

基于数据驱动的空间高温材料实验炉传热特性地面模拟方法研究

黄振宇^{1,2}, 于强¹, 刘学超³

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, 100049

3. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海, 201899

通信作者 于强 Email: yuqiang@nssc.ac.cn

Research on Ground Simulation Method of Heat Transfer Characteristics for Space High-Temperature Material Experimental Furnace Based on Data-Driven Approach

HUANG Zhenyu^{1,2}, YU Qiang¹, LIU Xuechao³

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201899

摘要

晶体生长过程中温度的稳定性对晶体形貌及结构有着显著影响, 为了提高晶体的性能及质量, 必需要保证晶体生长过程中温度的稳定性。现阶段我国空间高温材料科学实验炉均采用 PID 控制器对晶体生长温度进行控制。由于空间实验机会珍贵且稀少, 控制参数的整定工作需要在地面完成。然而, 由于地面与空间环境传热的不同, 导致高温材料实验炉的传热特性存在差异, 其传递函数也不相同, 若将地面整定的控制参数直接应用于空间工况, 将会导致温控效果变差。为此, 本文提出了一种基于数据驱动的减压法, 在地面实现了对空间微重力环境下高温炉传热特性的近似与模拟, 并给出了地面适配工况的压强值, 克服了传统减压法由于先验知识缺乏导致地面适配工况压强难以确定的问题。

关键词: 高温材料科学实验炉, 数据驱动, 减压法, 传热特性模拟

Abstract

The temperature stability during the crystal growth process has a significant impact on the morphology and structure of the crystal. In order to improve the quality of crystals, it is necessary to ensure the stability of temperature throughout the crystal growth process. Currently, in China, PID controllers are used to control the crystal growth temperature in space high-temperature material science experimental furnaces. Due to the limited and scarce opportunities for space experiments, the tuning of control parameters needs to be completed on the ground. However, due to the difference in heat transfer between the ground and space environments, there are differences in the heat transfer characteristics of the furnace, and its transfer functions are also different. If the control parameters tuned on the ground are directly applied to

space conditions, it will result in a worse temperature control effect. To address this, this paper proposes a data-driven depressurization method that approximates and simulates the heat transfer characteristics of the furnace under microgravity environments on the ground, and provides the pressure values for ground adaptation conditions. This overcomes the problem of the traditional depressurization method being difficult to determine the pressure value for ground adaptation conditions due to lack of prior knowledge.

Keyword : High-temperature material experimental furnace, Data-driven, depressurization method, heat transfer characteristic simulation

1 引言

空间微重力材料科学实验中, 制备晶体的过程离不开高温材料实验炉这样的实验装置, 高温材料实验炉为空间晶体生长实验提供高温环境, 其温度可达上千摄氏度, 可对合金、半导体及氧化物等材料进行高温加热处理。美国^[1]、俄罗斯^[2]、德国^[3]及中国^[4]等国相继开展了空间高温材料实验炉的研制工作, 并取得了丰硕的科研成果, 为推动空间材料科学的发展奠定了坚实的基础。

温度因素会影响晶体的生长速率^[5-7]以及晶体的形貌与结构^[8-10]。生长温度的高稳定性有助于改善晶体沿轴向的不均匀性^[11], 提高晶体质量^[12]。若生长过程中温度发生波动, 将会导致最终得到的晶体产生生长条纹^[13]。因此, 为了保证晶体的性能和质量, 需要对空间高温材料实验炉的温度进行精准控制^[14]。

对于空间微重力材料科学实验来说, 在空间开展晶体生长实验的成本很高, 实验机会珍贵且稀少, 一旦实验失败, 将没有办法进行弥补。根据以往空间材料科学实验的实践经验来看, 对不同的实验样品, 实验装置的传热特性以及系统传递函数也是不同的, 为了得到更好的动态及稳态性能, 对每一个实验样品, 都会分别对应着不同的控制参数。然而, 由于流体的流动特性不同, 地面与空间环境下, 高温材料实验炉的传热特性存在显著差异, 系统传递函数将会发生改变, 如果将在地面整定的控制参数直接应用于空间过程控制, 将会导致温度发生波动, 温控效果变差。为此, 需开展空间微重力环境下高温材料实验炉传热特性地面模拟方法的研究工作。

地面与空间环境下, 高温材料实验炉的传热差异主要体现在自然对流传热效应的不同。空间微重力环境下, 重力加速度的值约为 $10^{-3} \sim 10^{-5}g$, 由流体密度分布不均而引起的浮升力为零, 此时自然对流传热效应可以忽略不计。为了在地面模拟微重力环境下高温材料实验炉的传热特性, 应在保持其他传热效应不变的前提下, 尽量减小自然对流传热对其热特性的影响。为此, 常见的处理方法有缩尺法^[15]、减压法^[16]。顾名思义, 缩尺法是通过等比例的缩小模型的几

何尺寸来抑制自然对流传热效应，而减压法则是通过改变工况条件，即减小高温材料实验炉内的气体压强来减弱自然对流传热效应。减压法不需对模型进行额外操作，实验成本低，可操作性强。陶冶等将材料实验炉的压力从 1 atm 降至 3 kPa，用于模拟空间微重力环境下的传热特性^[17]。

空间高温材料实验炉属于复杂系统，这种复杂性不仅体现在其组成构件众多及其结构复杂度上，也体现在各组成部分之间的相互耦合作用上^[18-21]。正是基于对上述复杂性的考虑，在地面对空间微重力环境下高温材料实验炉的传热特性进行模拟时，更适合采用减压法，其在成本及可操作性上相较于缩尺法具有明显优势。然而，成功应用减压法的前提是已知流体的流动特性，当流体动力黏度、流体热膨胀系数以及雷诺数等表征流体流动特性物理量的取值未知，或者获取这些先验知识的难度较大时，将不能够由减压法直接给出地面适配工况的压强值。另一方面，减压法给出的结果依赖于对阿基米德数上界的定义，当上界取值不同时，减压法给出的结果也不同，求解过程具有很大的不确定性。

为此，本文提出了一种基于数据驱动的减压法，将数字孪生技术、人工智能技术赋能空间高温材料实验炉传热特性的研究，在地面对空间微重力环境下高温材料实验炉的传热特性进行近似与模拟，克服了由于流体流动特性等先验知识缺乏导致减压法无法确定地面适配工况压强值的问题。本文基于抽样及仿真技术，研究了压强取值的不同对高温材料实验炉内温度的影响，利用回归分析，建立了炉内温度分布与压强之间的黑箱模型，并以此构建多目标优化问题，给出了相应的地面适配工况条件，在此适配工况整定的控制参数可直接应用于空间晶体生长过程中的温度控制。

