移动式反应堆运输工况传热模拟研究

陈章隆,闫锋哲^{*},罗心越,刘佳玲,张复彤

(中国核电工程有限公司,北京 100840)

摘要:目的 为满足 GB 11806—2019《放射性物品安全运输规程》的要求,对移动式反应堆运输前停堆 冷却过程中的传热特性和反应堆外侧金属集装箱表面的最高温度进行研究。方法 通过 Fluent 分析软件 对现有设计条件下额定热功率为 15 MW 的移动式反应堆运输传热过程进行模拟,并在保持其他条件不 变的情况下计算反应堆剩余衰变热功率对箱体表面温度的影响。结果 通过建模计算得出,在现有设计 条件下,移动式反应堆在运输过程中金属集装箱表面的最高温度为 69 ℃,当反应堆剩余衰变热功率为 0.1 MW 时,其箱体表面的最高温度为 83.5 ℃,接近 GB 11806—2019 对放射性物品运输容器易接近表 面的温度不高于 85 ℃的要求。结论 进一步结合高温气冷堆停堆冷却时间与反应堆剩余热功率的对应关 系,当反应堆额定热功率为 13.9 MW 时,只需停堆冷却 1 d 即可满足 GB 11806—2019 的要求;当反应 堆额定热功率为 24 MW 时,需冷却 10 d;当反应堆的额定热功率超过 24 MW 时,为了实现灵活部署的 设计目标,需在现有基础上采取额外冷却方式对反应堆进行冷却。

关键词:移动式反应堆;高温气冷堆;数值模拟;传热计算

中图分类号: TL93 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2025)03-0300-06 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.036

Simulation Study of Heat Transfer from Transportable Reactors

CHEN Zhanglong, YAN Fengzhe^{*}, LUO Xinyue, LIU Jialing, ZHANG Futong (China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

ABSTRACT: The work aims to study the heat transfer characteristics of transportable reactors during the shutdown and cooling process before transportation and the maximum temperature on the surface of the metal container outside the reactor, so as to meet the requirements of GB 11806-2019 "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials". The transportation heat transfer process of a mobile reactor with a rated thermal power of 15 MW under the existing design conditions was simulated by Fluent simulation software, and the influence of the residual decay heat of the reactor on the surface temperature of the tank was calculated under other conditions. After modeling and calculation, it was concluded that the maximum temperature on the surface of the metal container of the mobile reactor during transportation was 69 °C under the existing design conditions, and the maximum temperature of the surface of the tank was 83.5 °C when the residual decay heat of the reactor was 0.1 MW, which was close to the requirement of GB 11806-2019 that the temperature of the accessible surface of radioactive material transport container should not exceed 85 °C. In conclusion, combined with the correspondence between the shutdown cooling time of the high-temperature gas-cooled reactor and the residual thermal power of the reactor, it is concluded that when the thermal power of the reactor reaches 13.9 MW, only one day of shutdown cooling is needed to meet the relevant requirements of GB 11806-2019. When the thermal power of the reactor exceeds 24 MW, only

additional cooling methods can be used to cool the reactor to meet relevant requirements of GB 11806-2019.

KEY WORDS: transportable reactors; high-temperature gas-cooled reactors; numerical simulation; heat transfer calculation transfer

移动式反应堆是一种电功率不超过 5 MW 的微型反应堆,其采用模块化设计,具有功率较小、安全性较高、可通过公路进行运输和部署灵活等特点,可以为主干电网难以覆盖的偏远地区提供能源,对摆脱传统化石燃料依赖、解决能源补给困难等问题具有重要的意义,受到中美等国的广泛关注^[1]。

2021 年 12 月,国家能源局发布的《"十四五"能 源领域科技创新规划》中指出,要开展轻型、智能核 电源装置设计与关键技术研究,突破移动式反应堆关 键共性技术,形成具备可移动能力的先进核电源装置 方案。2022 年 6 月,美国国防部与 BWXT 公司签订 3 亿美元的开发合同(即 Pele 项目),以推进移动式 反应堆的研发和部署^[2]。

