

文章编号:1006-9941(2021)02-0107-07

浇注炸药 PBX-1 侵彻安定性试验与数值模拟

张琪林¹,段卓平¹,孟凡星²,南海³,王昕捷¹,黄风雷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. 哈尔滨建成集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究浇注型高聚物黏结炸药(PBX-1)在侵彻过程中的安定性,开展 155 mm 火炮发射平头试验弹侵彻混凝土靶板试验,获得了该试验条件下装药安定的临界侵彻速度约为 $490 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。基于黏弹性统计裂纹(Visco-SCRAM)模型,采用流固耦合方法模拟了安定性试验中装药的力学响应,计算了装药黏弹性变形和宏观裂纹损伤导致的温升。数值模拟结果与试验结果相一致,试验弹体侵彻后无明显的变形和破坏,但浇注 PBX 炸药在侵彻过载下发生大变形流动,部分装药从尾部缝隙挤出并发生了局部点火反应;侵彻过程中装药尾部会与药室底部发生高速碰撞,形成局部高压区,最高压力超过 500 MPa,装药尾部变形和损伤严重,装药尾部在碰撞和挤出时,温度会急剧升高,从而导致意外点火。

关键词: 浇注型高聚物黏结炸药;侵彻安定性;黏弹性统计裂纹模型;点火;流固耦合

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020203

1 引言

浇注 PBX 炸药是一种具有低模量易变形特性的混合炸药,具有良好的抗过载和爆轰性能,自 20 世纪 80 年代,浇注 PBX 炸药开始广泛应用于高速侵彻战斗部中^[1-2]。钻地弹等侵彻战斗部装药在侵彻过程中需要承受极高的过载和复杂应力波作用,容易发生损伤、变形和摩擦,使局部温升过高,当温度超过炸药临界点火阈值时,装药会发生意外点火导致战斗部失效^[3-4]。因此,研究侵彻战斗部中浇注 PBX 装药的力-热响应具有重要意义。

国内外学者针对炸药的点火机制进行了广泛的研究,目前认可的热点机制包括裂纹摩擦、孔洞塌缩、位错滑移等^[5-7]。进一步研究表明,炸药在撞击等机械刺激下变形流动引起的温升是装药非冲击点火的重要因

素, Frankel 等^[8]通过测量落锤试验中炸药表面的温度变化,认为落锤实验中炸药的点火机制是大变形流动导致的温升;陈广南等^[9]计算了固体火箭推进剂在机械冲击载荷下的黏性升温,表明基体的黏性升温将促进含能颗粒受热分解,在一定条件下引发点火反应;楼建锋等^[10]在热弹塑性模型的基础上考虑了炸药的化学分解放热,较好地描述了 Steven 试验中炸药的力-热响应过程。Bennett^[11]在 Dienes^[12]和 Addressio^[13]等研究的基础上建立了黏弹性统计裂纹细观损伤模型(Visco-SCRAM),该模型将广义黏弹性体和细观微裂纹体耦合,不仅可以描述炸药的宏观黏弹性和细观裂纹损伤,还可以通过热力耦合表征炸药宏观变形升温 and 细观裂纹摩擦生热机制。浇注 PBX 装药因其浇注工艺和低模量的物理特性,可有效减少初始缺陷和裂纹摩擦形成的热点,但模量降低的同时会加大炸药在侵彻过载等复杂应力条件下的变形窜动,也难以对浇注 PBX 炸药在侵彻过程中的安定性进行实验和数值表征^[14-17]。

为研究浇注炸药 PBX-1 的侵彻安定性,本研究针对装填 PBX-1 炸药的平头试验弹进行了侵彻安定性试验,讨论了装药意外点火的原因;基于黏弹性统计裂纹模型,采用大变形流固耦合算法,对侵彻安定性实验进行了数值模拟,在验证试验结果的同时,分析了浇注炸

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-27

网络出版日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(11802024); 北京理工大学青年教师学术启动计划项目(2019年);

作者简介: 张琪林(1995-),男,硕士,主要从事材料与结构冲击动力学、炸药安全性方面的研究。e-mail: 2120170163@bit.edu.cn

通信联系人: 王昕捷(1991-),男,副研究员,硕士生导师,主要从事炸药安全性研究。e-mail: wangxinjie@bit.edu.cn

引用本文: 张琪林,段卓平,孟凡星,等. 浇注炸药 PBX-1 侵彻安定性试验与数值模拟[J]. 含能材料, 2021, 29(2):107-113.

ZHANG Qi-lin, DUAN Zhuo-ping, MENG Fan-xing, et al. Experiments and Numerical Simulations of Penetration Stability of Cast Charge PBX-1[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(2):107-113.

