

下冷式脉动热管太阳能集热器传热性能实验研究

商福民¹,董宜放²,范是龙¹,杨清静¹

(1. 长春工程学院 能源动力工程学院,吉林 长春 130012;2. 中国科学技术大学 工程科学学院,安徽 合肥 230026)

摘要: 实验研究和分析了一种新型下冷式脉动热管太阳能集热器的传热特性。与传统太阳能集热器相比,下冷式脉动热管太阳能集热器水箱位于底部,真空玻璃管不盛水并嵌于水箱上,脉动热管作为传热元件,一部分置于真空玻璃管内,另一部分封于水箱中。实验过程中通过调整脉动热管冷热段间的比例,研究不同情况下集热器启动、运行特性及传热性能。结果表明,在集热器倾角为 70° 、脉动热管充液率为55%的情况下,脉动热管的当量导热系数随冷热段比例的减小而先升后降;当冷热段比例为47%时,脉动热管的启动温度最低、传热性能最优。

关键词: 传热性能;太阳能集热器;脉动热管;底部冷却;冷热段比例

中图分类号:TK513.5 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.03.031

[引用本文格式] 商福民,董宜放,范是龙,等. 下冷式脉动热管太阳能集热器传热性能实验研究[J]. 热能动力工程,2020,35(3): 214-219. SHANG Fu-min, DONG Yi-fang, FAN Shi-long, et al. Experimental study on heat transfer performance of bottom-cooling PHP in solar collector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 214-219.

Experimental Study on Heat Transfer Performance of Bottom-Cooling PHP in Solar Collector

SHANG Fu-min¹, DONG Yi-fang², FAN Shi-long¹, YANG Qing-jing¹

(1. School of Energy and Power, Changchun Institute of Technology, Changchun, China, Post Code: 130012;

2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei, China, Post Code: 230026)

Abstract: To investigate the heat transfer characteristics of a new type of bottom-cooling PHP of solar collector, a new system was designed and experiment was carried out. Compared with the traditional solar collector, the bottom-cooling PHP of solar collector water tank is located at the bottom, in which the vacuum glass tube is embedded without water. The experimental method is as follows: The PHP is used as a heat transfer element, a part of it is arranged in vacuum glass tube, while the other is placed in the water tank. During the experiment, by adjusting the ratio between the cold and hot sections of the PHP, the start-up, operation characteristics and heat transfer performance of the collector under different conditions were studied. The results indicate that under the condition that the inclination of the collector is 70° and the filling rate of the PHP is 55%, the equivalent thermal conductivity of the PHP increases first and then decreases with the decrease of the proportion of the cold and hot sections. The PHP has the lowest start-up temperature and best heat transfer characteristics when the ratio between lengths of the cold and hot sections of the PHP is 47%.

Key words: heat transfer performance, solar collector, PHP, bottom-cooling, ratio of hot and cold sections

收稿日期:2019-07-28;修订日期:2019-09-13

基金项目:吉林省科技攻关项目(20190303113SF);吉林省产业技术研究与开发项目(2019C057-5)

Fund-supported Project: Science and Technology Development Project of Jilin Province (20190303113SF), Industrial Technology Research and Development Project of Jilin Province (2019C057-5)

作者简介:商福民(1968-),男,黑龙江方正人,长春工程学院教授, E-mail: shangfumin68@163.com.

引言

太阳能热利用方式很多,太阳能热水系统是目前我国太阳能热利用的主要形式。同时,太阳能热利用的应用领域也从热水、洗浴逐步向采暖、发电、制冷以及工农业生产等领域扩展^[1-4]。

脉动热管(PHP)是由日本学者 Akahci^[5]于1994年最早提出的一种高效传热元件,其工作原理与传统热管相比有很大不同,是强化传热的一个重要发展方向,许多学者对脉动热管的传热机理及其强化传热进行了实验研究^[6-8]。其中,脉动热管蒸发段与冷凝段的长度和容量的分配会影响脉动热管传热效果,而且能够改变脉动热管内流动模式。当脉动热管蒸发段的设置低于某个特定的启动热负荷时,脉动热管内流体将不再振荡。同理,如果脉动热管冷凝段不能释放足够的热量,将限制脉动热管的最大传热量^[9-10]。部分学者将脉动热管应用在太阳能热水器上,结果表明将脉动热管应用到太阳能热水器上可以显著提高太阳能利用效率^[11-15]。