天宫-2 上的材料科学实验，是我国非常成功的一次空间材料科学实验。它一共进行了 3 个批次，每个批次包含 6 个样品的空间材料科学实验。第一个批次的实验中炉子内部是真空状态（约为 1 kPa）。第一个批次的样品实验完成之后，宇航员打开炉子更换样品，又进行了第二个批次的实验。第二个批次的实验是在一个大气压下进行的。宇航员在离开天宫二号之前又将第三个批次的样品更换好，在一个大气压状态下进行了第三个批次的实验。下面以天宫-2 上开展高温材料科学实验的实验炉为例，研究基于数据驱动的空间高温材料实验炉传热特性。

我国已经建立了空间站，空间站上部署了高温材料科学实验柜。今后将会利用高温材料科学实验柜开展大量的空间材料科学实验。高温材料科学实验柜对温度控制稳定度的要求是 $1600 \pm 0.25^\circ\text{C}$ ，相当于温控稳定度优于 0.0156%，如此之高的稳定度，对温度的控制提出了更高的要求。本文的研究将为此后我国空间站上的高温材料科学实验中温度的高稳定度控制提供一个新思路和方法。

2 天宫-2 高温材料实验炉结构

经简化后的天宫-2 空间高温材料实验炉结构如下图所示。从图中可以看出，高温材料实验炉为轴对称结构，其内部有两个温区，每个温区分别对应一独立的热源，热源是由铁铬铝合金构成的电热丝，其位于炉内中心位置并嵌入在由氧化铝陶瓷构成的炉芯侧壁中，其中，处于下方的电热丝为炉丝 1，上方的电热丝为炉丝 2。炉芯的外侧包覆有氧化铝陶瓷管以及 3 层由石英纤维布和铂金膜构成的隔热组件，在最外层石英纤维布的外侧还包覆有一层钛合金，炉膛由上下两个陶瓷托管、炉芯以及凸肩垫圈构成。沿炉子径向还分布有 5 层不锈钢材质构成的辐射屏，它们可以显著减少通过热辐射所散失的热量，辐射屏之间垫有平垫圈。钛合金托盘位于高温炉中下部，其可以对铂金膜、石英纤维布、钛合金薄壁以及不锈钢辐射屏起到托举、支撑的作用。在高温炉的最外侧是由石棉材料构成的隔热层，往里分别为由铝及不锈钢构成的壳体。

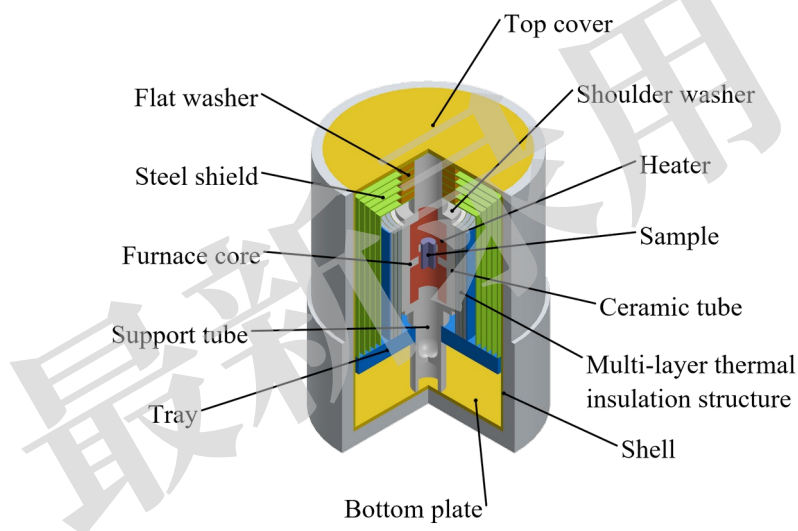


图 1 天宫二号高温炉的内部结构

Figure 1 Structure of the furnace on Tiangong-2

在空间高温材料实验炉内部分布有 18 个温度监测点 $B_1 - B_{18}$ ，在这些监测点处由热电偶对炉内温度进行测量，各温度监测点的位置分布如下图所示。

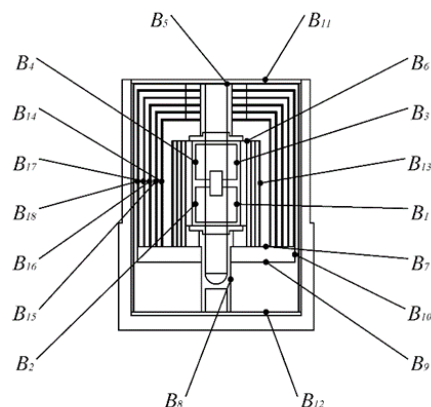


图 2 炉内温度监测点的位置分布

Figure 2 Distribution of temperature monitoring points in the furnace

3 减压法基本原理

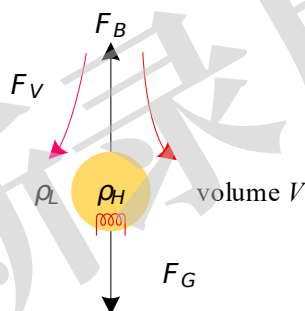


图 3 重力场中受热体积微元 V 所受作用力

Figure 3 The force acting on the heated volume V in gravitational field

地面和空间微重力环境下，高温材料实验炉传热特性的差异主要体现在自然对流传热效应的不同。自然对流传热效应的机理如上图所示，对于流体域内一受热体积微元 V ，其温度 t_H 高于环境温度 t_L ，由于热胀冷缩效应，其密度 ρ_H 小于周围流体的密度 ρ_L 。重力场中，体积微元受到的重力 F_G 与浮力 F_B 是一对非平衡力，且有 $F_B > F_G$ ，在合力的作用下，受热体积微元将向上运动，流体内部发生了相对流动，并伴随有热量的传输。由于流体内部发生了相对运动，体积微元还受到粘性力 F_V 的作用。而在微重力环境下，驱动体积微元向上运动的非平衡力消失，自然对流效应可以忽略。

在流体动力学中，可以通过无量纲数来表征流体的流动特性^[22]。其中，格拉晓夫数 Gr 表示浮升力与粘性力之比^[23]， Gr 数是与自然对流效应紧密相关的重要参数，其大小可用于衡量自然对流效应的强弱。格拉晓夫数越小，浮升力

的作用越不明显，自然对流效应越弱，格拉晓夫数越大，自然对流效应越强。格拉晓夫数可定义为

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2} = \frac{\rho^2 g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\mu^2} \quad (1)$$

上式中， g 为重力加速度， β 为热膨胀系数， T_w 和 T_∞ 分别为壁面温度和流体温度， L 为特征长度， ρ 为流体密度， ν 为流体运动粘度， μ 为流体动力黏度，且有 $\nu = \mu / \rho$ 。与强制对流相关的一个无量纲数为雷诺数，雷诺数表示粘性力与惯性力之比，其定义为

