

铝-锂合金应变率负敏感 效应及动态韧性现象

周光泉 程经毅
(中国科学技术大学)

摘要 本文从实验上揭示了铝-锂合金奇特的应变率负敏感效应和动态韧性特性,并应用作者所建议的无屈服型粘塑性本构模型对其力学行为从理论上进行了描述和讨论。

关键词 应变率负敏感 动态韧性 本构模型 粘塑性

一、引言

铝-锂合金是极富吸引力的下一代航天材料,因为它具有高比强度和高刚度的优点,正受到科学家和工程师们的青睐。许多国家竞相投入人力物力对其物理力学特性,尤其是它在动态加载的特殊条件下的力学行为从实验到理论,从宏观到微观进行观测和分析,以便为航空航天器械的设计和安全评估等提供可靠的科学依据和必要的参考数据。在本项研究工作中,我们分别对经受三种不同热处理条件的270铝-锂合金进行了不同方法动静态实验,获得了它们的动态拉伸特性,并与其准静态拉伸特性作了比较,发现铝-锂合金具有奇特的应变率负敏感效应和高速韧性现象。这个重要的发现对于材料动态力学性能研究中所建立的概念和相应理论是一个新的有力冲击。据我们所知,在此之前尚未发现有关文献报道这一现象。此外,为了应用的目的,本文还应用作者所提出的基于位错热激活机制的本构方程^[1]对上述现象进行了描述和讨论。

二、实验方法

为了实现对试件的高速拉伸,我们采用旋转圆盘冲击拉伸单杆试验设备^[2-3](图1)。通过实验测得撞块移动速度 $v(t)$ 和输出杆应变值 ϵ_r 后,就可根据下式求得试件材料相应的应力、应变值

$$\epsilon(t) = \frac{1}{L} \int_0^t [v(\tau) - C\epsilon_r(\tau + a/C)] d\tau \quad (1)$$

$$\sigma(t) = (S_0/S) E_0 \epsilon_r \left(t + \frac{a}{C} \right) \quad (2)$$

为了比较的目的,这里我们还运用

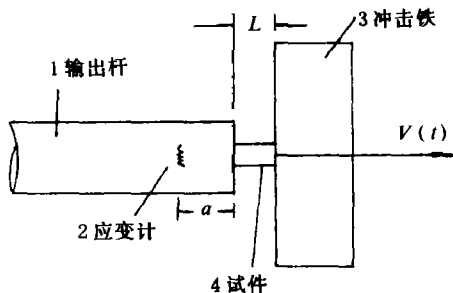


图1 单杆试验设备

Fig. 1 One-Bar Method Apparatus
1—Output bar, 2—Strain gage,
3—Impact block, 4—Specimen

AUTOGRAPHIS-500 材料试验机对试件进行了准静态拉伸试验。实验中试件几何尺寸分别为：试件直径 3 mm，标长 8 mm。试件材料为 270 铝-锂二元合金（日本神户制钢所特制），除铝之外其他附加成份为 Li—2.6%，Cu—1.9%，Mg—0.8%，Zr—0.12%。

