

## 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

爆裂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

爆裂实验中,由于起爆和装置结构等因素影响,爆裂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。为研究爆裂推动下飞板运动、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。

## 二、探针结构

单根刺猬电探针采用杆式同轴探针，其一端固定在支架上，另一端伸入到空腔某给定位置。为了保证探针安装后悬臂端不发生弯曲，探针应该具有一定刚度。经过实验，我们选用的探针主体为细钢管作为地线，其外直径为0.65mm，管内插入金属丝作为信号线，悬臂的端部是测试端，它实际上是一种电开关，由地线、绝缘层和信号线三部分组成（如图1所示）。绝缘层外面用导电胶与钢管连成地线。由于绝缘层和导电胶的厚度对测试空腔位置和探针接通时间有直接影响，故需严格控制其厚度。

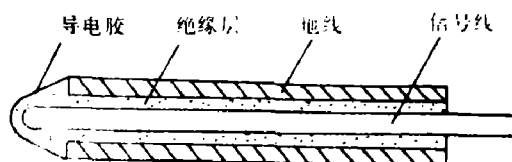


图1 刺猬探针结构示意图

这种探针属于压通型电探针。当飞板碰撞到探针的测试端后，使信号线和地线接通造成电路闭合，使其网络电路产生一个电脉冲信号，输入到电子仪器记录飞板到达时刻。实践证明，这种探针有较好的屏蔽和抗干扰性能。

## 三、探针性能测定

由于刺猬探针伸入到空腔中，它与埋在靶内的电探针（简称靶内探针）相比有许多新的特点，必须对其性能进行测定。

### 1. 刺猬探针测试精度

对于单空腔波形，通常采用光学测试和靶内电探针测试，这是两种成熟的测试技术，其精度已作过标定。为了确定刺猬探针测试精度，我们在平面实验中（图2）与靶内探针进行对比。刺猬探针测试端与靶内探针的上表面处于同一水平面上，两种探针以雷管轴线为对称轴分布。靶内探针上面覆盖一层薄盖片阻挡空气冲击波。实验结果表明，两种探针测试差小于 $\pm 0.06 \mu\text{s}$ 。

### 2. 刺猬探针防空气击波性能

飞板在运动过程中，飞板前会产生较强的空气冲击波，常常使一些电探针提前接通出现假信号。刺猬电探针不能像靶内探针那样用盖片阻挡空气冲击波，而是用其测试端的绝缘层和导电胶起盖片作用。因而探针测试端需经过严格检查，不能存在微小孔隙。在图2装置的外圆表面套以壁厚5mm的钢筒，减少空气击波稀疏速度，用这种装置来检验探针防空气冲击性能。实验表明，刺猬探针对一般强度的空气冲击波具有良好的阻挡效果。

### 3. 探针分布密度的确定

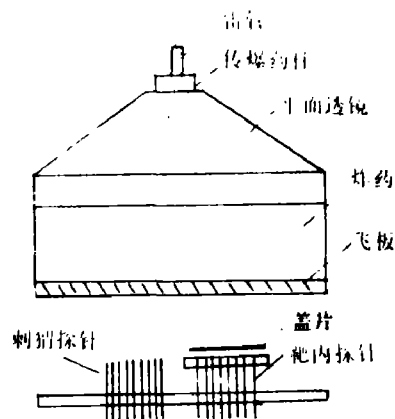


图2 平面装置示意图

在图2装置的外圆表面套以壁厚5mm的钢筒，减少空气击波稀疏速度，用这种装置来检验探针防空气冲击性能。实验表明，刺猬探针对一般强度的空气冲击波具有良好的阻挡效果。

刺猬探针能够测试多空腔波形和时间,是因为它们可以制成各种长度,伸入到空腔的任何部位。飞板首先碰撞到那些最长的探针,得到第一条波形。飞板继续运动,碰撞到第二层探针,得到第二条波形。依次可得到多条波形。但是,飞板与探针碰撞后,会在作用区内飞散出一定数量的金属粒子影响下层探针。因而两个探针轴线之间要有适当的距离。间距过小,上层探针产生的粒子可能碰撞到下层探针的测试端,使下层探针提前接通;间距过大,安装的探针数量就会减少,不能反映波形的真实形状。

