

热烤试验研究进展

冯长根¹, 张蕊², 都振华²

1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081
2. 陕西应用物理化学研究所, 西安 710061

摘要 为了适应钝感弹药发展过程中对安全性评价的需要, 本文采用综合分析和比较的方法, 对国内外热烤试验方法及其进展进行了综述。结果表明, 热烤试验的发展可分为试验技术、仿真计算技术和应用技术等 3 个方面, 目前热烤试验技术继续向着定量、安全和直观的方向发展。

关键词 热烤试验; 火工品; 爆炸箔起爆器

中图分类号 TQ560.7, X944

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.33.012

Progress in Cook-off Test

FENG Changgen¹, ZHANG Rui², DU Zhenhua²

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China

Abstract For the safety evaluation of insensitive munitions in its development stage, the synthesis and comparative analyses are made in this paper on the cook-off tests both at home and abroad. It is shown that the cook-off tests have been developed in 3 aspects, that is, the test technology, the numerical simulation and the application technology. The technology of cook-off tests is developing in the direction of more quantitative, safer and better visual evaluations.

Keywords cook-off test; initiators and pyrotechnics; exploding foil initiation

0 引言

热烤试验 (cook-off test) 是研究和评估弹药及含能材料在生产、使用、运输及贮存等复杂环境下热安全性的一种常用方法^[1-3], 根据试验结果可以对武器弹药的设计、使用和贮存条件提供建议。这种方法也用于评价传爆药^[4]和起爆药^[5]的热安全性。近年来, 安全问题日益引起人们高度关注, 同时, 随着钝感弹药的发展, 采用热烤试验评价含能材料热安全性的场合越来越多。针对不同弹药和弹药不同部件的要求, 热烤试验自身的研究也在不断发展。人们对于热烤试验的研究主要分为 3 个方面, 即热烤试验装置与试验方法研究、热烤试验的仿真计算方法研究, 以及基于热烤试验的热安全性评价方法研究, 即热烤试验的应用研究。

1 热烤试验方法

热烤试验一般是在限制条件下进行的, 即将被测样品装

于一定尺寸和材料的壳体中, 有时甚至是在试管两端加夹板和螺栓进行约束。通常的壳体是烤燃弹、金属制的套筒或试管。从加热速率上看, 热烤试验分为慢烤试验和快烤试验^[6], 慢烤试验的升温速率一般小于 0.05°C/s, 快烤试验也被称为火烧试验, 升温速率大于 1°C/s。

1.1 慢烤试验

1.1.1 一维热爆炸试验

1980 年 Sechmits^[7]进行了一维热爆炸 (One-Dimensional Thermal Explosion, ODTX) 试验。他将药柱装于样品试管中, 两端均使用了密封圈、塞子和螺旋压盖固定密封, 放入恒温炉后, 记录试管内药剂发生爆炸的时间, 并根据试管破片数量确定反应的剧烈程度。这被认为是限制性热烤试验的雏形。1982 年 Kent 和 Rat^[8]在试管外增加了防爆罐, 在防爆罐外缠绕加热丝进行加热, 为了获得炸药内部的温度变化增加了测温热电偶。TNO 的 Scholtes 等^[9]将加热丝缠绕于爆轰管外进行

收稿日期: 2012-09-07; 修回日期: 2012-10-08

作者简介: 冯长根, 教授, 研究方向为快速反应理论, 化学物理效应, 火工系统设计与仿真, 电子信箱: cgfeng@bit.edu.cn

加热并在管内布置了多根热电偶测温,后来在此基础上增加了压力传感器和应变测试装置^[10-11],获得了含能材料不同位置温度随时间的变化关系,通过压力和应变曲线可以分析燃烧转爆轰的情况,通过试验后试管的破碎程度可以判断反应的剧烈程度。图1给出了ODTX装置的示意图和照片。2001年,TNO的研究人员^[12]又将光纤干涉的试验方法应用于ODTX试验的测试中。他们将光纤缠绕于管外,通过分析干涉信号获得热烤过程中光纤长度的变化,从而得到爆轰管直径随时间的变化。建立的测试系统中包含了两种干涉仪,利用萨尼亚克干涉仪信号与光纤长度的变化率成正比以及马赫曾特干涉仪信号与光纤长度成正比的关系进行了对比研究。这是将光测试技术应用于热烤试验研究的首例报道。图2为系统简图及照片。



