

# 激光透射焊接件拉伸过程应力分布和失效行为

刘 伟 刘会霞 孟冬冬 郭德晖 刘保光 仲雪娇 王 霄

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 采用模拟与实验相结合的方式研究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。以 PA66 激光透射焊接件为研究对象,建立了焊后拉伸数值模拟模型,模拟得到了焊接件的拉伸载荷-位移曲线和拉伸变形情况,并与拉伸实验进行对比和验证;对拉伸过程中焊接件的剪切应力和 Von Mises 应力分布进行分析,从剪切和拉伸失效方面探究拉伸件的失效行为。拉伸实验验证了拉伸数值模拟模型能较好地预测焊接件的拉伸变形情况;数值模拟得到最大剪切应力发生在焊接界面上长方形焊接区域的 4 个角点附近,即剪切失效的起始位置,且由于最大剪切应力远小于 PA66 的剪切强度,拉伸件发生剪切失效的可能性较小。预测的焊接件拉伸失效形式及失效位置与实验结果吻合,验证了数值模拟方法的准确性和拉伸数值模拟模型良好的可靠性。

**关键词** 激光技术;激光透射焊接;拉伸数值模拟;剪切应力;Von Mises 应力;拉伸断裂;失效行为

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0602003

## Stress Distribution and Failure Behavior of Laser Transmission Welding Parts During Tensile Process

Liu Wei Liu Huixia Meng Dongdong Guo Dehui Liu Baoguang

Zhong Xuejiao Wang Xiao

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

**Abstract** Stress distribution and failure behavior of laser transmission welding parts are studied by means of simulation and experiment during the tensile process. The welding parts of PA66 are chosen as the research object and the numerical simulation model of the tensile experiment is established. The tensile deformation and the corresponding load-displacement curves of welding parts are simulated and compared with the results of tensile experiments. Analysis of the shear and Von Mises stress distribution of welding parts during the process of tensile experiment is carried out. The failure behavior of tensile specimen can be studied from the aspect of shear and tensile failure. The numerical simulation model can well predict the tensile deformation of the welding parts. The maximum shear stress occurs in the vicinity of the four corners of a rectangular weld area near the weld interface, which are also the starting positions of the shear failure. Because the maximum shear stress is much less than the shear strength of PA66, the tensile shear failure is less likely to occur. The predicted tensile failure and the failure position of welding parts by numerical simulation are consistent with the experimental results. The accuracy of numerical simulation method for analyzing and predicting the tensile failure behavior of the welding parts and the reliability of the numerical simulation model of tensile process are verified.

**Key words** laser technique; laser transmission welding; numerical simulation of tensile process; shear stress; Von Mises stress; tensile fracture; failure behavior

**OCIS codes** 140.2020; 160.5470; 120.7000; 350.3390

收稿日期: 2016-01-12; 收到修改稿日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(51275219)、江苏省高校自然科学研究面上项目(14KJB460006)、江苏大学工业中心大学生创新实践基金(ZXJG201592)

作者简介: 刘 伟 (1989-),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: liuweimei2964@163.com

导师简介: 刘会霞 (1964-),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事激光加工和数字化设计与制造等方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

激光透射焊接是一种新兴的连接技术,与传统连接方法相比有着许多独特的优势,如热影响区小、连接所受力学载荷微弱、焊接工艺灵活、连接表面质量高等<sup>[1-5]</sup>。但焊接实验具有实验工作量大、误差干扰项排除难、激光辐射对人体健康有潜在威胁等缺点<sup>[6-9]</sup>,因此单纯依靠实验进行相关研究具有较大的局限性。而数值模拟在计算机上即可完成相关仿真分析,且不受环境影响,可以很好地弥补实验研究的不足,在激光透射焊接研究中得到较为广泛的应用<sup>[10-12]</sup>。

目前,激光透射焊接数值模拟研究主要集中在焊接过程的温度场及应力场等方面<sup>[13-14]</sup>,而激光透射焊接件拉伸实验作为研究和评价激光透射焊接质量的重要方法之一,其测试过程耗时耗力且波动性较大,即便同一工艺参数下的焊接件,其拉伸测试结果也经常差异明显,给拉伸实验的评判带来许多不确定因素<sup>[15-17]</sup>。因此,从数值模拟的角度对拉伸过程进行分析,既能提高实验效率和结果的准确性,也能凸显数值模拟的价值。当前,拉伸数值模拟研究主要涉及拉伸过程中的焊接件应力分布情况和连接强度分析等。Mian 等<sup>[18-19]</sup>利用仿真软件 ABAQUS 建立了激光透射焊接钛与聚酰亚胺的二维拉伸模型,模拟得到了拉伸位移-载荷曲线,并对拉伸过程中焊缝界面处的应力分布进行了分析;Newaz 等<sup>[20]</sup>对镀钛玻璃和聚酰亚胺焊接试样拉伸断裂面的微观形貌进行分析,并在 ABAQUS 中建立拉伸测试数值模型,对连接强度进行了评估;刘臻等<sup>[21-22]</sup>对比了有、无补偿片情况下的拉伸实验,结果发现这两种拉伸模式均不能避免拉伸过程中的角度偏转,并对偏转角度的影响进行了初步分析。

