0254-6124/2026/46(2)-0362-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LU Pengfei, SU Kexian, PAN Xiuhong, LUO Xinghong, YU Qiang. Heat Transfer Analysis of High Temperature Rack Material in Space Station (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 362–370. CSTR:32142.14.cjss.2024–0175. DOI:10.11728/cjss2026.02.2024–0175

空间站高温柜材料实验过程中的传热分析*

鲁鹏飞[1,2] 苏克显[3] 潘秀红[4]
罗兴宏[5] 于 强[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 101408)

3(桂林理工大学机械与控制工程学院 桂林 541006)

4(中国科学院上海硅酸盐研究所 上海 201899)

5(中国科学院金属研究所 沈阳 110016)

摘 要 材料凝固过程中的温场对其最终的组织与性能有着重要影响. 由于空间与地面环境下热对流的不同, 其传热特性存在一定差异, 从而导致材料实验炉内温场分布也存在差异. 这使得在地面获得的控温参数无法直接应用到空间实验中, 进而对空间与地面材料实验条件的对等性造成影响. 为获得空间传热特征, 构建立了一个空间站高温材料实验炉三维传热数值计算模型并进行合理简化, 对地面实验和空间实验进行了温场的仿真模拟, 得到样品盒温度分布, 分析了在空间微重力环境与地面重力环境下传热参数的变化, 得出与实验条件相似的传热规律. 研究结果可为基于高温柜材料实验炉地基实验结果预测其空间温场分布提供研究参考.

关键词 温场分布, 空间实验, 空间材料科学, 空间高温实验柜, 传热特征, 数值模拟

中图分类号 V524

Heat Transfer Analysis of High Temperature Rack Material in Space Station

LU Pengfei[1,2] SU Kexian[3] PAN Xiuhong[4] LUO Xinghong[5] YU Qiang[1]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 101408)

3(*College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin* 541006)

4(*Shanghai Institute of Silicate, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201899)

5(*Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016)

Abstract The temperature field during solidification has an important influence on the microstruc-

* 中国载人航天工程项目资助 (Y69001A950)

2024-11-30 收到原稿, 2025-02-07 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

ture and properties of the material. Due to the difference of heat convection in space and ground environment, natural convection driven by gravity plays an important role in heat transfer in ground environment. However, in space, the microgravity environment almost eliminates the influence of gravity-dominated natural convection, which will lead to certain differences in the heat transfer characteristics between space and ground, resulting in differences in the temperature field distribution in the material experimental furnace. As a result, the temperature field obtained on the ground is different from that in space under the same temperature control conditions, thus affecting the equivalence of experimental conditions between space and ground materials. The heat transfer characteristics obtained from ground experiments cannot be directly applied to space experiments. This mismatch has a major impact on the space materials experiments. In order to obtain the heat transfer characteristics under microgravity conditions, a three-dimensional numerical model of heat transfer in the high temperature material experimental rack of the space station is established. In the modeling process, reasonable simplification is carried out according to the actual physical conditions, some minor heat transfer factors which have little influence on the overall temperature field are ignored. The temperature field simulation of the ground experiment and the space experiment was carried out respectively, and the temperature distribution of the sample box was obtained. The temperature obtained by simulation was compared with the measured temperature. Through comprehensive analysis of the changes of heat transfer parameters in the space microgravity environment and the normal gravity environment on the ground, the heat transfer law similar to the space condition was obtained. The research results provide a new way to predict the space temperature field distribution based on the ground experiment results of high temperature materials experiment rack and have important guiding significance for the future research of space materials.

Key words Temperature profile, Space experiment, Space materials science, Space high temperature experimental rack, Heat transfer characteristics, Numerical simulation

0 引言

开展空间材料实验对于深化基础理论、改善地面材料质量、提高材料性能以及推动材料学发展具有重要意义[1]. 空间科学技术的不断深入发展, 使得在空间开展材料实验成为可能. 空间材料学是材料学与空间技术交叉形成的学科[2], 中国空间站的建立为空间材料科学的研究提供了重要的平台, 空间站所处的微重力环境会对材料制备过程中的重力效应进行抑制, 能够显著提高材料的制备质量[3]. 传热方式主要有热传导、热对流和热辐射, 在地面进行材料凝固实验时, 不可避免地会受到地球重力场的影响, 使得对流传热特性明显不同于空间微重力环境. 在实验炉内由于各处温度不一致, 气体密度产生差异, 在重力作用下引发热对流现象, 从而影响炉膛内的温度分布. 但是在微重力环境下, 重力加速度极小, 重力引起的热对流几乎消失, 导致在同样控温条件下温度与地面有所差异, 进而对于材料的凝固行为产生影响, 因此, 获得微重力对温场分布的影响对于控制材料的生长速率、宏观结构和生长方式都有显著的指导作用, 甚至直接影响空间材料生长实验的开展.

