

装备防护

不同贮存条件下含热源产品传热特性研究

胡宇鹏¹, 胡纯², 鲁亮¹, 向延华¹, 毛勇建¹, 李明海¹

(1.中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621999; 2.西南科技大学 外国语学院, 绵阳 621010)

摘要:目的 以同位素热源产品贮存任务剖面为背景, 研究在贮存状态下含热源自发热产品的传热特性。方法 搭建含热源自发热产品热试验平台, 对不同贮存状态下含热源自发热产品的热状态进行实验研究, 分析有、无风, 有、无包装箱条件下产品的传热特性。结果 裸球状态有风条件下传热性能较好, 加厚包装箱内的发热球体和球壳组件温度比常规包装箱高。结论 2 种状态下各测点温度随着离热源距离的增加而下降, 裸球和常规包装箱状态下各测点温度随测点相对位置的增大, 其下降趋势逐渐减小。研究结果可为产品热设计及后期环境热考核试验作理论支撑。

关键词:贮存; 自发热; 包装箱; 传热特性; 实验

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)09-0078-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.013

Heat Transfer Characteristics of Products Containing Heat Source under Different Storage Conditions

HU Yu-peng¹, HU Chun², LU Liang¹, XIANG Yan-hua¹, MAO Yong-jian¹, LI Ming-hai¹

(1.Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2.School of Foreign Languages & Cultures, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

ABSTRACT: The paper aims to research the heat transfer characteristics of spontaneous heating products containing heat source under storage conditions based on the background of the storage task profile of radioisotope heat source product. The experiment platform of spontaneous heating product including heat source was built. The thermal state of product containing heat source under different storage conditions was studied experimentally. And the heat transfer characteristics of product with or without packaging box in or not in the wind were analyzed. The heat transfer ability of product without packaging box under windless conditions had good performance. Furthermore, the temperature of the hot sphere and spherical shells in the thicker packaging box was higher than that in the common one. The temperature of measuring points under the two conditions decreases with the increase of distance from the heat source. And the downtrend of the temperature of measuring points of the product without packaging box or with the common one decreases with the increase of the relative distance. The research results can be used as theoretic support for thermal design and later environmental thermal testing of product.

KEY WORDS: storage; spontaneous heating; packaging box; heat transfer ability; experiment

一般来说, 武器装备在非任务时间时大多处于贮存状态, 例如, 导弹相关部件寿命为 8~10 年, 任务

时间为 30 h, 99.9%的时间为非任务时间, 战机相关部件寿命为 15 年, 任务时间为 4000 h, 96.9%的时间

收稿日期: 2018-12-17

基金项目: 国家自然科学基金 (51706213); 民用航天技术预先研究项目 (D020216)

作者简介: 胡宇鹏 (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为传热传质、武器热安全及环境试验技术。

为非任务时间^[1-2]。综上所述,产品在较长贮存时间内保持规定的性能指标直接关系到产品的正常使用。环境因素是影响产品处于贮存状态时性能变化的一个重要因素,其中温度因素引起的产品故障占环境因素引起故障的 40% 左右。经验表明,库房条件和包装状态以及产品特性共同决定了产品的贮存状态。根据不同产品的材料特性,库房环境的贮存条件分为当地环境条件及指定温度条件(空调等主动调控措施)。产品状态不同,则对应的包装状态也不同,如部、组件临时组装时一般为简易包装或无包装状态,产品成型后为固定包装状态。综上所述,有必要对在不同贮存环境下的传热特性进行深入研究。