关于激光透射焊接件拉伸数值模拟的研究刚刚起步,利用数值模拟方法对焊接件剪切和拉伸失效行为的预测等方面的研究还很少,且缺乏系统性。本文通过建立焊后拉伸数值模拟模型,得到拉伸试样的载荷-位移曲线,并与拉伸实验结果进行对比和验证;对拉伸过程的变形情况进行模拟与实验对比,分析该拉伸数值模拟模型对拉伸变形过程的预测能力;最后对焊接界面处的剪切应力及 Von Mises 应力分布规律进行分析,从剪切和拉伸失效方面初步探究拉伸件的失效行为。

## 2 拉伸数值模拟模型的建立

### 2.1 拉伸试样及其尺寸

采用 UTM4104 型万能实验机(三思纵横公司,深圳)进行拉伸实验,拉伸速度  $\nu=3 \text{ mm/min}$ 。为避免无关弯矩的引入,在拉伸实验过程中试样两端添加填充物,如图 1(a)所示;拉伸数值模拟模型采用与拉伸试样相同的尺寸规格,如图 1(b)所示。

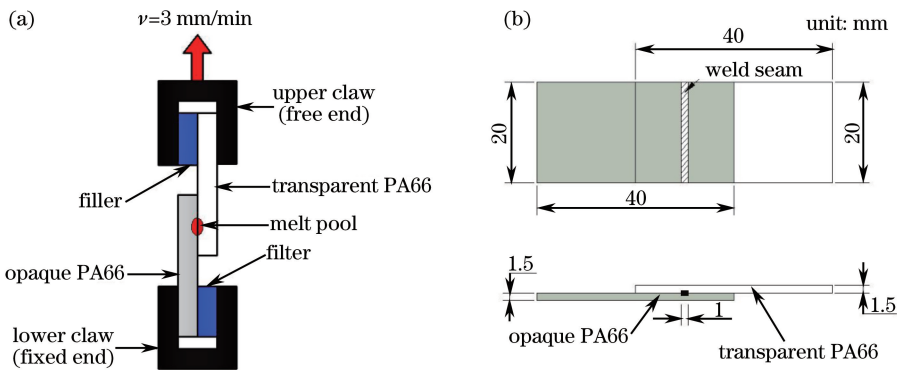


图 1 (a) 拉伸实验原理图; (b) 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 1 (a) Schematic of tensile test; (b) schematic of tensile specimen dimensions

拉伸试样是在一定工艺参数下通过激光透射焊接所得,激光透射焊接实验所用激光器为德国 DILAS 公司 Compact 130/140 型半导体连续激光器,焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters

Process parameter	Laser power /W	Scanning speed /(mm/s)	Clamping force /N	Spot diameter /mm
Specific value	7	5	150	1

## 2.2 数值模拟模型的建立

对激光功率  $P=7\text{ W}$ 、焊接速度  $V=5\text{ mm/s}$  焊接条件下得到的 PA66 焊接试样进行拉伸实验,拉伸结果表明该拉伸件主要失效形式为本体断裂,且表现出很高的连接强度。因此,为保证数值模拟结果的准确性,利用仿真软件 ANSYS 建立三维拉伸有限元模型时应遵从拉伸试样的实际尺寸。由于是同种材料间的焊接,焊接效果较好,焊接强度较高,因此假设焊接件间的连接稳固而有力。在界面处的焊缝区域共享节点来表征材料之间建立了强有力的连接;在焊缝区域外的其他搭接区域,上下材料界面之间建立接触,以此来模拟拉伸过程中可能存在的接触载荷。模型采用静力学分析,在模型下端加载  $X、Y、Z$  方向的约束,在模型上端加载纵向位移载荷  $S=1\text{ mm}$ ,以此模拟拉伸实验过程。

拉伸数值模拟模型选择 SOLID185(185 系列网格节点)单元进行分析,并选用多线性等向强化(MISO)材料模型,该模型采用等向强化的 Von Mises 屈服准则,且需知晓材料的弹性模量、泊松比以及塑性变形阶段的应力-应变。MISO 模型下,应力-应变曲线上第一个点的坐标必须与弹性模量相对应,且整个曲线不允许有大于弹性模量或者小于零的斜率段;当应变超过输入曲线的终点时,假定为理想塑性材料行为。图 2 所示为不同温度下 PA66 塑性阶段的应力-应变曲线。由于实验所用材料均保存于  $23\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 20% 的环境下,故选用温度为  $23\text{ }^\circ\text{C}$  下的 PA66 应力-应变曲线,相应的应力-应变值如表 2 所示。

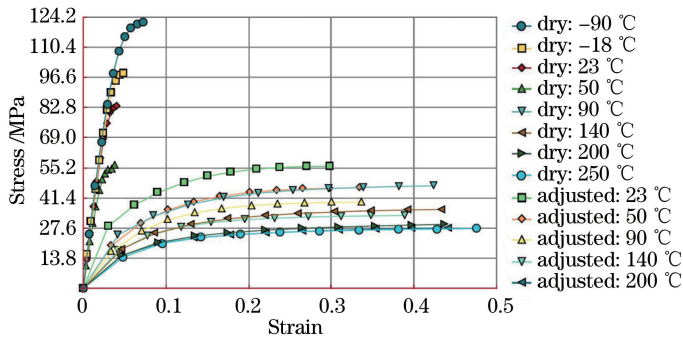


图 2 不同温度下 PA66 塑性阶段的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of PA66 plastic stage at different temperatures