本文提出了一种新型下冷式脉动热管太阳能集热器,与传统太阳能热水器相比,水箱位于集热器底部,且真空玻璃管内不盛水。将集热器设计成承压式的型式,这样除了增加太阳能集热器整体稳定性外,还避免了真空玻璃管会由于冬季恶劣天气冻裂泄漏等问题。

1 集热器传热性能实验

1.1 实验装置

实验用脉动热管集热器主体由内径为3.8 mm、外径为5 mm、总长度为14.2 m的黄铜管弯曲而成的具有12个弯头的回路型脉动热管组成;集热器总长540 mm,其中,加热段最小长度255 mm,冷却段最大长度235 mm,绝热段长度50 mm;脉动热管内工质为去离子水,充液率55%。真空玻璃管内径107 mm,外径125 mm,内部长度850 mm,外部长度895 mm;真空玻璃管壁面镀有吸收比0.93~0.96、反射比0.08~0.15的黑镍选择性涂层。水箱长550 mm,宽180 mm,高235 mm,最大装水量23.2 L,实验中水的流量为35 L/h。水箱分为上下两部分,水箱上盖部分设有凹槽以放置真空玻璃管。脉动热

管在真空玻璃管至水箱的空间内移动,用以调节加热段和冷却段之间的比例。

1.2 实验方法

实验系统由水箱、流量控制器、太阳能功率计、数据采集器、计算机和脉动热管太阳能集热器等组成,如图1所示。脉动热管的蒸发段和冷却段分别布置2个温度测点,水箱进出口及真空玻璃管内各布置1个温度测点,测温采用铠装K型热电偶。实验时,在集热器保持倾角为70°,脉动热管充液率为55%的情况下,调整脉动热管冷热段长度比为92%、74%、59%、47%和36%时,通过对脉动热管不同冷热段比的启动温度与壁温特性、当量导热系数 λ (热阻 R)以及水箱侧吸热量 Q 进行对比分析,从而研究和分析脉动热管太阳能集热器的传热性能。

