

文章编号:1006-9941(2019)06-0521-07

动能侵彻体冲击带壳炸药装药的爆燃失效

冯顺山¹,赵宇峰¹,边江楠²,周彤¹

(1.北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081; 2.北京航空工程技术研究中心,北京 100076)

摘要: 针对动能侵彻体冲击下带壳炸药装药的失效问题,分析了炸药装药不同反应情况驱动壳体速度,提出用等效格尼速度或等效格尼能表征炸药装药失效等级,相应给出了求解等效格尼速度和等效格尼能的方法。基于等效格尼速度对带壳炸药装药失效等级进行了划分并得到判据,提出爆燃失效是一种有效的失效理念。结合实验、数值模拟和解析计算研究了动能侵彻体冲击下带壳B炸药的爆燃失效问题,分析了爆燃失效与正常爆轰失效的关系,结果显示当等效格尼速度约为正常爆轰反应条件下的1%时,可视为邻近炸药装药爆燃失效的下限值。

关键词: 动能侵彻体;爆燃失效;带壳炸药装药;等效格尼速度;等效格尼能;等效破片初速

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018215

1 引言

末端反导是一种有效的反导方式,其中毁伤目标战斗部使其解体失效是末端反导作战是否有效的关键,否则无论是否命中预定目标,来袭导弹仍具有爆炸破坏能力,引发不可知的后果。所引出的核心问题是战斗部动能毁伤元冲击目标战斗部时,能否使其炸药装药发生有效反应,进而解体失效并丧失预定的毁伤能力。动能毁伤元撞击战斗部壳体产生的冲击波以及侵透壳体后对炸药的强剪切会使其发生反应,输出的能量驱动战斗部,壳体破裂程度及其破片的运动速度大小与炸药装药反应程度息息相关,从而决定了目标战斗部失效程度,最有效要求是目标战斗部在空中解体。通常认为炸药装药爆轰使战斗部解体失效是最理想的,但若目标战斗部采用钝感装药^[1-3],爆轰解体就难以实现,非爆轰解体失效问题得到关注。

关于带壳炸药装药在不同刺激条件下的反应情

况,目前国内外关注重点仍放在炸药装药发生爆轰反应时的破片冲击失效临界阈值^[4-8],而其他失效等级的研究很少。美国2011年发布的最新非核弹药危险评估试验标准MIL-STD-2105D对装药在外界刺激下的反应等级进行了划分^[9];闵冬冬^[10]与李德贵^[11]基于单枚动能侵彻体冲击实验的方法对带壳炸药装药的失效等级进行了初步研究。MIL-STD-2105D是基于弹药安全性的试验标准,将其应用在反导毁伤目标战斗部的研究中时,相应的失效等级的划分以及基本概念的阐述还需做出一定的调整;闵、李二人虽然对带壳炸药装药的失效等级进行了研究,但研究重点仍然是带壳炸药装药的爆轰解体失效。本研究关注非爆轰失效问题,提出了基于等效格尼速度和等效破片初速研究带壳炸药装药在动能侵彻体冲击条件下的爆燃失效等级及判据的思路,并通过实验与数值模拟相结合方法对其进行了计算和验证。

2 带壳炸药装药失效等级研究

2.1 炸药装药正常爆轰驱动壳体速度分析

带壳炸药装药失效等级与反应产物驱动壳体速度大小密切相关。本研究以炸药装药正常爆轰反应为基准,通过壳体破片运动速度的角度去分析炸药装药反应等级,故首先说明正常爆轰反应条件下的破片初速

收稿日期:2018-08-09;修回日期:2019-03-05

网络出版日期:2019-03-25

作者简介:冯顺山(1952-),男,教授,博士生导师,主要从事毁伤与弹药设计研究。e-mail:ssfeng@bit.edu.cn

通信联系人:周彤(1987-),女,讲师,博士,主要从事弹道与弹药设计研究。e-mail:zhoutong@bit.edu.cn

引用本文:冯顺山,赵宇峰,边江楠,等.动能侵彻体冲击带壳炸药装药的爆燃失效[J].含能材料,2019,27(6):521-527.

FENG Shun-shan, ZHAO Yu-feng, BIAN Jiang-nan, et al. Deflagration Failure of Explosive Cased Charge Under Impact of Kinetic Energy Penetrators[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(6):521-527.

