

低合金高强钢激光-MAG 复合多层焊接 头力学性能

秦浩 雷正龙 陈彦宾 冯杰才 李颖

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 在对 16 mm 厚 11CrNi3MnMoV 低合金高强钢采用激光-熔化极活性气体保护焊(MAG)复合多层焊技术实现可靠连接的基础上,对焊缝和母材的硬度、拉伸、冲击性能进行分析,并从断口特征方面对其断裂原因和机制进行研究。结果表明,焊缝抗拉强度达到 817 MPa,比母材高 13%,其断口韧窝相对细小均匀,而母材断口的粗大韧窝明显多于焊缝,表明焊缝强度高,母材韧性好。冲击试验中随着温度降低,母材冲击功保持稳定,而焊接接头冲击功逐渐减小,-40 ℃左右发生延-脆性转变。焊缝断口主要存在韧性断裂区和脆性断裂区,而母材只存在韧性断裂区。

关键词 激光技术;低合金高强钢;激光-MAG 复合;多层焊;力学性能

中图分类号 TN249;TG456.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.1003005

Mechanical Properties of Laser-MAG Hybrid Welding on Low Alloy High Strength Steel

Qin Hao Lei Zhenglong Chen Yanbin Feng Jiecai Li Ying

(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A low alloy high strength steel (11CrNi3MnMoV) of 16 mm in thickness is well joined by laser-metal active gas (MAG) hybrid welding and the hardness, tensile and impact properties of weld seam and base metal are analyzed, respectively. Furthermore, the fracture mechanism is investigated through fractography. The results of the tensile test indicate that the strength of weld seam is about 817 MPa, which is 13% higher than that of base metal. The dimples in the fracture of weld seam are fine and uniform, whereas that of base metal are large, which shows that the tensile strength of weld seam is much higher, while the tenacity of base metal is much better. The results of the impact test indicate that the impact energy of base metal changed slightly, while that of weld seam decreases gradually as the testing temperature reduced. In addition, the tenacity-fragility transformation occurs in weld seam as the testing temperature decreases to -40 ℃. The fracture of weld seam exists both ductile and brittle rupture zone, while that of base metal only exists ductile rupture zone.

Key words laser technique; low alloy high strength steel; laser-MAG hybrid; multi layer welding; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

低合金高强钢具有高强度、高韧性、低温性能极佳、综合性能好的特点,因此在舰船制造、寒地设施建设等军用领域以及工程机械、管线、容器、桥梁、汽

车及海洋设施等民用领域受到广泛重视^[1~4]。中、厚板高强钢的常规焊接方法主要有埋弧自动焊和半自动气体保护电弧焊,其生产成本低,而且工艺成熟,但是存在热输入高、变形大、易产生缺陷等问题。

收稿日期: 2011-05-11; **收到修改稿日期:** 2011-06-20

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20090460885)资助课题。

作者简介: 秦浩(1985—),男,硕士研究生,主要从事高强钢激光复合焊接工艺及机理方面的研究。

E-mail: qinhaojlu@163.com

导师简介: 雷正龙(1977—),男,副教授,主要从事激光-电弧复合焊接加工与基础、特种材料激光加工技术等方面的研究。E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn(通信联系人)

激光-熔化极活性气体保护焊(MAG)复合焊接技术作为一种新型焊接技术,以其稳定性高、熔深大、热输入低和较好的间隙适应能力等特点,在中、厚板焊接方面表现出很好的优势^[5,6]。

目前,国内外对中、厚板高强钢复合焊的研究主要集中在焊接工艺、成形和组织方面,对复合焊接头的力学性能的研究较少。G. Tani 等^[7]研究了 He 成分、气体流量对复合焊工艺稳定性的影响,当混合气体流量为 30 L/min, He 体积分数占 30%~40% 时可以实现最优的工艺性能。朱晓明等^[8]针对厚度 20 mm 的 AH32 船用高强钢,采用 15 kW 大功率 CO₂ 激光进行激光-电弧复合单道对接焊,发现焊接速度 0.5 m/min 时,最大熔深达到了 19 mm。英国 Corus, 丹麦 FORCE, 德国 Fraunhofer ILT 等参与了欧盟 Hyblas 工程^[9] (Economical and Safe Laser Hybrid Welding of Structural Steel), 这项工程的目标是为欧盟企业提供激光复合厚板焊接的行业标准,其对厚板复合焊工艺和各影响因素做了深入和

