

电阻式熔盐加热器内部传热特性研究

常东锋^{1,2}, 赵四海³, 张国龙^{1,2}, 赵洋³, 王伟^{1,2}, 倪平³, 张建元^{1,2}, 吴波³, 雒青^{1,2}, 王飞⁴

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054; 3.华电内蒙古能源有限公司包头发电分公司, 内蒙古 包头 014013; 4. 华能国际电力股份有限公司日照电厂, 山东日照 276826)

摘要: 高温熔盐电加热器是储热系统中实现电热转换的核心设备, 掌握内部温度分布特性是推动其结构优化的关键。文章建立了传统电阻式熔盐加热器计算模型, 采用 CFD 软件, 通过求解三维 N-S 方程和能量方程, 研究了加热器内部温度分布特点, 得到了电加热器内部温度分布在不同工况下的变化规律。结果表明: 沿流动方向上熔盐和管壁温差逐渐增加, 而多组串联布置能够有效降低传热温差, 在加热器连接处二者温差可从 27 °C 降低至 2 °C; 同时, 由于内部加热管密集程度不一致, 横截面内中心位置熔盐、电阻丝、填充材料温度明显高于边缘位置, 且伴随着负荷的增加温度梯度也逐渐增加, 当平均热流密度从 5.71 W/cm² 增加至 28.57 W/cm² 时, 截面熔盐温差从 49 °C 升高至 68 °C, 可以看出, 合理分配电加热管排布是降低截面温差、减小热应力的关键。

关键词: 熔盐储热; 电加热器; 数值模拟; 传热特性

中图分类号: TK116 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)11-1477-07

0 引言

“双碳”背景下, 构建新型电力系统是保障我国能源安全的战略任务。光伏、风电等可再生能源存在间歇、不稳定的缺陷, 易造成发电厂和用户侧电力供需不匹配, 须要配置一定容量的储能系统^[1]。熔盐储热作为安全、可靠且价格低廉的储能技术, 在风、光、热储可再生能源大基地建设、火电灵活性改造、用户侧储热、供热等场景中, 具有巨大的市场需求^[2]。

目前熔盐储热一般存在两种加热方式, 热源加热(蒸汽、烟气、空气等)和电加热, 其中电加热熔盐路线由于具有灵活性高、价格低廉、不受传热温差限制等优势, 已在众多场景得到应用推广^[3-5]。Cao R^[6]通过熔盐电加热器将熔盐储热系统与燃煤机组耦合, 实现了燃煤机组零出力。马汀山^[7]针对电加热熔盐储热和燃煤机组耦合系统, 给出了详细的系统设计及容量计算方法。西安某公司承担的“与煤电耦合的熔盐储热、调频、调峰及安全供汽技术示范工程项目”是熔盐储热在国内乃至世界范围内首次大规模工程应用于火电行业, 其利用 40 MW 熔盐电加热器有效提升了燃煤机组

调峰、调频能力^[8]。在绿电供汽领域, 使用低谷电或风、光富余电量加热熔盐, 经过电-熔盐-给水的热传递后, 用于供汽、供暖, 不仅增加了可再生能源消纳, 而且减少了化石燃料的碳排放^[2]。

综上, 电加热熔盐储热应用场景众多, 而高温熔盐电加热器是储热系统中实现电、热转换的关键设备, 电阻式熔盐加热器已实现了较多工程应用, 电极式和电磁式熔盐加热器仍在研发中试阶段。在前期研究过程中, 通过一维建模, 分析电阻式熔盐加热器的瞬态特性, 获得了沿熔盐流动方向上平均熔盐温度和管壁温度变化趋势^[9]。在工程应用过程中发现, 由于兆瓦级工业电加热器内部温度梯度过大、温度场分布不均匀, 导致其在运行过程中容易出现熔融盐热解和电加热器应力破坏等现象, 而掌握内部温度分布特征、合理优化结构是解决以上问题的关键。但目前关于 U 型管式熔盐电加热器热力特性鲜有公开资料, 因此, 有必要针对以上内容展开研究。

本文通过数值模拟的方法获得了电阻式熔盐加热器内部温度分布规律, 研究了轴向不同位置横截面内温度梯度变化, 揭示了电加热器在不同

收稿日期: 2023-10-24。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2405205)。

作者简介: 常东锋(1978-), 男, 高级工程师, 研究方向为汽轮机、储热技术的研发与应用。E-mail: changdongfeng@tpri.com.cn

