

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.018

北约慢烤试验标准修订关键技术分析

赵继伟, 胡燕峰, 霍菲, 赵继红

(西安航天动力测控技术研究所, 西安 710025)

摘要: 慢烤(Slow cook-off, SCO)安全性是弹药安全性考核的重要项目之一。为保证我国导弹及其动力系统慢烤安全性考核标准制修订的合理性,提升慢烤试验的有效性,需要借鉴国外慢烤试验技术及标准,分析国外慢烤试验标准的修订依据。本文以北约(North Atlantic Treaty Organization, NATO)慢烤试验标准化协议(Standardization agreement, STANAG) 4382的制修订过程为研究对象。该标准第一版于1996年制定,其实施为装备的定型和军备采购提供了依据,促进钝感弹药技术的发展,最终实现军队生存力和战斗力的全面提升。然而,标准实施过程中,很多成员国对标准中的升温速率、预处理和通过准则等条款提出了质疑,要求对其合理性进行重新评估,并根据评估结果对标准进行修订。本文从北约慢烤试验标准STANAG 4382第一版的制定过程及关键参数、第二版修订的主要内容和修订依据入手,汇总了文献中该标准在北约各成员国中的应用情况和各成员国对标准的修订建议,重点分析了各种情况下的慢烤升温速率模拟结果,并以此为依据对慢烤试验标准中升温速率、预处理参数的设置提出建议,为我军慢烤试验标准的制定提供借鉴。

关键词: 慢烤试验; 标准化协议 4382; 修订; 关键技术分析

中图分类号: V416.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)S-0115-06

Analysis on Key Technologies in Revision of NATO SCO Test Standard

ZHAO Jiwei, HU Yanfeng, HUO Fei, ZHAO Jihong

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: The slow cook-off(SCO) test is one of the important items of ammunition safety assessment. In order to ensure the rationality of the safety assessment standard formulation and revision of the missile and its propulsion system and improve the effectiveness of the SCO test, we need to learn the mature technology and standards of the SCO test from developed countries and deeply analyze the revision principles of the SCO test standard. This paper analyzes the formulation and revision process of standardization agreement(STANAG) 4382 developed by NATO countries. The munitions design finalization and arms procurement are supported. The development of IM technology is promoted. The overall improvement of military survivability and combat effectiveness are realized through implementing the standard in 1996. However, during the implementation of the standard, some doubts on the provisions have been raised by NATO members, such as heating rate, precondition and acceptance. Re-evaluating the rationality and revising the standard according to the evaluation results are required. The formulation process and key parameters of the first edition, and the revision contents and basis of the second edition are reviewed. The implementations of the standard in NATO members are collected, and the revision suggestions from the members are summarized. Through analyzing the simulation results of various heating rates and various typical environments, some suggestions on the setting of heating rates and precondition parameters in the standard are put forward, which can provide

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-06-28

通信作者: 赵继伟, 女, 高级工程师, E-mail: chaoww40105@163.com。

引用格式: 赵继伟, 胡燕峰, 霍菲, 等. 北约慢烤试验标准修订关键技术分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S): 115-120. ZHAO Jiwei, HU Yanfeng, HUO Fei, et al. Analysis on key technologies in revision of NATO SCO test standard[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 115-120.

reference for the establishment of the SCO test standard in China.

Key words: slow cook-off (SCO) test; standardization agreement (STANAG) 4382; revision; analysis of key technologies