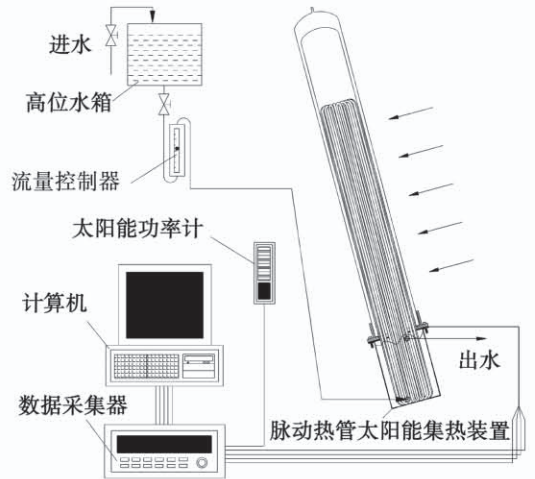


图1 脉动热管太阳能集热器实验系统

Fig.1 Experimental system diagram of PHP solar collector

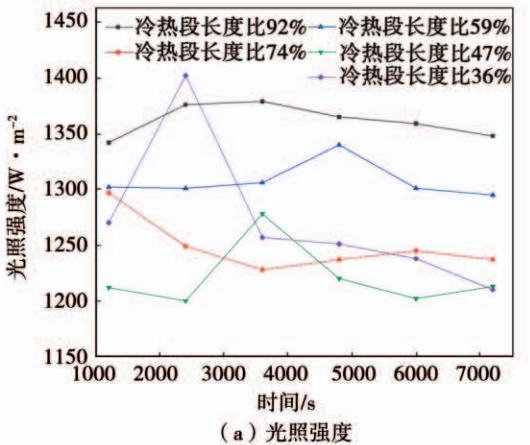
2 结果与分析

2.1 实验光照强度

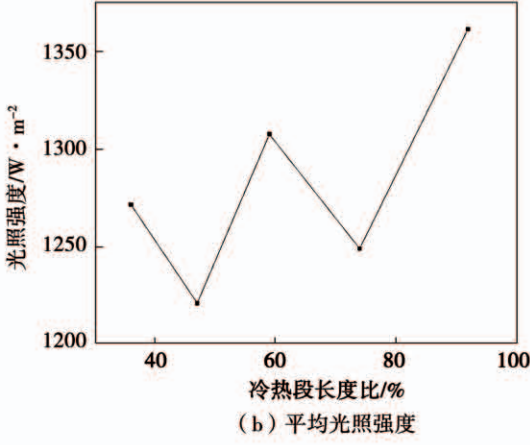
实验中5种工况下光照强度及其平均值数据变化如图2所示,光照强度数据每20 min检测一次。考虑到5种工况光照强度的不同,数据对比分析时,以脉动热管冷热段比92%的光照强度为基准进行折算,不同工况下光照强度的具体折算系数如表1所示。

2.2 脉动热管太阳能集热器启动与运行特性分析
脉动热管启动及运行特性是评价脉动热管太阳

能集热器运行的关键指标,脉动热管是否启动主要通过监测加热段和冷却段管壁温度的波形来判断。当冷、热端出现温度脉冲,即管内伴随着汽塞冷凝和液柱蒸发的相变流动过程,则说明脉动热管已经开始启动。实验结果如图 3 所示,从 5 种不同冷热段长度比情况下壁温特性可以看出:脉动热管工作过程可以分为启动阶段和稳定振荡阶段。



(a) 光照强度



(b) 平均光照强度

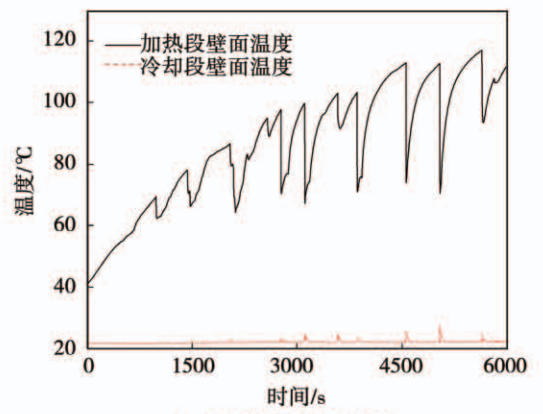
图 2 不同冷热段长度比时光照强度以及平均光照强度变化

Fig.2 Light intensity and average light intensity in 5 ways

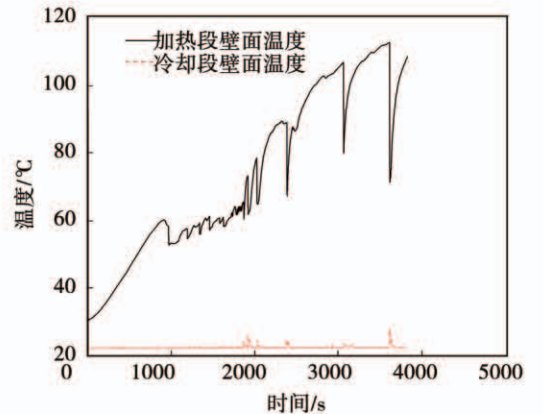
表 1 不同工况下光照强度折算系数

Tab.1 Conversion coefficient of illumination intensity under different working conditions

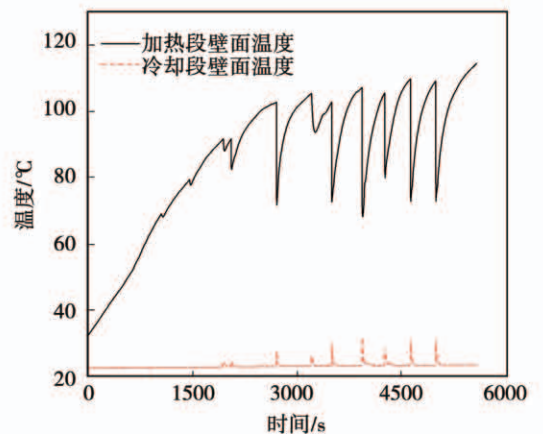
工况(冷热段长度比)/%	折算系数
92	1.000
74	1.063
59	1.015
47	1.087
36	1.044