工况下的传热性能,为电阻式熔盐加热器的设计与应用提供了理论基础。

1 电加热器内熔盐流动与传热模型

1.1 物理模型

典型电阻式熔盐加热器结构如图 1 所示。

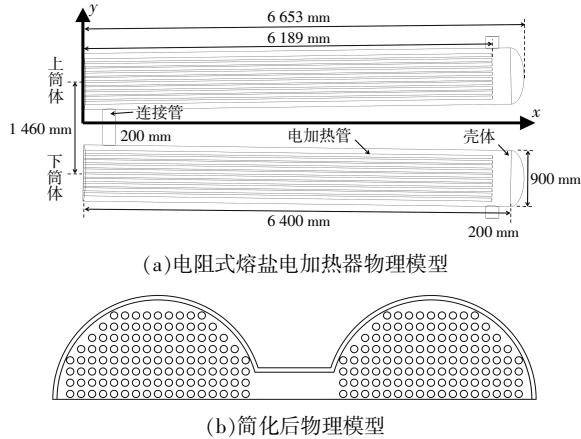


图 1 电阻式熔盐加热器物理模型

Fig.1 Physical model of molten salt electrical resistance heater

加热器采用壳管式结构,上、下两个壳管中电加热器串联使用,壳体为直径 900 mm、长度 6 400 mm 的圆柱筒体,筒体倾斜布置,倾斜角为 8°,以方便事故工况下非能动排盐。熔盐从下筒体入口流入电加热器,从上筒体出口流出。电加热器内部加热芯为 U 型管结构,规格为 Φ12.5 mm,单边长度 6 189 mm,共 390 根;加热芯从内到外依次是电阻丝、填充材料、金属外壁,具体参数见表 1。

表 1 电阻式熔盐加热器结构参数

Table 1 Structural parameters of molten salt electrical resistance heater

结构	参数	规格
壳体	材料	Q345R
	内径/mm	900.0
	厚度/mm	14.0
	长度/mm	6 400.0
内部 U 型加热管/根		390
加热芯电阻丝	材料	Ni80Cr20
	直径/mm	1.0
加热芯填充材料	材料	氧化镁 22SR
	厚度/mm	3.0
加热芯金属外壁	材料	S32168
	厚度/mm	2.7

熔盐加热器内部换热过程主要包含内部加热芯热传导和熔盐热对流,内部流动属于三维稳态流动问题。由于电加热器单侧面左右两边是对称

结构,为了减少计算量,选取电加热器一侧作为研究对象。

1.2 数学模型

根据质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,分别建立电加热器内部固体区、加热芯和流体区熔盐的控制方程^[10]。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

式中:ρ 为流体密度,kg/m³;u, v, w 为在 x, y, z 方向上的速度分量,m/s。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \rho f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = \rho f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中:μ 为动力粘度,Pa·s;P 为压力,N;f_x, f_y, f_z 为单位体积所受重力,N。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u^2 T_f)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 T_f)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2 T_f)}{\partial z} = \frac{\lambda}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

式中:T_f 为熔盐温度,℃;C_p 为熔盐比热容,J/(kg·℃);λ 为熔盐导热系数,W/(m·℃)。

内部加热芯固体导热方程为^[11]

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \phi = 0 \quad (6)$$

式中:T_s 为固体温度,℃;φ 为单位时间、单位体积中内热源生成的热量,W/m³。

1.3 边界条件

采用 CFD 流体力学计算软件进行数值模拟,计算过程中将电阻丝发热简化成一个体热源,电阻丝、填充材料、金属外壁和熔盐相互接触边界为耦合边界,入口边界处流量和温度保持恒定,出口边界为压力边界,具体描述分别为

