

凝聚相炸药爆炸残留物形成机制分析及残留量估算

王曙光¹, 杨力², 易建坤¹

(1. 解放军炮兵学院, 安徽 合肥, 230031; 2. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京, 210007)

摘要: 针对固态凝聚相炸药正常爆轰情况下仍会产生一定质量的残留物分布现象, 从爆轰物理学的角度对凝聚相炸药爆炸残留物形成的两个重要内在机制——拐角效应和边界效应进行了分析。依据爆轰物理临界直径理论和相关基于试验数据的拟合公式, 对边界效应产生的残留物量进行了理论意义上的估算, 获得了有关残留物比例与装药质量和装药爆速关系的若干结论, 且与已有的试验现象相符。

关键词: 凝聚相炸药; 爆炸残留物; 内在机制

中图分类号: TQ564 **文献标识码:** A

Analysis on Origin and Quantity of Explosive Residues of Solid Condensed Explosive

WANG Shu-guang¹, YANG Li², YI Jian-kun¹

(1. Artillery Academy of PLA, Hefei, 230031; 2. Engineering Institute of Engineer Corps PLA, University of Sci.&Tech., Nanjing, 210007)

Abstract: To explain the existence of explosive residue of condensed explosive even detonating in normal state, the analysis on two inherent mechanism of coming into being of explosive residue, such as corner effect and boundary effect, has been proceed in view of detonation physics. On the basis of critical diameter theory in detonation physics and experiential equations, the quantity of explosive residues which come into being because of boundary effect are estimated. Some conclusions on relation between proportion of explosive residues and quality or detonation velocity of explosive charge are drew and match some experimental phenomena well.

Key words: Condensed explosive; Explosive residues; Inherent mechanism

未反应或反应不完全的炸药残留物的存在是炸药爆炸的基本现象之一, 它是目前从爆炸事件现场中获取有关炸药类型信息最重要的物证来源。目前关于爆炸残留物的研究进行地较广泛, 但是很少有涉及到爆炸残留物的形成及分布机理。残留物的来源以及如何向四周飞散、如何在地面分布是炸药爆炸残留物现象研究的最根本性问题。本研究从爆轰物理学的角度

分析凝聚相炸药爆炸残留物形成的机制。

1 爆炸残留物形成机制分析

炸药因起爆装置起爆不完全或主装药的不均匀性等外在因素导致出现爆燃、低速爆轰(病态爆轰)或是爆轰不完全现象, 从而产生未爆炸药残留物质,

收稿日期: 2008-05-01

作者简介: 王曙光(1970-), 男, 博士研究生, 从事信息化弹药技术研究。

是较为常见的。但事实上,匀相炸药在正常爆轰的情况下也会产生一定量的残留物分布。这说明残留物的形成有其爆轰物理学上的内在机制。为简化起见,下面以裸露的柱形装药为例进行分析。

1.1 拐角效应残留物形成机制分析

实际装药的起爆绝大多数都是有限区域的局部起爆。有限区域的爆轰波要经过绕射扩展至整个主装药截面区域后才会形成稳定的爆轰传播,如图1所示。

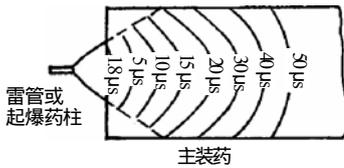


图1 装药的起爆过程
Fig.1 Initiation of charge

爆轰波从有限区域向周围发散传播时,爆轰波先主要朝起爆方向前进,然后才向侧向扩展,且沿起爆方向的爆轰传播速度要大于沿侧向的速度。当某些局部侧向速度小于一定值时,会导致爆轰熄灭,形成如图2所示的不爆轰区域,即死区^[1]。这种非理想爆轰传播就是所谓的拐角效应。

