专题——含能材料及其弹药系统的热安全性问题

含能材料热安全性研究进展

叶青，余永刚

（南京理工大学 能源与动力工程学院，南京 210094）

摘要：分析了国内外关于含能材料烤燃试验和烤燃数值模拟的研究进展，主要是炸药和推进剂等烤燃试验研究成果，以及装填含能材料的弹药系统的烤燃数值模拟研究成果。结果发现，小型含能材料烤燃试验技术是目前烤燃试验开展的重点，其中烤燃过程可视化、烤燃响应程度的量化是烤燃试验的关键技术。小型烤燃试验研究结合烤燃数值模拟是评估弹药系统热安全性的重要方法。针对烤燃数值模型的完善（热-机械-化学耦合烤燃模型）是未来的发展趋势。

关键词：含能材料；热安全性；烤燃；炸药；推进剂；烤燃试验；烤燃数值模拟

中图分类号：TJ450.4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672-9242(2022)03-0001-10

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2022.03.001

Thermal Safety of Energetic Materials

YE Qing, *YU Yong-gang*

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: This paper analyzes the research progress on the cook-off test and numerical simulation of energetic materials at home and abroad, mainly the research results of the cook-off test of explosives and propellants, as well as the research results of cook-off numerical simulation of the ammunition system filled with energetic materials. The analysis results found that the small-scale energetic cook-off test technology is the focus of the current cook-off test. The visualization of the cook-off process and the quantification of the cook-off response are the key technologies for the cook-off test. The small-scale cook-off test research combined with the cook-off numerical simulation is an important method to evaluate the thermal safety of ammunition systems. The improvement of cook-off numerical models (thermo-mechanical-chemical coupled cook-off models) is the future development trend.

KEY WORDS: energetic materials; thermal safety; cook –off; explosives; propellant; cook-off test; numerical simulation

含能材料，指能迅速释放大量能量并对外做功的物质，具有爆炸性和爆燃性。含能材料作为易燃易爆物，其安全性和作用可靠性是具有矛盾性的，在追求高能化的过程中，热安全性会被牺牲掉部分。含能材料在热刺激下会发生自热反应，最终出现燃烧或爆炸的情况。在兵器科学领域，常见的含能材料有炸药、发射药、推进剂、火工品等，这些含能材料一旦在热刺激下引发安全事故，造成的损失将非常惨痛。例如，

收稿日期：2021-12-23；**修订日期：**2022-02-21

Received：2021-12-23；**Revised：**2022-02-21

作者简介：叶青（1993—），女，博士，工程师，主要研究方向为固体火箭发动机热安全性。

Biography：YE Qing (1993—), Female, Doctor, Engineer. Research focus: thermal safety of solid rocket motor.

通讯作者：余永刚（1963—），男，博士，教授，主要研究方向为含能材料的燃烧理论与控制技术。

Corresponding author：YU Yong-gang (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: combustion theory and control technology of energetic materials.

引文格式：叶青, 余永刚. 含能材料热安全性研究进展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 001-010.

YE Qing, YU Yong-gang. Thermal Safety of Energetic Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 001-010.

在贮存过程中，弹药因自身散热不良导致局部温度过高，或受到外界物品燃烧产生的热辐射导致升温；在运输过程中，由于运载工具发生火灾，使弹药受到火焰直接烘烤等事故。上述外界的热刺激都会致使弹药温度升高，最终发生热安全性事故，导致贮存仓库、运载工具的损毁及相关工作人员的伤亡。美国历史上，因热刺激而引发的安全性事故案例很多，见表 1。为降低安全事故对人员和武器发射平台造成的破坏性，针对不同弹药和弹药不同部件的安全要求，学者们对其热安全性进行了大量研究[1-5]。

表 1 美国历史上热刺激引发的安全性事故

Tab.1 Safety accidents caused by thermal stimulation in American history

事故	事故原因	死/伤人数	财产损失
USS Forrstal 航母	机载火箭意外击中飞机油箱引火	134/161	7.763 亿美元
USS Enterprise 航母	Zuni 火箭意外点燃	28/343	4.966 亿美元
USS Nimitz 航母	载机降落撞击夹板，不死鸟导弹受热爆炸	14/48	1.249 亿美元
Black Horse Camp 科威特海湾战争	155 mm Shells 车辆火焰，清理损毁武器	3/53	14 辆 M1-A1 坦克

许多国家先后制定了评估含能材料和弹药系统安全性的相关标准。2003 年，美国海军公布了军标《非核弹药的危险性评估试验》，见表 2。其中烤燃试验分为慢速加热和快速加热条件，慢烤试验要求弹药温度以 3.3 K/h 均匀上升；快烤试验要求航空煤油的火焰环境温度大于 1143 K。烤燃试验作为评价弹药热安全性的主要试验手段，烤燃响应程度的分级判定对分析烤燃试验结果十分重要。北约将含能材料烤燃响应等级按照剧烈程度分为 5 级，分别为爆轰反应、部分爆轰反应、爆炸反应、爆燃反应和燃烧反应。

表 2 美军钝感弹药军用标准中烤燃试验要求

Tab.2 Cook-off test requirements in the US Army standard for insensitive ammunition

项目	试验条件	判定准则
快速烤燃	航空燃油或木材火焰	不发生超过燃烧的反应
慢速烤燃	升温速率为 3.3 K/h	不发生超过燃烧的反应

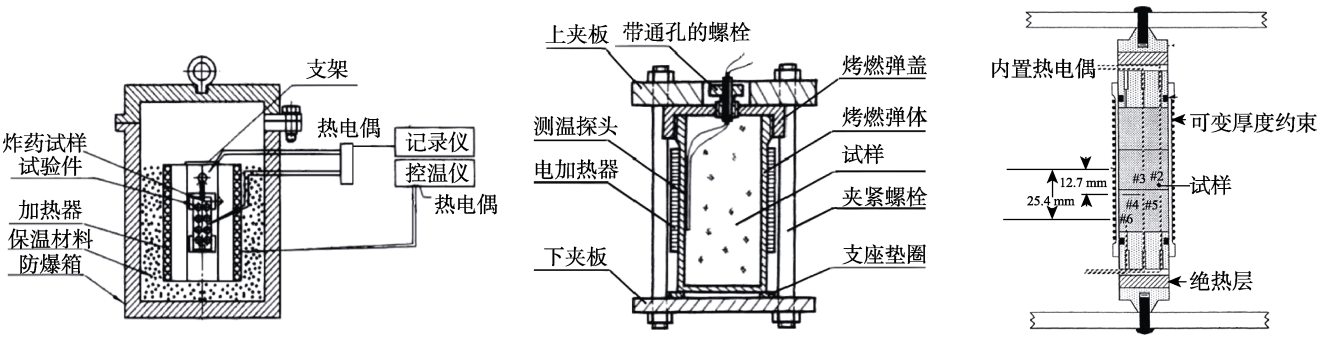
含能材料的热安全性研究包含烤燃试验和烤燃数值模拟。在烤燃试验中，通过设定不同的加热条件，内置热电偶等设备，监测含能材料的温度变化，获取烤燃响应时间和响应温度等重要参数。同时，根据试验装置的损坏程度，判断响应剧烈程度，从而对其热安全性进行分析评估。烤燃试验存在一定偶发性，危险性较大，花费较多。随着计算机技术的不断发展，学者们开展了烤燃数值模拟研究，不仅可以获得试验中无法观测到的细节，并且在少量试验的基础上，就能对含能材料的热安全性进行深入全面的研究。基于此，本文根据国内外公开发表的文献，综述了含能材料和弹药系统烤燃试验与烤燃数值模拟的相关研究进展。