现代战争中,火灾环境是最常出现且对弹药安全性影响最显著的因素之一。邻近平台起火,虽然弹药没有直接处于火焰环境,但火灾形成的高热气流会不断加热弹药,使其内部的含能材料发生分解,造成局部高压,最终发生燃烧、爆炸等事故,导致人员伤亡和武器平台损毁^[1]。北约国家在实战和考核中发现,慢烤是弹药最难通过的考核项目^[2]。为此,他们将常规导弹、固体发动机的慢烤安全性纳入弹药安全性评估和定型工作中,制定了慢烤试验标准。标准实施为装备定型和军备采购提供了依据,保证了弹药服役过程的安全性,促进钝感弹药技术的发展,最终实现军队生存力和战斗力的全面提升^[1]。然而,近几年北约成员国对标准部分条款提出了质疑,尤其是2017年的钝感弹药年会,明确提出重新评估升温速率、预处理和通过准则等条款的合理性。目前,我国也已准备制定慢烤安全性试验标准。本文通过分析该标准和2018年修订建议中的关键参数确定依据,对升温速率、预处理参数的设置提出建议,为我军慢烤试验标准的制定提供借鉴。

1 标准的制修订及关键参数

1.1 标准制修订过程简述

1.1.1 标准制定

早在1967年,美国海军发布的标准化文件

WR-50《海军武器要求-空中、水面和水下发射武器弹头最低安全性测试》^[3]就将慢烤试验纳入了标准。随着WR-50逐步上升为国防部标准和美军标^[4-5],慢烤安全性试验方法日趋成熟。为保证联合作战武器的安全性,美国在20世纪80年代在北约推广慢烤试验,并于1996年上升成北约标准化协议^[6]。该标准的关键参数包括:(1)升温速率为3.3℃/h,最高不超过5℃/h;(2)预处理要求是先将弹药快速升温至比预计反应温度低50~100℃,再以3.3℃/h升温直至弹药反应。

1.1.2 标准修订

1998年,北约《钝感弹药评估及发展指南》(AOP39)^[7]的发布和各成员国对提升慢烤试验适用性的需求,慢烤试验标准STANAG 4382^[8]进行了修订。主要体现在3个方面:(1)试验前后均需要按照AOP39进行评估,AOP39的评估流程见图1;(2)细化预处理要求,明确了烤箱先以5℃/min升温到50℃,维持8h使试件达到热平衡;(3)提出了可裁减程序,在考核可能引发间隔点火时,采用25℃/h升温速率,但对安全性考核仍选用3.3℃/h的升温速率;(4)明确装置要有温度循环措施,流入/流出空气温差不大于5℃;(5)明确试件与烤箱内壁每侧至少有200mm间隙;(6)细化了反应结果的评判方法及测试仪器,给出空爆超压值,验证板材质、尺寸和布设原则,碎片分析要求等。

