

含能材料热烤试验用多温区热控装置设计

鲁亮, 胡宇鹏, 周本权, 吴松, 李明海, 陈胜来

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 评估含能材料产品在热烤环境下的热安全性, 研制一套热烤环境试验用多温区热控装置。**方法** 从热烤试验需求出发, 制定试验系统功能、指标。进行系统功能分解, 重点分析加热方式和加热元件的选型, 温区之间的温度耦合及控制。基于试件含能, 危险性较大的情况, 制定安全策略。基于组态软件实现热控系统的软件设计, 考虑了参数及曲线设置、试验过程状态观测、数据存储、报警和安全保护等。**结果** 利用该多温区热控系统开展了验证性试验, 设置的温度为室温~229 °C, 温变速率为 6 °C/h, 三温区控制, 温度误差为±1.5 °C。**结论** 含能材料热烤试验用多温区热控装置可以完成大试件小温升速率热烤试验的要求, 为大尺寸含能材料热烤试验提供了试验能力。

关键词: 含能材料; 热烤试验; 热安全性

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0055-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.05.009

Design of Thermal Control Device in Multi-temperature Zones for Energetic Materials Cook-off Test

LU Liang, HU Yu-peng, ZHOU Ben-quan, WU Song, LI Ming-hai, CHEN Sheng-lai

(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: The paper aims to evaluate the safety of energetic materials products under cook-off environment, one heat test apparatus is developed. In this paper, the functions and index of the apparatus are formulated from the needs of the cook-off test, especially the selection of heating mode and heating element, and temperature coupling and control between temperature zones. Safety strategies are made in consideration of the dangerous of the energetic materials. The software design of the heat system is accomplished through configuration technology, including set of parameters and curves, status observation of test progress, storage of data, alarms and safeguard strategy. A simulated test piece for energy-containing material is designed and a functional verification test for the thermal control device is carried out. The scope of the temperature is from normal temperature to 229 °C with a rising rate at 6 °C/h under the control of three temperature zones.. The results show that the deviation of the temperature is within ±1.5 °C. The design of the thermal control device for the hot baking test with small temperature rise rate can meet the requirements of the hot baking test..The heating element with matching heating capacity should be selected in the test design

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-04-11

Received: 2021-03-29; Revised: 2021-04-11

基金项目: 中物院总体所科技专项项目 (2019SKJZX011)

Fund: Science and Technology Special Project of ISE (2019SKJZX011)

作者简介: 鲁亮 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境载荷加载及控制。

Biography: LU Liang (1986—), Male, Master, Engineer, Research focus: loading and control of environmental load.

通讯作者: 胡宇鹏 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为热物理及热安全试验技术。

Corresponding author: HU Yu-peng (1987—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: thermophysical and thermal safety testing techniques.

引文格式: 鲁亮, 胡宇鹏, 周本权, 等. 含能材料热烤试验用多温区热控装置设计[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 055-061.

LU Liang, HU Yu-peng, ZHOU Ben-quan, et al. Design of thermal control device with multi-temperature zones for energetic materials cook-off test[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 055-061.

stage, and the heating power output state of the thermal control device should be maintained in good condition.

KEY WORDS: energetic materials; cook-off test; heat safety

含能材料包括炸药、推进剂、烟火剂等,被广泛应用于军事、航天、石油化工等领域。由于含能材料产品受热反应易发生燃烧甚至爆炸等现象,因此具有极高的热环境要求。准确评估含能材料产品的热安全性,研究其在各类热刺激环境下的热响应规律,判断反应特征行为等级,对热事故处理、热安全性能评估^[1]等具有十分重要的意义。

主要是利用热烤试验^[2-6] (Cook-off test) 对含能材料产品的热安全性能进行评估。按加热速率可分为快烤试验 (Fast cook-off test) 和慢烤试验 (Slow cook-off test) 2 种工况,快烤试验的升温速率大于 1 °C/s,慢烤试验的升温速率小于 0.05 °C/s。目前,针对小尺寸量慢烤试验及大尺寸产品快烤试验技术已较为成熟。例如,王帅等^[7]利用加热炉研究了 DNAN 基熔铸炸药的热烤相变及传热特性,获取了小尺寸 ($\phi 30\text{ mm} \times 60\text{ mm}$) DNAN 基熔铸炸药的慢烤点火温度及相变反应过程。吴松等^[8]利用油池火烧装置,获取了 JOB-9003 炸药在快烤条件下点火处升温-时间历程,并给出了产品在火灾快烤事故场景下的热防护改进设计方案。然而,对于大尺寸含能材料产品小温升速率热烤试验技术还未见报道。

