

不锈钢薄板激光搭接焊接头的力学性能

梁行^{1,2}, 阚盈¹, 姜云禄¹, 陈怀宁¹

¹中国科学院金属研究所材料特种制备与加工研究部, 辽宁 沈阳 110016;

²中国科学技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110016

摘要 通过激光搭接焊试验,研究了不同接头试样的拉伸剪切性能和疲劳性能,结合焊缝横截面及断口形貌,对试验结果进行了分析。结果表明,对于宽度为 80 mm 的非熔透型接头,残余应力导致接头拉剪强度减小 4.1%,疲劳极限值减小 26.4%;0.2 mm 搭接间隙使得接头的拉剪强度减小 8.8%,疲劳极限值减小 6.25%;20°激光斜入射使得接头的拉剪强度增大 3.8%,疲劳极限值增大 18.7%。对于相同板厚组合,母材的冷轧状态对接头的力学性能会有一定的影响。

关键词 激光技术; 拉剪强度; 疲劳性能; 入射角; 搭接间隙

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0602001

Mechanical Properties of Laser Overlap Welded Joints of Stainless Steel Sheets

Liang Hang^{1,2}, Kan Ying¹, Jiang Yunlu¹, Chen Huaining¹

¹Department of Material Special Preparing and Processing Technology, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

²School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang, Liaoning 110016, China

Abstract By the laser overlap welding experiments, the tensile-shear and fatigue properties of different joint specimens are investigated and the experimental results are analyzed by combining the weld cross-sections and fracture morphologies. The results show that, as for the non-penetrating joint with a width of 80 mm, the residual stress makes the tensile-shear strength decrease by 4.1% and the fatigue limit value decrease by 26.4%. The 0.2 mm overlap gap makes the tensile-shear strength of the joint decrease by 8.8% and the fatigue limit value decrease by 6.25%. The incidence angle of 20° makes the tensile-shear strength of the joint increase by 3.8% and the fatigue limit value increase by 18.7%. As for the same thickness combination, the cold rolling state of base metals has a certain impact on the mechanical properties of joints.

Key words laser technique; tensile-shear strength; fatigue property; incidence angle; overlap gap

OCIS codes 350.3390; 140.3510; 160.3900

1 引 言

SUS301L 系超低碳不锈钢车体具有性能优异、后期综合维护成本低等优势,广泛应用于高速轨道客车。激光连续焊具有能量密度高、焊接速度快、密封性好等优点^[1-2],在侧墙薄板结构组焊过程中可弥

补电阻点焊的不足。熔透型和非熔透型激光搭接焊接头已成为不锈钢车体侧墙典型的接头形式。

为了确保车体侧墙焊接结构的承载能力和服役寿命,激光搭接焊接头的力学性能尤为重要^[3]。目前,国内外对不锈钢激光焊的工艺参数、微观组织和力学性能开展了数值模拟和试验研究^[4-14]。唐舵

收稿日期: 2017-11-03; 收到修改稿日期: 2017-12-01

作者简介: 梁行(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光焊接工艺及焊接接头性能方面的研究。

E-mail: hliang15s@imr.ac.cn

导师简介: 陈怀宁(1962—),男,博士,研究员,硕士生导师,主要从事焊接工艺对接头性能与残余应力影响方面的研究。

E-mail: hnchen@imr.ac.cn(通信联系人)

等^[9]明确了采用激光技术焊接不锈钢的质量优势;韩晓辉等^[10]建立了同时适用于不锈钢薄板 CO₂ 和光纤激光搭接焊的热源模型;Khalid 等^[11]研究了 AISI304 不锈钢光纤激光焊接的工艺参数问题;Kuryntsev 等^[12]研究了不同离焦量下激光束对不锈钢焊接接头质量的影响;Erdem 等^[13]研究了不锈钢激光焊接头的微观组织及力学性能。在考虑残余应力条件下,进一步开展关于入射角、搭接间隙、母材强度等因素对接头力学性能影响的研究具有十分重要的意义。

关于不锈钢薄板激光搭接焊接头,阚盈等^[15-16]认为,考虑全部残余应力影响时,制备的试样至少为 80 mm 宽;不考虑残余应力时,试样宽度至多为

表 1 SUS301L 板材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of SUS301L plate (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Fe
Value	0.02	0.43	1.08	0.04	0.003	7.10	17.70	0.02	Bal.

