

剪应力状态下 6061 铝合金的力学性能及断裂行为

朱 浩, 齐芳娟, 张 洋

(石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050043)

摘 要: 对设计的拉伸剪切试样和原位拉伸剪切试样分别进行不同剪应变率下的拉伸剪切试验及原位拉伸剪切试验, 研究 6061 铝合金在剪力状态下的力学性能及断裂行为, 并用有限元软件 ABAQUS 对铝合金在剪应力状态下的断裂行为进行模拟。结果表明: 随着剪应变率的增大, 6061 铝合金的剪切屈服强度和抗剪强度基本保持不变, 但剪切断裂应变明显减小; 剪应变率对试样的断口形貌没有影响; 6061 铝合金晶界是其最薄弱环节, 在拉伸剪切过程中铝合金试样表面上产生了大量与拉伸方向平行的滑移带; 微裂纹在剪应力作用下形核于与拉伸方向平行的滑移带和晶界, 随着剪应力的增加, 微裂纹长大和扩展; 微裂纹之间通过剪切而连接导致试样断裂; 6061 铝合金剪切断裂行为可以用 Johnson-Cook 模型进行描述。

关键词: 6061 铝合金; 拉伸剪切; 原位拉伸剪切; 断裂行为; Johnson-Cook 模型

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Mechanical properties and fracture behavior of 6061 aluminum alloy under shear stress states

ZHU Hao, QI Fang-juan, ZHANG Yang

(Institute of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The mechanics properties and fracture behaviors of 6061 aluminum alloy were investigated by the tensile shear tests and in-situ tensile shear tests with tensile shear specimen devised. The FEM software ABAQUS can be used to describe the fracture behaviors of 6061 aluminum alloy under shear stress states. The results indicate that with increasing the shear strain rates, the shear yield stress and shear ultimate stress of 6061 aluminum alloy remain constant basically, while the shear fracture strain obviously decreases. The shear strain rates have no influence on the fracture surfaces. A lot of slip bands paralleling to the tensile direction are produced on the specimens' surfaces. The grain boundaries of 6061 aluminum alloy are the weakest area, and the microcracks initiate at the slip bands and grain boundaries parallel to the tensile direction under shear stress. With increasing the shear stress, the microcracks extend and coalesce. The specimens fracture due to coalescence or shearing between the microcracks. The Johnson-Cook model can be used to describe the fracture behaviors of 6061 aluminum alloy under shear stress states.

Key words: 6061 aluminum alloy; tensile shear; in-situ tensile shear; fracture behavior; Johnson-Cook model

交通工具轻量化是节能、环保以及经济发展的需求。铝合金以其比强度和比刚度高、耐腐蚀、塑性好等优点被广泛地应用于载运工具^[1-3]。作为车辆主要承载体的铝合金空间框架结构, 对车辆安全性和运动耐

冲击性起关键作用。交通工具前端防撞装置用的是铝合金型材, 它在碰撞时会产生大量褶皱, 吸收大量的能量, 从而保护了驾驶员及乘客的人身安全。交通工具前端的防撞器一般为铝合金薄壁方管, 薄壁方管在

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(211022); 河北省自然科学基金项目资助项目(E2012210001); 河北省教育厅基金资助项目(933005); 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2010209)

收稿日期: 2011-05-19; **修订日期:** 2012-01-05

通信作者: 朱 浩, 副教授, 博士; 电话: 0311-87935086; E-mail: zhuhao@stdu.edu.cn

碰撞过程中, 其应力状态发生变化, 所以其损伤形式和断裂机理也是变化的, 损伤和断裂将会影响整个装置的吸能效果。关于铝合金韧性断裂机理, 国内外学者进行了大量研究^[4-7]。但薄壁方管在挤压过程中, 其上的应力状态很大一部分处于剪切范围内^[8]。关于铝合金在剪切应力状态下的力学性能及断裂行为报道甚少。本文作者通过对设计的拉伸剪切试样和原位拉伸剪切试样分别进行不同剪应变率下的拉伸剪切试验和原位拉伸剪切试验, 研究 6061 铝合金在不同剪应变率下的力学性能和断裂行为, 并对 6061 铝合金剪切断裂行为进行有限元模拟。

1 实验

1.1 实验材料

试验所用的材料为 Al-Mg-Si-Cu 系挤压 6061 铝合金方管(T6 态), 其室温下的屈服强度为 274.8 MPa, 抗拉强度为 297.9 MPa。该材料的显微组织如图 1 所示, 材料中各元素的含量如表 1 所列。

