

不同应力状态下铝合金变形及损伤机理的研究

朱 浩, 朱 亮, 陈剑虹, 吕先锋

(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: 利用改装的 Arcan 夹具对铝合金 (6063) 的蝶形试样进行 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 的拉伸及拉伸卸载试验, 研究了铝合金在不同应力状态下变形及损伤机理。结果表明: 铝合金在不同应力状态下的工程应力-应变曲线明显不同。 0° 加载时, 在蝶形中心产生微孔洞, 微孔洞之间剪切, 从而产生了微裂纹。随着微裂纹的扩展、连接导致试样断裂。随着试样中三轴应力度的减小, 在蝶形试样中心的剪切应力不断增大, 同时在蝶形试样中的剪切变形带越来越集中。显微裂纹首先在剪切带中产生, 随着微裂纹的扩展导致试样的断裂。 90° 拉伸时, 在蝶形中心形成明显的剪切变形带。 90° 加载时, 在试样中产生的剪切带是形变剪切带而非相变剪切带。利用有限元软件 ABAQUS 对不同角度拉伸试验进行模拟, 从而得出了不同应力状态下的塑性区的形状和大小。

关键词: 铝合金; 变形; 损伤; 剪切变形带; 微裂纹

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2007)04-0597-05

1 前 言

为了适应节能环保的要求, 大量的铝合金成为交通工具的主要用材。交通工具的一个重要性能指标就是耐撞击性^[1]。铝合金汽车构件在撞击过程中, 构件的应力状态各点均不相同, 而且在撞击过程中各点的应力状态还随着时间变化而变化。因此, 为了研究汽车铝合金构件在不同应力状态下变形及损伤机理, 利用改装的 Arcan 夹具^[2], 在蝶形试样上进行 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 的拉伸及拉伸卸载试验。大量研究表明^[3-9]: 铝合金存在着两种宏观断裂模式: 韧窝断裂模式与剪切断裂模式。从细观上来说, 材料的韧窝断裂由空穴形核、扩张和汇合造成; 剪切断裂的细观机理则是材料内的细观剪切面的开裂和汇合。汤安民^[10]通过研究 LY12 铝合金发现, 在这种材料中, 的确存在两种不同的断裂形式, 即正拉断与剪断。本实验利用蝶形试样在改装的 Arcan 夹具上进行不同角度的拉伸试验, 使得在蝶形试样中产生不同的应力状态, 研究 6063 铝合金在几种不同的应力状态下的变形及损伤机理。

2 实 验

本实验所用的材料是轧制的 Al-Mg-Si 系的 6063

铝合金, 供货状态为 T6。材料中各元素百分含量如下: Mg: 0.45~0.9; Si: 0.2~0.6; Zn, Cr, Ti 和 Mn < 0.1; Fe < 0.35。拉伸卸载试样在观察之前进行磨制、电解抛光, 然后用含 2 ml HF, 3 ml HCl, 35 ml HNO₃ 和 190 ml 水的溶液进行腐蚀。

在室温下, 用所制取的蝶形试样在改装的 Arcan 夹具上利用 SHIMADZU AG-10TA 万能拉伸机进行拉伸及拉伸卸载试验, 拉伸速度为 1 mm/min。改装的 Arcan 夹具试验原理图如图 1 所示: 图 1 中的 α 是外加载荷的方向与图中标定线的方向的夹角。试验时, 块 1 与块 2 做相对运动, 从而使得蝶形试样达到所要求的受力状态。

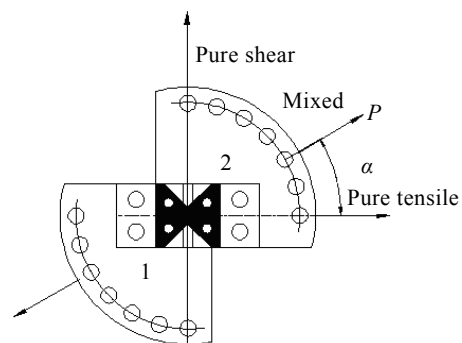


图 1 Arcan 夹具试验原理图

Fig.1 Test principle picture of Arcan fixture

收到初稿日期: 2006-06-29; 收到修改稿日期: 2006-10-31

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项 (2004CCA04900)

