

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.01.003

高能燃烧剂销毁金属壳体装药的安全压力计算^{*}

王 浩 方 向 郭 涛 丁 文 宋佳星

中国人民解放军陆军工程大学野战工程学院 (江苏南京,210007)

[摘 要] 为防止采用高能燃烧剂销毁带金属壳体的装药时发生燃烧转爆轰的现象,分析了装药燃烧转爆轰的机理,研究了装药燃烧时的壳体内部的压力变化情况,结合气体动力学压力关系式,推导了稳定燃烧时的压力计算表达式;以某型防坦克地雷为研究对象,计算了燃烧时的平衡压力,并结合试验分析了开孔直径与压力的变化关系。结果表明:燃烧产物质量生成速率曲线与产物排出速率曲线存在交点时,装药能够维持稳定燃烧,否则极易发生燃烧转爆轰现象。

[关键词] 高能燃烧剂;稳定压力;燃烧转爆轰

[分类号] TJ45+9

Safe Pressure Calculation of Explosives with Metal Shell Destroyed by High Energy Combustion Destruction Method

WANG Hao, FANG Xiang, GUO Tao, DING Wen, SONG Jiaxing

Field Engineering College ,Army Engineering University of PLA (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] To prevent the occurrence of deflagration to detonation transition when explosives with metal shell were destroyed by the high energy combustion destruction method, mechanism of deflagration to detonation transition was analyzed, and interior pressure change of the shell when the explosives were burning was studied. Aerodynamic pressure relation was combined to deduce the stable combustion pressure calculating expression. One kind of anti-tank mines was used as the subject of research, equilibrium pressure during combustion was calculated. Relationship between the aperture and interior pressure was analyzed according to the experiments. The results show that the explosives could combust steady when intersection of the product formation rate curve and discharge rate curve exists. Otherwise, it is prone to result in the phenomenon of deflagration to detonation transition.

[KEYWORDS] high energy combustion destruction; steady pressure; deflagration to detonation transition

引言

燃烧销毁法是销毁废旧弹药的一种常用方法。除了中小型口径枪弹外,普通的燃烧销毁法并不适用于其他大多数带有金属壳体的弹药,而采用高能燃烧剂则更加适用。该方法由高能燃烧剂产生的极高热量在短时间内熔穿弹药金属壳体,进而使内部装填的炸药燃烧殆尽,达到销毁的目的。

炸药的安全燃烧是采用高能燃烧法销毁废旧弹药的一项基本要求。如果炸药在燃烧销毁的过程中发生爆炸,则会产生各种爆破危害效应,不能满足燃烧销毁的安全需求。因此,很有必要对弹药壳体穿

孔后内部装药的安全燃烧条件进行研究。

根据燃烧转爆轰的发生原理^[1],燃烧转爆轰必须在爆轰发生之前形成冲击波,这种冲击波是爆轰形成的直接原因。转变过程可以区分为3个阶段:

- 1)在燃烧波阵面后压力急剧增大,压力加速上升产生压缩波,它穿过燃烧波阵面进入未燃烧的炸药中;
- 2)压缩波在火焰阵面前头的未燃烧炸药中汇合,形成冲击波;
- 3)冲击波诱发爆轰反应^[2]。

当凝聚炸药燃烧加速进行时,凝聚相表面气化的速度不断增加,由于气体产物的加速生成,前面的气体产物还未来得及扩散,而后面的气体产物就已

^{*} 收稿日期:2017-05-15
作者简介:王浩(1994-),男,硕士研究生,主要从事兵器科学与技术研究工作。E-mail:714843157@qq.com

压缩过来,这样就在前面的气体产物中形成压缩波。随着燃烧不断加速进行,气体产物中的这些压缩波逐渐叠加形成冲击波,当冲击波达到一定强度时,就导致炸药由燃烧转为爆轰^[3-5]。

