

文章编号:1671-5497(2005)04-0368-05

# 开式二相热虹吸管的传热特性

苏俊林<sup>1</sup>, 卢 军<sup>2</sup>, 王震坤<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022; 2. 大连冰山空调设备有限公司, 辽宁 大连 116033)

**摘要:**为了研究开式二相热虹吸管的传热特性,对其内部流动进行了理论分析,推导出了影响其工作极限——阻流现象的判据。在实验基础上建立了考虑开式二相热虹吸管倾角、开孔数、孔径及热流密度等影响的当量传热系数的经验公式。对比实验表明:开式热管的当量传热系数为闭式热管的85%以上,总传热量为相同工况下闭式二相热虹吸管的90%以上,而成本只有其50%左右。

**关键词:**热工学;开式二相热虹吸管;传热特性;余热回收

**中图分类号:**TK126 **文献标识码:**A

## Heat Transfer Characteristics of Open Two-phase Thermosyphon

SU Jun-lin<sup>1</sup>, LU Jun<sup>2</sup>, WANG Zhen-kun<sup>1</sup>

(1. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Dalian Ice Mountain Air Conditioning Equipment Co. Ltd., Dalian 116033, China)

**Abstract:** In order to study the heat transfer characteristics of the two-phase thermosyphon, its internal flow was analysed theoretically, a criterion affecting its working limit was deduced. By studying the heat transfer characteristics through experiments, an experiential formula of the equivalent heat transfer coefficient was established including the influences of the inclination, the hole number, the hole diameter and the heat flux density. Contrast experiments showed that the equivalent heat transfer coefficient of the open thermosyphon is above 85% of that of the closed one, and its total heat transfer quantity is above 90% of that of the closed one under the same working condition, but its cost is only about 50% of that of the closed thermosyphon.

**Key words:** thermal engineering; open two-phase thermosyphon; heat transfer characteristics; waste heat recovery

## 0 引言

常规的重力式热管亦称闭式二相热虹吸管,有优异的传热特性和流动阻力特性,被人们称为超导热元件。尤其是碳钢-水热管,由于其制造成本较低,被应用于余热回收领域。但是,此领域要

求余热回收装置造价低且寿命长。碳钢-水闭式二相热虹吸管的价格仍偏高,且往往存在化学不相容性而影响其性能和使用寿命。而开式二相热虹吸管在这方面具有优势。

开式热虹吸管分为开式单相热虹吸管和开式二相热虹吸管两种。开式热虹吸管的概念最早由Holzwarth提出。Schmidt等将开式单相热虹吸管

收稿日期:2005-01-15.

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20020422).

作者简介:苏俊林(1953-),男,教授.研究方向:强化传热与节能技术、热管技术、锅炉及换热器强化传热,洁净煤燃烧技术. E-mail:sujl@jlu.edu.cn

用于燃气轮机叶片的冷却<sup>[1]</sup>。1971年美国的Japikse等把开式单相热虹吸管应用到核反应堆上,排除大量热量<sup>[2]</sup>。文献[3,4]发表了对开式单相热虹吸管的研究成果。虽然开式单相热虹吸管已有一些研究和应用,但因为它是单相换热,还不能算是真正热管。1981年乌克兰科学院热物理所提出了开式二相热虹吸管的定义。因为它的工作循环是相变过程,能高效传热,所以称为开式热管。目前此种热管的热工性能研究刚刚起步,国内辽宁环保研究所和浙江大学进行过初步研究<sup>[5,6]</sup>。作者主要探讨影响开式二相热虹吸管的主要因素,对开式二相热虹吸管流动进行了理论分析和传热性能实验。

## 1 管内工质的二相流动分析

开式二相热虹吸管内工质流动有二相流动特征。管内部通常为三种流型,即冲击流、沫状流和液膜流(环状流)。热管稳定工作时管内为环状流。

采用分相流型进行分析。即把两相流动分别按单相处理并计入相互的作用,然后将各相的方程加以合并。二相流的压降由摩阻压降、重位压降和加速压降3部分组成:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{dp_f}{dz} + \frac{dp_g}{dz} + \frac{dp_a}{dz} \quad (1)$$

