

基于ABAQUS的工业反应炉温度场仿真

王广福^{1,2}, 刘嘉骐^{1,3}, 盛选禹^{1,3*}

¹季华实验室, 广东 佛山

²中国煤炭科学研究院矿山人工智能研究所, 北京

³清华大学机械工程系, 北京

收稿日期: 2025年12月7日; 录用日期: 2025年12月30日; 发布日期: 2026年1月7日

摘要

在高温化学反应过程中, 反应炉内部温度的精确控制是决定产物质量与工艺效率的关键因素。传统反应炉设计在多区温度控制方面存在均匀性不足、响应滞后等问题, 亟需通过仿真手段进行优化。本文针对某型反应炉, 基于ABAQUS有限元平台开展稳态温度场仿真分析, 重点研究其在多工况下的温度分布特性与PID控制策略的有效性。仿真结果表明, 该反应炉能够将各工作区温度稳定控制在设定区间内, 但部分区域由于存在加热器间的热耦合, 出现过热和温度不足的问题, 控制策略和结构设计需要进一步的改进。本文通过对某型反应炉进行仿真, 并根据仿真结果提出改进意见, 旨在为同类反应炉的热设计与控制优化提供理论依据。

关键词

温度场, 有限元仿真, 反应炉, 温度控制

Temperature Field Simulation of a Reaction Furnace Using ABAQUS

Guangfu Wang^{1,2}, Jiaqi Liu^{1,3}, Xuanyu Sheng^{1,3*}

¹Ji Hua Laboratory, Foshan Guangdong

²Research Institute of Mine Artificial Intelligence, Chinese Institute of Coal Science, Beijing

³Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing

Received: December 7, 2025; accepted: December 30, 2025; published: January 7, 2026

Abstract

In high-temperature chemical reaction processes, precise control of the internal temperature within the reactor is a critical factor determining product quality and process efficiency. Traditional

*通讯作者。

文章引用: 王广福, 刘嘉骐, 盛选禹. 基于 ABAQUS 的工业反应炉温度场仿真[J]. 建模与仿真, 2026, 15(1): 173-182.
DOI: 10.12677/mos.2026.151016

reactor designs suffer from issues such as insufficient uniformity and response lag in multi-zone temperature control, necessitating optimization through simulation. This paper focuses on a specific reactor model, conducting steady-state temperature field simulation analysis using the ABAQUS finite element platform. The study emphasizes investigating its temperature distribution characteristics under multiple operating conditions and the effectiveness of PID control strategies. Simulation results indicate that the modified structure can stably maintain temperatures within the set range across all working zones. However, thermal coupling between heaters in certain areas leads to overheating and insufficient temperature issues, necessitating further refinement of both control strategies and structural design. By simulating this specific reactor model and proposing improvements based on simulation outcomes, this study aims to provide a theoretical basis for thermal design and control optimization in similar reactors.

Keywords

Temperature Field, Finite Element Simulation, Reaction Furnaces, Temperature Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

高温工业反应炉是一种用于在极端高温条件下进行材料处理和化学反应的专用设备，其种类繁多，如回转窑(用于水泥生产、冶金等)、高温炉(用于材料烧结、热处理、退火等)和高温氢气还原炉(用于金属提炼和粉末冶金)等。这类设备广泛应用于包括冶金、化工、陶瓷、玻璃、电子、废物处理等多个工业和科研领域，以实现特定的物理变化或化学反应。

高温工业反应炉内部温度场的均匀性与稳定性直接影响反应效率与产品质量。对于精密高温化学反应，要求的温度控制非常精确，才能获得希望的化学产品。尤其在多温区控制的反应炉中，各区域需维持不同的目标温度并满足严格的公差要求，这对热设计与控制策略提出了较高挑战[1]。

随着现代工业对温控精度与能效要求的不断提高，对反应炉温度场进行精确仿真与优化设计显得尤为重要。通过有限元分析的方法，可以在设计阶段预测炉体在不同工况下的温度分布，为结构优化、控制策略、硬件选型等提供理论依据。

