

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.03.007

基于虚拟仪器的慢速烤燃系统的设计及应用^{*}

王 茂 韩志伟 李亚宁 李宏伟 陈 坤 王伯良
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为了满足不敏感炸药的发展需求,在 GJB 772A—1997 及行业内标准烤燃装置的基础上,设计并开发了一套慢速烤燃系统。该系统基于 LabVIEW 程序的控制软件,由以控制器、数据采集卡、热电偶及数字 I/O 卡等为主的典型硬件构成。参照美军标 MIL—STD—2105D 和国内行业标准,对该系统的适用性开展了试验研究;采用 RDX 基与 HMX 基两种典型的混合炸药装药进行了慢速烤燃试验。结果表明,该慢速烤燃系统具有广泛的温度适用范围,试验数据拟合相关系数不低于 0.999 8,在 0.055、0.200、1.000、2.000 ℃/min 和 3.000 ℃/min 等几种升温速率条件下,炸药均能实现较高精度的线性升温。与 RDX 基混合炸药相比,HMX 基混合炸药响应程度有所缓和。该慢速烤燃系统满足试验需求,可为研究炸药的热不敏感性提供有效手段。

[关键词] 慢速烤燃系统;混合炸药;升温速率;热不敏感性

[分类号] TQ560

Design and Application of a Slow Cook-off System Based on Virtual Instrument

WANG Mao, HAN Zhiwei, LI Yaning, LI Hongwei, CHEN Kun, WANG Boliang
School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] In order to meet the development demand of the insensitive explosives, a slow cook-off system was designed and fabricated based on GJB 772A—1997 and industry standards. The system consisted of a control software developed by LabVIEW program and several typical hardware, including controller, data acquisition card, thermocouple, digital I/O card. According to US military standard MIL—STD—2105D and the domestic industry standard, the applicability of the system was studied experimentally. RDX-based and HMX-based component explosives, two typical explosives, were tested by employing this system. Results showed that this system had a good feasibility in an extensive temperature range. Correlation coefficient of fitting test date could be up to 0.999 8. Specifically, this system presented high precision in a linear heating up process when the heating rates were 0.055, 0.200, 1.000, 2.000 ℃/min and 3.000 ℃/min respectively. Compared with RDX-based component explosive, the response of HMX-based component explosive is moderated. This slow cook-off system could satisfy the experimental requirements, which provided an effective mean for studying the thermal insensitivity of the component explosives.

[KEYWORDS] slow cook-off system; component explosives; heating rate; thermal insensitivity

引言

弹药在生产、运输、储存及实战环境中,易受到意外热刺激及机械刺激,一旦发生安全事故,后果不堪设想。因此,各国对于武器系统的安全性要求越来越严格^[1-3]。1973 年,以美国为首的西方国家开始发展不敏感弹药,并提出了不敏感弹药的安全性

评估试验和标准。自此,不敏感弹药的安全性评估体系在西方国家快速发展^[4-5]。至今,弹药的安全评估体系主要包括北约不敏感弹药评估和试验标准体系、美国 MIL—STD—2105D 非核弹药危险性评估试验标准体系等 6 种^[6-7]。热刺激是常见的意外刺激之一,因此,它对于考核弹药的热安全性相当重要。目前,主要用烤燃试验来评估弹药的热安全性^[8]。根据升温速率不同,烤燃试验分为快速烤燃

^{*} 收稿日期:2019-10-10
基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150780);江苏高校优势学科建设工程资助项目
第一作者:王茂(1994—),男,硕士研究生,研究方向为温压炸药热安全分析。E-mail:1498012088@qq.com
通信作者:王伯良(1964—),男,教授,主要从事爆炸理论及其应用研究。E-mail:boliangwang@163.com

