

# 双室热保护法测 VIP 导热系数的测试装置及实验研究

阚安康, 韩厚德

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

**摘要:** 传统的测试真空绝热板(VIP)导热系数的平板热保护法,受VIP尺寸限制及热桥效应影响,存在弊端。通过分析双室热保护法测定VIP导热系数的原理,设计了测试装置。外室作为热保护装置,内室作为测试加热装置,基于稳态下测试VIP平板的导热系数,该装置不受VIP尺寸限制,减少了热桥效应。找出了影响测试结果的因素做了理论误差分析,与标定值对比,测试结果较精确。该装置可以用于VIP出厂前导热系数的测试及用过的VIP老化程度检验。

**关键词:** 真空绝热板(VIP); 双室热保护法; 导热系数; 测试技术

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 引言

VIP 主要是依靠其内部真空度来提高其绝热性能的,当意外破损或使用时间长久气体渗透到板内时,真空度被破坏,其导热系数大大提高,保温性能急剧下降<sup>[1-2]</sup>。为检测VIP老化程度,也有必要对其导热系数进行测定。

目前,国内外主要依据大平板热保护法原理做成的测试仪器作为VIP导热系数的测试装置。这种装置是基于一维稳态导热下,采用热流量方式计算VIP导热系数,稳定时间长,测试精度高。但受仪器形体尺寸的局限,一般只能选取 200 mm × 200 mm × 20 mm 或 300 mm × 300 mm × 40 mm 的VIP作为在相同生产工艺下的样板进行测试,测试过程一般只能在实验室中进行。而企业需求的VIP尺寸一般远大于这一规定,现有测试技术条件下无法获取比规定尺寸大的VIP导热系数。本研究采取的基于稳态下双室热保护法测定VIP导热系数的方法,可以现场操作且不受尺寸限制,克服了传统测试技术的弊病。

## 1 测试仪尺寸确定及原理

平板热保护法是工程上广泛采用的测试板状保温材料导热系数的方法,精确度较高<sup>[3]</sup>。但采用该技术在测试VIP导热系数时,受VIP样品的尺寸的影响就要考虑VIP边缘热桥效应,不能将其作为一维导热处理<sup>[4]</sup>。在平板法测试VIP的导热系数时,通过热防护及边缘的热流大约占整体热流的7%<sup>[5]</sup>。为了不改变VIP尺寸,研究设计了双室热保护导热系数测试仪,如图1所示。

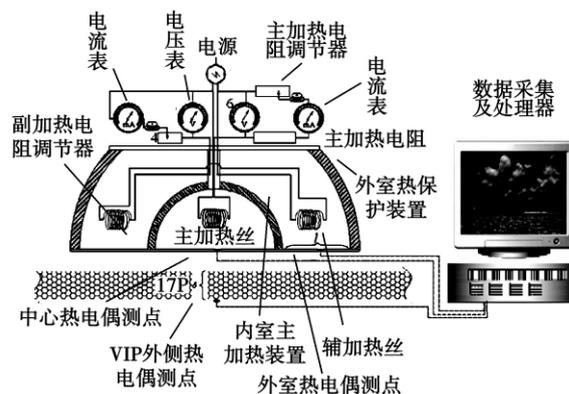


图1 双室热保护测试装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a dual-chamber heat protection testing device

测试装置主要由作为热保护的外室加热装置和用于测试用的内室加热装置组成。外室和内室中注满热容性较好的油脂或水,采用电阻和加热丝调节加热量。其构成包括电源、主加热电阻调节器、主加热电阻、内室主加热装置及加热丝组成的主加热循环用以维持内室的温度 $t_0$ ,并使其产生的热量全部以一维热传导方式通过其所覆盖的VIP区域;而由

收稿日期: 2010-09-13; 修订日期: 2010-12-03

基金项目: 上海市校内基金资助项目(2008468); 上海市教委重点学科基金资助项目(J50603)

