

# 车用超高强钢 22MnB5 及 22MnB5-Q235 光纤激光焊接接头组织及性能的研究

贾进<sup>1</sup> 杨尚磊<sup>1,2</sup> 倪维源<sup>1</sup> 白建颖<sup>1</sup> 丁波<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620  
<sup>2</sup> 上海工程技术大学高强激光智能加工装备关键技术产学研开发中心, 上海 201620)

**摘要** 为了提高车用超高强钢激光焊接技术的发展,采用光纤激光器对 1.9 mm 厚的 22MnB5 钢板进行激光对焊以及 22MnB5 与 Q235 钢板的激光拼焊。研究了激光焊接接头的微观组织、硬度以及拉伸性能的变化,分析了焊接速度对接头组织、性能的影响。结果表明,22MnB5 钢焊缝组织主要是板条马氏体,22MnB5 热影响区可分为完全淬火区、不完全淬火区和回火区,而 Q235 热影响区不存在回火区。焊接接头硬度分布不均匀,在焊缝边缘硬度最高。热影响区很窄,硬度急剧下降,22MnB5 热影响区存在严重的软化区,最低硬度仅为 319.6 HV, Q235 热影响区不存在软化区。随着焊接速度的增加,焊缝组织变得细小,马氏体含量增多,当焊速达到 5 m/min 时,22MnB5 焊缝最高硬度达到 544.2 HV。在垂直于焊缝的负载下,焊接速度为 3~5 m/min 时,22MnB5 拉伸试样均断裂在热影响区,塑性较差,断后延伸率仅为 2% 左右,而母材的断后延伸率却达到了 8.9%。

**关键词** 激光技术; 超高强钢; 22MnB5; 激光焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1003002

## Microstructure and Properties of Fiber Laser Welded Joints of Motor Ultrahigh-Strength Steel 22MnB5 and 22MnB5-Q235

Jia Jin<sup>1</sup> Yang Shanglei<sup>1,2</sup> Ni Weiyuan<sup>1</sup> Bai Jianying<sup>1</sup> Ding Bo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

<sup>2</sup> Shanghai Key Technology Development Center of High Intelligent Laser Processing and Equipment Production, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract** To accelerate the development of the laser welding technology of advanced high strength steel (AHSS), similar butt welding of 1.9 mm thick 22MnB5 and dissimilar tailored blank welding of 22MnB5 and Q235 are performed by using a fiber laser. The microstructure, hardness and tensile properties of weld joints are analyzed after the fiber laser welding (FLW). The results show that the microstructure of weld zone (WZ) mainly contains lathy martensite. Heat affected zone (HAZ) in 22MnB5 can be divided into three parts: quenched zone, incomplete quenched zone and tempered zone, and the last one is absent in Q235. The hardness distribution of weld joints is non-uniform, and the weld edge has the highest hardness. HAZ is very narrow and a soft zone exists in the 22MnB5 HAZ with the lowest hardness of 319.6 HV, while there is no soft zone in Q235. With the increase of welding speed, the martensite in WZ becomes finer, leading to the increasing of hardness. When the welding speed is 5 m/min, the highest hardness of the WZ attains 544.2 HV which is the highest of all the samples. The 22MnB5 samples for tensile test which are welded at the speed from 3 to 5 m/min are all broken in HAZ, and the elongation at break is only about 2%, which is obviously worse than that of base metal (8.9%).

