

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.003

基于外隔热法的固发烤燃安全性综述

夏 成¹, 董可海¹, 赖帅光¹, 陈思彤¹, 王成林²

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264000; 2. 中国人民解放军 92154 部队, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对海军固体战术战役导弹高能推进剂在突发性火灾等情况带来的安全性问题, 对隔热涂料包括合成树脂以及气凝胶涂料进行探讨。分别对环氧树脂材料、聚氨酯材料和气凝胶材料进行介绍, 总结慢速和快速烤燃实验的研究进展, 对烤燃实验的数值模拟仿真进行分析, 并对未来可用于固体发动机防火隔热的涂料进行展望。该研究对未来该领域的科研生产具有一定的指导意义。

关键词: 固体发动机; 合成树脂涂料; 气凝胶涂料; 烤燃实验; 烤燃数值模拟

中图分类号: TJ76.4 **文献标志码:** A

Safety Survey of Solid Rocket Cook-off Based on External Heat Insulation Method

Xia Cheng¹, Dong Kehai¹, Lai Shuaiguang¹, Chen Sitong¹, Wang Chenglin²

(1. Navy Aviation University, Yantai 264000, China; 2. No. 92154 Unit of PLA, Yantai 264001, China)

Abstract: In view of the safe problem of navy solid campaign missile high energy propellant when there is sudden fire, discuss heat insulation material including synthetic resin coating and aerogel coating. Separately introduce the epoxy resin material, polyurethane material and aerogel material, summarize the research progress of slow speed and fast speed cook-off test, analyze digital simulation of cut-off test, and look forward to the future coatings that can be used for solid engine fire and heat insulation. This research has certain guiding significance for future scientific research and production in this field.

Keywords: solid rocket; synthetic resin coating; aerogel coating; cook-off test; numerical simulation of cook-off test

0 引言

随着海军航母等战舰的列装, 各型导弹随舰战斗值班也日常化和常态化。固体火箭发动机组分为高能推进剂, 在舰战斗值班期间安全性问题凸显。由于导弹在舰上贮存时间长、环境较为恶劣, 不仅要受多种气候环境影响, 而且要考虑如舰上发生火灾, 固体发动机受其影响下的安全性^[1]。若发动机外层有相应的防火和隔热性能, 以延缓推进剂等火工品的反应和点火速度, 则可为现场抢救、人员脱险争取宝贵的时间。目前, 国内用于固发暴露于异常加热环境的隔热涂料研究较少, 如果没有好的隔热涂层, 固体发动机外防热环节就有可能成为导弹随舰战斗值班的重大安全隐患。

笔者对隔热涂料包括合成树脂以及气凝胶涂料进行综述, 总结了烤燃实验以及基于烤燃实验的数值模拟仿真的相关研究进展, 并对未来可用于固体发动机防火隔热的涂料进行展望。

1 隔热涂料研究进展

高温隔热涂料大部分是以高聚物为基体, 加入

填料、助剂分散而成的。其中, 以合成树脂为主要成膜物质的涂料, 称为合成树脂材料。基体树脂对涂料性能起主导作用, 基体树脂的选用将直接影响防热涂料耐热等级、粘接强度等性能^[2]。常用于防热涂料的基体树脂见表 1。

表 1 隔热涂料常用树脂

树脂品种	性能特点
改性环氧树脂	机械、粘接、耐热和耐烧蚀性能优良, 固化温度范围广
改性聚氨酯树脂	伸长率高, 韧性较好, 耐环境老化, 可室温固化
酚醛树脂	成碳率高, 耐高温性和耐烧蚀性能良好, 高温固化
芳基乙炔聚合物	碳化物结构密实, 热失重较少

酚醛树脂和芳基乙炔聚合物制成的涂料虽碳化率高、热导率低、比热容大、隔热性好, 但高温剪切强度低, 抗高速气流冲刷能力较差。

根据导弹随舰战斗值班的环境和使用限制, 环氧树脂涂料和聚氨酯涂料更符合要求。笔者主要对环氧树脂涂料和聚氨酯涂料的相关性能进行了总结概述。

收稿日期: 2020-08-02; 修回日期: 2020-09-30

项目基金: 武器装备预先研究基金项目(51328050101)