表 1 挤压 6061 铝合金的组分

Table 1 Compositions of extrusion 6061 aluminum alloy (mass fraction, %)

Si	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn	Cr
0.69	1.02	0.43	<0.20	0.26	<0.15	0.20

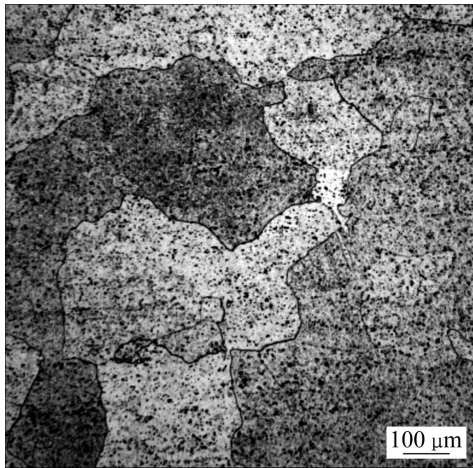


图 1 挤压 6061 铝合金的微观组织
Fig. 1 Microstructure of extrusion 6061 aluminum alloy

1.2 试样制备

为了研究材料在剪切条件下的力学行为, 国内外学者^[9-11]主要采用如图 2(a)~(c)的几种剪切试样, 这几

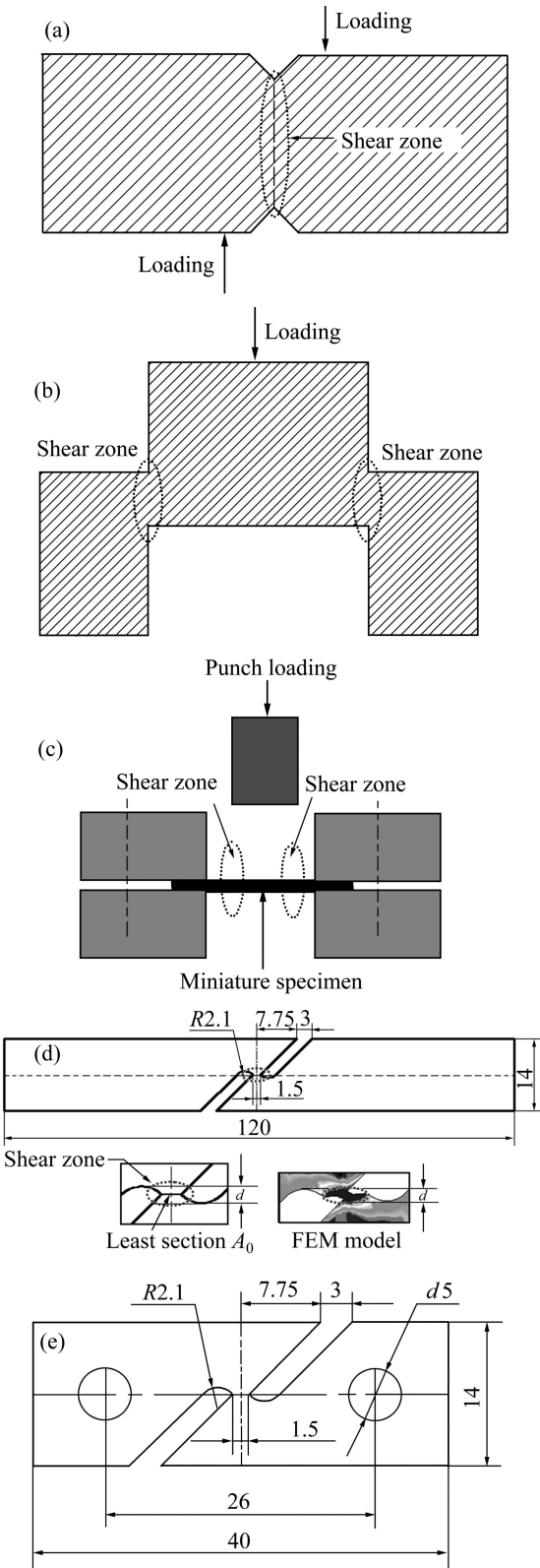


图 2 几种剪切试样示意图(mm)
Fig. 2 Schematic diagram of several kinds of shear specimens (mm): (a) Isoipescu specimen; (b) Cup specimen; (c) Punch specimen; (d) Tensile shear specimen; (e) In-situ tensile shear specimen