表 2 PA66 在  $23\text{ }^\circ\text{C}$  下的应力-应变值

Table 2 Stress-strain data of PA66 at  $23\text{ }^\circ\text{C}$

Stress /MPa	0	75.3638	80.3225	82.5231	83.6234
Strain	0	0.028058	0.032374	0.036391	0.040288

PA66 弹性模量  $E=2686\text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu=0.33$ ,最大拉伸强度为  $82\text{ MPa}$ <sup>[17]</sup>。表 2 对应的 PA66 最大拉伸应力为  $83.6234\text{ MPa}$ ,与 PA66 最大拉伸强度非常接近,因此将测得的数据  $83.6\text{ MPa}$  作为拉伸断裂或屈服的失效标准。

施加  $1\text{ mm}$  纵向位移载荷之后,需求解拉伸数值模型。通过多个载荷子步的逐次施加来模拟拉伸过程中载荷的加载与求解,同时保存每一个载荷子步下的计算结果。求解完成后,将固定端所有节点的支反力相加,便得到每一个子步下对应的拉伸载荷;得到所有载荷子步下的拉伸载荷后,便可以绘制出拉伸数值模拟对应的载荷-位移曲线。

## 3 拉伸数值模拟模型的实验验证

### 3.1 拉伸过程载荷-位移曲线的验证

图 3 所示为拉伸实验后得到的拉伸试样断裂件。从图中可以看出,拉伸件断裂方式为吸收层 PA66 本

体断裂,拉伸失效形式为吸收层材料的母体断裂。

对相同工艺条件下的 3 个拉伸试样进行拉伸实验,并将数值模拟和实验得到的载荷-位移曲线进行比较,如图 4 所示。图中横坐标代表拉伸位移值,纵坐标代表单位焊缝长度所承受的拉伸载荷。从图中可以看出,数值模拟和实验得到的载荷-位移曲线的整体变化趋势相同,且偏差很小。因此,拉伸数值模拟得到的预测结果与拉伸实验结果具有良好的一致性,证明了该拉伸数值模拟模型具有良好的参考价值。在拉伸实验过程中,可利用拉伸数值模型辅助实验,探究拉伸实验的可行性,减少拉伸实验的次数,从而提高拉伸实验效率,并且为工艺参数的优化奠定基础。同时,在拉伸过程中,当拉伸位移载荷  $S=0.6\text{ mm}$  时 3 个试样均已发生断裂。因此,选择  $S=0.6\text{ mm}$  时的模拟结果对拉伸件的失效行为进行分析。

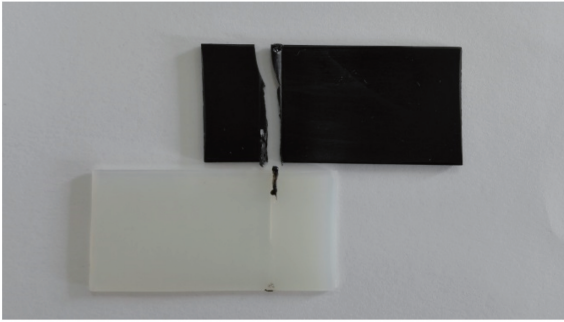


图 3 拉伸试样的典型破坏形式

Fig. 3 Typical failure mode of specimen under tensile force

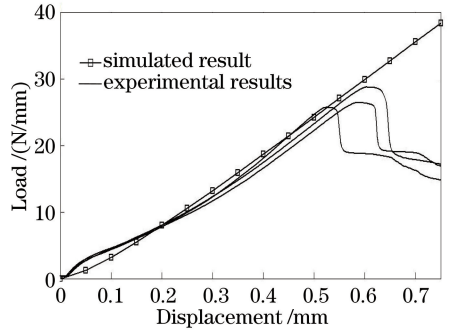


图 4 拉伸实验与数值模拟得到的载荷-位移曲线

Fig. 4 Experimental and simulated load-displacement curves for tensile specimen

### 3.2 拉伸过程变形情况的验证

拉伸数值模拟得到的拉伸件随拉伸位移载荷增大时的变形情况如图 5 所示,拉伸实验过程中不同时刻下的拉伸件变形情况如图 6 所示。对比图 5 和图 6 可知,拉伸数值模拟模型可以很好的预测拉伸过程中焊接件的拉伸变形情况。此外,从图中还可看出,虽然拉伸件仅承受竖直方向的位移载荷,且左右板材为规格相同的同种材料,但在拉伸过程中,焊接件仍会以焊缝区域为中心发生明显的弯曲变形,且变形量随着位移载荷的增加

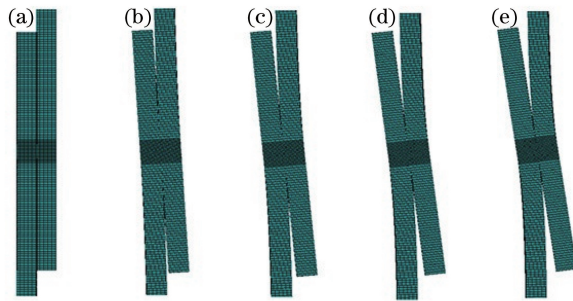


图 5 拉伸件变形过程模拟结果[从(a)到(e) $S$ 不断增大]