详细的分析,实现了从 12 mm 至 25 mm 厚度钢板的量化和无缺陷复合焊接。高明等^[10]将低碳钢激光-钨极惰性气体保护焊(TIG)复合焊的焊缝区分为激光区和电弧区,发现相比电弧区,激光区有更细小的晶粒,更高的显微硬度。本文结合高强钢及激光复合焊的特点,通过优化焊接工艺参数,在实现 16 mm 厚 11CrNi3MnMoV 低合金高强钢激光-MAG 复合多层焊接的基础上,侧重对焊缝和母材的拉伸、冲击性能进行分析,并从断口特征方面对其断裂机制和原因进行了研究。

2 试验方法

试验材料为 16 mm 厚 11CrNi3MnMoV 低合金高强钢,试件规格为 300 mm×50 mm×16 mm,填充焊丝采用直径为 1.2 mm 的高强钢专用焊丝,牌号为 10M960S,化学成分如表 1 所示。焊前用丙酮对试件进行清洗以除去试板表面的油污。

表 1 11CrNi3MnMoV 低合金高强钢及焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 11CrNi3MnMoV high strength steel and filler wire (mass fraction, %)

Element	C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	V
11CrNi3MnMoV	0.11	0.44	0.03	0.023	0.18	0.97	2.68	0.23	0.077
Filler wire	0.028	1.48	0.009	0.009	0.493	—	2.36	0.239	—

激光-电弧复合焊接系统采用德国 Rofin-Sinar 公司生产的 3.0 kW 射频激励扩散冷却 CO₂ 激光器和松下 YD-500AG 型 GMA 直流焊机,最大电流 500 A。焊接时,干伸长为 17~20 mm,焊枪和工件夹角为 30°,采用 Ar 和 CO₂ 混合保护气,流量为 25 L/min, Ar 和 CO₂ 混合保护气的体积比为 4:1。拉伸、冲击试样取样位置如图 1 所示。

合焊接头力学性能进行了分析。

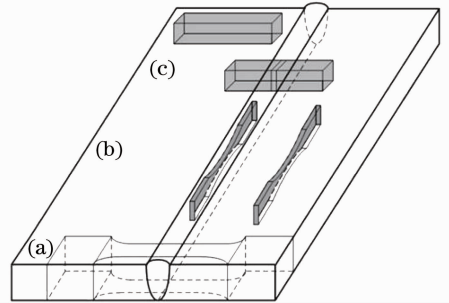


图 1 拉伸、冲击试样取样位置示意图。(a)焊接接头拉伸试样;(b)焊缝金属、母材拉伸试样;(c)焊缝金属、母材冲击试样

Fig. 1 Schematic diagram of tensile and impact specimen location. (a) Tensile specimen of welded joint; (b) tensile specimen of weld and base metal; (c) impact specimen of weld and base metal

3 试验结果与分析

通过大量工艺试验,对 16 mm 厚 11CrNi3MnMoV 低合金高强钢,优化了激光-MAG 复合四层焊的工艺参数,包括电弧电流 I 、电压 U 、激光功率 P 、热源间距 D 、距试件表面离焦量 Δf 和焊接速度 v (表 2),以及采用 Y 型坡口(图 2),获得了成型良好的焊接接头(图 3)。在此基础上,对复

表 2 复合焊接工艺参数

Table 2 Hybrid welding process parameters

	I / A	U / V	P / W	D / mm	$\Delta f / mm$	$v / (mm/min)$
First layer	280	32	2850	3	-14	600
Second layer	280	32	2850	3	-10	600
Third layer	280	32	2850	3	-6	600
Fourth layer	280	32	2850	3	-2	500

