

线能量对高强钢激光填丝接头组织及性能影响

周海铭¹, 李柘林², 牟楠¹, 杨昊¹, 罗丰华^{1*}

¹中南大学粉末冶金研究院国家重点实验室, 湖南长沙 410083;

²广东新会中集特种运输设备有限公司, 广东 江门 529144

摘要 利用 5 kW 碟片激光器对 1.1 mm 厚的先进高强钢进行对接填丝焊, 采用正交试验设计激光工艺参数, 并借助万能力学试验机、显微硬度仪、光学显微镜和扫描电镜对焊接接头的拉伸强度、显微硬度、表面与截面组织进行分析, 研究激光工艺参数对焊接接头力学性能及组织的影响。结果表明, 在试验参数范围内, 激光功率与焊接速度是影响接头性能最重要的参数。在合理的工艺参数下, 即线能量大于阈值时, 可以获得均匀、连续以及表面光滑的焊缝形貌, 抗拉强度为母材的 90% 以上。接头均存在熔合区硬化和外侧热影响区软化现象, 熔合区组织主要由板条马氏体和先共析铁素体组成, 热影响区组织因回火马氏体的大量出现而发生软化, 从而影响接头拉伸性能。

关键词 激光光学; 激光填丝焊; 热影响区软化; 热输入量; 力学性能; 组织形貌

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.031401

Effect of Line Energy on Microstructure and Properties of High Strength Steel Joints by Laser Filler Wire Welding

Zhou Haiming¹, Li Zhelin², Mu Nan¹, Yang Hao¹, Luo Fenghua^{1*}

¹State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University,

Changsha, Hunan 410083, China;

²Guangdong Xinhui China International Marine Containers Special Transport Equipment Co. Ltd., Jiangmen, Guangdong 529144, China

Abstract A 5 kW disk laser is used for the butt filler wire welding of 1.1 mm thick advanced high strength steels. The laser process parameters are designed by the orthogonal test, and the tensile strength, microhardness, surface and cross section of these welded joints are analyzed by the universal mechanical test machine, microhardness tester, optical microscope and scanning electron microscope. In addition, the effects of laser process parameters on the mechanical properties and microstructures of the welded joints are studied. The results show that laser power and welding speed are the most important parameters influencing the performances of joints in the range of test parameters. Under the reasonable process parameters, that is, when the line energy is greater than the threshold value, the weld appearance with a uniform, continuous and smooth surface can be obtained, and the tensile strength is more than 90% of that of the base material. There exist for all the joints the phenomena of fusion zone hardening and lateral heat-affected zone softening. The microstructure of the fusion zone is mainly composed of lath martensite and proeutectoid ferrite. The microstructure of the heat affected zone is softened due to the emergence of large quantities of tempering martensite, which affects the tensile properties of joints.

Key words laser optics; laser filler wire welding; heat affected zone softening; heat input; mechanical property; microstructure morphology

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引言

低合金钢用淬火-配分(Q&P)工艺热处理可以

获得马氏体、残余奥氏体与铁素体的多相组织。这种钢在服役过程中, 马氏体组织提供高强度和高硬度, 铁素体及残余奥氏体组织提供良好塑性^[1]。作

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-08-05; 录用日期: 2018-08-08

* E-mail: fenghualuo@csu.edu.cn

为第三代汽车用钢, Q&P 钢主要用于汽车承载件及防撞部件, 在车辆的减重和安全方面有着广阔的应用前景。

激光焊接具有热量输出高、焊接速度快和自动化容易实现等特点, 近年来受到工程人员的广泛关注。激光填丝焊不但具有较强的间隙容忍度, 可降低现场操作难度, 而且其焊透工件所需的线能量比激光自熔焊更低, 在运输领域的焊接制造中拥有独特的应用潜力^[2]。

焊接马氏体相钢时存在接头软化现象, 并且普遍认为这是无法避免的问题。该现象主要归结于热影响区(HAZ)附近的峰值温度达到母材回火温度至 A_{c1} 之间时, 碳化物发生积聚, 形成大量回火马氏体。当软化程度严重时, 会影响结构件的安全性^[3-6]。