情况。

在带壳炸药装药正常爆轰驱动过程中,壳体膨胀破裂成一定数量的破片并运动飞散,破片获得的最大速度即为破片初速 v_0 ,其受炸药装药的种类、装药密度、起爆位置、爆轰波的传播方向,以及稀疏波作用等因素影响,目前可通过AUTODYN等数值模拟软件或工程计算方法近似求解。破片初速解析计算能量模型如下。

根据能量守恒定律可知,炸药装药正常爆轰所释放出的化学能 Q_e ,一部分变为爆轰产物的比内能,一部分变为产物的动能,一部分变为壳体的动能,即:

$$m_e Q_e = m_e E_{ie} + E_t + 0.5 M v_0^2 \quad (1)$$

式中, m_e 为炸药装药质量, kg; M 为壳体质量, kg; E_{ie} 为爆炸产物的比内能, $J \cdot kg^{-1}$; E_t 为爆炸产物的动能, J; v_0 为破片初速, $m \cdot s^{-1}$ 。式(1)在以下假设^[12]基础上建立:爆轰波同时到达金属壳体表面,爆轰产物驱动壳体达到最大速度 v_0 时产物速度从起爆点至壳体内表面之间呈线性分布;不考虑起爆点对爆轰波形及传播方向的影响;不考虑壳体强度及其破裂时造成的能量损耗,即壳体同时破裂、同时被驱动达到最大速度 v_0 。

对于圆柱形壳体 $E_t = m_e v_0^2 / 4$, 则:

$$2(Q_e - E_{ie}) = \left(\frac{1}{2} + \frac{M}{m_e} \right) v_0^2 \quad (2)$$

令 $E_g = Q_e - E_{ie}$, E_g 即为炸药装药格尼能,是炸药正常爆轰时释放的化学能与爆轰产物状态内能之差, $J \cdot kg^{-1}$ 。式(2)即可演变为求解壳体破片初速的公式,称为格尼公式:

$$v_0 = \sqrt{2E_g} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}} \quad (3)$$

式中, $\beta = m_e / M$, 为带壳炸药装药装填比; $\sqrt{2E_g}$ 为炸药装药的格尼速度,具有速度的量纲, $m \cdot s^{-1}$ 。对于装填密度为 $1.68 g \cdot cm^{-3}$ 的熔铸B炸药(质量比RDX/TNT=60/40),其格尼速度为 $2697 m \cdot s^{-1}$ ^[13]。

格尼能 E_g 与格尼速度 $\sqrt{2E_g}$ 反映炸药正常爆轰驱动壳体的特性值,其数值由炸药装药的配方、制备工艺及其装填密度决定,可通过破片初速来反求。

2.2 等效格尼能与等效格尼速度

动能侵彻体冲击下带壳炸药装药有时会发生非正常爆轰,诸如弱爆轰、爆炸、爆燃、燃烧,炸药装药反应程度及驱动壳体的能力差异显著,此时通常所说的格尼能不适用于分析炸药装药发生非正常爆轰时驱动壳

体的能力。炸药装药非正常爆轰条件下的能量释放,可将其视作为某种低能含能材料的正常爆轰所释放的能量,相比于原炸药装药的格尼能 E_g 明显弱化,特提出等效格尼能 E_{di} 和等效格尼速度 $\sqrt{2E_{di}}$ 的概念,进而定量描述其弱化程度。

等效格尼能与等效格尼速度的定义:炸药装药弱爆轰、爆炸或爆燃反应释放出的能量,等效为相同形状、质量、装填比的某种低能炸药装药正常爆轰的格尼能 E_{di} ,称之为该炸药装药非正常爆轰条件下的等效格尼能;等效格尼能 E_{di} 对应的 $\sqrt{2E_{di}}$,称之为该炸药装药非正常爆轰条件下的等效格尼速度。

带壳炸药装药在非正常爆轰条件下输出的能量 E_{gF} 与正常爆轰条件下的格尼能 E_g 的比值 k_{Ei}^2 为:

$$\frac{E_{gF}}{E_g} = \frac{Q_{ei} - E_{ti}}{Q_e - E_t} = k_{Ei}^2 \quad (4)$$

式中,脚标F表示非正常爆轰; k_{Ei}^2 由炸药装药反应速率或程度决定,也可由实验对比测定,取值范围0~1,取值不同可表征炸药装药的反应等级;脚标*i*表示炸药装药反应等级,定性划分为五个等级,分别是A(正常爆轰)、B(弱爆轰)、C(爆炸)、D(爆燃)、E(燃烧)。