图1 ODTX装置的示意图和照片
Fig. 1 The ODTX device

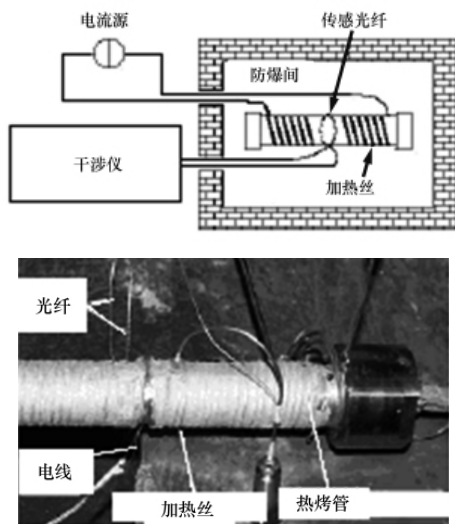


图2 含光纤的热烤系统简图和实物照片
Fig. 2 The cook-off system containing optical fibers

2001年,Sandusky等^[13]设计了一种新型的慢烤装置,他们在测试试管两端的弹簧片上安装了测量应变的装置,通过传感器记录因试管轴向膨胀而引起的弹簧片位置变化,并在距离测试试管0.6m处设置了压力传感器。通过炸药量、破片数量和爆炸超压来表征反应的剧烈程度。通过记录PBXN-109

在慢烤过程中的温度、压力和体积变化研究了样品尺寸、限制条件和加热方式对反应剧烈程度的影响。图3分别为试验系统装置和测试试管示意图。

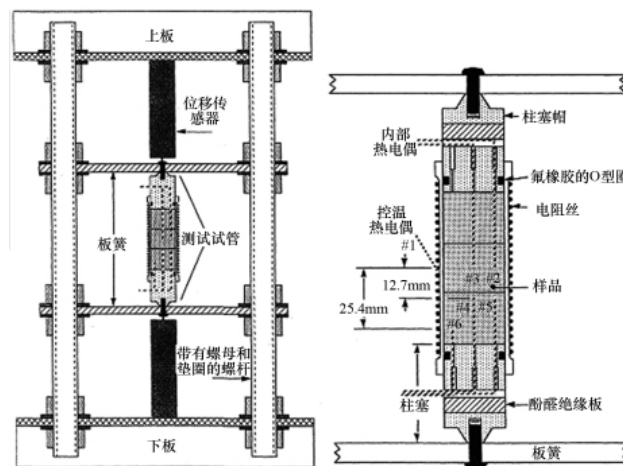


图3 试验装置和测试试管示意图
Fig. 3 The test device and tube

ODTX试验中使用的试管至今仍被应用于钝感弹药的热安全性评价。随着检测手段的增加,试样中获得的信息量也不断增多,为评估弹药的热安全性评价提供了更丰富的基础数据。

1.1.2 小型烤燃弹试验

小型烤燃弹试验 (Small Combustion Bomb Test, SCB Test) 最早是1984年由Parker^[14]设计。试验药量一般为20g,已成为研究炸药热烤特性的标准试验。图4为小型烤燃弹的结构简图。

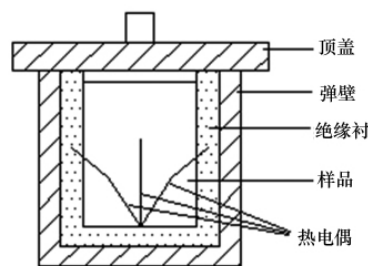


图4 小型烤燃弹SCB结构简图
Fig. 4 Structure of small combustion bomb

1992年,Scholtes等^[15]结合联合国标准建立了类似SCB的小型烤燃弹系统。1994年,Scholtes和Meer^[16]对系统进行了改进,增加了加热速率控制装置。这种TNO-PLM热烤试验系统示意图见图5。1997年,Chidester等^[17]利用类似装置进行了热烤试验,在试验样品的多个位置布置了测温热电偶来判断热点火发生的位置。中国标准GB/T 14372—2005《危险货物运输 爆炸品认可分项试验方法和判据》^[18]中的烤燃弹实验规定了类似TNO-PLM热烤试验装置。国家军用标准GJB 772A-1997《炸药试验方法》^[19]中也采用该方法作为评价炸药

