

纳米悬浮液热虹吸管的传热性能试验研究

向 军, 李菊香

(南京工业大学 能源学院, 江苏 南京 210009)

摘 要: 在相同的试验条件下, 对比研究了纳米 CuO-去离子水(DW)悬浮液重力热管与普通 DW重力热管的启动性和等温性, 研究了纳米工质热管的充液率和颗粒浓度对热管工作特性的影响, 对纳米工质热管的强化传热机理进行了初步探讨。研究表明: 纳米工质热管比普通热管启动快; 纳米工质热管蒸发段外壁温的高低与充液率、纳米浓度和加热条件有关; 纳米颗粒浓度和充液率对热管的传热性能影响较大, 且存在最佳浓度(本研究为 5%)和最佳充液率(本研究为 44.3%); 高浓度纳米工质热管比普通 DW重力热管易于达到传热极限; 试验中纳米悬浮液重力热管的传热强化率为 16.19%~146.27%。

关 键 词: CuO纳米悬浮液; 热虹吸管; 强化传热; Brownian 运动; 充液率; 浓度

中图分类号: TK172.4 TK124 文献标识码: A

引 言

在大多数情况下, 固体的导热系数比液体的导热系数大 1~3 个数量级^[1~2], 可以预期, 以添加固体颗粒的流体作为传热的工质能大幅度地强化传热。但事实上, 由于所添加固体颗粒的粒径太大或其与液体的密度差相差太大, 固体颗粒易于沉降, 其不适合热工要求。但是, 当颗粒的粒径达到纳米级尺度时, 颗粒具有较高的表面能和很大的比表面积, 以及比液体高得多的比热容等因素^[3], 使得纳米固体颗粒相对于毫米级或微米级固体颗粒而言不易沉降, 且在一定的浓度下, 强化传热较流动功耗占优, 因而可以将其添加到液体工质中, 使这种工质达到更好的传热效果。宣益民等人在水中加入 1%~7.5% (V_V) 的粒径为 100 nm 的纳米 Cu 颗粒制备水基 Cu 纳米流体^[4], 其导热系数可比纯水提高 24%~78%。Tsa 等人试验得出水基金纳米流体可有效降低热管传热过程中的总热^[5]。黄素逸等人得出水基纳米 ZnO、SiO₂、Al₂O₃、TiO₂ 流体相对于

纯水而言可将热管的总换热系数提高 13.584%~17.71%^[6]。彭玉辉等人将水基纳米 Al₂O₃ 用于热虹吸管^[7], 得出的结论是其强化传热增加率达 47%~96%。

本研究将纳米 CuO 颗粒加入到 DW 中作为两相闭式热虹吸管的工质, 对该种热管进行了传热性能试验, 并对其与普通 DW 热管进行了启动性和等温性的对比, 研究了这种工质的充液率和纳米颗粒浓度对热管蒸发段的传热系数的影响, 同时简要分析并归纳了该种热管的强化传热机理。

1 试验系统

图 1 为试验装置, 热管的总有效长度为 1 657 mm, 内径 26 mm; 其中, 冷凝段管外为夹水套, 套管有效长度 295 mm, 内径 57 mm。在蒸发段的管外壁和中心管内布置了 E 型热电偶, 各热电偶的轴向位置如图 2 所示。

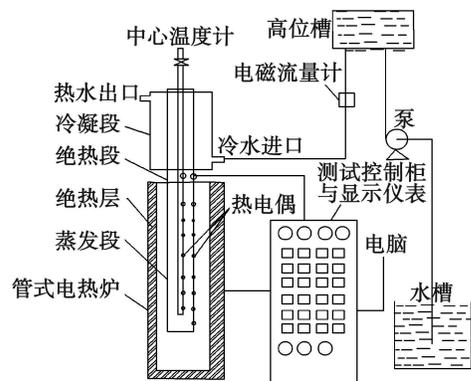


图 1 试验装置

纳米 CuO 颗粒的平均粒径为 50 nm, 在为试验而配置的悬浮液中, 颗粒的体积浓度分别为 2%、5% 和 8%。试验所取热管蒸发段的充液率分别为

收稿日期: 2009-03-06 修订日期: 2009-03-13

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2004214)