作者简介: 夏 成(1995—), 男, 山东人, 硕士, 从事航空装备综合保障工程研究。E-mail: 986574686@qq.com。

1.1 环氧树脂涂料研究进展

环氧树脂(epoxy-resin)是一种集电绝缘、耐化学药品、耐高温、耐磨和低收缩率、高黏合性能于一体的树脂材料^[3],易加工成型,且成本低,在材料领域有着广泛应用。

Toldy 等^[4]比较了含磷活性胺作为交联剂和阻燃剂在脂肪族和芳香族环氧树脂体系中的适用性。为了满足飞机和航空航天应用对机械性能的强烈要求,制备了碳纤维增强复合材料。改善了环氧树脂的阻燃性能和力学性能。

日本 Fischer 等^[5-6]研究表明:通过修改更耐热的结构的环氧树脂,实现阻燃功能,同时采用新型环氧树脂和改性含氮芳烃型核反应物,不仅具有阻燃性,而且具有良好的机械性能等。Kiuchi 等^[7]通过使用苯二甲基加入环氧树脂中,相对弹性和热稳定性好,在火焰中表面形成良好的泡沫炭,具有较好的阻燃性。

Hsiue 等^[8]在通过原位溶胶-凝胶法制得了含磷环氧基环氧-二氧化硅复合材料。研究表明,混合环氧树脂的玻璃化转变温度随 SiO₂ 含量的增加而升高。纳米级二氧化硅对环氧树脂的阻燃性能有增强作用。磷-硅对极限氧指数(limiting oxygen index)有增强作用,LOI 值为 44.5%。

L P Gao 等^[9]以 DODPP 为单体,合成了 EP, LOI 值为 30.2%;固化环氧树脂的玻璃化转变温度随磷含量的增加而降低;随着磷含量的增加,开始分解温度和最大分解速率温度降低,而炭产量增加。

S Wang 等^[10]合成了高性能阻燃环氧树脂,固化后,膨胀和致密炭形成能力突出,表现出优异的阻燃性,LOI 值高达 32.8%,固化后的环氧树脂的 T_{gs} 值非常高,为 214 °C,抗拉强度为 80.3 MPa,抗拉模量为 2 709 MPa。

S Yang 等^[11]研究了共聚二缩水甘油酯阻燃环氧树脂体系以及固化环氧树脂的热、阻燃性能。改性后的环氧树脂在 197~205 °C 的玻璃化转变温度内变化不大,且具有良好的阻燃性能。

1.2 聚氨酯涂料研究进展

聚氨酯材料是指分子结构中含有氨基甲酸酯基团(-NH-COO-)的聚合物。聚氨酯在 20 世纪 30 年代由德国化学家 O Bayer^[12]发明,由于其配方灵活、产品形式多样、制品性能优良,在各行各业中的应用越来越广泛。国内外学者专家也对其进行了多方面的研究。

H Yeganeh 等^[13]以甘油封端聚氨酯预聚体(glycerin terminated polyurethane prepolymer)和封闭的异氰酸酯固化剂(isocyanate curing agent)为原料,制备了新型聚氨酯隔热材料。

Y C Li 等^[14]将防火材料 MMT 与层状双氢氧化物(layered dihydroxides)进行交换,在聚氨酯柔性泡沫上产生了更有效的防火涂层,制备了耐燃和极低热释放率的聚氨酯泡沫。最好的涂层(最大可燃性降低与最少涂层)提供了减少 41% 的峰值热释放率。

P Salazar-Bravo 等^[15]制成了 ZnO/水性聚氨酯复合材料。ZnO 颗粒的形貌随温度变化而改变,ZnO 粉末可以增强涂层的抗紫外线的性能,聚合过程中,加入 6 wt pct ZnO 颗粒(673 K),力学性能由(79.2±4) MPa 提高到(165.5±0.1) MPa。

R Jinchuang 等^[16]以 ATO 为隔热填料,水性聚氨酯为成膜材料,制备了 ATO/PU 隔热材料。结果显示:当 pH=9,ATO 含量为 3%,涂层厚度为 100 μm 时,可见光的透过率是 70%,红外阻挡率高达 60%,温度差约 4.3 °C,有明显隔热性能。

1.3 气凝胶涂料研究进展

自 1931 年,美国斯坦福大学的 S.S.Kistler^[17]以水玻璃为硅源,HCl 做催化剂,通过溶胶-凝胶过程和超临界干燥工艺制备出气凝胶开始,国内外就气凝胶各方面性能和应用展开了火热研究。

