

重点推介

不同压力下具有内热源的包装箱内传热特性

胡宇鹏¹, 罗群生¹, 李友荣², 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.重庆大学, 重庆 400044)

摘要: **目的** 研究具有内热源的某产品包装箱在不同压力下的传热特性。**方法** 搭建具有内热源的某产品包装箱传热特性实验系统, 对不同压力下内部具有热源的某产品包装箱内的温度场进行测量, 讨论产品各部件的传热特性, 并基于计算结果, 拟合各部件的传热关联式。**结果** 常压状态下各测点温度较低压状态更易达到平衡, 箱体内温度场的分布符合被加热物四周热边界层厚度分布规律。包装箱内对流传热能力随着压强的增大而增强, 且箱内压强处于较小范围时, 压强的增加对于箱内各部的冷却效果更加显著。**结论** 正常工作的温度范围内, 该产品包装箱内传热能力的强弱主要受对流传热影响, 对流传热能力随着压强的增大而增强; 得到了各部件壁面传热关联式, 误差在 5% 以内。

关键词: 包装箱; 内热源; 压力; 传热特性; 实验

中图分类号: TB482.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0001-05

Heat Transfer Characteristics of a Product with an Inner Heat Source in a Packaging Container under Different Pressures

HU Yu-peng¹, LUO Qun-sheng¹, LI You-rong², LI Ming-hai¹

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

2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: This work aimed to investigate the heat transfer characteristics of a product with an inner heat source in a packaging container at different pressures. The experimental system of heat transfer characteristics in a packaging container was set up to test the temperature field of a product with an inner heat source in a packaging container under different pressures. The heat transfer characteristics of different parts of the product were discussed and the empirical heat transfer correlations were proposed based on the experimental results. The temperatures of various measure points reached equilibrium more easily under constant pressure than those under low pressure, and the distribution of the temperature field was consistent with the principles of the distribution of thermal boundary layer thickness of heated objects. The convective heat transfer ability was enhanced with the increase of the pressure, and the effect was more significant in a small pressure range. In the normal range of working temperature, the convective heat transfer affected the heat transfer ability of the packaging container greatly, and the convective heat transfer ability was enhanced with the increase of pressure. The empirical heat transfer correlations were obtained within 5% deviation.

KEY WORDS: packaging container; inner heat source; pressure; heat transfer characteristics; experiment

军用产品的贮存、运输对环境要求极高, 工程上常采用包装箱结构贮存军用产品及其部件, 保障

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 中国工程物理研究院总体工程研究所创新与发展基金 (14cxj20)

作者简介: 胡宇鹏 (1987—), 男, 四川绵阳人, 博士, 工程师, 主要研究方向为传热传质和武器热安全。

包装箱的安全可靠是武器装备研制的 1 个重要环节。包装箱内温度过高或过低都可能会损伤相关产品部件,因而,包装箱内的传热特性值得深入研究。

陈晓玲^[1]应用软测量技术对包装箱内的温度变化进行了分析,介绍了影响包装箱内温度变化的相关因素。李明海等^[2-3]对火灾环境下抗事故包装箱的热响应进行了研究,建立了热模型以及相应的计算方法。对于内部置有热辐射能力较强产品的包装箱,可以视为内部有热源的封闭腔内的对流传热模型,该模型已被众多学者广泛关注。Moukalled 等^[4]和 Shu 等^[5]对内壁为高温圆筒壁、外壁为方形的封闭腔体内的自然对流进行了数值模拟研究,计算了 $10^4 \leq Ra \leq 10^7$ 下的流场与温度场分布,结果发现,壁面传热性能随着瑞利数 (Ra) 的增加而增强,随着内壁半径与外壁边长的尺寸比的增加而有所削弱。相同模型下, Saha^[6]等和 Lee 等^[7]做了进一步的研究,讨论了外壁存在局部热源时的情况,指出了局部热源尺寸对流动传热特性在 Ra 数较小时影响很小,而在 Ra 数较大时影响十分明显。Shu 等^[8]、Ding 等^[9]和 Lee 等^[10]还研究了内热源偏心率对腔体内传热特性的影响,结果发现,当 Ra 数较小时,向上偏心对流传热能力与向下偏心几乎一致,当 Ra 数较大时,向上偏心弱于向下偏心。Yu 等^[11-12]对不同工质在具有内热源的封闭腔体内的自然对流进行了一系列数值模拟,结果发现,当 $Pr \leq 0.1$ 时,不同普朗特数 (Pr) 下腔体内流场与温度场有较大差异,当 $Pr \geq 0.7$ 时, Pr 数对流场与温度场影响较小。