与第一版相比,第二版要求更加细致,可操作

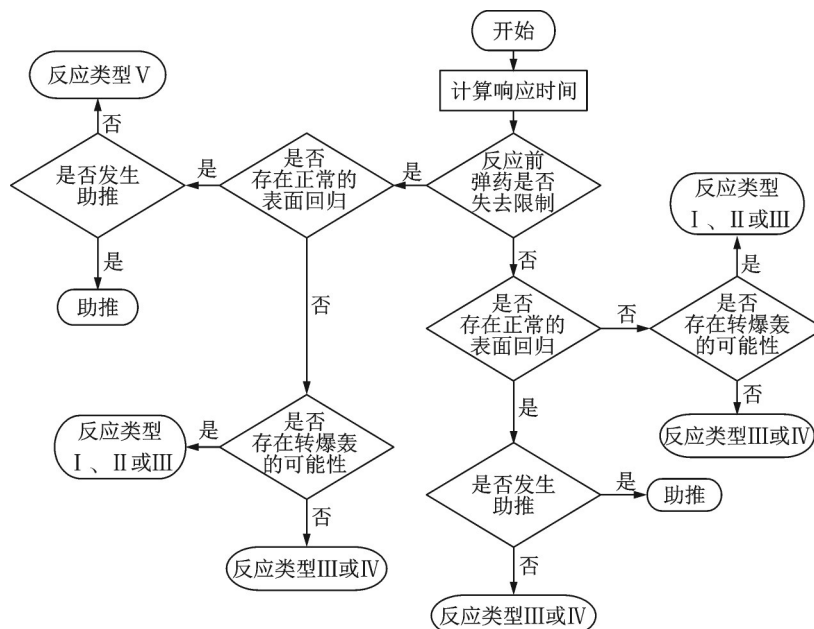


图1 慢烤安全性评估程序

Fig.1 Flow chart of SCO assessment

性好,同时针对引发间隔点火可能性的评估给出了裁剪程序,扩大了标准适用范围。

1.2 参数设置依据

1.2.1 升温速率

MIL-STD-2105D^[9]中明确规定:考核弹药安全性时“应选择最有可能的、可信的刺激,预计对生命、财产或战斗力造成最大伤害的试验项目和试验条件”。为确定慢烤安全性考核试验参数,美国海军在20世纪60年代进行了试验和理论分析,重点围绕:(1)相邻弹药库升温速率,如开展了航母上弹药库起火状态下邻近弹药库的升温过程测量;(2)通过试验和机理分析不同升温速率情况下弹药的反应剧烈程度等。其中,对弹药的反应过程研究中发现,当升温速率 ≤ 3.3 °C/h时,弹药的反应最为剧烈。

2003年,法国Desailly等对该领域前期的研究成果进行总结,并通过数值仿真对不同装药量发动机在不同升温速率下的温度变化、气孔及热点形成、点火点的位置、药柱温度梯度和质量损失过程进行了数值仿真^[10]。

研究得到:(1)不同的升温速率下,药柱内部形成热点的区域不同,升温速率越高,热点越靠近药柱边缘。(2)当升温速率不超过 3.3 °C/h时,药柱内部温度梯度较小,发生反应时,药柱中心能瞬间释放能量,反应相对更加剧烈。该研究认为:为了在最严酷条件下考核弹药安全性,标准将升温速率控制在 3.3 °C/h是合理的^[10]。

1.2.2 预处理

慢烤试验如果一直以 3.3 °C/h的升温速率进行加热,试验持续时间较长。为缩短试验周期,研究人员对加速升温等效性进行了数值模拟和验证。比利时的研究人员模拟了弹药以 25 、 50 、 75 、 100 、 150 和 200 °C的初始状态进行加热的反应过程,得出对于PBX类含能材料,预处理至 100 °C不会影响弹药的反应程度,但是对于低分解温度的材料,预处理的温度需要下调^[11]。Desailly等^[10]通过仿真验证了预处理温度低于反应温度 100 °C时,预处理升温速率为 5 °C/min,不会影响反应结果。标准第一版中规定预处理温度比预计反应温度低 $50\sim 100$ °C,需要试验前明确受试件中所有含能材料的分解特性,该规定可操作性差。考虑到常见的火工品分解温度为 $160\sim 230$ °C,因此,第二版将预处理温度设定在 50 °C,预处理升温速率为 5 °C/min,为保证试件内部热量均匀,提出保温 8 h的要求。

2 标准执行及偏离情况

目前,北约有14个成员国参照STANAG 4382中的方法和装置开展慢烤试验,但很多国家在执行中都存在偏离^[12]。其中,英国普遍省略了危险分析环节;部分试验没有采用 3.3 °C/h的升温速率;试验中热电偶数量和位置也根据实际情况进行了调整;部分试验没有采用强对流方式。德国部分试验没有按照标准中规定的升温速率进行加载;虽普遍进行了预处理,但平衡温度有室温、 50 和 70 °C;试验通常采用5个热电偶,但不进行冲击波测量。法国根据弹药在烤箱内的摆放位置设计不同的加热系统和对流方式。美国部分试验没有设计强对流装置;在防助推设计中,采用了外部约束和内部约束两种约束方式。图2给出了北约国家典型试验照片^[13]。

