

文章编号: 1673-5196(2007)04-0031-04

局部材料损伤行为的双孔微剪切实验

车洪艳^{1,2}, 朱亮^{1,2}, 陈剑虹^{1,2}, 任国松^{1,2}

(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: 为研究材料的局部力学性能进行双孔微剪切实验, 将实验结果与有限元相结合获得材料的损伤参数. 通过对比实验与数值仿真的结果, 验证 Gurson 和 Johnson-Cook 两种损伤模型对双孔微剪切过程中损伤的起始和演化过程. 结果表明, 基于微观机制的 Gurson 模型不能很好地预测剪切断裂的过程, 宏观现象学的 Johnson-Cook 损伤模型能够得到满意的结果. 分析原因, 材料的损伤行为与三向应力度相关, 在三向应力度不同时损伤机理不同.

关键词: 微剪切; 损伤; 有限元

中图分类号: TG146.2; TB115 **文献标识码:** A

Experiment of local damage behavior within materials by using double hole micro shearing

CHE Hong yan^{1,2}, ZHU Liang^{1,2}, CHEN Jian hong^{1,2}, REN Guo song^{1,2}

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

Abstract: Double hole micro shearing tests were carried out to investigate the local mechanical properties within materials. Then the experimental results were combined with those of numerical simulation of finite element to acquire the damage parameters. The numerical results were compared with the experimental ones to verify the validity of Gurson and Johnson-Cook damage models in describing the initiation and propagation of cracks during their evolution. The results indicated that, based on the micro mechanical Gurson damage model, it was impossible to predict the fracture propagation process quite well. However, the macro phenomenological damage model like Johnson-Cook gave good results instead. Because material damage behavior depended strongly on stress triaxiality, damage mechanism would be different for different stress triaxiality employed.

Key words: micro shear; damage; finite element

汽车碰撞过程中部件要经历塑性大变形, 进而材料将发生损伤, 以至于最后断裂. 而在这个过程中, 部件的焊缝又是主要的承载部位. 随着对碰撞仿真结果可靠性需求的增加, 模拟材料在碰撞时的损伤行为变得越来越重要. 然而焊接接头的不均匀性, 以及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^[1]. 国内外学者对此进行了大量的研究, 提出了焊缝区与母材屈服强度的拟合关系式; 采用试验和有限元反推相结合的方法对

材料的力学性能测试^[2]; 应用穿孔剪切的方法对钢、铝合金及钛合金在冲击载荷作用下的力学性能测试^[3]; 以及对焊接接头的力学性能提出微剪韧性的概念, 为微接头的局部力学性能测定提供了很好的方法^[4]. 仿真结果可靠性很大程度上取决于材料的损伤参数, 获得准确的损伤参数对于研究铝合金焊接结构的局部力学性能非常重要. 本文应用局部力学性能试验, 结合试验和有限元分析, 考虑材料的损伤行为, 研究不同损伤模型预测剪切断裂的过程.

1 实验

1.1 实验原理

首先在试样上选定被测材料区域, 在其两侧钻

收稿日期: 2007-03-29

基金项目: 国家重大基础研究专项基金(2004CCA 04900)

作者简介: 车洪艳(1977-), 女, 辽宁北镇人, 博士生

直径为 2 mm 的上下两个通孔,如图 1 所示.两孔间的小桥为被测材料的区域,厚度为 0.3 mm.实验时,通过专用的压头^[5]在上孔内表面施加向下的力,使两孔之间的材料发生剪切变形直至断裂.在加载过程中,变形集中在压头下的区域,对应的载荷-位移曲线只反映被测区域的力学性能.变形区域大小由压头大小决定,实验中压头尺寸宽度为 1 mm,压头与孔接触部分的弧度和孔相吻合.如图 1 所示.其实验装配如图 2 所示.

