

太阳能热动力系统单元热管吸热器建模与仿真

桂晓宏, 袁修干, 宋香娥, 徐伟强

(北京航空航天大学人-机-环境工程研究所, 北京市 海淀区 100083)

Modelling and Simulation of Solar Dynamic System Cell Heat Pipe Receiver

GUI Xiao-hong, YUAN Xiu-gan, SONG Xiang-e, XU Wei-qiang

(Graduate School of Human-Machine-Environment Engineering, Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Haidian District, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Cell heat pipe receiver of solar dynamic system was numerically simulated. Accordingly, mathematical model was set up, numerical calculation method was offered, fluid dynamics software named Fluent 6.1 was used to simulate, and calculation results were compared with those of experimental results and basis heat receiver. Simulation results show that heat pipe receiver owns the performance of perfect heat transfer and ideal identical temperature, the axial temperature difference of heat pipe is little, phase change material(PCM) canisters situated in different places of heat pipe can melt simultaneously and uniformly. And heat pipe receiver lightens system mass, improves heat efficiency of system. At the same time, normal operation of wick ensures circumference temperature uniformity of heat pipe, thus heat pipe receiver avoids heat spot. In addition, heat pipe receiver has axial and radial performance of ideal identical temperature. All PCM canisters can freeze simultaneously at the end of eclipse, and freeze fully at last, so heat pipe receiver avoids heat ratcheting.

KEY WORDS: thermal power engineering; heat pipe receiver; solar dynamic; numerical simulation; phase change material

摘要: 通过对太阳能热动力系统单元热管吸热器进行研究,建立了相应的数学模型,给出了数值解法,运用计算流体力学软件 Fluent6.1 对其进行了仿真,并把仿真结果同实验结果和基本型吸热器进行了对比。仿真结果表明,热管吸热器中热管高效、均匀的传热性能大大缩小了热管和蓄热容器壁温的波动范围,从而提高了吸热器工作的稳定性和可靠性;热管吸热器提高了 PCM(相变蓄热材料)利用率,从而减轻了系统的质量;热管吸热器各蓄热容器内的 PCM 都能同步、

均匀的熔化,从而避免热斑现象;热管吸热器各蓄热容器内的 PCM 能够同时凝固,从而避免热松脱现象。

关键词: 热动力系统; 热管吸热器; 太阳能热动力; 数值仿真; 相变蓄热材料

0 引言

吸热/蓄热器^[1-7]是 20 世纪 60 年代以来太阳能动力系统(SD)研究中投入力量最多的部件。吸热/蓄热器的质量大约占发电系统总系统质量的 1/3,减少吸热器的质量对于减少发电系统的成本有重要的意义。因此开发质量轻、体积小、效率高的新型吸热器迫在眉睫。热管吸热器不仅能改善温度均匀性,而且能充分有效利用相变材料,这使得吸热器变得质量轻,体积小。本文参考 NASA 的研究进展,对热管吸热器的热性能进行了数值计算,验证了 PCM 的储热能力,降低了系统工作温度,缩小了循环工质出口温度波动范围,这对于改善系统电力转化部件的工作条件,对保证系统的稳定输出具有重要意义。计算结果表明热管吸热器具有良好的热性能,是应用于先进空间太阳能热动力发电系统极具发展潜力的吸热器方案之一。

1 热管吸热器结构设计及其工作原理

图 1 表示 Garrett 公司采用布雷顿循环(CBC)的热管吸热器结构示意图^[1]。在吸热器腔内沿周向排列了多根钠热管,每根热管分为 3 段,见图 2。靠近腔口的一段为吸热段,该段在热管上没有任何附加物;中部为储热段,在储热段的热管上套以多个分离的环型截面的 PCM 容器,高温相变材料封装在容器内;最靠腔底的一段为换热段,热管插入

基金项目: 国家自然科学基金项目(50276001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50276001).