Leuret 等^[6]研究了不同约束条件下压装炸药燃烧转爆轰试验,表明在强约束下才有可能发生燃烧转爆轰;陈朗等^[7]根据高密度炸药状态,建立了炸药燃烧转爆轰模型,利用数值模拟进行计算,结果显示,炸药的反应程度和燃烧转爆轰趋势随着约束强度的增加而增加。因此,对于在密闭金属空间中的主装药,采用高能燃烧剂销毁时必须对其内部压力进行有效控制,确保炸药的安全燃烧,防止发生燃烧转爆轰现象,而降低外界约束是控制内部压力的最有效方法。

实际销毁作业中,通常采用高能燃烧剂燃烧才能在废旧弹药金属壳体上迅速开孔来控制内部压力。易建坤等^[8-10]系统地研究了铁铝高能燃烧剂在薄壁弹药销毁方面的配方与应用。当弹药金属壳体上被熔出一定面积的孔洞,就可使内部装药燃烧产生的大量气体产物排出,避免由壳体内气体的过度积聚导致压力急剧上升,从而防止内部装药发生燃烧转爆轰。

本文中,笔者从理论上研究了弹药装药在开孔的金属壳体中燃烧时压力的变化情况,推导了装药能够稳定燃烧时壳体内部的压力计算公式,并以某型防坦克地雷为例,计算了壳体内部燃烧的稳定压力,再通过对稳定压力公式的分析和讨论,绘制了质量生成速率与质量排出速率曲线,进而研究了高能燃烧开孔尺寸与壳体内部稳定压力的关系,为高能燃烧销毁技术中有效控制装药在金属壳体中燃烧时的压力提供了理论依据,并通过试验进行验证。在实际销毁作业中,也为高能燃烧法销毁器^[11-12]设置方法以及高能燃烧剂的最小使用量提供了一定的理论参考。

1 炸药燃烧压力的推导

1.1 基本假设

根据试验记录,使用高能燃烧剂销毁某型防坦克地雷时,稳定燃烧阶段的时间较长。通常,一颗地雷的平均燃烧时间不少于 10 min,为了便于计算,先假定稳定燃烧过程所有介质的状态保持稳定,内部压力和燃速也保持稳定。此外,还必须有以下基本假设:

1) 燃烧产物为完全气体,满足完全气体的状态

方程;

2) 主装药的燃烧服从燃烧定律^[13];

3) 壳体内部的燃烧产物均匀分布且状态处处相同。

1.2 理论推导

当炸药燃烧稳定时,壳体内燃烧反应生成气体的速率应当等于燃烧产物排出的速率。根据该质量守恒条件,可以得到

$$\frac{dm_r}{dt} = m_b - m_t \quad (1)$$

式中: $m_b = \rho A_b \bar{r}$; $m_r = \bar{\rho} V$; ρ 、 $\bar{\rho}$ 分别表示炸药密度和燃烧产物平均密度; A_b 表示炸药燃烧面积; m_r 、 m_b 、 m_t 分别表示壳体内燃烧产物质量、生成质量和排出质量; V 表示燃烧产物占有体积。

对式(1)微分后可以得到

$$\frac{dm_r}{dt} = \bar{\rho} \frac{dV}{dt} + V \frac{d\bar{\rho}}{dt} \quad (2)$$

说明壳体内燃烧产物的质量变化由两部分组成,其中, $\bar{\rho} dV/dt$ 表示单位时间内填充由于装药燃烧而增加的容积所需的燃烧产物质量; $V d\bar{\rho}/dt$ 表示单位时间内改变燃气密度所需的燃气质量。结合完全气体状态方程,可以综合得到:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \frac{dV}{dt} + V \frac{d\bar{\rho}}{dt} &= m_b - m_t = \rho A_b \bar{r} - m_t \Leftrightarrow \\ \bar{\rho} A_b \bar{r} + \frac{V d\bar{\rho}}{RT dt} &= \rho A_b \bar{r} - m_t \Leftrightarrow \\ \frac{V d\bar{\rho}}{RT dt} &= A_b \bar{r} (\rho - \bar{\rho}) - m_t \end{aligned} \quad (3)$$