表 2 SUS301L 板材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of SUS301L plate

Material type	Yield strength / MPa	Tensile strength / MPa	Elongation / %	Fatigue limit / MPa
DLT	>350	>700	43.2	265.8
ST	>420	>770	35.0	287.5
MT	>420	>420	30.0	319.2
HT	>700	>950	27.4	359.0
2G	>350	>750	35.0	300.0

10 mm,并排除了尺寸因素对力学性能的影响。本文根据客车侧墙薄板实际应用情况,研究了残余应力、激光入射角、搭接间隙等因素对激光搭接焊接头拉剪强度和疲劳强度的影响,结合接头的焊缝横截面和断口形貌,分析了不同参数影响接头性能的机理。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料与装置

采用不同厚度和冷轧状态的 SUS301L 不锈钢薄板作为试验材料,包括了 DLT、ST、MT、HT 和 EN 1.4318-2G(2G)型号,其化学成分和力学性能见表 1、2。

采用德国 IPG 公司生产的 YLR-10000 多模光纤激光器进行焊接试验,最大输出功率为 10 kW,激光波长为 1.07 μm,传输光纤芯径为 400 μm,聚焦透镜焦距为 300 mm,光斑直径为 0.6 mm,离焦量为 0^[17]。选择流量为 13 L·min⁻¹ 的氩气作为保护气体,45° 倾斜前吹,管径为 8 mm,管口距焊接件 15 mm。焊接试验装置如图 1 所示。定义激光束与搭接板法线方向夹角为激光入射角,定位和焊接操作由配套的六轴联动 OTC 机器人执行。

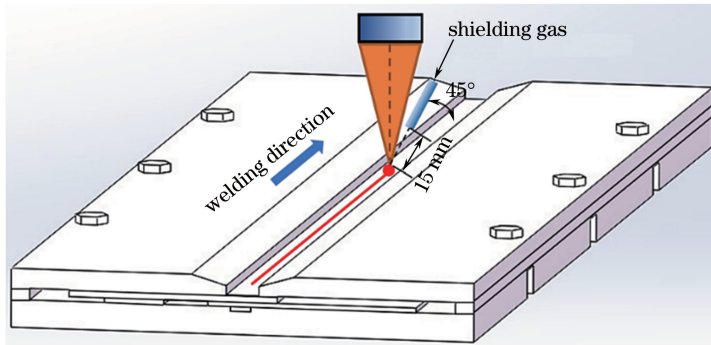


图 1 焊接试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

2.2 试验方案

采用自制夹具夹紧搭接试板,试板规格为 550 mm×90 mm×*t*,其中 *t* 为板厚度,搭接部分宽度为 30 mm。采用在搭接界面加间隙片的方式进行预置搭接,各组激光搭接焊试验的工艺参数见表 3。其中,2# 接头为熔透型搭接焊接头,其他接头为非熔透型搭接焊接头。

激光焊接长焊缝时,激光能量的波动可能会造成焊缝熔宽和熔深的不稳定。因此,取样前先确保每组试样的搭接焊缝有较为稳定的熔宽和熔深。采用线切割的方式垂直于焊缝制备 10 mm 和 80 mm 宽度的拉伸剪切和疲劳试样,试样示意图如图 2 所示。然后,为试验中的试样添加相应厚度垫板,以防止试验过程中产生偏心,如图 3 所示。