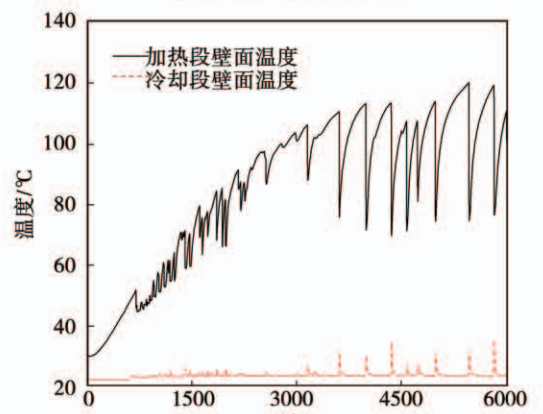
(a) 冷热段长度比92%



(b) 冷热段长度比74%



(c) 冷热段长度比59%



(d) 冷热段长度比47%

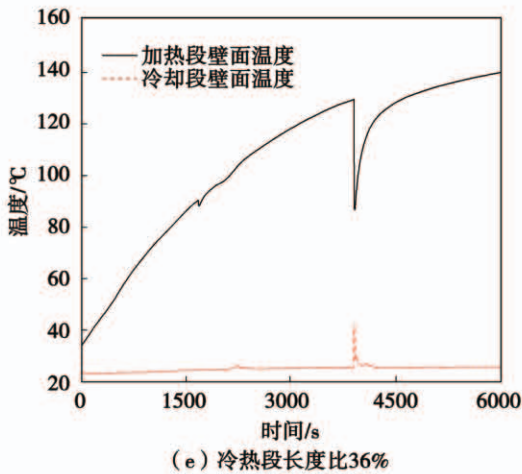


图3 不同冷热段长度比情况下脉动热管壁温特性

Fig. 3 Wall temperature characteristics of PHP under different hot and cold section ratio

2.2.1 启动特性

启动过程中,随着真空玻璃管内温度的提升,脉动热管加热段温度不断升高、工质不断吸热,当温度达到管内工质饱和温度时,液柱蒸发产生气泡,并不断膨胀推动气液工质流向冷却段,由于产生气泡的瞬间吸收汽化潜热,导致壁面温度出现“向下”的脉冲;同时,当气泡运动到冷却段时,工质被冷却,气泡凝结缩小甚至消失,同时也加大了冷热段间的压差,由于气泡消失的瞬间放出汽化潜热,导致壁面出现“向上”的脉冲。图中冷、热段壁温脉冲幅度的差异,主要是由冷、热段铜管壁面毕渥数 Bi 相差悬殊导致的。

脉动热管在随机性和不均衡性气液柱塞蒸发、凝结产生的交变压差作用下,管内工质出现往复、交替振荡,甚至循环振荡情况,直至稳定运行。基于以往的实验研究,影响脉动热管启动因素很多,在充液率不变的情况下,启动功率主要克服管内阻力,而启动功率一般用冷热段温差来衡量。从5种工况下对比实验可以看出:冷热段长度比不同时,脉动热管的启动特性不同,47%时的启动温度最低为51.82℃,如表2所示。

2.2.2 运行特性

脉动热管启动后,由于此时管内工质还未完全达到饱和状态,工质表现为小幅、局部振荡,随着真空玻璃管内温度进一步提高,脉动热管逐步由启动阶段过渡到稳定运行阶段。由图3中可以看出,不

同冷热段长度比的脉动热管从启动到稳定运行的壁温特性曲线表现出不同的特性。

表2 不同冷热段长度比情况下脉动热管的启动温度及稳定运行时的振荡周期

Tab. 2 Start temperature of PHP and oscillation period of stable operation under different hot and cold section ratio