种剪切试样主要在压缩载荷下发生剪切破坏, 主要适应于中厚板, 而对于铝合金薄板不是很合适。为了解决这种情况, 设计出如图 2(d)所示的拉伸剪切试样, 这种剪切试样可以采用拉伸的加载方式进行, 进而研究材料在不同剪应变率下的力学行为。同时, 为了全面地研究铝合金剪切断裂过程, 设计出原位拉伸剪切试样, 如图 2(e)所示。所有试样用电火花 CKX-2AJ 线切割机加工。

1.3 试验方法

在室温下, 将图 2(d)所示的剪切拉伸试样在 SHIMADZU AG-8TA 万能拉伸机上进行拉伸试验, 拉伸速度分别为 1、30、120、360 和 500 mm/min。试验时, 试验机自动记录加载时的载荷—位移曲线, 载荷—位移曲线转化为材料的剪应力—剪应变曲线。通过剪应力—剪应变曲线测量材料的剪切屈服应力、抗剪强度和剪切断裂应变。平均剪切应变率等于加载速率除以试样中缺口之间的最小距离。计算出的平均剪应变率分别为 0.01、0.33、1.33、4.00 和 5.56 s⁻¹。

将图 2(e)的原位拉伸剪切试样, 在扫描电镜 SEM-520 真空室内带有加载设备的小拉伸机上一边加载一边观察试样表面滑移带产生及裂纹的扩展情况。试验开始时, 通过拉伸机自带的载荷传感器输出的电压值, 然后通过事先对载荷传感器标定的载荷与电压的关系式换算成载荷值。载荷除以试样原始最小断面的面积, 以此得到相应的应力值。

2 计算结果与分析

2.1 不同剪应变率下拉伸剪切试验结果及讨论

不同剪应变率下的工程剪应力(τ)—剪应变(γ)曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 当剪应变率小于 1.33 s⁻¹ 时, 随着剪应变率的提高, 6061 铝合金的剪切屈服强度略有增加, 抗剪强度先略有增加后略有降低。这是由于这种合金中的 Mg₂Si 相以及其它一些颗粒对位错、晶界等晶体缺陷的钉扎作用, 使合金中位错密度略有增加, 运动时位错将彼此相遇而发生相互作用, 从而阻碍位错移动, 合金形变效果增加, 因而剪切屈服强度略有增加^[12]。合金在屈服后进入塑性流动阶段, 由于合金处于剪切应力条件下的大变形状态, 变形局部化程度高、时间短, 金属瞬间大变形产生大量的热, 在短时间内不能迅速散去, 引起试样局部温度升高, 导致

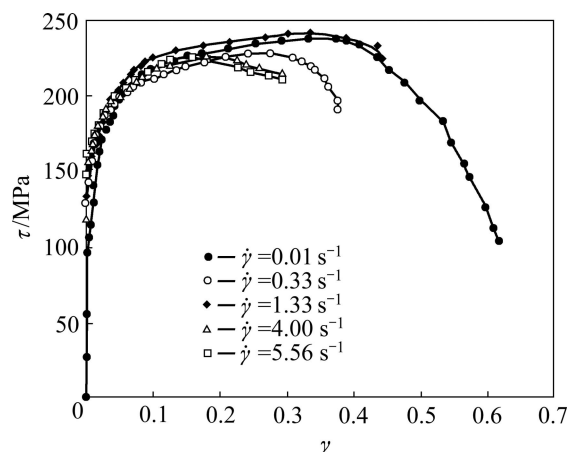


图 3 不同剪应变率下的剪应力—剪应变曲线

Fig. 3 Curves of shear stress—strain under different shear strain rates

金属软化, 热软化作用和形变强化效用相互竞争。除剪应变率为 0.33 s⁻¹ 以外, 当剪应变率小于 1.33 s⁻¹ 时, 形变强化效用占主要因素, 热软化作用占次要因素, 即形变强化效用大于热软化作用, 所以随着剪应变率提高, 抗剪强度略有增加; 当剪应变率大于 1.33 s⁻¹ 时, 热软化作用占主要因素, 形变强化效用占次要因素, 即热软化作用大于形变强化效用, 所以随着剪应变率提高, 抗剪强度略有降低。