Fig. 5 Simulated results of deformation of tensile specimen [ $S$  increases from (a) to (e)]

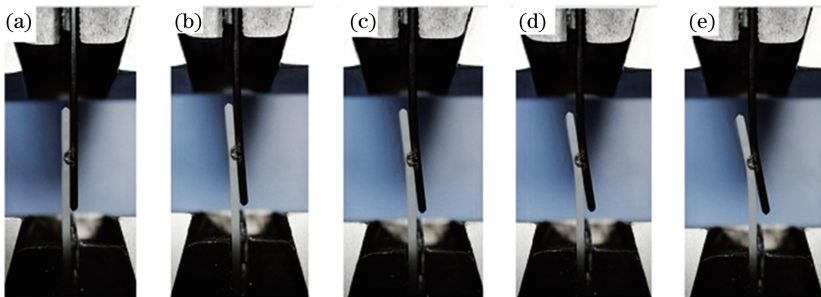


图 6 拉伸件变形过程实验结果[从(a)到(e) $S$ 不断增大]

Fig. 6 Experimental results of deformation of tensile specimen [ $S$  increases from (a) to (e)]



而逐渐增大。这主要是由于上下层焊接件所受拉力不在同一直线上,上下板沿位移载荷方向的拉力以焊缝为中心形成一对力偶,在该力偶作用下,拉伸件整体上有逆时针方向旋转的趋势。由于左侧板下端和右侧板上端的自由度受到约束,拉伸件无法自由旋转,最终迫使焊接件在焊缝区域发生弯曲变形,产生角度偏转。

## 4 分析与讨论

### 4.1 拉伸件剪切应力分析

#### 4.1.1 剪切应力分布云图

当  $S=0.6\text{ mm}$  时,拉伸试样上的剪切应力分布如图 7 所示,其中图 7(a)、(b)分别代表不同视角下的视图结果, $T$  为不同位置处的剪切应力值。剪切应力为矢量,有正负之分,在坐标面上,与坐标正向一致时为正,相反为负。从图中可以看出,在焊缝周边区域,剪切应力值和应力梯度比较大;而远离焊缝区域的材料本体中,剪切应力值较小,分布比较均匀;剪切应力在两板材中的分布基本一致;在焊缝界面处沿焊缝长度方向( $Z$  向)上,剪切应力呈现对称分布;剪切应力的最大值出现在焊缝的 4 个边角附近,其值为  $29.19\text{ MPa}$ 。

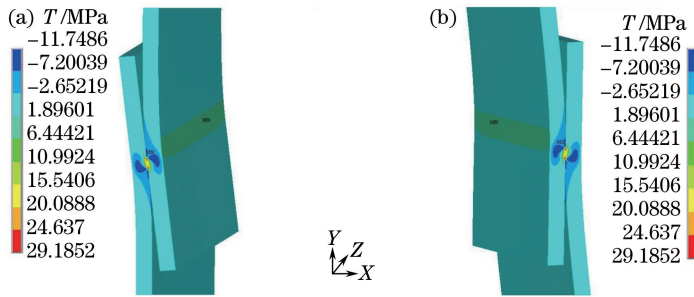


图 7  $S=0.6\text{ mm}$  时的剪切应力分布云图。(a)  $Z=20\text{ mm}$  端面; (b)  $Z=0\text{ mm}$  端面

Fig. 7 Contours of shear stress distribution when  $S=0.6\text{ mm}$ . (a) End face of  $Z=20\text{ mm}$ ; (b) end face of  $Z=0\text{ mm}$

#### 4.1.2 焊缝界面处剪切应力分布规律

当  $S=0.6\text{ mm}$  时,焊缝界面处沿焊缝长度方向( $Z$  向)的剪切应力曲线如图 8 所示。从图中可以看出,沿焊缝长度方向,所有剪切应力曲线相对各自中心位置均呈对称分布,且分布较均匀,仅在焊缝长度方向两端处应力突变达到最大值。

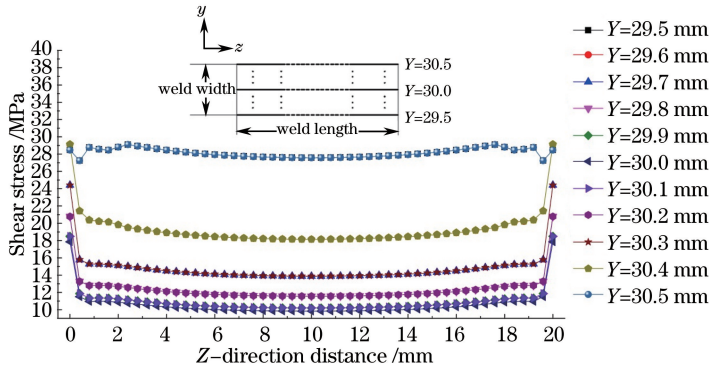


图 8  $S=0.6\text{ mm}$  时焊缝界面处剪切应力沿焊缝长度方向( $Z$  向)的分布

Fig. 8 Shear stress distribution along the welding direction ( $Z$ -direction) at the interface when  $S=0.6\text{ mm}$