药在侵彻过程中的力-热-点火响应。

2 侵彻安定性试验

2.1 试验方法及条件

装药侵彻安定性试验采用 155 mm 火炮水平发射含装药试验弹, 试验弹自由飞行约 20 m 后, 以一定的着靶速度侵彻钢筋混凝土靶标。在不超过火炮发射能力的前提下, 试验弹的着靶速度可通过调整发射药药量实现。采用测速网靶测量试验弹的着靶速度, 通过高速摄影判读试验弹飞行姿态和着靶姿态, 最终根据回收试验弹的状态分析和确认炸药的安定性。

为增加弹体侵彻阻力, 提高装药过载, 采用平头弹进行侵彻混凝土靶板试验。试验弹尺寸为 $\Phi 156 \text{ mm} \times 480 \text{ mm}$, 总重量为 38 kg。试验弹装填的 PBX-1 是一种以 RDX 为基的新型抗过载浇注炸药, 由 64% 的 RDX、16% 的铝粉和 20% 的 HTPB 黏结剂组成, 装药量为 6.9 kg。靶板由四层强度等级为 C30 的钢筋混凝土靶板紧密叠加而成, 单层靶板尺寸为 $\Phi 2000 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 靶板四周采用 4 mm 钢板箍紧。试验弹结构如图 1 所示, 试验前弹体实物如图 2 所示。

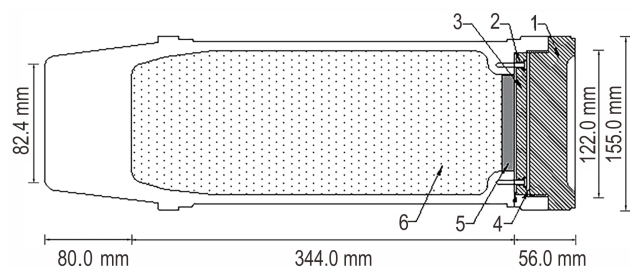


图 1 试验弹结构

1—后盖, 2—空隙, 3—盖板, 4—硅胶垫, 5—高分子材料, 6—装药

Fig.1 Structures of test projectile

1—rear cover, 2—interspace, 3—cover plate,
4—silicone pad, 5—polymer, 6—explosive



图 2 试验前弹体

Fig.2 Projectile before test

2.2 试验结果与分析

三发装填浇注炸药 PBX-1 的平头弹试验弹分别以

526, 489 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 416 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的着靶速度侵彻混凝土靶板, 回收试验弹发现试验弹壳体基本完好, 三发试验弹均发生了点火反应, 并且尾盖脱落。其中着靶速度为 526 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 489 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的试验弹嵌入靶中后瞬间尾盖脱落并伴有蓝烟冒出, 弹体尾部有少量炸药烧蚀; 着靶速度为 416 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的试验弹嵌入靶中约 3~5 min 后尾盖冲出并有大量浓烟冒出, 反应较为剧烈, 弹体被烧蚀发红, 弹体内大部分炸药燃烧, 由于反应剧烈, 无法直接判断点火位置, 但观察到平头弹的密封盖板背面螺栓孔周围有少量炸药残留。侵彻后弹体和装药状态如图 3 所示。



a. penetration of test projectile into concrete target



b. recovered test projectile

图 3 侵彻后的弹体及回收的试验弹状态

Fig.3 Penetration of projectile and recovered test projectile

本试验得到的装药安定的临界侵彻速度明显低于同条件下熔铸炸药安定的临界侵彻速度^[18], 为进一步分析原因, 重点对试验弹发生显著点火反应的尾部结构进行分析。试验弹密封盖板上下各有厚度约 1 mm 的硅橡胶垫, 而且密封盖板的螺栓孔为通孔, 螺栓与盖板以及盖板与壳体间均有空隙。试验中装药异常点火的原因可能是由于浇注 PBX 炸药模量较低, 炸药容易在侵彻过载下发生动态窜动, 向弹尾空隙处挤压流动, 产生较强的摩擦和剪切作用, 引起能量局域化并点火, 从而导致装药安定的临界侵彻速度降低。

2.3 设计改进及试验

针对装药的点火原因,以填充螺栓与盖板间以盖板与壳体间的空隙,提升装药密封性能为目的,对试验弹尾部结构进行了改进。首先将高分子材料药面修整掉约 6 mm,在高分子材料药面上装填足量有一定硬度的红色硅橡胶,然后装配密封盖板,多余的硅橡胶便会从密封盖板的通孔及周向空隙处溢到盖板表面;再在盖板表面放置厚度为 2.2 mm 的金属垫片,添加少量硅橡胶,最后装配后盖,多余的硅橡胶便会从螺纹处挤出,同时会有部分硅橡胶留在螺纹内起密封作用。改进后的弹体尾部结构如图 4 所示。