基于等效格尼能的概念与式(4),可给出等效格尼能 E_{di} 的数学表达式:

$$E_{di} = E_{gF} = k_{Ei}^2 E_g \quad (5)$$

式中,脚标d表示为等效条件。

基于等效格尼速度的概念与式(4)、式(5),可给出等效格尼速度 $\sqrt{2E_{di}}$ 的数学表达式:

$$\sqrt{2E_{di}} = \sqrt{2E_{gF}} = k_{Ei} \sqrt{2E_g} \quad (6)$$

式中, k_{Ei} 为等效格尼速度与格尼速度的比值,于是如式(7):

$$0 \leq \sqrt{2E_{di}} \leq \sqrt{2E_g} \quad (7)$$

本研究拟由带壳炸药装药非正常爆轰反应条件下的等效格尼能或等效格尼速度的分布值指导分析目标战斗部炸药装药失效等级问题。

2.3 等效破片初速

由于炸药装药非正常爆轰反应的复杂性,理论上求解等效格尼能和等效格尼速度数值较为困难,较为简便有效途径可通过实验测量或数值模拟得到不同动能冲击条件下炸药装药反应驱动壳体破片的最大运动速度后求出等效格尼能或等效格尼速度。依据本研究提出的等效格尼能和等效格尼速度的定义,相应提出等效破片初速的概念,进而定量描述其弱化程度。

等效破片初速的定义:带壳炸药装药弱爆轰或爆炸或爆燃反应的等效格尼能所求得破片的最大速度,等效为相同形状、质量、装填比的某种低能炸药装药正常爆轰反应时破片初速,称之为原炸药装药非正常爆轰条件下的等效破片初速 v_{di} 。在实验或数值模拟研究中,对比分析带壳炸药装药不同反应条件下驱动破片的速度,均为同坐标条件的破片速度,由下式表示:

$$v_{di} = \sqrt{2E_{di}} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}} \quad (8)$$

式(3)和式(8)仅能计算带壳炸药装药长径比足够大时破片最大初速。由于炸药装药爆轰非瞬时性和稀疏波的作用,实际破片初速值沿弹轴沿周向角呈分布状态。本课题组对不同起爆位置和装药结构条件下战斗部破片初速轴向分布及径向分布规律进行了大量的研究,通过脉冲X光摄影技术精准跟踪测量破片运动方向和速度变化历史,实现了任一破片初速的测试,提出了轴线起爆^[14-15](包含一端起爆、中心起爆和两端起爆)和偏轴心起爆^[16-18]条件下求解一般结构形状(包含等壁厚和变壁厚)战斗部破片初速的工程计算式。轴对称等壁厚炸药装药结构,一端轴线起爆条件下破片初速的工程计算式为:

$$v_{0x} = (1 - 0.3615e^{-1.111x/d}) [1 - 0.1925e^{-3.030(L-x)/d}] \sqrt{2E_g} \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}} \quad (9)$$

式中, v_{0x} 为破片在 x 坐标处的初速值,随 x 坐标变化而变化, $m \cdot s^{-1}$; L 为炸药装药的长度, m ; d 为炸药装药的直径, m 。壳体破片初速值分布如图1所示, v_{0a} 、 v_{0b} 分别为壳体端部破片初速、 v_{0c} 为破片最大初速,当炸药装药长径比足够大时, v_{0c} 等于 v_0 。

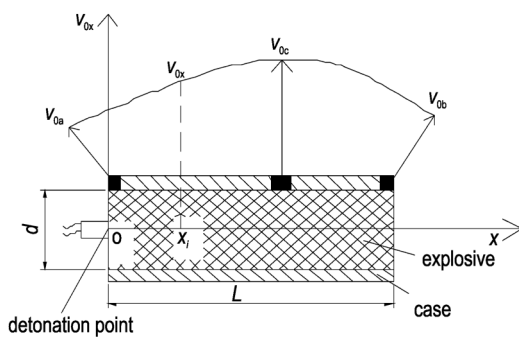


图1 轴对称等壁厚炸药装药结构一端轴线起爆条件下破片初速值随弹轴分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of the distribution of fragment initial velocity with projectile axis for axisymmetric explosive charge structure of equal wall thickness under the condition of one end point initiation

