

[文章编号] 1004-0609(2002)04-0701-05

塑性变形对铝合金弹性模量的影响^①

李雪春, 杨玉英, 王永志, 包 军

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

[摘 要] 回弹是影响弯曲件精度的主要障碍, 而弹性模量是影响回弹的重要因素之一。一般工程应用中都把弹性模量作为常数, 而实际上弹性模量随塑性变形的进展在不断发生变化。为了准确把握弹性模量值在塑性变形过程中的变化规律, 针对应用广泛的铝合金材料, 采用静力学实验方法, 对常用的退火 LY12 及退火 LF21 铝合金的弹性模量在塑性变形中的变化情况进行了实验研究。得到了弹性模量值随塑性变形程度及加载方式变化的规律, 并分别归纳为数学模型。

[关键词] 塑性变形; 弹性模量; 回弹; 加载方式

[中图分类号] TG 386

[文献标识码] A

弹性模量是工程材料重要的性能参数, 从宏观角度来说, 弹性模量是衡量物体抵抗弹性变形能力大小的尺度, 从微观角度来说, 则是原子间结合力强弱的反映。在不易引起混淆时, 一般金属材料的弹性模量就是指杨氏模量, 即正弹性模量。

弹性模量的大小对弯曲件的回弹影响很大。而且冲压成形时的形状冻结、面畸变和制件的刚度等都受材料的弹性模量支配。由此可见, 弹性模量对弯曲件的成形精度有着重要的影响^[1~3]。一般工程应用中都把弹性模量作为常数, 而实际上弹性模量随变形的进展在不断的变化, 这种变化的程度对某些材料是很大的^[4~6]。此时如果仍采用不变的弹性模量来计算、预测回弹或评价制件的刚度, 则所得结果与实际情况就会有很大的偏离^[7~9]。目前, 对冷轧钢板的弹性模量在塑性变形过程中的变化规律已经有了研究, 并将结果引入到了对弯曲件回弹的有限元模拟中, 有效地提高了回弹的模拟精度^[10~13]。不过, 对应用广泛的铝合金的弹性模量在塑性变形中的变化情况, 却至今无人进行过系统的研究。铝合金与钢在变形性能上有很大不同, 铝合金成形时, 很多情况下是不能套用钢的变形规律的。因此, 对铝合金弹性模量与塑性变形的关系进行系统而深入的研究有着重要的意义。本文作者通过实验研究, 探讨了常用的 LY12(M) 和 LF21(M) 铝合金的弹性模量随塑性变形程度及加载方式变化的规律, 并将其总结归纳成了数学模型。

1 实验

本研究采用静力学实验方法测量弹性模量, 即利用拉伸试验, 并在拉伸试件上粘贴应变片。为提高测量的准确程度, 采用了自动测试技术, 系统组成如图 1 所示。通过计算机对由光栅测长仪测得的位移信号、由力传感器测得的单向拉伸时的拉力值及由动态电阻应变仪测得的微应变信号, 进行自动采集自动处理, 可直接取得弹性变形范围内的应力—应变曲线。由于实验测得的应力—应变曲线的初始阶段不是严格意义上的直线, 按照取斜率求弹性模量的方法是不够准确的, 因此本研究中采用多项式拟合应力—应变曲线, 再将曲线外推到零点, 求零点的导数, 作为弹性模量的数据处理方法。两种材料均选取与轧制方向成 0°, 45°, 90° 的试样, 按 GB6397—86 制成标准拉伸试样。由于现有应变片的极限变形程度一般小于 2.5%, 所以没办法在一次单拉试验中直接测得弹性模量与塑性变形程度的关系, 只能是对材料进行一定程度的塑性变形后, 在试件上粘贴应变片, 然后加载, 在弹性范围内测得其应力—应变关系, 来求得在当前塑性变形程度下的弹性模量, 进而得到各种不同塑性变形程度下的弹性模量。为得到尽量真实、全面的数据, 具体采用如下两种试验方案:

