

# 10Ni8CrMoV 钢焊接模拟热影响区的组织与性能

杜 义 杨 澍 成应晋 蒋 颖

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所 河南 洛阳 471023)

**摘 要:** 采用焊接热模拟试验方法,模拟 980 MPa 级 10Ni8CrMoV 高强钢焊接接头热影响区的不同区域,通过对不同线能量条件下不同区域的拉伸、冲击试验及各个区域的组织分析,研究了该钢模拟热影响区的组织和性能。结果表明,该钢模拟热影响区粗晶区强度、塑性较基体显著降低;各区域低温冲击韧性随线能量的增大变化不明显,临界区韧性最低、为焊接接头的薄弱区域,粗晶区存在较多连续分布的奥氏体薄膜,是粗晶区低温冲击韧性较高的主要原因。

**关键词:** 980 MPa; 焊接热模拟; 热影响区; 奥氏体

**中图分类号:** TG113.1 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.19515/j.cnki.1003-1545.2016.05.005

## Microstructures and Mechanical Properties of HAZ of Weld Thermal Simulation for 10Ni8CrMoV Steel

DU Yi, YANG Shu, CHENG Yingjin, JIANG Ying

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** Microstructures and mechanical properties of HAZ of 10Ni8CrMoV of 980 MPa high strength steel were studied. The different regions of HAZ were simulated by weld thermal simulation technique. Microstructure observation, phase analysis, and corresponding tensile and impact tests for different regions in HAZ were made. The results indicated that the yield strength and plasticity were significantly reduced in the coarse grain zone; impact toughness of different regions in HAZ had no obvious change with the changing of the heat inputs; critical zone of HAZ had the worst impact toughness and was the weakest part of the HAZ; the main reason for higher impact toughness of coarse grain zone was that more austenite films was continuously distributed in this area.

**Keywords:** 980 MPa; weld thermal simulation; HAZ; austenite

低合金高强钢以其具有高强度、高塑韧性和良好的焊接性而广泛应用于工程机械、电力、压力容器、汽车等领域<sup>[1]</sup>,目前,已经对 800 MPa 级及以下强度级别的高强钢开展了大量的研究工作,且研究成果已成功应用于生产实际<sup>[2-4]</sup>。随着工程结构向大型化、轻量化和高效能化方向发展,980 MPa 级高强钢在工程结构中将有良好的应用前景,但其焊接性问题、尤其是其对焊接热作用的适应能力,须予以关注。

低合金高强钢焊接热影响区的组织性能的不均匀性可能导致该区域发生脆化或软化。热影响区的粗晶区由于晶粒严重长大,通常为焊接

接头的最薄弱区域<sup>[5]</sup>;细晶区由于发生了重结晶,晶粒细化,往往是接头热影响区性能最好的区域;临界区由于存在组织遗传现象,可能是焊接接头的薄弱区域。目前,对于焊接热影响区韧性差的机理研究结果包括晶粒粗大使临界断裂应力低<sup>[6]</sup>、形成 M-A 组元<sup>[7]</sup>、含碳量变化<sup>[8]</sup>、形成局部脆性区(LBZ)<sup>[8-9]</sup>、产生孪晶马氏体<sup>[10]</sup>、马氏体向贝氏体与贝氏体混合组织转变及板条间(内)碳化物的存在<sup>[11]</sup>等。

本文作者利用焊接热模拟试验方法,对 980 MPa 级 10Ni8CrMoV 钢在不同线能量条件下的焊接热影响区各区域的性能进行了研究。

收稿日期: 2016-04-07

作者简介: 杜义,男,1980 年生,高级工程师,主要从事船体结构钢用焊接材料及工艺研究; E-mail: duyiyi@725.com.cn。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验用钢板为 980 MPa 级 10Ni8CrMoV 钢, 经热分析测定该钢的  $A_{c1}$  为 635 °C,  $A_{c3}$  为 786 °C,  $M_s$  为 385 °C。钢板基本力学性能如表 1 所示。

表 1 10Ni8CrMoV 钢的基本力学性能  
Table 1 Mechanical properties of 10Ni8CrMoV steel

屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A$ /%	断面收缩率 $Z$ /%	-20 °C 冲击功 $KV_2$ /J
1 028 , 1 025	1 088 , 1 088	18.5 , 18.0	68 , 68	208 , 206 , 205 , 206

