

分离型热管单管回路传热特性实验研究

易冲冲, 王 文, 王博杰, 郑文龙

(上海交通大学 制冷与低温研究所, 上海 200240)

摘 要: 分离型热管作为高效的非能动传热元件, 在工业领域得到了广泛的应用。本研究以氨为工质, 对分离型热管单管回路开展了实验研究, 主要探讨了热源温度与充液率对热管传热性能的影响。实验结果表明: 外界热源温度越高, 管内工作温度越高, 热管换热量越大; 氨的沸腾换热系数随外界热流密度增大而增大, 实验条件下, 最高可达到 $7\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 水平冷凝管壁存在周向温差; 在不同的工况下, 分离式热管都存在一个最佳充液率, 且在一定范围内随着外界热负荷的升高而增大。

关 键 词: 分离型热管; 最佳充液率; 氨

中图分类号: TK24 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.007

引 言

作为典型两相换热器, 分离型热管内部流动与传热过程较为复杂, 国内外不少学者对此也作了相关的实验研究。文献 [1 - 2] 均以水为工质, 对单根分离型热管进行实验研究, 主要就外界输入功率与充液率对热管传热性能的影响进行了讨论。文献 [3] 以丙酮为工质, 对水平排管串联型分离型热管进行实验研究, 得出其最佳充液率为 70% - 114%。文献 [4] 以 R600A 为工质, 对分离型热管整体热量传递特性进行了实验研究, 并提出在一定范围内分离型热管传热能力与蒸发段和冷凝段的布置高差成正比。文献 [5] 对以水为工质的分离型热管换热器的传热特性进行了实验研究, 并得出热管最佳充液率范围为 18% - 38% (按管束总容量计)。

从上述实验研究可以看出, 分离型热管的工作性能与多种因素密切相关, 而其中以充液率尤为重要。不同的工质亦会对分离式热管的传热性能产生不同的影响^[6], 目前为止, 对于氨工质在分离型热管的传热特性还鲜有相关的报道。以氨为工质的热管在航天、余热回收等领域均已得到广泛应用。此外, 氨还可应用于核电站乏燃料水池非能动冷却热

管系统^[7]。基于此, 本研究主要就氨 - 不锈钢分离型热管在不同热源温度与充液率下的传热性能进行了实验研究。

1 实验系统

分离型热管单管回路试验测试系统如图 1 所示。图中①表示温度传感器, ②为压力传感器, 系统热源为 1 号恒温槽、冷源为 2 号恒温槽, 阀 1、阀 2 分别用来为系统充装工质与抽真空。

实验中共设置 4 个压力传感器, 分别布置在蒸发管入口、出口处与冷凝管入口、出口处。所用压力传感器型号最大量程为 5 MPa, 精度为 0.25%。而温度传感器共有 36 个。蒸发管壁共设有 8 个热电偶, 沿管长均匀布置, 自下而上编号依次为 T1 - T8。上升管外壁面共设有 2 个热电偶, 分别布置在上升管进、出口处, 编号分别为 T9、T10。为了判断管内工质流型, 冷凝管壁沿管长方向共有 5 个周向测点, 每一个周向测点布置 3 个热电偶, 分别在冷凝管顶部、底部与中部。沿工质流动方向, 冷凝管顶部热电偶编号分别为 T11、T14、T17、T20、T23; 冷凝管底部热电偶编号分别为 T12、T15、T18、T21、T24; 冷凝管中部热电偶编号分别为 T13、T16、T19、T22、T25。下降管壁共设有 3 个热电偶, 分别布置在下降管入口、垂直下降管中部与下降管出口, 编号分别为 T26、T27、T28。此外, 蒸发管外热源与冷凝外冷源水进出口均布置 2 个热电偶, 该 8 个热电偶在实验前使用 PT100 进行标定。温度传感器为欧米伽 T 型热电偶, 其测量精度为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 。

实验管路均采用 $\Phi 16\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 无缝不锈钢管, 各部分结构具体尺寸如图 2 所示, 图中单位均为 mm。从图中可以看出, 蒸发管垂直布置, 冷凝管水平布置, 而上升管的 U 弯设计是为了消除管道因温

收稿日期: 2014 - 01 - 21; 修订日期: 2014 - 04 - 25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206110); 科技部重大技术专项(ZB01K04)

