

# LY-12 铝高温凝聚态动力学性质研究 ——高温冲塞剪切破坏强度的测量

王春奎 刘小苹 郑融

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 本文介绍 Ly-12 铝合金从常温到 400℃ 高温下, 动态冲塞剪切破坏强度的测试及研究结果, 并给出了该种材料静态压剪破坏强度的测量结果。在上述温度范围内, Ly-12 铝的动态冲塞剪切破坏强度与其静态结果之比为 1.3:1 ~ 4:1, 表明随着温度的升高, 动态的强度远大于同温度的静态结果。

**关键词** Ly-12 铝合金 高温 冲塞剪切破坏强度

## 一、引言

在激光对材料的效应研究中, 强激光与金属材料的相互作用是一个重要的方面。强激光与物质相互作用时, 除伴有热效应外, 还产生动态力学效应。特别是靶材上, 除热效应外, 总伴有强激光辐照靶产生的高压蒸汽喷流引起的反冲压力, 该压力在强激光的光斑边缘处, 形成绝热剪切破坏现象。所以材料在高温下的剪切破坏强度值是很有用的。而强激光与材料相互作用时, 引起的剪切破坏现象与常规材料力学参数中的剪切破坏强度有所不同, 而与弹丸侵彻靶板时出现的状态相类似。根据研究工作的需要, 我们对 Ly-12 铝棒材从常温至 400℃ 高温的冲塞剪切破坏强度作了实验测量。为此, 我们将管式高温炉与 Hopkinson 压杆装置结合, 构成实验装置的主体。

## 二、实验装置和原理

实验装置及数据采集和处理系统如图 1 所示。它是由应力波发生器、输入杆、试件、输出杆、收集器、应变片、动态应变仪、数字示波器、磁盘机、PC 机、打印机等组成。

根据 SHPB 装置的原理, 在一维和均匀化假设<sup>[1]</sup>下, 并忽略导杆与试件端面的摩擦效应。当子弹从压气枪以速度  $V^*$  发射出来, 同心地撞击在输入杆上时, 在输入杆中, 便产生一个突跃脉冲应力波  $\phi$ , 自杆的被打击端向另一端传播, 并透射进入与其相连接的试件, 同时在它们的界面  $S_1$  处, 反射一波  $F_0\phi$ 。该透射波  $\phi_0$ , 又经试件与输出杆的界面  $S_2$ , 透射进入输出杆。为计算机处理数据的需要, 在输入杆适当位置<sup>[2]</sup>上, 贴应变片  $g_1$ , 使它分别单独记录应力波  $\phi$  的应变  $\varepsilon_1$  和反射波  $F_0\phi$  的应变  $\varepsilon_2$ 。贴在输出杆适当位置上的应变片  $g_2$ , 记录

• 本工作是由国家高技术计划激光技术领域资助, 也得到国家基金 9187004 部份资助。本文曾在“1991 年激光的热和力学效应学术会议”上宣读。

本文于 1991 年 9 月 2 日收到。

由试件透射进入输出杆的透射波  $\psi_T$  的应变  $\epsilon_r$ 。于是在输入杆与输出杆中, 应力波的应力分别为  $\sigma_i, \sigma_T$ 。

$$\sigma_i = \rho_0 c_0^2 (\epsilon_i + \epsilon_r) \tag{1}$$

$$\sigma_T = \rho_0 c_0^2 \epsilon_r \tag{2}$$

其中  $\rho_0$  和  $c_0$  分别为输入、输出杆材料的密度和声速。

根据弹性波在界面两侧总作用力相等条件<sup>[3]</sup>, 在输入杆与试件(试件的结构见图 2 及下文)、输出杆与试件两端应有

$$\sigma_i A_0 = \sigma'_i A_i, \quad \sigma'_i = (A/A_i) \sigma_i \tag{3}$$

$$\sigma_T A_0 = \sigma'_T A_T, \quad \sigma'_T = (A_0/A_T) \sigma_T \tag{4}$$

其中:  $A_0$  为输入、输出杆的截面积,  $\sigma'_i, A_i$  分别为试件小圆柱上的应力和截面积,  $\sigma'_T, A_T$  分别为试件大圆环上的应力和截面积。

