

# 301L 搭接激光焊接接头拉伸过程的弹塑性演变及断裂数值分析

郭相忠\*\*, 刘伟\*, 王昌坤, 刘慧玉, 范佳斐

北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044

**摘要** 采用数值分析方法,研究了 301L 不锈钢不同厚度板的非熔透搭接激光焊接接头在拉伸过程中的弹塑性演变、应力分布和拉伸断裂行为。建立了激光焊件的有限元模型,模拟得到的焊件拉伸曲线与实验结果有较好的一致性;随着拉伸载荷的增大,焊接试样塑性变形从靠近焊缝界面的母材向焊缝界面和母材两个方向扩展。随着焊缝熔宽/板厚比的增大,焊接试样的塑性应变区从焊缝界面附近逐渐扩展到母材内,拉伸断裂位移随着塑性变形区的增大而增大。当焊缝熔宽与板厚之比大于 0.75 时,焊件的断裂位移量大于 5 mm,焊件有较高的断裂强度,激光焊缝的剪切断裂强度约为 794 MPa。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 弹塑性演变; 拉伸断裂; 数值模拟

中图分类号 TG404

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1202003

## Numerical Analysis of Elastic-Plastic Deformation Evolution and Fracture Behavior in Tensile Process of Laser Lap Welded 301L Joints

Guo Xiangzhong\*\*, Liu Wei\*, Wang Changkun, Liu Huiyu, Fan Jiafei

School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** The elastic-plastic deformation evolution, stress distribution and tensile fracture behavior during the tensile process of laser non-penetrating lap welded joints of the 301L stainless steel plates with different thicknesses are studied by the numerical analysis methods. The finite element model of laser welded joints is established and the simulated tensile curves of welded joints are in a relatively good agreement with the experimental results. With the increase of tensile load, the plastic deformation of welded specimens extends from the base metal near the weld interface to both of the weld interface and the base metal. In contrast, with the increase of the ratio of weld width to plate thickness, the plastic strain zone of welded specimens extends gradually from the vicinity of weld interface to the base metal. The tensile fracture displacement increases with the increase of plastic deformation zone. Moreover, when the ratio of weld width to plate thickness is higher than 0.75 and the fracture displacement of welded specimens is larger than 5 mm, the fracture strength is relatively high and the shear fracture strength of laser weld is about 794 MPa.

**Key words** laser technique; laser welding; elastic-plastic deformation evolution; tensile fracture; numerical simulation

**OCIS codes** 140.3390; 000.4430; 000.2658

## 1 引言

以冷轧 301L 奥氏体不锈钢为主材制造的轨道车辆具有质量轻、运输安全以及材料可回收等优点,已被广泛应用于地铁和城际快速列车<sup>[1]</sup>。目前,奥

氏体不锈钢车体的主要焊接方法为电阻点焊<sup>[2-3]</sup>,但是电阻点焊的气密性较差,且车体表面压痕会降低车体表面耐腐蚀性。搭接非熔透激光焊接是解决车体外墙板气密性和外观质量问题的理想方法之一<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2018-06-04; 修回日期: 2018-07-23; 录用日期: 2018-07-30

基金项目: 原铁道部科技发展项目(2011J015-B)

\* E-mail: weiliu@bjtu.edu.cn; \*\* E-mail: 16116366@bjtu.edu.cn

国内外学者对激光焊接工艺进行了大量研究。陈俊科等<sup>[6]</sup>研究了激光功率和焊接速度的协同作用对 304 不锈钢激光焊接接头组织和力学性能的影响。李竹杰等<sup>[7]</sup>研究了不同氮气保护条件对 SUS301L 不锈钢激光焊缝组织、力学性能及表面抗腐蚀性能的影响。张婧等<sup>[8]</sup>研究了激光焊接工艺参数对不锈钢搭接接头组织和力学性能的影响。

焊接结构的拉伸性能是评估焊接结构质量的重要指标之一。杨武雄等<sup>[9]</sup>研究了 304 不锈钢激光焊接接头的组织及性能,研究结果表明,接头组织由奥氏体和少量铁素体组成,拉伸断裂发生在焊缝内。杨橄生等<sup>[10]</sup>研究了高强钢激光焊接三层板搭接接头的组织和拉伸性能,研究结果表明,焊接接头的力学性能主要取决于搭接界面的焊缝宽度。王晓南等<sup>[11]</sup>研究了激光焊接高强钢搭接接头的组织和拉伸性能,由于焊接接头的软化区较小,拉伸断裂发生在母材内。

搭接激光焊接接头的拉伸变形和断裂都发生在不可见的搭接界面,其过程无法通过实验方法检测,有限元数值分析是研究搭接激光焊接接头拉伸断裂过程的有效方法。刘伟等<sup>[12]</sup>采用数值模拟与实验相结合的方式,研究了激光透射焊接件拉伸过程中的应力分布和拉伸件的失效行为。Terasaki 等<sup>[13]</sup>采用弹塑性有限元模型估算了搭接接头的静载抗拉强度,与实验结果比较发现,等效塑性应变仅适用于估算母材的断裂,而焊缝的剪切断裂必须通过假设恒定剪切应力来评估。Lee 等<sup>[14-16]</sup>提出了一个非均匀的弹塑性模型来模拟高强度低合金钢(HSLA)中搭接接头的失效模式,有限元分析结果与实验结果