韩庆田等^[3]在导弹贮存可靠性预测模型研究中讨论了贮存环境温度对产品可靠性的影响,认为环境温度或湿度均会对产品的固有贮存失效率产生影响。李昌禧等^[4-5]根据洞库内弹药包装箱的状况,采用软测量技术进行了库存实验,提出弹药封装时环境绝对湿度应尽可能低而温度不能偏低的结论。李明海等^[6-7]通过数值模拟讨论了火烧试验条件下影响抗事故包装箱结构热响应的关键因素。黄鹏等^[8]利用有限元法对火烧环境下内部具有木材结构的典型抗事故包装箱作了进一步的热分析,计算结果表明包装箱内温度场分布受木材内水分汽化、热解和木材厚度的影响显著。最近,苏新明等^[9]对某航天器及其包装箱整体建模,采用有限容积法对模型进行了流动与传热耦合计算,结果发现,在极冷和极热环境下包装箱被动保温时间不会超过 12 h。国外学者往往将密闭包装箱内的流动与传热特征视为封闭腔体内的热对流问题,并对此进行了广泛研究^[10-12]。Sathiyamoorthy 等^[13]对底部进行恒定温度加热、侧壁进行线性加热,并在上部绝热边界条件下对方形腔内的热对流进行了一系列数值模拟并发现腔体底部出现的次级流胞增强了该区域壁面的传热能力。Nabavizadeh 等^[14]和 Mezhrah 等^[15]通过数值模拟研究了内部具有物体的封闭腔体内热对流的温度场分布规律,结果发现封闭

腔体倾斜角度、内外壁温差都是影响温度场分布规律的重要因素。

虽然贮存状态下军用设备的热特性对其能否安全贮存、有效使用有着重要的意义,但通过国内外文献调研发现,关于不同贮存条件下产品的热分析研究较少,特别是对含内热源产品热状态的分析更是鲜有报道。笔者所在课题组前期虽已针对某产品性能特性设计了相关包装箱^[16],但不同贮存状态下产品的热状态实验研究还需进一步开展。文中拟以同位素热源产品的贮存为背景,根据不同情况对应的场景,对自身发热产品在有风、无风及有包装箱、无包装箱条件下的热状态进行实验研究。

1 实验装置

实验产品主要分为 2 部分,即直径较小的实心球体以及与其连接的直径较大的空心球壳组件。其中,实心球体为发热组件,且置于球壳组件内部,球壳组件表面开有小孔。产品直接贮存时为无包装箱状态,置于包装箱内贮存时为有包装箱状态,2 种状态下产品的温度测点位置见图 1。实验系统见图 2,出于安全目的,用电加热方式替代真实产品的自身发热,电加热发热球体壳面为导热性能较好的紫铜材质,球体表面均匀绕制有由耐高温硅橡胶包覆的电加热线,球体内充满硅酸铝纤维。电加热线采用四线制连接到直流稳压电源,电流表及电压表分别串联和并联在电路中。上位机通过基于 VEE 平台的恒功率控制软件对电加热线上电加热,从而模拟实际产品的恒定发热功率。在不同位置布置 T 型热电偶进行温度测量,并由 FLUKE2640A 数据采集仪进行温度测试、采集并传至测试微机,热电偶位置已在图 1 中标出。实验产品通过托盘固定在试件车上,试件车置于 TET7045 高低温湿热试验室内以维持 20 ℃ 的恒定环境温度及有无风状态。当有产品处于包装状态时,在包装箱顶部进行加工,安装穿墙密封插座。