上述研究主要针对的是封闭腔体在常压状态下的热对流传热,而对于军用包装箱,其内部往往置有特殊材料制成的产品,为了防止包装箱内空气对其的腐蚀及氧化,往往需要使包装箱内部处于不同的压强状态,而目前关于不同压强状态下腔体内的热对流传热研究较为缺乏。这里以某产品包装箱为背景,对包装箱在不同压强状态的传热特性进行实验研究,分析不同状态下包装箱内的传热特性。

1 实验装置

实验系统见图 1, 包装箱内某产品主要分为 2 部分,即直径较小的发热球体,以及直径较大的球体组件,组件表面开有直径较小的孔,因而发热球体与球体组件间为空气。基于安全和经济方面的考虑,用电加热方式模拟某产品发热情况,将用耐热

(200 ℃)硅橡胶包覆的电加热线均匀绕制粘贴在铜球壳内表面制成球面型加热元件,铜球壳内空腔填满硅酸铝纤维。电加热元件两端各引出 2 根电缆,即采用四线制接线方式使直流稳压电源的电流表与电加热元件串联,电压表与电加热元件并联。控制计算机使用基于 VEE 软件平台开发的恒功率自动控制软件控制程式电源,给加热元件提供适当的直流电流和电压,从而自动精确模拟产品的发热。对包装箱进行补加工,安装穿墙密封插座和阀门。阀门上通过管路连接有真空泵进行包装箱内的压强调节。温度测量系统由 T 型热电偶、FLUKE2640A 数据采集器和测试微机组成,压强通过安置在包装箱顶部接口的真空计测量。包装箱安放在试件车上,整个装置置于 TET7045 高低温湿热试验室内以维持恒定 20 ℃ 的环境温度。为了准确研究不同参数下包装箱内对流传热特性,在加热球壳表面、包装箱内部及内外壁面共布置有 12 支 T 型热电偶,具体位置见图 2,热电偶采用高温胶带进行固定。实验中,通过测量包装箱内不同压强状态下箱体内部各层温度变化数据,讨论包装箱内传热特性的变化规律。

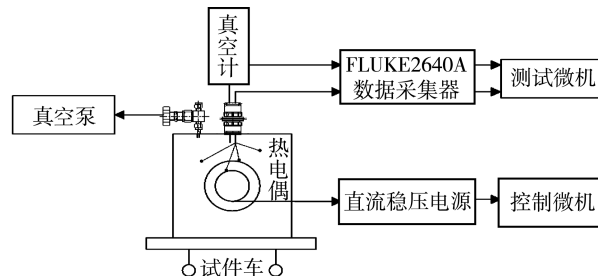


图 1 实验系统

Fig.1 Schematic of experimental system

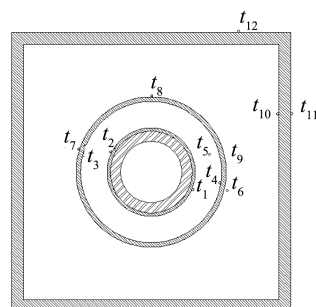


图 2 热电偶布置

Fig.2 Schematic of thermal couple location

2 结果与讨论

实验先进行了压强为 12 Pa 的低压及常压状态下包装箱内的温度分布测量,先通过真空泵将包装

箱内气压抽至 12 Pa，待各测点温度达至平衡后再向箱体内充气以进行常压状态下的测量，各测点温度随时间的变化规律见图 3，可以看出，实验初期，各测点温度受加热球加热影响温度上升明显，在 1000 min 后升温速率降低，温度逐渐趋于平衡。在 7400 min 时，向箱体内充气使得气压恢复至常压状态，此时各测点温度突然上升，分析其原因，是由于充气后气体膨胀做功使得系统温度升高。相比低压状态，常压状态下各测点温度很快达至平衡，且随着时间的推移，常压状态下箱体内对流运动增强，对流换热能力有了显著提升，因而各测点温度有了明显下降，且下降幅度较大。