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (2)$$

其中， U 为流速。根据雷诺数取值的不同，流体的流动特性表现为层流或者湍流。格拉晓夫数与雷诺数平方的比值称为阿基米德数（或理查森数， Ri ），有

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{\rho^2 g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\mu^2 Re^2} \quad (3)$$

由 Gr 数和 Re 数的定义可知， Ar 数表示浮升力与惯性力之比^[24]，其可被用于区分自然对流、强制对流以及混合对流。具体来说，当 $Ar < 0.1$ 时，可认为自然对流效应远弱于强制对流，即此时只存在强制对流；当 $Ar > 10$ 时，自然对流效应占据主导地位，强制对流的影响可以忽略不计；当 $0.1 < Ar < 10$ 时， Gr 数与 Re^2 为同一量级，此时为混合对流，既存在自然对流又存在强制对流。

对于理想气体，由理想气体状态方程可得

$$\rho = \frac{pM}{RT} \propto p \quad (4)$$

上式中， p 为气体压强， M 为气体摩尔质量， R 为摩尔气体常数， T 为气体温度。将上式代入式（3）可得

$$Ar = \frac{p^2 M^2 g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{R^2 T_\infty^2 \mu^2 Re^2} \propto p^2 L^3 \quad (5)$$

由式（5）可知， Ar 数正比于 p^2 。可以通过减小压强 p 来降低 Ar 数，使得式 $Ar \ll 1$ 成立，此时自然对流传热效应可以忽略不计，从而在地面实现对空间微重力环境下高温材料实验炉传热特性的近似与模拟。采用减压法，压力应满足

$$p \ll \frac{RT_{\infty} \mu Re}{M(g\beta \Delta T)^{1/2} L^{3/2}} \quad (6)$$

其中，温差 $\Delta T = T_w - T_{\infty}$ 。在减压法中，引入减压比来衡量对压强的改变程度，减压比可定义为

$$\gamma_p = \frac{p}{p_0}, 0 < \gamma_p < 1 \quad (7)$$

为了使式 $Ar \ll 1$ 成立，减压比应满足

$$\gamma_p \ll \frac{1}{p_0} \cdot \frac{RT_{\infty} \mu Re}{M(g\beta \Delta T)^{1/2} L^{3/2}} \quad (8)$$

需要注意的是，在利用减压法来减弱自然对流效应的同时，高温材料实验炉的其他传热特性应保持不变。由式（2）（4）可得

$$\mathfrak{R} = \frac{pMUL}{RT_{\infty} \mu} \propto pUL \quad (9)$$

由式（9）可知，当存在强制对流时，降低气体压强将导致 Re 数变小，强制对流效应变弱，为了保持 Re 数不变，相应的强制对流速度应从 U_0 增大为

$$U = \frac{U_0}{\gamma_p} \quad (10)$$

成功应用减压法的前提是已知流体的流动特性，当流体动力黏度、流体热膨胀系数以及雷诺数等表征流体流动特性物理量的取值未知，或者获取这些先验知识的难度较大时，将不能够由减压法直接给出地面适配工况的压强值。另一方面，减压法给出的结果依赖于对阿基米德数上界的定义，当上界取值不同时，减压法给出的结果也不同，求解过程具有很大的不确定性。

为此，本文提出了一种基于数据驱动的减压法，将数字孪生技术、人工智能技术赋能空间高温材料实验炉传热特性的研究，在地面对空间微重力环境下高温材料实验炉的传热特性进行近似与模拟，克服了由于流体流动特性等先验知识缺乏导致减压法无法确定地面适配工况压强值的问题。

