

射弹倾斜撞击带盖板炸药引发爆轰的条件

方青 卫玉章 张克明

(西南流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理实验室 成都 610003)

张寿齐 赵玉华

(中国工程物理研究院 成都 610003)

摘要 用二级轻气炮发射圆柱形、球形射弹以不同的角度撞击带不同厚度钢盖板的 TNT/RDX(40/60)炸药, 得到了不同条件下引发炸药爆轰的阈值射弹速度。可以用 $vd^{1/2} = (1+k)[A+Bh/(d\cos\theta)]$ 描述临界引爆条件。对于带钢盖板的 TNT/RDX(40/60)炸药, $A=3.33, B=5.34$; 圆柱形平头射弹撞击, $k \approx \theta/75^\circ$, 球形射弹撞击, $k \approx 0.5 + 0.2(1/\cos\theta - 1)$ 。由此, 本研究将 Jacobs 引爆判据推广到了斜碰撞条件。

关键词 射弹 倾斜撞击 引爆判据

中图分类号 O381

1 引言

许多人研究过射弹撞击炸药引发爆轰的阈值条件, 给出了各种不同形式的引爆判据。当裸体炸药受到圆柱形平头射弹正向撞击时, 可用

$$vd^{1/2} = A \quad (1)$$

描述其临界引爆条件。式中: v 是射弹速度, d 是射弹直径, A 是与炸药和射弹材料有关的常数, 这就是有名的 Held 引爆判据^[1]。James 给出了与飞片引爆炸药相类似的射弹引爆炸药的临界能量判据^[2]。

当炸药表面覆盖金属板时, 随着盖板厚度的增加, 射弹引爆炸药的阈值速度增加, Slade 等^[3]和 Rosland 等^[4]实验得到圆柱形平头钢射弹正向撞击带钢盖板的 Comp. B 炸药引发爆轰的阈值速度随盖板厚度的变化近似呈线性关系, 可以用

$$vd^{1/2} = A + Bh/d \quad (2)$$

描述临界引爆条件。这是 Jacobs 判据的一种简化形式, 也是 Held 判据的一种推广, 式中 h 是盖板厚度, 由实验数据拟合。对于 Comp. B 炸药, $A=3.33, B=5.34$ (v 的单位取 km/s, d 和 h 的单位取 mm)。新近, James 等给出了圆柱形平头钢射弹撞击带钢盖板的 Comp. B 炸药的引爆临界速度的一组新数据^[5], 列于表1。James 等用“一维”和“二维”冲击引爆判据描述临界引爆条件, 与实验结果基本一致。取 $A=3.33, B=5.34$, 用(2)式计算 James 实验条件下的阈值速度, 也可以同样好地描述实验结果。

当射弹不是平头, 而是球头或尖头时, 引爆炸药所需射弹速度将提高, 可以用

$$vd^{\frac{1}{2}} = (1 + k)(A + Bh/d) \quad (3)$$

描述临界引爆条件,称为 Jacobs 判据。式中, k 是“尖头系数”,当射弹为平头时, $k=0$ 。Bahl 等曾用该判据计算射弹撞击带盖的 PBX-9404 炸药引爆阈值速度,与实验结果接近^[6]。

以上所述,都是射弹正向撞击带盖板炸药。实际上带盖炸药可能遭到射弹不同倾斜方向的撞击,这时阈值速度如何变化?用什么样的判据描述临界引爆条件?是我们关心的一个问题。我们采用二级轻气炮发射圆柱形、球形钢射弹,以不同倾斜角度撞击带钢盖板的 TNT/RDX(40/60)炸药,观测了不同条件下阈值速度的变化,引入盖板等效厚度概念,将(3)式所示 Jacobs 判据推广到倾斜撞击条件。并指出,此时, k 值不仅与射弹形状有关,而且与碰撞角 θ 有关。

表 1 圆柱形平头钢射弹正向撞击带钢盖板 Comp. B 炸药引发爆轰的阈值速度^[5]

Table 1 Detonation-initiating threshold velocity for normal impact of a truncated cylindrical steel projectile onto Comp. B explosive covered with a steel plate^[5]

钢盖板厚度 /mm	阈值速度* /(km/s)	James“一维”和“二维”冲 击引爆判据/(km/s)	Jacobs 线性判据 /(km/s)
0	0.89±0.04	0.95	0.92
1	0.99±0.02	0.98	1.03
2	0.96±0.04	1.05	1.14
3	1.21±0.03	1.12	1.25
5	1.45±0.05	1.34	1.48
6	1.60±0.05	1.55	1.59
7	1.70±0.05	1.73	1.70
8	1.93±0.07	1.81	1.81
9	1.85±0.01 ^[5]	1.91	1.93
10	1.99	2.00	2.04