在移动式反应堆的研发过程中,确保移动式反应 堆的安全运输是整个移动式反应堆研发过程的重中 之重。如果移动式反应堆在运输过程中发生交通事故 或者出现内部故障,则需立即停止运输并对反应堆内 出现的设备故障进行修理,从而将事故的影响降到最 低。而在移动式反应堆外侧金属集装箱的表面建立热 平衡,并将其最高温度限制在合理范围内,是确保反 应堆出现故障的条件下,维保人员接近并进行维修的 关键因素。根据 GB 11806—2019《放射性物品安全 运输规程》7.8.3 小节和美国联邦法规 49CFR173 《General Requirements for Shipments and Packagings》442 小节等法规的相关要求,放射性物品运输 容器易接近表面的温度不高于 85 ℃^[3-4]。

对于移动式反应堆的运输,可将反应堆外侧的 金属集装箱视作放射性物品运输容器的易接近表 面。Lin 等^[5]以 MHTGR-350 为研究对象,系统分析 了反应堆压力容器的尺寸以及反应堆外屏蔽混凝土 的厚度等因素对反应堆外侧金属集装箱温度变化的 影响。

本研究主要目标是对小型移动式反应堆在运输时的传热特性进行模拟,并就反应堆运输时剩余衰变 热功率水平对传热特性的影响进行分析,以判断移动 式反应堆在运输时,反应堆外侧金属集装箱的表面温 度是否满足 GB 11806—2019 对放射性物品运输容器 易接近表面的相关要求,并根据反应堆不同的额定热 功率计算其所需停堆冷却时间。

1 数值模型及方法

本研究选取的研究对象为美国 Pele 项目中正在 研发的兆瓦级可移动式高温气冷堆,该移动式反应堆 采用高纯度低浓缩的(HALEU)UCO TRISO 作为核 燃料,输出电功率为 1~5 MW,由反应堆模块、发电装置模块、电气仪控集成模块、综合辅助系统集成模块和热阱系统集成模块组成,采用空气冷却的方式散热,可通过卡车进行公路运输,运输时通过在反应堆外侧部署金属集装箱进行防护^[6]。

假定 Pele 项目反应堆输出功率为 5 MW,按照 33.3%的热电转换效率计算,则该移动式反应堆热功 率为 15 MW。假定反应堆冷却 10 d 后运输,根据 Moses^[7]的研究结果,10 d 后反应堆的衰变热功率约 为反应堆热功率的 0.4%,运输时反应堆轴向中心截 面衰变热的热流密度最高,呈正弦分布,如图1所示。



图 1 移动式反应堆运输 Fig.1 Transportation of microreactors

在建模时,本研究假定反应堆为直径3m、长度 17m的卧式圆柱体,所使用的材料为316H不锈钢; 反应堆外侧集装箱的长度为17.5m,横截面为3.5m× 3.5m的正方形,箱体厚度为5mm,箱体两侧设置数 个通风口进行通风。在运输时,反应堆通过内部Sic 基体、燃料包壳和一回路压力边界应对极端交通事故 (撞击、火灾等),其箱体作为运输容器主要用于应 对包括极端降雨在内的极端天气,因此在模拟时暂不 考虑箱体的防护和缓冲设计。

对于反应堆与集装箱之间铅屏蔽层的设计,根据 Carmen^[8]的计算结果:热功率为15 MW、连续运行3 a 的移动式反应堆,刚停堆时需在径向和轴向布置25 cm 厚的铅屏蔽材料,以满足10CFER71 对辐射防护的需 求;在反应堆刚冷却时,反应堆外侧需布置25 cm 厚 的铅屏蔽材料,实现对放射性水平的有效防护。本研 究所选定的运输开始时间是停堆10 d 后,保险起见, 所选定的铅屏蔽材料厚度为25 cm。上文全部假定条 件,统称为原始工况。

由于反应堆在运输时,周围空气流体的流动会带 走金属集装箱的热量,导致其在运输状态的温度要低 于静止状态。为了让分析过程更加保险,本研究在建 模时不考虑由车辆速度引起的空气流动对移动式反 应堆传热特性的影响。

