

脉动热管运行可视化及传热与流动特性的实验研究

曹小林¹, 席战利¹, 周 晋², 晏 刚²

(1. 中南大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 西安交通大学制冷与低温工程系, 陕西 西安 710049)

摘 要: 对脉动热管的运行进行了可视化实验, 在不同的充灌率、倾角、截面形状、加热量条件下对脉动热管的运行进行了测试, 实验结果表明: 脉动热管是一种十分有效的散热技术; 脉动热管存在传热极限; 在最佳充灌率(50%)和最佳倾角(50°)下运行的脉动热管传热极限最高, 高热流密度下的传热热阻最低; 当热流密度较小时, 三角形通道的脉动热管要优于正方形通道的脉动热管, 但当热流密度较大时, 通道形状对热阻和单位截面传热极限影响不大; 通道大小对热管的热性能影响很小。

关键词: 脉动热管; 可视化; 运行机理

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引言

随着电子工业的发展, 电子元器件的散热问题已经成为电子工业发展的瓶颈问题, 急需微型高效的传热技术为其发展铺平道路。脉动热管具有体积小、当量传热系数很大(在合适的工质充灌量下)、结构简单、没有传统毛细极限和可随意弯曲等优点, 在体积越来越小、而发热量却越来越大的电子器件的冷却中, 有着传统热管无法比拟的优越性。目前关于脉动热管的理论研究还处于初级阶段, 对其运行机理的认识和设计理论还很不成熟。因此许多学者试图通过可视化实验研究去探讨其运行机理, 并研究充灌率、倾角等因素对脉动热管运行的影响, 但还没有截面形状对传热特性的影响

方面的研究^[1-3]。

本文比较全面地研究了加热量、充灌率、倾角、截面形状等因素对脉动热管运行过程和传热特性的影响。

2 实验装置及说明

实验装置和试件如图 1 所示。在一块 180 mm × 54 mm × 4 mm 的硬铝板上铣出若干平行的凹槽, 这些凹槽相互连通而形成一条蛇形通道, 通道的形状可以是正方形也可以是正三角形, 在这条蛇形通道的外围 3 mm 处再铣出一条封闭的凹槽以放置橡胶的 O 形圈, 用于密封, 这样就形成了一个试件。在 210 mm × 70 mm × 15 mm 的缩醛树脂板的中央铣出 180 mm × 54 mm × 4 mm 的凹槽, 正好将试件嵌进

