

文章编号:1006-9941(2018)10-0869-06

慢烤过程中热应力对 HMX 基含铝炸药装药响应特性的影响

沈飞,屈可朋,王胜强,邢晓玲,王辉

(西安近代化学研究所,陕西西安 710065)

摘要: 为获得炸药装药在慢烤过程中热应力的变化规律,设计了一套热应力测试装置,获得了奥克托今(HMX)基含铝炸药装药在密闭约束条件下热应力随温度的变化曲线;通过调整烤燃弹内惰性包覆层与装药的体积比,改变慢烤过程中装药热应力的上升速率,研究了烤燃弹临界响应温度及其三种工况下的响应剧烈程度。结果表明,壳体的约束作用使得装药的热应力随着温度的上升而逐渐增大,根据热应力变化速率的差异,可将整个过程分为6个阶段,其影响因素依次为热膨胀、孔隙率下降、HMX晶型转变、HMX缓慢分解、部分小分子气体泄漏、HMX加速分解,当温度升至208℃时,热应力达到9.2 MPa,装药随即点火;在烤燃弹的装药表面增加热膨胀性较强的硅橡胶包覆层,则会加快装药热应力的增长速率,使得装药的临界点火温度下降,但不会改变装药响应的剧烈程度。

关键词: 慢速烤燃;奥克托今(HMX)基含铝炸药;战斗部装药;热应力;包覆层

中图分类号:TJ55;O389

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018107

1 引言

炸药装药在慢速烤燃条件下的响应特性是不敏感战斗部设计中的重要研究内容之一,国内外研究人员不仅在炸药组分及配方方面对慢烤响应特性影响规律方面进行了大量探索^[1-3],还对壳体约束强度、密闭程度、装药尺寸及密度变化等因素的影响规律进行了研究。如胡双启等^[4]发现在密闭结构中,钝化黑索今装药密度增大将导致其慢烤响应的剧烈程度减小;Garcia等^[5]、智小琦等^[6]分别研究了壳体壁厚及材料种类对奥克托今(HMX)基、黑索今基高聚物粘结炸药(PBX)装药慢烤响应剧烈程度的影响规律;Madsen等^[7]研究了不同尺寸排气孔对典型浇注、熔铸炸药装药慢烤响应等级的影响,并分析了试验弹尺寸等因素对试验结果的影响。上述研究主要关注装药的最终点火温度及反应等级,未涉及装药内部热应力的分析,尤

其是装药在力、热耦合作用下的响应规律,在战斗部设计方面的指导意义有所不足^[8];且实验的药量较小,装药结构也较为单一,不便于考虑实际战斗部装药中填充或包覆用硅橡胶等材料的影响等,同时也可能存在一定的尺寸效应,因此,还需要在这些方面进行进一步研究。

本研究建立了一种装药慢烤条件下热应力测量方法,获取了HMX基含铝炸药装药在密闭约束条件下的热应力曲线,分析了装药热应力随温度的变化规律;然后模拟典型战斗部装药结构设计了一种烤燃弹,通过调整装药表面惰性包覆层的厚度以改变慢烤过程中装药内的热应力上升速率,并研究其临界点火温度、响应剧烈程度的差异,为战斗部装药的不敏感设计提供依据。

2 HMX基含铝炸药装药慢烤条件下的热应力

对于高能PBX炸药装药,在慢烤条件下随着温度逐渐上升,其首先产生热膨胀,但战斗部壳体的约束使装药体积难以自由增大,则将会导致装药内的热应力逐渐提升,这便使装药处于力和热共同作用的环境中,因此,获取炸药装药的温度与热应力的变化关系是研究装药慢烤响应过程的前提之一。为了便于试验操

收稿日期:2018-04-22;修回日期:2018-05-16

网络出版日期:2018-07-23

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

引用本文: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.