总体来说, 剪应变率对 6061 铝合金的剪切力学性能的影响作用不大, 即在中低剪应变率的范围内, 6061 合金对应变率敏感性较低。这进一步验证了在低应变率范围内, 铝合金是应变率不敏感材料的论断^[5, 13]。影响最大的还是剪切断裂应变, 剪应变率对剪切断裂应变的影响如图 4 所示。

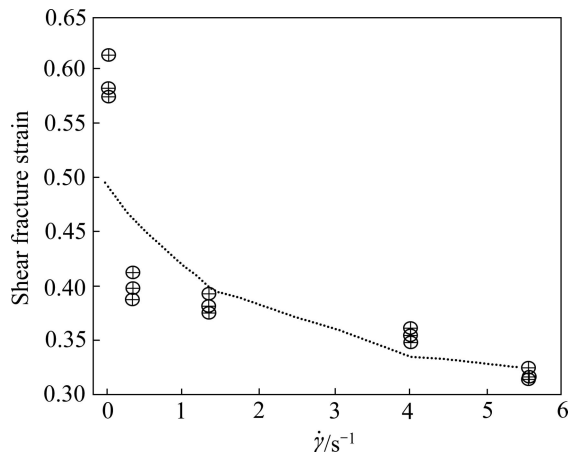


图 4 剪应变率对剪切断裂应变的影响

Fig. 4 Effect of shear fracture strain on shear strain rates

从图 4 可以看出, 随着剪应变率增加, 剪切断裂应变减小。这是由于随着剪应变率增加, 位错彼此相遇而发生相互作用增强阻碍位错移动, 从而导致剪切断裂应变减小。随着剪应变率进一步增加, 热软化作用虽然增强, 但此时试样中发生微孔洞损伤导致微裂纹形成, 从而使得剪切断裂应变进一步减小^[13]。通过试验数据的最小二乘法拟合可以得出剪应变率对剪切断裂应变(γ_f)的影响具有如下规律:

$$\gamma_f = 0.4\dot{\gamma}^{-0.05} \quad (1)$$

不同剪应变率下拉伸剪切断口如图 5 所示。从图 5 可以看出, 不同剪应变率下的拉伸剪切断口形貌几乎没有差别。在细观上, 与韧窝断裂的断口形貌相比, 它的显著特点是其断口上是由众多的细小的剪切面组成。剪切断口上几乎没有韧窝, 即没有空穴扩张和汇合的现象出现^[14]。理论上, 断口形貌的影响因素主要是试样中的三轴应力度(σ_m/σ_e)和等效塑性应变(Equivalent plastic strain, PEEQ), 三轴应力度占主导地位。三轴应力度控制着断口上韧窝的大小, 而等效塑性应变控制着韧窝的深浅和方向。试样中的三轴应力度越高, 则 σ_m 相对越大, 微孔洞长大的驱动力越大, 断口上的等轴型韧窝所占的面积比较大, 半椭圆型和

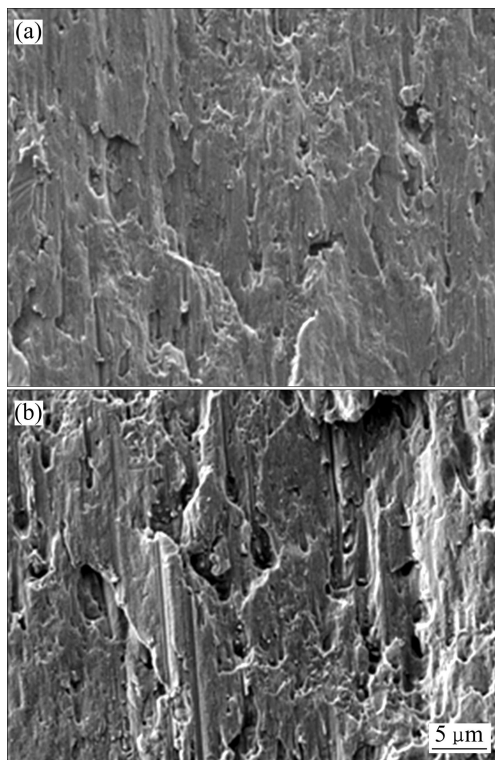


图 5 不同剪应变率下拉伸剪切断口形貌

Fig. 5 Tensile shear fracture surfaces morphologies of different shear strain rates: (a) $\dot{\gamma}=0.01 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\gamma}=5.56 \text{ s}^{-1}$

