超高强度钢与低合金钢的激光搭接焊性能

谷诤巍[1], 于思彬[1], 韩立军[2], 孟 佳[1], 徐 虹[1]

(1. 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130022; 2. 一汽大众汽车有限公司 产品管理部, 长春 130042)

摘 要: 采用Yb: YAG激光器对超高强度钢EN10292 TL4225和低合金钢H340LAD进行了激光焊接试验, 分析了不同焊接参数对接头质量的影响。利用光学显微镜观察了接头的微观组织, 并通过硬度测试及拉剪试验对接头的力学性能进行了测试, 最后采用扫描电镜(SEM, HITACHS-4300)对拉伸断口进行了研究。结果表明, 采用优化的焊接参数获得的接头具有良好的接头组织和力学性能, 焊接质量能够满足实际生产中的需要。

关键词: 材料合成与加工工艺; 超高强度钢; 低合金钢; 激光焊接; 全相组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7 **文献标志码**: A **文章编号**: 1671-5497(2012)02-0349-05

Laser lap-welding performance of ultra-high strength steel and micro-alloy steel

GU Zheng-wei[1], YU Si-bin[1], HAN Li-jun[2], MENG Jia[1], XU Hong[1]

(1. *College of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun* 130022, *China*; 2. *Department of Product Management, The FAW-Wolkswagen Automotive Company LTD, Changchun* 130042, *China*)

Abstract: Based on experiments of Yb: YAG laser welding of quenched ultra-high strength steel (UHSS) EN10292TL4225 and micro-alloy steel H340LAD, the effects of welding parameters on welding quality were analyzed. Microstructures of the joints were observed using the laser confocal scanning microscopy. The tensile-shear strength and the hardness distribution of the welded joint were tested, and the microstructure of the fracture surface was analyzed by SEM (HITACHS-4300). The test results showed that the obtained joint using the optimized parameter is characterized by good microstructure and mechanical property, the quality meets the actual need of production.

Key words: materials synthesis and processing technology; ultra-high strength steel; micro-alloy steel; laser welding; microstructure ; mechanical property

超高强度淬火钢板EN10292TL4225屈服强度为1200 MPa, 而其抗拉强度可以达到1500 MPa以上, 是目前强度级别最高的汽车用钢板, 可用于制造抗冲击和碰撞的汽车结构件, 如车内中通道、侧围B柱、车门防撞梁等, 具有很好的应用前景[1-3]。

激光焊接具有聚焦光斑能量密度高、热输入量低、热影响区窄、焊接变形小、速度快、深宽比大[3]等优点被广泛应用于材料焊接领域中。超高强度钢在使用中经常需要与其他成形性能好的材

收稿日期: 2010-09-25.

基金项目: 工信部高档数控机床与基础制造装备科技重大专项项目(2009ZX04014-072-01); 吉林省科技发展计划项目(20080507; 20110301); 吉林大学基本科研业务项目(20090318).

作者简介: 谷诤巍(1970-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 金属板材成形技术. E-mail: gzweii@163.com

通信作者: 徐虹(1972-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 超高强钢冷冲压/热冲压. E-mail: xh@jlu.edu.cn

料搭接焊在一起,但其物理化学性质比较特殊,焊接工艺较难控制。目前还没有这方面的相关文章发表。本文采用激光焊接的方法实现了超高强度钢与低合金钢的优质连接,分析了焊接参数对接头组织及力学性能的影响,为实际生产提供理论依据。

1 试验材料与焊接工艺

1.1 试验材料

试验材料选用超高强度钢淬火钢板 EN10292 TL4225 和低合金钢 H340LAD。超高强度钢是经过热成形加工工艺得到的强度高、性能好的钢板。热成形工艺是高温下(900 ℃,奥氏体化)成形并快速冷却的一种工艺。超高强度钢板的微观组织主要为板条马氏体,试样尺寸为 120 mm×25 mm×1.8 mm。低合金钢的微观组织主要为铁素体和少量的珠光体,试样尺寸为 120 mm×25 mm×1.5 mm。两种材料的化学成分分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 超高强度钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of ultra high strength steel