作, 本研究将采用直径为 25 mm 的装药对其进行测量。

2.1 热应力测量装置及原理

实验采用自行设计的测量装置(图 1)获取炸药慢速烤燃过程中的轴向热应力。将 3 节 $\Phi 25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的药柱装填至圆柱形钢筒中, 实验所用炸药为 HMX 基压装含铝炸药(HMX/Al/黏结剂的质量分数比为 64/30/6), 药柱的压制密度为 $1.85\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 筒的内径、壁厚、长度分别为 25, 10, 150 mm, 对药柱的径向具有较强的约束; 药柱两端采用钢柱填塞, 为了使其不仅具有传力柱的作用, 还具有较好的密封性, 需要对钢柱的直径公差进行精密的控制; 下端传力钢柱与装置的下基板接触, 并在两者之间放置 1 mm 厚的石棉隔热层, 尽可能降低两者间的热传递速率; 上端传力柱与测力传感器之间加置一个传力柱, 并在其两端放置石棉隔热层, 利用其热阻抗差异降低热传递速率, 避免力传感器的温度过高; 为了保证对药柱具有较强的约束, 上下基板的厚度为 15 mm, 其中心位置均设置定位槽, 螺栓的螺纹规格为 M20。装置中所有钢部件均为 45# 钢。由电阻丝制成的加热套包覆在钢筒的侧表面, 安装在钢筒侧表面的热电偶传感器用于获取壳体表面的温度。装置的安装过程中, 设置一定的预应力, 以减小石棉隔热层及药柱间隙等因素的影响; 安装完成后, 在加热套及上方传力柱周围包裹石棉隔热布, 以减少散热面积, 如图 1b 所示, 但测力传感器及与之接触的传力柱裸露。

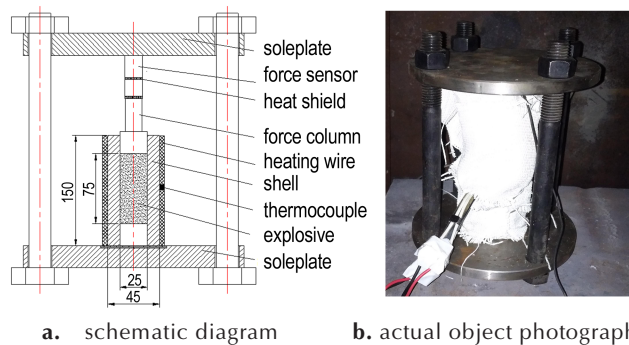


图 1 热应力测量装置图

Fig.1 Thermal stress measuring device

测力传感器的型号为 LH-685, 上海力恒传感技术有限公司生产, 满量程为 25 kN, 灵敏度 1.9598 mV/V , 实验过程中电桥的供电电压为 4 V, 则所测电压为 U (单位为 mV) 时可根据公式(1)计算出传感器所受的力 F (单位为 kN), 然后除以装药的横截面积, 则可获得药柱的轴向热应力值 p_r 。

$$F = \frac{U}{4 \times 1.9598} \times 25 \quad (1)$$

虽然根据该测量装置不能获得药柱的径向热应力 p_r , 但随着温度的升高, 药柱将发生软化, 则此时可假定 $p_r \approx p_a$ 。此外, 圆柱形钢壳体在加热过程会发生径向膨胀, 使其内腔的截面积增大, 从而使药柱受热后有一定的膨胀空间。这里可根据弹性力学轴对称平面应变假定对此进行分析, 其中, 壳体的径向位移 u 及径向应力 σ_r 分别为^[9]:

$$u = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \alpha \frac{1}{r} \int_a^r \Delta T \cdot r dr + C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (2)$$

$$\sigma_r = -\frac{\alpha E}{1 - \mu} \frac{1}{r^2} \int_a^r \Delta T \cdot r dr + \frac{E}{1 + \mu} \left(\frac{C_1}{1 - 2\mu} - \frac{C_2}{r^2} \right) \quad (3)$$

式中, E 为壳体材料的弹性模量 (210 GPa)、 μ 为泊松比 (0.3)、 α 为热膨胀系数 ($1.25 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$)^[10]; ΔT 为壳体温度的变化值, $^\circ\text{C}$; r 为壳体任意位置处的半径; a 为壳体的内半径; C_1 、 C_2 均为待定参数。为了便于分析, 本研究中假定壳体温度不随半径变化, 则将边界条件 $\sigma_r|_{r=a} = p_r$ 及 $\sigma_r|_{r=b} = 0$ 代入公式(3)后可得出 C_1 和 C_2 值, 再将其代入公式(2)便可计算出壳体内半径的增加值 $u|_{r=a}$:

$$u|_{r=a} = a(1 + \mu)\alpha \cdot \Delta T + \frac{p_r \cdot a}{E(b^2 - a^2)} [a^2(1 - \mu^2) + (1 + \mu)(b^2 - a^2\mu)] \quad (4)$$