1 含能材料烤燃试验研究进展

在多次武器系统安全性事故的惨痛教训后，钝感弹药技术在世界范围内得到了飞速发展。许多研究小组[1-5]针对低刺激灵敏度、高热稳定性和高性能特性的新型钝感含能材料开展了大量烤燃试验研究。

1.1 烤燃试验方法

为了评估含能材料的热安全性，学者们建立了一系列烤燃试验方法，并进行了试验研究。常见烤燃试验类型有一维热爆炸试验（ODTX）、小型烤燃弹试验（SCB）和可变约束烤燃试验（VCCT）。一维热爆炸试验是利用密封圈、塞子和螺旋压盖将含能材料药柱固定密封在试管中，记录在恒温炉内药柱爆炸的时间，并根据试管的损坏程度，判断响应剧烈程度，试验装置如图 1a 所示。小型烤燃弹试验装置由顶盖、



a 一维热爆炸试验　　b 小型烤燃弹试验　　c 可变约束烤燃试验

图 1 常见烤燃试验装置

Fig.1 Common cook-off test device: a) one dimensional thermal explosion test; b) Small fired bomb test; c) variable restraint roast test

弹壁、绝热层等组成，如图 1b 所示。将含能材料放置于金属壳体中，加热壳体，并通过内置热电偶进行测温，试验药量一般为 20 g。可变约束烤燃试验的装置同样由顶盖、弹壁、绝热层等组成，如图 1c 所示。壳体的厚度和两端顶盖密封条件等可以进行改变，研究不同约束条件下含能材料的烤燃响应状态。含能材料烤燃响应的剧烈程度，与烤燃试验的加热速率、约束条件、药柱尺寸和装药配方等因素相关，因此专家学者们针对不同试验条件开展含能材料的烤燃试验研究。

1.2　国外烤燃试验研究进展

炸药在军事领域作为弹药的战斗部，具备极强的爆破性，因此针对炸药进行烤燃试验研究时，关注重点为烤燃响应时的剧烈程度和对金属壳体的破坏性，并通过试验结果确定弹药的热感度，作为其在武器系统中存储和运输过程的安全标准参考。2002 年，Sandusky 等[6]利用 VCCT 进行了炸药的慢速烤燃试验，分别以 3、6 K/h 加热烤燃装置的金属壳体，发现在 3 K/h 的烤燃工况下，炸药的中心轴位置最早发生着火。2006 年，Garcia 等人[7]通过改变烤燃试验装置中不锈钢容器的端板厚度和装配螺栓的直径，控制混合炸药 LX-04 烤燃试验的约束水平。试验结果表明，减少整体约束能够降低烤燃过程中的压力，降低反应速率，从而降低烤燃响应程度。2010 年，Madsen 等人[8]采用可控的烤燃试验装置进行了固体炸药的小型和大型热爆炸试验，试验结果表明，在较低升温速率的工况下，炸药烤燃着火位置通常在钢坯中心附近。试验研究还确定了不同升温速率下固体炸药烤燃爆炸所需的排气面积，并用排气面积和升温速率的函数计算了爆炸反应的程度。

推进剂烤燃试验除了关注烤燃弹尺寸结构、加热方式、升温速率对试验结果的影响外，还针对推进剂配方、添加剂的类型等因素进行大量研究。Ho 等人[9]为研究加热速率和塑化剂含量对推进剂烤燃过程的影响，针对 HTPB 复合推进剂进行了小规模烤燃弹试验，发现塑化剂对推进剂烤燃响应时间和响应程度的影响比较明显。Chaturvedi 等人[10]针对采用不同粘合剂的 AP 基复合推进剂进行了慢速烤燃试验，发现粘合剂对推进剂烤燃响应剧烈程度的影响比较明显。Kimura 等人[11]则针对采用不同氧化剂的 AP 和 AN 进行了快速烤燃试验，他们发现烤燃反应时间主要取决于约束条件和推进剂成分，AP 推进剂的烤燃反应时间更长，但它的烤燃反应也比 AN 推进剂更为剧烈。

目前针对含能材料的小型模型试验开展得较多，而可视化和量化烤燃响应状态的试验装置是发展重点。2004 年，Dickson 等人[12]为能够直接观察含能材料的烤燃过程，利用蓝宝石和封闭玻璃替代烤燃装置的部分金属壳体，对烤燃试验装置进行可视化改进。在加热塑料粘结炸药（PBX）PBX-9501 的过程中，用高速摄像仪记录了炸药燃烧过程中的物理和化学变化现象。他们发现炸药的着火位置出现在中心，同时产生环向拉伸应力，出现 3 条中心向周围的径向裂缝。同时，较弱的约束会导致更多的径向裂缝，约束的强度越大，对裂纹形成的抑制效果越明显。

随着热测量和热控制技术的不断发展，目前含能材料的烤燃试验基本实现了试验的可重复性和扩展性。Cooper 等人[13]开发了一个能够可控、可重复地对含能材料样品进行辐射加热的台式烤燃试验装置。Ho 等人[9]改进了标准化小型烤燃弹试验装置，使其能够进行较大尺寸推进剂试样的烤燃试验。