一些研究者发现^[7-8], 同种低合金钢经过激光焊接后, 接头熔合区的硬度明显增加, 热影响区外侧位置出现软化, 在做拉伸试验时, 接头大部分塑性变形积累在软化的热影响区, 断裂位置虽存在大量韧窝, 但整体延伸率仍较低。另一些研究者^[9-12]发现, 异种低合金钢经过激光焊接后, 接头在拉伸试验中软化区均会出现局部应变累积导致的应力集中, 而通

过调节线能量或离焦量可以改变软化区宽度与软化程度, 降低软化带来的不利影响。综上, 尽管很多研究者对钢接头的组织变化和拉伸、成形性能展开了大量研究, 但对于热影响区软化区对接头性能的影响尚未形成研究体系, 并且对激光填丝工艺的报道较少。

因此, 本文针对运输用钢及其激光填丝焊接头, 研究工艺参数线能量(激光功率、焊接速度)和离焦量等对焊缝形貌及组织关系的影响, 为优化焊接工艺设计以获得力学性能合格的焊接接头工艺窗口提供实践指导, 同时明确接头显微硬度与显微组织之间关系, 并对软化原因给出详细解释。

2 试验材料与方法

试验材料为 1.1 mm 厚 Q&P 处理的低合金钢, 样品表面尺寸为 200 mm × 300 mm, 采用对接方式进行焊接, 试验材料的抗拉强度为 995 MPa, 屈服强度为 862 MPa, 延伸率为 6%。填充焊丝为 ER50-6 (直径为 0.8 mm), 试验钢与焊丝的化学成分如表 1 所示。图 1 为利用光学显微镜和场发射扫描电子成像的母材的显微组织, 可以看出, 试验钢金相组织主要由板条马氏体和块状铁素体组成。

表 1 试验钢和焊丝的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of test steel and wire (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Fe
Base material	0.16	0.35	1.35	0.03	0.005	0.45	0.18	0.28	—	—	Bal.
Weld wire	0.07	0.86	1.58	0.02	0.012	0.02	0.02	0.15	0.01	0.004	Bal.

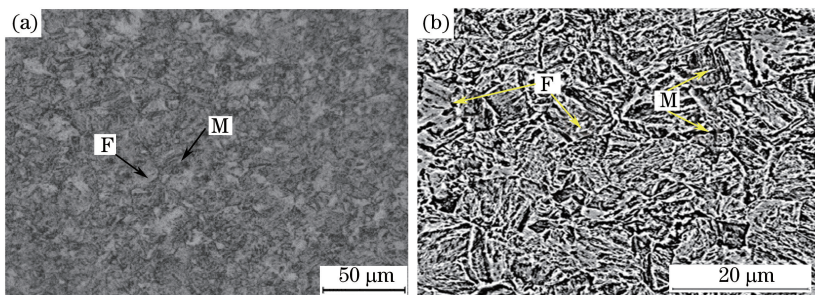


图 1 利用(a)光学显微镜和(b)场发射扫描电子成像的母材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of base material observed by (a) optical microscope and (b) field emission scanning electron microscope

用丙酮和酒精去除试验材料表面油污, 并用夹具将试样固定在激光焊接工装台上, 试验装置如图 2 所示。激光与板材保持 88° 夹角, 焊丝从激光前方送入, 送丝角度为 45° , 激光束与焊丝之间的距离为 1 mm, 选用波长为 1030 nm 的碟片激光器(Trudisk 5006)和 ABB 工业机器人加持 Precitec YW50 激光头进行填

丝焊, 光斑直径为 200 μm , 聚焦镜焦距为 300 mm。通过正交试验设计的工艺, 设计的激光功率范围为 3~4.5 kW, 焊速范围为 3.5~5.5 m/min, 离焦量为 -2~2 mm, 焊缝宽度为 0.05~0.2 mm。发现在此工艺参数范围内, 激光功率与焊接速度是影响接头力学性能最主要的参数。保护气选用纯氩气, 气体流量为

15 L/min。对试验中的典型试样进行具体分析讨论，具体工艺参数见表 2 所示。

焊后通过电火花数控机床切割样品，镶嵌后用砂纸和氧化铝粉处理样品，最后采用体积分数为 4% 硝酸酒精溶液对焊接接头样品进行化学腐蚀。利用 Leica DM2700 M 金相显微镜和 NOVATM NanoSEM 230 场发射扫描电子显微镜观察焊接接

