

# 射流引爆炸药的机制及临界判据

姜春兰·张宝铨

(北京理工大学力学工程系)

**摘要** 本文通过对国内外现有资料的调研、整理及分析,详细介绍了射流起爆高爆速炸药的过程、起爆机制及临界判据,此外,本文结合作者前期的工作,探讨了高速金属射流起爆低爆速炸药的过程及机制,并对射流起爆高爆速军用炸药与起爆低爆速工业炸药的不同特点进行了讨论。

**关键词** 射流引爆 爆轰 冲击波

## 1 射流引爆高爆速炸药的机制

射流起爆炸药一般分为射流直接引爆炸药和射流引爆覆盖金属隔板的炸药两种情况。射流直接引爆炸药的实验装置如图1所示。射流和炸药间的作用过程通过闪光X照相来记录。X射线同步借助于放在隔板和炸药间的扁平电传感器来实现。射流引爆有隔板炸药的研究可使用同一装置,通过在支座(炸高)与触发电探极间放一金属隔板来实现,调整隔板厚度可得到不同的射流出靶速度。

### 1.1 射流引爆覆盖金属隔板的炸药<sup>[1~3]</sup>

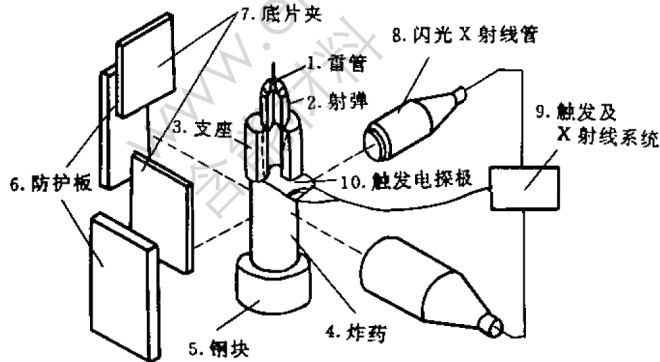


图1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

- 1—Detonator,
- 2—Projectile,
- 3—Supporting base,
- 4—Explosive,
- 5—Steel block,
- 6—Shielding,
- 7—Film holder,
- 8—Flash x-ray tube,
- 9—Trigger and x-ray system,
- 10—Trigger electrode.

已有的的研究结果表明,射流引爆覆盖金属隔板炸药的过程可综述如下:当射流头部与覆板发生碰撞时,将在碰撞点产生一曲面冲击波,此冲击波沿板向前传播,并逐渐衰减,

后续射流对覆板进行侵彻,在射流头部侵彻点则保持三高压状态,一般称此高压区为射流前驱波。射流撞击隔板产生的曲面冲击波、射流前驱波、射流头部三者将依次到达板与射流界面并进入炸药之中。研究表明,随着覆板厚度的不同,起爆机制也不同,炸药的起爆过程取决于下述射流/冲击波组合的相对重要性:

- (1) 射流撞击隔板产生的瞬时衰减冲击波;
- (2) 射流侵彻隔板产生的曲面冲击波(射流前驱波);
- (3) 射流侵入炸药产生的曲面冲击波。

对于薄板情况,射流与板高速碰撞产生的高压冲击波传至板与炸药界面时,衰减很少,该波先于射流进入炸药,并可在炸药表面附近引发爆轰。

随着板厚的增加,射流撞击隔板产生的冲击波幅值将有较大的衰减而不能将炸药引爆,此种情况下,炸药的起爆与否取决于射流侵彻隔板产生的曲面冲击波,即射流前驱波。板越厚,射流侵彻速度越小,进入炸药的前驱波强度随之减弱,起爆深入距离和延迟时间增加;当覆板厚度大于临界隔板厚度时,炸药将不能被引爆,只能产生局部的慢反应或由射流侵彻造成药柱的破坏。实验研究还表明,由于前驱波的预压缩作用,改变了炸药的性态,结果使炸药对射流的感度明显降低。如果设法消除前驱波的作用,炸药对射流的感度明显提高。文献[3]提供的下述实验足以证明这一点:选取大于临界隔板厚度的覆板,一个直接放在炸药表面上,一个和炸药表面留一空隙,每种情况点火十次,则发现前者一发也没引爆,而后者全部爆轰。另一个实验是空腔实验:选取大于临界厚度的隔板,直接放置在炸药表面上,点火后发现炸药不能被引爆。但如果在炸药内部设置一空腔,则发现射流运动到空腔下表面时把炸药引爆。以上实验足以证明前驱波对炸药有明显的钝感作用,从而阻止了后续射流的引爆。这时,炸药的起爆与否取决于前驱波的特性而不是射流的特性。

