

# LF-6及LY-12铝高温凝聚态动力学 性质研究——高温剪切模量的测量

王春奎

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 介绍 LF-6及 LY-12铝合金从常温到400℃高温下,在扭转 Hopkinson 杆上作的动态剪切模量的测试研究,并给出了相应温度范围 LF-6铝杨氏模量及泊松比。它们和现有文献中的静态结果比较表明,动态性能普遍高于静态值,在高温下更显著。实验结果表明 LF-6和 LY-12铝合金,对于温度和加载率都是敏感的,高加载率下相对于静态的温度,敏感性要弱一些。文中给出了剪切模量、弹性模量等与温度的关系式。

**关键词** LF-6铝合金 LY-12铝合金 高温 Hopkinson 扭杆 剪切模量 泊松比

## 1 引言

剪切模量在材料的基本参数中与弹性模量一样,占有重要地位。

人们早已发现很多材料的静、动态力学性能不同,有的差异还很大<sup>[1]</sup>。近年来不少部门越来越感到材料动态性能的重要性,但有关的资料却不多。LF-6及 LY-12铝合金由于它们具有比重小和强度高的特点,故是航空、航天和大军工部门的常用材料。但是,他们的动态性能,特别是高温下的动态性能,如剪切模量、弹性模量等,也很少有报导。在“中国航空材料手册”<sup>[2]</sup>这一大型综合性实用工具书中,有关资料也不够全面。开展他们的动力学性能参数测量,提供一些实用数据,有其实际意义。本文将提供在 Hopkinson 扭杆装置上获得两种合金的有关参数。

## 2 实验装置及原理

实验是在 Hopkinson 扭杆装置上进行的, Hopkinson 扭杆装置可参看文献[3],我们实验用的装置简图如图1。它主要由加载臂、旋转头、输入杆、应变花、可移动卡头、聚四氟支承环、试件、高温炉和调温平衡杆等组成。其中可移动卡头上的主要零件——扭矩存储、释放螺栓,应该用脆性好的材料制作,以便得到快速的波形上升沿,我们是利用标准件 M10×65的螺栓制作的。在螺栓的光杆部分的适当位置上,利用车床车出一个60°×2的三角形环形槽。所谓适当的位置,就是在卡头上,利用该螺栓卡紧扭杆时,该环形槽恰在卡头两个卡件的中间位置上。

1993年10月25日收到原稿,1994年1月17日收到修改稿。

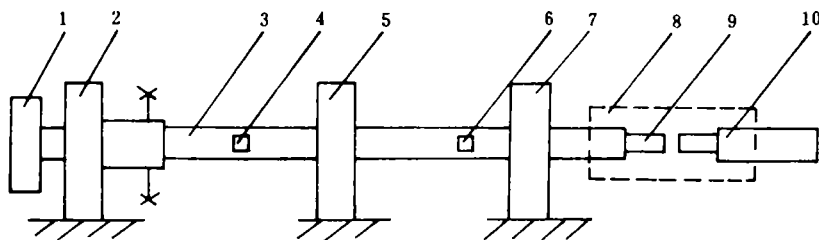


图 1 实验装置——扭转 Hopkinson 杆简图

1. 加载臂, 2. 旋转头, 3. 输入杆, 4, 6. 应变花, 5. 可移动卡头, 7. 聚四氟支承环, 8. 高温炉, 9. 试件, 10. 调温度平衡杆

Fig. 1 Schematic diagram of a torsional Hopkinson-bar apparatus

1. Torquer, 2. Rotating head, 3. Input bar, 4, 6. Gauges, 5. Clamp, 7. Teflon bearing ring, 8. Tubular furnace, 9. Specimen, 10. Equalizing bar for temperature control