4 数据驱动的空间环境高温炉传热特性的模拟

4.1 方法框架及流程

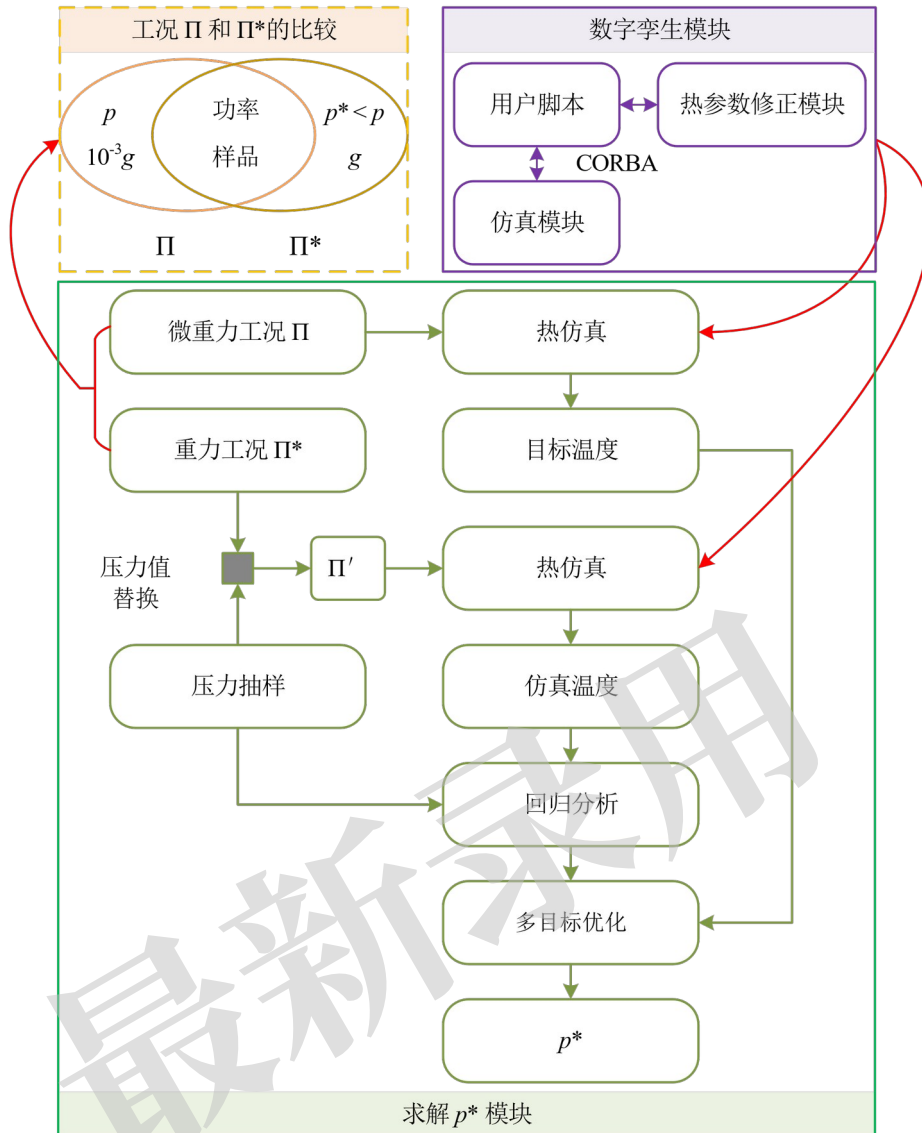


图 4 基于数据驱动的减压法

Figure 4 Data driven decompression method

本文提出的基于数据驱动的空间高温炉传热特性模拟方法如图 4 所示，图中 Π 为微重力工况，这里以 1 atm 下 2 批次 6 工位样品空间实验工况为例， Π^i 为与空间工况 Π 传热特性相似的地面适配工况。利用减压法在地面对空间微重力工况（ Π ）下高温材料实验炉的传热特性进行近似与模拟时，关键是要找到与工况 Π 下高温材料实验炉传热特性相似的地面适配工况 Π^* 所对应的压强值 p^* 。两种工况 Π 与 Π^* 的差异如图 4 左上角虚线框中所示，它们之间的加热功率相同，只在重力因素与压强上存在差异，由于传热特性相似，对于同样的加热功率，两种工况下的炉内温度分布应保持一致。

确定压强 p^* 取值的实验系统主要包含以下两个部分，第一部分为空间高温材料实验炉数字孪生模块，第二部分为基于数据驱动的压强求解模块。空间高

温材料实验炉数字孪生模块又包括热仿真模块、用户脚本程序以及热物性参数修正模块。其中，热仿真模块对炉内的传导、辐射及对流传热效应进行仿真，它与用户脚本程序之间通过 CORBA 协议进行通信，可实现仿真参数设置与仿真结果保存的自动化。热物性参数修正模块在充分挖掘热电偶收集数据价值的基础上，综合利用大数据技术以及人工智能技术，对仿真过程所用到的热物性参数 ω 的取值进行修正，减小了仿真误差，使得仿真结果有了实际工程应用价值，这与文献[17]直接通过测量来获得各热物性参数取值的方法不同，特别适用于先验知识缺乏或不方便开展测量的场景。基于数据驱动的压强求解模块用于求解地面适配工况的压强值 p^* ，其主要由相关的软件及算法组成，可实现拉丁超立方抽样、回归分析以及多目标优化问题的构建与求解等功能。

对于空间高温材料科学实验炉来说，在热物性参数 ω 、加热功率、 g 值已知的前提下，炉内温度与压强的关系可以表示为

$$T_i = \varphi_i(\omega, q_1, q_2, g, p) = \varphi_i(p), i=1, \dots, m \quad (11)$$

上式中， q_1 和 q_2 分别为炉丝1及炉丝2的加热功率， T_i 为炉内第 i 个温度监测点处的温度， p 为炉内气体压强， m 为温度监测点的个数。由图4可知，求解压强 p^* 的关键是要得到地面环境下炉内各温度监测点处温度与压强之间的映射关系 φ_i 。为此，首先可由减压法原理，确定压强 p^* 的取值区间，并利用拉丁超立方抽样方法对其进行采样，共得到 n 个压强样本。将工况 Π^* 的压强值依次替换为上述压强采样值，得到仿真工况 Π' ，开展热仿真实验，最终得到共 n 组炉内温度分布数据。上述借助数字孪生及热仿真技术，得到的温度与压强之间的映射关系可以表示为

$$T_i = \varphi_i'(\omega, q_1, q_2, g, p) = \varphi_i'(p), i=1, \dots, m \quad (12)$$

其中， φ_i' 为映射 φ_i 的近似。随后，将 φ_i' 视为黑箱模型，利用上述得到的温度-压强数据集，开展回归分析，得到地面环境下温度与压强之间的回归模型，如式(13)所示。

$$T_i = \hat{\varphi}_i'(\omega, q_1, q_2, g, p) = \hat{\varphi}_i'(p), i=1, \dots, m \quad (13)$$

由式(11)(12)(13)可知，可用回归模型 $\hat{\varphi}_i'$ 近似地替代映射 φ_i 。由于在实际

工程实践过程中，空间传热特性的模拟以及控制器的设计工作总是先于空间工况数据的获取，此时，空间工况的炉内温度分布数据对传热特性模拟任务是不

可见的，因此，需按工况 Π 配置仿真工况 Π' ，并开展相应的热仿真实验，得到空间工况炉内的温度分布数据，并以该温度分布数据作为各温度监测点处的温度目标值。最后，结合前述回归模型，构建多目标优化问题，其中每一个温度监测点都对应一个目标函数，对该多目标优化问题进行求解，可得地面适配工况 Π^* 的压强值 p^* 。最后，利用得到的 p^* 值进行仿真实验，并将得到的空间炉内温度分布情况与实测值进行比较，以评估所提框架的有效性。

4.2 与空间传热特性相似的地面工况的确定

下面介绍利用本文所提出的基于数据驱动的减压法，得到与该微重力工况下高温材料实验炉传热特性相似的地面适配工况 Π^* 所对应减压比的过程。由减压法原理可知，工况 Π^* 的压强 p^* 必然小于工况 Π 的压强，则 p^* 的取值范围为 $(0, 1\text{atm})$ ，为方便后续采样，且避免采样压强接近真空，造成热仿真结果不准， p^* 的取值区间可进一步缩小为 $[1\text{kPa}, 101\text{kPa}]$ 。随后采用拉丁超立方抽样方法对压强 p^* 进行抽样，抽样过程如下图所示，首先将闭区间 $[1\text{kPa}, 101\text{kPa}]$ 100 等分，随后在每一等分段上进行随机抽样，共产生 100 个样本点，这些样本点相较于直接随机抽样结果更加均匀地分布于取值空间内。