式中: T 为燃烧产物的温度; \bar{p} 为壳体内部的压力。由于炸药的燃烧符合指数燃速定律,并且在实际的燃烧过程中,燃烧产物的密度远小于装药密度, $\bar{\rho} < (1\% \sim 2\%) \rho$,因此忽略不计,式(3)可简化为:

$$\frac{V d\bar{\rho}}{RT dt} = A_b \rho (a + b\bar{p}^n) - \bar{m}_t \quad (4)$$

式中: \bar{m}_t 表示单位时间内排出燃烧产物的质量。从开口截面观察燃烧产物的流动情况,根据完全气体状态方程可得:

$$\bar{m}_t = \frac{p_0}{RT_0} \mu A \quad (5)$$

式中: μ 为质点平均速度; A 为开孔面积; p_0 和 T_0 为排出气体的压力和温度。

装药在壳体内燃烧产生大量的气体和热量,由于气体的堆积和高温会使壳体内部的压力高于外界的大气压,燃烧产物就会从开孔中迅速排出,使壳体内部的压力下降。当燃烧稳定时,壳体内部的压力是稳定的。壳体内气体的排出过程,可以看作是气体的等

熵膨胀过程。外界稀疏波侵入壳体内的燃烧产物会膨胀到与外界等压为止。因此,波后的压力可以认为是已知的,波后压力决定于周围的环境压力,气体动力学中稀疏波波前、波后的压力关系式为^[14]:

$$\begin{cases} \rho_2 = \rho_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} \frac{u_2 - u_1}{c_1} \right)^{\frac{2}{k-1}}; \\ T_2 = T_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} \frac{u_2 - u_1}{c_1} \right)^2; \\ p_2 = p_1 \left(1 + \frac{k-1}{2} \frac{u_2 - u_1}{c_1} \right)^{\frac{2k}{k-1}}. \end{cases} \quad (6)$$

式中:下标为 1 的表示波前参数;下标为 2 的表示波后参数。

在燃烧稳定后,波后压力为正常的大气压力。燃烧产物在壳体内无序的运动可看作平均速度为 0 的一团产物。由于稀疏波的作用,质点飞散速度是稀疏波传播的相反方向。根据波前和波后的状态参量关系式,将质点速度 u 与壳体内压力 p 的关系代入可得:

$$\bar{m}_1 = \frac{\bar{p}}{RT} A \frac{2c}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (7)$$

将式(7)代入式(4),得到压力公式的计算表达式:

$$\frac{V}{RT} \frac{d\bar{p}}{dt} = A_b \rho (a + b\bar{p}^n) - \frac{\bar{p}}{RT} A \frac{2c}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (8)$$

当燃烧稳定的时候,壳体内的压力保持不变,即 $d\bar{p}/dt = 0$,因此可以得到:

$$A_b \rho (a + b\bar{p}^n) = \frac{\bar{p}}{RT} A \frac{2c}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (9)$$

式中: p 为波前压力; \bar{p} 为波后压力。

这就是燃烧稳定时壳体内的压力理论计算公式。

2 稳定压力的求解

试验使用的某型防坦克地雷为装药高度 10 cm、直径 30 cm 的圆柱形梯黑熔铸装药,稳定燃烧遵循几何燃烧定律,燃烧的最大横截面积小于等于圆柱的直径剖面。燃烧温度由反应方程式计算得到,将所有热量损失考虑在内,假设全部通过开孔排出,认为 TNT 燃烧反应放出的热量全部传递到燃烧产物中。并根据完全气体状态方程计算燃烧产物的初始音速,根据试验测量结果,认定开孔直径是 4

cm 的圆孔。利用盖斯定律及 TNT 燃烧反应方程式获得参数,见表 1。

表 1 某型防坦克地雷壳体内部
稳定压力计算参数

Tab. 1 Interior Stable Pressure Parameters
of the one kind of anti - tank mines

参数	数值
A_b (炸药燃烧面积)/m ²	0.03
a /(cm · s ⁻¹)	0.009
n	1
T (产物初始温度)/K	3 151
c (产物中音速)/(m · s ⁻¹)	1 219
p_0 (标准大气压力)/Pa	10 ⁵
ρ (炸药密度)/(kg · m ⁻³)	1 600
b /[cm · (s × 10 ⁵ Pa) ⁻¹]	0.05
R (气体常数)/[J · (kg × K) ⁻¹]	337
A (排气孔面积)/m ²	7.065 × 10 ⁻⁴
k (绝热指数)	1.4