式中, b 为壳体的外半径。从上式可进一步可获得壳体内腔截面积的相对增大值 η , 即

$$\eta = (a + u|_{r=a})^2 / a^2 - 1 \quad (5)$$

由于该装置四周的固定螺栓未受热, 且上端传力柱及测力传感器受到隔热层的保护或能够局部散热, 使其温度不会太高, 因此, 本研究中忽略该装置的轴向热应变, 则壳体内腔体积的相对增大值可近似为 η 。

2.2 升温速率的确定

热电偶仅能获取壳体外表面的温度, 因此需要建立壳体温度与装药温度的函数关系, 其最直接的方式是降低壳体的升温速率, 尽可能地减小壳体与装药的温度差。为了确定最佳的升温速率, 可在壳体内装填与炸药相同体积的硅橡胶, 在恒定的升温速率条件下, 获取壳体表面温度与硅橡胶内部应力的关系曲线; 停止加热后, 壳体表面温度逐渐下降, 由于硅橡胶的导热系数低, 其温度下降速率也较小, 则当壳体温度降至硅橡胶的温度时, 硅橡胶可向壳体传递热量, 此时壳体表

面的温度近似等于硅橡胶的温度,则可获得降温时硅橡胶温度与热应力的关系曲线。

图 2a 显示了壳体表面升温速率恒定为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,壳体表面温度 T 与硅橡胶的轴向热应力 p_a 的关系曲线,由于硅橡胶的体积膨胀系数及体积模量较大,导致加热过程中其内部应力上升较快,为了不超过测力传感器的量程,当温度上升至 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时便停止加热;在降温初期,由于壳体温度仍然高于硅橡胶,则硅橡胶的温度并未下降,使得其热应力也未降低,当壳体温度与硅橡胶一致后,热应力才缓慢下降。从图 2a 也可以看出,对于相同的应力值,两条曲线的温度值约相差 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此还需要继续降低升温速率。当升温速率恒定为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,两条曲线较为接近,如图 2b 所示,对于相同的压应力值,其温度值相差最大不超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑到所用硅橡胶的导热系数 ($0.23\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)^[11] 小于 PBX 含铝炸药 (其导热系数大于 $0.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)^[12],因此,对药柱进行加热实验时可采用该升温速率。

2.3 热应力随温度的变化规律

预应力为 2.5 MPa ,升温速率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的

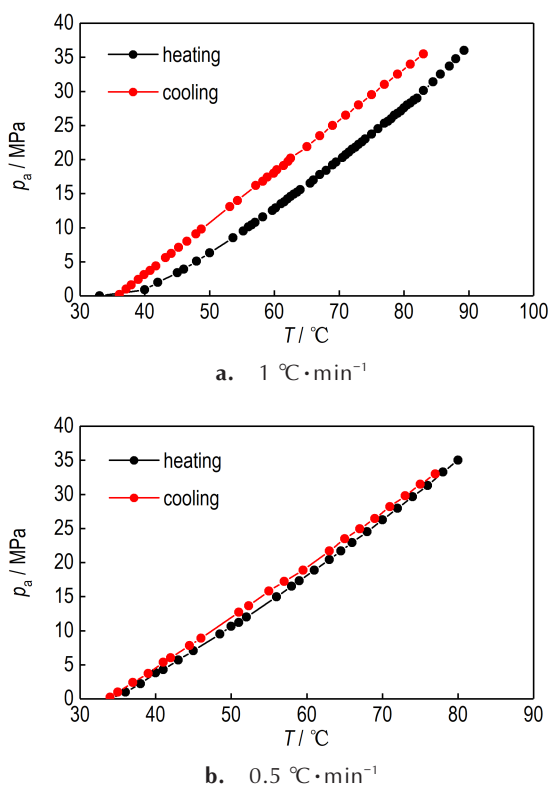


图 2 硅橡胶热应力与壳体表面温度的关系曲线
Fig. 2 Relationship curves between the surface temperature of shell and the thermal stress of silicone rubber