### 1.2 焊接热模拟试验

焊接热模拟试验在 Gleeble 3500D 型热/力模拟试验机上进行, 热模拟试样尺寸为 10.5 mm × 10.5 mm × 80 mm, 试样长度方向与钢板轧制方向一致, 试验过程中热电偶焊点位置位于两夹持端的中间, 试验所使用的焊接热循环参数如表 2 所示。

表 2 焊接热循环参数  
Table 2 Parameters of weld thermal cycle

热输入 $E$ / (kJ/cm)	峰值温度 $T_{max}$ / °C	冷却时间	
		$t_{8/5}$ / s	$t_{8/3}$ / s
10	1 300	5	17
	1 100	5	17
	900	5	17
	730	5	17
	1 300	10	34
	1 100	10	34
20	1 000	10	34
	900	10	34
	730	10	34
	1 300	20	58
40	1 100	20	58
	900	20	58
	730	20	58

### 1.3 力学性能测试

#### 1.3.1 拉伸试验

经焊接热模拟试验后的试样按 GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》要求加工成 R7 的圆拉伸试样, 并在室温条件下, 在 DNS-60

电子万能试验机上进行一组两个试样的拉伸性能测试。

#### 1.3.2 冲击试验

经焊接热模拟试验后的试样按 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》要求加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 的夏比 V 型缺口冲击试样, 缺口位置位于热电偶焊接处, 并在 -50 °C 条件下, 在 JBH-3000 冲击试验机冲上进行一组三个试样的冲击性能测试。

### 1.4 微观组织分析

经焊接热模拟试验后的试样, 在热电偶焊接位置制取金相组织和 TEM 分析试样。金相组织分析试样经磨光、抛光、采用 4% 硝酸酒精溶液/苦味酸洗涤剂水溶液腐蚀后, 在 Leica DMI5000M 金相显微镜上进行金相组织/晶粒度分析; TEM 分析试样经研磨、精磨及电解双喷后, 在 JEM-2100 透射电镜上进行 TEM 组织分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 拉伸性能试验

室温条件下, 线能量为 20 kJ/cm 时, 峰值温度分别为 1 300 °C、1 100 °C、1 000 °C、900 °C 和 730 °C 的焊接热模拟试样拉伸性能试验结果如表 3 所示, 为便于比较, 将未经过热模拟的基体 R7 型试样拉伸性能也列于表中。结果显示, 经焊接热模拟试验后, 峰值温度不同的试样的抗拉强度和断面收缩率均无明显变化; 与基体相比, 峰值温度为 1 300 °C 时, 试样的屈服强度和断后延伸率显著降低; 随着峰值温度的降低, 试样的屈服强度又有明显提高; 当峰值温度降低到 1 100 °C 后, 试样的屈服强度与基体的水平一致。

表 3 热模拟 HAZ 拉伸试验结果  
Table 3 Tensile test results from thermal simulation of HAZ

峰值温度 $T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断后伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$
基体	1 039	1 098	20.5	78
1 300	983 , 970	1 102 , 1 105	16.5 , 16.0	76 , 78
1 100	1 050 , 1 008	1 102 , 1 102	16.5 , 17.0	77 , 78
1 000	1 038 , 1 063	1 104 , 1 109	16.0 , 16.0	77 , 78
900	1 047 , 1 057	1 112 , 1 113	17.0 , 17.0	75 , 78
730	1 029 , 1 038	1 095 , 1 104	18.0 , 17.5	78 , 78

2.2 冲击性能试验

经焊接热模拟后的试样在  $-50^{\circ}\text{C}$  条件下的冲击性能试验结果如表 4 所示,冲击韧性随线能量及峰值温度的变化规律如图 1、2 所示。结果显示,在峰值温度为  $1\,300^{\circ}\text{C}$ 、 $1\,000^{\circ}\text{C}$  和  $900^{\circ}\text{C}$  时,随线能量的增大冲击韧性基本无变化,在峰值温度为  $730^{\circ}\text{C}$  时,冲击韧性随线能量的增大略有降低;线能量为  $10\text{ kJ/cm}$  时,冲击韧性随峰值温度的提高呈先降低后升高的趋势,线能量为  $20\text{ kJ/cm}$ 、 $40\text{ kJ/cm}$  时,冲击韧性随峰值温度的提高呈逐步升高的趋势。