将表 1 中的参数代入式(9),计算得出 $\bar{p} = 246$ 750 Pa 或 $\bar{p} = 687$ 979 Pa。

3 稳定压力公式分析与讨论

观察稳定压力公式(8),可以发现等式各项表达式的含义。当稳定燃烧时,波前压力等于波后压力。等式左边表示压力变化的趋势,当 $d\bar{p}/dt > 0$ 时,压力将随时间而上升;当 $d\bar{p}/dt < 0$ 时,压力将随时间而下降;当 $d\bar{p}/dt = 0$ 时,压力将处于稳定状态。等式右边是产物质量的生成速率与排出速率之差,其中,前半部分 $A_b \rho (a + b\bar{p}^n)$ 表示产物质量的生成速率,后半部分 $\frac{\bar{p}}{RT} A \frac{2c}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{k}}$ 表示产物质量的排出速率。

令 $y_0 = \frac{\bar{p}}{RT} A \frac{2c}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{k}} - A_b \rho \cdot (a + b\bar{p}^n)$, $y_1 = A_b \rho (a + b\bar{p}^n)$, $y_2 = \frac{\bar{p}}{RT} A \frac{2c}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] \left(\frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{\frac{1}{k}}$,利用表 1 的数值,作出 y_0 、 y_1 、 y_2 关于 \bar{p} 的曲线,得到质量生成速率与质量排出速率曲线,如图 1 所示。

根据图 1 中的曲线,可以分析出壳体内压力的变化过程。曲线 y_1 表示燃烧产物质量生成的速率,是一条直线,取决于炸药的自身特性。曲线 y_2 表示燃烧产物质量排出速率,是一条上凸的曲线,燃烧产物排出的速率受燃烧产物的成分、温度、外界气压和

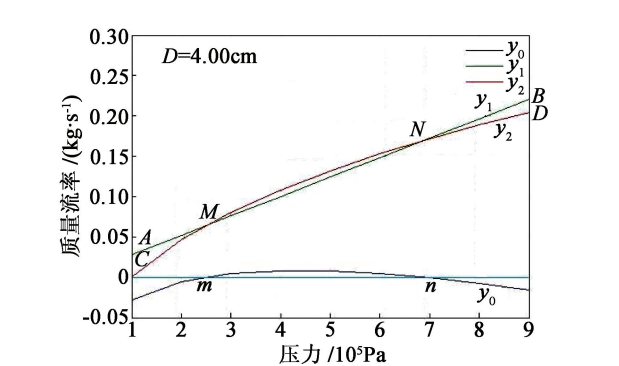


图1 质量生成速率与质量排出速率曲线

Fig.1 Mass generation rate and discharge rate curves

开孔面积的影响。曲线 y_0 表示产物生成速率与产物排出速率之差,曲线与横坐标轴的交点 m 、 n 即为平衡压力,与曲线 y_1 、 y_2 的交点 M 、 N 相对应。在燃烧初始状态,处于曲线 AM 段和 CM 段时,燃烧产物的质量生成的速率高于产物排出的速率,燃烧产物在壳体内堆积,压力逐渐上升。随着压力的增长,燃烧产物质量的生成速率速度小于排出速率,当达到 M 点时,燃烧产物质量的生成速率和排出速率相等,处于平衡状态,壳体内部的压力降稳定于 M 点处的压力。当燃烧的初始状态处于曲线的 MN 段时,燃烧产物质量的生成速率小于排出的速率,壳体内燃烧产物的质量将会下降,壳体内部的压力也随之下

降,当压力降到 N 点时,燃烧产物质量生成速率又和排出速率相同,压力稳定在 N 点处。当燃烧状态处于 NB 段和 ND 段时,燃烧产物质量的生成速率大于排出速率,并且燃烧产物质量生成速率随压力的增长速度也大于排出产物速率随压力的增长速度,随着压力的增大,两者之间差距越来越大,壳体内压力不断上升。当壳体内压力达到一定值时,装药发生燃烧转爆轰现象。