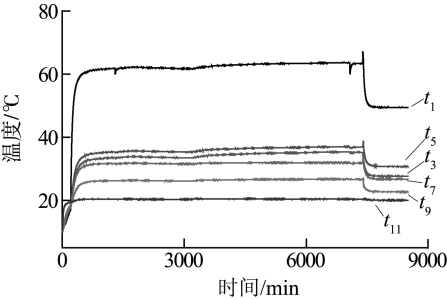


图 3 测点温度随时间的变化
Fig.3 Variation of temperature at the measure points with time

为了准确测量每一截面上的温度，对同一半径下的球面各布置有多个热电偶进行测量，低压及常压状态下各球面不同测点的温度测量结果见表 1。由于加热球以一定功率加热，环境温度恒定为较低温度 20 °C，因而各测点温度由内向外依次降低。值得注意的是，同一半径下球面上部测点温度略高于下部测点温度，例如，两状态下加热球壳上部测点温度 t_2 比下部测点温度 t_1 分别高 0.3 °C 和 0.1 °C，外部组件 t_6 、 t_7 和 t_8 测点中，下部测点 t_6 温度最低，顶部测点 t_8 温度最高。该规律符合被加热物四周热边界层厚度分布规律，被加热物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，即 Xu 等^[13]数模拟研究中的“热羽”现象，物体上部热边界层厚度较厚，下部热边界层厚度较薄。因而，同一半径球面的上部测点温度高于下部测点温度。

表 1 不同球面各测点温度
Tab.1 Temperature at the measure points on different spherical surface

压强	测点温度/°C						
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_6	t_7	t_8
12 Pa	63.6	63.9	35.4	35.1	31.9	32.1	32.3
常压	49.4	49.5	27.6	27.3	26.3	26.7	27.0

压强为 12 Pa 的低压及常压 2 种状态下包装箱内各测点温度的差异较大，为进一步讨论包装箱内压强对箱内传热特性的影响，对不同压强条件下包装箱内温度进行了测量。包装箱内各部测点与环境温度之差随压强的变化规律见图 4，可知，箱内各部分测点温度都随着压强的增加而减小。当压强较小时，各测点温度下降幅度较大，随着压强的增大，各测点温度下降趋势有了明显的减缓。可以认为，当箱内压强处于较小范围时，压强的增加即对流运动的增强对于箱内各部的冷却效果显著，随着箱内压强的增强，冷却效果有了一定程度的削弱。另外，不同位置测点与环境温度的差值在压强较小时较大，随着压强的增大，差值趋于常值。

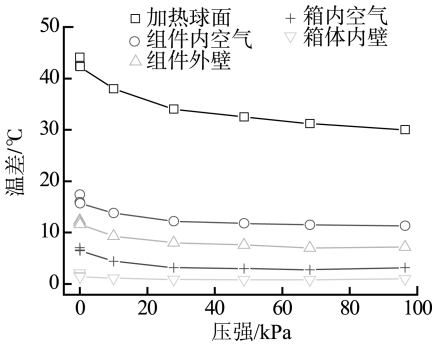


图 4 箱内各测点与环境温度差随压强的变化
Fig.4 Variation of the temperature difference between measure points in the container and the environment with pressure

不同压力下包装箱及各部件内外壁面测点温差见表 2，理论上内外壁面间的传热模式为导热，箱体内压强对其温差没有影响。当组件壁面及包装箱壁面材质选定后，其导热系数为定值，内外壁面温差应为常数。与理论分析不同，从表 2 中的实验数据发现，包装箱及部件内外壁面温差随着箱体内压强的增大而减小，并逐渐趋于常数。分析其原因，各测点位置的热电偶采用导热胶带贴合于壁面的布置方式，实验从常压状态进行测量，此时导热胶带与壁面贴合较好，测点温度即为壁面温度。当采用真空泵抽气进行欠压状态的测量时，胶带内空气难以排尽，胶带内外出现压差，胶带向外有轻微的凸起，内壁热电偶产生位移更靠近加热球壳，所测温度略高，因而内外壁面温差较大。随着包装箱内压力的减小，内外壁温差测量值有所增大。由于组件几何结构为球体，内壁为凹面，相比外壁的凸面以及包装箱内外壁的平面来说，气体更加难以排尽，上述现象在组件内外壁温度测量中更加明显。

表 2 包装箱及部件内外壁测点温差

Tab.2 Temperature difference of measure points of the container and the inner wall and external wall of component