我们的目的是测量试件的冲塞剪切破坏强度, 巧妙地把试件设计成适当的形状, 并把试件两端的压应力转变为在试件某部位的剪应力, 就可以达到我们的测试目的。我们把试件设计成图 2 的形状<sup>[4]</sup>。

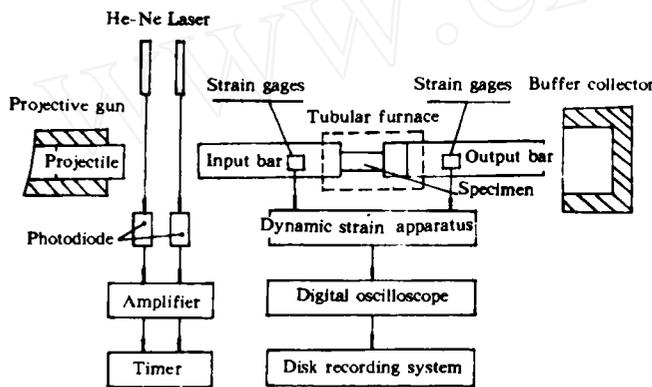


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

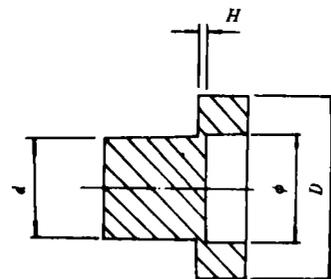


图 2 试件

Fig. 2 Punching specimen

正如在 Hopkinson 压杆装置图上所表示的, 试件的小圆柱与输入杆相连, 大圆环的外径  $D$  与输出杆直径相同, 并与之相连, 它的内径  $\phi$  略大于小圆柱的直径  $d$ 。小圆柱与大圆环同轴, 在它们之间有一个与之同轴的实心的过渡圆柱薄层, 厚(柱高)为  $H$ , 直径也为  $D$ , 剪切就在这个过渡区的小圆柱与大圆环之间的一个高为  $H$  的环形面积上发生。所以该环形面积内的平均剪应力  $\tau(t)$ , 可由试件两端的压应力  $\sigma'_i, \sigma'_T$  导出。在试件的小圆柱端, 剪切面积上的剪力, 由作用力相等条件有

$$\left(\frac{\phi + d}{2} \cdot \pi H\right) \tau_1 = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sigma'_i \tag{5}$$

同理在大圆环端剪力与压应力间有

$$\left(\frac{\phi + d}{2} \cdot \pi H\right) \tau_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - \phi^2) \sigma'_T \tag{6}$$

由剪应力成对条件

$$\tau = \tau_1 = \tau_2 \quad (7)$$

由(2)、(4)、(6)式,或(1)、(3)、(5)式,或者再由(7)式可以导出

$$\tau = \frac{\rho_0 c_0^2 A_0 (D^2 - \phi^2)}{4A_T H \left(\frac{\phi + d}{2}\right)} \cdot \epsilon_i \quad (8)$$

或者

$$\tau = \frac{\rho_0 c_0^2 A_0 d^2}{4A_T H \left(\frac{\phi + d}{2}\right)} \cdot (\epsilon_i + \epsilon_r) \quad (8')$$

或者

$$\tau = \frac{\rho_0 c_0^2 \left[ \frac{A_0}{A_i} \cdot d^2 (\epsilon_i + \epsilon_r) + \frac{A_0}{A_T} (D^2 - \phi^2) \epsilon_i \right]}{8H \left(\frac{\phi + d}{2}\right)} \quad (8'')$$

设试件剪切破坏时的剪应变值由  $\tau_b$  表示。只要取实验中与剪切破坏时所对应的输入杆中的入射和反射应变  $\epsilon_i$ 、 $\epsilon_r$  及输出杆中的透射应变  $\epsilon_t$ , 就可以由(8)式,或(8')、(8'')式求得  $\tau_b$  值。