剪切面所占的成分比较小; 反之, 试样中的三轴应力度越低, 则等效塑性应变相对越大, 微孔洞长大的驱动力越小, 断口上半椭圆型韧窝和剪切面所占的成分比较大。本试验中所用的试样是纯剪切试样, 不同剪应变的拉伸试样中三轴应力度都接近于 0, 微孔洞生长的驱动力接近于 0, 所以断口上几乎没有韧窝存在, 而是由大量的光滑平整的剪切面组成的, 因而, 剪应变率对剪切试样的断口形貌没有影响。

2.2 原位拉伸剪切试验结果及讨论

图 6 所示为原位拉伸剪切试样在相同外加应力下的表面形貌。当外加切应力(以下简称外加应力)第一次达到 165.21 MPa 时, 距缺口根部一段距离处开始产生几条滑移带, 滑移带方向与外加载荷的方向平行, 说明这些滑移带的确是在切应力下产生的, 如图 6(a)所示。当外加应力达到 225.54 MPa 时, 缺口附近的材料变形已经非常严重, 在缺口根部和缺口前方的滑移带区域由于位错堆积产生应力集中沿外加应力的方向开始产生微裂纹, 如图 6(b)所示。此后, 主裂纹在剪应力的作用下不断扩展, 而外加应力几乎一直维持在 225.54 MPa, 此时加工硬化上升的应力刚好与微裂纹扩展导致应力的下降相平衡^[15]。当外加应力再次下降到 165.21 MPa 时, 加工硬化上升的应力不足以弥补微裂纹扩展导致的应力下降, 导致外加应力降低, 右边缺口根部也产生一条长约 400 μm 的裂纹, 如图 6(c)所示。此裂纹与加载方向的夹角约为 15° , 而理论上的角度应该是 0, 结果表明原位拉伸剪切试样的断裂并不是完全由剪应力作用导致的(实际试验中除了扭转之外很难达到纯剪切状态), 其中正应力也起到一定的作用。这一点可以从图 7(a)中原位拉伸剪切试样最小断面路径上的三轴应力度等于 0.1 得到验证(纯剪切试验试样中的三轴应力度等于 0)。

2.3 有限元计算结果及讨论

用有限元软件 ABAQUS 计算拉伸剪切试样最小断面路径上的三轴应力度 σ_m/σ_e (σ_m 为平均应力, σ_e 为等效应力), 正应力及剪应力的分布, 并用 Johnson-Cook 模型对铝合金原位拉伸剪切断裂过程进行模拟。在粘塑性力学和连续介质损伤力学的基础上, 考虑了材料在大变形、高应变速率和绝热的条件下, Johnson 和 Cook 于 1983 年提出一个经验性的本构关系^[16-18]。该模型认为, 材料的流变应力可以表示为应变、应变率和温度的函数:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 - (T^*)^m] \quad (2)$$

式中: T_m 为材料的熔点; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T_r 为参考温度, 一般取室温。

Johnson-Cook 断裂应变模型:

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_e}) \right] \left[1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right]^{D_4} [1 + D_5 T^*] \quad (3)$$

式中: A , B , n , C , m , D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 为材料常数。单元类型采用三维 8 节点减积分应变单元 (C3D8R)。拉伸剪切试件最小断面路径上的三轴应力分布如图 7(a) 所示, 相应的正应力剪应力分布如图 7(b) 所示。原位拉伸剪切断裂行为模拟时材料常数值如下: $A=250$ MPa, $B=265.94$ MPa, $n=0.32$, $C=0$, $m=0$; $D_1=0.299$, $D_2=1.496$, $D_3=3.32$, $D_4=D_5=0$ 。模拟的剪应变率为 0.01 s^{-1} 时的剪应力—剪应变曲线以及原位拉伸剪切在不同剪应力下的 Mises 应力云图如图 8 所示。

由图 7(a) 可以看出: 在拉伸剪切试件两缺口根部三轴应力度达到极大值, 此后三轴应力度减小, 在距离两缺口根部大约 0.14 mm 的地方, 三轴应力度达到极小值 0.1 , 随后三轴应力度几乎保持不变。原因可以