合金元素	质量分数/%	合金元素	质量分数/%
C	0.22～0.24	Ti	0.02～0.05
Mn	1.20～1.40	Cr	0.11～0.20
Si	0.20～0.30	B	0.002～0.0035
Al	0.20～0.50	Mo	0.1
P	0.02	Ni	0.1
S	0.005		

表 2 低合金钢的化学成分

Table 2 Chemical compositions of micro-alloy steel

合金元素	质量分数/%	合金元素	质量分数/%
C	0.1	P	0.025
Al	0.015	S	0.025
Si	0.5	Tib	0.15
Mn	1.00	Nb	0.09

1.2 接头设计

试验采取搭接的接头形式,板材为两层搭接,如图 1 所示。上板为超高强度钢,下板为低合金钢。为防止焊接过程中试样在热应力的作用下发生错位,焊前应用夹具将试样夹紧。激光搭接焊中试样间隙尤为重要,应控制在 0.1 mm 以内。为减少焊接缺陷,焊接位置处应先用砂纸打磨,去除表面氧化皮,再用丙酮清洗并保持干燥。

1.3 焊接工艺

试验设备采用德国生产的 HL4006D Yb:YAG 激光器,最大功率 4 kW,连续输出模式,波长 1064 nm,最小聚焦光斑直径 0.6 mm。激光焊

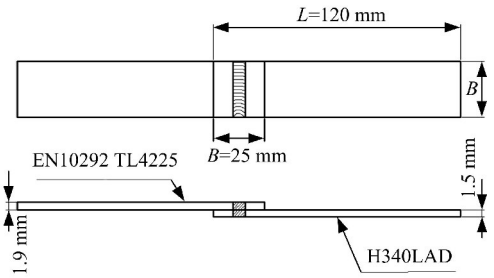


图 1 搭接试样示意图

Fig. 1 Drawing of the laser lap-welding specimen

接中影响焊接质量的主要工艺参数有激光功率、焊接速度和离焦量等。离焦量选取负值时可以获得较大熔深,通常选取为板厚的 1/4～1/3。本试验中离焦量 Δf 选取 −1.1 mm。试验中具体工艺参数如表 3 所示。焊接时激光作用在超高强度钢表面,激光束与试样表面垂直。

焊接结束后,采用激光共焦扫描显微镜对接头横截面的微观组织进行观察,并测量接头的显微硬度,载荷为 1.96 N,保压时间为 5 s。然后在 Zwick-Z100 试验机上对搭接接头进行拉剪试验,拉伸速度为 10 mm/min,并用扫描电镜(SEM,HITACHS-4300)对断口形貌进行观察分析。

表 3 激光焊接工艺参数

Table 3 Parameters of laser welding

试样号	激光功率 P/kW	焊接速度 V/(mm·s^{-1})	离焦量 Δf/mm
1	2.0	25	−1.1
2	2.2	25	−1.1
3	2.4	25	−1.1
4	2.6	25	−1.1
5	2.8	25	−1.1
6	2.6	15	−1.1
7	2.6	20	−1.1
8	2.6	25	−1.1
9	2.6	30	−1.1
10	2.6	35	−1.1