由于空间和地面的传热特性不同, 使得地面的传热模型无法准确反映空间环境的传热特征, 同时对于空间微重力环境与地面正常重力环境下的材料相关参数差异的研究相对较少, 无法给出具体的差异数据. 因此本文将利用有限元软件建立三维实验炉模型, 对高温实验炉的温度分布进行仿真分析, 并将其与高温实验炉的实验数据进行对比研究, 找出预测地面和空间环境的传热特征差异的方法. 在空间材料凝固实验中, 温场的分布与在地面环境下存在较为明显的差异, 会导致发生合金熔化的位置与地面的对照实验中不同, 尤其是对于合金成分较为复杂的材料, 在凝固过程中若是温度高于组元互溶温度, 熔体就会进入液态组元不混熔的区间, 生成一个与基体熔体不混熔的液相[4], 若得不到准确的温场分布, 会导致无法获得成分更加均匀的合金材料, 直接导致材料生长失败; 在 Al 基材料中添加 Bi 使其成纤维状排布才能获得具有更加优异的软磁和超导性能的材料[5], 若达到

熔化温度的位置不处于纤维状排列的区域, 则无法使合金按照纤维状生长, 导致材料性能下降. 因此在获得准确的空间温场分布后, 就可以对样品盒的位置进行调整, 使样品在特定的温度环境下凝固, 从而获得具有更加优异性能的材料.

关于空间传热和高温材料炉传热, 已开展了较多相关研究工作, 早在天宫二号的空间高温材料科学实验中, 就专门安排了空间温场测量的实验. 天宫二号上共有 3 个批次的样品实验, 每个批次 6 个样品. 其中第 3 批次的 6 个样品是专门用于高温炉空间温场测量的样品. Tao 等[3] 建立了天宫二号空间材料实验炉三维数值计算模型, 对不同工况下的地面实验中的炉内温度分布进行仿真计算, 该模型不仅可以得到地面实验炉的整体温度分布, 还可以预测微重力条件下炉温分布, 同时仿真结果表明地面实验炉中炉内壁温度与样品中心温度相差约 20℃. 目前中国空间站上的高温柜与天宫二号上的实验炉环境已经大不相同, 例如空间站高温柜的加热功率是 1200 W, 而天宫二号的加热功率是 200 W; 空间站高温炉划分为 4 个温区并且可以实现单独加热, 而天宫二号仅有 2 个温区; 空间站高温炉可以实现最高温度 1200℃ 的空间实验, 而天宫二号的最高温度仅能达到 950℃, 因此无法将上述在天宫二号得到的模型应用在空间站中, 所以在空间站高温柜上开展空间温场分布的研究是十分必要的. Luo 等[6] 开展了氩气空间传热特性研究, 利用缩比法对氩气和钠液面的换热进行研究, 对反应器的实际外温分布与数值模拟结果进行比较, 得到了氩气空间温度分布呈对称状的结论, 但是其利用缩比法进行实验, 与实际尺寸的实验仍存在差异, 并且研究的是氩气空间传热特性. Wu 等[7] 也对氩气的空间换热进行了研究, 结果表明其换热主要受到自然对流的影响, 给出氩气在空间的换热的理论分析, 并讨论了钠气溶胶对温度分布的影响, 但是该研究中忽略了壁面与氩气的温度变化所带来的影响. Lu 等[8] 为确定钠冷却反应堆主容器屋面板的温度分布以进行强度分析, 对其传热特性进行分析, 通过缩小尺寸的实验来获得顶板空间的温度分布, 将外推的温度分布与原反应堆的数值分布进行比较, 发现二者吻合较好, 但是其通过缩小尺寸的实验来获得顶板和氩气空间的温度分布, 没有获得直接的实验结果. 在数值模拟研究中, 边界条件的设置对模拟结果的准确程度起决定性作用[9]. Sun 等[10] 对合金凝固过程的传热方式进行分析, 利用数值模拟和有限差分的方式提高了温场仿真的精度, 但是其针对航空发动机所用镍基单晶涡轮叶片进行地面温场模拟, 无法得到其在空间的温度分布情况. Zhou 等[11] 和 Yang 等[12] 对单晶叶片温场、糊状区以及冷却速率进行模拟, 系统研究了铸造过程中的传热方式, 结果表明在开始阶段温度分布并不均匀, 随着铸件到冷却区后, 温场逐渐趋于平稳, 辐射换热加剧形成温度梯度, 但是其模拟实验仅得到了地面实验环境下的温场分布, 与实际空间微重力环境下传热特征有较大差距.