表 3 焊接试验工艺参数

Table 3 Process parameters in welding experiments

Sample No.	Plate thickness /mm	Incidence angle /($^{\circ}$)	Gap /mm	Laser power /kW	Welding speed /($m \cdot min^{-1}$)
1#	3(MT)+2(2G)	0	0	5.5	3.8
2#	1.5(HT)+0.8(DLT)	0	0	3.6	3.5
3-1#	2(2G)+2(2G)	0	0	3.8	3.6
3-2#	2(2G)+2(2G)	0	0.2	3.8	3.6
3-3#	2(2G)+2(2G)	20	0	3.8	3.6
4#	1.5(HT)+2(2G)	0	0	3.1	3.3
5#	1.5(ST)+2(2G)	0	0	3.1	3.3

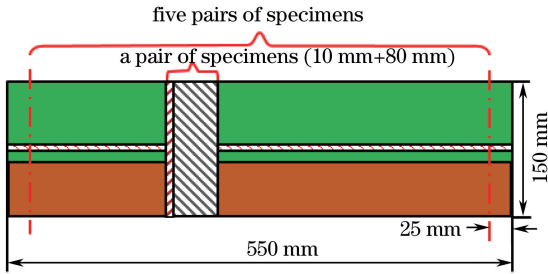


图 2 试样制取示意图

Fig. 2 Schematic of specimen preparation

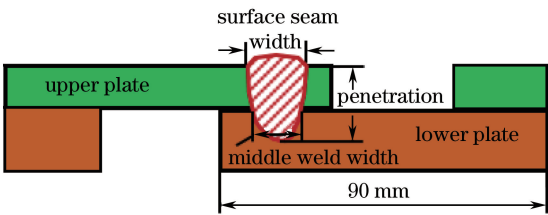


图 3 焊缝形貌示意图

Fig. 3 Schematic of weld morphology

采用电子万能试验机进行拉伸剪切试验,采用电液伺服万能材料试验机进行拉-拉剪切疲劳试验,载荷作等幅正弦变化,应力比为 0.1,试验频率为 40 Hz,设定疲劳极限的循环周次为 10^7 。使用光学显微镜观察焊缝横截面,采用扫描电镜进行断口分析。

搭接试样的残余应力测量位置为上下板的焊缝中心,采用全释放应变法^[18]。测试得到的残余应力数值反映的是切割区域内的平均值,因此,测量得到的应力数值偏小于表面真实值。

3 试验结果与分析

3.1 激光搭接焊接头宏观形貌

激光搭接焊接头焊缝形貌如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,非熔透型搭接焊接头的上表面呈平直分布的鱼鳞纹,熔合线附近有轻微烧灼;搭接接头下板表面呈无色或浅黄色状态。从图 4(b)可知,高能量密度产生了激光深熔焊机制下的“匙孔”效

应,非熔透型激光搭接焊可以获得具有较大深宽比的接头。焊接参数的差异使得非熔透型焊缝横截面呈典型的“花瓶”状或“钉子”状。图 4(c)所示的熔透型焊缝的上表面宏观形貌与非熔透型焊缝的相近,下表面则出现飞溅现象。熔透型焊缝横截面呈“沙漏”状,在搭接界面处焊缝形状变化明显。

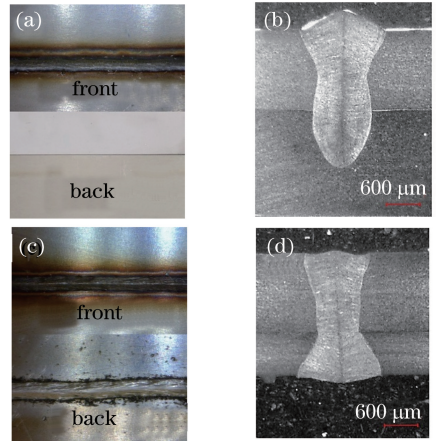


图 4 (a) 3-1# 接头表面形貌;(b) 3-1# 焊缝截面;
(c) 2# 接头表面形貌;(d) 2# 焊缝截面

Fig. 4 (a) Surface morphology of 3-1# joint; (b) cross section of 3-1# weld; (c) surface morphology of 2# joint; (d) cross section of 2# weld