**Key words** laser technology; ultrahigh-strength steel; 22MnB5 steel; laser welding; microstructure; mechanical property

**OCIS codes** 140.3390; 160.3900; 180.5810; 350.3390

收稿日期: 2014-03-03; 收到修改稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(51075256)、上海市教育委员会科研创新重点项目(11ZZ177)、上海市激光制造与材料改性重点实验室(上海交通大学)开放课题(MLPM2012-1)

作者简介: 贾进(1989—),男,硕士研究生,主要从事金属激光焊接技术方面的研究。E-mail: yzjiajin@126.com

导师简介: 杨尚磊(1968—),男,博士,教授,主要从事材料连接及疲劳性能方面的研究。E-mail: yslei@126.com

# 1 引 言

汽车工业的出现已有 120 多年的历史,是我国经济发展的重要支撑部分。我国汽车的产销量在 2009 年突破了 1364 万辆,超越美国成为世界第一大汽车生产国,而预计到 2020 年,我国汽车保有量将超过 2 亿辆<sup>[1]</sup>。随着汽车的普及,生活水平得到了改善,但同时面对油价的上涨以及尾气的过度排放,人们对汽车的节能环保、安全性提出了越来越高的要求。汽车车身轻量化是应对以上问题的重要措施,于是车用先进高强钢(AHSS)得到越来越多的关注和发展。近年来,一种利用热冲压成型技术的超高强硼钢(22MnB5)在汽车行业中被广泛应用在汽车安全构件上,并迅速成为各大汽车公司以及研究机构的关注热点<sup>[2-3]</sup>。

焊接是汽车制造过程中最重要的工序之一,焊接接头的质量对汽车的寿命及可靠性有着关键的影响。激光焊接技术是现代先进的焊接技术,具有能量集中、焊接速度快、深度大、变形小、热影响区小、接头质量好和易于自动化等优点<sup>[4-5]</sup>,正在逐步发展成为焊

接车用高强度钢的主要工艺。早在 20 世纪末激光焊接技术就被运用在汽车工业领域,目前美国三大汽车公司的电阻点焊生产线已有 50%被激光焊接生产线所取代。将先进的激光技术和车用先进高强钢板相结合,将对汽车轻量化、安全性做出极大贡献。董丹阳等<sup>[6-10]</sup>对先进高强钢板的激光焊接接头的组织和性能做了不少研究,但对超高强硼钢的光纤激光焊接的研究还鲜有报道。为此,本文通过光纤激光器对硼钢进行对接深熔焊,对其焊接接头微观组织、显微硬度、拉伸性能进行研究分析,为实际生产以及科学研究提供理论和经验参考。

# 2 试验材料及方法

试验采用阿赛洛生产的超高强热成型硼钢 USIBOR 1500P(22MnB5 steel),表面有 30 μm 厚的 Al-Si 镀层,板材厚度为 1.9 mm,使用状态为淬火态;以及 1.9 mm 厚度的 Q235 镀锌钢板,使用状态为正火态,化学成分如表 1 所示。

表 1 22MnB5 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical component of 22MnB5 steel (mass fraction, %)

	C	Mn	Cr	Si	Mo	Al	Ti	B
22MnB5	0.2~0.25	1.1~1.3	0.15~0.3	≤0.35	≤0.35	0.02~0.06	0.02~0.05	0.002~0.004
Q235	0.14~0.2	0.3~0.65	--	≤0.3	--	--	--	--

采用德国 IPG 公司生产的连有 KUKA 机器人臂手的 YLS-5000 型激光器(最大功率为 5 kW)对钢板进行激光对焊,焊接保护气为 Ar,气流为 25 L/min,试验参数如表 2 所示,激光焊接试验前利用砂纸对钢板进行打磨,去除试样边缘的毛刺及表面氧化膜,再用丙酮乙醇溶液清洗钢板表面。焊

接试验后通过 VHX-600 型超景深光学显微镜和 S3400 型扫描电子显微镜(SEM)观察焊接接头微观组织形貌;采用 HXD-1000 型维式硬度计测量焊接接头的显微硬度;使用 AG-25TA 型材料万能试验机对焊接试样进行拉伸试验,焊接接头以及焊缝拉伸试样示意图如图 1 所示。

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Details of laser welding process parameters

Welding rate / (m/min)	Defocusing amount / mm	Power / kW	Laser wavelength / nm	Spot diameter / mm
3~5	+1	3.5	1070	0.2

