

文章编号: 1000-8055(2000) 03-0263-05

空间发电系统热能储存容器的二维模型

邢玉明 侯欣宾 栗卫芳 杨春信 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: 高温熔盐相变储热是空间太阳能热动力发电系统的关键技术之一。基于微重力状态下的传热控制微分方程, 采用焓法对相变材料容器进行了二维数值分析。建立了一种新的空穴模型, 改进了以往的模拟计算, 对计算结果给予了讨论。

关键词: 太阳能发电; 模型; 数值分析

自由词: 吸热器

中图分类号: TK 513. 5

文献标识码: A

1 引言

重量轻、效率高、迎风面积小的太阳能热动力发电系统具有良好的空间应用前景。美国、俄罗斯、欧洲和日本都在积极投入力量加以研制。在轨道日照期太阳能热动力发电系统利用聚能器截取太阳能, 并将其聚集到吸热器圆柱形腔内(图 1),

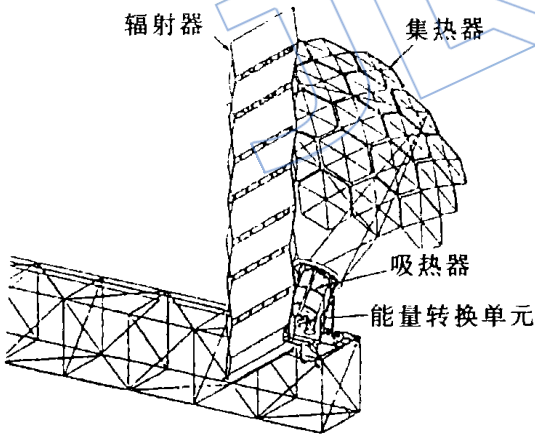


图 1 空间太阳能 SD 装置外形图

被吸收转化为热能。其中一部分热能传递给循环工质以驱动热机发电, 其余的热能被封装在多个小容器内的相变蓄热材料(PCM)吸收储存起来。这些 PCM 小容器逐个串联套装在循环工质管上。在美国自由号空间站(SSF)设计中, PCM 为

LiF 和 CaF_2 的共晶混合物(熔点为 1040 K, 熔化潜热为 790 J/g), PCM 在相变温度点附近吸热和放热, 使得空间站处于阴影期时(在低地轨道可达 36 分钟), 热机仍能连续工作, 保证连续供电^[1]。

PCM 容器是吸热器的基本蓄热单元, 研究 PCM 容器的吸、放热过程, 对 PCM 容器设计有着重要指导意义。PCM 容器内的传热过程是伴随有相态变化和体积变化的复杂传热过程。复杂边界条件、相变界面形状复杂、伴随体积收缩形成空穴以及相变过程中可能存在多个相变界面和相变界面的运动是该问题的显著特点。目前的空间太阳能热动力发电装置普遍采用 LiF 和 LiF- CaF_2 共晶盐做蓄热介质, 但是氟盐的一个明显缺点是其热导率较低以及凝固时体积收缩很大(LiF 高达 23%)。这两个缺点导致阴影期内相变材料凝固收缩时在容器内形成空穴, 造成日照期内出现“热松脱”(Thermal Ratchetting)和“热斑”(Thermal Spot)。这两种现象均会造成容器的热疲劳损坏。在地面, 重力会驱使液体填充低压空穴。而在微重力 micro-g 状态下, 空穴边界面的表面张力主要决定了空穴的发展。表面张力是温度的函数, 当空穴和液相 PCM 界面上有沿界面方向的温度梯度时, 液相 PCM 受不平衡的表面张力作用, 使液体微团运动, 填充产生的空穴, 新的位置又出现空穴。这样的运动是趋于使液体微团表面的温度梯

收稿日期: 2000-04-10; 修订日期: 2000-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59876003)

作者简介: 邢玉明(1966-), 男, 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系副教授, 博士。http://www.cnki.net

