

三种典型传爆药烤燃研究

华 泽¹ 刘天生¹ 王凤英¹ 吕春玲¹ 陈 燕² 鲁 飞³

(1.中北大学环境与安全工程学院,太原 030051;

2.陆军装备部驻北京地区军事代表局某军事代表室,太原 030009;

3.陆军装备部装备项目管理中心,北京 100089)

摘 要 为了研究传爆药在战场上对高温火焰的敏感程度及响应程度,选用 JFox、JH-14、PBXN-53 种典型的传爆药,用油压机压制大约 90%理论密度的药柱,以美军标 MIL-STD-2105C 和北约军标 STANAG4240 为参考确立了快速烤燃和慢速烤燃实验方法,以模拟遭受火灾、高温时的战场环境。通过对响应时间及响应时间段内火焰的平均温度的分析,并根据壳体破碎状态及位置、残药数量和位置、鉴证板状态等,判定传爆药的响应等级。实验结果表明,JH-14 较为敏感,快速烤燃实验中发生爆燃,慢速烤燃实验中发生了爆轰,属于易损性弹药;PBXN-5 较为敏感,对壳体破坏大,快速烤燃响应等级为爆燃,慢速烤燃响应等级为爆燃,不属于非易损性弹药;JFox 较为钝感,对壳体破坏小,快速烤燃响应等级和慢速烤燃响应等级都是燃烧,属于低易损性传爆药。

关键词 传爆药,快速烤燃,慢速烤燃,热安全性,低易损性

Study on three typical booster explosives by cook-off test

Hua Ze¹ Liu Tianshen¹ Wang Fengying¹ Lv Chunling¹ Chen Yan² Lu fei³

(1.School of Environment and Safety Engineering,North University of China (NUC),

Taiyuan 030051;2.A Military Representative Office of the Military Representative Bureau in Beijing of the Army Equipment Department,Taiyuan 030009;3.Equipment Project Management Center of the Army Equipment Department,Beijing 100089)

Abstract In order to study the sensitivity and responsiveness of booster to high temperature flame in battlefield,three typical booster explosives,JFox,JH-14 and PBXN-5,were used to suppress the theoretical density of about 90% by hydraulic press,and the fast cook-off test method and slow cook-off test method were established with reference to the US military standard MIL-STD-2105C and NATO military standard STANAG 4240.Cook-off test method was used to simulate the battlefield environment under fire and high temperature.Through the analysis of response time and average temperature of flame in response time,and according to the crushing state and position of shell,the quantity and position of residue and the state of identification plate,the response grade of booster explosive was determined.The test results shown that JH-14 was more sensitive,detonation occurred in fast cook-off test and detonation occurred in slow cook-off test,which belonged to vulnerable ammunition.PBXN-5 was more sensitive,and had damage to the shell.The response level of fast cook-off was detonation,and the response level of slow cook-off was detonation,which was not a non-vulnerable ammunition.JFox was more insensitive,had small damage to the shell,fast cook-off response level and slow cook-off response level were burning,belonged to LOVA booster explosive.

Key words explosive booster,fast cook-off,slow cook-off,thermal safety,low vulnerability(LOVA)

随着武器系统的快速发展,战场环境日益恶化。为了适应这种日益恶化的战场环境,弹药除了要满足技术要求以外,其安定性、可靠性也面临新的更严格的标准。提高弹药在战场上的生存能力以及使用、生产、运输、储存过程的安定性,已经成为国内外武器研究者关注的热点问题,低易损性弹药应运而

生,成为未来弹药的发展方向^[1-3]。

传爆药烤燃实验是模拟战场上明火或高温条件下传爆药的热安定性,以生产、储存、运输及战争环境中遭受火灾或者高温烘烤为出发点设计的实验,用来检验传爆药对高温火焰的敏感程度及相应的响应程度。传爆药的烤燃实验是检验传爆药易损性的

基金项目:国家自然科学基金(11572292);国家自然科学基金(11572292)