3.2 接头拉伸剪切与疲劳试验

3.2.1 残余应力对接头力学性能的影响

以 1# 和 2# 接头试样为研究对象,研究残余应力对接头拉剪强度和疲劳性能的影响,在考虑和不考虑残余应力影响条件下,试样宽度分别为 80 mm 和 10 mm。随机选择一个宽度为 80 mm 的试样,在焊缝上、下表面测量焊接残余应力数值,将沿焊缝方向的应力称为纵向应力 σ_x ,垂直于焊缝方向的应力称为横向应力 σ_y 。

分别测量拉断后每个试样两板结合处的中间熔宽值,试样的拉剪强度 τ 为

$$\tau = F_m / (a \cdot l), \quad (1)$$

式中 F_m 为拉断过程中最大的作用力; a 为两板结合

处的中间熔宽值; l 为试样宽度。疲劳试样焊缝的中间熔宽值无法准确测量,以单位长度上载荷幅值

$\Delta F/l$ 为纵坐标,循环周次 N 为横坐标绘制疲劳曲线,结果如图 5 所示。

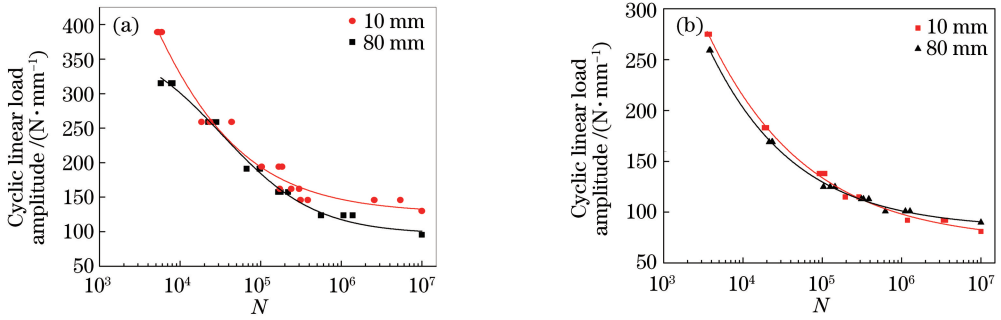


图 5 不同宽度试样的疲劳测试曲线。(a) 1#;(b) 2#

Fig. 5 Fatigue test curves of specimens with different widths. (a) 1#; (b) 2#

激光搭接焊接头拉剪测试的结果见表 4。可以看出,在非熔透型和熔透型接头焊缝中,存在超过 250 MPa 或 360 MPa 的纵向残余应力,接头的拉剪

强度减小了 4.1%。在非熔透型接头中,残余应力对接头疲劳性能的影响较大,其条件疲劳极限值减小了 26.4%,而在熔透型接头中残余应力的影响较小。

表 4 1#、2#接头的拉剪试验结果

Table 4 Tensile-shear test results of 1# and 2# joints

Sample No.	Specimen width /mm	Average tensile-shear strength /MPa	σ_x /MPa		σ_y /MPa	
			Upper plate weld seam	Lower plate weld seam	Upper plate weld seam	Lower plate weld seam
1#	10	736	0	0	0	0
	80	706	252	155	-21	-12
2#	10	596	0	0	0	0
	80	542	367	237	-39	-5

由于拉剪试样两板结合处的中间熔宽值小于搭接板厚度,因此,熔透型和非熔透型接头均从搭接界面的焊缝处被拉断。不同类型的疲劳试样断裂情况不同:非熔透型搭接焊接头的疲劳裂纹在焊缝与上、下板相交处萌生,沿下板厚度方向扩展的疲劳纹导致接头断裂失效;熔透型搭接焊接头的裂纹从焊缝与上、下板相交处萌生,沿上板厚度方向扩展的疲劳纹导致接头断裂失效。

