第12卷 第1期
1992年1月

爆 炸 与 冲 击
EXPLOSION AND SHOCK WAVES

Vol. 12, No. 1
Jan., 1992

(9) 68—76

铝-锂合金动态扭转实验研究*

田兰桥
(中国科学院力学研究所,北京100080)

TG146.263

Sturt, C C. Sturt B. Dodd
(英国里丁大学)

摘要 利用霍普金森扭杆(Torsional Split-Hopkinson Bar)技术对三种不同成份或状态的铝-锂合金材料的动态应力-应变-应变率关系进行了实验测定。应变率范围由$1300s^{-1}$到$2600s^{-1}$,研究表明随着应变率的提高,三种不同成份或状态的铝-锂合金材料的韧性和强度都有不同程度的提高。对剪切带的初步观察发现,随应变率的增加,剪切带有变窄的趋势。

关键词 铝-锂合金,霍普金森扭杆,动态应力-应变关系,剪切带 霍普金森杆,扭转实验.

1. 前言

铝-锂合金是近年来发展起来的一种合金材料,它具有较低的密度和较高的强度,有较好的机械性能和广泛的应用背景。

本文利用 Split-Hopkinson 扭杆对铝-锂合金的动态应力-应变-应变率关系进行了实验研究,并对试件断口进行了微观观察。此外,对高速扭转时剪切带的形成也进行了初步测定。

2. 实验设备及实验方法

由于 Split-Hopkinson 扭杆具有以下优点,因此被广泛的用于材料动态性能的研究。

(1)可以避免在压杆中由于杆件长细比不合适而引起的径向效应;

(2)在扭转实验中试件变形较均匀,不会产生由于试件的鼓胀或颈缩而引起的误差;

(3)由于在扭转试验中用薄壁管形试件,因此可以得到较大的应变。

关于 Split-Hopkinson 扭杆的详细介绍可参见文献[1]。这里只给出和本实验有关的情况。

本实验是在英国 Reading 大学机械工程系的 Split-Hopkinson 扭杆装置上进行的。设备总长为4m,杆的直径为25mm,整个设备垂直放置。由预加载装置,能量释放夹具,输入输出杆以及信号采集、记录和计算机数据处理等几个部分组成。图1是设备的示意图,下端为预扭加载端,夹具放置于距输入杆端1.5m 处,导杆材料为 Ti6Al4V 钛合金。

实验前把试件粘贴于输入和输出杆之间,实验时先拧紧夹具的螺钉,然后在预扭端施加扭矩,之后使夹紧螺钉迅速断开。于是储存于预扭端的能量迅速释放,扭转波沿杆系向

* 中国科学院和英国皇家学会联合支持,并得到国家自然科学基金会的部分资助。
1991年4月17日收到原稿。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

前传播，并作用于试件上。在输入、输出杆上有三组应变探头，用来测量预扭、入射波、反射波和透射波的应变信号。然后信号经放大器进入瞬态信息记录仪，再经计算机处理，即可得到相应的数据及图表等。

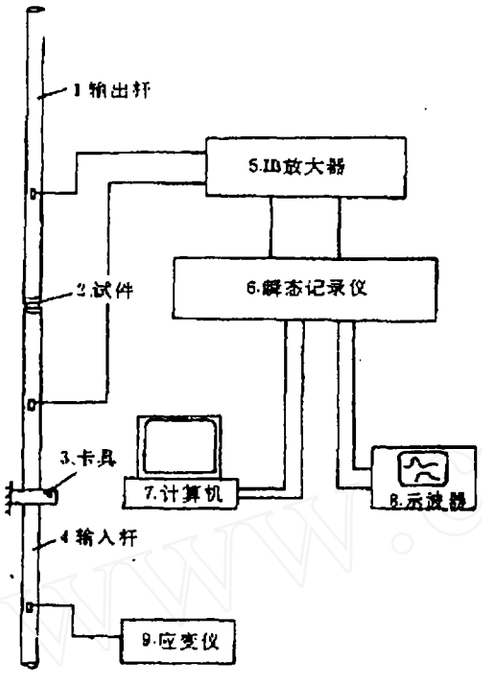


图 1　设备简图

Fig. 1　Schematic of Tortional Split-Hopkinson Bar

1. Output bar,　2. Specimen,
3. Gripper,
4. Input bar,
5. IB amplifier,
6. Transient recorder,
7. Computer,
8. Oscilloscope,
9. Strain meter