弹体结构改进后,又进行了三发着靶速度分别为 526、488 m·s⁻¹ 和 492 m·s⁻¹ 的试验弹侵彻混凝土靶试验,试验结果见表 1。由表 1 可知,弹体尾部结构改进后,装药侵彻安定性有了一定提升,根据试验结果可得浇注炸药 PBX-1 在侵彻试验中安定的临界速度约为 490 m·s⁻¹。

验,试验结果见表 1。由表 1 可知,弹体尾部结构改进后,装药侵彻安定性有了一定提升,根据试验结果可得浇注炸药 PBX-1 在侵彻试验中安定的临界速度约为 490 m·s⁻¹。

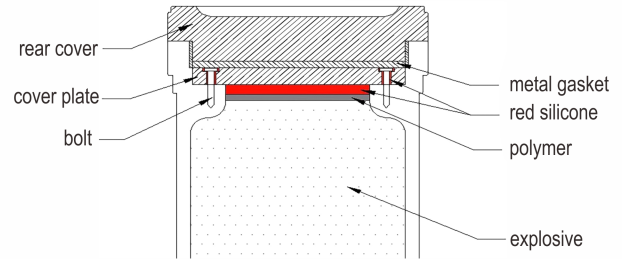


图 4 改进后的弹体尾部结构
Fig.4 Configuration of the improved projectile tail

表 1 浇注炸药 PBX-1 侵彻安定性试验结果

Table 1 Penetration stability test results of cast charge PBX-1

No.	penetration velocity / m·s ⁻¹	penetration depth / m	results
1	526	1.04	the rear cover of projectile comes off and the charge partially reacts
2	488	1.0	the rear cover of projectile comes off and the charge is unreactive
3	492	1.0	test projectile is in good condition and the charge is unreactive

3 数值模拟

3.1 有限元模型

为模拟具有大变形特征的浇注 PBX 炸药在弹体侵彻过程中的力-热响应,综合分析改进前后装药安定性差异和发生点火的原因,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对平头弹侵彻混凝土靶板安定性试验进行有限元仿真。由于浇注 PBX 炸药具有低模量、易变形的特点,炸药采用传统的 Lagrange 网格计算容易发生大变形网格畸变,导致计算中止。因此本研究采用流固耦合算法,装药采用 Euler 网格,在装药运动区域建立 Euler 网格流动域,并以空气填充,炸药和空气通过共节点接触,弹体结构和混凝土靶均采用 Lagrange 网格, Lagrange 网格和 Euler 网格通过流固耦合关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 作用。

由于试验弹均正侵彻靶体,因此建立 1/4 轴对称计算模型如图 5 所示。模型中为模拟装药从弹尾缝隙挤出现象,考虑到网格匹配和计算成本的因素,将改进前弹体缝隙宽度适当扩展至 3.3 mm,在改进后的弹体中将缝隙闭合。弹体侵彻硬质目标的数值模拟中,由于弹体和混凝土靶板之间的侵蚀算法会使靶体成坑区域网格大规模侵蚀删除,应力波等侵彻阻力数据会

产生明显的周期性振荡,对于前端为整个平面的平头试验弹,其数值振荡更加明显,需要在靶板轴向加密靶板网格,抑制数值噪声^[19]。对混凝土靶中心弹靶接触区域以及炸药网格进行不同程度地加密,经过对比验证,在尽可能节约计算成本且不影响计算结果的情况下,将弹靶接触区靶板网格的轴向长度设为 1.3 mm 可有效避免数值振荡,炸药的最小网格尺寸为 1.1 mm。

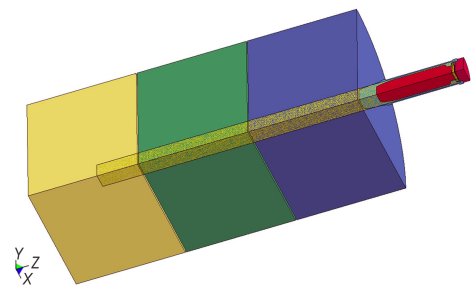


图 5 试验弹侵彻靶体 1/4 计算模型
Fig.5 One-fourth of the calculation model for a projectile penetrating target

3.2 材料模型与参数

采用黏弹性统计裂纹模型^[11-13]描述炸药的裂纹损伤和黏弹性力学特征,并通过力-热-化耦合建立宏观有限单元的体积温升模型,计算装药黏弹性变形和裂纹损伤以及化学分解热导致的温升,下面给出相关主要表达式。

广义黏弹性统计裂纹模型由多个 Maxwell 体元并联而成的广义黏弹性体与微裂纹体元串联而成, 模型中材料的总偏应力 \dot{S}_{ij} 可表示为:

$$\dot{S}_{ij} = \frac{2G\dot{\epsilon}_{ij} - \sum_{n=1}^N \frac{S_{ij}^{(n)}}{\tau^{(n)}} - 3\left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} S_{ij}}{1 + \left(\frac{c}{a}\right)^3} \quad (1)$$