不同,但均存在较大的纵向残余拉应力和较小的横向残余压应力。

激光搭接焊接头除了受到加载应力及弯曲应力外,还受到较大的纵向残余应力,因此,焊缝附近材料由含两轴应力的平面应力状态转变为含三轴应力的平面应变拘束状态,造成材料的塑性变形能力减小,这可能是残余应力导致接头拉剪强度和疲劳性能降低的主要原因。

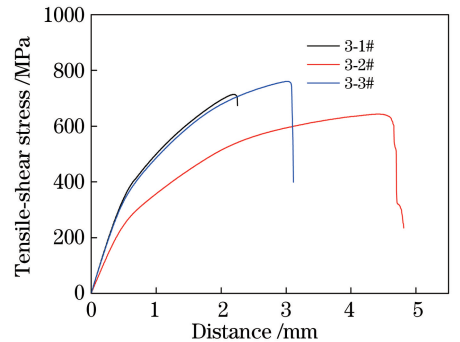


图 6 非熔透型接头的拉伸性能测试结果

Fig. 6 Tensile-shear test results of non-penetration joints

3.2.2 入射角、搭接间隙对非熔透型接头性能的影响

以 3-1#、3-2#、3-3# 试样为研究对象,研究入射角、搭接间隙对非熔透型接头的拉剪强度和疲劳性能的影响,疲劳性能曲线如图 6、7 所示,拉剪试验结果见表 5。由表 5 可以看出,当激光入射角或搭接间隙不同时,80 mm 宽试样包含的焊接残余应力

当激光入射角为 20°时,3-3# 试样的拉剪强度增大了 3.8%,接头的塑性变形能力增大;而当搭接间隙为 0.2 mm 时,3-2# 试样的拉剪强度减小了 8.8%,但接头的变形能力增大。

接头拉剪试样的断口形貌如图 8 所示。3-1# 试样的断口无明显韧窝,呈解理断裂特征;3-2# 试样的断口呈大面积且深的韧窝,说明接头具有很大

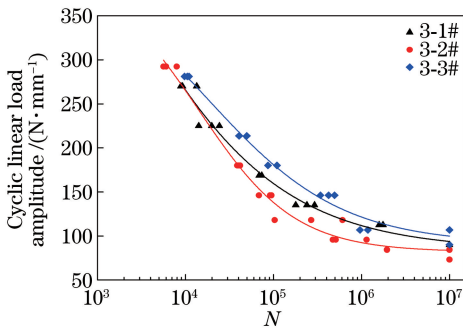


图 7 80 mm 宽的非熔透接头的疲劳性能测试结果

Fig. 7 Fatigue performance test results of non-penetration joint with a width of 80 mm

表 5 3-1#、3-2#、3-3# 试样的拉剪试验结果

Table 5 Tensile-shear test results of 3-1#, 3-2#, and 3-3# specimens

Sample No.	Specimen width /mm	Average tensile-shear strength /MPa	σ_x /MPa		σ_y /MPa	
			Upper plate weld seam	Lower plate weld seam	Upper plate weld seam	Lower plate weld seam
3-1#	80	736	206	206	-36	-10
3-2#	80	671	196	155	14	-73
3-3#	80	764	147	147	-84	-42

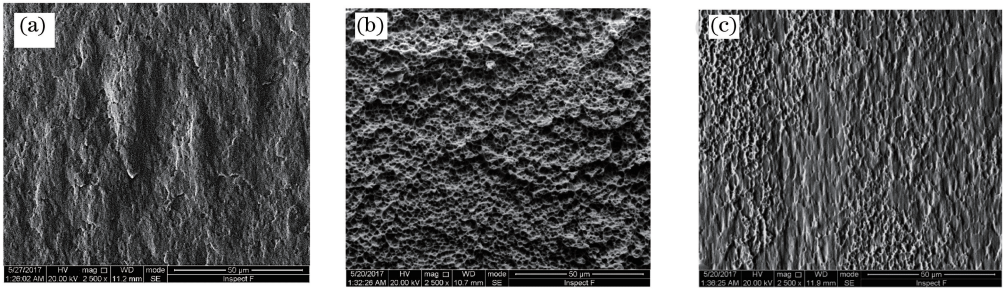


图 8 不同试样的拉剪断口形貌。(a) 3-1#;(b) 3-2#;(c) 3-3#

Fig. 8 Shear-fracture morphologies of different specimens. (a) 3-1#; (b) 3-2#; (c) 3-3#