作者简介:华泽(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为传爆药烤燃和武器系统运用与工程。

重要方法之一,传爆药快速、慢速烤燃实验方法和机理及影响因素的研究对传爆药热安定性的分析和评价具有重要意义^[4-5]。

我国对传爆药烤燃实验的研究起步较晚,近年智小琦等^[6]研究了壳体密封条件对和黑索今(RDX)基传爆药快速烤燃响应特性的影响,分析了影响传爆药的快速烤燃响应特性的主要原因;刘文杰^[7]对传爆药烤燃特性进行了数值仿真,并用烤燃实验测定传爆药等在较高温度下的反应状况;孙培培等^[8]对壳体参数对快速烤燃的影响进行了研究。杨建等^[9]研究了装药直径对奥克托今(HMX)基炸药慢速烤燃性能的影响;胡双启等^[10-11]研究了炸药装药密度对慢速烤燃响应和快速烤燃响应的影响,使得烤燃实验在过去的几年里获得较快发展,并得到越来越多的关注。

本研究主要通过借鉴美军标 MIL-STD-2105C^[12] 北约军标 STANAG4240^[13],确定快速烤燃实验方法及其相关实验参数、工具,并且对3种典型的传爆药进行快速烤燃实验和慢速烤燃实验,通过反应时间、响应等级和壳体损害程度来判断响应等级,确定它们是否属于低易损性弹药,并排除装药密度与尺寸、壳体材料与厚度、密封条件、周围环境等外界影响因素,从药剂成分方面对烤燃实验的影响进行分析。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

Fox-7(工业纯,纯度>99%),中北大学提供原材料;HMX(工业纯),甘肃银光化学工业集团有限公司;RDX(工业纯),甘肃银光化学工业集团有限公司。

63t 油压机(7908型),山东机三厂;无纸记录仪(MIK-5008D型),杭州美控自动化技术有限公司;密度天平(FA2104J型),上海舜宇恒平科学仪器有限公司;电子天平(GB/T23111型),梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 快速烤燃实验方法

将传爆药药柱约束在用金属材料制成的烤燃弹中,将烤燃弹置于高温火焰源中快速加热,一直到被测传爆药药柱发生响应为止;然后通过对烤燃弹壳体变形破坏状况、样品残骸状态、鉴证板状态等进行综合分析,以判定传爆药的响应等级,再用响应等级评定低易损传爆药的快速烤燃安全性。烤燃弹设计图、实验系统示意图和现场布置图分别见图1、图2和图3。

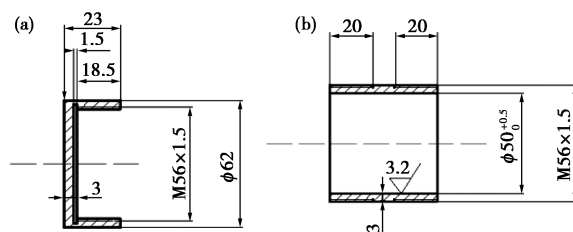


图1 烤燃弹壳体设计示意图

[(a)端盖;(b)外壁]

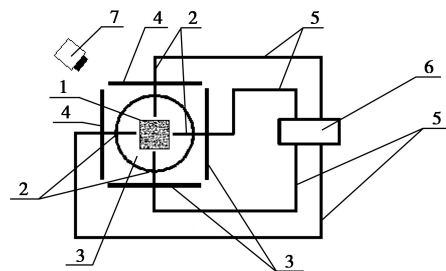


图2 快速烤燃实验系统示意图

(1:烤燃弹;2:热电偶;3:燃料槽;4:鉴证板;

5:温度补偿导线;6:数据采集记录仪;7:监控)



图3 快速烤燃实验现场布置图

1.3 快速烤燃实验步骤

在燃料槽中注入水,在水面距离燃料槽顶端面大约20cm处,加入约12L航空煤油;将烤燃弹悬挂在烤燃弹挂架上,使烤燃弹下边缘距离航空煤油燃料液面大约30cm;在烤燃弹四周安装4支热电偶,并使其感应头与烤燃弹体中心在同一水平面上,且距离烤燃弹壳体约5cm(图3);将温度补偿导线的两端分别与热电偶和多通道数据采集记录仪相连接;调整监控仪探头角度,使其可以全景监测整个实验场地;在燃料槽对角位置的燃料油液面上端,分别放置1个电点火药包,启动电起爆器点火;同步采集实验数据直至烤燃弹发生响应为止;待燃料全部燃烧没有危险后,回收试样残骸;整理温度采集数据,确定试样响应时间和该时间段内燃料火焰的平均温度;记录试样的状态,包括壳体破碎状态及位置、残药数量和位置、鉴证板状态等,并结合监控录像记录情况,综合分析判断试样的响应级别。