此外,在模型分析中,PA66 透光层作为左侧板,PA66 吸光层作为右侧板,模型的原点  $(0,0,0)$  位置在左侧板下端靠内侧顶点处。沿焊缝宽度方向上不同位置的坐标值  $Y=29.5\text{ mm}$  与  $Y=30.5\text{ mm}$ 、 $Y=29.6\text{ mm}$  与  $Y=30.4\text{ mm}$ 、 $Y=29.7\text{ mm}$  与  $Y=30.3\text{ mm}$ 、 $Y=29.8\text{ mm}$  与  $Y=30.2\text{ mm}$  对应的剪切应力曲线分别重合,如图 8 所示。这表明沿焊缝宽度方向,剪切应力也呈对称分布。

当  $S=0.6\text{ mm}$  时,焊接界面处沿焊缝宽度方向( $Y$  向)的剪切应力分布曲线如图 9 所示。从图中可以看出,沿焊缝宽度方向上的剪切应力呈对称分布,且宽度边缘处的剪切应力值明显大于中部,最大剪切应力发

生在焊接界面上长方形焊缝区域的 4 个角点(在图中用红色标出)附近,该位置即理论上剪切失效的起始位置。该结论与 Yang 等<sup>[23]</sup>在进行粘结件拉伸状态下的剪切应力分析时得到的结果一致,说明该拉伸数值模拟结果具有较高的准确性。此外,由于沿焊缝长度方向上剪切应力分布的对称性,沿焊缝长度方向上不同位置的坐标值  $Z=0$  mm 与  $Z=20$  mm、 $Z=4$  mm 与  $Z=16$  mm、 $Z=6$  mm 与  $Z=14$  mm、 $Z=8$  mm 与  $Z=12$  mm 对应的剪切应力曲线也分别相互重合。

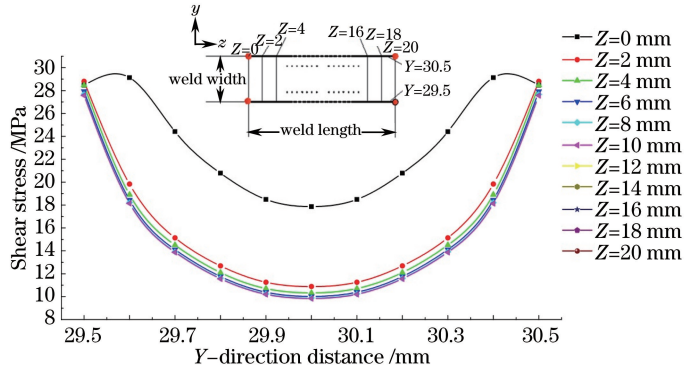


图 9  $S=0.6$  mm 时焊缝界面处剪切应力沿焊缝宽度方向(Y 向)的分布

Fig. 9 Shear stress distribution along the weld width direction (Y-direction) at the interface when  $S=0.6$  mm

综上所述,在焊接件拉伸过程中,沿焊缝长度方向上的剪切应力分布较均匀,仅在靠近两端处的剪切应力突变达到最大值;沿焊缝宽度方向上,焊缝边缘区域所承受的剪切应力远高于焊缝中部;剪切应力的最大值(29.19 MPa)出现在焊缝的 4 个边角附近,且该值远低于 PA66 的剪切强度(66.2 MPa)<sup>[24]</sup>,因此该拉伸件发生剪切失效的可能性较小。而拉伸实验中,拉伸件的失效形式是拉伸断裂,间接证明了拉伸数值模拟结果的准确性。

#### 4.2 拉伸件 Von Mises 应力分析

##### 4.2.1 Von Mises 应力分布云图

PA66 为塑性材料,但其失效形式却类似于脆性断裂,因此模拟时以第四强度准则下的 Von Mises 应力作为主要标准进行失效行为分析。图 10 为  $S=0.6$  mm 时的 Von Mises 应力云图,其中图 10(a)、(b)分别代表两个不同视角下的视图结果, $V_m$  为不同位置处的 Von Mises 应力值。从图中可以看出, $S=0.6$  mm 时拉伸件上 Von Mises 应力最大值为 82.4995 MPa,与前文定义的 PA66 失效强度 83.6234 MPa 非常接近。因此,拉伸件在此条件下发生拉伸断裂的可能性较大;而拉伸实验中,当  $S$  达到 0.6 mm 时焊接件已经拉伸断裂。

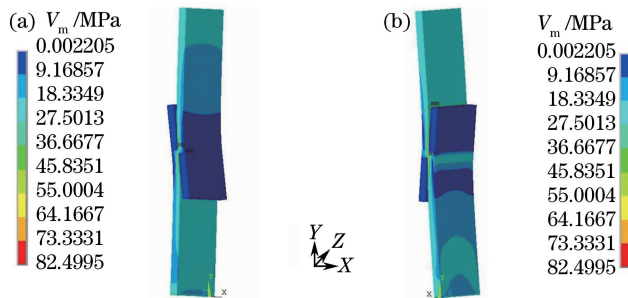


图 10  $S=0.6$  mm 时 Von Mises 应力云图。(a)  $Z=20$  mm 端面; (b)  $Z=0$  mm 端面

Fig. 10 Contours of Von Mises stress when  $S=0.6$  mm. (a) End face of  $Z=20$  mm; (b) end face of  $Z=0$  mm