作者简介: 易冲冲(1988 -), 男, 安徽蚌埠人, 上海交通大学硕士研究生。

度变化而产生的膨胀收缩应力的影响,而且还可防止冷凝液回流。

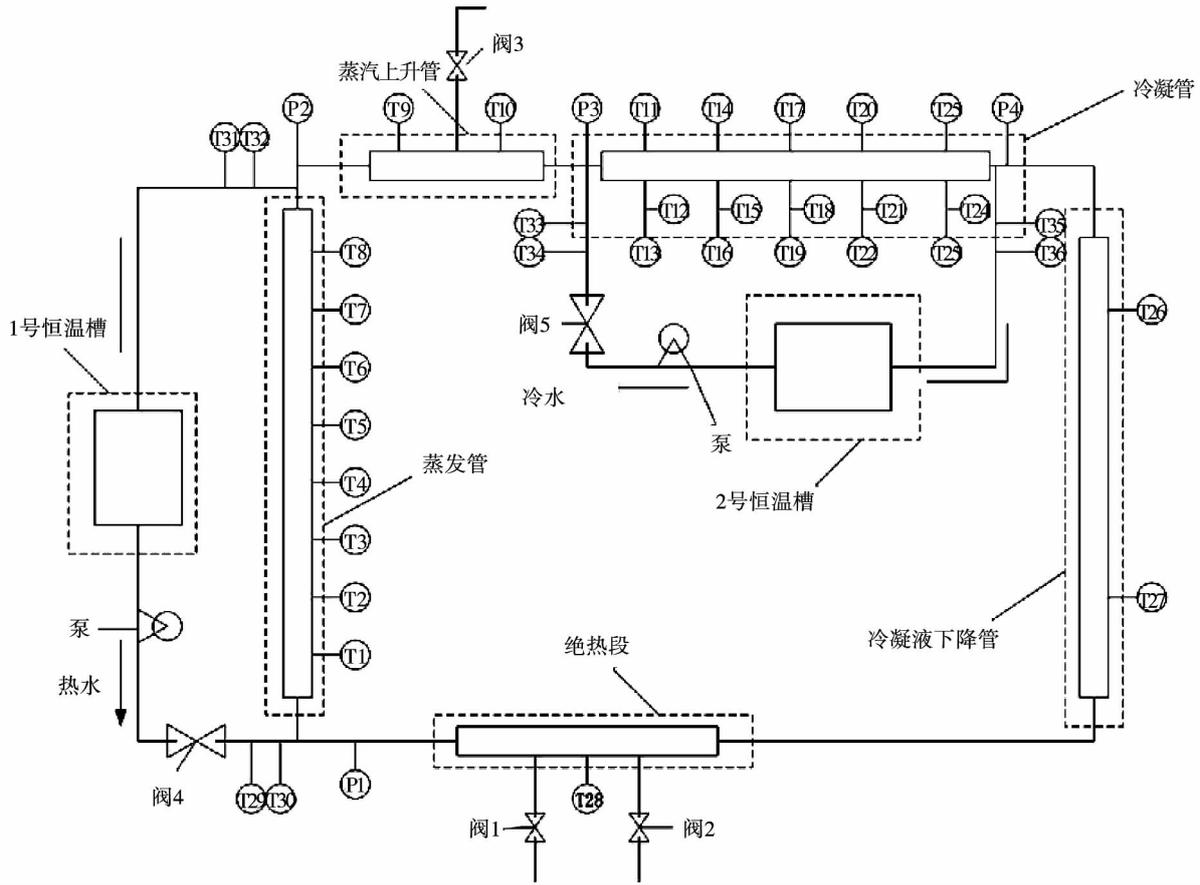


图 1 分离式热管试验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of a detachable type heat pipe test system

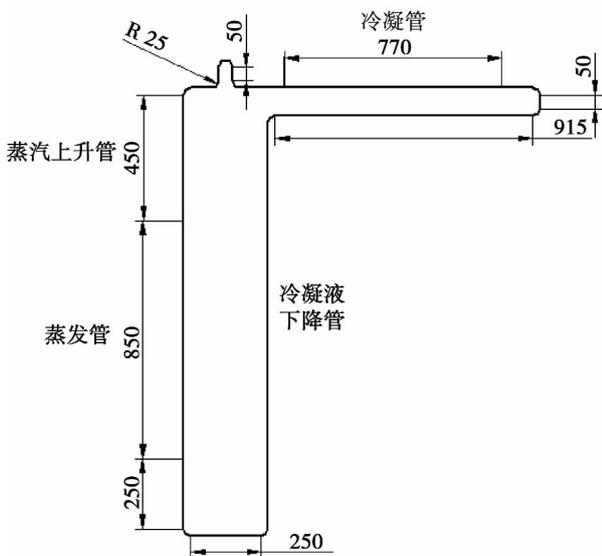


图 2 分离式热管实验系统结构尺寸图(mm)