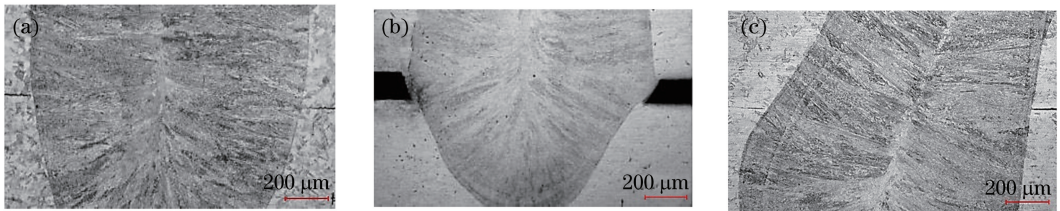


图 9 不同试样的焊趾形状。(a) 3-1#;(b) 3-2#;(c) 3-3#

Fig. 9 Weld toe shapes of different specimens. (a) 3-1#; (b) 3-2#; (c) 3-3#

三种界面处焊趾形状的受力示意图如图 10 所示,其中上下板间的间隙有所放大。当上板受到向左拉伸(疲劳)载荷、下板受到向右拉伸(疲劳)载荷时,3-1#试样间隙处的裂纹萌生位置为焊趾 A 或 B,并且 A、B 处激光焊缝与搭接界面成大于 90°的钝角;而 3-2#试样搭接界面处存在较大缝隙,融化

的延伸率,但材料约束能力的下降导致其拉剪强度减小;3-3#试样的断口为拉伸撕扯型伸长韧窝,表明接头塑性变形能力增大。

从图 7 可以看出,20°激光入射角下接头疲劳强度比 0°激光入射角下的显著增大,条件疲劳极限增大了约 18.7%,弥补了残余应力产生的不利影响;对于搭接间隙为 0.2 mm 的接头,疲劳性能恶化严重,条件疲劳极限值减小了 6.25%。进一步试验结果表明,这一现象同样存在于其他类型的接头组合中。

不同试样的焊趾形状如图 9 所示。

的焊缝金属沿间隙向两侧流出,A、B 处焊缝与搭接界面成小于 90°的锐角;对比 3-3#试样和 3-1#试样间隙可知,20°激光入射角下 3-3#试样的 A、B 处焊缝与搭接界面呈更大钝角。尖角容易造成大的应力集中,促使疲劳裂纹的萌生;钝角下应力集中程度较小,疲劳裂纹的萌生相对不易。

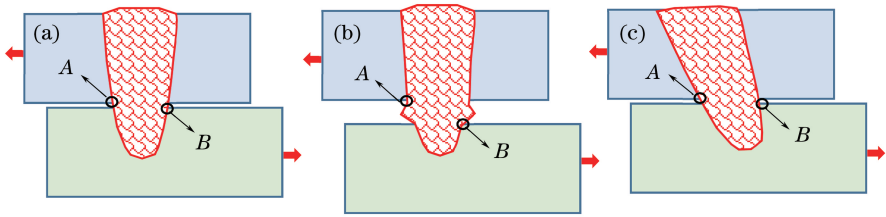


图 10 不同焊趾形状的受力示意图。(a) 3-1# ;(b) 3-2# ;(c) 3-3#

Fig. 10 Schematics of stress on weld toes with different shapes. (a) 3-1# ; (b) 3-2# ; (c) 3-3#

3.2.3 材料强度对非熔透型接头性能的影响

SUS301L 系超低碳奥氏体不锈钢经冷轧加工后,屈服强度、抗拉强度以及疲劳极限会相应增大^[19],如 HT 型不锈钢强度大于 ST 型,ST 型具有更好的延展性。以 4# 和 5# 接头试样为研究对象,

