文章编号:1006-9941(2019)10-0861-06

HMX基含铝炸药装药慢烤缓释结构设计及验证

沈 飞,王胜强,王 辉

(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘 要: 为了探索可满足战斗部装药慢烤泄压缓释要求的密封结构设计方法,设计了可调整连接强度及预制泄压孔面积的小型烤 燃弹,通过实验获得了奥克托今(HMX)基含铝炸药装药不发生比燃烧更剧烈反应的条件,包括烤燃弹壳体强度阈值、泄压通道面积 阈值等参数。据此提出了既能满足端盖具有较高连接强度又能可靠泄压的两级密封缓释结构设计方法,并在具有公斤级装药的烤 燃弹中进行了试验验证。结果表明,烤燃弹采用两级密封设计时,若泄压通道与装药截面的面积比不小于30%,且慢烤过程中,气 体产物的压力未达到96.5 MPa时便可打通泄压通道,避免了装药反应的进一步增长,使其仅发生燃烧,并保持壳体结构的完整性。 关键词:奥克托今(HMX)基含铝炸药;慢速烤燃;密封结构;约束强度;泄压通道;响应等级

中图分类号: O389; TJ55

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018273

1 引言

慢速烤燃条件下弹药响应等级的控制是不敏感弹 药设计的重要内容之一,弹体缓释结构作为其有效控 制途径之一,已受到国内外科研人员的广泛关注。

缓释结构的设计必须首先掌握壳体强度、泄压通 道尺寸、密封材料及方式等对炸药装药响应特性的影 响规律,确定相关参量的阈值,才能为整体缓释结构的 设计提供依据。目前这方面的研究已有一些报导,如 Garcia等^[1]、智小琦等^[2]分别研究了壳体壁厚及材料 种类对奥克托今(HMX)基、黑索今(RDX)基高聚物粘 结炸药(PBX)装药慢烤响应剧烈程度的影响规律,但 并未量化对比这些不同壳体的约束强度;Madsen等^[3] 研究了不同尺寸排气孔对四种典型炸药装药慢烤响应 剧烈程度的影响,并分析了试验弹的尺寸效应和低熔 点材料选取等问题;沈飞等^[4]研究了慢烤过程中装药热 应力的变化,发现惰性包覆层与装药体积比的改变能

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-12-18 网络出版日期: 2019-03-06 基金项目: 国防基础科研专项(05020501) 作者简介: 沈飞(1983-),男,硕士,副研究员,主要从事炸药爆轰 性能及安全性方面的研究。e-mail:shenf02@163.com 通信联系人: 王辉(1977-),男,硕士,副研究员,主要从事炸药爆 轰性能及安全性方面的研究。e-mail:wind_land@163.com

够调控装药热应力,进而降低临界点火温度:邓海等[5]、 Lori 等^[5]分别研究了B炸药、RDX 基含铝炸药在密闭和 有排气孔条件下的慢烤响应,发现密闭条件下装药的 响应更为剧烈;陈科全等[7]建立了熔铸炸药装药慢烤过 程中,弹体内压强增长率与排气孔压强释放率之间的 平衡关系:陈红霞^[8]等研究了聚乙烯PE、聚碳酸酯PC等 低熔点材料在温度压力耦合作用下的破坏方式,并分 析了其作为泄压通道密封材料的可行性。然而这些研 究主要是在预设工况下进行的,未结合战斗部结构开 展系统研究,难以为战斗部缓释结构的设计提供完整 的依据,目由于某些战斗部(如侵彻类战斗部)对壳体 连接强度要求较高,一些新颖的设计方法可能在战斗 部结构中难以应用,如用于密封泄压通道的低熔点材 料等难以满足结构强度的要求,因此,战斗部设计人员 更期望采用螺纹、螺钉等机械连接方式来满足泄压缓 释的要求。然而,目前对机械连接式战斗部泄压结构 的研究不论从实验观测还是机理探讨都还相对缺乏。

为此,本研究基于不同约束条件下HMX基含铝 炸药装药慢烤响应特性,通过调节壳体强度、泄压通道 面积,确定了其慢烤缓释所需要的条件,进而提出了具 有可靠泄压功能的两级密封设计方法,(即端盖具有较 高的连接强度,以满足战斗部的工作性能要求,而端盖 上预制泄压通道的密封强度降低,以满足装药可靠泄 压的要求),并通过模拟烤燃弹慢烤试验进行了验证,

引用本文:沈飞,王胜强,王 辉.HMX 基含铅炸药装药慢烤缓释结构设计及验证[J].含能材料,2019,27(10):861-866. SHEN Fei, WANG Sheng-qiang, WANG Hui. Slow Release Structure Design and Verification of HMX-based Aluminized Explosive Charge Under Slow Cook-off Condition[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*,2019,27(10):861-866.