实验时, 首先利用卡头卡紧扭杆的输入杆, 之后利用加载臂对旋转头与卡头间的输入杆部分预加扭矩, 所加扭矩的大小通过应变花 4, 利用静态应变仪测量, 然后再继续扭紧释放螺栓, 直至螺栓从环形槽处被拉断为止。这时预加扭矩从卡头释放, 所存势能以扭转波的形式, 从卡头通过输入杆的没有被预加载的部分向试件方向传播。该波  $\omega_0$  传播到扭杆与试件的分界面  $s_1$  时, 因出现截面的突变, 波  $\omega_0$  受广义波阻抗支配<sup>[4]</sup>, 发生反射和透射。反射波  $\omega_{r0}$  逆着  $\omega_0$  的方向传播, 透射波  $\omega_{t0}$  进入试件, 向试件的另一端传播。当它到达试件的另一端面  $s_2$  时, 发生全反射。当该反射波  $\omega_{r1}$  返回到  $s_1$  界面时, 又发生反射和透射。透射波  $\omega_{t1}$  进入输入杆, 向输入杆的另一端传去。反射波  $\omega_{r2}$  又传回试件内, …… , 应变花 6 依次接收到波  $\omega_0, \omega_{r0}, \omega_{t1}, \dots$ 。从行波图图 2, 可以看到从  $\omega_{r0}$  的起点到  $\omega_{t1}$  的起点之间的时间间隔, 恰是扭转波通过两倍的试件长度  $l(T)$  所需的时间  $t$ , 该时间间隔可以从数字示波器记录的波形图上测量得到。 $l(T)$  可以由常温的测量值  $l_0$  与其线膨胀系数  $\alpha$  值来计算, 即  $l(T) = l_0 e^{\alpha(T-T_0)}$ 。于是在试件中扭转波的波速, 即横波波速  $c_T(T)$  为

$$c_T(T) = \frac{2l(T)}{t} \tag{1}$$

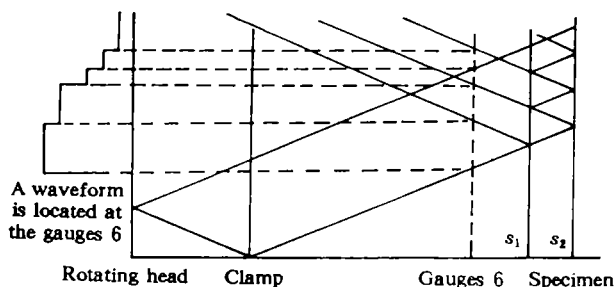


图 2 Hopkinson 扭杆及试件上的行波图

Fig. 2 Characteristic diagram of the elastic wave front on torsional Hopkinson bar and the specimen

必须指出, 上述的原理是属于输入杆及试件均处于同一温度情况下才是正确的。本实验中, 试件在高温炉内处于恒定的相同温度下, 应力波特征线是直线。但输入杆则一部分在炉内, 一部分在炉外, 因而杆上存在温度梯度, 弹性应力波的特征线是曲线。但是, 由于杆上的温度场是恒定的, 所以, 不论输入杆中的应力波特征

线随温度如何变化,应力波在应变花 6 与界面  $s_1$  间往返的时间是相同的。由于往返时间相同,所以这部分的传播时间完全相消,这样对上边的分析结果就没有影响了。由于试件在炉子内,且整个试件处于恒定的相同温度场下,则由(1)式所得波速,即为试件在该恒定温度下的横波波速了。

有了试件的横波波速  $c_T(T)$ ,则其剪切模量  $G(T)$ 为:

$$G(T) = \rho(T) \cdot c_T^2(T) = \rho_0 e^{3\alpha(T_0 - T)} \cdot c_T^2(T) \quad (2)$$

其中线膨胀系数  $\alpha$  及常温密度  $\rho_0$  可由文献[2]得到。LF-6 及 LY-12 铝合金的剪切模量就是这样测定的。

这里还要指出,剪切模量是材料在弹性变形下的参数值。测量材料的剪切模量,应保证材料处于弹性限以内。为确保这一条件,可以预估所加扭矩的大小,以便控制有据。因为波导杆在传递扭矩时,外径处剪应力为最大,只要保证最大应力不超过材料的比例极限,就可以确保测量条件。从实心圆杆在弹性范围内受单一扭转作用的基本假设<sup>[5]</sup>可直接得到

$$\tau_{\max} = M \cdot R/J \quad (3)$$

其中  $\tau_{\max}$  为杆的表面处所受最大剪切应力,  $M$  为与扭矩平衡的抵抗力矩,  $R$  为杆的半径,  $J$  为极惯性矩。将  $J = (\pi/2)R^4$  代入(3)式,有

$$M = \tau_{\max} \cdot \frac{\pi R^3}{2} \quad (4)$$

若  $M$  为波导杆传递的最大扭矩,  $\tau_{0.2}$  为杆材料的弹性极限对应的最大扭应力,则扭杆保持弹性限的条件是

$$\tau_{\max} \leq \tau_{0.2} \quad (5)$$

所以对杆施加的预扭矩  $M_0$  必须保持

$$M_0 \leq M = \tau_{0.2} \cdot \frac{\pi R^3}{2} \quad (6)$$

为安全保险,上式中  $\tau_{0.2}$  可取其值的一半或更小。于是  $M_0$  的最大值界限可以估算,并可利用此值与加载臂的长度,算出在加载臂上可以允许施加的最大力为多少,不超过弹性限的要求就可实现了。

