

文章编号:1671-6833(2009)01-0020-05

## 铝合金平板对接焊接接头变形及损伤行为研究

车洪艳<sup>1,2</sup>, 徐文福<sup>1,2</sup>, 陈剑虹<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省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**应用 TIG 焊获得焊缝质量良好的 6061 铝合金对接焊接接头, 进行静态拉伸试验; 试验结果表明, 试样大多断裂在距焊缝熔合线边缘 7~9 mm 处的软化区; 应用双孔微剪切试验与有限元结合获得焊接接头各微区的力学性能及损失参数, 提供给有限元计算, 建立静态拉伸试验的有限元模型, 并与实际试验结果对比验证模型的正确性, 在此基础上研究高匹配和低匹配焊接接头及试样相对宽度对焊接接头失效行为的影响, 结果表明, 对于低匹配焊接接头, 接头越窄越容易失效, 所以应尽量选择较宽的焊接接头; 对于高匹配焊接接头, 接头越窄, 越不容易失效, 所以建议应尽量选择较窄的焊接接头。

**关键词:** 铝合金; 对接接头; 失效; 有限元

**中图分类号:** TG 146.2; TB 115 **文献标识码:** A

### 0 引言

铝合金是汽车车身轻量化设计中考虑采用的重要轻质材料, 铝挤压型材、铝真空铸件及铝合金板是铝车身的三种基本元素, 这些基本元素通过各种联接方法组成车体的空间框架及其他各个部位, 其中熔化焊接接头应用非常广泛<sup>[1]</sup>。然而焊接接头由于焊接工艺的影响使得焊缝组织及性能不匹配。在过去的十几年中科技工作者作了大量的研究, 试图找到一种合理的工艺能根据需求得到不同匹配的焊接接头, 这需要花费大量的财力和物力, 况且这些研究主要针对于钢材<sup>[2]</sup>。随着有限元技术的发展, 关键试验加有限元模拟已经称为一种重要的研究方法, 基于对铝合金的变形及损伤行为不像对钢材那样熟悉, 作者针对 6061 铝合金挤压型材平板对接焊接接头的变形及损伤行为进行了一系列的研究。

### 1 试验部分

#### 1.1 平板对接试样制备及试验

采用西北铝加工厂生产的 Al-Mg-Si-Cu 系挤压 6061 铝合金, 供货状态为 T6。焊接接头拉伸试样的制备及试验过程参见文献[3], 拉伸试

验的结果如图 1 所示。

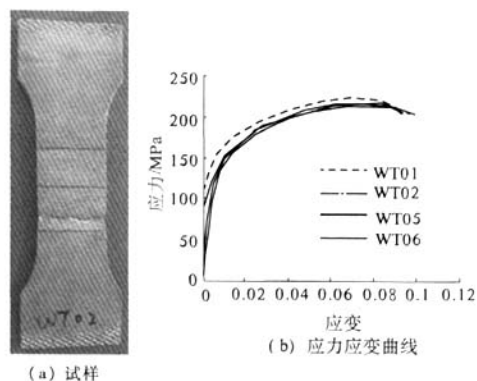


图 1 接头拉伸试验结果

Fig. 1 Results of tension test

从图 1 可以看出, 试样断裂在热影响区部位, 距离熔合线大概 7~9 mm, 试验结果的重复性比较好。图 1 中左边为拉伸试样断裂后的宏观形貌, 右边为试验的应力应变曲线, 其中标号的意义解释如下: WT01—W 代表焊缝, T 代表拉伸, 01 为试样编号。

#### 1.2 双孔微剪切试验

通过硬度及金相观察确定焊缝及热影响区的尺寸, 在每个微区内(焊缝、热影响区)进行双孔

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项资助项目(2004CCA04900)

作者简介: 车洪艳(1977-), 女, 辽宁北镇人, 兰州理工大学博士研究生, 研究方向: 主要从事铝合金焊接变形方面的研究工作, E-mail: earlyautumn@sina.com.cn.