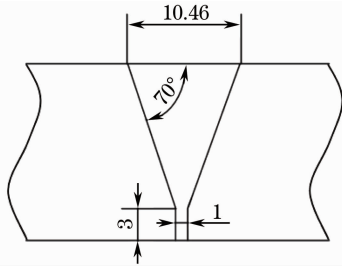


图 2 焊接试样坡口形式

Fig. 2 Groove of welded specimen

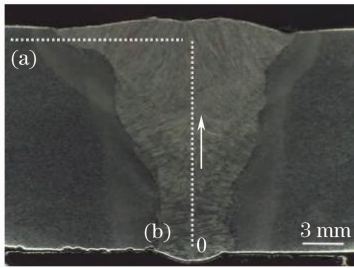


图 3 多层复合焊接接头宏观形貌。(a)表层焊缝硬度测量位置;(b)焊缝中心线硬度测量位置

Fig. 3 Macro-morphology of multi layer welded. (a) Location of hardness measurement of the top weld; (b) location of hardness measurement of the center weld

3.1 硬 度

利用维氏硬度计分别对焊缝表层和焊缝中心线进行硬度试验,测量位置如图 3(a)和(b)所示。焊缝表层硬度试验结果[图 4(a)]表明,母材(BM)和焊缝(WM)的硬度分别为 250 和 285 HV,热影响区(HAZ)硬度最大,达到 325 HV。焊缝中心线硬度试验结果[图 4(b)]表明,焊缝根部(0~4 mm)硬度为 305 HV,比其他位置(4~16 mm)硬度高 20 HV。由于激光复合多层焊打底层能够填充 7 mm 的焊缝高度,横截面为“高脚杯”状,其下半部分(0~4 mm)主要由激光作用,焊缝根部热循环为急热急冷,组织主要为针状铁素体,还存在一定量的粒状贝氏体和淬火马氏体[图 5(a)],由于马氏体的存在,导致组织淬硬。焊缝填充层受激光和电弧共同作用,组织为针状铁素体及少量下贝氏体,马氏体含量明显少于根部[图 5(b)],而焊缝二次重熔和多次热循环对焊缝根部的影响较小,因此焊缝根部硬度高于焊缝中心线其他位置。

3.2 拉伸性能

对焊接接头整体进行拉伸试验的取样位置如图 1(a)所示,为了保证试验的可靠性,每组共进行 3 次试验,并取平均值。结果表明,所有试样均断裂于母材,平均屈服强度和抗拉强度分别为 691.7 和

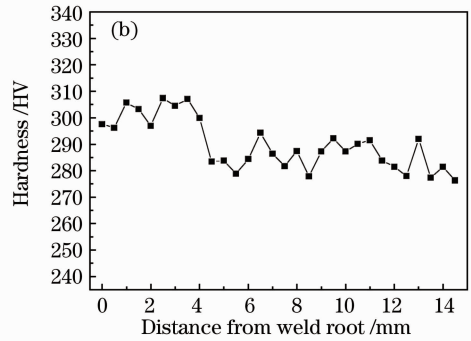
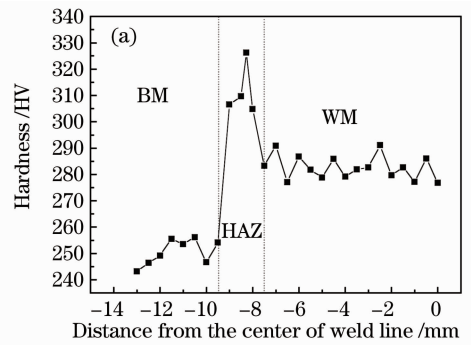


图 4 焊接接头硬度。(a)焊缝表层硬度;(b)焊缝中心线硬度

Fig. 4 Hardness of welded joint. (a) Hardness of the top weld; (b) hardness of the center weld