作者简介: 向 军 (1981-), 男, 四川达州人, 南京工业大学硕士研究生。

36.86%、38.92%、41.44%和 44.30%，以此获得不同颗粒浓度和不同充液率对热管蒸发段传热性能的影响。

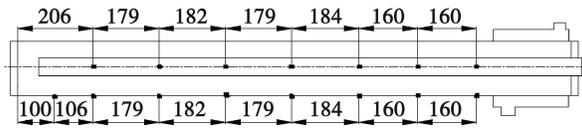


图 2 管外壁与中心管内的热电偶沿轴向分布情况

2 试验结果与分析

本研究对纳米 CuO-DW 热管与普通 DW 热管的启动性能、蒸发段管壁的等温性和传热极限进行了对比试验, 对不同充液率和不同纳米颗粒浓度的纳米 CuO-DW 热管进行了传热性能的测试。

2.1 启动性能

将浓度分别为 2%、5% 和 8% 的纳米 CuO-DW 热管和相同充液率下的普通 DW 热管进行了启动性能的对比试验。结果发现不同浓度的纳米 CuO-DW 热管由环境温度 28 °C 升到 80 °C 所需的时间为 3.5 ~ 4 min, 而普通 DW 热管则需要 8 min, 即纳米

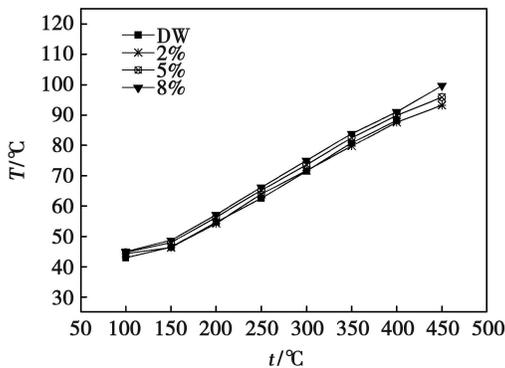
CuO-DW 热管的启动速度为普通 DW 热管的 2 倍以上。其原因是由纳米 CuO 颗粒的高比热容和小尺度效应、大比表面效应等因素使热管内壁与工质间的接触热阻大大减小; 同时, 纳米 CuO 颗粒在液体中起到了沸腾核化点的作用, 降低了沸腾所需的过冷度, 从而使沸腾加速。

2.2 蒸发段壁温分布

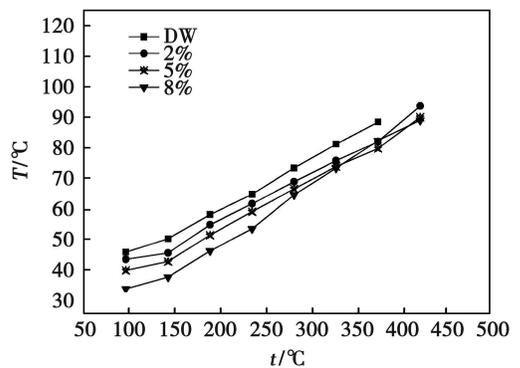
对比研究发现: 纳米 CuO-DW 热管蒸发段的外壁平均温度高低除与加热热流密度有关外, 还与纳米颗粒浓度、工质充液率有关。

(1) 当充液率为 36.86% 时, 如图 3(a) 所示, 对于纳米 CuO 浓度为 2% 和 5% 时的热管蒸发段的外壁平均温度与普通 DW 热管的壁温相比级别接近; 而浓度为 8% 的纳米 CuO-DW 热管壁温与普通 DW 热管相比, 低热流加热时高出 1~2 °C, 高热流加热时高出 4~5 °C。

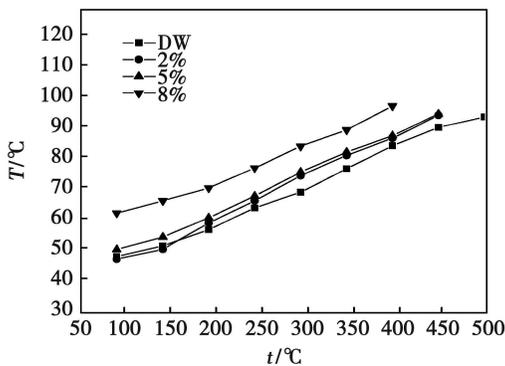
(2) 当充液率为 38.92% 时, 如图 3(b) 所示, 无论是高热流加热还是低热流加热, 纳米 CuO-DW 热管的各外壁温度都比普通 DW 热管的低, 且纳米浓度越高, 其对应的壁温越低。浓度为 2%、5% 和 8% 的纳米 CuO-DW 热管壁温分别比 DW 热管壁温低 2~6 °C、6~10 °C 和 6~15 °C。



