

# 冲击载荷下铁的弹性模量及屈服强度

经福谦 韩钧万

(1982年4月24日)

用冲击加载—卸载方法测定了在 $10.26 kb$ 和 $111.6 kb$ 下铁的弹性模量及屈服强度,结合Л·В·Альтшулер等<sup>1</sup>发表的 $1110 kb$ 和 $1850 kb$ 两个压力点的数据,发现铁的弹性模量及屈服强度在上述宽广的压力区间内均随压力而增加。这表明,尽管铁试件在上述压力范围内已经历了 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 相的相转变,而冲击波的加工硬化效应仍然是很明显的。

实验测定材料的弹性模量和屈服强度与冲击压力之间的关系,对于揭示材料的冲击特性,例如,冲击波对试件的加工硬化效应,建立描述这种特性的物理模型等,有着重要的意义<sup>[1,2,3,4]</sup>。

本文的目的是分析在冲击载荷下铁的上述性质。

实验装置示意图如图1所示。我们用锰铜压阻计测量了铁试件中的压力剖面 $p(t)$ 。试件材料为2\*纯铁,其纯度 $\sim 99.9\%$ 铁,初始密度 $\rho_0 = 7.85 g/cm^3$ ;硬度 $H_b = 87.5$ ;平均晶粒面积 $\sim 6580 \mu m^2$ ,系退火组织状态。在本实验的冲击加载—卸载的全过程测量中,来自飞片后界面的稀疏波尚未到达锰铜压阻计的测量位置,因而,所测得的卸载过程是由冲击波在铁试件的自由表面的反射稀疏波到达锰铜压阻计测量位置引起的。试件中的波系示意图如图2所示。

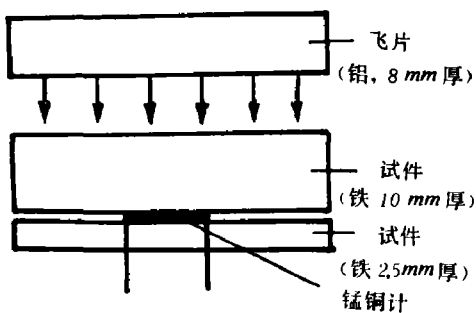


图1 实验装置示意图

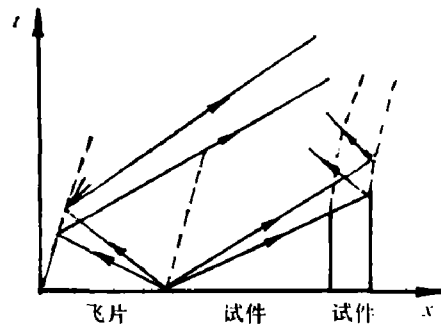
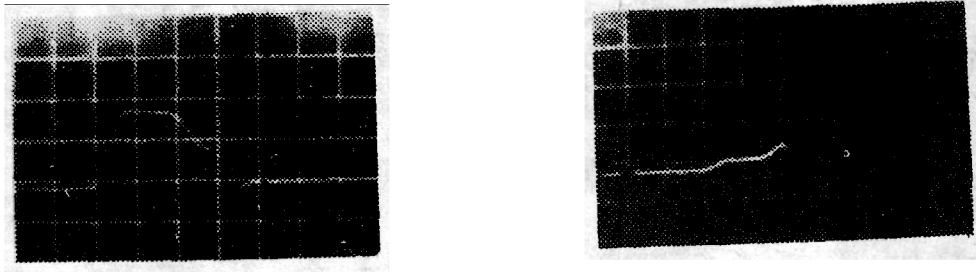


图2 在试件中的波系示意图

锰铜压阻计用 $\phi 0.05 mm$ 的锰铜丝制成,其初始电阻 $R_0 \approx 10 \Omega$ ;绝缘层为 $0.07 mm$ 厚的聚四氟乙烯膜。锰铜压阻计的压阻系数取为 $0.002363 kb^{-1}$ <sup>[2]</sup>;卸载讯号的滞后幅度取为7%。