1.4 慢速烤燃实验方法

将压制好的药柱放入金属所制的烤燃弹内,将

热电偶放在弹体两侧,云母布固定,并用加热带包裹弹体加热,在外围包裹一层玻璃丝棉布包裹弹体进行保温,最后外用锡纸包覆并用钢丝固定;接通加热电源,用无纸记录仪每 2min 记录温度,控制升温速率在 $1.0\sim 1.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$,直至温度上升至 400°C 或烤燃弹发生响应为止;实验结束后收集烤燃弹破片,观察烤燃弹壳体变形破坏状况、样品残骸状态、鉴证板状态等,并进行综合分析,以判定传爆药的响应等级。

2 结果与讨论

2.1 实验结果

快速烤燃实验耐热性方面的指标十分重要,但目前没有定量的标准,更多的是根据经验判断^[9]。

根据美军标 ML-STD-2105^[12]对弹药反应的评估标准将实验结果分为燃烧、爆燃、爆炸、部分爆轰、完全爆轰 5 种。响应等级的判断主要根据烤燃实验弹药反应过后壳体的损坏程度、鉴定板的损坏程度以及壳体飞出的距离,也可以适当参考药剂反应后的残渣、实验录像等,以保证响应等级的准确性。但在实验条件下,部分爆轰反应和完全爆轰反应产生的现象无法区分,它们对壳体都产生了很大的破坏,药剂反应后也几乎没有残渣,无法准确辨别部分爆轰反应和完全爆轰反应,所以结合实验的实际情况将实验结果分为燃烧、爆燃、爆炸、爆轰 4 个级别,详见表 1。3 种传爆药的烤燃时间和响应时间与温度的关系曲线见图 4,实验后的壳体及鉴定板见图 5。

表 1 反应等级定性描述表

响应等级	残药数量和位置	壳体破碎状态及位置	鉴证板状态	其他
爆轰	全部药柱发生一次性爆轰反应,现场无残留药粉。	实验弹壳体发生严重破碎,形成大量小碎片。	鉴证板被冲倒,鉴证板上有大量破片穿孔。	有瞬间爆轰火光或烟雾,同时伴有巨大爆炸响声。
爆炸	部分或全部药柱发生了一次性快速燃烧反应,现场无残留药粉。	实验弹壳体发生严重破裂,形成多个较大块破片。	鉴证板发生塑性变形,并有明显爆炸痕迹,可能有破片撞击凹痕或穿孔。	有瞬间爆炸火光或烟雾,同时伴有较大爆炸响声。
爆燃	现场无残留药柱或药块,可能有少量药柱破碎散射粉末。	实验弹一端或两端端盖被冲开,且壳体发生轻微膨胀变形或局部破裂,但不形成碎片。	鉴证板上可能有残药燃烧痕迹或端盖撞击形成的轻微凹痕。	有瞬间爆燃火光或烟雾,同时伴有爆炸响声。
燃烧	部分或全部药柱低压持续燃烧,或试样有燃烧发黑或碳化迹象,或现场有大量从试样壳体中洒落出的药块。	实验弹一端或两端端盖被冲开,壳体内有残药燃烧痕迹或有高温熔化变形,壳体无显著膨胀变形或破裂。	鉴证板上可能有残药喷射燃烧痕迹,或端盖撞击形成的轻微凹痕。	有低压燃烧火光或烟雾。

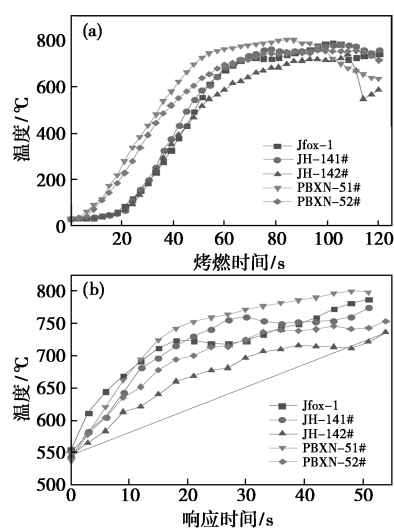


图 4 烤燃时间(a)和响应时间(b)与温度的关系曲线

由图 4 可见,JFox 传爆药在燃料温度升高至均温 788°C 时发生反应,响应时间为 52s。根据图 5(a),JFox 传爆药实验后现象为弹体一端端盖被冲开,弹体未发生明显变形,鉴证板完好无凹痕和穿孔,药柱基本完好或破裂成大药块;快速烤燃结束后,在壳体内部发现有黑色燃烧过的痕迹,有大量残药可见且小部分药剂发生碳化,依据表 1 判定发生了局部燃烧反应,响应级别为 V 级燃烧。