Fig.2 Chart showing the structural dimensions of the detachable type heat pipe test system(mm)

此外,蒸发侧与冷凝侧套管内的热源与冷源水均有相应的泵进行提供,其流量分别由阀门4、阀门5控制。在本实验中热源与冷源水流量保持不变,其值分别为0.054和0.053 kg/s。实验中蒸发管与冷凝管换热量为:

$$Q_e = m_w^h c_p (\bar{T}_{in}^h - \bar{T}_{out}^h) \quad (1)$$

$$Q_c = m_w^c c_p (\bar{T}_{out}^c - \bar{T}_{in}^c) \quad (2)$$

式中: m_w^h 、 m_w^c —热源、冷源水流量,kg/s; c_p —水的定压比热容, J/(kg·K); \bar{T}_{in}^h 、 \bar{T}_{out}^h —热源进、出口平均温度, K; \bar{T}_{in}^c 、 \bar{T}_{out}^c —冷源进、出口平均温度, K。

假设蒸发管表面热流密度分布均匀,则管内局部沸腾换热系数可由下式求得:

$$\alpha_j^e = \frac{Q_e}{A_j^e (T_w^e - T_e)} \quad (3)$$

式中: j —某一壁温测点; α_j^e —管内沸腾换热系数, W/(m²·K); Q_e —换热量, W; A_j^e —换热面积, m²;

T_w^j 、 T_e —管壁和管内温度 K 。

当工质在测点位置处于单相状态时,可结合绝热管壁面测量值,然后沿管长方向对过热(冷)区温度进行线性化处理,这样就可大致求得管内单相区局部换热系数。

2 实验结果分析

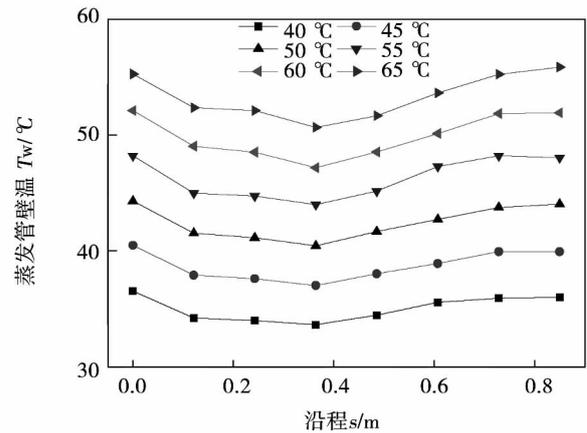
实验中冷源水温维持 20 °C 不变,热源水温范围为 40 - 65 °C,调温间隔为 5 °C。而氨工质 7 次充注质量分别为 84、93、110、133、153、175 和 204 g。所设计热管回路系统充满工质质量约为 260.9 g,故 7 次充液率 R 分别为 32.2%、35.6%、42.1%、50.9%、58.6%、67.1% 和 78.2%。