1.3　国内烤燃试验研究进展

国内学者在 20 世纪末开始进行含能材料的烤燃试验研究。1998 年，胡晓棉等人[14]根据国家钝感弹药操作规程，针对冲击片雷管和冲击片点火管，设计了适用于多种火工品的小尺度烤燃试验装置。此后，国内学者针对小尺度烤燃弹的尺寸结构、加热方式、升温速率等方面，改进试验装置，又开展了系列含能材料烤燃试验研究[15-16]。冯晓军等人[17]进行了 5 种装药尺寸炸药的慢速烤燃试验研究，发现装药尺寸越大，烤燃反应越剧烈，发生烤燃反应时的炉内温度越高。马欣等人[18]开展了不同尺寸炸药烤燃弹试验，发现当炸药长径比为 4:1 时，改变炸药尺寸，对炸药烤燃结果（响应时间、响应温度）的影响不大。孙培培等人[19]进行了不同壳体直径与不同约束条件下的炸药快速烤燃试验，发现壳体约束条件弱时，烤燃响应等级低。王沛等人[20]选用 GHL 炸药研究进行了 3 K/h~10 K/min 升温速率下的炸药烤燃试验，发现升温速率对炸药烤燃响应时间和位置的影响较大，对烤燃响应温度的影响很小。上述研究结果表明，装药结构和尺寸在一定程度上会对含能材料的烤燃响应情况造成影响。

在大量针对烤燃弹尺寸结构、加热方式、升温速率等烤燃试验装置外在条件的烤燃试验基础上，国内学者系统研究了含能材料的成分配方、添加剂类型等内在因素对含能材料烤燃响应时间、温度和剧烈程度的影响机理。周得才等人[21]针对不同粒度的硝铵炸药进行了慢烤试验，结果表明，随着炸药粒度的减小，硝铵炸药的烤燃响应温度随之降低。2013 年，向梅等[22]对由不同钝感炸药和高能炸药配比的复合药柱的烤燃响应特性进行了研究，不同升温速率下的烤燃响应情况显示，升温速率较小时，复合药柱的热安定性与高能炸药接近；升温速率较大时，复合药柱的热安定性与钝感炸药性能相近。还有学者[23-24]研究发现，炸药的装药密度越大，发生烤燃响应时壳体的破坏程度越小，但他们的研究均未对烤燃的燃烧转爆轰情况进行深入研究。高立龙等人[25]通过差示

扫描量热法测定了不同比例 Al/RDX 的 PBX 基炸药的热分解过程，并进行了慢速烤燃试验。试验表明，炸药的比例和配方对表观活化能和慢速烤燃响应特性有影响。

2010 年后，国内学者开展了一些含能材料烤燃试验研究，发现由于外界加热环境的多样性和复杂性，含能材料往往发生不同形式的烤燃反应，大致可区分为慢速、中速和快速烤燃 3 种形式（见表 3）。通常以着火响应区（即着火位置）来大致判别含能材料的烤燃形式[26]。杨筱等人[27-28]选用不同材料、不同厚度的隔热层进行钝化 RDX 炸药烤燃试验，结果表明，隔热层的材料和厚度均会使烤燃响应剧烈程度不同。宋柳芳等人[29]针对 HTPE 推进剂进行慢速烤燃试验，并根据试验数据计算了反应动力学参数。丁黎等人[30]针对高固含量的改性双基推进剂开展了热烤试验，发现当推进剂的固含量由 0 增至 50%时，热爆炸临界温度上升了约 22 ℃。陈晨等人[31]进行了不同老化程度推进剂的烤燃试验，发现存储时间越长，存储温度越高，推进剂的着火延迟期越短，烤燃响应越剧烈。赵孝彬等人[32]开展了不同配方推进剂的慢速烤燃试验研究，发现推进剂的配方和烤燃升温条件对推进剂着火温度有显著影响，烤燃装置的约束条件则对推进剂烤燃响应的剧烈程度有显著影响。

表 3 含能材料烤燃反应形式

Tab.3 Cook-off reaction form of energetic materials

反应形式	着火位置	热量传递方向
快速烤燃	含能材料表面	始终由外向内
中速烤燃	介于快、慢之间	介于快、慢之间
慢速烤燃	含能材料内部	先由外向内逐渐转变为由内向外

根据上述含能材料的烤燃试验研究可以发现，烤燃试验能够得到有效的试验数据，研究人员可以设定不同的加热条件，改变约束条件、装药尺寸等开展系列烤燃试验，获得相应含能材料的烤燃试验数据，从而对其热安全性进行分析评估。但试验结果往往是在特定条件下获得的，且含能材料的烤燃试验周期长、费用高，只能从宏观的角度判断着火延迟期，不具有一般性。

2 含能材料烤燃数值研究进展

利用化学动力学模型预测热爆炸可追溯到近 1 个世纪，只有在过去的 25 年里，借助动力学模型和数字计算机的力量才使可靠的预测成为可能。在先进计算机技术的支持下，学者们开始尝试建立含能材料的热分解模型，通过数值模型结果与试验测量结果的相互印证去分析含能材料的热分解、燃烧、爆炸行为。随着计算机数值仿真技术的迅猛发展，针对不同含能材料开展烤燃数值研究，不仅可以全面细致地记录各重要参数的时空分布，还可以快速且简便地对含能材料热安全性进行深入研究。结合烤燃试验和烤燃数值分析 2 种方法，既能使结果充分全面、可信度高，又能尽量缩短周期和减少费用。

2.1 使用自编程序烤燃数值模拟

在 20 世纪 80、90 年代，受限于计算机技术，烤燃数值模拟都是基于 Semenov 模型和 Frank-Kamenetskii 模型热爆炸基础的一维数值模拟。Tarver 等[33]、Merzhanov 等[34]、Jones 等[35]以及 Aydemir 等[44]都通过自编程序进行了含能材料一维热爆炸和传热问题的数值模拟。进入 21 世纪后，热反应机理的研究发展逐渐深入，含能材料多步热分解反应机理被揭示，专家学者们通过编程技术，建立了多种数值模拟平台，可进行含能材料烤燃过程多步反应、多个维度的数值计算。

Jones 等人[35]从试验和理论 2 个方面描述了小型燃烧弹试验装置内的温度分布。利用二维有限差分计算程序 HEAT，预测了惰性填充 SCB 内特定位置的温度-时间分布，并与试验测量得到的温度进行了比较。Schmitt 等人[37]建立了烤燃模型预测在烤燃过程中含能材料的剧烈反应，结果表明，着火后，含能材料将以毫秒级的速度燃烧。根据含能材料与约束材料的动力计算结果，如果烤燃装置在此过程中未受损坏，那么加速爆燃可能转变为爆轰。Wardell 等人[38]用流体力学程序 ALE3D 模拟了高能炸药的热爆炸现象，其中热分解和膨胀模型是基于 Arrhenius 动力学理论建立的，而爆炸模型则是采用基于压力的燃烧模型，他们的工作有助于模拟高能材料系统在热环境下的响应。一维烤燃数值模拟的结果显示，当炸药与钢制容器之间没有间隙时，响应程度会更剧烈。Baer 等人[39]为评估烤燃响应剧烈程度，针对 HMX 炸药进行了小型烤燃试验，并建立了二维数值模型进行数值仿真。他们发现，含能材料的烤燃反应涉及热、化学与机械耦合过程，而这个过程会对含能材料本身造成热损伤。Hill 等人[40]研究发现，含能材料在烤燃过程中会产生裂纹，因此他们建立了模型研究裂纹对烤燃爆炸现象的影响。结果表明，着火后，裂纹内的燃烧扩散到相连的孔隙中，增大了燃烧表面，从而导致更剧烈的烤燃响应。2006 年，Yoh 等人[41]根据热爆炸试验结果，建立了基于 HMX 的塑料粘结炸药（LX-10）烤燃响应模型，对爆炸引起的金属断裂和破碎进行了模拟，计算得到响应过程中的壁面应力变化和试验数据相吻合。2015 年，Choi 等人[45]优化了算法，针对含能材料爆炸或燃烧时的高压状态，计算了惰性理想气体的气体-真空界面通量，并将其扩展到具有一般非理想状态化学组分反应的气体混合物。Gross 等人[46]通过有限元方法模拟了受限 HMX 炸药在外热流作用