头的显微组织。根据《GB/T4340.1-2009》在 HV-G21ST 型显微维氏硬度计下进行焊接接头横截面的硬度测试，测试表面部位距离试样上表面 0.55 mm，载荷 200 g，保载时间 10 s。拉伸试验按照《GB/T2651-2008》要求，拉伸试样尺寸如图 3 所示，在 PM3148-2009 万能材料试验机上完成，拉伸速度 2 mm/min，各测三个样，取平均值。

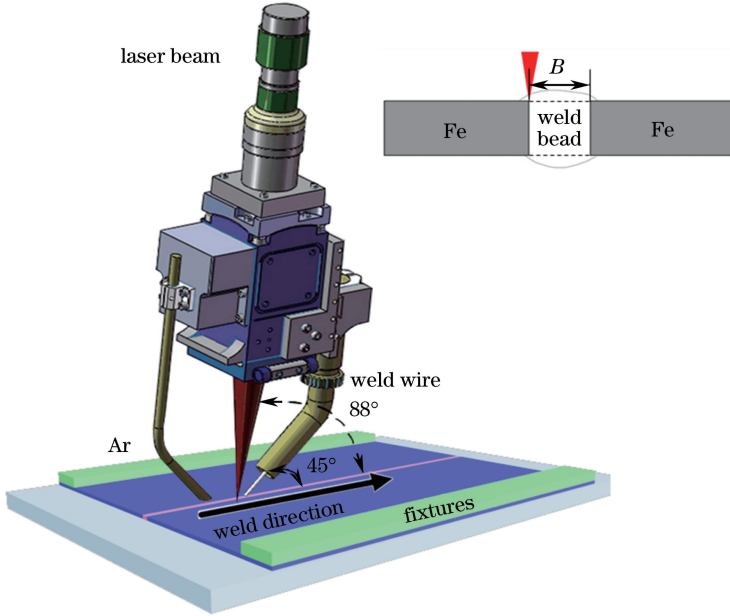


图 2 激光焊的试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup for laser welding

表 2 在试验中使用的样品及相应变量

Table 2 Samples used in experiments and corresponding variables

Sample	Laser power /kW	Weld speed /($m \cdot min^{-1}$)	Weld width /mm	Defocusing /mm	Line energy /($J \cdot cm^{-1}$)
1	3.0	5.5	0.20	1	327.3
2	3.5	5.5	0.15	2	381.8
3	4.0	5.5	0.10	-2	436.4
4	4.5	5.5	0.05	-1	490.9
5	4.5	4.5	0.15	1	600.0
6	4.5	4.0	0.20	-2	675.0

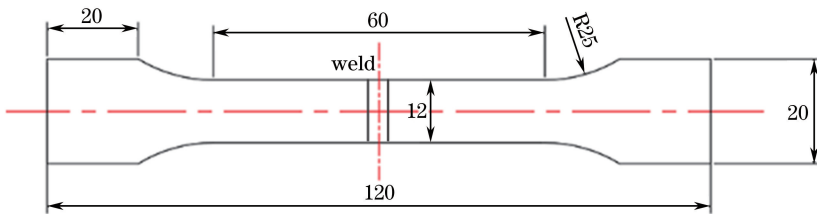


图 3 标准拉伸试样尺寸示意图

Fig. 3 Dimension of standard tensile sample

试验中选择的送丝速度 v_f 与焊接速度 v 、焊缝宽度 B 、焊丝直径 d 以及板厚 h 有关，为保证形成

饱满的焊缝，根据质量守恒选择恰当的送丝速度与焊接速度。公式为

$$v_f = \frac{4kBh}{\pi d^2} v, \quad (1)$$

式中 k 为填充补偿系数,考虑到金属烧损情况,一般取 1.1~1.2 较为合适。

3 试验结果及分析


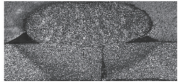
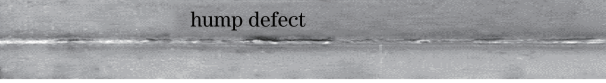