试验和慢速烤燃试验。其中,慢速烤燃试验用于模拟储存和实战环境下,外界温度缓慢升高时弹药或武器系统发生反应的温度、时间及响应程度^[9]。

经过几十年的发展,国内外不敏感弹药慢速烤燃试验加热方式一直在不断地改进。Sechmits^[10]利用恒温炉对装在试管中的样品开展限制性慢速烤燃试验,但这种加热方式安全隐患大。此后,Kent等^[11]对慢速烤燃试验的加热方式进行了改善,在防爆罐外壁缠绕加热丝加热,而电热丝熔点低,受热容易变形,可能会导致样品受热不均匀,使试验结果不理想。1984年,美国能源部在《钝感炸药材料鉴定试验原理和准则》^[12]中规定采用油浴加热试样,油浴方式可以解决样品受热不均,但其安全性低。鉴于此,2003年,北约制定了试验规程^[13],将油浴改为空气域加热,利用循环的热空气加热烤燃箱中的样品,为了使样品受热均匀,样品与烤燃箱内壁留有200 mm的间距。目前,国内研究机构也建立了慢速烤燃试验装置^[14-16],一般将加热带或加热器紧箍烤燃弹外壁,加热方式主要是热传导。该装置对烤燃弹两端未加热,样品可能会受热不均匀,造成试验结果差异大。在国内,多数依据 GJB 772A—1997《炸药试验方法》^[17]构建慢速烤燃装置,直接接触法偏多。

在国内外慢速烤燃装置的基础上,基于 LabVIEW,设计并开发了一套用于测试炸药装药慢速烤燃响应特性的慢速烤燃系统。参考标准 MIL—STD—2105D^[18]和 GJB 772A—1997^[17],考察了不同升温速率条件下慢速烤燃系统的适用性;并利用 XRD 基和 HMX 基两种典型混合炸药装药对该系统进行试验验证。相对于直接接触法及油浴加热,该慢速烤燃系统利用空气域将热量以热辐射方式传递给壳体,烤燃弹 360°全方位受热,壳体易受热均衡,且该加热方式安全性高,升温速率易控制。同时,还可以为研究全弹慢速烤燃试验提供试验装置。

1 慢速烤燃系统设计

1.1 硬件子系统

慢速烤燃系统主要包括控制器、数据采集卡、数字 I/O 卡、金属套筒(内径 130 mm、长度 300 mm、壁厚 5 mm)、加热带、炸药壳体、K 型热电偶(精度 1 级)及铁丝。其中,吊装试样材料为直径 1 mm 的铁丝,与壳体接触的铁丝面积约占整个传热面积的 0.86%;因此,单位时间内传递的热量可以忽略不计,不影响整个壳体受热均匀性。慢速烤燃试验系统工

作原理及结构分别如图 1 和图 2 所示。

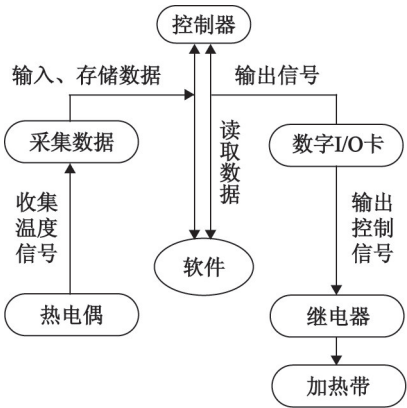
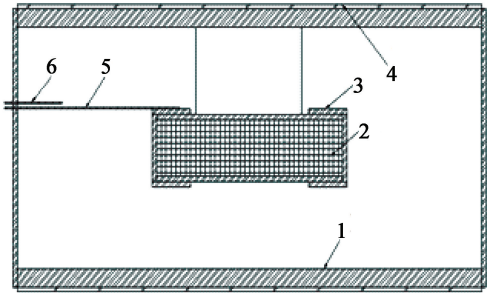


图 1 慢速烤燃试验系统工作原理
Fig. 1 Working principle of slow cook-off test system



1—金属套筒;2—药柱;3—炸药壳体;4—加热带;
5—控温热电偶;6—热电偶(测量空气)。
图 2 慢速烤燃试验装置结构
Fig. 2 Structure diagram of slow cook-off test device

硬件子系统可以分为数据采集模块和信号输出模块。

控制器、数据采集卡及热电偶组合构成数据采集模块。其功能是实时采集炸药壳体的温度-时间信号,并将该数据以文本文件的形式储存起来。数据采集卡型号为 NI-9213,实物如图 3 所示,它与控制器相连接。通过图 2 所示的控温热电偶采集温度信号,并将数据传输并储存于控制器,最终由控制器读取数据并进行逻辑判断。



图 3 数据采集卡
Fig. 3 Data acquisition card

控制器、数字 I/O 卡、继电器及加热带构成信号输出模块。该模块的功能是在对上述数据采集模块产生的温度-时间信号进行回读并进行必要逻辑判断的基础上,输出数字信号给固态继电器,对与固态继电器串联的加热带的通电时间和断电时间进行协调,从而实现特定升温速率条件下的线性升温。数字 I/O 卡型号为 NI-9214,实物如图 4 所示。