作者简介: 朱 浩, 男, 1975 年生, 博士生, 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2976644, E-mail: zhuhao@mail2.lut.cn

3 结果及讨论

3.1 拉伸试验曲线分析

不同角度的拉伸试验曲线如图 2 所示。图 2a 是载荷-位移曲线。由图 2a 看出：随着加载角度的增加，载荷-位移曲线越来越低，弹性阶段的斜率越来越小，而断裂位移越来越大。图 2b 是试验的名义应力-应变

曲线。从图 2b 可以看出：随着加载角度的增大，名义应力-应变曲线越来越低，弹性模量越来越小，断裂应变越来越大。图 2c 是加载的工程应力在 90°方向上的分解的剪切应力-剪切应变曲线。从图 2c 可以看出：随着加载角度的增大，剪切应力-应变曲线逐渐升高，而且剪切断裂应变也逐渐增大。上述结果的原因都是因为随着加载角度的增大，在试样中的三轴应力度逐

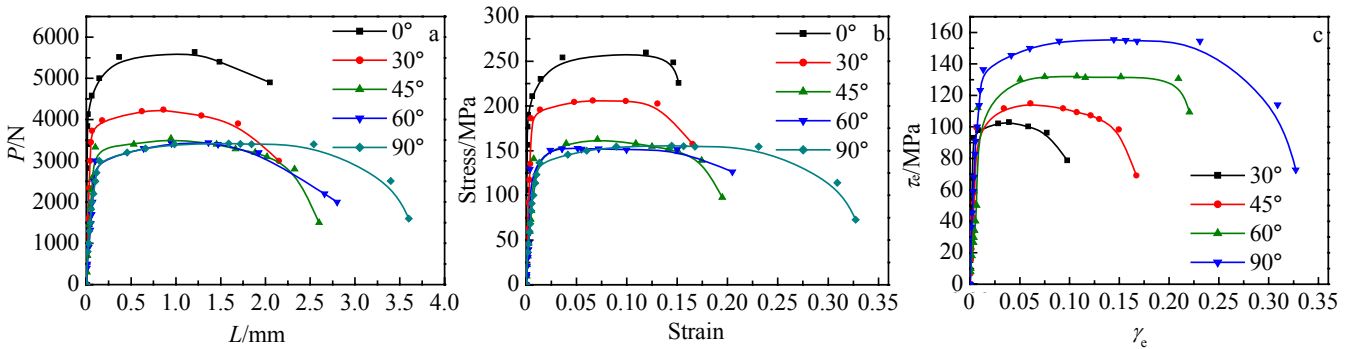


图 2 不同加载角度的拉伸试验曲线

Fig.2 Tensile curves of different loading angles: (a) load(P)-displacement(L); (b) stress(σ)-strain(ε); (c) τ_e-γ_e

渐减小所造成的。用 ABAQUS 计算不同 角度加载时 试样中三轴应力大小如图 3 所示。图 3 中的横坐标是蝶形试样两个缺口之间的距离。从图 3 看 出，随着加载角度的增大，蝶形试样中心处的三轴应力度逐渐减小。90°加载时，属于纯剪状态。试样中心的三轴应力度等于 0.1（纯剪切时，三轴应力度应该等于 0），因为试验很难达到纯剪状态。断裂应变与三轴应力之间的关系曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出，随着三轴应力的减小，断裂应变呈指数增加。通过 Origin 软件的指数拟和得出了断裂应变与三轴应力度之间的关系式：

1 可以看出：随着加载角度的增加，三轴应力度、弹性模量、屈服应力、加工硬化系数 K_p 和加工硬化指数 n_p 都是逐渐减小的；而断裂应变是逐渐增大的；塑性断裂功是先减小后增大，在 45°加载时达到最小值，原因在下文结合 45°拉伸断裂的断口进行分析。

$$\bar{\epsilon}_f = 0.07413 + 0.0892 \exp(-2.441 \frac{\sigma_m}{\sigma_e}) \quad (1)$$