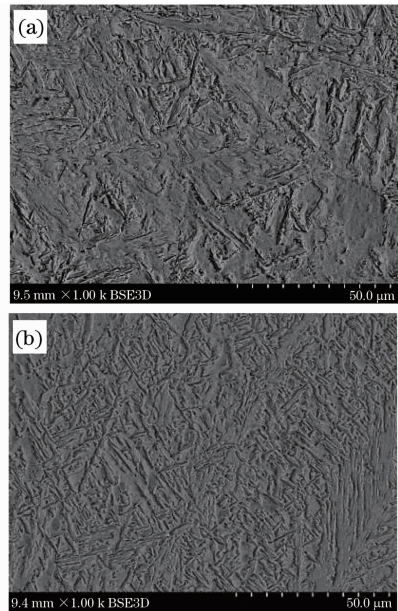


图 5 焊缝组织。(a)根部;(b)中部

Fig. 5 Microstructure of weld. (a) Root zone; (b) middle zone

720 MPa,试样断裂位置及其形貌如图 6 所示。图 7 为扫描电镜(SEM)下焊接接头断口宏观形貌,从断口宏观形貌中可以看出,断口出现了颈缩、纤维区和剪切唇区,这是韧性断裂的典型特征。

由于焊接接头拉伸试样断裂于母材,为了进一

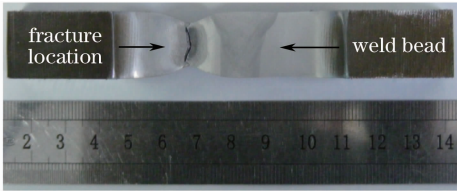


图 6 拉伸试样断裂位置

Fig. 6 Fracture location of tensile specimen

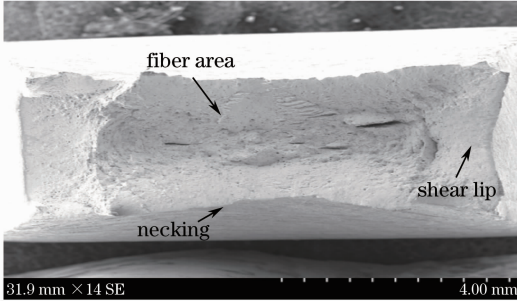


图 7 拉伸试样断口宏观形貌

Fig. 7 Fracture morphology of tensile specimen

步比较焊缝金属和母材的强度,因此分别对其拉伸性能进行了分析,取样位置如图 1(b)所示。图 8 为焊缝金属和母材拉伸试验的应力应变曲线。结果表明,母材平均屈服强度和抗拉强度分别为 625 和 721 MPa,焊缝平均屈服强度和抗拉强度分别为 636 和 817 MPa,其抗拉强度比母材高 13%,焊缝和母材断后延伸率分别为 17%和 28%。

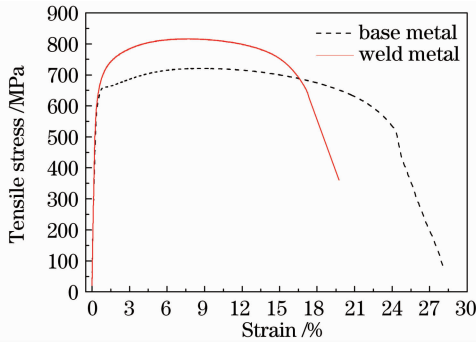


图 8 拉伸试样的应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain relationship of tensile specimen

图 9(a)和(b)分别为焊缝金属和母材拉伸断口微观形貌。结果表明,焊缝断口韧窝相对细小均匀,韧窝中弥散着大量的第二相粒子,表明焊缝的抗变形能力较强。而母材中粗大和细小的韧窝存在,粗大韧窝明显多于焊缝,表明母材的塑性较好,变形能力强。因此,焊缝抗拉强度高于母材,而其塑性低于母材,这与拉伸性能测试相吻合。