式中, G 为弹性体的剪切模量, MPa; 上标 n 表示第 n 个 Maxwell 体元; N 是 Maxwell 体元数; c 为微裂纹平均半径, m; a 为初始缺陷尺寸, m; τ 表示松弛时间, s。 $S_{ij}^{(n)}$ 为每个 Maxwell 黏弹性体元的偏应力, MPa, 其微分形式 $\dot{S}_{ij}^{(n)}$ 为:

$$\dot{S}_{ij}^{(n)} = 2G^{(n)}\dot{\epsilon}_{ij} - \frac{S_{ij}^{(n)}}{\tau^{(n)}} - \frac{G^{(n)}}{G} \left[3\left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} S_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 \dot{S}_{ij} \right] \quad (2)$$

基于黏弹性统计裂纹模型的体积温升模型考虑了装药的黏性、绝热体积压缩、裂纹演化拓展和化学分解的贡献, 化学分解放热用 Arrhenius 一级化学反应动力学方程描述, 当化学反应失稳也就是装药发生点火时,

温度会呈指数级增长, 考虑到侵彻时间较短, 忽略了热传导, 总的宏观温升变化率为:

$$\dot{T} = -\gamma T \dot{\epsilon}_{kk} + \frac{\eta}{\rho C_v} [\dot{W}_{ve} + \dot{W}_{cr}] + \frac{\Delta H}{C_v} Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

式中, γ 为 Gruneisen 系数; T 表示温度, K; $\dot{\epsilon}_{kk}$ 为体应变; ρ 是材料密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; C_v 为定容比热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; \dot{W}_{ve} 和 \dot{W}_{cr} 分别表示 Maxwell 体元黏性功率和微裂纹扩展功率, 其具体表达式分别见式(4)和式(5); η 代表机械功的热转换率; ΔH 为炸药单位质量化学反应热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$; E_a 为活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$; Z 为指前因子, s^{-1} 。

$$\dot{W}_{ve} = \sum_{n=1}^N S_{ij}^{(n)} \dot{\epsilon}_{ij}^{ve} = \sum_{n=1}^N \frac{S_{ij}^{(n)} S_{ij}^{(n)}}{2G^{(n)} \tau^{(n)}} \quad (4)$$

$$\dot{W}_{cr} = S_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^{cr} = \frac{1}{2G} \left[3\left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} S_{ij} S_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 S_{ij} \dot{S}_{ij} \right] \quad (5)$$

本研究中浇注炸药 PBX-1 的物性与文献[20]中所研究的浇注 PBX 炸药相近, 该型炸药由 60% 的 RDX、16% 的铝粉和 24% 的 HTPB 黏结剂组成, 因此本文数值模拟中采用文献[20]已标定的模型参数, 具体见表 2 所示。

表 2 浇注 PBX 炸药材料参数^[20]

Table 2 Material parameters of cast PBX explosive^[20]

$G^{(1)}$ / MPa	$G^{(2)}$ / MPa	$G^{(3)}$ / MPa	$G^{(4)}$ / MPa	$G^{(5)}$ / MPa	a / m	m	ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
35	4.27	83.56	115.94	472	0.002	10	1.69
$\tau^{(1)}$ / s	$\tau^{(2)}$ / s	$\tau^{(3)}$ / s	$\tau^{(4)}$ / s	$\tau^{(5)}$ / s	c_0 / m	v / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	K_0 / $\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$
0	7.5×10^{-4}	7.5×10^{-5}	7.5×10^{-6}	7.5×10^{-7}	0.00002	300	2.5×10^5

Note: $G^{(1)}, G^{(2)}, G^{(3)}, G^{(4)}, G^{(5)}$ are relaxation modulus. $\tau^{(1)}, \tau^{(2)}, \tau^{(3)}, \tau^{(4)}, \tau^{(5)}$ are relaxation time. a is the initial flaw size. m is the cracking parameter. ρ is density. c_0 is the average crack radius. v is the maximum growth rate of the average crack radius. K_0 is the initiation toughness of the matrix material.

平头试验弹壳体为高强度钢, 采用塑性随动硬化模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 描述, 主要材料参数见表 3^[21]。混凝土靶的有限元模型简化成素混凝土, 采用 HJC 模型, 其主要材料参数见表 4^[22]。

表 3 试验弹壳体主要材料参数^[21]

Table 3 Material parameters of projectile shell^[21]

ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	E / GPa	σ_y / GPa	β
7.85	210	1.5	1.0

Note: ρ is density. E is Young's modulus. σ_y is yield stress. β is hardening parameter.