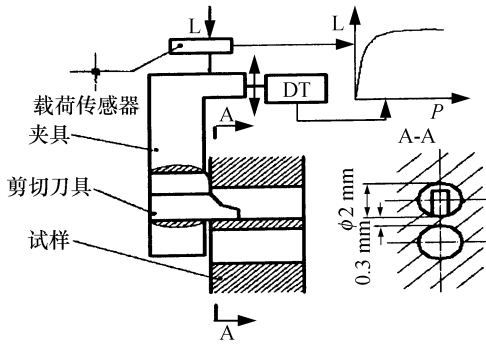


图 1 实验原理

Fig. 1 Principle of test

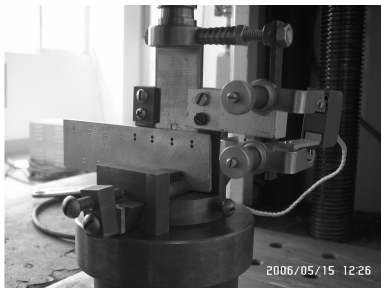


图 2 实验装配

Fig. 2 Experimental rig

1.2 实验过程

实验采用 AA 6014 铝合金为研究对象,以此均质材料为基础,应用局部力学性能实验方法测量材料的损伤参数,并研究使用不同损伤模型对剪切断裂的预测.试验在万能拉伸机上进行,实验中载荷通过夹具施加在剪切压头上,由载荷传感器测量.位移由应变仪测量,用记录仪记录载荷-位移曲线,加载速度为 1 mm/min,并对试样进行卸载观察.在加载过程中,被测量区域的材料要经历如图 3 所示的变形过程.

2 有限元模拟微剪切过程

2.1 有限元模型的建立

建立简化的有限元模型,模型具有对称性,取其 1/2 试样采用三维实体单元建模,并根据试验实际

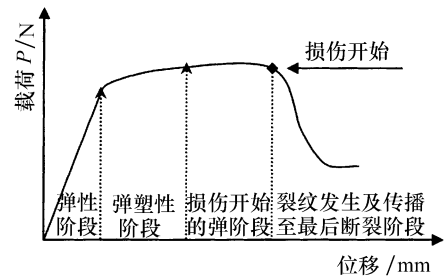


图 3 试样剪切断裂过程

Fig. 3 Schematic diagram of micro shear

设定边界条件,图 4 为应用 ABAQUS/CAE 建立微剪切试样的有限元模型及边界条件的设定.为得到准确的计算结果在小桥连接处采用细化网格的方法,网格尺寸为 0.5 mm,单元类型为 C3D8R,采用简缩积分沙漏控制.应用 ABAQUS/Explicit 进行计算,材料的损伤模型参数通过有限元反推法^[7],从拟合平板拉伸试验中获得.因为损伤参数与有限元网格尺寸有关,所以通过调节网格尺寸,改变参数,再将其应用在双孔微剪切试验中.

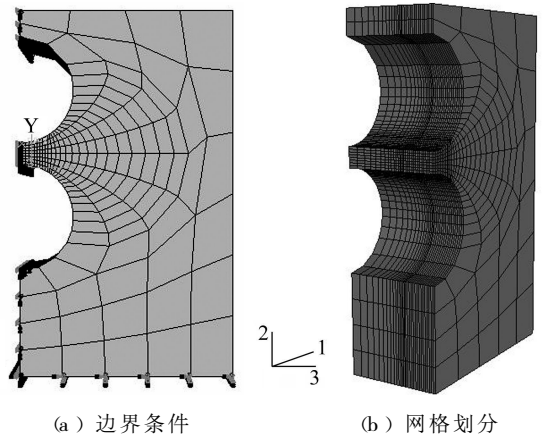


图 4 有限元模型

Fig. 4 F.E. model

在模拟双孔之间的小桥剪切断裂过程中,要准确预测损伤的发生位置及损伤的演化直至材料最后断裂的过程.所选择的损伤模型必须要能够同时预测损伤及断裂这一连续的过程.用微观机制的 Gurson 损伤模型,及宏观现象学的 Johnson-Cook 损伤模型都能描述材料的损伤及断裂这一连续的过程.

2.2 Gurson 损伤模型^[7]

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

$$\varphi = \left[\frac{q}{\sigma_y} \right]^2 + 2q_1 f^* \operatorname{ch} \left[-q_2 \frac{3p}{2\sigma_y} \right] - (1 + q_1 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

其中, q 是等效 Mises 应力, p 是静水压力, α_3 是屈服应力, q_1, q_2, q_3 为材料参数, f^* 为

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

其中, 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, f_F 为

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

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分数来表示. 因为对于韧性金属来讲, 损伤引起的各向异性不是非常明显. 孔洞体积分数包括两部分:

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

$$f_{gr} = (1 - f) e^{\epsilon^d} \quad (5)$$

$$f_{nuc} = A \epsilon_m^d \quad (6)$$

式(6)中, A 为

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

其中, ϵ_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.

2.3 Johnson-Cook 损伤模型^[7]

Johnson-Cook 剪切失效模型是基于单元积分点的等效塑性应变, 损伤参数 ω 定义如下:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \epsilon^d}{\xi^d} \right) \quad (8)$$

当损伤参数超过 1 时失效发生, 其中 $\Delta \epsilon^d$ 是等效塑性应变的增益, ξ^d 是失效点的应变, 求和符号是将所有的增益相加, 其中 ξ^d 在本文的研究中为

$$\xi^d = \left[d_1 + d_2 \exp \left(\frac{d_3 p}{q} \right) \right] \quad (9)$$

其中, p 为压力, q 为 Mises 应力, $d_1 \sim d_3$ 是在转变温度及以下测量得到的失效参数.