2.1 热源温度对分离型热管传热性能影响

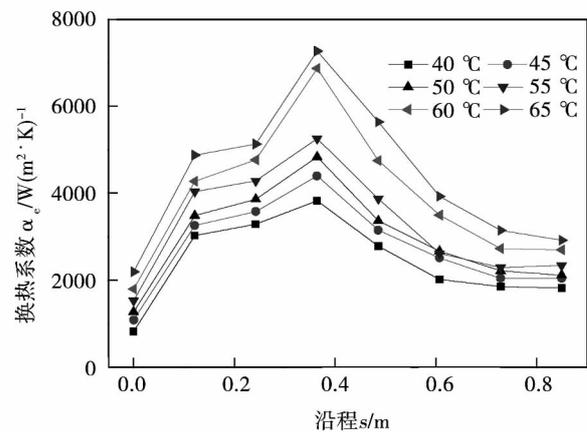
在充液率为 50.9% 时,分离型热管在不同热源温度下蒸发管壁温与其对应管内换热系数的沿程变化如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出,在同一热源温度下,蒸发管壁温整体变化不大,且沿蒸发管管长均呈现先减小后增大的趋势;而对于同一壁面温度测点,热源温度越高,壁面温度越高。从图 3(b) 中可以看出,在不同热源温度下,蒸发管管内换热系数均呈现先增大后减小的趋势,并在 0.4 m 处达到峰值。入口处换热系数之所以较低,是因为工质处于过冷状态,此时为单相对流换热。在 T2 位置处,工质已经开始蒸发,换热系数逐渐增大,但当干度高于一定值后,两相换热系数开始降低,故才会呈现如图 3(b) 所示趋势。此外,对于同一测点,热源温度越高,热流密度越大,测点所对应的管内换热系数越大。在该充液率下,蒸发管内平均热流密度在不同热源温度下依次为 8 166.2、11 140.3、13 574.8、17 092.9、21 137.7 和 25 433.2 W/m^2 。在实验最高热流密度下,氨工质沸腾两相换热系数最高可达 7 000 $W/(m^2 \cdot K)$ 以上。

蒸发管与冷凝管所有测点的壁温随热源温度变化趋势如图 4 所示。从图 4(a) 中可以看出,蒸发管各测点壁温随热源温度升高而升高,二者基本成线性关系,且热源温度越高,测点温差越大。从图 4(b) 中可以看出,对于各测点壁温与热源温度的关系,冷凝管与蒸发管类似。对于冷凝管同一测点,顶部壁面温度最高、中部次之、底部最低,壁温存在明显的周向差异性,说明管内凝结液膜覆盖不均,顶部液膜最薄,中部次之,这符合水平管内凝结层状流的

特征,工质在出口亦未能达到满管。此外,在该充液量下,热源温度越低,周向壁面温差越小。



(a) 蒸发管壁温沿程变化



(b) 蒸发管内换热系数沿程变化

图 3 不同热源温度下蒸发管壁温与管内换热系数沿程变化

Fig. 3 Changes in the wall temperature and heat exchange coefficient inside the evaporation tube along the length direction of the tube at various heat source temperatures

2.2 充液量对分离型热管传热性能影响

充液量的多少将直接影响分离型热管的工作性能。在本实验中,当充液量为 72 g ($R = 27.7%$) 时,系统无法运行。此时,套管的进出口水温基本无差异,这主要是由于蒸发管底部液池被全部蒸干,管内被蒸汽充满而无法顺利启动。

当热源温度为 55 °C 时,不同充液率下蒸发管壁温与冷凝管周向温差沿程变化如图 5 所示,其中周向温差是指冷凝管顶部温度与底部温度之差。从图

5(a) 中可以看出,充液率较高时,蒸发管各测点壁温差异较小,拥有较好的均温性。对于低充液率工况($R=32.2\%$ 、 $R=35.6\%$) ,壁温在 0.6 m 处存在明显的突升。这是由于此时管内壁面已无液膜覆盖,出现干涸现象,蒸汽处于过热状态。而当充液率满足外界换热功率时,不同充液率下同一测点壁温相差较小。

处工质已几乎被完全冷凝。周向壁温的差异性主要受管内液膜周向厚度分布影响,若是环状流膜状冷凝,则周向差异性较小,周向换热系数较均衡;而工质在低流速时,在水平管内冷凝容易受重力影响形成液膜分布不均,凝液主要在管内底部集聚,产生显著的分层流^[8]。随着工质的逐渐冷凝,底部凝液高度增加,周向温差会越来越小。