2 移动式反应堆运输三维传热计算

2.1 控制方程

本研究在传热计算中采用雷诺平均纳维-斯托克 方程,所使用的稳态质量方程、稳态动量方程和能量 守恒方程分别为式(1)~(3)^[9-11]。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + v\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$
(2)

$$u\frac{\partial x}{\partial x} + v\frac{\partial y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial y}{\partial y} + v\left(\frac{\partial x^2}{\partial x^2} + \frac{\partial y^2}{\partial y^2}\right) - g\rho\frac{\partial z}{\partial x}$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + \partial \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$
(3)

式中: *P* 为压强, Pa; ρ 为密度, kg/m³; *g* 为重 力加速度, m/s²; β 为体积热膨胀率, 1/K; *T* 为温度, K; α 为热扩散率, m²/s^[12-13]。

在对反应堆和金属集装箱的温度分布进行模拟 计算时,假定反应堆与箱体内壁间的传热方式为辐射 传热和自然对流,其中辐射传热的方式是漫反射。反 应堆与箱体均为灰体,箱体通过自然对流与辐射传热 向外界环境散热,暂不考虑箱体内空气对辐射传热的 影响。反应堆与集装箱之间的传热方程可用式(4)~ (5)表示,式中的下标 a 代表反应堆,b 代表集装 箱。在对反应堆与集装箱之间的自然对流进行模拟分 析时,考虑到反应堆与箱体进行传热的空气流体处于 湍流状态,采用 k-ω湍流模型进行计算。k-ω 模型是 基于湍流动能 k 和比耗散率ω的模型输运方案的经验 模型,其能量守恒方程见式(6)~(7)。

$$Q_{\text{out},a} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 + (1 - \varepsilon_a) \sum_{b=1}^n F_{ab} Q_{\text{out},b}$$
(4)

$$F_{ab} = \frac{1}{A_a} \int_{A_a} \int_{A_b} \frac{\cos \theta_a \cos \theta_b}{\pi r^2} \,\delta_{ab} \,\mathrm{d}A_a \,\mathrm{d}A_b \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tilde{G}_k + Y_k + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho\omega u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\Gamma_{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_{j}}) + G_{\omega} + Y_{\omega} + D_{\omega} + S_{\omega}$$
(7)

式中: Q_{out} 为离开物体的热量,W; ε 为物体表 面辐射系数;T为温度,K; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常 数,5.67×10⁻⁹ W/(m²·K⁴);A为面积,m²; ρ 为密度, kg/m³;k为热导率,W/(m·K);T为有效扩散系数; ω 为特定损耗率; \tilde{G}_k 和 G_{ω} 为湍流动能的产生; Y_k 和 Y_{ω} 为湍流引起的k和 ω 的耗散; D_{ω} 为交叉扩散项; S_k 和 S_{ω} 为源项^[14-15]。

2.2 传热计算结果

对于大多数复杂的流动现象,通过 Fluent 软件进 行数值模拟能提供更加快速且准确的结果,这种方式 相较于其他模拟软件具有更显著的灵活性。Fluent 的 求解过程不仅考虑了传导、对流和辐射等多种传热机 制,还可结合流体动力学的特性,提供全面的热工分 析。此外,Fluent 的并行计算能力使其在处理大规模问 题时表现出色,特别是在可扩展性方面更为突出,因此 它在各种复杂工况得到了广泛应用。无论是在科研领 域,还是工程实际中,Fluent 都因其通用性好得到大 量使用,成为研究人员首选的计算工具^[16-17]。

在使用 Fluent 软件对移动式反应堆运输过程中的散热行为进行数值模拟时,首先需建立一个精准的模型。本研究的建模对象包括移动式反应堆的堆本体、反应堆外侧的金属集装箱以及箱体上的通风散热口。采用的建模软件是 SpaceClaim,得到的几何模型如图 2 所示。将该几何模型导入 Fluent 计算。在模拟时,通过合理设置模型参数、环境温度、材料属性等关键条件(表 1^[18]), Fluent 可较为精确地计算出移动式反应堆在运输过程中的传热特性,尤其是解决了如何有效散热的问题,从而保证移动式反应堆的安全运输。