作者简介: 阚安康(1981-),男,山东济宁人,上海海事大学讲师,博士研究生。

电源、副加热电阻调节器及辅加热丝所组成的辅加热系统主要是维持外室内的温度与内室的温度相一致。

### 1.1 双室尺寸的确定

本装置设计的关键是处理好内室与外室间隔距离  $l$  及内外室的尺寸。内室和外室的尺寸是确保内室所有加热量完全沿一维方向传导,使加热量通过内室所有覆盖 VIP 区域<sup>[6]</sup>。本研究设置热端温度为 45 °C,冷端温度为 20 °C, VIP 厚度为 40 mm<sup>[7]</sup>,并对 VIP 和加热装置进行了网格划分和有限元计算,计算结果如图 2 所示。

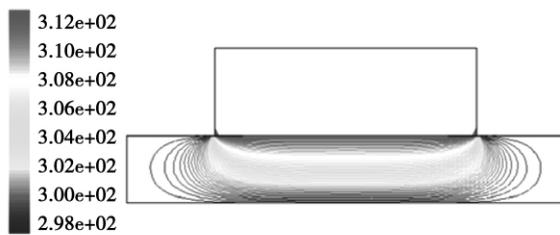


图 2 VIP 剖面温度场等温线分布示意图  
Fig. 2 Schematic drawing of the distribution of the isotherm in the VIP section

半径为  $r$  的圆形区域对 VIP 一侧加热并维持在这一温度时,通过 VIP 的等温线在两侧呈一定弧度分布,而中部温度呈梯度分布,不均匀弧度温度场所占区域沿径向约为  $1.5\delta$ ,即  $l$  的长度应不小于  $1.5\delta$ ,本研究为了测量的准确性,选择  $l = 2\delta$ 。

在 VIP 生产中,受真空室尺寸的限制, VIP 厚度一般不超过 40 mm。内室半径选择一般不小于所测试的 VIP 的厚度  $\delta$ ,即  $r_n \geq \delta$ <sup>[8]</sup>。本测试选择了  $r_n = 50$  mm,这样外室尺寸比所测量 VIP 的厚度大的多,可将其简化为沿厚度方向的一维传热。为得到稳定的一维温度场,外室半径尺寸需满足  $r_w \geq 3\delta$ ,本测试选择  $r_w = 130$  mm。外室高度理论上应远高于内室高度,即内室作成球冠形状,应保证其全部覆盖在外室液体内部,才能确保内室热量全部单向并沿 VIP 厚度方向传递<sup>[9]</sup>。本研究中设计的装置外室高度约为内室高度一倍,可保证即便在稍倾斜的前提下仍能满足外室内液体完全覆盖内室壁面。

### 1.2 测试原理

选用热电偶分别测量内、外室之间区域液体温度、腔室内液体温度、被内箱罩住 VIP 区域表面中心温度及相应外表面中心温度。

开启内外室加热装置对腔室内液体加热,调节

内外室加热装置电阻调节器,将内外室之间液体温度维持在设定值。本装置采用 PLC 控制加热单元,先稳定主加热装置加热温度,使腔室内液体首先达到设定值,一般选择高于当前环境温度 20 °C 以上,优选在 25 °C<sup>[9]</sup>。利用内外室之间温差作为正负反馈量来调节辅加热装置电阻,使外室内液体温度与内室内液体温度持平,从而保证腔室内加热量以一维方式沿 VIP 厚度方向传递。

沿 VIP 厚度方向热传导开始属于非稳态,因 VIP 具有一定蓄热作用,也就是开始时进入 VIP 的热流量与同一时刻由 VIP 传导到外表面的热流量并非一致,要建立稳定传热温度梯度需要一定时间延迟。为了消除这种影响,需要对稳态进行判断。本装置以测试环境大空间为冷端,以内室中心对应的 VIP 外侧测点温度为冷端温度,忽略环境温度波动对实验的影响,采用差分法判断,数据采集系统设置每 10 s 采集一次数据, VIP 外表面测点测取的相邻 10 组数据满足:

$$\left| \frac{t_{w,i+1} - t_{w,i}}{t_{w,i}} \right| \leq 10^{-3}$$

即可以认为系统已经达到稳态,可以根据测试的数据进行计算。

通过 VIP 的热量主要是取决于内室加热量  $Q$ ,可以通过测量加热丝两端的电压及电流获得。该装置中电压表读数均为加热丝两端电压值,电流表读数为加热回路中电流值,即:

$$W = UI = Q \tag{1}$$

式中:  $W$ ——内室加热丝加热功率, W;  $U$ ——内室加热丝两端电压降, V;  $I$ ——内室加热回路电流, A;  $Q$ ——内室沿 VIP 厚度方向传递的热流量, W。

又根据傅立叶定律可得:

$$Q = \lambda_{VIP} \frac{A_n}{\delta} (t_{n,VIP} - t_{w,VIP}) = \lambda_{VIP} \frac{\pi r_n^2}{\delta} (t_{n,VIP} - t_{w,VIP}) \tag{2}$$

式中:  $\lambda_{VIP}$ ——VIP 的导热系数, W/(m · K);  $A_n$ ——内室底面圆覆盖的 VIP 的面积, m<sup>2</sup>;  $\delta$ ——VIP 的厚度, m;  $t_{n,VIP}$ ——内室所覆盖的 VIP 区域中心测点温度, °C;  $t_{w,VIP}$ ——内室所覆盖的 VIP 区域相对应的外侧测点温度, °C;  $r_n$ ——内室所覆盖的 VIP 区域半径, m。

VIP 的导热系数可以根据式(1)和式(2)整理得:

$$\lambda_{VIP} = \frac{\delta}{\pi r_n^2} \cdot \frac{UI}{t_{n,VIP} - t_{w,VIP}} \tag{3}$$

外室加热量用以维持两室温度相同,其加热电压、电流值主要是作为设备稳定性的参考。

## 2 影响因素及解决方案

### 2.1 VIP尺寸的影响及应对措施

本装置为了可以测试生产状况下的VIP,选择了其极限厚度40 mm作为设计厚度<sup>[10]</sup>。因VIP隔气结构多选用含有金属层或防辐射层的多层聚酯基薄膜,其导热系数很大,(特别是作为防辐射层的铝箔,其导热系数可高达225.5 W/(m·K))与芯层导热系数相比,可相差几个数量级(芯材导热系数在真空状态下可低至0.004 W/(m·K))<sup>[11]</sup>。在测试过程中,只有中心区域热量是沿VIP厚度方向传递,有部分热量可能不经过VIP的内部而是沿表面膜由热端向冷端传递,即形成热桥<sup>[12]</sup>,如图3所示。

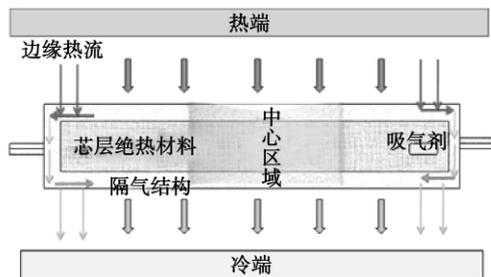


图3 VIP测试过程中热桥示意图

Fig. 3 Schematic drawing of the heat bridge in a VIP testing process

如果测试的VIP尺寸太小,甚至小于外室的尺寸,就会影响测试结果的准确性。所以本测试装置所测试的VIP外形尺寸,长宽方向上应超过外室形体尺寸,甚至越大越精确。

### 2.2 环境温度变化的影响及应对措施

测试时选择环境空间作为冷端,但环境温度并非恒定值,其会随着时间推移有所波动<sup>[13]</sup>。由于外界温度的变化,在相同电压及加热温度条件下所测得的VIP两端的温差会有所不同。为了消除外界温度波动的影响,必须采取措施使环境温度尽量恒定。一般可采取3个方面的措施。

