

# 6063 铝合金在不同应力状态下的变形及损伤行为

徐文福<sup>1</sup>, 车洪艳<sup>2</sup>, 陈剑虹<sup>2</sup>

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

**摘要:** 用平板拉伸、缺口拉伸、剪切试验结合断口形貌观察及有限元模拟等方法, 对 6063 铝合金在三种不同应力状态下的变形及损伤行为进行了研究。结果表明: 在不同应力状态下该合金的变形及损伤行为存在明显的差异, 剪切时材料的断裂应变远大于平板和缺口拉伸时的, 而缺口拉伸时材料的屈服强度及峰值应力大于平板拉伸时的; 平板拉伸时试样为拉剪混合型断裂, 断口由一定比例的韧窝和剪切平面组成; 缺口拉伸时试样有明显的颈缩, 断口以韧窝为主; 剪切断口以剪切平面为主; 损伤行为的有限元模拟结果与试验结果吻合较好。

**关键词:** 6063 铝合金; 变形; 损伤; 有限元模拟

**中图分类号:** TG146.2; TB115

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2009)01-0020-03

## Deformation and Damage of 6063 Aluminum Alloy under Different Stress States

XU Wenfu, CHE Hongyan, CHEN Jianhong

(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Tensile tests with plat specimen, notched specimen and shear specimen were performed. The fracture appearance was observed by SEM. ABAQUS finite element calculation and simulation were done. The deformation and damage process of 6061 aluminum alloy under three different stress states were analyzed carefully. Studies indicated that there were evident differences in deformation and damage under different stress states. The fracture strain under shearing state was higher than that of notched tension, while the yield strength and peak stress of the notched tension were higher than those of the plat tension. The plat tension fracture was a mixture model of tension and shearing, composed by a certain proportion of dimples and shear planes. The notched tension fracture had evident neck, composed mainly of dimples. The shearing fracture mainly composed of shear planes. The process of deformation and damage of the material under different stress states had been calculated and simulated by finite element software of ABAQUS. The results were consistent with the test results well.

**Key words:** 6063 aluminum alloy; deformation; damage; finite element simulation

## 0 引言

抗撞击性是交通工具的一个重要性能指标, 而碰撞是一个十分复杂的过程, 涉及到结构的大位移、大变形、材料的塑性流动与硬化以及接触摩擦等<sup>[1]</sup>。目前铝合金在汽车中的应用越来越多, 汽车碰撞过程中铝合金构件各点的应力状态随时间、受力等的不同而发生变化, 由于应力状态不同导致材料的变形及损伤行为存在明显的差异。因此, 通过对材料

在不同应力状态下力学性能的测定, 得出合适的本构关系及失效模型参数来对材料的性能进行表征就显得非常重要。

文献[2]提出铝合金存在着两种宏观断裂模式: 韧窝型断裂和剪切型断裂; 另外, 金属材料受载荷作用发生断裂的形式有拉断、剪断和拉剪混合型断裂。作者在这些成果的基础上对 6063 铝合金进行了平板拉伸、缺口拉伸、剪切试验及有限元模拟分析, 探讨了该材料在不同应力状态下的变形及损伤行为, 为进行下一步铝合金材料的表征拟奠定基础。

## 1 试样制备与试验方法

### 1.1 试样制备

试验材料为 2 mm 厚挤压成型的 T6 态 6063 铝

收稿日期: 2007-12-01; 修订日期: 2008-04-16

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

作者简介: 徐文福(1984—), 男, 青海乐都人, 硕士研究生。

导师: 陈剑虹教授

合金板材,其化学成分(质量分数/%)为 0.45~0.9Mg,0.2~0.6Si,<0.1Zn,<0.1Cr,<0.1Ti,<0.1Cu,<0.1Mn,<0.35Fe。室温下材料的显微组织见图 1。根据 GB/T 16865-1997 制备拉伸试样和剪切试样,其几何尺寸见图 2。

## 1.2 试验方法

用 Shimadzu AG-10TA 型万能拉伸机对三种试样进行室温拉伸试验,拉伸速度为  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。用 LZ3-204 型记录仪自动记录载荷-位移

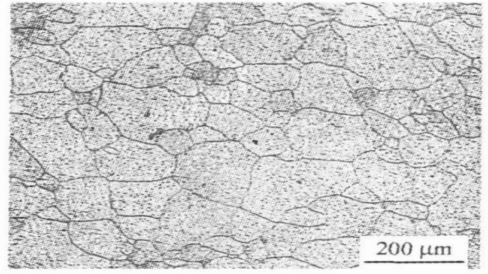


图 1 T6 态 6063 铝合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of 6063(T6)aluminum alloy