入口边界:

$$\dot{m}_{in}=\dot{m}_0, T_{f,in}=T_0 \quad (7)$$

式中: \dot{m} 为熔盐流量,kg/s。

出口边界:

$$p_{out}=p_0, \frac{\partial T_f}{\partial n}=0 \quad (8)$$

式中: \vec{n} 为截面的法线方向。

金属外壁面:

$$u=v=w=0, \frac{\partial T_s}{\partial n}=0 \quad (9)$$

此外,计算收敛残差设置为 10^{-5} 。电加热器内熔盐选用Hitec混合硝酸盐(53%硝酸钾+40%亚硝酸钠+7%硝酸钠),其物性参数见表2^[12]。

表2 熔盐物性参数

Table 2 Physical properties parameters of molten salt

参数	拟合方程
密度/g·cm ⁻³	$\rho=2.06-7.027 \times 10^{-4} t$
定压比焓/J·(g·K) ⁻¹	$C_p=-0.932+0.02127 t-5.193 \times 10^{-5} t^2+3.469 \times 10^{-9} t^3$
导热系数/W·(m·K) ⁻¹	$\lambda=0.8097-0.00138 t+4.753 \times 10^{-6} t^2-6.034 \times 10^{-9} t^3$
动力粘度/10 ⁻³ Pa·s	$\eta=0.5264 \times \exp\left(\frac{560.81}{t}\right)$

1.4 网格无关性检验

为验证网格数量对计算结果的影响,分别划分了网格数量为780万、1040万、1570万、2380万和3570万的5套网格,对比计算了同一工况下熔盐电加热器出口熔盐平均流速,计算结果如图2所示。

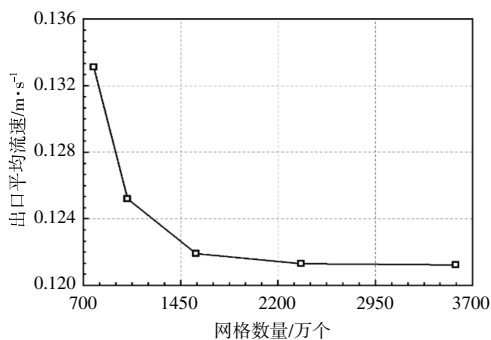


图2 网格无关性验证

Fig.2 Grid independence verification

从图2可以看出,当网格数量超过1570万时,电加热器出口熔盐流速几乎不再发生变化。本文兼顾计算效率和计算精度要求,将网格数量设

置为1570万,并在流体边界设有边界层,如图3所示。

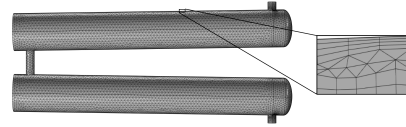


图3 电阻式熔盐加热器边界层设置

Fig.3 Boundary layer setting of molten salt electrical resistance heater

2 电加热器内部温度分布特性

以电功率5MW(平均热流密度14.28W/cm²)、入口熔盐流量34.5kg/s(加热器内平均流速0.017m/s)、入口熔盐温度203℃为工况,选择电加热器入口、中间、出口截面作为典型截面,计算电加热器内部温度分布特性,如图4所示。

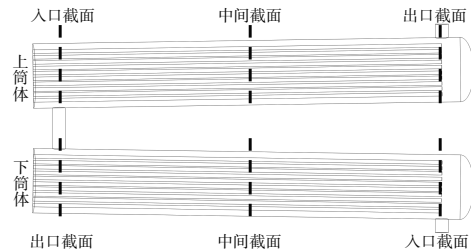


图4 加热器典型截面位置图

Fig.4 Key section location diagram of the heater

2.1 轴向温度分布特性

电加热器中熔盐在流动方向上不同截面内熔盐平均温度、加热管外壁平均温度如图5所示,其中,横坐标为图1(a)x轴位置,负值代表下筒体,正值代表上筒体。

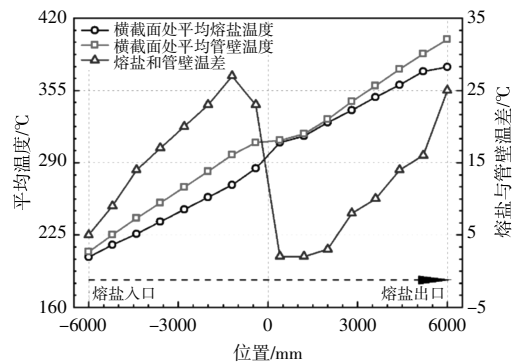


图5 轴向不同位置截面内熔盐与加热管外壁平均温度及温差

Fig.5 The average temperature and temperature difference between the molten salt and the outer wall of the heating tube in different axial positions of the cross-section