本实验中试件的热处理条件如下所示：

T_4 在 530°C 下固溶处理 0.5 小时后进行自然时效。

$T_{6,2}$ 在 530°C 下固溶处理 0.5 小时后在 165°C 下进行人工时效 2 小时。

T_6 在 530°C 下固溶处理 1 小时后在 165°C 下进行人工时效 48 小时。

三、实验结果

(1) 拉伸强度 σ ，破坏应变 ϵ_b 和吸收能量 E_{ab} 的应变率敏感性表示在图 2 ~ 6 中，这里

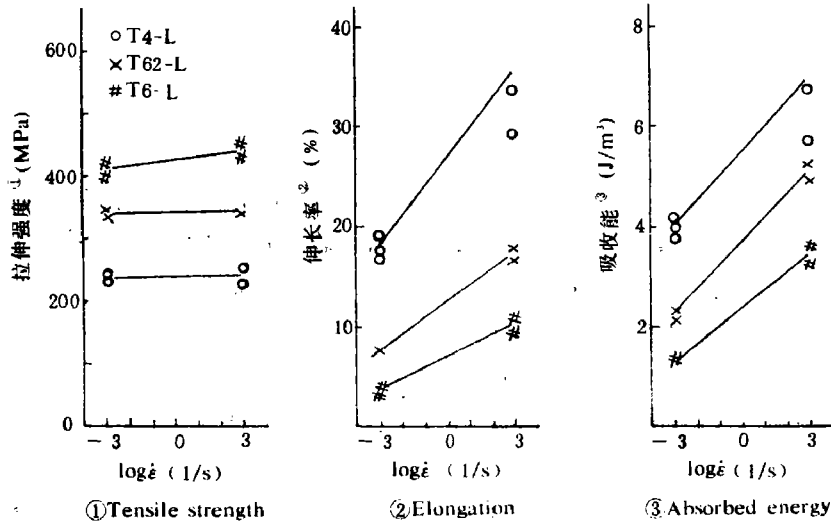


图 2 L 方向上 Al-Li 合金的动静态性质

Fig. 2 The dynamic and static properties of Al-Li alloys along the direction of L

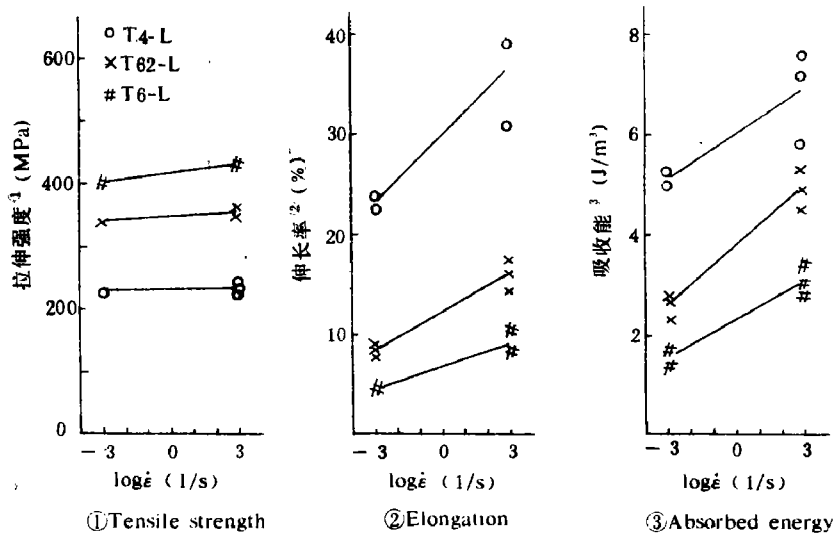
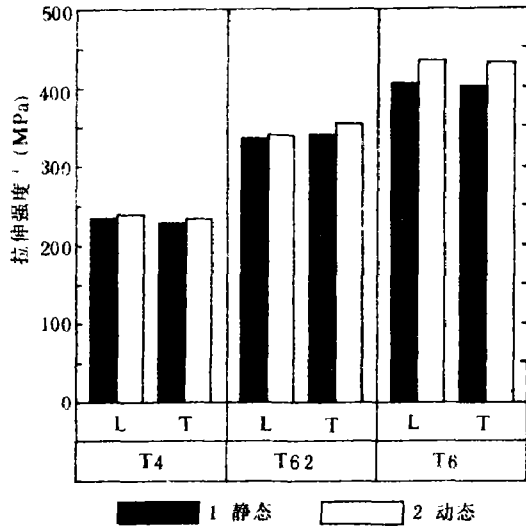