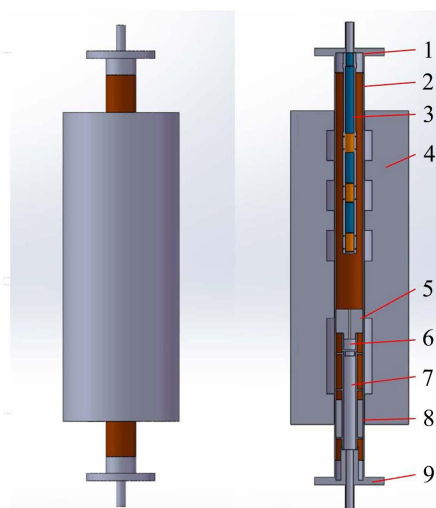
目前，针对高温反应炉的热仿真与控制优化已有较多研究。例如，V. Bharath Kumar 等[2]通过 MATLAB/Simulink 软件开发了一种基于模糊逻辑的控制器，能实时修正运行中扰动，具有较好的动态性能、快速响应及优异鲁棒性；Grazia Leonzio 等[3]则针对传统壳管式甲醇合成反应器存在的问题提出双区壳管式反应器设计，并通过分区调控冷却剂温度实现非等温操作，提高碳转化率，减小冷却剂流量。此外，张亚超等[4]针对工业炉温控系统中存在的大惯性与非线性问题，提出了一种将神经网络算法与传统 PID 控制相结合的单神经元 PID 控制器。然而，现有研究在针对特定工艺场景下的反应炉结构改进与多目标温控协同优化方面仍显不足。

ABAQUS 是一个大型商业有限元软件，可以对结构进行温度场分析，也可以进行结构和热的耦合分析，其最擅长的是非线性分析。该软件的功能足以完成反应炉的热分析工作[5] [6]。

本文以某工业用反应炉为研究对象，通过 ABAQUS 软件构建其有限元模型，开展稳态温度场仿真，评估不同加热功率与控制工况下的温控效果，并与实际工艺要求进行对比。本研究旨在为该反应炉的结构设计与控制策略提供数据支持与优化方向，具有一定的工程应用价值。

2. 模型简化

反应炉系统包含炉体、外部冷却设备、机箱和支架等，如图 1 所示。为节约计算资源，减少处理时间，按照反应炉工作的原理，以保留炉体及附加冷却部件功能和相关属性为前提，将不必要的部件去除，并合并材料属性相同的相邻零件，简化为图 1 所示的仿真模型。在保温层中由下到上分出一大一小共四块区域用于安装热电偶，实现对炉内温度的控制。后续仿真中也在这四个区域内壁设置温度或热流量的边界调节，模拟真实工况。



1. Water-cooled flange, 2. Heat pipe, 3. Trap, 4. Sintered ceramic insulation layer, 5. Plug, 6. Reaction crucible, 7. Support, 8. Lower insulation layer, 9. Water-cooled flange
1. 上水冷法兰, 2. 热管, 3. 捕集器, 4. 烧结陶瓷保温层, 5. 堵头, 6. 反应坩埚, 7. 支承件, 8. 下保温层, 9. 下水冷法兰

Figure 1. Simplified simulation model of the reactor system and its full cross-sectional view
图 1. 反应炉系统简化仿真模型及其全剖视图

3. 网格划分

简化模型具有九个零件，在 ABAQUS 中对简化模型各零件分别进行网格划分。由于仿真仅关心固体稳态传热，使用默认算法的四面体网格即可，单元类型为 DC3D4 (四节点线性传热四面体单元)，在 ABAQUS 中的 Standard 单元库中选择热传递即可。

各零件视体积大小和复杂程度设置 4~6 mm 的全局网格尺寸，其中热管和烧结陶瓷保温层由于体积大、表面结构简单，设置 10 mm 的全局网格尺寸，但为了防止配合面网格质量与其他零件相差过大，在全局种子的曲率控制处调节最大偏移因子为 0.01，使其在每个圆上能生成 79 个以上的单元。本计算主要关心炉体高度方向的传热情况，所以对于各零件水平方向的薄壁结构网格数量要求不高，统一使用为边布种功能，设置厚度方向单元个数为 2 个，并在薄壁件轴向方向按照 3 mm 尺寸沿边布种细化网格，避免薄壁单元水平和竖直方向的尺寸差距过大。网格划分结果如图 2 所示。各零件的节点数和单元数如下：

a. 上水冷法兰：结点数：24,532，单元数：116,572；b. 捕集器：结点数：25,114，单元数：114,915；c. 下保温层：结点总数：3894，单元数：17,760；d. 支承件：结点数：11,533，单元数：43,917；e. 下水冷法兰：结点数：27,747，单元数：133,722；f. 热管：结点数：26,164，单元数：102,064；g. 坩埚：结点数：2763，单元数：11,061；h. 烧结陶瓷保温层：结点数：158,059，单元数：870,507；i. 管堵：结点数：7224，单元数：37,095；总装：结点总数：287,030，单元总数：1,447,613。

