

# 射流对工业炸药的引爆及侵彻机制

姜春兰 徐更光 丁 懋

(北京理工大学力学工程系)

**摘要** 本文用脉冲 X 光摄影技术及电探极 - 记录仪系统, 对射流引爆及侵彻工业炸药的过程进行了观测, 探讨了射流引爆及侵彻工业炸药的机制, 给出了射流与工业炸药作用过程的物理图象。

**关键词** 射流引爆 侵彻 爆轰

## 一、引言

聚能射流引爆炸药的研究已进行许多年。L. Zerman 等人于 1955 年最先研究了射流通过钢隔板引爆 B 炸药的机制。1968 年, M. Held<sup>[1]</sup>观测了铜射流直接引爆炸药的过程, 在归纳了大量实验结果的基础上, 提出  $v^2d$  为射流引爆炸药的临界条件。其中,  $v$  为射流速度,  $d$  为射流直径。对于不同材料的射流, C. L. Mader 等人<sup>[2]</sup>提出用  $\rho v^2d$  做为射流引爆炸药的临界条件。这里,  $\rho$  为射流密度。M. C. Chick 等人<sup>[3-4]</sup>, 研究了射流引爆有隔板及裸装的 B 炸药的过程, 并发表了他们的实验结果。

上述工作, 都是出于军事上的考虑, 从武器系统安全性角度出发进行研究的, 主要研究了射流与军用猛炸药的作用机制。

用聚能射流引爆工业炸药, 是为了解决我国矿山爆破中钝感工业炸药的强起爆问题而提出的一个新的起爆方案。1982 年, 在德兴铜矿初步试用, 取得了良好效果<sup>[5]</sup>。为使这种起爆技术进一步完善和推广, 有必要对其起爆过程进行系统的研究。

由于工业炸药为散装装药, 其爆轰感度及爆轰速度均低于军用猛炸药。因此, 射流引爆工业炸药与引爆高速猛炸药的过程有许多不同的特点。本文探讨了聚能射流引爆工业炸药的机制, 给出了引爆过程的物理图象。

## 二、实验

本文选取 2 号岩石炸药 (硝酸铵 84%, TNT 11%, 木粉 4%) 和铵油炸药 (硝酸铵 94%, -10 号柴油 6%) 为主要研究对象。药卷直径均为 40 mm, 装药密度均为 0.85 克/厘米<sup>3</sup>。射流形成装置为 84-29 型石油射孔弹。实验系统见图 1。整个系统主要由 X 光摄影设备、被测试件及防护装置三部分组成。

当雷管点火后, 引爆射孔弹形成一股高速金属射流通过 40 mm 高支座 (炸高), 撞击在炸药上, 接通安装在药卷上表面的电探极, 触发 X 光摄影系统, 经预置延迟时间, 可拍摄到两张不同时刻的射流引爆工业炸药过程的瞬态相。取不同延迟时间, 进行多发实验, 便可得到射流引爆工业炸药全过程的图象。