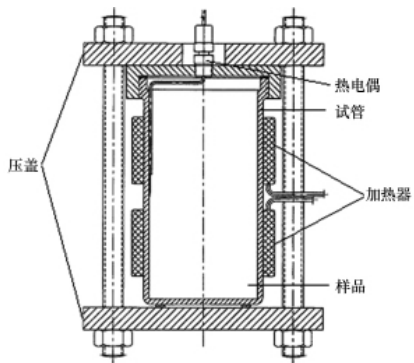


图5 TNO-PLM 热烤试验系统示意图
Fig. 5 The TNO-PLM cook-off test system

热安全性的一个标准试验。

除炸药外,国内还将热烤试验推广到其他含能材料领域。2001年,王晓峰等^[12]利用两端是螺纹约束的小型烤燃弹对多种配方的传爆药进行了热烤试验。这是国内利用热烤试验研究传爆药热安全性的首例报道。2003—2004年,张蕊等^[13]设计了适用于火工药剂的热烤试验装置,加入了电子控温仪对加热炉升温速率的控制,均热块对爆炸盒进行均匀加热,热电偶对试验样品的温度变化进行实时采集,并通过计算机进行处理。采用不同升温速率对RDX-1炸药和起爆药BNCP进行了热烤试验,得到了这两种药剂的热响应情况,据此综合分析了药剂的热安全性。图6为热烤试验系统示意图。

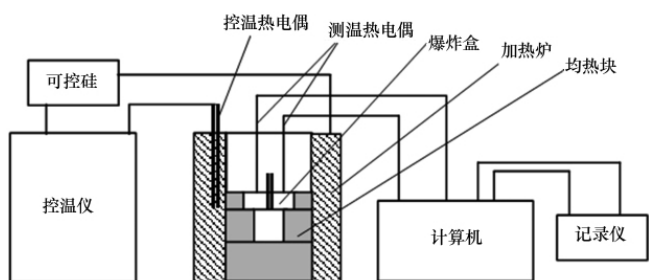


图6 热烤试验系统示意图
Fig. 6 The cook-off test system

2009年,智小琦等^[20]采用不同壁厚和不同材料的烤燃弹研究了不同约束条件下RDX炸药烤燃响应特性。分析了约束条件对爆炸延滞期和反应剧烈程度的影响,得到了材料的导热系数和强度等因素对传爆药热安全性的影响。目前,国内的热烤试验基本都是建立在SCB模式的基础上,只是对烤燃弹的尺寸结构、加热方式、升温速率和测温热电偶的位置进行了设计和改进。2010年,都振华等^[21]根据钝感弹药对爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiation,EFI)热安全性评价的要求,建立了适用于EFI的热烤试验系统,采用温度程序控制装置,完成恒温 and 程序升温条件下EFI及其装药的热烤试验,通过对热烤试验结果的分析,评价EFI及其装药的热安全性。图7为试验系统的照片。

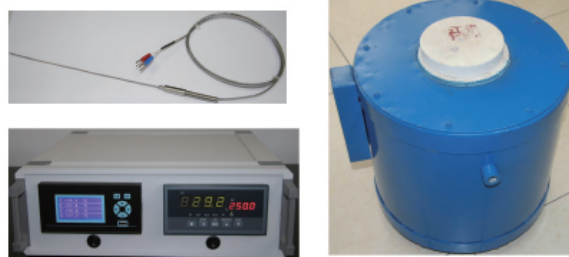


图7 适用于EFI热烤试验系统照片
Fig. 7 The cook-off test system applied to EFI

1.2 快烤试验

快烤试验是为了模拟弹药在火灾条件下的热响应特性,评价其热安全性而设计的。快烤试验一般采用不同的有机燃料,如汽油、酒精、木料等为加热物质,直接对被测物进行加热。GB/T 14372—2005《危险货物运输 爆炸品认可分项试验方法和判据》对该方法进行了规定。由于火烧试验需要的试验场地大,试验结果受自然条件影响大,因此,该方法主要用于整弹或体积较大的含能材料部件的热烤试验研究。有文献^[22]报道了这种方法用于钝感弹药的热安全性能测试,杨丽侠等^[23]则利用池火进行了发射药的易损性研究。