度最小,尽可能平衡。上述表面张力作用下的液相 PCM 的流动即 Marangoni 对流,在地面 1-g 状态下这一对流与自然对流相比要小一个数量级,通常可以不考虑。但在 micro-g 下 Marangoni 对流处于主导地位,它影响了容器中空穴的形成和发展。空穴的分布与温度场有关,它的存在使热阻增大,又反过来影响了温度场。所以在相变材料容器的热分析中必须考虑空穴的影响,明确了空穴的分布才能准确的分析传热过程。在轨道周期中空穴的生成和消失总是在不断发生变化,其形状也并不是固定不变的。空穴的形状、分布及如何扩展目前尚无成熟的理论可以引用。NASA 刘易斯研究中心于 1989 年设计了以 LiF 作为相变材料的空间飞行试验装置^[2],在 STS-62 飞行任务中完成了搭载试验^[3]。试验完成后对 PCM 容器内的空穴分布进行了层析 X 射线照相。结果表明空穴易形成于温度较高的区域,而且倾向于朝向加热热流最大的方向。美国橡树岭国家实验室开发了模拟 PCM 容器内相变换热过程的模拟计算程序 NORVEX^[4],模拟了空穴的产生、生长和消失过程,这一研究很深入,但目前尚未见到它对容器在整个轨道周期内相变换热过程完整和详细的计算结果发表。国内已开始这方面的研究工作,但在高温蓄热方面尤其是对氟盐作为蓄热介质的相变换热过程的研究还相当缺乏。本研究试图建立一种新的空穴生消模型来模拟容器内的换热过程,为吸热器和 PCM 容器的合理设计提供依据。

2 数学模型

2.1 空穴产生和消失模型

在微重力 micro-g 条件下,决定空穴位置的 Marangoni 力是表面力,与自然重力 1-g 条件下的相变传热不同,重力是体积力,所以可以假设凝固时空穴有一个由分散到集中的移动过程。本模型从每个控制体单元的角度观察空穴的发展,这样可以更好地模拟空穴的产生及扩展过程,并且单元之间 PCM 的混合反映了 Marangoni 对流换热。在不均匀温度场下,温度低的区域先凝固,但由于空穴界面 Marangoni 力的作用,产生的空穴要移动,使液气界面的微团所受表面力平衡。产生空穴区周围温度最高的微团表面张力最小,便向空穴移动,二者交换位置,空穴在新的位置继续这一过程。熔化过程中温度高的区域熔化体积膨胀,多余体积便向周围有空穴或也已熔化的区域流

动,这样熔化的液态 PCM 逐渐占据了空穴区。温度分布并不影响这一过程。

本文的模型在描述空穴的形成、移动、减少、消失时,以控制体单元为对象。逼近相变过程中微团的行为。空穴模型与 Marangoni 对流、PCM 膨胀和收缩引起的对流是不可分的。在凝固过程中,二者的作用是相结合的,在熔化过程中只考虑后者。模型不考虑 PCM 与容器的润湿作用并假定空穴内为真空。

和文献[5~8]不同,本文的计算并没有首先固定空穴的初始位置,而是从每个控制体单元出发,据其体积变化量来观察空穴的发展。如图 2 所示,在计算程序中,每一个时间步长内计算 PCM 总体积的变化量 SV 。

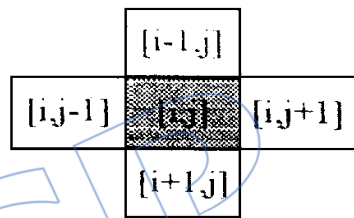


图 2 热分析控制体单元

凝固过程 $SV < 0$ 。参见图 2, 计算控制体单元 $[i, j]$ 。如单元内有体积收缩或已有部分空穴,即 PCM 体积 $V[i, j] <$ 单元体积,则在 $[i, j]$, $[i+1, j]$, $[i-1, j]$, $[i, j-1]$ 和 $[i, j+1]$ 5 个单元中确定最高温度单元的 PCM 进入 $[i, j]$ 单元,如不能填满 $[i, j]$ 单元,则最高温度单元变为全空。