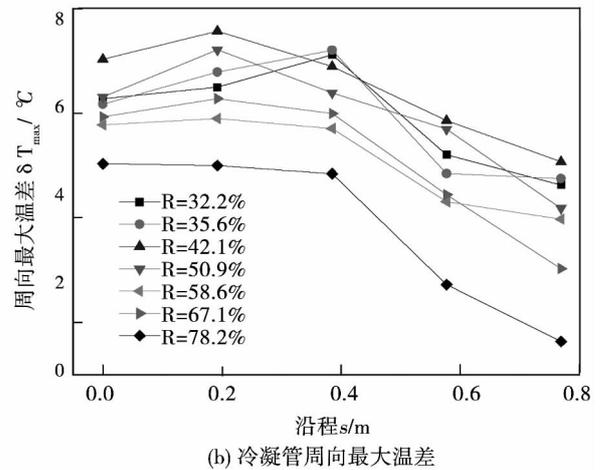
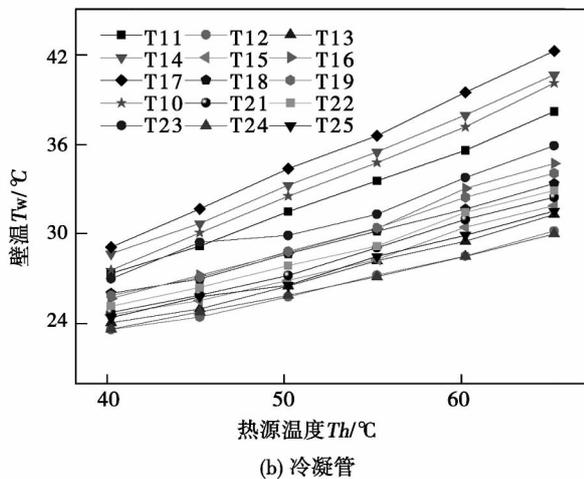
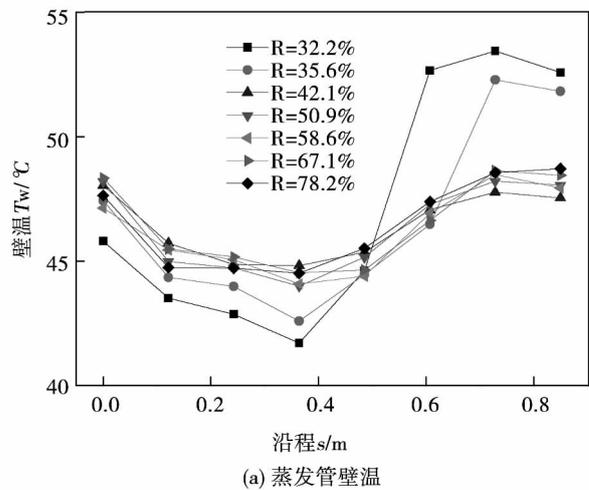
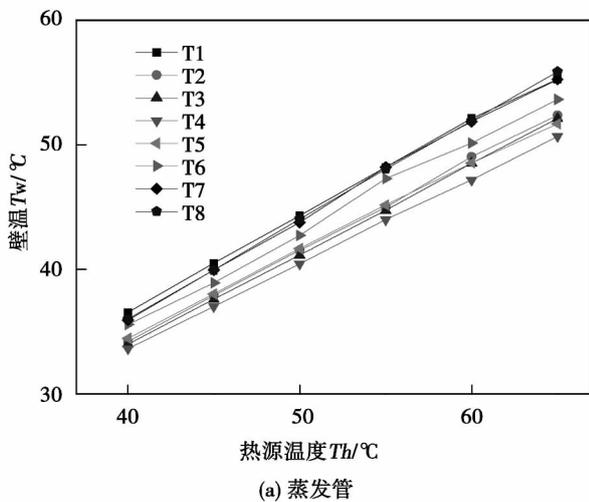


图 4 不同热源温度下蒸发管壁温与冷凝管壁温变化

Fig. 4 Changes in the wall temperature of the evaporation and condensing tube at various heat source temperatures

图 5 不同充液率下蒸发管壁温与冷凝管周向最大温差沿程变化

Fig. 5 Changes in the wall temperature of the evaporation tube and circumferential maximum temperature difference of the condensing tube along the length direction of the tubes at various liquid filling rates

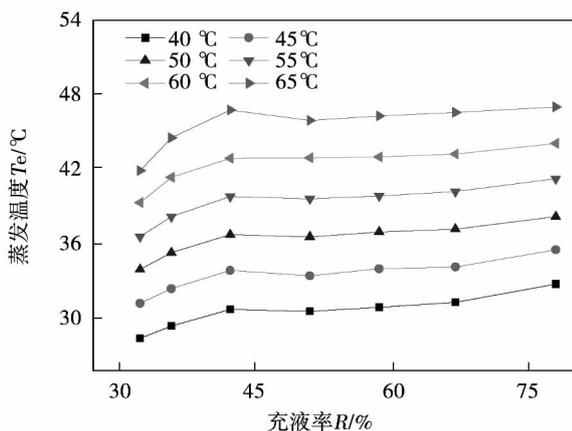
图 5(b) 给出了不同充液率下冷凝管 5 个壁温测点最大周向温差沿程变化。从图中可以看出,周向最大温差沿程整体而言呈递减趋势,且充液率越大,周向温差越小,下降亦越快。在充液率较低时,周向最大温差可达 7 °C,最小可达 4 °C。而在充液率为 78.2% 时,冷凝管出口周向温差不到 2 °C,此