故 x 坐标处的等效破片初速 v_{xdi} 的工程计算式(9)可变为:

$$v_{xdi} = (1 - 0.3615e^{-1.111x/d}) [1 - 0.1925e^{-3.030(L-x)/d}] \sqrt{2E_{di}} \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}} \quad (10)$$

炸药装药非正常爆轰条件下,实测得某 x 坐标处的等效破片初速值,就可通过式(10)求得相同数值的等效格尼速度或等效格尼能;反之,由等效格尼速度通过式(10)亦可计算出不同 x 坐标处的等效破片初速。

2.4 带壳炸药装药失效等级

提出了带壳炸药装药的五个反应等级,对应指导战斗部解体失效等级定性划分为A、B、C、D、E五个等级,由等效格尼速度和等效破片初速表征的判据数学形式由式(11)所示:

$$\begin{cases} \sqrt{2E_{Si}} = k_{Ei} \sqrt{2E_g} \\ v_{xdi} = k_{Ei} v_{0x} \end{cases} \quad (11)$$

式中,脚标S表示失效; i 表示失效等级A、B、C、D、E。五个失效等级描述如下:

(1) 正常爆轰失效(A等级失效)

带壳炸药装药正常爆轰失效时,壳体正常破碎解体,由格尼速度或破片初速表征的带壳炸药装药正常爆轰失效判据 $\sqrt{2E_{SA}}$ 或 v_{xSA} 为:

$$\begin{cases} \sqrt{2E_{SA}} = \sqrt{2E_g} \\ v_{xSA} = v_{0x} \end{cases} \quad (12)$$

(2) 弱爆轰失效(B等级失效)

带壳炸药装药弱爆轰失效时,弱爆轰反应产物压力很高对战斗部壳体仍具有很强的驱动能力,壳体显著破坏解体。由等效格尼速度或等效破片初速表征的带壳炸药装药弱爆轰失效判据 $\sqrt{2E_{SB}}$ 或 v_{xSB} 为:

$$\begin{cases} \sqrt{2E_{SB}} = k_{EB} \cdot \sqrt{2E_g} \\ v_{xSB} = k_{EB} \cdot v_{0x} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 爆炸失效(C等级失效)

带壳炸药装药爆炸失效时,爆炸产物对战斗部壳体仍具有较强的驱动能力,壳体仍可形成较多破片而解体,但尺寸和质量相对较大,壳体破片运动速度为每秒几百米量级,具有杀伤作用。由等效格尼速度或等效破片初速表征的带壳炸药装药爆炸失效判据 $\sqrt{2E_{SC}}$ 或 v_{xSC} 为:

$$\begin{cases} \sqrt{2E_{SC}} = k_{EC} \cdot \sqrt{2E_g} \\ v_{xSC} = k_{EC} \cdot v_{0x} \end{cases} \quad (14)$$

(4) 爆燃失效(D等级失效)

带壳炸药装药爆燃失效时,爆燃反应产物具有一定压力,可驱动壳体产生几米至上百米的运动速度,战斗部壳体解体为若干较大尺寸的破片。由等效格尼速度或等效破片初速表征的带壳炸药装药爆燃失效判据

$\sqrt{2E_{SD}}$ 或 v_{xdD} 为:

$$\begin{cases} \sqrt{2E_{SD}} = k_{ED} \cdot \sqrt{2E_g} \\ v_{xdD} = k_{ED} \cdot v_{ox} \end{cases} \quad (15)$$

(5) 燃烧失效(E等级失效)

带壳炸药装药燃烧失效时,装药壳体发生局部物理膨胀甚至有裂缝现象,但不形成破片也无破片速度。由等效格尼速度或等效破片初速表征的带壳炸药装药燃烧失效判据 $\sqrt{2E_{SE}}$ 或 v_{xdE} 为:

$$\begin{cases} \sqrt{2E_{SE}} = k_{EE} \cdot \sqrt{2E_g} \\ v_{xdE} = k_{EE} \cdot v_{ox} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

综上所述,对于带壳炸药装药或战斗部被打击后发生正常爆轰、弱爆轰、爆炸和爆燃失效均可以使壳体解体产生破片并具有速度,虽四者失效程度差异很大,但都可达到解体效果,故只需使炸药装药爆燃失效即可达到使目标战斗部解体毁伤的目的。