上述的基本理论,都是在弹性应力波传播基础上的结果。所以,实验中,波在输入、输出杆与试件中的传播,除剪切破坏的局部区域,及剪切破坏的那一瞬间外,均应保持弹性变形。输入、输出杆保持弹性变形容易控制。实验中,关键是控制 Ly-12 铝试件保持弹性变形。因此,在试件内,应满足

$$\begin{cases} \sigma_s \cdot \frac{\pi}{4} d^2 > \tau_b H \cdot \pi \left(\frac{d + \phi}{2}\right) \\ \sigma_s \cdot \frac{\pi}{4} [D^2 - \left(\frac{\phi + d}{2}\right)^2] > \tau_b H \cdot \pi \left(\frac{\phi + d}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

其中  $\sigma_s$  为 Ly-12 铝在实验温度下压缩屈服强度<sup>[2]</sup>,  $\tau_b$  为其相应温度下的剪切破坏强度。所选试件之  $H$ 、 $d$  和  $\phi$  应满足(9)式。同时,一般在设计试件尺寸时,应使小圆柱与大圆环的截面积相等,还要求  $\phi$  与  $d$  的差值尽量小。实验中,与保持试件弹性状态相应的是必须控制弹速。

我们曾经通过实验验证过<sup>[2]</sup>,在 400°C 以内,输入、输出杆,虽处于有温度梯度的情况下,若它们的位移  $U$  的波动方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} = c(T)^2 \frac{\partial \epsilon}{\partial X} + \frac{\epsilon}{\rho(T)} \cdot \frac{\partial E(T)}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial X} \quad (10)$$

用常温下的方程

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \quad (11)$$

代替,因杆上温度差引起的误差是很小的。因为实测结果  $\partial E(T)/\partial T \approx 0$ 。

### 三、一些问题的初步讨论

根据弹性波<sup>[3]</sup>在同种介质及不同介质的变截面杆中的间断面上的透射、反射,以及弹性波的叠加原理,可以导出试件内应力波的传播情况。本实验中,由于试件的间断面比较

多,再加上试件与输入、输出杆的两个界面,波在传播过程中,每遇界面都发生反射和透射,使一波生三波,波的个数成几何级数增加。所以,波的传播变得非常复杂。应力、应变 在试件内达到平衡的过程,也就相当复杂,而且时间较长。为了使实验尽量满足假设条件,这就存在何时发生剪切破坏的问题。通过对波传播情况的分析,可以给出这一时间范围。

入射波  $\psi$  从入射杆与试件的界面  $S_1$ ,透射到试件的小圆柱内,该透射波  $\varphi_0$ ,在小圆柱内往复反射、透射,形成反射波系列: $\varphi_0 F_1, \varphi_0 F_1 F_2, \varphi_0 F_1 F_2 F_3, \dots$ ,这个反射波系列和  $\varphi_0$ ,命名为  $\psi_{20}$ 。它们又通过输入杆与试件的界面  $S_1$ ,透射进入输入杆,形成  $\varphi_0 F_1 T_2, \varphi_0 F_1 F_2 T_4, \varphi_0 F_1 F_2 F_3 T_6, \dots$ 系列,连同  $F_0 \varphi$  命名为  $\psi_{10}$ 。 $\psi_{20}$ 还通过界面  $S_2$ ,透射进入试件的过渡层,形成  $\varphi_0 T_1, \varphi_0 F_1 F_2 T_3, \varphi_0 F_1 F_2 F_3 T_5, \dots$ 系列,命名为  $\psi_{30}$ 。整理它们,有

$$\psi_{10} = F_0 \psi + \psi_{20} T_2 \sum_{n=1}^{\infty} F_1^n F_2^n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

$$\psi_{20} = \varphi_0 (1 + F_1) \sum_{n=0}^{\infty} F_1^n F_2^n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (13)$$

$$\psi_{30} = \varphi_0 T_1 \sum_{n=0}^{\infty} F_1^n F_2^n, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

其中

$$\varphi_0 = \frac{2A_0}{A_1 [1 + (\rho c)_{F_0} \cdot A_0 \div (\rho c)_{A_1} \div A_1]}, \quad F_0 = \frac{1 - (\rho c)_{F_0} \cdot A_0 \div (\rho c)_{A_1} \div A_1}{1 + (\rho c)_{F_0} \cdot A_0 \div (\rho c)_{A_1} \div A_1},$$

$$T_1 = \frac{A_1}{A_0} \cdot \frac{2}{1 + A_1 \div A_0}, \quad T_2 = \frac{A_1}{A_0} \cdot \frac{2}{1 + (\rho c)_{A_1} \cdot A_1 \div (\rho c)_{F_0} \div A_0},$$

$$F_1 = \frac{1 - A_1 \div A_0}{1 + A_1 \div A_0}, \quad F_2 = \frac{1 - (\rho c)_{A_1} \cdot A_1 \div (\rho c)_{F_0} \div A_0}{1 + (\rho c)_{A_1} \cdot A_1 \div (\rho c)_{F_0} \div A_0}$$