利用一些改进的火烧试验装置,也可以进行小型含能材料部件的热烤试验。如美国海军表面武器中心的研究人员^[24]利用装于燃料盘的某航空汽油对悬于一定高度的烤燃弹进行了火烧试验,他们在弹盖上加装测温热电偶,根据热作用爆炸后见证板上的痕迹和烤燃弹破片数量来判断反应的剧烈程度。1998年,北京理工大学胡晓棉等^[25]以固体酒精为燃料对PETN药柱进行了热烤试验,采用爆轰电效应(Detonation Electric Effect, DEE)判断样品是否发生了爆轰。他们在燃料盘和试验试管之间增加了一个标准钢块,除起均热的作用外,该钢块还用来表征反应的剧烈程度。图8为快烤试验装置示意图。

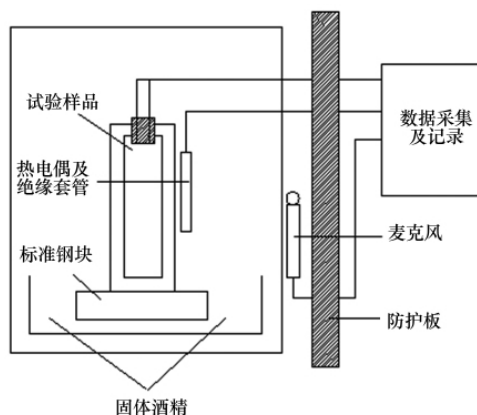


图8 快烤试验装置图
Fig. 8 Devices of fast cook-off test

2008年,代晓淦等^[26]采用螺纹约束和夹板约束两种加强约束的方式对几种不同尺寸的PBX-2炸药进行了火烧试验。

结果表明,在相同的壳体厚度以及夹板约束条件下,随着 PBX-2 尺寸的增大,反应剧烈程度逐渐减弱。

火烧试验加热速度快,火焰温度高,但是火焰受燃料种类及空气的流动影响较大,试验对火焰温度也有一定的要求,需预置足够的燃料确保测试样品发生反应,而且只能待燃料燃尽后才能搜集和观察试验结果。为此,2006年,Atwood等^[27]对火烧试验进行了改进,将丙烷以一定的压力从安装于圆筒壁对称位置上的8个雾化喷嘴中喷出,利用吹风机在一侧吹入空气,点火后在另一侧放置测试样品。该装置通过控制空气吹入速率和丙烷的喷射速率,实现了稳定热流输出,同时也解决了燃烧时间的控制问题。图9为装置示意图和照片。

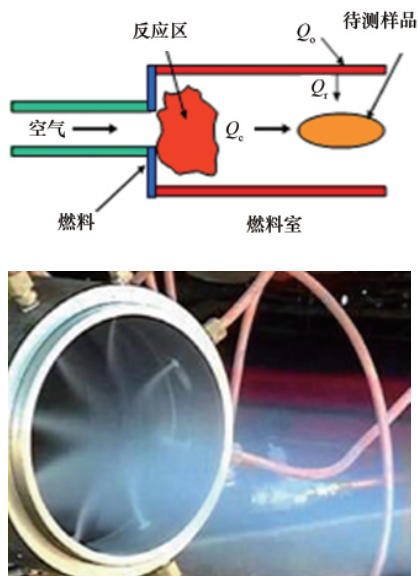


图9 新型弹药快烤装置示意图和装置图
Fig. 9 The new cook-off test for munition

总之,热烤试验作为研究和评价弹药热安全性的一种重要试验手段一直为人们所重视,研究人员对于热烤试验方法和试验装置的研究也一直没有停止过。

2 热烤试验的仿真研究进展

为了通过热烤试验更好地评价弹药的热安全性,仿真计算手段近年来也常常会被用于热烤试验结果的分析中。弹药热烤现象从理论上可以归入热爆炸理论的范畴, Frank-Kamenetskii 模型和 Thomas 模型仍是分析热烤现象的物理过程和数学建模的基本理论^[28]。随着计算机技术的发展,对于热烤现象的模拟仿真计算近些年取得了不少成果。通过模拟计算,人们对于含能材料部件发生热响应的位置、温度和时间有了更加细致的认识,也为含能材料部件的热安全性评价提供了理论和数据的支撑。