(1) 控制测试环境温度恒定。可选择恒温室作为测试环境,但这需要建立恒温室,会增加企业额外投入,也为测试带来不便。或可选择具有一定保温作用的相对狭小空间作为测试环境室,确保测试过程中温度是恒定的。另外环境气流不均匀或存在流动,会增大VIP表面与环境的热对流作用,也会影响测试精度。所以需要测试环境气流组织较为均匀,

且没有空气运动。

(2) 缩短测试时间。VIP在封装前一般都会对芯材预热处理,此时芯材温度高于环境温度,选择VIP封装完成后进行测试可以缩短芯材蓄热时间。让设备内外室温度恒定后,直接进行测试,缩短测试的时间间隔。

(3) 如果外界环境温度变化比较明显,可以改变内外室的加热量,从而改变通过VIP的热流量和传热温差,多次测量VIP导热系数取平均值的方式,尽量消除环境温度变化的影响。如果内外室温度远高于环境温度,测试温差较大,外界细微的温度变化就可忽略不计。

## 3 实验示例

为验证实验装置的实际应用效果,选择了3块不同规格的VIP进行实测实验。VIP样板均有国内生产厂家提供,其具体相关信息如表1所示。型号1-HD-玻璃纤维-VIP,型号2-TLC-PU-VIP,型号3-GT-玻璃纤维-VIP。

表1 VIP样板相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of a VIP templet

规格(L×W×δ)	真空度 /Pa	导热系数 /W·(m·K) <sup>-1</sup>	使用温度 /℃
型号1 280×280×12	10 <sup>-3</sup>	0.0048	-50~70
型号2 300×300×18	10 <sup>-3</sup>	0.0083	-50~70
型号3 300×300×22	10 <sup>-3</sup>	0.0045	-50~70

\* 说明:数据为厂家提供;规格中L×W×δ的单位为mm×mm×mm;

为了便于简化计算,将实验设备的内室半径 $r_n=0.05$  m代入式(3)中得:

$$\lambda_{VIP} = 127.32 \frac{\delta UI}{t_{n,VIP} - t_{w,VIP}} \quad (4)$$

实验过程及参数设置参照GB/T10294-88、GB/T3399-1982和ASTMC1484-00。当前环境温度为19.3℃,设定内室温度为43℃,开启实验装置对内外室中的液体加热,当内外室液体温度达到设定值时,开始数据采集系统进行测试。实验过程中系统根据平衡条件自动调节内室加热丝的加热量,并根据上述条件判断是否进入稳态。实验过程中只要记录加热的电流和电压,测取VIP板内外表面的温差,即可求取其导热系数。待系统进入稳态后,将数据采集并运算,结果如表2所示。

表 2 试验 1 测试数据表

Tab.2 Table of test data in test No.1

	$U$	$I$	$\delta$	$t_{n,VIP}$	$t_{w,VIP}$	$\lambda_{VIP}$	耗时
	/V	/A	/mm	/°C	/°C	/W·(m·K) <sup>-1</sup>	/s
型号 1	0.38	0.19	12	41.8	20.6	0.0052	620
型号 2	0.4	0.2	18	42.2	22.0	0.0091	580
型号 3	0.26	0.13	22	42.1	22.8	0.0049	820

改变内室设定温度为 53 °C, 重复上述实验, 结果如表 3 所示。

表 3 试验 2 测试数据表

Tab.3 Table of test data in test No.2

	$U$	$I$	$\delta$	$t_{n,VIP}$	$t_{w,VIP}$	$\lambda_{VIP}$	耗时
	/V	/A	/mm	/°C	/°C	/W·(m·K) <sup>-1</sup>	/s
型号 1	0.45	0.225	12	52.1	22.9	0.0053	580
型号 2	0.49	0.245	18	52.6	21.7	0.0089	520
型号 3	0.33	0.165	22	52.2	22.3	0.0051	740