熔化过程 $SV > 0$ 。计算 $[i, j]$ 控制体单元,如单元内有体积膨胀或体积已超过单元体积,即 PCM 体积 $V[i, j] >$ 单元体积,则多余体积向 $[i+1, j]$, $[i-1, j]$, $[i, j-1]$ 和 $[i, j+1]$ 4 个单元分配,原则是先向含空穴的单元分配、如多余体积未分配完,再向含液相单元分配。分配量由被填充单元边界尺寸与可填充 PCM 的单元边界尺寸之比决定。空穴内的热传递包括辐射、导热和蒸发凝结换热。这里主要考虑辐射换热。空穴内的辐射换热计算基于以下假设: (1) 所有空穴表面均为漫射灰表面; (2) PCM 表面吸收所有波长的辐射; (3) 空穴内蒸气不参与辐射换热。

2.2 PCM 容器传热模型

PCM 容器内的传热过程是伴随有相变的复杂传热过程。相变问题具有强烈的非线性,很难得到解析解,通常采用数值解法。数值解法分为强数值解法和弱数值解法。强数值解法要求在计算过

程跟踪相变界面的位置, 在求解二维和三维问题时会变得相当困难。弱数值解法是唯一可行的求解 PCM 容器内多维相变传热过程的方法。最常见的弱数值解法是广义显热容法和焓法。本文采用焓法。

求解焓法能量方程, 控制体单元的计算参数为焓, 由焓确定单元内 PCM 的相态并决定其物性参数, 进而求出单元中心温度。由于相态的变化, 相变材料不同相态间的界面是移动的, 焓法避免了求解温度时无法确定控制体单元物性参数的困难。

PCM 及其容器壁在二维坐标 (r, θ) 情况下采

$$T = \begin{cases} h/C_w & \\ h/C_s & h < h_s \\ T_m & h_s < h < h_l \\ \frac{h-h_l}{C_l} + T_m & h > h_l \end{cases}$$

容器壁

固相 PCM

糊相 PCM

液相 PCM

$$h_s = T_m \times C_s$$
$$h = xh_s + (1-x)h_l$$
$$h_l = C_sT_m + q_m$$

(3)

其中 C_w 为容器壁比热; C_s 为固相 PCM 比热; C_l 为液相 PCM 比热; T_m 为 PCM 相变点温度; q_m 为 PCM 熔化潜热; x 为糊相 PCM 中固相百分比。固液两相混合的 PCM, 其物性参数按下式计算:

$$\rho = \rho_s + (1-x)\rho_l$$
$$C = xC_s + (1-x)C_l$$
$$K = xK_s + (1-x)K_l$$

$$\rho, C, K$$
 分别表示密度、比热、导热系数, 下标 s 表示固相, l 表示液相。

计算时间为 10 个轨道周期, 每个周期计 95 分钟, 经历日照期 59 分钟, 阴影期 36 分钟。

初始条件为全部 PCM 均为液相且温度 $T = 1123\text{ K}$ 。

将计算的 PCM 容器按 r, θ 划分为 10×16 个控制体单元。方程(2) 离散化后采用完全显式方法求解, 时间步长的选取以满足收敛性要求为前提(本计算中 $dt = 0.06\text{ s}$)。文中所涉及的材料物性、轨道参数及边界条件参见文献[9]。容器外壁面正对太阳辐射热流处最大热流取 $q_s = 68000\text{ W/m}^2$, 容器外壁面的热流分布按下式确定^[10]。

$$q_r = \begin{cases} (0.54\cos\theta + 0.29) \times q_s & \theta < \frac{\pi}{2}, \theta > \frac{3\pi}{2} \\ 0.29 \times q_s & \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

容器内壁面与循环气体换热在吸热器腔内不同位置的 PCM 容器, 气体温度不同。另外壁面与吸热器腔内其它部件间的辐射换热以外壁面单元灰体辐射量乘系数 $1\% \sim 10\%$ 考虑。系数越大, 散

用焓的形式表示的能量控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right]$$

(1)

式中 h 是比焓($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。比焓 h 是温度 T 的函数, 对于每个控制体单元其能量控制方程又可写成:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \cdot V = q_{ri} - q_{ro} + q_{ai} - q_{ao}$$