综上所述,含能材料产品热烤试验手段还十分缺乏。相比小尺寸产品慢烤试验,大尺寸试件的小温升速率热烤试验更加复杂^[9-12]。尤其是针对小温升速率热烤装置的载荷加载方式、控制方法、复杂约束条件下多参数测试技术等,还需要进一步研究。文中以含能材料产品小温升速率热烤试验任务为背景,对含能

材料热烤试验载荷加载方式进行了系统研究,研制了一套含能材料产品热烤试验装置,设计了验证试验,并利用该试验装置对模拟试验件进行了热烤试验,提出了后续试验改进方法,为含能材料产品的热安全评估提供了技术支持。

1 装置总体研制

1.1 研制目标

该装置主要用于含能材料产品热事故场景模拟、热安全性能评估等。升温速率方面,需能够满足含能材料产品小温升速率热烤试验需求;最高设计温度方面,应能够满足含能材料产品在不同结构、约束条件下热反应、安全性评估的要求。同时,考虑到含能材料产品热事故场景下受热不均匀等情况,装置应具备多温区^[13-15]加热能力。针对试验对象含能危险性较大,应具备故障应急处理能力。

根据设计思路,装置总体研制目标如下:可实现三温区加热;单温区具备 10 kW 加热能力,输出功率调节范围为 0~100.0%;单温区加热范围满足室温~350 °C,升温速率为 0~6 °C/h 可调(典型试验件);设计冗余硬件,具备硬件容错功能。

1.2 设计技术路线

装置总体设计技术路线如图 1 所示。总体设计时,从任务需求分析入手,确定装置所需实现功能,包括多温区加热、曲线等参数设置、数据显示、数据存储分析、故障应急处理。

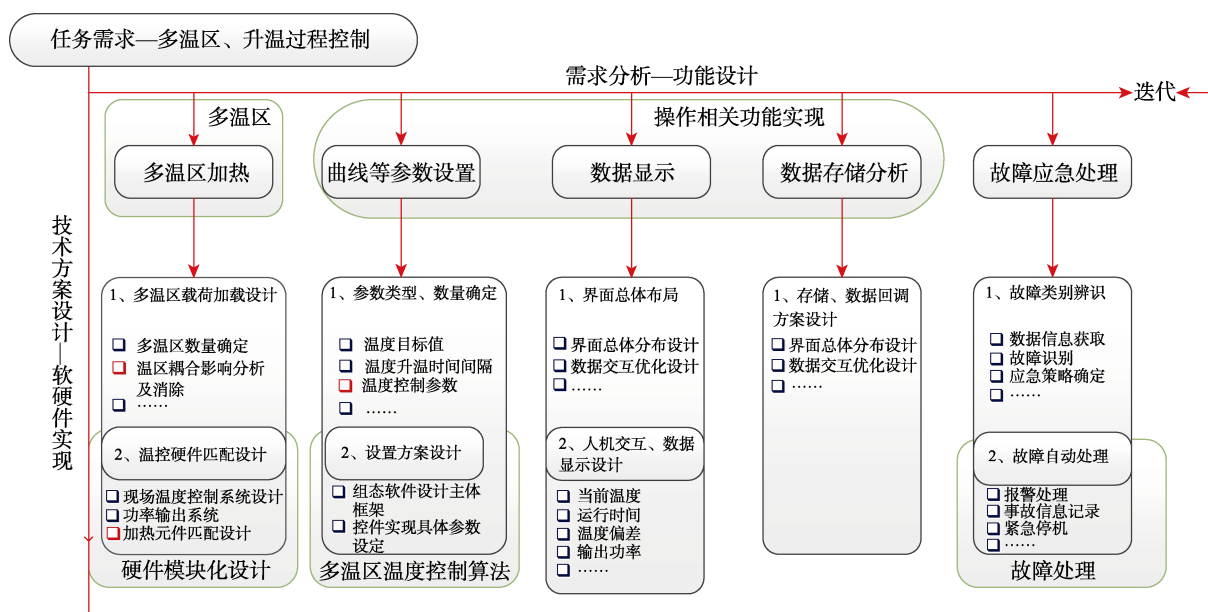


图 1 热烤试验装置总体设计技术路线

Fig.1 Overall design technical route of cook-off test device

分析、故障应急处理等。根据装置功能,从装置研制目标出发,制定技术方案,并研究软硬件设计实现方法。多温区加热功能主要通过多温区载荷加载设计及温控硬件匹配设计来实现,需对相邻温区之间温度耦合影响进行分析,并研究消除方法,同时完成温度控制系统、功率输出系统、加热元件等硬件的匹配设计,以满足装置多温区加热、最高设计温度、升温速率等研制指标要求。操作时,应完成曲线等参数设置功能设计,要求能够实现温度目标值、升温时间间隔、温控参数等设置,利用组态软件等实现装置硬件控制、图形化界面设计软件。设计时,应与数据显示、存储、分析等功能协同考虑。考虑到含能材料产品在热反应条件下的安全性响应特征,装置还需要从底层硬件及配套软件上,完成故障应急处理功能,涉及故障类型辨识及自动处理等。