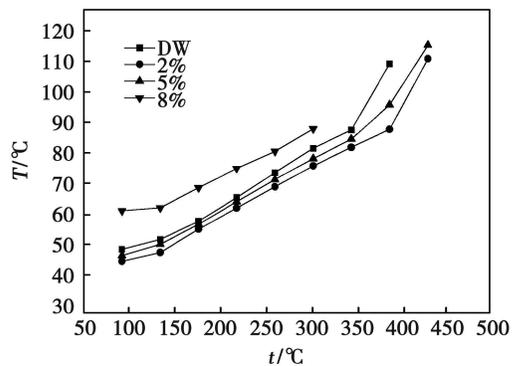
(a) 充液率 36.86%



(b) 充液率 38.92%



(c) 充液率 41.44%



(d) 充液率 44.30%

图 3 不同充液率和浓度条件下热管蒸发段外壁温度对比

(3) 当充液率为 41.44% 时, 如图 3(c) 所示, 纳米 CuO-DW 热管的各外壁温度都比普通 DW 热管的高, 浓度为 2% 时高出 2~5 °C; 浓度为 5% 时高出 2~7 °C; 浓度为 8% 时高出 13~15 °C。

(4) 当充液率为 44.30% 时, 如图 3(d) 所示, 纳米 CuO-DW 热管与普通 DW 热管的各外壁温度相比, 浓度 2% 时低 2~6 °C; 浓度 5% 时低 1~5 °C; 浓度 8% 时高 6~12 °C (此时, 可能是高浓度导致的热管内部的汽-液界面热阻加大, 颗粒积聚加重)。

由此可见, 在其它条件相同时, 热管壁温高低与浓度和充液率密切相关。出现以上的现象的原因是由纳米颗粒的高导热性、颗粒的量子效应和颗粒的 Brownian 运动等因素所引起的。同时, 充液率对这种热管传热性能的影响较大, 纳米颗粒的上述特性是导致如此的管壁壁温特性的主因。单就热管工作温度而言, 其充液率在 36.86%~44.30% 范围内、浓度为 2%、5%、8% 时, 36.86% 和 38.92% 两种充液率在低纳米浓度 (比如试验中的 2% 和 5%) 时, 可以保证其壁温较低, 这样有利于热管长期稳定工作。

2.3 纳米浓度和充液率对热管蒸发段换热性能的影响

对于普通热管, 充液率和加热的热流密度是影响热管换热的两个最重要的因素^[8]。经过试验发现, 对在基液中加入纳米颗粒的热管, 影响换热系数的大小除以上因素外还与纳米颗粒的体积浓度高低有关。其纳米 CuO-DW 热管蒸发段传热性能相对于普通 DW 热管的强化率随充液率和浓度的变化而变化, 如图 4 所示。蒸发段的平均换热系数定义为:

$$h = \frac{Q}{A_i (T_{we} - T_v)} \quad (1)$$

式中: h —热管蒸发段的平均换热系数; Q —传热量 (冷却水带走热量计); T_{we} —热管蒸发段的平均外壁温; T_v —热管的管内蒸汽温度 (以中心管内所测温度近似); A_i —热管蒸发段的内表面积。

2.3.1 充液率的影响

热管的充液率分别取为 36.86%、38.92%、41.44% 和 44.30%, 4 种情况蒸发段的平均换热系数的试验结果是: 普通 DW 热管的蒸发段换热系数在个工作温度时基本接近, 即在所试验的范围内充液率对蒸发段换热系数的影响较小; 而对于纳米 CuO-DW 热管, 如图 4 所示, 在各个不同的纳米浓度时, 蒸发段换热系数在个工作温度随充液率的变化较