SiO₂ 气凝胶独特的纳米孔结构纳米以及 3 维网状结构不仅破坏了基质的热量传导路径,而且限制了空气分子的自由流动,抑制了空气的对流传导,无限多的孔壁形成了热辐射的反射面和折射面,具有“无穷隔热板效应”^[18],最大限度地抑制了辐射导热;因此,将具有优异隔热性能的 SiO₂ 气凝胶用于隔热材料中会提升涂膜的隔热效果。

SiO₂ 气凝胶本身透光性好,2003 年 G S Kim 等^[19]在透明玻璃上涂覆了 SiO₂ 气凝胶隔热涂层,其透光率达到 90%,当涂层厚度为 100 μm 时,其导热系数可低至 0.2 W/(m·K),是未涂对比的 1/10。

S Yoon 等^[20]制备了 YSZ 气凝胶。在高温燃气轮机表面作为热障涂层,成功地证实了其隔热的功能。YSZ 气凝胶在 25~1 000 °C 内的热导率测量值为 0.168~0.212 W/(m·K)。SEM 证实,气凝胶的多孔结构在高温环境下仍然保持良好,显示出良好的热稳定性。

C Q Hong 等^[21]用冷冻干燥法制备的多孔 ZrO₂ 陶瓷浸渍在 SiO₂ 湿溶胶中,成功制备出 ZrO₂/SiO₂

气凝胶。所得复合气凝胶抗压强度达到 36.8 MPa, 热导率为 0.041~0.098 W/(m·K), 孔隙率为 69.8%。

J Yang 等^[22]利用一步前驱体—气凝胶转换法合成的掺杂 SiO₂ 的 Al²O₃ 气凝胶含有莫来石成分, 可耐 1 200 °C 高温, 有效抑制了氧化铝的晶型转变, 1 000 °C 时比表面积为 311 m²/g, 而 1 200 °C 时为 146 m²/g。

孙登科等^[23]通过掺杂 TiO₂ 遮光剂成功制备出 SiO₂ 气凝胶耐高温材料。经验证当 TiO₂ 掺杂的质量分数为 10% 时, 隔热效果最佳。

J Koravos 等^[24]通过实验测试气凝胶涂层的防火性能, 测得在基材温度分别为 160 与 200 °C 时, 1 mm 厚的气凝胶涂层比陶瓷涂层的接触温度分别多降低了 14 和 18 °C, 并且测得其热阻是相同厚度陶瓷涂层的 6~11 倍。

1.4 小结

以上文献中体现出合成树脂材料和气凝胶材料都具有很好的隔热防火性能, 通过红外光谱和核磁共振氢谱试验对其化学结构进行表征, 采用差示扫描量热法 (differential scanning calorimetry)、热重分析 (thermogravimetric analysis)、极限氧指数 (LOI) 测定、UL94 试验和锥形量热仪对其进行热、阻燃性能的相关性能研究, 可为以后作为防火隔热材料应用到固体发动机外隔热提供参考依据。

2 烤燃实验研究进展

烤燃实验 (cook-off test) 是研究和评价弹药和含能材料在生产、使用、运输及贮存等复杂环境下热安全性的一种常用方法^[25], 根据实验结果可以对武器弹药的设计、使用和贮存条件提供参考。通常情况下, 烤燃实验分为慢烤燃 (slowcook-off) 和快烤燃 (fastcook-off) 2 类^[26]。慢烤实验主要是应对于模拟隔壁弹库着火导致温度上升受烘烤的情况, 而快速烤燃则是模拟发动机存放弹库着火发动机处于火焰中的情况。

2.1 慢速烤燃实验研究进展

T D Hedman 等^[27]研究了复合固体推进剂 (hydroxyl-terminated polybutadiene) 在慢烤过程中的反应。采用差示扫描量热法 (DSC) 和 TGA 测定了反应动力学特性, 研究了在 3.3 °C/h 的升温速率下的反应, 并且基于实验观察, 推导了 2 种启发式反应模型。

陈中娥等^[28]对比分析了高能推进剂 (nitrate

plasticized polyether) 和 HTPB 推进剂的热分解特性与慢速烤燃行为的关系。结果表明: 高氯酸铵 (ammonium perchlorate) 热分解后形成的多孔洞是导致 HTPB 推进剂慢速烤燃响应剧烈的主要原因; 硝酸酯在温度较低时放出热量, 使得 NEPE 推进剂在高氯酸铵 (AP)、奥克托今 (HMX) 分解反应前点火, 慢速烤燃响应较为温和。