图 3 T 方向上 Al-Li 合金的动态与静态性质

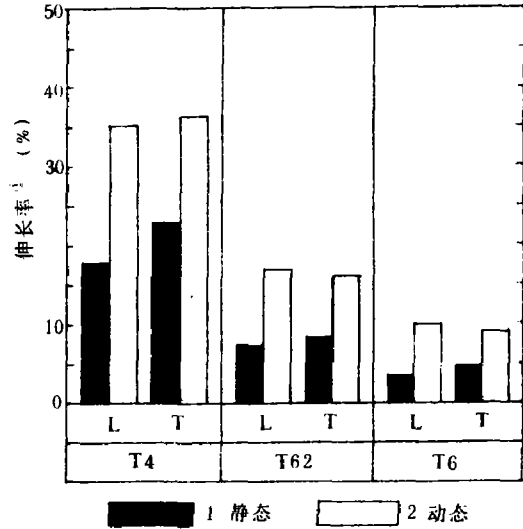
Fig. 3 The dynamic and static properties of Al-Li alloys along the direction of T



(1) Tensile strength

图 4 Al-Li 合金的拉伸强度

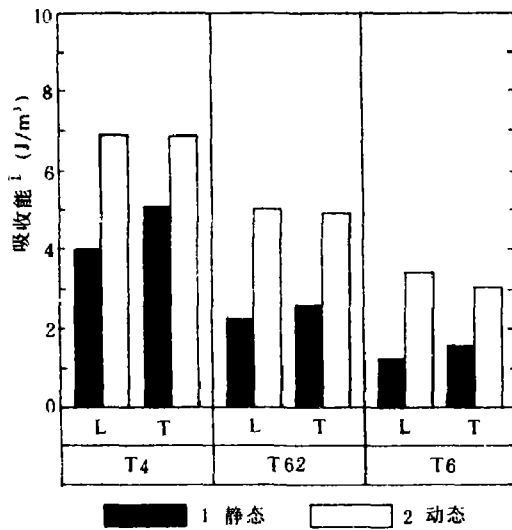
Fig. 4 The tensile strength of Al-Li alloys
1—Static, 2—Dynamic



(2) Elongation

图 5 Al-Li 合金的伸长率

Fig. 5 The elongation of Al-Li alloys
1—Static, 2—Dynamic



(3) Absorbed energy

图 6 Al-Li 合金的吸收能

Fig. 6 The absorbed energy of Al-Li alloys
1—Static, 2—Dynamic

L 表示轧制方向, T 表示垂直轧制方向, $\dot{\epsilon}$ 表示应变率。从这些数据不难看出, 拉伸强度随应变率变化并不显著, 然而破坏应变却随应变率的增加而有成倍的提高。这说明 270 Al-Li 合金表现出明显的动态韧性特性, 在讨论材料这样的高应变率力学行为时, 人们往往引入一种所谓“高速可用性系数” β

$$\beta = \frac{\epsilon_{hd} - \epsilon_{bs}}{\epsilon_{bs}} \quad (3)$$

式中 ϵ_{hd} —动态破坏应变, ϵ_{bs} —准静态破坏应变。

对于我们所实验的材料来说, β 总是正数。

(2) 270 Al-Li 合金动态 ($10^3 s^{-1}$) 应力-应变曲线与准静态 ($10^{-3} s^{-1}$) 曲线的比较表明, 该材料具有对应变率负敏感的特性, 即随着应变率的提高, 同一应变处的应力水平在下降, 见图 7。这是一种与一般金属相反的力学行为, 这可能与固溶强化材料的溶质迁移现象有关, 其