从图5可以看出,沿着流动方向熔盐和加热管外壁的平均温度单调增加。在单个电加热器内

沿着熔盐流动方向上,受流动边界层影响,熔盐和加热管外壁之间对流换热系数降低、传热温差逐渐增大。

从具体的数值来看,在下加热器内熔盐和加热管外壁之间传热温差从入口处的 5 °C($x=-6\ 000$ mm)逐渐增加到 27 °C($x=-1\ 200$ mm);在上加热器内传热温差从入口处的 2 °C($x=400$ mm)逐渐增加到 25 °C($x=6\ 000$ mm)。上、下电加热器换热特性基本一致,但在下电加热器出口段和上电加热器入口段,上、下电加热器的连接细管改变了内部流场,破坏了熔盐与管壁之间的边界层,强化了熔盐与管壁间对流传热,因而传热温差降低。

电加热器纵向截面内熔盐温度分布见图 6。



图 6 纵向截面内熔盐温度分布图

Fig.6 Temperature distribution diagram of molten salt in longitudinal section

2.2 熔盐径向温度分布特性

电加热器筒体典型截面内熔盐温度分布如图 7 所示,其中上、下电加热器入口、中间和出口处典型截面的位置分别为图 1(a)中 $x=\pm 400, \pm 3\ 600, \pm 6\ 000$ mm。

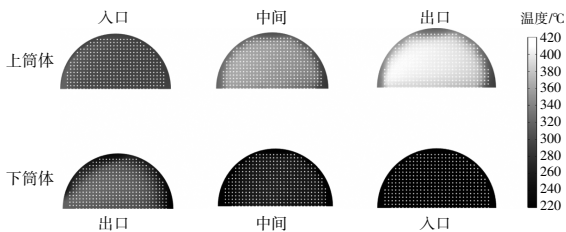


图 7 熔盐流动方向上典型截面内熔盐温度分布图

Fig.7 Temperature distribution diagram of molten salt in a typical cross-section in the direction of molten salt flow

从图 7 可以看出,在同一截面内中心位置的熔盐温度明显高于边缘位置熔盐温度。

中心位置和边缘位置熔盐温度沿流动方向变化趋势如图 8 所示。

从图 8 可以看出,单个电加热器沿流动方向上中心位置和边缘位置熔盐温差逐渐增大,而上电加热入口由于流动扰动,缩小了中心位置和边缘位置熔盐温差,减弱了截面熔盐温度分布不均。

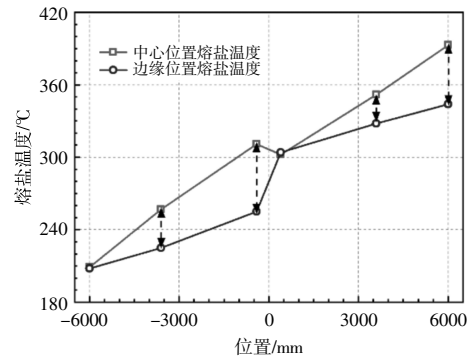


图 8 流动方向上截面中心和边缘位置熔盐温度

Fig.8 Molten salt temperature at the center and edge of the cross-section in the flow direction

2.3 加热管径向温度分布特性

电加热器中心轴线、筒体边缘处电加热管截面内温度分布如图 9 所示,典型截面位置同图 7。

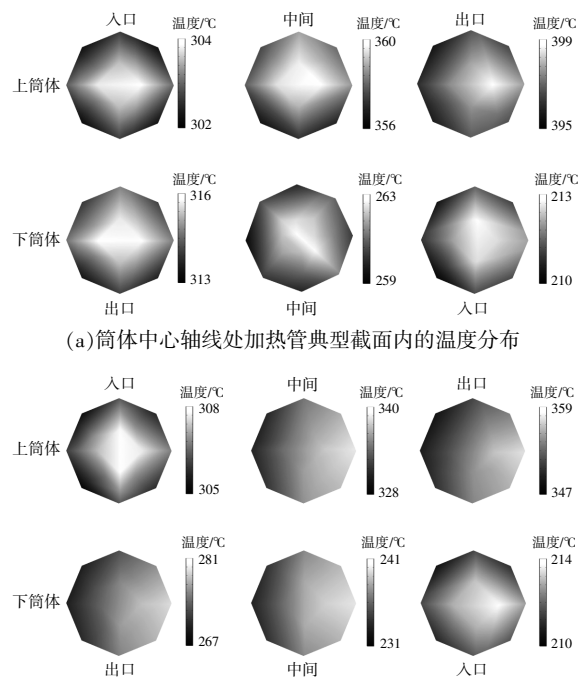


图 9 代表性加热管典型截面内的温度分布

Fig.9 Temperature distribution within a typical cross-section of a representative heating tube