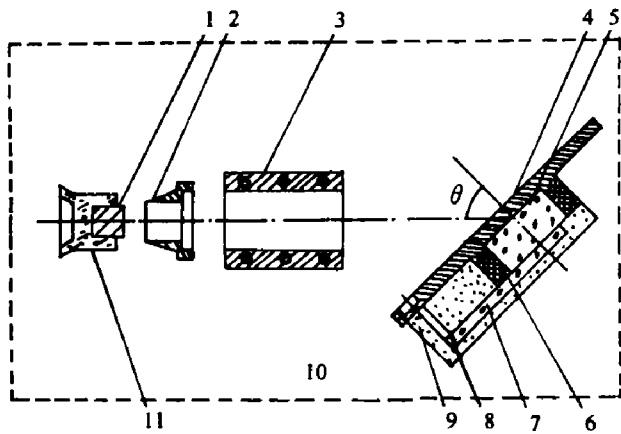
* 上限值为发生爆轰的最低速度,下限值为不发生爆轰的最高速度。

2 实验及其结果

我们作了用口径 37mm 的二级轻气炮发射射弹撞击带钢盖板的 TNT/RDX(40/60)炸药的实验研究,实验装置如图 1 所示。钢射弹长度与直径之比为 1,炸药药柱直径 40mm,厚度 20mm,密度 1.71g/cm³,每发实验由磁测速装置给出射弹速度。

设计了一种特殊的验证板方法,如图 1 中序号 6~9 所示。根据盖板上的盲孔击穿情况来判断炸药是否发生了爆轰。如果炸药样品发生爆轰,药条传播的爆轰波就会将盲孔击穿;炸药样品若不发生爆轰,药条中则不出现传播的爆轰波,盲孔不被击穿。

进行了 0°(正撞击)、15°、45°和 60°四种角度的撞击引爆实验,圆柱形平头射弹和球形射弹实验结果列于表 2。引爆阈值速度是发生爆轰的最低速度和不发生爆轰的最高速度的平均值。



- 1. 射弹;
- 2. 弹-托分离装置;
- 3. 磁测速装置;
- 4. 钢盖板;
- 5. TNT/RDX(40/60)炸药;
- 6. 聚四氟乙烯套;
- 7. TNT/RDX(40/60)药条;
- 8. PBX-HMX 药条;
- 9. 真空封泥;
- 10. 气炮靶室;
- 11. 弹托

1. Projectile; 2. Projectile-sabot separator; 3. Electromagnetic velocity gauge; 4. Steel cover plate; 5. Explosives(TNT/RDX=40/60); 6. Plastic tube; 7. TNT/RDX=40/60 explosive bar; 8. PBX-HMX explosive bar; 9. Paste for explosive bar-fixing; 10. Gun chamber; 11. Sabot

图 1 射弹倾斜撞击带盖板炸药实验装置

Fig. 1 Experiment observations for oblique impact of projectile onto plate-covered explosive

表 2 圆柱形平头和球形钢射弹撞击带钢盖板的 TNT/RDX(40/60)炸药引发爆轰的阈值速度

Table 2 Detonation-initiating threshold velocity for oblique impact of a cylindrical steel projectile onto TNT/RDX(40/60) explosive covered with a steel plate

射弹形状	序号	撞击角度 / (°)	射弹直径 /mm	钢盖板厚度 /mm	引爆阈值速度 / (km/s)	尖头系数 K
圆柱形平头	1	0	16.2	14	1.99±0.04	0
	2	15	16.2	9	1.99±0.08	0.25
	3	45	16.2	6	2.44±0.06	0.62
	4	45	20.4	12	2.70±0.10	0.57
	5	60	16.2	6	3.25±0.05	0.80
球形	1	0	16.67	6	1.91±0.06	0.49
	2	0	16.67	12	2.65±0.05	0.51
	3	15	16.67	6	1.96±0.10	0.50
	4	45	16.67	6	2.38±0.07	0.61
	5	45	18.34	6	2.12±0.04	0.57
	6	60	16.67	6	3.00±0.10	0.71

