

激光深熔焊接 X65 油气管线钢焊缝的成形机理及性能分析

江国业*, 刘宇平, 雷璞, 庞铭, 李敏, 付威

中国民航大学机场学院, 天津 300300

摘要 采用 Nd:YAG 激光器开展 X65 管线钢激光深熔焊接实验,通过光学显微镜、扫描电镜、硬度仪,观察焊缝形貌,表征焊缝区域的微观组织,测量焊缝区域的硬度变化。结果表明:由于焊接偏转角度的变化影响了激光在空间中的能量分配,焊缝深度从 8 mm 下降至 4 mm,且沿焊接厚度方向,焊缝形貌沿激光偏转角度发生了偏转;由于焊接裂纹与温度、温度梯度等相关,通过降低焊接速度,在焊缝收尾处观察到了裂纹;随着焊接速度的增加,焊接热影响区的宽度变窄,焊缝区最大硬度由 472.1 HV 增大到 565.5 HV;熔凝区硬度分布的非对称性随着焊接速度的增大而增强。

关键词 激光光学; 非对称性; 激光焊接; 管线钢; 微观组织; 硬度

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.031406

Forming Mechanism and Performance Analysis of X65 Oil and Gas Steel Pipeline Weld Fabricated by Laser Deep-Penetration Welding

Jiang Guoye*, Liu Yuping, Lei Pu, Pang Ming, Li Min, Fu Wei

Airport College, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China

Abstract In this study, a laser deep-penetration welding experiment was conducted on an X65 steel pipeline using a Nd:YAG laser. The morphology of the created weld was observed using a optical microscope. The microstructure of the weld area was characterized by a scanning electron microscope and its hardness was measured by a hardness tester. Results show that the weld depth of the steel sample decreases from 8 mm to 4 mm because of the variation in welding deflection angle, which affects the energy distribution of the laser in space. It is also observed that the weld profile deflects along the laser deflection angle in the direction of welding thickness. At the end of the welding process, a crack associated with temperature and temperature gradient is observed on the weld due to reduction in welding speed. However, as the welding speed increases, the width of the weld heat-affected zone narrows, and the maximum hardness of the weld zone increases from 472.1 HV to 565.5 HV. The asymmetry in the hardness distribution of the fusion zone increases with the increasing welding speed.

Key words laser optics; asymmetry; laser welding; pipeline steel; microstructure; hardness

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810

1 引言

石油、天然气通过金属管道长距离输送, X65 管线钢是常见的高承压、大管径、高钢级的管线钢^[1-2]。目前管道之间的连接主要是焊接,以往管线钢焊接

主要采用熔化极气体保护焊、焊条电弧焊和钨极氩弧焊等焊接工艺,这些传统焊接工艺存在焊接效率低、焊接接头韧性差、焊接一个接头需要多层多道焊等缺点,已经难以适应恶劣条件下高级别管线钢的焊接^[3-5]。激光焊接作为目前较为先进的焊接技术,

收稿日期: 2019-05-17; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1633111)、中央高校基本科研业务费专项(19CX05007A)、天津市研究生科研创新项目(2019YJSS070)

* E-mail: guoyejiang@foxmail.com

具有聚焦后的激光功率高、焊接速度快、焊缝深宽比大、激光加热范围和热影响区小、耗材成本低、无需开坡口、焊接残余应力和变形小等优点^[6],较好地弥补了传统焊接中存在的一些问题。