因此, M 点处的压力是一个稳定的压力,当炸药燃烧状态处于 M 点附近时,会自动调整到 M 点处的状态。而 N 点是一个临界值,当壳体内压力小于 N 点处压力,会逐渐稳定到 M 点的状态,但如果大于 N 点处的压力,壳体内部的压力会逐渐增加,极易发生爆轰现象。

曲线 y_2 的位置和形状受多种因素影响,其中外界约束为主要影响因素。改变开孔的面积,曲线 y_1 和 y_2 的相交情况就会发生改变,如图2所示。

开孔直径下降时, M 点位置上移, N 点位置下移。当开孔的直径降低为3.88 cm时,两点重合到一起,即曲线 y_1 、 y_2 只有一个交点,此时两曲线相切;当开孔直径降低为3.50 cm时,曲线 y_1 、 y_2 没有交点,也就是说燃烧产物生成的速率始终大于产物排出的速率,壳体内部的压力始终处于上升状态,这种

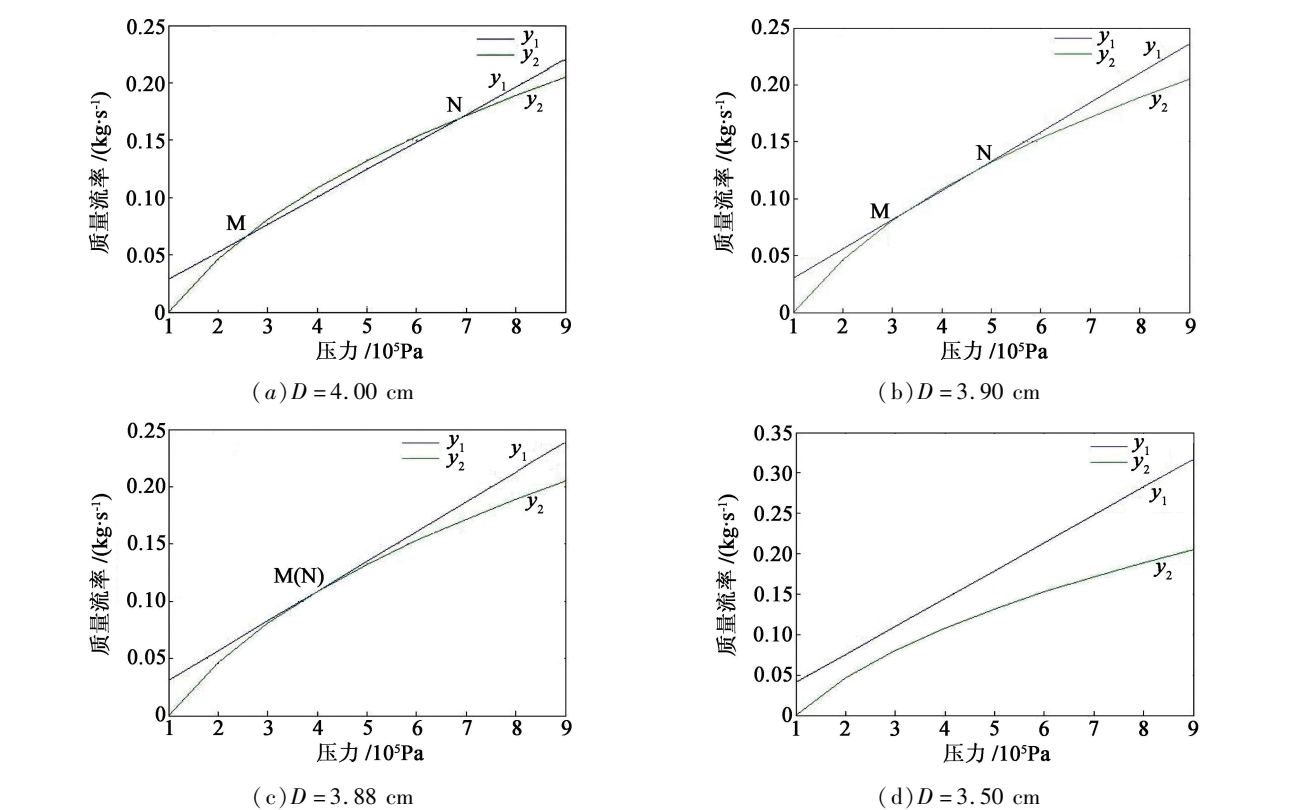


图2 不同孔径下质量生成速率与排出速率曲线

Fig.2 Mass generation rate and discharge rate curves under different apertures

情况下极易发生燃烧转爆轰的现象。

4 试验

4.1 模拟地雷试验

普通防坦克地雷的主装药为 TNT 或梯黑混合熔铸炸药,药量 5 kg 左右。直接用实际地雷试验,成本较高、风险大,因此设计了与地雷主装药一致的模拟地雷进行试验,验证高能燃烧剂在融穿地雷壳体之后能否可靠点燃主装药,主装药能否在密闭的容器中安全燃烧。

模拟地雷的外壳由钢制成,材料的机械性能与普通地雷外壳的性能相同。与高能燃烧剂作用的一面为厚度 2 mm 的钢板,其他地方的厚度均远远大于 2 mm,钢板与下面壳体使用螺栓连接,使用耐高温胶密封。模拟地雷的内部密封有一个 200 g 的 TNT 药块,与一般地雷的主装药成分相同。

使用铁铝高能燃烧剂对模拟地雷进行销毁试验,模拟地雷埋置于土中,高能燃烧剂放置于模拟地雷上方,由于 100 g 铁铝高能燃烧剂对钢板的穿孔能力不能达到炸药安全燃烧的条件,因此将高能燃烧剂质量调整为 200 g。使用电点火方式进行点火。高温熔渣融化了金属外壳后,点燃了模拟地雷的内部主装药。主装药安全稳定燃烧(未转爆轰),从孔洞处喷出火焰并冒出浓烟,剩余壳体保存完好。整个燃烧过程持续约 28 s。试验后测量孔径约为 3.9