(2)

式中: V 为控制体单元体积, q_{ri} 和 q_{ro} 分别为控制体单元径向输入、输出热流, q_{ai} 和 q_{ao} 分别为控制体单元周向输入、输出热流。

控制体单元焓 h 与温度 T 的关系为:

容器壁

固相 PCM

糊相 PCM

液相 PCM

$$h_s = T_m \times C_s$$
$$h = xh_s + (1-x)h_l$$
$$h_l = C_sT_m + q_m$$

(3)

热量越大。

3 计算结果分析

图 3 表示了计算得到的 PCM 体积变化图和等温线图。其中左面的 5 个图为第 6 个周期的 PCM 体积百分率图, 右面的 5 个图为第 4 个周期的等温线图。每个图, 最大热流位于圆周的右侧。

3.1 空穴的形成与消失

空穴的形成和消失以第 6 个周期的计算结果说明。日照期分别取第 1 分钟、15 分钟、58 分钟, 阴影期分别取 72 分钟、90 分钟。图中表示的是循环气体温度为 950 K, 系数 0.1 时的计算结果。

由图可见, 与文献[5]不同, 空穴形成的位置并不总在容器外壁处而是形成于 PCM 中, 这是因为内壁处气体工质温度较高(950 K), PCM 在凝固冷却过程中最高温度位置不在外壁处。在吸热器中, 位于单元换热管流动方向靠后的容器处于此工况。在阴影期, 随着温度的下降, PCM 开始凝固时, 由于系数为 0.1 时 PCM 容器的冷却速度较快, 最大温度位置在 PCM 内部最大辐射热流方向, 不紧贴外壁。空穴在此形成, 逐渐沿周向扩展。因冷却速度较快, PCM 周向温度较一致, 空穴持续扩展, 形成一个圆周。在日照期, PCM 熔化时从最大热流方向处开始, 沿空穴径向两侧同时充扩, 周向扩充并不明显, 空穴体积减少。随着热量向内传递, 容器最大热流相反方向的 PCM 也开始熔化, 填充容穴, 空穴收缩, 逐渐消失。