CHINESE JOURNAL OF ENERGETIC MATERIALS

以期为不敏感战斗部的设计提供参考。

2 HMX基含铝炸药装药慢烤缓释条件

在慢烤过程中,伴随着石蜡等粘结剂的逐渐熔化, HMX基压装含铝炸药装药的强度逐渐降低,当出现热 点后,大量气体产物使得壳体内的压力迅速升高,若不 能及时突破壳体的薄弱区域或通过预制通道泄压,装 药的反应速率随即迅速增长,因此,壳体薄弱结构的强 度阈值及预制泄压通道的面积阈值成为缓释结构设计 中需要掌握的关键参数。但这两个参数难以通过实验 方法直接测量,本研究通过调整小型烤燃弹的设计参 数进行估算。

2.1 小型烤燃弹设计

由于战斗部的端盖部位一般为其强度薄弱区域, 缓释结构常集中设置于该区域,因此,本研究中设计了 如图 1 所示的小型烤燃弹,通过调整端盖与壳体连接螺 纹的长度 x 以改变烤燃弹的约束强度,并根据试验需 要,在端盖处设置不同直径的通孔作为预制泄压通道。 此外,这里所设计的烤燃弹仅考虑长径比不大于 2 的工 况。烤燃弹壳体及端盖的材料均为 45 号钢,其中,壳体 壁厚为 5 mm,螺纹处壁厚为 10 mm,内部空腔尺寸为 Φ 25.1 mm×50.1 mm,外接螺纹为 M45×2 mm,端盖 的壁 厚为 10 mm。炸药药柱采用压装工艺制成, HMX/AI/粘 结 剂 质 量 分 数 为 65/30/5,密 度 为 1.85 g·cm⁻³,每发烤燃弹内装填两节 Φ 25 mm×25 mm 的药柱,缝隙采用惰性硅橡胶封填。



图1 Φ25 mm 小型烤燃弹结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Φ 25 mm small-sized cook-off bomb

当炸药点火后,产物若及时通过预制泄压通道或 冲破端盖充分泄压,则炸药一般仅会发生燃烧反应,且 壳体结构不会发生较大变形;若未能充分泄压,则炸药 反应迅速增长,进而发生爆燃甚至爆炸等更剧烈的响 应。为了掌握充分泄压所需的临界条件,研究过程中 将 Φ25 mm 小型烤燃弹分为三类:(1)端盖处不设置 通孔,通过改变端盖与壳体的连接强度以获取产物冲 开端盖泄压时所须满足的阈值条件;(2)提升端盖与 壳体的连接强度,通过改变端盖处通孔的面积以获取 泄压通道所须满足的面积阈值;(3)当泄压通道面积 满足产物充分泄压要求时,改变端盖与壳体的连接强 度,以研究泄压过程中的附带作用。

在泄压过程中,端盖螺纹的破坏一般为动态剪切 破坏,根据动态剪切强度理论^[9],产物对端盖的作用载 荷F需满足

$$F = p(S_{\rm c} - S_{\rm H}) > x\sigma_{\rm b} \cdot d_{\rm s}/1.14 \tag{1}$$

式中,p为炸药点火后产物的压力,MPa; S_c 为端盖的 受冲击面积,也是药柱的截面积,mm²; S_H 为端盖上所 设通孔(即预制泄压通道)的面积; σ_b 为钢的静态抗拉 强度,45号钢约取600 MPa; d_s 为螺纹内径,可近似为 45 mm。此外,为了便于分析,螺纹长度 x取螺距的整 数倍,若 x=2 mm(即螺纹的有效圈数 n=1)时螺纹被 破坏,则可以推断 F > 47.4 N;若螺纹有效圈数 n增加 后仍被破坏,则 $F > n \cdot 47.4$ N。

为了提升试验效率,将采用加热套对烤燃弹表面 进行加热,热电偶传感器也安装在壳体表面,整个系统 放置于保温防护层内,如图2所示。试验过程中,烤燃 弹表面的升温速率设置为1℃·min⁻¹。



图 2 Φ25 mm小型烤燃弹慢烤试验布局图 Fig.2 Layout of slow cook-off experiment for Φ25 mm smallsized cook-off bomb