3.3 冲击性能

冲击性能试验取样位置如图 1(c)所示,每组温度同样进行 3 次试验,并取平均值,母材和焊接接头

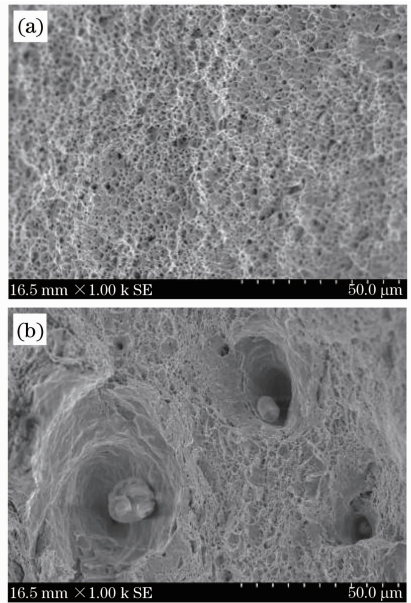


图 9 焊缝(a)和母材(b)的断口微观形貌

Fig. 9 Fracture morphology of (a) weld and

(b) base metal

冲击性能如图 10 所示。结果表明,母材冲击韧性相当稳定,随着温度的降低,冲击功均保持在 160 J。而焊接接头冲击功随着温度降低而减小,当温度降至 -40 °C 左右时发生延-脆性转变,20 °C 和 -80 °C 时冲击功分别为母材的 75%和 43%。

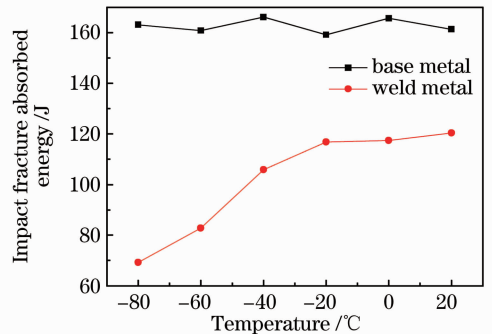


图 10 母材和焊接接头冲击性能曲线

Fig. 10 Impact toughness of specimens

焊缝和母材不同温度下的冲击断口宏观形貌如图 11 所示,焊缝断口随温度的降低,脆性断裂区逐渐增大,如图 11(c)B 区域所示,-40 °C 以下为脆性断裂。母材断口随温度的降低,韧性断口无明显变化,一边为断裂起始区,三边存在剪切唇,纤维平行于起始断裂面,排列成行,试件未完全冲断,如图 11(e)和(f)所示。焊缝断口微观形貌区别明显,韧性断裂区存在大量的韧窝和第二相粒子如图 12(a)所示,而脆性断裂区为解理断裂,河流花样显著,如图 12(b)所示。