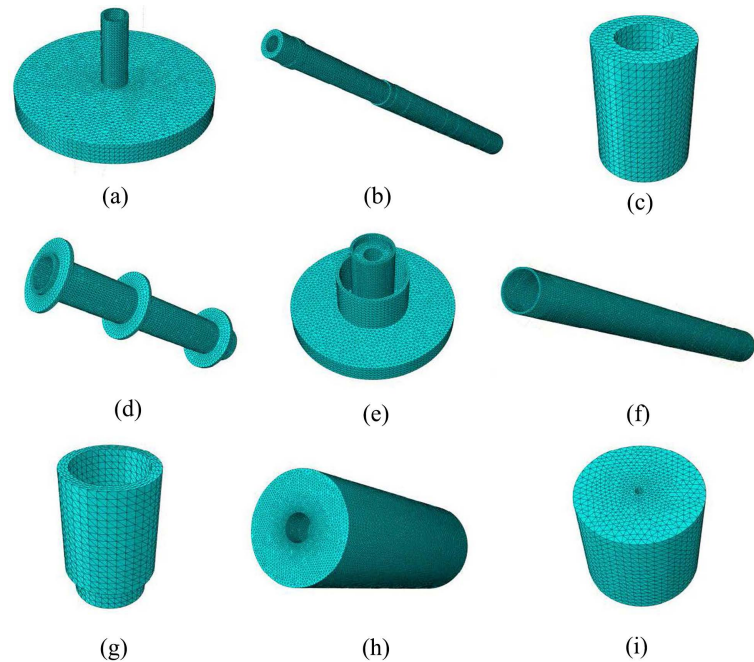


Figure 2. Meshing results of each part. (a) Upper water-cooled flange, (b) Trap, (c) Lower insulation layer, (d) Support, (e) Lower water-cooled flange, (f) Heat pipe, (g) Crucible, (h) Sintered ceramic insulation layer, (i) Pipe blockage

图 2. 各零件网格划分结果。(a) 上水冷法兰, (b) 捕集器, (c) 下保温层, (d) 支承件, (e) 下水冷法兰, (f) 热管, (g) 坩埚, (h) 烧结陶瓷保温层, (i) 管堵

4. 材料属性

对于本次稳态固体传热的仿真, 设置的材料属性包括热传导率、密度、杨氏模量、泊松比、线膨胀系数、比热。根据给定的工程要求, 仿真涉及的材料包括 304 不锈钢、310S 不锈钢、刚玉、三氧化二铝发泡材质、微孔刚玉烧结材质、烧结陶瓷保温层。查询企业供货信息、国家标准和相关文献[7]-[10], 取各材料属性值如表 1 所示, 部分材料属性使用与温度相关数据。

Table 1. Simulation material properties

表 1. 仿真材料属性

| 材料 | 热传导率 mW/mm·°C | 密度 t/mm ³ | 杨氏模量 MPa | 泊松比 | 线膨胀系数 1/°C | 比热 N·mm/(t·K) |
|----------|-------------------------|-------------------------|----------|------|---|------------------|
| 304 | 15.0@20°C 18.0@500°C | 7.93e-9 | 2e5 | 0.3 | 1.6e-5@100°C 1.70e-5@300°C 1.80e-5@500°C | 5e8 |
| 310S | 14@20°C 17.5@500°C | 7.98e-9 | 1.95e5 | 0.28 | 1.58e-5@100°C 1.65e-5@300°C 1.73e-5@500°C | 4.5e8 |
| 刚玉 | 30 | 3.9e-9 | 2e5 | 0.25 | 7.8e-6 | 8e8 |
| 发泡三氧化二铝 | 5 | 3e-10 | 5e4 | 0.2 | 8e-6 | 9e8 |
| 微孔刚玉烧结材质 | 0.4@300°C 0.8@1000°C | 3.5e-9 | 8e4 | 0.2 | 7e-6 | 7.6e8 |
| 烧结陶瓷保温层 | 0.1 | 3.5e-9 | 5e4 | 0.24 | 7.7e-6 | 7.8e8 |

ABAQUS 软件没有内置的单位系统, 需要用户自行统一单位后直接输入对应的数值, 本案例使用 mm-t 为单位进行建模, 使用 mm-t 制单位, 表格中数据均为已转换为 mm 制单位的数值。