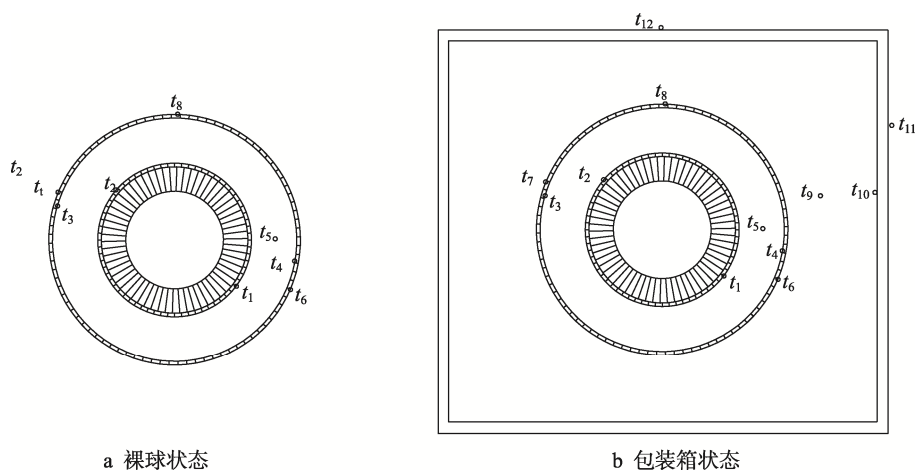


图 1 实验产品示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental product

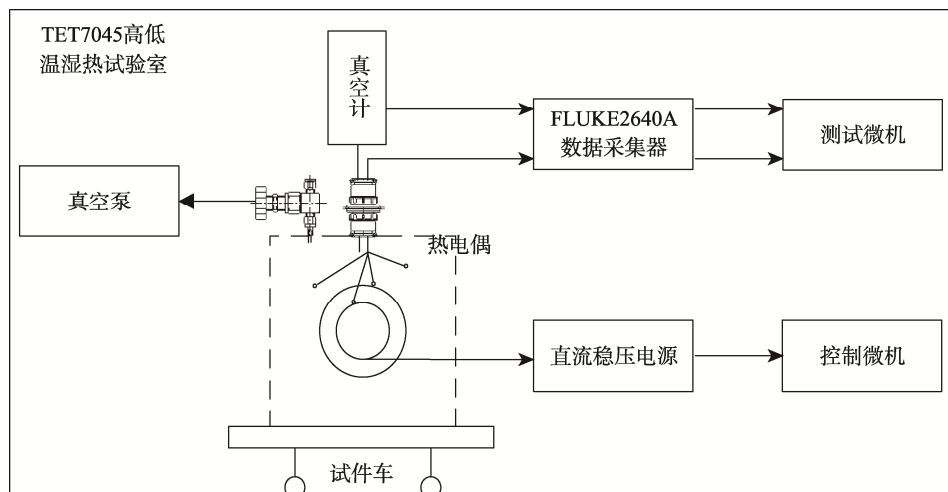


图 2 实验系统示意

Fig.2 Schematic diagram of experimental system

2 结果与讨论

首先对产品裸露在外的裸球状态进行实验研究，裸球状态时按试验室内有无风的状态又可分为无风及有风 2 种状态，其中风速为 3 m/s。裸球状态下产品各测点温度测量结果见表 1。由于加热球以某恒定功率加热，环境温度在 19 ℃ 左右，因而各测点温度由内向外依次减小。球壳组件表面开有小直孔，因而球壳间为空气夹层，其构成了产品径向传热的主要热阻，在经过空气夹层的对流传热后，球壳组件温度较发热球体表面温度有较大幅度地减小。无风条件下各测点温度比有风条件下各测点温度大约高 2 ℃，这是由于无风条件下产品组件外部为空气的自然对流传热，有风条件下为强迫对流传热，显然，强迫对流较自然对流传热能力更强，组件外壁散热能力更强，进而产品整个温度都有所降低。壳体组件为金属材质，导热系数为定值且较大，组件内外壁间依靠导热方式传热，不受环境有无风的影响，因而在有无风条件下组件内外壁温差较小，约为 1 ℃。值得注意的是，无风条件下上部测点温度 t_2 比下部测点温度 t_1 高 0.3 ℃，组件内壁上部测点温度 t_3 比下部测点温度 t_4 高 0.2 ℃，外壁 3 个测点同样是组件上部测点温度高于下侧。该现象的出现是由于热源上部热边界层分离形成指向向上的热柱，而下部热边界层没有分离，上部热边界层厚度较下部热边界层厚，符合经典的热