表 4 热模拟 HAZ 冲击试验结果  
Table 4 Impact test results from thermal simulation of HAZ

峰值温度 $T_{\max}/^{\circ}\text{C}$	线能量 $E/(\text{kJ/cm})$	$-50^{\circ}\text{C}$ 冲击功 $KV_2$ 及平均值/J
1 300	10	187 , 202 , 191/193
1 100	10	171 , 171 , 165/169
900	10	164 , 158 , 159/160
730	10	193 , 187 , 144/175
1 300	20	203 , 166 , 210/193
1 100	20	174 , 171 , 179/175
900	20	137 , 164 , 168/156
730	20	182 , 119 , 149/150
1 300	40	193 , 198 , 194/195
1 100	40	182 , 174 , 176/177
900	40	165 , 153 , 151/156
730	40	147 , 174 , 147/156

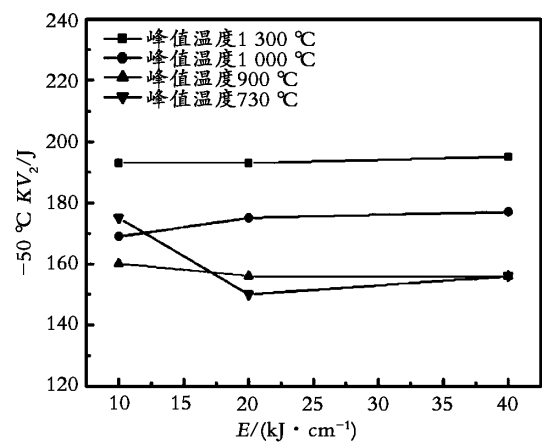


图 1 线能量对冲击韧性的影响  
Fig. 1 Effect of different heat inputs on impact toughness

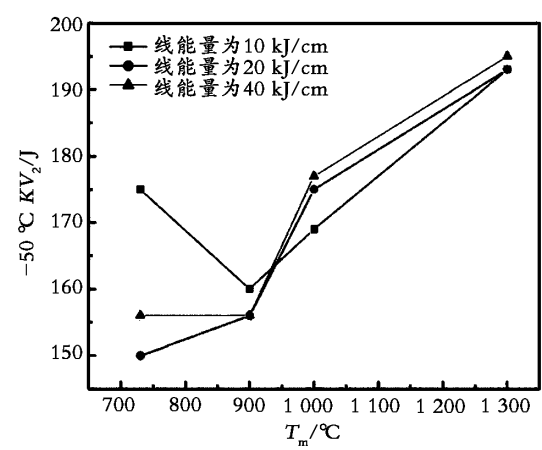


图 2 峰值温度对冲击韧性的影响  
Fig. 2 Effect of different peak temperatures on impact toughness