5. 边界条件设置

对于高温炉体的温度场分析, 需要考虑热辐射的作用。在 ABAQUS 的模型中编辑模型属性, 设置绝对零度为-273.15, 给定斯特藩 - 玻尔兹曼常数(Stefan-Boltzmann constant)常数为 5.67e-11 (mm-t 制单位)。

斯特藩 - 玻尔兹曼常数, 一个用希腊字母 σ 标记的物理常量, 用于斯特藩 - 玻尔兹曼定律: $j^* = \sigma T^4$ 。

此定律说明一个黑体表面单位面积在单位时间内辐射出的总能量(称为物体的辐射度或能量通量密度) j^* 与黑体本身的热力学温度 T_k 的四次方成正比, 其中的比例系数 σ 就是此常数。

σ 的值为 $5.670\ 367(13) \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ [11]。本值既能被推导, 亦能被实验测定; 见斯特藩 - 玻尔兹曼定律。

σ 的定义能以玻尔兹曼常数 k_B 表示:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} = \frac{\pi^2 k_B^4}{60h^3 c^2} = 5.670367(13) \times 10^{-8} \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$$

其中 h 为普朗克常数, $h = h/2\pi$, 为约化普朗克常数, c 是真空中光速。

分析步设置为默认的稳态热传递, 并设置输出节点温度。在相互作用模块中创建水冷对流、空气对流和接触传热的相互作用属性。水冷法兰位于炉体上下两端, 并且覆盖一部分刚玉热管, 因此需要对热管做分割处理, 根据接触材质的不同热管需要分成水冷段、空气接触段、炉内段和加热段(图 3), 以便分别施加边界条件。水冷部件覆盖的区域, 包括水冷法兰和刚玉水冷段设置表面热交换条件, 使用毫米制单位, 散热系数设置为 1, 环境温度为 35°C (即冷却液温度为 35°C)。暴露在空气中的部分, 包括保温层的外表面、刚玉热管的空气接触段设置表面热交换条件, 假定空气无强制对流, 散热系数为 0.01, 环境温度 20°C 。另外, 外露部分尤其是高温的炉体保温层外壁需要设置表面辐射, 辐射类型为“到环境”, 发射率根据材料特性设置为 0.78, 环境温度 20°C 。

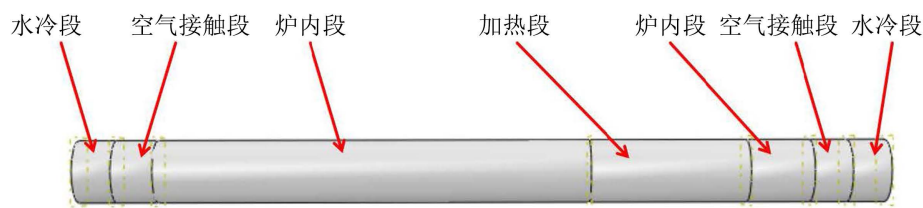


Figure 3. Heat pipe partition

图 3. 热管分区

对于接触传热首先需要在相互作用管理器中创建各接触表面的接触属性, 并在相互作用属性管理器中创建默认的切向和法向接触行为, 此外还需要设置不同零部件之间的接触传热系数。基于 Mikic (1974) 和 Yovanovich (1982) 发展的联合粗糙表面塑性接触模型[12] [13], 其接触传热系数 h_c 可表示为:

$$h_c = 1.25k_s \frac{m}{\sigma} \left(\frac{P}{H_c} \right)^{0.95} + \frac{k_g}{Y}$$

其中 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, σ_1 和 σ_2 分别是两种接触表面的均方根粗糙度; $m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2}$, m_1 和 m_2 是表面轮廓的平均斜率; P 是施加在接触面上的表观压力; H_c 为较软材料的显微硬度; $k_s = \frac{2k_1 k_2}{k_1 + k_2}$ 为两种材料的联

合热导率，其中 k_1 、 k_2 为两种材料本体热导率， k_g 为界面流体的热导率； Y 为截面平均气隙厚度。
根据以上公式，结合各部件实际安装方式设置不同材质的传热系数如表 2 所示。

Table 2. Contact heat transfer coefficients in simulation
表 2. 仿真涉及的接触传热系数

| 接触材料 | 刚玉-304 | 刚玉 - 烧结陶瓷保温层 | 刚玉 - 发泡三氧化二铝 | 刚玉 - 微孔刚玉烧结材料 | 304-310S | 刚玉 - 刚玉 |
|--------|--------|--------------|--------------|---------------|----------|---------|
| 接触传热系数 | 1 | 0.3 | 0.6 | 0.5 | 2 | 2 |

