

文章编号: 1001-1455(2004)01-0054-05

# 铝锂合金材料的极限应变率软化特性研究<sup>\*</sup>

郭 扬, 李永池, 姚 磊, 董 杰

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 通过系列准静态与动态力学实验得到了铝锂合金材料的基本力学参数。证实了该种材料具有独特的应变率软化特性, 并揭示了材料应变率软化效应的极限性特征, 提出了极限应变率软化材料的概念, 从而对突加载荷下粘塑性材料中也会出现双波结构的现象给出了合理的解释。为便于实际应用, 还对实验得到的材料应力-应变曲线进行了拟合, 提出了一种便于实际应用的材料本构关系的具体形式, 即双幂次应变硬化-极限幂次应变率软化本构关系。

**关键词:** 固体力学; 极限应变率软化; 本构关系; 铝锂合金; 动态力学实验

**中图分类号:** O348      **国标学科代码:** 430·1010      **文献标志码:** A

## 1 引 言

作为新型材料, 铝锂合金在航空、航天等国防和高科技领域得到了广泛应用, 国内外对不同类型的铝锂合金的力学性能都有研究。周光泉等<sup>[1]</sup>研究了铝锂合金的动态拉伸特性, 发现其具有冲击拉伸韧性特征和应变率负敏感效应, 即应变率软化效应, 并提出了基于热激活理论的本构方程。田兰桥等<sup>[2]</sup>在冲击扭转杆上的研究进一步证明了铝锂合金的动态韧性, 但认为铝锂合金的屈服应力对应变率不是非常敏感的。T. Kobayashi<sup>[3]</sup>讨论了铝锂合金应变率软化效应, 同时指出铝锂合金有良好的温度特性。

但以上研究都未涉及到理论和应用上最重要的冲击压缩性能, 且存在应变率变化范围较窄(1300-2600s<sup>-1</sup>)或应变率参数取点太少等问题, 也未能将其研究工作与材料在高压下特性的研究结果相联系进行分析, 总体上还缺少对其力学性能比较全面的研究工作。加之不同元素含量、不同制备方法及不同热处理过程都对材料力学特性有显著影响。

为此, 本文中对中国特制的铝锂合金样品材料进行了系列 MTS (Material Test System) 准静态实验、波速测量实验、SHPB 动态应力应变关系测量实验, 结合对其在轻气炮上靶板自由面质点速度时程曲线和 Hugoniot 线测量的有关结果<sup>[4]</sup>, 以波动力学和材料本构关系理论为指导, 对铝锂合金的动静态力学性能进行了较系统的分析和总结。发现此种材料是具有应变率软化特性的粘塑性材料, 在一定应变率变化范围内随着加载应变率的提高其屈服应力和整个应力-应变曲线有较明显的下降, 但随着应变率的继续提高, 其应变率软化效应逐渐减弱, 当应变率提高到一定值以后材料的应变率效应趋于不明显, 而当应变率极高即理论上趋于无穷大时, 其本构关系趋于一个有限的弹塑性本构关系, 就象某种应变率无关的弹塑性材料一样。我们将此种材料称为极限应变率软化材料。

## 2 实验方法

采用两套实验设备研究不同应变率下材料的力学特性。

MTS 材料试验机实现对材料的准静态和低应变率压缩加载, 其应变率范围为  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \sim 10^{-1} \text{s}^{-1}$ 。试件几何尺寸为: 直径 10mm, 标长 25mm 及 20mm 两种。样品共 8 枚。实验采用的加载应变率分别为  $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}$  和  $0.2 \text{s}^{-1}$ 。图 1 为加载应变率  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{s}^{-1}$  时的应力-应变曲线, 曲线末端由于样品剪

\* 收稿日期: 2003-02-09; 修回日期: 2003-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(10272097)