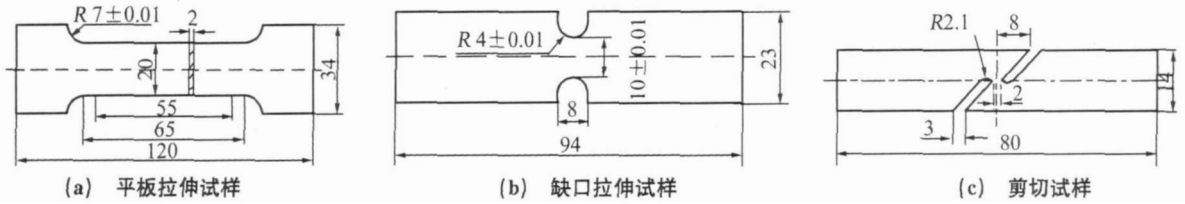


图 2 试样的几何尺寸

Fig.2 Geometry size of the test samples (a) flat tensile (b) noteh tensile (c) shear

曲线。用 ABAQUS/explicit 软件对三种试验进行有限元模拟。用 JSM-6700F 型扫描电镜(SEM)对三种试样断口形貌进行分析。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 应力-应变曲线

由图 3 可计算出 6063 铝合金的屈服强度  $\sigma_s = 210 \text{ MPa}$ ,抗拉强度  $\sigma_b = 226 \text{ MPa}$ ;由公式  $\sigma = \sigma_s(1 + \epsilon_s)$ 、 $\epsilon_s = \ln(1 + \epsilon_e)$  及  $\sigma = K\epsilon^n$ <sup>[3]</sup>,可以推导出真应力、应变值以及 6063 铝合金的加工硬化系数( $K = 281$ )、加工硬化指数( $n = 0.07$ )。由图可见平板拉伸时的屈服强度及峰值应力小于缺口拉伸时的,但断裂应变大于缺口拉伸的<sup>[4]</sup>。另外,试样的宏观形貌特征表明,平板试样断裂时只在板厚方向出现少量的颈缩,而缺口试样断裂时则出现明显的颈缩。

### 2.2 断口的 SEM 形貌

由图 4 可见,6063 铝合金在不同应力状态下断

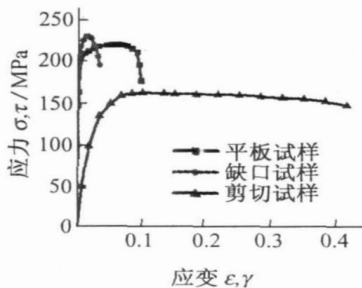


图 3 三种试样的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves from three kinds of tests

口的形貌有明显的差别。其中,平板试样断口由大量聚集的韧窝和平坦的剪切面组成<sup>[5]</sup>。平板试样在拉应力的作用下,在第二相粒子或夹杂物聚集点发生开裂形成微孔洞,而后因材料内的三向应力度不高,孔洞失去了生长的驱动力,最终由于微孔洞间剪切带的破坏而发生断裂。另外,6063 铝合金只含有少量的弥散相,可以促进合金变形的均匀化,降低合金的沿晶应力和应力集中,夹杂物相由于其本身强度较低或与基体界面的结合强度不足,在拉伸时发生优先断裂或与基体分离,致使合金发生韧性断裂。由图 4(b)可见,缺口试样断口上有较少的剪切面和大量的韧窝,韧窝所在的平面垂直于拉应力方向,而且与拉应力方向的倾角相同聚集形成等轴韧窝。另缺口试样在拉伸时缺口根部产生较大的三向应力度,试样断口处发生了明显的颈缩。在断裂过程中材料内有微孔洞产生,随着应力的增加试样内微孔洞的体积不断增加,达到临界体积分数时发生断裂。由图 4(c)可见,剪切时材料中塑性应变聚集较大,在最大剪应力方向上产生塑性流动,其结果是形成一些局部剪切带,微裂纹在剪切带上产生,剪切带的扩展引起剪切断裂的发生。断面与最大剪应力面一致,在剪应力的作用下微孔洞被拉长,在断口上形成抛物线或半椭圆形的切变韧窝<sup>[6]</sup>。