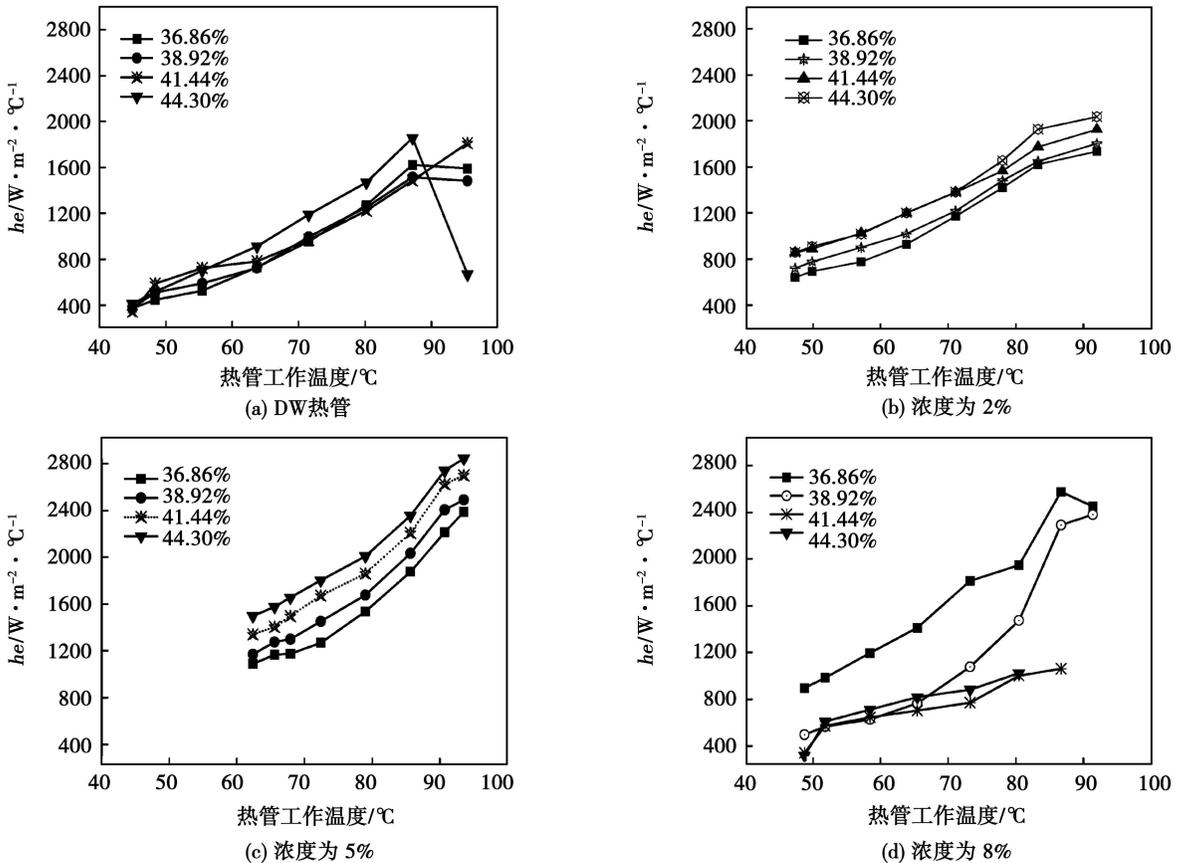


图 4 充液率对热管蒸发段换热系数的影响

大, 说明充液率对纳米 CuO-DW 热管蒸发段的换热性能的影响较大。当浓度为 2% 和 5% 时, 纳米 CuO-DW 热管蒸发段的换热系数随充液率的增加而增大, 但当浓度为 8% 时, 其纳米 CuO-DW 热管蒸发段的换热系数随充液率的增加而降低。8% 浓度的工质的热管换热效果被恶化的主要原因是: 高浓度工质导致工质的流动热阻、蒸发热阻增加。所以对比可知, 以纳米 CuO-DW 热管的最佳充液率应该比普通 DW 热管的最佳充液率大。

2.3.2 浓度的影响

由图 5 可知, 在 4 种充液率条件下, 纳米 CuO

颗粒的浓度为 2% 和 5% 时, 蒸发段的换热系数随浓度的增加而增大, 但当浓度达 8% 时, 换热系数出现了不稳定现象, 有时比 2% 浓度的更大, 有时甚至低于普通 DW 的情况, 其原因在于, 高浓度的纳米颗粒在水中发生了团聚, 当加热热流密度较小时, 这种团聚体几乎不运动; 但是, 当高热流密度时, 团聚体遭到破坏, 粒子就会发生 Brownian 运动。所以纳米 CuO-DW 热管存在一个最优浓度, 本试验中当纳米浓度为 5% 时, 热管的换热效果最好, 其换热被强化了 (87.05% ~ 146.27%), 而高浓度 (8%) 的热管换热效果被恶化 (本试验为 16.19%)。