图 2 SpaceClaim 模拟移动式反应堆运输 Fig.2 Stimulation of transportation of transportable reactor by SpaceClaim

表 1 模型中的重要参数 Tab.1 Important parameters in model

材料属性	环境 温度/℃	模型参数	
		材料热导率/	热容量/
		$(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
压力容器	26.0	16.27	502.48
(316H 不锈钢)			
屏蔽材料(铅)		34.8	130.0
箱体材料(碳钢)		202.4	871.0

经过 Fluent 软件的迭代计算,移动式反应堆在运输过程中金属集装箱表面温度分布如图 3a 所示,反应堆压力容器表面与铅屏蔽层的温度分布如图 3b 所示。由图 3 可看出,箱体表面的温度分布特征与箱体内反应堆的热流密度分布存在高度的相似性。整体上,箱体温度呈现中心温度较高、两侧温度较低的分布特点,这主要由于反应堆产生的热量集中在中心区域并逐渐向两侧扩散,导致了温度的梯度分布^[19-20]。



图 3 在运移动式反应堆的温度分布 Fig.3 Temperature distribution of mobile reactor in transit

根据模拟结果,集装箱表面最高温度为 69 ℃, 箱体表面平均温度为 47.7 ℃。考虑到金属集装箱的 箱体通常设置一些折弯结构,以提高箱体的换热面 积,并有利于增加移动式反应堆的传热效率,因此箱 体实际的最高温度和平均温度可能会较本研究的计 算结果更低。

此外,集装箱内部空气流体的温度分布呈现明显 的空间差异性。箱体内空气的温度受多种因素影响, 包括通风口设置、外界空气的对流作用以及流体自身 的重力效应。通风口的设置对提高箱体的散热效果可 起到积极作用,其位置和数量决定了热空气的流通情 况,从而影响散热效果。如果将通风口设置在集装箱 的高处,热空气可自然上升并流出,达到更好的散热 效果。通风口的面积也是影响因素,通风面积越大, 热空气流通越顺畅,散热效果越好。从空气对流角度 来看,由于箱体底部的空气流体更接近集装箱内的高 温区,其温度相对较高;而位于箱体顶部的空气流体 则受到外部空气的冷却作用和自然对流的影响,温度 相对较低。这种差异导致箱体通风口与箱体下侧空气 的温度显著低于箱体顶部与两侧^[21-22]。

根据上述计算结果,该工况下移动式反应堆外侧 金属集装箱的最高温度可满足 GB 11806—2019 等规 范性文件要求。从传热学角度讲,该工况下移动式反 应堆的运输安全可以得到保证。

3 反应堆剩余衰变热功率对集装箱 表面温度的影响

灵活部署作为移动式反应堆的主要研发目标,需 反应堆在停堆后能在最短时间内将其剩余衰变热功 率降到足够低的水平,确保反应堆运输前在规范文件 要求的温度下实现热平衡。为此,本研究进一步分析 反应堆剩余衰变热功率对金属集装箱表面温度的影 响。在原始工况下,额定热功率为15 MW的移动式 反应堆在停堆冷却10d后的剩余热功率为0.06 MW, 金属集装箱表面的最高温度为 69 ℃,低于 GB 11806—2019 要求的85 ℃,这表明从传热特性角度 来看,反应堆不需要冷却 10 d 即可满足 GB 11806—2019 的相关要求。本研究在保持原始工况其 他条件不变的情况下,使用 Fluent 软件分别对剩余衰 变热功率为0.04、0.08、0.1、0.12 MW 的传热过程进 行计算,最终结果见表 2。

表 2 反应堆衰变热功率对金属集装箱表面温度的影响 Tab.2 Effect of reactor decay heat on surface temperature of metal containers