## 1.2 射流引爆裸装炸药<sup>[3-6]</sup>

起爆机制与有覆板的炸药的起爆机制不同,此时,炸药的起爆是由射流本身撞击炸药产生的曲面冲击波决定的。在起爆过程中,曲面波的重要性决定了射流的速度和直径是控制这一过程的主要因素,射流密度主要起控制侵彻速度的作用。较大直径的射流能产生头部较平的曲面波,该冲击波受稀疏波的影响较小,因而在起爆过程中更为有效。射流起爆裸装炸药,爆轰一般是在炸药表面附近展开。例如,在临界起爆条件下,射流起爆裸装 B 炸药,爆轰是在射流撞击炸药表面约几个毫米时出现的。而起爆临界隔板的 B 炸药,爆轰是在射流侵入炸药 40 mm 时出现的。射流起爆裸装炸药,如果射流撞击炸药时界面压力大于炸药本身的 C-J 压力,则在炸药中必将引发过压爆轰,而该爆轰能否传播下去,则取决于该过压爆轰衰减到 C-J 爆轰时,该爆轰是否扩展到炸药的临界直径。很显然,如果射流直径大于炸药本身的临界直径,则只要炸药界面压力大于 C-J 压力,一定能引发炸药产生爆轰。

## 2 射流起爆炸药的临界条件

目前,公认的射流引爆炸药的临界条件是 1968 年 Held 在归纳大量实验结果的基础上提出的  $V_j^2 D_j$  模型。 $V_j$  为射流头部速度, $D_j$  为射流头部直径。1985 年,Vigil M G<sup>[7]</sup>用修正了的一维飞片起爆模型作为射流起爆炸药的临界能量判据。

$$E_c = pu\tau = \rho u D_j / (6C_j) \quad (1)$$

其中:  $p$ 、 $u$ 、 $D_j$  和  $C_j$  分别为冲击波压力、未反应炸药的粒子速度、射流直径和射流材料中的声速。由冲击波的动量守恒及炸药的冲击压缩方程对上式稍加变换可得到如下形式:

$$E_c = \rho_c D_j u^2 (C_c + S_c u) / (6C_j) \quad (2)$$

式中:  $u = [-B + (B^2 - 4AC)^{0.5}] / (2A)$ ,  $A = (\rho_c S_c - \rho_j S_j)$ ,  $B = (\rho_c C_c + \rho_j C_j + 2\rho_j S_j V_j)$ ,  $C = -(\rho_j C_j V_j + \rho_j S_j V_j^2)$ ,  $\rho_c$ ——炸药密度,  $S_c$ ——炸药材料状态方程中的斜率,  $\rho_j$ ——射流密度,  $S_j$ ——射流材料状态方程中的斜率,  $C_c$ ——炸药中的声速,  $V_j$ ——射流头部撞击速度。

所以,临界能量  $E_c$  可以用射流撞击参数 ( $V_j$ 、 $D_j$ ) 和已知的射流、炸药参数 ( $S_j$ 、 $\rho_j$ 、 $C_j$ 、 $C_c$ 、 $S_c$ ) 来计算。

我们知道,不论用  $V_j^2 D_j$  值还是用临界能量值做为炸药的临界起爆条件,其临界值的确定必须基于大量的实验数据,这必将造成大量人力和物力上的损耗。既然  $V_j^2 D_j$  值对特定的炸药是常数,那么就能找出一种只基于已知的炸药参数来确定炸药的  $V_j^2 D_j$  值。文献 [7] 用量纲分析方法找出了射流/炸药的无量纲参数  $D_0 = \rho_j p_{c_j} / (\rho_c^2 D_c \cdot g)$ , 并用最小二乘法 and 已知的几种炸药的  $V_j^2 D_j$  实验数据导出了如下公式:

$$V_j^2 D_j = \{0.090 [\rho_j p_{c_j} / (\rho_c^2 D_c \cdot g)]^{0.753}\} \times 10^9 \quad (3)$$