式中: $dp/dz$ 为压降损失; $dp_f/dz$ 为摩阻压降; $dp_g/dz$ 为重位压降; $dp_a/dz$ 为加速压降。

为了简化分析,现做如下假设:①气液界面是光滑的;②因为加速压降比摩阻压降和重位压降小得多,故忽略加速压降;③认为蒸发段产生的蒸汽全部在冷凝段上冷却下来,然后沿管壁回流;④先分析气流核心不夹带液滴情况,然后对环雾状流考虑窜流比进行修正。

分析蒸发段流动情况,根据能量守恒定律有:

$$q_1 z = m_v r \quad (2)$$

式中: $q_1$ 为单位长度加热热流量; $z$ 为沿热管的轴向坐标; $r$ 为汽化潜热; $m_v$ 为蒸汽质量流量,其表达式为:

$$m_v = V_v \rho_v \quad (3)$$

式中: $\rho_v$ 为蒸气密度。

把式(2)代入式(3)整理得到汽相体积流量:

$$V_v = \frac{q_1 z}{r \rho_v} \quad (4)$$

由质量守恒定律可得:

$$m_v = -m_l \quad (5)$$

式中: $m_l$ 为凝液质量流量。

凝液的体积流量为:

$$V_l = \frac{m_l}{\rho_l} = \frac{q_1 z}{r \rho_l} \quad (6)$$

定义液相折算流率和气相折算流率:

$$w_l = \frac{|V_l|}{A} = \frac{4q_1 z}{\pi d_i^2 r \rho_l} \quad (7)$$

$$w_v = \frac{|V_v|}{A} = \frac{4q_1 z}{\pi d_i^2 r \rho_v} \quad (8)$$

式中: $A$ 为流通截面积; $d_i$ 为管内径。

不发生阻液现象的条件为:

$$\bar{w}_v^{1/2} + \bar{w}_l^{1/2} < 1 \quad (9)$$

式中: $\bar{w}_v$ 和 $\bar{w}_l$ 分别为气相折算流率和液相折算流率的时均值,其中:

$$\bar{w}_v = w_v \sqrt{\frac{\rho_v}{g d_i (\rho_l - \rho_v)}}$$

$$\bar{w}_l = w_l \sqrt{\frac{\rho_l}{g d_i (\rho_l - \rho_v)}}$$

将式(7)、(8)代入式(9),并考虑 $\rho_l \gg \rho_v$ ,得:

$$q_1^2 z^2 / d_i^5 < 0.616 g \rho_v \rho_l r^2 \quad (10)$$

定义单位面积上的热流量为 $q$ , $q_1 = \pi d_i q$ ,即:

$$q^2 z^2 / d_i^3 < 0.0624 g \rho_v \rho_l r^2 \quad (11)$$

式(11)可以作为开式二相热虹吸管防止发生阻液现象的判据。因为阻液现象是开式二相热虹吸管的重要极限,超过这个极限,热管将发生干枯现象。由式(11)可知,热流越大、蒸发段越长、管径越小,则发生阻液现象的可能性就越大。要想增大热流可以采用缩短蒸发段、增加管径的方法。