物理机制尚待进一步探讨。

四、本构方程的建议及其对 Al-Li 合金动态力学性质的描述

为了较真实地描写材料的动态力学行为, 我们曾发展了一套基于位错运动的热激活理论

的无屈服型弹/粘塑性本构方程^[1]。在室温单轴应力状态下, 该方程具体化为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p \\ \dot{\epsilon}^e &= \dot{\sigma}/E \\ \dot{\epsilon}^p &= C_0' \rho (\sigma/\tau_0)^n \\ \rho &= \left(\rho_0 + p \frac{W_p}{W_{p0}} \right) \left[1 + \Phi \left(\frac{W_p}{W_{p0}} \right)^q \right] \\ \tau_0 &= \tau_m (\dot{\epsilon}^p/\dot{\epsilon}_0)^{-\gamma} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里, $\dot{\epsilon}$ 是总应变率, $\dot{\epsilon}^e$ 为弹性应变率, $\dot{\epsilon}^p$ 为塑性应变率, σ 为应力, W_p 为塑性功, E 为杨氏模量, ρ 为可动位错密度, ρ_0 为初始位错密度, p 为增殖系数, τ_0 为绝热剪切流动强度, 以及 $C_0', \eta, \tau_m, \dot{\epsilon}_0, W_{p0}, \Phi, q$ 和 γ 为材料常数。

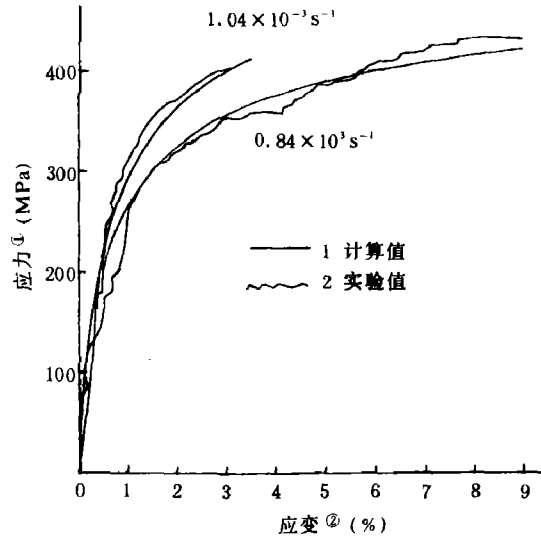
塑性应变率方程可以写成

$$\sigma = \frac{\tau_m \dot{\epsilon}_0}{(C_0' \rho)^{\frac{1}{n}}} (\dot{\epsilon}^p)^{\frac{1}{n} - \gamma} \quad (5)$$

可以看出, 流动应力 σ 随应变率的依赖是通过因子 $(\dot{\epsilon}^p)^{\frac{1}{n} - \gamma}$ 来表达的。指数 $[(1/n) - \gamma]$ 的大小反映了材料的应变率敏感程度, 数 $|(1/n) - \gamma|$ 越大, 材料的应变率敏感程度就越显著。若 $[(1/n) - \gamma] > 0$, 则反映应变率硬化效应; 若 $[(1/n) - \gamma] = 0$, 则是应变率无关的本构方程; 若 $[(1/n) - \gamma] < 0$, 则表现出应变率软化效应 (即应变率负敏感特性)。后面我们将看到本构方程 (1) 能较为准确地描述 Al-Li 合金的应变率软化特性。加工硬化是通过可动位错密度 ρ 的演化方程 $\rho = \rho(W_p)$ 表达的。函数 $\rho(\omega_p)$ 的具体形式完全确定加工硬化曲线的形状。对函数 $\rho(W_p)$ 的正确选择就能准确地反映材料的加工硬化特性。应变率历史效应也是通过函数 $\rho(W_p)$ 来表达的。因为在具有应变率硬化 (或软化) 特性的材料的变形过程中, 在相同的应变水平下, 对应于不同应变率来说, 其所做的塑性功不同。从而 $\rho(W_p)$ 在相同的应变下, 对应于不同的应变率其值也是不同的。因此, 在应变率发生变化的情况下由方程 (5) 得到的流动应力 σ 值亦是不相同的, 由此而表现出应变率历史效应。