Yoh等^[29-31]在2003—2006年间对限制条件下的炸药进行了慢速加热的热爆炸试验,并对该试验过程进行了建模和仿真计算,得到了反应体系内温度分布图像,而且还给出了外壁的膨胀和断裂过程。将热烤现象温度场仿真与结构仿真相

结合,为判断反应的剧烈程度提供了一个新方法。

2004年,荆松吉等^[32]采用有限元方法编制二维烤燃程序,程序中加入了 Frank-Kamenetskii 零级反应模型、一级反应模型及 McGuire-Tarver 反应模型,对 RDX 炸药圆柱体的烤燃行为进行了数值模拟研究。同年,张蕊等^[33]利用 Phoenix 3.3 对 RDX 在热烤过程中的热响应情况进行了三维数值模拟,计算以 Frank-Kamenetskii 模型为主要模型,通过在模型中加入化学反应放热,实现了对不同尺寸 RDX 炸药柱在不同的热烤温度下发生热点火的时间和位置的估算,并且在模型中考虑了热辐射。

2009年,王沛等^[34]为了研究不同升温速率条件下炸药热反应规律,建立了炸药烤燃模型,利用计算流体力学软件,对固黑铝炸药(GHL)在不同升温速率下的烤燃过程进行了数值模拟计算。

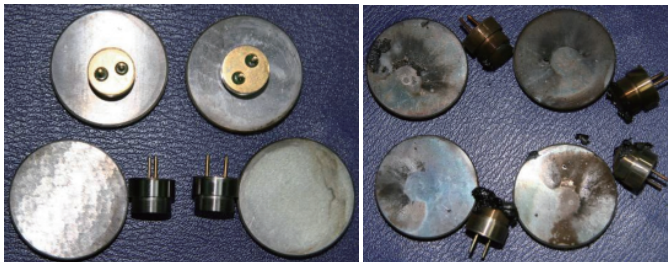
同年,陈朗等^[35]以低熔点 TNT 为研究对象,建立了炸药烤燃热反应模型,模型除了考虑炸药热传导和自热反应外,还考虑了炸药相变和液态炸药的对流传热。采用 Fluent 软件对 TNT 的热烤过程进行了数值模拟,通过模拟计算获得了药柱在不同温度条件下发生热响应的时间。

3 热烤试验在火工品技术领域的应用

由于热烤试验一般用于进行弹药的热安全性评价,因此,需要根据研究对象在生产、使用和存储过程中的实际情况设定试验方式和试验条件。这会增加新产品开发的研究工作量和设备成本。各类试验并没有明显的界限,试验方法和装置相互交叉,对试验结果的评价,也会根据试样的具体情况确定。即使如此,热烤试验仍然是评价武器弹药的重要方法,因为热烤试验在火工品技术领域的应用主要是顺应钝感弹药的安全要求发展起来的。

美国于20世纪70年代提出发展钝感弹药,以提高武器弹药的环境生存能力及其在贮存、运输及勤务处理时的安全性,在2003年形成了钝感弹药军用标准 MIL-STD-2105C《非核弹药危险性评估试验》^[36]。MIL-STD-2105C 规定了非核弹药、弹药子系统、火炸药和起爆点火装置的安全试验、钝感弹药特征的评估试验等方法及其相应的合格判据,规定采用热烤试验评价弹药的热安全性。当前火工品技术的重要发展方向之一是 EFI。由于 EFI 不含起爆药,具有较高的本质安全性而使其符合钝感弹药的设计要求,这使其在钝感弹药中具有广泛的应用前景。但是,EFI 在弹药中使用时采用直列式起爆序列,不同于错位式起爆序列,即 EFI 与下一级装药处于对准状态,两者之间不存在任何可以阻止爆轰传递的环节。如果 EFI 在热作用下产生爆轰,对于武器系统的危害是致命的。为了保证武器系统的安全,相关标准中规定,EFI 在热烤环境下不应发生比燃烧更剧烈的反应。热烤试验则作为评价 EFI 的热安全性的方法被列入相关标准中,如美国军用标准 MIL-DTL-23659E《电起爆器通用设计规范》的附录 A 明确规定了爆炸箔起爆器应通过热烤试验^[37]。