2 装置整体结构及关键模块设计

2.1 基于主-从结构硬件模块化设计

装置整体结构采用主-从结构硬件的模块化设

计,硬件工作原理如图 2 所示。为了实现装置多温区加热功能需求,减小各温区之间电、磁、信号的相互干扰,装置为各温区设置了独立的硬件单元。硬件单元采取模块化设计,分为现场温度控制模块、功率输出模块、加热元件等。考虑到工业现场的复杂及不确定性,提高装置工作的可靠性,设计了主-从式的控制单元。以各温区现场温度控制模块为从站,上位机监控系统为主站。主站与从站之间通过以太网通信,正常工作时,现场温度控制单元将现场数据传输给上位机监控系统,监控系统根据各温区加热情况,统筹处理,控制加热输出。当主-从站通讯遭到干扰时,相应温区进入从站温度控制模式,现场温度控制模块根据之前设置好的温度控制曲线、加热控制逻辑保证当前温区加热继续进行。

功率输出模块用于接收现场控制模块发出的功率输出指令,并利用供电电源,调节输出功率至加热元件。模块硬件由供电电源、调功器、保护装置等部分组成。模块设计时,应根据任务要求,明确最高设计温度、升温速率等指标,并选择电功率匹配、输出线性度好的功率器件。

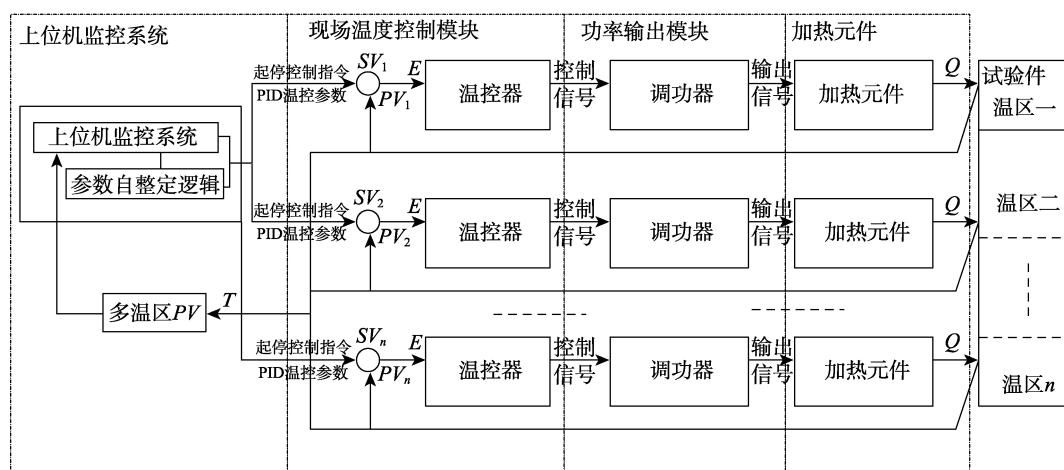


图 2 装置硬件工作原理

Fig.2 Operating principle diagram of the device hardware

加热元件方面,对温度箱、加热炉、柔性加热带^[16]、加热膜^[17]、辐射灯^[18-21]等工程上常见加热元件相关指标开展了调研分析。温度箱、加热炉等加热元件较难针对大尺寸含能材料产品进行分区加热;柔性加热带、加热膜可通过缠绕、粘贴在产品外表面,模拟产品外表面热边界情况,适用于不大于 0.1 °C/s 升温速率、室温~300 °C 升温范围的分区加热场景;辐射灯阵加热能力强,可以满足 1 °C/s 升温速率要求,但布置方法较复杂,相邻温区之间容易产生干扰。总之,在开展相关研究任务时,应根据需求进行综合考虑,同时为了减少温区之间干扰等,还需开展优化设计。