此外,焊接界面靠近焊缝边沿处的 Von Mises 应力达到最大值,但与此区域相对应的厚度另一侧,应力值却明显小的多。因此,材料发生断裂失效时,初始裂纹必然是从焊接界面一侧产生,然后向外表面一侧扩散。

拉伸实验中,拉伸试样断裂后 PA66 透光层上的裂纹形貌如图 11 所示,其中图 11(a)、(b)分别表示焊接界面一侧和与之对应的另一侧的裂纹形貌。该拉伸试样在 PA66 吸光层本体处发生断裂,而 PA66 透光层整体完好。从图中可以看出,PA66 透光层上裂纹较多,且裂纹发生在焊接界面一侧,并且未扩展到材料外表面,证明裂纹沿厚度方向的扩展从焊接界面一侧向外表面一侧进行。

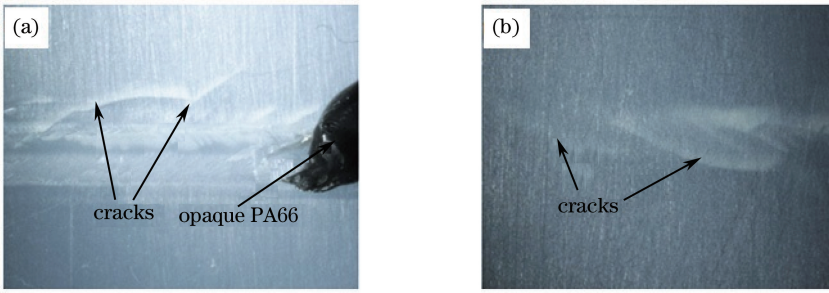


图 11 拉伸断裂后 PA66 透光层试样上的裂纹形貌。(a) 焊接界面；(b) 外表面

Fig. 11 Crack profiles in the transparent PA66 after fracture. (a) Welding interface; (b) outside face

#### 4.2.2 焊缝宽度方向上 Von Mises 应力分布

由于左右两板中 Von Mises 应力关于焊缝中心对称分布,因此以左侧板为例进行应力分析。当  $S = 0.6 \text{ mm}$  时,左侧板在焊接界面上的 Von Mises 应力沿焊缝宽度方向的变化曲线如图 12 所示。图中宽度变化范围为  $Y = 29.0 \sim 31.0 \text{ mm}$ ,焊缝区域范围为  $Y = 29.5 \sim 30.5 \text{ mm}$ 。从图中可以看出,在焊缝宽度区域内,各个位置处的 Von Mises 应力值关于中心线  $Y = 30.0 \text{ mm}$  对称分布,且靠近宽度边界处的 Von Mises 应力值明显高于焊缝中心区域。由于该拉伸模型关于  $Z = 10 \text{ mm}$  平面对称,对称平面两侧应力曲线完全相同,因此图中只显示  $Z = 0 \sim 10 \text{ mm}$  范围内的应力曲线。

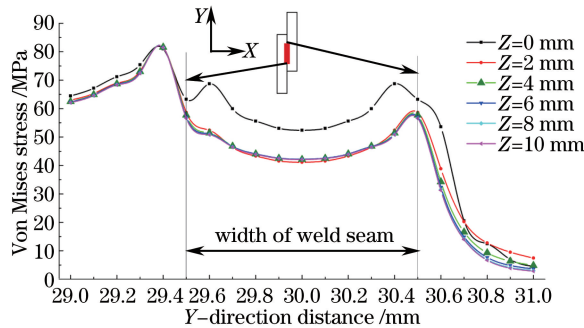


图 12  $S = 0.6 \text{ mm}$  时沿焊缝宽度方向的 Von Mises 应力曲线

Fig. 12 Von Mises stress along weld width direction when  $S = 0.6 \text{ mm}$

虽然焊缝宽度  $Y = 29.5 \sim 30.5 \text{ mm}$  范围内的应力曲线关于焊缝中心线对称,但在整个模型宽度范围内却并非如此。在超过焊缝下侧边界 ( $Y = 29.5 \text{ mm}$ ) 之后,应力呈现出先增大后减小的趋势,且在  $Y = 29.4 \text{ mm}$  处取得最大值;而在超过焊缝上侧边界 ( $Y = 30.5 \text{ mm}$ ) 之后, Von Mises 应力值急剧减小。这主要是因为左侧板下端面施加有固定约束,在拉伸过程中相对于上侧自由端会承受更大的载荷,因此焊缝下端附近的应力值明显高于焊缝上端对应位置处的应力值;而拉伸过程中该区域也是弯曲变形最为严重的区域,附加的弯曲应力也进一步使得该区域总的应力值增大。

此外,拉伸过程中左侧板焊缝下边界附近及右侧板焊缝上边界区域属于高应力分布区,同时也是断裂失

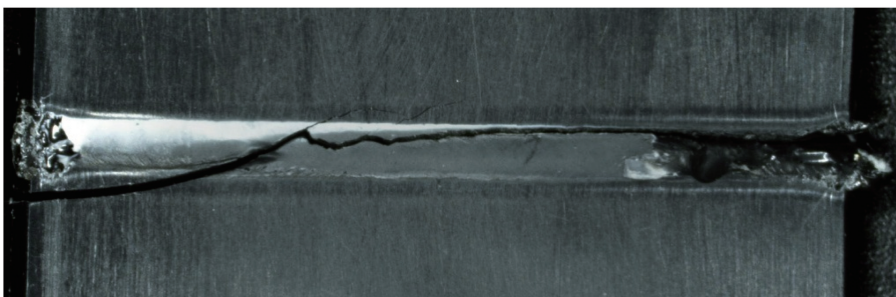


图 13 拉伸试样的焊缝断裂图

Fig. 13 Fracture image of tensile specimen



效的潜在起始位置;因此,当初始裂纹产生并沿焊缝长度方向扩展时,其扩展路径最可能成为焊缝宽度的边界区域。图 13 为典型拉伸失效试样的焊缝断裂图,从图中可以看出,断裂边界与焊缝宽度边界高度重合,证明了拉伸数值模拟结果的准确性。