吻合。然而,有限元建模的主要局限是在数值分析不收敛前,数值模拟会持续进行,模拟的载荷-位移曲线是单调递增的,无法确定接头强度的最大载荷,即没有用来判定焊件失效的载荷标准。

本文以 301L-DLT 不锈钢非熔透搭接激光焊件为研究对象,采用数值分析方法研究了不同厚度板组合的非熔透搭接激光焊接接头在拉伸过程中的弹塑性演变、应力分布和拉伸断裂行为。建立了激光焊件的数值模拟模型,模拟得到了焊件的拉伸曲线,并与实验结果进行了对比验证;对拉伸过程中焊件的等效塑性应变和应力分布进行了分析,探究了拉伸过程中弹塑性演变的机理,确定了焊缝剪切失效的应力标准,得出了改善断裂塑性行为的途径。

## 2 实验和研究方法

试样材料为 301L-DLT 冷轧板材,其化学成分(质量分数)和力学性能如表 1 所示,其中  $\sigma_s$  为屈服强度,  $\sigma_b$  为强度极限,  $\delta$  为延伸率。搭接非熔透激光焊接拉伸试样的几何结构和尺寸如图 1 所示,全部熔透的上板为焊接内板,部分熔透的下板为焊接外板,部分熔透焊接的外板表面无焊接痕迹,  $t_1$  和  $t_2$  分别为焊接内板和焊接外板的厚度,  $R$  为倒角半径。为了使剪力在拉伸过程中保持同轴,在试样的两端焊接相应厚度的垫板。图 2 所示为  $0.8+2.0$  ( $t_1=0.8\text{ mm}$ ,  $t_2=2.0\text{ mm}$ ) 和  $2.0+2.0$  ( $t_1=2.0\text{ mm}$ ,  $t_2=2.0\text{ mm}$ ) 试样的激光焊缝微观结构,可以看出,激光焊接接头的热影响区很窄,接头组织致密,无焊接裂纹和气孔。焊缝与板材熔合线规则平滑,且内外板之间结合紧密无间隙。

表 1 301L-DLT 板材的化学成分和力学性能

Table 1 The chemical composition and mechanical property of 301L-DLT sheet

Sheet	Mass fraction / %									$\sigma_s$ / MPa	$\sigma_b$ / MPa	$\delta$ / %
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N				
301L-DLT	<0.03	<1.0	<2.0	<0.045	<0.03	6-8	16-18	<0.2	>350	>700	>40	

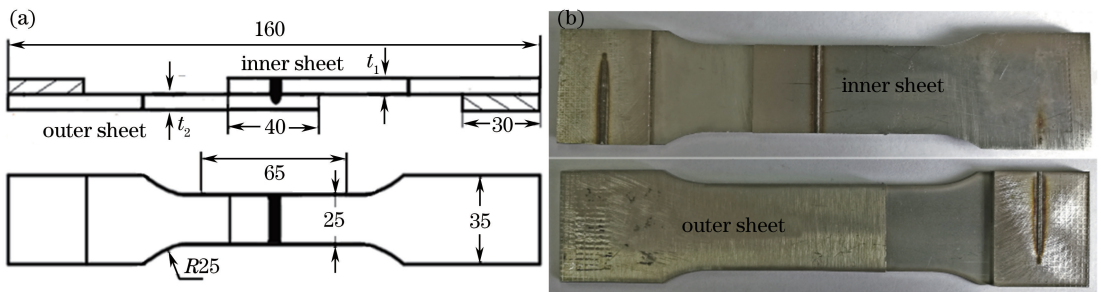


图 1 搭接激光焊接拉伸试样。(a) 尺寸; (b) 实物

Fig. 1 Laser lap welded tensile specimen. (a) Dimension; (b) real map

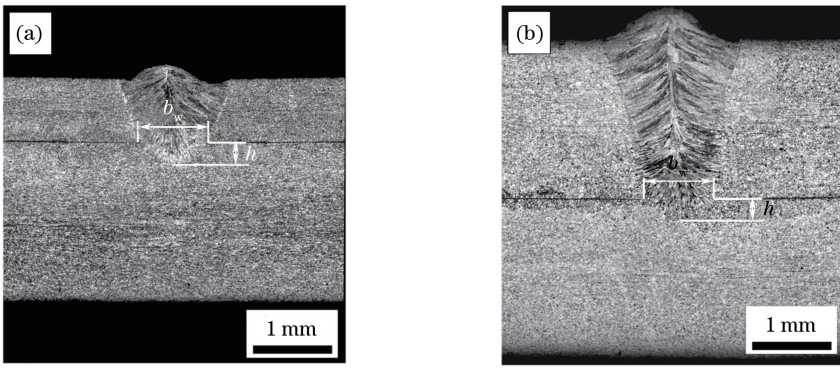


图 2 激光焊接接头的微观结构。(a) 0.8+2.0;(b) 2.0+2.0

Fig. 2 Microstructures of laser-welded joints. (a) 0.8+2.0; (b) 2.0+2.0

图 3 所示为 301L-DLT 板材搭接激光焊接接头的硬度分布曲线,301L-DLT 母材的平均硬度为 230 HV,激光焊缝的平均硬度为 215 HV。激光焊接的热影响区很窄,且硬度与母材的差别较小,故在有限元模拟中可忽略热影响区的影响。表 2 所示为两组激光焊接试样的焊缝几何尺寸,焊缝的几何尺寸如图 2 所示,其中  $b_w$  为焊缝界面熔宽, $h$  为外板焊缝熔深。

