

LY-12 铝高温屈服强度的测量

王春奎 刘小苹 郑融

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文介绍 LY-12 铝合金在常温至 400 °C 动载下(应变率为 10^3 /秒), 屈服强度的测试及研究。采用一维 Hopkinson 压杆实验装置及管式高温炉。利用一维应力波传播理论及应变片直接测量两种方法, 得到了 LY-12 铝合金的屈服强度随温度变化的曲线。

关键词 Hopkinson 压杆 高温动态力学性能 LY-12 铝合金 高温动态屈服强度

一、前言

强激光束辐照在物质上, 会产生各种各样的现象。与激光破坏机理有关的问题中, 占重要地位的有激光热效应和冲击效应。所以, 物质在高温下的动态力学性质学科, 是开展激光破坏机理工作不可缺少的知识。因此, 目前在我们国家自己的材料高温动态力学性能参数不多的情况下, 材料高温屈服强度的测定工作也就是很有意义的了。

通常最简单的方法, 是在试件上直接粘贴高温应变片进行测定。但目前, 适用于各种材料的高温应变片十分缺乏, 甚至没有。因此, 该法有一定的局限性。在这种情况下, 我们认为, 如果能够通过间接的方法, 也就是借助于材料动态力学性能有关的规律, 将高温应变片上的信息, 转化到常温应变片上进行采集, 再通过理论计算转换为所需的结果, 那将是很有意义的。这样, 由于革除了高温应变片, 使实验工作简化了。更重要的是可以测量更高温度范围材料的屈服强度, 以及其他的动态力学性能。

二、实验装置和原理

实验装置如图 1 所示。它是由应力脉冲产生系统, 输入、输出杆, 试件, 高温炉和测量系统组成。应力脉冲产生系统, 实质上是一个气动发射枪。它由气路控制系统、压气室, 枪膛及子弹组成。子弹的速度决定于压气室的气体压力, 及子弹在枪膛内的位置。输入、输出杆, 试件和高温炉是实验的核心部分。测量系统是由应变片, 动态应变仪和存储数字示波器组成的。

以速度 V_p 从枪膛射出的子弹, 同心地撞击在输入杆上。在输入杆产生一个平面应力脉冲波, 由近及远的传播过去。如图 2 所示, 当波 ψ 传到输入杆与试件的界面 S_1 时, 发生反射与透射。反射波 ψ_R 沿输入杆回传; 透射波 ψ_0 在试件内向前传, 当它传到试件与输出杆的界面 S_2 时波 ψ_0 又发生反射和透射, 透射波 $T_1\psi_0$ 沿输出杆向前传。反射波 $F_1\psi_0$ 回传, 到界面 S_1 又发生反射和透射, 形成波 $F_1F_2\psi_0$ 和 $T_2F_1\psi_0$ 。反射波将在试件内往复下去, 每遇界

1990年6月7日收到来稿, 1990年7月3日收到改稿。

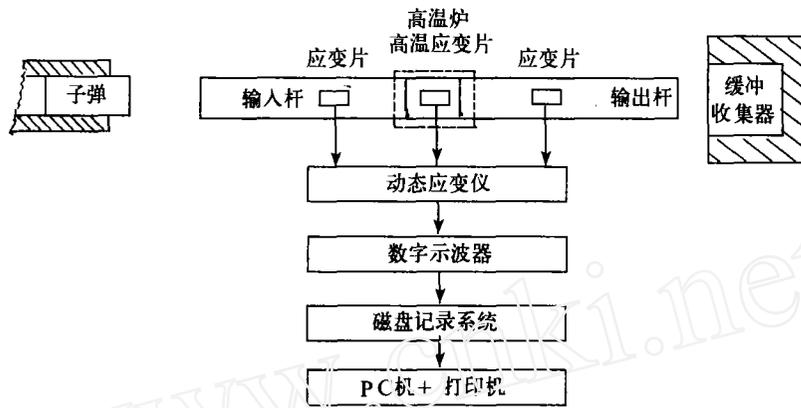


图 1 实验装置示意图

面都发生反射和透射，形成新的波。

当 ψ_0 在试件内进行 n 次反射和透射，在输入杆内沿入射波反方面传播的波 ψ_1 为：

$$\psi_1 = F_0\psi + F_1T_2\psi_0 + F_1F_2F_3T_4\psi_0 + \dots + F_1F_2F_3 \dots F_nT_{n+1}\psi_0 \quad (1)$$