针对热烤试验过程中升温过程可能出现的传感

器脱落等意外事故,为了保障含能材料热烤试验的可靠性,利用容错技术,增加硬件冗余单元,设计完成了故障应急处理单元。正常工作时,常规功率输出通道进行加热输出,冗余通道备用,且实时采集温度数据。当常规功率输出通道处于正常工作状态时,处理器自动跟踪试验装置运行状态,并对温度、加热输出功率、程序运行状态等参数变化过程进行实时动态检测。当发生传感器数据、加热功率输出异常等情况时,处理器根据故障源和故障特征,切断常规功率输出通道,冗余通道启动运行,以保证热加载试验系统始终处于安全、连续运行状态。故障应急处理工作原理及电气设计如图 3 所示。

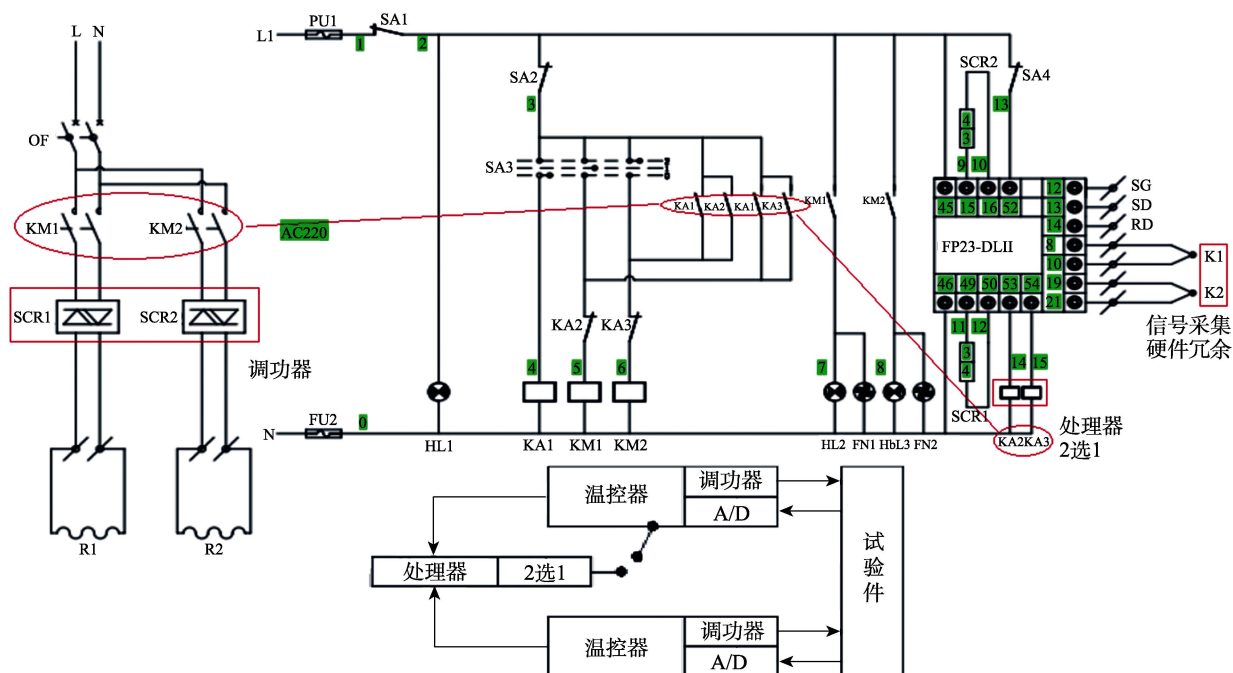


图3 故障应急处理工作原理及电气设计

Fig.3 Working principle and electrical design of fault emergency treatment

2.2 多温区温度控制算法设计

为了准确模拟含能材料产品在热烤过程中的响应温度场分布特征,装置设计了多温区加热功能。虽然不同温区的硬件结构相互独立,但是热量在产品不同温区之间传递,温区之间的相互耦合仍然十分强烈。若将每一个温区看作是独立的单输入输出系统,很难达到满意的控制效果。以三温区加热控制系统为例,装置温度控制系统如图4所示。其中, SV_n 是第 n 温区的温度输入; PV_n 是第 n 温区的温度响应; G_n 是第 n 温区的控制输入到输出量的传递函数; G_{nm} 是第 n 温区对第 m 温区的耦合传递函数。

由于热量总是从温度高的区域传向温度低的区域,因此,同一时刻, G_{nm} 以及 G_{mn} 中只有一个起作用。在进行多温区温控算法设计时,将温区之间的相互影响视为外界对温区输出通道上的温度扰动,这时,如图4所示的温度控制系统框图可转化为图5。

