

of explosive based on a relation between the quantitative DTA(or DSC) and Semenov's theory of thermal explosion under non-isothermal condition is presented. The calculated values for PETN, RDX, HNS and DATB are in accord with the published experimental data in literature. Their errors are estimated to be within 3.5 %.

## 动载荷下固体材料的剪切断裂判据

王明锐 汤敏君 涂植峰 刘云英

本文通过对钢质圆柱体弹丸高速撞击平面铝靶板实验的二维数值模拟计算,提出了以最大工程剪切应变作为剪切断裂判据的建议。

### 一、最大工程应变剪切断裂判据

固体的断裂,按通常的分类有三种形式:图1(a)所示为张裂,也称层裂,是材料在强拉伸力作用下出现的,拉伸力 $F$ 垂直于断裂面;图1(b)所示为撕裂;图1(c)所示为滑裂;这两类属于同一性质,是强剪切力作用下出现的剪切断裂,作用力 $F$ 平行于断裂面。

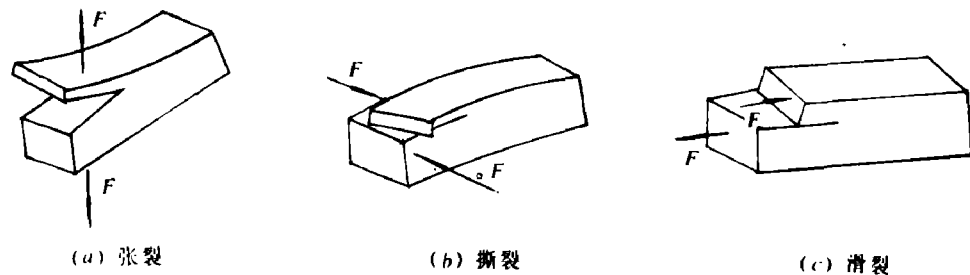
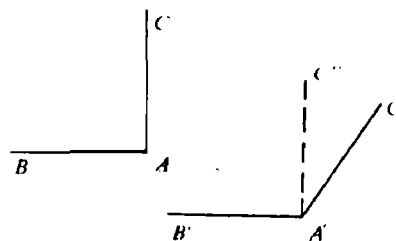


图1 固体的断裂形式

动载荷下的层裂称为 Hopkinson 断裂<sup>[1]</sup>。许多实验和分析研究,已提出的断裂判据有 Whiteman 等<sup>[2]</sup>的依赖于应力速率的判据, Mader 等<sup>[3]</sup>的依赖于应力梯度的判据,还有 Butcher 等<sup>[4]</sup>的累积损伤判据。本文研究固体材料在动载荷下的剪切断裂,并且提出了“最大工程剪切应变”判据。这个结果是1986年初对北京工业学院所作的弹丸碰靶冲塞

本文于1987年6月16日收到。



实验进行数值模拟计算后得出的。

“工程剪切应变”  $\gamma$  定义如下:

设  $A$  为变形体中的一个质量点, 过  $A$  点取两条随介质运动的质量线元  $AB$  和  $AC$ , 初始时刻其交角为直角。设在物体变形中的某个时刻线元的新位置为  $A'B'$  和  $A'C'$ , 此时它们的交角一般不再是直角, 为叙述方便起见不妨设其为钝角。在钝角  $\angle B'A'C'$  内过  $A'$  点作线段  $A'C''$  垂直于  $A'B'$ , 定义此时在介质中  $A$  点处的工程应变  $\gamma$  为

$$\gamma = \angle C''A'C' \quad (1)$$

一般说来  $\gamma$  为小量, 故可近似写成

$$\gamma = \sin \angle C''A'C' = \frac{\overline{A'C''} \times \overline{A'C'}}{|\overline{A'C''}| |\overline{A'C'}|} \quad (2)$$