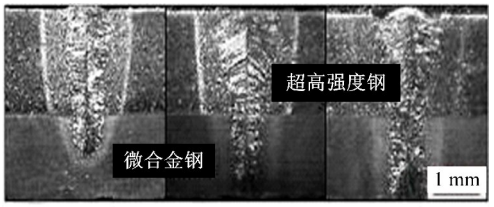
2 试验结果与分析

2.1 焊缝横截面形貌

2.1.1 激光功率对焊缝横截面形貌的影响

观察 1#、3# 和 5# 试样在相同焊接速度和离焦量下,激光功率对焊缝横截面形貌的影响,如图 2 所示。焊缝形貌为典型的匙孔型焊缝,焊接接头各区域分布界限较明显,接头成形良好,没有裂纹、缩孔等内部缺陷。激光功率较小时,焊缝宏观形貌为“V”型,如图 2(a)。当激光功率增大时,焊缝形貌变为“Y”型,此时试样被完全焊透,如图 2(b)(c)。图 3 为焊接速度为 25 mm/s、离焦量为 −1.1 mm 时,激光功率对焊缝熔深和熔宽的影

响。由图 3 可以看出，当激光功率大于 2.4 kW 时，熔深达到了最大值，试样被完全焊透。且随着激光功率的增大，焊缝顶部和底部宽度均有所增加。这是由于激光功率的增大导致单位时间内激光热输入增加，使得更多的金属被熔化，焊缝熔深和熔宽增加。



(a) P=2.0 kW　(b) P=2.4 kW　(c) P=2.8 kW

图 2　不同激光功率下的焊缝横截面形貌

Fig. 2　Cross-sections of beads with different laser power

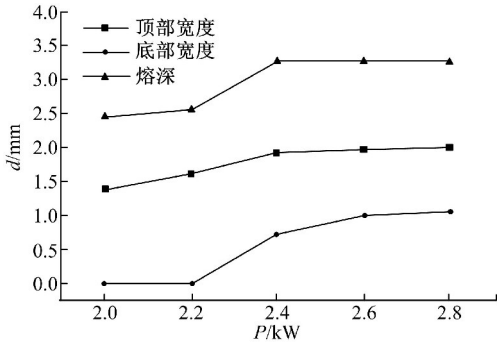


图 3　激光功率对焊缝熔深和熔宽的影响

Fig. 3　Effects of laser power on the depth and width of the weld metal

2.1.2　焊接速度对焊缝横截面形貌的影响

选取 7＃、8＃和 10＃试样观察在相同激光功率和离焦量下，焊接速度对焊缝横截面形貌的影响，如图 4 所示。在焊接速度较低时，试样被完全焊透，当焊接速度达到 35 mm/s 时，试样未能被焊透。图 5 为激光功率为 2.6 kW，离焦量为 −1.1 mm 时焊接速度对焊缝熔深和熔宽的影响。由图 5 可以看出，随着焊接速度的增大，焊缝顶部和底部宽度变小。这是由于焊接速度增大，