其中:  $p_{c_j}$ ——炸药 C-J 压力,  $D_c$ ——炸药的临界直径,  $g$ ——重力加速度。

这样,只要已知炸药本身的参数及射流的密度就可知道该炸药的临界起爆值  $V_j^2 D_j$ 。

### 3 射流起爆低爆速炸药的机制

实验研究表明<sup>[8]</sup>,射流起爆低爆速炸药与起爆高爆速军用炸药具有明显不同的特点,实验得到的射流起爆低爆速工业炸药(铵油炸药)的典型的 X 光照片如图 2 所示。

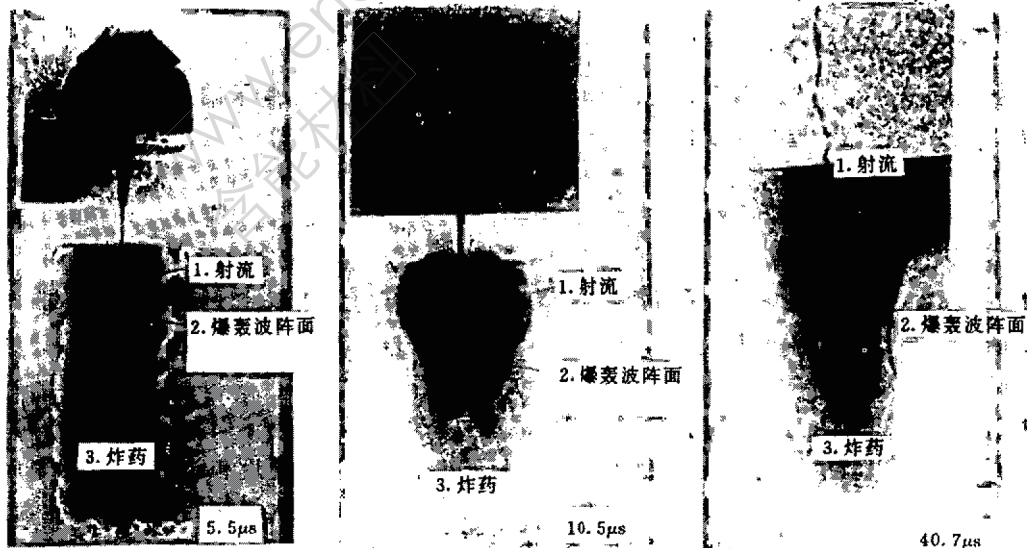


图2 射流起爆铵油炸药的脉冲 X 光照片

Fig. 2 Pulse X-ray photograph of initiating an ANFO explosive by jet

1——Jet, 2——Detonation front, 3——Explosive.