3 结果及讨论

考虑材料的损伤行为, 分别应用 Gurson 和 Johnson-Cook 损伤模型模拟双孔微剪切的断裂过程, 试验与仿真结果的载荷-位移曲线如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 当应用 Gurson 模型来预测剪切断裂的过程时, 没有得到很好的结果. 随着压头下压位移的增加, 材料进入到弹塑性阶段以后, Gurson 模型所预测的曲线便偏离了实际实验曲线.

而应用 Johnson-Cook 损伤模型预测剪切变形的损伤和断裂过程得到了较好的结果. 图 6 为工具显微镜下观察到的双孔之间小桥的变形、损伤及断裂过程. 随着压头下压距离的增加, 材料开始发生塑性变形如图 6a 所示, 随着下压距离的增加在小桥的左右两侧, 从宏观上可以观察到材料开始发生剪切破坏, 图 6c 为宏观裂纹进一步扩展的金相照片.

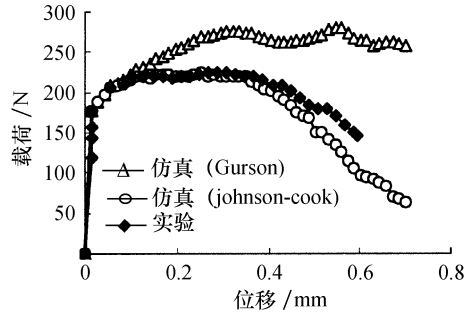
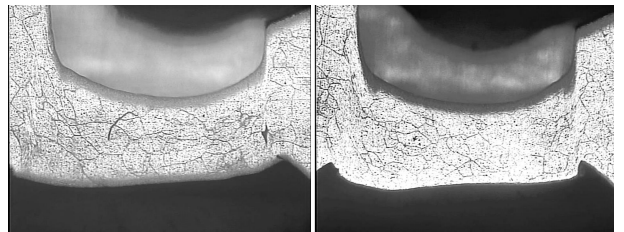


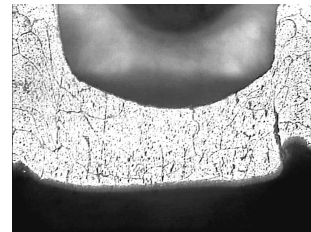
图 5 试验和仿真的对比曲线

Fig. 5 Comparison of experiment and numerical simulation



(a) 塑性变形

(b) 损伤开始



(c) 裂纹扩展

图 6 剪切断裂过程

Fig. 6 Fracture process

图 7 为在损伤发生前的一个增量时, 两种损伤模型预测的 Mises 应力的云纹图.

从图 7 可以看出, 当压头在下压的过程中, 图 7a 中剪切面上 Mises 应力较图 7b 中剪切面上 Mises 应力的量值要高. 图 8 为 Johnson-Cook 损伤模型预测的材料在剪切载荷作用下损伤发生及演化直至最后断裂的过程.

从图 8 可以看出, 随着压头下压距离的增加, 材料开始发生塑性变形, 如图 8a 所示, 当下压距离进一步增加, 材料损伤开始发生. 图 8b 为当式(8)中损伤参数值超过 1 时, 通过 ABAQUS/Explicit 将失效