根据工程场景需要，在炉内加热区设置温度的边界条件，大小为 1650°C ，用于模拟工程场景下对坍塌部位的加热，其他调节温度所用的电热丝默认不开启，因此不需要设置温度条件。为整体在初始分析步中设置预定义场条件，温度 20°C 用于模拟环境温度。

反应炉在上半部分的保温层中布置了三处加热区域(图 4)，每个区域使用 1 kW 功率的电加热器进行加热，采用 PID 方法控制不同区域的温度以满足捕集器需要的凝结温度。为了验证加热器功率是否满足需求，可以在载荷模块中对三个区域施加表面热流以模拟加热器加热工况。本案例对于加热器全开、1、2 号加热器打开以及仅 1 号加热器打开的工况做了仿真，设置表面热流为 1 kW 以模拟加热器满功率的工况，如果在这三个工况下三处捕集器附近的温度超过实际需要的温度，即可说明在 PID 控制下的加热器可以使得各点温度稳定在需要的值。

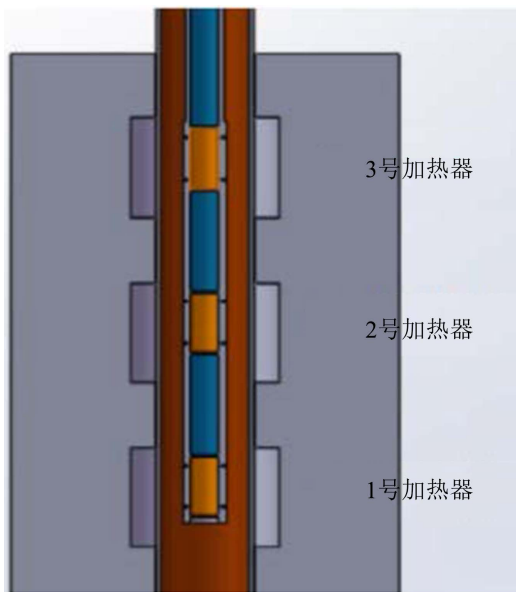
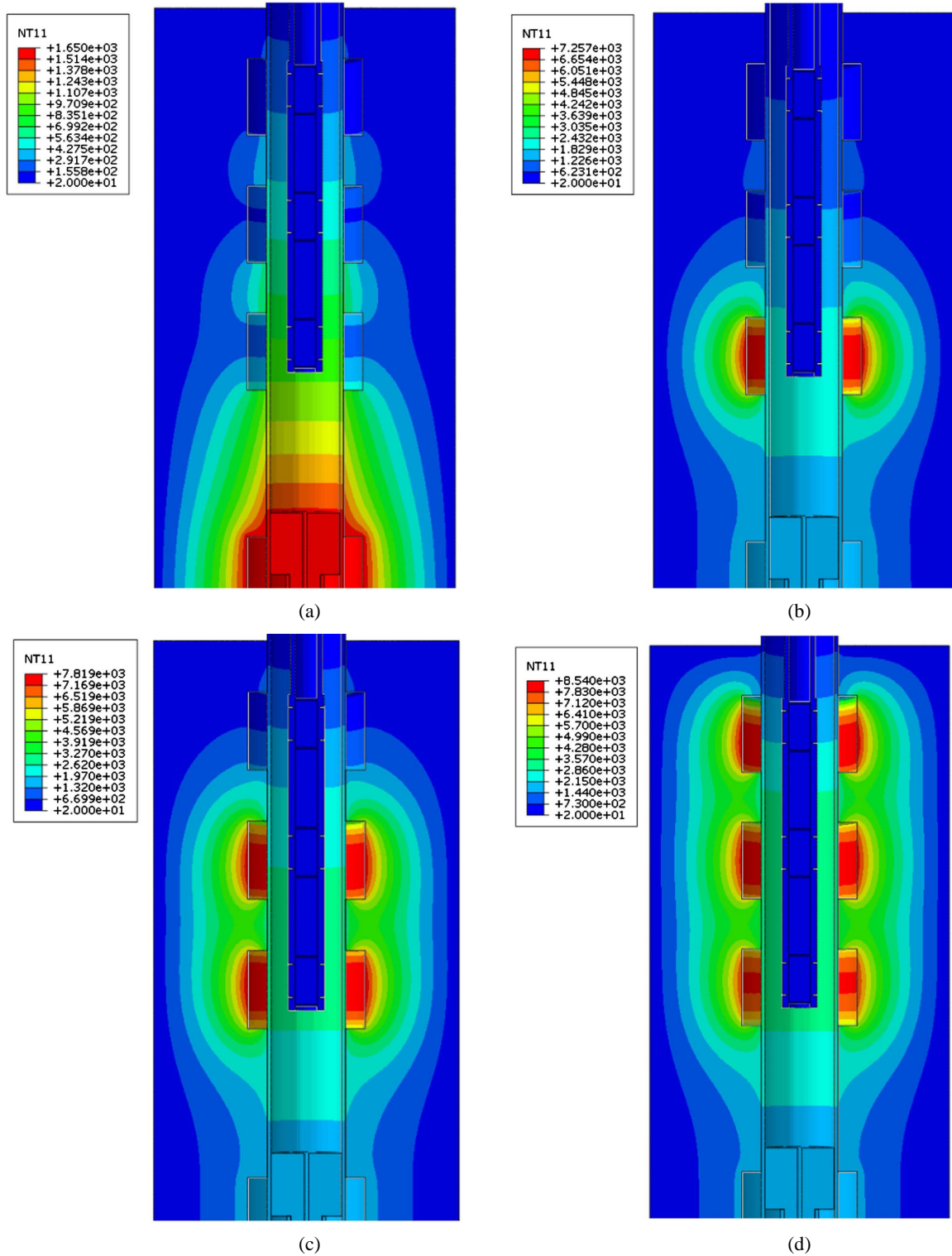