1998年,胡晓棉^[38]设计了以固体酒精为燃料的热烤试验装置,第一次对EFI的模拟样品进行了热烤试验,得到了样品温度与时间的关系曲线,利用标准钢块凹痕和爆轰电效应来判断反应剧烈程度。但严格地说,这并没有对完整的EFI进行热烤试验。2009年,同红海^[39]根据EFI的装药结构,设计了不同尺寸和不同约束条件下的HNS-IV药柱,进行热烤试验。根据EFI装药的试验结果,选择各种不同装药尺寸的完整的EFI进行了热烤试验。试验结果表明,在450℃时,EFI装药量大于220mg时发生爆炸;装药量在45—85mg时发生爆燃;装药量小于34mg时发生热分解反应。图10为部分试验结果。

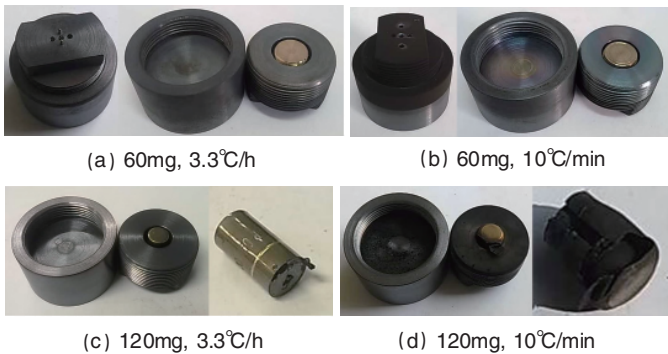


(a) 试验前
(a) Before test
(b) 试验后
(b) After test

图10 同红海得到的EFI的热烤试验结果

Fig. 10 Results from Tong Honghai of EFI's cook-off test

2010年,都振华等^[40-41]采用其设计的热烤试验装置,利用程序升温 and 恒温两种加热方式,对EFI及其装药热安全性进行研究。结果表明,装药量为60mg的EFI在3.3℃/h、5℃/min和10℃/min等3种程序升温条件下,都具有良好的热安全性,装药量为120mg的EFI在3.3℃/h和5℃/min两种升温条件下具有良好的热安全性,而在10℃/min的升温条件下会发生爆炸反应。图11给出了部分试验结果。



(a) 60mg, 3.3°C/h
(b) 60mg, 10°C/min
(c) 120mg, 3.3°C/h
(d) 120mg, 10°C/min

图11 都振华得到的EFI的热烤试验结果

Fig. 11 Results from Du Zhenhua of EFI's cook-off test

4 结论

随着钝感弹药技术的发展,热烤试验作为一类评价弹药热安全性的方法在弹药的设计和勤务处理中使用得越来越

多,热烤试验技术本身也向着更加直观、安全和定量的方向发展。特别是结合模拟仿真技术,通过热烤试验可以获得更多的有关弹药热安全性方面的信息。这些信息都将为提高弹药安全性提供有利的支撑。

参考文献 (References)

