

不锈钢薄板非熔透激光搭接焊热源模型

韩晓辉¹, 陈静^{2*}, 阚盈², 陈怀宁², 赵瑞荣¹

¹中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

²中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016

摘要 基于不锈钢薄板非熔透 CO₂ 激光搭接焊和光纤激光搭接焊获得的实际焊缝形状, 采用表面高斯+柱状体复合热源模型, 得到热源比例系数分别为 0.85 和 0.70。对其余 4 个热源描述参数, 包括高斯热源半径和深度、柱状热源半径和深度进行正确设置, 就可以获得不同焊接功率和焊接速度下, 搭接焊缝形状表征参量(表面缝宽、中间熔宽和熔深)的变化规律。模拟结果与试验结果符合很好。

关键词 激光技术; 不锈钢激光搭接焊; 非熔透焊接; 热源模型; 热源参数; 焊缝形状表征参量

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0502002

Heat Source Model for Non-Penetration Laser Lap Welding of Stainless Steel Sheets

Han Xiaohui¹, Chen Jing², Kan Ying², Chen Huaining², Zhao Ruirong¹

¹CRRC QingDao SiFang Co., LTD, Qingdao, Shandong 266111, China;

²Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

Abstract Based on the actual weld shape from stainless steel sheets with non-penetration CO₂ laser lap welding and fiber laser lap welding, by taking the Gaussian-plane+cylinder-body composite heat source model, the obtained heat source proportionality coefficients are 0.85 and 0.70, respectively. By correctly setting the other four parameters for describing heat source, including the radius and the depth of Gaussian heat source, and the radius and the depth of cylinder heat source, the change laws of weld shape characterization parameters (surface seam width, middle weld width and weld penetration) of lap welds can be obtained under different welding powers and welding speeds. The simulation results are well consistent with the experimental results.

Key words laser technique; laser lap welding of stainless steel; non-penetration welding; heat source model; heat source parameters; weld shape characterization parameters

OCIS codes 140.3510; 350.3390; 140.3390

1 引言

目前,在不锈钢车体侧墙中采用的非熔透激光搭接焊工艺已经广泛应用于地铁、动车等制造领域。作为一种高能束的精密焊接方法,激光焊的突出优点是焊缝窄,深宽比大,焊速快,及工件变形和热影响区域小^[1]。同时,激光焊具有特有的净化效应,更易获得杂质含量低、接头力学性能好的焊缝。但激光焊也存在缺点,如对焊件装配精度的要求高,要求光束在工件上的位置不能有显著偏移,否则激光聚焦后光斑尺寸小,焊缝窄,很容易造成焊接缺陷^[2]。

激光焊接质量的影响因素较多,主要包括焊接功率、焊接速度、离焦量、激光入射角度、保护气体、光斑直径等^[3-5]。一般情况下,离焦量、激光入射角、光斑直径和保护气体在实际生产中常常作为固定参数优先确定,而

收稿日期: 2016-11-22; 收到修改稿日期: 2017-01-04

作者简介: 韩晓辉(1977—),男,硕士,高级工程师,主要从事轨道车辆车体制造技术方面的研究。

E-mail: 13793237339@139.com

* 通信联系人。E-mail: cj@imr.ac.cn

对焊接质量或焊缝形状影响十分显著的焊接功率和焊接速度,则需根据不同搭接接头形式或焊缝形状来确定。

激光焊接成本较高,影响因素复杂,为避免耗费大量的人力物力,通常选择通过数值模拟来指导试验研究方向。而模拟的首要问题是激光焊接热源模型的准确建立。国内外对于激光焊接热源模型的模拟仿真和机理研究大都建立在小孔深熔焊的特性上^[6-8],热源模型是否准确均是以与实际焊缝形状是否相符为判断依据。对于激光熔透焊接,Kroos等^[9]基于能量守恒计算得出CO₂大功率熔透焊时小孔直径至少为光斑的1.7倍,Dowden等^[10]依据试验得出,工件上表面匙孔最大直径正好是底部的3倍。对于非熔透激光焊接的工艺模拟并不很多,史春元等^[11]采用三维锥体热源加半椭球复合热源模型获得了与实际焊接一致的花瓶状焊缝形状,刘佳^[12]采用双三维高斯热源模拟得出了与试验相应的焊缝形状。以上研究都是在特定的参数条件下以获得高度相符的焊缝形状为目标,并未得到一个通用的热源模型。