$\psi_{30}$ 系列的每个波,又在过渡层内往复反射、透射,它们除在过渡层内形成多个小反射波系列外,还透射进入小圆柱与大圆环,在其中形成多个小透射波系列,及小小反射波系列。如此一直传播开去,形成无穷多个波系列,见图3。我们只讨论几个波系,希望找出它们的共同规律,指导我们的实验工作。

透射进入过渡层的  $\psi_{30}$ 波系的每个波,在过渡层内,往复反射,形成自己的反射波系列,它们叠加后,形成  $\psi_{3r}$ 。

$$\psi_{3r} = \varphi_0 T_1 \sum_{n=0}^{\infty} F_1^n F_2^n \cdot (1 + F_{31}) \cdot \sum_{j=0}^{\infty} F_{31}^j F_{32}^j \quad (15)$$

其中

$$F_{31} = \frac{1 - A_0 \div A_T}{1 + A_0 \div A_T}, \quad F_{32} = \frac{1 - A_0 \div A_1}{1 + A_0 \div A_1}$$

$\psi_{30}$ 波系的每个波,透射进入大圆环,形成  $\psi_{40}$ 波系。 $\psi_{40}$ 的每个波,在大圆环内往复反射,形成  $\psi_{4r}$ 的反射波系列,叠加后,形成  $\psi_{4r}$ 。

$$\psi_{4r} = \varphi_0 T_1 T_{41} \sum_{n=0}^{\infty} F_1^n F_2^n \cdot (1 + F_{41}) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} F_{41}^i F_{42}^i \quad (16)$$

其中

$$T_{41} = \frac{A_0}{A_T} \cdot \frac{2}{1 + A_0 \div A_T}, \quad F_{41} = \frac{1 - (\rho c)_{A_1} \cdot A_T \div (\rho c)_{F_0} \div A_0}{1 + (\rho c)_{A_1} \cdot A_T \div (\rho c)_{F_0} \div A_0},$$

$$F_{42} = \frac{1 - A_T \div A_0}{1 + A_T \div A_0}$$

$\psi_{4e}$  系列波透射进入输出杆, 形成  $\psi_{5e}$  波系.

$$\psi_{5e} = \varphi_0 T_1 T_{41} T_{51} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} F_1^n F_2^n \cdot \sum_{i=0}^{\infty} F_{41}^i F_{42}^i \quad (17)$$

其中

$$T_{51} = \frac{A_T}{A_0} \cdot \frac{2}{1 + (\rho c)_{A1} \cdot A_T \div (\rho c)_{E_0} \div A_0}$$

$\psi_{4e}$  系列波还透射进入过渡层, 形成  $\psi_{3e}$  波系, 它们又在过渡层内往复反射、叠加形成  $\psi_{34e}$  波系:

$$\psi_{34e} = \varphi_0 T_1 T_{41} T_{341} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} F_1^n F_2^n (1 + F_{31}) \cdot \sum_{i=0}^{\infty} F_{31}^i F_{32}^i \cdot F_{41} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} F_{41}^j F_{42}^j \quad (18)$$