表 4 Netzsh HFM 测试数据

Tab.4 Netzsh HFM test data

	热端温 度/°C	冷端温 度/°C	平均温 度/°C	样品厚 度/mm	导热系数/ W·(m·K) <sup>-1</sup>	温度 梯度	耗时 /s
型号 1	35.02	10.01	22.52	12	0.0050	1999.0	1860
型号 2	35.01	15.00	25.00	18	0.0087	1999.0	1620
型号 3	35.02	11.02	23.02	22	0.0048	1999.0	1840

试验测取的数据取平均值后与样品出厂参考值存在较大差异, 为验证设备测得数据的准确性, 将 3 块样本选用 Netzsh HFM 设备再次进行测试, 测试结果如表 4 所示。对本装置 2 次实验取得的导热系数取平均值后, 与 Netzsh HFM 测取的数据进行比较对照发现, 两者测取的数据基本一致, 都高于出厂参考值。这是因为 VIP 在使用过程中, 因板内外压差致使部分气体通过隔气结构或热封口渗入板内, 引起板内压力升高而使导热系数上升。基于本装置测取的数据中, VIP 平均温度高于 Netzsh HFM, 故而得到的导热系数稍高于后者。本装置只能设置内外室内液体温度, 根据环境温度来调节 VIP 平均温度和温差, Netzsh HFM 设备可根据具体情况来调节热端和冷端水浴的温度, 从而较为精确地控制 VIP 两端温差。所以本装置不适用于基于某种边界条件下 VIP 导热系数的测试, 其测试数据可作为工厂或研究单位研制 VIP 时的参考数据。本装置更换 VIP 测试时不用再次稳定设备热端, 与 Netzsh HFM 相比较, 耗时短, 效率高。

### 4 理论误差分析

采用大平板热保护法(如 Netzsh HFM 测试)对 VIP 进行导热系数测量时, 因 VIP 厚度相对于其长度和宽度而言并不是无限小, 加之 VIP 的隔气结构材质易于引起热桥现象, 测试中存在误差。

本装置采用双室热保护法测取 VIP 的导热系数, 避免了测试中热桥效应的影响, 测试精度较之大平板热保护法有所提高。对式(3)取对数展开得:

$$\ln \lambda_{VIP} = \ln \delta + \ln U + \ln I - (\ln \pi + 2 \ln r_n + \ln(t_{n,VIP} - t_{w,VIP})) \quad (5)$$

两边同时进行全微分, 即得:

$$\frac{d\lambda_{VIP}}{\lambda_{VIP}} = \frac{d\delta}{\delta} + \frac{dU}{U} + \frac{dI}{I} - 2 \frac{dr_n}{r_n} - \frac{d\Delta t}{\Delta t} \quad (6)$$

导热系数对应的综合误差就可以表示为:

$$\Delta \lambda_{VIP} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \delta}{\delta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_n}{r_n}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t}\right)^2} \quad (7)$$

将测试 VIP 厚度、内室半径的仪器精度 0.01 mm, 热电偶精度 0.1 °C 及电压电流表的精度 0.05 级带入式(7)中便可以得到导热系数的综合误差。例如样板 1 的误差为  $2.5 \times 10^{-5}$ 。本测试装置采用的仪器仪表精度较高, 并采用自动控制和自动数据采集系统, 可确保所计算的数据是可信的。

### 5 结 论

双室热保护法测试 VIP 的导热系数, 改变了以往大平板稳态热保护法测试 VIP 导热系数时受 VIP 形体尺寸限制的弊端, 简便易行。通过实验结果对比, 证明该装置测试结果可信度高, 系统误差小, 可以广泛应用于 VIP 流水线生产时样品现场检测及 VIP 使用过程中老化程度的判断。采用双室热保护法测 VIP 的导热系数时应注意: 测试环境温度尽量恒定, 气流组织均匀且无相对运动; 内外室设定温度一般要高于环境温度 20 °C 以上; 测试时尽量应选择尺寸较大的 VIP 板, 避免热桥效应影响。