赵孝彬等^[29]研究了 HTPE 固体推进剂慢速烤燃特性的影响因素。HTPE 推进剂慢速烤燃特性较为温和, HMX 加入量为 10% 时使其慢速烤燃的响应程度增加, 燃速从 10.1 mm/s 增加到 32.2 mm/s, 升温速率从 3.3 °C/h 增加到 1 °C/min。

张晋元^[30]研究了壳体厚度对 RDX 传爆药慢速烤燃响应特性的影响。随着壳体厚度的增加, 炸药的热爆炸延滞期增长; 热敏感程度降低, 热安定性也相应提高; 烤燃反应的剧烈程度减小。

2.2 快速烤燃实验研究进展

张旭等^[31]根据三氨基三硝基苯 (TATB) 基高聚物黏结炸药异常环境安全性特点, 采用固体推进剂作为燃料进行了 2 mm 厚约束钢壳的 TATB 基高聚物黏结炸药快速烤燃小尺寸实验。

李亮亮等^[32-33]设计了不同密封条、不同外壳涂层及包覆层导热系数的烤燃弹结构, 并研究了 HMX 基 Al 炸药 (HAE) 装药对液体燃料外部燃烧条件的反应。高分子复合涂层单独使用时可有效延长炸药装药的响应参数, 烤燃弹的破膜时间和耐烤燃时间分别较对比配方延迟 1.17 和 2.81 min。

X Dai 等^[34]通过加强约束对不同粒度的 PBX-2 炸药进行快速烤燃实验, 分析不同粒度的 PBX-2 炸药的燃烧规律。结果表明: 在相同厚度的壳下, 有限的限制条件下, 粒度越小, PBX-2 炸药的反应越剧烈。

孙培培等^[35]通过快速烤燃实验方案, 研究了壳体厚度对 TNT 炸药装药响应的影响。壳体厚度在 2~6 mm 变化时, TNT 炸药均为爆炸反应等级; 随着壳体厚度变大, 提高了 TNT 炸药的对外做功能力; 随着环境压力的提高, 反应释放热量增大, TNT 分解量增大。

2.3 小结

烤燃实验是研究和评估含能材料热安全性的常用方法, 其中, 慢烤的研究主要是通过控制影响炸药热起爆反应的因素 (温升速率和约束条件), 利用一系列测试方法, 获得有关的动力学参数, 如活化

能、指前因子、生成热等,并用这些参数有效预测炸药对热刺激的响应。而快烤主要评估的是炸药在受到外部火烧时的反应程度。快速烤燃特点有 3 点: 炸药反应程度的影响因素; 快速烤燃过程中温度梯度; 反应发生在约束壳体与炸药界面之间。这 3 点决定了含能材料是否发生爆炸或者爆轰。但目前的烤燃实验重点都在于研究药柱的相关反应特性,忽略怎样可以使发动机的烤燃特性趋于安全符合实验标准; 因此,对于烤燃实验可以在外绝热改善烤燃特性方面进行研究。

目前的烤燃实验研究中,主要是研究推进剂在烤燃实验中的反应情况,而很少有研究隔热涂层对烤燃实验的影响; 因此,可以在后面的研究中往此类方向发展。

3 基于烤燃实验的仿真模拟研究进展

目前针对固体推进剂热安全性烤燃实验的研究主要利用小尺寸实验弹开展,然而,各种小型烤燃实验所得响应结果不仅难以全面、准确地反映固体发动机的热安全特性^[36],而且难以实现重复性实验。为此,考虑到可用烤燃实验的数值模拟来分析实验无法观测到的反应细节,减少实验次数,缩短研制周期,降低成本。

Ki-hong Kim 等^[37]对暴露在非预期热环境(火灾或异常燃烧)下的 AP/HTPB 和 AP/HTPE 推进剂进行了研究。基于 BDP 的 3 种 AP 的固体推进剂的烤燃模型,进行了 1 维和 2 维的模拟实验,结果表明模型的计算结果与实验结果基本一致。该模型可用于基于 AP 的其他类型固体火箭发动机的安全性评估。