3.3 计算结果与分析

由于基于 Eluer 网格的流固耦合算法无法跟踪物质点, 数值模拟结果主要以云图形式呈现。图 6 为着靶速度 $416 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下平头试验弹侵彻过程中装药的压

表 4 混凝土靶板主要材料参数^[22]

Table 4 Material parameters of concrete target^[22]

ρ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	f_c / MPa	G / MPa	σ_T / MPa
2.4	35	13.52	4

Note: ρ is density. f_c is uniaxial compression strength. G is shear modulus. σ_T is maximum tensile strength.

力云图。由图 6 可见, 侵彻初始阶段, 装药头部主要受从壳体传入的压缩波作用; 当压缩波传至弹体和装药尾部界面时, 发生自由面反射形成拉伸波; 由于从装药头部传入的压缩波幅值大于从尾部向前传播的拉伸波, 中后部的炸药因两种应力波抵消, 应力值最低。480 μs 和 660 μs 时刻, 装药峰值压力近 300 MPa 且均集中在头部中心处, 分析原因可能是从弹体周围透射进入装药的压缩波会在装药头部中心汇聚, 导致应力集中。侵彻过程中装药在冲击过载下发生压缩变

形,弹体底盖与装药之间出现了明显的间隙,660 μs 时最大间隙达 2.6 cm。1080 μs 时,装药尾部与弹体底盖发生了碰撞,形成局部高压区。碰撞后尾部装药开始向弹体盖板与弹壳之间的缝隙挤压流动,最终有部分装药渗漏至盖板背面,如图 7 所示,与实验中观察到回收的弹体盖板背面有炸药残留的现象一致。

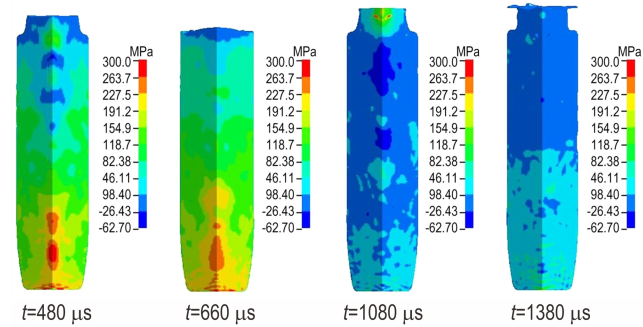


图 6 试验弹着靶速度 416 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时装药压力云图
Fig.6 Pressure contours of charge at the initial penetration velocity of 416 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

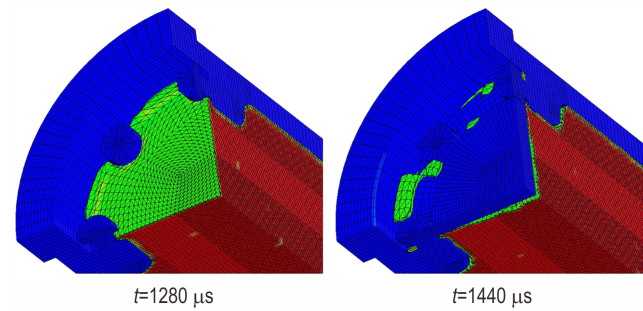


图 7 装药从尾部缝隙渗出
Fig.7 Charge seeping from the gap in the tail

为对比分析弹体结构改进前后装药安定临界侵彻速度不同的原因,图 8 和图 9 分别为弹体结构改进前后,在着靶速度 416 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下试验弹侵彻过程中装药的温度云图,其中初始温度为 298 K。弹体尾部结构改进前后,装药头部的宏观变形温升基本一致,在头部中心应力集中处的温度较高。由图 8 可见,改进前试验弹尾部装药在 1080 μs 时与药室底部碰撞后,温度急剧上升,最高温度达 436 K,但没有发生点火。改进前试验弹尾部存在缝隙,当装药尾部因碰撞从缝隙挤出时,发生强烈的剪切变形和黏性流动,在化学分解热的促进下尾部装药温度迅速上升,没有发生点火的原因可能是没有考虑摩擦等局部耗散机制。由图 9 可知,改进后的弹体在 1050 μs 时,装药尾部撞向药室底部,装药压力和变形迅速增大,温度增加到 400 K,但由于碰撞压力较低,瞬时温升不足以使装药发生点火。图 9 中装药边缘的温度场出现了低于初始温度的情