剪切断裂的“最大工程应变判据”的含义是: 如果质点  $A$  的运动速度平行于  $AB$  方向, 则当  $A$  点的工程剪切应变达到某个极限值  $\gamma_f$  时, 材料在  $A$  点处出现沿  $AB$  方向的剪切断裂 (即滑裂),  $\gamma_f$  是材料常数。据对北京工业学院提供的冲塞实验数据的数值模拟计算, 对铝而言,  $\gamma_f = 0.21$ 。

## 二、实 验

图 2 是冲塞实验的示意图。  $A$  是从枪管发射出来的一个钢弹丸, 它是一根长为  $L = 2.5$  cm、截面半径为  $r = 0.25$  cm 的等截面圆柱体。  $B$  是一个厚度  $d = 0.5$  cm 的充分大的平面铝板。弹丸以  $700$  m/s 的速度撞击在靶板上, 并向靶中侵入, 侵入深度用  $H$  表示 (见图 2(b))。靶板中受弹丸  $A$  撞击的部分  $C$  将被切割下来, 并从靶板背面抛掷出去, 这时叫做“冲塞”。小圆柱体  $C$  称为塞柱, 切割塞柱  $C$  的过程, 就是剪切断裂面自弹、靶接触面处开始, 不断向靶板背面扩展的过程。当断裂面贯穿整个靶板时, 塞柱就最后形成, 并开始冲塞。这就是图 1(c) 所示的滑裂, 塞柱的侧面就是断裂面。

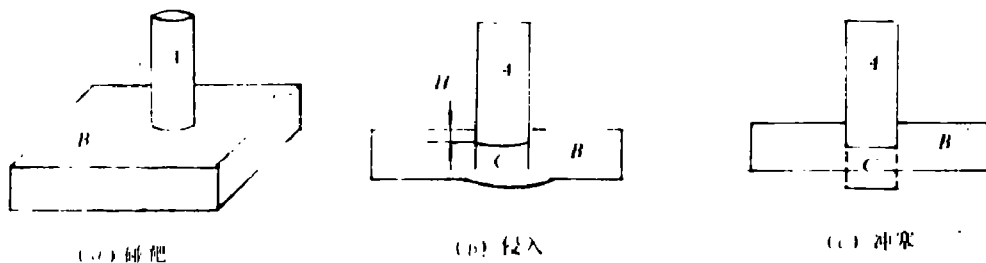


图 2 冲塞实验示意图

北京工业学院采用 X 光闪光照相<sup>[5]</sup>, 拍摄了弹碰靶后四个时刻的照片, 以碰靶瞬时为时间起点, 这四个时刻分别是  $t = 3.5, 4.5, 5.0$  和  $8.0 \mu s$ 。由于弹丸材料和靶板材料的密度不同, 它们在底片上颜色深浅差异很大, 可以清楚地辨别出每个时刻弹丸在靶板中的侵入深度 (见图 3)。由图 3 可以看出, 在弹丸向靶板侵入的过程中, 起初是靶板背面逐渐向外拱凸。在