H Yang 等^[38]研究了 AP-HTPB 复合推进剂的热安全性,针对某固体火箭发动机建立了 2 维烤燃简化模型。在 3 种升温速率(1.8、3.6 和 7.2 K/h)下,AP/HTPB 推进剂的初始着火点均发生在药柱内壁纵向 1 mm 肉厚环形区域内,且随着升温速率的增大,初始着火点由中心区向药柱壳体端面移动。当加热速率从 1.8 K/h 到 7.2 K/h,点火延迟时间从 31.48 h 缩短到 14.87 h。

H W Yang 等^[39]对固体火箭发动机在不同热通量下的点火性能进行了数值预测。结果表明,AP/HTPB 推进剂的初始点火位置出现在喷管附近推进剂外壁的环形区域。随着热通量的增大,推进剂的点火延迟时间明显缩短,喷管附近点火时的点火温度和壳体温度逐渐升高。

H YANG 等^[40]研究了固体火箭发动机在非预期火焰环境下的热安全问题,以复合固体推进剂 AP/HTPB 为加载对象,建立了小型固体火箭发动机点火的 2 维模型。复合固体推进剂中 AP 组分的分解温度随着火焰温度的升高而升高。

4 结束语

综上所述: 国内外已对合成树脂与气凝胶防火隔热材料的性能开展了研究,对包括慢烤和快烤的烤燃实验以及基于烤燃实验的数值模拟进行了相关研究,但是对于防火隔热材料应用到固体发动机意外暴露于非正常受热方面的研究较为缺乏; 因此,未来可以针对于防火隔热材料应用在固体发动机外隔热可行性进行研究,将烤燃实验进一步优化,加上国内外的数值模拟平台软件的仿真研究,对于导弹热安全性研究方面有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 杨长胜,周圣林. 机载导弹在航空母舰上使用问题研究[J]. 战术导弹技术, 2017(6): 21-24.
- [2] 李琳,朱小飞,杨科,等. 国内外战术导弹外防护涂层技术现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(14): 47-51.
- [3] 赵洪涛,陈国华,田明伟,等. 功能性环氧树脂复合材料研究进展[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2018(3): 2.
- [4] TOLDY A, SZOLNOKI B, MAROSI G. Flame retardancy of fibre-reinforced epoxy resin composites for aerospace applications[J]. Polymer degradation and stability, 2011, 96(3): 371-376.
- [5] FISCHER T, TAKEDA Y, DESAI N, et al. Characterization of Environment-Friendly Halogen-Free Materials for Radio-Frequency Electronics Use[C]. proceedings of the IPC Printed Circuits Expo, F, 2003.
- [6] TAKEDA Y, IKEDA K, TAKANO N, et al. Environment-Friendly Halogen-Free Materials for PCBs[J]. Paper at IPC Printed Circuit EXPO, 2001, 2001(S11-14).
- [7] KIUCHI Y, IJI M. Environmentally conscious IC molding compound without toxic flame-retardants[C]. proceedings of the Proceedings of ISSM2000 Ninth International Symposium on Semiconductor Manufacturing (IEEE Cat No 00CH37130), F, 2000. IEEE.
- [8] HSIUE G H, LIU Y L, LIAO H H. Flame-retardant epoxy resins: An approach from organic-inorganic hybrid nanocomposites[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2001, 39(7): 986-996.
- [9] GAO L P, WANG D Y, WANG Y Z, et al. A flame-retardant epoxy resin based on a reactive phosphorus-containing monomer of DODPP and its thermal and flame-retardant properties[J]. Polymer Degradation and stability, 2008, 93(7): 1308-1315.