图 4 数字 I/O 卡
Fig. 4 Digital I/O card

1.2 软件子系统

软件系统需要采集温度信号、储存温度数据和通过控制固态继电器开合调整加热带的加热时长,从而控制升温速率。

LabVIEW 程序通过数据采集卡完成对温度-时间数据的采集,并储存于名为“Tem. versustime. txt”的文本文档。系统的控温原理是设定加热周期 Δt ,在加热初始时刻和终止时刻各采集一次瞬时温度,利用两次瞬时温度、 Δt 、目标升温速率计算当前实测温度 θ 与目标温度 θ_0 之间的关系。若 $\theta > \theta_0$,则在下一周期内减少加热带工作时间;若 $\theta < \theta_0$,则在下一周期内延长加热带工作时间;若 $\theta = \theta_0$,则在下一周期内保持加热带工作时间不变。

相对于其他控温仪器,LabVIEW 开发的慢速烤燃软件的控制前面板可以根据用户需求自行设计且可以灵活定义仪器功能。同时,可在试验中进一步完善程序,提高试验精度。慢速烤燃系统软件升温速率范围广,可根据实际需要设定升温速率。

2 慢速烤燃系统测试与应用

2.1 慢速烤燃系统测试

2.1.1 测试方法

为测试慢速烤燃系统在不同升温速率下的适应性,试验设计如下:壳体内部装满沙子,两端螺纹密封;测试时,将不锈钢制成的壳体与无缝钢管制成的

金属套筒同轴悬挂,用加热带均匀缠绕在金属套筒外壁,对其进行加热;外部使用控制器对升温速率进行控制,金属套筒两端和加热带外表面包裹隔热材料进行保温,以降低热损耗。在 0.055、0.200、1.000、2.000 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 及 3.000 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 等几种升温速率下测试试验装置,并对采集的时间-温度数据进行线性拟合,得到拟合方程 $\theta_2 = Kt + \theta_1$ 。其中, θ_1 为初始温度; θ_2 为经过时间 t 后的温度; K 为实际升温速率; t 为加热时间。

2.1.2 测试结果与分析

几种升温速率下的壳体外壁温度随时间的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出,弹壳外壁升温曲线数据较集中,数据波动幅度小;拟合曲线与采集的时间-温度曲线基本上完成重合,实际升温速率与目标升温速率相一致,相关系数 $R \geq 0.999\ 8$;该慢速烤燃系统可以实现较高精度的线性升温,在 0.055 ~ 3.000 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率条件下适应性较好、精度高;同时,升温速率可以根据试验需要进行设定。

受试验条件与方法限制,未开展直接接触法加热控制试验。采用加热带作为热源时,直接接触法只可保证弹体侧壁均匀加热,而弹体两端裸露,受热不均匀;加热带缠绕壳体两端,则会造成加热带自身受热而损坏,安全系数低。在空气域中,360 $^{\circ}$ 全方位可以接受热量,受热均衡,会按照设定的升温速率升温。同时,有国外文献介绍,相较于直接接触加热、油浴加热,空气域加热可以使试样受热均匀,且安全性较好,更接近试验模拟的储存与实战环境^[13]。因此,该慢速烤燃系统安全性好,且升温速率稳定。

2.2 慢速烤燃系统应用

2.2.1 烤燃试样

烤燃弹壳体材料为 45 $^{\#}$ 钢,壳体内径尺寸为 $\varnothing 60\ \text{mm} \times 240\ \text{mm}$,壁厚为 3 mm,两端用带螺纹的金属端盖密封。

采用 RDX 基和 HMX 基两种混合炸药装药。HMX 基混合炸药配方(质量分数)为 90.5% HMX/Al/助燃剂和 9.5% 黏结钝感体系;RDX 基混合炸药配方(质量分数)为 90.5% RDX/Al/助燃剂和 9.5% 黏结钝感体系。

将两种混合炸药分别压制成尺寸为 $\varnothing 60\ \text{mm} \times 60\ \text{mm}$ 的圆柱形药柱。药柱数量为 4 节,装药时为消除空隙,涂抹导热硅脂。HMX 基混合炸药每节药柱质量约为 339 g,装填密度为 2.00 g/cm^3 ;RDX 基混合炸药每节药柱质量大约为 322 g,装填密度为 1.90 g/cm^3 。