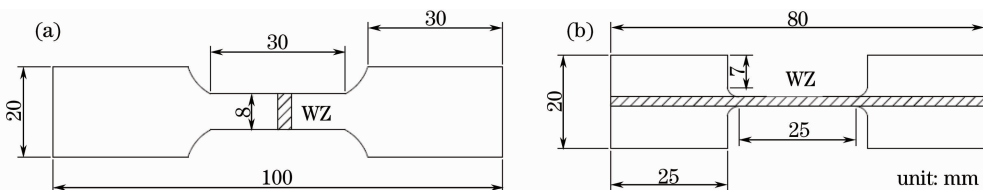


图 1 拉伸试样示意图

Fig. 1 Tensile test specimen for welded joints and weld zone (WZ)

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 显微组织

在表 2 的焊接工艺下,焊速为 3 m/min 时,22MnB5 焊接接头微观形貌如图 2 所示。图 2(a)可以看出,在经过激光焊接后,试样焊接接头显微组织发生了明显变化,由焊缝(WZ)、热影响区(HAZ)、母材(BM)组成,接头无裂纹、气孔等缺陷,由于没有填丝且焊接过程温度过高使焊缝材料略有气化,焊缝表面稍有塌陷。图 2(b)~(d)分别是 22MnB5 激光焊接接头的热影响区、焊缝、母材光学金相微观组织图。由于激光焊接熔池冷却速度极快,且很难测得熔池的即时温度,所以很难直接测得焊接熔池的冷却速度。但是可以根据冷却时间公式

$$t_{T/T_0} = \frac{\rho}{4\pi\lambda^2} \left( \frac{q}{vh} \right)^2 \left[ \frac{1}{(T-t)^2} - \frac{1}{(T_0-t)^2} \right]$$

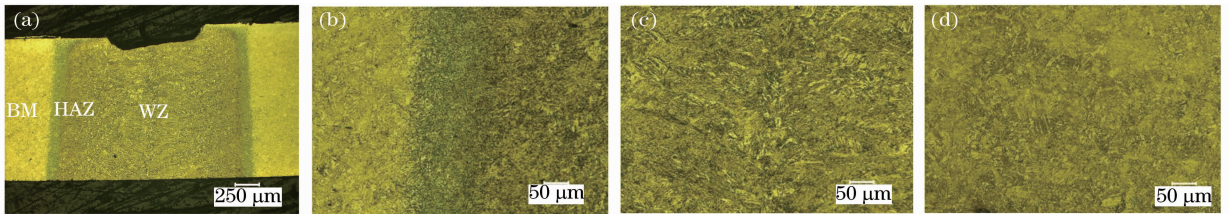


图 2 22MnB5 激光焊接接头光学金相微观组织图。(a) 焊接接头全景图；(b) 热影响区；(c) 焊缝；(d) 母材

Fig. 2 Optical microscopy images showing the microstructure in the welded joints of 22MnB5.

(a) Overall view; (b) HAZ; (c) WZ; (d) BM

图 3 为 22MnB5-Q235 异种钢激光焊接接头显微组织图,无气孔、裂纹等缺陷,焊缝表面也存在轻微凹陷。Q235 母材主要是铁素体和少量珠光体[图 3(d)],晶粒细小组织均匀,由于母材组织不同,所以在激光焊接后,接头两边热影响区也不一样,如图 3(a)所示。在 22MnB5 钢一侧的热影响区颜色形貌均和与之对应的图 2 中 22MnB5 焊接接头中热影响

间接地代替冷却速度结合连续冷却曲线(CCT)分析焊缝最终组织类型<sup>[11-12]</sup>,在本文试验焊接工艺条件下算得  $t_{9/4} = 1.3$  s,远快于 22MnB5 钢在 CCT 曲线中马氏体临界转变速度所需冷却速度<sup>[13]</sup>,所以焊缝为马氏体组织,且组织晶粒粗大,如图 2(c)所示。焊缝在熔池凝固发生 A→M 转变时,马氏体相首先在奥氏体晶界处形核,由于金属含碳量少,初生马氏体细小并向晶内呈列状生长,所以最终生成的马氏体呈现长条状<sup>[14]</sup>。如图 2(d)所示,22MnB5 母材主要为马氏体组织,马氏体形貌为板条状,组织细小均匀。图 2(c)中,组织在热影响区处颜色与形状发生明显变化,与母材和焊缝明显不同。