## 2 传热性能实验

### (1) 实验目的

研究开式二相热虹吸管工作状况,测定其传热系数;研究开式二相热虹吸管结构参数对传热性能的影响。

### (2) 实验方法

利用热电偶测量热管表面、电炉表面温度及环境温度。可直接将测得的电功率转换为实际加热功率。测出水流量和进出口水温,由此计算出吸热量。

### (3) 实验装置

实验装置主要由试验元件、控制装置、电加热

器及测量仪表组成,如图1所示。

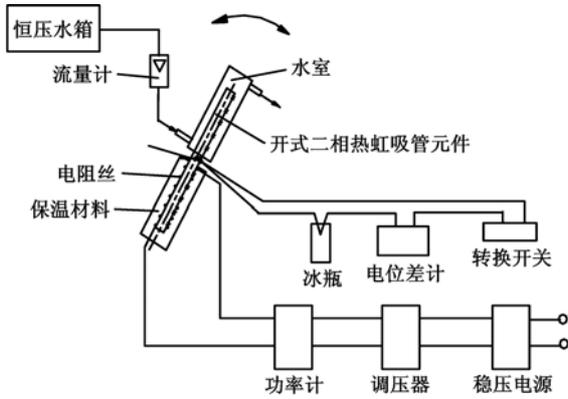


图1 开式二相热虹吸管实验台简图

Fig.1 Test bench sketch of open two-phase thermosyphon

实验元件为 $\varnothing 25\text{ mm} \times 2 \times 1500\text{ mm}$ 的碳钢管管壳。管子的一端封闭,另一端可旋上带有不同节流孔径的螺帽,供试验时选用。外部流体通过节流孔进行充液。本实验的控制装置由电源及调压器组成。电源电压为220 V,交流。调压器型号是TGI/0~250,5 kW,电压可调范围0~250 V。用型号为D26-W型的电功率表测取电功率,测量范围为0~2500 W,精度等级为0.5。用型号为LZJ-10的浮子流量计测量冷却水流量,量程60 L/h,精度等级为2.5。将10对NiCr-NiSi热电偶布置在管壁上,其间距为150 mm。为减小热惯性,电偶丝直径取0.2 mm。炉内电偶丝直径为0.5 mm,外套瓷管绝热。水套中电偶丝直径为0.2 mm,外有塑料绝缘层。采用自行设计的管式电阻炉加热。电炉分成3段,每段长400 mm,外径160 mm。每段设计的最大功率为4 kW,通过外部接线可自行选择其加热功率范围。本实验选用两段电炉,电炉安放在实验台支架上,支架可以转动0~90°,供改变热管倾角用。

### 3 传热性能实验结果及实验关联式

开式二相热虹吸管各工况试验曲线见图2~10。开式二相热虹吸管的传输功率 $P$ 、开孔数 $n$ 、孔径 $\phi$ 及倾角 $\theta$ 对于温度分布的影响分析如下:  
 ①随着热管传输功率的增加,其壁面温度和工质温度随之增加。  
 ②在热管功率小时,温度的不均匀性明显。  
 ③开式热管比闭式热管的温度不均匀性明显。  
 ④在蒸发段和冷凝段内,壁温及工质温度的均匀性好,温度波动小。

在生产和科研的许多实际问题中,遇到的常常是多因素实验。研究实验指标 $Y$ 与 $P(P \geq 2)$ 个因素 $g_j(j=1,2,\dots,p)$ 间的定量关系问题,称为多元回归问题。对于研究 $Y$ 与 $g_j$ 间的线性定量关系问题,称为多元线性关系问题。