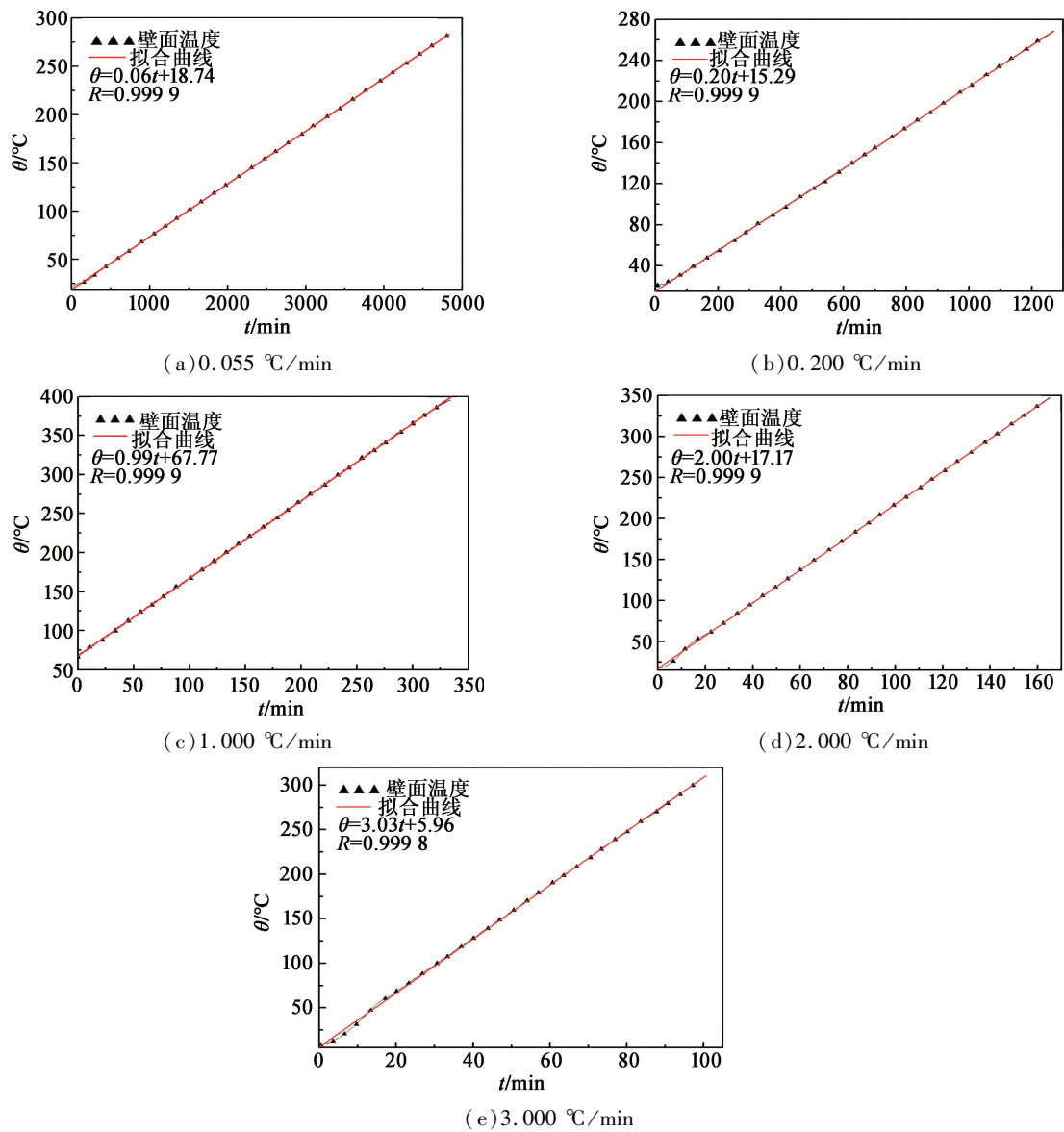


图 5 不同升温速率下壳体外壁温度随时间的变化

Fig. 5 Changes of out wall temperature with time under different heating rates

2.2.2 试验方法

试验时,将 4 节药柱装入炸药壳体内,两端螺纹密封。炸药壳体固定于金属套筒轴线上。用加热带缠绕在金属套筒外壁进行加热,加热带功率为 100 W/m。金属套筒两端用厚度为 3 mm 的钢板封口,外壁、两侧均用石棉保温。以 1 °C/min 的升温速率从室温开始加热,直至炸药发生响应。用两支 K 型热电偶(精度 1 级)采集温度信号,一支测炸药壳体外壁温度(控温热电偶),另一支测金属套筒内的空气温度。利用软件自动采集与记录时间-温度数据。由于试验状态一致,烤燃装置封闭,响应的剧烈程度根据壳体的变形以及破片的数量进行判断^[3]。