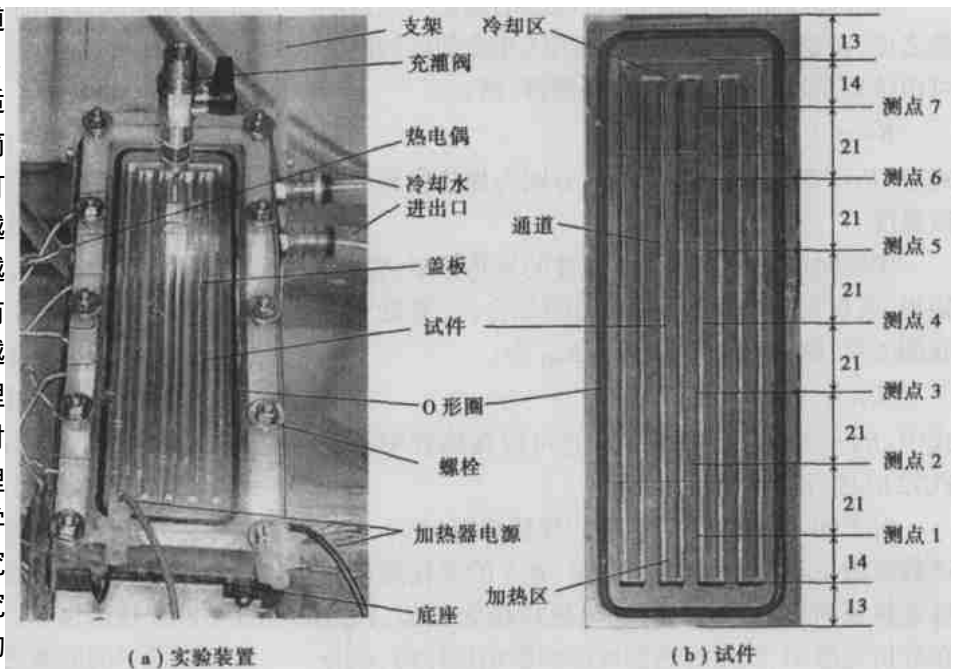


图 1 实验装置和试件

凹槽中, 在上面盖上聚碳酸酯玻璃盖板并用螺栓压紧, 使 O 形圈受压变形而达到气密的作用。在底座的上部还铣出水流道, 冷却水在流道中流过, 在上部冷却区从试件的背面冷却试件; 试件的下部加热区在背面贴上加热器加热试件。通过蛇行通道中的电子冷却液 FC72 的蒸发、冷凝和流动将热量从下部带到上部, 构成了一个平板型脉动热管。在玻璃盖板上安装有一个阀门, 供排出空气和充灌工质用。

为了比较倾角对脉动热管性能的影响, 脉动热管布置在可调节角度的支架上, 实验中在脉动热管加热段采用电加热, 加热功率可通过调节电压进行控制, 冷却段采用冷却水冷却。为了测量脉动热管运行时的温度分布, 在试件的背面沿通道轴线方向均匀布置了 7 个热电偶, 测点的分布见图 1(b)。

为了比较蛇形通道的截面形状和大小对脉动热管性能的影响, 对四个试件进行了测试, 其中两个正方形通道和两个三角形通道, 具体尺寸见表 1。

表 1 试件尺寸

试件号	截面形状	边长/mm	通道数
1 号	正方形	2	8
2 号	正方形	1.5	10
3 号	正三角	3.4	8
4 号	正三角	2.6	10

定义总热阻为加热区和冷却区的温差与总传热量之比, 在稳定运行过程中, 加热区和冷却区的温度可由该处所布置的热电偶近似测得, 则:

$$R_T = (T_h - T_c) / Q_T \quad (1)$$

式中: R_T —总热阻; T_h 和 T_c —分别为加热段和冷却段温度。

实验时试件的总热阻是试件的导热热阻(底座、铝板、盖板)和脉动热管的热阻的综合, 二者处于并联的关系, 则脉动热管的热阻 R_{PH} 为:

$$R_{PH} = 1 / (1/R_T - 1/R_X) \quad (2)$$

式中: R_X —试件的导热热阻, 它可以在热管中不充 FC72 时进行测量得到。

对于同一试件, 因为试件的导热热阻(R_X) 和通道截面积是不变的, 所以总热阻(R_T) 的变化规律和脉动热管的热阻(R_{PH}) 的变化规律极为相似, 因此在分析充灌率、倾角对热管性能的影响规律时, 就分析总热阻随充灌率和倾角的变化。但是当比较通道大小和形状对热管性能的影响时, 就涉及到不同的试件, 因为不同试件的导热热阻(R_X) 和通道截面积不同, 就必须比较在单位通道面积内传递的相同热

量时的传热热阻。单位热管通道面积内所能传递的热量也就是脉动热管通道的热流密度 Q_{PHA} , 即:

$$Q_{PHA} = Q_{PH} / A = [(T_h - T_c) / R_{PH}] / A \quad (3)$$

式中: Q_{PH} —通过脉动热管通道传递的热量; A —脉动热管通道截面积。

则单位截面传热热阻 R_{PHA} 为:

$$R_{PHA} = (T_h - T_c) / Q_{PHA} = R_{PH} A \quad (4)$$

3 脉动热管运行的观察结果

实验中分别对 4 种试样、4 种充灌率(分别为 20%、30%、50%和 70%)在 5 种倾斜角度(分别为 10°、30°、50°、70°和 90°)共 80 种工况进行了加热量从 0 W 逐渐增加到加热段烧干为止的测量和拍摄。观察到的运行情况可大致分为两大类:

第一类: 没有形成脉动效应。主要特征是在热管的顶部各通道之间没有液体的互窜, 每一个通道各自以热管的机理运行, 各通道之间没有明显的影响。出现这种运行情况主要有 3 种工况:

(1) 充灌率很低时(20%)的工况, 这是因为充灌率很低, 液体太少, 在通道中形不成液塞, 每一个通道的加热段产生的气体都可以在各自的通道中自由上升而不会受到液塞的阻碍, 冷凝段形成的液体也可以在各自的通道中沿壁面(尤其是棱角边沿)下降, 随着加热量增加, 液体和气体的流动也会更加剧烈, 但是直到加热段烧干也不会形成液塞, 如图 2(a)所示;

(2) 倾角较小(10°倾角)的工况, 热管在运行过程中自冷凝端向蒸发段的回液是通过三种力引起的, 即重力、表面张力和形成脉动效应后的脉动力。其中表面张力较小, 形成脉动效应之前, 脉动力为零, 这时主要靠重力回液, 当倾角很小时, 重力在流动方向上的分力很小, 随着加热量的增加, 在还没有形成脉动效应时加热段就可能烧干, 如图 2(b)所示, 在液塞还不能越过顶部时加热段就已经烧干;

(3) 加热量较小的工况, 当充灌率达到 30%且倾角达到 30°时, 如果加热量较小, 加热段因为气体产生而形成的压力也较小, 还不足以克服重力作用推动液塞越过顶部, 液塞会在各个通道中上下振动, 但各通道中的液塞之间没有明显的相互影响, 运行情况很类似于图 2(b), 不同的是加热段还没有烧干。

第二类: 形成了脉动效应。主要特征是热管顶

部有液柱从一个通道窜到另一个通道,甚至使得气体在某些通道中上升,而液体在相邻的通道中下降,形成一种单相脉动流动。对于充灌率不低于30%且倾角达到30°以上的工况,随着加热量的增加,液塞在气体压力的作用而振动的平衡位置上升,当加热量较高时,液塞可能会越过顶部而窜入相邻的通道中,并给该通道中的液塞施加向下的力,因此而形成脉动效应,如图2(c)和图2(d)所示。这时热管的运行不再完全依靠重力和表面张力,脉动力成了运行的主要动力,在脉动力的作用下,加热段能得到充分的供液,从而大大地增大了热管的烧干极限。这也是脉动热管优于常规热管的原因。图2(c)和图2(d)是两个相邻时刻(时差0.05 s)的静态照片,因为这时的加热量(61 W)较大,液体和气体的流动很快,并伴随着气体的冷凝和液体的蒸发,使得在0.05 s内气液的分布就发生了明显的改变,也使得跟踪某一个液塞或气泡的运动变得相当困难。

4 影响热管传热性能的因素

4.1 脉动热管的运行效果

在还没有充灌FC72时,先对脉动热管的导热热阻 R_X (主要是铝板)进行了测量。当脉动热管中充灌了工质时,脉动热管运行时总热阻 R_T 是导热热阻 R_X 热管的传热热阻的并联,因此会有明显的降低。表2为充灌率为50%以及倾角为90°时脉动热