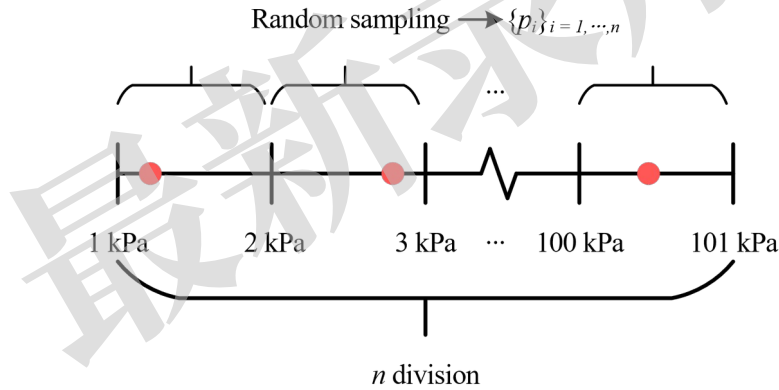


图 5 采用拉丁超立方抽样方法对压强进行采样

Figure 5 Pressure sampling with Latin hypercube sampling method

接下来，借助于数字孪生技术对高温材料实验炉开展热仿真实验。热仿真实验可分为两个阶段：在第一阶段，我们将上述 100 个 p^* 的采样值输入至仿真架构中，得到地面环境下高温材料实验炉内的温度分布数据，图 6 给出了各温度监测点处温度与压强的关系；在仿真的第二阶段，我们将仿真工况设置为微重力工况 Π ，并最终得到工况 Π 所对应的炉内温度分布数据。开展第一阶段仿真的目的是得到地面环境下温度-压强数据集，并据此对温度与压强的关系进行黑箱建模，而第二阶段仿真的目的则是为了得到空间工况下各温度监测点处的温度，并以此作为地面适配工况的温度目标值。在仿真第一和第二阶段，加热功率保持一致，其中，炉丝 1 的加热功率为 $q_1 = 60.97\text{ W}$ ，炉丝 2 的加热功率为

$q_2 = 48.57 \text{ W}$ ，两仿真阶段分别对应重力及微重力工况，在对仿真参数进行设置时，需要特别注意两阶段重力因素的不同。

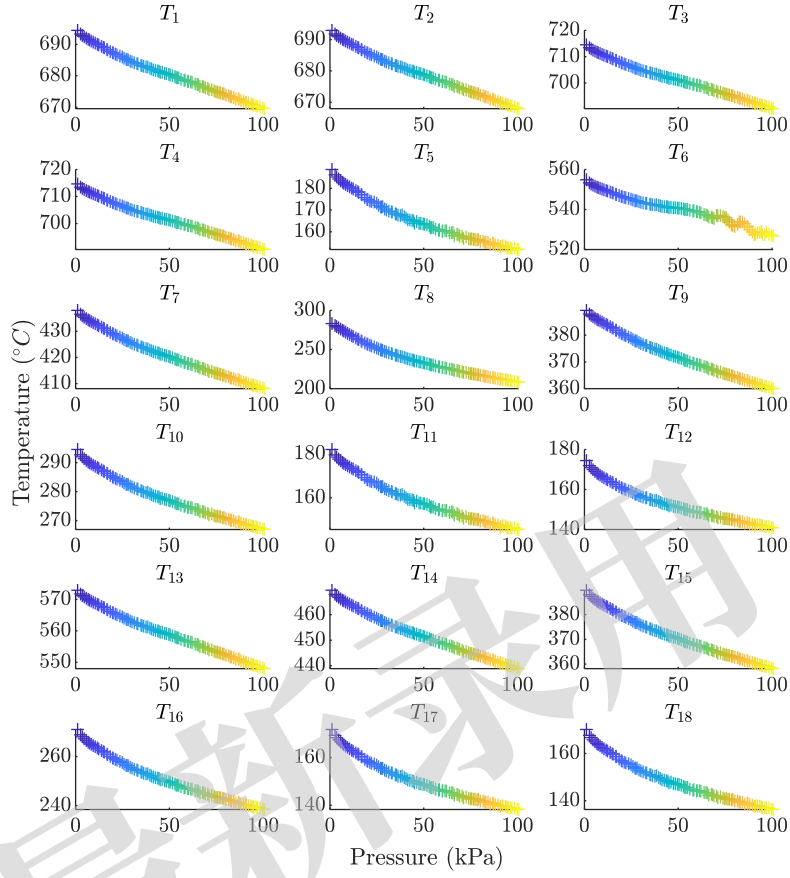


图 6 各温度监测点处压强温度关系散点图

Figure 6 Scatter plot to show relationship between pressure and temperature at each monitoring point

随后，利用第一阶段仿真得到的地面环境温度-压强数据集，在各个温度监测点处，分别对温度与压强之间的关系进行拟合。在回归分析过程中，只有压强这一个自变量，因此可采用一元多项式模型对温度进行拟合，如式（14）所示，其中， T_i 为第*i*个监测点处的温度， $c_{0,i}$ 为常数项， $c_{n,i}$ 为*n*次项系数，*m*为温度监测点的个数。在拟合前，将数据集随机拆分为训练集以及测试集，其中训练集占样本总数的 80%，测试集占样本总数的 20%。接着，对样本进行标准化处理，以消除量纲及单位不同对回归结果的影响。

$$T_i = c_{0,i} + c_{1,i} * p + c_{2,i} * p^2 + \dots + c_{n,i} * p^n + \dots, i = 1, \dots, m \quad (14)$$

需要注意的是，在利用训练集进行模型拟合时，所选择的模型结构复杂程

度应该保持适中，过于复杂或者过于简单的模型都将导致拟合任务的失败。如果最终得到的模型结构过于复杂，此时模型泛化能力变弱，过拟合风险升高，具体表现为模型在训练集上的预测精度很高，而在测试集上的预测精度明显变差。另一方面，如果模型结构过于简单，则模型不能够较好地表征数据的分布特征，模型的预测能力较差，拟合模型也不具备实际应用价值。基于上述考虑，在对炉内温度与压强之间的关系进行拟合时，首先需要确定合适的模型阶次，使得在保证模型预测精度的前提下，尽可能多地降低模型的复杂程度。对于测试集，下图给出了测验分数与模型阶次之间的关系，从图中可以看出，在各温度监测点处，当模型阶次较小时，测验分数的取值随着模型阶次的增加而增加，当模型阶次为 3 时，测验分数取得最大值，此后随着模型阶次的继续增大，测验分数基本保持不变。因此，当回归模型的阶次取值为 3 时，所得到的回归模型的性能最优。