为确定探针分布密度对测试结果的影响,用图2装置进行了测定。在支架上安装了若干组探针,每组七根。其中六根长探针分别装置于正六边形顶点,六边形中心安装一根短探针。长、短探针高度差40mm。六边形外接圆半径分别为3,4,5,6,7mm。对比探针与短探针高度相同,两者安装在以雷管轴线为心的同心圆上,以便减少波形不平度对测试结果的影响。实验结果表明,探针轴线间距大于3mm无显著影响,两者测试结果差小于 $\pm 0.07 \mu\text{s}$ 。

这一结论通过闪光X射线观察,进一步得到证实。爆轰装置概貌如图2所示。采用直径为100mm的平面透镜和高度为50mm的TNT/RDX=40/60平面药柱。实验中选用了两种直径探针,其一是外直径为 $\phi 1.24 \text{ mm}$ 的钢管,另一种是 $\phi 0.65 \text{ mm}$ 的钢管。探针伸出支架上表面50mm,飞板自由面到支架上表面的距离为69mm。探针轴线之间距离5mm。图3(a)是实验装置起爆前飞板、探针和支架的X光照片。飞板在爆轰产物推动下向空腔运动

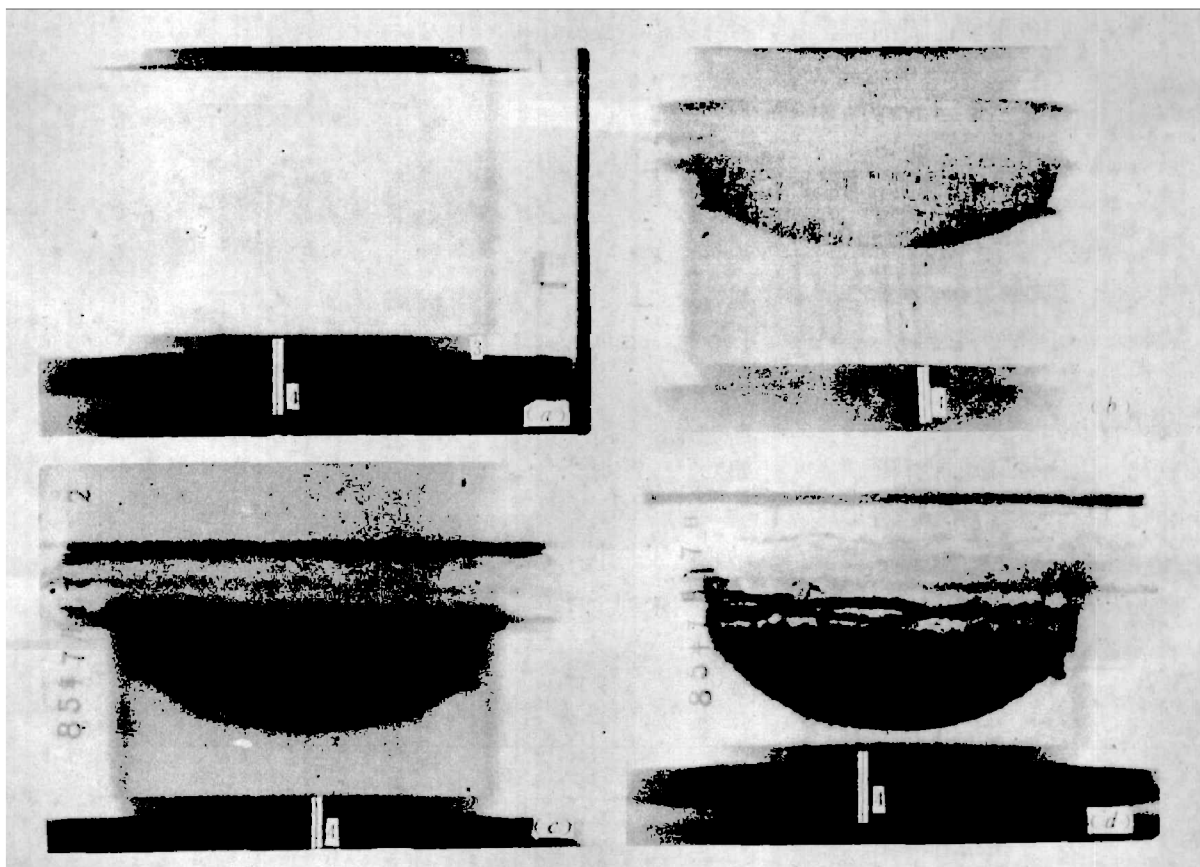


图 3

(a) 静止相, (b) 起爆后  $33 \mu\text{s}$ , (c) 起爆后  $38 \mu\text{s}$ , (d) 起爆后  $43 \mu\text{s}$ , 1—飞板  
2—探针, 3—支架, 4—线左右边分别为直径  $1.24 \text{ mm}$ ,  $0.65 \text{ mm}$  探针组。

