

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212264

电阻式熔盐加热器动态建模与参数化分析

张国龙^{1,2}, 居文平^{1,2}, 常东锋^{1,2}, 张建元^{1,2}, 雒青^{1,2},
王伟^{1,2}, 王东晔^{1,2}, 耿如意^{1,2}

(1.西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054; 2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 采用 Dymola 软件建立以电阻式熔盐加热器为研究对象的动态模型, 在验证模型有效性的基础上, 重点研究了在电负荷和熔盐流量扰动下及不同布置方式下电阻式熔盐加热器的瞬态特性和内部温度场。研究表明: 电负荷和熔盐流量大扰动对电阻式熔盐加热器动态特性的影响趋同, 且分别在 110 s 和 105 s 时达到其极限工况; 而二者协同扰动时, 可大幅推迟其极限工况的发生; 多个电加热器串联或并联布置能够减缓熔盐温度变化, 但却增加了系统成本。研究结论可为电阻式熔盐加热器的设计、控制和调试提供参考。

[关键词] 电阻式加热器; 熔盐; 动态模拟; 参数扰动; Dymola

[引用本文格式] 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. ZHANG Guolong, JU Wenping, CHANG Dongfeng, et al. Dynamic modeling and parametric analysis of resistance molten salt heater[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 155-161.

Dynamic modeling and parametric analysis of resistance molten salt heater

ZHANG Guolong^{1,2}, JU Wenping^{1,2}, CHANG Dongfeng^{1,2}, ZHANG Jianyuan^{1,2}, LUO Qing^{1,2},
WANG Wei^{1,2}, WANG Dongye^{1,2}, GENG Ruyi^{1,2}

(1. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: The dynamic model of resistive type molten salt heater was established by Dymola software, and the transient characteristics and internal temperature field of resistive type molten salt heater under electrical load and molten salt flow disturbance and different arrangement modes were studied on the basis of verifying the effectiveness of the model. The results show that the influence of large disturbance of electric load and molten salt flow on the dynamic characteristics of resistance type molten salt heater tends to be the same, and reaches its limit condition at 110 s and 105 s respectively. However, the occurrence of the limit condition can be greatly delayed when the two disturbances are coordinated. Multiple electric heaters arranged in series or in parallel can slow down the change of molten salt temperature, but increase the system cost. The research conclusion can provide reference for the design, control and debugging of resistance molten salt heater.

Key words: electric heater; molten salt; dynamic simulation; parameter perturbation; Dymola

近年来, 将电能转化为热能的储能方式在大规模储能方面表现出极大潜力。相较于抽水储能、压缩空气储能、电池储能和超级电容器等其他储能技术^[1], 电转热的储能方式虽然效率较低, 但却具有不受地理条件限制、材料成本低及相关技术成熟等优势^[2-5]。

Okazaki^[6]分别在光伏发电和风力发电 2 种情境下, 定量分析了电热储能技术相比于电池储能的经济优越性。Guo 等人^[7]提出一种具有电加热器的风光热混合动力系统, 通过粒子群优化算法求解储热系统最佳容量配置, 并得出在风光系统中添加电加热器和热能储存将显著提高其可靠性和经济性。

修回日期: 2022-12-21 网络首发日期: 2023-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFB1505400); 西安热工研究院有限公司自主科技项目 (GB-22-TZK12)

Supported by: National Key Research and Development Program (2019YFB1505400); Independent Technology Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (GB-22-TZK12)

第一作者简介: 张国龙 (1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为熔盐储热系统动态模拟, zhangguolong@tpri.com.cn。

Yang 等人^[8]分析了在可再生能源领域引入电加热器的影响,结果表明电加热器有助于减少发电计划偏差和弃风弃光现象。Trieb 等人^[9]通过对热电联产机组建模,得出在高度可变负荷框架内配置电热储热系统的技术可行性和经济可行性。

电加热器作为电能转化为热能储存的核心设备,具有可扩展性强、技术成熟及结构简单等优点,配合储热系统可平滑可再生能源输出、辅助火电机组调频调峰及维持电网频率稳定等。

本文以电阻式熔盐加热器为研究对象,采用集总参数法,建立全尺寸电阻式熔盐加热器数学模型;在验证模型有效性的基础上,重点研究了在电负荷和熔盐流量的扰动下及不同布置方式下电阻式熔盐加热器的瞬态特性和内部温度场,为电阻式熔盐加热器的设计与运行提供理论指导。