注: * 同表 1。

3 讨论

对于倾斜撞击,沿射弹速度方向盖板的厚度为 $h/\cos\theta$ (θ 为射弹飞行方向与盖板法线方向的夹角, h 为盖板厚度), 可用

$$vd^{\frac{1}{2}} = (1 + k)[A + Bh/(d\cos\theta)] \tag{4}$$

来描述引爆临界条件。由实验阈值速度得到不同撞击条件下的“尖头系数” k 值, 列于表 2 最后一列。计算中仍取 $A=3.33$ 和 $B=5.34$ 。

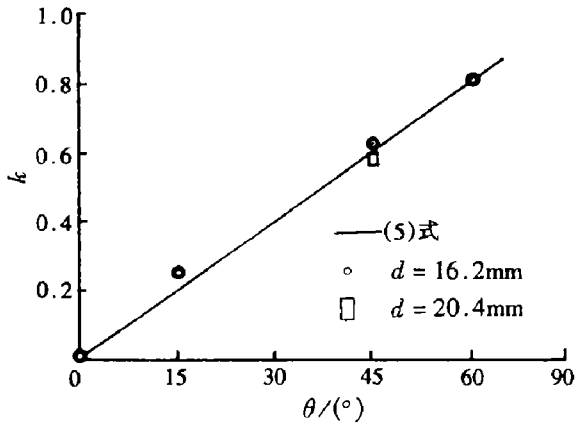


图2 圆柱形平头钢射弹引爆带钢盖板
TNT/RDX(40/60)炸药尖头系
数随撞击角的变化关系

Fig. 2 Tip coefficient dependence on attack angle θ for a truncated cylindrical steel projectile impacting onto TNT/RDX(40/60) explosive covered with a steel plate

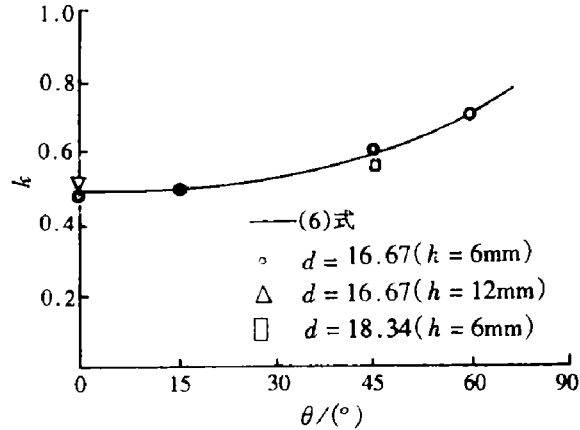


图3 球形钢射弹引爆带钢盖板
TNT/RDX(40/60)炸药尖头系数随
撞击角的变化关系

Fig. 3 Tip coefficient dependence on attack angle θ for a spherical steel projectile impacting onto TNT/RDX(40/60) explosive covered with a steel plate

圆柱形射弹 k 随 θ 的变化如图 2 所示,拟合实验数据得到。

$$k \approx \theta/75^\circ \quad (5)$$

结果表明,对圆柱形平头射弹,当 $\theta=0^\circ$ 时, $k=0$; 倾斜撞击时, k 随撞击角 θ 的增加近似呈线性增大。倾斜撞击与正撞击的撞击姿态不同,正撞击属于平头撞击,而斜撞击属于尖头撞击,后者比前者入射到盖板中的冲击波衰减更快,因而需要更大的撞击速度才能引爆炸药。

球形射弹尖头系数随角度的变化示于图 3。拟合实验数据得到。

$$k \approx 0.5 + 0.2(1/\cos\theta - 1) \quad (6)$$

比较图 2 和图 3,可见,球形钢射弹,在 $\theta=0^\circ\sim 30^\circ$, k 值变化不大;在 $\theta=45^\circ\sim 60^\circ$ 时, k 值明显增大,但比圆柱形平头射弹增加得稍微缓慢。

为了比较倾斜撞击和正向撞击引爆行为,表 3 给出了几种不同形状的射弹在正撞击条件下($\theta=0^\circ$)的实验结果。平头撞击, $k=0$,圆头和尖头撞击, $k=0.5\sim 0.7$ 。

球形射弹倾斜撞击带盖炸药,虽然都呈圆头撞击姿态,但引爆判据中的尖头系数 k 值随 θ 角的增大而增大,这表明按 $h/\cos\theta$ 计算倾斜撞击比正撞击需要更高的速度才能将炸药引爆。

射弹撞击带整体盖板炸药引发爆轰的主控机制是冲击引爆机制^[7],入射到炸药中的压力脉冲的时间、空间分布对引爆起决定性作用。倾斜撞击时,不仅使入射到炸药中的冲击压力峰值下降,也改变了入射压力脉冲的时空分布,即使将盖板厚度处理为 $h/\cos\theta$,仍与正冲击有显著差异。

k 本来是表示弹头形状的参数,对于一定半径的球形射弹来讲,正撞击和倾斜撞击都

是相同半径的圆头撞击,尖头系数 k 应该是相同的。保持 k 不变,而改变等效厚度来拟合实验数据,将会得到更有物理意义的倾斜撞击引爆判据。我们对此曾作过尝试,得到的等效厚度随角度 θ 变化的表示式较复杂一些。在工程应用中,由实验数据拟合得到的经验判据,其形式越简单,使用越方便,因而我们暂且保留了这种 k 随 θ 变化的简单形式。