实验获得的典型示波图如图3所示。图3(a)为铁试件的冲击加载—卸载全过程的示波图,图3(b)为上述加载部分的局部放大的示波图。



(a) 灵敏度: 5 伏/格; 扫速: 0.5 微秒/格 (b) 灵敏度: 0.5 伏/格; 扫速: 0.2 微秒/格  
图 3 实验记录示波图

对上述示波图作数据处理时,所用的方法与文献[6]相同。获得的结果表明,在本实验装置下,铁试件的冲击加载—卸载过程的  $p(t)$  剖面有如图 4 所示的特征。其数据结果为:在冲击加载时,最大压力  $\sigma_M = 111.6 \text{ kb}$ ,相应的应变  $\varepsilon_M = 0.056$ , Hugoniot 弹性极限压力  $\sigma_{HEL} = 10.26 \text{ kb}$ ,相应的应变  $\varepsilon_{HEL} = 0.0036$ ,在实验室坐标系中的一维应变弹性波速度  $c_{EL} = 6.06 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ,塑性波速度  $D = 5.00 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ;在卸载时,弹性卸载波的压力幅度  $\Delta p_E = 26.28 \text{ kb}$ ,实验室坐标系中的卸载弹性波速度  $c_{ER} = 6.56 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。

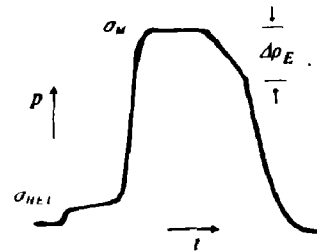


图 4 铁试件的冲击加载—卸载过程的波剖面图

在分析数据时,由弹—塑性理论,不难得到弹性模量及屈服强度的下述关系式<sup>(1,4,7)</sup>(从严格意义上的弹—塑性理论考虑,可以把用下式求得的结果称之为有效弹性模量和有效屈服强度)。

(i) 冲击加载时(在本实验中适用于  $10.26 \text{ kb}$  点的数据分析):

$$Y = \frac{3}{2} [\sigma_{HEL} - P(U_{HEL})] \quad (1)$$

$$v = \frac{(\sigma_{HEL} - Y)}{(2\sigma_{HEL} - Y)} \quad (2)$$

$$E = c_{EL}^2 \rho_0 \left[ \frac{(1+v)(1-2v)}{(1-v)} \right] \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2v)} \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \quad (5)$$

(ii) 卸载时(在本实验中适用于  $111.6 \text{ kb}$  点的数据分析):

$$Y = \frac{\Delta p_E}{2} \cdot \frac{(1-2v)}{(1-v)} \quad (6)$$

$$\nu = (3C_B^2 - C_{\epsilon R}^2) / (3C_B^2 + C_{\epsilon R}^2) \quad (7)$$

$$K = \rho C_B^2 \quad (8)$$

$$C_B = (C_0^2 + 4\lambda P / \rho_0)^{1/2} \quad (9)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

$$E = C_{\epsilon R}^2 \frac{\rho_0}{1-\epsilon_M} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (11)$$

式中,  $Y$ 、 $\nu$ 、 $E$ 、 $K$ 、 $G$  分别为屈服强度、泊松比、杨氏模量、体积模量和剪切模量,  $p(u)$  为静水压曲线,  $C_0$  及  $\lambda$  为 Hugoniot 关系式  $D = C_0 + \lambda u$  中之系数,  $D$  和  $u$  分别为冲击波速度和波后粒子速度,  $\epsilon$  为相对压缩比 ( $V/V_0$ ),  $\rho_0$  为初始密度,  $C_B$  为流体力学声速。

在我们的实验中, 由于最高压力仅为  $111.6 \text{ kb}$ , 故可以认为静水压曲线、Hugoniot 线及等熵线之间无区别, 取为相同, 从而简化了数据处理的过程。Hugoniot 线的形式取为<sup>[1]</sup>,

$$D = 4.63 + 1.33 u$$

根据测量数据并利用 (1)~(11) 式, 得到了如下表所列的数值结果。为了便于进行由低压到高压的综合分析, 表中还列出了 Л. В. Альтшулер 等<sup>[1]</sup> 的数据, 相应的关系曲线示于图 5。

$p$ (kb)	$u$ (mm/ $\mu$ s)	$D$ (mm/ $\mu$ s)	$C_{\epsilon R}$ (mm/ $\mu$ s)	$\nu$	$G$ (kb)	$K$ (kb)	$E$ (kb)	$Y$ (kb)
10.26	0.022			0.306	810	1810	2110	5.78
111.6	0.280	5.00	6.56	0.339	870	2410	2330	6.52
1110	2.00*	7.075*	8.32*	0.420	1040	6200	2950**	11*
1185	2.81*	8.39*	9.75*	0.425	1450	9300	4130**	27*