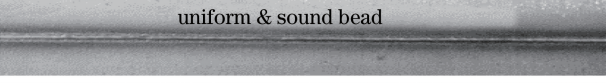

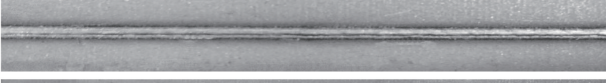

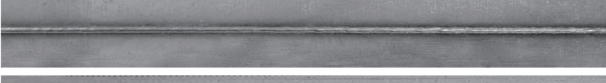

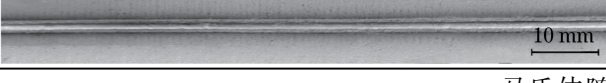
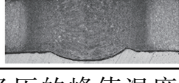
3.1 线能量对焊接接头表面形貌的影响

采用表 2 中列出的相应焊接参数,得到焊缝外观如表 3 所示。样品 1、2 的焊缝正面出现了焊道驼

峰和未焊满的缺陷,低功率高速焊时,线能量较低,导致焊接金属不但未充分熔化,而且熔渗时间不足,原本朝向焊缝中心生长的液态金属来不及重新分布,接头便形成如此形貌。在不同线能量条件下,距离上表面 0.55 mm 的接头各区域宽度如图 4 所示,随着线能量的增加,焊缝逐渐达到熔透状态。当线能量超过一定值时,通过观察样品 3~6,可见焊缝表面成形光滑、均匀,说明填丝过程比较稳定,接头焊缝轮廓相似,余高大小适中。

表 3 不同工艺条件的焊接接头的表面与横截面形貌

Table 3 Surface and cross-sectional morphologies of welded joints under different process parameters

Sample	Surface quality welding direction	Cross section	Result description
1			Lack of penetration
2			Local incomplete penetration
3			Full penetration forming good
4			Full penetration slight undercut
5			Full penetration forming good
6			Full penetration slight undercut

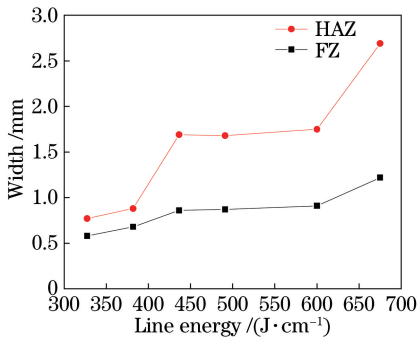


图 4 线能量对激光焊接头不同区域宽度的影响

Fig. 4 Effect of line energy on widths of different areas of laser welded joint

由于激光填丝焊的工艺参数接近,焊缝各区的组织形貌类似,因此仅分析样品 3,便足以总结研究。图 5(a)为样品 3 焊缝的右侧热影响区各区域的显微分布图,而图 5(b)为图 5(a)靠近熔合区(FZ)的热影响区组织扫描电镜照片,图 5(c)为图 5(a)显示靠近母材(BM)的热影响区组织扫描电镜照片。焊缝从中心往右依次为熔合区、热影响区和母材区。在激光热源的作用下,钢中的铁素体与

马氏体随着经历的峰值温度以及冷却速率的不同而产生不一样的相变组织。其中距离热源中心最近的熔合区组织,原始组织完全奥氏体化,经快速冷却后变成马氏体,组织呈现典型的快速凝固特征。在稍远离热源中心的热影响区位置,具体可分为峰值温度超过晶粒粗化温度的粗晶区(CGZ),峰值温度和 A_{c3} 晶粒粗化温度的细晶区(FGZ)和峰值温度介于 $A_{c1} \sim A_{c3}$ (经测定,该钢的 A_{c1} 温度为 746 °C, A_{c3} 温度为 854 °C) 的临界区域(ICZ)这三个区域。其中临界热影响区(ICHAZ)的形成过程是母材组织在快速升温过程中奥氏体化不充分,使得母材中的残余铁素体得到保留,并在随后的冷却过程中,转变为马氏体组织。在较远离热源中心的位置,该区域峰值温度区间介于马氏体回火温度 A_{c1} ,材料的马氏体组织发生回火作用,形成的回火马氏体强度与硬度均低于淬火马氏体,故此区域为热影响区的软化区。熔合区组织主要由板条马氏体和少量先共析铁素体组成,如图 5(b)和(c)所示,热影响区组织由先共析铁素体、少量板条马氏体和回火马氏体组成。