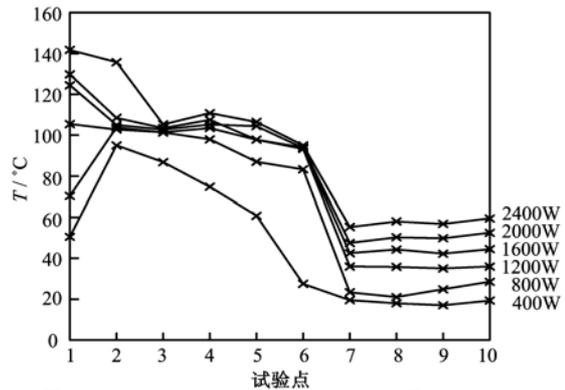


图2  $n=3, \phi=1.0\text{ mm}, \theta=90^\circ$ 时温度分布曲线

Fig.2 Temperature curve when  $n=3, \phi=1.0\text{ mm}, \theta=90^\circ$

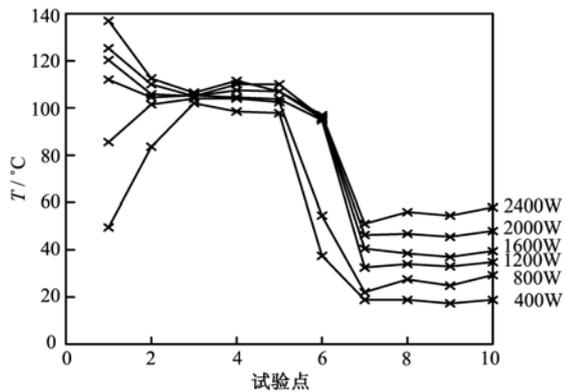


图3  $n=1, \phi=1.0\text{ mm}, \theta=90^\circ$ 时温度分布曲线

Fig.3 Temperature curve when  $n=1, \phi=1.0\text{ mm}, \theta=90^\circ$

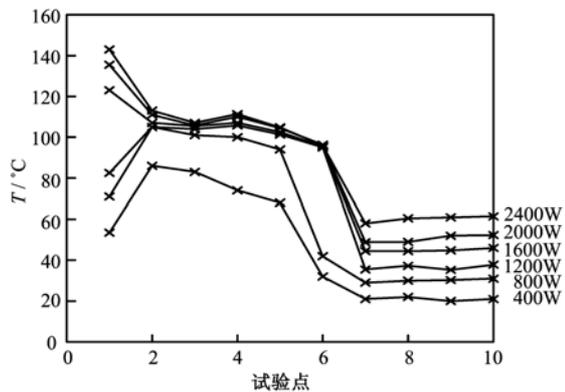


图4  $n=1, \phi=1.5\text{ mm}, \theta=90^\circ$ 时温度分布曲线

Fig.4 Temperature curve when  $n=1, \phi=1.5\text{ mm}, \theta=90^\circ$

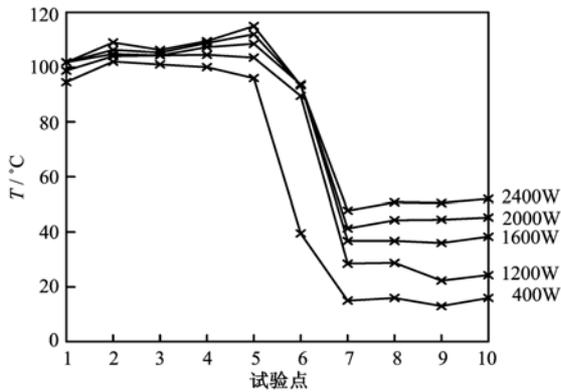


图 5  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=90^\circ$  时温度分布曲线  
Fig. 5 Temperature curve when  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=90^\circ$

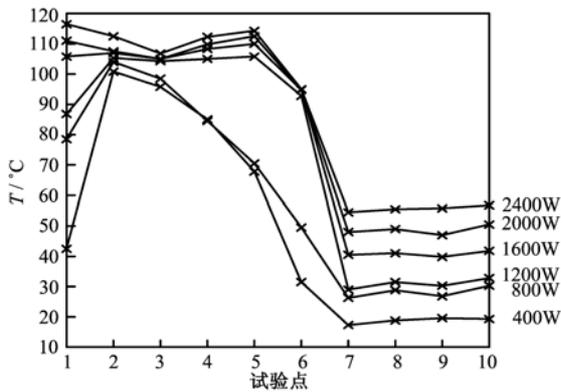


图 6  $n=1, \phi=3.0 \text{ mm}, \theta=90^\circ$  时温度分布曲线  
Fig. 6 Temperature curve when  $n=1, \phi=3.0 \text{ mm}, \theta=90^\circ$

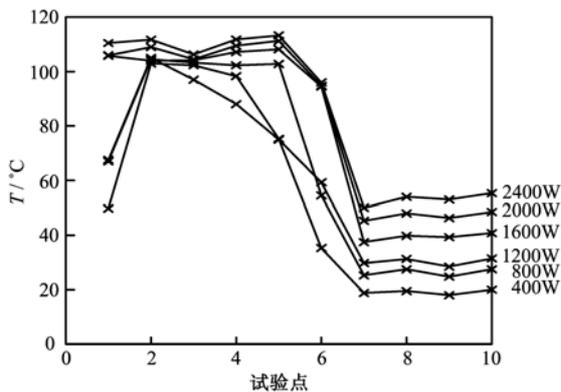


图 7  $n=1, \phi=4.0 \text{ mm}, \theta=90^\circ$  时温度分布曲线  
Fig. 7 Temperature curve when  $n=1, \phi=4.0 \text{ mm}, \theta=90^\circ$