并与探针相碰。飞板继续向前运动,则超过探针端面与探针发生相互作用。图3(b)表示雷管起爆后33 $\mu\text{s}$ 时的动态X光照片。飞板运动距离约38mm,飞板超过探针测试端19mm。从照片可以看出,探针与飞板作用区周围没有明显的粒子喷射现象。图3(c)是起爆后38 $\mu\text{s}$ 的动态照片,这时飞板飞行了51mm,超过探针测试端32mm,显然粗探针周围出现了粒子流,其直径范围约2.1mm,长度约1.3mm。而 $\phi 0.65\text{mm}$ 的细探针周围却观察不到喷射现象。

在这种情况下,确切地估算喷射粒子的质量是困难的。作为粗估,我们可以假设喷射范围按柱状分布,粒子流的密度按钢的初始密度。显然这种方法估算的结果比实际值偏大,但对于分析钢管受压后的状态具有一定参考意义。所以,每根 $\phi 1.24\text{mm}$ 钢管周围的粒子质量小于0.023克,而被飞板覆盖长度为32mm的钢管质量为0.19克。可见,喷射的粒子质量与钢管质量比小于12%。

图3(d)为起爆后43 $\mu\text{s}$ 情况,飞板飞行了65mm,超过探针46mm。在这种较大空腔下,细探针周围仍然未出现明显喷射现象。 $\phi 1.24\text{mm}$ 探针周围粒子喷射范围有些扩大,其直径约2.5mm,长度约为1.3mm。粗估其喷射质量约为0.038克。而被飞板覆盖钢管质量约为0.28克,两者质量比小于13.8%。从照片可见,飞板前面的探针直径未出现增加迹象,钢管也未产生弯曲变形和倾斜堆积现象,说明钢管探针与飞板相互作用过程中,大部分穿入飞板,并没有被飞板压垮停留在空腔中。在钢管与飞板相互作用的边界处,由于压力集中,有小部分粒子飞散形成射流;而细钢管由于容易受稀疏使得作用区压力衰减较快,粒子喷射量就比较少。

通过上述实验可以直观看到,在 $\phi 1.24\text{mm}$ 的粗钢管情况下,飞散粒子严重影响范围也只有2.5mm左右,显然细钢管探针影响范围将更小。

#### 4. 飞板对探针斜碰撞的影响

爆轰实验中,常常需要测试二维或三维运动的波形。这时飞板与探针不是垂直相碰,而是斜碰撞。为了确定斜碰撞对测试结果的影响,进行了斜置探针实验。实验装置如图4所示,在同一发实验中同时安装与飞板自由面垂直和倾斜两种探针,以比较倾斜探针测试精度。如果把探针与雷管轴线的夹角称为倾斜角,我们作了倾角为 $30^\circ$ 和 $45^\circ$ 两种实验。取探针测试端至雷管轴线的距离为 $R$ ,倾角为 $45^\circ$ 的探针的部分测试结果列于表1。

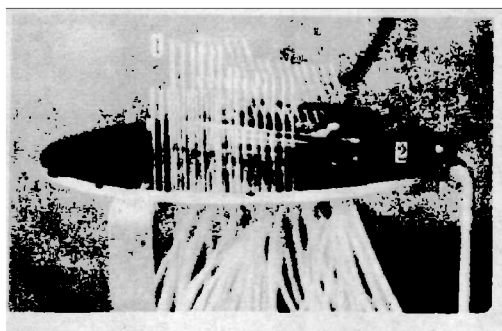


图4 平面刺猬探针  
1—探针, 2—探针支架。

表1 倾角 $45^\circ$ 和 $0^\circ$ 探针测时比较\*

$R$ (mm)	10.00	14.14	18.03	26.93	30.41	31.62	36.40	42.43
倾 $45^\circ$ 测时( $\mu\text{s}$ )	27.34	27.33	27.37	27.30	27.31	27.37	27.38	27.25
$0^\circ$ 测时( $\mu\text{s}$ )	27.35	27.36	27.39	27.36	27.30	27.37	27.34	27.33
时间差( $\mu\text{s}$ )	-0.01	-0.03	-0.02	-0.06	0.01	0	0.04	-0.08