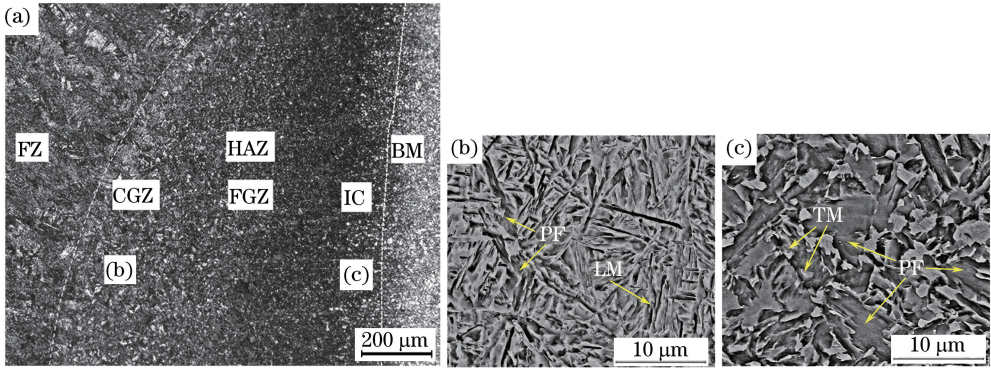


图5 3#接头焊缝和右侧热影响区各区域组织图。(a)焊缝轮廓;(b)粗晶-细晶区域;(c)细晶-临界区域

Fig. 5 Regional distribution of 3# welding seam and right HAZ. (a) Weld profile; (b) CG-FGZ; (c) FG-ICZ

3.2 焊接接头力学性能分析

3.2.1 线能量对接头力学性能影响

采用正交试验工艺参数研究线能量对拉伸试验的影响,如图6(a)所示,较高的线能量可以获得性能良好的焊接接头。线能量小于390 J/cm时,接头没能达成有效连接,力学性能无法满足基本的使用要求,而大于该阈值时,焊丝与母材熔合充

分,焊缝成形饱满,可以得到上下熔宽、余高近似一致的焊缝形貌,抗拉强度为原始母材的90%以上。试验还发现断裂位置均出现在热影响区软化区附近。如图6(b)所示,在低功率高速焊的条件下,会出现明显的驼峰和未焊合等缺陷,而在其余激光功率和速度的组合条件下均可获得良好的成形。

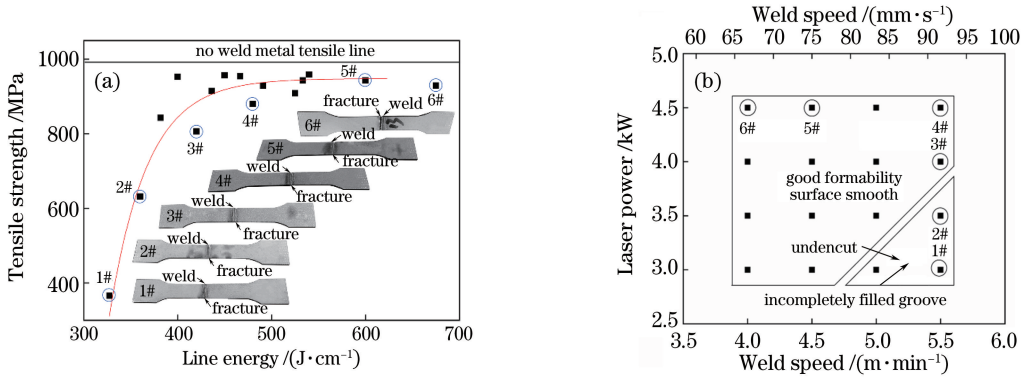


图6 线能量对接头力学性能及成形性的影响。(a)不同线能量下接头的力学性能与成形性;