2.2 壳体破坏强度及泄压面积阈值的确定

确定壳体约束强度阈值时,主要采用第一类 Φ25 mm小型烤燃弹结构(即端盖处不设置通孔,只改 变螺纹连接强度)进行试验,共包含两种工况,其试验 后残骸如图3所示。当螺纹有效圈数 n=1时,烤燃弹 发生响应后,螺纹被拉脱,但壳体结构完整且没有明显 膨胀变形(图3a),此外,壳体内有少量药粉残留。而 当 n=2时,壳体破裂、展开,端盖严重变形(图3b),考 虑到该烤燃弹的装填比较小,难以对壳体造成严重破 坏,虽然壳体并未分离成数块,但仍可判断装药发生了 爆燃反应。结合公式(1)的计算结果可知,对于无预 制泄压孔的烤燃弹结构,当炸药点火后,其产物压力p 大于临界压力值(为96.5~193 MPa)时,则反应快速 增长,因此,若要避免装药发生比燃烧更剧烈的反应, 则应控制壳体强度,使其破坏前,内部气体产物的压力 小于96.5 MPa。



图3 无泄压通道的 Φ 25 mm 烤燃弹响应后的残骸 Fig. 3 The wreckage after response for Φ 25 mm cook-off bomb without pressure relief channel

为了获得预制泄压通道的面积阈值,采用第二类 Φ 25 mm小型烤燃弹结构(即提升端盖与壳体的连接 强度,取n=7,改变泄压通道的面积)进行试验,共包括 四种不同面积的泄压通道,且设计过程中,考虑到单个 通孔过大时,药柱可能容易大块喷出,因此,尽可能分 散为多个通孔。这四种烤燃弹慢烤后的残骸如图4所 示,由图4可以看出,当 S_{μ}/S_{c} =16%,装药发生了爆炸; 当 $S_{\rm H}/S_{\rm c}$ =23%时,虽然壳体没有破裂,但螺纹被破坏, 端盖变形严重,孔口隆起,壳体直径明显增大,这表明 泄压通道面积的增大一定程度上抑制了炸药反应速率 的进一步提升,但该泄压通道的面积仍偏小;当S₁/S_c =30%时,壳体完整,端盖孔口处略有隆起痕迹,端盖 和壳体可正常分离,这表明炸药点火后,残余药和产物 排泄时对端盖仍有较强的冲击力;当S_H/S_c=48%时, 壳体无明显变形,壳体内部有少许未反应的残余药。 因此,可以判断预制泄压通道的面积 $S_{\parallel}/S_{c} \ge 30\%$ 时, 装药响应的烈度可能会较小。

当泄压通道的面积满足泄压要求时,若降低烤燃 弹壳体和端盖的连接强度,则泄压过程中烤燃弹是否 仍会保持完整是研究重点之一。本研究中采用第三类 $\Phi_{25} \text{ mm}$ 小型烤燃弹结构(即 S_{μ}/S_{c} =48%,减少有效 连接螺纹的数量)进行试验,共包括两种工况,其试验 后残骸如图 5 所示。从图 5 可以看出,当 S_{H}/S_{c} =48% 时,若有效螺纹数 n=1 或 2 时,虽然壳体结构变形较 小,其内部也有部分残余药,但螺纹均被拉脱,这表明,

即便泄压通道面积较大,泄压过程中,其残余药和产物 对端盖仍有较大的冲击作用。此外,根据图5b中的工 况,由公式(1)可计算出,产物的压力 p>378 MPa,远 超图 3 所获的临界压力值(96.5~193 MPa),但并未发 生更剧烈的响应,这可能是由于非密闭条件下,压力释 放迅速,使得炸药的反应未迅速增长。







 $S_{\perp}/S_{c}=30\%$ **d.** $S_{\rm H}/S_{\rm C}$ =48%

图4 具有不同面积泄压通道的 Φ_{25} mm 烤燃弹响应后的残骸 Fig. 4 The wreckage after response for Φ 25 mm cook-off bomb with pressure relief channel of different areas





b. *n*=2

图5 不同螺纹数下 S_{μ}/S_{c} =48% 的 Φ 25 mm 烤燃弹响应后的 残骸

Fig. 5 The wreckage after response for Φ 25 mm cook-off bombs with S_{μ}/S_c =48% under different screw thread numbers