下瞬态行为的一维动力学模型，该模型预测的着火延迟期与试验测量的快速烤燃时间吻合较好。

在国内，牛余雷等人[47-48]、陈科全等人[49]基于 Frank-Kamenetskii 等模型建立了炸药烤燃模型，自编程序进行了烤燃数值模拟，研究了不同升温速率、装药尺寸和装药结构情况下炸药的烤燃响应情况。

2.2　使用商业软件烤燃数值模拟

计算机技术的飞速发展，出现了许多商用计算软件，其中使用最广泛的是 ANSYS Fluent。现阶段许多学者都利用 CFD 软件中的用户自定义函数(UDF) 功能，将烤燃外界条件和含能材料烤燃反应条件加载到数值计算中，同时通过软件设置或自定义函数改变计算条件，可以快速研究不同影响因素之间的关系与规律。与烤燃试验相比，数值模拟的成本一般较低，可以更好地评价含能材料的热安全性，并进行风险预判。因此，现阶段大部分学者的烤燃数值模拟均是通过商业软件 ANSYS Fluent 完成，并获得诸多研究结果。

Mcclelland 等[50]针对壳体间存在空气间隙的炸药烤燃装置开展了数值模拟研究。Deng 等人[51]使用零级反应动力学模型数值模拟了慢速加热条下复合 B 炸药（无壳和带壳）的响应特性，并将计算结果与试验结果进行比较，得到了铸件慢速烤燃试验的关键过程和参数，如熔化过程、温度场演变、点火时间、点火温度和点火面积。陈朗等[52]进行炸药烤燃特性研究时发现，炸药相变对烤燃特性的影响很大，且影响程度与加热速率有关。刘静等人[53]为分析模块装药在外界热刺激下的热稳定性，开展了 1.8~7.2 K/h 升温速率下模块装药慢速烤燃特性的研究，结果表明，慢速升温速率对模块装药烤燃响应位置的影响较大。张晓立等人[53]对不同热通量下固黑铝炸药进行了烤燃数值模拟，结果表明，随着热通量的增大，炸药的着火时间逐渐缩短。李旭妍等人[55]分别模拟了烤燃弹的快速烤燃和慢速烤燃过程，研究了烤燃过程中内部各区域温度和热应力的变化情况，得出烤燃弹热反应过程中的热传递规律。寇永锋等人[56]针对含 Al 炸药进行了烤燃数值模拟，结果表明，Al 粉的加入会加快炸药内部的传热速率，缩短其点火时间，降低炸药的热安全性。唐鑫等人[57]对含有导爆药柱的聚奥-9C 装药的引信传爆管进行了快速烤燃试验，并进行了数值模拟，通过 2 种烤燃结果的对比验证，标定了聚奥-9C 炸药的活化能与指前因子。马欣等人[18]针对不同尺寸的 HMX 炸药烤燃弹进行了烤燃试验和数值模拟，通过数值计算获得了 HMX 炸药的反应物、中间产物及其质量浓度的变化情况。

学者们在推进剂热分解和燃烧特性试验研究[58-69]基础上，建立了相关的数值模型[70-71]。Gillard 等人[72]根据 Al/AP/HTPB 推进剂各组分之间的相互作用，建立了新的慢烤过程模型。该模型考虑了推进剂固相和气相中热量和质量的平衡，在每个高氯酸铵颗粒中和 HTPB 粘合剂基质内部都考虑了质量和热传递，并将数值结果与通过热重分析仪进行的质量损失测量进行了比较。这些也为推进剂的热安全性数值研究打下了基础。Kim 等人[73]研究了 AP 基推进剂的点火和起爆特性，建立了 AP/HTPB 和 AP/HTPE 推进剂的热分解模型，在慢速升温条件下对 AP 推进剂进行了热分解数值模拟。Shen[74]使用各种诊断技术检查了改性双基推进剂的慢烤特性，得到了推进剂在逐渐加热和点火期间的化学、物理特性。采用光谱分析研究了改性双基推进剂的初级分解产物，结合热烤试验测量结果可用于改进数值模型。多位学者[48,75,77-79]分别进行了烤燃试验结合数值模拟的炸药烤燃研究，通过数值模拟研究了不同物理界面对炸药烤燃特性的影响、升温速率和装药尺寸对炸药烤燃临界环境温度和响应程度的影响。

国内外的专家学者们[80-90]也对 AP/HTPB 推进剂的燃烧特性进行了数值研究。李文凤等人[91-94]开展了底排装置的快速烤燃特性数值研究，结果表明，外界加热速率的变化对底排药着火位置的影响略小，但对着火延迟期影响较大。宋柳芳等[29]对不同尺寸的 HTPE 推进剂开展了慢速烤燃和快速烤燃试验和数值模拟，分析了烤燃着火时推进剂内部温度的分布情况。与炸药烤燃数值模拟研究不同的是，推进剂烤燃数值模拟研究是在计算机技术相对成熟的时候起步的，因此推进剂烤燃数值模拟研究以二维、三维数值计算为主，且更注重推进剂的工程应用背景，如推进剂作为底排推进装药和固体火箭发动机装药等。叶青等人[95-100]建立了不同热刺激条件下、装填不同推进剂的固体火箭发动机的烤燃数值模型，并开展了小型推进剂烤燃试验进行模型验证，在此基础上进行数值仿真预测固体火箭发动机烤燃着火时间、着火温度和着火响应位置等随外界环境变化的影响规律。

3　结语

根据前文关于烤燃试验的研究进展可以看出，烤燃试验由固定壳体向可变约束壳体演变，能够模拟多种弹药系统的约束条件，同时壳体材料可视化、烤燃试验结果可量化也是烤燃试验重点发展的方向。

目前含能材料烤燃数值模型中的化学反应动力学模型由单步反应向多步反应转变，但含能材料的热安全性问题是涉及到热-化学-机械耦合的复杂问题。因此，含能材料烤燃数值模型的未来发展方向是引入详尽的反应机理，考虑含能材料受热相变过程，充分考虑弹药系统中含能材料的燃烧反应与弹药结构受热、受力形变等特性的关系。

随着计算机技术的发展，采用小型烤燃试验和数

值模拟相结合进行含能材料多种应用环境下的热安全性研究，能够有效降低烤燃试验的危险性，快速研究不同影响因素之间的关系与规律，可以更好地评价含能材料的热安全性，并进行风险预判。

参考文献：

[1] KLAPÖTKE T M, WITKOWSKI T G. Covalent and Ionic Insensitive High-Explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(3): 470-483.