边界层厚度分布规律，因此，同一径向位置上部测点温度比下部高。

进一步对产品置于包装箱内时的传热特性进行实验研究，包装箱按照壁面厚度可分为常规包装箱及厚包装箱。常规包装箱、厚包装箱状态下产品各测点温度测量结果见表 2。由表 2 可知，加厚包装箱内的发热球体和球壳组件温度相比常规包装箱高出 18 ℃ 左右，空气夹层以及包装箱内壁相比常规包装箱高出 15 ℃ 左右。与裸球无风状态一样，常规和加厚包装箱内产品各部件测点温度依然满足被加热物四周热边界层厚度分布规律，即也说明包装箱内对流传热以自然对流传热为主。对比测点 t_{10} 、 t_{11} 和 t_{12} 温度可知，常规包装箱内外壁温差为 0.5 ℃，温度梯度较小，即隔热保温能力较差；加厚包装箱内外壁温差为 16 ℃，温度梯度较大。

如表 1—2 所述，各状态下产品各部件测点温度有较大差异，为进一步讨论各状态下产品的传热特性，分析了裸球和包装箱在不同条件下各部件测点温度与环境温度之差的变化规律（见图 3—4）。为便于比较，横坐标为测点的无因次相对位置 $X=(x-R_i)/R_i$ ，其中 x 为测点到球心的距离， R_i 为球半径；纵坐标为测点温度与环境温度之差。由图 3 和图 4 可知，2 种状态下各测点温度随着离热源距离的增加而下降，即符合径向热传递规律。裸球有风状态下各测点温度最低，厚包装箱状态下各测点温度最高。另外，裸球和常规包装箱状态下各测点温度随着 X 的增大其下降

表 1 裸球状态下各测点温度

Tab.1 Temperature of each measuring point on unpackaged spherical surface

条件	测点温度/℃								
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
无风	47.4	47.7	25.7	25.5	32.5	24.2	24.3	24.7	19.6
有风	45.2	45.5	23.3	23.2	30.3	22.2	22.1	22.4	18.7

表 2 包装箱状态下各测点温度
Tab.2 Temperature of each measuring point on the spherical surface packaged with box

条件	测点温度/℃											
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
常规	49.4	49.5	27.6	27.3	34.8	26.3	26.7	27.0	22.7	20.5	20.0	20.0
加厚	66.9	67.2	46.1	45.8	50.5	44.3	45.1	45.4	36.7	36.1	20.1	20.0

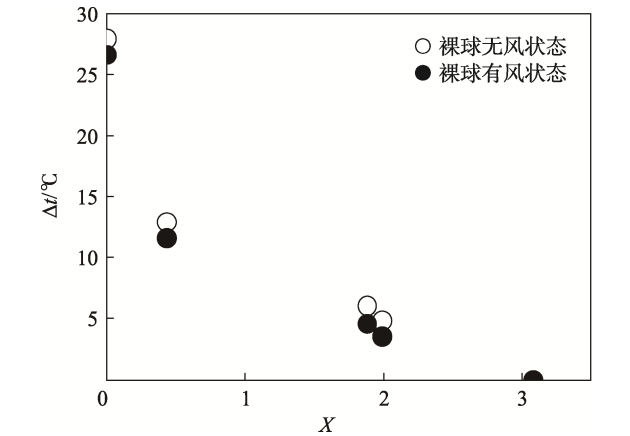


图 3 裸球不同条件下各测点温度与环境温度之差
Fig.3 Variation of temperature difference between measuring points and environment under different conditions for the product without packaging box