\* 引自文献 [1] 的数据

\*\* 利用 [1] 中数据通过 (11) 式计算得到的数据

从表中数据和图 5 可以看出, 铁的弹性模量和屈服强度在所给定的压力范围内, 都随压力而增加, 其中, 以体积模量和屈服强度值表现出明显的递增趋势, 这表明冲击波对铁的加工硬化效应是很明显的, 而剪切模量则变化不大。值得注意的是: 考虑到铁在低于  $130 \text{ kb}$  下为  $\alpha$ -相, 高于  $360 \text{ kb}$  时转变为完全的  $\epsilon$ -相<sup>[8]</sup>, 介于上述两个压力界限之间, 则为  $\alpha$  和  $\epsilon$  相的混合相区; 从图 5 中还可以看出, 虽然铁在冲击波作用下经历了这种多晶型转变, 但其弹性模量及屈服强度值变化的上述规律依然存在。对于这个结果的一种可能的解释是: 在冲击波相变时, 铁的高压相 ( $\epsilon$ -相) 是高密度相, 而弹性模量及屈服强度, 往往是随密度而增加的。此外, 剪切模量  $G$  没有表现出随压力而减小的趋势。还说明了在近乎  $2000 \text{ kb}$  的

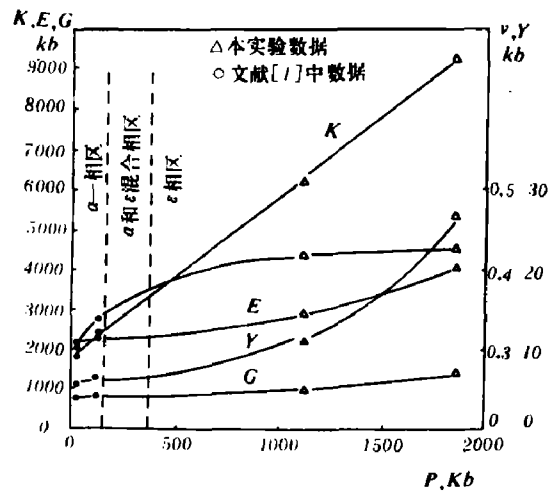


图5 铁的弹性模量及屈服强度与冲击压力的关系

冲击压力下，铁材料在卸载间尚未表现出向理想流体模型演化的趋势，因此，在精确的动力学理论计算中，以及在冲击波实验的设计时，应考虑铁材料的这一特性。

张玉松、朱博海等同志参加了实验工作，谨向他们表示谢意

#### 参 考 文 献

- [1] Альтшулер, Л. В., и Др., *ПМТФ*, No. 2, стр. 159, (1971)
- [2] Fuller, P. J. A., Price, J. H., *Brit. J. Appl. Phys.*, 2 (2), 275, (1969)
- [3] Воробьев, А. А., Дремин, А. Н., Канель, Г. И., *ПМТФ*, No. 5, 94 (1974)
- [4] Дремин, А. Н., Канель, Г. И., *ПМТФ*, No. 2, 146, (1976)
- [5] Канель, Г. И., Вахитов, Г. Г., Дремин, А. Н., *ФГВ*, Том, 14, No. 2, 130, (1978)
- [6] Павловский, М. Н., *ПМТФ*, No. 5, 136, (1976)
- [7] Baker, L. M., Hollenbach, R. E., *J. Appl. Phys.*, 45 (11), 4872, (1974)
- [8] Новиков, С. А., и Др., *ЖЭТФ*, Том, 4 т., Вып. 3 (9), 814, (1964)

## ELASTIC MODULI AND YIELD STRENGTH OF SHOCK-LOADED IRON

Jing Fuqian Han Junwan

### Abstract

Elastic moduli and yield strength of iron at 10.26 kb and 111.6 kb are determined by means of shock loading-unloading technique. Combining the data reported by Альшутлер, Л. В. et. al.<sup>[1]</sup> at 1110 kb and ours at 1850 kb, it is found that the values of elastic moduli and yield strength all increase with shock pressure over a wide pressure range. It implies that the work-hardening effect of shock waves of iron is significant, although the iron specimen has been undergone  $\alpha \rightarrow \epsilon$  phase transformation in the above pressure range.