

# 真空石墨加热器温度场数值模拟与分析

韩立勇, 杨星团, 姜胜耀, 刘志勇

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:** 石墨加热器是测量球床堆芯等效导热系数实验的关键部件, 加热器温度场对系统安全及数据准确性有重要影响。本文基于 Fluent 计算平台, 分别采用 DTRM 模型、P1 模型、ROSSELAND 模型、DO 模型对真空保护环境下的石墨加热器温度场进行数值模拟, 确定适合真空保护石墨加热器温度场的计算方法并讨论石墨导热系数、表面发射率对温度场分布的影响。比较分析表明: DO 模型计算得到的温度分布较为接近真实情况, 导热系数小于  $35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  时, 最高温度对其敏感; 导热系数大于  $35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  时, 其对加热体最高温度影响较小, 最高温度较为稳定。

**关键词:** 石墨加热器; 真空环境; 辐射换热; 数值模拟

中图分类号: TL331

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)05-0559-05

## Numerical Simulation and Analysis of Temperature Field in Vacuum Graphite Heater

HAN Li-yong, YANG Xing-tuan, JIANG Sheng-yao, LIU Zhi-yong

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Graphite heater is the key component of the thermal conductivity measuring system of the pebble bed reactor core. Temperature field of the heater has a major influence to safety of the system and data accuracy. DTRM model, P1 model, ROSSELAND model and DO model were employed to simulate the temperature field of the graphite heater in the protection of vacuum environment. The method for calculating the temperature field of graphite heater was discussed and the influence of graphite thermal conductivity and surface emissivity on the temperature field was studied. Comparison results show that result obtained by DO model is most reasonable. The highest temperature of the heater drops as the thermal conductivity of graphite increases. When the thermal conductivity of graphite is less than  $35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , the highest temperature is sensitive to graphite thermal conductivity. When the graphite thermal conductivity is greater than  $35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , the highest temperature tends to be stable.

**Key words:** graphite heater; vacuum environment; radiation heat transfer; numerical simulation

模块式高温气冷堆采用球床堆芯,全陶瓷包覆颗粒制成球形燃料元件,通过元件的堆积形成圆柱形反应堆堆芯。正常运行时,热量可通过流动的氦气载出,而在事故工况下,堆芯内的余热载出一个具有内热源的换热过程,堆芯的最高温度及升温过程与堆芯的等效导热系数大小有紧密联系,石墨球床在超高温状态下的等效导热系数是设计关注的重要参数之一。鉴于此,实验测定球床等效导热系数对于研究事故工况下反应堆的换热状况有重要意义。

石墨加热器是测量球床等效导热系数的关键部件,其温度不能超过石墨承受能力,高温区的位置与最高温度是关注的重要参数,为实现径向准一维换热,实验过程要尽量保证测量区域轴向与周向上温度分布均匀。基于上述要求,本文利用 Fluent 开发建立三维辐射换热计算模型,获得分析真空保护条件下石墨加热体内的温度分布,确定高温区域的位置和最高温度及重要变量的影响规律,以为温度测点位置确定以及装置改进奠定基础。

## 1 几何结构与数学建模

### 1.1 几何结构与物理模型

球床堆芯的尺寸要求及物性决定实验主要测量导热系数的方法应采用稳态法<sup>[1-3]</sup>,拟采用的实验系统部件示于图 1。

实验装置包括加热体、堆积石墨球床及保温隔热层。高温加热体可选用石墨材料<sup>[4]</sup>,采用真空保护方式防止石墨高温燃烧;导热系数测量段利用石墨球代替燃料球堆积,形成环形测量区;保温隔热层包括高温隔热层和低温保温层,维持测量段的高温状态。

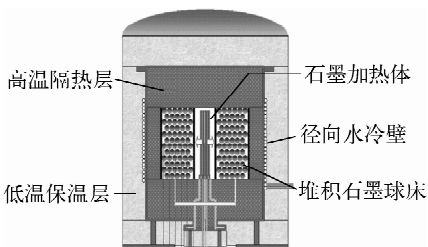


图 1 球床等效导热系数测量装置

Fig. 1 Thermal conductivity measuring system of pebble bed

石墨加热器简化物理模型如图 2 所示。为增大单元电阻,在石墨圆管壁上加工凹槽,形成展开为蛇形的加热体单元<sup>[4]</sup>。单元空隙为真空环境,在中心位置设有支撑圆柱体,高温条件下保证力学稳定性。采用四面体非结构化网格形式对上述物理模型进行网格划分<sup>[5]</sup>。