3 带壳炸药装药爆燃失效研究

3.1 实验研究

实验系统由动能侵彻体、高速摄影相机、前置靶板、试件(带壳B炸药或带壳尼龙)、炸药装药反应效应鉴证靶、惯性块(模拟战斗部质量)组成。发射装置为13.2 mm口径的滑膛式弹道枪,由混合发射药对动能侵彻体加载,使其获得预定速度对试件作用。动能侵彻体的着靶速度 u_0 和试件壳体运动速度由高速摄影记录。终点弹道示意图如图2所示。

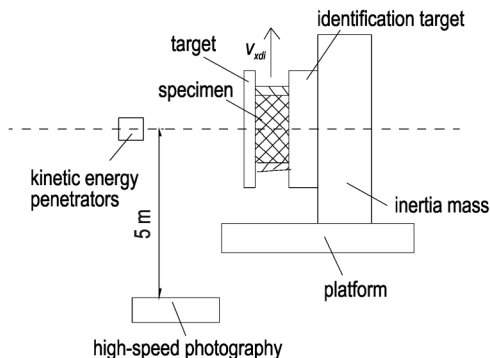


图2 终点弹道实验方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of terminal ballistic experimental setup

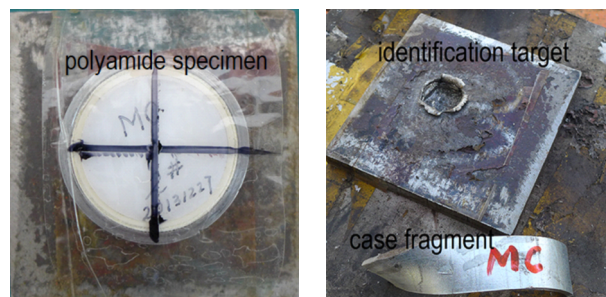
参试的动能侵彻体为平头圆柱形45#钢破片,质量为10 g、尺寸为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$;带壳炸药装药试件为圆柱形带壳B炸药,其质量比RDX/TNT=60/40、尺寸为 $\Phi 38 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ($L/d=0.526$),外侧的PVC衬套厚度为1.5 mm、金属壳体厚度为2 mm,装填比 $\beta=0.62$,装填密度为 $1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,前置靶板为A3钢材;带壳尼龙试件用于分析动能侵彻体冲击作用下压力径向扩张对壳体的径向膨胀速度的贡献,其尺寸与B炸药相同,密度为 $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。对比炸药装药爆燃失效条件下驱动破片的速度,均为壳体中部的破片速度,带壳B炸药照片如图3所示。



图3 带壳B炸药照片

Fig.3 Photograph of cased composition B

首先进行带壳尼龙试件的试验,测得无炸药装药条件下的壳体膨胀速度值 v_n 。进行了动能侵彻体以 $1171 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的着靶速度冲击带壳尼龙试件试验,尼龙以及鉴证靶上动能侵彻体作用效应和壳体胀坏情况如图4所示,通过高速摄影测得壳片初速 $v_n=38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。故可判断带壳炸药装药爆燃失效时壳片初速应明显大于 v_n 才合理,炸药装药爆燃条件下试件驱动壳体真实速度应去除 v_n 。



a. polyamide specimen

b. identification target and case fragment

图4 动能侵彻体冲击带壳尼龙试件典型实验照片

Fig.4 Typical testing photographs of kinetic energy penetrators impacting cased polyamide specimen

当动能侵彻体以 $917 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的着靶速度冲击带壳B炸药试件时,鉴证靶上除弹坑外无任何凹陷变形痕

迹,实验平台无未反应炸药粉末,收集到的壳体破片如图 5a 所示,单枚破片最大长度约为壳体周长的 50%,通过高速摄影测得 B 炸药试件壳片初速 $v_B=52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,判断试件在爆燃失效条件下等效破片初速 $v_{\text{xdD}}=v_B-v_n=14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;当动能侵彻体着靶速度为 $863 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,实验平台有未反应炸药碎块如图 5b 所示,前置靶板上附少量炸药装药反应黑色产物,通过高射摄影测得 B 炸药试件壳片初速 $v_C=37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,等同于 v_n ,可判断带壳炸药装药发生燃烧失效,B 炸药燃烧对破片实际驱动速度为 0。对比分析 v_B 和 v_C 可知,动能侵彻体以 $917 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的着靶速度冲击试件接近使炸药装药反应的下限条件。