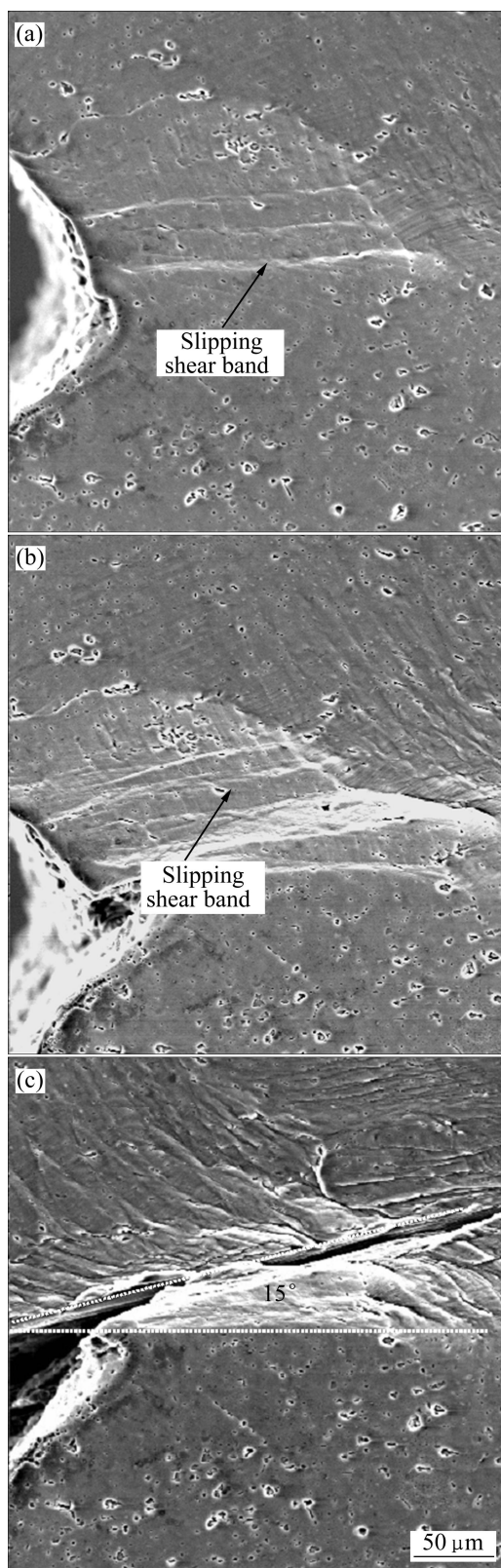


图 6 原位拉伸剪切试样表面滑移带及裂纹形貌

Fig. 6 Surfaces observation of in-situ tensile shear specimen: (a) 165.21 MPa; (b) 225.54 MPa; (c) 165.21 MPa

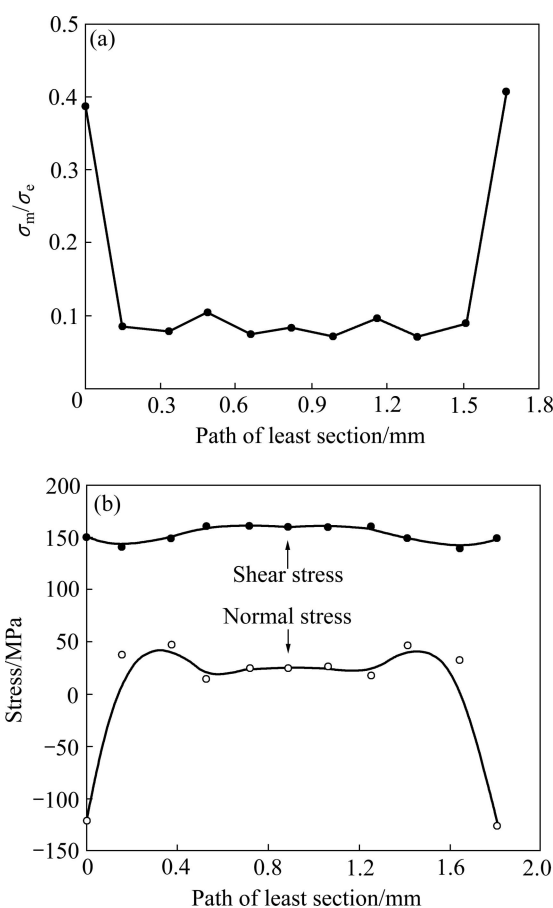


图 7 拉伸剪切试样最小路径上的三轴应力度和正应力及剪应力分布

Fig. 7 Distributions of stress triaxiality, normal stress and shear stress: (a) Distribution of stress triaxiality; (b) Distribution of normal stress and shear stress