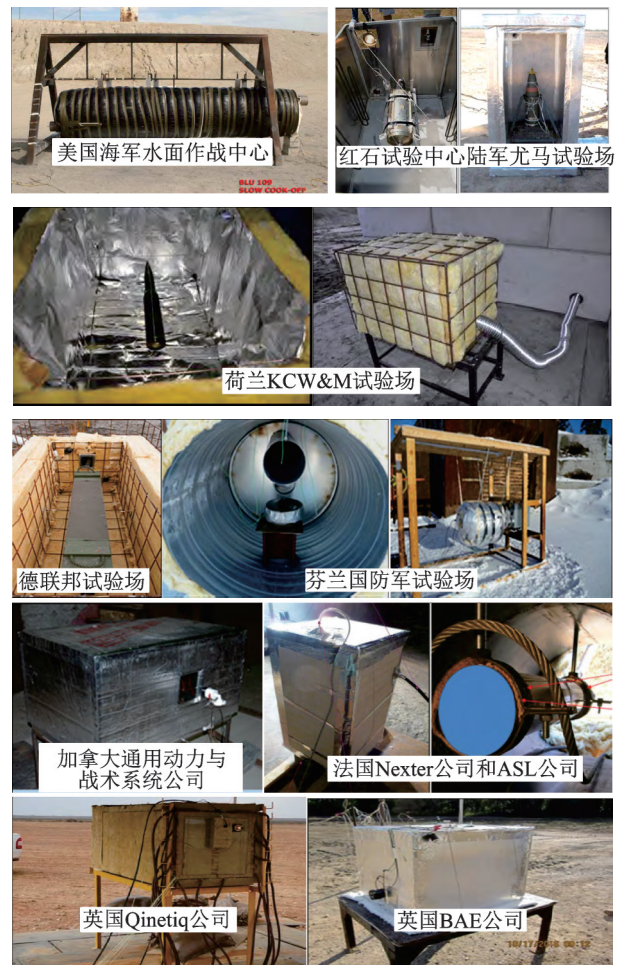


图2 北约国家典型慢烤试验照片

Fig.2 Photos of typical SCO tests in NATO countries

3 各成员国对标准修订的建议

3.1 升温速率的调整

尽管各成员国都遵循了 3.3 °C/h的升温速率,但近几年,关于调整升温速率的呼声越来越高。

2018年北约弹药安全信息分析中心组织召开的会议中,专家认为3.3 °C/h的设定过于保守,大大降低了弹药安全性考核效率^[12]。认为,按照MIL-STD-2105D中试验参数确定原则,3.3 °C/h虽然满足“预计对生命、财产或战斗力造成最大伤害的试验条件”,但不是弹药寿命周期内“最有可能的、可信的刺激”,明确提出需要重新评估标准中升温速率的合理性。

3.2 制定可裁剪预处理参数

在预处理参数设定中,成员国主要对两个方面提出质疑^[13]:(1)标准中规定试验件加热到50 °C后保温8 h,目的是使试件达到热平衡,从而使弹药反应程度最剧烈。但随着大型战术甚至战略装备加入考核,8 h很难使整个试件达到热平衡。(2)对与50 °C存在两种截然相反的观点,一种认为用室温,可以不需要保温8 h;另一种认为应调高预处理温度,提升试验效率。

3.3 不必限定烤箱的加热设备和对流方式

成员国也对第二版中规定的加热设备和对流方式提出了意见。例如美国海军提出战舰弹药库通常采用自然对流,强迫对流不能代表弹药实际面临的烤燃环境。同时,随着技术进步,出现了多种加热方式,加热设备不断更新,各成员国采用了不同的加热方式,并要求标准取消对加热设备的限定^[14]。

3.4 对于试验通过准则的争议

在2017年的修订调研中,通过准则也是争议最多的问题之一。大多认为不超过反应类型V过于严苛,应该规定为不超过反应类型IV^[15](爆燃)或对周围15 m范围外不构成威胁^[13-14]。