微剪切试验,由于各个微区内性能梯度相差不大,因此取各个微区性能的平均值.试样的制备及试验结果如图2所示,详细的原理及过程见文献[4].

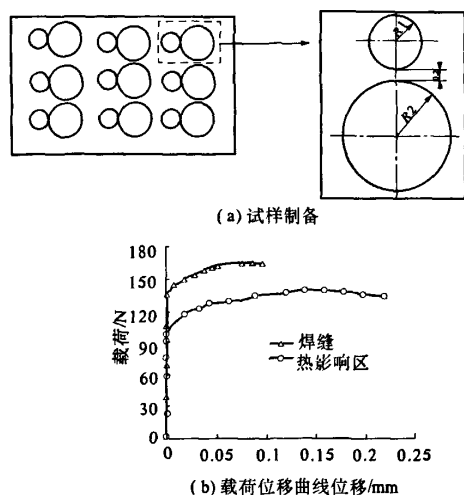


图2 试样制备及试验结果

Fig.2 Preparation of specimen and results of test

## 2 有限元仿真

### 2.1 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,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,详细的模型及计算过程参见文献[4].模拟结果如图3所示.应用有限元反推法得到焊缝及热影响区的真应力真塑性应变曲线如图4所示,并与母材进行比较.

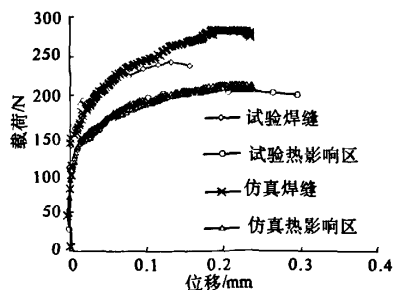


图3 试验与模拟结果对比

Fig.3 Comparison on test and simulation

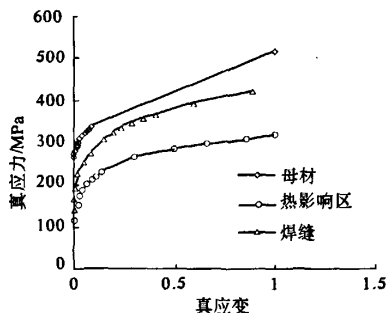


图4 真应力应变曲线

Fig.4 Curve of true strain and true stress

### 2.2 损伤模型<sup>[5]</sup>

1975年Gurson在McClintock, Rice和Tracey等的工作基础上发展了一套比较完整的本构方程,用以描述微孔洞损伤对材料塑性变形行为的影响.在ABAQUS/explicit中Gurson模型的失效准则为

$$\phi = \left( \frac{q}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left( -q_2 \frac{3p}{2\sigma_y} \right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

式中:  $q$  是等效 Mises 应力;  $p$  是静水压力;  $\sigma_y$  是屈服应力;  $q_1, q_2, q_3$  为材料参数;  $f^*$  为

$$f^* = \begin{cases} f & (f \leq f_c) \\ f_c + \frac{\bar{f}_f - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & (f_c < f < f_f) \\ f_f & (f \geq f_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f_c$  是孔洞体积分数的临界值;  $f_f$  是断裂时的孔洞体积分数.  $\bar{f}_f$  为

$$\bar{f}_f = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} \quad (3)$$

在Gurson模型中,损伤被视为各向同性的,损伤变量用一个标量即孔洞体积百分比来表示.因为对于韧性金属来讲,损伤引起的各向异性性质往往不是非常明显.孔洞体积分数的两部分:

$$\dot{f} = \dot{f}_{gr} + \dot{f}_{nuc} \quad (4)$$

其中,

$$\dot{f}_{gr} = (1 - f) \dot{\epsilon}^{pl} : I \quad (5)$$

$$\dot{f}_{nuc} = A \dot{\epsilon}_m^{pl} \quad (6)$$

其中  $A$  为:

$$A = \frac{f_N}{S_N \times \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\epsilon_m^{pl} - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_N$  为孔洞形核的平均应变;  $S_N$  为相应的标准方差;  $f_N$  为可以发生微孔洞形核的所有二相粒

子的体积分数.