- [10] WANG S, MA S, XU C, et al. Vanillin-derived high-performance flame retardant epoxy resins: facile synthesis and properties[J]. *Macromolecules*, 2017, 50(5): 1892-1901.
- [11] YANG S, WANG J, HUO S, et al. Preparation and flame retardancy of an intumescent flame-retardant epoxy resin system constructed by multiple flame-retardant compositions containing phosphorus and nitrogen heterocycle[J]. *Polymer degradation and stability*, 2015, 11: 251-259.
- [12] BAYER O, SIEFKEN W, RINKE H, et al. A process for the production of polyurethanes and polyureas[Z]. German Patent DRP, 1937: 728981.
- [13] YEGANEH H, SHAMEKHI M A. Preparation and properties of novel polyurethane insulating coatings based on glycerin-terminated urethane prepolymers and blocked isocyanate[J]. *Polymer international*, 2005, 54(5): 754-763.
- [14] LI Y C, YANG Y H, SHIELDS J R, et al. Layered double hydroxide-based fire resistant coatings for flexible polyurethane foam[J]. *Polymer*, 2015, 56: 84-292.
- [15] SALAZAR-BRAVO P, DEL ANGEL-LÓPEZ D, TORRES-HUERTA A, et al. Investigation of ZnO/Waterborne Polyurethane Hybrid Coatings for Corrosion Protection of AISI 1018 Carbon Steel Substrates[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(10): 4798-4813.
- [16] JINCHUANG R, PING W, ZHE W, et al. Study on the preparation and properties of ATO/PU transparent heat-insulation coating[J]. *Modern Salt and Chemical Industry*, 2018(1): 14.
- [17] KISTLER S S. Coherent expanded aerogels and jellies[J]. *Nature*, 1931, 127(3211): 741.
- [18] WU H J, FAN J T, DU N. Porous materials with thin interlayers for optimal thermal insulation[J]. *international Journal of Nonlinear sciences and Numerical simulation*, 2009, 10(3): 291-300.
- [19] KIM G S, HYUN S H. Synthesis of window glazing coated with silica aerogel films via ambient drying[J]. *Journal of non-crystalline solids*, 2003, 320(1/3): 125-132.
- [20] YOON S, HAN G D, JANG D Y, et al. Fabrication of yttria-stabilized zirconia aerogel for high-performance thermal barrier coating[Z]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019: 806.
- [21] HONG C Q, HAN J C, ZHANG X H, et al. Novel nanoporous silica aerogel impregnated highly porous ceramics with low thermal conductivity and enhanced mechanical properties[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(8).
- [22] YANG J, WANG Q, WANG T, et al. Facile one-step precursor-to-aerogel synthesis of silica-doped alumina aerogels with high specific surface area at elevated temperatures[J]. *Journal of Porous Materials*, 2017, 24(4): 889-897.
- [23] 孙登科, 杨兵兵. TiO₂ 掺杂硅气凝胶的制备及性能研究[J]. *铸造技术*, 2015, 36(6): 1525-1527.
- [24] KORAVOS J, NORWOOD C, PESCATORE P, et al. Aerogel insulative coatings: new coating technology offers personnel protection[Z]. *Paint Coat Ind*, 2013: 48-50.
- [25] 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.
- [26] KANESHIGE M J, RENLUND A M, SCHMITT R G, et al. Cook-off experiments for model validation at Sandia National Laboratories[Z]. Albuquerque, NM, 2002: 87185.
- [27] HEDMAN T D, GROSS M L, FORD K P, et al. Experimental Observation for the Development of Reaction Kinetics in Composite Propellant Slow Cook-Off[J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2015, 14(1).
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 张晋元. 壳体厚度对传爆药慢速烤燃响应的研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(3): 61-64.
- [31] 张旭, 谷岩, 张远平, 等. TATB 基 PBX 的快速烤燃实验与数值模拟[J]. *含能材料*, 2010, 18(5): 551-557.
- [32] 李亮亮, 沈飞, 屈可朋, 等. 不同密封及包覆下 HAE 装药快速烤燃的响应特性[J]. *含能材料*, 2018, 26(8): 696-700.
- [33] 李亮亮, 沈飞, 王胜强, 等. 外部涂层及包覆层对 HAE 装药快速烤燃实验的影响[J]. *火炸药学报*, 2019(2): 202-206.
- [34] DAI X G, ZI JIAN L, SHEN C Y, et al. Reaction Rule for Different Size PBX-2 Explosives in Fast Cook-off Test[Z]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008: 3.
- [35] 孙培培, 南海, 牛余雷, 等. 壳体厚度对 TNT 炸药快速烤燃响应的影响[J]. *含能材料*, 2011, 19(4): 432-435.
- [36] 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(9): 5.
- [37] 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.
- [38] YANG H W, YU Y G, YE R. Numerical Simulation of Slow Cook-off Characteristic for AP/HTPB Composite Solid Propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015(10): 3.
- [39] YANG H W, YU Y G, YE R, et al. Cook-off test and numerical simulation of AP/HTPB composite solid propellant[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 1-9.
- [40] YANG H W, YU Y G, YE R. Numerical simulation of cook-off characteristic of solid rocket motor in different flame environments[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(9): 1640-1646.