由图 4 和图 5(b)可见,JH-14 传爆药第一发实验在燃料温度升高至均温 736°C 时开始响应,响应时间为 51s;第二发实验在燃料温度升高至均温 774°C 时开始响应,响应时间为 54s。两发实验结果相同:1 号弹体与 2 号弹体快速烤燃实验后结果大致相同,两端端盖均被冲开且端盖扭曲变形,在端盖

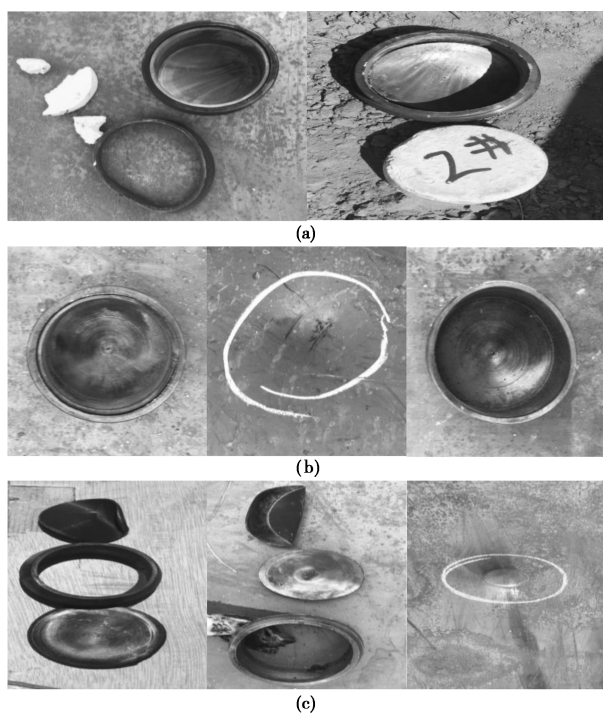


图5 JFox(a)、JH-14(b)和传爆药快速烤燃实验后壳体及鉴定板

[(a)Jfox;(b)JH-14;(c)PBXN-5]

处有明显的烧过的痕迹,弹体无明显变形,鉴证板上有较深凹痕,现场无残药。在快速烤燃实验过程中,由于航空煤油燃烧导致短时间的持续加热,壳体内部温度迅速提高且无法散发,热量聚集导致 JH-14 反生反应,但只是端盖冲开并没有碎片形成,所以根据表 1 判定其发生了爆燃反应,JH-14 传爆药快速烤燃响应级别为Ⅳ级。

由图 4 和图 5(c)可见,PBXN-5 传爆药第一发实验在燃料温度升高至均温 750°C 时开始响应,响应时间为 52s,弹体一端端盖被冲开,弹体未发生明显变形,鉴证板上有明显凹痕,现场无残药;第二发实验在燃料温度升高至均温 784°C 时开始响应,响应时间为 54s,弹体一端端盖被冲开,弹体发生了轻微变形,鉴证板上有明显凹痕,现场无残药。从 PBXN-5 两次传爆药快速烤燃实验结果来看,在壳体内部有明显的蓝色印记,这是药柱发生了反应的现象,证明药柱在壳体内部发生了爆燃反应。由于外界的加热导致 PBXN-5 的热量聚集最后产生了反应,从而在鉴定板上留下了明显的痕迹,响应程度较高。根据现场的实际情况和表 1 判定,其发生了爆燃反应,响应级别为Ⅳ级爆燃。

2.2 实验结果分析

根据谢苗诺夫的混合气体的热自动点火的热爆

炸理论阐述,传爆药在外界热作用下反应放出的热量大于热传导散失的热量,导致传爆药内部出现热积累,当温度值达到一定后由热分解转变为燃烧、爆燃甚至爆轰。实验中发现,JFox 为低易损性弹药,而 PBXN-5、JH-14 为非低易损性弹药。