1) 方案 1 采用多个试样, 先分别拉伸变形到不同的塑性变形程度, 卸载后在试件上粘贴应变片, 再加载, 在弹性范围内测量其弹性模量。可称

① [收稿日期] 2001-10-22; [修订日期] 2001-12-10

[作者简介] 李雪春(1968-), 女, 副研究员, 博士。

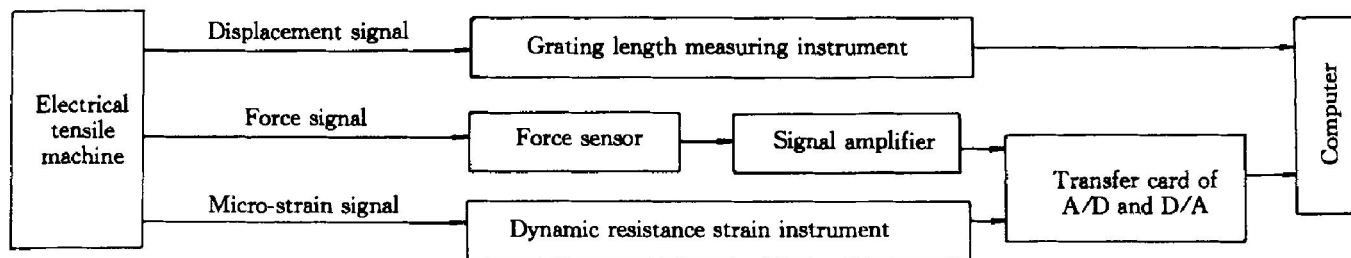


图 1 拉伸实验自动测试系统组成框图

Fig. 1 Chart of automatic testing system for tensile test

为分别加载。

2) 方案 2 采用一个试样, 先拉伸变形到一定的塑性变形程度, 卸载后在试件上粘贴应变片, 然后加载, 在弹性范围内测量其弹性模量。继续加载, 使其产生更大的塑性变形, 重复上述步骤, 直到取得足够的试验数据。可称为反复加载。

2 结果与分析

由实验得到的不同铝合金材料的弹性模量与塑性变形程度及加载方式的关系如图 2~ 5 所示。由图 2~ 5 可知, 在同一塑性变形程度下, 在板材平面内不同方向上所制取的试样的弹性模量有一些不同, 但无论是反复加载还是分别加载, 每种材料在 0° , 45° , 90° 这 3 个方向的弹性模量随塑性变形程度的变化趋势是相同的。而且两种铝合金材料的弹性模量随塑性变形程度的变化趋势也基本相同, 即随塑性变形程度的增加先下降, 当达到一定变形程度后, 又开始增加。这与冷轧钢板的弹性模量在塑性变形中的变化规律不同。冷轧钢板的弹性模量随塑性变形程度的增加, 呈下降趋势, 在达到一定变形程度后, 其变化趋于平缓^[12, 13]。两种铝合金弹性模量的下降最大幅度约为 20% 左右, 比冷轧钢板的弹性模量下降幅度大得多。冷轧钢板的弹性模量值最大可下降约 6%。

加载方式对弹性模量的变化有影响。在不同加载方式下, 弹性模量随塑性变形程度的变化趋势相同。但在反复加载方式下, 铝合金弹性模量的下降幅度大于分别加载方式下弹性模量的下降幅度。

铝合金材料的弹性模量在塑性变形过程中的变化规律, 可回归成如下数学模型:

$$E = E_0(1 + \bar{\epsilon}_p)^m \quad (1)$$

式中 E_0 —材料未经拉伸变形时的弹性模量; $\bar{\epsilon}_p$ —等效塑性应变。

不同加载方式下, 铝合金的弹性模量随塑性变形程度变化的规律, 可分别用如下模型表示:

1) 反复加载方式下

LF21(M) 材料弹性模量为

$$E/\text{GPa} = 70.5398(1 + \bar{\epsilon}_p)^{-0.1341}$$

LY12(M) 材料弹性模量为

$$E/\text{GPa} = 70.3508(1 + \bar{\epsilon}_p)^{-0.0979}$$

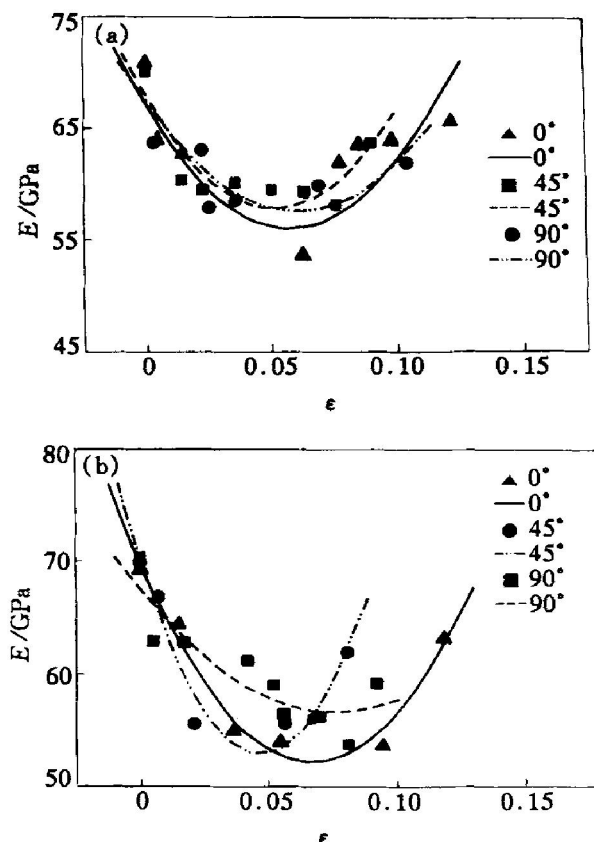


图 2 LY12(M) 不同方向上的塑性变形与弹性模量的关系

Fig. 2 Relationship between plastic deformation and elastic modulus of annealed LY12 alloy in different directions

(a) —Test points and regression curve under repetitive loading;

(b) —Test points and regression curve under single loading

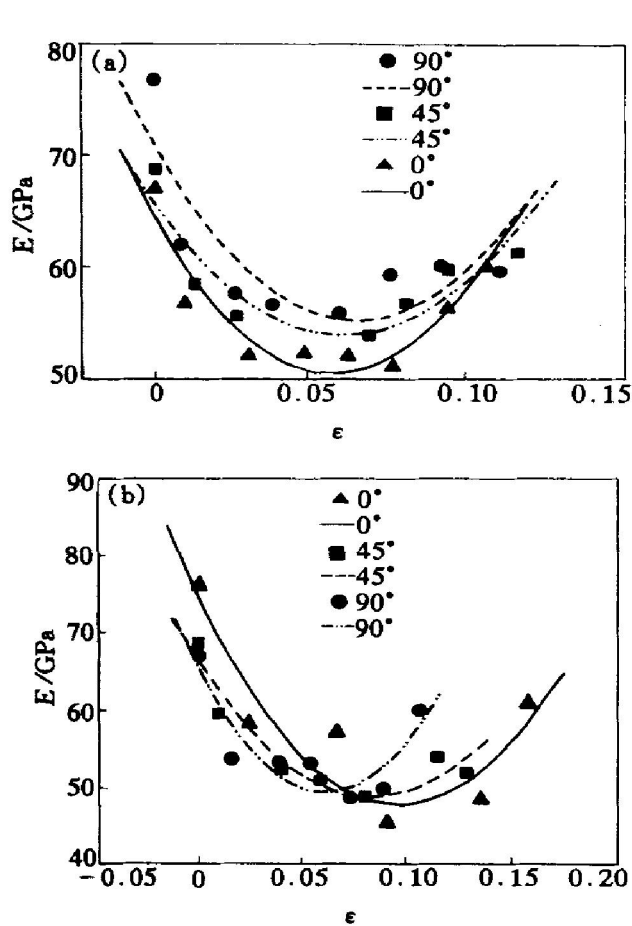


图 3 LF21(M) 不同方向上的塑性变形与弹性模量的关系

Fig. 3 Relationship between plastic deformation and elastic modulus of annealed LF21 alloy in different directions
(a) —Test points and regression curve under repetitive loading;
(b) —Test points and regression curve under single loading

2) 分别加载方式下

LF21(M) 材料弹性模量为
 $E/\text{GPa}=70.5398(1+\overline{\varepsilon}_p)^{-0.1171}$
LY12(M) 材料弹性模量为
 $E/\text{GPa}=70.3508(1+\overline{\varepsilon}_p)^{-0.0736}$

这些模型可直接应用于回弹的有限元模拟、弯曲成形精度预测及材料性能参数识别中。

3 结论

1) LY12(M) 和 LF21(M) 铝合金的弹性模量随塑性变形程度的增加, 先下降较快, 达到一定变形程度后, 弹性模量值又开始回升。在反复加载方式下, 弹性模量的下降幅度大于分别加载时弹性模量的下降幅度。弹性模量值最大可下降约 20%。