为验证其效果,可在杆或试件的表面沿轴向刻线,实验过后观察有无扭曲变形现象。

扭转 Hopkinson 杆预加扭矩的存储与释放的关键环节是卡头上的存储释放螺栓。有关其选材问题,前边已经谈了,这里指出在实验中的正确操作方法。操作不当会使预加扭矩慢慢释放,造成实验失败。我们的经验是,当预扭矩一旦存储,则对该螺栓只能继续拧紧直至拉断,不能在已经存储了扭矩后,再对其锯预备断口等操作。如果螺栓上的预开环形槽深度不够,想用锯缺口的办法补救或者为了其它目的,必须锯缺口时,可以在未加预扭矩之前实施。

应变花 6 的贴片位置,应根据行波图图 2 合理确定,要保证所得波形容易分辨出  $\omega_{r0}$  与  $\omega_{r1}$  的起点,即在波形上要有显著的跳变,又不与其它的波形跳变混杂。这要综合考虑截面比的大小、试件长度、可移动卡头的位置及应变花 6 的位置等因素。

为了测量 LF-6 铝的弹性模量,我们采用了 SHPB 装置,装置的详情请参阅[6]。和上

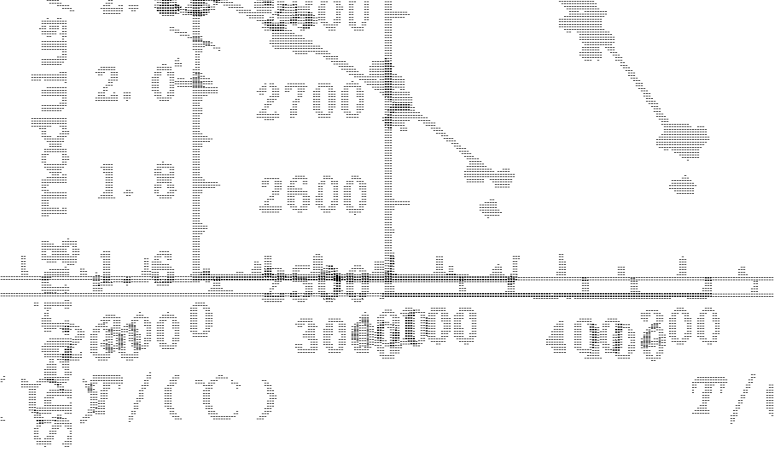


Figure 1. The relationship between the storage modulus ( $E'$ ) and temperature ( $T$ ) for a material.

Figure 1. The relationship between the storage modulus ( $E'$ ) and temperature ( $T$ ) for a material.

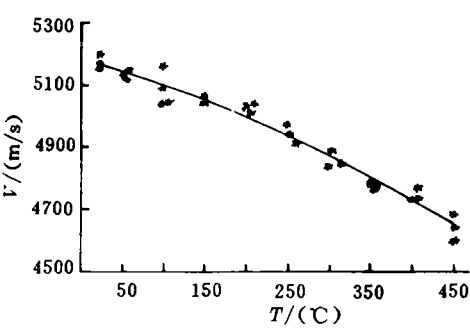


图 6 LF-6 铝合金纵波波速与温度的关系  
Fig. 6 The velocity of elastic longitudinal wave with temperature relation of LF-6 aluminium alloy

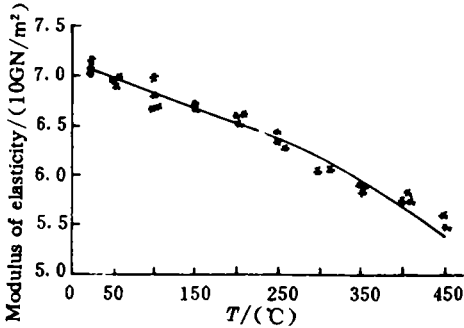


图 7 LF-6 铝合金弹性模量与温度的关系  
Fig. 7 The modulus of elasticity with temperature relation of LF-6 aluminium alloy