重复三次,测量结果取平均值。

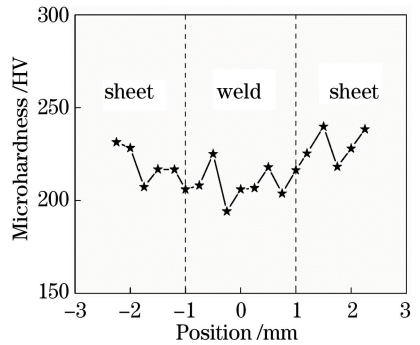


图 3 激光焊接接头的硬度分布

Fig. 3 Microhardness distribution of laser welded joints

采用美国 MTS 公司生产的 MTS-810 型材料试验机在位移控制模式下对表 2 中列出的两组焊接试样进行拉伸试验,拉伸方向与不锈钢板的轧制方向相同,拉伸速率为  $4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。每组拉伸试验

表 2 搭接激光焊接试样的焊缝几何尺寸

Table 2 Geometric size of laser lap welded specimen

Specimen	Penetrating plate	Facade plate	Interfacial weld	Weld depth of facade
	thickness $t_1$ /mm	thickness $t_2$ /mm	width $b_w$ /mm	plate $h$ /mm
0.8+2.0	0.8	2.0	0.85	0.30
2.0+2.0	2.0	2.0	0.90	0.30

### 3 实验结果

图 4 所示为 0.8+2.0 和 2.0+2.0 激光焊接试样的拉伸曲线,表 3 所示为两组拉伸试样的焊缝熔宽与板厚之比(非等厚板取较薄板的厚度,即  $b_w/t_1$ )、断裂位移、断裂载荷和断裂位置。图 5 所示为 0.8+2.0 和 2.0+2.0 试样的拉伸断裂模式,白色箭头为加载方向。可以看出,0.8+2.0 试样的断裂位移比 2.0+2.0 试样的大很多,而断裂载荷要比其小,二者的拉伸断裂模式均为焊缝剪切断裂。

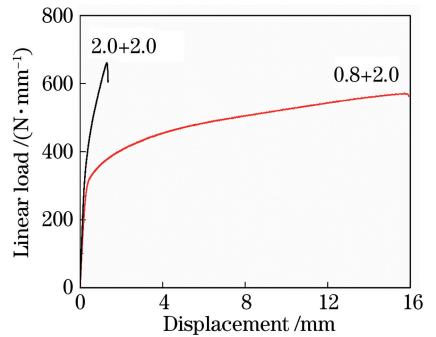


图 4 激光焊件的拉伸曲线

Fig. 4 Tensile curves of welded specimens

0.8+2.0 试样具有较大的断裂位移,这是由于其具有较大的焊缝熔宽/板厚比,断裂分析证明塑性变形主要产生于 0.8 mm 内板,如图 5(a)所示,在焊缝发生剪切断裂之前,0.8 mm 板已产生明显的伸长变形。而 2.0+2.0 试样的断裂位移很小,断裂分析

表明其塑性变形主要集中在焊缝及附近金属,且焊缝剪切断裂时板材内只有弯曲变形,未产生明显的拉伸塑性变形,如图 5(b)所示。0.8+2.0 试样的断裂载荷比 2.0+2.0 试样的小,这是由于 0.8+2.0 试

样的焊缝熔宽小于 2.0+2.0 试样的。此外,该试样 变的强化效果有限。  
 中 0.8 mm 薄板的拉伸屈服载荷较小,板材塑性应

表 3 拉伸实验结果

Table 3 Tensile experimental results

Specimen	Weld width $b_w$ /mm	$b_w/t_1$	Fracture displacement /mm	Fracture load /( $N \cdot mm^{-1}$ )	Fracture position
0.8+2.0	0.85	1.06	15.72	571.98	Weld
2.0+2.0	0.90	0.45	1.29	660.98	Weld

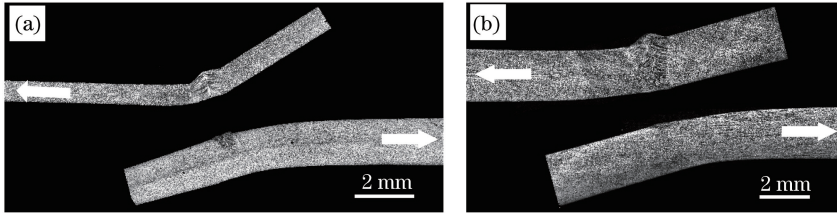


图 5 拉伸试样的断裂模式。(a) 0.8+2.0;(b) 2.0+2.0

Fig. 5 Fracture modes of tensile specimens. (a) 0.8+2.0; (b) 2.0+2.0

焊接接头的断裂模式为焊缝界面剪切断裂,焊接试样的拉伸断裂载荷随焊缝熔宽的增大而增大;焊缝熔宽/板厚比越大,其断裂位移越大,塑性能越好。

在工程应用中为了防止焊件发生脆性断裂,常常需要结构具有较大的塑性变形。而搭接激光焊接接头的拉伸变形和断裂都发生在不可见的搭接界面,其过程无法通过实验方法检测,有限元数值分析是研究搭接激光焊接接头拉伸断裂过程的有效方法。