目前对空间高温材料实验炉内部温场的分析和研究尚未开展, 中国空间站的建立为空间材料科学的研究提供了前所未有的机遇. 为保证空间材料科学实验的顺利开展, 本文将探讨高温材料实验炉在地基和空间温场分布的规律, 为利用中国空间站高温柜开展空间材料科学研究提供温场分布依据和保障. 这里选择中国空间站高温材料科学实验柜 (简称高温柜) 标准样品盒的空间和地面实验数据, 对高温炉和样品盒进行合理简化并构建其三维模型. 同时对照炉内热电偶安装位置在模型中插入检测点, 对仿真过程中检测点温度进行监测, 在输入传热参数的条件下, 能够得到与实际温度数据误差最小的仿真结果, 说明利用上述模型能够得到与空间微重力环境下相似的传热特征, 同时也可以利用上述模型对实验样品进行前期数值模拟的验证, 对炉内的温度分布进行预测, 为研究空间微重力环境下的传热特征提供参考.

1 三维传热模型建立

1.1 高温柜实验系统

高温柜实验系统组成如图 1 所示, 其中的加热炉内部设有 4 个核心加热单元, 分别为温区 1～4, 各温区可以实现单独控制, 在温区 3 和温区 4 之间包含旋转磁场区域, 该区域为旋转磁场作用区域, 其区域分布如图 2 所示, 旋转磁场的线圈布置在外侧, 并且在本文中涉及的标准样品空间和地基实验中并没有开启旋转磁场的功能, 因此几乎不会产生焦耳热影响样品的温度分布, 因此在后续的建模过程中仅考虑该区域的流体与固体传热.

样品盒结构如图 3 所示, 标准样品存放在样品盒

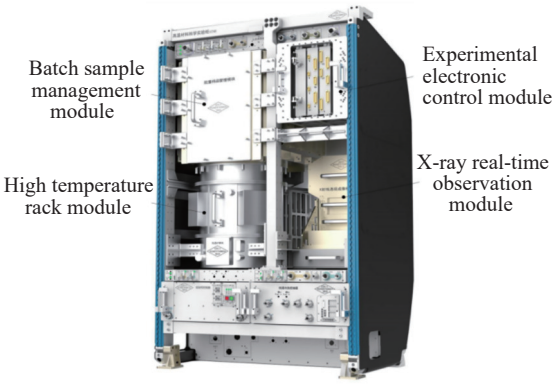


图 1 高温柜实验系统组成

Fig. 1 Schematic of the high-temperature rack experimental system

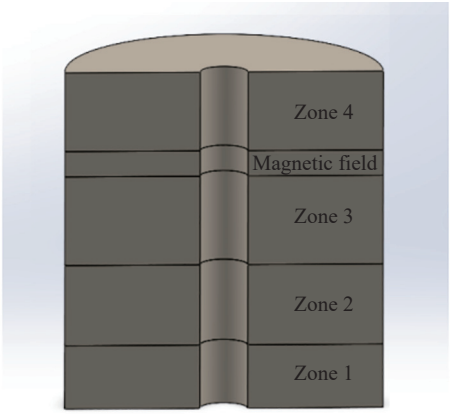


图 2 高温炉温场

Fig. 2 Temperature field of high temperature rack

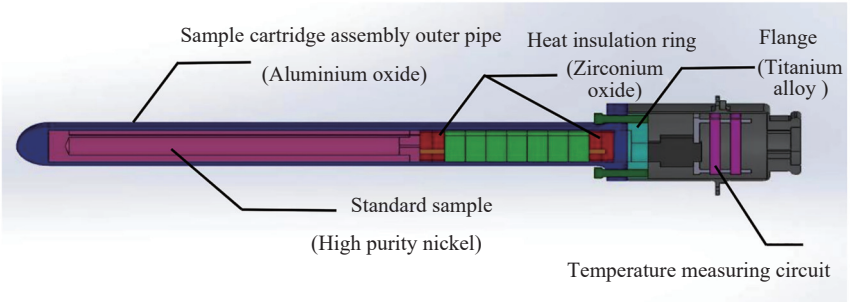


图 3 样品盒结构

Fig. 3 Structure of sample cartridge assembly

中, 样品盒尺寸为 Φ31 mm×380 mm, 样品尺寸为 Φ25 mm × 160 mm, 其中深蓝色区域表示样品盒外管, 粉色区域表示陶瓷坩埚, 红色区域表示氧化锆隔热环, 绿色区域表示氧化锆隔热垫, 黄色区域表示隔热法兰, 浅蓝色区域表示钛合金法兰, 上方粉色区域表示测温电路, 样品盒实物如图 4 所示.