[2] MCKENNEY R L, KRAWIETZ T R. Binary Phase Diagram Series: HMX/RDX[J]. Journal of Energetic Materials, 2003, 21(3): 141-166.

[3] 刘栓虎, 程根旺, 骆广梁. 高能推进剂钝感含能材料研究现状[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2010, 8(2): 5-10.
LIU Shuan-hu, CHENG Gen-wang, LUO Guang-liang. Research Status of Insensitive Energetic Materials Used in High-Energy Propellant[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2010, 8(2): 5-10.

[4] 徐司雨, 赵凤起, 李上文, 等. 几种钝感低特征信号推进剂的能量特性[J]. 含能材料, 2006, 14(6): 416-420.
XU Si-yu, ZHAO Feng-qi, LI Shang-wen, et al. Energy Characteristics of Several Propellants with Insensitive and Minimum Signature Properties[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(6): 416-420.

[5] CHEESE P J, BRIGGS R I, FELLOWS J, et al. Cook-Off Tests on Secondary Explosives[C]//11th International Detonation Symposium. Colorado: [s. n.], 1998.

[6] SANDUSKY H W, CHAMBERS G P. Instrumentation of Slow Cook-Off Events[J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 620(1): 1073-1076.

[7] GARCIA F. Thermal Cook-Off Experiments of the HMX Based High Explosive LX-04 to Characterize Violence with Varying Confinement[C]//AIP Conference Proceedings. Baltimore, Maryland (USA): AIP, 2006.

[8] MADSEN T, BAKER E L, DEFISHER S. Explosive Venting Technology for Cook-Off Response Mitigation[R]. USA: Army Armament Research, Development and Engineering Center, 2010.

[9] HO S Y. Thermomechanical Properties of Rocket Propellants and Correlation with Cookoff Behaviour[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1995, 20(4): 206-214.

[10] CHATURVEDI S, DAVE P N. Solid Propellants: AP/HTPB Composite Propellants[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2019, 12(8): 2061-2068.

[11] KIMURA E, OYUMI Y. Sensitivities of Azide Polymer Propellants in Fast Cook-Off, Card Gap and Bullet Impact Tests[J]. Journal of Energetic Materials, 1997, 15(2-3): 163-178.

[12] DICKSON P M, ASAY B W, HENSON B F, et al. Thermal Cook-Off Response of Confined PBX 9501[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 460(2052): 3447-3455.

[13] COOPER M, ERIKSON W, OLIVER M, et al. Radiant Heating Cook-Off Experiments and Predictive Simulations for Fast Cook-Off[R]. Oak Ridge, Tennessee: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2012.

[14] 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 Xiao-mian, FENG Chang-gen, ZENG Qing-xuan, et al. Study on Design of the Cook-Off Test for Explosives Used in In-Line System[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1998, 18(5): 638-641.

[15] 路桂娥, 江劲勇, 陈明华, 等. 发射药的热自燃实验研究[J]. 火炸药学报, 2000, 23(3): 48-49.
LU Gui-e, JIANG Jin-yong, CHEN Ming-hua, et al. Study on the Heat Self-Ignition Tests of Gun Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000, 23(3): 48-49.

[16] 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 Chang-gen, CHEN Lang. Cook-Off Test of Ammunition[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(4): 37-39.

[17] 冯晓军, 王晓峰, 韩助龙. 炸药装药尺寸对慢速烤燃响应的研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 285-288.
FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng, HAN Zhu-long. The Study of Charging Size Influence on the Response of Explosives in Slow Cook-Off Test[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3): 285-288.

[18] 马欣, 陈朗. HMX 基混合炸药烤燃特性及多步热反应计算[J]. 兵工学报, 2015, 36(S1): 334-342.
MA Xin, CHEN Lang. Research on Cook-Off Characteristics and Multistep Thermal Decomposition Calculation of HMX-Based Explosive[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 334-342.

[19] 孙培培, 南海. 壳体参数对炸药快速烤燃响应的影响[J]. 火工品, 2016(4): 29-31.
SUN Pei-pei, NAN Hai. The Influence of Shell Parameters on Fast Cook-Off Reaction of Explosives[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(4): 29-31.

[20] 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.
WANG Pei, CHEN Lang, FENG Chang-gen. Numerical Simulation of Cook-Off for Explosive at Different Heating Rates[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(1): 46-49.

[21] 周得才, 吕春玲, 李梅, 等. 粒度对硝胺类炸药烤燃热感度的影响[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 442-444.
ZHOU De-cai, LYU Chun-ling, LI Mei, et al. Effect of Particle Size of Nitroamine Explosives on Cook-Off Sensitivity[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 442-444.

[22] 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 Mei, HUANG Yi-min, RAO Guo-ning, et al. Cook-Off Test and Numerical Simulation for Composite Charge at Different Heating Rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 394-400.

[23] 冯晓军, 王晓峰. 装药孔隙率对炸药烤燃响应的影响[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(1): 109-112.
FENG Xiao-jun, WANG Xiao-feng. Influences of Charge Porosity on Cook-Off Response of Explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 109-112.

[24] 智小琦, 胡双启. 炸药装药密度对慢速烤燃响应特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(2): 221-224.
ZHI Xiao-qi, HU Shuang-qi. Influences of Charge Densities on Responses of Explosives to Slow Cook-Off[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 221-224.

[25] 高立龙, 李昆, 陈春燕, 等. 不同铝粉含量黑索今基浇注高聚物黏结炸药的慢速烤燃特性[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(6): 246-250.
GAO Li-long, LI Kun, CHEN Chun-yan, et al. Slow Cook-Off Test Response Characterization of Different Al/Hexogen Ratio Cast Polymer Bonded Explosive[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(6): 246-250.