3. 基本关系式

根据一维应力波传播理论[2],[3]，可知，当夹紧的螺钉断裂后，储存于预扭端的扭矩有一半向前传播，于是就可以得到入射、反射、透射扭矩，它们分别用 M_i，M_r，M_t 表示，试件中的扭矩 M_s 为

$$M_s = \frac{1}{2}(M_i + M_r + M_t) \tag{1}$$

$$M_t = M_i + M_r \tag{2}$$

$$M_s = M_t \tag{3}$$

试件中的剪应力 τ_s 为

$$\tau_s = M_s \cdot R_s / J_s \tag{4}$$

$$J_s = 2\pi R_s \cdot R_s^2 \delta \tag{5}$$

其中 J_s 为试件的极惯性矩，R_s 为试件平均半径，δ 为试件壁厚。

由(3)、(4)、(5)可得到

$$\tau_s = \frac{M_t}{2\pi R_s^3 \delta} \tag{6}$$

试件中的应变率 $\dot{\gamma}_s$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\dot{y}_s = (v_{s1} - v_{s2})/L_s \tag{7}$$

$$\frac{v_s}{v_b} = \frac{R_s}{R_b}$$

$$\dot{y}_s = \frac{R_s}{R_b L_s}(v_{b1} - v_{b2}) \tag{8}$$

$$v_b = \omega R_b$$

$$\dot{y}_s = \frac{R_s}{L_s}(\omega_1 - \omega_2) \tag{9}$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \tag{10}$$

$$= \frac{c_0}{J_b G_b}(M_s + M_r)$$

$$\omega_2 = \frac{c_0}{J_b G_b} M_t \tag{11}$$

因此

$$\dot{y}_s = \frac{2R_s c_0}{L_s J_b G_b}(M_s - M_t) \tag{12}$$

$$G_b = \rho c_0^2$$

$$\dot{y}_s = \frac{2R_s(M_s - M_t)}{\rho c_0 J_b L_s} \tag{13}$$

试件中的应变 y_s 为

$$y_s = \int_0^t \dot{y}_s dt \tag{14}$$

根据(13)式

$$y_s = \frac{2R_s}{\rho_b c_0 J_b L_s}\int_0^t [M_s(t) - M_t(t)]dt \tag{15}$$

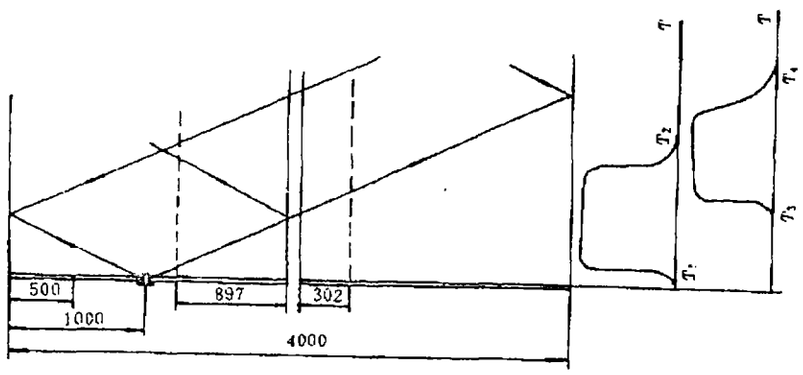


图2 应力波传播简图

Fig. 2 Schematic of the stress wave propagation

以上各式中 v_b、c_0、ρ_b、R_b、J_b、G_b、ω 分别为导杆运动速度、声速、密度、半径、极惯性矩、剪切模量和角速度。L_s、v_s 为试件试验段长度和试件两端运动速度。

一维应力波理论忽略了由于试件试验段和杆横截面积的变化引起的端部效应。此外

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

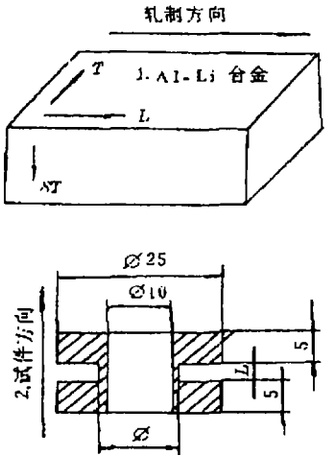


图 3　试件尺寸及方向(铝-锂合金)