式中 n 为奇数。

在试件中，总叠加波为：

$$\psi_2 = \psi_0 + F_1\psi_0 + F_1F_2\psi_0 + F_1F_2F_3\psi_0 + \dots + F_1F_2F_3 \dots F_n\psi_0 \quad (2)$$

式中 n 为自然数。

在输出杆上的透射波叠加为：

$$\psi_3 = T_1\psi_0 + F_1F_2T_3\psi_0 + F_1F_2F_3F_4T_5\psi_0 + \dots + F_1F_2F_3 \dots F_nT_{n+1}\psi_0 \quad (3)$$

式中 n 为偶数。

(1)，(2)，(3) 式中 F_i 和 T_i 分别是第 i 次的反射系数和透射系数。

当 ψ_1, ψ_2, ψ_3 是弹性波时， $F_i = F_{i+1}, T_i = T_{i+1}$

$$F_i = \frac{1-\eta}{1+\eta}, \quad T_i = \frac{2}{1+\eta}$$

其中 $\eta = \frac{(\rho c)_{Al}}{(\rho c)_{Fe}}$ 。 ψ_0 是波 ψ 从钢到 LY-12 铝的透射波。 $F_0\psi$ 是反射波，

$$F_0 = \frac{1 - \frac{1}{\eta}}{1 + \frac{1}{\eta}}, \text{ 与其他 } F_i (i \neq 0) \text{ 不同。由此可以导出 } \psi_0 = \eta T \psi。$$

由(2)式的计算表明，应力波 ψ_2 在试件内每反射一次，应力增加一次。所以应力脉冲在试件内多次反射，应力不断增加，变形也就不断增加。当应力脉冲足够强时，试件产生塑性变形。借助于试件上的应变片，测量得到试件的 $\varepsilon(t) \sim t$ 曲线(实际上也反映了应变对应力的

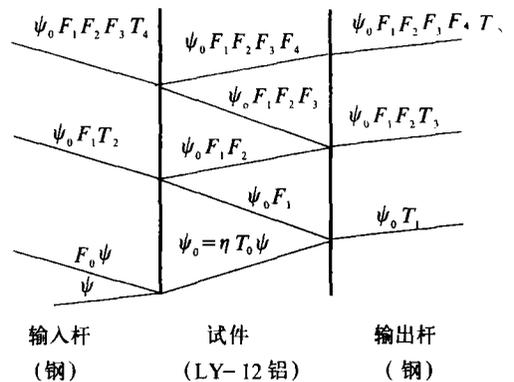


图 2 输入、输出杆及试件内波的传播图

关系)。从曲线上就可以找到试件的屈服点。特别当子弹速度控制适当时, 屈服滞后效应明显, 在 $\varepsilon(t) \sim t$ 曲线上, 屈服点特征突出, 非常直观, 很容易读出该点的应变值 $\varepsilon(t)$ 。对应的屈服应力由下式决定:

$$\sigma_y = E(T)\varepsilon(T) = \rho(T)C(T)^2 \cdot \varepsilon(t) \quad (4)$$

其中 $E(T)$ 为试件的弹性模量。 $E(T)$ 值由文献[4] 得到, 由此可以得到屈服应力。

我们再分析(2)和(3)式。只要注意到反射系数 F 和透射系数 T 之间有如下关系: $1 + F = T$, 就可以发现波 ψ_2 , 每到偶数个波叠加时, 也就是第 $2n$ 个波从输出杆反射回来, 直到第 $2n + 1$ 个波从输入杆反射回来止, $\psi_2 = \psi_3$ 。另外, 当试件是 LY-12 铝, 输入、输出杆是钢时, 波在试件内往复五、六次后, $\psi_2 \approx \psi_3$ 。所以, 当适当的把试件做得短一些时, 波传入试件后, 很快就可以认为 $\psi_2 \approx \psi_3$, 而且误差可以很小, 如第五次反射后, 最大误差小于 0.7%。