cm。见图 3。

4.2 金属外壳地雷销毁试验

销毁金属外壳地雷使用单个铁铝高能燃烧剂装药,药量为 200 g。使用的地雷为某型铁壳防坦克地雷,外壳为 2 mm 厚的铁皮,药量约为 5 kg。整个销毁试验的现象使用摄像机录制。试验使用电点火方式点燃高能燃烧剂,点火位置距离地雷约 500 m。

从远程监控摄像头所拍摄到的地雷销毁燃烧视频中(截图见图 4)观察到,试验中装药燃烧的过程基本一致,高能燃烧剂顺利点火,10 s 内在地雷壳体上形成孔洞,试验后测量孔径约为 4 cm。高温熔渣点燃了地雷的内部主装药,主装药安全燃烧,并从孔洞处喷出火焰,冒出浓烟,剩余地雷壳体保存完好。主装药燃烧约 660 s,燃烧过程中,由于壳体内部压力大,火焰呈喷射状从壳体的穿孔中喷出。

5 结论

根据气体动力学及相关燃烧的理论^[15],从理论上推导了装药在壳体内燃烧时压力计算表达式,再由试验进行了验证。通过对平衡压力的求解以及对稳定压力公式的分析,并结合试验具体情况,可以得出结论:

要使装药在壳体内稳定燃烧,其内部压力必须处于一个稳定的状态。反应到试验中,即排出气体速率必须大于生成气体速率才可以保证不会发生燃



图 3 高能燃烧剂销毁模拟地雷
Fig. 3 Simulated mine destroyed by termite



图 4 高能燃烧剂销毁金属地雷
Fig. 4 Metal mine destroyed by termite

烧转爆轰。

所以,对于一种特定的装药结构,存在一个使炸药安全燃烧的最小开孔面积。当 y_1 、 y_2 两曲线相切时即对应最小开孔面积。由于炸药本身装药结构和装填不均匀性等原因,燃烧时可能存在一定程度的压力波动。因此,为确保装药能够安全燃烧,开孔的面积应该略大于最小开孔面积,在条件允许的情况下,应尽可能大一些。即曲线 y_1 、 y_2 应当有交点,而只有当开孔面积必须大于某个值时,才能保证曲线 y_1 、 y_2 有交点存在。若开孔面积小于最小开孔面积,内部压力则无法达到稳定,会不断升高,最终极易形成冲击波,从而导致燃烧转爆轰现象的发生。