为了在改变焊接参数的情况下,不需要进行相应的对比试验就能获得焊接工艺对焊接质量或焊缝形状的影响规律,本文探讨了不锈钢薄板非熔透激光搭接焊过程中热源模型及相应参数的确定,初步建立了同时适用于CO₂和光纤激光两种焊接方法的通用热源模型参数,系统分析了焊接功率和速度对非熔透激光搭接焊焊缝形状的影响规律,本研究成果为实际生产的工艺参数制定提供了一定的指导。

2 有限元模型建立

2.1 单元模型建立

因为激光焊接的焊缝深宽比大,焊缝窄,所以模拟的准确度与模型网格的质量密切相关。网格越密,计算结果越精确,但是计算时间也会显著增加。网格的高质量要兼顾准确性和经济性,同时,网格的疏密安排也要合理。根据以上原则和激光焊特性,经过反复试算和分析,确定激光搭接焊的仿真计算模型如下:搭接试板规格为65 mm×106 mm(焊缝方向)×(δ₁+δ₂),δ₁为上板厚度,δ₂为下板厚度,搭接部分宽度为30 mm。焊缝及近焊缝区域单元网格在焊接时随热源移动自动细化,最终单元大小为0.125 mm×0.25 mm×0.5 mm,可以满足温度场和应力场的计算分析要求。搭接焊接板的平台设置、夹具固定及散热边界条件与试验时保持一致,结果如图1所示。

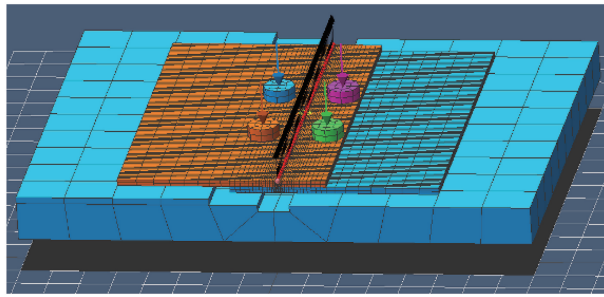


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

2.2 热源模型选择

激光搭接焊的熔池尺寸较小,且形状复杂、能量集中,因此数值模拟所用的热源模型不同于其他常规的热源模型。根据激光深熔焊的温度场特性,经过分析和筛选,选用了表面高斯+柱状体热源的复合热源形式,如图2所示。高斯面热源热流 q_s 和柱状体热源热流 q_v 径向分布规律分别为

$$q_s(r) = \frac{3Q_s}{\pi R_s^2} \exp\left(-\frac{3r_s^2}{R_s^2}\right), \quad (1)$$

$$q_v(r) = \frac{3Q_v}{\pi H R_v^2} \exp\left(-\frac{3r_v^2}{R_v^2}\right), \quad (2)$$

式中 r 为离加热斑点中心的距离, Q_s (高斯面热源功率)+ Q_v (柱状体热源功率)为总的加热功率, R 为激光光斑的有效加热半径, H 为柱状体热源的有效深度,本热源模型假设体热源热流在 H 向均匀分布。