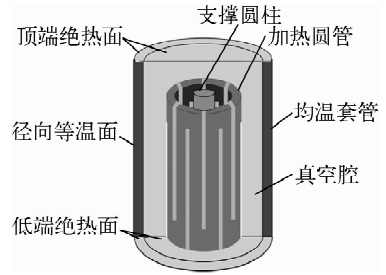


图 2 石墨加热器结构与网格划分

Fig. 2 Structures and meshes of graphite heater

加热体设定为具有均匀内热源的发热装置<sup>[6]</sup>,下端面为绝热面,背景辐射面为等温表面。加热体向外散热,热量以辐射换热形式传递至支撑体和外边界,支撑体吸收的热量通过内部导热,最终以辐射换热形式发射至外边界;在加热体内部,热量以导热形式传递至表面。几何结构内辐射换热与导热的换热量阻分布决定热量传递方向与温度分布,考虑到辐射换热的复杂性,本文选用三维稳态能量传递方程,考虑常用的 4 种换热模型对上述热量传递过程的温度场分布进行模拟计算。

### 1.2 控制方程

#### 1) 能量方程与辐射传递方程

采用真空保护条件计算固体辐射换热,在计算过程中只需引入能量方程<sup>[7]</sup>,形式如下:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + \Phi_r = 0 \quad (1)$$

式中:  $\Phi$  为能量源相;  $k$  为材料导热系数;  $\Phi_r$  为辐射换热引入的能量源相<sup>[8]</sup>,由下式确定:

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s) I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{r}$  为辐射方位角法向向量;  $\mathbf{s}$  为辐射沿程长度向量;  $\alpha$  为材料吸收系数;  $n$  为折射系数;  $\sigma_s$  为散射系数;  $\sigma$  为黑体辐射常数;  $I$  为辐射强度;  $\Omega'$  为辐射立体角。

2) 辐射换热模型

(1) 离散传播辐射模型利用单一辐射射线代替表面在某个立体角内的所有辐射效应<sup>[9]</sup>:

$$I(s) = \frac{\sigma T^4}{\pi}(1 - e^{-as}) + I_0 e^{-as} \quad (3)$$

由辐射强度衰减曲线获得表面处各条射线的净辐射强度,积分获得辐射热源。

(2) P1 模型主要出发点是将辐射强度方程展开成为正交的球谐函数<sup>[9]</sup>,取前 4 项,有:

$$q_r = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla I \quad (4)$$

$$\nabla(\Gamma \nabla I) - aI + 4a\sigma T^4 = S_G \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (6)$$

$$-\nabla q_r = aI - 4a\sigma T^4 + S_G \quad (7)$$

表达式可直接带入能量方程,得到由于辐射所引起的热量源。

(3) ROSSELAND 模型在 P1 模型基础上引入与温度成 3 次方的传热系数来计算辐射热流量:

$$q = q_c + q_r = -(k + k_r) \nabla T \quad (8)$$

$$k_r = 16a\Gamma T^3 \quad (9)$$

ROSSELAND 模型表达形式类似傅里叶定律,通过包含辐射换热系数的传热方程耦合能量方程求得温度场分布。

(4) 离散坐标模型(DO 模型)是将立体角离散化,求解有限个立体角发射出的辐射方程:

$$\nabla \cdot (I(\mathbf{r}, \mathbf{s})\mathbf{s}) + (a + \sigma_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = a \frac{\sigma T^4}{\pi} +$$

$$\frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \quad (10)$$

DO 模型对辐射强度方程进行空间角离散化,通过求解各立体角内的辐射运输方程获得辐射强度分布,积分获得辐射热源。

1.3 数值计算条件

采用非结构网格、有限容积隐式迭代法对能量方程进行求解。本文的数值计算条件如下:加热体内热源  $\phi$  为 4 MW/m<sup>3</sup>;辐射背景温度  $T$  为 2 000 K;加热体导热系数为 1~250 W/(m·K);加热材料黑度为 0.5~1.0;稀薄气体导热系数为 1×10<sup>-20</sup> W/(m·K),粘性系数  $\nu$  为 1×10<sup>-15</sup> kg/(m·s),吸收系数为 1×10<sup>-18</sup> m<sup>-1</sup>,散射系数为 1×10<sup>-18</sup> m<sup>-1</sup>。内热源大小与实验线路承受电流能力以及加热体

几何尺寸相适应,辐射背景温度按照石墨能承受的温度条件定出。计算过程将真空视为极稀薄的介质,用极稀薄气体的物性参数描述真空传热特性,验证性的二维解析算例表明,这种描述得到的温度场与解析解相比是合理的。

2 数值模拟结果与分析

2.1 网格敏感性分析

图 3 为网格大小随数量的变化。由图 3 可知,加热体网格单元大小随网格数量的增加而减小,网格数量超过 40 万时,网格体积大小趋于稳定。图 4 为不同网格计算条件下加热体内的温度分布。由图 4 可得,网格数量大于 16 万时,继续增加网格数量来减小加热体内的平均网格体积对于加热体温度分布影响很小。