#### 4 有限元模型的建立

采用 Abaqus 有限元分析软件建立图 1 所示的

表 4 模型中焊缝和母材的材料属性

Table 4 Material properties of weld and base material in model

Material	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio	Yield strength /MPa
Sheet	206	0.3	380
Weld	200	0.3	360

将有限元分析和拉伸实验得到的拉伸载荷-位移曲线进行比较,如图 7(a)、8(a)所示,其中横坐标为试样拉伸位移量,纵坐标为线载荷(单位焊缝长度

0.8+2.0 和 2.0+2.0 试样的三维模型,由于 301L-DLT 板材和焊缝的材料成分类似,且硬度和强度非常接近,故利用激光熔透楔形焊缝的弹塑性有限元模型来进行拉伸过程分析。

表 4 所示为有限元模型中母材<sup>[17]</sup>和焊缝<sup>[18]</sup>的材料属性。采用有限元模型对焊接试样进行静力学分析,焊缝与母材间采用 Tie 绑定连接方式,对模型的一端施加全约束,另一端施加 X 轴方向的位移载荷并施加 Y 和 Z 轴的约束,使用结构化六面体 C3D8R 网格,焊缝内网格大小为 0.1 mm × 0.1 mm × 0.8 mm,如图 6 所示。

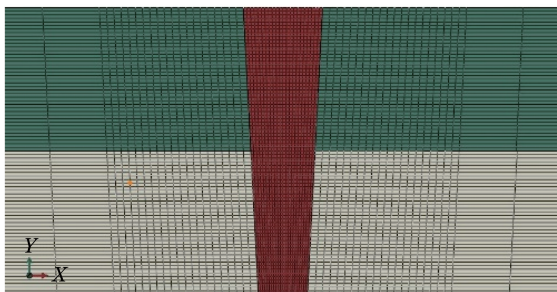


图 6 2.0+2.0 试样的激光焊缝网格图

Fig. 6 Mesh of laser welded 2.0+2.0 specimen

的拉伸剪切载荷),虚线为有限元模拟的拉伸曲线,实线为实验测得的拉伸曲线,五角星标记为有限元分析中的不同载荷水平,右侧为不同载荷水平下的等效塑性应变分布云图。可以看出,有限元分析和拉伸实验测得的拉伸曲线整体变化趋势相同,偏差较小,证明该有限元分析模型具有较好的参考价值。

#### 5 分析与讨论

##### 5.1 拉伸试样等效塑性应变分析

0.8+2.0 试样的拉伸断裂模式为焊缝剪切断裂,其断裂位移量为 15.72 mm。如图 7(a)所示,在拉伸载荷增大到 A 点的过程中,焊件主要发生了弹性变形,拉伸载荷和位移呈线性关系,等效塑性应变

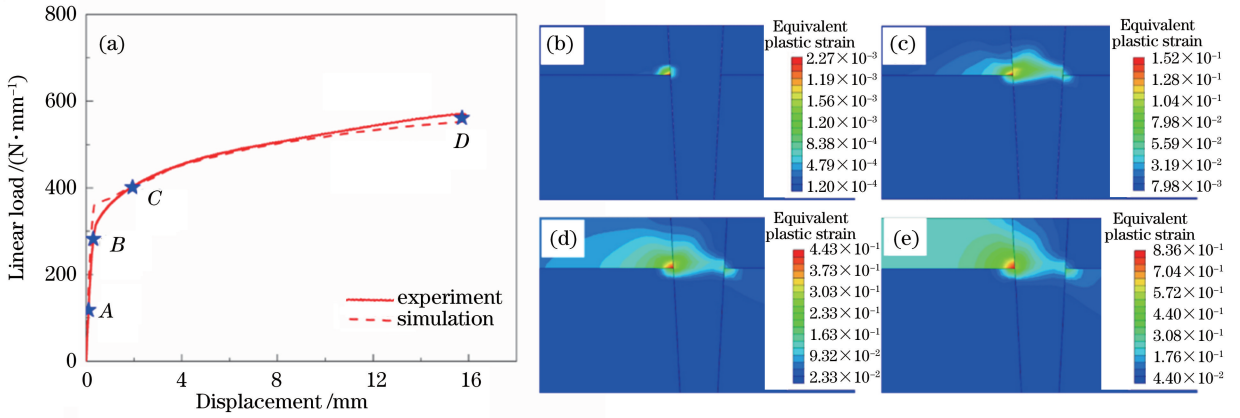


图 7 0.8+2.0 拉伸试样的等效塑性应变分析。(a) 实验与模拟拉伸曲线对比；(b) A 点处的等效塑性应变分布；(c) B 点处的等效塑性应变分布；(d) C 点处的等效塑性应变分布；(e) D 点处的等效塑性应变分布