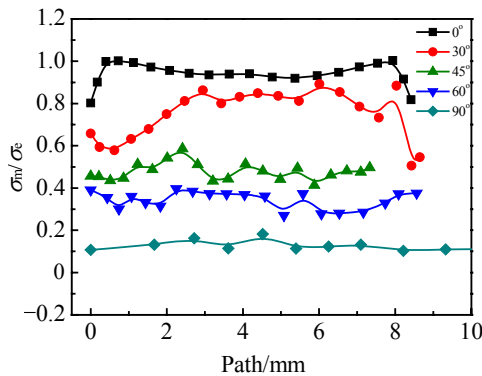


图 3 蝶形试样中心的三轴应力

Fig.3 Triaxial stress of butterfly specimen

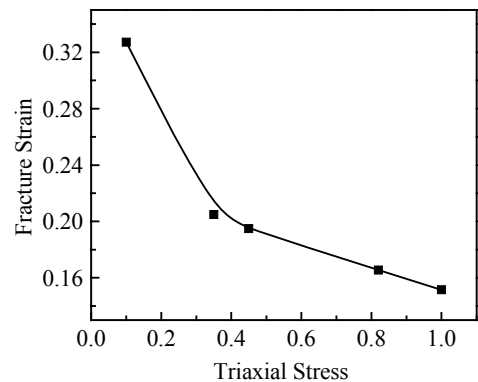


图 4 断裂应变随三轴应力的变化曲线

Fig.4 Curve of fracture strain-triaxial stress

3.2 金相观察

把不同角度拉伸的蝶形试样，加载到规定的应变后卸载，不同角度下的拉伸卸载试样内部变形和损伤情况如图 5 所示。不同角度下拉伸断裂的断口如图 6 所示。

图 5a 是 0°加载后卸载试样的金相照片。从图 5a 可以看出，由于应力集中，在缺口根部附近首先产生微裂纹，而且缺口根部的晶粒在拉伸应力方向明显被

不同加载角度的拉伸试验数据如表 1 所示。由表

表 1 试验数据表
Table 1 Experimental datas

Loading angles	Stress triaxiality	Equivalent elastic module	Equivalent yield stress	Equivalent fracture strain	Work hardening exponential	Work hardening coefficient	Fracture energy/J
	σ_m/σ_e	\bar{E}/MPa	$\bar{\sigma}_y/\text{MPa}$	$\bar{\epsilon}_F$	n_p	K_p	
0°	1	67312	225.65	0.1515	0.109	389.05	2.614
30°	0.82	37966	187.15	0.1654	0.072	213.79	1.946
45°	0.45	28048	168.20	0.1949	0.061	136.77	1.934
60°	0.35	27219	156.06	0.2049	0.0586	99.77	2.244
90°	0.1	25614	136.97	0.3272	—	—	2.675