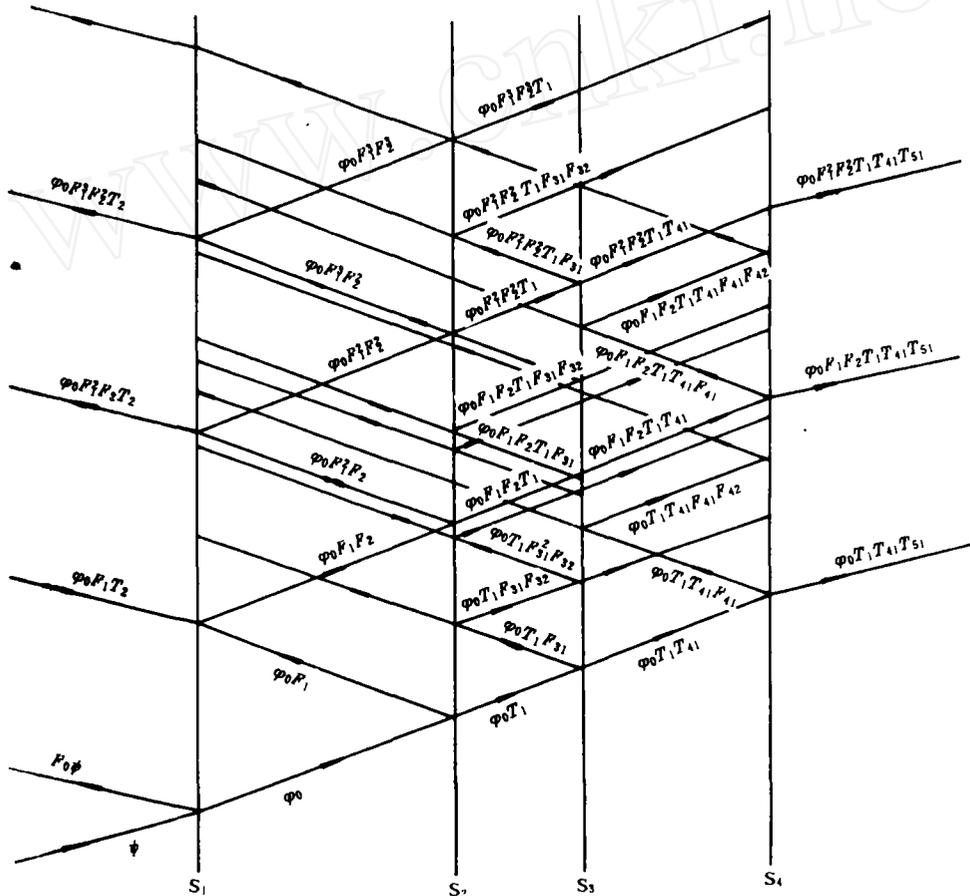


图 3 应力波传播图

Fig. 3 Diagram of wave propagation

其中

$$T_{s41} = \frac{A_r}{A_0} \cdot \frac{2}{1 + A_r \div A_0}$$

在我们的试件情况下,上述各波系,经过数值计算表明,每个波系都是大约经过7~8次反射后,应力趋于平衡。反射波系列相应的透射波大约经过3~4次透射,应力趋于平衡。这时可视为均匀性假定成立。估算时间大约为20 $\mu$ s左右。如果考虑波系在试件各部分之间的传播,这个时间应该还要加长。这个平衡时间,我们取40~50 $\mu$ s以上。这大约是波在全试件内往返7~8次与波在试件最长段往返7~8次的时间之和。这样我们要求在实验中,剪切破坏应在波到达试件后40~50 $\mu$ s后发生,以满足均匀化的要求。又因波在卸载阶段,应力也不均匀,所以,冲剪破坏还要在波卸载之前实现。当然,在实验中,更不允许有二次加载引起的破坏。

我们就是在上述原则下,控制弹速的。弹速的数值估算,可以参照文献[5]的方法及上述有关的公式。

#### 四、实验和结果

本实验中,一个重要问题是弹速的控制,文中已谈了何时剪断问题及试件不能进入压缩塑性问题。我们作从常温到400 $^{\circ}$ C的剪切破坏问题,所以还涉及温度变化,及由此引起的屈服强度变化与弹速关系,剪切环厚度与弹速和温度关系。实验中,这些关系都要处理好。实际上,弹速控制很大成分要靠经验。通过实验我们发现,随着温度升高,除弹速要降低外,相应地剪切环的厚度 $H$ 也要减小。