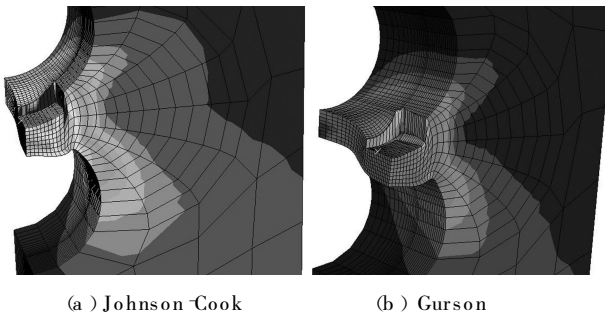


图 7 Mses 应力对比

Fig. 7 Comparison of contour of Mses

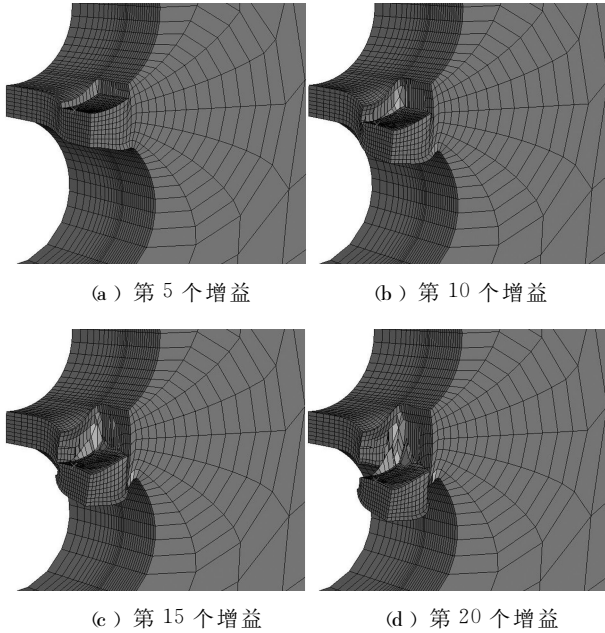


图 8 剪切过程模拟(Johnson-Cook)

Fig. 8 Simulation of shear process (Johnson-Cook)

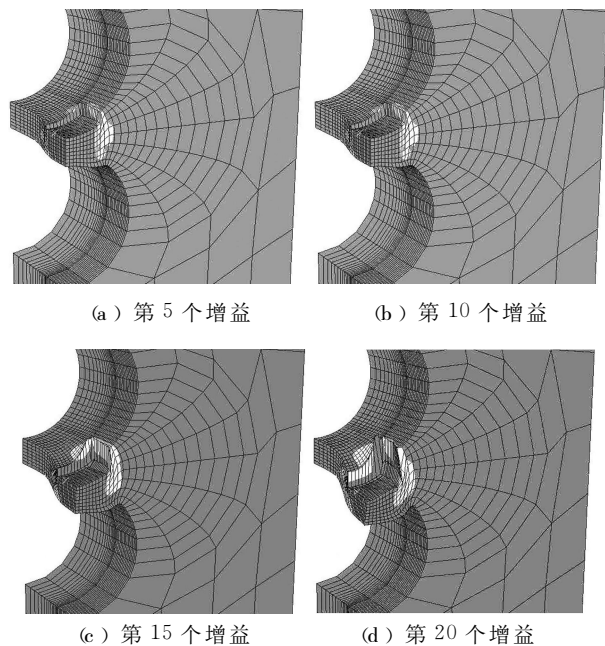


图 9 剪切过程模拟(Gurson)

Fig. 9 Simulation on shear process (Gurson)

的单元消去后得到的效果图,对应于图 6b.图 8 为裂纹进一步扩展,两个剪切面已经发生剪切断裂的效果图.图 8d 为最终断裂的结果,对应于图 6c.图 9 为应用 Gurson 模型预测微剪切断裂的过程,显示了微孔洞体积分数在剪切过程中分布的变化.

从图 9 可以看出,在剪切过程中,孔洞产生及长大的区域并不在剪切面上,而是在剪切面的临近区域,这也就导致了最后的断裂并不发生在剪切面上,因而 Gurson 模型没有很好地预测剪切断裂过程中损伤的发生及演化.

4 结论

实验及数值仿真结果表明,双孔微剪切试验能够获得材料局部力学性能,并且与有限元仿真相结合能够预测材料的损伤及断裂行为.连续损伤模型 Gurson 及 Johnson-Cook 在预测双孔微剪切断裂的过程中得到不同的结果.基于微观机制的孔洞形核及长大理论的 Gurson 损伤模型,不能很好地预测剪切断裂的过程.这是因为铝合金的损伤机理与三轴度密切相关,Gurson 模型中的孔洞体积膨胀率随着三轴度的增大而增大,而在剪切断裂过程中,三轴度很小(纯剪切时为 0),在此情况下,不存在使孔洞体积连续长大的驱动力.基于宏观现象学的 Johnson-Cook 剪切断裂模型很好地预测了在剪切断裂过程中损伤的发生及演化过程.

参考文献:

- [1] KIM Y J, SCHWALBE K H. Mis match effect on plastic yield loads in idealised weldments :II .heat affected zone cracks [J]. Engineering Fracture Mechanics ,2001,68(2):183-199.
- [2] 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.
- [3] ROESSING K M ,MASON J J .Adiabatic shear localization in the dynamic punch test ,part I :experimental investigation [J].International Journal of Plasticity ,1999,15(3):241-262.
- [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] 朱 亮,侯艳容.双孔微剪切法测定材料的局部强度[J].兰州理工大学学报,2006,32(3):25-28.
- [6] LAURO F ,BENNANI B .Identification of the damage parameters for anisotropic materials by inverse technique application to an aluminium [J].Material Processing Technology ,2001,118(1-3):472-477.
- [7] 石亦平,周玉蓉.ABAQUS 有限元分析实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006.