

文章编号: 1000-8055(2003) 05-0645-05

先进太阳能热动力发电系统 吸热/蓄热器研究

桂晓宏, 袁修干

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系, 北京 100083)

摘要: 先进太阳能热动力发电系统研究目的是提高系统的效率, 提高功率/重量比, 为将来太阳能热动力发电系统在空间的广泛应用打下基础。通过对四种先进太阳能吸热/蓄热器的结构、性能及其设计进行分析评价, 为进一步研究有发展前途的新型吸热器/蓄热器提供了参考依据。分析研究结果表明采用热管吸热器作为先进太阳能热动力系统吸热/蓄热器, 大大减轻了系统质量, 具有良好的应用前景。

关键词: 航空、航天推进系统; 太阳能热动力; 先进吸热器; 热管; 蓄热器

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

Research on Heat Receiver in Advanced Solar Energy Dynamic System

GUI Xiao-hong, YUAN Xiu-gan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The research purpose of advanced solar energy dynamic system is to improve efficiency and lay a foundation for further wide use in space. By evaluating and analyzing the structure, performance and designing of four advanced solar energy heat receivers, the designing concept of a new type heat receiver is given. The research result indicates that the mass of solar energy dynamic system is greatly reduced by use of heat pipe receiver which has a good future in use.

Key words: aerospace propulsion system; solar energy dynamic system;
advanced heat receiver; heat pipe; thermal storage

1 前言

吸热/蓄热器(HR-heat receiver)是空间太阳能热动力发电系统关键部件之一, 它集吸热、传热和储热三项功能为一体。在轨道的日照期, 吸热/蓄热器吸收通过吸热/蓄热器入射窗的太阳光反射器反射的太阳能, 一部分能量直接传递给循环工质, 剩余能量利用相变蓄热材料储存起来; 在轨

道的阴影期, 蓄热材料向循环工质放热, 保证系统在阴影期的正常运行也可用于先进热电转换系统的高温热源。由于其重要性和技术复杂性, 吸热/蓄热器是60年代以来空间太阳能热动力发电系统研究中投入力量最多的部件, 而系统的轻量化研究是空间应用领域研究的重点。先进太阳能热动力发电系统研究的目的是提高系统的效率, 提高功率/重量比, 为将来太阳能热动力发电系统在

收稿日期: 2002- 11- 13; 修订日期: 2003- 01- 16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276001)

作者简介: 桂晓宏(1976-), 男, 安徽安庆人, 北京航空航天大学人一机一环境研究所博士生, 主要从事空间站太阳能热动力发电系统研究。

空间的广泛应用打下基础。美国从80年代中期开始,进行了大量的研究,提出了多种解决方案。主要研究内容包容热力循环的选择^[1,2]、热机选择、吸热/蓄热器和太阳光反射器及辐射器的先进设计^[3~6]。本文对四种先进太阳能吸热/蓄热器的结构、性能及其设计作了较为详尽的分析,其研究对于减少吸热/蓄热器的重量,提高系统的效率,降低空间太阳能热动力发电系统的费用有重要的意义。

2 先进太阳能吸热/蓄热器

2.1 堆积床吸热/蓄热器

堆积床吸热/蓄热器换热管内有很多小的PCM (Phase Change Material) 密封容器^{7]}, 每个小容器内装填固定量的PCM (包囊 PCM), 容器外壳由薄壁金属构成, 用真空电子束焊接密封, 容器为两端呈弯形的柱体, 换热管均匀布置在腔壁, 工质流体流经堆积床时直接和小容器接触, 见图1。日照期时太阳辐射热通过管壁熔解小容器内的PCM 并加热工质流体, 阴影期则由PCM 凝固放热加热流体, 容器材料为C-403, 是一种中等强度含有10% 钎的铝合金。PCM 容器总共有近30000个, 显然小容器的制造工艺及PCM 的充装技术对HR 的寿命有很大影响。为此专门设计了一套容器制造、颗粒PCM 充装、真空下PCM 熔解除气、真空电子束焊以及密封检验的工艺流程。