区颜色形貌相似,而在 Q235 钢一侧的热影响区与 22MnB5 一侧明显不同,热影响区颜色变浅很多,与母材很相似,组织较焊缝发生明显改变[图 3(b)]。如图 3(c)所示,异种钢焊接接头的焊缝组织也主要为板条马氏体,组织均匀,焊缝结合良好,这表明合金元素的含量对于异种钢材激光焊接的融合无显著影响。

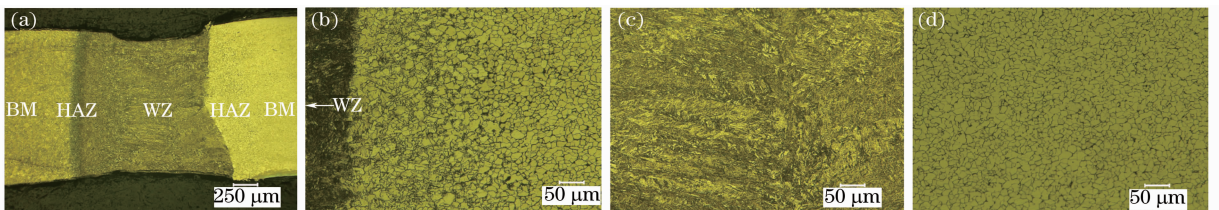


图 3 22MnB5-Q235 激光焊接接头光学金相微观组织图。(a) 焊接接头全景图；(b) Q235 钢一侧的热影响区；

(c) 焊缝；(d) Q235 母材

Fig. 3 Optical microscopy images showing the microstructure in the welded joints of 22MnB5-Q235.

(a) Overall view; (b) HAZ on the Q235 side; (c) WZ; (d) Q235 BM

图 4 为 22MnB5 与 Q235 钢热影响区组织扫描电子显微镜微观组织分析图,由于焊接接头上各点到焊接热源的距离不同,因此所经历的热循环也不一样,这就使得热影响区中出现了不同的微观组织

与形貌。如图 4(a)所示,22MnB5 钢热影响区可分为三部分:内部淬火区、中部不完全淬火区、外部回火区。在淬火区[图 4(b)],由于焊接过程中该区域加热温度超过了  $A_{c3}$ ,使得原始组织完全奥氏体化,

所以淬火区组织依然以板条马氏体为主;在不完全淬火区[图 4(c)],焊接时温度维持在  $Ac_1 \sim Ac_3$  之间,使得只有部分原始组织奥氏体化,而另一部分马氏体组织转化为铁素体,最终得到马氏体和铁素体组织;而在回火区[图 4(d)],焊接过程中,该区域温度一直低于  $Ac_1$ ,没有达到奥氏体化温度,但是该试验所用超高强热成型硼钢在焊前经过淬火处理,所以大量原始马氏体发生了回火,得到了回火马氏体、原始马氏体和铁素体组织。而 Q235 钢原始组织为正火态,不含有马氏体,在  $Ac_1$  温度以下不发生任

何相变,所以其热影响区不存在回火区,只包含内部近缝区和外部两相区[图 4(e)]。在近缝区[图 4(f)],主要为铁素体和针状贝氏体;在两相区[图 4(g)],原珠光体和铁素体组织的加热温度较低,在  $Ac_1 \sim Ac_3$  间,这一区域在焊接热循环作用下,原始组织发生不完全奥氏体化和重结晶,且 Q235 淬透性不好,使得焊后得到的主要组织与母材类似。因此,在激光焊接过程中,由于焊接接头的不同位置经受的焊接热循环不同,其微观组织形貌也有所不同,进而带来焊接接头力学性能的改变<sup>[15]</sup>。