Fig. 7 Equivalent plastic strain analysis of 0.8+2.0 specimen. (a) Comparison of experimental and simulated tensile curves; (b) equivalent plastic strain distribution at point A; (c) equivalent plastic strain distribution at point B; (d) equivalent plastic strain distribution at point C; (e) equivalent plastic strain distribution at point D

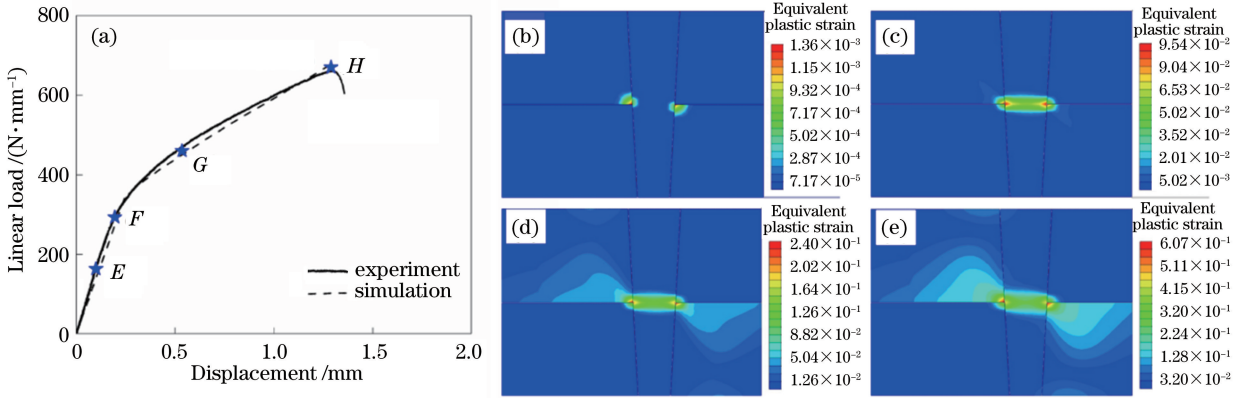


图 8 2.0+2.0 拉伸试样的等效塑性应变分析。(a) 实验与模拟拉伸曲线对比；(b) E 点处的等效塑性应变分布；(c) F 点处的等效塑性应变分布；(d) G 点处的等效塑性应变分布；(e) H 点处的等效塑性应变分布

Fig. 8 Equivalent plastic strain analysis of 2.0+2.0 specimen. (a) Comparison of experimental and simulated tensile curves; (b) equivalent plastic strain distribution at point E; (c) equivalent plastic strain distribution at point F; (d) equivalent plastic strain distribution at point G; (e) equivalent plastic strain distribution at point H

主要集中在靠近焊缝界面的内板中，塑性应变值很小，外板未发生塑性变形，如图 7(b) 所示；当拉伸载荷由 A 点增大到 B 点时，等效塑性应变从靠近焊缝界面的内板扩展到焊缝界面内，靠近焊缝界面的外板出现了较小的塑性变形，如图 7(c) 所示；当拉伸载荷由 B 点增大到 C 点时，内外板的塑性变形区域均增大，内板大部分区域发生了塑性变形，焊缝内塑性变形区域基本不变，塑性应变随载荷的增大逐渐增大，如图 7(d) 所示；当拉伸载荷从 C 点增大到 D 点时，随拉伸载荷的增大，内板全部区域发生塑性变形，外板塑性变形区域基本不变，约 1/3 板厚的区域发生了塑性变形，如图 7(e) 所示。0.8+2.0 试样的拉伸位移量由 0.8 mm 内板的较大塑性变形产生，

随着拉伸载荷的增大，焊缝内应力水平达到临界值并在焊缝发生剪切断裂。

2.0+2.0 试样的拉伸断裂模式也为焊缝剪切断裂，其断裂位移为 1.29 mm。如图 8(a) 所示，在拉伸载荷增大到 E 点的过程中，焊件主要发生了弹性变形，拉伸载荷和位移呈线性关系，等效塑性应变主要集中在靠近焊缝界面的内板和外板中，且内外板塑性变形沿焊缝中心对称分布，塑性应变值很小，如图 8(b) 所示；当拉伸载荷由 E 点增大到 F 点时，等效塑性应变区域扩展到焊缝界面内，塑性应变值随载荷的增大逐渐增大，如图 8(c) 所示；当拉伸载荷由 F 点增大到 G 点时，内外板的塑性变形区域逐渐增大，焊缝内的塑性变形区域基本不变，塑性应变随载荷的

增大逐渐增大,如图 8(d)所示;当拉伸载荷由 G 点增大到 H 点时,内外板和焊缝内的塑性应变进一步增大,板材内约 1/2 板厚的区域发生了塑性变形,如图 8(e)所示。2.0+2.0 试样塑性变形主要集中在焊缝界面内和靠近焊缝界面的 1/2 板厚的内外板中,焊缝内应力水平达到其临界值,发生剪切断裂。