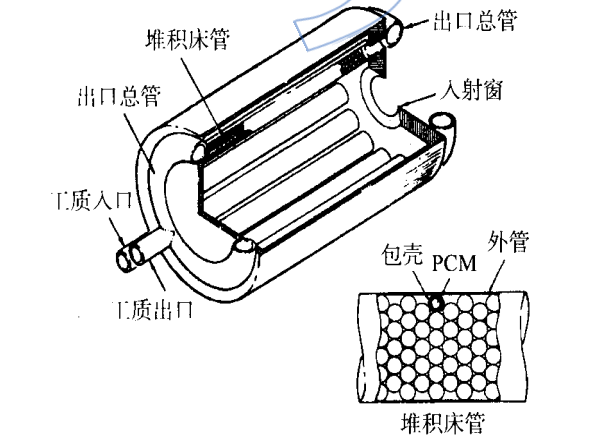


图1 堆积床吸热器
Fig. 1 Packed bed receiver

堆积床吸热器方案的质量和体积分别为原型的62%和38%, 由于流体和小容器直接接触增强了热交换, 使PCM 和流体间温差减到最小, 但包囊PCM 技术有待进一步研究。表1为堆积床吸热器设计参数。

表1 堆积床吸热器设计参数
Table 1 Designing parameters of packed bed heat receiver

参 数	CBCRS
PCM 包壳	C-103
管材料	FS-85
PCM 容器外径/cm	1.3
PCM 容器长度/cm	1.3
堆积系数	0.6
PCM 容器点数	28138
换热管长/m	0.91
HR 长度/m	1.3
HR 外径/m	0.9
管数	15
管内径/cm	8.4
管心距/cm	15.2
PCM 质量/kg	70
包壳质量/kg	46
管质量/kg	49
总质量/kg	292

2.2 直接吸收式吸热器^[8,9]

1987年 Sanders 研究小组成员 Kesseli J B 提出一种和过去的设计概念完全不同的直接吸收吸热器, 见图2。它是一个圆锥形腔, 底面中心有一

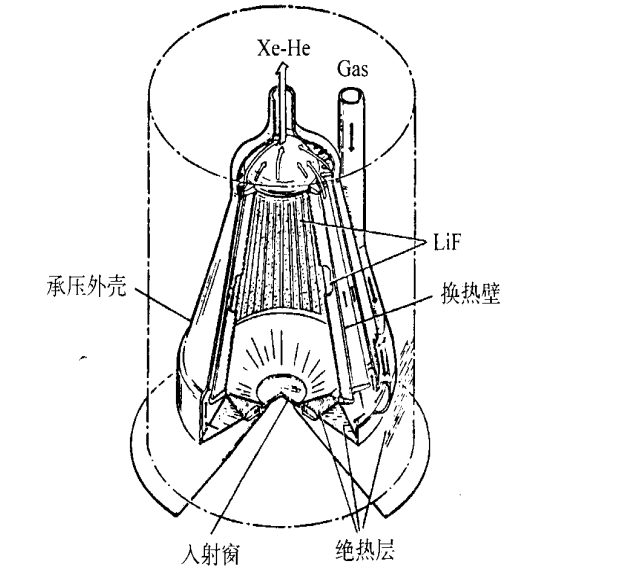


图2 直接吸收式吸热器
Fig. 2 Direct absorption receiver

个位于抛物面集热器焦点的透射阳光的窗口, 日照期从集热器会聚来的阳光穿透氟化锂(LiF)层,

通过换热壁传给在换热壁和承压壳之间的夹层通道内流动的 He-Xe 气体工质, 其余热量为 LiF 所吸收。阴影期液体 LiF 凝固放出的热量仍通过换热壁传给 He-Xe, 纯 LiF 几乎能完全透过太阳辐射, 通过少量的掺杂可以使 LiF 能吸收一部分太阳辐射, 为防止 LiF 的蒸发损失, 吸热腔的开口采用了能透射太阳辐射的窗来密封, 在微重力条件下, 由于液体 LiF 高的表面张力, 使得 LiF 能被抽吸在换热壁的瓦楞面上, 从而在腔内面进入夹层通道, 再会聚到位于锥尖处的出口管。直接吸收式吸热器有下列几个主要优点:

(1) 日照期 PCM 和换热壁同时接受太阳辐射热量, 可大大提高腔内壁能容忍的最大能流密度水平, 在同样的锥形吸热器腔中如果采用同心套管式换热管来吸收辐射热流, 其最大能接受的辐射热流密度为 $2 \sim 3.5 \text{ W/cm}^2$, 而这种设计能接受的最大辐射热流密度可增加 5 倍。吸热腔的直径可降低到 $1/24$ 。

(2) 由于 PCM 有一个自由边界, 不会出现空穴问题, 因此有可能使晶体盐均匀一致溶解, 对壁面施加压力问题可大大减轻。

(3) 直接吸收吸热器效率高的主要原因是它的外表面积仅为原型的 30% 左右, 另外, 腔的平均辐射温度很接近 LiF 的相变温度, 而原型的腔温在最好情况下也高出相变温度 20°C 。

(4) 在进入日照期时, 有直接的气体工质热响应, 工质出口温度在 PCM 相变温度 15 K 范围内波动, 而原型(指采用同心套管式 PCM 容器的 NASA/GE 方案, 下同)在最佳情况下的温度变化范围在相变温度以下 $20 \sim 50 \text{ K}$ 之间变化, 这可以使循环效率提高。

直接吸收式吸热器的研制有三个关键问题:

(1) 使 LiF 对太阳辐射的吸收达到要求值的掺杂方法: 在 LiF 中掺少量的稀土或过渡金属可以调整 LiF 对太阳辐射的吸收率到要求的值, 通过试验, 由于高的表面散射而排除了采用稀土金属掺杂的可能性, 试验结果认为, 当 LiF 在小于 $0.014\% \text{ M}$ 浓度的 CoF_2 掺杂下, 可以做到要求的太阳吸收率并且有低的散射, 其它过渡金属氟化盐也有可能做到。

(2) 对窗的研究: 窗对太阳辐射的透射率在 10 年寿命期间应不低于 95%。当透射率下降到 90% 时, 就失去了直接吸收器效率高的优点。和这个问题有关的因素, 有窗材料的种类、LiF 对窗的腐蚀、LiF 在窗上的凝结、窗温及其影响因素、光

谱选择性涂层的蒸镀、窗形状、腔内不凝结气体的充填等。这些因素又互相影响, 通过对 10 种候选窗材料在腔-窗模拟环境下初步试验, 认为采用 LiF 或 MgF_2 制成的窗, 由于低太阳吸收率使窗温保持 LiF 相变温度以下, 并采用不凝结气体在腔内少量增压, 可以做到窗上有少量 LiF 的凝结时在寿命期所要求的太阳辐射透射率, 另外, 金刚石类材料也是可供选择的对象。

(3) 腔系统的自由能分析, 分析的目的在于要得到能满足 LiF 湿润要求, 腔长径比范围和瓦楞的几何形状, 同时还需进行微重力下液体 PCM 特性的实验研究。

以上这些研究有的正在进行, 有的还在计划中, 看来这种吸热器要在工程上实现, 问题还比较多。

2.3 二次热管吸热器

1990 年文献发表了一个用于刘易斯中心 (LeRC) 1.5 kW 太阳能热动力发电系统 (SDPSS-Solar Dynamic Power Space Station) 系统的小功率吸热器方案^[11], 该方案是在宇航信号联合公司 (ASRC-Allied Signal Aerospace Company) 的热管吸热器基础上发展起来的。图 3 为它的结构简图。它和 ASRC 的热管吸热器的主要区别在于它采用两个热管系统。一次热管为在腔四壁均匀分布的 10 根普通钠热管, 沿轴向分三段。靠近腔口的吸热段没有 PCM 容器, 在日照期它直接接受太阳辐射。中间储热段上有同心套管式 PCM 容器, 由 792 个小的环型容器组成。小容器的侧壁起翅片作用。在日照期 PCM 容器的外壁也能接收到太阳辐射热。一次热管的最后一段插入并穿过二次热管和热源热交换器 (HSHX-Heat Source Heat Exchanger) 连接。日照期腔所接收到的热量除掉为 PCM 容器内的 LiF- CaF_2 储存以外的部分以及阴影期 LiF- CaF_2 所释放的热量大部分, 由一次热管直接传给 HSHX, 小部分通过二次热管传递给 HSHX。二次热管实际上为一短圆柱体形腔热管, 在靠近热头的端面有 10 根突出的延伸腔和一次热管平行插入热头区。表 2 列出了二次热管吸热器的设计参数和尺寸。二次热管有三个作用:

(1) 当进入 HR 腔的太阳热流不轴对称时, 可通过二次热管平衡由一次热管传给 HSHX 的热流。

(2) 当有一次热管失效时, 在二次热管的作用下仍然能使热头得到均匀分布的热流。

(3) 二次热管提供了一条和一次热管平行的

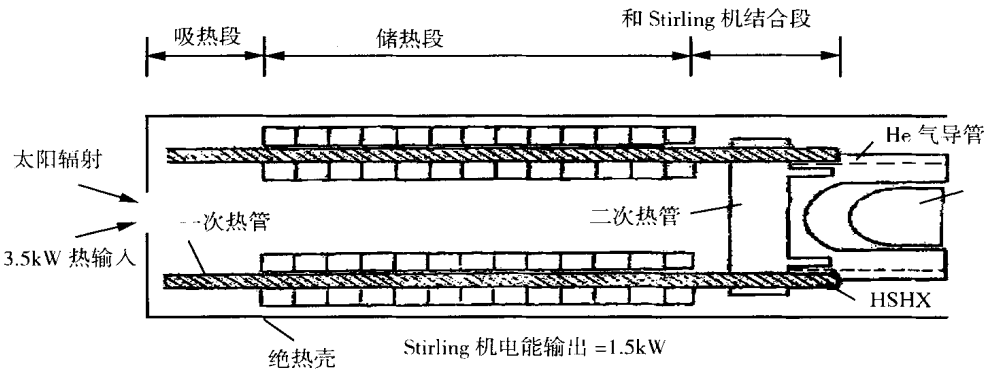


图3 二次热管吸热器
Fig.3 Secondary heat pipe receiver

表2 二次热管吸热器的设计参数和尺寸

Table 2 Designing parameters and sizes of secondary heat pipe receiver

项 目	参数	项 目	参数
轨道日照期/ min	60	一次热管长度/cm	138
轨道阴影期/ min	36	一次热管内径/cm	1.9
Stirling 机热输入/kW	4.95	PCM 容器数	792
腔辐射损失/kW	1.22	PCM 容器段长度/cm	114
HR 外壁损失/kW	0.08	PCM 容器外径/cm	4.06
PCM 过设计	1.2	PCM	LiF-22CaF ₂
一次热管分布圆直径/cm	13.3	热管壳和 PCM 容器材料	Inconel
一次热管根数	10	热管工质	钠

给热头传递能量的通道,减少了传递热量的温降。

2.4 热管吸热器

CBC 吸热器(CBCRS)中采用热管有几种方式,在 Garrett 公司的 ASRC 研制中,设计了图4所示的热管吸热器。在 HR 腔内沿周向排列了20根钠热管。每根热管分为三段。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环型截面的 PCM 容器,最靠腔底的一段为 HSHX 段。热管插入通过工作流体的板翅式 HSHX。

由于在吸热段和储热段中间有隔板,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 HSHX 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,HSHX 段仍为冷凝段,此时 PCM 凝结放热仍有热量提供给 HSHX。

热管的冷凝液回流系统由钎粉烧结的毛细芯和干线组成。毛细芯控制冷凝液的周向分布,而干线则提供冷凝液的轴向回流,整根热管的外壁面无论从周向还是轴向来看基本是等温面。

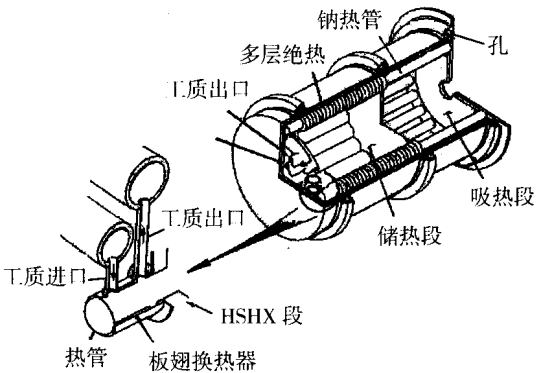


图4 用于 CBC 的热管吸热器
Fig.4 CBC heat pipe receiver

热管吸热器避免了太阳直接向 PCM 容器壁照射提供热量,而通过热管来提供热量,消除了由

于热流密度不均匀而出现的局部过高热流密度,并且使 PCM 容器面为等壁温,这样就缓解了“热斑”和“热松脱”现象的出现。热管吸热器的质量和体积为原型的67%和23%,具有良好的应用前景。表3为热管吸热器的设计参数。