从图 7(b)得到解释,在拉伸剪切试样最小截面上的正应力和剪应力都占了相当的比例,但是其分布不同。在缺口根部,正应力分量大于剪应力分量;在离缺口一定的距离时,正应力开始减小,而剪应力开始增加。在试样缺口最小截面上一定区域内,正应力达到最小值并保持不变,剪应力达到最大值也保持不变。

图 8 所示为加入 Johnson-Cook 模型模拟剪应变率为 0.01 s^{-1} 时的剪应力—剪应变与试验的对比图以及

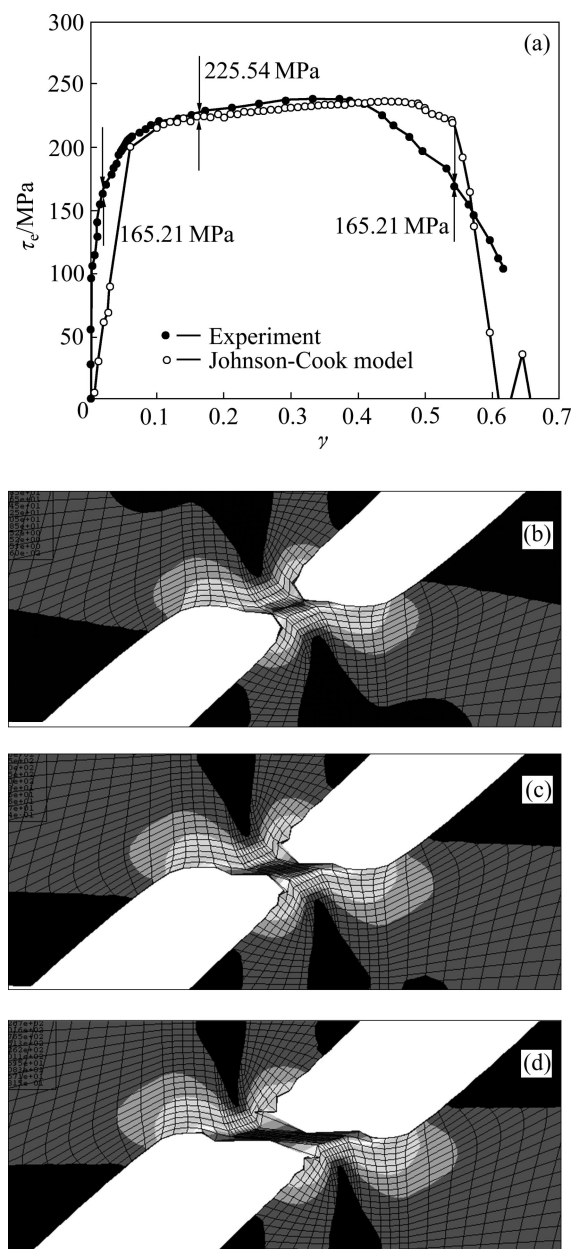


图 8 模拟剪应变率为 0.01 s^{-1} 时剪应力—剪应变曲线及原位拉伸剪切试样 Mises 云图

Fig. 8 Curve of shear stress—shear strain under shear strain rate of 0.01 s^{-1} and Mises nephogram: (a) Curves of shear stress—shear strain under shear strain rate of 0.01 s^{-1} ; (b) 165.21 MPa; (c) 225.54 MPa; (d) 165.21 MPa

在不同剪应力下试样上 Mises 云图。从图 8 可以看出,用 Johnson-Cook 模型计算出 6061 铝合金在剪应力状态下的剪应力—剪应变曲线与试验吻合较好。同时还可以看出,模拟的原位拉伸剪切试样在不同剪应力下的塑性变形和断裂行为与原位拉伸剪切试验基本上相似。所以,Johnson-Cook 模型可以用来描述 6061 铝合金在剪应力状态下的力学及断裂行为。

3 结论

1) 设计的拉伸剪切试样和原位拉伸剪切试样可以满足不同剪应变率下的剪切试验和原位拉伸剪切试验要求,对研究薄板材料在剪应力状态下的力学性能与断裂行为具有很好的借鉴意义。

2) 在中低剪应变率的范围内,6061 合金对应变率敏感性较低,即剪应变率对 6061 铝合金的抗剪强度影响不大;随着剪应变率的增大,剪切断裂应变减小;剪应变率对拉伸剪切试样的断口形貌没有影响,断口大部分由平整光滑的区域组成,在断口上几乎没有韧窝,属于典型的纯剪切断口形貌。