## 3 模拟结果及分析

用 ABAQUS/explicit 软件对三种试验进行有限元模拟,采用壳单元建立模型,为了提高模拟结果

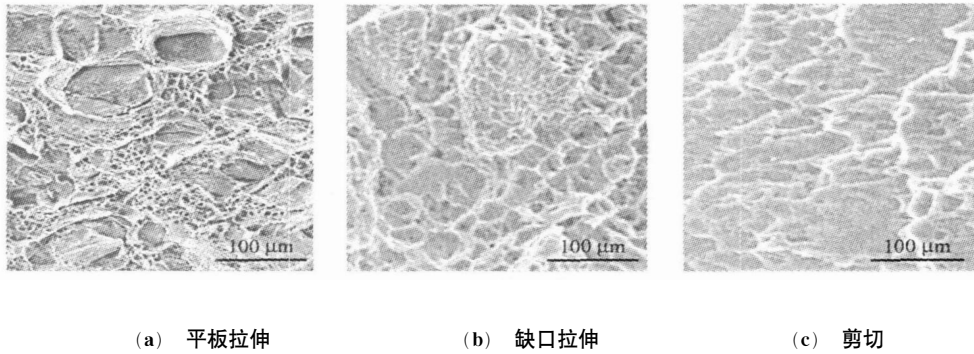


图4 三种断口的SEM形貌

Fig.4 Fracture appearance from three kinds of tests (a) flat tensile (b) notch tensile (c) shear

的正确性和控制计算耗时,对应力较集中的部分网格进行局部细化。图5为三种试样在不等分网格尺寸下的仿真结果,其中图5(c)为局部放大图。

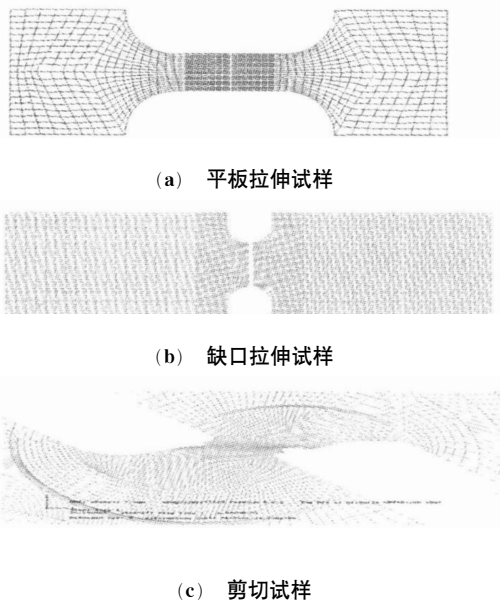


图5 三种试样的模拟结果

Fig.5 Simulation results of the three kinds of specimens

(a) flat tensile (b) notch tensile (c) shear

在平板拉伸和缺口拉伸模拟中采用 Gurson 损伤模型,在剪切模拟中采用 Johnson-Cook 损伤模型,因为 Gurson 模型在三向应力度较低时不能很好地预测材料的损伤行为<sup>[7,8]</sup>。

由图6可见,试验曲线与模拟曲线吻合较好,说明有限元模拟能较好地预测6063铝合金在不同应力状态下的变形及损伤行为。

在三种不同应力状态即三种三向应力度下的等效塑性应变(PEEQ)对比结果见图7。

文献[9]提出三向应力度能综合反映应力场中三向应力状态程度和材料变形的约束程度,对特定材料来说,在一定范围内,三向应力度值越大,等效

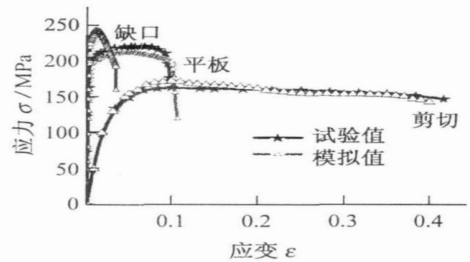


图6 三种试样的试验与模拟应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves from three kinds of tests and simulation

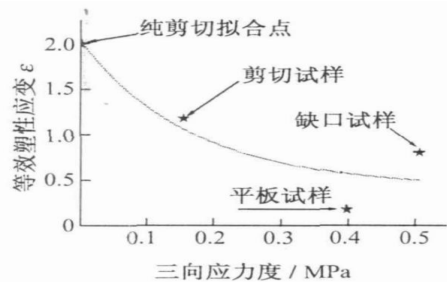


图7 不同应力状态下等效塑性应变对比

Fig.7 Comparison of PEEQ with different stress states

应力就越低。因此,三向应力度的提高使材料的塑性变形困难,要达到相同的应变所需的应力就会升高,所以相对较高的三向应力度使材料的屈服强度和峰值应力相对提高,但使材料断裂的驱动力增强,导致材料提前断裂。剪切时材料的三向应力度几乎为零,其变形能力远大于平板拉伸时的。

## 4 结论

(1) T6态6063铝合金在不同应力状态下的变形及损伤机理明显不同,剪切时材料的断裂应变远大于平板和缺口拉伸时的,而缺口拉伸时材料的屈服强度及峰值应力大于平板拉伸时的。

(下转第43页)