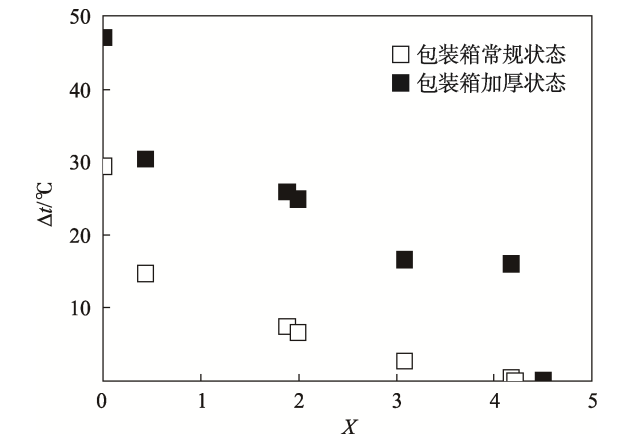


图 4 包装箱不同条件下各测点温度与环境温度之差
Fig.4 Variation of temperature difference between measuring points and environment under different conditions for the product in packaging box

趋势都逐渐减小,但厚包装箱状态下由于保温效果明显,与箱内各测点温度的下降趋势相比,内外壁温度下降的趋势明显增大。

各状态下各测点温度都高于环境温度,且最高温度已高达 66.9℃,这是由于产品自身有一定功率的发热量,再加上加厚包装箱的保温效果,导致热量一直在箱体内累积,因此测点温度较高。此时产品的传热过程是包含产品各部内外壁的导热、空气夹层的对流传热以及热源辐射传热的复合传热模式,因此,加热球面和组件外壁传热能力的强弱可用复合传热表面传热系数 k 表征,即 $q=k\Delta t$,其中 q 为加热球的加

热功率。4 种状态下加热球面和组件外壁的复合传热表面传热系数见表 3。由表 3 可知,裸球状态下的复合传热表面传热系数比包装箱状态下的大,即裸球状态传热性能更优,这是由于裸球无风状态自然对流换热性能较包装箱状态更优。同时,有风状态裸球的换热性能又较无风状态提升明显,这是由于裸球有风状态对流传热属于强制对流传热,其传热性能优于自然对流。此外,常规包装箱的换热性能优于加厚包装箱。

表 3 不同状态下加热球面和组件外壁的复合传热表面传热系数

Tab.3 Compound surface heat transfer coefficient of heating sphere and outer component surface in different states w/m^2				
部件	裸球		包装箱	
	无风	有风	常规	加厚
加热球面	18.5	20.1	17.8	15.8
组件外壁	8.2	9.6	7.5	5.3

3 结语

通过不同状态含热源自热产品热试验平台的设计搭建,对自热产品在有无风及有无包装箱条件下的热状态进行了实验研究,分析了不同状态下产品的传热特性。研究结果表明,裸球状态无风条件下各测点温度比有风条件下各测点温度高,即有风状态下传热性能更优;包装箱状态下,加厚包装箱内的发热球体和球壳组件温度比常规包装箱的高出 18℃左右,其空气夹层以及包装箱内壁比常规包装箱高;对比分析 2 种状态可知,2 种状态下各测点温度随着离热源距离的增加而下降,裸球和常规包装箱状态下各测点温度随着测点相对位置的增大,下降趋势都逐渐减小。厚包装箱状态下箱体内外壁温度下降趋势较箱体内部各测点温度下降趋势明显增强,即不同贮存条件下产品复合传热性能有较大差异。研究结果可为产品热设计及后期环境热考核试验作理论支撑。

参考文献:

[1] 栾大龙. 谈包装设计与产品贮存可靠性的关系[J]. 包装工程, 1996, 16(1): 46—48.
LUAN Da-long. Relationship between Packaging Design and Product Storage Reliability[J]. Packaging En-