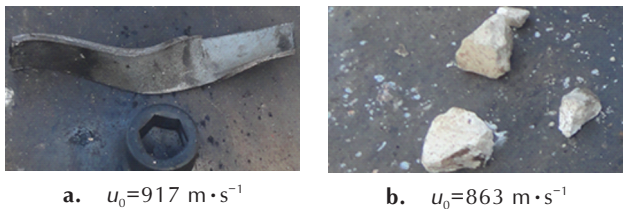


图 5 动能侵彻体冲击带壳 B 炸药典型实验照片
Fig.5 Typical testing photographs of kinetic energy penetrators impacting shelled charges

3.2 数值模拟研究

基于 AUTODYN 软件对动能侵彻体冲击带壳 B 炸药或带壳尼龙试件进行仿真,其仿真模型如图 6 所示。根据结构的对称性建立 1/2 二维有限元模型。动能侵彻体(45°钢破片)、前置靶板、壳体、尼龙、鉴证靶、惯性块均采用 Lagrange 算法,其中 45°钢破片、前置靶板、壳体的网格密度为 0.5 mm,鉴证靶和惯性块的网格密度为 1 mm,尼龙的网格密度为 0.1 mm,炸药装

药采用 SPH 算法,网格密度为 0.1 mm,计算时采用 cm-g- μs 单位制。在试件壳体上设置 3 个 Gauges 观测壳片初速,3 个 Gauges 观测点位置 x/L 分别为 0.15、0.5、0.85。

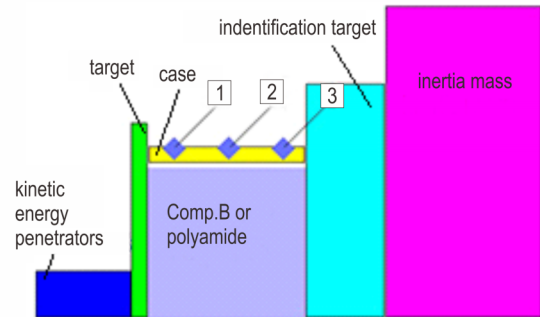


图 6 动能侵彻体冲击带壳 B 炸药(带壳尼龙)仿真模型示意图
Fig.6 Schematic diagram of simulation model for kinetic energy penetrators impacting cased composition B (cased polyamide)

数值模拟中各试件材料、尺寸和密度与实验相同,45°钢和 A3 钢均采用 shock 状态方程和 Johnson-Cook 强度模型,材料参数取自文献[19];B 炸药起爆状态方程采用 Lee-Tarver 三项目点火增长模型方程、炸药反应产物和未反应物采用 JWL 状态方程,材料参数取自文献[20];尼龙尺寸与 B 炸药相同,其材料参数取自 AUTODYN 材料数据库。

动能侵彻体冲击带壳尼龙、带壳 B 炸药时壳体 Gauges 观测点速度如表 1 所示,与实验结果对比可知,此时带壳 B 炸药发生爆燃失效,而尼龙径向膨胀能使壳片获得一定速度,两种条件下壳体三个观测点的平均速度差值即为 B 炸药爆燃对破片的实际驱动速度,得到爆燃失效条件下等效破片初速值为 $14.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表 1 数值模拟结果

	u_0	velocity of Gauges			velocity of case
		Gauges 1	Gauges 2	Gauges 3	
cased polyamide	1100	29.8	38.7	49.5	39.3
cased Composition B	910	43.3	58.7	60.3	54.1
actual driving speed of Composition B	-	13.5	20.0	10.8	14.8

Note: u_0 is impact velocity of kinetic energy penetrators.

3.3 对比分析

基于实验和数值模拟得到的 B 炸药爆燃对破片实际驱动速度,通过式(10)可求出相应的等效格尼速度,对比如表 2 所示,再将实验得到的 B 炸药爆燃失效的格尼速度代入式(10),分别求出 $x/L=0.15、0.5、0.85$

处的破片速度后取平均值,其与实验结果对比如表 3 所示。基于上文分析以及式(9)可求得带壳 B 炸药试件正常爆轰时破片平均初速值为 $1216.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,结合格尼速度可求得相应的 k_{ED} 的数值,如表 2 和表 3 所示。

由上表的误差分析可知,数值模拟计算值与实验

结果、式(10)计算值与实验结果基本一致,说明上述实验方法、数值模拟方法以及式(10)均可用于研究带壳炸药装药不同条件下的失效问题,由等效格尼速度和等效破片初速的途径可定量评价带壳炸药装药的反应/失效等级。