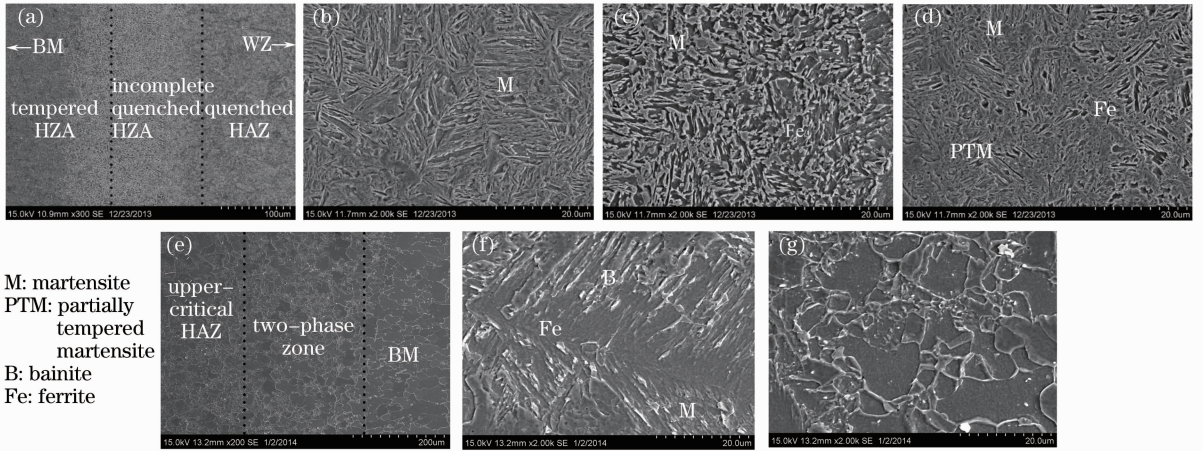


图 4 22MnB5 和 Q235 热影响区 SEM 微观组织分析图。(a) 22MnB5 热影响区全景图; (b) 淬火区; (c) 不完全淬火区; (d) 回火区; (e) Q235 热影响区全景图; (f) 近缝区; (g) 两相区

Fig. 4 SEM micrographs showing the microstructure of HAZ in welded joint. (a) Overall view of the 22MnB5 HAZ; (b) quenched zone; (c) incomplete quenched zone; (d) tempered zone; (e) overall view of the Q235 HAZ; (f) upper-critical HAZ; (g) two-phase zone

### 3.2 显微硬度

图 7 为不同焊接速度下 22MnB5 钢接头硬度分布,由图 7 可知接头硬度分布不均匀,最高硬度均出现在焊缝处,这是由于激光焊接冷却速度极快,熔池凝固时发生了  $A \rightarrow M$  的转变,产生冷硬度极高的马氏体组织。从焊缝向热影响区过渡时,硬度往往会稍有提升,这是因为焊缝边缘的冷却速度要高于焊缝中心,形成的马氏体短而细小[比较图 5(a)和 4(b)],所以硬度值偏高,但是由于都为马氏体组

织,所以硬度虽然有所上升但幅度并不大<sup>[15]</sup>。从热影响区向母材过渡时,硬度迅速下降,到达最低点后又快速上升,直到母材位置时才趋于平缓。这表明在热影响区存在软化区,硬度下降非常明显,最低硬度仅为母材的 63%。因为激光焊接的热影响区的尺寸很小,且由于距离焊接热源越远该区域热循环的最高温度越低,冷却速度也相应降低,导致马氏体产量也会迅速降低,因此硬度值出现骤降,且 22MnB5 钢的母材组织为马氏体,其外侧热影响区