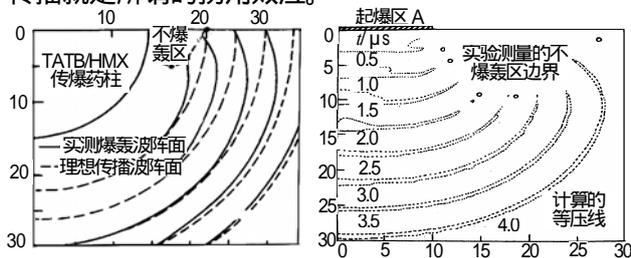


图2 起爆爆轰波的拐角效应

Fig.2 Corner effect of detonation wave of initiation

拐角效应体现的是炸药爆轰向侧向扩展的能力,通常成为衡量同类条件下炸药爆轰性能的一种尺度。受拐角效应影响的爆轰减弱区域或是爆轰熄灭区的炸药未来得及反应完全或根本就没有反应便被粉碎而随爆轰产物飞散出去。目前有关受拐角效应影响的爆轰减弱区域或死区还无法从理论计算上加以确定,只有通过试验测定。而且对于同一种炸药而言,拐角效应还受局部起爆面积、装药密度、装药温度以及颗粒度的影响^[1],故要估算出因拐角效应而产生的未反应完全的炸药量是很困难的。

1.2 边界效应残留物形成机制分析

起爆区域的爆轰波经扩展后会在柱形主装药中

形成稳定的爆轰波型,如果按理想爆轰处理,这种爆轰波型应该是一维平面波阵面的CJ或ZND爆轰波型。但实际装药尺寸有限,无法避免边侧稀疏的影响。在一端起爆时,柱形药柱中传播的爆轰波并非严格的平面波阵面,而是凸曲面形状,形成与装药初始条件无关的拟定态的二维曲面爆轰波结构,如图3所示。

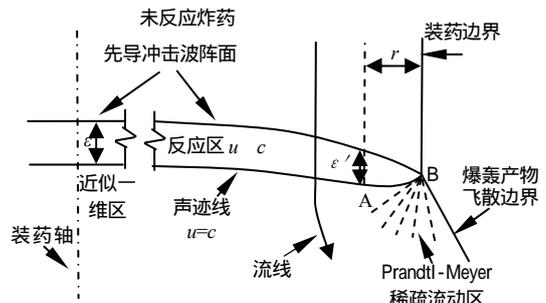


图3 裸露柱形装药非理想二维拟定常爆轰波结构
Fig.3 Configuration of nonideal two-dimensional quasi-steady detonation wave of bared cylindrical charge

图3中的非理想二维拟定态爆轰波结构依然沿用了一维ZND爆轰模型的基本概念,即先导冲击波阵面后存在长度为ε'的反应区,爆轰反应经过反应时间τ后,在声速面也即CJ面处完成反应,随后声速面后产物以超声速飞散。

当裸露装药中的先导冲击波传至边界处B点时,会在B点处产生Prandtl-Meyer稀疏流动,从B点向装药内部传播一组中心稀疏波,使B点附近的流场产生偏转角θ,同时使流场压力P变化。在波后形成PM流动的的必要条件是波后质点速度u < c,因此B点后方和B点处的流场都得满足u < c。又因爆轰波结构为定常,若B点处流场为亚声速反应区,则肯定会受到中心稀疏波扰动而无法保持定常流动,故B点只可能是先导冲击波与波后声迹线的交点。

从图3中可看出因先导冲击波与波后声迹线在B点的这种交会必然导致距边界r距离以内的亚声速爆轰反应区的长度ε'明显小于一定条件下炸药固有的反应区长度ε。这表明靠近边界处的爆轰波结构中,爆轰反应无法在声迹线以内亚声速区完成,导致亚声速区域释能减少,从而引起爆轰波阵面传播速度降低。低速爆轰的现象会导致距边界r以内的炸药爆轰反应不完全。特别是对B点而言,其爆轰阵面几乎得不到亚声速反应区释能的推动

(如果考虑反应区内能量的横向运输的话,情况则不同),极有可能使炸药无法发生反应就随爆轰产物飞散而成为残留物,这就是边界效应导致爆炸残留物产生的机制所在。

2 边界效应产生的残留物比例(占炸药总质量的比例)估算

由上述分析可知边界效应所产生的残留物只可能来自距边界 r 的炸药区域内。假定这部分炸药全部都未反应,可得裸露柱形装药正常爆轰情况下因边界效应产生残留物比例值的上限估计。