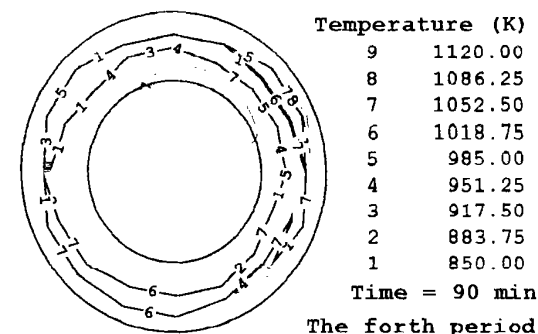
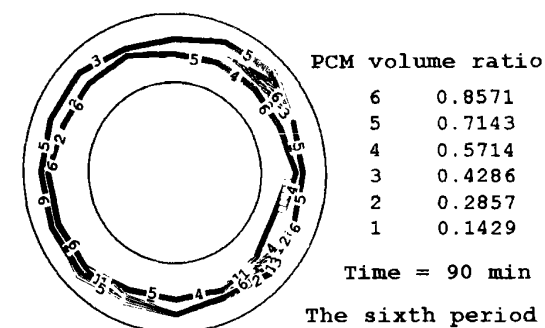
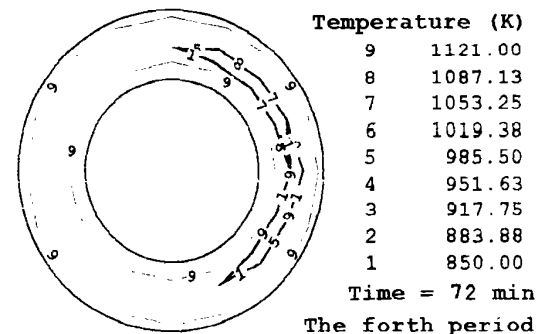
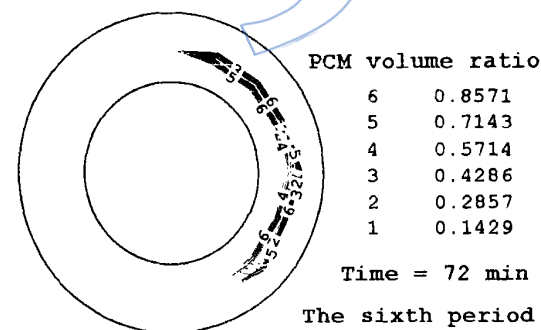
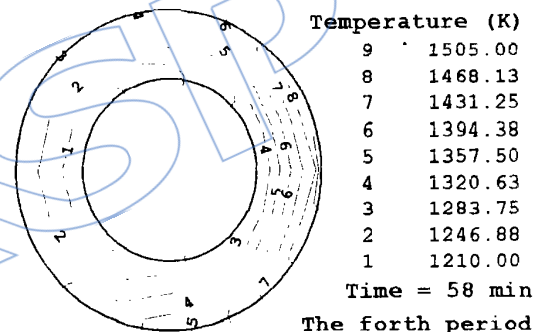
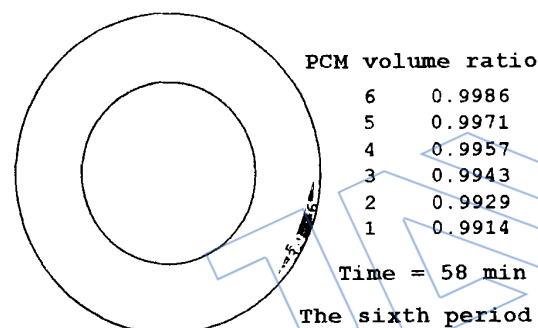
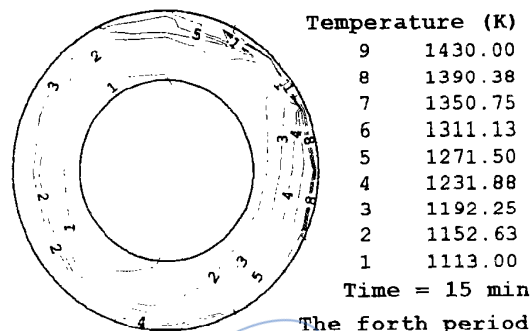
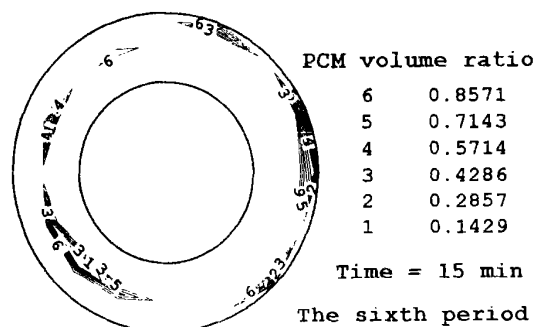
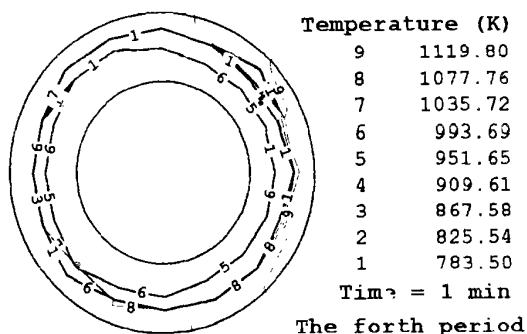
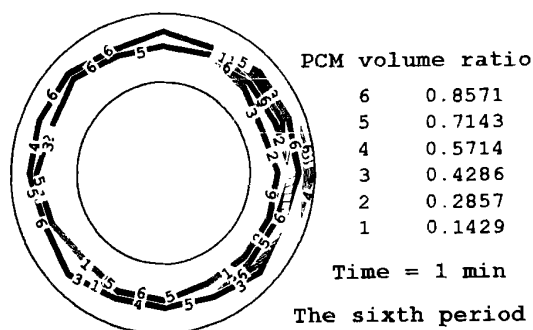