两级密封结构的设计及慢烤试验验证 3

在实际战斗部的设计中,装药必然处于全密闭状

态,若采用图3中的单一强度密封模式,则端盖破坏前,其内部气体产物的压力须小于96.5 MPa,这使得端盖与壳体的连接强度较小,可能不能满足一些战斗部(如侵彻战斗部等)对结构强度的要求。为此,根据上述研究设计了一种两级密封结构,即一方面,确保端盖与壳体的连接强度,以满足战斗部的性能要求,另一方面,端盖处所设泄压通道的密封强度适当减弱,以确保弹体内部压力达到反应增长阈值前便可打开泄压通道。为了验证这种密封结构的泄压可靠性以及2.2节所获参量阈值的适用性(尤其是增大药量后的工况),本研究采用公斤级装药的烤燃弹对其进行验证。

3.1 两级密封结构及烤燃弹的设计

烤燃弹由壳体、两级密封结构(包括端盖、密封泄 压通道的法兰盘)及HMX基含铝炸药装药组成,其结 构如图 6 所示。壳体及端盖等结构的材料均为 30CrMnSi,其静态抗拉强度为1080 MPa;壳体壁厚为 5 mm;为了模拟战斗部内腔形状特征,其前段设置为 弧形,且装药的长径比小于2;端盖的厚度为15 mm, 外接螺纹为 M118 mm×1.75 mm,以确保其余壳体的 连接强度,端盖上的泄压通道采用对应的法兰盘封堵, 并采用6个均布的 M6螺钉(性能等级为8.8级)将其固 定在端盖上。装药分为两部分,前段为半球形,直径为 Φ114 mm,后端为圆柱形,尺寸为Φ114 mm×110 mm, 整体装药量约2.8 kg。装药与壳体内壁之间采用惰性 硅橡胶填充。



图6 含两级密封结构的 Φ 114 mm烤燃弹示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the Φ 114 mm cook-off bomb with two-stage sealing structure

装药点火后,若要使法兰盘可靠分离以便迅速打 开泄压通道,必须首先破坏螺钉,假定其为拉伸破坏, 则所受载荷必须满足

$$F = p \cdot \pi d_{\rm H}^{2}/4 > 6\sigma_{\rm b} \cdot A_{\rm s} \cdot k \tag{2}$$

式中, d_H为预制泄压通道的直径, mm; A_s=20.1 mm² 为 M6 螺钉的公称应力截面积^[10];该螺钉的静态抗拉

强度 $\sigma_{\rm b}$ =800 MPa; k为螺钉的动态抗拉强度与静态抗 拉强度的比值,具体数值与应变率等相关,在冲击载荷 下常取 1.5^[11]。由于图 6 中的装药长径比小于图 1 的 工况,其泄压通道的面积阈值可能没有增大,因此,这 里仍采用图 4 所获规律,将泄压通道设置为两种工况, 其工况一选择 $S_{\rm H}/S_{\rm c}$ =30%,工况二则将 $S_{\rm H}/S_{\rm c}$ 增大至 50%,以对比两者的缓释效果,且依据公式(1)和(2) 可计算出推开端盖和法兰盘时,气体产物分别须达到 的压力阈值 $p_{\rm c}$ 和 $p_{\rm F}$,其相应数据列于表 1。从表 1 可 以看出,这两种工况下,推开法兰盘时,气体产物所须 满足的临界压力均小于 96.5 MPa,则可确保密闭条件 下,装药点火后,产物可顺利开通泄压通道,使装药仅 发生燃烧反应;同时结合图 5 所示结果可以推断,残余 药和产物喷射过程中,端盖螺纹可能会受到破坏。

表1 两种工况下Φ114 mm 烤燃弹密封结构参数

Table 1 Sealing structure parameters of Φ 114 mm cook-offbombs under two working conditions

operating condition	$d_{\rm H}/{ m mm}$	$S_{\rm H}/S_{\rm C}$	$p_{\rm F}/{\rm MPa}$	$p_{\rm C}/{\rm MPa}$
1#	64	30%	45	217
2#	82	50%	27	296

Note: $d_{\rm H}$ is the diameter of pressure relief channel. $S_{\rm H}/S_{\rm C}$ is the ratio of the area of pressure relief channel to charge cross section. $p_{\rm F}$ is the gas pressure threshold causing flange damage. $p_{\rm C}$ is the gas pressure threshold causing end cap damage.