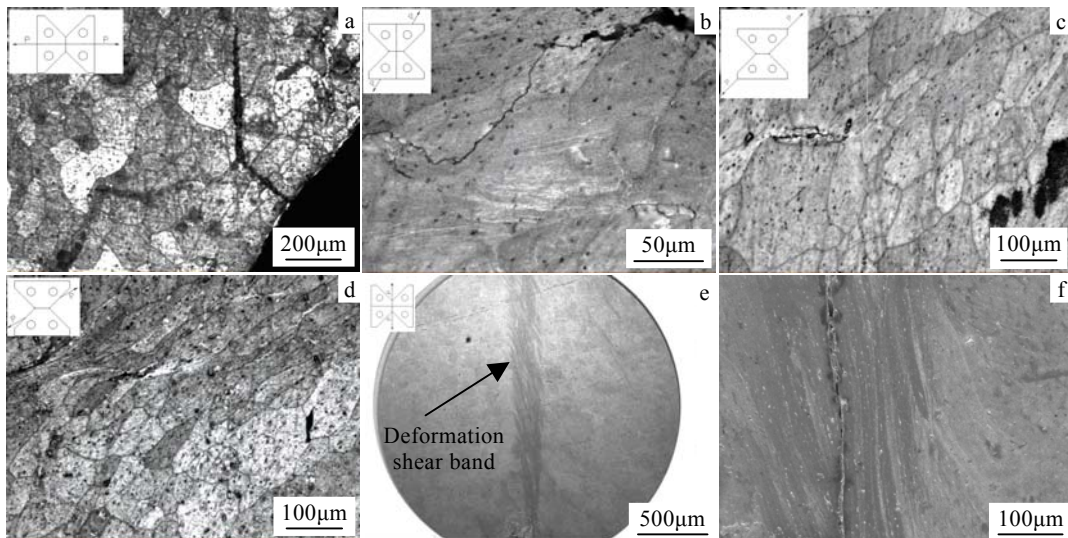


图 5 不同加载角度拉伸卸载试样内部变形与损伤金相照片

Fig.5 Metallurgraphs of deformation and damage of tensile samples at different loading angles:

(a) 0°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 90°; (f) magnification of (e)

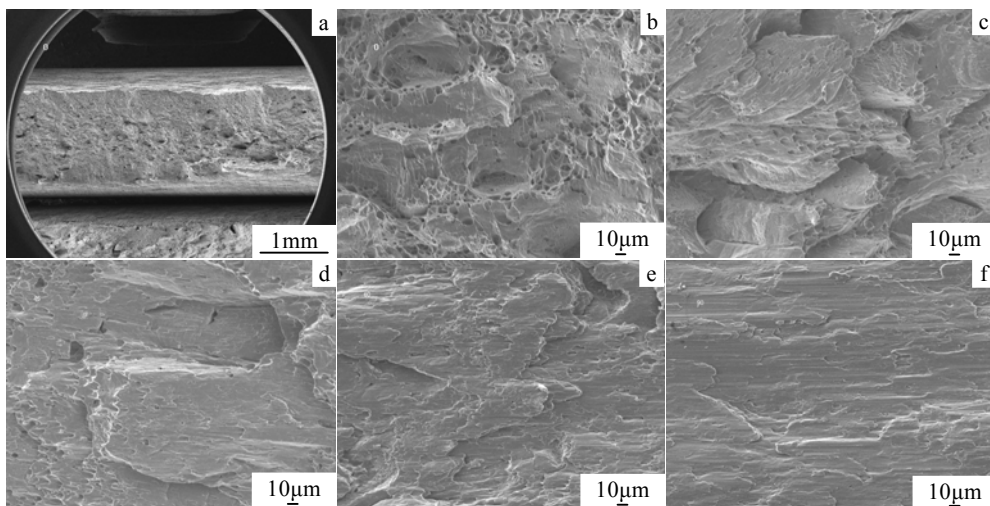


图 6 不同角度拉伸试样断口照片

Fig.6 Micrographs of fracture surfaces of tensile samples at different loading angles:

(a) 0°; (b) magnification of (a); (c) 30°; (d) 45°; (e) 60°; (f) 90°

拉长了。在 0°加载卸载金相照片上并没有发现微孔洞的存在。图 6a 是 0°拉伸的断口照片。断口是由大量

集聚的韧窝区和平坦的剪切区组成，结合 0°拉伸卸载金相照片可以断定，0°拉伸断裂是由发育不充分的孔

洞间产生剪切面形成的。随着微裂纹的产生,降低了试样中的应力状态,可能进一步抑制微孔洞的长大。然后随着微裂纹的扩展、连接,从而导致整个试样的断裂。这种断裂方式是文献[3~9]提到的金属韧性断裂的两种宏观模式——韧窝断裂与剪切断裂的组合。图 5b 是 30°加载后卸载的金相照片。从图 5b 可以看出,在缺口附近产生了一条很长的微裂纹,晶粒在 30°的方向上明显被拉长了。图 5b 中也没有观察到微孔洞的产生。从图 6c, 30°拉伸断口上却发现了少量韧窝的存在,韧窝和 0°拉伸断口上的韧窝相比,数量明显减少,单个韧窝的体积也变小了,剪切破坏的面积比例增加了。分析原因是 30°拉伸的过程中,三轴应力度比 0°拉伸时小,更加不利于孔洞的生长的缘故。另外,从图 5b 还可以看出,少量的韧窝在 30°方向上也发生了明显的变形。图 5c 是 45°拉伸卸载的金相照片。从图 5c 可以看出,晶粒在 45°方向上明显严重变形,但是并没有发现局部变形带的产生,只是在晶粒边界产生了一条长度大约 100 μm 的微裂纹。图 6d 是 45°拉伸的断口形貌。从图 6d 看出,断口上几乎没有韧窝,断口大部分由一些平坦光滑的剪切面组成的,可知 45°方向上的拉伸断裂方式是剪切断裂。从表 1 中可以看出:断裂功先降低,到了 45°拉伸时达到最小值,而后断裂功上升。原因是 45°拉伸时的断裂应力低于 0°拉伸时的断裂应力,由于三向应力度降低,要得到同样的剪应力所需要的拉伸应力降低。虽然断裂应变增大,但所需要的断裂功仍然较低。随着拉伸角度的上升,三向应力度进一步下降,在屈服和断裂均由剪应力控制的条件下,工程断裂应力进一步下降,而断裂应变进一步上升,从而使得断裂功增大。图 5d 是 60°拉伸卸载金相照片。从图 5d 可以看出,晶粒在 60°方向上明显严重变形,而且已经开始产生局部变形带,在局部变形带中,沿着晶界产生了几条微裂纹。图 6e 是 60°拉伸断裂的断口形貌。从图 6e 可以看出,断口比较平坦光滑,属于剪切断裂的断口形貌。图 5e 是 90°拉伸卸载的金相照片。从图 5e 可以看出,组织中已经产生了明显的局部剪切变形带,在剪切带中产生了一条很长的主裂纹。局部剪切带的产生与发展是在一个极其短暂的时间内(约几十到几百微秒)完成的,是应变、应变率和热软化相互竞争的结果。一般认为剪切变形带的产生是温度软化克服其他两个条件的结果。局部化变形形成后,存在一个材料的软化过程。首先是温度升高导致的热软化,此外还包括微观(位错)层次上的软化,而微观层次上,材料的软化则表现在微裂纹(或微孔洞)的形成、扩展与连接。90°拉伸试验中产生的剪切变形带的软化主要是由于裂纹

的产生引起的。图 6f 是 90°拉伸断裂的断口形貌。从图 6f 可以看出,断口形貌平坦光滑,属于典型的剪切断口形貌。从以上分析可知:①随着加载角度的增加,材料的损伤方式表现为:微裂纹和微孔洞—微裂纹—局部剪切带和微裂纹;②铝合金的晶界由于塑性变形导致应力集中而成为薄弱环节,大量的微裂纹的起裂大都是在晶界上首先产生的,但是随后裂纹的扩展的过程中,晶界和晶粒内部对其具有同等的阻力作用,裂纹扩展即可以在晶界上,也可以在晶粒内部;③从裂纹扩展的路径来看,0°加载时,裂纹扩展的方向随着裂纹的扩展不断变化。而 90°加载时,裂纹扩展的路径几乎为一条直线,即裂纹在扩展的过程中方向基本没有变化。产生这一结果的原因可能是裂纹的起裂及扩展几乎是在一瞬间完成的。

4 有限元模拟结果

用有限元软件 ABAQUS 模拟不同角度的拉伸,在蝶形试样中心塑性区的形状及大小。图 7 是蝶形试样中心塑性区的模拟结果。由图 7 可以看出,随着加载角度的不同,蝶形试样中心塑性区的形状及大小均不相同。0°加载时,由于变形大都集中在缺口根部而使塑性区最小,90°加载时,由于塑性变形严重而使塑性区最大。随着加载角度的增大,塑性区的材料在加载的方向上明显被拉长,这些模拟结果都和试验中所观察的现象相一致。