如何提高激光焊接的接头性能,是当前激光焊接中的主要研究方向之一。在高级管线钢的焊接中,熔池的动态行为与激光焊接参数对焊接接头质量有着重要的影响^[7-9],其中黄根哲等^[10]主要研究了高强钢非对称双面双弧焊的微观组织及硬度分布规律,李敬勇等^[11]研究了惯性摩擦焊摩擦界面两侧温度分布的非对称性。总的来说,在激光焊接速度和非对称性上对管线钢焊接接头性能的影响研究^[12]较少,在汽车制造领域对焊接速度的影响^[13-17]研究较多。景财年等^[18]发现,随着焊接速度的提升,在 TRIP590 钢激光焊接接头焊缝区的微观组织中,马氏体板条更加细长,晶粒更加细化,焊缝硬度随焊接速度加快而增大,这与谷争巍等^[19]关于焊接速度与晶粒大小、焊缝区的硬度之间关系的结论相一致。Cao 等^[20]研究发现激光焊接 Ti-6Al-4V 合金需采用适当的焊接速度,若焊接速度高于 7.5 m/min,焊接过程则会出现未焊透的现象。Lee 等^[21]在研究焊接速度对铜板和铝板焊接接头质量的影响时发现,在极高的焊接速度下,焊接过程会产生质量较高的焊接接头。

对于高压油气长输管道来说,焊接接头的组织和力学性能关系到整个系统的完整性和可靠性,以及人身财产的安全,焊接方法及焊接参数的正确选择尤为重要。本文采用油气管道常用的 X65 管线钢进行激光焊接,对试样开展微观组织扫描和力学性能分析等研究,揭示了激光深熔焊

过程中熔池的非对称性机理以及不同激光焊接速度对 X65 管线钢焊接接头的微观组织与力学性能的影响规律,为获得高质量的 X65 激光焊接接头提供依据。

2 实验材料及方法

基体材料选用 D660 材质的 X65 管线钢,实验用的材料是从管径为 610 mm 管道上切割出的 15.0×9.5×1.0 cm 尺寸试样,其化学成分见表 1。

表 1 X65 管线钢化学成分

Table 1 Chemical composition of X65 steel pipeline

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
Mass fraction /%	0.059	0.26	1.52	0.01	0.0013	Bal.

从 X65 钢管上切割试样,采用 Nd:YAG 激光器对其进行单面激光焊接,激光聚焦镜焦距为 150 mm,离焦量为 -1 mm,焊接过程采用氩气保护,焊接功率为 3 kW,焊接速度分别为 5 mm/s 和 15 mm/s。在焊速为 15 mm/s 时,激光束方向与两块管材接缝存在 5°偏转角度,如图 1 所示。将焊接好的两组钢板的焊缝区涂渗透剂和显影剂,实施着色探伤处理后,用电火花线切割机将其切割成尺寸为 15 mm×10 mm×5 mm 的试样。对两组试样横截面进行磨抛处理,采用 HF 和 HNO₃ 的水溶液作为腐蚀液,将磨抛后的试样腐蚀后,用乙醇溶液清洗,并吹干备用。

使用型号为 AFT-DC130 的光学显微镜观察两组试样的宏观形貌后,采用 Quanta 450 扫描电镜再对两组试样进行微观组织扫描,最后,采用型号为 HVS-1000Z 维氏硬度仪对两组试样横截面分别进行硬度测试。

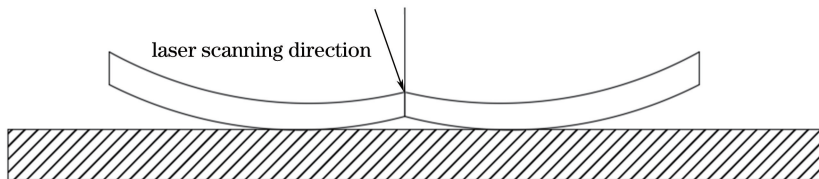


图 1 焊接速度为 15 mm/s 时,激光束偏转示意图

Fig. 1 Schematic of laser beam deflection at welding speed of 15 mm/s

3 结果分析与讨论

3.1 焊缝裂纹与表面特征

3.1.1 焊缝裂纹

图 2 为在 5 mm/s 速度下焊接试样的表面探伤照片。可知,激光束沿图从左向右焊接钢管,焊接至末尾处时,热源移除,能量降低,末尾处无法形成新的熔池,

与焊缝的前序位置相比,具有较大的温度梯度和残余应力,从而出现裂纹。在焊接过程中热量分别沿焊缝的纵向和横向传递,激光束沿纵向扫描,相较于纵向传热的焊缝,焊缝两边的基体为冷体,因此横向温度梯度大于纵向温度梯度,会形成较大的热应力,产生指向焊缝两侧的拉应力,故裂纹沿焊缝方向扩展。