压强/Pa	$(t_3 - t_7) / ^\circ\text{C}$	$(t_4 - t_6) / ^\circ\text{C}$	$(t_{10} - t_{11}) / ^\circ\text{C}$
12	3.3	3.2	1.3
37.6	2.1	2.1	0.9
50.2	1.8	2	0.9
27 800	0.9	1	0.2
48 700	0.9	1	0.1
68 200	0.8	0.9	0.2
96 400	0.9	1	0.2

考虑到各实验工况下,各测点温度都在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,最高温度达到 $64.1\text{ }^\circ\text{C}$,此时包装箱内传热过程不仅有对流传热,还包括辐射传热模式,特别是当压强较低时,辐射传热的影响更不能忽略。各部件壁面传热能力的强弱可用复合传热表面的传热系数来表征,包括对流传热表面传热系数及辐射传热折算出来的表面传热系数。加热球面及组件外壁复合传热表面传热系数随包装箱内压强的变化规律见图 5,可知,加热球面和组件外壁的复合传热表面传热系数都随着包装箱内的压强增大而增大,即包装箱内的传热过程随压强的增大变得更加强烈。参考图 4 可知,箱内压强越小,各部件温度越高,辐射传热能力越强,此时对流传热能力较弱。随着箱内压强的增大,各部件温度逐渐降低,辐射传热能力减弱,而此时对流传热能力却有所增强。由包装箱内总的传热过程随压强增大而变得更加强烈可知,压强较小时,虽然箱内辐射传热能力较强,但对流传热能力太弱,使得复合传热表面传热系数较小,随着压强的增大,辐射传热能力逐渐减弱,对流传热能力逐渐增强,增强幅度大于辐射传热能力的削弱程度,因而复合传热表面传热系数有所增加。在正常工作的温度范围内,该产品包装箱内传热能力的强弱主要受对流传热影响,对流传热能力的强弱直接决定了包装箱内总的传热能力的强弱。由图 5 可知,加热球面复合传热系数远大于组件外壁,即加热球面壁面传热性能较组件外壁更强,且随着压强的增大,两部件壁面的复合传热系数差值进一步增大。

根据计算结果,对数据进行回归整理,可以得到加热球面的传热关联式: $k=(-8 \times 10^{-11}P^2+2 \times 10^{-5}P+3.2503)(\Delta t/L)^{1/4}$; 组件外壁的传热关联式: $k=(-2 \times 10^{-10}P^2+3 \times 10^{-5}P+1.2130)(\Delta t/L)^{1/4}$ 。式中特征长度 L 参考不同的几何结构进行选取,加热球面的传热模

型中内壁为加热球壳,外壁为组件球壳组成的环形腔体结构,其特征长度往往选取为组件内径与加热球壳半径之差,即 $R_{\text{加热球}}-R_{\text{组件内径}}$ ^[14]。组件外壁的传热模型中内壁为组件球壳,外壁为矩形包装箱的异型环形腔体结构,其特征长度 L 往往选取为 $1/2$ 矩形高度与组件外径之差,即 $H/2-R_{\text{组件外径}}$ ^[15]。各部件壁面传热关联式的应用范围为 $0 < P \leq 0.1\text{ MPa}$, $0 < \Delta t < 65\text{ }^\circ\text{C}$ 。

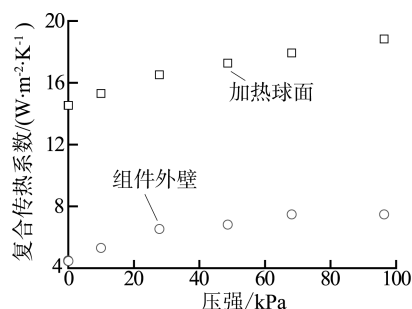


图 5 部件表面复合传热系数随压强的变化

Fig.5 Variation of compound heat transfer coefficient of different components with pressure

对于加热球面和组件外壁,壁面复合传热表面传热系数实验计算值和拟合值的误差分别在 1.5% 和 5.0% 以内,见图 6,两者的平均误差分别为 0.5% 和 1.2% 。

