文章编号: 1673-5196(2008) 02-0027-04

# 6061 铝合金平板对接焊接接头拉伸性能研究

车洪艳<sup>1,2</sup>、朱 亮<sup>1,2</sup>、陈剑虹<sup>1,2</sup>、徐文福<sup>1,2</sup>、吕先锋<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

摘要:采用 TIG 焊获得 6061 铝合金平板对接焊接接头,在万能拉伸机上进行拉伸试验;应用双孔微剪切试验结合有限元计算,用反推法得到焊缝和热影响区的力学性能参数及损伤参数;应用 ABAQUS/ Explicit 模拟平板对接焊接接头在拉伸载荷作用下的变形和损伤行为,并与实验结果进行对比. 结果表明,仿真结果与实验结果吻合得很好.改变不同区域的损伤参数,发现弱化区的损伤参数对仿真结果影响最为明显,因此要得到屈服强度及断裂强度较好的焊缝主要是控制弱化区的材料性能.

关键词:微剪切;损伤;有限元

中图分类号: TG 146; TB1 15 文献标识码: A

## Investigation of tension behavior of butt weld on plate of aluminum alloy 6061

CHE Hong-yan<sup>1,2</sup>, ZHU Liang<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-hong<sup>1,2</sup>, XU Wen-fu<sup>1,2</sup>, LU Xian-feng<sup>1,2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. State Key Lab. of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract**: TIG butt weld on the plate of aluminum alloy 6061 was tested for its tension behavior on an universal tension apparatus. By using the double-hole micro-shearing experiment and finite element computation, the mechanical parameters and damage parameter of the weld in its thermo-affected area were obtained with retro-deduction method. The deformation and damage behavior of butt weld of the plate under the action of tension load was simulated with ABAQUS/Explicit and compared with its experimental result, showing that they were consistent well with each other. It was found that, when the damage parameter of different areas were altered, the influence of damage parameter in weakened area on the simulation result was most remarkable, so that it would be essential to control the material property of the weakened area in order to obtain a weld with better yield strength and fracture strength.

Key words: micro-shearing; damage; finite element

随着全铝汽车车身的使用, 焊接结构的强度及损伤行为已经成为一个重要的研究内容. 因为焊接接头力学性能存在不同程度的不均匀性, 而焊接接头性能的不均匀性对接头整体承载能力有复杂的影响<sup>[1]</sup>. 在应用有限元仿真进行结构变形及损伤行为研究时, 材料参数的准确测定对模拟结果有很大的影响. 焊接接头由于焊缝和热影响区尺寸的限制不能通过常规的拉伸试验获得力学性能参数<sup>[2]</sup>. 国内外学者进行一系列的研究, 提出焊缝区与母材屈服强度的拟合关系, 采用试验和有限元反推相结合的方法对材料的力学性能进行测试<sup>[3]</sup>; Asif Husain 等

人采用实验和有限元回归的方法对材料的力学性能测试方法做了研究, 史耀武等对焊接接头的力学性能提出了微剪韧性的概念, 为微接头的局部力学性能的测定提供了很好的依据<sup>14</sup>. 本文应用双孔微剪切实验结合有限元模拟, 应用反推法得到各区的性能参数及损伤参数. 并代入平板拉伸试验的有限元模型, 验证参数的准确性, 在此基础上应用有限元模拟研究了弱化区的性能对整个接头性能的影响.

## 1 实验方法和设备

### 1.1 拉伸试样制备及试验过程

采用西北铝加工厂生产的 6061 铝合金, 供货状态为 T6. 材料的质量分数如表 1 所示. 其屈服强度

收稿日期: 2007-11-26

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项(2004CCA04900)

#### 6061 铝合金的成分质量分数

Tab. 1 Chemical compositions of aluminum alloy 6061 Zn CuMп  $C_r$ Νi 0.69 1.02 0.43 < 0.200. 26 < 0.15 0. 20 < 0.05

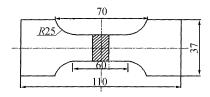
在挤压管材上截取长 160 mm, 宽 60 mm 的板 材用作焊接材料, 板厚为 5 mm, 开单边坡口. 焊丝 采用 E R4043, 焊接工艺如表 2 所示.

表 2 TIG 焊接实验主要参数

Tab. 2 Main parameters of TIG

热输入	电压	电流	焊接速度	氩气流量
$/\left(J^{\circ}\text{mm}^{-1}\right)$	U/ $V$	<i>I</i> / A	v/(cm ° min <sup>-1</sup> )	$/(L \circ min^{-1})$
855	17. 5	205	23	14

在焊接好的试板上截取拉伸试样, 焊接接头拉 伸试样的尺寸及形状如图 1 所示, 在万能拉伸机上 进行拉伸实验, 拉伸速度为 1 mm/min. 试验机自动 记录载荷位移曲线.