在拉伸过程中,随着拉伸载荷的增大,搭接试样的塑性变形从靠近焊缝界面的母材内向焊缝界面和母材中扩展。0.8+2.0 试样在焊缝剪切断裂之前塑性变形已经扩展到整个 0.8 mm 板材内,2.0 mm 板材仅有 1/3 板厚的区域发生塑性变形;而 2.0+2.0 试样在焊缝剪切断裂之前塑性屈服仅集中在焊缝界面和母材约 1/2 板厚区域内,未扩展到整个母材,因此其拉伸断裂的位移量较小。

### 5.2 拉伸试样应力分析

激光焊件在拉伸变形过程中旋转角度较小,其失效模式为焊缝剪切断裂,焊缝内断裂应力由剪切应力主导,因此,通过对焊缝内 Mises 应力分析可确定焊缝剪切断裂应力的临界值。图 9 所示为拉伸试样断裂时焊缝内的 Mises 应力分布,2.0+2.0 等厚板试样焊缝内的应力沿焊缝中心对称分布;0.8+2.0 非等厚板试样靠近薄板一侧焊缝内的应力远远大于厚板一侧的,其主要原因是内外板厚差异导致薄板一侧应力较大。

虽然焊缝内应力分布差别较大,但两组试样在拉伸断裂时的平均 Mises 应力都接近 794 MPa,将两组拉伸试样断裂时的平均 Mises 应力作为判断拉伸试样焊缝剪切断裂的应力标准。

为了评估焊缝剪切断裂应力标准的准确性,引用文献[18]中的等厚板组合 1.5+1.5 ( $t_1 = 1.5$  mm,

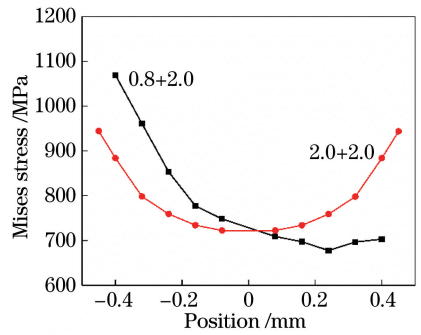


图 9 拉伸试样断裂时焊缝内的 Mises 应力分布  
Fig. 9 Mises stress distribution within weld when tensile specimen fractures

$t_2 = 1.5$  mm) 试样进行有限元分析。图 10 所示为 1.5+1.5 试样焊缝内的 Mises 应力随拉伸位移量的变化曲线,利用焊缝剪切断裂应力标准确定其断裂位移为 17.5 mm。表 5 所示为 1.5+1.5 试样的拉伸实验结果及模拟结果对比,可以看出,模拟的断裂位移与拉伸实验断裂位移的误差为 8.3%,焊缝剪切断裂应力标准能够较为保守地预测拉伸断裂位移量。

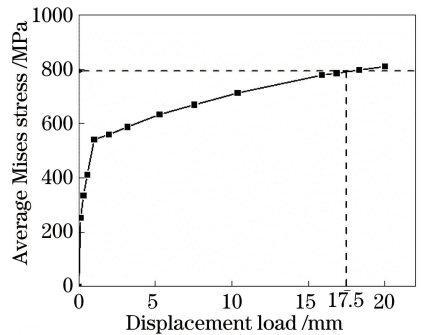


图 10 1.5+1.5 试样焊缝内平均 Mises 应力与拉伸位移的关系  
Fig. 10 Relationship between average Mises stress within weld and tensile displacement of 1.5+1.5 specimen

表 5 1.5+1.5 试样的模拟与实验拉伸断裂位移量对比

Table 5 Comparison of simulated and experimental tensile fracture displacements of 1.5+1.5 specimen

Specimen	$b_w/t_1$	Experimental tensile fracture displacement /mm	Simulated fracture displacement /mm	Error /%
1.5+1.5	0.87	19.08	17.5	8.3

为了改善 2.0+2.0 试样的塑性性能,利用 ABAQUS 有限元分析软件,以焊缝临界剪切应力标准(794 MPa)为判据,分析不同焊缝熔宽/板厚比对激光焊接试样拉伸断裂位移量的影响。假设焊缝熔宽/板厚比分别为 0.60、0.75 和 0.90,对试样模型施加逐级增大的位移载荷,并计算每个载荷步中焊缝内的平均 Mises 应力,分析其拉伸断裂位移量。

图 11 所示为 2.0+2.0 试样在不同焊缝熔宽/板厚比时,焊缝内的平均 Mises 应力随拉伸位移的变

化曲线。在位移载荷较小时,焊缝内的平均 Mises 应力随着焊缝熔宽/板厚比的增大变化很小;在位移载荷较大时,焊缝内的平均 Mises 应力随着焊缝熔宽/板厚比的增大逐渐减小。以焊缝剪切断裂临界应力(794 MPa)为标准时,不同焊缝熔宽/板厚比对应的拉伸断裂位移量如表 6 所示。可以看出,随着焊缝熔宽/板厚比的增大,拉伸断裂位移量逐渐增大,当焊缝熔宽/板厚比大于 0.75 时,焊件拉伸断裂位移量大于 5 mm,焊件具有较好的塑性性能。