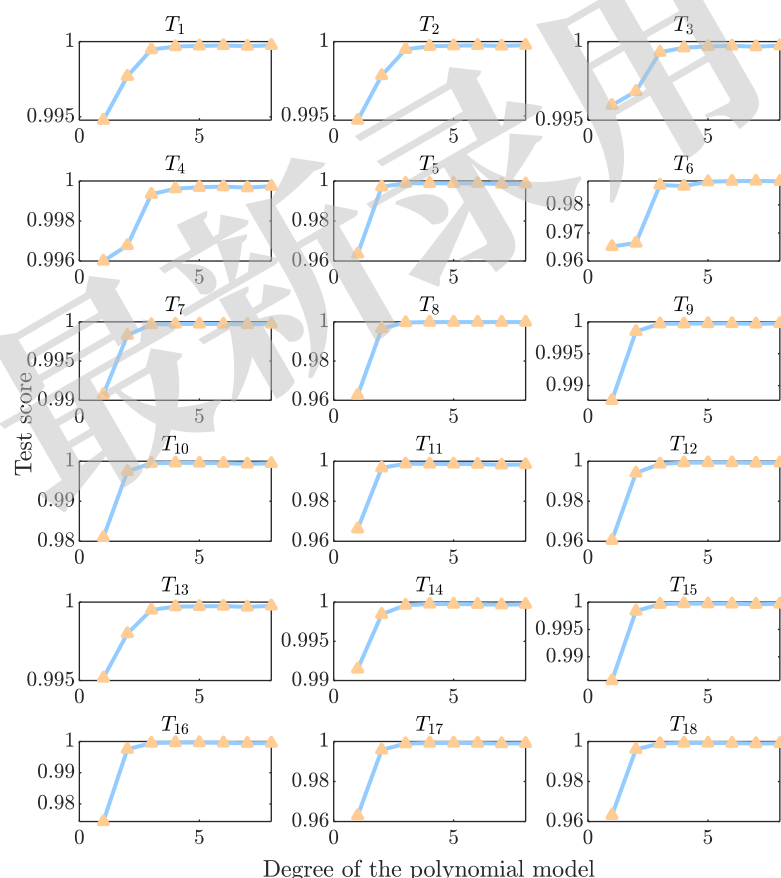


图 7 测验分数与回归模型阶次之间的关系

Figure 7 Relationship between test score and model degree

为了评估回归模型的拟合精度，我们分别把训练集和测试集压强数据代入回归模型中，得到炉内各监测点处的温度预测值，将温度预测值减去温度目标

值可得相应的温度预测误差。在数据集上，回归模型的预测误差如图 8 和图 9 所示。由图 8 可知，对于训练集中的绝大多数样本，回归模型的预测误差都在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，模型预测效果较好，不存在欠拟合的情况。由图 9 可以看出，回归模型在测试集与训练集上的拟合精度接近，拟合过程中过拟合的风险低。

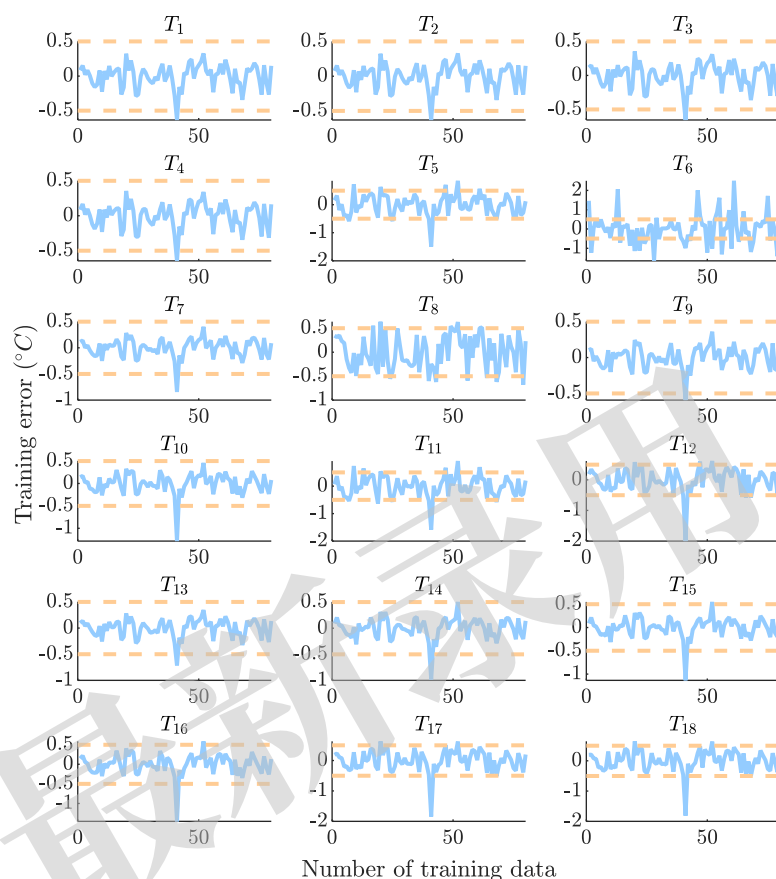


图 8 训练集上的温度预测误差

Figure 8 Temperature prediction error on training set

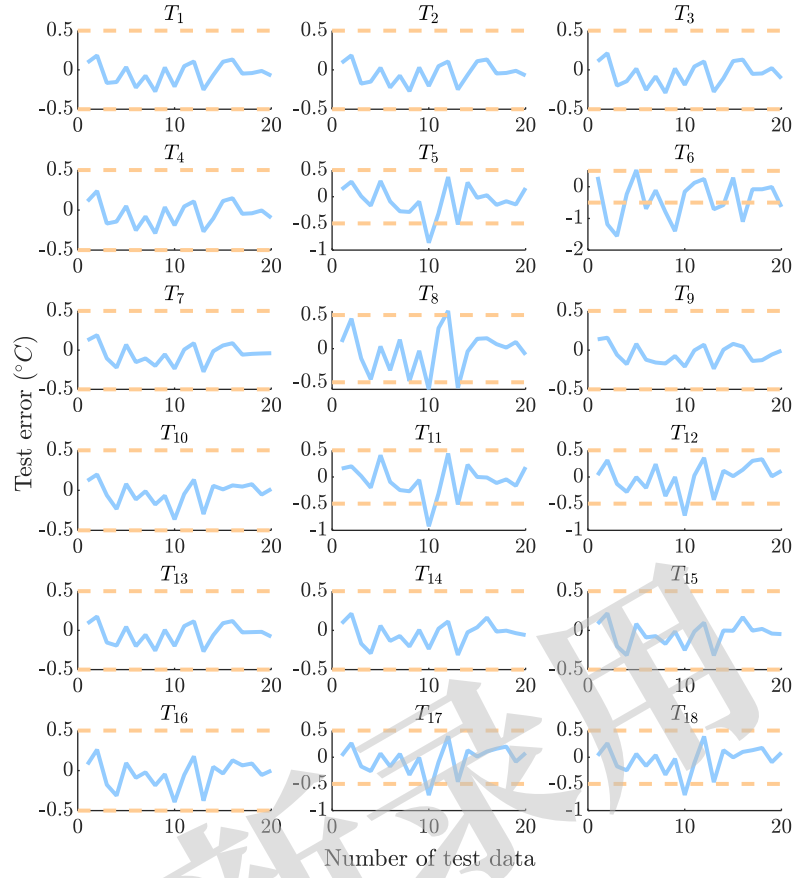


图9 测试集上的温度预测误差

Figure 9 Temperature prediction error on test set

至此，我们建立了地面环境下各监测点处温度与压强之间的回归模型，为了得到与微重力环境下高温材料实验炉传热特性相似的地面匹配工况所对应的压强值，可以结合温度目标值，进一步构造如下多目标优化问题

$$\begin{aligned}
 & \min_{\gamma_p} \begin{aligned} & L_1(T_{1,t}, T_{1,s}) \\ & L_2(T_{2,t}, T_{2,s}) \\ & \vdots \\ & L_m(T_{m,t}, T_{m,s}) \end{aligned} \\
 & \begin{aligned} & T_{1,s} = \hat{\phi}'_1(\gamma_p) \\ & T_{2,s} = \hat{\phi}'_2(\gamma_p) \\ & \vdots \\ & T_{m,s} = \hat{\phi}'_m(\gamma_p) \end{aligned} \\
 & \text{s.t.} \quad \begin{aligned} & 0 < \gamma_p < 1 \end{aligned} \\
 & (15)
 \end{aligned}$$