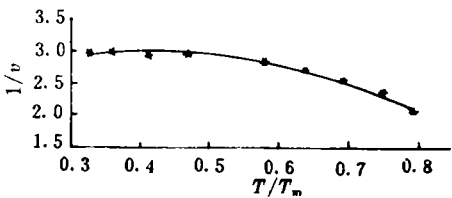


图 8 LF-6 铝合金泊松比的倒数与温度的关系  
Fig. 8 Reciprocal poissons ratio of LF-6 aluminium alloy versus  $T/T_m$

表 1 LF-6 铝合金在各种温度下的横波、纵波声速、剪切模量、弹性模量和泊松比

Table 1  $c_T(T), c_L(T), G(T), E(T), \nu$  of LF-6 aluminium alloy at various temperatures

$T/(^{\circ}\text{C})$	$c_T(T)/(\text{m/s})$	$c_L(T)/(\text{m/s})$	$G(T)/(10\text{GN/m}^2)$	$E(T)/(10\text{GN/m}^2)$	$\nu$
20	3168	5180	2.650	7.084	0.337
50	3152	5150	2.617	6.986	0.335
100	3120	5101	2.554	6.829	0.337
150	3090	5052	2.497	6.673	0.337
200	3057	5004	2.434	6.523	0.340
250	3011	4950	2.352	6.356	0.351
300	2956	4888	2.258	6.174	0.367
350	2880	4809	2.133	5.948	0.394
400	2785	4710	1.986	5.681	0.430
440	2675	4615	1.826	5.435	0.488
450		4590		5.374	

横波波速与温度的关系

$$c_T(T) = 3155 + 2.701 \times 10^{-2}T - 2.439 \times 10^{-3}T^2 \quad (\text{m/s}) \tag{10}$$

其中  $T$  为摄氏温度值。

剪切模量与温度的关系

$$G(T) = 2.64 - 3.323 \times 10^{-4}T - 3.324 \times 10^{-6}T^2 \quad (10\text{GN/m}^2) \tag{11}$$

其中  $T$  为摄氏温度值。

(11)式也可用下式表达

$$G(T) = 2.65 \times \{1 - T/910 \exp[4.21(T/910 - 1)]\} \quad (10\text{GN/m}^2) \quad (11')$$

上式中  $T$  为绝对温度值。

纵波波速与温度的关系

$$c_L(T) = 5176 - 0.4535T - 1.83 \times 10^{-3}T^2 \quad (\text{m/s}) \quad (12)$$

其中  $T$  为摄氏温度值。

弹性模量与温度的关系

$$E(T) = 7.092 - 1.96 \times 10^{-3}T - 4.017 \times 10^{-6}T^2 \quad (10\text{GN/m}^2) \quad (13)$$

其中  $T$  为摄氏温度值。

弹性模量与温度的关系也可用下式表示：

$$E(T) = 7.084 \times \{1 - T/1000 \exp[3.8(T/1000 - 1)]\} \quad (10\text{GN/m}^2) \quad (13')$$

(13')中  $T$  为绝对温度值。

泊松比的倒数与温度的关系

$$1/\nu = 1.79 + 5.76 \times (T/900) - 6.79 \times (T/900)^2 \quad (14)$$

其中  $T$  为绝对温度值。

LY-12 铝合金横波波速及剪切模量等的数据如表 2 所示。图 9 和图 10 分别是横波波速与温度的关系以及剪切模量与温度的关系曲线图。由表 2 的数据拟合的横波波速与温度的关系式为

$$c_T(T) = 3104 - 0.252T - 2.194 \times 10^{-3}T^2 \quad (\text{m/s}) \quad (15)$$

其中  $T$  为摄氏温度值。

表 2 LY-12 铝合金在各种温度下的横波波速及剪切模量  
Table 2  $c_T(T), G(T)$  of LY-12 aluminium alloy at various temperatures

$T/(^{\circ}\text{C})$	$c_T(T)/(\text{m/s})$	$G(T)/(10\text{GN/m}^2)$
20	3107	2.703
50	3082	2.654
100	3052	2.596
150	3011	2.515
200	2968	2.435
250	2907	2.326
300	2837	2.208
350	2752	2.068
400	2646	1.904