表3 热管吸热器的设计参数

Table 3 Designing parameters of heat pipe receiver

参 数	CBCRS	SCRS
热管工质	钠	钠
容器材料	Nb-1Zr	Nb-1Zr
热管材料	Nb-1Zr	FS-85
管数	20	20
管中心距/cm	8.9	8.9
管外径/cm	5.1	5.1
管长/m	1.2	1.3
每根管 PCM 容器数	24	27
容器外径/cm	8.9	8.9
HR 外径/m	0.73	0.73
HR 长度/m	1.25	1.31
PCM 质量/kg	73	73
热管质量/kg	67	78
容器质量/kg	81	91
总质量/kg	316	356

3 结 论

- (1) 堆积床吸热器方案的质量和体积分别为原型的62%和38%,由于流体和小容器直接接触增强了热交换,使 PCM 和流体间温差减到最小,但包囊 PCM 技术有待进一步研究。
- (2) 直接吸收式吸热器效率高,不会出现空穴问题,可大大提高腔内壁能容忍的最大能流密度水平,但这种吸热器要在工程上实现比较困难,问题还比较多。
- (3) 二次热管吸热器可通过二次热管平衡由一次热管传给热源热交换器的热流,并提供了一

条和一次热管平行的给热头传递能量的通道,减少了传递热量的温降,当有一次热管失效时,在二次热管的作用下仍然能使热头得到均匀分布的热流,但这种吸热器各个热交换面上都有高热流密度,要研制这样的吸热器在技术上是很难的。

(4) 热管吸热器避免了太阳直接向 PCM 容器壁照射提供热量,而通过热管来提供热量,消除了由于热流密度不均匀而出现的局部过高热流密度,并且使 PCM 容器面为等壁温,这样就缓解了“热斑”和“热松脱”现象的出现。热管吸热器的质量和体积为原型的67%和23%,大大减轻了系统质量,具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] Agazzani A, Massardo A. Advanced Solar Dynamic Space Power Systems, Part I: Detailed Design and Specific Parameters Optimization[J]. Trans. ASME, J. Solar Energy Engineering, 1995, 117: 265- 273.

[2] Agazzani A, Massardo A. Advanced Solar Dynamic Space Power Systems, Part II: Efficiency and Surface Optimization [J]. Trans. ASME, J. Solar Energy Engineering, 1995, 117: 274- 281.

[3] Wu Y C, Roschke E J, Birur G C. Solar Dynamic Heat Receiver Thermal Characteristics in Low Earth Orbit[R]. AIAA-88- 0472, 1988.

[4] Roger A Crane. Thermal Evaluation of Advanced Solar Dynamic Heat Receiver Performance[R]. NASA CR- 185117, N89- 27256, 1989.

[5] Crane R A, Bharadhwaj G. Thermal Performance of Specific Heat Receiver Concepts for Advanced Solar Dynamic Applications[R]. IECEC- 899410, 1989, 2: 943- 951.

[6] Heidenreich G R, Downing R S, Lacey E. Brayton Advanced Heat Receiver Development Program[R]. IECEC- 899007, 1989, 2: 937- 941.

[7] 田文华. 空间太阳能动力装置吸热器/蓄热器方案论证报告[R]. 北京: 航天航空部五〇一设计部, 1989.

[8] Kesseli J B, Lacy D E. Advanced Solar Receiver Conceptual Design Study[R]. Proc. 22nd IECEC, 1987.

[9] Kesseli J B, Associates. The Cavity Heat Pipe Stirling Receiver for Space Solar Dynamics[R]. Proc. 24th IECEC, 1989.