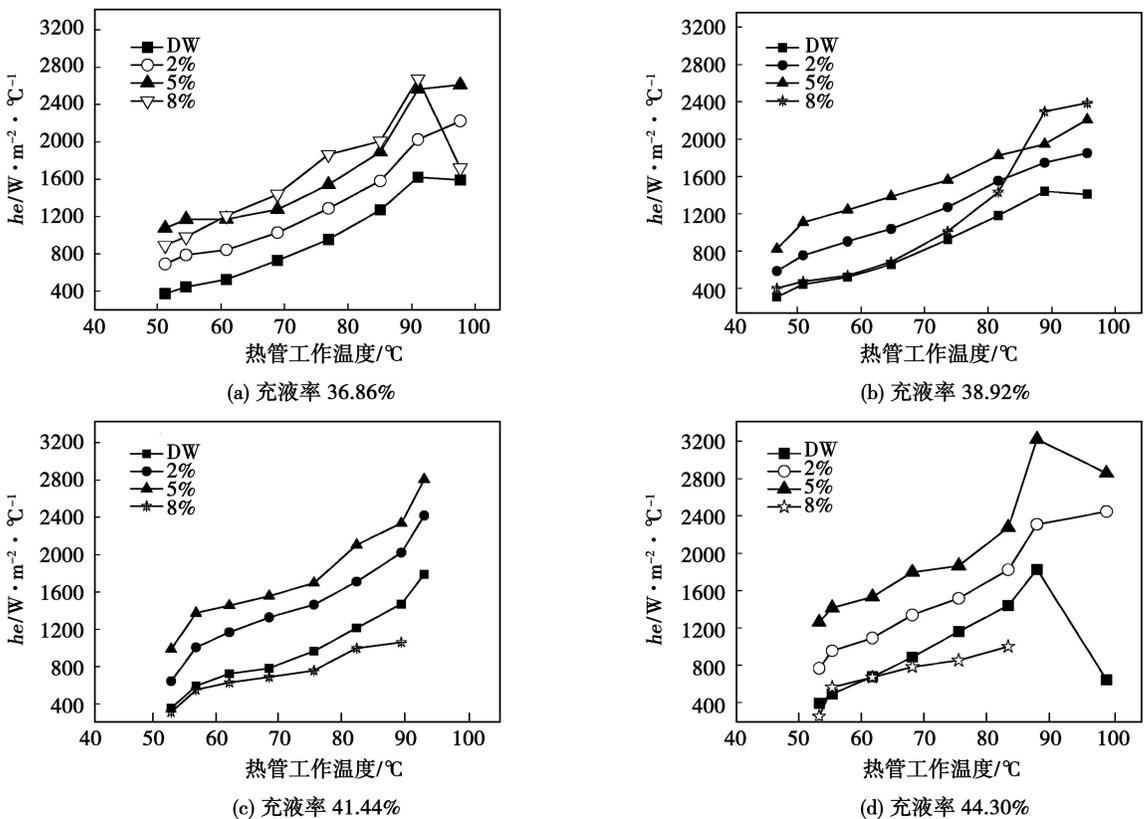


图 5 纳米浓度对热管蒸发段换热系数的影响

图 6 为不同纳米浓度的纳米 CuO-DW 热管与普通 DW 热管相比, 蒸发段传热性能的强化率随充液率的变化。由图可知, 作为热管工质的纳米悬浮液存在一个最佳的颗粒体积浓度, 在该浓度时, 强化传热效果最明显, 本研究中的最佳颗粒体积浓度为 5%, 其强化传热增加率为 87.05% ~ 146.27%。同时由图 4 和图 6 可知, 纳米 CuO-DW 热管的最佳充液率应该比普通 DW 热管的最佳充液率大。