上式中， m 为炉内温度监测点的个数，也即优化问题中目标的个数， $T_{i,t}$ 为第 i

个温度目标值， $\hat{\phi}_i$ 为地面环境下第*i*个监测点处温度与压强之间的回归模型， $T_{i,s}$

为对应的模型输出， γ_p 为减压比， L_i 为第*i*个目标函数。

在求解上述多目标优化问题时，常见的方法有经典搜索和优化算法以及进化算法。进化算法相较于传统优化算法具有以下优点：进化算法具有天然的并行性，并行性是进化算法的本质属性，其表现为种群内个体的适应度可以并行地给出等方面；进化算法鲁棒性强，算法可定制化程度高，可以方便地与其他优化算法进行整合；进化算法可给出多样化的搜索结果，并可结合实际情形从这些备选方案中进行选择。基于进化算法的上述优点，我们利用它来求解上式中的优化问题。

空间高温材料实验炉内共有 18 个温度监测点，即对式（15），有 $m = 18$ ，优化目标的个数超过了 15，属于超多目标优化问题。利用进化算法求解多目标优化问题时，随着目标个数的增多，解集中非支配解的数目大大增加，搜索及寻优的效率降低，极大增加了优化问题的求解难度。为此，本文采用聚合策略对目标进行简约，将相似的目标聚合为一类，只保留聚类中心处的目标，并删除聚类中所包含的其他目标。在确定聚类中心处的目标时，采用加权聚合的方法，使用线性加权模型将聚类中的多个目标聚合为一个目标。

$$\begin{aligned} \min_{\gamma_p} \quad & \sum_{i=1}^m w_i |\phi_i(\gamma_p) - T_{i,t}| \\ \text{s.t.} \quad & \sum w_i = 1 \\ & (16) \end{aligned}$$

由式（16）可知，权重 w_i 越大则意味着在监测点 B_i 处构造的损失函数占聚合函数的比重越高，如果权重为零，则不需考虑该监测点处温度响应与目标温度之间差异的影响，而如果权重为 1，则其他监测点处的权重为 0，此时仅需考虑该监测点处温度响应与目标温度之间差异的影响。由于权重的和为 1，如果某个温度监测点处的温度差异表现更为关键，则需要将较大的权重赋予相应的损失函数，表 1 给出了目标权重的取值。

表 1 目标函数权重取值

Table 1 Weight value of the objective function

权重	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	w_8	w_9
值	1/8	1/8	1/8	1/8	1/28	1/28	1/28	1/28	1/28
权重	w_{10}	w_{11}	w_{12}	w_{13}	w_{14}	w_{15}	w_{16}	w_{17}	w_{18}
值	1/28	1/28	1/28	1/28	1/28	1/28	1/28	1/28	1/28

随后，采用基于精英保留策略的遗传算法对式（13）中的优化问题进行求解，GA 超参数及其取值如表 2 所示，最终求得地面适配工况的压强值 $p^* = 4.466$ kPa。本文提出的数字孪生技术+数据驱动的减压法用于在地面对微重力环

境下高温炉的传热特性进行模拟，得到地面适配工况的压强值，在此适配工况整定的控制参数可直接应用于空间过程控制，该方法具有操作方便、实现成本低等特点，特别适用于流体流动特性等先验知识缺乏的场景，如表 3 所示，相较于其他三种方法，该方法具有明显优势。

表 2 GA 超参数及取值

Table 2 GA hyperparameters and their values

参数名称	取值
种群大小	500
最大迭代次数	100
变异概率	0.05
交叉概率	0.9

表 3 微重力环境高温炉热特性地面模拟方法比较

Table 3 Comparison of different ground simulation methods for the furnace heat transfer characteristics in microgravity environment

	缩尺法	减压法	实验法 + 数据驱动减压法	数字孪生技术 + 数据驱动的减压法
优点	从高温炉机理出发且有严格的理论支撑。	从机理出发，有严格的理论支撑；与缩尺法相比，易于操作与实现。	所求减压比结果准确且不需要了解额外的先验知识。	操作方便、实现成本低且不需额外的先验知识。
缺点	需要改变高温炉几何尺寸，不适用于复杂研究对象。	需了解流体流动特性等先验知识。	实验法成本较高、可行性及可操作性较差。	需要根据实验数据对仿真进行修正等额外操作。

将 p^i 的值代入仿真软件，设置 $g=-9.8\text{ m/s}$ ，仿真得到微重力环境下高温材料实验炉温场分布情况，与文献[17]不同，本文将仿真温度直接与天宫 2 空间实测数据进行对比，结果如图 10 所示。在温度监测点 B_7 、 B_9 、 B_{15} 以及 B_{18} 处，仿真温度与实测温度差的绝对值 $|\Delta T|>50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此时我们认为仿真温度与实测温度的重复性较差，如图中红色点所示。而在温度监测点 B_1 B_5 、 B_{10} B_{14} 以及 B_{17} 处，仿真温度与实测温度差的绝对值 $|\Delta T|<30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此时我们认为仿真温度与实测温度的重复性较好，如图中绿色点所示。对于控温偶温度 T_1 T_4 ，温度误差约为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