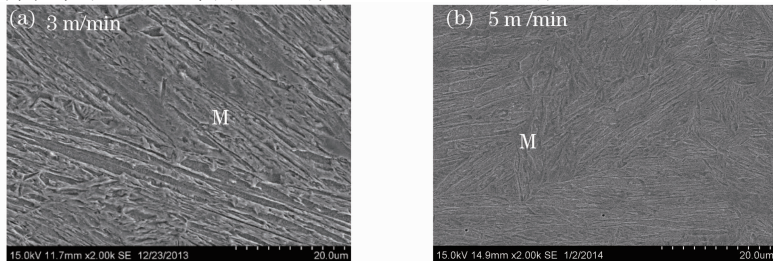


图 5 不同焊速下焊缝 SEM 微观组织分析图

Fig. 5 Microstructure of the 22MnB5 WZ at different welding speeds

会发生回火,使得原始马氏体组织回火转变为回火马氏体和铁素体,硬度降低,出现软化区。22MnB5 钢母材硬度很高,造成大部分热影响区硬度都比母材要低,所以大部分热影响区都可称为“软化区”,使得软化区的范围较大。该软化区的存在使得其对焊接接头拉伸性能的影响也更值得注意。

由接头的硬度分布也可以看出,焊缝和热影响区的宽度均随着焊接速度的增加而逐渐变窄。焊缝硬度值随着焊接速度的增加而升高,且硬度值变化加快。这是因为焊接速度增加时,焊接热输入降低,导致金属吸收的热量减少,所以焊缝和热影响区面积也减小。同时,由于随着焊接速度的升高,焊接热循环时间变短,焊接接头冷却速度增加,使焊缝组织变得更加细小,板条马氏体含量增多,如图 5 所示,也同样使得热影响区马氏体含量增多,而且降低了马氏体的回火程度,进而降低了热影响区的软化程度。所以在焊接速度为 5 m/min 时焊缝拥有最高硬度 544.2 HV(图 6)。焊速为 5 m/min 时软化区最低硬度为 343.2 HV,4 m/min 时最低硬度为 330.1 HV,3 m/min 时则仅为 319.6 HV。

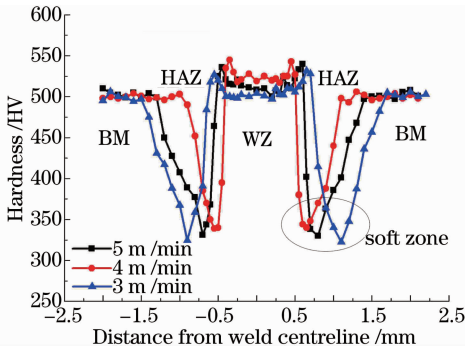


图 6 22MnB5 焊接接头硬度分布

Fig. 6 Microhardness distribution of the 22MnB5 welded joints

图 7 为焊速为 3 m/min 时 22MnB5-Q235、22MnB5 和 Q235 钢焊接接头硬度分布,硬度分布都不均匀。最高硬度依然出现在焊缝,但是 22MnB5 一侧的焊缝硬度明显高于 Q235 一侧的焊缝硬度,这是由于激光焊接冷却速度极快,合金元素没有来得及在焊缝中完全均匀分布,碳含量、合金元素含量高的 22MnB5 一侧淬透、淬硬性更好,使得其硬度高于淬硬性低的 Q235 钢一侧的焊缝硬度。但是,虽然 Q235 一侧的焊缝硬度要低于 22MnB5 一侧焊缝硬度,但是相对于 Q235 同种焊接接头焊缝硬度,要高出很多,这种钢板进行激光拼焊时,焊缝组织、元素混合良好,没有不良缺陷产生,对于焊缝硬度的影响很明显。且异种钢焊接接头热影响区