作者简介: 郭 扬(1962—), 男, 博士研究生, 高级工程师。

切破坏而加载停止。

分离式霍普金森压杆 (SHPB) 实现对材料的高应变率压缩加载, 其应变率变化范围为  $\dot{\epsilon} = 10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。试件几何尺寸分别为: 直径 12mm, 标长 5mm 及 8mm 两种。共进行了 4 个名义应变率范围共 28 次实验。通过调节气阀的气压值改变子弹的撞击速度, 从而改变加载条件下的应变率大小。为了明显看到应变率效应, 实验中将应变率大小拉开一定范围。由于实验系统控制的随机性, 相同的气压值未必给出相同的弹速, 但是仍认为它们是对应同一的名义弹速和名义应变率。名义应变率分别为 1200、2500、3500、5000  $\text{s}^{-1}$ 。每一种应变率范围的实验根据具体情况做了 48 发。由于数据量较大, 原始曲线较多, 不便全部列出。图 2 给出名义应变率为 5000  $\text{s}^{-1}$  时实验得到的试件一维应力状态的等应变率本构曲线, 曲线进入塑性段后不久即显塑性流动状态, 即应变增加而应力基本保持不变, 且塑性变形段很长, 应变可达到 40% 以上。其它试件曲线的形状与趋势类似。

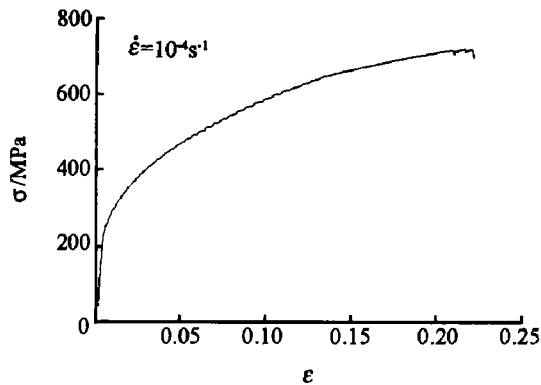


图 1 MTS 加载下的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve loaded by MTS

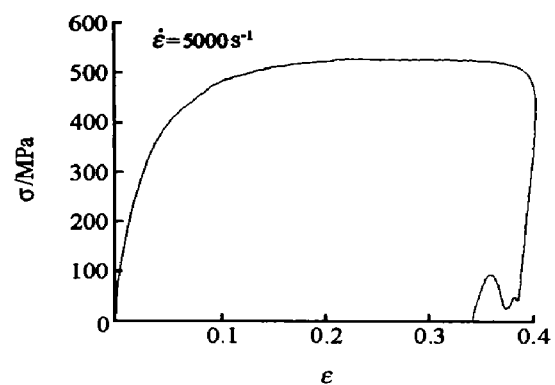


图 2 SHPB 加载下的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve loaded by SHPB

利用 SHPB 装备和应变片技术测量了材料在一维应力下的纵波波速, 其平均值为

$$c = 5.64 \text{ km/s}$$

据此可得材料动态杨氏模量  $E = 78.5 \text{ GPa}$ 。

### 3 实验结果及分析

将实验取得的各种应变率加载条件下的应力-应变曲线放在一起, 可比较不同应变率下材料应力应变关系的变化, 如图 3 所示。为了消除实验、数据判读和处理的误差, 对同一名义应变率实验应力-应变关系曲线做了平均化处理, 并将之作为此应变率下材料的应力-应变曲线。综观全部实验可得以下结论:

(1) 低应变率的实验在样品剪切破坏时终止, 一般破坏应变不超过 30%, 而高应变率下的实验应变达 40% 以上样品还未破坏。而且随应变率的提高, 曲线的塑性流动趋势加强, 塑性变形段明显变长, 相同应力所对应的应变也明显提高, 材料的预计破坏应变和破坏时所吸收的塑性功都明显增加。这表明材料具有良好的冲击韧性, 在高应变率下有很好的吸能效应, 这是其区别于大多数金属材料的突出优势。