1 研究对象和仿真模型

1.1 Dymola 仿真平台

商业仿真平台 Dymola 基于 Modelica 语言,其包含了机械、热工、水力等物理领域的标准库,适用于包含熔盐、水等工质的热力循环瞬态特性研究^[10-12]。由于本文研究对象电阻式熔盐加热器在周向上热流分布均匀,同一截面下各点温度相差不大,所以为简化计算,本文选择使用一维建模软件 Dymola 进行模拟计算。

1.2 储热介质选择

“太阳盐”(60%NaNO₃~40%KNO₃(质量分数,下同))具有工作温度范围广、高导热性和成本较低等优点^[13-14],是一种优秀的储热介质,被广泛应用于聚光太阳能发电厂^[15-16]。“太阳盐”可以和电加热器直接接触换热,相比于电加热器加热岩石需要借助中间介质空气换热来说^[17],“太阳盐”和电加热器耦合结构简单、技术成熟,本文选取“太阳盐”为储热介质。

1.3 物理模型

电加热器主要用于流动的液态、气态介质的加热,根据加热方式不同,电加热器可分为电阻式、感应式和电弧式等。典型电阻式加热器结构示意图如图 1 所示。电阻式加热器主要由 U 型电加热管、壳体和支撑板组成(图 1a)),其中 U 型电加热管内部(图 1b))从里到外依次是合金电阻丝、填充材料和金属外壁,其具体参数见表 1。电流通过合金电阻丝产生热量,热量由内之外传递给壳侧熔盐;同

时,为避免电加热器局部温度过高,U 型管顶端不发热^[4-6,18]。

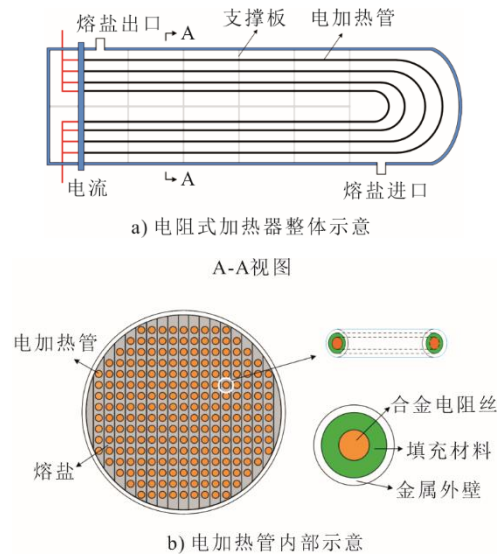


图 1 电阻式加热器结构示意图
Fig.1 Structural diagram of resistance heater

表 1 电阻式熔盐加热器物理参数

Tab.1 Physical parameters of resistance molten salt heater

项目	主要参数	数值
电加热器	额定功率/MW	15
	进口熔盐温度/°C	295
	出口熔盐温度/°C	565
壳体	直径/mm	900
	长度/m	18
	U 型电加热管根数/根	390
电阻丝 (Ni80Cr20)	最高工作温度/°C	1 200
	直径/mm	1
	比热容/(kJ·(kg·K) ⁻¹)	0.460
	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	15.0
填充材料 (氧化镁 22SR)	密度/(g·cm ⁻³)	8.14
	最高工作温度/°C	1 200
	厚度/mm	3.00
	比热容/(kJ·(kg·K) ⁻¹)	0.875
金属外壁 (S32168)	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	19.1
	密度/(g·cm ⁻³)	3.58
	最高工作温度/°C	1 400
	厚度/mm	2.75
	比热容/(kJ·(kg·K) ⁻¹)	0.500
	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	22.2
	密度/(g·cm ⁻³)	8.03

1.4 数学模型

为建立电阻式熔盐加热器数学模型作出以下假设: 1) 忽略电阻丝径向热阻; 2) 忽略电阻丝、填充材料和金属外壁之间的接触热阻; 3) 假设电阻式加热器内部全部由熔盐填充,不存在空气; 4) 将电流流过电阻丝产生的热量等效为恒热流密度