2.2.3 试验结果

HMX 基和 RDX 基混合炸药装药烤燃结果及壁

面温度-时间曲线如图 6 和图 7 所示。烤燃响应结果如表 1 所示。表 1 中的反应类型判定参照 MIL—STD—2105D^[18]。

由图 7 看出,两种炸药升温曲线试验数据较为集中,温度波动小,基本上与拟合曲线重合。实际升温速率约等于 1 °C/min,拟合度 $R = 0.9999$,与目标升温速率相一致。因此,该慢速烤燃系统满足 1 °C/min 升温要求,适应性较好。利用空气域对试样进行加热,炸药壳体按照目标升温速率升温,这可以为研究炸药慢速烤燃响应特性提供试验装置。

由图 6 和表 1 可以看出, HMX 基混合炸药壳体整体完整,一端端盖冲出,且有残药,依据标准判断发生了燃烧反应,响应时壁面温度 267 °C。RDX 基混合炸药壳体破碎为许多碎片,判断发生了爆炸反



图6 两种炸药慢速烤燃试验结果

Fig. 6 Slow cook-off test results of the two explosives

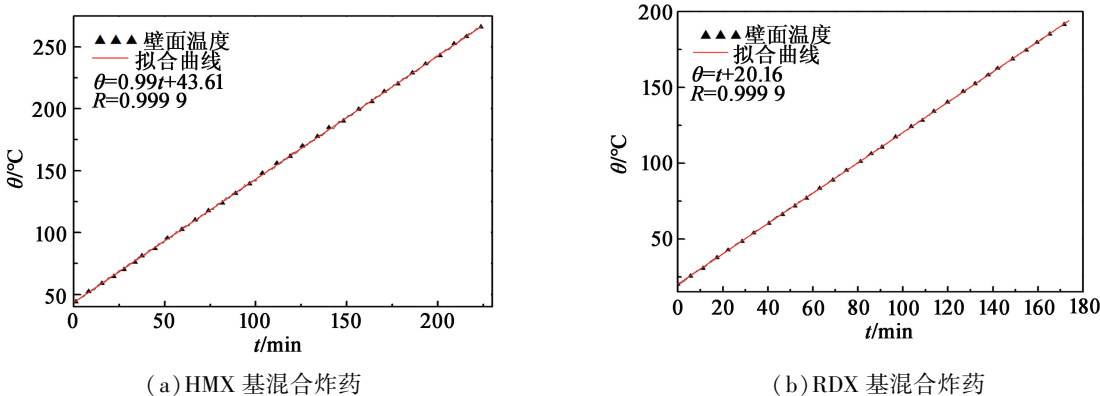


图7 两种炸药慢速烤燃试验壁面温度

Fig. 7 Wall temperature of the two explosives in slow cook-off test

表1 两种炸药慢速烤燃反应结果			
Tab. 1 Slow cook-off reaction results of the two explosives			
主体 炸药	响应温度/ ℃	现象	反应 类型
HMX	267	一端端盖冲出,壳体完整, 有药粉残留	燃烧
RDX	208	壳体破碎为许多碎片	爆炸

应,响应时壁面温度 208 ℃。HMX 基混合炸药响应温度高于 RDX 基混合炸药,但响应时 HMX 基混合炸药比 RDX 基混合炸药响应程度有所缓和。

3 结论

1)设计并开发了一套用于炸药热不敏感性研究的慢速烤燃系统,该系统在低升温速率($\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)条件下,测试数据与理论数据相关系数 R 不低于 0.999 9;高升温速率条件下($\geq 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$),测试数据与理论数据相关系数 $R\geq 0.999\ 8$ 。结果表明,该系统可同时满足国内和国外相关标准要求,表现出较好的适应性。

2)RDX 基和 HMX 基两种混合炸药的慢速烤燃试验结果表明,加热速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,与目标升温速率相一致。利用空气域对弹体进行加热,安全性较好,弹体处于空气域中, 360° 全方位加热,弹体受热均衡,且会按照目标升温程序进行升温,可以为研究炸药的热不敏感性提供有效手段。

参 考 文 献

[1] 蒋超, 闻泉, 王雨时, 等. 不敏感弹药烤燃试验技术综述[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(2): 1-9.
JIANG C, WEN Q, WANG Y S, et al. An overview on cook-off test technology for insensitive munitions [J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(2): 1-9.

[2] 董海山. 钝感弹药的由来及重要意义[J]. 含能材料, 2006, 14(5): 321-322.
DONG H S. The importance of the insensitive munitions [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(5): 321-322.