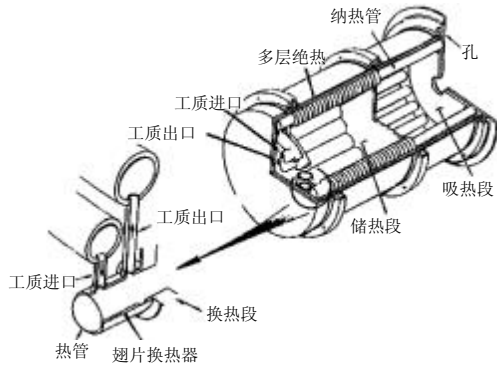


图1 用于 CBC 装置的热管吸热器
Fig. 1 Heat pipe receiver configuration(CBC)

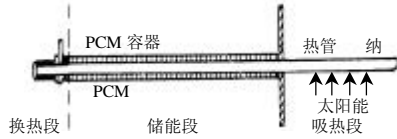


图2 热管吸热器换热单元管
Fig. 2 Cell heat pipe receiver

通过工质流体的翅片式换热器。

由于吸热段和储热段之间有隔板，在日照期只有吸热段能接受到太阳辐射热流。此时吸热段成为热管的蒸发段，而储热段和换热段成为冷凝段，提供热量熔解 PCM 和加热流体。在阴影期，吸热段除有少量通过腔口的辐射热损失外，基本处于绝热状态，储热段则由冷凝段转变为蒸发段，换热段仍为冷凝段，此时 PCM 凝结放热仍有热量提供给换热段，使得空间站处于阴影期时仍能连续工作发电。

目前对于热管吸热器的热分析较多的集中在实验研究方面^[2]。本文对吸热器进行了热分析，得到了轨道周期内容器外壁最高温度、热管壁温、PCM 熔化率等主要参数的变化。

2 单元热管吸热器数值计算

2.1 计算条件

采用 Fluent6.1 流体力学计算软件进行数值计算^[8-13]，并作如下假设：①吸热段周向的入射热流分布是均匀的；②热管蓄热段沿管长壁温一致（即给定热管中的所有 PCM 容器的工作情况完全相同）；③热管回液芯系统能正常工作，确保热管圆周的温度基本一致，所有的储热容器都具有完全相同的温度场；④相变过程发生在某个特定的温度，而非一个温度区域；⑤PCM 容器与热管管壁间的接触热阻忽略不计；⑥PCM 容器侧壁的导热不考虑。

2.2 热管部分

在热管计算中，采用热阻串联模型，分别计算

出热管传热环节的热阻值。根据热管壁温可以得到热管的传热量，描述出与相变过程耦合传热时的内部工作状态。

2.3 相变区

焓模型的基本方程概括了各区域的单位质量焓方程的发展，如下式所示：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_k} r_k h_k dV_k = - \int_{S_k} r_k h_k \bar{U}_k \cdot \bar{n}_k dS_k - \int_{S_k} \bar{q}'' \cdot \bar{n}_k dS_k \quad (1)$$

与之联立的方程为关于温度、下标为 k 的区域焓方程

$$h_k - h_{ref} = \int_{T_{ref}}^{T_k} c_k(T_k') dT_k' \quad (2)$$

式中下标 ref 为参考。对于各个 k 有以下定义： $k=1$ ，容器外壁区域； $k=2$ ，PCM 区； $k=3$ ，容器内壁区域； $k=4$ ，热管壁区。

2.4 热量传递

换热段中传递给工质的热量为

$$Q = KA(T_i - T_0) / \ln \frac{T_0 - T_w}{T_i - T_w} \quad (3)$$

式中： T_i 为工质进口温度； T_0 为工质出口温度； T_w 为热管的外壁温度。

2.5 网格划分

如图3所示，单元热管沿径向划分为12个节点，其中热管壁作为一个节点，PCM 容器内壁作为一个节点，PCM 区域被划分为8个节点，固定空穴作为一个节点，PCM 容器外壁作为一个节点。

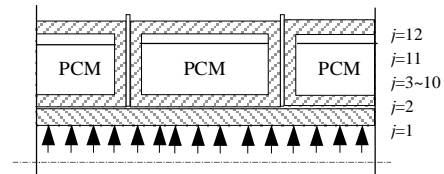


图3 热管单元简化模型

Fig. 3 Model of cell heat pipe receiver

2.6 边界条件

由于吸热器只在吸热段吸收入射的太阳能，而蓄热段并不直接吸收太阳能，所以若忽略辐射换热，则蓄热段的 PCM 容器在外壁处绝热，内壁（包括热管壁）与热管工质进行强迫对流换热。故边界条件为

$$\begin{cases} k \frac{\partial}{\partial r} [T(r_o, t)] = 0 \\ k \frac{\partial}{\partial r} [T(r_i, t)] = a [T(r_i, t) - T_f(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中： a 为对流换热系数；下标 i 和 o 分别代表 PCM