表2 数值模拟与实验结果对比

Table 2 Comparison of the simulations results and the experimental data

	$\sqrt{2E_{dD}}$ / $m \cdot s^{-1}$	v_{xdD} / $m \cdot s^{-1}$	k_{ED} $\frac{\sqrt{2E_{dD}}/\sqrt{2E_g}}{v_{xdD}/v_{0x}}$	v_{xdD}/v_{0x}
simulation	32.1	14.8	0.0119	0.0122
experiment	30.4	14	0.0113	0.0115
error	5.6%	5.7%	5.3%	6.1%

表3 解析计算与实验结果对比

Table 3 Comparison of the calculated results and the experimental data

	$\sqrt{2E_{dD}}$ / $m \cdot s^{-1}$	v_{xdD} / $m \cdot s^{-1}$	k_{ED} $\frac{\sqrt{2E_{dD}}/\sqrt{2E_g}}{v_{xdD}/v_{0x}}$	v_{xdD}/v_{0x}
calculate	29.7	13.7	0.0110	0.0113
experiment	30.4	14	0.0113	0.0115
error	2.3%	2.1%	2.7%	1.7%

Note: $\sqrt{2E_{dD}}$ and v_{xdD} are parameters of cased charge; k_{ED} is the ratio of to $\sqrt{2E_g}$ or v_{xdD} to v_{0x} .

由 k_{ED} 的数值可知,当带壳炸药装药爆燃失效的等效格尼速度达到正常爆轰失效格尼速度的 1.13% 时,炸药装药可实现爆燃反应且壳体结构解体失效。表 2 和表 3 数据分析表明,等效格尼速度或等效破片初速约为正常爆轰反应条件下的 1% 时,可视为邻近炸药装药爆燃失效的下限值,工程应用需考虑多种干扰因素,修正系数应大于 1。

4 结论

(1) 提出由等效格尼速度和等效破片初速表征的带壳炸药装药五个失效等级的判据 $\sqrt{2E_{Si}}$ 或 v_{xdi0}

(2) 得到了 B 炸药爆燃失效等级下的等效格尼速度、等效破片初速以及 k_{ED} 值,认为等效格尼速度约为正常爆轰反应条件下的 1% 时,可视为临近炸药装药爆燃失效的下限值。

参考文献:

[1] Gobalsecurity Org. Insensitive high explosives[EB/OL]. <http://www.globalsecurity.org>. 2006-11-08.

- [2] Scott F. Melt pour loading of PAX-21 into the 60mm M720E1 mortar cartridge[C]//Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Arlington: NDIA, 2000: 91-99.
- [3] Steven N, John N, Pamela F. Recent developments in reduced sensitivity melt pour explosives[C]//34th International Annual Conference of ICT, 2003.
- [4] 田少康,李席,刘波,等.一种RDX基温压炸药的JWL-Miller状态方程研究[J].含能材料,2017,25(3):226-231.
TIAN Shao-kang, LI Xi, LIU Bo, et al. Study on JWL-Miller equation of state of RDX-based thermobaric explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(3): 226-231.
- [5] 钱石川,甘强,任志伟,等.HNS-IV炸药一维冲击起爆判据的研究[J].含能材料,2018,26(6):495-501.
QIAN Shi-chuan, GAN Qiang, REN Zhi-wei, et al. Study on one-dimensional shock initiation criterion of HNS-IV explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(6): 495-501.
- [6] 王昕,蒋建伟,王树有,等.钨球对柱面带壳装药的冲击起爆数值模拟研究[J].兵工学报,2017,38(8):1498-1505.
WANG Xin, JIANG Jian-wei, WANG Shu-you, et al. Numerical simulation on the initiation of cylindrical covered charge impacted by tungsten sphere fragment[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(8): 1498-1505.
- [7] 刘鹏飞,智小琦,杨宝良,等.六棱钨柱冲击起爆带壳B炸药比动能阈值研究[J].高压物理学报,2017,31(5):637-642.
LIU Peng-fei, ZHI Xiao-qi, YANG Bao-liang, et al. Specific kinetic energy threshold of impacting initiation covered explosive B by six-prismed tungsten fragment[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(5): 637-642.
- [8] 路迎,王芳,卞晓兵,等.破片对复合壳体装药冲击起爆判据的研究[J].兵工学报,2017,(增刊1):194-199.
LU Ying, WANG Fang, BIAN Xiao-bing, et al. Shock initiation criterion of composite shell charges under impact of fragment[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, (S1): 194-199.
- [9] Center NSW. Hazard assessment tests for non-nuclear munitions[S]. Military Standard No MIL-STD-2105D, 2011.
- [10] 闵冬冬.破片侵彻下战斗部装药失效机理及低易损性方法研究[D].北京:北京理工大学,2014.
MIN Dong-dong. The failure mechanism of warhead charge and the low vulnerability method by the fragment penetration [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [11] 李德贵.战斗部抗破片冲击引爆感度评价方法与实验研究[D].北京:北京理工大学,2016.
LI De-gui. The evaluation method and experimental research on anti-fragment penetration sensitivity of warhead charge[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [12] 张宝坪,张庆明,黄风雷.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,1997:305-311.
ZHANG Bao-ping, ZHANG Qing-ming, HUANG Feng-lei. Detonation physics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1997: 305-311.
- [13] 孙业斌.爆炸作用与装药设计[M].北京:国防工业出版社,1987:76-78.
SUN Ye-bin. Explosion effect and charge design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987: 76-78.
- [14] 冯顺山,崔秉贵.战斗部破片初速轴向分布规律的实验研究[J].兵工学报,1987,8(4):60-63.