Fig. 3　Schematic of the specimen (Al-Li alloy)

L-Rolling direction, 1. Al-Li alloy, 2. Specimen direction

由于弯曲波影响较小，并在试验中采取了相应措施减少弯曲波的影响，因此弯曲波的影响也可忽略不计。由于加载时间 t 远大于试件中应力平衡所需的时间 t_s，因此可以认为试件中的应力是均匀的，试件处于准静态。图 2 是剪应力波在杆中传播的简图。

试件材料为三种不同成份或状态的铝-锂合金材料，它们是：铝-锂二元合金(Binary alloy)，其成份为 Al-2.5Li，英国牌号为 4499；固溶处理铝-锂合金和时效处理铝-锂合金，其成份均为 AL-2.76Li-0.08Fe-0.03Si-0.01Cu-0.01Mg，固溶处理为加热到 545℃±5℃保温一小时水淬，时效处理条件为加热 170℃保温 32 小时，这种材料的牌号为 8090。

为研究轧制方向对材料性能的影响，试件采用：沿轧制方向(定为 L 向)，垂直于轧制方向(定为 T 向)，垂直于轧制平面的方向(定为 ST 向)三个方向制备。试件为薄壁管形如图 3，其中Ø和 L 的长度可根据实验要求而改变。

4. 实验结果

(1)扭转实验结果

图 4、5、6 分别是铝-锂二元合金，固溶处理 8090 和时效处理 8090 铝-锂合金三种试件在不同应变率下的应力-应变曲线(图中各符号的意义分别为：AL 代表 Al-Li 合金，S 代表固溶处理，A 代表时效处理，其他代表试件取向)。通过这三组曲线，我们不难看出，应变率在 $1300s^{-1}$～$2600s^{-1}$，这一范围内随着应变率的增加不但强度稍有增加，材料的韧性也有明显地增加，这是与一般常规材料不同的。通常，随着应变率的增高，材料的强度提高，但韧性有所下降。

为了研究材料的各向性能，图 7 表示出在相同的应变率下，同种材料沿不同取向的试验结果，可以发现，沿垂直于轧制平面截取的试件显示出较差的韧性。

同时对三种铝-锂合金试件在相同应变率下的动态性能进行了比较，图 8 示出当应变率为 $2600s^{-1}$时，三种铝-锂合金试件的 τ～γ 曲线。由图中可以看出，时效处理的 8090 铝-锂合金示出较高的强度，但韧性较差。固溶处理的 8090 铝-锂合金有较好的韧性，但强度较差。二元铝-锂合金居中。

以上结果和断口的显微观察是相符合的。

(2)断口观察

用扫描电镜对试件断口进行观察，我们可以发现：

a. 固溶处理的 8090 铝-锂合金，当应变率为 $2600s^{-1}$时，断口可以观察到大量的韧窝，但当应变率下降时，断口处的韧窝明显减少，并有裂纹和孔洞出现，韧性也有所下降(见显

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

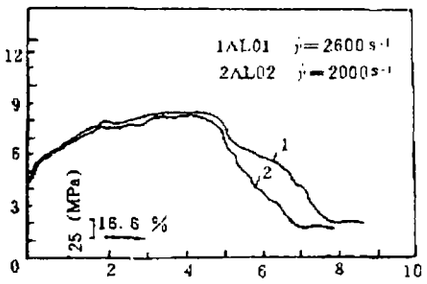


图4 两元铝-锂合金应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of the binary Al-Li alloy

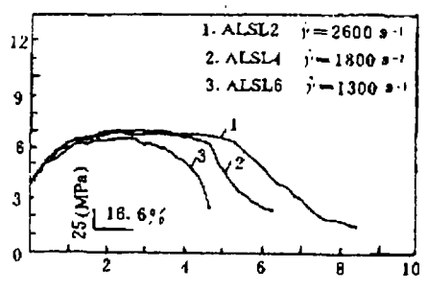


图5 固溶处理铝-锂合金应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of the solution treated Al-Li alloy