容器的内壁和外壁；下标 f 代表热管工质。

初始条件为全部 PCM 均处于固态，即

$$T(r,0) = T_s < T_m \tag{5}$$

式中下标 s 、 m 分别表示固相和熔点。

2.7 计算结果及分析

图 4 所示为日照期末 PCM 温度随径向位置变化曲线。由于在径向位置为 0.025 m 热管壁与蓄热容器内壁基本重合，可以看出热管壁温变化在 1061~1069 K，变化幅度为 8K，随着径向距离的增加，温度下降，热管壁温均高于蓄热容器的温度，由热管向蓄热容器壁均匀传热。所有蓄热容器壁温变化范围在 1050~1067 K，变化幅度为 17 K，超过了 PCM 的熔点 1040 K，PCM 完全熔化。

图 5 所示为阴影期末温度曲线。可以看出径向位置为 0.025 m 处的热管壁温变化为 1026~1036 K，变化幅度为 10 K，随着径向距离的增加，温度上升，热管壁温均低于蓄热容器的温度，由蓄热容器壁向热管传热。所有蓄热容器壁温变化范围在 1025~1039 K，变化幅度为 14 K，低于 PCM 的熔点 1040 K，PCM 完全凝固。

图 6 所示为在日照与阴影期单元热管吸热器热循环的实验结果^[14]。从中可以看出，在热循环开始阶段，工质出口温度变化为 35K，在热循环稳定后工质出口温度的温度变化不超过 15K，实验结果表

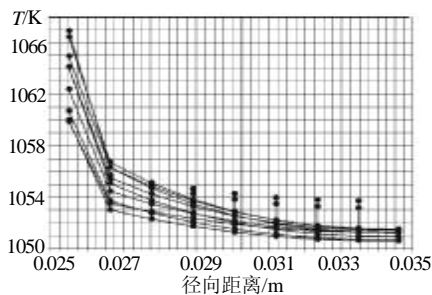


图 4 日照期末 PCM 径向温度曲线
Fig. 4 Radial temperature curve of PCM at the end of sunlight periods

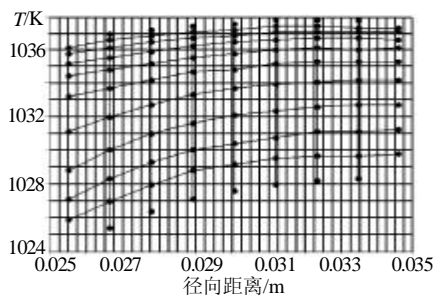


图 5 阴影期末 PCM 径向温度曲线
Fig. 5 Radial temperature curve of PCM at the end of eclipse periods

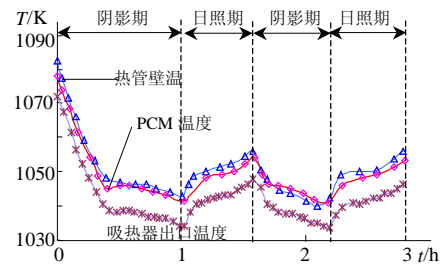


图 6 单元热管吸热器热循环的实验结果
Fig. 6 Experimental result of cell heat pipe receiver of heat cycle

明包含着 PCM 的整个热管起着均匀热负荷的作用。在整个实验过程中，热管壁温与 PCM 容器的温度非常接近。同图 4、图 5 相比较后，不难看出，通过数值计算得出图 4、图 5 的结果与图 6 的实验结果基本相吻合。因此，数值模拟结果可信，单元热管提高了吸热器的可靠性，能够使整个吸热器的温度保持稳定。

图 7 所示为日照期末温度场分布，可以看出热管吸热器的温度分布比较均匀，日照期时热管吸热器由热管传递给 PCM 容器，由于热管良好的导热性和理想的等温性，热管在轴向的温差很小，这就使得热管在不同位置上的容器内 PCM 都能同步、均匀地熔化；另外热管吸液芯的正常工作使得热管周向温度分布均匀，从而避免热斑现象。