2.4 传热极限

试验中还发现, 在小充液率 (36.86%) 时, 普通

DW 热管和 2%、5% 纳米浓度的纳米 CuO-DW 热管的传热极限相差不大。当充液率增大时, 随着炉膛加热功率的不断增大, 纳米 CuO-DW 热管出现传热极限的工作温度比普通 DW 热管要高, 但 8% 纳米浓度的 CuO-DW 热管出现传热极限的工作温度反而比普通 DW 热管的更低。这主要是因为高纳米浓度会引起热管管壁的出现溪流现象, 导致管壁局部干涸, 从而出现局部过热现象。

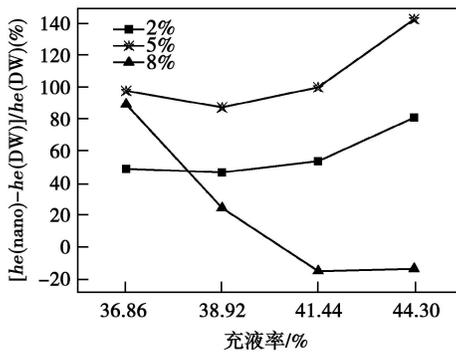


图 6 纳米 CuO-DW 热管蒸发段传热性能
的强化率随充液率和浓度的变化

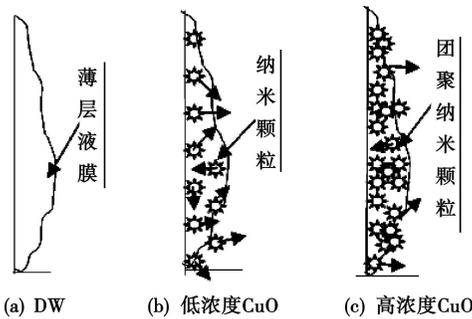


图 7 管壁上的薄液膜

3 强化换热机理分析

由试验可知,加入纳米 CuO 后热管的换热性能得到了明显的改善,可能原因在于:

(1) 由于纳米颗粒本身的导热能力比水的导热能力强,所以纳米颗粒的加入增强了热管工质的有效导热系数。

(2) 在小热流密度时,热管的蒸发段的液池内进行的不再是自然对流换热,而转变为弱势的强制对流换热。其依据是:工质中的纳米颗粒在液池内进行着 Brownian 运动,当工质被加热时,粒子的 Brownian 运动会变得异常激烈,每一个粒子的 Brownian 运动都会引起其周围的液体一种微对流^[9],因而变成了弱势的强制对流。这种微对流的存在也强化了热管在低热流密度时的换热。

(3) 在高的热流密度时,液池和管壁液膜内进行的是核态沸腾。而大量的纳米颗粒被吸附在管壁上,当纳米颗粒的粒径大于液体均质成核的临界半径时^[10],纳米颗粒在液体中就能起到核化点的作用,这样的纳米颗粒对流体内部汽泡成核起到促进作用,即纳米颗粒在工质中充当了核态沸腾时所需

的大量汽泡形成的汽化核心,导致汽泡产生的密度与纯水相比大得多,而且汽泡尺寸均匀且小,因为纳米颗粒本身的 Brownian 运动,导致这些汽泡形成后很快就被带离了管壁,让出部位以便下一批纳米颗粒吸附并形成汽泡。这就使得纳米颗粒的加入既强化的核态沸腾又扰动了加热壁面微层液膜(即降低了核态沸腾的热阻)。又由于纳米颗粒易过热^[3],将导致含有这种纳米颗粒的流体发生汽泡成核所需的过热度就应更小。

(4) 在冷凝段,考虑到水与管壁的润湿性,可以认为该蒸汽进行的是膜状凝结,所以蒸汽凝结放出的相变热(潜热)必需穿过液膜才能传到冷凝段管壁上。这时,液膜层就成为传热的主要热阻。而在加入一定量的纳米颗粒后,则可以降低这种热阻,原因在于:如图 7 所示,其中图 (b) 代表纳米的浓度不高(比如本试验的 2%、5% 浓度)的液膜,其所加纳米几乎不会发生团聚且能够均匀分布在水中,这种情况下发生了表面吸附的纳米颗粒有两种作用:其一,固体颗粒的导热系数大于水,这样就导致纳米流体导热性高于纯水;其二,没有团聚的纳米颗粒可以发生剧烈的 Brownian 运动,即纳米颗粒扰动了管壁的液膜层,从而降低了该层液膜的热阻。但在高浓度下如图 7 中的 (c),大量的纳米团聚形成大的集团,这种集团是不会发生 Brownian 运动的或者只是很微弱的 Brownian 运动,所以在这种情况下,其强化换热只能依靠大量团聚体的导热系数高于基液水的导热系数来强化换热。当高浓度(比如 8%)工质的充液率达到 41.44%、44.30% 时,在高热流下加热,这时蒸汽与液膜层的剪切力使得冷凝段的热阻变得很大,冷凝液的流动阻力增大,其综合效果是各种阻力的耗散大于强化的效果。同时高浓度(8%)引起蒸发时汽-液界面浓度增加,导致蒸发热阻增加,以上总的情况是换热被恶化了,从而出现图 4 中浓度为 8% 的传热情形。