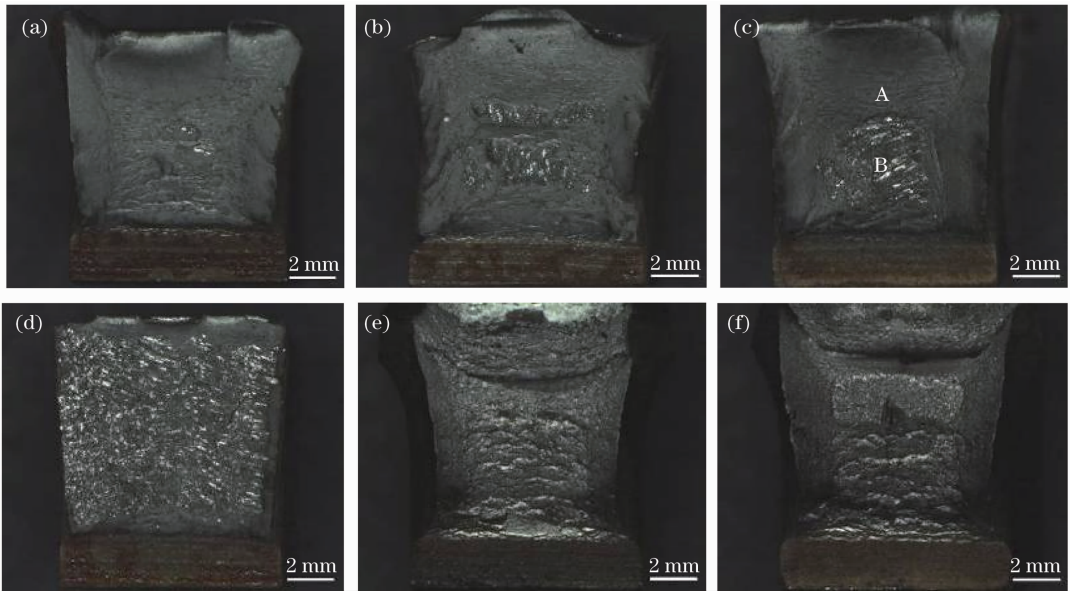


图 11 不同温度下焊缝及母材断口的宏观形貌。焊缝断口:(a) 20 °C;(b) -20 °C;(c) -40 °C;(d) -80 °C;
母材断口:(e) 20 °C;(f) -80 °C

Fig. 11 Macro fracture morphology of impact specimen at different temperatures. Weld: (a) 20 °C; (b) -20 °C;
(c) -40 °C; (d) -80 °C; base metal: (e) 20 °C; (f) -80 °C

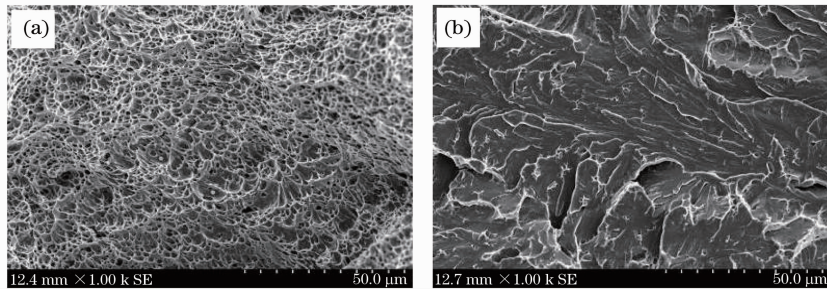


图 12 -40 °C 焊缝冲击断口微观形貌。(a) 韧性断裂区(A 区);(b) 脆性断裂区(B 区)

Fig. 12 Fracture morphology of impact specimen at -40 °C (the weld metal). (a) Ductile fracture zone (A zone);
(b) brittle fracture zone (B zone)

对于焊缝金属出现延-脆性转变温度的原因是:宏观上其断裂强度和屈服强度与温度有关系,随着温度的降低,屈服强度升高,断裂强度保持不变。在延-脆性转变温度以下,焊缝的屈服强度比断裂强度大,因此焊缝在受力时还未发生屈服便断裂了,显示为脆性。从微观上看,金属在塑性变形时主要依靠位错运动来完成的,而低温脆性与位错在晶体点阵中运动的阻力有关,如果阻力增大,则屈服强度也相应增加。通过透射电镜(TEM)分析发现,由于高强钢母材经过调制处理,使其位错密度明显低于焊缝,低温时更容易发生屈服,因此母材延-脆性转变温度较焊缝降低很多,如图 13 所示。

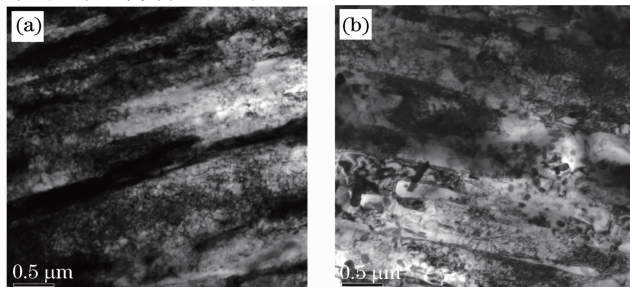


图 13 TEM 形貌。(a) 焊缝;(b) 母材

Fig. 13 Morphology of TEM. (a) Weld; (b) base metal

4 结 论

1) 对于 16 mm 厚 11CrNi3MnMoV 低合金高强度钢采用激光-MAG 复合四层焊接,通过优化激光与电弧能量匹配($P=2850\text{ W}$, $I=280\text{ A}$, $U=32\text{ V}$)及改进坡口形式等手段,能够获得成型良好的焊接接头。