图 8 所示为阴影期末温度场分布，可以看出热管吸热器由于热管在轴向和周向上良好的等温性，在阴影期末，各蓄热容器内的 PCM 能够同时凝固，并最终达到完全凝固，从而避免热松脱现象。

图 9 所示为基本型吸热器换热管的最高温度 T_{max} 和工质出口温度 T_{out} 的变化情况^[4]，可以看出基本型吸热器换热管变化范围在 1040~1130 K 之间，变化幅度为 90K，蓄热容器变化范围为 1040~1105K，变化幅度为 65K。而热管吸热器热管壁温变化为 1061~1069 K，变化幅度为 8 K，蓄热容器壁温变化范围为 1050~1067 K，变化幅度为 17K。由此可见，热管吸热器的热管壁温与蓄热容器壁温的波动大大低于基本型吸热器换热管，蓄热容器的壁温波动，也就使得热管吸热器热管、蓄热容器受到的热应力大大低于基本型换热管、蓄热容器的热应力，从而降低了热管与蓄热疲劳破坏的可能性。

图 10 所示为基本型吸热器换热管 PCM 的熔化率变化^[15]，可以看出基本型吸热器的熔化率变化范围为 0~0.68，而热管吸热器在日照期末 PCM 能完全熔化，提高了 PCM 的利用率，从而减轻了系

统的质量, 实现轻量化, 并能提高系统的热效率。

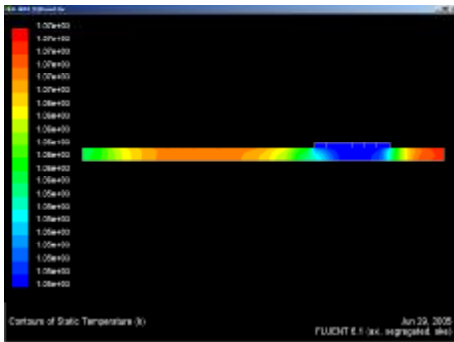


图7 日照期末温度场分布
Fig. 7 Distribution of temperature field at the end of sunlight periods

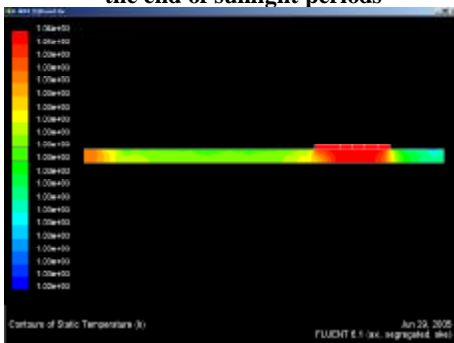


图8 阴影期末温度场分布
Fig. 8 Distribution of temperature field at the end of sunlight periods

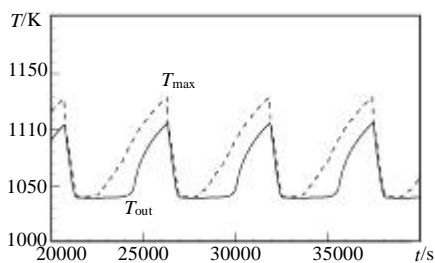


图9 最大温度和出口温度
Fig. 9 Variation of the maximum and outlet temperature of heat exchange tube of the basis heat receiver

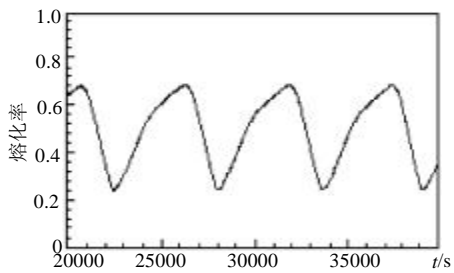


图10 PCM 熔化率
Fig. 10 The melting ratio variation of heat exchange tube of the basis heat receiver

3 结论

通过对单元热管吸热器进行数值计算, 并把仿真结果同实验结果和基本型吸热器进行对比, 得出以

下结论:

(1)单元热管吸热器的热管提高了吸热器的可靠性, 能够使整个吸热器的温度保持稳定。

(2)热管吸热器中热管高效、均匀的传热性能大大缩小了热管壁温、蓄热容器壁温的波动范围, 减小了吸热器内的周期性热应力, 降低了热管与PCM 容器疲劳破坏的可能性, 提高了吸热器工作的稳定性和可靠性; 扩大了PCM 熔化率变化范围, 提高了PCM 利用率, 从而减轻了系统的质量, 实现轻量化, 并能提高系统的热效率。