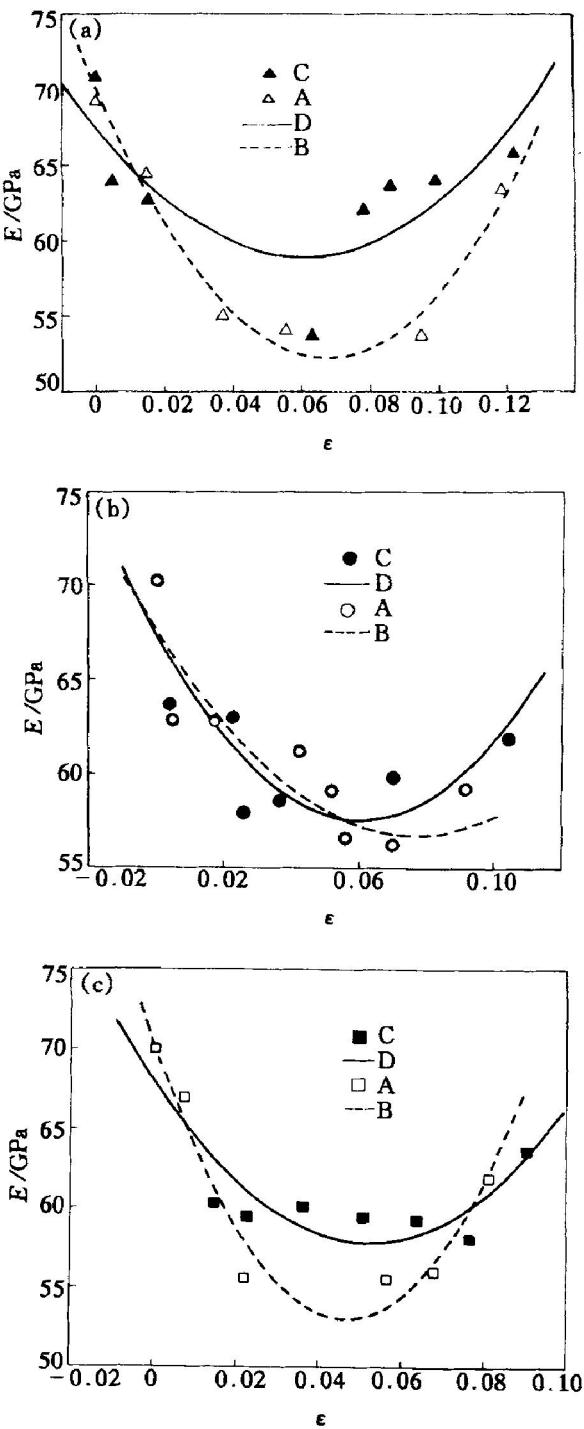


图 4 LY12(M) 不同加载方式下塑性变形与弹性模量关系的比较

Fig. 4 Comparison of relationship between plastic deformation and elastic modulus of annealed LY12 alloy under predeformation in different directions
(a) —0° direction; (b) —45° direction;
(c) —90° direction;
A, B —Under repetitive loading;
C, D —Under single loading

2) 不同加载方式下, 铝合金的弹性模量随塑性变形程度变化的规律, 分别用如下模型表示:

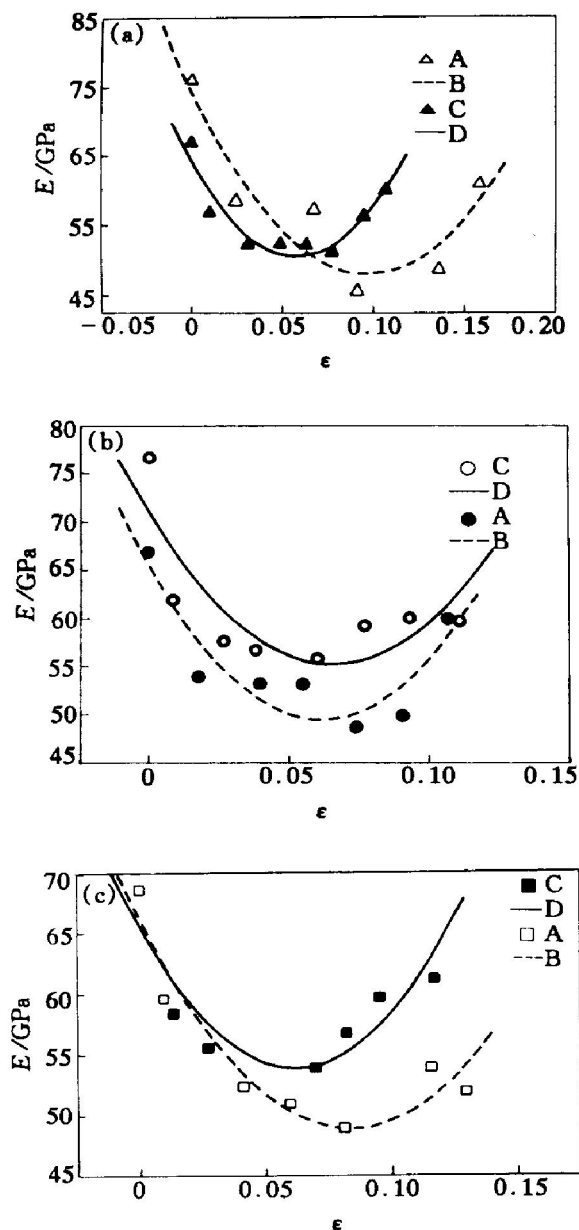


图 5 LF21(M) 不同加载方式下塑性变形与弹性模量关系的比较

Fig. 5 Comparison of relationship between plastic deformation and elastic modulus of annealed LF21 alloy under predeformation in different directions