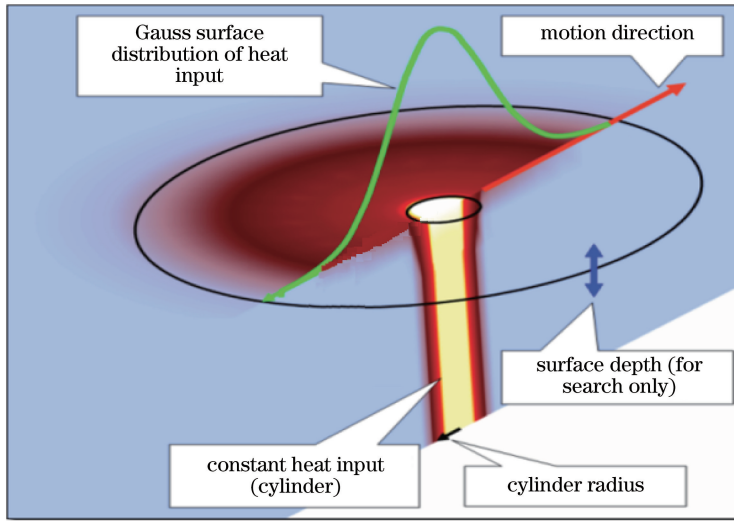


图 2 复合热源模型

Fig. 2 Composite heat source model

2.3 材料参数的设置

试验材料为 SUS301 系奥氏体不锈钢,其部分性能参数见表 1,热物理常数随温度的变化关系如图 3 所示。

表 1 SUS301 不锈钢的部分性能参数

Table 1 Partial performance parameters of SUS301 stainless steel

Density ρ / (kg/m ³)	Poisson ration ν	Solidus temperature / °C	Melting temperature / °C	Latent heat / (J/kg)
7.996×10^3	0.30	1280	1450	2.564×10^5

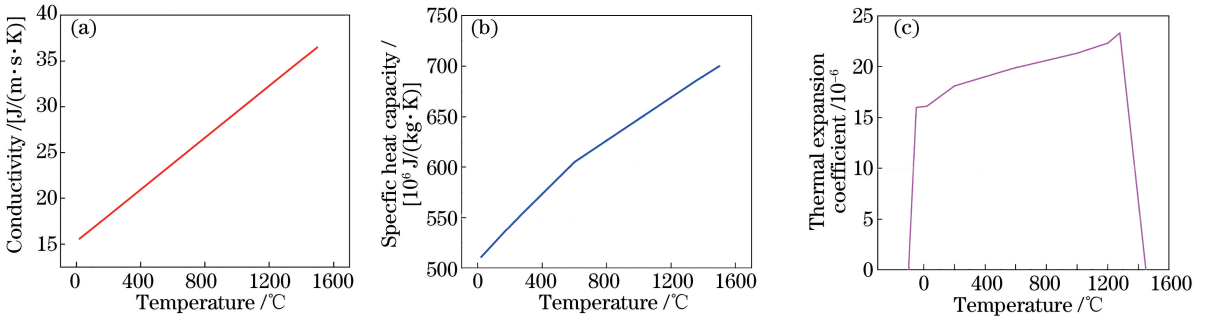


图 3 材料热物理常数随温度的变化。(a)电导率;(b)比热容;(c)热膨胀系数

Fig. 3 Changes of material thermal physical constants with temperature. (a) Conductivity;

(b) specific heat capacity; (c) thermal expansion coefficient

3 模拟结果与试验对比分析

3.1 搭接焊缝形状参数的表征

表征激光搭接焊焊缝形状的重要参量可以确定为三个,分别为表面缝宽、中间熔宽和熔深,如图 4 所示。不锈钢侧墙激光搭接焊焊缝一般要求有稳定且较大的熔宽以保证较高的拉剪强度和抗疲劳性能,同时要求有较小的熔深以满足外观和变形的需要。

3.2 热源模型参数设置与分析

采用的复合热源模型有 5 个参数需要设置,分别为高斯面热源半径和深度、柱状体热源半径和深度及柱状热源的比例系数。面热源参数主要影响表面缝宽,而体热源参数主要影响中间熔宽和熔深。模拟计算时发现,比例系数对焊缝形状的影响很大,通过影响体热源的热输入实现从传导焊到深熔焊的转变。

当功率为 3.0 kW、速度为 3.2 m/min、采用不同热源比例系数时(其余热源模型参数相同),针对厚度为 2 mm+2 mm 的搭接试板(表示为 2lap2,下同)获得的熔池形状变化规律见表 2。依据试验焊缝的形状,初