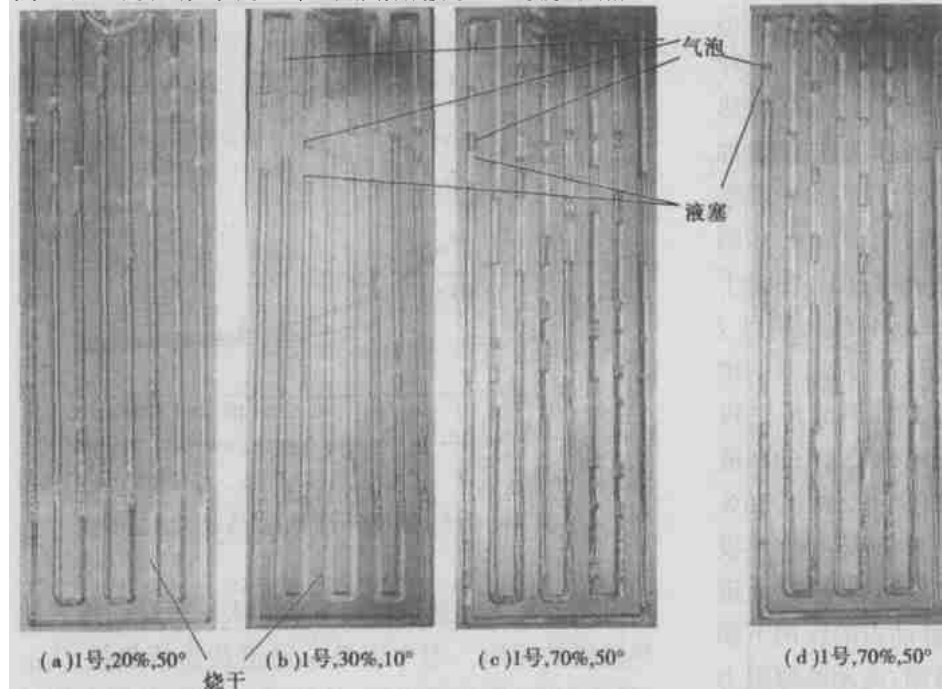


图2 不同工况下脉动热管内部的气液分布

管的总热阻 R_T 与未充注工质时的导热热阻 R_X 的比较,显然充灌50%的FC72后总热阻 R_T 有了很大的降低,这也意味着在相同的传热量下,脉动热管的运行可使加热段的温度显著降低。

表2 总热阻与试件导热热阻的对比

试件	热阻/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$		当量导热系数提高倍数 R_X/R_T
	导热热阻 R_X	总热阻 R_T	
1号	2.644	0.75(加热量 82.83 W)	3.53
2号	2.393	0.85(加热量 69.79 W)	2.82
3号	2.642	0.87(加热量 76.01 W)	3.04
4号	2.177	0.74(加热量 69.89 W)	2.94

4.2 脉动热管运行时的温度分布

图3显示了在加热量相同而充灌率不同时脉动热管运行时的温度分布。这张图上有两点值得注意:(1)在所有充灌率(20%、30%、50%、70%)下,测点1和测点2之间的温差基本相等,测点6和测点7之间的温差也基本相等;(2)随着充灌率的增加,测点2和测点6之间的温差逐渐增大。由图1可知,测点2至测点6分布在绝热段,在稳定运行下,可以近似认为测点2至测点6的温度就是该处热管内部的工质温度,而测点1反映的是加热段的壁面温度,测点7反映的是冷凝段的壁面温度。测点1和测点2之间的温差主要反映的是加热段的蒸发传热热阻,测点6和测点7之间的温差主要反映的是冷凝段的冷凝传热热阻。对于同一个试样,加热段的蒸发传热热阻和冷凝段的冷凝传热热阻基本不受充灌率的影响,因此在加热量相同时,测点1和测点2之间的温差基本相等,测点6和测点7之间的温差也基本相等。另外,因为通道较细,在表面张力的作用下,液体形成封闭的液塞,随着充灌率的增加,通道中的液塞总长增加,加热段产生的气体克服液塞的重力上升的阻力越大,使得传热热阻增加,因此在相同加热量时,测点2和测点6之间的温差逐渐增大。