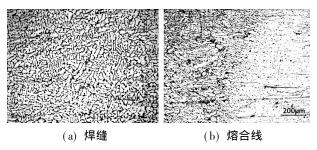


焊接接头拉伸试样

Fig. 1 Tension sample of welded joint

### 1.2 微剪切试样的制备及实验过程

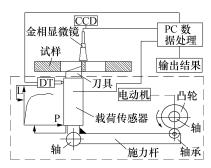
在与拉伸试样同样的焊接板材上截取微剪切试 样,并根据硬度测试及金相观察确定平板拉伸试样 上焊缝和热影响区的尺寸. 在焊缝和热影响区分别 进行微剪切实验,试样制备方法见文献[5].图2为 金相观察照片. 实验的原理图及在实验力为 29.4 N 时所测得的硬度曲线如图 3 和图 4 所示,图 4 中 0 刻度为焊缝中心位置.



室温下的焊缝金相组织

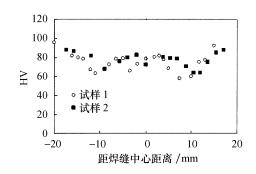
Fig. 2 Metallographic structure of weld at room temperature

双孔微剪切实验装置采用电动机带动传力杆 在双孔的小桥之间施加向前的载荷,载荷传感器记 录所施加的电压, 位移传感器靠近刀头的位置, 以便 准确测量刀头的位移. 将此装置与自动记录装置连



微剪切实验原理图 图 3

Fig. 3 Principle chart of micro-shearing experiment

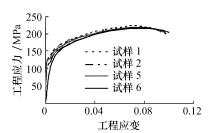


29.4 N下的硬度曲线

Fig. 4 Hardness curre in 29.4 N

#### 实验结果 2

铝合金在焊接过程中热影响区强度出现了弱 化,相比于母材和焊缝要低些,最终的断裂位置在热 影响区,图5为拉伸实验的结果,在焊缝和热影响区 分别进行双孔微剪切试验,因为其性能梯度变化不 大, 因此分别取各区的平均值, 得到的曲线见图 6.



接头拉伸实验结果

Result of tension test

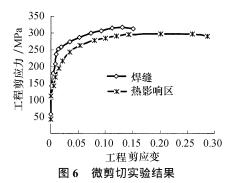


Fig. 6 Result of micro-shearing test

接,得到力和变形的曲线。

## 3 有限元模拟

### 3.1 模拟双孔微剪切试验

应用 ABAQUS/Explicit 前处理工具建立有限元模型, 因为模型具有对称性, 取其 1/2 进行建模,模型采用三维实体结构, 根据试验实际设定边界条件, 为得到准确的模拟结果, 在小桥连接处细化网格, 网格尺寸为 0.05 mm×0.05 mm, 详细的模型及计算过程见文献[5].模拟结果如图 7 所示.

应用有限元反推法得到焊缝及热影响区的应力-应变曲线如图 8 所示.

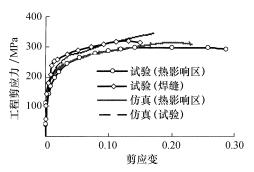


图 7 有限元模拟结果

Fig. 7 Result of simulation

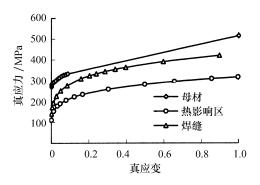


图 8 母材、焊缝和热影响区数值对比

Fig. 8 Comparison of results from BM, WM and HAZ

### 3.2 拉伸试验模拟结果

图 9 为拉伸试验模拟结果. 该图是采用实体单元建立有限元模型, 根据硬度分析及金相观察结果

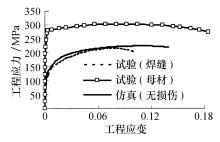


图 9 拉伸试验与模拟结果

Fig. 9 Results of simulation and tension test

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publ

确定焊缝和热影响区的形状及尺寸, 在焊缝和热影响区细化网格. 将得到的焊缝和热影响区性能参数提供给 ABAQUS/Explicit 进行有限元模拟, 不考虑损伤的情况下得到的模拟结果及应力-应变的曲线如图 9 所示, 并与各区性能均为母材性能的模拟结果进行对比. 从图 9 可以看出, 当考虑焊缝和热影响区的影响时, 接头屈服强度和抗拉强度均降低.

## 4 断口观察及损伤模拟

将拉伸试验得到的断口在扫描电镜下进行观察,照片如图 10 所示,从图可以看出,断面上存在大量的韧窝,说明试样在拉伸的过程中,由于热影响区的强度比较低,在此处发生应力集中,原有孔洞在力的作用下不断长大,新的孔洞继续形成,当孔洞相互连接时,形成裂纹,试样的承载能力下降.