4 升温速率

上述4个方面中,升温速率的调整是最急于解决的问题。鉴于篇幅限制,本文重点分析升温速率合理性。

4.1 反应分析

本文以动力系统为对象,建立二维模型,外边界条件如下

$$T_w = T_0 + kt \quad (1)$$

式中: T_w 为外壁面温度; T_0 为外壁面初始温度50 °C(323 K); k 为升温速率,分别为50、10、3.3和1 °C/h; t 为烤燃时间。

能量控制方程如下

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + S \quad (2)$$

式中: ρ 为物质密度, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; S

为源项,如下

$$S = \rho Q Z \exp(-E/RT) \quad (3)$$

式中: Z 为反应的指前因子, s^{-1} ; E 为反应活化能, kJ/mol ; T 为当前位置当前时刻的温度, K ; R 为通用气体常数, $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; Q 为反应热。

仿真得到反应位置、时间和温度,如表1所示。

表1 动力系统慢烤计算结果

Table 1 Calculation results of power system slow cook-off

初始温度/K	升温速率 $k/(\text{°C}\cdot\text{h}^{-1})$	反应位置	反应时间/s	反应温度/K
323	50	(12.46, 0)	19 250	782
323	10	(72.91, 0)	81 661	733
323	3.3	(276.5, 0)	229 534	668
323	1	(394.5, 0)	727 507	636

不同升温速率下的反应位置如图3所示。

从图3可以看出,50 °C/h的反应位置在推进剂最边缘,此时推进剂大部分处于较低温度,不会与边缘同时反应,而是发生次生反应,反应剧烈程度较低。随着升温速率减小,着火点位置逐渐向轴线中心靠近,反应程度也将会越来越剧烈。当升温速率小于等于3.3 °C/h时,反应位置是动力系统中心。此时降低升温速率不会提升反应剧烈程度,但会延长试验时间。因此,3.3 °C/h能够代表“对生命、财产或战斗力造成最大伤害的试验条件”。

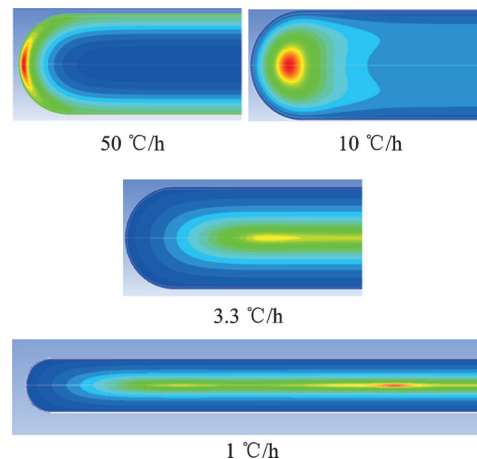


图3 不同升温速率下的反应位置

Fig.3 Reaction locations at different heating rates

4.2 环境合理性分析

升温速率的设定不光要考虑反应剧烈程度,还应该能够代表弹药寿命周期内的典型环境。2018年北约慢烤标准修订小组就弹药典型环境进行了分析。该小组首先建立了临近弹药库火灾模型,计算了火焰、舱壁、弹药库内空气、弹药和远端墙壁的升温过程^[12],如图4所示。