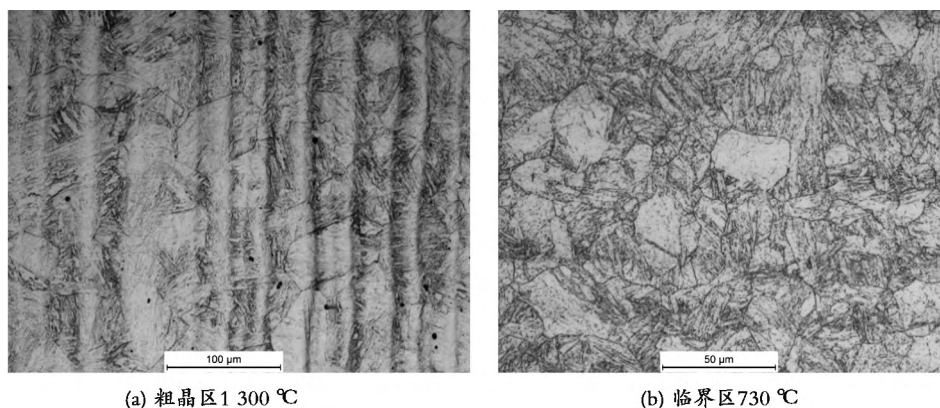
2.3 微观组织分析

在焊接过程中,母材热影响区上各点因距焊缝的远近不同,其所经历的焊接热循环峰值温度也不同,对于调质高强度低合金钢而言,焊接热

影响区根据所受的热循环峰值温度不同可分为粗晶区、细晶区、临界温度区和亚临界区。粗晶区靠近熔合线,峰值温度在  $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上,该区域晶粒粗大可能导致韧性恶化,通常是热影响区中韧性最差的区域,同时,随焊接线能量的增大,晶粒粗化更为严重,冲击韧性将呈降低的趋势;细晶区峰值温度在  $A_{c3}$  以上,通常为  $900\text{—}1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,该区域晶粒得到了细化,往往是接头热影响区性能最佳的区域;临界区峰值温度介于  $A_{c3}$  和  $A_{c1}$  之间,由于存在组织遗传现象,也可能是热影响区的薄弱区域;亚临界区峰值温度低于  $A_{c1}$ ,组织形貌通常没有变化。

对于本文所研究的  $980\text{ MPa}$  级  $10\text{Ni}8\text{CrMoV}$  钢,由表 4 结果可知,在峰值温度为  $1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$  的粗晶区、 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  的细晶区,随线能量

的增大,冲击韧性基本无变化,而在峰值温度为  $730\text{ }^{\circ}\text{C}$  的临界区,随线能量的增大冲击韧性呈略有降低的趋势;同时,在相同热输入的条件下,随峰值温度的降低,冲击韧性基本呈逐步降低的趋势,即粗晶区的冲击韧性最高、临界区最低。图 3 为线能量为  $40\text{ kJ/cm}$  时粗晶区和临界区的晶粒度,经评级得出粗晶区的晶粒度为 6.5 级,临界区的晶粒度为 8.5 级,相比而言,粗晶区的晶粒明显粗化;图 4 为线能量为  $40\text{ kJ/cm}$  时粗晶区和临界区的金相组织,可以看出,粗晶区的组织为马氏体,临界区的组织为贝氏体。从晶粒度和组织来看,粗晶区的韧性应比临界区低,但试验结果却恰好相反,为此对这两个区域的透射电镜组织进行观察,透射电镜组织图分别如图 5、6 所示。

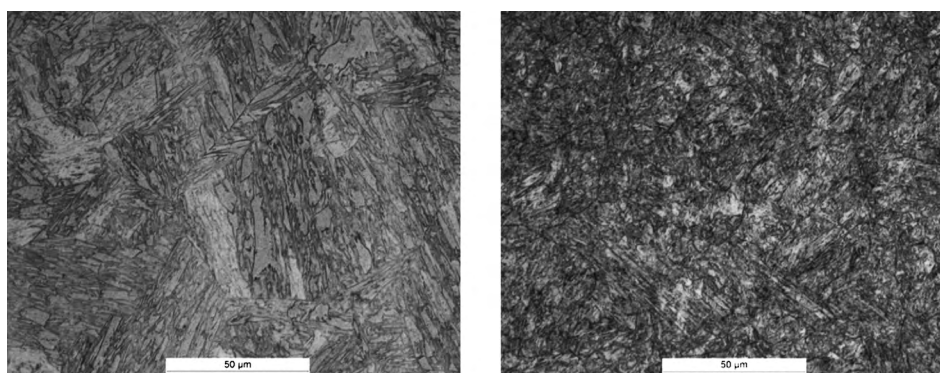


(a) 粗晶区  $1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) 临界区  $730\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 3 模拟热影响区不同区域的晶粒粒度

Fig. 3 Grain sizes of thermal simulation HAZ



(a) 粗晶区  $1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) 临界区  $730\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 4 模拟热影响区不同区域的金相组织