本文还采用了电探极组 - 瞬态记录仪系统作为 X 光摄影的补充, 测量了射流在炸药中的

1988 年 9 月 12 日收到原稿, 11 月 7 日收到修改稿。

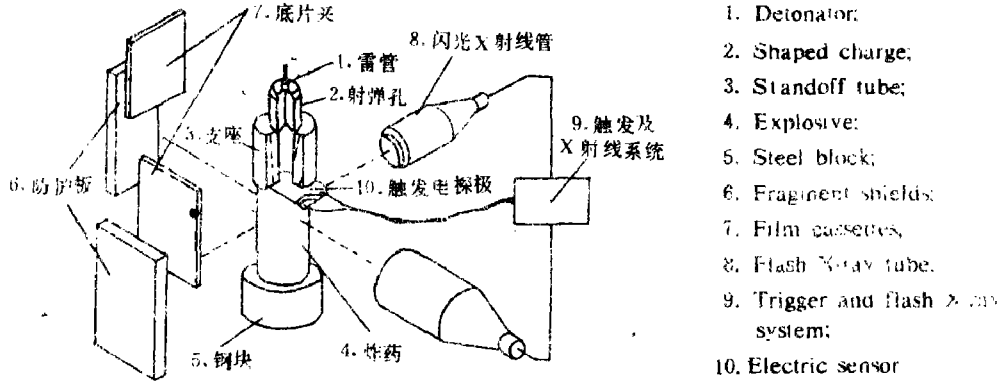


图 1 X光摄影实验装置

Fig. 1 X-ray flash photography experimental layout

侵彻规律。实验系统见图 2。电探极为两层厚 0.02mm 的铜箔,中间夹聚乙烯膜做绝缘层。两电探极靶距 20mm。所用仪器为 DM-902 瞬态记录仪。

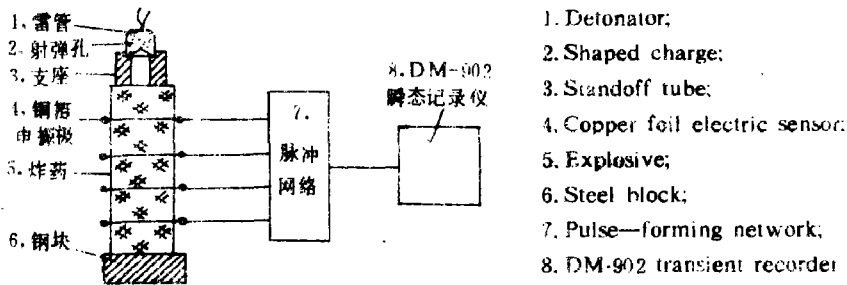


图 2 电探极-记录仪系统

Fig. 2 Electric sensor—recorder system

### 三、实验结果及分析

#### 1. 射流参数的测定

图 3 为射孔弹形成射流的 X 光照片,射流速度分布已由文献 [6] 给出,射流质量及能量分布采用传统方法进行测量,结果如图 4 所示。

#### 2. 射流引爆及模拟工业炸药过程的观测

实验系统见图 1。图 5(a)、(b)、(c) 是射流引爆铵油炸药的三张典型的 X 光照片。

图 5(a) 为射流侵入铵油炸药 5.5 $\mu$ s, 侵入深度为 27.75mm 时的 X 光照片。此时,在炸药内部,爆轰已经建立。图 5(b) 为射流侵彻炸药 10.5 $\mu$ s, 侵入深度为 48.5mm 时的现象,此时,爆轰波“附”在射流端部,形成一个近似锥形的“附体”爆轰波;图 5(c) 为射流侵入炸药 40.7 $\mu$ s, 侵彻深度为 88.7mm 时的情况,此时,爆轰波已脱离射流,以稳定爆轰速度自行传播,射流在爆轰产物中运动(从照片中看出,此时射流已经断裂)。

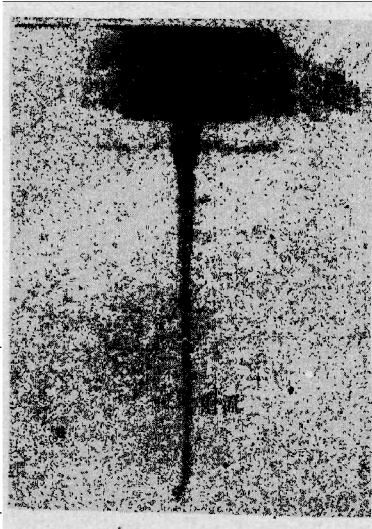


图 3 射流到达罩口部  
14.8 $\mu$ s 时照片

Fig. 3 Metal jet at 14.8 $\mu$ s

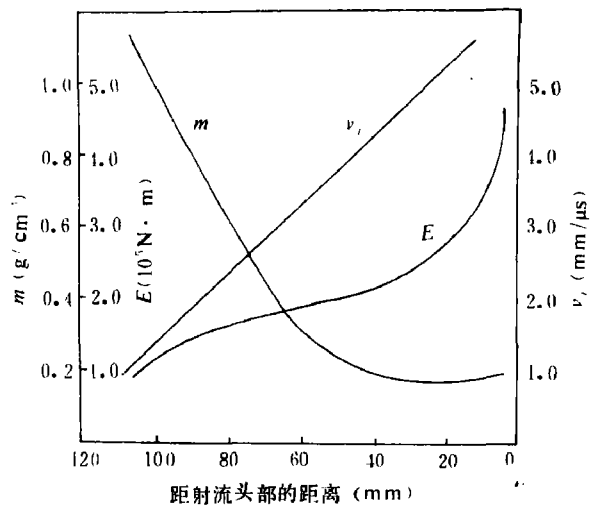


图 4 微元质量  $m$ 、能量  $E$  和速度  $v_j$  沿射流的分布 (19.5 $\mu$ s)

Fig. 4 Distribution of particle mass  $m$ , energy  $E$  and velocity  $v_j$  along the jet at 19.5 $\mu$ s