#### 参考文献:

[1] 温永刚, 王先荣, 杨建斌, 等. 真空绝热板技术及其发展 [J]. 低温工程. 2008(6): 35-39.  
WEN Yong-gang, WANG Xian-rong, YANG Jian-bin, et al. Vacuum adiabatic plate technology and its development [J]. Cryogenic

- engineering, 2008 (6): 35 - 39.
- [2] CAPS R, BEYRICHEN H. Monitoring gas pressure in vacuum insulation panels [C] // Proceedings 7<sup>th</sup> International Vacuum Insulation Symposium, 2005 (9): 57 - 66.
- [3] MITSUO KUDON, KIYOSHI OHIRA, HIROKAZU NAKAMURA et al. Simple method to support optimization of layouts for vacuum insulation panels (VIPs) for refrigerators [J]. Heat Transfer Asian Research, 2006, 35(7): 453 - 462.
- [4] WESSLING F C, MOSER M D, BLACKWOOD J M. Subtle issues in the measurement of the thermal conductivity of vacuum insulation panels [J]. Journal of Heat Transfer, 2004(4): 155 - 160.
- [5] 张双喜, 陈海涛, 李世全. 轻质保温材料导热系数现场测试的研究 [J]. 新型建筑材料, 2006(7): 73 - 76.  
ZHANG Shuang-xi, CHEN Hai-tao, LI Shi-quan. Study of the on-site testing of heat conduction coefficients of light insulation materials [J]. New type building materials. 2006 (7): 73 - 76.
- [6] Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties By Means of the Heat Flow Meter Apparatus [R]. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, ASTM C518-98, 1998.
- [7] 王唯威, 淮秀兰. 分形多孔介质导热系数数值模拟分析 [J]. 工程热物理学报, 2007(5): 835 - 837  
WANG Wei-wei, HUAI Xiu-lan. Numerical simulation and analysis of the heat conduction coefficient of fractal porous media [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007(5): 835 - 837.
- [8] 奥西波娃 B A. 传热学试验研究 [M]. 蒋章焕, 王传院, 译. 北京: 高等教育出版社, 1982.  
Oxibova B A. Experimental study of heat transfer [M]. Translated by JIANG Zhang-huan, WANG Chuan-yuan. Beijing: Higher education press. 1982.
- [9] Standard specification for vacuum insulation panels [R]. ASTM C1484-00, American Society for Organic and No homogeneous Inorganic Thermal Insulations, West Conshohocken. 2000.
- [10] 杨春光, 高霞. 真空绝热板的热桥效应及其优化措施 [J]. 真空, 2010(3): 78 - 82.  
YANG Chun-guang, GAO Xia. Heat bridge effect of a vacuum insulation plate and its optimization measures [J] Vacuum. 2010 (3): 78 - 82.
- [11] 阚安康, 韩厚德, 王友聪. 真空绝热板导热系数测量装置的设计 [J]. 上海海事大学学报, 2006(3): 9 - 11.  
HAN An-kang, HAN Hou-de, WANG You-cong. Design of a device for measuring the heat conduction coefficient of a vacuum insulation plate [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2006 (3): 9 - 11.
- [12] SCHWAB H, STARK C. Thermal bridges in vacuum-insulated building facades [J]. Journal of Thermal Environment and Building. 2005 (4): 345 - 357.
- [13] ENPIERIK M J, JOHANNES J M. CAUBERG. Integrating vacuum insulation panels in building constructions: an integral perspective [J]. Construction Innovation, 2007, 7(1): 38 - 53.
- [14] 南京玻璃纤维研究设计院. GB/T10295 - 2008, “绝热材料稳态热阻及有关特性的测定热流计法” [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
Nanjing Glass Fiber Research and Designing Institute. GB/T10295-2008, “Heat flux meter method for determining the steady state heat resistance and relevant characteristics of insulation materials” [S]. Beijing: Chinese Standard Press. 2008.
- [15] 化学工业部. GB/T3399-2009, “塑料导热系数试验方法-护热平板法”. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
Ministry of Chemical Industry. GB/T3399-2009, “Test method for measuring the heat conduction coefficient of plastics” [S]. Beijing: Chinese Standard Press. 2009.