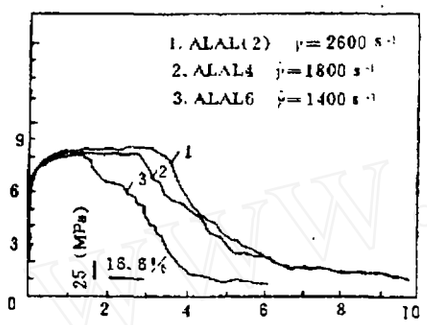


图6 时效处理铝-锂合金应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of the aged Al-Li alloy

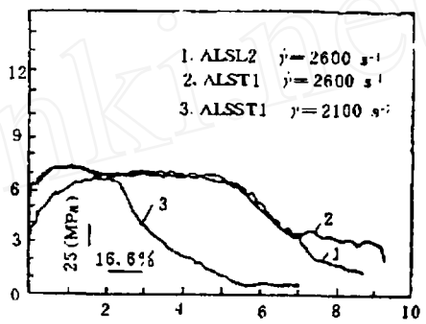


图7 固溶处理铝-锂合金三种取向应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of the solution treated Al-Li alloy along three different directions

微照片1)。

b. 观察时效处理的8090铝-锂合金试件断口，除有韧窝出现外，还可以观察到大量的 δ' (Al_3Li)粒子，在有些试件中还可以观察到裂纹和孔洞。这和扭转实验中材料表现出来的较高的强度和较低的韧性也是一致的。(见显微照片2、3、4)。

c. 在垂直于轧制平面的试件的断口上可以观察到较多的孔洞和裂纹、断面呈层状并有少量夹杂物存在。因此，可以解释为什么垂直于轧制平面的扭转实验曲线呈现出强度及韧性都较差的原因(见显微照片5、6)。

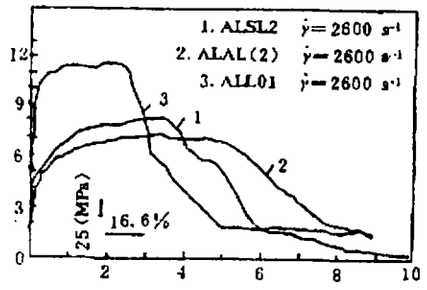
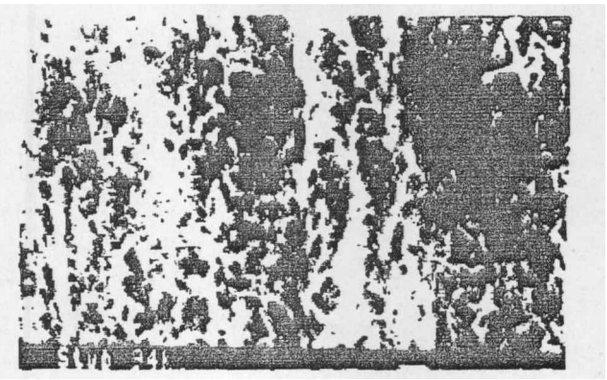


图8 三种铝-锂合金应力-应变曲线

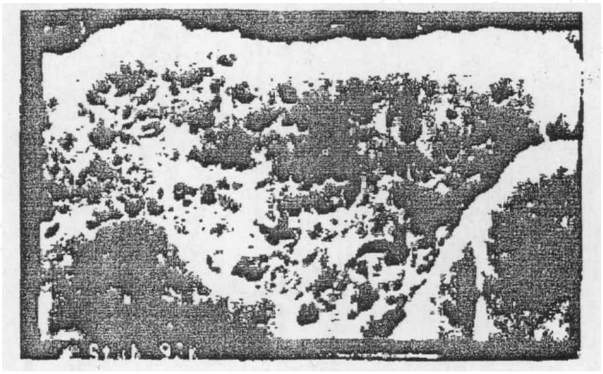
Fig. 8 Stress-strain curves of three kinds of Al-Li alloy