反应堆剩余衰变	集装箱表面	集装箱表面
热功率/MW	最高温度/℃	平均温度/℃
0.04	65.6	46.5
0.06	69.0	47.4
0.08	76.8	50.0
0.10	83.5	52.3
0.12	90.6	54.7

由表 2 可知, 在保持反应堆和金属集装箱的尺寸 与材料等不变的情况下, 如果在运输前反应堆剩余衰 变热功率水平达 0.1 MW, 可认为其箱体表面最高温 度接近 GB 11806—2019 对其易接近表面的温度要 求, 这对移动式反应堆研发具有积极的意义。对于不 同额定热功率的反应堆, 可根据上述结果推算出其所 需最短的停堆冷却时间。Moses^[7]对 MHTGR(小型 高温气冷堆)在不同冷却时间的反应堆剩余衰变热功 率占比进行了统计, 结果见表 3。

本研究以停堆冷却后反应堆剩余衰变热功率达 0.1 MW 为目标,对表 3 冷却时间相对应的反应堆额 定热功率进行计算,结果如图 4 所示。由图 4 可知: 当反应堆额定热功率为 13.9 MW 时,只需停堆冷却 1 d 即可满足 GB 11806—2019 相关要求;当反应堆额 定热功率为 24 MW 时,需冷却 10 d;当反应堆的额 定热功率超过 24 MW 时,如果想实现灵活部署的设 计目标,则需在现有基础上采取额外冷却方式对反应 堆进行冷却。

表 3	MHTGR 反应堆剩余衰变热功率的变化趋势
Tab.3 Tr	ends in residual decay heat of MHTGR reactors

冷却时间	剩余衰变热功率占比/%
10 s	7.55
100 s	4.46
1 000 s	2.65/2.43
10 000 s	1.24
1 d	0.719
10 d	0.417
100 d	0.101
1 000 d	0.013 1





4 结语

本文通过 Flunt 软件对现有设计条件下额定热功 率为 15 MW 的移动式反应堆运输前停堆冷却的传热 过程进行模拟,并在保持其他条件不变的情况下,就 反应堆剩余衰变热功率对箱体表面温度的影响进行 计算。结果表明,仅从传热特性来看,小功率移动式 反应堆具备灵活部署能力,大功率移动式反应堆的灵 活部署,则需在现有设计基础上采取额外的冷却方 式。考虑到目前国内外在研的移动式反应堆都属于小 功率范畴,因此暂不需要在现有设计方案上采取额外 的冷却措施^[23-24]。

参考文献:

- [1] 闫锋哲,贺克羽,刘佳玲,等.移动式反应堆运输风 险目标研究[J].包装工程,2024,45(15):313-318.
 YAN F Z, HE K Y, LIU J L, et al. Transportation Regulation and Risk Objectives of Transportable Reactors[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(15): 313-318.
- [2] 赵阳,李达维,张昌芳.美军移动微型核反应堆建设

发展及军事影响[J]. 国防科技, 2023, 44(1): 54-61.

ZHAO Y, LI D W, ZHANG C F. Development and Military Impact of the U.S.Military's Mobile Micro Nuclear Reactors[J]. National Defense Technology, 2023, 44(1): 54-61.

[3] 生态环境部,国家市场监督管理总局.放射性物质安 全运输规程:GB 11806—2019[S].北京:中国环境出 版社,2019.

Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: GB 11806—2019[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.