此外,在实验中还发现,在不同热负荷下,当充液率较低时,试验热管系统从启动到稳定运行大约需要 50 min;当充液率较高时,启动时间缩短至 30 min。这充分表明,充液量较大时有利于系统的启动

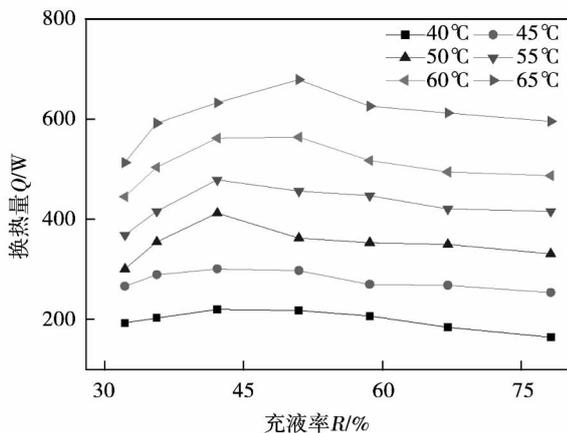
与稳定。

2.3 多工况下分离型热管整体性能分析

图 6 给出了蒸发温度、换热量在不同热源温度下与充液率的关系。从图 6(a) 中可以看出, 充液率越大, 氨工质蒸发温度越高; 当充注量过少而不能满足外界换热时, 蒸发温度将更低。分离型热管管内蒸发温度主要由冷、热侧换热量决定。当系统处于启动阶段, 假设蒸发侧换热量较大, 而冷凝侧无法满足时, 此时将会有更多的工质参与蒸发, 使得管内工质蒸发压力提高, 饱和温度增大, 从而使得蒸发侧换热温差减小, 冷凝侧换热温差增大, 使得系统自动朝着稳定的工况运行。



(a) 蒸发温度与充液率关系



(b) 换热量与充液率关系

图 6 蒸发温度与换热量在不同热源温度下与充液率关系

Fig. 6 Relationship of the evaporation temperature and heat quantity exchanged with the liquid filling rate at various heat source temperatures

从图 6(b) 中可以看出, 在不同热源温度下, 换

热量随着充液率的不断增大, 呈先增加而后减小的趋势; 对每一个热源温度, 均存在一个最佳充液率。对于 40 - 55 °C 工况, 最佳充液率为 35.6% - 50.9%; 对于 60 °C 和 65 °C 工况, 最佳充液率在 42.1% - 58.6% 之间。由此可以看出, 外界换热强度越大, 最佳充液量越高。当充液率过低时, 蒸发管上部被单相蒸汽占据, 管内换热严重恶化, 故此时换热量较小; 而当充液率过高时, 冷凝管内底部凝液较多, 顶部液膜较厚, 热阻较大, 管内凝结换热亦被严重恶化, 从而造成整体换热量的下降。当蒸发管内两相区长度最长, 且出口干度接近于 1, 此时才最接近分离型热管最佳工作状态。为了避免在分离型热管换热器在实际运行中蒸发管顶部出现干涸现象, 应适当提高充液量。

3 结 论

(1) 在相同的充液率下, 分离型热管蒸发温度、换热量与外界热源温度成正比关系。外界热流密度越大, 氨工质沸腾换热系数越大, 最高可达 7 000 W/(m² · K)。

(2) 在相同的热源温度下, 充液率越大, 分离型热管蒸发温度越高。不同热负荷下, 分离型热管均存在一个最佳充液率, 且在一定范围内热负荷越大, 最佳充液率越高。实验条件下, 对于 40 - 55 °C 工况, 其最佳充液率在 35.6% - 50.9%, 而对于 60 和 65 °C 工况, 其最佳充液率范围为 42.1% - 58.6%。

(3) 水平冷凝管周向存在明显的壁温差异, 顶部温度最高、中部次之、底部最低。周向最大温差沿程整体而言呈递减趋势, 且充液率越高, 周向温差越小。

参考文献:

[1] Hirashima M, Kawabata K, Negishi K. Experimental study on a separate type thermosyphon[J]. Heat and Mass Transfer. 1994, 29(8): 479 - 486.