(W/m²); 5) 忽略熔盐在电阻式加热器流动中产生的压降。

电阻式熔盐加热器模型包括加热管热传导子模型和熔盐传热子模型^[19]。

1.4.1 加热管热传导子模型

使用 FVM (有限体积法) 将电阻式熔盐加热器沿长度方向划为 n 个离散控制体积, 其中单根电加热管在径向热传导模型如图 2 所示。

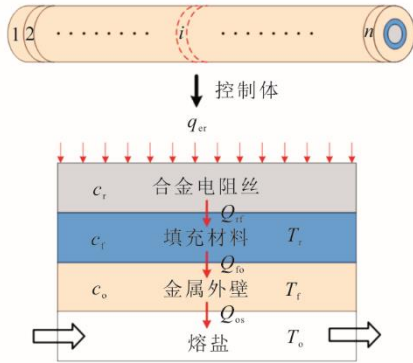


图 2 单根电加热管径向热传导示意

Fig.2 Radial heat conduction diagram of single electric heating pipe

其中, 电阻丝被电流加热温升过程的能量平衡可以描述为:

$$\frac{d(c_r m_r T_r)}{dt} = q_{er} A_r - Q_{rf} \quad (1)$$

式中: c_r 为电阻丝的比热容, J/(kg·K); m_r 为电阻丝单位体积内质量, kg; T_r 为电阻丝单位体积内平均温度, K; q_{er} 为等效热流密度, W/m²; A_r 为单位体积内电阻丝和填充材料的有效接触面积, m²; Q_{rf} 为单位时间内单位体积电阻丝向填充材料传递的热量, W。

填充材料的能量传递方程和能量平衡方程为:

$$\frac{dc_f m_f T_f}{dt} = Q_{rf} - Q_{fo} \quad (2)$$

$$Q_{rf} - Q_{fo} = A_f \frac{\lambda_f}{\delta_f} \Delta T_f \quad (3)$$

式中: c_f 为填充材料的比热容, J/(kg·K); m_f 为填充材料单位体积内质量, kg; T_f 为填充材料单位体积内平均温度, K; Q_{fo} 为单位时间内单位体积填充材料向金属外壁传递的热量, W; A_f 为单位体积内填充材料和金属外壁的有效接触面积, m²; δ_f 为填充材料的厚度, m; λ_f 为填充材料的导热系数, W/(m·K); ΔT_f 为单位体积填充材料内外壁面温差, K。

金属外壁的能量传递方程和能量平衡方程为:

$$\frac{d(C_o m_o T_o)}{dt} = Q_{fo} - Q_{os} \quad (4)$$

$$Q_{fo} - Q_{os} = A_o \frac{\lambda_o}{\delta_o} \Delta T_o \quad (5)$$

式中: c_o 为金属外壁的比热容, J/(kg·K); m_o 为金属外壁单位体积内质量, kg; T_o 为金属外壁单位体积内平均温度, K; Q_{os} 为单位时间内单位体积金属外壁向熔盐传递的热量, W; A_o 为单位体积内金属外壁和熔盐的有效接触面积, m²; δ_o 为金属外壁的厚度, m; λ_o 为金属外壁的导热系数, W/(m·K); ΔT_o 为单位体积金属外壁内外壁面温差, K。

1.4.2 熔盐传热子模型

热量通过对流换热从电加热管表面转移到管外流体, 对流换热由一维模型模拟。与电加热管热传导子模型一样, 管外空间被划分为多个控制体积, 如图 3 所示, 温度位于法向单元的中心。

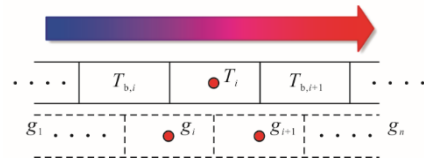


图 3 熔盐传热子模型示意

Fig.3 Schematic diagram of heat transfer sub model of molten salt

对于控制体积 i , 质量平衡方程为:

$$\frac{d(\rho_i V_i)}{dt} = g_i - g_{i+1} \quad (6)$$

式中: ρ_i 为熔盐单位体积内密度, kg/m³; V_i 为熔盐单位体积大小, m³; g_i 为熔盐单位体积内质量流量, kg/s。

控制体积 i 的能量平衡方程为:

$$\frac{d(c_{p,i} m_i T_i)}{dt} = g_i h_i - g_{i+1} h_{i+1} + Q_{os} \quad (7)$$

式中: $c_{p,i}$ 为熔盐定压比热容, J/(kg·K); m_i 为熔盐单位体积内质量, kg; T_i 为熔盐单位体积内平均温度, K; h_i 为熔盐单位体积内比焓, J/kg; Q_{os} 为单位时间内单位体积熔盐和管壁之间的对流换热量, 计算方程见式(8)。

$$Q_{os} = \alpha_i A_o (T_{ob} - T_i) \quad (8)$$

式中: α_i 为熔盐单位体积内表面传热系数, W/(m²·K), 由式(9)计算; T_{ob} 为金属外壁单位体积下的外壁温度, K。

$$\alpha_i = Nu \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (9)$$

考虑到本文熔盐流动的雷诺数介于 400~2 300 时, 可使用经验关联式(10)计算 Nusselt 数^[20]。

$$Nu = 1.61 \left(\frac{RePr}{l/D} \right)^{0.63} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.32} \quad (10)$$

式中： Re 为雷诺数； Pr 为普朗特数； l 为长度， m ； D 为特征长度， m ； μ_f 、 μ_w 分别为熔盐和管壁温度下的熔盐黏度系数， $kg/(m \cdot s)$ 。

2 模型验证

本文在对电阻式熔盐加热器动态模型验证过程中，构建了一个与文献[21]中相同尺寸的电加热管和熔盐模型，用于比较动态模型的准确性，比较结果如图4、图5所示。由图4及图5可知：加热管出口熔盐温度和管壁温度的模拟值和实验值变化趋势一致，均是先降低后趋于平稳；熔盐出口温度和管壁温度的模拟值与实验值最大偏差不到3%，主要发生在瞬态过程中，在稳态时，模拟值与实验值最大偏差不到1%。因此，本文所建立的电阻式熔盐加热器模型的准确性得以证明。

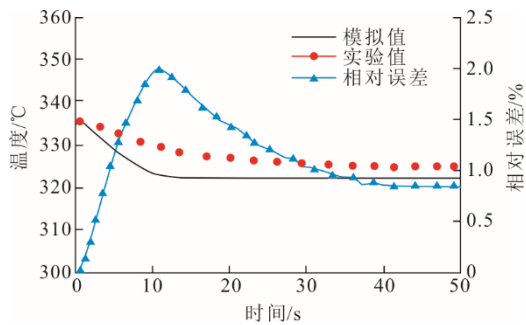


图4 出口熔盐温度的模拟值与文献[21]实验值结果对比
Fig.4 Comparison between simulated value of outlet molten salt temperature and experimental value in literature [21]

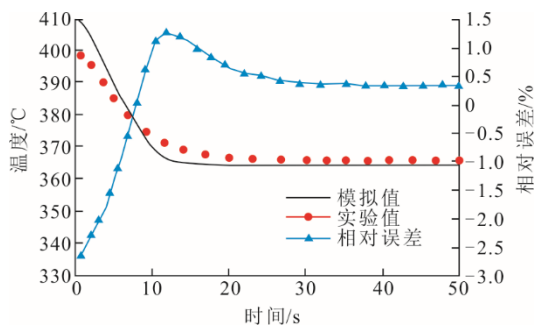


图5 出口管壁温度的模拟值与文献[21]实验值结果对比
Fig.5 Comparison between simulated value of outlet pipe wall temperature and experimental value in literature [21]

3 数值模拟结果与分析

电阻式熔盐加热器在接入可再生能源系统时，电负荷将频繁波动，为保证其运行稳定且高温熔盐不分解，本节将深入分析在电功率和熔盐流量扰动下及不同布置方式时其动态性能，这些研究结果将为其控制策略的指定提供研究基础。

3.1 电功率扰动

3.1.1 温度分布情况

当熔盐流量保持不变，而电负荷从7.5 MW突增为15.0 MW时，在出口径向截面上熔盐平均温度、金属管壁温度、填充材料外表面温度以及电阻丝温度的变化曲线如图6所示。由图6可知：在0~20 s内出口电加热管内部温度快速升高，而熔盐温度变化缓慢；随着时间推移，在20 s后，出口熔盐温度跟随电加热管温度的升高而升高，但熔盐温度变化速率要小于壁温变化速率。这主要是因为电加热器传热过程中的热阻主要集中于管壁和熔盐之间，熔盐温度变化要滞后于电加热管温度变化。