#### 4.2.3 焊缝长度方向 Von Mises 应力分布

当  $S=0.6\text{ mm}$  时,左侧板不同位置处的 Von Mises 应力沿焊缝长度方向( $Z$  向)的变化曲线如图 14 所示。图中空心图标代表焊缝下边界外侧  $Y=29.2\sim 29.4\text{ mm}$  区域,实心图标代表焊缝下边界内侧  $Y=29.5\sim 30.0\text{ mm}$  区域。从图中可以看出,沿焊缝长度方向 Von Mises 应力分布比较均匀,仅在焊缝长度的两端附近突变并取得最大值。因此,沿焊缝长度方向两端也是最可能的起始失效位置。此外,左侧板在焊缝边外侧  $Y=29.4\text{ mm}$  处 Von Mises 应力取得最大值,与焊缝宽度方向 Von Mises 应力分析所得结论相吻合。

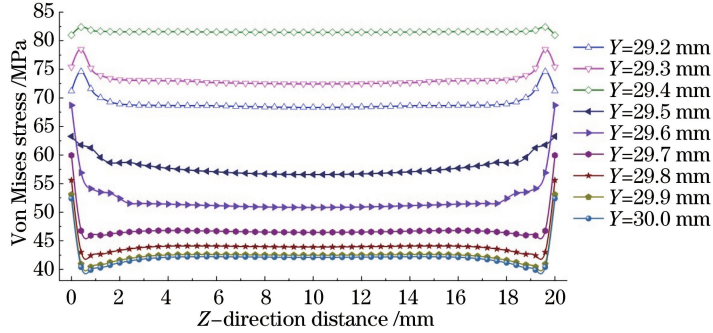


图 14  $S=0.6\text{ mm}$  时沿焊缝长度方向的 Von Mises 应力曲线

Fig. 14 Von Mises stress along welding direction when  $S=0.6\text{ mm}$

在焊接试样的拉伸实验过程中,绝大部分的断裂都发生在吸收层 PA66 上。主要因为焊接过程中吸收层 PA66 的热影响区面积远大于透光层,因此冷却后的残余应力比较明显;此外,由于温度最高点出现在下层材料中,因此吸收层 PA66 对应的焊缝区域可能发生了肉眼不可见的分子降解,削弱了材料的力学性能。

## 5 结 论

通过对 PA66 激光透射焊接件的拉伸过程进行数值模拟与实验研究,对实验和模拟得到的拉伸载荷-位移曲线和拉伸变形情况进行对比;同时从剪切和拉伸失效方面探究拉伸件的失效行为,分析了拉伸件在拉伸过程中潜在的失效方式和失效位置,结论如下:

- 1) 拉伸数值模拟得到的载荷-位移曲线与拉伸实验结果具有较好的一致性,验证了拉伸数值模拟模型的准确性和可靠性;
- 2) 拉伸数值模拟能较好地预测由于竖直方向上的位移载荷引起的拉伸试样在焊缝周边区域的弯曲变形现象;
- 3) 拉伸数值模拟得到最大剪切应力发生在焊接界面上长方形焊接区域的 4 个角点附近,即剪切失效的起始位置,且由于最大剪切应力为  $29.18\text{ MPa}$ ,远低于 PA66 剪切强度  $66.2\text{ MPa}$ ,拉伸试样剪切失效可能性较小;
- 4) 发现沿厚度方向上,拉伸试样在焊接界面一侧的 Von Mises 应力值明显高于外表面,推测裂纹沿厚度方向的扩展是从焊接界面向外侧进行的,并得到实验观测结果的验证;沿焊缝宽度方向上, Von Mises 应力最大值出现在左侧板焊缝下边界附近及右侧板焊缝上边界附近,据此预测了拉伸断裂时裂纹沿焊缝长度方向上的扩展路径,同样得到了实验结果的验证;沿焊缝长度方向上 Von Mises 应力分布整体而言比较均匀,仅在焊缝长度的两端附近突变取得最大值,焊缝长度两端是最可能的起始失效位置;
- 5) 拉伸数值模拟对拉伸实验具有一定的辅助作用,在提高实验效率、优化工艺参数等方面具有一定意义。