(a) V=20 mm/s　(b) V=25 mm/s　(c) V=35 mm/s

图 4　不同焊接速度下的焊缝横截面形貌

Fig. 4　Cross-sections of beads with different welding speed

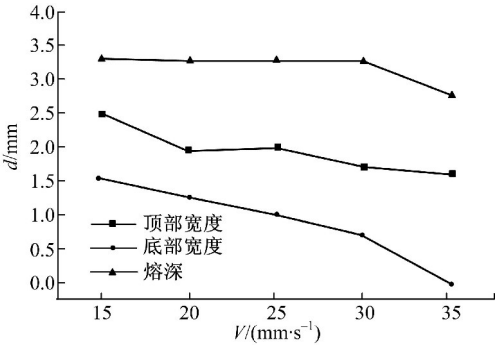


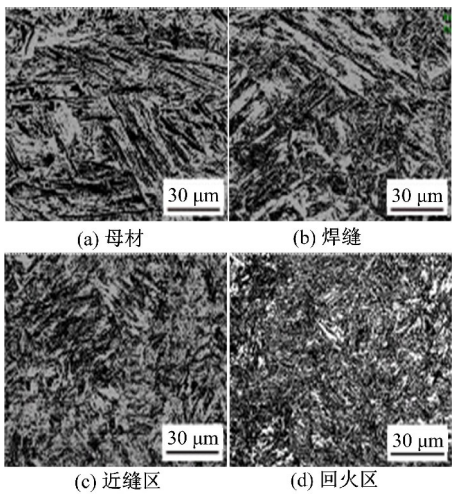
图 5　焊接速度对焊缝熔深和熔宽的影响

Fig. 5　Effects of welding speed on the depth and width of the weld metal

导致激光热输入增加，焊缝熔深和熔宽减小。

2.2　微观组织

图 6 为超高强度钢焊接接头各部分的微观组织。焊接接头包括焊缝、热影响区和母材三部分。母材的微观组织是典型的板条马氏体，如图 6(a)所示。焊缝组织仍为马氏体(如图 6(b))，这是由于激光焊接过程中极高的冷却速度所致。此外，超高强度钢中添加了 B 元素，B 元素的添加可以大大提高金属的淬透性，更容易获得马氏体组织。热影响区(近缝区)组织也为马氏体(如图 6(c))。回火区组织有很大不同(如图 6(d))，此区域中加热温度较低，有部分碳化物析出，并伴随着大量的铁素体生成，组织和性能发生变化。



(a) 母材　(b) 焊缝

(c) 近缝区　(d) 回火区

图 6　超高强度钢的微观组织

Fig. 6　Microstructrures of UHSS

图 7 为低合金钢焊接接头各部分的微观组织。低合金钢母材主要是铁素体。如图 7(a)所示。低合金钢焊缝为马氏体组织，如图 7(b)所示。这同样是由于激光焊接过程中极高的冷却速

度所致。激光焊接时热影响区上各点所经历的焊接热循环不同,出现了不同的组织。热影响区组织从焊缝位置到母材位置晶粒逐渐变细,如图 7(c)(d)所示。

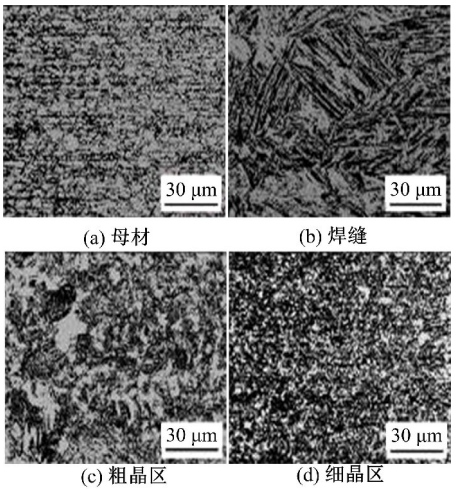


图 7 低合金钢的微观组织

Fig. 7 Microstructrures of micro-alloy steel

2.3 硬度测量

图 8 为焊接接头的硬度分布。超高强度钢和低合金钢焊缝区的硬度值接近,均为 450 HV 左右,比超高强度钢母材硬度略低(约为 480 HV)。这主要是由于一次结晶后形成的马氏体较母材粗大[4],超高强度钢一侧热影响区中硬度先上升然后急剧下降,有明显的软化现象发生,在不完全淬火区硬度值下降最为明显,峰值温度为 Ac_1 附近处硬度值最低。这是由于超高强度钢焊前经过淬火处理,金属在温度为 Ac_1 时发生了回火马氏体中过饱和的碳在晶界析出,马氏体部分转变为铁素体,因而硬度值大大降低。随着临近母材,回火温度降低,软化程度减小,所以硬度值也逐渐升高,直到母材位置不再有明显改变。软化区宽度

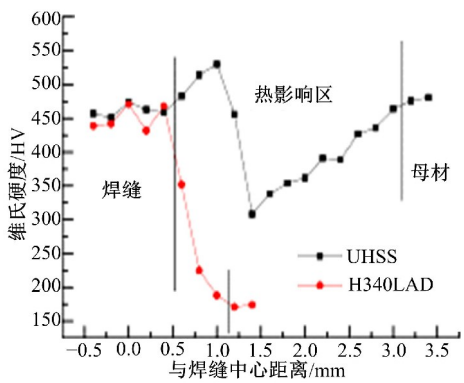


图 8 接头显微硬度

Fig. 8 Hardness distributions of the joint

随着焊接速度的增大而减小。较低的热输入会降低热循环的温度,使母材中的马氏体回火过程进行得不充分。在焊接速度较低时,马氏体中过饱和碳不但析出而且长大,回火过程更完全[5]。低合金钢一侧焊缝处硬度最高,热影响区中硬度逐渐降低,无软化现象发生。