(a) -0° direction; (b) -45° direction;
(c) -90° direction;

A, B—Under repetitive loading;

C, D—Under single loading

反复加载方式下

LF21(M) 材料弹性模量为

$$E/\text{GPa} = 70.5398(1 + \bar{\epsilon}_p)^{-0.1341}$$

LY12(M) 材料弹性模量为

$$E/\text{GPa} = 70.3508(1 + \bar{\epsilon}_p)^{-0.0979}$$

分别加载方式下

LF21(M) 材料弹性模量为

$$E/\text{GPa} = 70.5398(1 + \bar{\epsilon}_p)^{-0.1171}$$

LY12(M) 材料弹性模量为

$$E/\text{GPa} = 70.3508(1 + \bar{\epsilon}_p)^{-0.0736}$$

[REFERENCES]

- [1] 杨玉英. 大型薄板成形技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
YANG Yurying. Forming Technology of Large-scale Sheet [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996.
- [2] Leu D K. A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 66: 9– 17.
- [3] Forcellese A, Gabrielli F. Effect of the training set size on springback control by neural network in an air bending processing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80– 81: 493– 500.
- [4] Streppel A H, Devin L J. Suitability of sheet bending modeling techniques in CAPP applications [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 36: 339– 356.
- [5] Shima S, Yang M. A study of accuracy in an intelligent V-bending process for sheet metals [J]. Material, (In Japanese), 1995, 44(500): 578– 583.
- [6] 李雪春, 杨玉英, 包 军. 弹性模量与塑性变形关系的探讨 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 31(5): 54 – 56.
LI Xuechun, YANG Yurying, BAO Jun. Discuss on the relations between Young's modulus and plastic deformation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 31(5): 54– 56.
- [7] 胡 平, 连建设, 李运兴. 弹塑性有限变形的拟流动理论 [J]. 力学学报. 1994, 26: 275– 283.
HU Ping, LIAN Jianshe, LI Yuxing. Quasi-flow laws of elastoplastic finite deformation [J]. Journal of Mechanics, 1994, 26: 275– 283.
- [8] 黄克琴, 杨 节. 塑性变形的物理基础 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
HUANG Kexin, YANG Jie. The Physical Foundation of Plastic Deformation [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.
- [9] 田 蔚, 李秀臣. 金属物理性能 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1994.
TIAN Shi, LI Xiuchen. Metal Physical Performance [M]. Beijing: Aeronautic Industry Press, 1994.
- [10] Makinouchi A, Ogawa H. Use the ITAS-2D program to calculate the springback with considering the change in Young's modulus due to plastic deformation [A]. No. 43 Unite Report Conference of Plastic Deformation

- [C], (in Japanese). Tokyo: 1992. 755– 756.
- [11] Devin L J, Streppel A H. A process model for air bending [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 57: 48– 54.
- [12] Morestin E, Boivin M, Silva C. Elasto plastic formulation using a kinematic hardening model for springback analysis in sheet metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 56: 619– 630.
- [13] 李雪春. 弯曲成形中材料性能在线实时识别及成形精度预测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- LI Xuechun. On-line Real-time Identification of Material Property and Prediction of Forming Precision During Bending [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.

Effect of plastic deformation on elastic modulus of aluminum alloy

LI Xuechun, YANG Yuying, WANG Yongzhi, BAO Jun

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, China)

[Abstract] The forming precision of bent parts is dominated by springback, and springback is affected by elastic modulus of the material. Elastic modulus is usually treated as constant in engineering application. In fact, elastic modulus of the material is changing with plastic deformation of the blank in forming. The change of elastic modulus with plastic deformation was experimentally studied for LY12 and LF21 aluminum alloy respectively, and the law of change of elastic modulus with plastic deformation and loading path was attained, and mathematical models were also put forward.

[Key words] plastic deformation; elastic modulus; springback; loading path

(编辑 袁赛前)