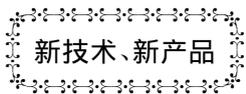
[2] Chen K S, Chen Y Y, Tsai S T. An experimental study of the heat transfer performance of a rectangular two-phase natural circulation loop[J]. Experimental Heat Transfer, 1990, 3(1): 27 - 47.

[3] 郝莹, 臧润清, 金育义. 以 R600A 为工质的分离式热管的实验研究[J]. 低温与超导, 2009, 37(12): 37 - 41.

HAO Ying, ZANG Run-qing, JIN Yu-yi. Experimental research of a detachable type heat pipe with R600A serving as the working medium [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(12): 37 - 41.

- [4] 陈 岚, 苏俊林, 伍贻文. 分离式热管充液率实验研究[J]. 上海理工大学学报 2003 25(3): 285-288.
CHEN Lan, SU Jun-lin, WU Yi-wen. Experimental study of the liquid filling rate of a detachable type heat pipe [J]. Journal of Shanghai University of Science and Technology 2003 25(3): 285-288.
- [5] 唐志伟, 师明星, 韩雅芳, 等. 分离型热管换热器传热特性的实验研究[J]. 工程热物理学报 2012 33(7): 1190-1192.
TANG Zhi-wei, SHI Ming-xing, HAN Ya-fang, et al. Experimental study of the heat transfer characteristics of a detachable type heat pipe heat exchanger [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012 33(7): 1190-1192.
- [6] 罗海清, 汤广发, 黄文胜, 等. 热虹吸管散热器与热管工质的实验研究[J]. 煤气与热力 2005 25(4): 17-20.
LUO Hai-qing, TANG Guang-fa, HUANG Wen-sheng, et al. Experimental study of thermosyphon radiator and heat pipe working media [J]. Coal Gas & Heat 2005 25(4): 17-20.
- [7] 易冲冲, 王 文, 匡以武, 等. 乏燃料池长期非能动冷却可行性分析[C]. 第十三届反应堆热工流体学术会议 2013.
YI Chong-chong, WANG Wen, KUANG Yi-wu, et al. Feasibility analysis of the long-term non-energy-driven cooling in a fuel-deficient pool [C]. 13th Reactor Thermal Fluid Conference 2013.
- [8] 徐济望. 沸腾传热和气液两相流[M]. 北京: 原子能出版社 2001.
XU Ji-jun. Boiling heat transfer and gas-liquid two-phase flow [M]. Beijing: Atomic Energy Press 2001.

(丛 敏 编辑)



新技术、新产品

热力装置燃烧碳氢燃料时减少 NO_x 排放工艺方法的效果分析

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.008

据《Энергетика》2013年3-4月刊报道,白俄罗斯国立技术大学的专家就抑制动力锅炉 NO_x 形成的各种工艺方法的效果进行了分析和比较。

这些工艺方法包括:

1. LEA(低过量空气);
2. 分阶段将空气引入炉膛;
3. 将水蒸汽和氨喷到锅炉火焰上;
4. 烟气再循环;
5. 分阶段填加燃料;
6. 低毒性燃烧器和分阶段引入空气、烟气再循环、分阶段添加燃料;

列出了这些方法、 NO_x 减少程度、百分比、应用的限制和注意事项。

应特别关注在燃烧碳氢燃料时,利用富氧空气减少 NO_x 排放的研究。这些计算结果已经证明,借助于提高氧含量到 50% (按体积),有可能使形成的 NO_x 减少 21%。

(吉桂明 摘译)

thing to do with the width-depth ratio of the channel ,fluid pressure and heating condition. Compared with the currently available flow pattern transition criteria ,the most transition boundaries of the flow patterns cannot be predicted very well ,therefore ,it is necessary to develop a new theoretical model for predicting the transition of the water-steam two-phase flow pattern of a flow heated at a single side of a narrow channel. **Key Words:** thermodynamics ,rectangular narrow channel ,water heating ,flow pattern chart ,transition criterion ,visualization study