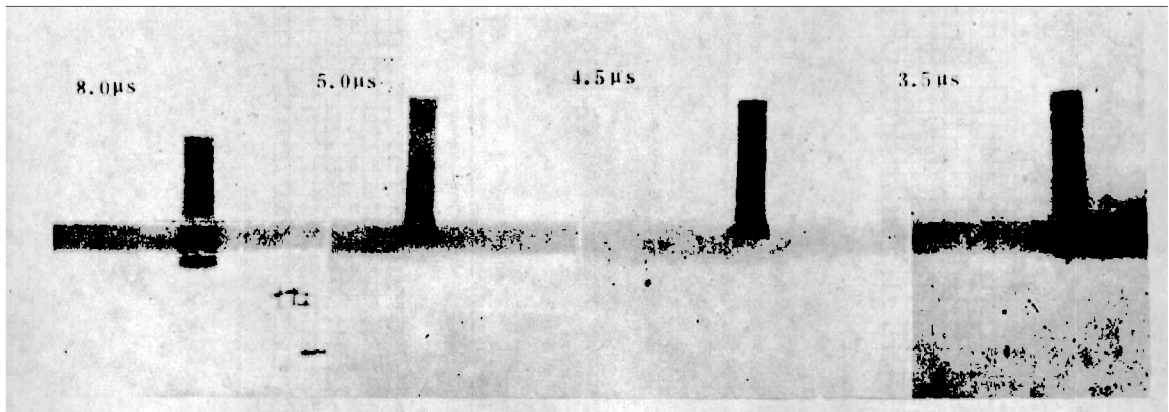


图3 钢弹丸高速撞击铝靶板的X光闪光照片

$t = 5 \mu\text{s}$  以前还未出现冲塞现象,说明塞柱此时还未最后形成,也就是剪切断裂面还未穿透靶板。在  $t = 8 \mu\text{s}$  时,塞柱已有很大一部分冲出靶板了。不难想象,弹的侵入深度  $H_p$  和开始冲塞的时间,是与剪切断裂面的扩展速度有关的。下面进行数值模拟计算。

### 三、数值模拟计算

用二维拉氏网格弹塑性流体力学程序 APHEMP<sup>[6]</sup> 进行数值模拟计算,取柱面坐标系,不考虑材料的粘滞性,采用 Von-Mises 屈服条件。材料的剪切模量  $\mu$  和屈服强度  $Y^0$  采用北京工业学院给出的力学参数,状态方程  $p = p(\rho, e)$  采用我单位自编的参数。模拟步骤是

(1) 人为地调整剪切断裂面的扩展速度,随时将计算得到的弹丸侵入深度  $H_p$  同实测值进行比较,直到  $H_p$  的计算值时刻都基本落在实测值的误差范围内为止。

(2) 然后分析断裂面前缘处各力学量的特征,寻找其规律性。经过分析发现:各点在断裂面到达之时,正好是该点的工程剪切应变上升到  $\gamma = 0.21$  的之时。

(3) 最后以工程剪切应变  $\gamma = 0.21$  作为剪切断裂判据作重新计算,发现结果和前面所算得的完全相符。现将这样算得侵入深度  $H_p$  值与实测的  $H_p$  值对比如表 1。

表 1

$t(\mu\text{s})$	3.5	4.5	5.0	8.0
实测值 (cm)	0.225~0.25	0.225~0.25	0.25~0.313	0.386~0.430
计算值 (cm)	0.20	0.226	0.252	0.414

图 4 是计算得到的  $t = 5 \mu\text{s}$  和  $t = 8 \mu\text{s}$  的图形。在  $t = 5 \mu\text{s}$  时,冲塞尚未开始,靶板背面向外拱凸;在  $t = 8 \mu\text{s}$  时,塞柱已冲出靶板一部份了:这与 X 光闪光照片符合的。