### 2.3 模拟结果

笔者基于修改的 Gurson 模型,应用有限元仿真预测焊接接头的变形及损伤行为.应用双孔微剪切与有限元相结合得到的力学性能及损伤参数提供给有限元模型,模拟的结果如图 5 所示.

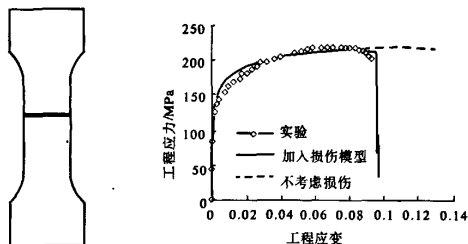


图 5 模拟结果

Fig.5 Result of simulation

从图 5 可以看出,通过对比试验和有限元模拟的结果,验证了模型的正确性,基于此应用有限元仿真的方法研究不同匹配焊接接头对材料失效行为的影响,低匹配焊接接头母材、焊缝、热影响区的屈服强度分别为:270 MPa、110 MPa、140 MPa,相对宽度分别为 1,2,3,4;对于高匹配焊接接头母材、焊缝、热影响区的屈服强度分别为:270 MPa、275 MPa、280 MPa,相对宽度分别为 1,2,3,4. 试样的相对宽度定义为接头(焊缝+热影响区)宽度的一半与试样厚度的比值,即设相对宽度为  $\omega = a/b$ ,其中  $a = (a_1 + a_2)/2$ ,  $a_1$  为焊缝宽度,  $a_2$  为单侧热影响区宽度,  $b$  为试样厚度.

### 3 结果及讨论

当焊缝性能低于母材时称为低匹配,焊缝性能高于母材时称为高匹配.应用 ABAQUS/EXPLICIT,基于修改的 Gurson 损伤模型,研究了不同匹配条件下,焊缝相对宽度对材料损伤行为的影响.图 6(a)为在低匹配条件下,相对宽度为 3 的模型在宏观裂纹产生之前,孔洞体积分数分布情况.图 6(b)为其等效断裂应变分布情况,图 6(c)为其 Mises 应力分布情况.从图 6(a)可以看出,微孔洞主要形核于试样的中心部位.从图 6(b)和图 6(c)可以看出,应力和应变集中主要发生在接头部位,最大的等效塑性应变发生在接头的横截面的中心部位.由于孔洞的形核由应变控制,应变越高越容易形核.因此孔洞的形核和长大在接头的薄弱部位发生,接下来宏观孔洞在此形

成.然而,最大的等效应力却发生在试样的边缘部位,如图 6(c)所示,因为试样的边缘部位没有多余的约束,处于自由状态,因此这些部位更容易变形.

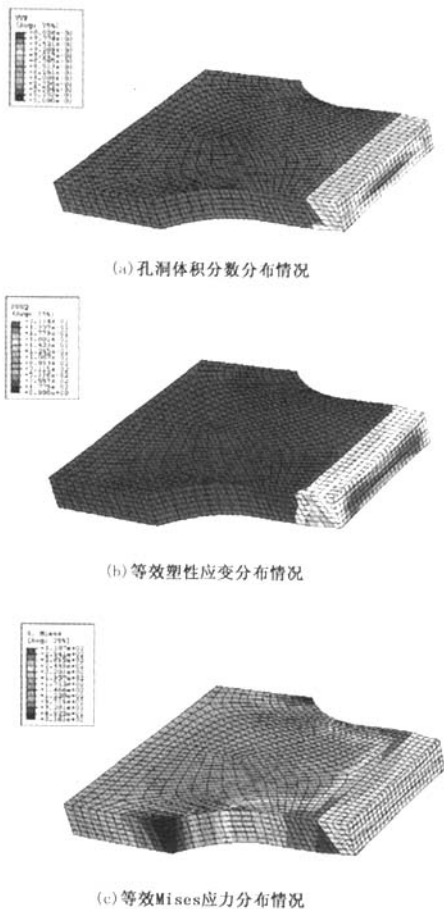


图 6 低匹配条件下相对宽度为 3 的模型在宏观孔洞形成之前的性能分布

Fig.6 The accumulation of property in an under-matched joint with the relative width of 3mm, just before the formation of a macroscopic void