[3] 高飞, 刘俊学, 侯旷怡. 钝感弹药评估标准发展与试验应用[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(8): 46-48.
GAO F, LIU J X, HOU K Y. The development and experimental application of evaluative standard of insensitive

- ammunitom[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(8): 46-48.
- [4] 王震宇, 杜力民, 冯成良, 等. 国外钝感弹药发展脉络及其启示[C]//2014'(第六届) 含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集. 成都, 2014: 244-248.
- [5] 许蕾, 张鹏. 国内外钝感弹药评估标准的发展与分析[J]. 航天标准化, 2010(4): 35-37.
- [6] 殷瑱, 闻泉, 王雨时, 等. 北约不敏感弹药标准试验方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(10): 1-7.
- YIN Z, WEN Q, WANG Y S, et al. Standard experiment method of insensitive munition in NATO[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(10): 1-7.
- [7] 梁晓璐, 梁争峰, 程淑杰, 等. 不敏感弹药试验方法及评估标准研究进展[J]. 飞航导弹, 2016(6): 84-87.
- [8] 陈朗, 马欣, 黄毅民, 等. 炸药多点测温烤燃实验和数值模拟[J]. 兵工学报, 2011, 32(10): 1230-1236.
- CHEN L, MA X, HUANG Y M, et al. Multi-point temperature measuring cook-off test and numerical simulation of explosive[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(10): 1230-1236.
- [9] 徐洪涛, 金朋刚. 炸药缓慢加热条件实验技术进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 5-17.
- XU H T, JIN P G. Development of slower cook-off test for explosives[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(9): 5-17.
- [10] SECHMITS G T. ODTX test program; MHSMP-80-40 [R]. 1980.
- [11] KENT R, RAT M. Explosive thermique (cook off) des propulseurs solides[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1982, 7(5): 129-136.
- [12] SLAPE R J. IHE material qualification tests description and criteria; MHSMP-84-22 [R]. 1984.
- [13] NATO Standardization Agency Slow heating, munitions test procedures; STANAG 4382 [S]. Brussels; NATO, 2003.
- [14] 向梅, 黄毅民, 饶国宁, 等. 不同升温速率下复合药柱烤燃实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 394-400.
- XIANG M, HUANG Y M, RAO G N, et al. Cook-off test and numerical simulation for composite charge at different heating rate[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 394-400.
- [15] 姚奎光, 钟敏, 代晓淦, 等. 缓慢热作用下 PBX-9 炸药的响应特性[J]. 火炸药学报, 2015, 38(6): 56-60.
- YAO K G, ZHONG M, DAI X G, et al. Response characteristics of PBX-9 explosive under slow thermal stimulus[J]. Chinese Journal of Explosive & propellants, 2015, 38(6): 56-60.
- [16] 于永利, 智小琦, 范兴华, 等. 自由空间对炸药慢烤响应特性影响的研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 280-283.
- YU Y L, ZHI X Q, FAN X H, et al. The research of free-space influence on response characteristics of explosive on slow cook-off condition[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 280-283.
- [17] 中国兵器工业总公司. 炸药试验方法; GJB 772A—1997 [S]. 北京, 1997.
- [18] Hazard assessment tests for non-nuclear munitions; MIL—STD—2105D [S]. 2011.

(上接第 36 页)

- ZOU H M, CHEN S S, LI X, et al. Thermal analysis and risk assessment of a CL-20 based PBX explosive [C]//2016 The Seventh Academic Symposium on Energetic Materials and Insensitive Ammunition Technology. Mianyang: Editorial Department of Chinese Journal of Energetic Materials, 2016: 743-746.
- [11] ZOU H M, CHEN S S, JIN S H, et al. Preparation, thermal investigation and detonation properties of ϵ -CL-20 based polymer bonded explosives with high energy and reduced sensitivity [J]. Materials Express, 2017, 7: 199-208.
- [12] LAN G C, JIN S H, JING B C, et al. Investigation into the temperature adaptability of HNIW-based PBXs [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2019, 44(3): 327-336.
- [13] 陈鲁英, 赵省向, 杨培进, 等. CL-20 炸药的包覆钝感研究[J]. 含能材料, 2006, 14(3): 171-173, 199.
- CHEN L Y, ZHAO S X, YANG P J, et al. The coating and desensitization of CL-20 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(3): 171-173, 199.
- [14] 中国兵器工业总公司. 炸药试验方法; GJB 772A—1997 [S]. 北京, 1997.