4.3 充灌率对脉动热管传热热阻的影响

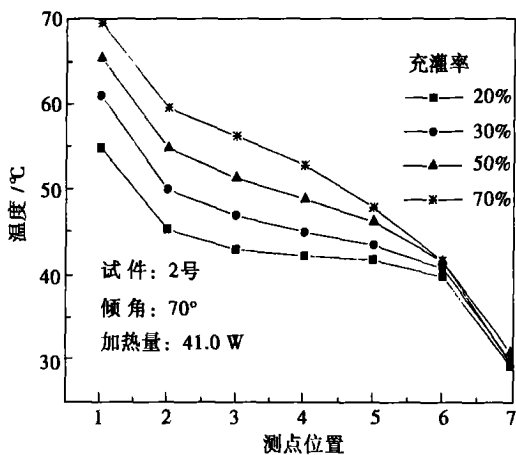


图 3 不同充灌率下的温度分布

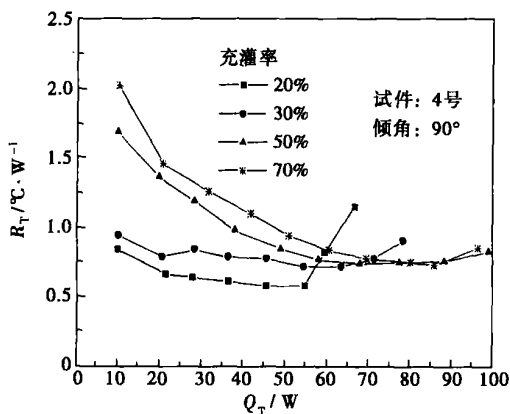


图 4 充灌率对热阻的影响

图 4 以试样 4 在倾角为 90° 时的运行为例显示了充灌率对脉动热管热阻的影响。图 4 中也有三种现象需要说明: (1) 脉动热管存在传热极限, 当加热量升高时, 脉动热管的热阻逐渐降低, 当加热量增加到一定程度时, 热阻又迅速增大, 这时在实验中观察到脉动热管的加热段发生烧干现象, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 说明脉动热管存在传热极限; (2) 在烧干之前, 充灌率越低, 热阻越小, 这一点不难从测点 2 和测点 6 之间的温差 (相同加热量时) 随充灌率的增加而逐渐增大得到解释; (3) 20% 充灌率时传热极限很低, 因为这时没有发生脉动现象, 蒸发段的回液主要靠重力和表面张力, 因此很快烧干, 30%、50% 和 70% 充灌率时传热极限较高, 其中 50% 时传热极限最高。这是因为: 一方面随着充灌率的增加, 通道内液体增加, 在重力、表面张力和脉动力的作用下回液充分; 另一方面随着充灌率的增加, 流动摩擦阻力增大, 使得回液困难。二者综合作用的结果是存在一个最佳的充灌率 (50%), 在最佳充灌率下传热极

限最高。

4.4 倾角对脉动热管传热热阻的影响

图 5 是 70% 充灌率时倾角对热阻的影响。实验结果表明, 在烧干之前倾角对热阻影响较小, 因为这时回液的主要动力是脉动力, 但在重力分力的影响下, 随着倾角的增加, 传热极限先是逐渐增加, 当倾角超过 50° 时, 重力分力随倾角的增加而只有较小的增大, 相反在加热段液体与铝壁的接触逐渐变差, 使得加热段更容易烧干, 因此也存在最佳倾角 (为 50°), 这是对于本实验的三面受热的情况, 但是对于四面受热的情况可能会有所不同。

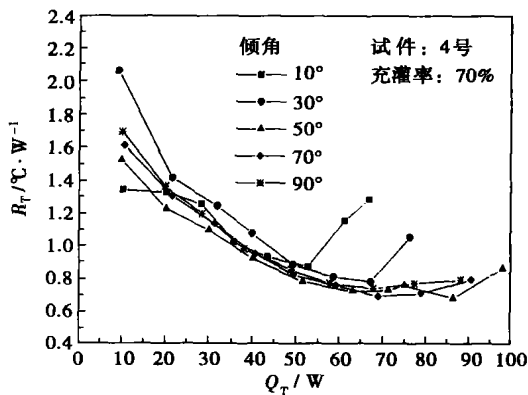


图 5 70% 充灌率时倾角对热阻的影响

4.5 截面形状对脉动热管传热热阻的影响

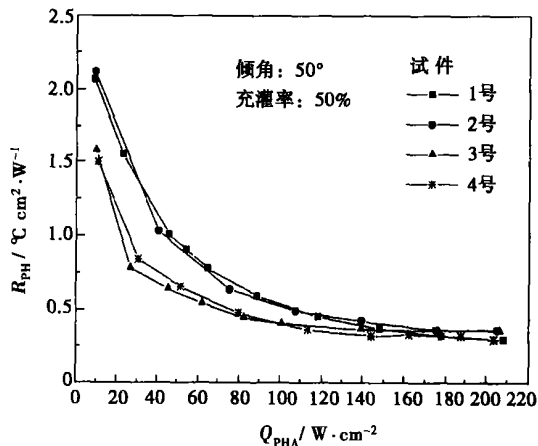


图 6 截面形状对脉动热管热性能的影响

图 6 是不同通道截面形状和大小对脉动热管的热性能的影响。图中以单位通道截面传热量 Q_{PHA} (热流密度) 作为横坐标, 比较单位截面面积上流过相同热量时的热阻。从图 6 中可以看出, 当热流密