当孔洞体积分数  $f_v$  达到 90%,也就是达到失效时的孔洞体积分数,在试样的中心部位,宏观孔洞形成,此处材料失去承载能力.图 7(a)为宏观裂纹形成以后孔洞体积分数的分布.之后孔洞主要在宏观裂纹的两边形核,然后向试样的边缘生长扩展.图 7(b)为宏观裂纹形成以后等效塑性应变的分布情况,同样是在宏观裂纹的两侧.然而与宏观裂纹形成之前不同的是等效应力也在宏观裂纹的两侧集中如图 7(c)所示.因此可以看出,应力和应变集中的影响,导致新的孔洞快速形核以及原有的孔洞长大,导致材料的快速失效.

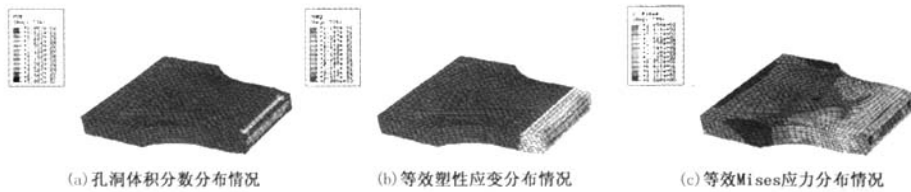


图 7 低匹配条件下相对宽度为 3 的模型在宏观孔洞形成之后的性能分布

Fig. 7 The accumulation of property in an under-matched joint with the relative width of 3mm, after the formation of a macroscopic void

在低匹配条件下分别对不同相对宽度的模型进行计算,结果表明,孔洞都在接头中心部位开始形核,宏观孔洞形成时的断裂应变不同.图 8 为在低匹配条件下断裂应变与接头相对宽度的关系.从图 8 可以看出,随着接头相对宽度的增加,断裂应变增加.这个结果表明,接头的相对宽度越窄,由应变控制的损伤越容易形成,因此对于低匹配的焊接接头尽量让接头的相对宽度宽些.

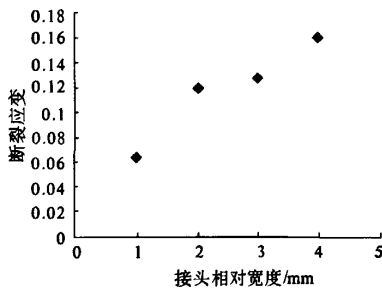


图 8 低匹配条件下断裂应变与接头相对宽度的关系

Fig. 8 Relations between longitudinal strain and width of relative width of under-matched joints

对于高匹配的焊接接头,微观孔洞的形核和长大发生在与接头相邻的母材部分,如图 9(a)所示,因为接头性能不匹配的影响在此部分容易形成应力和应变集中,应变控制的机理导致微孔洞在此形核,由于几何对称性微观孔洞依旧在中心部位形成,并在宏观孔洞的两侧向试样边缘扩展,如图 9(b)所示.

在高匹配的条件下,断裂应变与试样相对宽度的关系如图 10 所示.从图 10 可以看出,随着接头相对宽度的增加材料的断裂应变减小.也就是说,接头的相对宽度越宽,应变控制的损伤越容易形成,因此对于高匹配的焊接接头,应该尽量选择较窄的焊接接头.