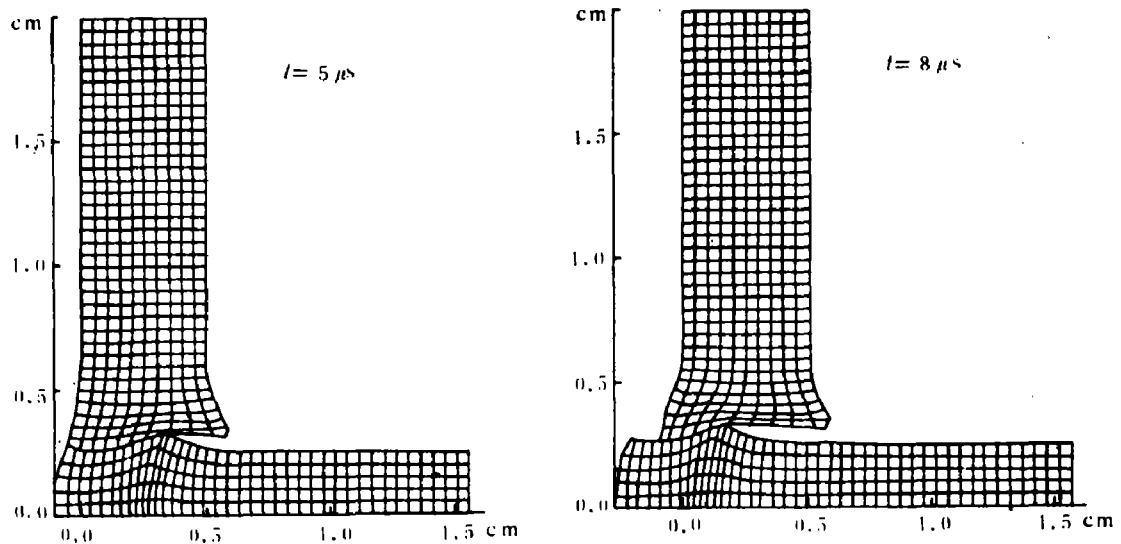


图4 计算图形

#### 四、结 束 语

(1) 本文提出以最大工程剪切应变为剪切断裂判据,这是根据和实验作对比计算提出的,因而是有参考价值的。这一结论推广到一般固体的可能性也是存在的。

(2) 最大工程剪切应变  $\gamma_f$  是否与材料的热力学状态有关,有待于进一步研究。

(3) 如果材料是各向同性的,  $\gamma_f$  应与断裂面的方向无关,也就是和弹丸与靶的正碰或斜碰无关,而实际上是否如此,还有待于研究。

对王继海教授提出并转达的王子修副教授的有益意见,谨致谢意,感谢孙锦山副教授在工作中的具体帮助和支持。

#### 参 考 文 献

- [1] Hopkinson, B., *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, 213 (1914), 437.
- [2] Whiterman, P., *AWRE-SWAN-10 61*, (1962).
- [3] Breed, B.R., Mader, C.L., et al., *J. Appl. Phys.*, 38 (1967), 3271.
- [4] Tuler, F.R., Butcher, B.M., A Criterion for the Time Dependence of Dynamic Fracture, *Int. J. Fracture Mech.* 4 (4) (1968).
- [5] 李录荫, 何顺录, 杆式平头弹垂直碰撞靶板的X光测试, 私人通信, (1985).
- [6] 汤敏君等, APHEMP程序, 私人通信, (1985).

## A SHEAR FAILURE CRITERION OF SOLIDS UNDER DYNAMIC LOADING

Wang Mingrui    Tang Minjun    Tu Zhiju    Liu Yunying

### Abstract

By two-dimensional numerical simulation for a penetration process of a steel cylindrical projectile with high impacting velocity into a planar aluminum target, a shear failure criterion of maximum engineering shear strain is proposed in this paper.

## 电探针测多空腔波形和时间

付兴海

爆轰实验中常需要测试多个空腔时间或波形。本文介绍了一种电探针测多空腔波形技术,从多方面论证了可靠性。文中评述了平面多空腔波形测试结果,时间测量误差小于 $\pm 0.08 \mu\text{s}$ 。

### 一、前言

爆轰实验中,由于起爆和装置结构等因素影响,爆轰波或冲击波呈现一维、二维或三维运动,其飞板形状在运动过程中不断变化。为研究爆轰推动下飞板运动、波形发展规律,需测出数个空腔的飞板到达时间和波形。这种测试往往要做多发同类实验才能完成,不仅周期长,耗资多,而且还会引入不同发的实验误差。

为了在同一发实验中测出多个空腔波形,我们研究了电探针测多空腔波形技术。基本出发点是将若干数量的单根探针垂直地安装在支架上,探针分成几组,每组探针高度相同。各组探针之间应有一定高度差,可以在同一发实验中测出几个空腔波形和时间。因探针安装在球形支架上形状如“刺猬”,故平面和球面电探针统称为刺猬电探针。

美国利弗莫尔国家实验室曾登载过一张圆顶形探针装置照片<sup>[1]</sup>,他们认为这种方法是除了闪光X射线和高速转镜外第三个主要诊断技术。为了解决若干具体技术问题,我们做了多种单项实验,本文着重讨论探针结构、性能的测定以及平面实验。实验结果表明,探针性能满足了实验要求,测试时间的综合误差小于 $\pm 0.08 \mu\text{s}$ 。

本文于1987年5月30日收到,1987年7月30日收到修改稿。