Figure 4. Schematic diagram of the layout of the reactor heater
图 4. 反应炉加热器布置示意图

另外，由于实际工程场景中通过控制加热器功率控制 1、2、3 号加热器附近的温度为 1000°C 、 800°C 和 600°C 以满足反应炉的需求，所以还需要针对 1、2 号加热器开启温度控制的工况进行仿真，用于验证在实施温度控制时相邻的捕集器工作区间是否会发生过热的情况。最后对反应炉所有加热器都正常工作的工况进行仿真，用于观察炉体结构是否具有优化的可能。

6. 仿真结果与结论

提交仿真分析后,得到的结果如图5所示。使用查询工具查看a、e、f三组结果中捕集器工作区间两端的结点温度,可以得到对应工作间的温度范围,结果如表3所示。



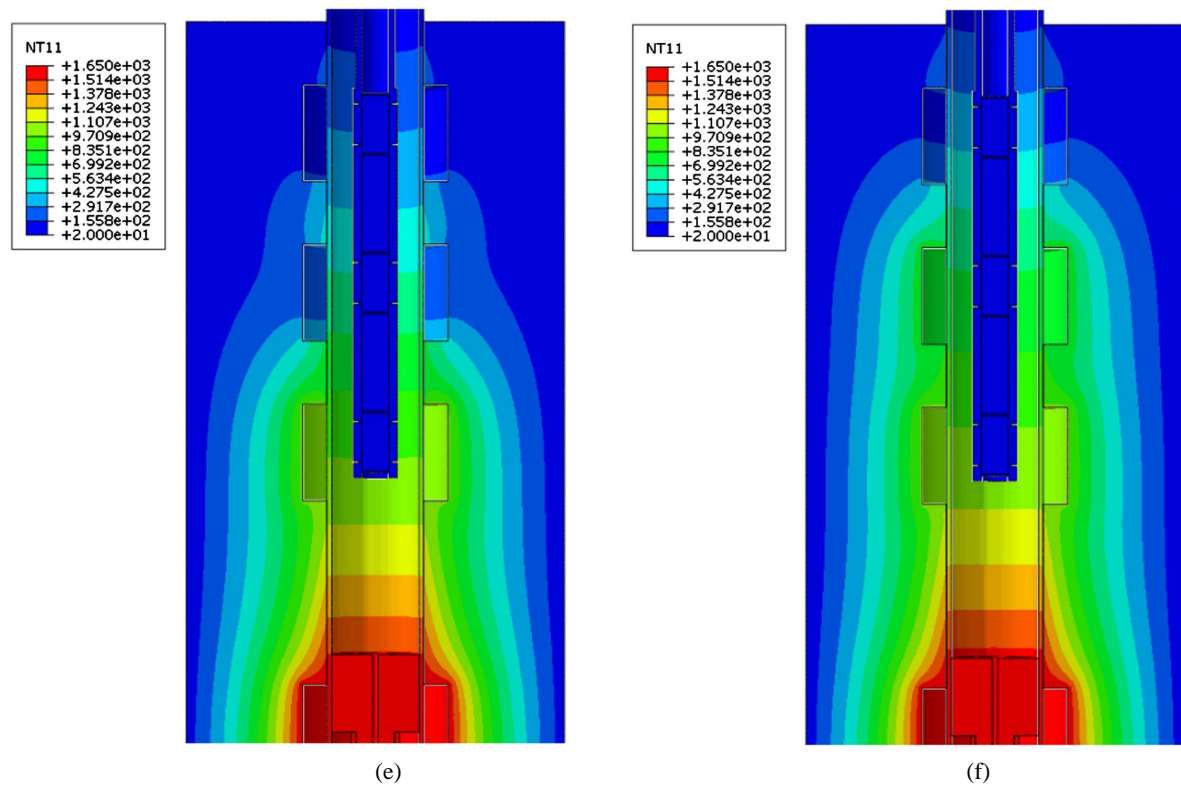


Figure 5. Temperature field simulation results. (a) All heaters are turned off; (b) No. 1 heaters are turned on; (c) No. 1 and No. 2 heaters are turned on; (d) All heaters are turned on; (e) Heating area 1 temperature control; (f) Heating area 1 and 2 temperature control

图 5. 温度场仿真结果。(a) 加热器全部关闭；(b) 1 号加热器打开；(c) 1、2 号加热器打开；(d) 加热器全开；(e) 1 号加热区域温度控制；(f) 1、2 号区域温度控制

Table 3. Temperature range of each area under different temperature control conditions
表 3. 不同温度控制工况下各区域温度区间

| 组别 | 位置 | 温度区间/℃ | 期望工作温度/℃ |
|------------------|--------|----------|----------|
| (a) 加热器关闭 | 1 号加热器 | 761~994 | 1000 |
| | 2 号加热器 | 438~616 | 800 |