由前面的分析可知,开式二相热虹吸管的当量传热系数  $\alpha_m$  与加热段的热流密度  $q_h$ 、热管顶端开孔直径大小  $\phi$ 、顶端开孔个数  $n$ 、热管倾角  $\theta$ 、冷热段长度比  $J$  及冷却水流量  $m_w$  有关,即:

$$\alpha_m = f(q_h, \phi, n, \theta, J, m_w) \quad (12)$$

实验中,保持  $J, m_w$  不变,所以:

$$\alpha_m = f(q_h, \phi, n, \theta) \quad (13)$$

把热管内部当量传热系数的半经验公式写成如下形式:

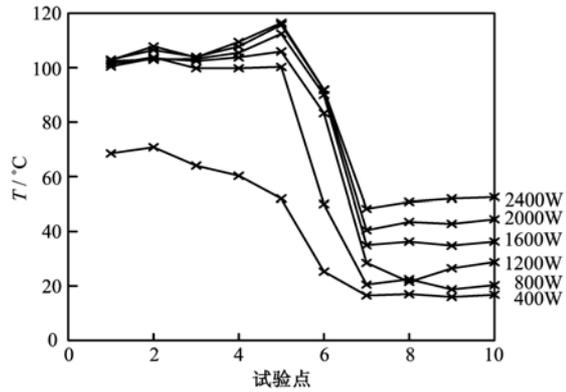


图 8  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=75^\circ$  时温度分布曲线  
Fig. 8 Temperature curve when  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=75^\circ$

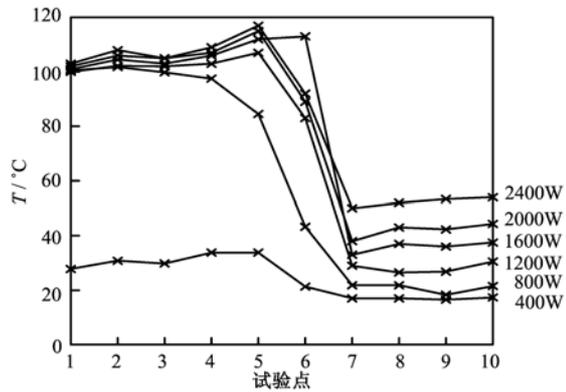


图 9  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=60^\circ$  时温度分布曲线  
Fig. 9 Temperature curve when  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=60^\circ$

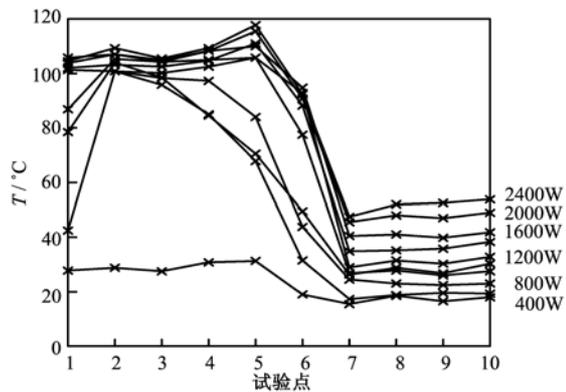


图 10  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=45^\circ$  时温度分布曲线  
Fig. 10 Temperature curve when  $n=1, \phi=2.0 \text{ mm}, \theta=45^\circ$

$$\alpha_m = Cq_h^A \phi^B n^D \theta^E \quad (14)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  均为待定系数。

将式(14)经多元回归,结果如下:

$$\alpha_m = 0.0369q_h^{0.8703} \phi^{0.0164} n^{-0.0184} \theta^{-0.2135} \quad (15)$$

上式验证范围为:  $2.4 \text{ kW/m}^2 \leq q_h \leq 20 \text{ kW/m}^2$ ;  
 $1.0 \text{ mm} \leq \phi \leq 4.0 \text{ mm}$ ;  $1 \leq n \leq 4$ ;  $\pi/12 \leq \theta \leq \pi/2$ 。

通过查  $F$  分布表进行显著性检验,判断随机变量与自变量之间的线性关系是否显著。

方差分析的结果如下: 剩余平方和  $Q = 7.559$ , 回归平方和  $U = 68.117$ , 剩余标准差  $S = 0.036$ , 相关系数  $R = 0.949$ , 检验值  $F = 150.939$ 。