3.2 慢烤试验结果及分析

试验仍采用加热套对 Φ114 mm 烤燃弹表面加 热,其整体布局与图 2 相似,增加视频监控,烤燃弹表 面的升温速率仍设置为1 ℃·min⁻¹。

1*工况下, **Φ**114 mm 烤燃弹的壳体表面温度达到 209 ℃时,装药发生反应,由烤燃弹试验前后的状态对 比(图7)可看出,壳体的结构基本完好;端盖略有变 形,其外接螺纹有局部破损;端盖上的法兰盘未见明显 变形;6个 M6 螺钉均断裂,且断裂面为平面,有一定程 度的颈缩,则应为拉伸破坏。此外,结合不同时刻的视 频截图(图8)可以看出,烤燃弹的响应分为三个阶段: 第一阶段,装药点火后,产物冲破密封结构并迅速抛洒 装药,形成较大范围的火球,但持续时间仅约2 s,这可 能是由于点火前,装药中的石蜡等粘结剂早已熔化,使 得装药的强度较低,近似为"糊状",则部分装药抛洒较 为均匀,且自身温度较高,与空气充分接触后,反应较 为迅速;第二阶段,火焰高度迅速变小,且集中至残药 较为集中的区域(图 8c);第三阶段,至点火后约12 s, 燃烧(图 8d)。因此,可以判断该烤燃弹的响应等级为 燃烧,虽然在第一阶段装药的反应速率较高,但并未对 周围的钢板等物体造成明显的破坏。





a. before experiment

b. after experiment

图 7 1[#]Φ114 mm 烤燃弹慢烤试验前后状态的对比 Fig. 7 Comparison of the states before and after the slow cook-off experiment for 1[#]Φ114 mm cook-off bomb



c. 8 s

d. 12 s

图8 1[#]*Φ*114 mm 烤燃弹的响应过程视频截图

Fig.8 Screen screenshots of response process of $1^{\#}\Phi 114 \text{ mm}$ cook-off bomb

2*工况下, Φ114 mm 烤燃弹的壳体表面温度达到 203 ℃时, 装药发生反应。由试验前后的状态对比 (图 9)可看出, 壳体的整体结构及螺纹基本完好, 内有 少量残药; 端盖有明显凸起, 其螺纹有轻微破损; 端盖 上的法兰盘飞入附近草丛后未找到; 6个 M6 螺钉均断 裂, 但其中一个为剪切破坏, 其余为拉伸破坏, 这可能 与产物的作用力分布不均有关。视频监控显示, 2*烤 燃弹的响应过程及时间与 1*烤燃弹极为相似, 其响应 等级也为燃烧, 这表明泄压通道的面积满足 $S_{\rm H}/S_{\rm c} \ge 30\%$, 且打开泄压通道时气体产物的压力小于 96.5 MPa, 则装填该含铝炸药装药的烤燃弹在慢烤过 程中均能可靠泄压, 且响应过程也基本相似。



a. before experiment

b. after experiment



4 结论

针对某典型烤燃弹结构,通过调整壳体的密封强度、泄压通道面积等,探索HMX基含铝炸药装药在1℃·min⁻¹升温速率下的慢烤缓释条件,进而提出两级密封缓释结构设计方法,并在公斤级装药的烤燃弹中进行了验证,得出以下结论:

(1)对于装填该HMX基含铝炸药装药且长径比 小于2的烤燃弹,若端盖采用单一强度密封方式,则须 确保装药点火后,气体产物的压力未达到96.5 MPa时 便可破坏连接结构而泄压,才能避免装药反应的进一 步增长。

(2)采用两级密封设计时,其泄压通道与装药截 面的面积比须大于 30%,且气体产物的压力未达到 96.5 MPa时便可打通泄压通道,则可确保装填该含铝 炸药装药的烤燃弹在慢烤过程中可靠泄压。该密封设 计方式对端盖与战斗部的连接强度并没有严格限制, 可根据战斗部工作状态的需要进行调整,但拓展到其 它炸药,其壳体结构的相关参数阈值还需要进一步 优化。

参考文献:

- [1] Garcia F, Vandersall K S, Forbes J W, et al. Thermal cook-off experiments of the HMX based high explosive lx-04 to characterize violence with varying confinement[R]. American Physical Society Meeting on Shock Compression of Condensed Matter. MD. UCRL-CONF-214058, 2005.
- [2] 智小琦, 胡双启, 李娟娟, 等. 不同约束条件下钝化黑索金炸药

含能材料

的烤燃响应研究[J].火炸药学报,2009,32(3):22-24.

