J]. 煤矿

机械,2018,39(9):34-35.

[7] 王祖滨,贾书君. 大力发展低合金高强度钢促进钢铁工业增长方式的转变[J]. 中国冶金,2006,16(4):1-8.

[8] 邹增大,李亚江,尹士科. 低合金高强钢焊接及工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2001.

[9] Kitada T, Fukuda K, Fukushige N. Weldability of Newly Developed TMCP Type High Strength Steel Shapes for Hull Structure[J]. Nippon Kokan Tech,1986,112:69-74.

杨俊(1975-),男,博士(2011年北京科技大学),高级工程师,1995年湖南工业大学(本科)毕业,钢铁产品研发。E-mail:313010357@qq.com

收稿日期:2021-02-16

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备和技术、产品研发宣传广告**