[26] 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 Chang-gen. Numerical Simulation of Cook-Off about Phase Transition of Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(5): 568-573.

[27] 杨筱, 智小琦. 炸药烤燃特性的隔热层效应研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(35): 198-202.
YANG Xiao, ZHI Xiao-qi. Insulation Effect of Explosive Cook-Off Characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(35): 198-202.

[28] 高峰, 智小琦, 刘学柱, 等. 物理界面对炸药慢速烤燃特性的影响[J]. 火炸药学报, 2014, 37(6): 53-57.
GAO Feng, ZHI Xiao-qi, LIU Xue-zhu, et al. Effect of Physical Interface on Slow Cook-Off Characteristics of Explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(6): 53-57.

[29] 宋柳芳, 李尚文, 王拯, 等. HTPE 推进剂烤燃试验尺寸效应及数值模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(9): 735-742.
SONG Liu-fang, LI Shang-wen, WANG Zheng, et al. Size Effect and Numerical Simulation of Cook-Off Tests for HTPE Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(9): 735-742.

[30] 丁黎, 王琼, 王江宁, 等. 高固含量改性双基推进剂的烤燃试验研究[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(6): 829-832, 837.
DING Li, WANG Qiong, WANG Jiang-ning, et al. Study of Screw Extrusion Modified Double Base (MDB) Propellantwith High Solid Content by Cook-Off Test[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(6): 829-832, 837.

[31] 陈晨, 路桂娥, 江劲勇, 等. GATo-3 推进剂的烤燃实验[J]. 含能材料, 2015, 23(6): 563-567.
CHEN Chen, LU Gui-e, JIANG Jin-yong, et al. Cook-Off Test of GATo-3Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(6): 563-567.

[32] 赵孝彬, 李军, 程立国, 等. 固体推进剂慢速烤燃特性的影响因素研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 669-672.
ZHAO Xiao-bin, LI Jun, CHENG Li-guo, et al. Influence Factors of Slow Cook-Off Characteristic for Solid Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6): 669-672.

[33] TARVER C M, TRAN T D. Thermal Decomposition Models for HMX-Based Plastic Bonded Explosives[J]. Combustion and Flame, 2004, 137(1-2): 50-62.

[34] MERZHANOV A G, ABRAMOV V G. Thermal Explosion of Explosives and Propellants. A Review[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1981, 6(5): 130-148.

[35] JONES D A, PARKER R P. Heat Flow Calculations for the Small-Scale Cookoff Bomb Test[R]. Australia: Materials Research Labs Ascot Vale, 1991.

[36] JONES D A, PARKER R P. Heat Flow Calculations for the Small-Scale Cookoff Bomb Test[R]. US: DTIC, 1991.

[37] SCHMITT R G, BAER T A. Millisecond Burning of Confined Energetic Materials during Cook-Off[R]. NM (United States): SAND97-2668C, 1997.

[38] YOH J J, MCCLELLAND M A, MAIENSCHEIN J L, et al. Towards a Predictive Thermal Explosion Model for Energetic Materials[J]. Journal of Computer-Aided Materials Design, 2005, 10(3): 175-189.

[39] BAER M R, HOBB M L, GROSS R, et al. Cook-Off of Energetic Materials[C]//Proceedings of 11th International Detonation Symposium. Washington, DC: [s. n.], 1998.

[40] HILL L G. Burning Crack Networks and Combustion Bootstrapping in Cookoff Explosions[C]//AIP Conference Proceedings. Baltimore. Maryland (USA): AIP, 2006.

[41] YOH J J I. High-End Modeling and Simulation of Cookoff of HMX-Based Energetic Materials[C]//Computational Science and Its Applications—ICCSA 2006. UK: [s. n.] 2006.

[42] YOH J J, MCCLELLAND M A, MAIENSCHEIN J L, et al. Simulating Thermal Explosion of Cyclotrimethylenetrinitramine-Based Explosives: Model Comparison with Experiment[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(8): 083504.

[43] YOH J J I, MCCLELLAND M A, MAIENSCHEIN J L, et al. Test-Based Thermal Explosion Model for HMX[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2353-2359.

[44] AYDEMIR E, ULAS A. A Numerical Study on the Thermal Initiation of a Confined Explosive in 2-D Geometry[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 396-400.

[45] CHOI S, STEWART D S, YOO S. Modeling of the Quenching of Blast Products from Energetic Materials by

Expansion into Vacuum[J]. Journal of Computational Physics, 2015, 296: 158-183.

[46] GROSS M L, MEREDITH K V, BECKSTEAD M W. Fast Cook-Off Modeling of HMX[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(9): 3307-3315.

[47] 牛余雷, 南海, 冯晓军, 等. RDX 基 PBX 炸药烤燃试验与数值计算[J]. 火炸药学报, 2011, 34(1): 32-36.
NIU Yu-lei, NAN Hai, FENG Xiao-jun, et al. Cook-Off Test and Its Numerical Calculation of RDX-Based PBX Explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(1): 32-36.

[48] 牛余雷, 冯晓军, 郭昕, 等. GHL01 炸药烤燃实验的尺寸效应与数值计算[J]. 火炸药学报, 2014, 37(5): 37-41.
NIU Yu-lei, FENG Xiao-jun, GUO Xin, et al. Size Effect and Numerical Simulation of Cook-Off Test for CHL01 Explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(5): 37-41.

[49] 陈科全, 黄亨建, 路中华, 等. 基于 ABAQUS 的 PBX 炸药烤燃试验数值计算[J]. 火炸药学报, 2014, 37(2): 31-36.
CHEN Ke-quan, HUANG Heng-jian, LU Zhong-hua, et al. Numerical Calculation of Cook-Off Test for PBX Explosive Based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(2): 31-36.

[50] MCCLELLAND M A, MAIENSCHEIN J L, HOWARD W M, et al. ALE3D Simulation of Heating and Violence in a Fast Cook-Off Experiment with LX10[C]// 13th International Detonation Symposium. Norfolk: [s .n.], 2006.

[51] DENG H, SHEN F, LIANG Z F, et al. Numerical Simulation and Experimental Study on Slow Cook-Off Response Characteristics of Composite B[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1507(2): 022014.

[52] 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 Lang, MA Xin, HUANG Yi-min, et al. Multi-Point Temperature Measuring Cook-Off Test and Numerical Simulation of Explosive[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(10): 1230-1236.

[53] 刘静, 余永刚. 不同升温速率下模块装药慢速烤燃特性的数值模拟[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 990-995.
LIU Jing, YU Yong-gang. Simulation of Slow Cook-Off for Modular Charges at Different Heating Rates[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(5): 990-995.