Fig. 4 Microstructures of thermal simulation HAZ

粗晶区组织主要为马氏体,在马氏体边界上存在较多连续奥氏体薄膜,同时,在马氏体板条

间和晶界上有较多渗碳体析出颗粒,如图 5 所示;临界区组织主要为马氏体和少量贝氏体,在

马氏体边界上存在断续奥氏体薄膜,同时,在马氏体板条间和晶界上也有较多渗碳体析出颗粒,如图6所示。对比粗晶区和临界区的微观组织可以看出,两区域的组织区别主要表现为奥氏体薄膜的形态及分布状态。粗晶区中的奥氏体薄膜较厚、数量较多且呈连续分布状态,而临界区中的奥氏体薄膜相对较薄、数量较少且呈断续弥散分布状态。奥氏体强度较低、但韧塑性高,尤其是在低温条件下仍保持较高的韧塑性。当在外力作用下,马氏体板条产生塑性变形形成微裂纹

后,微裂纹扩展遇到奥氏体薄膜时,奥氏体的高塑韧性可吸收较多能量而使应力松弛,阻止微裂纹继续扩展,更重要的是,奥氏体薄膜的存在改变了原微裂纹的传播路径,显著增大了微裂纹的扩展长度,如图7所示。在上述两方面的作用下,在宏观上就表现为冲击韧性提高。由于粗晶区较临界区的奥氏体薄膜更厚、更多且连续分布,增大了微裂纹在奥氏体薄膜中的传播几率,最终结果表现为粗晶区较临界区有更高的低温冲击韧性。

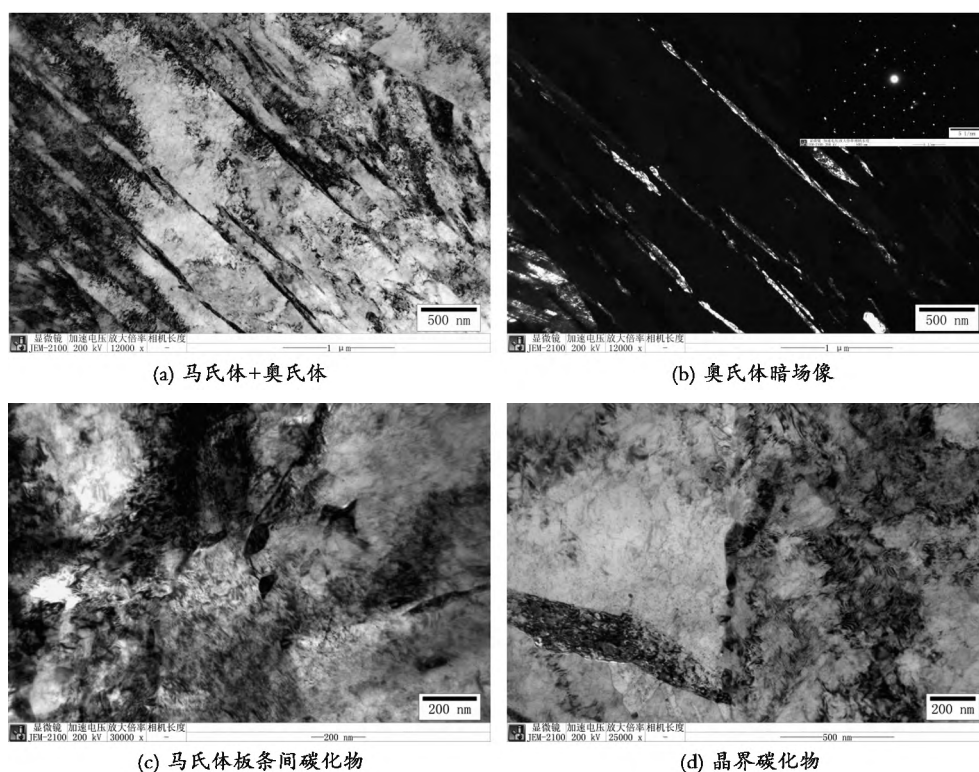
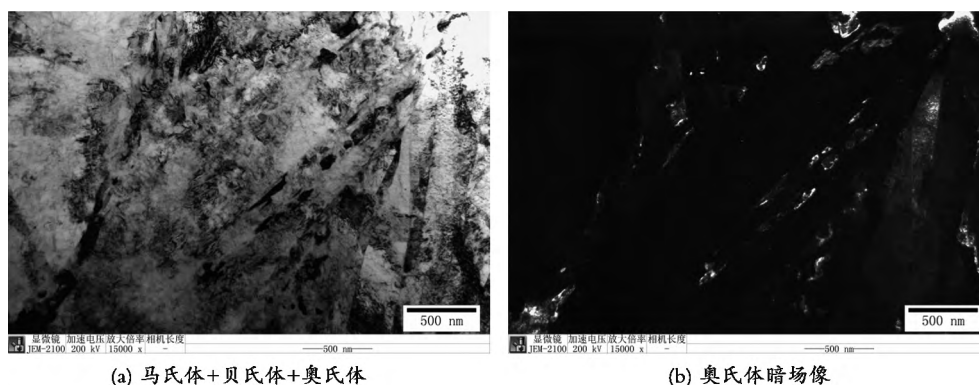