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



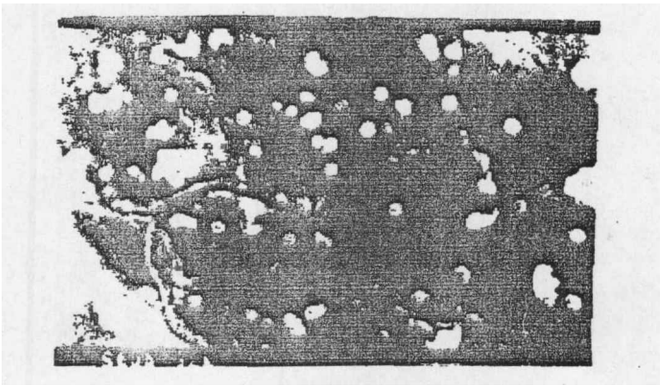
照片 1　固溶处理铝-锂合金断口形貌（应变率-2600/s）

Picture 1　Fractograph of the solution treated Al-Li alloy（～2600/s）



照片 2　时效处理铝-锂合金断口观察到大量韧窝

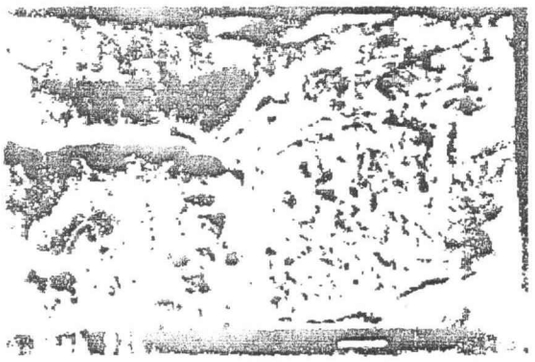
Picture 2　Large amout of dimples of aged Al-Li alloy in fracture plane



照片 3　时效处理铝-锂合金断口观察到大量 δ' 粒子

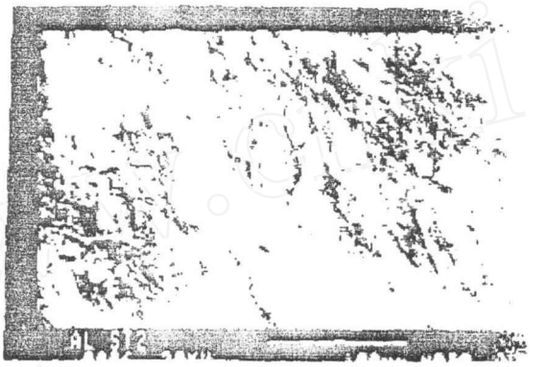
Picture 3　Large amount of δ' phase in fracture plane of aged Al-Li alloy

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



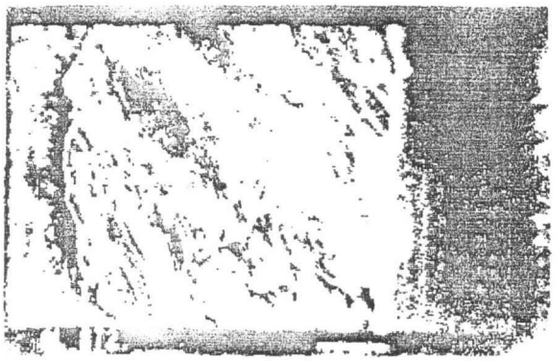
照片4 时效处理铝-锂合金断口形貌

Picture 4 Fractograph of aged Al-Li alloy



照片5 垂直于轧制平面的固溶处理铝-锂合金断口呈层状破坏

Picture 5 Laminar fractured surface of the ST direction solution treated specimen



照片6 垂直于轧制平面的二元铝-锂合金断口形貌

Picture 6 Fractograph of the ST direction binary Al-Li alloy specimen

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3)剪切带的观察

绝热剪切带是材料在高速变形中常出现的一种现象，特别是材料临近破坏之前都可以观察到剪切带。因此，通常认为剪切带的出现是材料破坏的先兆，从而引起人们极大的关注。

本实验对材料变形后出现的变形局部化也进行了初步观察。

实验前先在试件内表面沿轴线方向画数条标志线，当试件变形后，标志线也随之发生改变，通过观察可以发现：变形后的标志线大约可以分为二个部份，如图 9，即均匀变形段和变形局部化段，Δs 示剪切带的宽度，通过测量发现，随着应变率增加，Δs 趋于变窄，表 1 是图 9 所示各参量的测量结果。