对于快速烤燃实验来说,由于是在火焰上直接烤燃,所以弹壳内的温度分布不均匀,外部温度要高于内部温度,且呈梯度变化^[14],热传导一直向远离火焰处传播。因壳体的束缚导致无法将内部热量及热分解的气体散播出去,所以在压力及温度逐渐升高的过程中,炸药发生爆轰或者燃烧是必然的。

传爆药最后发生爆轰或者燃烧不仅仅跟外部壳体硬度、密闭度、导热率、热膨胀系数^[15]等有关,也取决于传爆药的本身性质。JFox、JH-14、PBXN-53 种药剂的组成成分不同,但是它们都是由猛炸药粘结剂组成。JFox 中的主要成分 1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯本身就是一种新型高能钝感炸药,分子和分子之间都存在氢键,热稳定性好。在高于 1000K 时, C-NO_2 键裂产生 NO_2 ;而在低温(低于 550K)下,则发生异构化反应^[16-17]。由于两个热电偶在 550°C (823.15K) 以上开始记录, 788°C (1061.15K) 开始响应,所以在 JFox 发生反应时主要是药剂的热分解产生了大量气体,再由热分解转变为燃烧,并没有爆燃爆轰的发生。而 JH-14 和 PBXN-5 的主要成分分别是 RDX 和 HMX,RDX 和 HMX 由于分子结构相似,因此具有相同的分解机理^[18],只是 HMX 的分解温度略微高一点。虽然粘结剂都是 2# 氟橡胶,但在 JH-14 中还有少量的石墨用于防止静电。由于石墨在高温下有良好的导热性能,导致药柱的整体导热系数提升,在较低的温度下发生了响应。由此可以解释 3 种药剂的响应温度、响应时间及响应级别的不同。

如果其实际分解过程如上所述,则可以推测慢速烤燃也会出现与快速烤燃想接近的结果。但由于慢速烤燃的温度较低、加热时间较长,所以分解过程会有些不同,但是发生的响应结果应该是接近的。因此,本课题组以美军标 MIL-STD-2105C^[10] 为参考标准并借鉴国内相关实验^[8-9,11],确定了慢速烤燃方法进行慢速烤燃实验。实验结果发现,JFox 传爆药的热爆炸临界温度点最高为 251°C ,弹体[图 6 (a)]只有一端端盖被冲开,壳体发生了轻微变形,鉴证板上无凹痕和穿孔,现场有大量抛撒的黄色散药粉末,其响应程度最低,由此判定发生了局部燃烧反应,响应级别为Ⅴ级。PBXN-5 传爆药的热爆炸临

界温度点较高为 248°C , 实验后弹体[图 6(b)]被炸裂成大约 5~8 块较大碎块, 现场无残药, 鉴证板上有多处较大穿孔和凹痕, 现场录像显示有较大的燃烧火光, 而且有较大的爆炸声响, 其慢速烤燃响应程度较高, 由此判定其发生了爆燃反应, 响应级别为 II 级。JH-14 传爆药的热爆炸临界温度点最低, 为 211°C , 实验后弹体[图 6(c)]被炸裂成大量小碎块, 现场无残药, 鉴证板上留有大量大小不等的穿孔和凹痕, 现场录像显示有瞬间反应火光, 而且有很大的爆炸声响, 其慢速烤燃响应程度最高, 由此判定其发生了爆轰反应, 响应级别为 I 级。