- FENG Shun-shan, CUI Bing-gui. An experimental investigation for the axial distribution of initial velocity of shells[J]. *Acta Armamentarii*, 1987, 8(4): 60-63.
- [15] HUANG Guang-yan, LI Wei, FENG Shun-shan. Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing under explosive loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 20-27.
- [16] 冯顺山, 蒋建伟, 何顺录. 偏心起爆破片初速径向分布规律研究[J]. 兵工学报, 1993, (增刊1): 12-16.
- FENG Shun-shan, JIANG Jian-wei, HE Shun-lu. On the pattern of radial distribution pattern of initial velocities of fragments under asymmetrical initiation [J]. *Acta Armamentarii*, 1993, (S1): 12-16.
- [17] HUANG Guang-yan, LI Wei, FENG Shun-shan. Fragment Velocity Distribution of Cylindrical Rings Under Eccentric Point Initiation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40 (2): 215-220.
- [18] LI Wei, HUANG Guang-yan, FENG Shun-shan. Effect of eccentric edge initiation on the fragment velocity distribution of a cylindrical casing filled with charge [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 80: 107-115.
- [19] 陈刚, 陈小伟, 陈忠福, 等. A3钢钝头弹撞击45#钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 390-397.
- CHEN Gang, CHEN Xiao-wei, CHEN Zhong-fu, et al. Numerical simulation of failure model of 45# steel impacting by blunt penetrator of A3 steel [J]. *Explosion and Waves*, 2007, 27 (5): 390-397.
- [20] 李凯, 朱建生, 钱志博, 等. 基于J-C本构模型的Comp.B炸药落锤冲击数值模拟[J]. 力学与实践, 2011, 33(1): 21-23.
- LI Kai, ZHU Jian-sheng, QIAN Zhi-bo, et al. Numerical simulation of drop weight impact tests for Comp. B using Johnson-Cook constitutive model [J]. *Mechanics and Practice Journal*, 2011, 33(1): 21-23.

Deflagration Failure of Explosive Cased Charge Under Impact of Kinetic Energy Penetrators

FENG Shun-shan¹, ZHAO Yu-feng¹, BIAN Jiang-nan², ZHOU Tong¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the failure problem of cased explosive charge under impact of kinetic energy penetrators, the velocity of case driven by explosive charge under different reaction rate was analyzed. The grade of characterizing explosive charge failure was proposed using equivalent gurney velocity or equivalent gurney energy. The method of solving equivalent gurney velocity and equivalent gurney energy was given accordingly. Based on equivalent gurney velocity, the failure grades of cased explosive charge were divided and the criterion was given, the idea of deflagration failure is proposed which is considered to be more effective to realize. The deflagration failure problem of cased composition B under impact of kinetic energy penetrators was studied based on experimental tests, numerical simulation and analytical calculation. The relations between deflagration failure and normal detonation failure were analyzed and the lower limit value of deflagration failure criterion was given. The results shows that it can be regarded as the lower limit of deflagration failure of explosive when equivalent gurney velocity reaches 1% of gurney velocity.

Key words: kinetic energy penetrators; deflagration failure; cased charge; equivalent gurney velocity; equivalent gurney energy; equivalent fragment initial velocity

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018215

(责编:高毅)