将仿真得到的弹药库内空气代入式(4)计算。

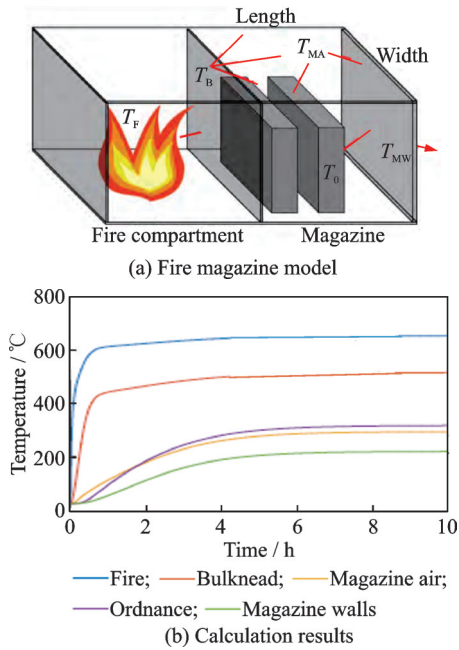


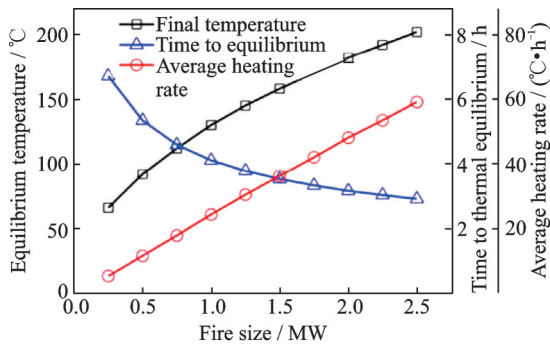
图4 弹药库火灾模型及计算结果

Fig.4 A model of fire magazine and calculation results

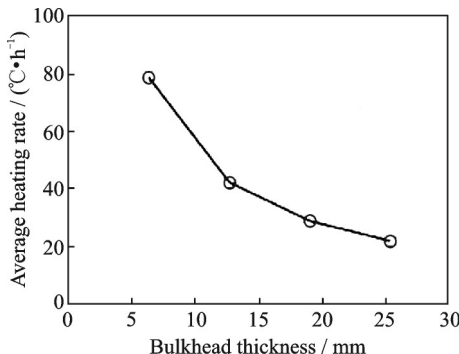
$$\frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dT}{dt} \cdot dt = \frac{T(t_2) - T(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (4)$$

式中: T 为温度, K; t 为时间, s; t_1 为初始时刻; t_2 为达到热平衡的时刻。

如图5(a)所示,按照传统舱壁厚度,对于1 MW的火焰,达到弹药库热平衡温度130 °C的时间 $t_2=4.1$ h,计算得到弹药库内空气平均升温速率24.3 °C/h。火焰更大时,升温速率更高。



(a) Effect of fire on heating rate



(b) Effect of bulkhead thickness on heating rate

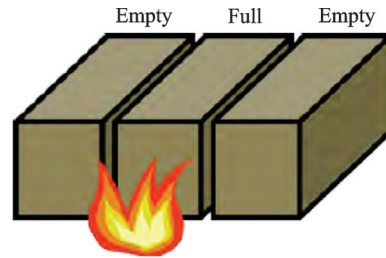
图5 平均加热速率计算曲线

Fig.5 Calculation results of average heating rate

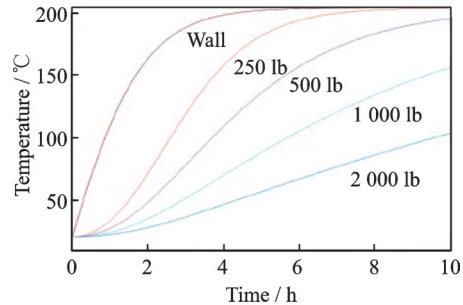
如图5(b)所示,把壁厚增加到12 mm,升温速率12 °C/h;把壁厚增加到25 mm,升温速率10 °C/h。

从计算可以得出,对于临近弹药库火灾,按最保守情况计算,升温速率 ≥ 10 °C/h,其远大于3.3 °C/h。

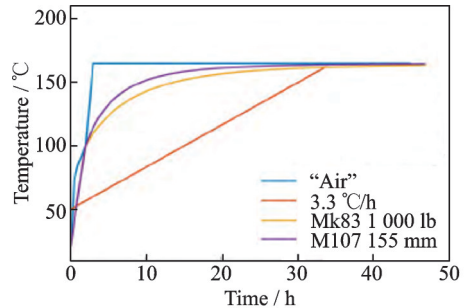
该研究小组还建立了弹药库满载、空载、火灾不同位置、蒸汽泄露等情况的模型,如图6所示。