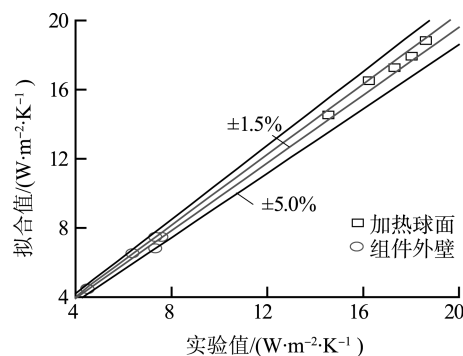


图 6 表面复合传热系数实验值和拟合值的比较

Fig.6 The comparison of the experimental result for the heat transfer coefficient with the proposed correlation

3 结 语

通过搭建包装箱内对流传热特性实验台,对内部具有热源的某产品包装箱内的传热特性进行实验研究,讨论不同压力下包装箱内的传热情况。研究表明:常压状态各测点温度较低压状态更易到达平衡,且各测点温度有明显下降;由于“热羽”现象,同一半径球面上部测点温度高于下部测点温度;包装箱内对流传热能力随着压强的增大而增强,

且箱内压强处于较小范围时,压强的增加对于箱内各部的冷却效果更加显著;当进行低压状态的测量时,胶带内外出现压差,内壁热电偶发生位移,所测温度略高,内外壁面温差较大,该现象在几何结构为球体的组件内外壁温的测量中更加明显;在正常工作的温度范围内,该产品包装箱内传热能力的强弱主要受对流传热影响,对流传热能力的强弱直接决定包装箱内总的传热能力的强弱;基于计算结果,采用线性回归方法,得到各部件壁面复合传热系数的传热关联式。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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, 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, 2001, 41(2):68—71.
- [4] MOUKALLED F, ACHARYA S. Natural Convection in the Annulus between Concentric Horizontal Circular and Square Cylinders[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1996, 10(3):524—531.
- [5] SHU C, ZHU Y D. Efficient Computation of Natural Convection in a Concentric Annulus between an Outer Square Cylinder and an Inner Circular Cylinder[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2002, 38(5):429—445.
- [6] SAHA S, SAHA G, ISLAM M Q. Natural Convection in Square Enclosure with Adiabatic Cylinder at Center and Discrete Bottom Heating[J]. Daffodil International University Journal of Science and Technology, 2008, 3(1):29—36.
- [7] LEE J M, DOO J H, HA M Y, et al. Effects of Thermal Boundary Conditions on Natural Convection in a Square Enclosure with an Inner Circular Cylinder Locally Heated from the Bottom Wall[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65(10): 435—450.
- [8] SHU C, XUE H, ZHU Y D. Numerical Study of Natural Convection in an Eccentric Annulus between a Square Outer Cylinder and a Circular Inner Cylinder Using DQ Method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(17):3321—3333.
- [9] DING H, SHU C, YEO K S, et al. Simulation of Natural Convection in Eccentric Annuli between a Square Outer Cylinder and a Circular Inner Cylinder Using Local MQ-DQ Method[J]. Numerical Heat Transfer, Part A-Applications, 2005, 47(3):291—313.
- [10] LEE J M, HA M Y, YOON H S. Natural Convection in a Square Enclosure with a Circular Cylinder at Different Horizontal and Diagonal Locations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(25): 5905—5919.
- [11] YU Z T, HU Y C, FAN L W, et al. A Parametric Study of Prandtl Number Effects on Laminar Natural Convection Heat Transfer from a Horizontal Circular Cylinder to Its Coaxial Triangular Enclosure[J]. Numerical Heat Transfer, Part A-Applications, 2010, 58(7): 564—580.
- [12] YU Z T, XU X, HU Y C, et al. Unsteady Natural Convection Heat Transfer from a Heated Horizontal Circular Cylinder to Its Air-Filled Coaxial Triangular Enclosure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(7):1563—1571.
- [13] XU X, YU Z T, HU Y C, et al. A Numerical Study of Laminar Natural Convective Heat Transfer around a Horizontal Cylinder Inside a Concentric Air-Filled Triangular Enclosure[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1):345—355.
- [14] YOO J S. Flow Pattern Transition of Natural Convection in a Horizontal Annulus with Constant Heat Flux on the Inner Wall[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2005, 15(7): 698—709.
- [15] HU Y P, LI Y R, WU C M. Comparison Investigation on Natural Convection of Cold Water near Its Density Maximum in Annular Enclosures with Complex Configurations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72(5):572—584.