针对图4中的各温区,参照模糊控制的思想,设计了含阈值判断一类模糊温度控制算法,控制结构如图6所示。思路如下:当各温区实际温度偏差(含扰动)超过一定范围时,逻辑选择器阈值输出逻辑工作。这时温度控制器输出信号为 U' ,并下载至执行单元,进行定功率输出。当实际温度偏差在一定范围时,采用类模糊PID控制调节算法控制温度。借鉴模糊控制的思想,以设定温度与实际温度的温度偏差及温度偏差变化率为输入信号,按照温度偏差及温度偏差变化率的变化范围,控制参数大小,进行模糊化关系对应,建立PID控制参数对应规则,完成类模糊PID参数自整定调节。

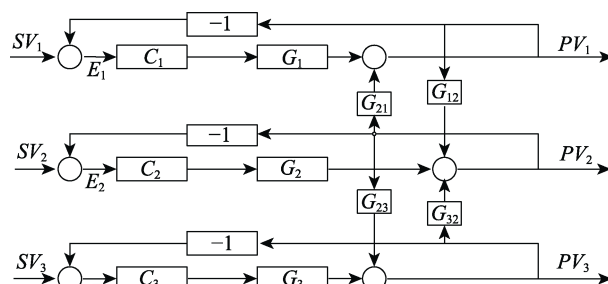


图4 温度控制系统框图

Fig.4 Block diagram of temperature control system

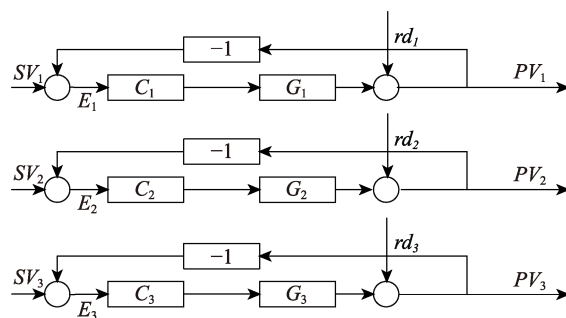


图5 温区间相互影响关系转化图

Fig.5 Transformation diagram of temperature interval interaction

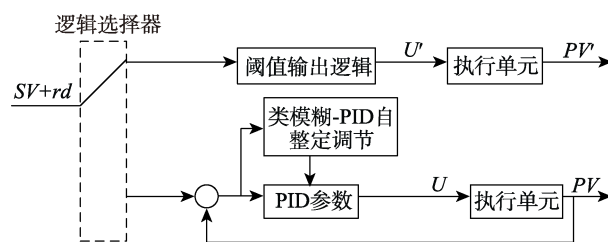


图6 含阈值判断一类模糊温度控制结构

Fig.6 Class fuzzy temperature control structure diagram with threshold judgement

3 小温升速率热控装置应用研究

3.1 试验件及试验条件

为了达到考核热烤试验装置加载、控制有效性的试验目的，设计了含能材料产品慢烤验证试验。慢烤验证试验采用柔性加热带为加热元件，利用模拟试验件为实验对象开展试验考核。模拟试验件设计为圆柱体结构，长为 1200 mm，直径为 500 mm，总质量为 300 kg，装填某规格含铝炸药约 90 kg。

试验类型为大尺寸含能材料慢烤试验，试验条件见表 1。慢烤试验载荷加载时，为了提高试验效率，首先按 6 °C/h 的升温速率将温度升至 120 °C，并保温 4 h。待模拟试验件内部温度平衡后，再按照 3 °C/h 将试验件温度升高至 200 °C，平衡 2 h。平衡结束后，再次升温，直至产品反应。

表 1 慢烤试验温度加载条件
Tab.1 Temperature loading conditions of slow cook-off test for energetic materials

温升区间/°C	温升条件
常温~120	6 °C/h
120	保温 4 h
120~200	3.0 °C/h
200	保温 2 h
200~反应	3.0 °C/h
试验期间，若发生反应，立刻停止加热	

载荷控制点选为模拟试验件外壳体外部，按产品前、中、后进行温区划分，选取各温区中心位置为温度控制点。控制方式采用三温区独立加载、平均控温方式进行。试验期间，若产品发生反应，立即停止加热。