与分析(2)和(3)式关系一样, 我们分析(2)式和 $(\psi_1 - \psi)$ 。除注意 $1 + F = T$ 外, 有 $1 - F = \eta T$ 。可以发现, ψ_2 的前奇次项之和与对应的输入杆上的透射波的 $(\psi_1 + \psi)$ 相等, 条件是试件中的波自输入杆界面的 S_1 反射回来开始, 到该波传到试件与输出杆的界面 S_2 为止。同样, 波在试件内往复反射五、六次后, $\psi_2 = \psi_1 + \psi$ 。

由以上分析可以看到, 当试件相当短时, 弹塑性波在试件内, 来回反射几次时间很短, 但却使试件内两端面的应力达到了平衡。而且试件内的应力变化也已经很小, 且越来越小。所以我们可以假定: 应力和应变在试件内是均匀分布的。而且杆中传播的应力波也是一维的。如果忽略试件和导杆界面上的摩擦。我们便可以得到试样的平均应力和平均应变如下:

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \frac{A_0}{A_s} (\sigma_{s1} + \sigma_{s2}) = \frac{E}{2} \frac{A_0}{A_s} [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_R(t) + \varepsilon_T(t)] \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{U_{s1} - U_{s2}}{L_s} = \frac{C}{L_s} \int_0^t [\varepsilon_1(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)] dt \quad (6)$$

其中 C, E, A_0 是输入、输出杆的弹性声速, 弹性模量和截面积; L_s, A_s 是试件的长度和截面积, $\varepsilon_1(t), \varepsilon_R(t), \varepsilon_T(t)$ 分别是入射波、反射波和透射波在输入、输出杆上的应变。 $\varepsilon_1(t)$ 和 $\varepsilon_R(t)$ 可以由贴在输入杆上, 适当位置的应变片测量得到。 $\varepsilon_T(t)$ 可以由贴在输出杆上的适当位置的应变片测量得到。这样试件的平均应力应变关系曲线, 就可以得到了。从曲线上可以找出屈服点。于是屈服应力也就得到了。

但是, 必须注意, 上述关系式是输入输出杆及试件均在同一温度下时, 才成立的。我们测量的是高温下试件的屈服应力, 在实验测量中, 试件虽然恒温在某一高温下, 但输入输出杆则处于一个有温度梯度的环境中。因而, 输入输出杆的弹性模量是温度的函数, 变为 $E(T)$, 而温度是随杆的坐标变化的。因而位移 U 的波动方程:

$$\frac{\partial U^2}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (7)$$

需要重新导出。由材料在弹性范围内的本构关系:

$$\sigma = E(T) \cdot \varepsilon \quad (8)$$

及运动方程:

$$\rho(T) \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (9)$$

得:

$$\rho(T) \frac{\partial V}{\partial t} = E(T) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial E(T)}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = C(T)^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\varepsilon}{\rho(T)} \cdot \frac{\partial E(T)}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (10)$$

(7)式与(10)式相比, (10)式多了一项。因而由波动方程(10), 导不出,

$$dV = \pm C d\varepsilon \quad (11)$$

通过方程(11)导出的方程(6), 对于方程(10)中之 U 不再成立。需要测出 $E(T) \sim T$ 及温度沿输入输出杆的分布函数, 再对(10)式求解, 才能得到界面 S_1, S_2 处之 U_{s1}, U_{s2} 。才能得到所需的高温下的屈服应力。