(b)功率与焊速组合效果的工艺窗口

Fig. 6 Effect of line energy on mechanical properties and formability of joint. (a) Mechanical properties and formability of joints with different line energies; (b) power and weld speed combined effect of the process window

3.2.2 线能量对接头显微硬度影响

图7(a)所示为样品4~6的焊接接头显微硬度的测试结果。图中从边缘至焊接中心线依次为母材区、热影响区、熔合区。发现经过激光焊接后,熔合区与粗晶、细晶热影响区的硬度值均较母材出现大幅度提高,且均在外侧热影响区位置出现不同程度的软化现象。在能完全熔透的线能量条件下,软化区尺寸减小,软化程度增大,表明线能量虽会改变软化尺寸大小与程度,但在此范围内未改变拉伸断裂的位置。图7(b)所示为不同线能量条件下焊接接头各区域平均硬度。当焊接线能量由490.9 J/cm

依次增加到600 J/cm和675 J/cm时,接头母材显微硬度285 HV_{0.2}依次增大到332 HV_{0.2}和357 HV_{0.2},熔合区显微硬度则由405 HV_{0.2}依次增至444 HV_{0.2}和464 HV_{0.2},随着线能量的提高,熔合区与母材的平均硬度有增加的趋势,这是激光焊的高热输入量导致的。

3.3 软化区断裂机理解释

如图6(a)所示,试验还发现断裂位置均出现在热影响区软化区附近,这说明软化区域对接头的拉伸性能影响很大。一般而言,若焊接接头存在软化区,则试验在此区域会断裂,其原因是回火马氏体和

铁素体软相组织,在单向拉伸应力作用下,优先发生塑性变形,且加工硬化后的强度也无法达到其他区域水平,外侧的 ICHAZ 组织恰好符合这样的特点。图 8 为典型接头拉伸过程的断裂金相图及软化区受力分析示意图,充分揭示软化区尺寸与程度对拉伸断裂位置之间的关系。对于理想的均匀材料而言,拉伸过程中试样的应力为单向状态,施加外力时会

变形直至断裂。但尽管接头处于单向拉伸状态,接头的软化区与硬化区共存,这种硬度不均匀的状态造成软化区受两侧约束以及附加纵向应力 F^* 限制其横向变形,且此纵向应力会随着拉伸载荷的增加而增加。在这种情况下,软化区的应力状态由原来的单向拉伸变为双向拉伸,应力的集中会导致焊件整体塑性的下降^[11]。

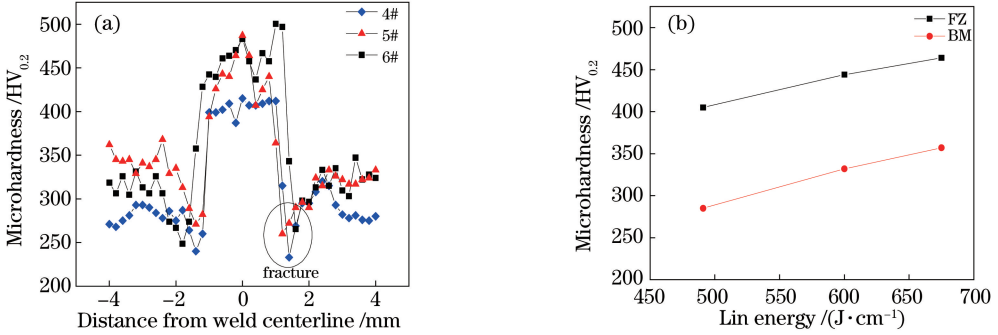


图 7 不同线能量焊接接头。(a)显微硬度分布图;(b)各区域平均硬度

Fig. 7 Laser welded joints under different line energies. (a) Microhardness distribution; (b) average hardness in each region