HMX 基含铝炸药装药热应力的变化过程如图 3 所示。从图 3 可以看出,整条曲线从趋势上可分为 6 个阶段: (1) 药柱温度逐渐上升至 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程中,其热应力平缓增至 3.3 MPa ,主要由药柱的热膨胀引起,其中可能伴随有石蜡的熔化; (2) 随着温度的增加,药柱内的热应力逐渐下降,并在 $130\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$,其热应力接近初始预应力值,这可能是由于炸药组分中的黏结剂逐渐熔化,降低了药柱内部的孔隙率所致; (3) 从 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始, HMX 发生晶型转变,即 β -HMX 逐渐转变为体积膨胀系数较大且较不稳定的 δ -HMX^[13],这使得药柱内的应力随着温度的上升而迅速增大,在 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应力值约达到 5.3 MPa ; (4) 应力的增长趋势明显变缓, (5) 出现了较长的平台段,这可能是因为药柱在热作用下开始有速率较慢的分解行为,部分小分子气体从微小的缝隙中缓慢泄露,一定程度上缓解了药柱内热应力的快速增长趋势; (6) 温度达到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近时, HMX 分解开始加速,尤其是在约 $206\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后,应力迅速上升,且炸药开始自加热, $208\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应力达到 9.2 MPa ,后续极短的时间内,装药点火。图 4 为药柱点火后测量装置的残骸,由图 4 可以看出,钢筒沿轴向发生了破裂,上下基板不仅发生了变形,且在中心位置还有明显的凹陷板痕,表明药柱发生了爆炸反应。

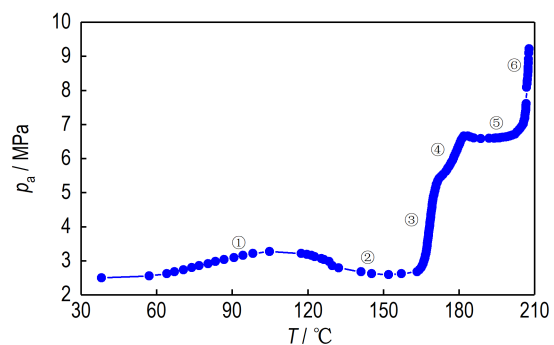


图 3 装药热应力随温度的变化曲线

Fig. 3 The change curve of thermal stress of charge with temperature

此外,图 3 还显示,该炸药反应前,其热应力小于 10 MPa ,则结合公式(4)和(5)可计算出壳体内半径的增加值 $u|_{r=a} \approx a(1 + \mu)\alpha \cdot \Delta T$,壳体内腔体积的相对增大值 $\eta \approx 2(1 + \mu)\alpha \cdot \Delta T$ 。在药柱临近点火时,壳体温度约上升了 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$,则 $\eta \approx 0.55\%$,这也是药柱受热过程中的最大体积膨胀比。

从上述实验可知,该装药点火时对应的温度为 $208\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、热应力为 9.2 MPa ,但在实际战斗部中,为了提升装药的安全性,常在壳体内表面或装药外表面涂



图4 实验后热应力测量装置的残骸

Fig.4 The wreckage of Thermal stress measuring device after the experiment

抹高分子类惰性包覆层,由于这类高分子材料的热膨胀系数远高于炸药,因此,慢烤过程中,装药热应力的增长速率会有一定提升,进而可能会改变装药点火的临界温度值及应力值,甚至可能影响响应剧烈程度。由于包覆层与装药的体积比一般较小,且包覆层沿装药表面分布较均匀,小药量试验中不易准确控制,因此,采用公斤级装药的烤燃弹研究该问题。

3 包覆层与装药的体积比对装药响应特性的影响

3.1 烤燃弹结构及试验布局

设计的烤燃弹由壳体、端盖及HMX基含铝炸药装药组成,其结构如图5所示。壳体壁厚为5 mm, Q235钢材质,为了模拟战斗部内腔形状特征,其前段设置为弧形;装药分为两部分,前段为半球形,直径为 $\Phi 114$ mm,后端为圆柱形,尺寸为 $\Phi 114$ mm \times 110 mm,整体装药量约2.8 kg;装药外表面与壳体内壁之间的包覆层选用加成型硅橡胶材质,且在同一种工况的烤燃弹中,包覆层的厚度恒定。通过调整壳体内腔的尺寸,设计了三种工况的烤燃弹,其包覆层的厚度分别为0.3, 0.6, 1 mm,从而使得包覆层与装药的体积比 β 分