试验条件制定的过程中，由于现阶段国内外标准均未对载荷加载允差作出规范，笔者参照 GJB 150A 中温度单项试验的规定，拟定了试验允差、合格判据

等内容，以期对试验进行评价。

1) 试验允差：100 °C 以内温度范围，温度允差不超过±2 °C；100 °C 以上温度范围，温度允差不超过±5 °C。

2) 合格判据：热烤试验期间，试验载荷加载准确有效，在允差规定范围内，则试验合格。

3.2 结果及分析

依据制定的试验流程、大纲，按照温度加载条件开展了含能材料模拟试验件功能验证试验，试验起始温度为 7.0 °C，历时 3461 min，最终反应温度约 229.0 °C。

含能材料模拟试验件三温区温升及温升偏差曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出，升温过程中，各温区温度实际值根据设定值进行升温及恒温，期间温度偏差值均小于 2 °C，满足试验要求。初始加热升温时，各温区温度出现负超差，这是由于初始加热段，温度目标值变化，而实际值跟随不及时导致的。当进入 120 °C 恒温段时，各温区温度出现了正偏差，分析原因是由于升温跟随的惯性导致的。当 120 °C 恒温段结束，继续升温过程时，各温区温度出现了负偏差，这是由于恒温一定时间后，由于设定值继续增加，热响应滞后造成的。当进入 200 °C 恒温段时，未见明显温度正偏差情况，分析原因是由于 120~200 °C 升温段温升速率相对于进入 120 °C 恒温段低，因此温度过冲不明显；200 °C 设定温度较 120 °C 高，也限制了温度过冲量的增加。各温区加热时，温度偏差最大值、偏差的情况并不相同，如 1#温区加热偏差最大值出现在 120 °C 恒温段结束时，2#温区加热偏差最大值出现在升温段，3#温区加热偏差最大值出现在初始加热段。由于采取了相同的加热 PID 控制参数，因此分析出现这种现象的原因是由于加热对象的不同以及加热元件的差异造成的。

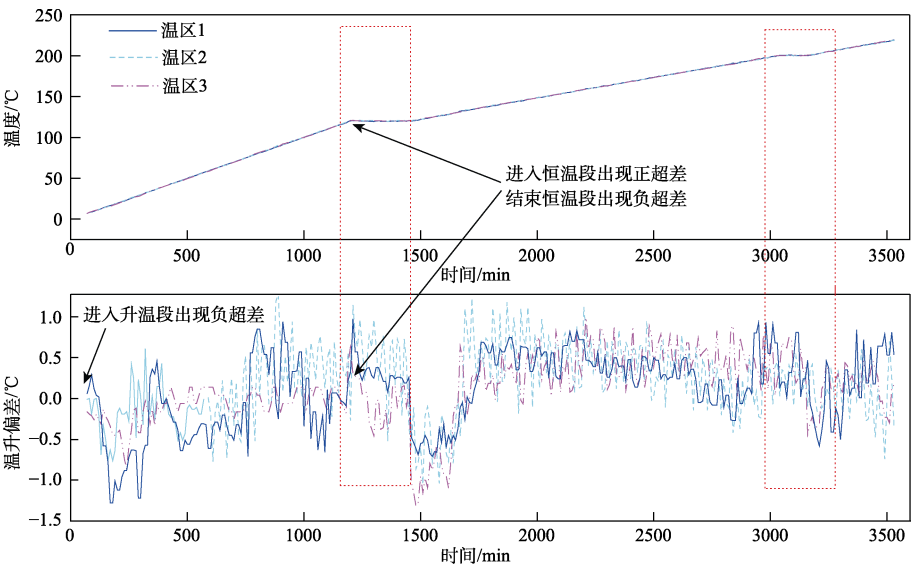


图 7 含能材料产品小温升速率热烤温升及温升偏差曲线
Fig.7 Small temperature rise rate and temperature rise deviation curve of cook-off of energetic material products

由于各温区加热状态具有一定的相似性,以1[#]温区为例,含能材料模拟试验件慢烤温升过程中,装置1[#]温区加热输出百分比情况如图8所示。由图8可以看出,升温过程中,室温至120℃升温段期间,热控装置加热输出百分比波动范围较小,波动范围约为10%。这说明120℃以下温度区间,6℃/h恒温加热状态下,温度控制器输出状态稳定,且留有较大裕

量。120℃以上升温段期间,加热功率波动加大,波动范围超过25%。分析原因是由于温度增高,虽然此时升温速率降为3℃/h,但由于过高的温度导致试验件与周围换热明显增强,造成加热功率波动度变大。同时,随着温度的上升,加热功率曲线震荡向上,最大值接近50%,显示高温段所需的加热功率增加,但是设备仍然处于良好的工作状态,且留有一定裕量。