- [4] Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Department of Transportation. General Requirements for Shipments and Packagings: 49CFR173[S]. Washington, DC, USA: Office of the Federal Register, 2023:807.
- [5] LIN T Y, AJAY K, BINDRA H. Numerical Simulations of Passive Heat Removal from Mobile Microreactors[J]. Nuclear Science and Engineering, 2024: 1-15.
- [6] USA Defense Science Board. Task Force on Energy Systems for Forward/remote Operating Bases[R]. Washington, DC, USA: Department of Defense of USA, 2016.
- [7] MOSES D L. Technical Evaluation Report for NRC of the Nuclear Design of the Standard MHTGR[R]. Washington, DC, USA: Nuclear Regulatory Commission, 1988: 46.
- [8] CARMEN S C. Conceptual Design of a Nuclear Microreactor Transportation Cask[D]. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2021.
- [9] 杨林谦,魏雅川,宋国磊,等. 湍流模型的选择与评价[C]//中国航天电子技术研究院科学技术委员会2020年学术年会论文集. 北京:中国航天电子技术研究院科学技术委员会,2020:742-747.
 YANG L Q, WEI Y C, SONG G L, et al. Selection and Evaluation of Turbulence Models[C]// The 2020 Academic Annual Meeting of the Committee of China Academy of Aerospace Electronics Technology. Beijing: Science and Technology Committee of China Academy of Aerospace Electronics Technology, 2020: 742-747.
- [10] 张宏飞,曹红松,赵捍东,等.数值仿真中湍流模型的选择[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(4):242-244. ZHANG H F, CAO H S, ZHAO H D, et al. The Choice of Turbulence Model in Numerical Simulation[J]. Journal of Projectiles, 2006, 26(4): 242-244.
- [11] 袁新. 可压缩粘性流动中双方程湍流模型的选择[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(4): 427-432.

YUAN X. Selection of Two-Equation Turbulence Model for Compressible Viscous Flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(4): 427-432.

- [12] HOWELL J R, MENGÜÇ M P, DAUN K, et al. Thermal Radiation Heat Transfer[M]. Seventh Edition. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2021.
- [13] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,
 2019.
 TAO W Q. Heat Transfer[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- [14] ALFONSI G. Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations for Turbulence Modeling[J]. Applied Mechanics Reviews, 2009, 62(4): 040802.
- [15] CESINI G, PARONCINI M, CORTELLA G, et al. Natural Convection from a Horizontal Cylinder in a Rectangular Cavity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42(10): 1801-1811.
- [16] 梁涛峰, 王洲, 杨献勇. 环形空间内导热、对流、辐射 耦合问题的数值仿真[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(5): 46-49.

LIANG T F, WANG Z, YANG X Y. Numerical Simulation for Conjugated Problems of Conduction, Convection and Radiation in an Annular Space[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1998, 38(5): 46-49.

- [17] 郭磊.对FLUENT辐射模型的数值计算与分析[J].制 冷与空调(四川), 2014, 28(3): 358-360.
 GUO L. Numerical Calculation and Analysis of the FLUENT Radiation Model[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2014, 28(3): 358-360.
- [18] 肖能齐, 范尹, 胡义, 等. 基于 Fluent 的流场散热仿

真及风道优化设计[J/OL]. 机械设计, 2024(5). (2024-05-30)[2025-01-27]. https:// doi.org/10.13841/j.cnki. jxsj.20240529.001.

XIAO N Q, FAN Y, HU Y, et al. Research on Flow Field Heat Dissipation Simulation and Air Duct Optimization Design Based on Fluent[J/OL]. Journal of Machine Design, 2024(5). (2024-05-30)[2025-01-27]. https://doi.org/10. 13841/j.cnki.jxsj.20240529.001.

- [19] PARK H K, HA M Y, YOON H S, et al. A Numerical Study on Natural Convection in an Inclined Square Enclosure with a Circular Cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66: 295-314.
- [20] MOUKALLED F, ACHARYA S. Natural Convection in the Annulus between Concentric Horizontal Circular and Square Cylinders[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1996, 10(3): 524-531.
- [21] OHIRA H. Numerical Simulation of Aerosol Behavior in Turbulent Natural Convection[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, 39(7): 743-751.
- [22] VERMA M K, MISHRA P K, PANDEY A, et al. Scalings of Field Correlations and Heat Transport in Turbulent Convection[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2012, 85(1 Pt 2): 016310.
- [23] TESTONI R, BERSANO A, SEGANTIN S. Review of Nuclear Microreactors: Status, Potentialities and Challenges[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 138: 103822.
- [24] SURYAWANSHI P L, GUMFEKAR S P, BHANVASE B A, et al. A Review on Microreactors: Reactor Fabrication, Design, and Cutting-Edge Applications[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 189: 431-448.