冷热段长度比/%	启动温度/℃	振荡周期/min
92	79.7	7.46
74	60.1	6.56
59	68.5	5.94
47	51.8	5.2
36	84	>30

当冷热段长度比较大(92%)时,脉动热管启动温度相对较高,启动较晚。从启动到稳定运行前的过渡阶段,加热段壁温出现一些比较典型的“M”形脉冲曲线。这说明此时由于加热段占比相对较小,太阳能输入功率不足以克服循环流动阻力,表现为气泡产生过程中由于加热段工质未达到饱和状态,致使气化过程不够充分,有的气泡甚至没有到达冷却段就已萎缩或消失,所以对应时刻冷却段出现很小的脉冲甚至没有。随着加热段长度占比的增加,这种情况得到了改善,过渡阶段加热段“M”形脉冲逐步转化为“V”形脉冲。

但当加热段长度占比进一步增加,即冷热段长度比较小(36%)时,脉动热管启动温度较高,启动也较晚,且在实验过程中,从启动阶段开始没有达到相对稳定的运行阶段。这说明此时由于冷却段占比相对较小,太阳能输入功率又相对较大,管内工质蒸发不能有效地被冷却,加之冷却段液柱由于自重的影响,若推动其运动到加热段需附加的动力,致使管内振荡次数较少,加热段管内一直维持较高的水平。

在稳定运行振荡周期方面,不同冷热段长度比的振荡周期与启动温度具有一定的关联度,即启动温度较低,振荡周期也较短。同样,脉动热管冷热段平均温差也是最小的。综合以上分析,在本实验研究的范围内,冷热段长度比为47%时为最优的冷热段匹配。

2.3 脉动热管太阳能集热器传热性能分析

2.3.1 传热量

脉动热管传递的热量由冷却水箱进、出口水温

变化来确定,平均传热量为:

$$Q = q_m c_p \Delta t \quad (1)$$

式中: q_m —冷却水箱流量, kg/s; c_p —定压比热容, J/(kg·K); Δt —水箱进出口水的温差, °C。

不同冷热段长度比情况下,脉动热管平均传热量如图4所示。由于脉动热管传热量的主要成分是显热,而显热主要取决于两个因素:一是脉动热管内工质的流动速度;二是脉动热管内工质的质量。如图所示,在充液率55%不变时,脉动热管的平均传热量随冷热段比的减小先逐渐增加后逐渐减小。当冷热段长度比为47%时,脉动热管平均传热量为51 W,当冷热段长度比为36%时,脉动热管没有振荡,传热量22 W。这是由于充液率为55%时,脉动热管内工质质量相对较少,管内的工质更容易蒸发。当冷热段长度比为36%时,由于冷凝量跟不上蒸发量,管内工质不能及时回流,造成加热段部分过早烧干,因而传热量最小;同理得知,当冷热段长度比为92%时,由于蒸发量跟不上冷凝量,工质同样脉动缓慢,脉动热管无法连续稳定工作,因而传热量也较小;当冷热段长度比逐渐减小到47%时,由于脉动热管蒸发量逐渐增加,逐渐地补充冷凝量,从而管内工质回流也加快,使得脉动热管的极限传热量出现较晚,极限传热能力逐渐变大,因而传热量逐渐达到最大值。

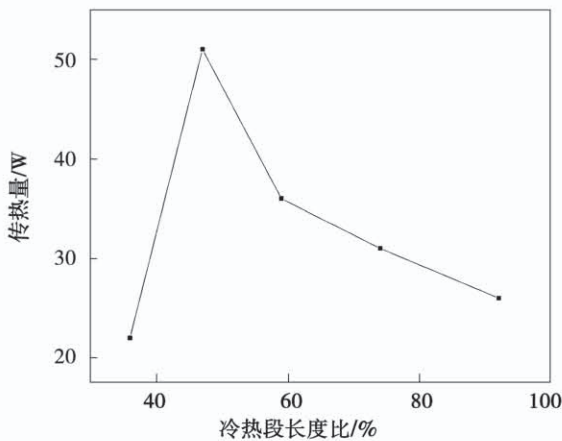


图4 不同冷热段长度比下脉动热管平均传热量变化

Fig. 4 Average heat transfer of different hot and cold segments than PHP

2.3.2 当量导热

当量导热系数 λ 定义为:

$$\lambda = \frac{QL}{A(t_h - t_c)} \quad (2)$$

式中: Q —脉动热管传递的热量, W, 由式(1)确定; L —蒸发段和冷凝段之间的平均长度, m; A —脉动热管流通通道总横截面积, m^2 ; t_h 、 t_c —脉动热管蒸发段和冷凝段平均壁温, °C。