三、辅助实验和结论

输入输出杆温度分布的测量: 实验中输入输出杆的一端插入高温炉内, 与试件连接, 另一端在炉外的常温环境中, 因而沿杆有温度分布, 特别在炉口处温差很大。输入与输出杆对炉子是对称安装的, 所以温度分布也是对称的。(参见图1)只要测出其中一个杆的温度分布, 另一个也就知道了。为此, 我们采用十多对热电偶, 沿输入杆合理布置测点。分别测量了实验中使用温度下沿杆的温度分布。并得到了温度实验测量值的拟合公式:

$$T = T_0 \cdot e^{-ax^2} + 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

式中 $a = 3.7809 \times 10^{-3} / \text{cm}^2$ 。在各种温度下, T_0 值如表1所示:

表 1

实验温度:	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C
T_0	35 °C	85 °C	130 °C	175 °C	220 °C	265 °C	310 °C	355 °C

x 的坐标原点取在炉内的输入杆与试件的连接点处。

输入和输出杆材料在各种温度下的声速测量, 测量的实验装置与图1相似, 差别是输出杆与试件不连接, 弹长也不一样。具体情况详述如下:

试件做成比输入杆细一点的, 与输入杆同样材料的, 并做与输入输出杆同样热处理的杆, 杆长做成300mm左右。将试件与输入杆同心地安装在高温炉内。使试件在实验的温度下, 保持恒温。输出杆也保持与试件同轴, 但不连接, 作吸收杆用, 在输入杆的适当位置上贴应变片。用200mm长的弹冲击输入杆, 控制弹速使试件在弹性范围内。记录从试件两个端面返回的一系列信号。从数字示波器读出几个脉冲间隔之间的时间间隔。此时间间隔就是波通过几倍试件长所需的时间。由此得到相应温度下的试件的声速。我们首先测量了常温和400 °C下输入输出杆上的声速, 结果如下:

常温声速 : 5149.8m/s

400 °C 下声速: 5122.3m/s

测量结果有五位有效数字, 精度相当高。

分析此结果我们认为: 结果准确可靠。由此结果说明在 400 °C 以内, 输入输出杆材料的声速随温度的变化十分小。在近 400 °C 的温差下, 声速仅下降了 0.5%。其他温度下的声速可以不再测量了。并且我们可以假设, 在该温度范围内, 声速随温度是线性下降的, 则:

$$C = C_0(1 - \alpha T) \quad (12)$$

其中: $\alpha = 1.3 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

我们查阅输入输出杆材料 40Gr 钢^[5]的膨胀系数, 在 20 °C ~ 400 °C 时, $\beta = 1.39 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。则:

$$E(T) = \rho(T)C(T)^2 = \rho_0 C_0^2 \times (1 - \alpha T)^2 \times e^{-3\beta \Delta T} \quad (13)$$

将 $\alpha = 1.3 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $\beta = 1.39 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, $T = 400 ^\circ\text{C}$, $\Delta T = 385 ^\circ\text{C}$ 代入 (13) 式, 则:

$$E(T) / E_0 = 0.974$$

可见, 输入输出杆的弹性模量随温度的变化在 400 °C 以内是十分小的。而且, 在我们的实验中, 输入输出杆达到 400 °C 仅是一个小的局部区域。因此, 我们假定 (10) 式中 $E(T) = E_0$, 因此, $\partial E(T) / \partial T = 0$ 。这样做引起的误差也是小的。在这一假设下, (10) 式变成了 (7) 式。所以, 在我们的实验温度范围内, (6) 式也就成立了。用 (5) 式, (6) 式作为间接法求解试件的平均应力应变关系也就有了理论和实验基础。