在空间与地面实验过程中使用标准样品 (高纯镍) 制作的同样的样品盒, 将装有样品的样品盒放入炉膛后开始加热, 利用同样的炉子并采用相同的升温过程, 将温度升高至 1000℃. 其中地面实验炉膛内的压强为 100 Pa, 空间实验的压强是 1630 Pa, 地面实验重力加速度值为 1 g, 空间重力加速度值为 0.001 g. 通过温度控制器可以控制炉膛进行升温并采集炉膛不同位置的温度分布数据 (S1～S4), 炉膛通过热辐射、热对流和热传递等一系列方式将热量传递给样品盒, 通过测温电路可以实时采集样品盒实验过程中 5 个不同位置热电偶的温度数据 (T1～T5). 从图 5 可以看出, 由于空间与地面的传热方式发生改变, 尤其

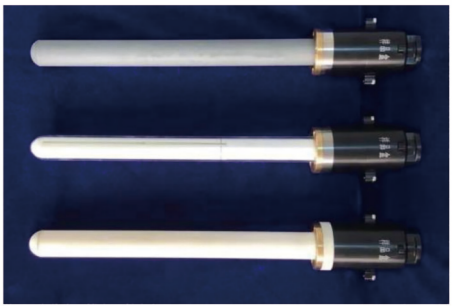


图 4 样品盒实物

Fig. 4 Physical picture of sample cartridge assembly

是热对流会产生较大差异, 在炉膛的温度分布相似的情况下, 空间与地面样品盒的温度分布情况具有较大差异, 并且空间实验机会少成本高, 若无法掌握空间传热特征, 获得样品在空间的准确温度分布情况, 极有可能会导致空间实验失败, 造成巨大的浪费.

1.2 加热炉传热数学模型

基于空间高温材料炉的结构特性, 其传热过程主

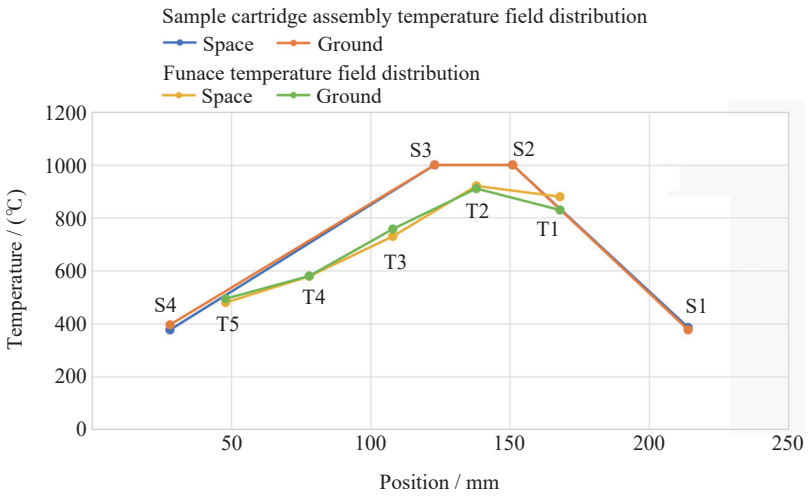


图 5 空间与地面环境下炉膛与样品盒温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of furnace and sample cartridge assembly in space and ground environment

要包括热传导、热辐射和热对流[13], 高温炉的各个组成部件表面被空气或被真空分隔. 真空在热分析领域通常被视为一种非参与介质, 而大部分气体在一定条件下也可被近似当作非参与介质处理. 针对这一特征, 在对空间材料高温炉实施热分析过程中, 介质对于辐射所产生的吸收、发射以及散射作用均可忽略不计[14,15]. 因此, 在对炉内辐射情况进行分析时, 选择面对面辐射模型来构建辐射模型较为合适. 面β_k的能量通量为

$$q_{o,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{i,k}. \tag{1}$$

式中, ε_k为发射率, ρ_k为反射率, σ为玻尔兹曼常数, T_k为面β_k的表面温度, $q_{i,k}$为从周围环境入射到该面的能量通量. 由灰体辐射模型可知, 入射到灰体表面的能量被吸收、被反射回环境中或者被透射, 即满足

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \tag{2}$$

其中, α为吸收率, ρ为反射率, τ为透射率. 由基尔霍夫定律可知, 发射率ε等于吸收率α. 而且, 由空间高温材料炉的材料组成可知, 在可见光及红外光谱范围内, 高温炉各构件表面对热辐射是不透明的, 即有$\tau = 0$. 因此, 对表面β_k, 有

$$\rho_k = 1 - \varepsilon_k. \tag{3}$$

来自周围n个表面的入射能量通量可以表示为

$$A_k q_{i,k} = \sum_{j=1}^{n} A_j q_{o,j} F_{j,k}. \tag{4}$$

式中, A_k和A_j分别为面β_k和面β_j的面积, $F_{j,k}$为辐射角系数, 其仅仅取决于两个面的形状和位置, 可以由热仿真软件计算得到. 由角系数互换关系, 得到

$$A_k F_{k,j} = A_j F_{j,k};\ \ j = 1, 2, \cdots, n. \tag{5}$$

因此, 从表面β_k离开的能量通量可以重写为

$$q_{o,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) \sum_{j=1}^{n} F_{k,j} q_{o,j}. \tag{6}$$

在流体的流动过程中, 遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三个基本守恒定律[16]. 加热炉在工作时且流体为空气时, 在流动性计算时, 可以使用流体质量守恒方程或连续性方程来表示, 有

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \boldsymbol{v}) = 0. \tag{7}$$

式中, ρ为流体密度, $\boldsymbol{v}$为速度矢量, t为时间, $\rho\boldsymbol{v}$表示单位流体质量.