图5 粗晶区透射电镜组织

Fig. 5 TEM micrographs of coarse grain zone



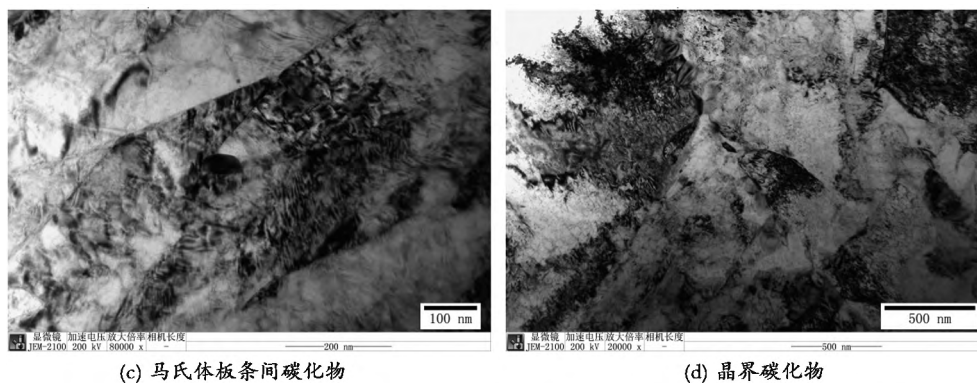


图6 临界区透射电镜组织

Fig. 6 TEM micrographs of critical zone

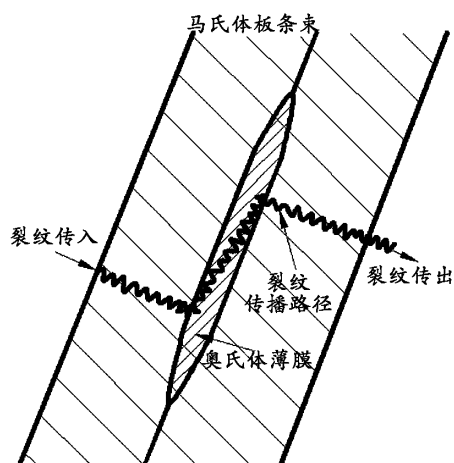


图7 微裂纹扩展路径示意图

Fig. 7 Extension path of micro-crack

### 3 结论

(1) 10Ni8CrMoV 钢焊接热模拟粗晶区的屈服强度、塑性显著降低,细晶区及临界区的强塑性与基体基本一致。

(2) 10Ni8CrMoV 钢焊接热模拟各区域低温冲击韧性随线能量的变化不明显,均表现为粗晶区韧性最高,临界区韧性最低,临界区附近韧性最差,为焊接接头的薄弱区域。