(2) 随着应变率的提高, 应力-应变曲线初始段斜率减小且提前进入塑性阶段, 屈服应力及整条曲线

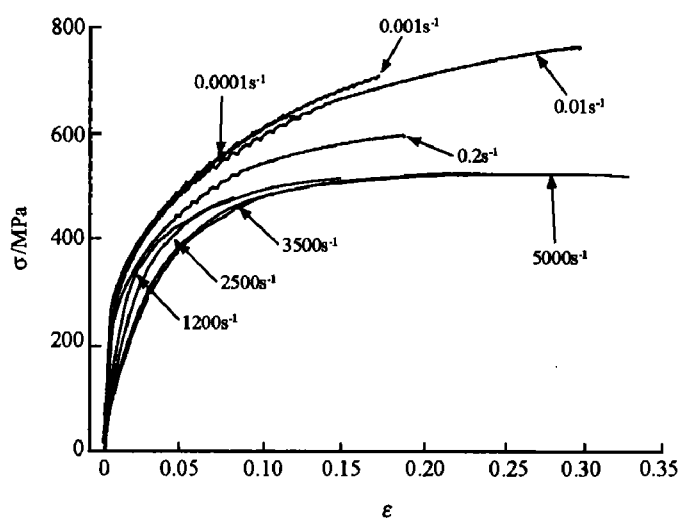


图 3 铝锂合金在不同应变率下的应力-应变关系

Fig. 3 The stress-strain relations of Al/Li alloy under different strain rates

趋于下降,这说明这种铝锂合金材料具有明显的应变率软化特性。

实验得到的铝锂合金基本力学参数如表1所示,其中动态杨氏模量略小于准静态杨氏模量也是材料应变率软化特性的一个方面。

表1 实验得到的铝锂合金基本力学参数

Table 1 The basic mechanics parameters of Al/Li alloy

密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	泊松比 $\nu$	准静态杨氏模量 $E_0/\text{GPa}$	准静态比例极限 $Y_p/\text{GPa}$	一维应力纵波波速 $c / (\text{km}/\text{s})$	动态杨氏模量 $E/\text{GPa}$
2470	0.32	8.21	0.24	5.64	7.85
体积称重法求得,供参考	实验测量	实验测量	直接判读	实验测量	由波速换算

(3)高应变率下的应力-应变曲线在较小应变下出现明显差别(应变率低的曲线在上,应变率高的曲线在下),而在应变较大时不同曲线又逐渐趋同,最大流动应力保持在520~525MPa左右。应变率越高,不同曲线趋同的应变范围越宽。应变率高到一定值时,不同应变率下的应力-应变曲线即整体趋同了。这说明,这种材料在某一应变率范围内有较明显的应变率软化效应,而随着应变率的提高其应变率软化效应趋于饱和,可以预计当应变率达到某极限时将趋于某种应变率无关材料的弹塑性本构特性。我们将这种高应变率下应变率敏感效应消失而应力-应变关系趋于某极限弹塑性关系的材料称为极限应变率敏感材料,而铝锂合金则是一种极限应变率软化材料。

(4)极限应变率敏感材料这一概念的提出不仅有其形式和数学上的意义,而且有一定的物理意义和背景,这就是:极限应变率敏感材料由于其应变率效应的极限特征,突加载荷作用下即应变率无穷大时材料的响应表现为其极限弹塑性响应,故材料中将会出现类似于弹塑性材料中的双波结构。这一现象已为Hugoniot冲击测量实验结果所证实<sup>[4]</sup>。

#### 4 本构方程及其对极限应变率软化材料力学性质的描述

由于各等应变率的应力-应变曲线都具有幂函数的基本特征,而曲线对应变率的依赖又有极限应变率软化的趋势,故提出如下的双幂次应变硬化-极限幂次应变率软化的粘塑性本构模型,即设

$$\sigma = \sigma_0(\epsilon)\phi(\dot{\epsilon}) = Y_0\epsilon^m(1 + \alpha \cdot \epsilon^n)\left[1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right]^p\right] \quad (1)$$

$$\sigma_0(\epsilon) = Y_0\epsilon^m(1 + \alpha \cdot \epsilon^n), \quad \phi(\dot{\epsilon}) = 1 + \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right]^p \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为轴向应力, $\epsilon$ 为轴向应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, $Y_0$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $\alpha$ 和 $p$ 分别为与材料特性相关的参数。其中因子 $(1 + \alpha\epsilon^n)$ 用以修正基本幂次硬化关系 $Y_0\epsilon^m$ ,以便更好地刻画其本构特性。采用最小二乘法拟合实验得到的应力-应变关系曲线(如图3所示),得出以下结果

$$Y_0 = 746\text{MPa}, \quad m = 0.374, \quad n = 1.65, \quad \alpha = -2.05, \quad p = -0.0274 \quad (3)$$