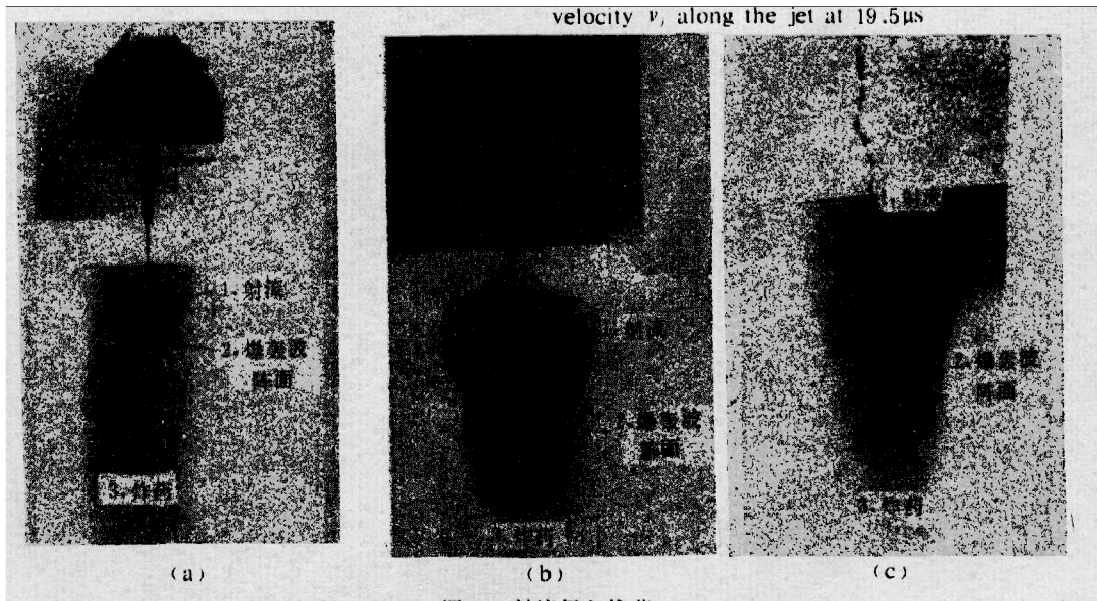


图 5 射流侵入炸药

(a) 5.5 $\mu$ s; (b) 10.5 $\mu$ s; (c) 40.7 $\mu$ s

Fig. 5 Jet penetration at (a) 5.5 $\mu$ s; (b) 10.5 $\mu$ s; (c) 40.7 $\mu$ s

1. Jet; 2. Detonation front; 3. Explosive

本文采用传统的方法对 X 光底片进行数据采集。图 6、图 7 为测量不同时刻的 X 光底片得到的射流起爆铵油及 2\* 岩石炸药的爆轰波的传播过程。整个侵彻及引爆过程的  $L-t$  曲线见图 8 和图 9 (其中  $L$  为侵彻深度,  $t$  为侵彻时间)。

从以上实验结果中可看到, 射流引爆工业炸药的过程是持续引爆过程。开始射流速度很高, 它在炸药中的侵彻速度大于炸药本身的 C-J 爆速, 形成如图 5 (b) 所示的附体爆轰波。