假定图3中声迹线上的A点是边界稀疏波传至时炸药爆轰反应刚好进行完全的临界点,声迹线AB段对应的区域则是爆轰反应未进行完全,即受到稀疏波影响的区域,很明显应有:

$$r = c\tau \quad (1)$$

式(1)中: τ 为爆轰反应时间, c 为稀疏波速度。

根据 Харитон 对柱形装药临界直径 d_{cr} 的物理定义^[1]有:

$$d_{cr} \approx 2c\tau \quad (2)$$

由式(1)~(2)可得:

$$r \approx \frac{d_{cr}}{2} \quad (3)$$

对于直径为 R 的裸露柱形装药,因边界效应产生的残留物比例 η 的上限即可由下式所求:

$$\eta_{\max} = 1 - \left(\frac{R - d_{cr}/2}{R} \right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{d_{cr}/2}{R} \right)^2 \quad (4)$$

式(4)表明残留物比例上限只与装药临界直径及装药直径两个参数有关。但是作为炸药的基本爆轰参数之一的临界直径 d_{cr} 却是1个受炸药化学成分、温度、装药压力、密度、有效反应表面积及装药颗粒度等多因素影响的参数。目前尚无求解临界直径 d_{cr} 的实用的理论解析式, d_{cr} 只是通过试验测定,或在广泛地研究裸露装药爆速的直径效应的实验数据基础上拟合出经验公式并计算而获得^[2-4]。表1为部分凝聚相炸药的裸露柱型装药临界直径的试验测定值。

Eyring 在早期研究柱形裸露装药爆速的直径效

应时,发现实际装药爆速 $D(d)$ 与装药直径的倒数 $1/d$ 存在如下线性关系^[6]:

$$D(d) = A[1 - (a/d)] \quad (5)$$

式(5)中 A 、 a 都为实验拟合数据。Campbell 和 Engelke 为解释高密度装药或非均相装药直径接近试验所测定的临界直径 d_{cr} 时爆速急剧下降的现象,向式(5)中加入含有另一拟合系数 d'_{cr} 的项,即^[6-7]:

$$D(d) = A\{1 - (a/d) - [(ad'_{cr})/(d - d'_{cr})]\}$$

后经 Bdzil 归纳为^[8]:

$$D(d) = A[1 - 2B/(d - d'_{cr})] \quad (6)$$

(6)式中 B 和 d'_{cr} 均为拟合系数。对于大多数固体炸药,拟合数据显示:

$$d'_{cr} = 0.88d_{cr} \quad (7)$$

表1 部分凝聚相炸药的裸露柱形装药临界直径的试验测定值^[1, 5]

Tab.1 Experimental value of critical diameter of some bared cylindrical charge^[1, 5]

炸药	装药形式	装药密度 / (g·cm ⁻³)	临界直径 d_{cr} /mm
Comp.B	铸装裸露装药	1.71	4.3
RDX/TNT (75/25)	铸装裸露装药	1.75	6.0~8.0
TATB	压装裸露装药	1.72	5.3
PBX9404	压装裸露装药	1.82	1.2
TNT	压装裸露装药	1.63	2.6
Octol	裸露装药	1.834	<6.4
PETN	玻璃管外壳	1.0	0.9
RDX	玻璃管外壳	1.0	1.2
2#岩石炸药	玻璃管外壳	1.0	20

而对于大多数含 RDX 的混合炸药,Whelan 和 Bocksteiner 发现其柱形裸露装药的 $D(d)$ 和 $1/d$ 更接近一种椭圆关系^[9]:

$$D(d)^2 = A^{*2} \left[1 - (a^*/d)^2 \right] \quad (8)$$

式(8)中 A^* 、 a^* 均为拟合系数。同时拟合数据显示: $d_{cr} = 2.208a^*$ (9)

无论是将(7)式代入(6)还是将(9)代入(8)式均可得到 $d_{cr}(D)$ 为爆速 D 的减函数的结果。再依据式(4):

$$\eta_{\max} = 1 - \left(1 - \frac{d_{cr}(D)/2}{R} \right)^2$$

可得到如下定性结论:

(1) 边界效应产生的残留物比例随装药半径的增加也即装药质量的增加而降低。此结论与诸多试验结果相符。文献[10]的试验结果表明:81mm 和

120mm 的迫击炮(装填药为 B 炸药)爆炸后在地面沉积的残留物成分比例要低于 60mm 迫击炮。

(2) 残留物比例随着装药爆速的增加而降低,即高爆速的炸药产生残留物的量少。因为爆速高的炸药,其爆轰反应进行速度快,完成爆轰反应的时间 τ 短,在 τ 时间内,边界稀疏波向内传播的距离也短,使受稀疏波影响反应不完全的炸药量减少。

关系式(4)也可用于估算带壳柱形装药边界效应产生残留物比例的上限,只要能测出相同装药条件下的柱形装药 d_{cr} 的值。

上面分析只是针对柱形装药的侧向边界,而柱形装药端部以及球形装药边界等其它形式的自由面也会产生稀疏波效应,其附近同样也存在一个受稀疏影响的爆轰反应不完全区域。作为粗糙的近似,可认为影响区域为距自由面距离 $d_{cr}/2$ 的区域。

综上所述,对于任意自由面形状的装药,其因边界效应产生的残留物来自于距自由面距离为 $d_{cr}/2$ 的区域;若自由面总面积为 S ,则产生的残留物量的上限为: $\eta_{\max} = \rho S d_{cr} / 2$ (10)

当然无论是式(4)还是式(10)进行的估算都难用试验结果予以验证,因通过试验来精确测量出残留物的量很难实现。文献[10]对几种常规弹药爆炸后产生残留物的量进行了试验研究,获得的也只是粗糙近似条件下的结果,只适合用于定性分析。故式(4)或(10)也只能用作定性分析。

3 结论

(1) 拐角效应和边界效应是凝聚相炸药在正常爆轰情况下产生残留物分布的爆轰物理学意义上的重要内在机制,与爆轰波的传播规律及爆轰波结构有关。

(2) 拐角效应受起爆面积、炸药密度、温度等多因素的影响,难以实现对其产生的残留物量的理论估算;边界效应可用非理想二维拟定常爆轰波模型进行解释,结合临界直径理论与相关爆速和装药直径的试验关系,可实现理论意义上的残留物质

量估算。

(3) 边界效应产生的残留物质量的估算关系式表明:残留物比例随装药半径的增加也即装药质量的增加而降低;随着装药爆速的增加而降低,即高爆速的炸药产生残留物的量少。这与已有的试验现象是相符的。

参考文献:

- [1] 孙承纬,卫玉章,周之奎著.应用爆轰物理[M].北京:国防工业出版社,2000.
- [2] 谭多望,方青,张光升,等.钝感炸药直径效应实验研究[J].爆炸与冲击,2003,23(4):300-304.
- [3] Whelan D J, Swinton R, Bocksteiner G. Velocity of detonation and charge diameter in some RDX-driven heterogeneous explosive: PBXW-115, PBXN-111, H6 and Composition B [R]. DSTO-TR-0400, 1996.
- [4] Swinton R G, Bussell T, Mcvay L. A critical diameter study of the Australian manufactured underwater explosive composition H6 [R]. DSTO-TN-0049, 1996.
- [5] 惠君明,陈天云著.炸药爆炸理论[M].南京:江苏科学技术出版社,1995.
- [6] Eyring H, Powell R E, Duffey G H, Parlin R B. The stability of detonation [J]. Chem. Rev., 1949(45):69-181.
- [7] Campbell A W, Engelke R. The diameter effect in high density heterogeneous explosion [C] // Proc Sixth Symp. (internatl.) on Detonation. Colorado, USA: Office Research Department of the Navy, 1977:642-652.
- [8] Vadim N Gamezo. Reaction zone structure of a steady state detonation wave in a cylindrical charge [J]. Combustion and Flame, 1997(109):253-265.
- [9] Whelan D J, Bocksteiner G. Velocity of detonation, charge diameter and critical diameter in unconfined RDX-driven non-ideal explosive [J]. J. Energetic Materials, 1994(13):13-34.
- [10] Alan D Hewitt, Thomas F Jenkins. Estimates for explosives residues from the detonation of army munitions [R]. ERDC/CRREL TR-03-16, 2003.