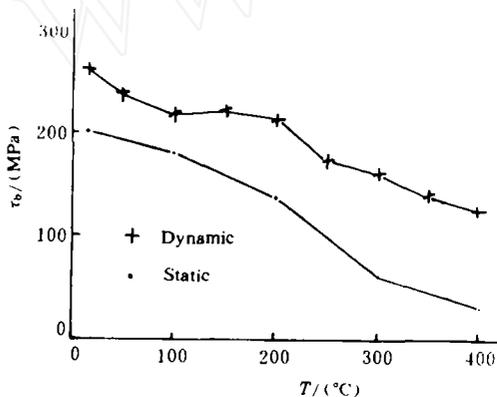


图4 Ly-12 铝动态冲剪剪切破坏强度与其静态值随温度的变化

Fig. 4 Relation between fracture strength and temperature (dynamic and static)

[2]也相仿。实验结果绘在表1,并表示于图4上。测量波形照片见图5。

为了与动态结果比较,我们在 Instran 材料试验机上用同样试件测量了静态冲剪的破坏强度,结果如表2和图4。

从图4可以看出,从常温到400 $^{\circ}$ C, Ly-12 铝的动态剪切破坏强度与静态结果之比为1.3:1~4:1。表明随着温度的升高,动态的强度远大于静态的结果。

关于误差问题。应变片灵敏系数误差1%,动态标定误差2%。数据采集过程中,干扰

剪切环径向尺寸厚度 $\delta$ (即 $(\phi-d)/2$ )值,也是需要注意的。从理论上要求 $\delta$ 越小越好。但实际上太小了是不现实的。我们最后取值一般是 $\delta=0.15$ mm。由此引起断口呈锥形。在处理数据时,需考虑这一因素。

实验中,还有一个重要环节要注意,即在升温过程中,升温速率尽量控制一致,大约为8 $^{\circ}$ C/min,以保证试件加温历史一致。总的升温过程与文献[2]一致。