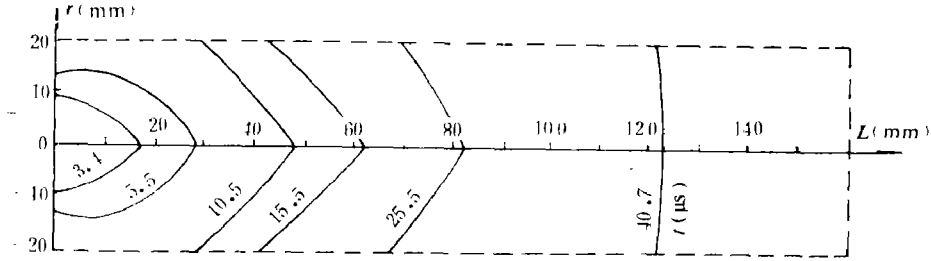


图 6 铵油炸药的起爆过程  
Fig. 6 The initiation process of ANFO

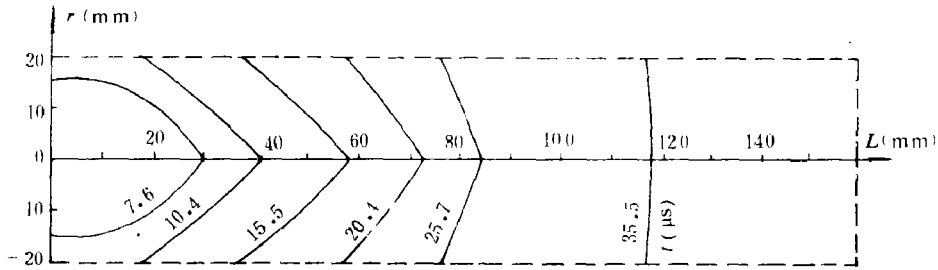


图 7 2号岩石炸药的起爆过程  
Fig. 7 The initiation process of Rock No. 2

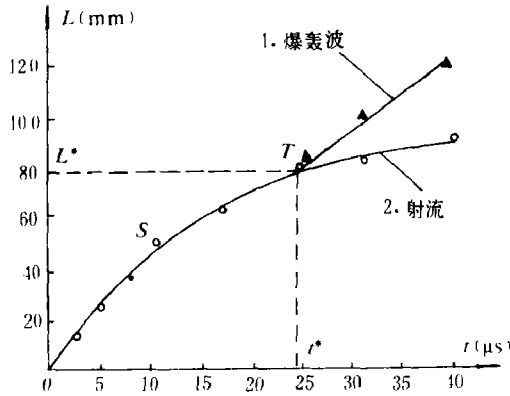


图 8 铵油炸药的侵彻及起爆过程  
Fig. 8 Process of penetration and initiation of ANFO in  $L-t$  diagram  
1. Detonation front; 2. Jet

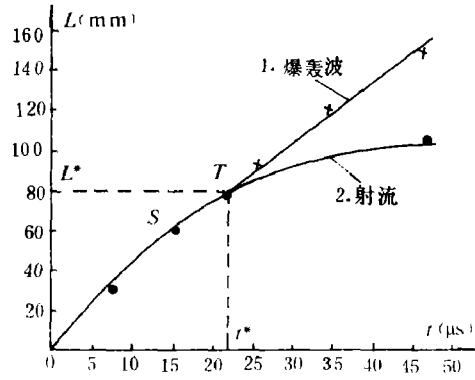


图 9 2号岩石炸药的侵彻及起爆过程  
Fig. 9 Process of penetration and initiation of Rock No.2 in  $L-t$  diagram  
1. Detonation front; 2. Jet

由于射流存在速度梯度，射流在炸药中的侵彻速度将逐渐减小。当侵彻速度小于炸药本身的 C-J 爆轰速度时，爆轰波开始脱离射流，以稳定的爆轰速度自行传播（如图 5(c) 所示）。

### 3. 聚能金属射流在工业炸药中的侵彻

应用准定常理想不可压缩流体力学理论,射流侵彻深度与侵彻时间有如下关系<sup>7</sup>

$$L = (H - b) \left\{ \left( \frac{t_0 - t_a + t}{t_0 - t_a} \right)^{1.0(1 + \sqrt{\rho_s / \rho_t})} - 1 \right\}$$

其中  $L, t$  ——侵彻深度及侵彻时间;  $H$  ——炸高;  $t_0$  ——射流从罩口部到达被发炸药的时间;  $b, t_a$  ——射流虚拟点源坐标;  $\rho_s, \rho_t$  ——射流及炸药密度。

计算用常数:  $H = 40\text{mm}$ ,  $b = 3.76\text{mm}$ ;  $t_0 = 6.4\mu\text{s}$ ;  $t_a = -0.5\mu\text{s}$ ;  $\rho_s = 0.85\text{g/cm}^3$ ;  $\rho_t = 8.9\text{g/cm}^3$ 。计算得到的铵油炸药的  $L-t$  曲线与实验结果比较如图10所示。