下面, 我们就用这里所建议的本构模型来对前述的 Al-Li 合金的应变率软化特性和加工硬化特性进行分析与描述。通过对图 7 中应变率为 $\dot{\epsilon} = 1.04 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $\dot{\epsilon} = 0.84 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 的两条实验曲线的最小二乘法拟合, 得到本构方程中的各材料常数如下:

$$\begin{aligned} E &= 69580.0 \text{ MPa} & C_0' &= 1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ \rho_0 &= 1.0 \times 10^6 \text{ m}^{-2} & p &= 1.0 \times 10^4 \text{ m}^{-2} \\ W_{p0} &= 1 \text{ MPa} & \Phi &= 80.06 \\ q &= 0.5468 & \tau_m &= 3828.5 \text{ MPa} \\ \gamma &= 0.282 & \dot{\epsilon}_0 &= 1 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$



① Stress ② Strain
图 7 Al-Li 合金的动态与静态应力-应变曲线
Fig. 7 The dynamic and static stress-strain curves of Al-Li alloys
1—Calculated, 2—Experimental

$$n = 3.468$$

拟合的曲线见图7。显然，理论计算曲线与实验曲线有着很好程度的吻合。

从上面的材料常数可以看出，对Al-Li合金有参数 $(1/n) - \gamma = -0.00788 < 0$ ，这说明Al-Li合金具有应变率负敏感的特性，这是与实验结果相一致的。但由于 $|(1/n) - \gamma| = 0.00788$ 是一个较小的值，这说明Al-Li合金对应变率不是十分敏感。如试验中应变率的量级相差不大，则很难确定试验结果是应变率的影响还是试验误差。

试验表明Al-Li合金具有一定程度的加工硬化性质。从拟合的曲线(图7)可以看出，理论也能较准确地反映这种性质。

五、结 论

综上所述，我们不难得到如下几点结论性的意见：

(1) 铝-锂合金具有很好的动态韧性性质，动态破坏应变甚至可以比静态破坏应变大一倍左右，对于航天航空的实际应用来说，这种特殊性质是十分有利的。

(2) 应变率负敏感现象的发现具有重要的理论意义，它向传统的粘塑性理论提出了尖锐的挑战。这将促使人们开展深入细致的宏观与微观相结合的研究工作，真正弄清各种应变率效应的本质。为此，我们已有所考虑，这将在另文中予以介绍。

(3) 本文所建议的弹/粘塑性本构方程能够较为准确地描述具有应变率负敏感效应和加工硬化效应的铝-锂合金的动态力学行为，这一事实进一步证明作者先前发展的基于热激活理论的本构模型有着较广泛的适用范围。

本文中部分数据取自作者访问东京大学时的实验研究工作，实验中得到小林昭教授、桥本先生的多方协助，在此特致诚挚谢意。

参 考 文 献

- [1] Zhou, G. Q., Li, Y. C. and Cheng, J. Y., A Constitutive Representation Developed From Thermo-Activated Mechanism, *Journal DE PHYSIQ* Tome 49, Sept., (1988), 497.
- [2] Kawata, K., et al., *Inst. Ohys.*, (47) (1979), 71.
- [3] Kawata, K., et al., 13th Cong. Int'l. Council Aeronautical Sci. AIAA, (1982), 862.

THE INVERTED STRAIN-RATE SENSITIVITY OF Al-Li ALLOYES AND THEIR PROPERTIES OF DYNAMIC DUCTILITY

Zhou Guangquan, Cheng Jingyi
(University of Science and Technology of China)

ABSTRACT In this research, the specimens of 270Al-Li alloy subjected to three different

thermal-heated conditions are tested by different static and dynamic experimental method. Through comparison of the static and dynamic experimental results, it is shown that Al-Li alloys have the unusual effects of inverted strain-rate sensitivity and properties of dynamic ductility. Furthermore, for the purpose of practical applications, the above mechanical behaviours of the Al-Li alloy are described and discussed theoretically by use of the no-yield visco-plastic model which was proposed by the authors. The theoretical calculated curves show consistency with the experimental very well.

KEY WORDS inverted strain-rate sensitivity, dynamic ductility, constitutive model, visco-plasticity.