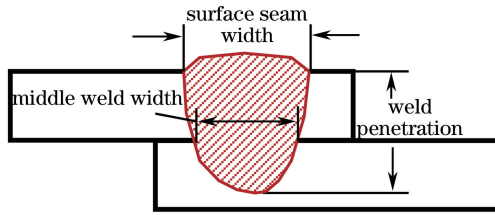


图 4 搭接焊缝形状的表征参数

Fig. 4 Characterization parameters of weld shape under lap welding

步设定高斯热源半径和深度分别为 3.0 mm 和 0.5 mm,柱状体热源半径和深度分别为 0.5 mm 和 2.5 mm。从表中可以看出,当比例系数为 30%时,激光焊处于传热焊的焊接形式;当比例系数增加到 50%时,熔深开始突变,从传热焊过渡到深熔焊形式。

从上面的模拟结果可以看出,采用高斯+柱状复合热源模型,不仅可以模拟传热焊形成的碗状特征,也可以同时模拟深熔焊的钉子状或柱状特征,从而满足薄板激光非熔透搭接焊缝形状的全范围模拟仿真要求。

表 2 热源分配系数对焊缝形状的影响

Table 2 Influence of heat source distribution coefficient on weld shape

Proportionality coefficient /%	Surface seam width /mm	Middle weld width /mm	Weld penetration /mm	Weld shape
20	3.96		0.93	
30	3.74		0.98	
40	3.47		1.19	
50	3.14		1.94	
60	2.75	0.51	0.24	
70	2.29	0.71	0.34	
80	1.86	0.86	0.42	
90	1.56	0.97	0.49	

3.3 模拟和试验结果分析

由于不同激光焊接方法形成的焊缝形状有所差别,以下针对 CO₂ 和光纤激光焊两种方法分别进行对比讨论。

3.3.1 CO₂ 激光焊接

采用轴流式 CO₂ 激光器进行焊接,光斑直径为 0.6 mm,焦距为 330 mm,保护气体为 50%Ar+50%He (50%为对应组分所占的体积分数)。图 5 所示是焊接功率为 3.0 kW、速度为 3.2 m/min 时,激光搭接焊 2lap2 得到的实际焊缝截面图。

根据该焊缝截面图以及对热源模型参数中比例系数的分析,确定 CO₂ 激光焊的热源比例系数为 0.85。采用设定的包括比例系数在内的 5 个热源参数,进行了不同厚度及不同热输入的模拟分析,两种典型的焊缝形状对比如图 6 所示。从图中可以看出,无论是 2lap2 还是 0.8lap2,模拟和试验的焊缝截面形状均符合得很好,说明采用的热源模型和参数的设置是合理准确的。更多条件下的焊缝熔宽及熔深值对比见表 3,为减小焊接变形对焊缝表征参数的影响,试验焊缝的选取位置为熔宽稳定且上下板结合较好的部位。可以认为,采用此复合热源模型,可以准确预测不同规格的搭接试板在不同热输入条件下的焊缝熔宽和熔深值。