## 参 考 文 献

1 Pang Q H, Zhao Z Z, Tang D. Microstructure and properties of hot-rolled high strength bainitic steel by laser welding



- [J]. *Materials & Design*, 2015, 87(1): 363-369.
- 2 Georgiev G L, Baird R J, McCullen E F, *et al.*. Chemical bond formation during laser bonding of Teflon® FEP and titanium[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(15): 7078-7083.
- 3 Liu H X, Yan Z, Li P, *et al.*. Prediction of molten area in laser transmission welding of thermoplastic polymers[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(6): 487-492.
- 4 Coelho J M, Abreu M A, Rodrigues F C. Modelling the spot shape influence on high-speed transmission lap welding of thermoplastics films[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(1): 55-61.
- 5 Qiang Hongliang, Cheng Zhaogu, Luo Jiangtao, *et al.*. Influencing factors on topography of weld in deep penetration laser welding[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1289-1295.  
强宏亮, 程兆谷, 雒江涛, 等. 激光深熔焊焊缝表面形状的影响因素[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1289-1295.
- 6 Acherjee B, Kuar A S, Mitra S, *et al.*. Finite element simulation of laser transmission thermoplastic welding of circular contour using a moving heat source[J]. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 2013, 6(5-6): 437-454.
- 7 Li Pin, Liu Huixia, Xu Zhenkai, *et al.*. Laser transmission joining process of PET films and titanium[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1914-1920.  
李 品, 刘会霞, 许贞凯, 等. 医用PET薄膜与薄钛板激光透射连接工艺研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1914-1920.
- 8 Wang Xiao, Yang Kun, Zhang Huizhong, *et al.*. Laser transmission welding between two different kinds of thermoplastic plastics[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(5): 97-100.  
王 霄, 杨 昆, 张惠中, 等. 两种不同热塑性塑料之间的激光透射焊接试验[J]. *焊接学报*, 2009, 30(5): 97-100.
- 9 Tang Xuefei, Fan Zhengxiu, Wang Zhijiang. Temperature response of laser induced thin film heating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, 12(11): 1032-1037.  
汤雪飞, 范正修, 王之江. 激光辐射致热单层薄膜温度响应[J]. *光学学报*, 1992, 12(11): 1032-1037.
- 10 Liu Huixia, Xing An, Zhang Huizhong, *et al.*. Temperature field simulation on laser transmission welding of polyvinylchloride[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1801-1807.  
刘会霞, 邢 安, 张惠中, 等. 聚氯乙烯激光透射焊接温度场的有限元模拟[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1801-1807.
- 11 Luo Mi, Luo Kaiyu, Wang Qingwei, *et al.*. Numerical simulation of laser shock peening on residual stress field of 7075-T6 aluminum alloy welding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0414003.  
罗 密, 罗开玉, 王庆伟, 等. 激光冲击7075-T6铝合金焊缝的残余应力场数值模拟[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0414003.
- 12 Xu X F, Bates P J, Zak G. Effect of glass fiber and crystallinity on light transmission during laser transmission welding of thermoplastics[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 69: 133-139.
- 13 Chen Hao, Wang Xiao, Liu Huixia, *et al.*. Numerical simulation - driven optimization of laser transmission welding process between PET and 304L stainless steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0403006.  
陈 浩, 王 霄, 刘会霞, 等. 数值模拟驱动的激光透射焊接PET与304L不锈钢的优化研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0403006.
- 14 Wang X, Chen H, Liu H X. Numerical-simulation-driven optimization of a laser transmission welding process under consideration of scattering[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(12): 40396.
- 15 Wu B B, Chen R, Xia K W. Dynamic tensile failure of rocks under static pre-tension[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, 80: 12-188.
- 16 Wang X, Chen H, Liu H X. Investigation of the relationships of process parameters, molten pool geometry and shear strength in laser transmission welding of polyethylene terephthalate and polypropylene[J]. *Materials & Design*, 2014, 55: 343-352.
- 17 Aden M, Liviany F, Olowinsky A. Joint strength for laser transmission welding of thermoplastics: A simulation approach [J]. *International Polymer Processing*, 2013, 28(1): 79-83.
- 18 Mian A, Newaz G, Vendra L, *et al.*. Laser bonded microjoints between titanium and polyimide for applications in medical implants[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2005, 16(3): 229-237.
- 19 Mian A, Newaz G, Georgiev D G, *et al.*. Performance of laser bonded glass/polyimide microjoints in cerebrospinal fluid [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2007, 18(3): 417-427.
- 20 Newaz G, Sultana T, Nusier S, *et al.*. Miniaturized samples for bond strength and hermetic sealing evaluation for transmission laser joints[J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2008, 3(3): 186-195.
- 21 Liu Zhen, Wang Yaomin, Wang Yingwei, *et al.*. Study on tensile shear strength testing of plastic plaques jointed by laser

transmission welding[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3): 241-245.

刘 臻, 王耀民, 王瑛玮, 等. 激光透射塑料焊接剪切强度测试方法分析研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(3): 241-245.

- 22 Zhang Xin, Zhang Jingan. Study on tensile-shearing strength test method of polypropylene jointed by laser transmission welding[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(6): 619-623.

张 新, 张靖安. PP 塑料激光透射焊接剪切强度测试方法研究[J]. *激光与红外*, 2014, 44(6): 619-623.

- 23 Yang C, Pang S S. Stress-strain analysis of single-lap composite joints under tension[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1996, 118(2): 247-255.

- 24 Lingesh B V, Rudresh B M, Ravikumar B N. Effect of short glass fibers on mechanical properties of polyamide66 and polypropylene (PA66/PP) thermoplastic blend composites[J]. *Procedia Materials Science*, 2014, 5: 1231-1240.