表1 (续)

$R$ (mm)	46.10	20.62	25.00	28.28	32.02	41.23	44.72	53.15
倾 $45^\circ$ 测时 ( $\mu\text{s}$ )	27.39	30.79	30.84	30.76	30.84	30.75	30.73	30.76
$0^\circ$ 测时 ( $\mu\text{s}$ )	27.35	30.77	30.76	30.77	30.77	30.74	30.75	30.73
时间差 ( $\mu\text{s}$ )	0.04	0.02	0.08	-0.01	0.07	0.01	-0.02	0.03

\* 从传爆药柱与透镜交面到探针接通时间。

由表1可以看出, 倾斜  $45^\circ$  探针所测时间的平均值分别为  $27.34\mu\text{s}$  和  $30.78\mu\text{s}$ , 而  $0^\circ$  探针测得时间平均值相应为  $27.35\mu\text{s}$  和  $30.76\mu\text{s}$ , 两种探针测试结果基本一致。将倾角  $45^\circ$  探针与对应的  $0^\circ$  探针一一对比, 两者测时差小于  $\pm 0.08\mu\text{s}$ 。

#### 四、平面多腔时间测试

我们利用刺猬探针测试了图2装置的飞板运动规律, 取得了良好效果。其中传爆药柱  $\phi 32 \times 11\text{mm}$  的特屈儿, 平面波透镜的直径为  $200\text{mm}$ , 主药柱 TNT/RDX = 40/60,  $\phi 200 \times 40\text{mm}$ , 飞板为  $\phi 200 \times 3\text{mm}$  的黄铜片。图4为探针与支架照片, 其中垂直探针分成四种高度, 每种高度有7—8根探针, 一发实验测得四组空腔时间。在另一发实验中, 主药柱 TNT/RDX = 40/60,  $\phi 200 \times 50\text{mm}$ , 测得13组空腔时间。测试结果列于表2, 其中  $x$  为飞板自由面

表2 测试与计算空腔时间比较

主	$\frac{\text{TNT}}{\text{RDX}} = \frac{40}{60}$ $\phi 200 \times 40(\text{mm})$	$x$ (mm)	10.76	29.98	51.00	57.70			
		$t_e$ ( $\mu\text{s}$ )	4.35	11.39	17.89	20.11			
		$t_c$ ( $\mu\text{s}$ )	5.19	11.46	17.92	19.94			
药 柱	$\frac{\text{TNT}}{\text{RDX}} = \frac{40}{60}$ $\phi 200 \times 50(\text{mm})$	$x$ (mm)	0	1.15	2.89	5.89	8.89	12.89	
		$t_e$ ( $\mu\text{s}$ )	0	0.60	1.76	3.06	4.32	5.72	
		$t_c$ ( $\mu\text{s}$ )	0	1.19	2.11	3.37	4.49	5.88	
		$x$ (mm)	21.20	24.20	28.20	30.00	33.00	36.00	40.00
		$t_e$ ( $\mu\text{s}$ )	8.35	9.37	10.68	11.26	12.26	13.20	14.40
		$t_c$ ( $\mu\text{s}$ )	8.27	9.53	10.78	11.17	12.25	13.16	13.37

到探针测试端的距离,  $t_e$  为飞板在空腔中运动时间的平均值,  $t_c$  是根据爆炸产物对物体的一维抛射<sup>[2]</sup>计算的结果。图5绘出了  $x-t$  曲线计算结果。可以清楚看到, 当空腔大于  $20\text{mm}$  时, 计算与实验结果符合得很好。但对于小空腔来说, 计算的飞层运动时间比实验值偏大, 且空腔越小, 时间偏长量越大。很多实验都证实了这一点, 说明不是测试误差引起的, 而是公式推导过程中的一些假设条件还不能完全反映真实情况所致。