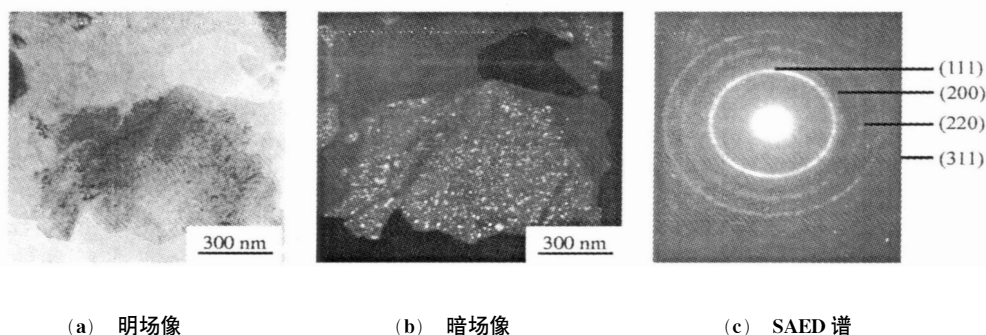


图5 距表面3 μm处的TEM形貌及SAED谱

Fig.5 TEM micrographs showing nanocrystallites at the top surface layer (a) bright-field (b) dark-field (c) corresponding SAED pattern

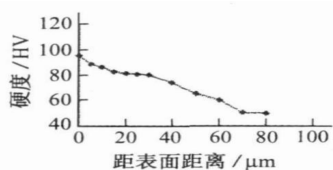


图6 经SMAT处理试样表面显微硬度沿深度的变化

Fig.6 Hardness evolution along the depth direction of the sample after SMAT

形成位错缠结、位错胞和高密度位错墙;随应变的增加,这些位错组态逐渐演变成位错胞、亚晶、位错墙-显微带结构和层状胞块结构。并随着应变和应变速率的进一步增加,晶粒细化遵循逐渐细分原则,逐渐在表面形成随机取向的纳米晶。

(3) 纯铝表面纳米化使材料的表层硬度明显提高,与心部硬度相比,表面硬度提高了90%。

参考文献:

[1] Lu K. Nanocrystalline metals crystallized from amorphous so-

lids: Nanocrystallization structure and properties[J]. Mater Sci Eng R, 1996, 16: 161-221.

[2] Jang J S C, Koch C C. Hall-petch relationship in nanocrystalline iron produced by ball milling[J]. Scr Metall Mater, 1990, 24: 1599-1604.

[3] Jeong D H, Gonzalez F, Palumbo G, et al. The effect of grain size on the wear properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings[J]. Scripta Mater, 200, 44: 493-499.

[4] Erb U, Elsheriik A M, Palumbo G, et al. Synthesis, structure and properties of electroplated nanocrystalline materials [J]. Nanostr Mater, 1993, 2(4): 383-390.

[5] Koch C C. Synthesis of nanostructured materials by mechanical milling problems and opportunities [J]. Nanostr Mater, 1997, 9(1): 13-22.

[6] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation [J]. Progr Mat Sci, 2000, 45: 103-189.

[7] 卢柯,吕坚. 一种金属材料表面纳米层的制备方法: 中国, 99122670.4[P]. 1999-12-24.

[8] Liu Q, Juul Jensen D, Hansen N. Effect of grain orientation on deformation structure in cold-rolled polycrystalline aluminium [J]. Acta mater, 1998, 46: 5819-5838.

(上接第22页)

(2) 平板拉伸时试样为拉剪混合型断裂, 缺口拉伸和剪切时试样分别以拉伸和剪切断裂为主。平板拉伸试样断口由大量的韧窝和剪切平面组成, 缺口拉伸试样断口以韧窝为主, 而剪切试样断口由局部的剪切带和椭圆或抛物线型的切变韧窝组成。

(3) 用 ABAQUS 软件对不同应力状态下的试验进行有限元模拟, 模拟结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] 曹银锋,李光耀,钟志华. 汽车碰撞过程并行有限元仿真技术 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(2): 153-154.

[2] 周惠久,黄明志. 金属材料强度学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.

[3] 徐秉业,刘信声. 应用弹塑性力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

[4] 汤安民,刘泽明. 铝合金材料断裂形式变化规律的试验分析 [J]. 西安理工大学学报, 2003, 19(3): 227-228.

[5] 朱浩,朱亮,陈剑虹. 铝合金在两种应力状态下损伤的有限元模拟 [J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 888-891.

[6] 汤安民,师俊平. 铝合金材料剪切断裂实验分析 [J]. 力学季刊, 2002, 23(1): 82-86.

[7] 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.

[8] Schmitt W, Sun D Z, Blauel J G. Damage mechanics analysis (Gurson model) and experimental verification of the behaviors of a crack in a weld-cladded [J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 174: 237-246.

[9] 车洪艳,乔及森,陈剑虹. 铝合金薄壁方管在轴向载荷作用下力学行为研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(4): 7-9.