2.4 抗剪试验

抗剪强度是检验搭接接头焊接性能的重要指标。图 9 为激光功率对接头抗剪力的影响。从图 9 可以看出,随着激光功率的增大,接头抗剪力也随之增大。这是由于激光功率的增大使得输入到小孔的能量密度变大,焊接过程更稳定,同时更多的金属被熔化,焊缝金属的结合面积增大,因而其抗剪力有所提高。1#~5#试样全部断裂于接头结合面处。这是因为在剪切过程中,在接头结合面处形成了强烈的应力集中导致断裂。断口表面较平滑,没有发生明显的塑性变形。这是由于激光焊接过程中极高的冷却速度使焊缝获得了马氏体组织。马氏体内部具有极高密度的位错,变形困难[4]。因此,接头抗剪力很高,且断裂后无明显的塑形变形。

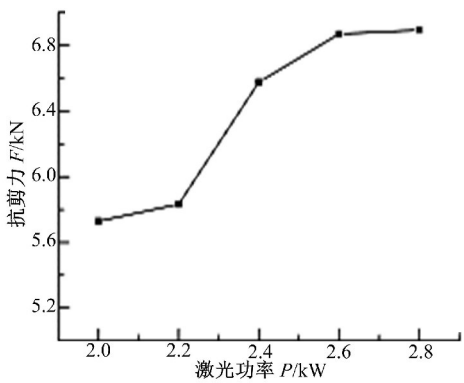


图 9 激光功率对接头抗剪力的影响

Fig. 9 Effect of laser power on the fracture load

图 10 为焊接速度对接头抗剪力的影响。焊接速度为 15 mm/s(6#)时,接头抗剪力最小,仅为 2.72 kN,接头断裂于超高强度钢一侧焊缝处。这是由于超高强度钢一侧热输入过大,金属过度烧损,焊缝组织性能恶化所致。焊接速度大于 20 mm/s 时,随着焊接速度的增大接头抗剪力减小。这是因为随着焊接速度的增大,激光热输入降低,使得焊缝金属的结合面积减小,因此抗剪力减小。此外,熔池金属结晶时,在结晶前沿液体金属的溶质浓度和杂质含量较高,当焊接速度很高时,容易在焊缝中心形成偏析,在应力作用下较易形成裂

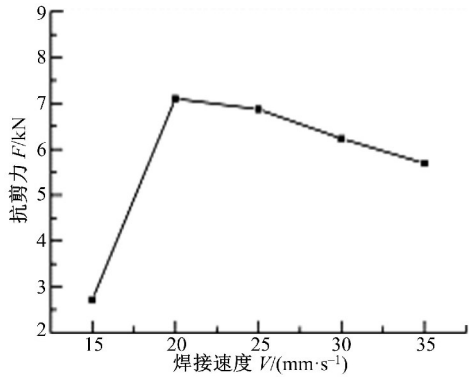


图 10　焊接速度对接头抗剪力的影响

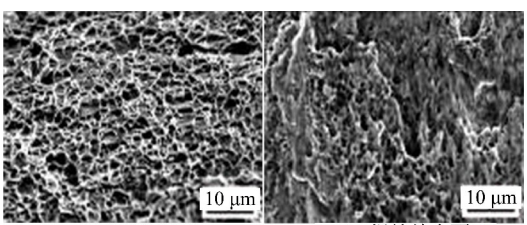
Fig. 10　Effect of welding speed on the fracture load