图3 PCM 体积百分率图和温度场

当以循环气体温度为 850 K, 系数 0.01 计算时, 结果显示空穴形成在外壁处与文献[5]结果一致, 在吸热器中, 位于单元换热管流动方向靠前部分的容器处于此工况。

图中 PCM 的体积比(PCM volume ratio), 即单元内 PCM 的体积与控制体单元体积的百分比。

3.2 温度场分析

从计算结果看, 温度场周期性地变化, 从温度场中亦可看出空穴的存在。

计算结果表明, 第 1 周期 PCM 的温度偏高, 这是因为初始温度高(1123 K)。日照期 PCM 左侧温度先降低, 继而升高, 温度场有一个重新分配过程。进入第四个周期, 计算基本稳定。在 10 个计算周期中, 日照期外壁面温度最高处在右侧最大太阳热流处, 阴影期恰恰相反, 温度最高处在左侧。图中表示了第四个周期的等温线图, 可见, 传热过程周期性稳定后, 在一个周期内 1~45 min PCM 开始并全部熔化, 65~90 min 开始并全部凝固。从第 4 周期看, 熔化初期由于空穴的影响, 空穴区周围的 PCM 温度仍是均匀的, 热流受到空穴的阻隔, 容器左侧最大热流处温度偏高, 高约 100 K。容器左侧的 PCM 熔化比右侧慢。凝固初期, 温度分布右侧偏高, 但随后温度迅速下降, 空穴形成, 此时整个 PCM 温度场分布较均匀。PCM 释热过程中由于空穴的阻隔, 空穴包围区外的 PCM 仅向外壁散热, 其温度比空穴包围内侧面 PCM 的温度要高。

容器内壁面温度比外壁面低, 变化幅度小, 热工况比外壁面要良好的多, 沿周向温度差最大达 100 K。而外壁面受辐射热流和空穴的影响, 工况恶劣, 日照期最高温度达 1500 K。熔化过程中, 大量的热量集中在右侧, 左右两侧温差可达 200K, 这会引起较大温差应力。详尽的分析结果请见文献[10]。

4 结 论

由 PCM 容器的二维(r, θ) 计算结果可知:

(1) 由于周向热流的不均匀性, 使得容器内、外壁面周向有一定的温差, 外壁温差约 200 K 左右, 内壁温差可达 100 K。

(2) 由于空穴增加了热阻, 使得空穴周围热流过大, 局部温度过高, 再加上容器周向较大温差引

起的热应力、容器的耐久性将受到严峻考验, 为此在进行容器的热设计和结构设计时可考虑在容器内增加径向直肋片或填充镍毡等措施强化热传导, 这样径向金属侧壁的传热增强将改善空穴热阻带来的影响, 甚至影响空穴的分布。

(3) 本空穴模型从每个控制体单元的角度来观察空穴的发展, 这样可以更好的模拟空穴的形成、生长和消失过程, 并且单元之间 PCM 的混合反映了微重力 micro-g 状态下 PCM 的 Marangoni 对流换热过程。计算结果表明在不同的热边界条件下空穴形成的位置不同。本研究表明空穴在某些热工况下紧贴外壁处, 在某些热工况下则完全处于 PCM 中。温度分布和空穴分布相互依赖、相互影响。