度低于 140 W/cm^2 时, 三角形试件(3 号和 4 号)的热阻小于正方形试件(1 号和 2 号)的热阻, 但是当热流密度高于 140 W/cm^2 时, 4 个试件的热阻相差较小, 而且 4 个试件的单位截面面积的传热极限(曲线的最右方一点)也相差较小。这是因为, 脉动热管的运行动力有 3 种: 重力、表面张力和脉动力。当热流密度较低时, 脉动力相对不高, 表面张力的影响不可忽略, 而三角形通道的表面张力高于正方形的表面张力, 因此热阻小; 当热流密度高于 140 W/cm^2 时, 脉动力增强, 相对有很强的脉动力时, 表面张力的影响可以忽略, 而对于 4 个试件来说, 在热流密度相同时, 脉动力也相差不大, 因此热阻和单位面积的传热极限基本相近。对于通道形状相同但大小不同的热管, 热阻和单位截面传热极限比较相近。

5 结 论

(1) 脉动热管的运行热阻明显低于铝板的导热热阻, 相对于传统热管, 脉动热管可以微型化, 因此对于电子冷却来说, 脉动热管是一种十分有效的散热技术。

(2) 脉动热管存在一个传热极限, 加热量超过

传热极限, 加热段烧干, 脉动热管的热阻急剧上升。

(3) 脉动热管的运行存在两种运行机理: 重力和表面张力作用下没有脉动效应的运行和在重力、表面张力和脉动力作用下有脉动效应的运行。发生脉动时传热极限明显提高, 这就是脉动热管相对于常规热管的优点所在。观察表明, 脉动现象只有在较大的充灌率下才能发生。

(4) 存在最佳的充灌率(50%)和最佳倾角(50°), 在最佳的充灌率和最佳倾角下运行的热管, 其传热极限最高, 在高热流密度下传热热阻最低。

(5) 当热流密度较小时, 三角形通道的脉动热管要优于正方形通道的脉动热管, 但当热流密度较大时, 通道形状对热阻和单位截面传热极限影响不大, 通道大小对热管的热性能影响很小。

参考文献:

- [1] TONG B Y, WONG T N, OOI K T. Closed-looped pulsating heat pipe [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, 21: 1845-1862.
- [2] AKACHI H, POLASEK F. Pulsating heat pipe[A]. *Proceedings of 5th International Heat Pipe Conference [C]*, Australia, Melbourne, 1996.
- [3] 杨蔚原, 张正芳, 马同泽. 脉动热管运行的可视化实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(增刊): 117-120.
- [4] ERIC STREICHER, OVIDIU MARIN, OLIVIER CHARON. Oscillating combustion technology boosts furnace efficiency [J]. *Industrial Heating*, 2001, 68(2): 35-39.
- [5] HARRY S KUREK. Oscillating combustion technology being evaluated as method to reduce NO_x emissions [J]. *Industrial Heating* 2000, 67(8): 64-67.
- [6] KATHLEEN TIERNEY. Natural gas technology reduces NO_x emissions [J]. *Pollution Engineering*, 2000, 32(8): 10.
- [7] 赵海亮, 徐旭常, 李彦, 等. 脉动供燃料燃烧技术及火焰技术频率特征 [J]. *燃烧科学与技术*, 2004. 已录用
- [8] KIM KI SEONG, PARK SANG KYU, ZHAO HAILIANG. Flame characteristics of a Pulse jet burner [A]. *Proceedings of the KOSME 2002 Autumn Conference [C]*, Changwon; Korean Society of Marine Engineering, 2002, 31-37.
- [9] 赵海亮, 由长福, 徐旭常, 等. 燃气流量低频脉动时的火焰特征. *清华大学学报*, 2004 44(8): 1071-1074.
- [10] KIM T K, PARK J, SHIN H D. Mixing mechanism near the nozzle exit in a tone excited non-premixed jet flame [J]. *Combust Sci and Tech*, 1993, 89(1-4): 83-100.