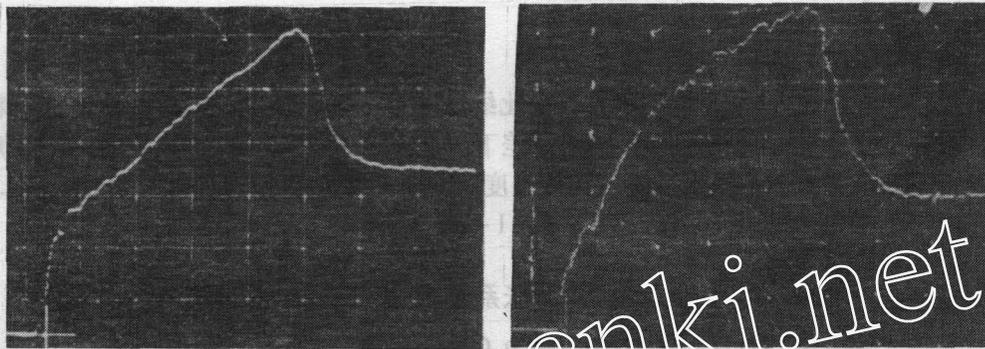
四、实验和计算机处理结果

1. 直接贴高温应变片法测量 LY-12 铝的屈服应力

我们把试件做成长 25mm 的圆柱体。在试件中部贴高温应变片。本实验中, 有两个环节必须控制, 一是子弹的冲击速度, 即不能高、也不能低。而且要随温度的升高而降低。目的是希望在 $\varepsilon(t) \sim t$ 曲线上出现明显的屈服滞后效应, 以便于读数见图 3 照片 (a), (b)。二是升温过程应当尽量控制一致。我们在升温过程中, 一般分三个阶段, 即起始、中间、终止阶段。在中间阶段, 升温速度一般控制在 10 °C / 分左右。起始阶段一般情况下, 炉膛内起始温度都高于室温, 而且实验温度越高, 偏离室温越多, 如在 300 °C 以上时, 炉膛起始温度可以达到 150 °C 以上。因此, 起始升温的速率都远高于 10 °C / 分。最后, 在接近实验温度时, 把升温速率降低, 如距实验温度还有 10 °C 左右时, 开始降低升温速率, 此后大约经过 5 ~ 10 分钟, 可达到预定实验温度, 进行实验。在进行实验前几分钟, 对高温应变片进行标定。实验中记录试件上的应变片的应变历史。即以电压对时间表示的 $\varepsilon(t) \sim t$ 曲线。在该曲线上找出屈服点, 并读取该点的电压值, 利用标定值及应变片的电阻值、灵敏系数, 换算为应变值 $\varepsilon(t)$ 。再将 $\varepsilon(t)$ 代入 (4) 式, 即 $\sigma_y = E(t)\varepsilon(t)$, 其中 $E(T)$ 值由文献 [4] 得到。用该法测量的屈服应力如表 2 所示, 并表示在图 3 上。

表 2

温度 (°C)	13	50	100	150	200	250	300	350	400
屈服应力 (N/m ²)	3.25×10^8	3.36×10^8	3.20×10^8	2.92×10^8	2.84×10^8	2.57×10^8	/	/	1.38×10^8
屈服应力 (kg/mm ²)	33.1	34.3	32.6	29.8	29.0	26.2	/	/	14.1



照片(a)弹速适中,屈服点明显

照片(b)弹速过高

图 3 直接贴高温应变片法测量LY-12 铝的屈服应力

2. 间接法测量LY-12 铝的高温屈服强度

我们把试件做成长 10mm 左右。实验中,子弹的速度和升温过程与直接法一致。该法不在试件上贴应变片,而是在输入输出杆上贴常温应变片。需要注意贴片的位置保证应变片能分别记录单独的输入全波形,反射全波形和透射全波形。而不能让它们之间或它们与其他的从杆的另一端返回的信号相叠加。否则将给计算带来困难。因此,贴片位置的选择需要考虑杆长,试样长和位置之间的相互关联。要根据走时图估算最佳贴片位置。以保证从应变片上获得所需要的正确的信息。