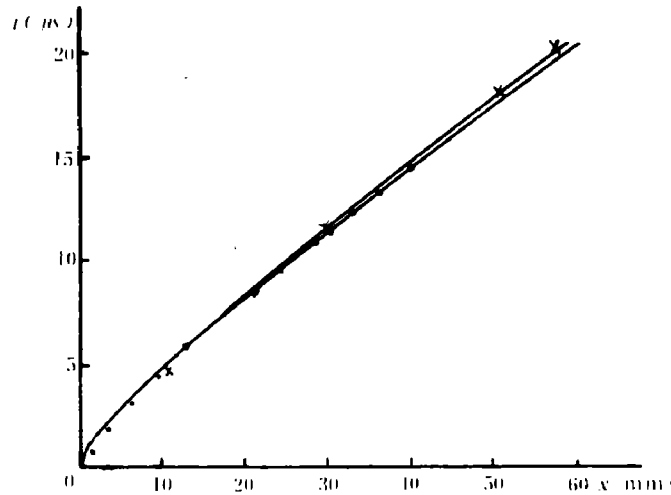


图5  $x-t$  计算曲线与实验比较

——计算曲线: 1 药柱  $\phi 200 \times 40 \text{ mm}$ , 2 药柱  $\phi 200 \times 50 \text{ mm}$ ,  
 $\times$  药柱  $\phi 200 \times 40 \text{ mm}$  实验点,  $\bullet$  药柱  $\phi 200 \times 50 \text{ mm}$  实验点。

## 五、结 束 语

刺猬探针是重要的测试手段之一。在保证每根探针的质量和组装精度的情况下,其测时间精度可以小于  $\pm 0.08 \mu\text{s}$ 。实验证明,刺猬电探针能够测试平面飞板的多腔运动波形,达到一炮多用的效果。

参加本项目研究的还有李坊远、谢云娣、周腊梅、丁秀华、蒋宏志和其他一些同志,研究过程中吴世法、董庆东同志提过许多宝贵意见,刘光祚同志对本文给予很多支持,在此深表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Lawrence Livermore Laboratory, Upgrading the Site 300 Explosive Hydrodynamic Test Facility, UCRL-52000-79-1, (1979), 29-31.
- [2] 鲍姆·Ф.А.等, 众智译, 爆炸物理学, 科学出版社(1963)。

## MEASUREMENT OF WAVEFORMS AND MOVING TIME AT SUCCESIVE FLYING DISTANCES OF A PLATE WITH ELECTRON PINS

Fu Xinghai

### Abstract

In detonation experiments, measurement of waveforms and moving time at successive flying distances of a flying plate is often needed. The technique of measurement is introduced in this paper. The reliability of the method is described from all respects. The results measured on plane assembly is presented. The errors on moving time of a flying plate are less than  $\pm 0.08\mu\text{s}$ .

## 在二层楼楼板上用控制爆破方法 拆除钢筋混凝土基础

姬云峰

本文介绍了在楼房内二层楼板上,用控制爆破成功地拆除钢筋混凝土基础的一个实例。本中叙述了装药配置、药量计算、实际施工、安全防护和爆破效果等工作,为拆除类似建筑物提供了一些经验。

1987年1月11日至14日,在河南省焦作市修武县水泥厂用控制爆破方法成功地拆除了一个座落在二层楼楼板上的立窑体钢筋混凝土基础,从中得到了一些在楼房内二层楼板上用控制爆破方法拆除各种结构的构筑物的施工经验,可为今后拆除类似建筑物提供参考。

### 一、工程概况

立窑体楼为一个钢筋混凝土框架式结构的三层楼房建筑,高约17米。三楼安装两个直径为50cm、高约10米的钢管结构烟囱,其基础位于二楼楼板上;基础下部由四根截面 $900 \times 900$  mm直柱子支承,各柱间由截面 $400 \times 700$  mm的钢筋混凝土横梁连接。基础部分座落在横梁上,但有 $530 \sim 600$  mm的宽度座落在厚度150 mm的二楼楼板上。基础的正上方2米高处及其三楼悬吊和设置有近100吨重的各种设备和构筑物。基础高2500 mm,底部尺寸:  $3400 \times$

本文于1987年2月23日收到,1987年6月17日收到修改稿。