(上接第 375 页)

也增加火焰长度。在其它频率下增大雷诺数会增大火焰长度, 并保持附着。

本文作者还有韩国丽水大学机械系的金基晟教授和朴相圭教授。

参考文献:

- [1] CHARON O, JOUVAUD D, GENIS B. Pulsated O_2 /fuel flame characteristics of a Pulse Jet: A New Technique for Low NO_x Emission [J]. *Combustion Science and Technology*, 1993, 93(1-6): 211-222.
- [2] DROGUE SOPHIE, BREININGER SHANNON, RUIZ ROBERTO. Minimizing NO_x emissions through improved oxy-fuel [J]. *Glass Industry*, 1994, 75(6): 13-20.
- [3] HARRY S KUREK, JOHN C WANGNER. Oscillating combustion on a high temperature forging furnace [R]. Project Review Meeting at California Air Resources Board, Sacramento, CA, 2001.

length, condensing section length, heat dissipation conditions and their layout location. It was found that when the heat-pipe fins are horizontally placed and allowed to dissipate heat in a natural environment, then due to the influence of a non-condensing gas, there could appear an excessively low temperature at the end portion of the heat-pipe fin condensing section. If the evaporating section is excessively long, there will emerge overheating points with a simultaneous occurrence of temperature rise. If the condensing section of the heat-pipe fin is allowed to dissipate heat in a finite space, the temperature rise phenomenon will disappear. If placed in an inclined position, the heat-pipe fins will attain an optimum performance. **Key words:** heat pipe, heat-pipe fin, shaped high-temperature heat-pipe fin.

脉动热管运行可视化及传热与流动特性的实验研究 = **Experimental Investigation of the Visualization of Pulsating Heat-pipe Operation as well as Heat Transfer and Flow Characteristics** [刊, 汉] / CAO Xiao-lin, XI Zhan-li (Institute of energy and Power Engineering under the Zhongnan University, Changsha, China, Post Code: 410083), ZHOU Jin, YAN Gang (Department of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 411 ~ 415. A visualization experiment is conducted with respect to the operation of pulsating heat pipes. Under different conditions of filling rate, inclination angles, section shape and heating rate, tests are conducted on the operation of the pulsating heat pipes. The results of the tests indicate that the pulsating heat pipes represent a kind of very effective heat dissipation technology. There exists a heat transfer limit for the pulsating heat pipes. During operations at an optimum filling rate (50%) and an optimum inclination angle (50°), the pulsating heat pipes have a maximum heat transfer limit with a minimum heat transfer resistance under a high heat flux density. In the case of a relatively small heat flux density the pulsating heat pipe with a triangular channel will be superior to that with a square-shaped channel. However, when the heat flux density is relatively great, the shape of the channel will not have any significant influence on heat resistance and unit section heat-transfer limit. The size of the channel exercises a very small influence on the thermal performance of the heat pipes. **Key words:** pulsating heat pipe, visualization, operation mechanism.

基于多参数的电站风机监测技术的试验研究 = **Experimental Investigation of Multiple Parameter-based Monitoring Technology for a Power Plant Air Blower** [刊, 汉] / WANG Shong-ling, HOU Jun-hu, AN Lian-suo (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 416 ~ 420.

By using a experimental study method an investigation was conducted of a multiple parameter-based monitoring technology involving the performance, non-steady state flow and mechanical vibrations of a power station air blower. On the basis of the stable and good mapping mechanism existing among the performance parameters as reflected by non-dimensional performance curves, a RBF (Radial Basis Function) network featuring excellent approximation characteristics was employed to approximate the non-dimensional performance curves of the air blower. As a result, a parameter mapping-based flow-monitoring model was derived, thereby realizing the on-line monitoring of the air blower performance. Through a study of the rotating stall at the 4-73 air blower suction and pressure side and the frequency characteristics of inlet vortex flow and an analysis of three kinds of non-steady flow specific features given are combined eigen parameters capable of accurately describing three kinds of non-steady state flows. Mechanical vibration characteristics of the air blower are divided into harmonic, energy and singularity characteristics. By using frequency-division section technology and a binary small-wave transformation method derived are harmonic monitoring indexes, energy and singularity indexes. **Key words:** air blower, parameter monitoring, RBF network, small wave transformation, experimental study.

900 MW 锅炉水冷壁鳍片超宽问题分析及处理 = **Analysis and Treatment of the Problem Relating to Excessive Width of Water Wall Fins in a 900 MW Boiler** [刊, 汉] / FENG Wei-zhong (Shanghai Waigaoqiao No. 2 Power Generation Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200137) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 421 ~ 423.

Described is the problem relating to the excessive fin width in some parts of the boiler water wall used in a Shanghai