同时可以发现,试样焊接接头收尾处出现凹坑。

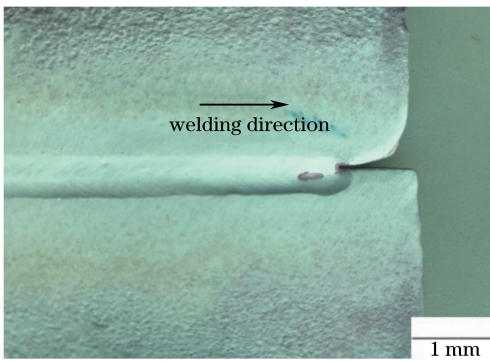


图2 焊接速度为 5 mm/s 的试样探伤图
Fig. 2 Sample inspection diagram when welding speed is 5 mm/s

原因为焊接速度较小,试样所获得的能量较大,造成末尾处烧损程度较大。本文后续实验研究选取的试样均避开了试样焊接接头的收尾处。

3.1.2 焊缝横截面的宏观形貌

在 5 mm/s 和 15 mm/s 两个焊接速度下,试样焊接接头的横截面宏观成形图如图 3 所示。焊缝深度随速度的变化由 8 mm 变为 4 mm,热影响区的最大宽度由 1.1 mm 变为 0.7 mm。图 3(a)为典型的激光深熔焊形貌,图 3(b)是更改激光束偏转角度后焊缝区的宏观形貌。由于在当前激光焊接功率下,实验所选择的两个焊接速度较低,焊接时输入能量过大,致使局部温度过高,材料气化压力减小;周围空气挤压焊接表面,致使焊缝正面出现凹陷。由图 3 可以看出,两个试样正面和背面的焊缝宽度均呈下降趋势,但图 3(b)的焊缝宽度明显比图 3(a)

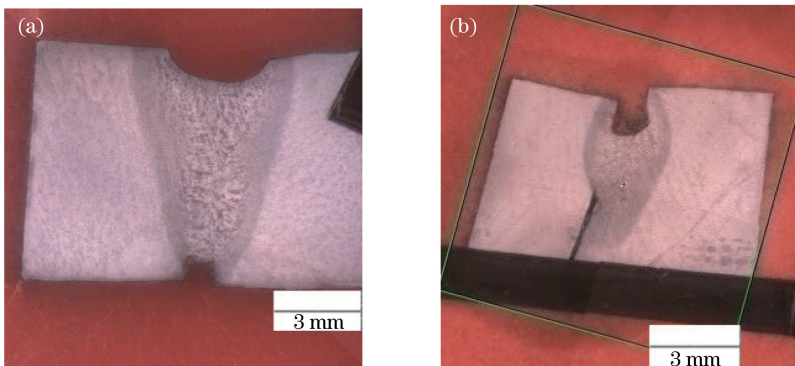


图3 不同焊接速度下的试样宏观成形图。(a) 5 mm/s;(b) 15 mm/s

Fig. 3 Macroscopic forming diagrams of sample at different welding speeds. (a) 5 mm/s; (b) 15 mm/s

3.2 焊接速度对焊缝微观组织的影响

图 4 为不同焊接速度下 X65 管线钢激光焊接接头的热影响区的微观组织,两种焊接速度下试样热影响区的微观组织主要为铁素体和珠光体。相对于 5 mm/s 的焊接速度,当焊接速度为 15 mm/s