和与之对应的同种钢焊接接头的热影响区宽度、硬度值和趋势基本一致,并未受到明显影响。

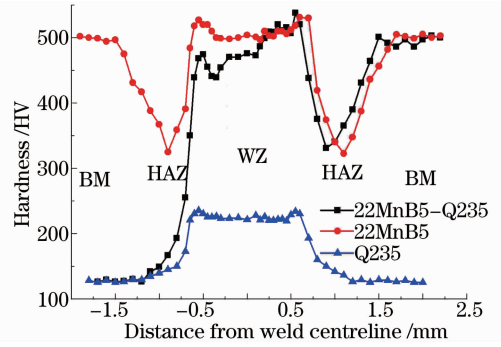


图 7 22MnB5、Q235 以及 22MnB5-Q235 焊接接头在焊接速度为 3 m/min 时的显微硬度分布

Fig. 7 Comparison of hardness for the 22MnB5, Q235 and 22MnB5-Q235 welded joints at a welding speed of 3 m/min

### 3.3 拉伸性能

22MnB5 拉伸试验结果如表 3 所示,由于母材是淬火态,组织为板条马氏体,所以其抗拉强度达到了 1610.2 MPa。焊后的拉伸试样均断在热影响区处,如图 8 所示,这是因为热影响区组织马氏体含量减少,铁素体含量增加,且存在软化区,原始马氏体发生大量回火,使得该区域强硬度比其他部分薄弱。而且由于本身强硬度很高,使得大部分热影响区都成为了 22MnB5 激光焊接接头的薄弱环节,而热影响区中的回火区更能被称作薄弱区中的“危险区”,造成了此钢种激光焊接接头的薄弱区所占比例较大,所以相对于接头其他部分更容易遭到破坏。虽然焊缝中的马氏体相对于热影响区和母材中的粗大,但是根据图 1 中的拉伸试样可以测得 22MnB5 焊缝的强度为 1412.2 MPa,高于热影响区的强度 1219.1 MPa,这更能说明试样断在热影响区处的原因。由于母材与接头均含有大量脆硬相马氏体,使得 22MnB5 的断后无明显颈缩现象发生,断后延伸率小,母材为 8.9%,而焊接接头由于组织比母材粗

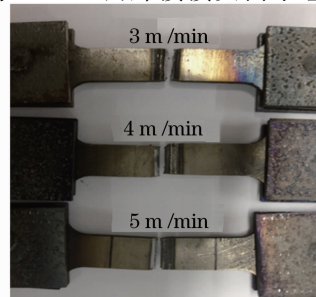


图 8 22MnB5 焊接接头拉伸断裂试样

Fig. 8 Fractured specimens of 22MnB5 welded joints

大、分布不均匀,延伸率仅为 2%左右。随着焊速的增加试样断后延伸率稍微有所提高,这是因为焊速越高,试样焊接接头组织越细小,塑韧相残余奥氏体会有所增多,这对材料塑韧性的提高均有帮助<sup>[16]</sup>。

虽然焊速提高造成回火区铁素体含量的减少,但是试样断后延伸率是由焊缝、热影响区和母材共同决定的,回火区只是其中一小部分,所以回火区对整个接头的延伸率影响很小。

表 3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tensile test

No.	Type	Tensile strength /MPa	Elongation /%	Fracture site	Occurrence of necking
1	22MnB5(BM)	1610.2	8.9	—	Not clear
2	3 m/min	1241.9	1.7	HAZ	No
3	4 m/min	1285.3	1.8	HAZ	No
4	5 m/min	1299	2.1	HAZ	No
5	Q235(BM)	391.7	28	—	Yes
6	22MnB5-Q235	397.1	22	Q235(BM)	Yes

Q235 与 22MnB5 情况恰恰相反,该钢种拉伸试验均断在母材,且抗拉强度比 22MnB5 小得多,仅有 391.7 MPa,但是由于母材中含有大量的细小且均匀分布的塑韧相铁素体,其断后延伸率达到 28%。22MnB5-Q235 异种钢焊接接头拉伸试样均断在了强度较低的 Q235 母材,且断后延伸率仅为 22%,这是由于 22MnB5 延伸率明显低于 Q235,而强度却远远大于 Q235,这造成了整个试样的塑性变形基本发生在 Q235 一侧,而 22MnB5 一侧钢板几乎无任何塑性变形,使该拉伸试样的断后延伸率有所下降。