(a) Calculation results for full/no-load



(b) Calculation results for the fire below deck



(c) Calculation results for the case of steam leakage

图6 不同情况升温速率计算

Fig.6 Calculation results of heating rate at different cases

满载升温速率小于空载,按传统壁厚,满载升温速率 ≥ 18 °C/h。火灾在甲板下方的升温速率 ≥ 17 °C/h。蒸汽泄露情况下的升温速率 ≥ 8 °C/h。

所以,弹药典型环境的升温速率 ≥ 8 °C/h,升温速率3.3 °C/h基本不会出现在实际服役环境中。

5 结 论

2018年北约已经启动新一轮慢烤试验标准的修订计划,并对升温速率、预处理过程进行了系统的论证。从论证结果推测,新版标准中升温速率可能会提高到8 °C/h及以上,预处理参数可能也会从

单一状态调整到多组备选参数,对于烤箱加热方式和对流方式的限制也会放宽。我国目前已开始制定导弹或固体发动机的慢烤试验标准,在标准的制定中应充分论证升温速率、预处理参数以及试验装置要求的合理性,才能更加有效地指导慢烤试验的开展。

参考文献:

- [1] 李广武, 赵继伟, 杜春兰, 等. 常规导弹弹药安全性考核与技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.
LI Guangwu, ZHAO Jiwei, DU Chunlan, et al. Safety assessment and technology of non nuclear missile and ammunition[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2015.
- [2] FISHER M, JOHNSON P. A system approach to IM for solid rocket motors-composite cases and reduced sensitivity propellants[C]//Proceedings of Insensitive Munitions & Energetic Materials Meeting. Orlando, Florida, USA: NIMIC Publication, 2003.
- [3] 美国海军. 空中、水面和水下发射武器弹头最低安全性测试: WR50—1967 海军武器要求[S]. [S.l.]: 美国海军, 1967.
America Navy. Minimum safety testing for air, ground and underwater launched weapon warheads: WR50—1967 Naval Weapon Requirements[S]. [S.l.]: America Navy, 1967.
- [4] US Department of Defense. Hazard assessment tests for non-nuclear munitions: DOD-STD—1982[S]. [S.l.]: US Government, 1982.
- [5] US Department of Defense. Hazard assessment tests for non-nuclear munitions: MIL-STD—1989[S]. [S.l.]: US Government, 1989.
- [6] Military Agency for Standardization of NATO. STANAG 4382 slow heating, munition test procedures[S]. England: Allied ordnance publication, 1996.
- [7] Military Agency for Standardization of NATO. AOP-39 guidance on the development, assessment and testing of insensitive munitions (MURAT) [S]. England: Allied ordnance publication, 1998.
- [8] Military Agency for Standardization of NATO. STANAG 4382 slow cook-off, munition test procedures[S]. England: Allied Ordnance Publication, 2003.
- [9] US Department of Defense. Hazard assessment tests for non-nuclear munitions: MIL-STD-2105D[S]. [S.l.]: US Government, 2011.
- [10] DESAILLY D, GUENGANT Y. Numerical simulation of reaction violence to cook-off experiments [C]//Proceedings of Insensitive Munitions & Energetic Materials Meeting. Orlando, Florida, USA: NIMIC Publication, 2003.
- [11] GUENGANT Y, ISLER J, HOUDUSSE D. Influence of energetic material formulation on the reaction to slow cook-off[C]//Proceedings of International Symposium on Energetic Materials Technology. [S.l.]: ADPA Publication, 1994.
- [12] HUBBLE D. An investigation into a proper heating rate for slow cook-off testing[C]//Proceedings of Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Portland, USA: MSIAC Publication, 2018.
- [13] BAKER E. STANAG 4382 slow heating survey and historical review[C]//Proceedings of Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Portland, USA: MSIAC Publication, 2018.
- [14] GUENGANT Y. Insensitive munitions industry contribution for new STANAG-AOP 4382 edition of the slow cook-off test[C]//Proceedings of Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. Portland, USA: MSIAC Publication, 2018.
- [15] Military Agency for Standardization of NATO. STANAG 4439 policy for introduction and assessment of insensitive munitions(IM)[S].[S.l.]: Allied Ordnance Publication, 2010.

(编辑: 胥橙庭)