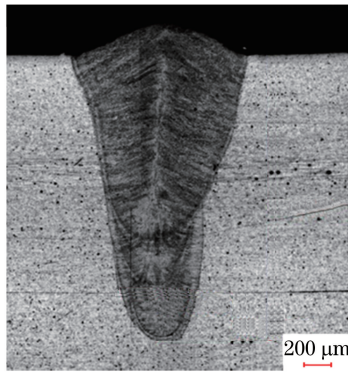


图 5 2lap2 搭接焊缝形状图

Fig. 5 Weld shape of lap welding of 2lap2

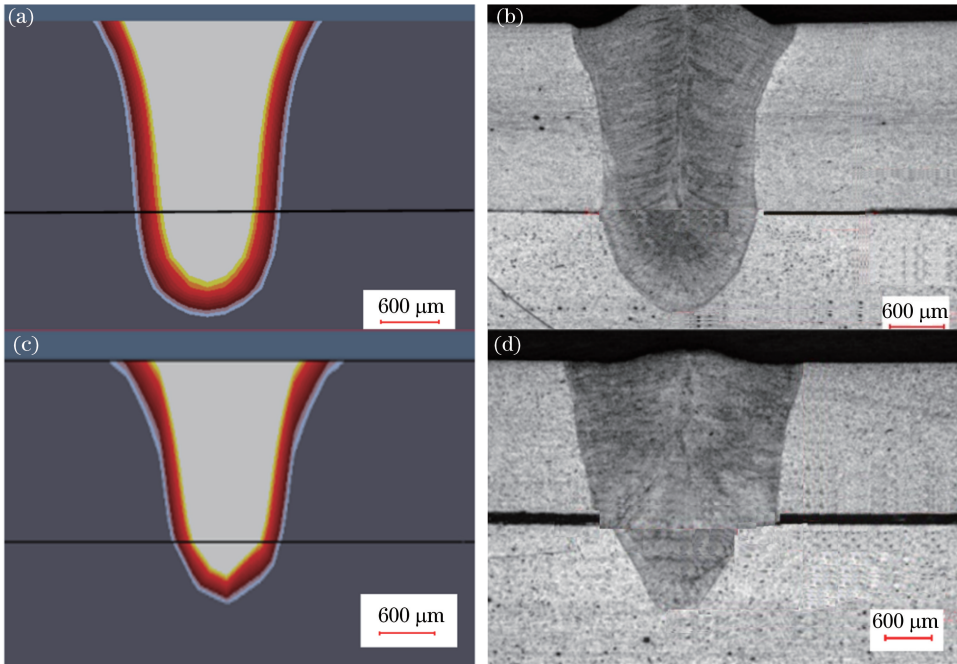


图 6 CO₂ 激光焊接下焊缝形状模拟和试验结果。(a) 2lap2, 模拟; (b) 2lap2, 试验; (c) 0.8lap2, 模拟; (d) 0.8lap2, 试验

Fig. 6 Simulated and experimental results of weld shape under CO₂ laser welding. (a) 2lap2, simulation;

(b) 2lap2, experiment; (c) 0.8lap2, simulation; (d) 0.8lap2, experiment

表 3 搭接焊缝形状表征参量的模拟和试验结果比较

Table 3 Comparison between simulated and experimental results of characterization parameters of lap weld shape under lap welding

Plate thickness /mm	Welding power P /kW	Welding speed v /(m/min)	Simulation		Experiment	
			Middle weld width /mm	Weld penetration /mm	Middle weld width /mm	Weld penetration /mm
0.8+2	1.75	3.30	0.84	1.39	0.83	1.26
1.5+2	3.05	3.75	0.66	2.07	0.69	2.10
2+2	3.00	3.20	0.70	2.58	0.68	2.43
3+2	3.80	2.90	0.77	4.05	0.64	3.96

3.3.2 光纤激光焊接

光纤激光焊采用德国 IPG 公司生产的 YLR-10000 多模光纤激光器,定位和焊接操作由配套的 KUKA 机器人执行,光斑直径为 0.6 mm,焦距为 300 mm。氩气保护,流量为 20 L/min,30°后吹。针对目前不锈钢动车车体侧墙搭接组合焊接试板的厚度(0.8lap2,1.5lap1.5,1.5lap2 和 2lap2),本次试验采用 3 mm 厚的试

板进行激光焊工艺模拟和试验研究。根据实际得到的非熔透焊缝截面形状,确定光纤激光焊模拟仿真的热源模型比例系数为 0.70,而其余 4 个热源参数与 CO₂ 激光焊的设置保持一致。通过改变焊接功率或焊接速度,或保持两者比值不变来研究不同焊接工艺参数对焊缝形状的影响规律。

图 7 是光纤激光焊两种热输入条件下模拟和试验得到的焊缝形状的比较。从图中可以看出,与 CO₂ 激光焊方法一样,光纤激光焊的模拟仿真和实际焊接的焊缝形状符合得较好。可以认为,采用的复合热源模型不仅可以准确描述某种激光焊接方法下不同焊接参数对焊缝形状的影响规律,还可以正确模拟不同激光焊接方法下的焊缝形状。