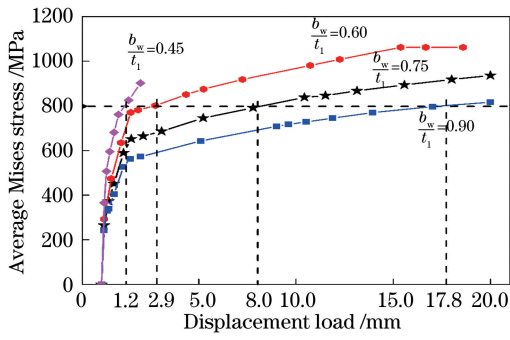


图 11 不同  $b_w/t_1$  下 2.0+2.0 试样焊缝内平均应力与位移载荷的关系

Fig. 11 Relationship between average stress within weld and displacement load of 2.0+2.0 specimen under different  $b_w/t_1$

表 6 不同  $b_w/t_1$  下 2.0+2.0 试样的拉伸断裂位移量

Table 6 Tensile fracture displacements of 2.0+2.0 specimen under different  $b_w/t_1$

Specimen	Fracture displacement / mm			
	$b_w/t_1=0.45$	$b_w/t_1=0.60$	$b_w/t_1=0.75$	$b_w/t_1=0.90$
2.0+2.0	1.2	2.9	8.0	17.8

图 12 所示为 2.0+2.0 试样在焊缝熔宽与板厚比分别为 0.45、0.60、0.75、0.90 时,以临界焊缝剪切应力为标准,拉伸试样断裂时的等效塑性应变分布。可以看出,随着焊缝熔宽/板厚比的增大,等效塑性应变从焊缝界面及其附近扩展到整个板材内,产生了较大的塑性变形量,改善了试样的塑性性能。

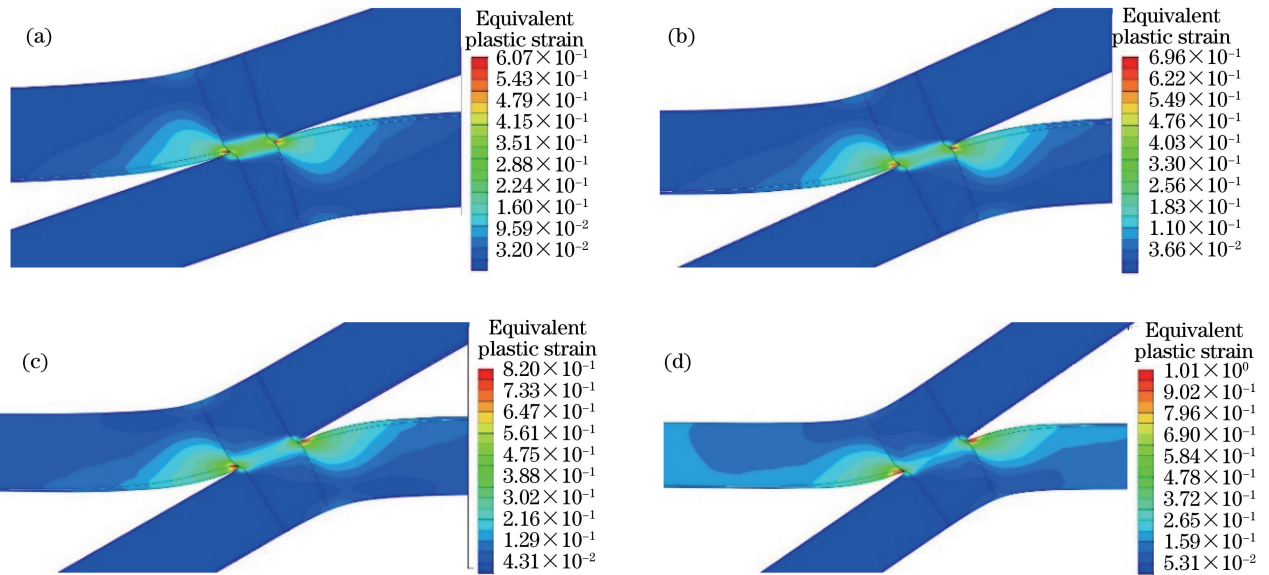


图 12 不同  $b_w/t_1$  下 2.0+2.0 试样在拉伸断裂时的等效塑性应变分布。(a) 0.45; (b) 0.60; (c) 0.75; (d) 0.90

Fig. 12 Equivalent plastic strain distributions of 2.0+2.0 tensile fracture specimens under different  $b_w/t_1$ . (a) 0.45; (b) 0.60; (c) 0.75; (d) 0.90

## 6 结 论

采用数值分析方法,研究了 301L-DLT 不锈钢不同厚度板的非熔透搭接激光焊接接头在拉伸过程中的弹塑性演变、应力分布和拉伸断裂行为,建立了激光焊件的有限元模型,得到以下结论。

1) 搭接非熔透激光焊接接头的数值模拟得到的拉伸曲线与实验结果具有较好的一致性,拉伸断裂载荷随焊缝熔宽的增大而增大,拉伸断裂位移随焊缝熔宽与板厚比的增大而增大。

2) 随着拉伸载荷的增大,焊接试样塑性变形从靠近焊缝界面的母材逐渐向焊缝界面和母材两个方

向扩展。0.8+2.0 试样在焊缝剪切断裂前,0.8 mm 板材全部发生塑性变形,并产生了较大的拉伸位移量,2.0 mm 外板约 1/3 板厚的区域发生塑性变形;而 2.0+2.0 试样在焊缝剪切断裂之前塑性变形仅集中在焊缝界面和母材约 1/2 板厚区域内,未扩展到整个母材,因此其拉伸断裂位移量较小。