2) 焊接接头拉伸试样断裂于母材,焊缝和母材平均抗拉强度分别为 817 和 721 MPa,焊缝和母材断后延伸率分别为 17%和 28%。焊缝断口韧窝相对细小均匀,而母材断口的粗大韧窝明显多于焊缝,表明焊缝强度较高,而母材韧性好。

3) 冲击试验焊缝断口主要存在两个区域,韧性断裂区和脆性断裂区,而母材只存在韧性断裂区。母材冲击韧性相当稳定,随着温度的降低,冲击功均保持在 160 J,而焊接接头冲击功随着温度降低而减小,当温度降为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时发生延-脆性转变,位错密度是影响延-脆性转变温度的主要因素之一。

4) 母材和焊缝的硬度分别为 250 和 285 HV,热影响区硬度最大,达到 325 HV。由于焊缝根部主要由激光作用,淬火马氏体多于焊缝填充层,而焊缝二次重熔和多次热循环对根部的影响较小,因此其硬度高于焊缝中心线其他位置。

参 考 文 献

1 Zhang Tao, Hou Huaxing, Ma Yupu *et al.*. Development of HQ590DB heavy plate of super-low carbon bainite steel[J]. *Angang Technology*, 2005, (2): 27~30
张涛,侯华兴,马玉璞等. 超低碳贝氏体钢 HQ590DB 厚板的开发[J]. 鞍钢技术, 2005, (2): 27~30

2 A. K. Lis, J. Lis, L. Jeziorshi. Advanced ultra-low carbon bainitic steels with high toughness[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, **64**(1): 255~266
3 Li Yaling, Huang Jian, Gao Zhiguo *et al.*. Structure and properties of high power laser welding of high strength steel B450LAD for vehicles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 2047~2051
李亚玲,黄坚,高志国等. 高功率激光焊接汽车用高强度钢 B450LAD 组织与性能[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 2047~2051
4 Xu Pingguang, Bai Bingzhe, Fang Hongsheng. Current status and development of high strength low alloy steel plate[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2001, **25**(2): 2~6
徐平光,白秉哲,方鸿生. 高强度低合金中厚钢板的现状与发展[J]. 机械工程材料, 2001, **25**(2): 2~6
5 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1680~1685
肖荣诗,吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1680~1685
6 Lei Zhenglong, Chen Yanbin, Song Guoxiang *et al.*. Weld appearance of CO₂ laser-gas metal arc hybrid welding for ultra-low carbon bainitic steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3068~3073
雷正龙,陈彦宾,宋国祥等. 超低碳贝氏体钢 CO₂ 激光-气体金属弧焊复合焊接成形特性[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 3068~3073
7 G. Tani, G. Campana, A. Fortunato *et al.*. The influence of shielding gas in hybrid laser-MIG welding[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8050~8053
8 Zhu Xiaoming, Cai Yan, Wu Yixiong. Research on laser-arc hybrid welding process of thick ship plates[J]. *Hot Working Technology*, 2009, **38**(21): 122~125
朱晓明,蔡艳,吴毅雄. 大厚度船用高强度钢激光-电弧复合焊接技术研究[J]. 热加工工艺, 2009, **38**(21): 122~125
9 S. Webster, J. K. Kristensen, D. Petring. Joining of thick section steels using hybrid laser welding[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2008, **35**(7): 496~504
10 Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Yan Jun *et al.*. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel[J]. *Appl. Surf. Science*, 2008, **254**(18): 5715~5721