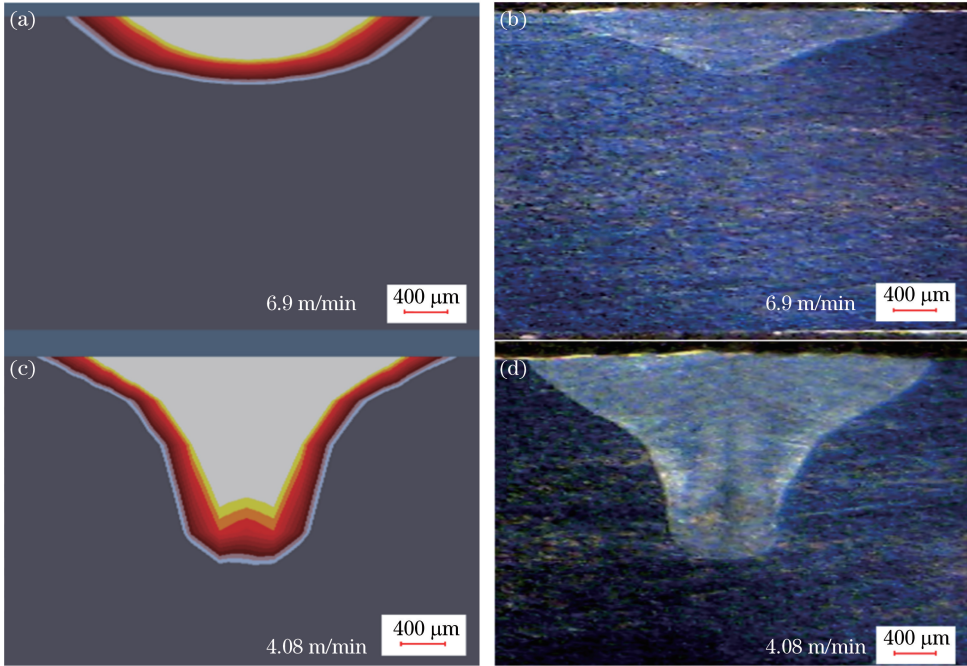


图 7 焊接功率为 1.3 kW 时,光纤激光焊焊缝形状(a)(c)模拟和(b)(d)试验结果
Fig. 7 (a)(c) Simulated and (b)(d) experimental results of weld shape under fiber laser welding when welding power is 1.3 kW

表 4 给出了 3 mm 厚试板非熔透光纤激光焊接下焊缝形状表征参量的模拟和试验结果,此处熔宽值取自试板中间厚度的焊缝宽度,可以近似代表 1.5lap1.5 搭接试板的熔宽情况。从表 4 中可以看出,当焊接速度相同时,随着功率的增大,激光焊接从传热焊向深熔焊转化,熔深明显增大;同样,当焊接功率相同时,随着速度的减小,熔深和熔宽均增大。在相同热输入而功率与速度成正比变化的情况下,缝宽几乎不变,熔深和熔宽随功率和速度的增大而呈增大趋势。上述结果符合一般规律。

4 结 论

根据不锈钢薄板非熔透激光搭接焊的工艺特点,针对 CO₂ 激光焊和光纤激光焊两种方法,采用高斯+柱状复合热源模型,通过改变焊接工艺参数和搭接板厚度,进行相应的模拟仿真和试验对比研究,得到以下结论:

- 1) 采用的高斯+柱状复合热源模型和有限元网格划分策略,可以准确描述不锈钢非熔透激光搭接焊全参数范围的焊缝形状,包括传热焊的碗型焊缝和深熔焊的钉子型或柱形焊缝;
- 2) 通过将热源比例系数分别设置为 0.85(CO₂ 焊)和 0.70(光纤激光焊),同时准确设置其余 4 个参数(高斯热源半径和深度,柱状热源半径和深度),可以正确表征描述搭接焊缝形状的三个参量:表面缝宽、中间熔宽和熔深,模拟仿真结果与试验结果符合得很好;
- 3) 该模拟仿真方法可以用来系统分析和预测 CO₂ 激光焊和光纤激光焊两种方法下焊接功率和速度对不同厚度搭接接头焊缝形状的影响规律,为实际生产的工艺参数制定提供了参考。

表 4 非熔透激光焊缝形状表征参量的模拟和试验结果对比

Table 4 Comparison between simulated and experimental results of weld shape characterization parameters under non-penetration laser lap welding