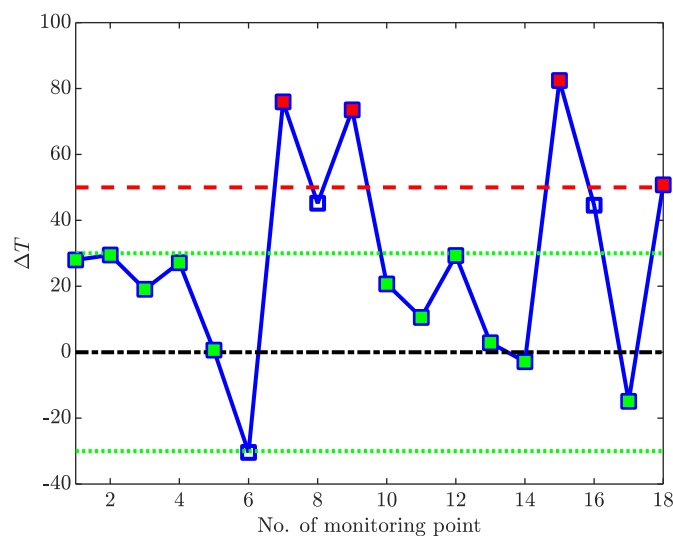


图 10 温度误差结果

Figure 10 Results of temperature error

5 结束语

本文提出了一种基于数字孪生技术+数据驱动的减压法，用于对微重力环境下高温材料实验炉的传热特性进行模拟与近似，并给出了地面适配工况所对应的压强值。首先，从无量纲数的物理含义出发，阐述了减压法的基本原理，为之后基于数据驱动的方法提供了理论基础。随后，研究了压强取值的不同对高温材料实验炉内温度分布的影响，在各监测点处，给出了压强与温度响应之间的拟合关系，结合温度目标值，完成了优化问题的构建，并求解得到了相应的压强值。与其他同类方法相比，本文所提方法具有操作方便、实现成本低等特点，特别适用于流体流动特性等先验知识缺乏的场景。该项研究为我国空间站上的高温材料科学实验炉高稳定度温度控制提供了一个新的思路和方法。

参考文献

- 1 Ostrogorsky A G, Marin C, Churilov A, et al. Reproducible Te-doped InSb experiments in microgravity science glovebox at the International Space Station[J]. Journal of crystal growth, 2008, 310(2): 364-371.
- 2 Barmin I, Bryukhanov N, Egorov A, et al. Using the progress transport spacecraft in structure of the international space station for realization of scientific experiments under microgravity conditions[J]. Acta Astronautica, 2002, 51(1-9): 255-259.
- 3 Stenzel C, Dold P, Benz K W. Magnetic damping array implemented into a space-compatible multizone furnace for semiconductor crystal growth[J]. Review of

- scientific instruments, 1996, 67(5): 1985-1988.
- 4 Yin Z, Zhang X, Pan X. Crystal growth from melts: materials science program in the SJ-10--recoverable scientific experiment satellite[J]. Wuli, 2016, 45(4): 213-218.
 - 5 Madras G, McCoy B J. Temperature effects for crystal growth: a distribution kinetics approach[J]. acta materialia, 2003, 51(7): 2031-2040.
 - 6 Rozmanov D, Kusalik P G. Temperature dependence of crystal growth of hexagonal ice (Ih)[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2011, 13(34): 15501-15511.
 - 7 Ashkenazy Y, Averbach R S. Atomic mechanisms controlling crystallization behaviour in metals at deep undercoolings[J]. EPL (Europhysics Letters), 2007, 79(2): 26005.
 - 8 Ashkenazy Y, Averbach R S. Kinetic stages in the crystallization of deeply undercooled body-centered-cubic and face-centered-cubic metals[J]. Acta Materialia, 2010, 58(2): 524-530.
 - 9 ZHANG Zhe, YU Bin, LI Tianbao, et al. Effect on Growth Temperature and Ammonia Flow on the Crystal Structure and Morphology of InN Synthesized by HCVD[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2020, 51(6):5 (张哲, 于斌, 李天保, 等. HCVD 方法中生长温度和氨气流量对 InN 晶体结构和形貌的影响[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(6):5)
 - 10 LIU Yan, PENG Yan, GUO Jingwei, et al. Effect of growth temperature on the morphology and crystal structure of InAs/GaAs radial heterostructure nanowires[J]. *Acta Materiae Compositae Sinic*, 2019, 36(10):8 (刘妍, 彭艳, 郭经纬, 等. 生长温度对 InAs/GaAs 横向异质结构纳米线形貌及晶体结构的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10):8)
 - 11 ZHENG Daoping. Temperature Field Design of Single Crystal Growth Furnace by Plasma Torch Melting\,[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2020 (郑道平. 等离子炬焰熔法单晶生长炉温场设计研究[D]. 沈阳工程学院, 2020)
 - 12 YAO Yong, YANG Binwei, KOU Zili. Influence of Temperature Stability on Fine-grained Diamond Synthesized by Belt-type Apparatus[J]. *Diamond and Abrasives Engineering*, 2006 (1): 43-46 (姚勇, 杨宾维, 寇自力. 生长温度稳定性对两面顶细粒度金刚石性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006 (1): 43-46)
 - 13 Azami T, Nakamura S, Eguchi M, et al. The role of surface-tension-driven flow in

- the formation of a surface pattern on a Czochralski silicon melt[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, 233(1-2): 99-107.
- 14 GUO Yongwen. Study on Growth and Properties of Large Size Nd, Ce: YAG and Mid Infrared Er: YAG Laser Crystals\,[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022 (郭勇文. 大尺寸 Nd,Ce:YAG 和中红外 Er:YAG 激光晶体的生长及性能研究[D]. 广东工业大学, 2022)
 - 15 XIA Jingjing, ZHANG Chao, WANG Xian. High-performance Numerical Study on Mixed Convection and Heat Transfer in Spacecraft Cabin Under Microgravity[J]. *Thermal power generation*, 2019, 48(8): 27-35 (夏京京, 张超, 王娴. 微重力下航天器舱内混合对流传热高性能数值研究[J]. *热力发电*, 2019, 48(8): 27-35)
 - 16 MA Lanxin, TAN Jianyu. Numerical Simulation of a Spacecraft Pressurized Cabin Using Lowering Pressure Method[J]. *Energy conservation technology*, 2013, 31(6): 487-490 (马兰新, 谭建宇. 航天器密封舱降压法抑制自然对流的数值研究[J]. *节能技术*, 2013, 31(6): 487-490)
 - 17 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 (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 (4): 464-468)
 - 18 Karaca Y, Baleanu D, Zhang Y D, et al. Multi-Chaos, Fractal and Multi-Fractional Artificial Intelligence of Different Complex Systems[M]. Elsevier, 2022.
 - 19 Fath B. Encyclopedia of ecology (Second Edition) [M]. Elsevier, 2018, Pages 546-552.
 - 20 Aström K J, Albertos P, Blanke M, et al. Control of complex systems[M]. Springer Science & Business Media, 2011.
 - 21 Svítek M. Information Physics[M]. Academic Press, 2021, Pages 87-98.
 - 22 Baker C, Johnson T, Flynn D, et al. Train aerodynamics: fundamentals and applications[M]. Butterworth-Heinemann, 2019.
 - 23 Mahony J J. Heat transfer at small Grashof numbers[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1957, 238(1214): 412-423.
 - 24 Abdelsalam A, Cem S, Eduardo P. New dimensionless number for gas–liquid flow in pipes[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, 81: 15-19.