ZHI Xiao-qi, HU Shuang-qi, LI Juan-Juan, et al. Study on slow cook-off characteristic of passive RDX explosive under different restriction condition[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(3): 22–24.

- [3] Madsen T, Defisher S, Baker E L, et al. Explosive venting technology for coof-off response mitigation [R]. Technical Report ARMET-TR-10003, 2010.
- [4] 沈飞,屈可朋,王胜强.等.慢烤过程中热应力对HMX基含铝 炸药装药响应特性的影响[J].含能材料,2018,26(10): 869-874.
 SHEN Fei, QU Ke-peng, WANG Sheng-qiang, et al. Effect of thermal stress on the response characteristics of hmx based aluminized explosive charge in slow cook-off test [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2018, 26 (10): 869-874.
- [5] 邓海, 沈飞, 梁争峰, 等. 不同约束条件下 B 炸药的慢烤响应特 性[J]. 火炸药学报, 2018, 41(5): 465-470.
 DENG Hai, SHEN Fei, LIANG Zheng-feng, et al. Slow cookoff response characteristics of composition B under different constraints[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2018, 41(5):465-470.
- [6] Lori N, Gail W, Mary H, et al. Implications of underwater explosive binder systems on slow cook-off violence and interactions with warhead venting[C]//NDIA Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Italy: Fiber-och Ploymerteknologi, 2015.

- [7] 陈科全,黄亨建,路中华,等.一种弹体排气缓释结构设计方法 与试验研究[J].弹箭与制导学报,2015,35(4):15-18.
 CHEN Ke-quan, HUANG Heng-jian, LU Zhong-hua, et al. Structural design and experimental study on venting of projectile body [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35(4): 15-18.
- [8] 陈红霞,蒋治海,陈科全,等.弹体缓释排气通道形成条件研究
 [J].四川兵工学报,2015,36(9):145-148.
 CHEN Hong-xia, JIANG Zhi-hai, CHEN Ke-quan, et al. Research on formation condition of venting channel of missile
 [J]. Journal of Sichuan Ordnance,2015,36(9):145-148.
- [9] 陈小伟,金建明.动能深侵彻弹的力学设计(Ⅱ):弹靶的相关力 学分析与实例[J].爆炸与冲击,2006,26(1):71-78. CHEN Xiao-wei, JIN Jian-ming. Mechanics of structural design of EPW (Ⅱ): Analyses on the design of EPW projectiles, concrete targets and examples[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(1): 71-78.
- [10] 成大先.机械设计手册.单行本.联接与紧固[M].北京:化学工 业出版社,2004:4-69.
 CHENG Da-xian. Mechanical Design Handbook. Single File.
 Connection and Fastening [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 4-69.
- [11] 任辉启,穆朝民,刘瑞朝,等.精确制导武器侵彻效应与工程防 护[M].北京:科学出版社,2016:233.
 REN Hui-qi, MU Chao-min, LIU Rui-chao, et al. Penetration Effects of Precision Guided Weapons and Engineering Protection[M]. Beijing: Science Press, 2016:233.

Slow Release Structure Design and Verification of HMX-based Aluminized Explosive Charge Under Slow Cook-off Condition

SHEN Fei, WANG Sheng-qiang, WANG Hui

 $(\it Xi' an Modern \ Chemistry \ Research \ Institute$, $\it Xi' an \ 710065$, $\it China)$

Abstract: To explore the design method of sealing structure which can meet the slow release requirements of warhead charge under slow cook-off condition, a small-sized cook-off bomb with adjustable connection strength and prefabricated area of pressure relief hole was designed. For octogen (HMX)-based aluminized explosive charge, the conditions of no more intense reaction occurs than combustion were obtained by experiments, including the strength threshold of shell and area threshold of pressure relief channel of cook-off bomb, etc. parameters. Based on this, a design method of two-stage sealing slow-release structure, which can satisfy the requirement of high connection strength and reliable pressure relief of the end cap, was proposed and the method was tested and verified in the cook-off bombs with kilogram charge. The results show that when two-stage sealing design for cook-off bomb is adopted, if the ratio of the area of the pressure relief channel to the charge cross section is not less than 30%, and the pressure of the gas product does not reach 96.5 MPa in the slow cook-off process, the pressure relief passage can be opened, which avoids the further growth of charge reaction, makes the combustion occur only and keeps the integrity of shell structure.

Key words: octogen (HMX)-based aluminized explosive; slow cook-off; sealing structure; constraint strength; pressure relief channel; response level

CLC number: O389; TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018273

(责编:张 琪)