其剪切模量与温度的关系拟合式为

$$G(T) = 2.709 - 7.8 \times 10^{-4}T - 3.035 \times 10^{-6}T^2 \quad (10\text{GN/m}^2) \quad (16)$$

其中  $T$  为摄氏温度值。

上式也可用下式表达

$$G(T) = 2.703 \times \{1 - T/910 \exp[3.55(T/910 - 1)]\} \quad (10\text{GN/m}^2) \quad (16')$$

其中  $T$  为绝对温度值。

拟合式(10)~(16)是以实验数据为基础的,只能在实验的温度范围内才是有效的。

总结上述结果,并与现有文献[2]比较说明,动态相对于静态对于温度的敏感性弱一

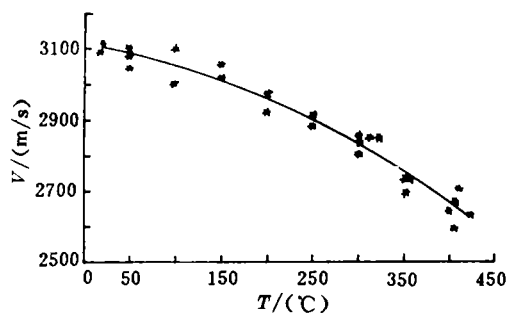


图9 LY-12 铝合金横波波速与温度的关系

Fig. 9 The velocity of elastic transverse wave with temperature relation of LY-12 aluminium alloy

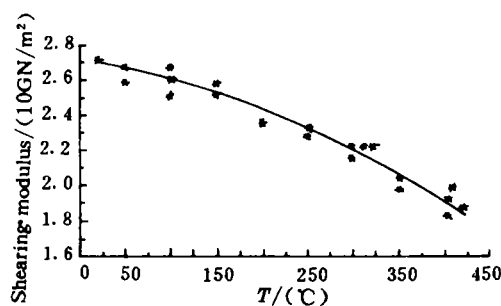


图10 LY-12 铝合金剪切模量与温度的关系

Fig. 10 The shearing modulus with temperature relation of LY-12 aluminium Alloy

些, LF-6 铝合金的弹性模量与 LY-12 铝合金的剪切模量均如此。它们有:  $|dE(T)/dT|_{\text{静}} > |dE(T)/dT|_{\text{动}}$ ,  $|dG(T)/dT|_{\text{静}} > |dG(T)/dT|_{\text{动}}$ 。另一特点是动态性能高于静态的结果, 而且是温度越高越显著。LF-6 和 LY-12 铝合金对于温度和加载率都是敏感的。

参加实验工作的还有郑融、郑坚等, 作者感谢段祝平教授的指导。

### 参 考 文 献

- 1 白以龙, 等. 力学情报, 1979, (2): 5
- 2 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册, 第3版. 北京: 中国标准出版社, 1989
- 3 Lewis J L, Campbell J D. Exp Mech, 1972, 12: 520
- 4 王礼立编著. 应力波基础. 北京: 国防工业出版社, 1985
- 5 [美]波波夫著. 王士耕, 等译. 固体力学引论. 第5章. 北京: 人民邮电出版社, 1985
- 6 王春奎, 刘小苹. 高压物理学报, 1991, 5(1): 27

## DYNAMIC PROPERTIES OF LF-6 AND LY-12 ALUMINIUM ALLOY UNDER HIGH TEMPERATURE

### —HIGH TEMPERATURE SHEARING MODULUS MEASUREMENTS

Wang Chunkui

(Institute of Mechanics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**ABSTRACT** Investigations of high temperature shearing modulus with the torsional Hopkinson bar method, of LF-6 and LY-12 aluminium alloy at temperatures up to 440°C, is introduced, elastic modulus and Poisson ratio of LF-6 aluminium alloy are reported. Results show that these dynamic properties, especially at high temperatures, are generally higher than their static ones. LF-6 and LY-12 aluminium alloy are sensitive to both temperature and loading rates, but their sensitivity to temperature at high strain rates is less than that in static loading rate. In this paper relations of the shearing modulus and elastic modulus with temperature are given.

**KEY WORDS** torsional Hopkinson bar, high temperature shearing modulus, Poisson ratio.