分析母材强度对非熔透型接头拉剪强度和疲劳性能的影响,拉剪试验结果见表 6,疲劳性能测试结果如图 11、12 所示。高硬化率的 HT 型试样的焊接残余应力比低硬化率的 ST 型试样增大了 30%。

表 6 4#、5# 试样的拉剪测试结果

Table 6 Tensile-shear test results of 4# and 5# specimens

Sample No.	Specimen width /mm	Average tensile-shear strength /MPa	σ_x /MPa		σ_y /MPa	
			Upper plate weld seam	Lower plate weld seam	Upper plate weld seam	Lower plate weld seam
4#	80	804	303	168	-73	-54
5#	80	764	236	185	-32	-48

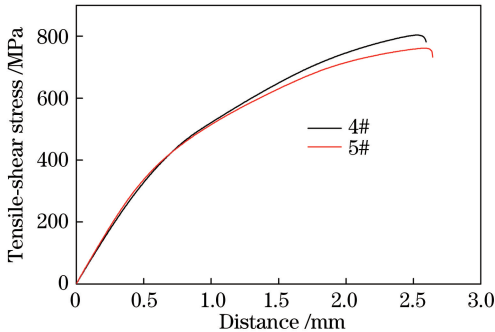


图 11 同母材接头的拉伸性能测试结果

Fig. 11 Tensile performance test results of joints with different base metals

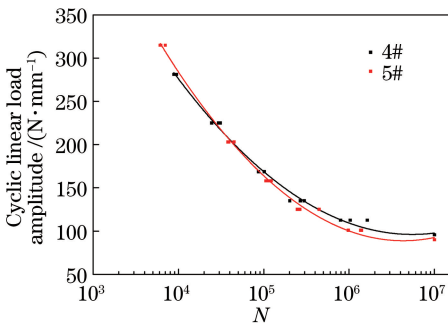


图 12 不同母材接头的疲劳性能测试结果

Fig. 12 Fatigue performance test results of joints with different base metals

从表 6 可以看出,当激光入射角和搭接间隙相同时,随着母材强度的增大,即使残余应力的影响增大,搭接接头的拉剪强度仍然增大。从图 11 可以看出,尽管 ST 型不锈钢板具有更好的延展变形性能,但搭接接头的塑性变形能力没有增大。对于疲劳性能,在高应力等级下,母材强度对搭接接头疲劳寿命无明显影响;在条件疲劳极限或较低应力等级下,与拉剪强度相似,尽管残余应力的影响增大,但接头的疲劳性能随着母材强度的增大仍有一定程度的增大。

4 结 论

通过激光搭接焊试验,研究了不同接头试样的拉伸剪切性能和疲劳性能,并分析了焊缝的断裂机理,得到以下结论。

1) 高值焊接残余应力减小了激光搭接焊接头的拉剪强度和疲劳强度,非熔透型接头更为明显。

2) 当接头中存在残余应力时,20°激光入射角可以增大非熔透型接头的拉剪和疲劳强度,拉剪断口形貌呈撕扯状切窝;0.2 mm 的搭接间隙会导致接头强度减小,但拉剪时的延伸率增大,断口呈大面积且深的切窝。