[54] 张晓立, 洪滔, 王金相, 等. 不同热通量下炸药烤燃的数值模拟[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 436-441.
ZHANG Xiao-li, HONG Tao, WANG Jin-xiang, et al. Numerical Simulation of Cook-Off for Explosive at Different Heat Fluxs[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 436-441.

[55] 李旭妍, 张磊, 吴其洲, 等. 烤燃试验温度压力数值模拟技术研究[J]. 测试技术学报, 2020, 34(3): 233-237.
LI Xu-yan, ZHANG Lei, WU Qi-zhou, et al. Study on Numerical Simulation Technology of Temperature and Pressure Measurement for Cook-Off Test[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(3): 233-237.

[56] 寇永锋, 陈朗, 马欣, 等. 黑索今基含铝炸药烤燃实验和数值模拟[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 978-989.
KOU Yong-feng, CHEN Lang, MA Xin, et al. Cook-Off Experimental and Numerical Simulation of RDX-Based Aluminized Explosives[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(5): 978-989.

[57] 唐鑫, 袁俊明, 刘玉存, 等. 聚奥-9C 装药的引信传爆管快速烤燃实验及数值模拟[J]. 装甲兵工程学院学报, 2017, 31(1): 61-65.
TANG Xin, YUAN Jun-ming, LIU Yu-cun, et al. Fast Cook-Off Test and Numerical Simulation of JO-9C Charge of Fuse Booster[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2017, 31(1): 61-65.

[58] KAZAKOV A I, DASHKO D V, NABATOVA A V, et al. Thermochemical and Energy Characteristics of DNTF and DNFF[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2018, 54(2): 147-157.

[59] XUE Xiao-chun, YU Yong-gang, YE Rui. Unsteady Chemical Kinetics Behavior of AP/HTPB Propellant with Micro-Scale Model[J]. Combustion Science and Technology, 2018, 190(12): 2164-2187.

[60] PANG Wei-qiang, LI Jun-qiang, WANG Ke, et al. Effects of Dihydroxylammonium 5,5'-Bistetrazole-1,1'-Diolate on the Properties of HTPB Based Composite Solid Propellant[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2018, 43(10): 1013-1022.

[61] PANG Wei-qiang, DELUCA L T, FAN Xue-zhong, et al. Combustion Behavior of AP/HTPB/Al Composite Propellant Containing Hydroborate Iron Compound[J]. Combustion and Flame, 2020, 220: 157-167.

[62] KAKADE S D, NAVALE S B, NARSIMHAN V L. Studies on Interface Properties of Propellant Liner for Case-Bonded Composite Propellants[J]. Journal of Energetic Materials, 2003, 21(2): 73-85.

[63] YAN Qi-long, ZHAO Feng-qi, KUO K K, et al. Catalytic Effects of Nano Additives on Decomposition and Combustion of RDX-, HMX-, and AP-Based Energetic Compositions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, 57: 75-136.

[64] LIU Lei-li, LI Feng-sheng, TAN Ling-hua, et al. Effects of Nanometer Ni, Cu, Al and NiCu Powders on the Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2004, 29(1): 34-38.

[65] 刘子如, 阴翠梅, 孔扬辉, 等. 高氯酸铵的热分解[J]. 含能材料, 2000, 8(2): 75-79.
LIU Zi-ru, YIN Cui-mei, KONG Yang-hui, et al. The Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate[J]. Energetic Materials, 2000, 8(2): 75-79.

[66] 刘磊力, 李凤生, 杨毅, 等. 纳米金属和复合金属粉对 AP/HTPB 推进剂热分解的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(5): 458-461.
LIU Lei-li, LI Feng-sheng, YANG Yi, et al. Effect of Metal and Composite Metal Nanopowders on the Thermal

Decomposition of HTPB Propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(5): 458-461.

[67] LI Jun-qiang, LIU Lin-lin, FU Xiao-long, et al. Transformation of Combustion Nanocatalysts Inside Solid Rocket Motor under Various Pressures[J]. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 2019, 9(3): 381.

[68] CARO R I, BELLERBY J M. Behavior of hydroxyl-Terminated Polyether (HTPE) Composite Rocket Propellants in Slow Cook-Off[J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2008, 7(3): 171-185.

[69] 蒋秋黎, 罗一鸣, 杨斐, 等. 铅、铜盐催化剂对 DNTF 炸药热分解及烤燃响应特性的影响[J]. 含能材料, 2020, 28(5): 470-474.
JIANG Qiu-li, LUO Yi-ming, YANG Fei, et al. Influence of Lead and Copper Salt Catalysts on the Thermal Decomposition and Cook-Off Responses of DNTF[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(5): 470-474.

[70] BRILL T B, REN W Z, YANG V. Flash Pyrolysis of Ammonium Perchlorate-Hydroxyl-Terminated-Polybutadiene Mixtures Including Selected Additives[J]. Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics, 2000, 185: 3-32.

[71] LONGUET B, GILLARD P. Experimental Investigation on the Heterogeneous Kinetic Process of the Low Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate Particles[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2009, 34(1): 59-71.

[72] GILLARD P, LONGUET B. Investigation of Heat Transfer and Heterogeneous Reactions during the Slow Cook Off of a Composite Propellant[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 1506-1514.

[73] KIM K H, KIM C K, YOO J C, et al. Test-Based Thermal Decomposition Simulation of AP/HTPB and AP/HTPE Propellants[J]. Journal of Propulsion and Power, 2011, 27(4): 822-827.

[74] SHEN J D. Examination of the Small Scale Slow Cookoff Behavior of a Cast Modified Double Base Propellant[D]. Chicago: University of Illinois, 2015

[75] 沈飞, 屈可朋, 王胜强, 等. 慢烤过程中热应力对 HMX 基含铝炸药装药响应特性的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(10): 869-874.
SHEN Fei, QU Ke-peng, WANG Sheng-qiang, et al. Effect of Thermal Stress on the Response Characteristics of HMX Based Aluminized Explosive Charge in Slow Cook-Off Test[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(10): 869-874.

[76] 冯晓军, 田轩, 赵娟, 等. DNTF 基炸药燃烧转爆轰影响因素实验研究[J]. 含能材料, 2018, 26(3): 255-259.
FENG Xiao-jun, TIAN Xuan, ZHAO Juan, et al. Experiment Study on the Influence Factors of the Deflagration to Detonation Transition for DNTF-Based Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(3): 255-259.

[77] 王洪伟, 智小琦, 刘学柱, 等. 限定条件下聚黑炸药烤燃试验及热起爆临界温度的数值计算[J]. 火炸药学报, 2016, 39(1): 70-74.
WANG Hong-wei, ZHI Xiao-qi, LIU Xue-zhu, et al. Cook-Off Experiments and Numerical Calculation on Thermal Initiation Critical Temperature of JH Explosive under Defined Condition[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1): 70-74.