在高温材料炉空间与地面的热分析中, 其炉内的流动速度远远小于 0.3 Ma, 因此可以认为流体是不可压缩的, 不可压缩流体密度的散度为零[17], 可写为

$$\nabla \boldsymbol{v} = 0. \tag{8}$$

考虑到空间高温材料炉所受的体积力仅包含重力而不包括其他外力, 动量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \boldsymbol{v}) + \nabla [(\rho \boldsymbol{v}) \boldsymbol{v}] = -\nabla p + \nabla \Sigma + \rho g. \tag{9}$$

式中, p为压强, Σ表示应力张量, g为重力加速度. 对于高温材料炉中的固体区域, 能量方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla (\rho e \boldsymbol{v}) = \nabla (h \nabla T) + S. \tag{10}$$

式中, ρ为固体密度, h为热导率, S为辐射能量, T表示温度, e为焓, 其表达式为

$$e = \int_{T_0}^{T} c\mathrm{d}T. \tag{11}$$

其中, c为比热容, T_0为参考温度且通常情况下其值被设置为 298.5 K.

在高温炉实验温度范围内, 其材料的密度ρ、比热容c参数受到环境参数的影响较小, 在不同工况下(压强p和重力加速度g取值不同时) 可认为是常数, 因此不同工况对高温炉传热特征的影响主要集中在材料导热率和辐射率, 由于空间实验机会少, 几乎不可能在空间条件下测得样品盒各个材料的传热参数, 直接得到空间传热特征, 基于样品的温度分布建立模型, 通过仿真得到地面和空间实验的传热参数特征的差异, 对后续开展空间实验提高温度稳定性具有重要意义.

1.3 仿真流程

在进行仿真模拟之前, 首先建立高温炉模型, 然后对创建好的模型进行前处理, 主要包括模型内部流体域的抽以及进行共享拓扑等操作[18], 前处理完成后选取合适的网格对模型进行网格划分, 将边界条件盒求解器添加到模型中, 对模型中涉及的氧化铝陶瓷、钛合金、氧化锆等材料参数进行设置, 并根据仿真结果与实际地面和空间温度结果进行对比, 再对材料的导热率和辐射率进行调整, 在误差缩小到一定范围时, 就得到了相应的传热特征, 其仿真流程如图 6 所示.

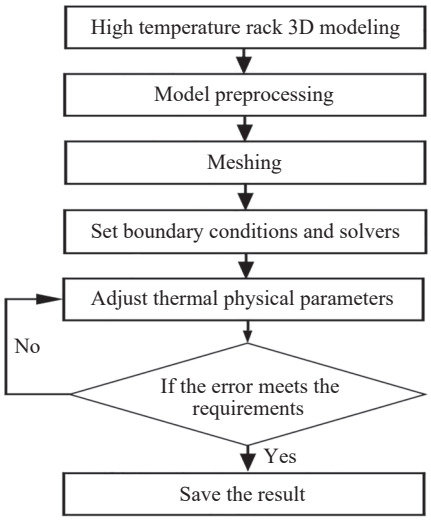


图 6 仿真主要流程

Fig. 6 Simulation main flow chart

1.4 加热炉网格划分

在划分网格时, 网格尺寸的大小不仅会影响计算机的求解时长还会对仿真结果的精度造成影响. 网格尺寸过小会增加计算时间, 尺寸过大则会导致结果不够准确[19]. 通常采用正交质量、偏斜系数与纵横比等来判断网格质量是否合格, 正交质量越接近于 1 表明网格质量越高, 而越接近于 0 则说明网格质量越低, 通常情况下要求网格的平均正交质量系数应该大于 0.5. 图 7 给出了加热炉体单元模型的体网格划分截面, 经检验该网格划分的平均正交质量系数达到 0.8. 在数值模拟中, 为确保计算结果的准确性和可靠性, 进行网格无关性验证也是必不可少的步骤. 采用 ANSYS Fluent 生成网格, 对几何模型首先进行前处理, 然后生成结构化网格. 初始网格的尺寸设定为 15 mm, 通过更改网格尺寸参数, 得到不同疏密程度的网格. 在不同网格上进行数值模拟时, 采用相同的边界条件和初始条件. 通过计算相邻两次网格下解的相对误差, 发现当网格密度达到 1 mm 时, 相对误差小于 5%, 因此认为在本研究中达到了网格无关性. 此时的计算结果作为后续分析的基础. 因此, 该网格划分结果是可接受的, 如图 7 所示, 可适用于后续热仿真实验.