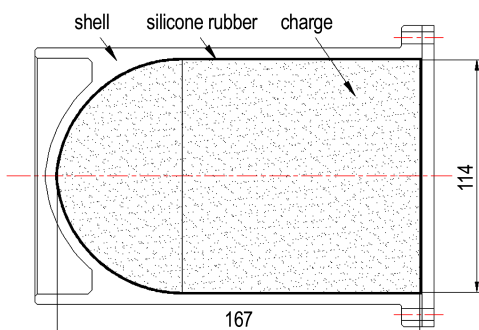


图5 烤燃弹结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of the cook-off bomb structure

别为2.26%, 3.27%, 4.62%。

为了保证烤燃弹表面受热均匀,本研究中选择在烤燃箱内对弹体进行加热,其布局如图6所示。为了保证箱体内空气温度分布均匀,在加热丝附近设置挡板及小型风扇,加速箱体内气体的流动;箱体一面设为钢化隔热玻璃,以便于摄像机记录实验全过程;设置了两个热电偶传感器,分别测量箱体内空气的温度及弹体表面的温度。

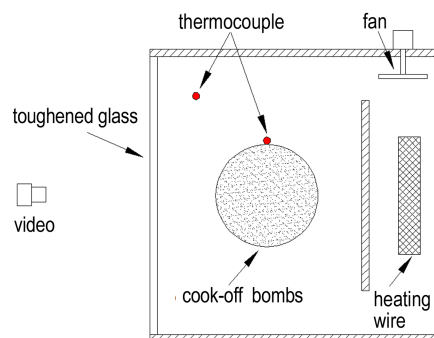


图6 慢烤试验布局图

Fig.6 Sketch of slow cook-off experiment

3.2 点火温度阈值及响应剧烈程度的变化

拟将壳体的升温速率控制在 $0.8\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,由于从空气到壳体的传热系数较小,因此需要提高箱体内空气的升温速率,以增大空气与壳体的温度差。实验时,以箱体内的空气温度作为加热控制系统的反馈参量,并将升温过程设置为四个阶段:第一阶段,以 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$,并恒温20 min;第二阶段,以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,并恒温30 min;第三阶段,以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$,并恒温20 min;第四阶段,以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率继续升温直至烤燃弹反应。

获得了三种工况烤燃弹的壳体温度变化曲线,如图7所示,其中, T_g 表示加热箱内的空气温度(不同工况下,箱内空气温度的变化曲线设置相同); T_{s-1} , T_{s-2} , T_{s-3} 分别表示 $\beta=2.26\%$, 3.27% , 4.62% 时的壳体表面温度。从图7可以看出,壳体表面的升温速率约为 $0.82\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,且随着 β 值逐渐增大,烤燃弹相应的临界点火温度呈现下降趋势,分别为 233.5 , 221.6 , $206.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这表明硅橡胶包覆层的热膨胀对装药形成了更强的挤压,提升了装药热应力随温度的上升速率,使得在更低温度时装药的热应力便达到点火阈值,且随着 β 值的增大,这一趋势愈发显著。此外,由烤燃弹点火前的温度分布的仿真云图(图8)可以看出,装药即将点火时,其中心部位的温度仅 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$,结合图3可

发现,此时该部位装药的热膨胀作用还未有效发挥,若进一步降低弹体的升温速率,减小弹体内的温度分布梯度,则烤燃弹点火的温度将会更低。

三种工况的烤燃弹响应后,壳体端盖处的连接螺钉均被拉断,端盖被抛出,壳体结构完好,壳体内及附

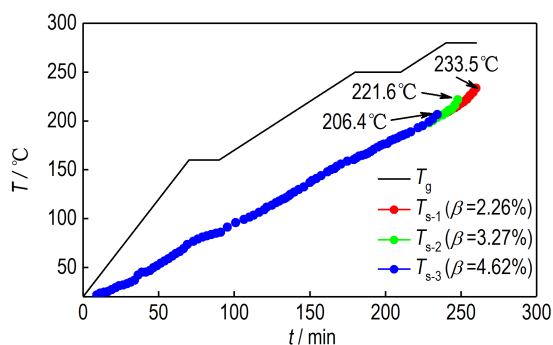


图7 烤燃弹温度随时间变化的曲线

Fig.7 Change curves of cook-off bomb temperature with time

近地面有装药燃烧后的残渣(图9a),且结合视频监控(图9b显示了点火瞬间两个时刻的现场状态)可以判断,装药仅发生了燃烧反应。这表明包覆层体积的增加虽然降低了烤燃弹的临界响应温度,但并未改变其响应的剧烈程度。