- [1] 张蕊,姚朴,冯长根,等. RDX炸药的热安全性综合评价[J]. 含能材料, 2004, 12(A01): 286-291.
Zhang Rui, Yao Pu, Feng Changgen, et al. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2004, 12(A01): 286-291.
- [2] 陈中娥,唐承志,赵孝彬. 固体推进剂的慢速烤燃行为与热分解特性的关系研究[J]. 含能材料, 2005, 13(6): 393-396.
Chen Zhong'e, Tang Chengzhi, Zhao Xiaobin. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2005, 13(6): 393-396.
- [3] 陈中娥,唐承志,赵孝彬. HTPB/AP推进剂的慢速烤燃特征[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 155-157.
Chen Zhong'e, Tang Chengzhi, Zhao Xiaobin. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2006, 14(2): 155-157.
- [4] 王晓峰,戴蓉兰,涂健. 传爆药的烤燃试验 [J]. 火工品, 2001, 2: 5-7, 30.
Wang Xiaofeng, Dai Ronglan, Tu Jian. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001, 2: 5-7, 30.
- [5] 张蕊,冯长根,姚朴,等. 钝感起爆药BNCP的热安全性 [J]. 火炸药学报, 2003, 26(2): 66-69.
Zhang Rui, Feng Changgen, Yao Pu, et al. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(2): 66-69.
- [6] 张蕊,冯长根,陈朗. 弹药的热烤(Cook-off)实验[J]. 火工品, 2002, 4: 37-39.
Zhang Rui, Feng Changgen, Chen Lang. *Initiators & Pyrotechnics*, 2002, 4: 37-39.
- [7] Sechmits G T. ODTX test program[R]. MHSMP-80-40, 1980.
- [8] Kent R, Rat M. Explosion thermique (cook-off) des propergols solides[J]. *Propellant, Explosive & Pyrotechnical*, 1982, 7: 129-135.
- [9] Scholtes J H G, Makkus J C. A description of preliminary cook-off experiment of type IV pipes filled with TNT[R]. TNO report, ADA266751, 1993.
- [10] Scholtes J H G, ven der Meer B J. Temperature and strain gauge measurement in the TNO-PLM cook-off test[R]. TNO report, PML 1996-A62, 1996.
- [11] Scholtes J H G. Strain rate results of the TNO-PML cook-off test with HTPB/AP and PPG/AP/AN propellants[R]. TNO report, PML 1997-A87, 1997.
- [12] Cheng L K, Smorenburg C, Scholtes J H G, et al. Application of fiber optic interferometers for Cook-off measurements[C]//24th International Congress on High-Speed Photography and Photonics. Proceedings of SPIE. 2001, 4183: 444-452.
- [13] Sandusky H W, Chambers G P. Instrumentation of slow cook-off events [C]// Furnish M D. Shock compression of condensed matter-2001. Melville, NY: American Institute of Physics, 2002.
- [14] Parker R P. USA small-scale cook-off bomb (SCB) test[C]//Minutes of 21st Department of Defense Explosives Safety Board Explosives Safety Seminar, Houston, 1984.
- [15] Scholtes J H G, Makkus J C. The construction of the small scale cook-off bomb (SCB) op het PML-TNO[R]. TNO report, PML 1992-104, 1992.