2 高温炉内部温场实体结构

在空间实验过程中将样品盒插入高温炉中, 建立的三维模型如图 8 所示, 通过给高温炉加热将热量传递给样品盒, 在高温炉体当中通过热电偶来测量指定

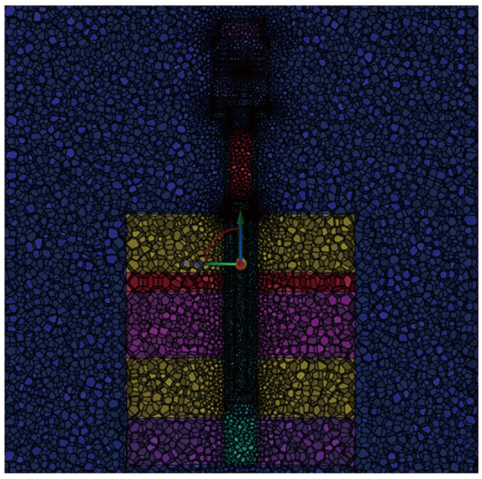


图 7 加热炉体单元体网格划分截面

Fig. 7 Grid section of heating furnace unit

位置的实时温度, 用 S1～S4 表示, 根据空间中实验过程中高温炉的实际温度设置高温炉 4 个温区的温度作为输入, 将样品在样品盒里实际所处的温度用 T1～T5 来表示并作为输出值, 其具体分布如图 9 所示, 其中 T1～T5 位于氧化铝陶瓷坩埚管的内部, 为样品管内部的直接测温点, T1 位于坩埚管内距底部 12 mm 处, T2 位于 T1 上方 30 mm 处, T3 位于 T2 上方 30 mm 处, T4 位于 T3 上方 30 mm 处, T5 位于 T4 上方 30 mm 处.

3 仿真实验结果分析

由于测温点与管内样品直接接触, 在进行三维传热数值计算时, 通过在模型中插入对应点的坐标, 在求解完成后就可以得到对应检测点的温度, 以高温炉实际温度 S1～S4 和包含的热物理参数作为输入, 样品盒 5 个热电偶 T1～T5 的数值作为输出, 得到在空间和地面条件下样品盒的温度分布情况, 通过不断调整热物理参数, 减小实际样品盒温度分布情况与仿真结果的误差, 在可以接受的误差范围内时, 最终可以通过这 5 个测温点的温度来近似判断样品管内部温场的分布情况, 说明该仿真模型可以得到空间和地面条件下的传热特征. 高温炉温度传感器使用 S 型热电偶 (铂铑 10-铂热电偶), 在地基与空间实验中, 炉温最高保持在 1000℃, 根据国标 GB/T 1598-2010 可知[20], S 型热电偶在该测温环境下的精度为 1℃, 如表 1 所显示为在地面与空间环境下, 样品盒 5 组热电偶的仿真温度值和实验温度值, 从表 1 中可以看出, 通过调节地基 (100 Pa, 1 g) 和空间 (1630 Pa, 0.001 g) 的压强和重力加速度值, 其同一位置 (T1) 的温度差距超过 50℃, 主要原因就是微重力环境改变了炉内的对流传热, 通过调整材料的导热率和辐射率不断减小不同工况下实际值与仿真值的误差, 使其最终达

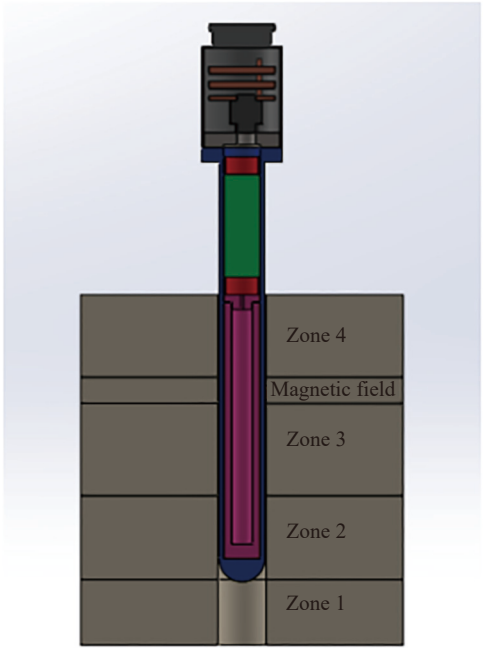


图 8 样品盒与高温炉三维实验模型

Fig. 8 Three-dimensional experimental model of sample box and high temperature furnace

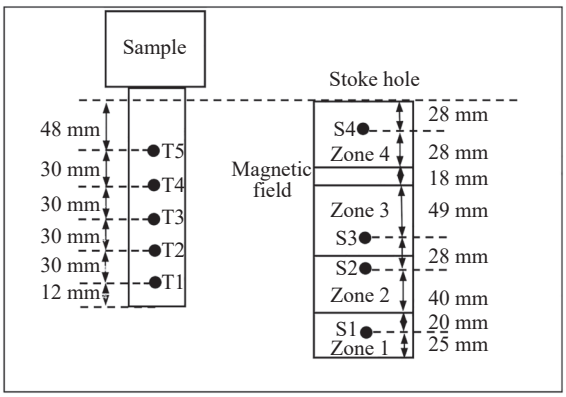


图 9 热电偶分布

Fig. 9 Distribution of thermocouples

表 1 地基实验与空间实验温度误差值 (单位: ℃)