3) 6061 铝合金晶界是其最薄弱环节,铝合金试样在拉伸剪切过程中,其表面上产生了大量的与拉伸方向平行的滑移带,微裂纹在剪应力作用下形核于与拉伸方向平行的滑移带和晶界,随着剪应力的增加,微裂纹长大和扩展。微裂纹之间通过剪切而连接导致试样断裂,由于拉伸剪切试样最小断面基本上只存在切应力,而正应力非常小,所以,微裂纹的产生及扩展基本上都是在切应力作用下完成的。

4) 6061 铝合金剪切力学行为和断裂行为可以用 Johnson-Cook 模型进行描述。

REFERENCES

- [1] PIKETT A K, PYTTEL T, PAYEN F. Failure prediction for advanced crashworthiness of transportation vehicles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30: 853–872.
- [2] HOU S J, LI Q, LONG S Y, YANG X J, LI W. Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35: 1355–1367.
- [3] JOEM K P, JUNG K S. A method for progressive structural crashworthiness analysis under collisions and grounding[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45: 15–23.
- [4] BATRA R C, LEAR M H. Adiabatic shear banding in plane strain tensile deformations of thermoelastoviscoplastic materials

- with finite thermal wave speed[J]. *International Journal of Plasticity*, 2005, 21: 1521–1545.
- [5] WARREN T L, FORRESTAL M J. Effect of strain hardening and strain-rate sensitivity on the penetration of aluminum targets with spherical-nosed rods[J]. *Int J Solid Structures*, 1998, 35: 3737–3753.
- [6] ZHU H, ZHU L, CHEN J H, LÜ D. Investigation of fracture mechanism of 6063 Al alloy under different stress states[J]. *International Journal of Fracture*, 2007, 146(3): 159–172.
- [7] 朱浩, 朱亮, 陈剑虹, 吕先锋. 不同应力状态下 6063 铝合金变形及损伤机理研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, 36(4): 597–601.
- ZHU Hao, ZHU Liang, CHEN Jian-hong, LÜ Xian-feng. The study of deformation and damage mechanism of aluminum alloy (6063) under different stress states[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2007, 36(4): 597–601.
- [8] GU Gong-yao, XIA Yong, ZHOU Qing. On the fracture possibility of thin-walled tubes under axial crushing[J]. *Thin-Walled Structure*, 2012, 55: 85–95.
- [9] YANG R Q, LI S X, ZHANG Z F. Cyclic deformation and dynamic compressive properties of copper baristas[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 466(1/2): 207–217.
- [10] FLEURY E, HA J S. Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1998, 75: 699–706.
- [11] FINARELLI D, ROODING M, CARSUGHI F. Small punch tests on austenitic and martensitic steels irradiated in a spallation environment with 530 MeV protons[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, 328: 146–150.
- [12] 郭伟国, 田宏伟. 几种典型铝合金应变率敏感性及其塑性流动本构模型[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(1): 56–60.
- GUO Wei-guo, TIAN Hong-wei. Strain rate sensitivity and constitutive models of several typical aluminum alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(1): 56–60.
- [13] SMERD R, WINKLER S, SALISBURY C. High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32: 541–560.
- [14] YUAN S P, WANG R H, LIU G, LI R. Effects of precipitate morphology on the notch sensitivity of ductile fracture in heat-treatable aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527: 7369–7381.
- [15] 朱浩, 吕丹, 朱亮, 陈剑虹, 陈德利. 6061 铝合金断裂机理的原位拉伸研究[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(2): 94–99.
- ZHU Hao, LÜ Dan, ZHU Liang, CHEN Jian-hong, CHEN De-li. Investigation of fracture mechanism of 6061 aluminum alloy by means of in-situ observation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(2): 94–99.
- [16] MILANI A S, DABBOUSSI W, NEMES J A, ABEYARATNE R C. An improved multi-objective identification of Johnson-Cook material parameters[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 294–302.
- [17] WANG X B. Temperature distribution in adiabatic shear band for ductile metal based on Johnson-Cook and gradient plasticity models[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society China*, 2006, 16: 333–338.
- [18] LALWANI D I, MEHTA N K, JAIN P K. Extension of Oxley's predictive machining theory for Johnson and Cook flow stress model[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209: 5305–5312.

(编辑 龙怀中)