时,也就是焊接速度越高,焊缝区宽度越窄。造成这种现象的原因是:随着焊接速度的增加,焊接热输入随之降低,焊接能量扩散范围有限,造成焊缝背面宽度较窄,当焊接能量不足以支持焊缝成形时,就会出现焊缝背面宽度为 0、熔深过小的情况,即试样未被完全熔透。

图 3(b)中焊缝区呈现非对称性,且没有完全熔透。这是因为激光束使加热区的金属汽化,在熔池内形成匙孔,匙孔上方覆盖等离子气体。激光束的能量通过匙孔的传热,向管材内部传导,由于等离子气体吸收和孔壁的多次反射,以及金属相变,试样上部到试样底部的能量下降。同时因为激光束有一定的偏转角度,会造成激光束偏向焊缝右侧,激光束中心线与试样的缝隙越往下部,偏离越大,故下部金属以右侧获得的注入能量为主,右侧先熔化并以热传导、对流和热辐射的方式向四周传递热量,而试样缝隙的存在降低了两侧管材的传热系数,热量由试样右侧向左侧部分的传递减少,主要留在右侧扩散。以上两方面的综合作用造成了图 3(b)试样焊缝区的非对称性。

基于以上分析,为获得全熔透的激光焊接接头,在激光功率为 3 kW 的条件下,焊接速度应在 5~15 mm/s 之间选择,但这个范围内的焊速会导致焊缝上端面出现咬边凹陷,因此可适当降低功率,降低能量输入。应该注意的是,为了获得全熔透、无凹陷的焊接接头,在焊接之前一定要确保样件搭接完好,样件之间的缝隙与激光器头位置对齐。

时,试样的高温熔池存留时间短,晶粒无法充分生长,因此试样热影响区的组织晶粒较为细小;还可观察到,焊接接头热影响区的微观组织中出现了少量细小的马氏体,原因为焊接速度大,导致冷却速度大,满足了马氏体转化的条件。

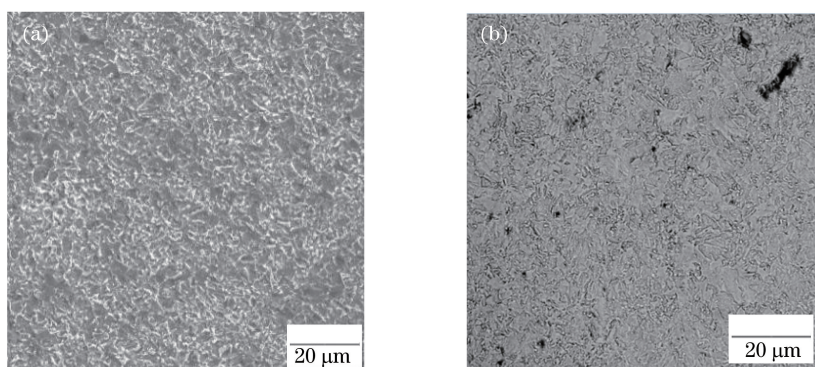


图4 不同焊接速度下热影响区的微观组织。(a) 5 mm/s;(b) 15 mm/s

Fig. 4 Microstructures of heat affected zone at different welding speeds. (a) 5 mm/s; (b) 15 mm/s

结合宏观形貌图3(b)可知,随着焊接速度的增加,热影响区域的宽度降低,这是由于焊接速度的变化改变的是单位面积总的能量输入。随着焊接速度的增加,激光在单位面积输入的能量降低,进而影响熔池的温度。在激光焊接过程中,激光辐照形成高温焊接熔池后,高温熔池再通过热传导传递给热影响区。激光焊接速度的增加和熔池温度变化的综合作用导致热影响区的宽度减少。