实验过程的其它环节及数据处理与文献

信号引起的误差约 2%，导杆温度梯度引起的误差 2.5%。断口锥角及断口面积引起的误差约为 4%。总误差大约为 6%。

我们在电子显微镜上对断口进行了观察。发现常温下实验的断口结瘤成分多一些，而高温下实验的断口，初窝结构多一些。两种情况下的照片见图 5。

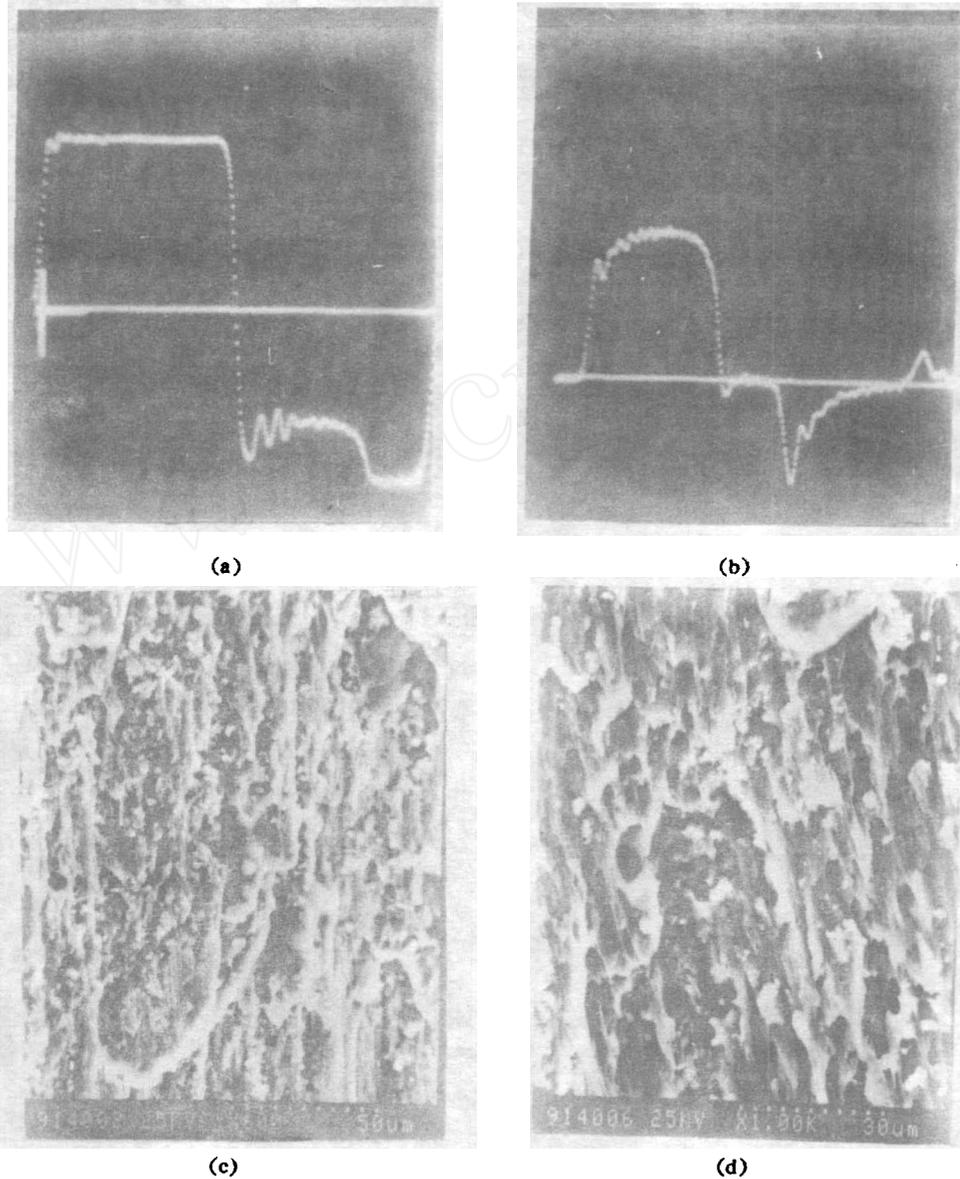


图 5 Ly-12 铝冲塞剪切破坏断口形貌与测量波形照片  
(a)输入杆中入射波和反射波, (b)输出杆中透射波,  
(c)常温下断口, (d)350℃下断口

Fig. 5 Photo of recorded wave and fractography

(a) Incident and reflected wave in the input bar, (b) Transmitted wave in the output bar,  
(c) Fractography under room temperature, (d) Fractography under 350℃

表1 Ly-12 铝动态冲塞剪切破坏强度

Table 1 The punching shear fracture strength of Ly-12 aluminium alloy (dynamic)

Temperature/(°C)	15	50	100	150	200	250	300	350	400
$\tau_b$ /(MPa)	263	238	219	222	215	173	162	140	124
$\tau_b$ /(kgf/mm <sup>2</sup> )	26.9	24.3	22.3	22.6	21.9	17.6	16.5	14.3	12.7

表2 Ly-12 铝静态压剪破坏强度

Table 2 The static shear fracture strength of Ly-12 aluminium alloy

Temperature/(°C)	16	100	200	300	400
$\tau_b$ /(MPa)	203.3	181.0	136.5	60.5	29.5
$\tau_b$ /(kgf/mm <sup>2</sup> )	20.8	18.5	13.9	6.18	3.01

参加实验的还有韩庆生同志。作者感谢田兰桥工程师的合作,感谢段祝平教授的指导。

## 参 考 文 献

- [1] 段祝平,等.力学进展,1980,10(1):1  
 [2] 王春奎,刘小苹,郑融.强激光与粒子束,1991,3(1):57  
 [3] 王礼立编著.应力波基础.第三章.北京,国防工业出版社,1985  
 [4] 白以龙,田兰桥.三种钢材抗冲孔力学性能参数的实验研究(内部合同报告)  
 [5] 王春奎,刘小苹.高压物理学报,1991,5(1):27

## DYNAMIC PROPERTIES OF Ly-12 ALUMINIUM ALLOY — ITS PUNCHING SHEAR FRACTURE STRENGTH AT HIGH TEMPERATURES

Wang Chunkui, Liu Xiaoping, Zheng Rong

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080)

**ABSTRACT** This paper describes the measurements of the punching shear fracture strength of Ly-12 aluminium alloy from room temperature to 400°C, and the static shear strength in the same temperature range. The ratio of the dynamic punching shear to the static is about 1.3 : 1 at room temperature to 4 : 1 at 400°C. It shows that the high temperature dynamic strength is considerably higher than that of static.

**KEY WORDS** Ly-12 aluminium alloy, high temperature, punching shear fracture strength.