(陈滨 编辑)



## 生物质热解气化技术(2011-X-009)

生物质热解气化技术能够将任何木质纤维结构或碳氢结构的原材料在 10 s 内、700 °C 以下热解成碳氢化合物。该技术使用水蒸气为气化媒介,不消耗水资源。产生的碳氢气体纯度高,热值 1 672 000 kJ 以上(视不同的原材料而言),可以直接接入居民生活用气管道,或者接入燃气轮机发电,或者净化后生产无水甲醇或乙醇,直接加入汽油中部分替代化石燃料。

该技术在加拿大已有工业示范项目,运行超过 3000 h,现有三个商业项目在建设。

该技术的优点是几乎不消耗水资源,特别适合在缺水地区推广。适用的原材料品种广泛,可以是各类丛生灌木、农业秸秆、生活垃圾和劣质煤、沥青、重油渣、石油焦、油砂等。由于是低温气化,不会有二恶英气体、呋喃气体和其它氯类酸性气体排放,有限废水可以 100% 回收利用,占原材料重量 5% 的废渣已经碳化无害,可以安全填埋或用作建材填料。

(需要者请与编辑部联系)

title colony algorithm

双室热保护法测真空绝热板导热系数的装置及实验研究 = **Device for Measuring the Heat Conduction Coefficient of a Vacuum Insulation Plate By Using a Dual-chamber Heat Protection Method and Its Experimental Study** [刊,汉] KAN An-kang, HAN Hou-de ( College of Merchant Ships, Shanghai Maritime University, Shanghai, China, Post Code: 201306) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6) . - 751 ~ 755

The traditional plate heat protection method for testing the heat conduction coefficient of a vacuum insulation plate (VIP) is limited by the dimensions of a VIP and affected by the heat bridge effect, thus, there exist certain demerits. The authors introduced a principle for determining the heat conduction coefficient of a VIP by using a dual-chamber heat protection method and designed a testing device. With the outer chamber serving as a heat protection device and the inner chamber serving as a testing and heating device, the heat conduction coefficient of the VIP was tested under a steady state. The device is not limited by the dimensions of the VIP with the heat bridge effect being reduced. The authors also analyzed the factors influencing the test results and the theoretical error. The test result was relatively precise when compared with the calibrated value. The device under discussion can be used for testing the heat conduction coefficient of a VIP before it leaves the works and inspecting the aging degree of any used VIP.

**Key words:** vacuum insulation plate (VIP), dual-chamber heat protection method, heat conduction coefficient, testing technique

基于 TMS320C31 + FPGA 数字控制器的主被动磁悬浮飞轮一体化控制 = **Integrated Control of a Driving and Driven Magnetically Levitated Flywheel Based on a TMS320C31 + FPGA (Field-programmable Gate Array) Digital Controller** [刊,汉] ZHANG Fu-xin, LI Guang-jun, LIU Gang, et al ( College of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(6) . - 756 ~ 759

In the light of the demands for a low power consumption, high reliable and integrated driving and driven magnetically levitated flywheel with a driven control in three degrees of freedom along the axial direction and a driving control in two degrees of freedom along the radial direction, integrated and designed was its controller. Firstly, a mathematical model was established for the driving magnetic bearing with proper control tactics being chosen. On this basis, an integrated digital control system with DSP + FPGA serving as the core, including a signal modulation, outer storage, driving and power amplification module, was presented and experimentally verified. The test results show that when the flywheel is levitated in a static state, the radial runout of the rotor is around 70 mV, about 8.7% of the protection clearance (the peak-peak value is about 8 V). When the flywheel is accelerated to its rated speed, the radial runout of the rotor is around 1.2 V, around 15% of the protection clearance. When operating at the rated speed, the power consumption of the magnetic bearing system of the magnetically levitated flywheel is only 5.5 W, thus meeting the requirements for the performance of the flywheel. **Key words:** driving and driven magnetic levita-