图5为不同焊接速度下试样焊缝区的微观组织,可以确定两种焊接速度的焊缝区均以大量的板条状马氏体为主,这是因为激光焊接后本身存在非常大的

过冷度,导致高温融化后的钢板在固态相变和凝固过程中由奥氏体发生切变型相变转变为板条状马氏体^[22]。图中还可看出,在低焊接速度下焊缝区的微观组织明显比在高焊接速度下焊缝的微观组织疏松,且低焊接速度下的板条状马氏体组织粗大,板条宽度平均为 $0.6\ \mu\text{m}$,而高焊速的板条状马氏体组织更加细密,其板条平均宽度为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。这是因为随着焊接速度的增大,其冷却速度也在增大,导致激光焊接熔池的高温停留时间较短,奥氏体还来不及在其相变温度下保温和增大晶粒。所以在高温融化时形成的奥氏体晶粒细小,从而板条状马氏体组织更加细密。

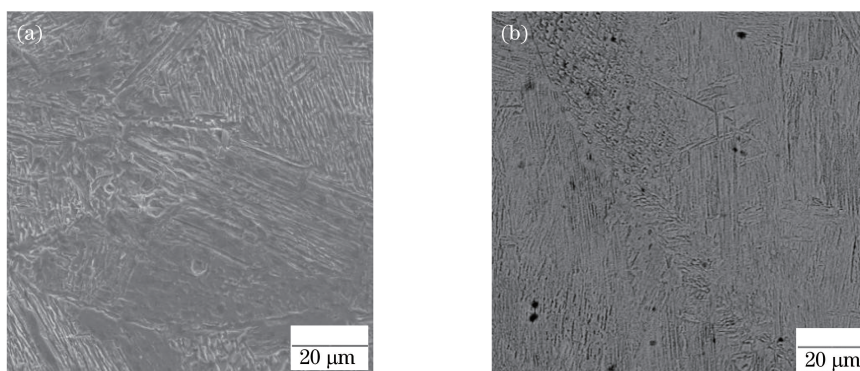


图5 不同焊接速度下试样焊缝区的微观组织。(a) 5 mm/s;(b) 15 mm/s

Fig. 5 Microstructures of weld zone of specimen at different welding speeds. (a) 5 mm/s; (b) 15 mm/s

3.3 硬度分析

沿试样横截面中部垂直于焊缝的方向从左至右测量硬度,测得两种焊接速度下的X65管线钢激光焊接接头的硬度分布,如图6所示。结果表明:焊速为5 mm/s和15 mm/s时,两个试样的横截面显微硬度从大到小依次为焊缝区、热影响区和母材。硬度最大值出现在焊缝区,这是由于焊接接头相较于母材出现了马氏体组织,而马氏体本身硬度较高。从图6中还可以观察到,高焊接速度的热影响区与焊缝区的硬度均明显高于低焊接速度的热影响区与

焊缝区15 mm/s焊速下焊缝区最高硬度可达565.5 HV,而5 mm/s时的最大硬度仅为472.1 HV,最大硬度出现位置也发生相应变化,由距试样左端2.65 mm变化为距试样左端2.20 mm。这主要与不同焊接速度下管线钢焊接接头的晶粒大小和显微组织不同有关。高焊速下,焊接接头微观组织的晶粒更细小,热影响区也出现了少量马氏体,因此该状态下热影响区和焊缝区的硬度均显著增加。

由图还可看出,在这两个焊接速度下,焊缝接头

两侧组织不同,硬度分布具有非对称性,对于焊速为 15 mm/s 的试样来说,非对称性更为明显。这是因为实验选择激光偏向右侧,导致热量集中于右侧板材,右侧板材传热速率明显高于左侧,从而造成温度场的非对称性。试样右侧具有较高的温度和过冷度,故形成了具有不同硬度的晶粒和微观组织。