由于画出所有拟合曲线与实验曲线的对比将使图过于杂乱,故在图4中仅给出应变率分别为5000和 $0.01\text{s}^{-1}$ 两种情况下的实验曲线和拟合曲线的比较,而表2则给出所有拟合曲线与实验曲线的相关系数,可见拟合结果是令人满意的。

表2 拟合曲线与实验曲线的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the fitting and experimental curves

应变率/ $\text{s}^{-1}$	5000	3500	2500	1200	0.2	0.01	0.001	0.0001
相关系数	0.978	0.970	0.964	0.966	0.946	0.974	0.983	0.991

式(2)中的双幂因子 $\sigma_0(\epsilon)$ 为应变硬化因子, $\phi(\dot{\epsilon})$ 为应变率软化因子。分析 $\phi(\dot{\epsilon})$ 的特征可知,其幂次指数为负,这表征了材料的应变率软化效应,参数 $\dot{\epsilon}_0 = 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 可称为参考应变率。图5给出了应变率软化因子 $\phi(\dot{\epsilon})$ 的变化趋势。曲线表明应变率在 $10^{-4} \sim 10^3\text{s}^{-1}$ 时, $\phi(\dot{\epsilon})$ 随应变率增加而下降得十分迅速,当应变率继续提高时其下降趋于平缓,应变率对应力的影响已相当微弱,而当应变率趋于无穷大时, $\phi(\dot{\epsilon})$ 趋于1,即在突加变形的极限条件下趋于某种应变率无关的弹塑性材料的性质,故式(2)给出的

关系  $\sigma = \sigma_0(\dot{\epsilon})$  可视为铝锂合金在极高应变率下的极限弹塑性本构关系。因此, 尽管此种材料是应变率敏感的粘塑性材料, 但在平板撞击等突然加载问题中却会出现类似于弹塑性材料中的双波结构, 这是与一般的粘塑性材料不同的, 这一现象在轻气炮实验中得到了证实<sup>[4]</sup>。

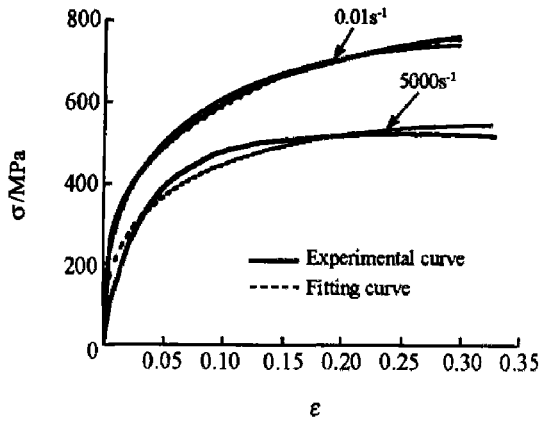


图 4 实验曲线与拟合曲线

Fig. 4 Experimental curve and fitting curve

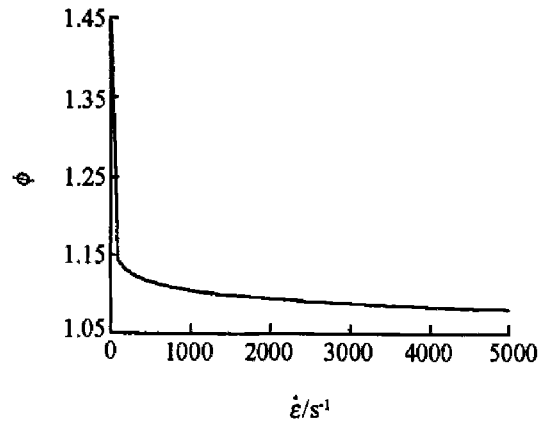


图 5 应变率软化因子与应变率关系

Fig. 5 Relation between softening factor and strain-rate

材料的这一性质也可以由其应变率敏感系数  $f(\dot{\epsilon})$  来描述, 其定义和结果分别为

$$f(\dot{\epsilon}) \equiv \frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{d(\ln \dot{\epsilon})} = -0.0274 \left[ \frac{\dot{\epsilon}}{0.0001} \right]^{-0.0274} \quad (4)$$