(5) 纳米颗粒有大的比表面、高的比热容和小尺寸效应,使得当工质与管壁接触时^[3],其接触热阻变得非常小,即出现了热短路现象。这种热短路现象的结果就使得 CuO 纳米热管的启动性变得很快,同时对于同样的热源,它会使同样的工质在单位时间内传输的热流密度比纯水热管大。但是,也正是这些因素,使得纳米颗粒的在高温时的耐热能力有限,如文献 [3] 所测的数据表明,材料在纳米级时,其熔化温度比普通块状材料低得多,将纳米悬浮液用于常温热管中是不会出现这种问题的。

4 结 论

(1) 与普通热管相比, 纳米 CuO-DW 热管具有很好的启动性, 其蒸发段壁温的高低与工质的充液率和工质中的纳米浓度、外部加热条件有密切的关系。

(2) 与普通热管一样, 充液率是其决定纳米悬浮液热管传输功率的重要因素。在本研究的充液率 36.86%~44.30% 范围内, 纳米 CuO-DW 热管的最佳充液率为 44.30%。同时, 纳米悬浮液的热管的最佳充液率大于传统热管的最佳充液率。

(3) 从纳米 CuO-DW 热管蒸发段的总体传热性能强化效果的角度来看, 在一定的纳米浓度范围内, 随着浓度的增加, 强化效果也会增加; 但超过这个范围后, 热管的传热反而会被恶化。本试验研究中的最佳浓度为 5%, 其强化传热效果达 87.05%~146.27%。而浓度为 8% 时, 传热被恶化可达 16.19%。

(4) 高纳米浓度的 CuO-DW 热管在大充液率时与普通 DW 热管相比, 更易于出现传热极限。

参考文献:

- [1] 程能林. 溶剂手册 [M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 1994.
- [2] 马庆芳, 方荣生, 项立成. 实用热物理性质手册 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986.
- [3] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] XUAN Y, LI Q. Heat transfer enhancement of nano fluid [J]. Heat Fluid Flow 2000 21: 58-64.
- [5] TSAI C Y, CHEN H T. Effect of structural character of gold nano particles in nano fluid on heat pipe thermal performance [J]. Materials Letters 2004 58(9): 1461-1465.
- [6] 黄素逸, 李中洲, 黄锜剑. 纳米材料在热管中的应用 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006 34(5): 105-107.
- [7] 彭玉辉, 彭玉辉, 黄素逸, 等. 纳米颗粒强化热虹吸管传热特性的实验研究 [J]. 热能动力工程, 2005 20(2): 138-141.
- [8] 庄 骏, 张 红. 热管技术及工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [9] GUPTA SUNIL K, ADVANI SURESH G. Role of micro convection due to non-affirmation of particles in a mono-disperse suspension [J]. Heat/Mass Transfer 1995 38(16): 2945-2958.
- [10] 王金照. 汽泡成核的分子动力学研究及纳米颗粒对成核的影响 [D]. 北京: 清华大学, 2005.

(本文责任编辑 何静芳)

新技术、新工艺

球面滚柱轴承技术的应用

据《Marine Engineers Review》2009年6月号报道, 总吨位为 121 878 t 航速达到 24 节的大型旅游船于 2008 年年末建成。该船使用了具有先进轴承技术的传动系统。

Celebrity Solstice 旅游船的推进传动装置使用了一个高速自动增益 (FAG) 径向球面滚柱轴承和二个球面滚柱推力轴承。

该旅游船的推进和操舵是利用一对 20 MW 吊舱推力器, 在运行过程中的振动和噪声级都非常低, 从而能保证旅客旅途的舒适性。

Schaeffler 的轴承使驱动装置的轴支承在两个吊舱的每个吊舱内的定位轴承侧, 接纳来自发动机和螺旋桨的推力和负荷。

大的球面滚柱推力轴承具有 850 mm 的外径, 充当主推力轴承并在 135 r/min 最大速度下承受多达 150 t 的推力负荷。在极端的情况下, 该轴承甚至可以在短时间内承受更大的多达 430 t 的负荷。