图5为不同工况下当量导热系数随时间的变化。从图中可以看出,在充液率、倾角相同时,随着脉动热管冷热段长度比的减小,当量导热系数 λ 先逐渐增加,然后迅速减小。当量导热系数最大为1412.8 W/(m·K),约为铜导热系数的13倍。

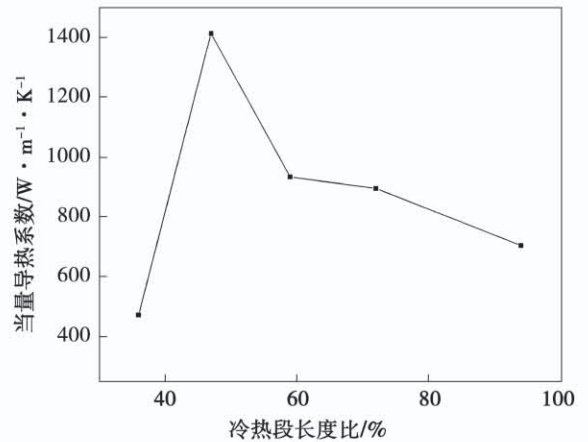


图5 不同冷热段长度比下脉动热管平均当量导热系数变化

Fig. 5 Average equivalent thermal conductivity of PHP with different ratio of cold and hot sections

2.3.3 集热器效率

脉动热管太阳能集热器效率计算取决于所参考的集热器面积,文献[16]对真空管集热器规定了3种集热器面积的定义:吸热体面积、采光面积和总面积。本文采用吸热体面积进行计算,真空管集热器的吸热体面积是吸热体的最大投影面积。

脉动热管太阳能集热器效率为:

$$\eta = P/(FG) \quad (3)$$

式中: η —以吸热体面积为参考的集热器效率,%; P —集热器实际获得的有用功率(脉动热管传热量 Q), W; F —真空管集热器的吸热体面积, m^2 ; G —太阳辐照度, W/m^2 。

由于冷热段长度比47%时脉动热管振荡最佳,所以,选取对应数据进行计算。对应的 P 为51 W(取传热量 Q), F 为 $0.775 \times 0.107 = 0.083 m^2$, G 为 $1220 W$ (取平均光照强度),带入式(3)得出平均效率 η 为50.4%。

3 结 论

(1) 脉动热管在冷热段长度比不同时,其启动特性不同,冷热段长度比为47%时的启动温度最低为51.82℃。

(2) 脉动热管的启动特性与运行特性是相关联的,在某一冷热段长度比越容易启动的脉动热管,其运行特性也越突出,脉动热管壁温振荡波形较为一致,振荡周期最短,冷热段间的温差也最小。

(3) 从传热特性来看,脉动热管启动和运行特性直接反应出了其传热性能,即冷热段长度比为47%时传热性能最优,其平均当量导热系数为1412.8 W/(m·K),对应的脉动热管太阳能集热器集热效率为50.4%。太阳能集热技术、冷热段长度比或冷热负荷分配直接影响脉动热管的传热性能。针对研究工况,脉动热管的最佳冷热段长度比在45%~50%间。

(4) 通过对下冷式脉动热管太阳能集热器传热性能实验分析可知,该种集热器结构上是可行的,运行时只要冷热段长度(面积)以及充液率间匹配合理,除了集热效率高于传统太阳能集热器外,还克服了其运行、安装及布置等方面的缺点,具有比较好的应用技术前景。

参考文献:

- [1] 陈德明,徐刚.太阳能热利用技术概况[J].物理,2007,36(11):840-847.
CHEN De-ming, XU Gang. Solar thermal utilization—an overview [J]. Physical, 2007, 36(11): 840-847.
- [2] 赵军,高留花.太阳能热利用技术研究进展与对策[J].建设科技,2012,21(21):34-37.
ZHAO Jun, GAO Liu-hua. Research progress and countermeasures of solar thermal utilization technology [J]. Construction Technology, 2012, 21(21): 34-37.
- [3] 张鑫,许崇涛.太阳能供暖系统的应用研究[J].节能技术,2019,37(4):360-363.
ZHANG Xin, XU Chong-tao. Application study on solar heating system [J]. Energy Conservation Technology, 2019, 37(4): 360-363.
- [4] 朱瑞,徐玉杰,李斌,等.太阳能蓄热式压缩空气储能系统特性分析[J].太阳能学报,2019,40(6):1536-1544.
ZHU Rui, XU Yu-jie, LI Bin, et al. Performance analysis on solar heat storage type compressed air energy storage system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(6): 1536-1544.
- [5] AKACHI H. Looped capillary tube heat pipe [C]//Proceedings of 71th General Meeting Conference of JSME, Tokyo, 1994.
- [6] 曹小林,席战利,周晋,等.脉动热管运行可视化及传热与流动特性的实验研究[J].热能动力工程,2004(4):411-415,441.
CAO Xiao-lin, XI Zhan-li, ZHOU Jin, et al. Experimental investigation of the visualization of pulsating heat-pipe operation as well as heat transfer and flow characteristics [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004(4): 411-415, 441.
- [7] 李惊涛,李志宏,韩振兴,等.脉动热管的流型及流向分析[J].热能动力工程,2009,24(3):347-351,410-411.
LI Jing-tao, LI Zhi-hong, HAN Zhen-xing, et al. An analysis of flow patterns and directions of a pulsating heat pipe [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(3): 347-351, 410-411.
- [8] 吕绍凡,苏磊,张红.乙醇-水双工质脉动热管传热性能实验研究[J].热能动力工程,2016,31(6):21-26,121.
LYU Shao-fan, SU Lei, ZHANG Hong. Experimental study on the thermal performance of ethanol-water double-medium pulsating heat pipe [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(6): 21-26, 121.
- [9] 汪双凤,西尾茂文.加热段冷却段长度分配对脉动热管性能的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(11):59-62.
WANG Shuang-feng, NISHIO S. Effect of length ratio of heating section to cooling section on properties of oscillating heat pipe [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(11): 59-62.
- [10] 汪健生,马赫.蒸发/冷凝段长度比对脉动热管性能的影响[J].化工进展,2015,34(11):3846-3851.
WANG Jian-sheng, MA He. Influences of the ratio of evaporation section length to condensation section length on the performance of pulsating heat pipe [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(11): 3846-3851.
- [11] 洗海珍,曹传钊,杨勇平,等.振荡流热管在太阳热水器上的应用[J].太阳能学报,2014,35(9):1658-1662.
XIAN Hai-zhen, CAO Chuan-zhao, YANG Yong-ping, et al. Application of oscillating heat pipes in the solar water heater [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(9): 1658-1662.
- [12] RITTIDECH S, WANNAPAKNE S. Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP) [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11/12): 1978-1985.
- [13] RITTIDECH S, DONMAUNG A, KUMSOMBUT K. Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat-pipe with check valve (CLOHP/CV) [J]. Renewable Energy, 2009, 34: 2234-2238.
- [14] KAEGARSHRIFABAD H, MAMOURI S J, SHAFII M B, et al. Experimental investigation of the effect of using closed-loop pulsating heat pipe on the performance of a flat plate solar collector [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5(1): 1753-1766.
- [15] ARAB M, SOLTANIEH M, SHAFII M B. Experimental investigation of extra-long pulsating heat pipe application in solar water heaters [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 42: 6-15.
- [16] GB 12936-2007, 太阳能热利用术语[S].
GB 12936-2007, Solar thermal utilization terms [S].