Table 1 Heat transfer parameters of ground experiment and space experiment (Unit: ℃)

热电偶编号	地基仿真值	地基真实值	地基差值	空间仿真值	空间真实值	空间差值
T1	827	826	1	880	879	1
T2	911	911	0	920	920	0
T3	752	753	–1	729	730	–1
T4	570	569	1	578	579	–1
T5	481	481	0	478	479	–1

表 2　地基实验与空间实验传热参数

Table 2　Heat transfer parameters of ground and space experiment

材料		钛合金	氧化锆	氧化铝
地基实验	辐射率	0.6	0.78	0.45
	热导率/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	10.8	9.8	25.9
空间实验	辐射率	0.683	0.82	0.487
	热导率/($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	12.83	11.4	29.75

到±1℃, 从而获得空间和地面较为准确的传热特征.

在表 1 所示的地基和空间的样品盒温度分布下, 其温度误差在±1℃, 在该工况下通过仿真得到对温度分布具有显著影响的材料具体参数见表 2, 在此条件下各测温点温度均达到了较好的拟合结果, 模拟仿真的测温点温度与实际温度最为接近, 即模拟实验炉内温场分布情况与实际加热炉内温场分布情况最为接近, 可以看出在空间条件下各种材料的辐射率与导热率几乎都比地面条件下偏大, 利用该模型获得了空间条件的传热特征.

4　结论

通过对空间站高温柜中高温炉空间材料装置建立的三维数值仿真计算模型, 对空间与地面工况下的三维传热模型进行了模拟仿真, 在不同工况下考虑到炉内热传导、热对流、热辐射的情况下, 流体压强和重力加速度值主要影响炉内的对流情况, 导致地基与空间的样品盒温度分布存在较大差异. 采用该模型通过对样品盒结构的分析, 调节影响样品盒温度分布的主要材料的传热参数, 不断减小误差从而分别得到与实验相似的温度分布, 获得与地基和空间加热炉内温场分布最为接近的传热特征, 并确定了相关物理参数值, 为后续开展空间实验提供了空间传热特征参考. 同时由于空间实验的机会十分宝贵, 可以采用该模型对不同种样品在微重力环境下进行实验时的加热炉内温场分布情况进行预测.

利益冲突　所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] CUI Xiaojie, LU Dengbai, MA Dongtao, *et al*. Research progress of high temperature material science experimental equipment for space application[J]. *Manned Spaceflight*, 2023, **29**(4): 455-463 (崔晓杰, 陆登柏, 马动涛, 等. 空间高温材料科学实验设备研究进展 [J]. 载人航天, 2023, **29**(4): 455-463)

[2] RUAN Ying, HU Liang, YAN Na, *et al*. Recent advances and future perspectives of space materials science[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, **50**(6): 603-649 (阮莹, 胡亮, 闫娜, 等. 空间材料科学研究进展与未来趋势 [J]. 中国科学: 技术科学, 2020, **50**(6): 603-649)

[3] TAO Ye, YANG Liping, ZHONG Qiu, *et al*. Simulation and ground experiment investigation of material experimental furnace in space[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2016, **36**(4): 464-468 (陶冶, 杨莉萍, 钟秋, 等. 空间材料实验炉的模拟热分析与地面试验分析 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(4): 464-468)

[4] WANG H P, WEI B B. Understanding atomic-scale phase separation of liquid Fe-Cu alloy[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(32): 3416-3419

[5] CUI Hongbao, GUO Jingjie, BI Weisheng, *et al*. The evolution of unidirectional solidification microstructure of the Al-In monotectic alloys in high temperature gradient[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, **40**(12): 1253-1256 (崔红保, 郭景杰, 毕维生, 等. 高温度梯度下 Al-In 偏晶合金定向凝固组织的演化规律 [J]. 金属学报, 2004, **40**(12): 1253-1256)

[6] LUO Xinyue, LU Daogang, FENG Jiaqi, *et al*. Numerical simulation of the argon space for the heat transfer characteristics in the main vessel based on the scaled-down test model[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2023, **43**(5): 961-970 (罗心越, 陆道纲, 冯佳琪, 等. 基于缩比实验模型的快堆主容器内氩气空间传热特性数值研究 [J]. 核科学与工程, 2023, **43**(5): 961-970)