较小的副轴承也是一个 FAG 球面滚柱推力轴承, 外径为 620 mm, 它经受机动运行时反向的推力负荷。该轴承被设计成承受多达 20 t 的推力负荷, 在极端的情况下, 可以在短时间内承受多达 200 t 的负荷。

也是由 Schaeffler Group 供应的 FAG 径向球面滚柱轴承被设计成接纳来自发动机的径向负荷、螺旋桨的重量和动态力。该径向轴承以这样的方式布置在 Schaeffler 的推力组件装置中, 通过一个公共点使它们对中, 从而能够补偿传动轴的任何不对中。

先进的传动技术使用了专门涂层的球面滚柱轴承, 有助于保证船舶平稳、安全的机动, 同时也减少了振动和噪声级, 减少了燃油的消耗。

(吉桂明 摘译)

Share Holding Co. Ltd., Tianjin, China, Post Code: 300452), WANG Xiaojun (Thermal Company Harbin Investment Corporation Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 184 ~ 189

On the basis of an analysis comparison and argumentation of USA, Great Britain and German standard calculation methods as well as our country's same calculation ones, determined was the variety of calculation loads and the location of the examination and check points, and chosen were a stress concentration coefficient and the low cycle fatigue design curve. In addition, the strength criterion for calculating the main stress difference and the method for calculating the fatigue and damage safety criterion were determined. The method for calculating the radial temperature difference and its thermal stress as well as the method for synthesizing the inner pressure stress and radial temperature difference caused thermal stress were established. On this basis, the method for calculating the low cycle fatigue life of a supercharged boiler drum was determined to meet the maneuverability requirements for steam power plants. The establishment of the method in question can not only offer guidance for the design of supercharged boiler drums, but also lay a foundation for the exploratory study concerning the final determination of the method for calculating the low cycle fatigue life of supercharged boiler drums and other relevant problems. Key words: supercharged boiler, boiler drum, low cycle fatigue life, calculation method

纳米悬浮液热虹吸管的传热性能试验研究 = Experimental Study of the Heat Transfer Performance of a Nano-suspension-based Thermosyphon Pipe [刊, 汉] / XIANG Jun, LI Juxiang (College of Energy Source, Nanjing Polytechnical University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 190 ~ 195

Under the same test conditions, contrasted and studied were the startup and isothermal characteristics of a gravity heat pipe filled with nano-CuO-deionized water (DW) suspension and a common DW gravity heat pipe. Moreover, the influence of the liquid filling rate and the particle concentration of the nano-working medium heat pipe on its working characteristics was studied with a preliminary exploration of the mechanism governing the intensified heat transfer of the heat pipe. It has been found that the nano-working medium heat pipe can start up quicker than a common heat pipe. The exterior wall surface temperature of the evaporative section of the nano-working medium heat pipe depends on its liquid filling rate, nano-working medium concentration and heating conditions. The nano-particle concentration and the liquid filling rate exercise a relatively big influence on the heat transfer performance of the heat pipe and there exist an optimum concentration (5%) and an optimum liquid filling rate (44.3%). It is easier for the high concentration nano-working medium heat pipe to reach its heat transfer limits than the common DW heat pipe. The intensified heat transfer rate of the nano-suspension gravity heat pipe is within a range from 16.19% to 146.27% for the present test. Key words: CuO nano-suspension, thermosyphon pipe, intensified heat transfer, nano-working medium, Brownian motion

重力辅助平板型环路热管实验研究 = Experimental Study of a Gravity-assisted Plate Type of Loop Heat Pipe [刊, 汉] / GAIDongxing, LIU Zhichun, LIU Wei, YANG Jinguo (College of Energy Source and Power Engineering, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 196 ~ 201

Developed was a set of plate type evaporator and air cooled condenser with stainless steel wires serving as capillary cores, and loop heat pipes with methanol serving as the working medium. The emphasis was put on the study of their startup characteristics under different heat load conditions and their operating characteristics under off design