表 3 不同形状钢射弹正向撞击($\theta=0^\circ$)带盖板 TNT/RDX(40/60) 炸药引爆阈值条件中的尖头系数

Table 3 Tip coefficient k for normal impact of steel projectiles onto TNT/RDX(40/60) explosives covered with a steel plate

序号	射弹形状	撞击姿态	射弹尺寸 /mm	钢盖板厚度 /mm	阈值速度* /(km/s)	垂直于飞行 方向的最大截面 等效直径/mm	尖头系数 k
1	圆柱平头	平头撞击	$\phi 16.2$	14	1.99 ± 0.04	16.2	0
2	圆柱尖头	尖头撞击	$\phi 16.2$ 尖角 83°	6	2.22 ± 0.08	16.2	0.68
3	球形	圆头撞击	$\phi 16.67$	12	2.65 ± 0.05	16.67	0.51
4	立方体	面撞击	$14 \times 14 \times 14$	12	1.85 ± 0.08	15.8	0
5	立方体	尖头撞击	$14 \times 14 \times 14$	6	1.93 ± 0.06	18.01	0.60

* 同表 1

射弹倾斜撞击带盖板炸药引发爆轰的数值计算是一个三维反应流体动力学问题, IAPCM 的李银成等人对这个问题作了初步数值计算,结果与本文中实验规律定性一致。

参 考 文 献

- 1 Held M. Initiation Phenomena with Shaped Charge Jets. 9th Int Symp on Det. 1989. 1416~1426
- 2 James H R, et al. Critical Energy Criterion for the Shock Initiation of Explosives by Projectile Impact. Propellants, Explosives Pyrotechnics, 1988, 13: 35~41
- 3 Slade D C, et al. High Order Initiation of Two Military Explosives by Projectile Impact. ARBRL-TB-1021, Ballistics Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1957
- 4 Roslund L A, et al. Initiation of Warhead Fragments I. Normal Impacts, NOLTR 73-124, Naval Surface Weapons Center, White Oak, 1973
- 5 James H R, et al. The Dependence of the Response of Heavily-Confined Explosives on the Degree of Projectile Penetration. 10th Int Symp on Det, Boston, Massachusetts, 1993, 89~93
- 6 Bahl K L, et al. The Shock Initiation of Bare and Covered Explosives by Projectile Impact. Seventh Int Symp on Det, Annapolis, Maryland, 1981, 858~868
- 7 Zhang Shouqi, Wei Yuzhang, Fang Qing, et al. An Investigation on the Projectile Impact Initiation Mechanism of Detonation in Explosive Charges Covered with a Thick Steel Plate. 15th Int Symp on Ballistics, Jerusalem, Israel, VZ, 1995, 423~429

ON THE PROJECTILE OBLIQUE-IMPACT INITIATION CONDITIONS FOR EXPLOSIVE COVERED WITH A PLATE

Fang Qing, Wei Yuzhang, Zhang Keming

*(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Southwest
Institute of Fluid Physics, P. O. Box 523, Chengdu, 610003)*

Zhang Shouqi, Zhao Yuhua

(China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 501, Chengdu, 610003)

ABSTRACT Cylindric and spherical steel projectiles were launched by using a two-stage light gas gun at LSD to impact onto an explosive charge (TNT/RDX=40/60) with a steel cover plate. Critical projectile velocity to initiate the detonation in the charge is obtained for various projectile attacking angles and different cover plate thicknesses.

Our experimental results show that we can use a modified or generalized Jacobs criterion

$$vd^{1/2} = (1 + k)[A + Bh/d\cos\theta]$$

to formulate the critical initiation condition for oblique impact. Here v is the projectile velocity, d is the projectile diameter, h is the plate thickness, θ is the attack angle, A and B are material parameters related to explosives and the cover plate (for steel plate-covered TNT/RDX=40/60 explosives, $A=3.33$ and $B=5.34$). k is a coefficient related both to the geometry of the projectile head and to the attacking angle θ . For truncated cylindrical steel projectile, $k \approx \theta/75^\circ$ and for spherical steel projectile $k \approx 0.5 + 0.2(1/\cos\theta - 1)$. We thus extend the Jacobs criterion to a form suitable for oblique impact.

KEY WORDS projectile, oblique impact, detonation initiation criterion.