况,是因为基于流固耦合算法的 Euler 网格物质边界不清晰导致边界计算精度不高。

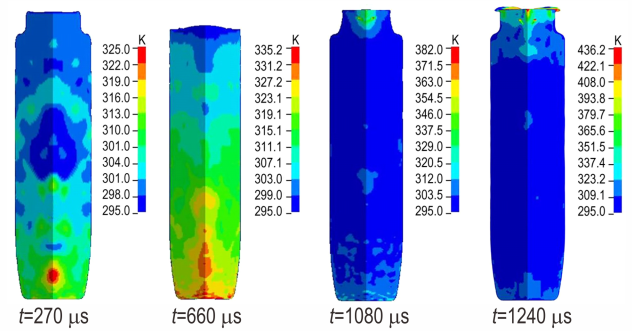


图 8 试验弹 416 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度侵彻温度云图
Fig.8 Temperature contours of original projectile at the initial penetration velocity of 416 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

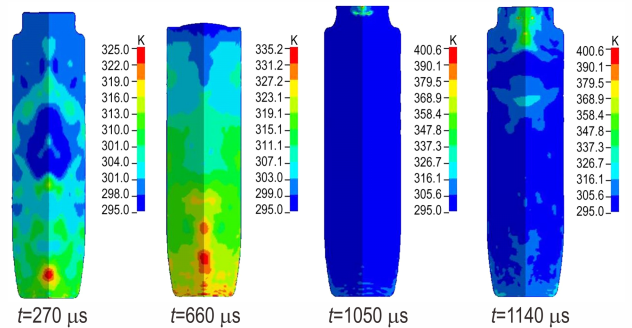


图 9 改进试验弹 416 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度侵彻温度云图
Fig.9 Temperature contours of improved projectile at the initial penetration velocity of 416 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

为分析改进弹体密封性后,着靶速度为 526 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下装药意外点火的机制,对该试验条件下的弹体侵彻进行了数值模拟,图 10 和图 11 分别为压力和温度云图。由图 10 和图 11 可见,210 μs 和 660 μs 时,装药处于压缩阶段,温升主要集中在头部,装药温升与所受的应力状态紧密相关,当压缩波在装药中心汇聚时装药变形增大使得温度升高,在应力集中处形成局部高温区。装药压缩至最低位置后,在拉伸波的作用下开始回弹,体积功的恢复吸热使得装药温度有所下降。1020 μs 时,尾部装药高速撞向弹体底盖,碰撞速度达 125 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,导致压力迅速上升,压力最大值超过 500 MPa,装药尾部温度在压力作用下急剧升高,在化学分解热的促进下温升发生失稳,1050 μs 时,装药已经发生了点火。加强弹体尾部密封性后,装药不再发生渗漏,但随着侵彻速度增加,装药与弹体尾部的碰撞压力增加,装药尾部变形和损伤严重,容易导致装药提前点火。

将平均裂纹半径 c 与初始缺陷尺寸 a 之比 c/a 表征炸药的裂纹损伤程度,图 12 为改进试验弹 526 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度侵彻过程中装药无量纲损伤变量 c/a 云图。由

图12可知, 210 μs 时, 装药损伤主要集中在头部, 在应力集中处损伤最为严重; 660 μs 时, 装药损伤主要集中在尾部和头部, 尾部损伤程度最高; 1020 μs 后装药尾部与药室底部发生碰撞, 碰撞区域无量纲损伤变量 c/a 超过40。Visco-SCRAM模型中裂纹扩展速率与压缩状态下的偏应力和拉伸状态下的拉应力相关^[11], 侵彻初始阶段装药仅在头部受压缩应力作用, 此后尾部装药逐渐受到向中心汇聚的拉应力作用, 装药损伤严重区域逐渐从头部转向尾部, 1020 μs 时, 装药尾部在较高的碰撞压力下使得裂纹体的半径迅速扩大。

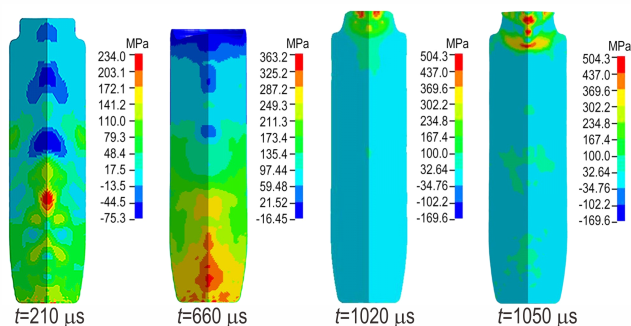


图10 改进试验弹 $526 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度侵彻压力云图

Fig.10 Pressure contours of improved projectile at the initial penetration velocity of $526 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