实验的方块图已如图 1 所示。但还需要注意一些细节,为了获得更好的信息,在输入输出杆上贴应变片往往采用对称贴一对或两对的方式。而动态应变仪的标定档,往往是对 120Ω 应变片设置的,而且它的标定档的灵敏系数往往也是一个固定值。这样使用的标定参数就与实际应变片不一致。所以,在取值计算时,必须注意进行修正。如我们就是采用一对应变片对称贴片的方式的,应变片的灵敏系数也与标定档设置的值有小的差别。因此,在换算时,我们采用修正的公式:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta U}{\Delta U_e} \cdot \frac{K_e R_g}{K \cdot R} \cdot \varepsilon_e \quad (14)$$

式中 ΔU —实测电压值, ΔU_e —标定电压值, ε_e —标定的应变值, K_e —标定档设置的灵敏系数, R_g —标定档设置的应变片电阻值, K —应变片实际的灵敏系数, R —应变片实际阻值, $\varepsilon(t)$ —为所求之应变。

另外,在示波器与微机进行数据传送时,存在一个幅值比问题,需要在计算时注意,因为传送的幅值不一定是 1:1 的。数据采集传送软件程序我们使用 BASIC 语言。

上边已经谈到,贴应变片要保证测量时得到独立的输入波,反射波和透射波,实际上测量得到的三个波形是电压对时间的曲线,我们需要的是应力应变曲线。所以需要将数据送到微机中,进行计算。计算时,我们使用 FORTRAN 语言编程。程序框图如图 4 所示。

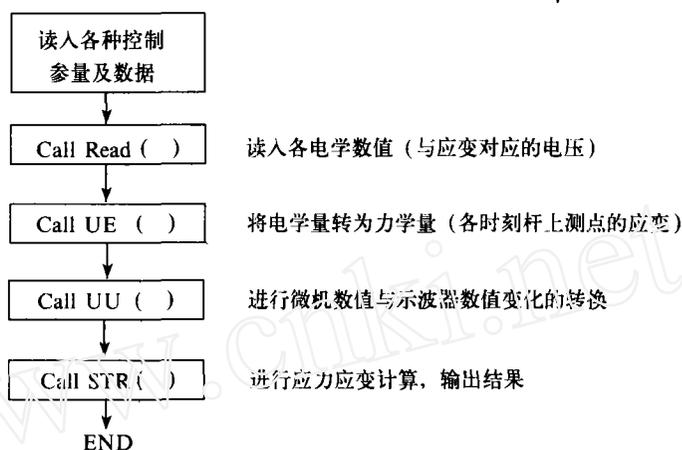


图 4 使用FORTRAN 编程的程序框图

最后的计算结果如表 3, 并将结果表示于图 5。

表 3

温度 (°C)	13	50	100	150	200	250	300	350	400
屈服应力 (N/m ²)	2.90×10^8	2.98×10^8	2.82×10^8	2.59×10^8	2.33×10^8	2.13×10^8	1.98×10^8	1.72×10^8	1.21×10^8
屈服应力 (kg/mm ²)	29.6	30.4	28.8	26.4	23.8	21.7	20.2	17.5	12.3