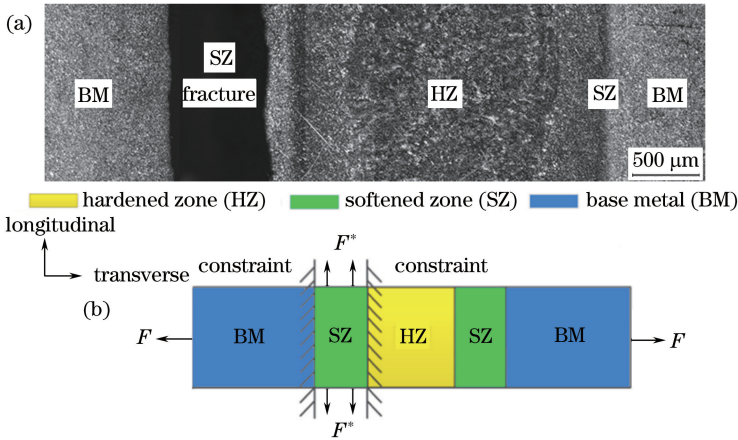


图 8 (a)接头断裂位置图;(b)SZ 受力分析示意图

Fig. 8 (a) Fracture location of joint; (b) force analysis of SZ

4 结 论

采用碟片激光器完成 Q&P 钢的填丝对接焊,对于焊缝成形质量而言,线能量小于 390 J/cm 时,接头不仅未完全熔透,并会出现焊道驼峰、未焊满缺陷,接头力学性能无法满足使用要求,随着线能量的增加,焊缝逐渐被熔透。线能量足够时,焊丝与母材充分熔合,成形饱满,可以得到上下熔宽、余高近似一致的焊缝截面形貌。

焊缝熔合区组织由板条马氏体和先共析铁素体组成;粗晶、细晶热影响区组织由先共析铁素体和少量板条马氏体组成;临界热影响区组织由回火马氏

体和先共析铁素体组成。线能量对热影响区的显微组织没有明显影响。

焊接接头熔合区和热影响区的显微硬度均高于母材,最高硬度出现在焊缝中心。接头的热影响区边缘出现明显软化区,拉伸试验断裂位置主要发生在此区域上,说明热影响区的软化会影响材料的整体力学性能。

参 考 文 献

[1] Speer J G, Assunção F C R, Matlock D K, *et al.* The “ quenching and partitioning ” process: background and recent progress [J]. Materials

- Research, 2005, 8(4): 417-423.
- [2] Mathieu A, Shabadi R, Deschamps A, *et al.* Dissimilar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire)[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(3): 652-661.
- [3] Zhang M, Wang X N, Zhu G J, *et al.* Effect of laser welding process parameters on microstructure and mechanical properties on butt joint of new hot-rolled nano-scale precipitation-strengthened steel[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014, 27(3): 521-529.
- [4] Guo P F, Wang X N, Zhu G H, *et al.* Microstructures and properties of X100 pipeline steel joints by fiber laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202003.
郭鹏飞, 王晓南, 朱国辉, 等. X100 管线钢光纤激光焊接头的显微组织及性能[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1202003.
- [5] Zhang F, Li F, Hua X M, *et al.* Research of microstructure and mechanical properties of laser tailor-welded blank of cold rolled multi-phase steel and HSLA [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0903010.
张帆, 李芳, 华学明, 等. 冷轧复相钢与低合金高强度钢差厚板激光拼焊的焊缝组织与力学性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903010.
- [6] Anawa E M, Olabi A G. Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1/2/3): 22-33.
- [7] Farabi N, Chen D L, Zhou Y. Fatigue properties of laser welded dual-phase steel joints [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 835-843.
- [8] Wang J F, Wang L J, Yang L J, *et al.* Research on microstructure and properties of laser welding DP1000 high-strength steel weld joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0903003.
王金凤, 王立君, 杨立军, 等. DP1000 高强钢激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903003.
- [9] Jia Q, Guo W, Li W D, *et al.* Microstructure and tensile behavior of fiber laser-welded blanks of DP600 and DP980 steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 236: 73-83.
- [10] Lun N, Saha D C, Macwan A, *et al.* Microstructure and mechanical properties of fibre laser welded medium manganese TRIP steel [J]. Materials & Design, 2017, 131: 450-459.
- [11] Wang X N, Sun Q, Zheng Z, *et al.* Microstructure and fracture behavior of laser welded joints of DP steels with different heat inputs[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 699: 18-25.
- [12] Ning J, Zhang L J, Sun M J, *et al.* Studies of the characteristics and size effects of softened zone of laser welded 20MnTiB joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 405-419.