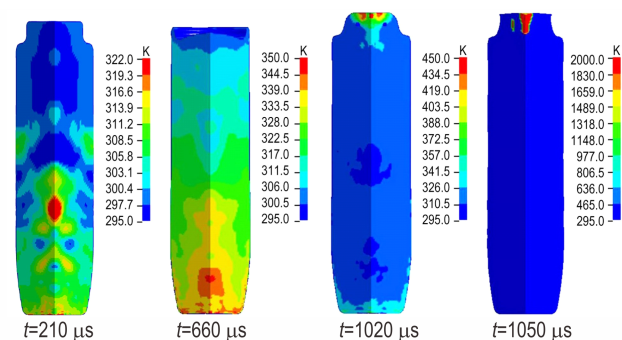


图11 改进试验弹 $526 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度侵彻温度云图

Fig.11 Temperature contours of improved projectile at the initial penetration velocity of $526 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

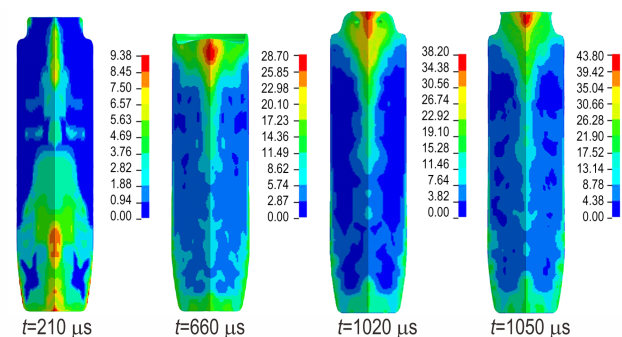


图12 改进试验弹 $526 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度侵彻裂纹损伤云图

Fig.12 Crack damage contours of improved projectile at the initial penetration velocity of $526 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

4 结论

对具有低模量、大变形力学特征的浇注炸药PBX-1进行了侵彻安定性试验和数值模拟研究, 在获取其在侵彻过程中力-热响应的同时, 综合分析了安定性试验中不同弹体结构中装药点火的原因。得到如下结论:

(1) 侵彻安定性试验中PBX-1装药在尾部发生了局部点火反应, 浇注炸药在侵彻过载下容易发生大变形流动, 当弹体尾部密封性不足时, 装药会朝尾部缝隙挤压流动, 发生强烈的剪切和摩擦作用, 严重影响了装药安定性, 因此含浇注PBX装药的弹体尾部在设计 and 装配中应加强密封性。

(2) 数值模拟结果表明, 弹体侵彻过程中装药头部主要受弹体头部传入的压缩波作用, 弹体和药室头部结构的汇聚效应会使装药容易产生应力集中; 装药尾部主要受拉伸波的作用, 尾部装药会高速撞向药室底部, 形成局部高压区, 局部高压导致的能量集中是引发装药点火的重要因素。改善装药头部和尾部的受力环境是以后侵彻弹体设计中需要重点关注和解决的问题。

参考文献:

- [1] Gordana A, Vesna R, Zoran B. Influence of content and dispersion of octogene and oxidizer on the mechanical properties of cast aluminized PBX[J]. *Scientific Technical Review, LVIII* (2), 2008: 51-59.
- [2] Hoffman D M, Hawkins, T W, Lindsay, G A. Clean, agile alternative binders, additives and plasticizers for propellant and explosive formulations [C]// *Life Cycles of Energetic Materials*, Del Mar, CA (United States). 1994.
- [3] Lefrancois A, Lambert P, Chesnet P, et al. Microstructural analysis of HE submitted to penetration experiments[C]// *Proceedings of the 31st International Pyrotechnics Seminar*. Fort Collins, CO, US: IPS USA Seminars, Inc., 2004: 687-706.
- [4] 高金霞, 赵卫刚, 郑腾. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究[J]. *火工品*, 2008(4): 4-7.
GAO Jin-xia, ZHAO Wei-gang, ZHENG Teng. Study on the anti-overloading technique for penetrating warhead charge. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(4): 4-7.
- [5] Field J E. Hot spot ignition mechanisms for explosives[J]. *Accounts of Chemical Research*, 1992, 25(11): 489-496.
- [6] Field J E, Bourne N K, Walley S M, et al. Hot-spot ignition mechanisms for explosives and propellants[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1992, 339 (1654): 269-283.
- [7] 彭亚晶, 叶玉清. 含能材料起爆过程“热点”理论研究进展[J]. *化学通报*, 2015, 78(8): 693-701.
PENG Ya-jing, YE Yu-qing. Research progress of ‘Hot-Spot’ theory in energetic materials initiation[J]. *Chemistry Bulletin*, 2015, 78(8): 693-701.
- [8] Frankel M, Liddiard T, Coffey S. Experimental investigation of hot spots produced by high rate deformations and shock waves [C]// *Proceedings of 7th International Symposium on Detona-*