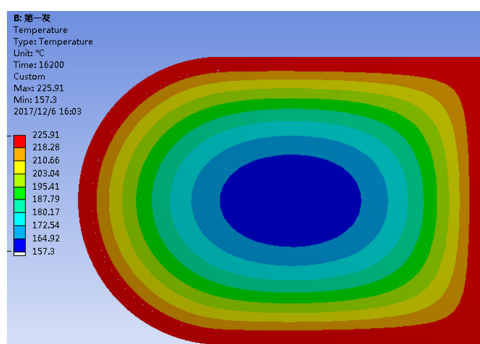
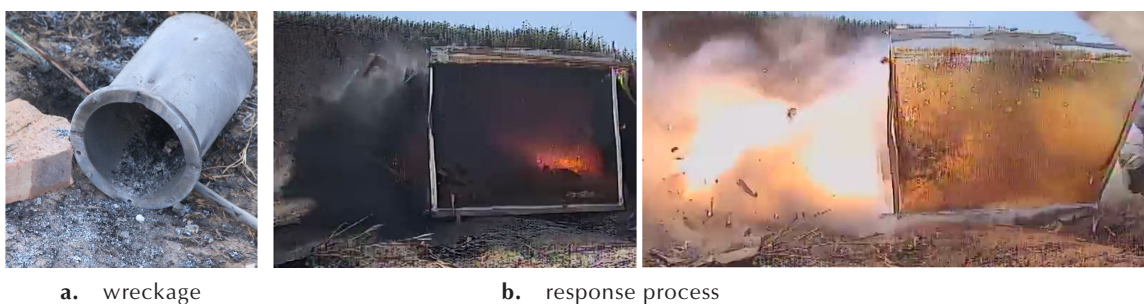


图8 烤燃弹点火前的温度分布云图($\beta=2.26\%$)

Fig.8 Temperature distribution of cook-off bomb before ignition ($\beta=2.26\%$)



a. wreckage

b. response process

图9 烤燃弹残骸及响应过程

Fig.9 The wreckage and response process of cook-off bomb

4 结论

(1) 在慢速烤燃条件下,壳体约束作用使 HMX 基含铝炸药装药的热应力逐渐增大;升温速率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,当温度超过 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,由于黏结剂逐渐熔化,降低了药柱内部的孔隙率导致装药内的热应力逐渐回落;约 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, HMX 逐渐发生晶型转变,体积膨胀系数增大,使得装药热应力的上升速率明显提升; $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, HMX 分解开始加速,热应力迅速上升,并随之产生自加热, $208\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应力达到 9.2 MPa ,装药随即点火。

(2) 烤燃弹内的硅橡胶包覆层体积与 HMX 基含铝炸药装药体积的比值从 2.26% 调整至 3.27% 及 4.62% ,且弹体表面的升温速率约为 $0.82\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,其临界响应温度从 $233.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 依次下降为 $221.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $206.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,但响应的剧烈程度并未改变。这表明热膨

胀性较强的硅橡胶对装药的挤压作用加快了装药热应力的增长速率,从而降低了装药的临界点火温度。

参考文献:

- [1] 周得才, 吕春玲, 李梅, 等. 粒度对硝酸类炸药烤燃热感度的影响[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 442-444.
ZHOU Dei-cai, LÜ Chun-ling, LI Mei, et al. Effect of particle size of nitroamine explosives on cook-off sensitivity[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(4): 442-444.
- [2] Atwood A I, Curran P O, Bui D T, et al. Energetic material response in a cook off model validation experiment[C]//Proceedings of Twelfth International Detonation Symposium. Office of Naval Research, San Diego, 2002: 112-117.
- [3] 蒲翰涛, 王星, 赵寒月, 等. RDX 基 PBX 药柱烤燃过程的数值模拟[J]. 含能材料, 2016, 24(10): 985-989.
PU Han-tao, WANG Xing, ZHAO Han-yue, et al. Numerical simulation of the cook-off process of RDX-based PBX cylinder [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(10): 985-989.
- [4] 胡双启, 解朝变, 智小琦. 装药密度与壳体约束对钝化 RDX 慢速烤燃特性的影响[J]. 火炸药学报, 2011, 34(2): 26-28.