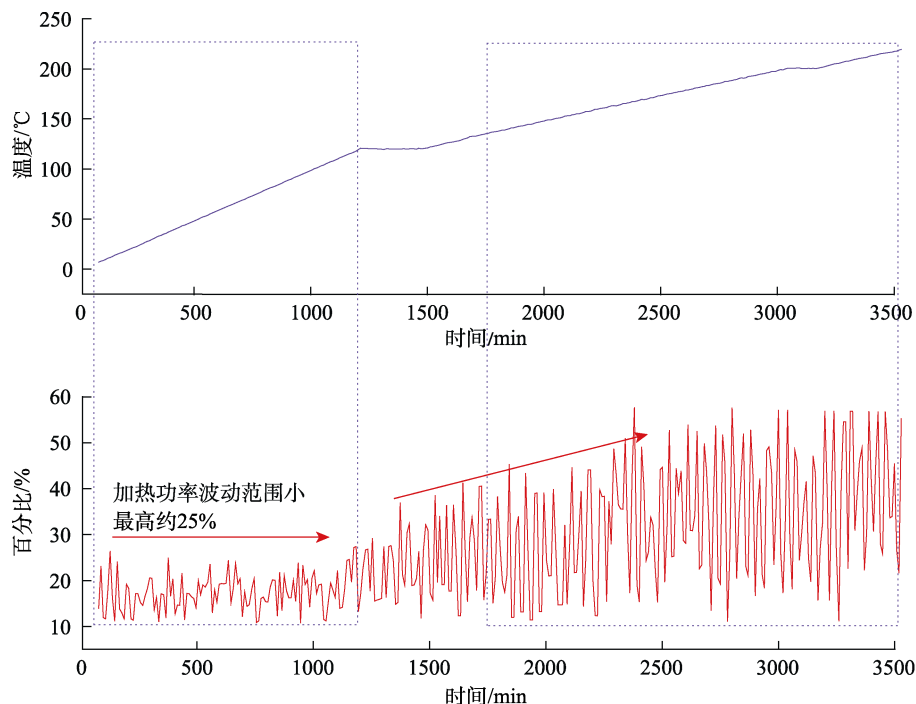


图8 含能材料产品小温升速率热烤温升过程加热输出百分比

Fig.8 Percentage of heating output in the process of small temperature rise of products with energetic materials

综上所述,试验结果表明,含能材料热烤试验用小温升速率热控装置设计能够按照小温升试验条件要求开展相关试验。试验过程中,产品成功加热至反应温度,升温、恒温期间温度偏差不大于2℃,升温范围、允差满足试验要求。升温范围要求对热控装置升温状态、能力产生影响,热控装置在试验设计阶段,应考虑选择具有匹配加热能力的加热元件,在试验件温升条件范围内保持良好的加热功率输出状态,并留有足够的加热裕量。

4 结语

以含能材料试验产品小温升速率热烤试验为背景,对含能材料热烤试验用小温升速率热控装置设计方法开展了研究。研制了一套小温升速率热控装置样机,制定了含能材料试验件小温升速率热烤试验方法。利用该热控装置对含能材料模拟试验件进行了室温~229℃、3~6℃/h的小温升速率热烤环境试验考核。试验结果证明,研制的小温升速率热控装置能够对含能材料热烤试验载荷进行准确加载,试验装置具

备开展含能材料产品小温升速率热烤试验能力,可为大尺寸含能材料安全性试验研究提供技术支持。

参考文献:

- [1] 王耘,冯长根,郑晓.含能材料热安全性的预测方法[J].含能材料,2000,8(3):119-121.
WANG Yun, FENG Changgen, ZHENG Rao. Prediction of thermal safety of energetic materials[J]. Energetic materials, 2000, 8(3): 119-121.
- [2] WANG B B, YI H, XU K L, et al. Prediction of the self-accelerating decomposition temperature of organic peroxides using QSPR models[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2017, 128(1): 399-406.
- [3] LIANG G R, YE Q G, ZHANG H Z, et al. Research progress in thermal risk evaluation of reactive materials[J]. Chemical research, 2012, 23(1): 44-47.
- [4] 冯长根,张蕊,都振华.热烤试验研究进展[J].科技导报,2012,30(33):68-73.
FENG Chang-gen, ZHANG Rui, DU Zheng-hua. Progress in cook-off test[J]. Science & technology review, 2012, 30(33): 68-73.