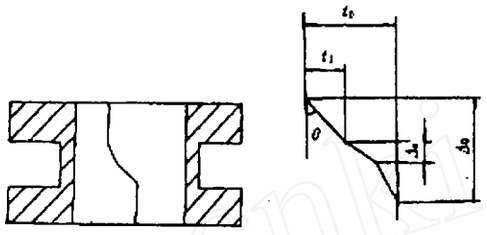


图 9　标志线变化情况

Fig. 9　Change of the marked line on the specimen surface

表 1　标志线测量值

Table 1　Measurements of the marked line

试件 No.	t/(mm)		Δ/(mm)			θ/(°)
	t_0	t_1	Δ_0	Δ_s	Δ_{s1}	
ALSR1	0.461	0.314	0.699	0.157		31
ALSR2	0.572	0.356	0.773	0.146		33.5
ALSR4	0.721	0.542	1.019	0.261		32.5
ALSR5	0.799	0.539	1.558	0.445		20

5. 结论与讨论

通过以上三种不同成份或状态的铝-锂合金高应变率扭转实验研究，可以初步归纳和讨论如下：

1. 本文实验的应变率均在 $10^3 s^{-1}$ 范围，通过实验可以观察到，当应变率变化后，材料弹性段几乎没有变化，不影响材料的弹性模量 G，屈服点在该实验范围内变化也较小。材料屈服后进入硬化段，这是材料在高应变率状态下均具有的性能，但该材料硬化区域变化不大。然而随即出现的塑性平台随应变率的增大明显增长。其示意图如图 10。这现象表明，在高速变形条件下，铝-锂合金随应变率的增长（二倍左右），其屈服点、强度的变化并不敏感，但屈服平台的变化十分敏感，屈服平台的增长导致延伸率的增加。

2. 在本实验范围内，随应变率的增高材料强度稍有提高，韧性有明显增强，通过初步

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测量及显微观察可以认为，这是因在高应变率下材料变形速度快，使局部温度升高材料软化，因此材料中裂纹，孔洞不易萌生，显示出较好的韧性。

3. 时效处理后的8090铝-锂合金由于Cu、Mg、Zr元素加入二元Al、Li合金后增加了固溶强化，亚结构强化和δ'(Al_2CuMg)相与δ'相的复合沉淀强化效果，使得其强度提高。

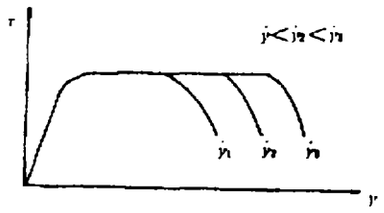


图10 应变率对韧性影响示意图
Fig. 10 Schematic of the strain rate effect on toughness

4. 随着应变率的增加，剪切带有变窄的趋势。这一现象目前只进行了初步观察，因此还有待于进一步的分析研究。

5. 由于该材料具有随应变率增高其延伸率增大的现象，可以判定，这种材料进行大变形塑性加工时，特别是用常规加工方法较难实现时，采用高能率加工方法，如爆炸成形等可能较为优越。

参 考 文 献

[1] Baker W B, Yew C H. J Appl Mech, 1966, 33(4): 917～923
[2] Meyers M A, Aimone C T. Progress in Materials Science, 1983, 28(1): 1～96
[3] 王礼立，应力波基础. 第一版. 北京：国防出版社，1985
[4] Curran D R, Seaman L. Rewiew Section of Physics Letters, 1987, 147 (5 & 6): 253～388
[5] Nicholas T, Lawson J E. the AFML Technical Report; AFML-TR. 71～143

STUDY ON DYNAMIC TORSIONAL TEST OF Al-Li ALLOY

Tian Lanqiao
(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing* 100080)
C. Sturt B. Dodd
(*Reading University, U. K.*)

ABSTRACT The dynamic shearing strength of Al-Li alloy under different strain rate was determined useing split-Hopkinson torsional bar (SHTB) facility with tubular specimens and the fractographyic observations were carried out with SEM. Besides, the shear bands were also measured.

The results show that the toughness increases and the shear band narrows with the increasing of strain rate.

KEY WORDS Al-Li alloy, split-Hopkinson torsional bar, dynamic stress-strain relation, shear band

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net