- HU Shuang-qi, XIE Chao-bian, ZHI Xiao-qi. Effect of charge density and restriction of shell on slow cook-off characteristics of passive RDX [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(2): 26–28.
- [5] Garcia F, Vandersall K S, Forbes J W, et al. Thermal cook-off experiments of the HMX based high explosive Ix-04 to characterize violence with varying confinement[R]. American Physical Society Meeting on Shock Compression of Condensed Matter. MD. UCRL-CONF-214058, 2005.
- [6] 智小琦, 胡双启, 李娟娟, 等. 不同约束条件下钝化黑索今炸药的烤燃响应研究[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.
- [7] Madsen T, Defisher S, Baker E L, et al. Explosive venting technology for cook-off response mitigation [R]. Technical Report ARMET-TR-10003, 2010.
- [8] Madsen T, Defisher S, Baker E L, et al. Warhead venting design technology development[R]. NJ07856-5000, USA, 2008.
- [9] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 390–394.
XU Bing-ye, LIU Xin-sheng. Applied Elasticity and Plasticity [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995: 390–394.
- [10] 成大先. 机械设计手册. 单行本. 常用设计资料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 11.
CHENG Da-xian. Mechanical Design Handbook. Single File. Common Design Information [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 11.
- [11] 叶丹丹, 文庆珍, 王晓晴. 空心玻璃微球/硅橡胶隔热材料的研究[J]. 弹性体, 2017, 27(2): 24–28.
YE Dan-dan, WEN Qing-zhen, WANG Xiao-qing. Research of hollow glass beads/silicone rubber heat insulation material[J]. *Chinese Elastomeric*, 2017, 27(2): 24–28.
- [12] 韦兴文, 周筱雨, 王培, 等. 温度对HMX基PBX炸药热膨胀系数和导热率的影响[J]. 火炸药学报, 2012, 35(3): 33–37.
WEI Xing-wen, ZHOU Xiao-yu, WANG Pei, et al. Influence of temperature on thermal expansion coefficient and thermal conductivity of HMX based polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(3): 33–37.
- [13] 胡惟佳, 吴艳青, 黄风雷. 烤燃作用下的HMX单晶各向异性力学响应和相变[J]. 含能材料, 2018, 26(1): 86–93.
HU Wei-jia, WU Yan-qing, HUANG Feng-lei. Anisotropic mechanical response and phase transition of cooked HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(1): 86–93.

Effect of Thermal Stress on the Response Characteristics of HMX Based Aluminized Explosive Charge in Slow Cook-off Test

SHEN Fei, QU Ke-peng, WANG Sheng-qiang, XING Xiao-ling, WANG Hui

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

Abstract: To obtain the change of thermal stress in the slow cook-off test of explosive charge, a set of thermal stress testing device was designed. The change curves of the thermal stress with temperature of octogen (HMX) based aluminized explosive charge under the closed confinement condition were obtained. Through adjusting the volume ratio of inert coating layer and charge, and changing the rising rate of thermal stress in the slow cook-off process, the critical response temperature of cook-off bomb and the intensity of response under three working conditions were researched. The difference of change rate of thermal stress, the whose process can be divided into six stages. Its influencing factors is thermal expansion, porosity decrease, HMX crystal transformation, slow decomposition of HMX, partial small molecule gas leakage, and accelerated decomposition of HMX in the order. When the temperature rises to 208 °C, the thermal stress reaches 9.2 MPa and the charge is ignited immediately. Increasing the silicone rubber coating layer with greater thermal expansion on the charge surface of cook-off bomb, can make the growth rate of the thermal stress of charge accelerate and the critical ignition temperature of charge reduce, but the drastic degree of the response of charge does not change.

Key words: slow cook-off test; octogen (HMX) based aluminized explosive; warhead charge; thermal stress; coating layer

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018107