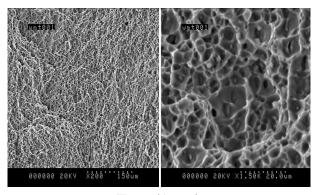


图 10 断口观察

Fig. 10 Fracture surface observation

应用微观机理的 Gurson 模型及宏观现象学的 Johnson-cook 模型都能很好地预测拉伸试样的损伤过程, 因为本文应用的双孔微剪切方法是在三向应力度较低的情况下进行的, 由于 Gurson 模型在三向应力度较低的情况下不能很好地预测材料的损伤行为, 所以选用宏观现象学的 Johnson-cook 模型进行模拟. Johnson-cook 剪切失效模型<sup>[6]</sup> 是基于单元积分点的等效塑性应变, 损伤参数 ω定义如下:

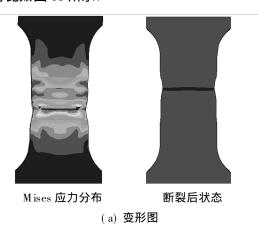
$$\omega = \sum \frac{\Delta \varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \tag{1}$$

当损伤参数超过 1 的时候失效发生, 其中  $\Delta \epsilon^{pl}$  是等效塑性应变的增益,  $\epsilon_{r}^{pl}$  是失效点的应变, 求和符号 是将所有的增益相加.  $\epsilon_{r}^{pl}$  在本文的研究中为

$$\bar{\varepsilon}_{f}^{pl} = d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{p}{q} \right) \tag{2}$$

焊缝和热影响区的损伤参数通过拟合双孔微剪切试验得到, 母材的损伤参数通过拟合平板拉伸试验的损伤过程得到 $^{17}$ . 对于 6061 对接平板拉伸试样备个区的损伤参数为; 母材;  $d_1 = 0$ . 299 14,  $d_2 = 0$ 

1.496 54,  $d_3$ = 3.32; 焊缝:  $d_1$ = 0.243,  $d_2$ = 1.354 67,  $d_3$ = 5.122 34; 热影响区:  $d_1$ = 0.25,  $d_2$ = 1.332 41,  $d_3$ = 5.161 28.由于损伤参数与网格尺寸相关, 因此模拟平板拉伸试验时, 需要调整损伤参数, 应用调整后的损伤参数得到的模拟结果与实验的对比如图 11 所示.



(b) 仿真结果对比曲线 图 11 仿真结果对比

工程应变

Fig. 11 Comparison of results from experiment and simulation

5 各区损伤参数对模拟结果的影响 各区损伤参数模拟的对比结果如图12所示.

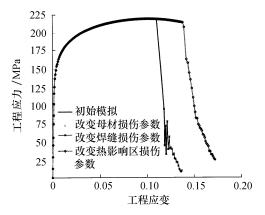


图 12 不同损伤参数模拟结果

Fig. 12 Simulation result for different damage parameters

首先是将焊缝改为与母材相同,保持其它各区损伤参数不变;其次将母材的损伤参数改为与热影响区相同,其它各区损伤参数保持不变;最后将热影响区的损伤参数改为与母材相同,发现断裂应变增大..说明影响材料损伤及断裂行为的是弱影响区的参数,因此要想得到屈服强度及断裂强度较好的焊缝主要是控制弱化区材料的性能.

### 6 结论

- 1) 双孔微剪切实验与有限元反推法相结合能够准确得到接头材料的力学性能参数及损伤参数;
- 2) 从宏观断口观察,对接焊接接头由于热影响区材料强度弱化,在拉伸过程中易在此处出现应力集中,产生颈缩,最后断裂发生在热影响区;
- 3) 从微观断口观察可以看到,大量的圆形韧窝存在于断口表面,说明在拉伸的过程中由于颈缩产生了较高的三向应力度,使得孔洞具有长大的驱动力,当孔洞长大到一定程度相互连接形成裂纹,使得试样的承载能力下降,宏观表现为断裂.应用 Johnson-cook 模型能很好预测材料的损伤和断裂过程;
- 4) 接头的弱化区对焊缝整体性能的优劣起主要作用,因此要得到屈服强度及断裂强度较好的焊缝主要是控制弱化区的材料性能.

#### 参考文献:

- [1] HA UG E, CLINCKEMAILLIE J, NI Xiaomin. 汽车碰撞仿真设计的最新进展和发展趋势 [J]. 机械工程学报, 1998, 34(1): 93-99.
- [2] KIM Y J, SCH WA LBE K H. Mismatch effect on plastic yield loads in idealised weldments II: heat affect zone cracks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(2): 183-199.
- [3] HUSAIN A, SEHGAL D K, PANDEY R K. An inverse finite element procedure for the determination of constitutive tensile behavior of materials using miniature specimen [J]. Computational Materials Science, 2004, 31(1-2): 84-92.
- [4] 史耀武, 周宁宁, 张新平. 微剪切试验及对焊接接头力学性能的评价[J]. 焊接学报, 1994, 15(4): 235-240.
- [5] 车洪艳,朱 亮,陈剑虹,局部材料损伤行为的双孔微剪切实验 [J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(4): 31-34.
- [6] 李兆霞. 损伤力学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 车洪艳, 朱 亮, 陈剑虹, 有限元反推法评定 A A 6014 铝合金的 损伤参数 [J]. 机械工程材料, 2007, 31(7): 57-59.