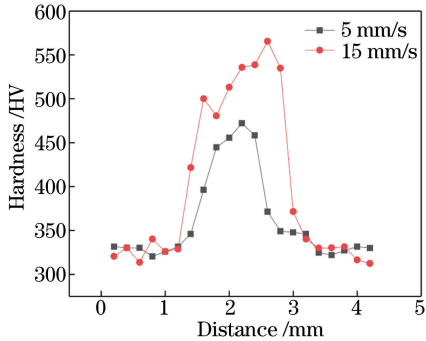


图 6 焊接速度变化对硬度的影响

Fig. 6 Effect of welding speed change on hardness

4 结 论

采用 Nd:YAG 激光器对 X65 管线钢进行了激光深熔焊接实验,通过观察焊缝形貌和维管组织、分析焊缝硬度性能,可以得到以下结论。

1) 由于熔池在高温下的存在时间及冷却速度等因素的影响,伴随着激光焊接速度的增加,焊缝深度从 8 mm 降到 4 mm,并且在焊缝深度方向出现了焊缝偏转及未焊透的情况。由于焊接裂纹与温度、温度梯度等相关,通过降低焊接速度,在焊接速度为 5 mm/s 时焊缝收尾处观察到了裂纹。

2) 伴随着激光焊接速度从 5 mm/s 增加到 15 mm/s,焊接热影响区的最大宽度从 1.1 mm 变为 0.7 mm,焊缝区域最大硬度从 472.1 HV 增加到 565.5 HV,最大硬度出现的位置由距试样左端 2.20 mm 变为距试样左端 2.65 mm。由于激光偏转角度的存在、熔池在空间的传热变化及激光熔凝过程中非平衡凝固等综合影响,伴随激光焊接速度的提高,熔凝区域硬度分布的非对称性增强。

3) 激光深熔焊接 X65 管线钢,由于激光偏转角度改变了激光在空间中的能量传输,且在激光深熔焊接中,激光在匙孔中传递的能量逐渐衰减,匙孔底部通过热传导来熔化周边金属,故在非对称熔池综合传热等影响下,激光角度的偏转导致焊缝发生偏析。

参 考 文 献

[1] Deng C Y, Zhang Y F, Huo L X, et al. CTOD

fracture toughness of welded joints of X65 pipeline steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 13-16, III-IV.

邓彩艳, 张玉凤, 霍立兴, 等. X65 管线钢焊接接头 CTOD 断裂韧度 [J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 13-16, III-IV.

[2] Xu Z. Study on constitutive relation and failure criteria of X65 pipeline steel [J]. Petroleum Engineering Construction, 2014, 40(3): 23-27.

徐震. X65 管线钢的本构关系及失效判据研究 [J]. 石油工程建设, 2014, 40(3): 23-27.

[3] 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.

[4] You Y, Shang C J, Nie W J, et al. Investigation on the microstructure and toughness of coarse grained heat affected zone in X-100 multi-phase pipeline steel with high Nb content [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 558: 692-701.

[5] Cao Y L, Huang F X, Wang Q. Research progress and development direction of long distance pipeline welding technology in China [J]. Oil Forum, 2012, 31(1): 7-11, 68.

曹永利, 黄福祥, 王勤. 我国长输管道焊接技术进展及发展方向 [J]. 石油科技论坛, 2012, 31(1): 7-11, 68.

[6] Guo R J, Fu G Y, Yang T B, et al. Laser welding technology of long distance pipeline [J]. Welded Pipe and Tube, 2007, 30(6): 78-80, 97.

郭瑞杰, 付桂英, 杨天冰, 等. 长输油气管道激光焊接技术 [J]. 焊管, 2007, 30(6): 78-80, 97.

[7] Peng J, Wang X X, Li G, et al. Effect of laser welding with filler wire on molten pool dynamic behavior and weld formation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1102004.

彭进, 王星星, 李刚, 等. 激光填丝焊对熔池动态行为及焊缝成形的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102004.

[8] Huang Y J, Gao X D, Lin S D. Influences of laser welding parameters on mechanical properties of polymethyl methacrylate and stainless-steel joints [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1202006.

黄怡洁, 高向东, 林少铎. 激光焊接参数对有机玻璃与不锈钢接头力学性能的影响 [J]. 中国激光, 2017,

44(12): 1202006.