燃烧稳定时壳体内部的压力理论计算公式不仅适用于某型防坦克地雷燃烧销毁时内部压力的计算,也适用于多种不同装药类型和装药结构的弹药计算。使用时,只需根据具体的弹药装药参数计算表 1 中的参数即可,适用范围广,在理论指导和销毁实践上具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 张超,马亮,赵风起,等. 含能材料燃烧转爆轰研究进展[J]. 含能材料,2015,23(10):1028-1036.
ZHANG C, MA L, ZHAO F Q, et al. Review on deflagration-to-detonation transition of energetic materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23 (10): 1028-1036.

[2] 彭培根. 燃烧转爆轰过程及机理[J]. 火炸药, 1982, 5 (1):21-28.

[3] 荣光富. 燃烧与爆炸相互转换试验及应用研究[D]. 南京:南京理工大学,2006:17-31.
RONG G F. Experiments and application research about the deflagration-to-detonation transition [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006:17-31.

[4] 杨涛,金志明,栗保明. 高装填密度火药颗粒床燃烧转爆轰的数值分析[J]. 兵工学报弹箭分册, 1991 (3):14-22.

[5] 王建,文尚刚. 以 HMX 为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23 (6):441-446.
WANG J, WEN S G. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in two pressed high-density explo-

sives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23 (6): 441-446.

[6] LEURET F, CHAISSE F, PRESLES H N. Experimental study of the low velocity detonation regime during the deflagration to detonation transition in a high density explosive [C]//Proceedings of the 11th Symposium (International) on Detonation. Colorado,1998.

[7] 陈朗,王飞,伍俊英,等. 高密度压装炸药燃烧转爆轰研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 697-704.
CHEN L, WANG F, WU J Y, et al. Investigation of the deflagration to detonation transition in pressed high density explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6): 697-704.

[8] 易建坤,贺五一,吴腾芳,等. 高热剂在弹药销毁领域应用初探[J]. 工程爆破, 2004, 10(4):21-25.
YI J K, HE W Y, WU T F, et al. Preliminary investigation into application of thermite in destruction of ammunition [J]. Engineering Blasting, 2004, 10(4):21-25.

[9] 易建坤,吴腾芳,贺五一. 用于弹药燃烧销毁的高热剂配方试验研究[J]. 爆破, 2005, 22(1):107-111.
YI J K, WU T F, HE W Y. Experimental study on the composition of thermite applied in the ammunition disposal [J]. Blasting, 2005, 22(1):107-111

[10] 易建坤,吴腾芳. 高热剂燃烧法销毁薄壁弹药的试验研究[J]. 火工品, 2005(1):17-21.
YI J K, WU T F. Experimental study on disposal of thin-shell ammunition by thermite combustion [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2005(1):17-21.

[11] 王泽山,张丽华,曹欣茂. 废弃火炸药的处理与再利用[M]. 北京:国防工业出版社,1994.

[12] SONG E. Thermite destructive device:US 5698812[P]. 1997-12-16.

[13] 王保柱. 火药实用燃烧定律[J]. 弹道学报, 1991 (2):15-23.
WANG B Z. The practical combustion-law of gunpowder [J]. Journal of Ballistics, 1991(2):15-23.

[14] 叶序双. 爆炸作用基础[M]. 南京:解放军理工大学工程兵工程学院,2003(2):45-70.
YE X S. Foundation of explosion [M]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2003(2):45-70.

[15] 张涵信. 近代高速气体动力学现状[J]. 力学学报, 1963, 6(4):249-286.
ZHANG H X. Modern developments in recent high-speed aerodynamics [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1963, 6(4):249-286.