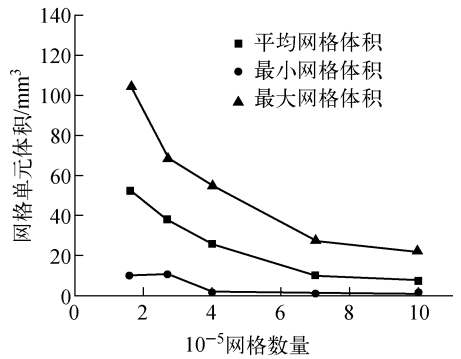


图 3 不同网格数量下网格体积的变化  
Fig. 3 Variation of grid volume for different grid numbers

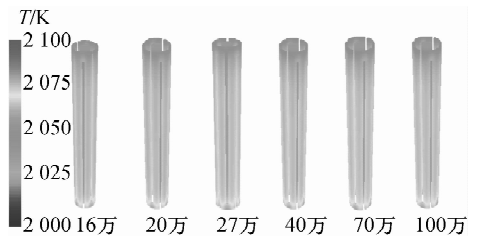


图 4 不同网格数量下的温度分布  
Fig. 4 Fringes of temperature distribution for different grid numbers

2.2 模型敏感性分析

利用 4 种辐射模型对石墨加热体真空保护条件下的温度场进行计算,图 5 为利用不同辐射模型、加热量 34 kW、石墨导热系数

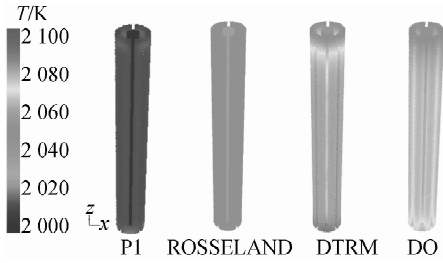


图5 不同模型计算的加热体温度分布云图  
Fig. 5 Fringes of temperature field for different models

129 W/(m·K)下的加热体温度场分布云图。表1列出利用不同模型计算得到的辐射热流量分布。

由不同模型计算的分布云图以及辐射换热热量分布可看出:PI模型计算得到的边界吸收辐射热流量很小,与发热体产生的热量相差较多,加热体温度低,与支撑体辐射换热量为0;ROSSELAND模型计算得到的边界接收辐射热流量与加热体产生的热量相等,但与支撑体间的辐射热流量为0;DTRM模型计算得到的边界辐射热流量较大;DO模型计算得到的边界吸收辐射热量与加热体产生的热量相等,同时计算得到了支撑体接收的加热体的辐射热流量。实际换热过程中,当达到稳态后,由能量守恒得知,外界面的辐射热流量应等于加热体产生的热流量。由以上结果可看出,DO模型虽计算量较大,但计算结果与实际情况较为接近。

表1 不同计算模型下的换热量分布

Table 1 Quantity of heat from different models

模型	换热量/W		
	边界	加热体外表面	支撑体外表面
PI	-42	15 421	0
ROSSELAND	15 421	-15 421	0
DTRM	-20 247	15 421	0
DO	-15 421	15 421	165

究其原因,可能是DO模型通过立体角的离散化将辐射微分方程转化为若干辐射强度运输方程,未直接在介质辐射特性上进行简化,因此在存在真空的辐射计算过程中,采用稀薄气体的描述方式并未对迭代计算产生大的影响。

而其他3种模型均对介质的辐射特性进行了一定程度的简化,条件过度简化使得结果偏差较大。

### 2.3 DO模型计算得到的加热体三维温度场

图6为用DO模型计算得到的加热体与支撑体温度分布。由图6可知,加热体上存在较为明显的轴向换热、周向换热。凹槽对于圆管的温度分布有较大影响,主要表现为加热体高温区域出现在绝热面一侧未被凹槽贯穿的部分,凹槽边缘温度高于加热体蛇形带温度。

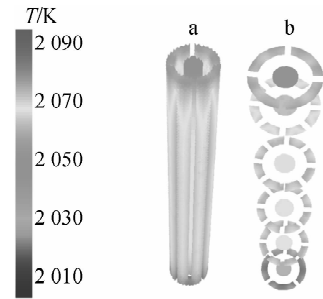


图6 DO模型计算的加热体(a)与支撑体(b)三维温度分布

Fig. 6 3-D temperature distribution in heater (a) and supporter (b) for DO model

凹槽未挖穿的区域出现高温,其原因是凹槽使得轴向的换热受到影响,该区域向轴向的辐射角系数小,换热热阻增大使得温度升高。未穿凹槽处的温度升高引起周向换热,导致与之靠近的加热体凹槽边缘温度升高,高于蛇形带中心温度。