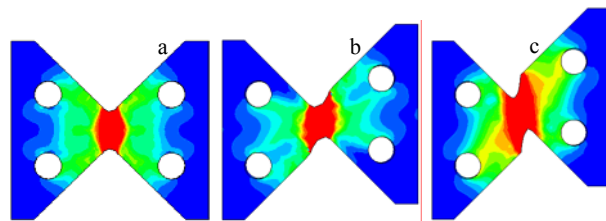


图 7 不同加载角度下蝶形试样中心塑性区的形状

Fig.7 Shapes of plastic zone for butterfly specimen at different loading angles: (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°

5 结论

1) 随着加载角度的增加,三轴应力度、弹性模量、屈服应力、加工硬化系数 K_P 和加工硬化指数 n_P 都是逐渐减小的;而断裂应变是逐渐增大的;塑性断裂功是先减小后增大,在 45°加载时达到最小值,在 90°加载时达到最大值。

2) 随着加载角度的增加,材料的损伤方式表现为:微孔洞和微裂纹—微裂纹—局部剪切带和微裂纹。

3) 0°拉伸的断裂方式为韧窝断裂和剪切断裂的混

合模式; 随着拉伸角度的增大, 韧窝断裂机制在减小, 剪切断裂机制在增大。90°拉伸时的断裂形貌则是典型的剪切断口形貌。随着试样中三轴应力度的增大, 断口越来越平坦光滑。

5) 裂纹扩展的路径在 90°加载时, 几乎不随着裂纹的扩展而变化。在此, 快速剪切机制起主要作用。在 0°加载时, 则不发生这种情况。

参考文献 References

- [1] Anthony K Pikett, Thomas Pyttel, Fabrice Payen. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2004, 30: 853
- [2] Rani Ei-Hajjar, Rami Haj-Ali. *Composites*[J], 2004, Part B(35): 421
- [3] Zhou Huijiu(周惠久) *et al. Metal Materials Strength(金属材料强度学)*[M]. Beijing: Science Press, 1989
- [4] El-Magd* E, Abouridouane M. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2006, 32: 741
- [5] Hopperstad O S, Borvik T, Langseth M *et al. European Journal of Mechanics*[J], 2003, A/solids: 1
- [6] Agarwal H, Gokhale A M, Graham S *et al. Materials Science and Engineering*[J], 2003, A341: 35
- [7] Yu Shouwen(余寿文), Feng Xiqiao(冯西桥). *Damage Mechanics(损伤力学)*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997
- [8] Schmitt W, Sun D Z, Blauel J G. *Nuclear Engineering and Design*[J], 1997, 174: 237
- [9] Batra R C, Lear M H. *International Journal of Plasticity*[J], 2005, 21: 1521
- [10] Tang Anmin(汤安民). *Journal of Xian University of Technology(西安理工大学学报)*[J], 2003, 19(3): 16

The Study of Deformation and Damage Mechanism of Aluminum Alloy (6063) under Different Stress States

Zhu Hao, Zhu Liang, Chen Jianhong, Lü Xianfeng

(State Key Laboratory of Gansu New Non-Ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Using the modified Arcan fixture on the butterfly specimens the deformation and damage mechanism of aluminum alloy (6063) were investigated by 0°, 30°, 45°, 60°, 90° tensile tests and tensile-unload tests. The results show that the curves of stress-strain under different stress states are obviously different. Microvoids appeared at the center of the specimen when 0° direction loading was performed. The microcracks were produced in the root of notch as the result of shearing of microvoids, and then led to specimen fracture due to microcracks propagating. With decreasing of triaxial stress among specimens, the shear stress in the middle of butterfly specimen increased gradually, at the same time, the deformation bands became more and more concentrated. At first, the microcracks appeared in the shear deformation bands, then propagated, resulted in specimen fracture. When 90° direction loading was performed, the shear band was obviously formed at the center of the specimen. The shear band was a deformed shear band rather than a phase transformation shear band. The simulations of different angles tensile tests were performed with FEM (ABAQUS), and the shapes and size of plastic deformation zones were gained under different stress states.

Key words: Al alloy; deformation; damage; shear deformation band; microcrack

Biography: Zhu Hao, Candidate for Ph. D, The College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2976644, E-mail: zhuhao@mail2.lut.cn