[7] WU Qiang, ZHANG Donghui, LIU Yunyan. Simulation principle and analysis for heat transfer of argon space in the main vessel of China Experimental Fast Reactor[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2009, **29**(1): 27-32 (吴强, 张东辉, 刘云焰. 快堆主容器内氩气空间传热实验原理及分析 [J]. 核科学与工程, 2009, **29**(1): 27-32)

[8] LU D G, FENG J Q, YU Z Y, *et al*. Heat transfer in the argon space of pool-type sodium-cooled fast reactor: numerical simulation and experimental validation[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2024, **197**: 110282

[9] YANG H M, PU Z M, GUO Z P, *et al*. A study of metal/die interfacial heat transfer behavior of vacuum die

cast pure copper[J]. *China Foundry*, 2020, **17**(3): 206-211

[10] SUN Jiayi, DONG Longpei, ZHAO Yunsong, *et al*. Research progress on numerical simulation of temperature field during directional solidification of nickel-based single crystal turbine blades[J]. *Special Steel*, 2024, **45**(4): 34-40 (孙佳怡, 董龙沛, 赵云松, 等. 镍基单晶涡轮叶片定向凝固过程温度场数值模拟研究进展 [J]. 特殊钢, 2024, **45**(4): 34-40)

[11] ZHOU Yuhui, HUANG Qingmin, LIN Rongchuan. Numerical simulation of directional solidification process of single crystal superalloy blade[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021, **41**(11): 1361-1365 (周玉辉, 黄清民, 林荣川. 单晶高温合金叶片定向凝固过程数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, **41**(11): 1361-1365)

[12] YANG Zhenyu, CHEN Hao, HU Songsong, *et al*. Evolution of temperature field of Ni-based single crystal superalloy at early stage of directional solidification[J]. *Foundry*, 2020, **69**(11): 1180-1184 (杨振宇, 陈昊, 胡松松, 等. 镍基单晶高温合金定向凝固初期温度场演化过程 [J]. 铸造, 2020, **69**(11): 1180-1184)

[13] LI Jiahao. Research on Inverse Heat Conduction Problem of Czochralski Silicon Single Crystal Growth Process[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023 (李佳浩. 直拉硅单晶生长过程逆传热研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023)

[14] JIANG Qiongyan. Analysis of Flow and Heat Transfer Characteristics and Structural Optimization of Plate Heat Exchanger[D]. Ji'nan: Shandong University, 2023 (蒋琼艳. 板式换热器结构优化及传热流动特性分析 [D]. 济南: 山东大学, 2023)

[15] JIN Yujun, LI Ning, LIAO Dunming, *et al*. Numerical simulation of sintering temperature field in titanium alloy investment casting shell[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, **44**(4): 571-576 (金煜俊, 李宁, 廖敦明, 等. 钛合金熔模铸造型壳焙烧温度场数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, **44**(4): 571-576)

[16] ZHANG Hao. Temperature Field Analysis of Oil-Cooled Permanent Magnet Synchronous Motor for Passenger Car[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023 (张浩. 某乘用车油冷式永磁同步电机温度场分析 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023)

[17] GAO Jiaxu, REN Zhibin, ZHAO Ming. Heat transfer characteristics and topology optimization of tubular phase change regenerator under microgravity[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2023, **45**(1): 78-86 (高佳徐, 任智彬, 赵明. 微重力条件下列管相变蓄热器的传热特性研究及拓扑优化 [J]. 上海理工大学学报, 2023, **45**(1): 78-86)

[18] XIA Jianfang, YAO Heng, CHEN Siyu, *et al*. Design of optimal nozzle angle for high-speed gears based on CFD method[J]. *Lubrication Engineering*, 2023, **48**(9): 178-186 (夏建芳, 姚恒, 陈思雨, 等. 基于 CFD 方法的高线速度齿轮最优喷嘴布置角度设计 [J]. 润滑与密封, 2023, **48**(9): 178-186)

[19] ZHANG Ye. Multi-Objective Optimization and Heat Transfer Enhancement Performance Analysis of Hot Blast Stove Heat Exchanger[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023 (张野. 热风炉换热器多目标优化及强化传热性能分析 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023)

[20] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 1598-2010 Platinum-10%Rhodium/Platinum -thermocomouplewires-Platinum-13%Rhodium/Platinem-thermocomouplewires-Platinum-30%Rhodium/Platinem-6%Rhodi-um thermocomouplewires[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1598-2010 铂铑 10-铂热电偶丝、铂铑 13-铂热电偶丝、铂铑 30-铂铑 6 热电偶丝 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011)

作者简介



鲁鹏飞 男, 博士研究生, 1998 年 2 月出生于河南省安阳市, 主要研究方向微重力科学实验技术、空间传热学. 参与空间站高温材料科学实验柜相关科学实验、高温柜热仿真实验, 高温柜样品盒实验数据采集与处理.

E-mail: lupengfei20@mails.ucas.ac.cn



于 强（通信作者） 男, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向空间科学实验技术.

E-mail: yuqiang@nssc.ac.cn