| | 3 号加热器 | 171~337 | 600 |
| (e) 1 号加热区温度控制 | 1 号加热器 | 874~1057 | 1000 |
| | 2 号加热器 | 502~714 | 800 |
| | 3 号加热器 | 225~374 | 600 |
| (f) 1、2 号加热区温度控制 | 1 号加热器 | 942~1100 | 1000 |
| | 2 号加热器 | 661~821 | 800 |
| | 3 号加热器 | 298~500 | 600 |

由此结果可知，当三处加热器都不开启时(图 5(a))，炉体下部温度高，1 号加热区所在的捕集器温度区间为 761℃~994℃，接近期望的工作温度；2 号和 3 号加热区的捕集器温度区间分别为 438℃~616℃和 171℃~337℃，均远低于期望的工作温度，因此需要打开加热器进行升温。

为了使各区域温度达到工作温度，三处加热区布置了最大功率为 1 KW 的热电偶，使用 PID 控制方法对工作区域进行加热。为了验证热电偶的加热功率足以使目标区域达到工作温度，需要对各热电偶以最大功率工作的工况进行仿真，如果对应的加热区温度超过目标温度，则说明热电偶功率足够。以最大功率依次打开 1、2、3 号加热器时(图 5(b)、图 5(c)、图 5(d))，加热区温度极高，说明热电偶功率完全可以实现温度控制。

另外，还需要考虑加热器之间的热耦合效应，当 1 号加热器工作时，2、3 号加热区有可能出现过热的现象；同理，1、2 号加热器正常工作时，3 号加热区也有过热的可能性。因此本案例也对 1 号加热区正常工作 and 1、2 号加热区共同工作的工况进行了仿真(图 5(e)、图 5(f))。结合表 3 数据可知，当 1 号加热器正常工作时，对应区域的温度区间可以被控制在 874℃~1057℃之间，而 2、3 号区域温度区间分别为 502℃~714℃和 225℃~374℃；当 1、2 号区域加热器都正常工作时，1 号区域温度分布在 942℃~1100℃范围内，2 号区域温度 661℃~821℃，3 号区域温度 298℃~500℃。以上结果表明各加热器之间存在明显的热耦合效应，加热器正常工作时不会导致上方加热区域温度超出目标值；观察 1 号加热区在各工况的温度区间可以发现，当相邻两个加热器都工作时，位于下方的加热区域温度会有一定程度的上升。