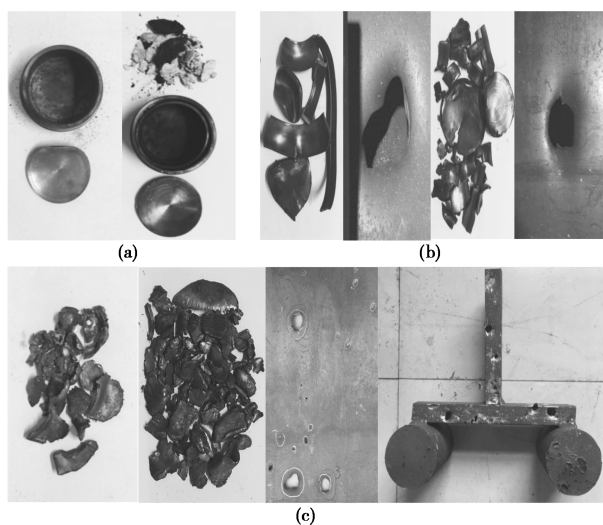


图 6 JFox(a)、PBXN-5(b) 和 JH-14(c) 传爆药慢速烤燃响应后的壳体破片

由于慢速烤燃实验是用电阻丝包裹烤燃弹进行加热, 升温速率为 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 所以可以认为炸药是均匀受热, 与快速烤燃有所不同, 而且点火位置的不同以及升温速率的不同会对反应的剧烈程度造成一定的影响。因此 JH-14 在快速烤燃时发生了爆燃反应, 而在慢速烤燃时发生了爆轰反应。但是两种烤燃实验中, JH-14 的热分解过程和机理是相同的。在慢速烤燃实验中, JFox 传爆药无论是临界温度还是反应时间都是最高的, 这是因为慢速烤燃温度开始时的温度在 550K 以下, JFox 主要发生了异构化反应, 所以 JFox 传爆药反应时间长、反应温度高。而在 PBXN-5 慢烤实验中可以明显看出, PBXN-5 有良好的耐热性, 因为 PBXN-5 中的主要成分是 HMX 和氟橡胶, 所以耐热性能较好。虽然 JH-14 和 PBXN-5 的分解机理相同, 但因为在 JH-14 中加入了石墨, 导致其耐热性降低, 所以在慢烤实验中 JH-14 发生了爆轰反应。虽然有很多影响因素会导致快速烤燃与慢速烤燃有所差别, 但是快速烤燃实

验药剂与慢速烤燃实验药剂发生反应的原理是一致的。两种实验最大的差别在于出发点不同, 所模拟的环境也不相同。

3 结论

(1) 用 3 种典型的传爆药 JFox、JH-14、PBXN-5 进行了快速烤燃实验, 测试了其响应温度、响应时间及反应激烈程度。结果发现, JFox、JH-14 和 PBXN-5 的火焰平均温度分别为 716°C 、 708°C 和 718°C , 响应时间分别为 51s、52s 和 54s。说明在快速烤燃条件下, 3 种典型传爆药的耐热性几乎相同。从快速烤燃实验后收集到的破片以及鉴定板的状态判断, PBXN-5、JH-14 的反应剧烈, JFox 的反应较为温和。说明在迅速加热的情况下, JH-14 和 PBXN-5 具有较差的耐烤燃性, 而 JFox 的耐烤燃性好, 具有较强的热安定性。

(2) 依据快烤实验和慢烤实验后的鉴定板、烤燃弹壳体、残药等状态判定, JFox 响应级别为燃烧; JH-14 响应级别在快速烤燃条件下为爆燃, 慢速烤燃条件下为爆轰; PBXN-5 响应级别为爆燃。JFox 为低易损性传爆药, 可以在低易损弹药中使用; 而 JH-14 和 PBXN-5 为非易损性传爆药, 不能在低易损弹药中使用。

(3) 分别对 3 种传爆药的快速烤燃和慢速烤燃进行对比, 发现其药剂的分解原理是相同的。因此, 虽然点火位置与加热速率会对响应结果造成影响, 但是可以通过慢速烤燃来验证快速烤燃药剂分解分析的准确性。

参考文献

- [1] 王红星, 王晓晓, 罗一鸣, 等. DNAN 炸药的烤燃实验[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 183-186.
- [2] 赵亮. 尺寸效应对炸药烤燃响应特性影响的研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [3] 徐双培, 胡双启, 王东青, 等. 壳体密封性对小尺寸弹药快速烤燃响应规律的影响[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 35-37.
- [4] 中国科学技术协会. 第十六届中国科协年会第九分会场含能材料及绿色民爆产业发展论坛论文集[C]. 昆明: 中国科学技术协会, 云南省人民政府, 2014.
- [5] 王晓峰, 戴蓉兰, 涂健. 传爆药的烤燃实验[J]. 火工品, 2001, (2): 5-7, 30.
- [6] 智小琦, 胡双启, 肖志华, 等. 密封条件对钝化 RDX 快速烤燃响应特性的影响[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 31-37.
- [7] 刘文杰. 传爆药烤燃响应特性的数值仿真及实验研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.

(下转第 162 页)