从图 9 可以看出:沿流动方向电热管的温度逐渐升高,由于中心处加热管四周换热均匀,其截面内的温差非常小,一般在 2~4 °C;在边缘处的加热管由于四周换热不均匀,截面内的温差明显高于中心处的加热管,一般在 4~14 °C。

电加热管内电阻丝、填充材料温度沿流动方向变化趋势如图 10 所示。

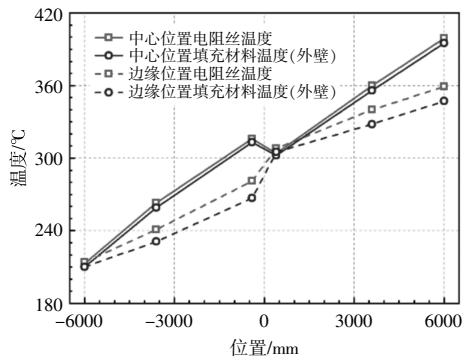


图 10 流动方向上截面中心和边缘位置加热管温度
Fig.10 Heating tube temperature at the center and edge of the cross-section in the flow direction

从图 10 可以看出,由于中心位置加热管相对较密,较高的热流密度导致中心位置加热管的电阻丝和填充材料温度明显高于边缘处的加热管中电阻丝和填充材料的温度。

3 传热性能在不同工况下变化规律

以入口熔盐温度 203 °C、出口熔盐温度 384 °C 为边界条件,模拟研究了熔盐电加热器在 3 种工况下(表 3)的传热性能,获得了不同工况下的局部传热特性以及温度分布不均特性。

表 3 不同工况下热力参数

Table 3 Thermal parameters under different operating conditions

工况	电负荷 MW	热流密度 W/cm ²	熔盐流量 kg/s	熔盐流速 m/s
工况一	2	5.71	6.90	0.006 7
工况二	5	14.28	17.25	0.017 0
工况三	10	28.57	34.50	0.033 0

3.1 不同工况下局部对流传热系数

加热管外局部对流传热系数计算式^[13,14]为

$$h_{loc} = \frac{q_{loc}}{T_{loc} - T_f} \quad (10)$$

式中: h_{loc} 为加热管外局部对流传热系数, W/(m²·K); q_{loc} 为加热管局部热流密度, kW/m²; T_{loc} 为加热管外壁面局部温度, °C。

轴向不同位置截面内局部对流传热系数在不同工况下的变化规律如图 11 所示。

从图 11 可以看出,在进、出口熔盐温度一定的情况下,随着热流密度、熔盐流速的增加,电加热器内局部对流传热系数增加,其中在上电加热器入口处对流传热强化程度更加显著。从具体的数值来看,当热流密度和熔盐流速从 5.71 W/cm², 0.006 7 m/s 增加至 28.57 W/cm², 0.033 0 m/s 时,在下电加热器出口横截面温差从 49 °C 提高至 68 °C, 加热器筒体内

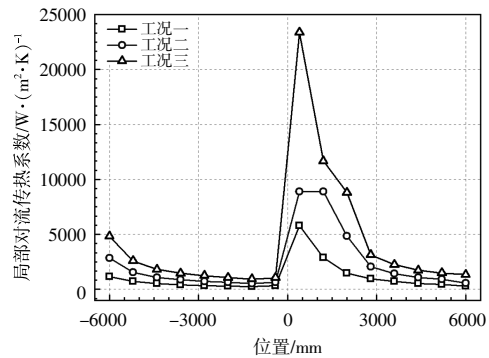


图 11 不同工况下轴向不同位置截面内局部对流传热系数

Fig.11 Local convective heat transfer coefficient in axial and different position sections under different operating conditions

W/cm², 0.006 7 m/s 增加至 28.57 W/cm², 0.033 0 m/s 时,在上电加热器入口处局部对流传热系数从 5 796 W/(m²·K)提高至 23 370 W/(m²·K),熔盐与管壁间的对流传热强化了 4 倍。这主要是因为熔盐流速提高时,上电加热器入口段的流动扰动更大、湍流程度更高。