反应炉所有加热器都正常工作的工况仿真结果如图 6 所示，查看结点温度发现 1 号区域最高温度为 1106℃，2 号区域最高温 841℃，而 3 号区域温度区间仅为 573℃~401℃。1、2 号区域出现过热的现象，而 3 号区域由于靠近水冷法兰和保温层边缘，温度低于期望工作温度。因此，在炉体的优化方面可以考虑将 1、2 号加热区间距加大，以减少加热器之间的热耦合效应；将 3 号加热区下移，靠近 2 号加热区以充分利用热量。由于捕集器位于刚玉热管内部，温度相较热电偶所控制的加热区壁面更低，所以 3 号加热区的温度控制策略需要相应做出调整，如提高目标温度或将传感器测量的对象直接指定为捕集器。

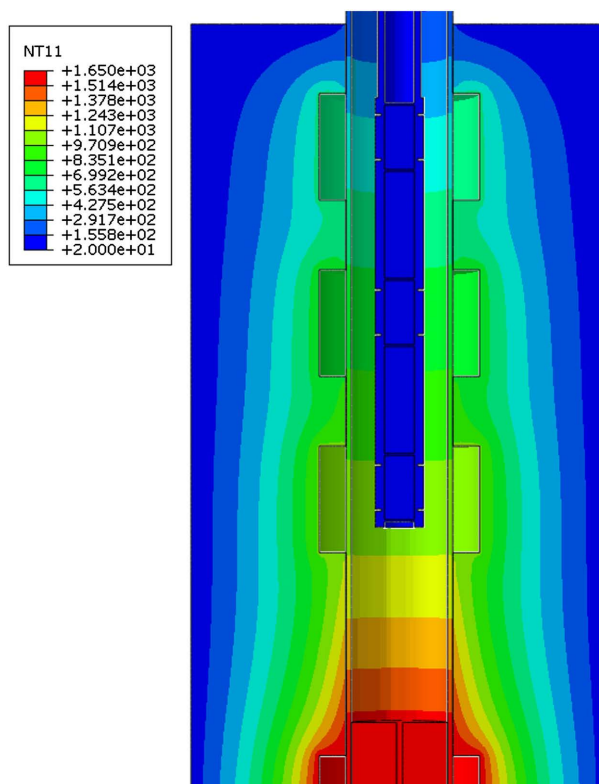


Figure 6. Simulation results under design conditions
图 6. 设计工况仿真结果

使用 ABAQUS 有限元分析软件, 可以对加热炉的温度分布进行精确分析, 获得不同工况下加热炉内的温度分布, 确保加热炉内的温度精确满足化学反应的需求。后续, 可以根据温度场仿真结果, 对加热器提出精确的 PID 仿真策略。

基金项目

季华实验室科研项目(X220011TN220)。

参考文献

- [1] Incropera, F.P. and Dewitt, D.P. (2002) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 5th Edition, John Wiley & Sons.
- [2] Kumar, V.B., Rao, K.S., Charan, G. and Pavan Kumar, Y.V. (2021) Industrial Heating Furnace Temperature Control System Design through Fuzzy-Pid Controller. 2021 *IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, Toronto, 21-24 April 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1109/iemtronics52119.2021.9422491>
- [3] Leonzio, G., Manenti, G., Bozzini, M.M., Baratti, R. and Manenti, F. (2025) Analysis of a Methanol Synthesis Reactor Operating in Non-Isothermal Cooling Conditions. *Fuel Processing Technology*, **276**, Article ID: 108288. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108288>
- [4] 张亚超, 李海英, 张军亚, 董格伦, 王烁鑫. 基于单神经元 PID 的炉温控制方法研究[J]. 节能, 2022, 41(2): 63-66.
- [5] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [6] 盛选禹, 盛博. ABAQUS FOR CATIA 有限元分析实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 20878-2024 不锈钢牌号及化学成分[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 33500-2017 外墙外保温泡沫陶瓷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [9] 朱伯铨, 魏国平, 李享成, 等. 刚玉质微孔耐火材料的制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(3): 422-426.
- [10] 徐鲲濠, 孙阳, 黄勇, 等. 凝胶注模工艺与发泡凝胶工艺制备隔热保温氧化铝多孔陶瓷的性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S1): 345-348.
- [11] (2016) CODATA Value: Stefan-Boltzmann Constant. <https://physics.nist.gov>
- [12] Mikić, B.B. (1974) Thermal Contact Conductance; Theoretical Considerations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **17**, 205-214. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(74\)90082-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(74)90082-9)
- [13] Yovanovich, M., Devaal, J. and Hegazy, A. (1982) A Statistical Model to Predict Thermal Gap Conductance between Conforming Rough Surfaces. *3rd Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference*, St. Louis, 7-11 June 1982, 1-8. <https://doi.org/10.2514/6.1982-888>