3) 随着焊缝熔宽与板厚比的增大,焊接试样在拉伸断裂时的塑性应变区从焊缝界面附近逐渐扩展到板材内,拉伸断裂位移量随塑性变形区的增大而增大。当焊缝熔宽/板厚比大于 0.75 时,焊件的断裂位移量大于 5 mm,焊件有较高的断裂强度,焊缝剪切断裂应力约为 794 MPa。

## 参 考 文 献

- [1] Jaxa-Rozen W. Cold-worked austenitic stainless steels in passenger railcars and in other applications [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 83: 190-199.
- [2] Liu W, Fan H L, Guo X Z, *et al.* Mechanical properties of resistance spot welded components of high strength austenitic stainless steel [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2016, 32 (6): 561-565.
- [3] Liu W, Sun C J, Xu X Y, *et al.* The influences of nugget diameter on the mechanical properties and the failure mode of resistance spot-welded metastable austenitic stainless steel [J]. *Materials & Design*, 2012, 33: 292-299.
- [4] 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.
- [5] Cerrone C, Chiti F, Sacchi M, *et al.* Application of laser welding to stainless steel light rail vehicle [J]. *Welding in the World*, 2008, 52(7/8): 27-32.
- [6] Chen J K, Shi Y, Liu J, *et al.* A study of austenitic stainless steel laser welding process [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(3): 335-338.  
陈俊科, 石岩, 刘佳, 等. 奥氏体不锈钢激光焊接工艺研究 [J]. *应用激光*, 2015, 35(3): 335-338.
- [7] 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.
- [8] Zhang J, Gao J S, Xu H, *et al.* Study on welding process and mechanical properties of laser welded ultra-thin stainless steel [J]. *Applied Laser*, 2017, 37 (3): 379-385.  
张婧, 高嘉爽, 许辉, 等. 超薄不锈钢激光焊接工艺及接头性能研究 [J]. *应用激光*, 2017, 37(3): 379-385.
- [9] Yang W X, Xin J J, Fang C, *et al.* Microstructures and mechanical properties of hundred-millimeter-grade 304 stainless steel joints by ultra-narrow gap laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0702005.  
杨武雄, 信纪军, 方超, 等. 百毫米级 304 不锈钢超窄间隙激光焊接头的组织及性能 [J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0702005.
- [10] Yang G S, Yu Z S, Lu Q H, *et al.* Study of laser welding T-joint of sandwich structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0403003.  
杨橄生, 于治水, 卢庆华, 等. 激光焊接三明治结构 T 型接头的研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41 (4): 0403003.
- [11] Wang X N, Zheng Z, Zeng P L, *et al.* Effect of microstructure on hardness and fatigue properties of 800 MPa high strength steel fiber laser weld joints [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (12): 1202010.  
王晓南, 郑知, 曾盼林, 等. 800 MPa 级高强钢光纤激光焊接接头微观结构对硬度及疲劳性能的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202010.
- [12] Liu W, Liu H X, Meng D D, *et al.* Stress distribution and failure behavior of laser transmission welding parts during tensile process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0602003.  
刘伟, 刘会霞, 孟冬冬, 等. 激光透射焊接件拉伸过程应力分布和失效行为 [J]. *中国激光*, 2016, 43 (6): 0602003.
- [13] Terasaki T, Kitamura T. Prediction of static fracture strength of laser-welded lap joints by numerical analysis [J]. *Welding International*, 2004, 18 (7): 524-530.
- [14] Lee J, Asim K, Pan J. Modeling of failure mode of laser welds in lap-shear specimens of HSLA steel sheets [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, 78(2): 374-396.
- [15] Asim K, Lee J, Pan J. Failure mode of laser welds in lap-shear specimens of high strength low alloy (HSLA) steel sheets [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2011, 35(3): 219-237.
- [16] Asim K, Sripichai K, Pan J. Fatigue behavior of laser welds in lap-shear specimens of high strength low alloy steel sheets [J]. *International Journal of Fatigue*, 2014, 61: 283-296.
- [17] Liu W, Li Q, Jiao D Z, *et al.* Deformation and strain hardening behaviors of austenitic cold rolled 301L stainless steels [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(7): 775-780.  
刘伟, 李强, 焦德志, 等. 冷轧 301L 奥氏体不锈钢的变形和应变硬化行为 [J]. *金属学报*, 2008, 44 (7): 775-780.
- [18] Liu Y J, Liu W, Xia H T, *et al.* Fracture behavior and performance of overlap and butt laser welding joints of austenitic stainless steel car body sheets [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(1): 28-33.  
刘亚姣, 刘伟, 夏海涛, 等. 不锈钢车体板材搭接与对接激光焊接接头的拉伸断裂行为研究 [J]. *铁道学报*, 2014, 36(1): 28-33.