3.2 不同工况下电加热器横截面温差

中心位置和边缘位置熔盐温差在不同工况下的变化规律如图 12 所示。

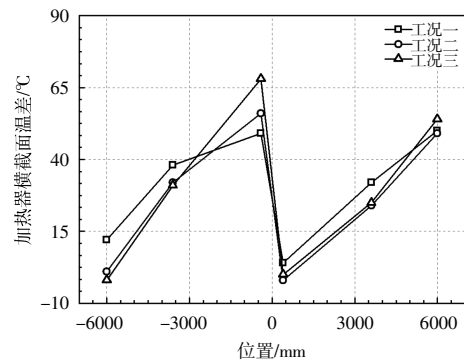


图 12 不同工况下电加热器横截面温差

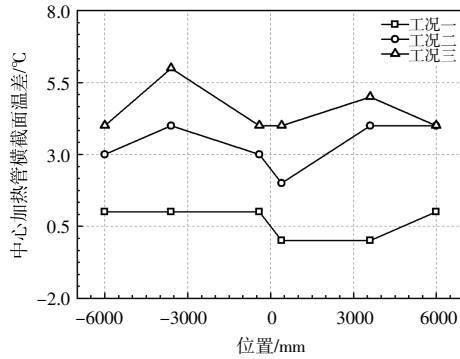
Fig.12 Cross section temperature difference of electric heater under different working conditions

从图 12 可以看出,在进、出口熔盐温度一定的情况下,随着热流密度、熔盐流速的增加,单个电加热器横截面内熔盐温差沿轴向变化趋势基本相同,均是逐渐增大,其中单个电加热器出口段负荷越高截面温差越大。从具体的数值来看,当热流密度和熔盐流速从 5.71 W/cm², 0.006 7 m/s 增加至 28.57 W/cm², 0.033 0 m/s 时,在下电加热器出口横截面温差从 49 °C 提高至 68 °C, 加热器筒体内

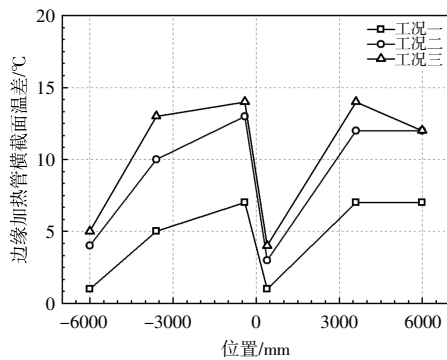
部热应力增大。

3.3 不同工况下加热管横截面温差

中心位置和边缘位置加热管横截面温差在不同工况下的变化规律如图 13 所示。



(a) 筒体中心轴线处加热管横截面温差



(b) 筒体边缘处加热管横截面温差

图 13 不同工况下加热管横截面温差

Fig.13 Cross section temperature difference of heating tube under different working conditions

从图 13 可以看出,在进、出口熔盐温度一定的情况下,随着热流密度、熔盐流速的增加,中心位置和边缘位置加热管横截面温差逐渐增大。从具体的数值来看,当热流密度和熔盐流速从 5.71 W/cm²,0.006 7 m/s 增加至 28.57 W/cm²,0.033 0 m/s 时,中心位置和边缘位置加热管横截面温差分别最大增加 5 °C 和 8 °C,且均发生在单个电加热器轴向中间位置。

4 结论

本文采用 CFD 软件,建立了传统电阻式熔盐加热器计算模型,通过求解三维 N-S 方程和能量方程,研究加热器内部温度分布特点,得到了以下结论。

①沿流动方向上熔盐和管壁的平均温度单调增加,且传热温差逐渐增大,多组串联能够有效降低传热温差,在平均热流密度 14.28 W/cm²、熔盐

流速 0.017 m/s 情况下,连接处传热温差可从 27 °C 降低至 2 °C。

②随着热流密度、熔盐流速的增加,电加热器内局部对流换热系数增大,其中电加热器连接处强化传热程度最为明显。

③由于内部加热管密集程度不一致,导致了横截面内中心位置熔盐、电阻丝、填充材料温度明显高于边缘位置,且伴随负荷的增加温度梯度也逐渐增加,在平均热流密度从 5.71 W/cm² 增加至 28.57 W/cm² 时,截面熔盐温差从 49 °C 提高至 68 °C。