静止流体中颗粒污垢沉积模型数值模拟 = **Numerical Simulation of the Granular Foul Deposition in a Static Fluid** [刊 汉] XU Zhi-ming ,SUN Mei (Northeast University of Electric Power ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) , ZHANG Yi-long (North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(6) . -627 -632

To study the law governing the granular foul deposition in a static fluid ,a granular foul deposition model was established based on the solid-liquid two-phase flow theory and the diffusion theory ,by using the numerical simulation method ,changes of the granular deposition speed ,concentration and deposition quantity with the deposition process were analyzed and studied with the law controlling the deposition of particles with a diameter being greater than 5 μm being obtained: all the granular deposition speed ,concentration and deposition quantity assume a step-by-step progressive type tendency and the particles finally deposit to the bottom at a constant deposition speed. The closer to the bottom ,the shorter the deposition time. The closer to the surface ,the quicker the change of the concentration. When the simulation value and the test one are analyzed and contrasted ,it has been found that both are in relatively good agreement and their error is within the range permitted. **Key Words:** granular foul ,deposition ,model ,numerical simulation ,test verification

分离型热管单管回路传热特性实验研究 = **Experimental Study of the Heat Transfer Characteristics of the Single Tube Loop of a Separate Type Heat Pipe** [刊 汉] YI Chong-chong ,WANG Wen ,WANG Bo-jie ,ZHENG Wen-long (Refrigeration and Cryogenics Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29(6) . -633 -638

As high efficiency non-energy-driven heat transfer elements ,separate type heat pipes have obtained a wide use in industry. With ammonia serving as the working medium ,an experimental study was performed of the single tube loop of a separate type heat pipe. In this connection ,the influence of the temperature of the heat source and the liquid filling rate on the heat transfer performance of the heat pipe was mainly discussed. The test results show that the higher the temperature of the heat source ,the higher the working temperature in the heat pipe and the larger the

heat quantity exchanged by the heat pipe. The boiling heat exchange coefficient of ammonia will increase with an increase of the heat flux density, being up to $7\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ under the test conditions. In addition, it has been found that the horizontal condensing tube wall has its circumferential temperature difference. Under different operating conditions, there exists an optimum liquid filling rate for a separate type heat pipe and in a certain range, will increase with an increase of the heat load. **Key Words:** separate type heat pipe, optimum liquid filling rate, ammonia

圆管内间隔插入交叉半椭圆片传热与流动的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Heat Transfer and Flow in a Round Tube Intermittently Inserted With Cross-semi-elliptical Plates** [刊 汉] WANG Shuang-feng, ZHANG Hong-nan (Education Ministry Key Laboratory on Enhanced Heat Transfer and Process Energy-conservation, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640), LI Xuan-you (Center for Research of Energy-saving in Industry, Shandong Provincial Academy of Sciences, Jinan, China, Post Code: 250103) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6) . - 639 - 644

To improve the flow and heat transfer performance of a viscid fluid inside a heat exchange tube, cross semi-elliptical plates were inserted at an interval inside the tube and with water serving as the working medium, a corresponding physical and mathematical model was established with its heat transfer and flow characteristics being numerically simulated. In the meantime, its heat transfer performance was compared with that of a bare tube. The research results show that to insert cross semi-elliptical plates into a round tube can effectively enhance its comprehensive heat transfer performance and its comprehensive performance evaluation coefficient (PEC) may range from 1.1 - 1.95.

Key Words: cross semi-elliptical plate, numerical simulation, heat transfer, flow, field synergy analysis

螺旋管内迪恩涡强化传热的试验研究 = **Experimental Study of the Dean Vortex-enhanced Heat Transfer Inside a Spiral Tube** [刊 汉] ZHU Hui, WANG Han-qing, LIU Zhi-qiang (College of Energy Science and Engineering, South China University, Changsha, China, Post Code: 410083), ZHU Hui, WANG Han-qing (Center for Collaborative Innovation of Building Energy-saving and Environment Control Key Technologies, Hunan Polytechnic University, Zhuzhou, China, Post Code: 412008) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(6) . - 645 - 650

Under the boundary conditions in the first category, based on the Dean vortex theory, seven kinds of spiral copper tube and straight tube with various geometrical parameters were used to perform a heat transfer test and changes of the Nusselt number, pressure drop and enhanced heat transfer comprehensive performance evaluation coefficient of the fluid inside the spiral tube with Reynolds number, curvature ratio and twist rate were obtained. The test results