(3) 10Ni8CrMoV 钢焊接热模拟粗晶区中有较多且呈连续分布的奥氏体薄膜,是其低温冲击韧性较临界区高的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 王勇. 低合金调质高强钢焊接工艺研究进展[J]. 应用能源技术, 2009 (8): 11—13.
- [2] Han K, Park S S, Kim K H, *et al.* The effect of welding condition on the characteristics of CO laser welded 800 MPa grade trip steel [C]. United States: Laser Institute of America, 2004.
- [3] 赵琳, 张旭东, 陈武柱. 800 MPa 级低合金钢焊接热影响区韧性的研究[J]. 金属学报, 2005, 41(4): 392—396.
- [4] 刘占户, 李晓娜, 许先果, 等. 70 kg 级超低碳贝氏体高强钢在液压支架中的应用[J]. 电焊机, 2008, 38(11): 39—41.
- [5] Neves J, Loureiro A. Fracture toughness of welds — effect of brittle zones and strength mismatch [J]. Journal of Material Processing Technology, 2004, (153—154): 537—543.
- [6] Chen J H, Xia T D, Yan C. Study on impact toughness of C-Mn multilayer weld metal at  $-60^{\circ}\text{C}$  [J]. Welding Journal, 1993, 72(1): 19—27.
- [7] Filho W W, Carvalho A L M, Bowen P. Micro-mechanisms of cleavage fracture initiation from inclusions in ferritic welds P II. Quantification of local fracture behaviour observed in fatigue pre-cracked test pieces [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, (460—461): 436—452.
- [8] Jang J I, Ju J B, Lee B W, *et al.* Effects of micro structural change on fracture characteristics in coarse-grained heat-affected zones of QLT-processed 9% Ni steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 340: 68—79.
- [9] Jang J I, Lee B W, Ju J B, *et al.* Experimental analysis of the practical LBZ effects on the brittle fracture performance of cryogenic steel HAZ with respect to crack arrest toughness near fusion line [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70: 1245—1257.

- [10] 冯伟,曹睿,彭云,等. 980 MPa 级高强钢焊接接头 HAZ 的组织与性能[J]. 焊接学报,2009,30(7):17—20.

焊接热影响区组织和韧性[J]. 焊接学报,2011,32(5):97—100.

(编辑:许紫娟)

- [11] 吴昌忠,徐怀宁,范闽宁,等. 1 000 MPa 级高强钢

## 《材料开发与应用》征稿启示

### 征稿范围:

本刊旨在提高船舶、海洋工程及相关领域的材料研究、开发和应用学术水平和技术水平,促进科研成果的推广应用,积极开展国内外学术和技术交流,推动我国材料科学技术的发展。主要刊登上述领域的材料研制、材料工艺、材料性能研究及分析与测试等方面的研究报告、学术论文、专题评述等,尤其注重报道高新技术及实用技术在上述领域中的应用。

### 文稿要求:

- 1) 来稿不宜超过 6000 字,包括中、英文文题、作者和单位、中、英文摘要、关键词和中图分类号。
- 2) 正文应论点明确、论据充分、文字简炼、通顺、层次清楚。
- 3) 应采用国家最新颁布的法定计量单位。
- 4) 插图和照片按先后次序统一编号。表格应采用三线表,放在首次提到该表的正文后面。

5) 参考文献应为公开出版物。引用文献须按引用的先后,在正文中有关处用 [1],[2]…标明,序号与全文末的参考文献必须一致。须对参考文献类型加标识,即按 GB3469 的规定,以单字母方式标识以下各种参考文献类型,并给标识字母加上 [],如 [M]、[C] 等。

参考文献类型	专著	论文集	报纸文章	期刊文章	学位论文	报告	标准	专利
文献类型标识	M	C	N	J	D	R	S	P

### 参考文献书写格式如下:

专著、论文集、学位论文、报告: 作者. 文献题名 [文献类型标识]. 出版地: 出版者, 出版年. 起止页. 例:

普通图书: 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版者, 出版年: 页码.

期刊文章: 作者. 文献题名 [J]. 刊名, 年, 卷(期): 起止页码.

标准: 标准编号 标准名称 [S]. 出版地(任选): 出版者(任选), 出版年(任选).

专利: 专利所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

### 注意事项:

- 1) 请用电子邮件以附件形式投稿。
- 2) 请勿一稿两投。来稿决定录用后立即通知作者。超过 2 个月未收到录用通知, 作者可对稿件另行处理。稿件一经刊出即付稿酬, 并赠当期刊物 2 本。
- 3) 稿件的作者署名、保密和是否侵权等问题均由作者自行负责。
- 4) 来稿时请附加作者简介, 包括已取得的业绩和现在研究的方向以及有效联系方式。

来稿请寄: 洛阳市 023 信箱 5 分箱《材料开发与应用》编辑部

邮 编: 471023

电 话: (0379) 67256142 67256345

E - mail: tg023@163.com