- [5] HUBBLE D. An Investigation into a proper heating rate for slow cook-off testing[C]// Insensitive munitions & energetic materials technology symposium. Portland: [s. n.], 2018.
- [6] FORD K, ATWOOD A, FARMER A, et al. Low cook-off consortium workshop findings[R]. NM: Sandia National Lab, 2016.
- [7] 王帅, 智小琦, 王雪. DNAN 基熔铸炸药的慢烤相变及传热特性[J]. 火炸药学报, 2019, 42(4): 396-402.
WANG Shuai, ZHI Xiao-qi, WANG Xue. Phase transition and heat transfer characteristics of DNAN based melt-cast explosive in slow cook-off test[J]. Chinese journal of explosives & propellants, 2019, 42(4): 396-402.
- [8] 吴松, 李明海, 张中礼. 火灾环境下复杂炸药结构的热防护设计与分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(8): 1275-1280.
WU Song, LI Ming-hai, ZHANG Zhong-li. Design and analysis of thermal protection of complex structure with high explosives under fire conditions[J]. Acta armamentarii, 2014, 35(8): 1275-1280.
- [9] 李翊, 赵继伟, 霍菲. 国外固体发动机慢烤安全性评估技术[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(6): 897-902.
LI Yi, ZHAO Ji-wei, HUO Fei. Solid rocket motor slow-cookoff safety evaluation technology in foreign countries[J]. Journal of solid rocket technology, 2015, 38(6): 897-902.
- [10] ACOBS G. Naval weapon cook-off improvement concepts and development[R]. [s.n.]: DTIC Document, 1981.
- [11] NICHOLS I A, SCHOFIELD S. Modeling the response of fluid/melt explosives to slow cook-off[C]// 15th International Detonation Symposium. San Francisco: [s. n.], 2014
- [12] FROTA O V. Development of a low cost cook-off test for assessing the hazard of explosives[D]. Cranfield: Cranfield University, 2015.
- [13] 袁朝辉, 张慧. 多温区加热炉的 PID 神经网络控制[J]. 计算机仿真, 2010, 27(12): 176-179.
YUAN Zhao-hui, ZHANG Hui. PID neural network control for electric heating furnace with multiple temperature-zone[J]. Computer simulation, 2010, 27(12): 176-179.
- [14] 舒怀林. 基于改进 PID 神经元的多变量系统控制算法[J]. 电子科技, 2016, 29(6): 26-33.
- SHU Huai-lin. Simulation of multivariable control systems based on improved PID neural network[J]. Electronic science and technology, 2016, 29(6): 26-33.
- [15] 陈武, 邓忠华, 程善美. 高性能模糊控制研究[J]. 模糊系统与教学, 2000, 14(2): 76-79.
CHEN Wu, DENG Zhong-hua, CHENG Shan-mei. Research on fuzzy controller with high performance[J]. Fuzzy systems and mathematics, 2000, 14(2): 76-79.
- [16] 李联成, 张萍. 卫星管路家热带安装工艺方法探讨[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(4): 384-386.
LI Lian-cheng, ZHANG Ping. Installation of pipeline with electric heater in spacecraft[J]. Spacecraft environment engineering, 2008, 25(4): 384-386.
- [17] 张武康, 陈小源, 李东栋, 等. 薄膜热导率测量方法研究进展[J]. 功能材料, 2017, 6(8): 6034-6040.
ZHANG Wu-kang, CHEN Xiao-yuan, LI Dong-dong, et al. Research progress of measurement for the thermal conductivity of thin films[J]. Journal of functional materials, 2017, 6(8): 6034-6040.
- [18] 王振亚, 丛琳华. 石英灯照射虚拟热试验程序的设计与实现[J]. 工程与试验, 2020, 60(3): 65-67.
WANG Zhen-ya, CONG Lin-hua. Design and implementation of virtual thermal test program for quartz lamp irradiation[J]. Engineering & test, 2020, 60(3): 65-67.
- [19] 王德成, 林辉. 石英灯辐射式瞬态热环境试验关键技术分析[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 36-40.
WANG De-cheng, LIN Hui. Main technical analysis of quartz lamp radiation transient thermal environment experiment main technical analysis[J]. Equipment environmental engineering, 2016, 13(5): 36-40.
- [20] 吴松, 胡宇鹏, 李翊, 等. 适应瞬态高温过载环境的加载装置设计及试验研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(3): 101-106.
WU Song, HU Yu-peng, LI Chong, et al. The design of overloaded transient thermal testing apparatus to simulate re-entry heating and testing techniques[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(3): 101-106.
- [21] GOETHEM D V, JEPSEN R, ROMERO E. Vibrafuge: Re-entry and launch test simulation in a combined linear acceleration and vibration environment[C]// The 44th AIAA aerospace sciences meeting and exhibit. Reno, Nevada: AIAA, 2006.