参考文献:

- [1] 陈海生,李泓,徐玉杰,等.2022 年中国储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2023,12(5):1516-1552.
- [2] 左芳菲,韩伟,姚明宇.熔盐储能在新电力系统中的应用现状与发展趋势[J].热力发电,2023,52(2):1-9.
- [3] Drost M K,Somasundaram S,Brown D R,et al.Thermal energy storage for coal-fired power generation [R]. Richland:Pacific Northwest Lab,1990.
- [4] Garbrecht O,Bieber M,Kneer R.Increasing fossil power plant flexibility by integrating molten-salt thermal storage[J].Energy,2017,118:876-883.
- [5] Zhang K,Liu M,Zhao Y,et al.Thermo-economic optimization of the thermal energy storage system extracting heat from the reheat steam for coal-fired power plants [J].Applied Thermal Engineering,2022,215:119008.
- [6] Cao R,Lu Y,Yu D,et al.A novel approach to improving load flexibility of coal-fired power plant by integrating high temperature thermal energy storage through additional thermodynamic cycle [J].Applied Thermal Engineering,2020,173:115225.
- [7] 马汀山,王伟,王东晔,等.基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究[J].热力发电,2023,52(7):113-118.
- [8] 新华网.全球首套煤电机组耦合熔盐储热示范工程在靖投运[EB/OL].http://js.news.cn/2022-12/20/c_1129221190.htm,2023-08-13.
- [9] 张国龙,居文平,常东锋,等.电阻式熔盐加热器动态建模与参数化分析[J].热力发电,2023,52(9):155-161.
- [10] 陈宏芳,杜建华.高等工程热力学[M].北京:清华大学出版社,2003.161.
- [11] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,

- 1988.
- [12] 韩燕,吴玉庭,马重芳.混合硝酸盐热物性对比分析[J].储能科学与技术,2019,8(6):1224–9.
- [13] Cattani L,Maillet D,Bozzoli F,et al.Estimation of the local convective heat transfer coefficient in pipe flow using a 2D thermal quadrupole model and truncated singular value decomposition [J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2015,91:1034–1045.
- [14] Cattani L,Bozzoli F,Rainieri S.Experimental study of the transitional flow regime in coiled tubes by the estimation of local convective heat transfer coefficient[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,112:825–836.

Research on internal heat transfer characteristics of molten salt electrical resistance heater

Chang Dongfeng^{1,2}, Zhao Sihai³, Zhang Guolong^{1,2}, Zhao Yang³, Wang Wei^{1,2}, Ni Ping³, Zhang Jianyuan^{1,2}, Wu Bo³, Luo Qing^{1,2}, Wang Fei⁴

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co.,Ltd., Xi'an 710054, China; 2.Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co.,Ltd., Xi'an 710054, China; 3.Huadian Inner Mongolia Energy Co.,Ltd. Baotou Power Branch, Baotou 014013, China; 4.Huaneng Power International,Inc. Rizhao Power Plant, Rizhao 276826, China)

Abstract: The high-temperature molten salt electric heater is the core equipment for achieving electric heating conversion in the heat storage system, and mastering the internal temperature distribution characteristics is the key to promoting its structural optimization. A calculation model for traditional molten salt electrical resistance heater was established, and CFD software was used to study the temperature distribution characteristics inside the heater by solving the three-dimensional N-S equation and energy equation. The variation patterns of the temperature distribution inside the electric heater under different working conditions were obtained. The results show that the temperature difference between the molten salt and the tube wall gradually increases along the flow direction, while multiple series arrangements can effectively reduce the heat transfer temperature difference. The temperature difference between the two at the heater connection can be reduced from 27 °C to 2 °C; At the same time, due to the inconsistent density of the internal heating tubes, the temperature of the molten salt, resistance wire, and filling material in the center of the cross-section is significantly higher than that at the edge, and with the increase of load, the temperature gradient gradually increases. When the average heat flux density increases from 5.71 W/cm² to 28.57 W/cm², the temperature difference of the molten salt in the cross-section increases from 49 °C to 68 °C. It can be seen that reasonable distribution of the electric heating tube layout is the key to reducing the temperature difference in the cross-section and reducing thermal stress.

Keywords: molten salt heat storage; electric heater; numerical simulation; heat transfer characteristics