可见  $f(\dot{\epsilon}) < 0$ , 反映了材料的应变率软化效应; 在  $\dot{\epsilon} \in [0.0001, \infty)$  的范围内,  $|f(\dot{\epsilon})|$  由 0.0274 单调下降至 0, 在低应变率区  $|f(\dot{\epsilon})|$  变化较快, 而随着应变率的提高  $|f(\dot{\epsilon})|$  变化渐缓直至趋于 0, 这与图 5 反映的趋势是一致的。

## 5 结 论

(1) 实验结果表明铝锂合金具有低密度、高比强度、高比刚度等优点。材料应力-应变关系表明铝锂合金具有良好的延展性, 随应变率的增加其破坏应变明显提高表明合金具有很好的冲击韧性。对于航空航天实际应用来说, 以上特殊性质是十分有利的。

(2) 铝锂合金材料是具有应变率软化效应的特异性材料, 随着应变率的提高其屈服应力和整个应力-应变曲线下降, 这也可视为其冲击韧性特征的一种表现。按照时温等效的观点, 这种材料可能具有某种高温硬化或低温韧性的特性, 这有待于今后进一步开展工作。

(3) 铝锂合金还是一种极限应变率软化材料, 在应变率为无穷大的突加载荷作用下, 其响应趋于某种极限弹塑性本构关系。这一现象的发现和极限应变率敏感(软化或硬化)粘塑性概念的提出具有一定的理论意义和实际意义, 因为这一概念的提出进一步澄清了粘塑性材料和弹塑性材料的差异和相互转化, 以及在应力波传播特性上的表现形态, 从而对某些粘塑性材料中双波结构的出现给出了合理解释, 同时也为深入细致研究材料力学特性的宏观机理、讨论应变率效应的本质提出了新研究素材。

(4) 本文中提出的双幂次应变硬化-极限幂次应变率软化本构方程形式简单, 但能较为准确地描述实验得出的铝锂合金动态力学行为, 且便于实际应用。关于此本构形式的物理内涵和宏观机理将另文讨论。

## 参考文献:

- [1] 周光泉, 程经毅. 铝锂合金应变率负敏感效应及动态韧性现象[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(3): 193-198.  
ZHOU Guang-quan, CHENG Jing-yi. The inverted strain-rate sensitivity of Al/Li alloys and their properties of dynamic ductility[J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(3): 193-198.
- [2] 田兰桥, Sturt C, Dodd B. 铝锂合金动态扭转试验研究[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(1): 68-76.  
TIAN Lan-qiao, Sturd C, Dodd B. Study on dynamic torsional test of Al/Li alloys[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(1): 68-76.

- [3] Kobayashi T. Strength and fracture of aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, A280: 8—16.
- [4] 李永池, 郭扬, 谭福利, 等. 铝锂合金材料状态方程的研究[J]. *高压物理学报*, 2003, 17(2): 81—87.  
LI Yong-chi, GUO Yang, TAN Fu-li, et al. Equation of state for Al/Li alloy[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(2): 81—87.

## Study on the limit strain-rate softening property of Al/Li alloy

GUO Yang<sup>\*</sup>, LI Yong-chi, YAO Lei, DONG Jie

(*Department of Mechanics and Mechanical Engineering,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

**Abstract:** In this paper, with the series of quasi-static and dynamic experiments of mechanics, the basic mechanical parameters of the Al/Li alloy have been obtained. By comparison of the experimental results of different strain-rates, it is shown that the Al/Li alloy has the extraordinary property of strain-rate softening. Also the limit characteristics of the strain-rate softening of the material are revealed, based on which the concept of limit strain-rate softening material is proposed so that the existence of double-wave phenomenon in viscoplastic material is reasonably explained. Furthermore, we have completed the fitting of the experimental strain-stress curves, and presented one concrete form of the constitutive model of the material convenient for practical application, which is a constitutive relation of double powers strain hardening with a limit and power strain-rate softening.

**Key words:** solid mechanics; limit strain-rate softening; constitutive relation; Al/Li alloy; dynamic experiments

---

\* Corresponding author; GUO Yang; Telephone: 0551-3601293