进一步的工作将建立包括动量方程的三维数学模型, 并开展有关实验研究。

参 考 文 献

- 1 Strumpf H J, Coombs M G. Solar Receiver for the Space Station Brayton Engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and power, 1990, 110(4): 295- 300
- 2 Namkoong David. Flight Experiment of Thermal Energy Storage[R]. IECEC: 899491
- 3 Namkoong David, Jacquin D, Szaniszló. Effect of Microgravity on Material Undergoing Melting and Freezing - the TES experiment[R]. AIAA- 95- 0614
- 4 Douglas Darling, Davie Namkoong J, Raymond Lee Skarda. Modeling Void Growth and Movement with Phase Change in Thermal Energy Storage Canisters[R]. AIAA- 93- 2832
- 5 Thomas W Kerslake, Mounir B Ibrahim. Analysis of Thermal Energy Storage Material with Change-of-Phase Volumetric Effects[R]. NASA- TM 102457, 1990
- 6 Kerslake T W, Ibrahim M B. Two-Dimensional Model of a Space Station Freedom Thermal Energy Storage Canister [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1994, 116: 114- 121
- 7 董克用, 袁修干. 微重力条件下相变材料容器的二维瞬态热分析[J]. 太阳能学报, 1998, 19(1): 41- 46
- 8 董克用, 袁修干, 邢玉明. 不同空穴位置下固液相变换热过程的差别[J]. 航空学报, 1999, 20: 27- 29
- 9 蒋大鹏. 空间太阳能动力装置吸热-储热器相变材料容腔的热分析计算:[硕士学位论文][D]. 航天工业总公司 501 设计部, 1991
- 10 栗卫芳. 相变蓄热容器的热分析及结构分析:[硕士学位论文][D]. 北京航空航天大学, 2000

(责任编辑 杨再荣)
(英文摘要转第 273 页)

[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11 (2): 315– 318

8 Siegel R. Temperature Distributions in Channel Walls with Translucent Thermal Barrier Coatings [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, 12(3): 289– 296

9 Frankel J I. Cumulative Variable Formulation for Transient Conductive and Radiative Transport in Participating Medium [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1995, 9 (2): 210– 218

10 Tan H P, Lallemand M. Transient Radiative-Conductive Heat Transfer in Flat Glasses Submitted to Temperature, Flux and Mixed Boundary Conditions[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1989, 32(5): 795– 810

11 Tan H P, Ruan L M, Xia X L, Yu Q Z, Tong T W. Transient Coupled Radiative and Conductive Heat Transfer in an Absorbing, Emitting and Scattering Medium[J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1999, 42: 2967– 2980

12 Tan H P, Wang P Y, Xia X L. Transient Coupled Radiation and Conduction in an Absorbing and Scattering Composite Layer[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2000, 14(1): (已录用)

13 王平阳, 谈和平, 夏新林. 不透明表面漫反射下两层散射性介质内的瞬态耦合换热[R]. 中国工程热物理学会, 传热传质学学术会议论文集 No. 993015, IX– 41– 10), 合肥: 1999

(责任编辑 杨再荣)

Heat Transfer in Translucent Thermal Barrier Coatings of Turbine Engine

Wang Pingyang, Tan Heping, Liu Linhua, Luo Jianfeng

(School of Energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Some of thermal barrier materials for coating in aeroengine, such as zirconia and ceramic, are partially transparent to thermal radiation. So it is necessary to estimate quantitatively the radiation effect in the thermal analysis of turbine engine under high temperature. In this paper, various surface radiative characteristics are considered including opaque (with soot) and semitransparent (without soot) coating surfaces, specular and diffuse reflections. The radiative transfer coefficients of the absorbing and isotropic scattering coatings are derived by the ray tracing / node analysis method. The transient coupled radiative and conductive heat transfer in the coatings are numerically simulated by the radiative transfer coefficients in combination with the full implicit control-volume method. The radiative properties of the coatings are modelled by two or four spectral bands. The analysis includes the effects of the opaque surface emissivity, the coating thickness, and the surface radiative characteristics on the temperature distributions and heat flux densities.

Key words: thermal barrier coatings; numerical simulation; heat transfer

(The Chinese text of the following abstract is prited in P263– 267)

A Two-Dimensional Model of Thermal Energy Storage (TES) Canister for Space Power System

Xing Yuming, Hou Xinbin, Li Weifang, Yang Chunxin, Yuan Xiugan
(5th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: High temperature phase change heat storage using molten fluoride salts is one of the key techniques for space solar thermal dynamic power system. On the basis of heat conduction governing differential equation under micro-gravity (micro-g), a two-dimensional numerical analysis of PCM container has been completed using the enthalpy method. A novel void model has been developed and the previous simulation has been improved.

Key words: solar electrical energy generation; models; numerical analysis