- gineering, 1996, 16(1): 46—48.
- [2] 李正, 童小燕, 宋保维. 环境因素对产品贮存寿命影响的模糊确定方法[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(3): 284—286.
LI Zheng, TONG Xiao-yan, SONG Bao-wei. Fuzzy Determination Methods for the Effects of Environmental Factor on Storage Life of Products[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2007, 27(3): 284—286.
- [3] 韩庆田, 刘梦军. 导弹贮存可靠性预测模型研究[J]. 战术导弹技术, 2002(3): 32—36.
HAN Qing-tian, LIU Meng-jun. Prediction Model of Storage Reliability of Missile[J]. Tactical Missile Technology, 2002(3): 32—36.
- [4] 李昌禧, 陈晓玲, 葛强. 密封箱体内相对湿度的数学模型与仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(11): 80—82.
LI Chang-xi, CHEN Xiao-ling, GE Qiang. Mathematical Model and Computer Simulation of Relative Humidity Inside Sealed Boxes[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2005, 33(11): 80—82.
- [5] 陈晓玲. 密封包装箱内温湿度软测量系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
CHEN Xiao-ling. Research on Soft Measurement of Internal Temperature and Relative Humidity in Sealed Packages[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [6] 李明海, 翟贵立, 宋耀祖, 等. 抗事故包装箱热防护结构的设计及其性能分析[J]. 包装工程, 2000, 21(2): 5—8.
LI Ming-hai, ZHAI Gui-li, SONG Yao-zu, et al. Design and Performance Analyses of Thermal Protection Structure of Accident-resistant Packaging Container[J]. Packaging Engineering, 2000, 21(2): 5—8.
- [7] 李明海, 任建勋, 罗群生, 等. 钢-木组合结构在火灾中的热响应数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(2): 68—71.
LI Ming-hai, REN Jian-xun, LUO Qun-sheng, et al. Numerical Simulation of the Thermal Response of Steel-wood Composite Structure on Fire[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2001, 41(2): 68—71.
- [8] 黄鹏, 郝志明, 黎维芬, 等. 火烧环境下包装箱结构的热响应有限元模拟[J]. 固体力学学报, 2013(33): 247—252.
HUANG Peng, HAO Zhi-ming, LI Wei-fen, et al. Thermal Response Simulations of the Packaging Container in Fire Environment Using the Finite Element Method[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013(33): 247—252.
- [9] 苏新明, 付仕明, 裴一飞. 航天器运输用包装箱被动保温性能分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(9): 1334—1340.
SU Xin-ming, FU Shi-ming, PEI Yi-fei. Passive Heat Preservation Analysis on Spacecraft Transportation Package[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(9): 1334—1340.
- [10] LI H M, BRAUN M J, PAUDEL G. Flow Structure and Heat Transfer in a Lower Half Heated and Upper Half Cooled Rectangular Enclosure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(19/20): 3462—3476.
- [11] NASR K B, CHOUIKH R, KERKENI C, et al. Numerical Study of the Natural Convection in Cavity Heated from the Lower Corner and Cooled From the Ceiling[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(7): 772—775.
- [12] ZHAN N Y, XU P W, SUN S M, et al. Study on the Stability and 3-Dimensional Character for Natural Convection in a Rectangular Cavity Heated from Below[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(6): 1647—1654.
- [13] SATHIYAMOORTHY M, BASAK T, ROY S, et al. Steady Natural Convection Flows in a Square Cavity with Linearly Heated Side Wall(s)[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50: 766—775.
- [14] NABAVIZADEH S A, TALEBI S, SEFID M, et al. Natural Convection in a Square Cavity Containing a Sinusoidal Cylinder[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 51: 112—120.
- [15] MEZRHAB A, BOUALI H, AMAOUI H, et al. Computation of Combined Natural-convection and Radiation Heat-transfer in a Cavity Having a Square Body at Its Center[J]. Applied Energy, 2006, 83: 1004—1023.
- [16] 胡宇鹏, 罗群生, 尹霞, 等. BWBZX-1 保温包装箱设计与验证[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 33—38.
HU Yu-peng, LUO Qun-sheng, YIN Xia, et al. Design and Verification of BWBZX-1 Insulated Packaging Container[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(1): 33—38.