Welding parameter		Simulation			Experiment		
Power / kW	Speed / (m/min)	Surface seam width /mm	Middle width /mm	Penetration / mm	Surface seam width /mm	Middle width /mm	Penetration / mm
1.3		1.63		0.70	1.46		0.64
1.6		1.77		1.09	1.58		1.06
1.9		1.91		1.32	1.76		1.33
2.2	3.00	1.96	0.58	2.00	1.81	0.54	2.02
2.5		2.10	0.63	2.36	2.09	0.68	2.38
2.8		2.25	0.60	2.68	2.37	0.65	2.65
	6.90	1.67		1.09	1.67		1.12
	5.64	1.85		1.33	1.82		1.32
	4.74	1.99	0.38	1.65	1.97	0.45	1.64
3.0	4.08	2.10	0.63	2.00	2.00	0.84	1.92
	3.60	2.18	0.65	2.48	2.21	0.64	2.38
	3.18	2.28	0.69	2.69	2.25	0.54	2.66
1.6	1.92	2.15		1.44	2.11		1.46
1.9	2.28	2.12	0.48	1.71	2.03	0.47	1.72
2.2	2.64	2.10	0.52	2.17	2.05	0.56	2.21
2.8	3.36	2.17	0.72	2.36	2.07	0.64	2.34
3.2	3.84	2.21	0.67	2.48	2.15	0.69	2.44
3.5	4.20	2.25	0.74	2.38	2.02	0.85	2.31

参 考 文 献

[1] Tang Duo, Wang Chunming, Tian Man, *et al.* Contrasting study on quality of SUS301L-HT joints in fiber laser welding and MIG welding[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0703003.
唐 舵, 王春明, 田 曼, 等. SUS301L-HT 不锈钢激光焊接与 MIG 焊接对比试验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0703003.

[2] Li Yajiang, Wang Juan, Xia Chunzhi. Special welding technology and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 16-50.
李亚江, 王 娟, 夏春智. 特种焊接技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 16-50.

[3] Zhu Lihong. Study on effects of laser welding heat input on microstructures and properties of stainless steel joints[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 23-31.
朱立红. 激光焊接线能量对不锈钢接头组织及性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 23-31.

[4] Li Geng, Zhang Lin, Gao Ming, *et al.* Influence of shielding gas on fiber laser welding of stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(23): 126-129.
李 耿, 张 林, 高 明, 等. 保护气体对不锈钢光纤激光焊接的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23): 126-129.

[5] Chen Genyu, Kang Bin, Zhang Yi, *et al.* Effects of incident angle on welding performance of fiber laser butt welding of high-strength automobile steel[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103008.
陈根余, 康 斌, 张 屹, 等. 光纤激光入射角对高强度对接焊焊接性能的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103008.

[6] Zou Jianglin. Investigation on characterization of deep penetration welding with high power fiber laser welding[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 19-28.
邹江林. 高功率光纤激光深熔焊接特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 19-28.

[7] Han Ning, Zhang Huanzhen, Xiao Rongshi, *et al.* Threshold characterization for laser penetration welding[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 311-315.
韩 宁, 张寰臻, 肖荣诗, 等. 激光深熔焊接阈值表征及特性[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 311-315.

[8] Xia Shengquan, He Jianjun, Wang Wei, *et al.* Simulation of three-dimensional transient behavior of molten pool in

- laser deep penetration welding[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1102004.
- 夏胜全, 何建军, 王 巍, 等. 激光深熔焊熔池三维瞬态行为数值模拟[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1102004.
- [9] Kroos J, Gratzke U, Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(3): 474-480.
- [10] Dowden J, Kapadia P. A mathematical investigation of the penetration depth in keyhole welding continuous CO₂ laser [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(11): 2252-2261.
- [11] Shi Chunyuan, Gu Guochen, Wang Hongxiao, *et al.* Heat source model for partial penetration lap welding of stainless steel railway vehicles[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(5): 82-85.
- 史春元, 顾国晨, 王洪潇, 等. 不锈钢车体非熔透激光搭接焊热源模型[J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 82-85.
- [12] Liu Jia. Research on laser lap welding technology of SUS301L austenitic stainless steel for railway vehicles [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 23-47.
- 刘 佳. 轨道客车用 SUS301L 奥氏体不锈钢激光叠焊技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 23-47