为了和动态数据进行比较, 我们也作了 LY-12 铝, 在部分高温下的静态屈服强度的实验。结果如表 4, 并表示在图 5 上。

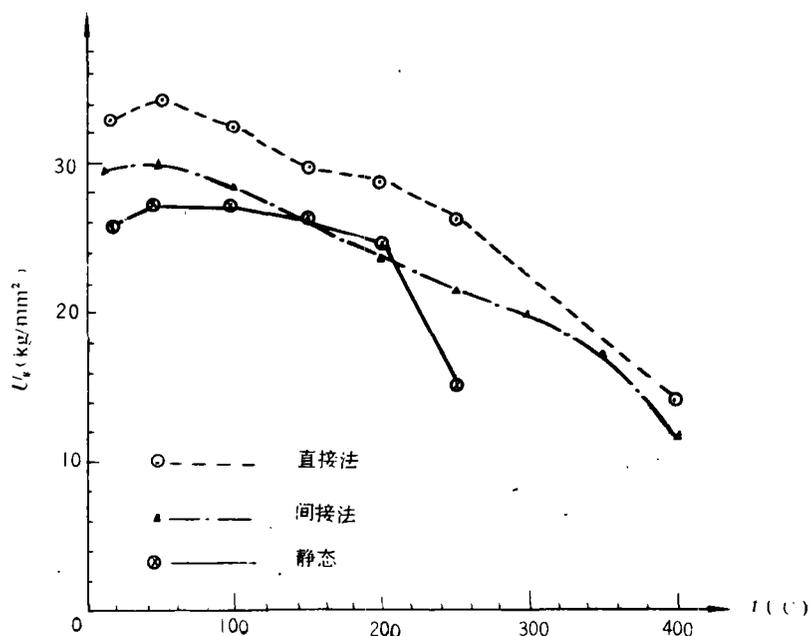


图 5 LY-12 铝屈服强度测量结果

表 4

温度(℃)	15	50	100	150	200	250
屈服应力 (kg/mm ²)	25.9	27.0	26.9	26.5	24.7	15.3

关于误差问题,在直接法中,误差主要来自高温应变片的灵敏系数,而且随着温度的升高误差增大。如清华大学 200℃ 的高温应变片,它在常温时,灵敏系数误差是 1.4%,在 200℃ 时,误差达到 3.3%。其次是标定误差小于 1%。其他误差较小,从常温到高温总误差在 3~5%。在间接法中,主要误差来源于输入输出杆在高温下,声速和线膨胀系数的改变引起的,它们引起的误差也是随温度的增加而增大,在 400℃ 下大约是 2.5%。由于应变片灵敏系数引起的误差是 1.5%,标定误差在 1% 以内,其他误差较小。总误差也在 3~5%。如果该方法考虑温度的影响,那么高温下的误差将减小。但方法要复杂得多。

由图 5 的结果可以看出,LY-12 铝的屈服强度在 50℃ 左右比常温的略高一些。温度再高,则屈服强度随温度升高而下降。静态的在 200℃ 以上相对动态下降稍快。另外,直接与间接法之间的偏差可能是由于某些系统误差引起的。

致谢 作者对田兰桥工程师在各方面给予的支持, LNM 开放实验室给予的方便, 和段祝平教授对该课题的指导, 表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 段祝平等, 力学进展, 第10卷, 第1期, 1980年。
- [2] 王礼立编著, 应力波基础, 国防工业出版社, 1985年。
- [3] 孙承纬, 1989年激光与材料相互作用的热和力学效应学术会议文集(1)。
- [4] 王春奎、刘小苹, 1989年激光与材料相互作用的热和力学效应学术会议文集(3)。
- [5] 工程材料实用手册编辑委员会, 工程材料实用手册(1), 中国标准出版社, 第266页, 1988年。

THE YIELD STRENGTH MEASUREMENT OF LY-12 ALUMINIUM ALLOY UNDER HIGH TEMPERATURE

Wang Chunkui, Liu Xiaoping, and Zheng Rong
Institute of Mechanics, Academia Sinica

ABSTRACT This paper introduces the yield strength measurement of LY-12 aluminium alloy under dynamic loading in temperature interval from room temperature to 400℃. This research utilizes one dimensional split Hopkinson pressure bars and the tubular furnace. The average stress-strain curves of specimens can be measured under different temperature conditions based on one dimensional theory of stress wave propagation and their stress-strain curves also can be detected by strain gages directly. The yield strength and yield strength temperature curve can be obtained.

KEY WORDS Hopkinson pressure bar, dynamic property of material under high temperature, LY-12 aluminium alloy, dynamic yield strength under high temperature.