- tion. 1981: 970-975.
- [9] 陈广南, 张为华, 夏智勋. 机械冲击载荷下粘性加热对颗粒填充固体推进剂热点形成的影响[J]. 固体火箭技术, 2005(3): 192-194, 211.
CHEN Guang-nan, ZHANG Wei-hua, XIA Zhi-xun. Effect of viscous heating on hot-spot formation of particulate filled propellant under the mechanical impact load[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2005(3): 192-194, 211.
- [10] 楼建锋, 张延耿, 周婷婷, 等. 基于力热耦合材料模型的 Steven 试验数值模拟方法[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 807-812.
LOU Jian-feng, ZHANG Yan-geng, ZHOU Ting-ting, et al. Research on the damage and hot-spot generation in explosive charges during penetration into single-or multi-layer target[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(5): 807-812.
- [11] Bennett J G, Haberman K S, Johnson J N, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46(12): 2303-2322.
- [12] Dienes J K, Zuo Q H, Kershner J D. Impact initiation of explosives and propellants via statistical crack mechanics[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 2006, 54(6): 1237-1275.
- [13] Addessio F L, Johnson J N. A constitutive model for the dynamic response of brittle materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 67(7): 3275-3286.
- [14] 成丽蓉, 汪德武, 贺元吉. 侵彻单层和多层靶时战斗部装药损伤及热点生成机理研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(1): 32-39.
CHENG Li-rong, WANG De-wu, HE Yuan-ji. Numerical method for simulating Steven test based on thermos-mechanical coupled material model[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(1): 32-39.
- [15] 李媛媛, 高立龙, 李巍, 等. 抗过载炸药装药侵彻安全性试验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 702-705.
LI Yuan-yuan, GAO Li-long, LI Wei, et al. Experiment research on security of insensitive explosive charge during penetration [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(6): 702-705.
- [16] Gruau C, Picart D, Bouton E, et al. Ignition of a confined high explosive under low velocity impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36: 537-550.
- [17] 唐明峰, 蓝林钢, 李明, 等. 以 RDX 为基的浇注 PBX 力学性能与本构模型[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 215-220.
TANG Ming-feng, LAN Lin-gang, LI Ming, et al. Constitutive behavior of RDX-based PBX with loading-history and loading-rate effects [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 215-220.
- [18] 李东伟. 侵彻环境下炸药装药安定性评估方法[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
LI Dong-wei. Evaluation method of explosive charge stability in penetration environment [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [19] 王晨, 王亚斌. 弹体硬目标侵彻数值模拟数值噪声发生机理及抑制方法研究[C]//2015 Altair 技术大会论文集. 2015: 531-541.
WANG Chen, WANG Ya-bin. Occurring mechanism and restraining method research of numerical noise signal in penetration simulation [C]//Proceedings of 2015 Altair Technical Conference, 2015: 531-541.
- [20] Xiao Y, Sun Y, Zhen Y, et al. Characterization, modeling and simulation of the impact damage for polymer bonded explosives [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 103: 149-158.
- [21] 孙宝平, 段卓平, 张海英, 等. 破片撞击装药点火实验和数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(5): 456-462.
SUN Bao-ping, DUAN Zhuo-ping, ZHANG Hai-ying, et al. Experiment and numerical simulation on ignition of charge by fragment impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 456-462.
- [22] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strain, high strain rates, and high pressure[C]//The 14th International Symposium on Ballistic. Quebec, Canada, 1993: 591-600.

Experiments and Numerical Simulations of Penetration Stability of Cast Charge PBX-1

ZHANG Qi-lin¹, DUAN Zhuo-ping¹, MENG Fan-xing², NAN Hai³, WANG Xin-jie¹, HUANG Feng-lei¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Harbin Jiancheng Group Company Ltd., Harbin 150030, China; 3. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To study the stability of a cast polymer-bonded explosive (PBX) during penetration, projectiles with the PBX-1 charge was launched by a 155mm gun to penetrate concrete targets. The penetration depths at different velocities were obtained, and the critical penetration velocity for maintaining the charge stability was about $490 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Based on the viscoelastic statistical crack (Visco-SCRAM) model, the experiments for testing penetration stability were modelled by a fluid-solid coupling method with large deformation. Thermal-mechanical responses of the charge during penetration were obtained and reasons for the unexpected ignition of the charge were analyzed. The numerical results and experimental data are in a good agreement. The results show that no obvious deformation or damage is observed for the projectile shell, while the cast PBX charge undergoes large deformation and part of charge seeps out from the end gap. During the penetration process, the charge collides with the bottom of charge chamber at high speed and forms a local high-pressure zone. The maximum pressure exceeds 500 MPa when the charge tail is impacted. The tail of the charge is deformed and damaged severely, which may lead to a highly localized temperature and even ignition.

Key words: cast polymer-bonded explosive (PBX); penetration stability; viscoelastic statistical crack mechanics; ignition; fluid-solid coupling

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020203

(责编: 王艳秀)