### 2.4 不同石墨导热系数下加热体温度分布

采用DO模型,计算不同石墨导热系数 $\lambda$ 下温度场分布(图7)。加热体最高温度随 $\lambda$ 的增大呈下降趋势。 $\lambda$ 较小( $<35$  W/(m·K))时,最高温度对 $\lambda$ 变化敏感;大于35 W/(m·K)时,最高温度随 $\lambda$ 增大变化很小,较为稳定。

分析原因,在材料导热系数很小时,导热热阻成为径向、轴向换热热阻的主要部分,因此加热体最高温度对其很敏感;而在导热系数很大时,加热体内部导热热阻较小,温度较均匀,最高温度主要取决于辐射热阻,再改变导热系数,对加热体最高温度影响较小。

### 2.5 不同表面发射率条件下加热体温度分布

图8为表面发射率由0.5增加至1.0时加

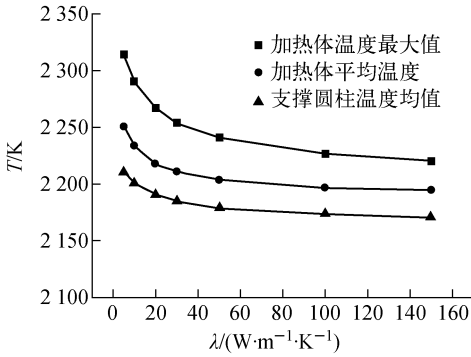


图7 加热体温度随加热体导热系数的变化

Fig. 7 Influence of thermal conductivity on temperature distribution

热单元温度场。

结果表明,表面发射率增加,加热体最高温度变小,但减小速率逐渐变慢,支撑圆柱内温度也逐渐减小,同时也表现出下降趋势变缓,加热体与支撑圆柱的平均温差随表面发射率的增加而减小。

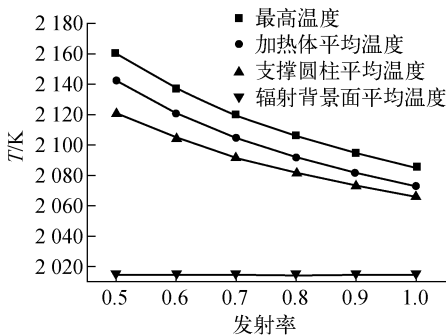


图8 不同表面发射率下加热单元温度分布曲线

ig. 8 Temperature field in heater and supporter for different surface emissivities

3 结论

1) Fluent 辐射计算模型中,DO 模型较为适合石墨加热器真空保护状态下温度场的计算。

2) 石墨加热体高温区域出现在加热体管壁的未被凹槽挖穿的区域。

3) 材料导热系数小于 35 W/(m·K)时,加热体最高温度对材料导热系数敏感;当导热系数大于 35 W/(m·K)时,最高温度受加热体导热系数影响较小,较为稳定。

4) 加热体温度随表面发射率的升高而下

降,下降趋势逐渐变缓。

参考文献:

[1] SALMON D. Thermal conductivity of insulations using guarded hot plates, including recent developments and sources of reference materials[J]. Meas Sci Technol, 2001, 12(2): 89-98.

[2] MIRMIRA S R, FLETCHER L S. Review of the thermal conductivity of thin films [J]. J Thermophys Heat Transfer, 1998, 12(2): 121-130.

[3] 李丽新,刘圣春,刘秋菊. 用综合测量方法设计固体导热系数测试试验台[J]. 实验室研究与探索, 2006, 25(4): 435-438.

LI Lixin, LIU Shengchun, LIU Qiuju. Design of thermal conductivity test desk for solid materials with multi-measuring method [J]. Res Explor Lab, 2006, 25(4): 435-438(in Chinese).

[4] 郭茂先. 工业电炉[M]. 北京:冶金工业出版社, 2002.

[5] 温正,石良辰,任毅如. Fluent 流体计算应用教程 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.

[6] 赵雨涛,康慧,曲平. 真空钎焊炉加热体的数值模拟[J]. 工业加热, 2008, 37(1): 33-36.

ZHAO Yutao, KANG Hui, QU Ping. The numerical simulation of the heater in the vacuum braze furnace [J]. Industrial Heating, 2008, 37(1): 33-36(in Chinese).

[7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.

[8] 李铁,李伟力,袁竹林. 用不同辐射模型研究下降管内传热传质特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 92-98.

LI Tie, LI Weili, YUAN Zhulin. Different radiative models for heat and mass transfer characteristics in vertical pipe [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 92-98(in Chinese).

[9] 顾名言,章明川,范卫东,等. 辐射离散传播法在三维圆柱腔体辐射传热计算中的应用[J]. 热能动力工程, 2005, 20(5): 482-485.

GU Mingyan, ZHANG Mingchuan, FAN Weidong, et al. The application of a radiation discrete transfer method for the radiation heat transfer calculation of a three-dimensional cylindrical cavity body [J]. J Eng Therm Energy Power, 2005, 20(5): 482-485(in Chinese).