纹[6]。这同样会使接头在高的焊接速度下抗剪力减小。

6＃试样断裂于超高强度钢一侧焊缝处，7＃试样断裂于低合金钢母材一侧，而 8＃～10＃试样断裂于焊缝接合面处。由此可以看出，7＃试样具有较好的焊接质量，焊缝抗剪力超过低合金钢母材，完全可以满足实际生产需求。

2.5　断口形貌

断裂后的试样用扫描电镜对断口形貌进行分析。图 11 为 7＃和 8＃试样的断口表面形貌。7＃试样断裂于低合金钢母材一侧。由图 11(a)可以看出，断口呈现为典型的韧性断裂特征。韧窝较大而且均匀连续，断口表面具有明显的高低起伏。韧窝的形成是在拉剪过程中，伴随着塑性变形的加剧，试样中心部位形成强烈的应力集中，裂纹在中心部位形核，成为多个显微空洞，然后长大汇合并最终断裂，于是在断口表面留下多个凹坑形的韧窝[7]。低合金钢微观组织主要为塑性较好的铁素体，因为呈现明显的塑性断裂方式。



(a) 低合金钢母材　　(b) 焊缝结合面

图 11　断口微观形貌(SEM)

Fig. 11　SEM microstructures of fractured surfaces

8＃试样断裂于焊缝结合面处。断口表面形貌如图 11(b)所示。断口形貌呈现混合断裂特征。在断口边缘为沿剪切方向拉长的韧窝以及解理小平面。断口中心部分为韧窝形貌，但是此处韧窝较小而且很浅，塑性相比低合金钢母材要差。对于 8＃试样，拉剪过程中焊缝处形成了强烈的应力集中，裂纹首先在焊缝边缘处形核，然后快速扩展到焊缝中心直至断裂。

3　结　论

(1)采用合适的激光焊接参数(激光功率为 2.6 kW，焊接速度为 20 mm/s，离焦量为－1.1 mm)得到的超高强度钢与低合金钢接头质量良好，没有气孔、裂纹等缺陷，接头强度超过低合金钢母材，抗剪强度满足产品设计要求。

(2)超高强度钢和低合金钢焊缝组织均为板条马氏体，热影响区中组织不均匀，晶粒尺寸由焊缝到母材逐渐变小。

(3)超高强度钢和低合金钢的焊缝硬度值接近，比超高强度钢母材略低。在超高强度钢热影响区中有明显的软化现象发生，而低合金钢热影响区中硬度逐渐降低，但略高于母材。

(4)接头抗剪力随焊接热输入增加而增大。低合金钢母材断口为明显的韧性断裂。结合面处断口边缘出现了解理小平面，在断口中心为小而浅的韧窝形貌，断裂方式为混合断裂。

参考文献：

[1] Tae-Kyo HAN. CO_2 laser welding characteristics of 800 MPa class TRIP steel[J]. ISIJ, International 2005,45(1):60-65.

[2] 韩立军 谷诤巍 张正林. 超高强淬火钢板中频点焊接头组织与断口形貌[J]. 焊接学报，2010,31(4):101-104.
Han Li-jun, Gu Zheng-wei, Zhang Zheng-lin. Microstructure and fracture surface of spot welded joint of ultra high strength steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010,31(4):101-104.

[3] Wu Qiang, Gong Jin-ke, Chen Gen-yu, et al. Research on laser welding of vehicle body[J]. Optics & Laser Techonogy, 2008,40(2):420-426.

[4] 徐州，赵连城. 金属固态相变原理[M]. 北京：科学出版社，2004:93-94.

[5] Xia Ming-sheng, Biro Elliot, Tian Zhi-ling, et al. Effect of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels[J]. ISIJ International, 2008,48(6):809-814.

[6] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京：机械工业出版社，1999:130-131.

[7] 田燕. 焊接区断口金相分析[M]. 北京：机械工业出版社，1990:20-21.