(3)热管吸热器由于热管良好的导热性和理想的等温性, 热管在轴向的温差很小, 这就使得热管在不同位置上的容器内的PCM 都能同步、均匀的熔化; 另外热管吸液芯的正常工作使得热管周向温度分布均匀, 从而避免热斑现象。

(4)热管吸热器由于热管在轴向和周向上良好的等温性, 在阴影期末, 各蓄热容器内的PCM 能够同时凝固, 并最终达到完全凝固, 从而避免热松脱现象。

参考文献

- [1] Dennis Alexander. 2kWe solar dynamic ground test demonstration project[R]. NASA-CR-198423. Tempe, Arizona: AlliedSignal Aerospace, 1997.
- [2] Solar dynamic power system development for space station freedom[R]. NASA-RP-1310, N94-12807. Cleveland, Ohio: Lewis Research Center, 1993.
- [3] Hal J Strumpf. On-orbit performance prediction of the heat receiver for the U. S. Russia solar dynamic power flight experiment[J]. IEEE, 1996(1): 178-184.
- [4] Marvin W, Thaddeus S M. The NASA advanced solar dynamic technology program[R]. 24th IECEC Paper 899076, 1989.
- [5] Roger A. Crane. Thermal performance of specific heat receiver concepts for advanced solar application[R]. IEEE, 1989.
- [6] Anthony P. Advanced solar brayton space power systems[R]. IECEC Paper 899492.
- [7] Hal J. Strumpf, Christopher Krystkowiak. Design of the heat receiver for the US/Russia solar dynamic power joint flight demonstration [R]. IECEC Paper Lewis Research Center, 1995,411-416.
- [8] Strumpf H J, Coombs M G. Advanced heat receiver conceptual design study[J]. N88-25977, Lewis Research Center, 1988.
- [9] 史小平, 许天舒. 核电站热功率跟踪汽轮机负荷的动态矩阵控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (5): 93-96.
Shi Xiaoping, Xu Tianshu. Simulation study of dynamic matrix control of the nuclear reactor thermal power tracking system [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (5): 93-96(in Chinese).
- [10] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (12): 63-66.

- Chen Xingying, Liu Mengjue, Shan Yuanda. Application of super conducting magnetic energy storage system---SMES in wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (12): 63-66(in Chinese).
- [11] 赵玉新. FLUENT 教程[M]. 北京: 国防科技大学航天学院, 2003.
- [12] 侯欣宾, 袁修干, 崔海亭. 组合相变材料换热管吸热器性能的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6): 805-808.
- Hou Xinbin; Yuan Xiugan; Cui Haiting. Numerical analysis of multiple phase change materials heat receiver thermal performance[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(6): 805-808(in Chinese).
- [13] 崔海亭, 袁修干, 侯欣宾. 组合式相变材料吸热器热性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 166-169.
- Cui Haiting, Yuan Xiugan, Hou Xinbin. Analysis of thermal performance for combined heat receiver of multiple phase change materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 166-169(in Chinese).
- [14] 崔海亭, 袁修干, 侯欣宾. 太阳能热动力系统吸热/蓄热器能量分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3): 332-335.
- Cui Haiting, Yuan Xiugan, Hou Xinbin. Energy analysis of solar dynamic system receiver[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 332-335(in Chinese).
- [15] Fujiwara M, Sano T, Suzuki K, et al. Thermal analysis and fundamental tests on heat pipe receiver for solar dynamic space power system[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1990, 112(4): 177-182.
-
- 收稿日期: 2006-02-21。
- 作者简介:
- 桂晓宏(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为空间站太阳能热动力发电系统, gxhbox@sina.com.cn;
- 袁修干(1934—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为人-机-环境系统计算机仿真技术、人机系统工效设计与评价技术、航空航天控制与生命保障技术、高温相变传热与蓄热技术、新型制冷技术;
- 宋香娥(1975—), 女, 北京交通大桥梁与结构设计研究所硕士研究生, 研究方向为桥梁设计及有限元计算, 流体力学数值计算等;
- 徐伟强(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为空间站太阳能热动力系统微重力下的相变蓄热。
- (编辑 贾瑞君)