[78] 王洪伟, 智小琦, 郝春杰, 等. 升温速率对限定条件下烤燃弹热起爆临界温度的影响[J]. 含能材料, 2016, 24(4): 380-385.
WANG Hong-wei, ZHI Xiao-qi, HAO Chun-jie, et al. Effect of Heating Rate on the Critical Temperature of Thermal Initiation of Cook-Off Bomb in Defined Conditions[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(4): 380-385.

[79] XIAO Li-qun, FAN Xue-zhong, LI Ji-zhen, et al. Effect of Al Content and Particle Size on the Combustion of HMX-CMDB Propellant[J]. Combustion and Flame, 2020, 214: 80-89.

[80] ISERT S, CONNELL T L, RISHA G A, et al. Near-Surface Flame Structure Characterization of Simplified Ammonium Perchlorate/Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Compositions[J]. Combustion and Flame, 2016, 164: 201-211.

[81] GADUPARTHI T, PANDEY M, CHAKRAVARTHY S R. Gas Phase Flame Structure of Solid Propellant Sandwiches with Different Reaction Mechanisms[J]. Combustion and Flame, 2016, 164: 10-21.

[82] 马龙泽, 余永刚. AP/HTPB 推进剂微尺度燃烧特性的数值分析[J]. 含能材料, 2017, 25(3): 178-183.
MA Long-ze, YU Yong-gang. Numerical Simulation of Micro-Scale Combustion Characteristics of AP/HTPB Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(3): 178-183.

[83] ZHANG Ling-ke, TIAN Ru-yuan, ZHANG Zhu-wei. Burning Rate of AP/HTPB Base-Bleed Composite Propellant under Free Ambient Pressure[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 62: 31-35.

[84] 李鹤群, 安崇伟, 杜梦远, 等. 基于 Kissinger 方法的 3,4-双(4-硝基呋咱-3-基)氧化呋咱的热分解反应动力学参数和热稳定性研究[J]. 火炸药学报, 2016, 39(3): 58-60.
LI He-qun, AN Chong-wei, DU Meng-yuan, et al. Study on Kinetic Parameters of Thermal Decomposition Reaction and Thermal Stability of 3,4-Bis (3-Nitrofurazan-4-Yl) Furoxan Based on Kissinger Method[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(3): 58-60.

[85] KOROTKIKH A G, GLOTOV O G, ARKHIPOV V A, et al. Effect of Iron and Boron Ultrafine Powders on Combustion of Aluminized Solid Propellants[J]. Combustion and Flame, 2017, 178: 195-204.

[86] PERUMAL R, NAGENDRA K, RAMAKRISHNA P A.

Effect of Ageing on Combustion of Ammonium Perchlorate with Copper Chromite Additive[J]. Combustion and Flame, 2020, 212: 352-354.

[87] NAGENDRA K, VIJAY C, INGOLE M, et al. Combustion of Ammonium Perchlorate Monopropellant: Role of Heat Loss[J]. Combustion and Flame, 2019, 209: 363-375.

[88] KUMAR N, Y R A, P A R. Extinction of AP Monopropellant by Rapid Depressurization: Computational and Experimental Studies[J]. Combustion and Flame, 2017, 184: 90-100.

[89] 单自兴, 绳利丽, 杨荣杰. 二十面体多硼氢 $B_{12}H_{12}^{2-}$阴离子化合物及其在火炸药中的应用研究进展[J]. 火炸药学报, 2017, 40(3): 1-16.
SHAN Zi-xing, SHENG Li-li, YANG Rong-jie. Research Progress of Icosahedronal Polyhydroborate $B_{12}H_{12}^{2-}$ Anion Compounds and Their Application in Propellants and Explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(3): 1-16.

[90] WENG Xin-yan, TANG Cheng-long, LI Jian-ling, et al. Coulomb Explosion and Ultra-Fast Hypergolic Ignition of Borohydride-Rich Ionic Liquids with WFNA[J]. Combustion and Flame, 2018, 194: 464-471.

[91] 李文凤, 余永刚, 叶锐. 底排药快速烤燃特性的数值模拟[J]. 含能材料, 2016, 24(10): 941-946.
LI Wen-feng, YU Yong-gang, YE Rui. Numerical Simulation of Fast Cook-Off Characteristics for Base Bleeding Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(10): 941-946.

[92] 李文凤, 余永刚, 叶锐. 装药尺寸对高氯酸铵/端羟基聚丁二烯底排药烤燃特性的影响[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1532-1540.
LI Wen-feng, YU Yong-gang, YE Rui. Effect of Charge Size on Cook-Off Characteristics of AP/HTPB Base Bleed Propellant[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(8): 1532-1540.

[93] 李文凤, 余永刚, 叶锐, 等. 不同升温速率下 AP/HTPB 底排装置慢速烤燃的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 46-52.
LI Wen-feng, YU Yong-gang, YE Rui, et al. Simulation of Cook-Off for AP/HTPB Composition Propellant in Base Bleed Unit at Different Heating Rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 46-52.

[94] LI Wen-feng, YU Yong-gang, YE Rui, et al. Three-Dimensional Simulation of Base Bleed Unit with AP/HTPB Propellant in Fast Cook-Off Conditions[J]. Journal of Energetic Materials, 2017, 35(3): 265-275.

[95] YE Qing, YU Yong-gang, LI Wen-feng. Study on Cook-Off Behavior of HTPE Propellant in Solid Rocket Motor[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167: 114798.

[96] YE Qing, YU Yong-gang. Numerical Analysis of Cook-Off Behavior of Cluster Tubular Double-Based Propellant[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 115972.

[97] YE Qing, YU Yong-gang. Numerical Simulation of Cook-Off Characteristics for AP/HTPB[J]. Defence Technology, 2018, 14(5): 451-456.

[98] 叶青, 余永刚. 星型装药固体火箭发动机烤燃特性[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 1970-1978.
YE Qing, YU Yong-gang. Cook-Off Characteristics of Solid Rocket Motor with Star-Configuration Propellant Charge[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(10): 1970-1978.

[99] 叶青, 余永刚. 考虑自然对流的某固体火箭发动机慢速烤燃特性数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 3-12.
YE Qing, YU Yong-gang. Numerical Analysis of Slow Cook-Off Characteristics for Solid Rocket Motor with Natural Convection[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 3-12.

[100] 叶青, 余永刚. 大尺寸固体火箭发动机快速烤燃特性的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 621-626.
YE Qing, YU Yong-gang. Numerical Simulation of Fast Cook-Off Characteristics for a Large Scale Solid Rocket Motor[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(6): 621-626.