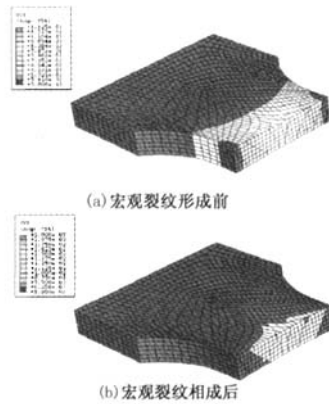


图 9 高匹配条件下相对宽度为 3 的模型在宏观孔洞形成前后的性能分布

Fig. 9 The accumulation of property in an over-matched joint with the relative width of 3mm, just before and after the formation of a macroscopic void

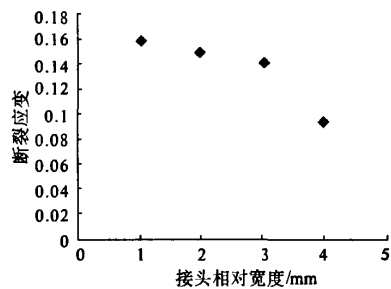


图 10 高匹配条件下断裂应变与接头相对宽度的关系

Fig. 10 Relations between longitudinal strain and width of relative width of over-matched joints

#### 4 结论

应用双孔微剪切试验方法结合有限元模拟,研究了铝合金对接焊接接头在静态拉伸条件下的变形及损伤行为,并基于修改的 Gurson 模型研究了焊接接头性能不匹配条件下,焊接接头相对宽

度对接头失效行为的影响,得到以下的结论:

(1) 双孔微剪切试验能够准确的表征材料的性能;

(2) 对于低匹配的焊接接头,微观孔洞主要形核于接头部分,并且随着接头相对宽度的增加,材料的断裂应变增加;

(3) 对于高匹配的焊接接头,微观孔洞主要形核于母材部分,并且随着接头相对宽度的增加,材料的断裂应变减小;

(4) 因此对于低匹配的焊接接头尽量选择相对宽度较宽的焊接接头,对于高匹配的焊接接头尽量选择接头相对宽度较窄的焊接接头。

究,2000,(6):31~33.

- [2] LI X Y, HAO Q, SHI Y W. Influence of mechanical mismatching on the failure of welded joints by void nucleation and coalescence[J]. International Journal of pressure Vessels and Piping, 2003, 80(9):647~654.
- [3] 车洪艳,朱亮,陈剑虹. 6061 铝合金平板对接焊接接头拉伸性能研究.[J]. 兰州理工大学学报,2008, 34(2):27~30.
- [4] 车洪艳,朱亮,陈剑虹. 局部材料损伤行为的双孔微剪切试验[J]. 兰州理工大学学报,2007,33(4): 31~34.
- [5] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社,2002.

### 参考文献:

- [1] 王柏龄. 全铝车身的研究及发展[J]. 汽车工业研

## Study on Deformation and Damage Behavior of Aluminium Alloy Butt Welded Joint under Tension Loading

CHE Hong - yan<sup>1,2</sup>, XU Wen - fu<sup>1,2</sup>, CHEN Jian - hong<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** TIG butt weld on the plate of aluminium alloy 6061 was tested for its tension behavior on a universal tension apparatus. The failure of specimen occurred in HAZ (heat - affected - zone) which apart 7 ~ 9mm from fusion line. By using the double - hole micor - 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 mehod. 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 well consistent with each other. It also studies the influence of mechanical mismatching on the failure of welded joints based on the correct model. The results show the damage of under - matched joints mainly occurred in the HAZ, the narrower the joint, the lower the damage resistance of the specimen, based on which, a reasonably wide weld should be chosen for under - matched welded joints. While, to the over - matched joints, the damage mainly occurred in the base metal area adjacent to the joint, the narrower the joint, the higher the damage resistance of the joint. A reasonably narrow weld is suggested to be chosen for over - matched welded joints.

**Key words:** aluminium alloy; butt welded joint; failure; FEM