526.4 HV 提高到 544.2 HV,软化区最低硬度由 319.6 HV 提高到 336.7 HV。

5) 由于软化区的存在,焊后拉伸试样均断在热影响区,强度在 1200~1300 MPa,断后延伸率很小,仅为 2%左右。

参 考 文 献

4 结 论

1) 采用光纤激光可实现 22MnB5 钢板对接深熔焊接以及 22MnB5-Q235 钢板的激光拼焊,焊接接头无明显气孔、裂纹等缺陷,焊接质量良好。

- 1 Xu Ruilin, Zhu Pinchao, Yu Chengzai, *et al.*. Present situation and development trends of welding technologies for B. I. W[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(50): 1-18.
- 2 H Karbasian, A E Tekkaya. A review on hot stamping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15): 2103-2118.
- 3 A Turetta, S Bruschi, A Ghiotti. Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1): 396-400.
- 4 X Cao, M Jahazi. Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd:YAG laser[J]. Opt & Lasers in Eng, 2009, 47(11): 1231-1241.
- 5 Yu Sibin. Research on Laser Welded Joint Weld Ability of Ultra-High Strength Steel[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- 6 Dong Danyang, Wang Guanjun, Ma Min, *et al.*. Study on microstructure and properties of laser welding dual phase steel joints for an auto-body[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0903002.
- 7 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.
- 8 Lu Bingbing. Analysis and optimization for auto roof to body-side laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1375-1379.
- 9 W Xu, D Westerbaan, S S Nayak, *et al.*. Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints[J]. Materials and Design, 2013, 439(11): 373-383.

2) 光纤激光焊接焊后冷却速度极快,22MnB5 和 22MnB5-Q235 焊缝以及热影响区宽度很窄,焊缝以板条马氏体为主;22MnB5 的热影响区可分为淬火区、不完全淬火区、回火区,而 Q235 的热影响区只有近缝区和两相区(无回火发生)。

3) 22MnB5 焊接接头硬度分布不均匀,最大硬度出现在焊缝边缘,在热影响区硬度发生骤降且出现软化区,过渡到母材时硬度又迅速回升,母材硬度稍低于焊缝;22MnB5-Q235 焊接接头焊缝在 22MnB5 一侧硬度要明显高于 Q235 一侧,Q235 的热影响区不存在软化区。

4) 随着焊速的提高,焊接热输入降低,冷却速度加快,导致焊缝、热影响区的宽度减小,组织变细小,马氏体含量增多,使得焊接接头的硬度提高,焊速从 3 m/min 提高到 5 m/min 时,焊缝最高硬度由

- 10 N Farabi, D L Chen, Y Zhou. Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(3): 982—989.
- 11 A Sullivan, J D Robson. Microstructural properties of friction stir welded and post-weld heat-treated 7449 aluminium alloy thick plate[J]. *Materials Science Engineering A*, 2008, 478(1-2): 351—360.
- 12 L Quinto, A Costa, R Miranda, *et al.*. Welding with high power fiber lasers—a preliminary study[J]. *Materials Design*, 2007, 28(4): 1231—1237.
- 13 A Turetta, S Bruschi, A Ghiotti. Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1-3): 396—400.
- 14 Jia Jin, Yang Shanglei, Ni Weiyuan, *et al.*. Study on microstructure and properties of laser welding joints of marine high strength steel E36[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0203002.
- 15 Wang Wenquan, Shang Yangeng, Li Xiujuan, *et al.*. Microstructure and property of laser welded 650 MPa transformation induced plasticity steel sheet[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2012, 42(5): 1203—1207.
- 16 Z Gu, S Yu, L Han, *et al.*. Influence of welding speed on microstructures and properties of ultra-high strength steel sheets in laser welding[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(3): 483—487.

栏目编辑:张浩佳