- [16] Scholtes J H G, van der Meer B J. Investigation into the small-scale cook-off bomb (SCB)[R]. TNO report, PML 1994-A44, 1994.
- [17] Chidester S K, Traver C M, Green L G, *et al.* On the violence of thermal explosion in solid explosives [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1997: 264-280.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 14372-2005 《危险货物运输 爆炸品认可、分项试验方法和判据》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 14372-2005 Provisions of dangerous goods-Test method and criteria of acceptance and classification for explosives[S]. Beijing: China National Standard Press, 2006.
- [19] 国防科学技术工业委员会. GJB 772A-1997 炸药试验方法[S]. 1997. National defense science and technology industry committee. GJB 772A-1997 Explosive test method[S]. 1997.
- [20] 智小琦, 胡双启, 李娟娟, 等. 不同约束条件下钝化 RDX 的烤燃响应特性[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 23-24, 34. Zhi Xiaoqi, Hu Shuangqi, Li Juanjuan, *et al.* *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(3): 23-24, 34.
- [21] 都振华, 张蕊, 同红海, 等. 热烤试验系统的建立及其温度特性研究 [C]//全国火炸药、火工品青年学术交流会暨陕西省兵工学会第十届青年学术交流会论文集. 西安, 2010: 256-262. Du Zhenhua, Zhang Rui, Tong Honghai, *et al.* Construction of cook-off system and study of its temperature characteristic [C]//The 10th youth symposium of explosive, initiators and propellant of Ordnance Society in Shaanxi province proceedings. Xi'an, 2010: 256-262.
- [22] Chang J. Development and testing of the Navy's new insensitive explosives, PBX1H-134 & PBX1H-135[C]//NDIA Inertive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium, 2000.
- [23] 杨丽侠, 张邹邹, 刘来东. 发射装药热刺激下的易损性响应试验研究 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 71-74. Yang Lixia, Zhang Zouzou, Liu Laidong. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(3): 71-74.
- [24] Rooijers A J T, Leeuw M W. Literature study of cook-off [R]. PML-1987-22, 1987.
- [25] 胡晓棉, 冯长根, 曾庆轩, 等. 直列式火工品装药的热烤试验设计及其研究[J]. 北京理工大学学报, 1998, 18(5): 638-641. Hu Xiaomian, Feng Changgen, Zeng Qingxuan, *et al.* *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 1998, 18(5): 638-641.
- [26] 代晓淦, 吕子剑, 申春迎, 等. 火烧实验中不同尺寸 PBX-2 的响应规律[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 47-49, 82. Dai Xiaogan, Lu Zijian, Shen Yingcun, *et al.* *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(3): 47-49, 82.
- [27] Atwood A I, Wilson K J, Laker T S, *et al.* Washburn. Development of subscale fast cook-off test [R]. Naval Air Warfare Center Weapons Division, 2006.
- [28] 冯长根. 热爆炸理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988. Feng Changgen. Thermal explosion theory [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [29] Yoh J J, McClelland M A, Maisenschein J L, *et al.* Towards a predictive thermal explosion model for energetic Materials[J]. *Journal of Computer-Aided Materials Design*, 2003, 10: 175-189.
- [30] Yoh J J, McClelland M A. Simulating the thermal response of high explosive on time scale of days to microseconds [C]// Furnish M D, Gupta Y M, Forbes J W. Shock compression of condensed matter-2003. American Institute of Physics, 2004: 425-428.
- [31] Yoh J J. High-end modeling and simulation of cookoff of HMX-based energetic materials[C]// Lecture Notes in Computer Science-2006, 2006: 484-490. doi: 10.1007/11751649_53.
- [32] 荆松吉, 张振宇. 炸药圆柱体烤燃二维数值模拟[J]. 含能材料, 2004, 12(A02): 521-525. Jing Songji, Zhang Zhenyu. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2004, 12(A02): 521-525.
- [33] 冯长根, 张蕊, 陈朗. RDX 炸药热烤(Cook-off)实验及数值模拟[J]. 含能材料, 2004, 12(4): 193-198. Feng Changgen, Zhang Rui, Chen Lang. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2004, 12(4): 193-198.
- [34] 王沛, 陈朗, 冯长根. 不同升温速率下炸药烤燃模拟计算分析[J]. 含能材料, 2009, 17(1): 46-49, 54. Wang Pei, Chen Lang, Feng Changgen. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(1): 46-49, 54.
- [35] 陈朗, 王沛, 冯长根. 考虑相变的炸药烤燃数值模拟计算[J]. 含能材料, 2009, 17(5): 568-573. Chen Lang, Wang Pei, Feng Changgen. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(5): 568-573.
- [36] American Department of Defense. MIL-STD-2105D Hazard assessment tests for non-nuclear munitions[S]. 2011.
- [37] American Department of Defense. MIL-DTL-23659F Detail specification initiators, electric, general design specification for[S]. 2010.
- [38] 胡晓棉. 电爆炸箔起爆系统的设计优化数值模拟及安全性[D]. 北京: 北京理工大学, 1998. HU Xiaomian. Optimization design of electric exploding foil initiator system, numerical simulation and security [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1998.
- [39] 同红海. 爆炸箔冲击片雷管装药设计及其规律研究[D]. 西安: 陕西应用物理化学研究所, 2009. Tong Honghai. Charge design and rule study of exploding foil initiator [D]. Xi'an: Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, 2009.
- [40] Du Z H, Zhang R, Tong H H, *et al.* Cook-off test and its application in EFI's safety evaluation [C]//Tian Shuicheng, Shi Guirong, Li Hongxia, *et al.* Progress in Safety Management Research and Practice. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009: 274-278.
- [41] Du Z H, Zhang R, Tong H H, *et al.* Cook-off test of exploding foil initiator [C]//Li Shengcai, Wang Weiye, An Ying. Progress in Safety Science and Technology. Proceedings of the 2010 International Symposium on Safety Science and Technology, Beijing: Science Press, 2010: 1089-1092.

(责任编辑 齐志红)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。