- [9] Peng J, Hu S M, Wang X X, et al. Effect of filler metal on three-dimensional transient behavior of keyholes and molten pools in laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0102003.
彭进, 胡素梦, 王星星, 等. 填充对激光焊接匙孔与熔池三维瞬态行为的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0102003.
- [10] Huang G Z, Liu S Y, Liu F D, et al. Study on microstructure evolution and microhardness distribution of asymmetric double-sided double arc welding of high strength steel [C] // Proceedings of the 20th National Welding Conference. [S.l.: s.n.], 2015.
黄根哲, 刘双宇, 刘凤德, 等. 高强钢非对称双面双弧焊微观组织演变和显微硬度分布规律的研究[C]//第二十次全国焊接学术会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2015.
- [11] Li J Y, Qiu S, Qiu C L. Asymmetry of inertia friction welding joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(12): 81-84.
李敬勇, 邱硕, 仇晨龙. 惯性摩擦焊接头非对称性分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 81-84.
- [12] Wang J, Guo P F, Wang X N, et al. Research on microstructure and corrosion resistance of X100 pipeline steel laser weld joints [J]. Applied Laser, 2017, 37(6): 835-841.
汪杰, 郭鹏飞, 王晓南, 等. X100 管线钢激光焊接接头显微组织及耐腐蚀性能研究[J]. 应用激光, 2017, 37(6): 835-841.
- [13] Zhao Y, Zhang S, Hu W. Effect of welding speed on microstructure, hardness and tensile properties in laser welding of advanced high strength steel [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(7): 581-590.
- [14] Yang Z H, Yang S L, Tuo W H, et al. Effects of welding speed on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of TRIP590 high strength steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(4): 94-97.
杨智华, 杨尚磊, 庾文海, 等. 焊接速度对 TRIP590 高强钢激光焊接接头组织与力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(4): 94-97.
- [15] Jiang X H, Chen X P. Effect of welding speed on microstructure and properties of laser welded joints of high strength galvanized steel [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(15): 185-187.
蒋贤海, 谌小平. 焊接速度对高强镀锌钢板激光焊接
- 头组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 185-187.
- [16] Cheng D H, Huang J H, Lin H F, et al. Microstructure and mechanical analysis of Ti-6Al-4V laser butt weld joint [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(2): 103-106.
程东海, 黄继华, 林海凡, 等. TC4 钛合金激光拼焊接头显微组织及力学性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 103-106.
- [17] Duan Q, Yan J, Zhu G H, et al. Microstructure and crack formation mechanism of X80 pipeline steel welded seam [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(11): 68-72.
端强, 阎军, 朱国辉, 等. X80 管线钢焊缝组织及裂纹形成机制[J]. 金属热处理, 2015, 40(11): 68-72.
- [18] Jing C N, Ni X M, Li H X, et al. Effect of welding speed on microstructure and property of laser welding joint for TRIP590 steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(6): 111-114.
景财年, 倪晓梅, 李怀学, 等. 焊接速度对 TRIP590 钢激光焊接接头组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(6): 111-114.
- [19] Gu Z W, Yu S B, Han L J, et al. Effect of welding speed on microstructure and micro hardness of the weld seam of laser welded ultra-high strength steel [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(3): 656-659.
谷净巍, 于思彬, 韩立军, 等. 激光焊接速度对超高强度钢焊缝微观组织和显微硬度的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(3): 656-659.
- [20] Cao X, Jahazi M. Effect of welding speed on butt joint quality of Ti-6Al-4V alloy welded using a high-power Nd: YAG laser [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(11): 1231-1241.
- [21] Lee S J, Nakamura H, Kawahito Y, et al. Effect of welding speed on microstructural and mechanical properties of laser lap weld joints in dissimilar Al and Cu sheets [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(2): 111-118.
- [22] Huan P C, Wang X N, Zhu T C, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of 800 MPa grade hot-rolled high strength steel [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102002.
环鹏程, 王晓南, 朱天才, 等. 800 MPa 级热轧高强钢激光焊接接头的组织和力学性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102002.