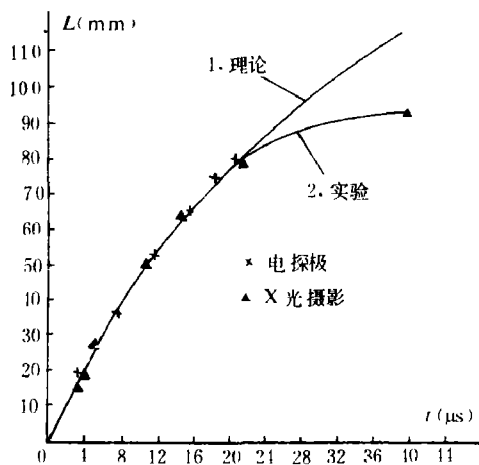


图10 射流侵彻铵油炸药的理论曲线与实验结果

Fig.10 Theoretical curve and experimental result of jet penetration in ANFO

1. Theoretical  
2. Experimental  
x—Electric sensor;  
▲—X-radiograph

图10表明,在射流侵彻前期,理论计算结果与实验结果非常吻合,而侵彻后期实验结果则偏离计算值。这主要是由于在侵彻前期射流速度很高,爆轰产物压力对射流侵彻的影响可忽略;而在后期,射流速度已很低,爆轰产物压力的影响不能忽略。特别是在射流侵彻35 $\mu\text{s}$ 后,射流已开始断裂,这时需对准定常理想不可压缩流体力学理论加以修正。

#### 4.射流引爆工业炸药临界条件的讨论

文献[2]指出,射流引爆高速猛炸药的临界条件为 $\rho v^2 d$ 。我们知道,一般军用猛炸药的C-J爆速在6000~8000m/s之间,射流在炸药中的侵彻速度远小于炸药的C-J爆速。因此,不存在持续引爆的情况,炸药是否爆轰,只取决于射流头部微元参数,而与后续射流无关。

在射流引爆低速的工业炸药时,因射流在炸药中的侵彻速度大于炸药的C-J爆速,炸药中将产生持续引爆。此时工业炸药的引爆不仅是射流头部的作用,而且是侵彻速度大于临界条件的那一段射流的综合作用,我们不妨把这段射流叫有效射流。所以射流引爆工业炸药的临界条件仅用射流头部微元参数 $\rho v^2 d$ 已不适用,应该考虑到有效射流段的作用加以修正。具体判据的提出还有待于进一步的工作。

## 四、结 论

(1) 高速金属射流引爆低速工业炸药的过程是持续过压引爆,炸药的爆轰分为有持过压引爆段及稳定爆轰段。

(2) 当射流速度较高(侵彻速度大于炸药的C-J爆速)时,射流在炸药中的侵彻规律

可用准定常理想不可压缩流体力学理论来描述。

(3) 用聚能射流引爆低速工业炸药的方案是可行的。

本文实验部分得到冯顺山, 万丽珍及欧阳向东的协助, 在此致谢。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Held, M., Initiating of Explosives, A Multiple Problem of the Physics of Detonation, *Explosives*, 5, (1968), 98.
- [ 2 ] Mader, C. L., Pimbley, G. H., and Bowman, A. L., Jet Penetration of Inerts and Explosives, LA-9527-MS (1982).
- [ 3 ] Chick, M. C., Hatt, D. J., The Initiation of Covered Composition B by a Metal Jet, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 8, (1983), 121.
- [ 4 ] Chick, M. C., Hatt, D. J., The Jet Initiation of Solid Explosives, *Eighth Symposium (international) on Detonation* (1985).
- [ 5 ] 江西德兴铜矿等, M-1工程起爆药柱定型文件, 私人通信 (1982).
- [ 6 ] 蔡景瑞等, 84-29型射孔弹研制报告, 私人通讯, (1984).
- [ 7 ] 北京工业学院八系编, 爆炸及其作用 (下), 国防工业出版社, (1979), 129.

## MECHANISM OF JET INITIATION AND PENETRATION OF COMMERCIAL EXPLOSIVES

Jiang Chunlan, Xu Gengguang, Ding Jing

(Beijing Science and Engineering University)

**ABSTRACT** The interaction of shaped charge jet and explosives has been studied since the sixties for military applications and safety considerations. It has been proved that the metal jet produced by a shaped charge is a powerful tool to initiate the military high explosives. The mechanism of jet initiation and the criteria for maintaining a propagating initiation were reported.

In this work, jet initiation of two commercial explosives ANFO and Rock No.2 (a mixture of 85% AN, 11% TNT and 4% wood flour) has been studied. X-ray flash photograph, multiple electric sensor system are used for diagnosis and data acquisition. The jet is produced by a shaped charge used for oil drilling with a copper liner of 60 degree cone angle and a standoff of 40 mm.

The characteristics of the copper jet have been studied in detail. The distribution of particle velocity, mass and energy along the jet at some instants were determined. The process of jet penetration and initiation were studied and the physical picture of the process is given. It is clear that the jet impact on the explosive is strong enough to induce detonation in ANFO and Rock No.2.

**KEY WORDS** jet initiation, penetration, detonation.