查  $F$  分布表可得:  $F_{0.01}(7.42) = 3.80$ ,  $F > F_{0.01}(4.72)$ , 从而可知线性关系是显著的。

通过误差计算可知, 当量传热系数的标准差为  $7.43 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$ , 相对误差为  $5.2\%$ 。

## 4 开式与闭式两种热管性能比较

热管在余热回收方面虽发挥着一定的作用, 但仍受到很多制约, 主要制约因素是经济合理问题。因为余热回收的价值有限, 所需的热管根数又很多, 所以对余热回收用热管的基本要求为结构简单、保证高效、价格便宜、寿命较长。

鉴于上述考虑, 主要将开式和闭式二相热虹吸管进行综合经济性比较。

### 4.1 闭式二相热虹吸管的选择

为了便于比较, 实验用闭式和开式二相热虹吸管的材料一致, 其规格都为  $\text{D}25 \text{ mm} \times 2 \times 1500 \text{ mm}$ 。充液率为总容积的  $25\%$ 。闭式二相热虹吸管的实验参数、台架及实验步骤与开式二相热虹吸管相同。

### 4.2 开式与闭式二相热虹吸管的比较

经数据回归处理, 闭式二相热虹吸管的当量传热系数公式如下:

$$\alpha_m = 0.158q_h^{0.7515} \theta^{-0.0992} \quad (16)$$

试验验证范围为:  $2.4 \text{ kW/m}^2 \leq q_h \leq 20 \text{ kW/m}^2$ ;  
 $\pi/12 \leq \theta \leq \pi/2$ 。

方差分析结果如下:  $Q = 1.256$ ,  $U = 12.827$ ,  $S = 0.0196$ ,  $R = 0.954$ ,  $F = 168.566$ 。

从试验结果分析, 开式二相热虹吸管的传热系数比闭式小  $15\%$  左右。

由实验数据可知, 在相同的工况下, 开式二相热虹吸管正常工作时的总传热量是闭式传热量的

$90\%$ , 工况的稳定程度及平稳性与闭式一致, 但由于开式热管必须达到一定温度方能启动, 工质温差较大, 因而对温度较低的余热不能达到高效传热的目的, 这是开式二相热虹吸管的主要弊端。

由于闭式二相热虹吸管的加工工艺比较复杂(抽真空、注液及各种处理工艺), 因而成本较高。而开式二相热虹吸管加工工艺简单, 成本降低了  $50\%$  左右。

## 5 结 论

(1) 对开式热管内部流动进行理论推导及分析, 得到影响其工作极限阻液现象判据和内部流动的数学模型。

(2) 通过大量的实验研究开式二相热虹吸管的传热特性, 最后得到传热系数的经验公式, 可供工程设计使用。

(3) 通过与闭式二相热虹吸管传热性能比较可知, 开式热管的当量传热系数是闭式热管的  $85\%$  以上, 总传热量为相同工况下闭式二相热虹吸管的  $90\%$  以上, 而成本只有其  $50\%$ 。从经济性看, 开式二相热虹吸管比较合理, 更适于余热回收换热场合使用。

### 参考文献:

- [1] SCHMIDT E. Heat Transmission by Natural Convection at High Centrifugal Acceleration in Water Cooled Gas Turbine Blades [C] // Proc Inst. Mech. Eng. ASME Conf. Proc. 1951; 361 - 363.
- [2] JAPIKSE D, WINTER. Single-phase Transfer Processes in the Open Thermosyphon [J]. Int J Heat Mass Trans, 1971, 14 : 427 - 441.
- [3] KUSUDA H, IMURA H. Boiling Heat Transfer in an Open Thermosyphon [J]. Bulletin of the JSME, 1973, 16(10): 1723 - 1740.
- [4] NEJAT Z. Effect of Density Ration on Critical Heat Flux in Closed End Vertical Tube [J] Int J Multiphase Flow, 1981, 7: 321 - 327
- [5] ZHAO Rong-di. The Experimental of Two-phase Flow in the Open Thermosyphon Heat Pipe [C] // 7th IHPC, 1989.
- [6] TU C J. Principle and Applications of Semi-open Two-phase Thermosyphon [C] // First IHPC, 1990.

(责任编辑 陈永杰)