图3为从X光底片得到的射流起爆铵油炸药的爆轰波的传播过程。

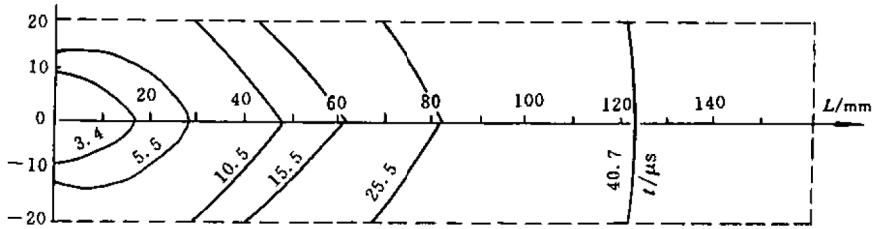


图3 铵油炸药的射流起爆过程

Fig. 3 The process of initiating an ANFO explosive by jet

由以上实验结果,射流引爆铵油炸药的过程可描述如下:当高速射流撞击到炸药表面时首先在炸药中产生一撞击冲击波,并激发炸药产生局部爆轰。但由于射流直径很小(约1.5 mm)而工业炸药的临界直径很大(约30 mm),因此,可以想见,由于起爆面积太小,该爆轰在扩展到炸药的临界直径以前就很快衰减了,该爆轰很难稳定传播下去。因此,单凭射流撞击炸药产生的冲击波很难建立起稳定传播的爆轰。所以此撞击冲击波不是激发炸药产生稳定爆轰的主要因素。实际上,由于炸药本身的C-J爆速较低(铵油、2号岩石等炸药的爆速约为2800~3200 m/s),小于射流在炸药中的侵彻速度,因此,后续射流侵彻炸药产生的曲面冲击波仍能起爆炸药,并在炸药中形成了有持过压爆轰,产生了如图2所示的附体爆轰波。有持过压爆轰的持续时间主要取决于高速段射流的长度及炸药的爆速。当射流在炸药中的侵彻速度小于炸药本身的爆速时,爆轰波将以C-J爆速自行向前传播(如图3所示)。

## 4 小结

4.1 射流起爆有隔板炸药的机制是:对于较薄板的情况,引起炸药爆轰的是射流撞击隔板产生的曲面冲击波。这种情况基本与小飞片撞击起爆模型相一致。

对于厚板情况,引起爆轰的是射流侵彻隔板产生的曲面冲击波,即射流前驱波。炸药的起爆与否取决于前驱波的性质而不是射流的性质。实验表明,射流前驱波对炸药有明显的钝感作用,从而阻碍了后续射流的引爆,这已被间隙实验和空腔实验所证实。

4.2 射流起爆裸装炸药的机制是:炸药的起爆与否取决于射流撞击炸药表面产生的曲面冲击波。此时,射流起爆炸药的临界条件为 $V_j^2 D_j$ (见式(3))或用临界起爆能 $E_c$ (见式(1)及(2))来表征。

4.3 射流引爆低爆速工业炸药的机制与引爆高爆速猛炸药不同。射流引爆高爆速炸药时,炸药爆轰与否只取决于射流头部微元参数,即只取决于射流头部速度和头部直径,而与后续射流无关。射流引爆工业炸药时,因射流在炸药中的侵彻速度大于炸药的C-J爆速,在炸药中将产生持续引爆,此时,工业炸药的引爆不仅仅取决于射流的头部微元,而是侵彻速度大于临界条件的那一段射流的综合作用,文献[8]把这一段射流叫有效射流。特别是由于工业炸药的临界直径较大(30 mm左右)而射流直径很小(1.5 mm),因此,炸药的临

界直径效应使得后续射流的作用对建立起持续传播的爆轰显得更为重要。在这种情况下,射流引爆工业炸药的临界条件仅用头部微元参数  $V_0^2 D_0$  就显得不够全面了,应考虑到整个有效射流段对起爆过程的贡献。

### 参 考 文 献

- 1 Chick M C, Hatt D J. The Mechanism of Initiation of Composition B by a Metal Jet. Seventh symposium (international) on Detonation, 1981.
- 2 Chick M C, Hatt D J. The Initiation of Covered Composition B by a Metal Jet. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1983, 8: 121
- 3 Chick M C, Hatt D J. The Jet Initiation of Solid Explosives. Eighth Symposium (International) on Detonation, 1985.
- 4 Held M. Initiating of Explosives. A Multiple Problem of Physics of Detonation, Explosivestoffe, 1968, 5: 98
- 5 Mader C L, Plimbley G H. Jet Initiation of Explosives, LA-8647, 1981.
- 6 Mader C L, Plimbley G H, Bowman A L. Jet Penetration of Inerts and Explosives, LA-9527, 1982.
- 7 Vigil M G. Explosive Initiation by Very Small Conical Shaped Charge Jets. Eighth Symposium (International) on Detonation, 1985.
- 8 姜春兰、徐更光、丁徽. 射流对工业炸药的引爆及侵彻机制. 爆炸与冲击, 1989, 9(4): 303

## MECHANISM AND CRITICAL CRITERION OF JET INITIATION EXPLOSIVES

Jiang Chunlan Zhang Baoping

(Dept. of Engineering Mechanics, Beijing Institute of Technology)

**ABSTRACT** In this paper, jet initiation mechanism and criterion of high detonation velocity explosives have been discussed in detail on the basis of investigating and analysing a number of references. Besides, jet initiation process of commercial low detonation velocity explosives also has been described. The different characteristics between jet initiation of high detonation explosive and commercial low detonation explosives have been analysed.

**KEY WORDS** jet initiation, detonation, shock wave.