3) 母材强度越大,激光搭接焊接头的拉剪强度和低应力疲劳载荷情况下的接头疲劳强度越大。

参 考 文 献

- [1] Shi C Y, Gu G C, Wang H X, *et al.* Heat source model for partial penetration lap laser welding of stainless steel railway vehicles [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(5): 85-88.
史春元, 顾国臣, 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): 85-88.
- [2] Mei L F, Yan D B, Chen G Y, *et al.* Comparative study on CO₂ laser overlap welding and resistance spot welding for automotive body in white [J]. Materials and Design, 2015, 78: 107-117.
- [3] Fang H Y. Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 56-57.
方洪渊. 焊接结构学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 56-57.
- [4] Takashiroyuki M. Laser welding techniques of stainless steel vehicle body [J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 2007(5): 4-5.
- [5] Zhou Y, Cai Y, Heng H K, *et al.* Influence of side assist gas on microstructure and corrosion resistance of welds of austenitic stainless steel in laser welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0502005.
周媛, 蔡艳, 衡昊坤, 等. 侧吹气体对奥氏体不锈钢激光焊缝组织和耐腐蚀性能的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0502005.
- [6] Liu J. Research on laser lap welding technology of SUS301L austenitic stainless steel for railway vehicles [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 1-11.
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: 1-11.
- [7] Xing M Q, Li Z G, Sun J H, *et al.* Effect of small diameter side-blown gas flow on fiber laser welding of medium and heavy plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302012.
邢孟琪, 李铸国, 孙军浩, 等. 细管径侧吹气体流量对光纤激光中厚板焊接的影响 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302012.
- [8] Li Z J, Lü J X, Zou J L, *et al.* Microstructure and mechanical property of joints in laser welding of stainless steels with nitrogen shielding gas [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202006.
李竹洁, 吕俊霞, 邹江林, 等. 氮气保护不锈钢激光焊接接头组织及力学性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202006.
- [9] Tang D, Wang C M, Tian M, *et al.* Contrasting study on quality of SUS301L-HT joints in fiber laser welding and MIG welding [J]. Chinese Journal of 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.
- [10] Han X H, Chen J, Kan Y, *et al.* Heat source model for non-penetration laser lap welding of stainless steel sheets [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0502002.
韩晓辉, 陈静, 阚盈, 等. 不锈钢薄板非熔透激光搭接焊热源模型 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0502002.
- [11] Khalid M H, Katayama S. Fiber laser welding of AISI 304 stainless steel plates [C]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2009, 27(2): 69-73.
- [12] Kuryntsev S V, Gilmudtinov A K. Welding of stainless steel using defocused laser beam [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 305-313.
- [13] Erdem M, Altug M, Karabulut M. Investigation of mechanical, microstructural, and machining properties of AISI 420 martensitic stainless steel welded by laser welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1/2/3/4): 481-492.
- [14] Liu J, Shi Y, Liu J, *et al.* Effect of shielding gas on laser welding of austenitic stainless steel [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 051402.
刘键, 石岩, 刘佳, 等. 保护气体对奥氏体不锈钢激光焊接的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 051402.
- [15] Liang H, Jiang Y L, Chen H N, *et al.* Effect of residual stress on mechanical properties of sheet laser overlap welding joints [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(10): 112-116.
梁行, 姜云禄, 陈怀宁, 等. 残余应力对薄板激光搭接接头力学性能影响 [J]. 焊接学报, 2017, 38(10): 112-116.
- [16] Zhao R R, Kan Y, Jiang Y L, *et al.* Standardized width of tensile and fatigue specimens of laser lap welded joints considering residual stress [J]. Welding & Joining, 2017(2): 40-43.
赵瑞荣, 阚盈, 姜云禄, 等. 考虑残余应力的激光搭接焊接接头拉伸和疲劳试样宽度标准化 [J]. 焊接, 2017(2): 40-43.
- [17] Zhu G R, Chen S, Li M M. Study on fatigue performance of stainless steel non-penetration laser lap welding of SUS301L stainless steel body [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 14-18.
朱国仁, 陈松, 李蒙蒙. SUS301L 不锈钢非熔透型激光搭接焊的疲劳特性分析 [J]. 焊接学报, 2016,

- 37(4): 14-18.
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China: GB/T 31218-2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [19] Yu M, Zhang Q D, He R Y, *et al.* Surface hardness control technique for SUS301 and SUS304 stainless strip cold rolling[J]. Iron and Steel, 2010, 45(1): 64-69.
- 于孟, 张清东, 何汝迎, 等. 冷轧 SUS301 和 SUS304 不锈钢表面硬度控制工艺优化研究[J]. 钢铁, 2010, 45(1): 64-69.