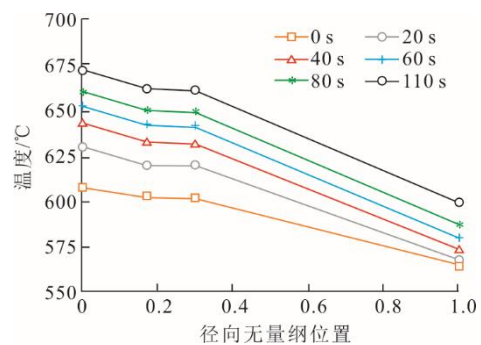
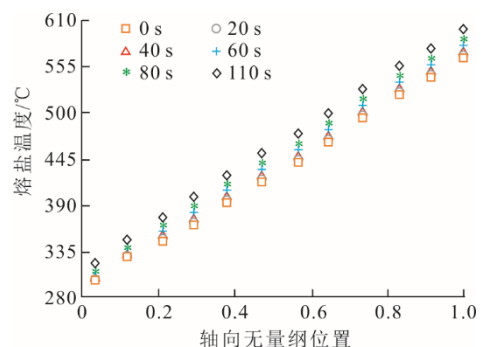


图6 电加热器出口处径向温度随时间变化曲线
Fig.6 Time varying curve of radial temperature at the outlet of electric heater

当电负荷阶跃变化而熔盐流量保持不变时，在轴向上熔盐平均温度及电加热管壁温随时间变化曲线如图7、图8所示。由图7可知，熔盐温度在稳态和动态变化过程中都保持着沿轴向线性升高趋势，且在电加热器出口处达到最高熔盐温度。在110 s时电加热器出口熔盐温度率先达到600 °C，超出了“太阳盐”的安全工作温度范围，将发生严重热分解现象；同时其过高的工作温度导致与其接触的钢材发生腐蚀，甚至可能会引发电加热管破裂，造成巨大的经济损失[22-23]。而此时电加热器内部电阻丝最高温度为672 °C，远远低于电加热管安全温度设定值1200 °C。



a) 电加热器轴向熔盐平均温度变化曲线

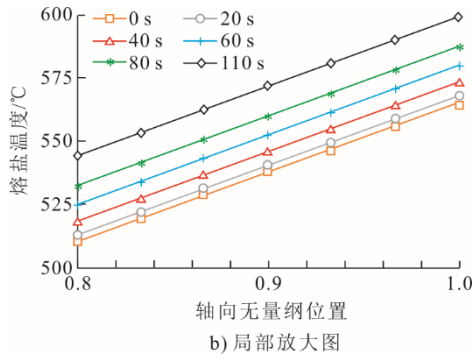


图 7 电加热器轴向熔盐平均温度变化曲线
Fig.7 Average temperature change curve of electric heater axial molten salt

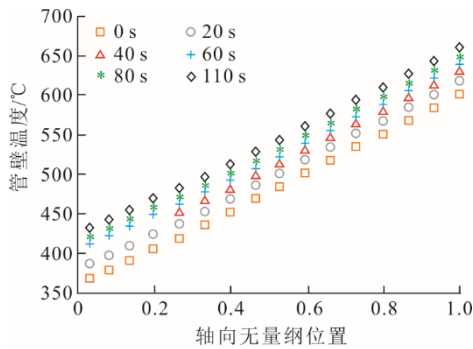


图 8 电加热器轴向管壁温度变化曲线
Fig.8 Temperature change curve of axial tube wall of electric heater

由图 8 可知：管壁温度沿轴向逐渐升高，且在出口处达到最高管壁温度；随着时间推移，管壁温度逐渐升高，并在 110 s 出口熔盐温度达到 600 °C，管壁最高温度为 661 °C。电加热管壁温度不宜过高，过高的管壁温度会加快熔盐对电加热管的腐蚀，严重可能会导致电加热器停止运行。

3.1.2 不同离散程度

由于本文使用分段集总参数法建立电阻式熔盐电加热器模型，其离散化程度决定了数学模型的精确度。因此，本文为选择合适的离散化程度，分别选取了单位长度为 1.80、0.60、0.36、0.18 m 的数学模型，计算不同离散程度下的电加热器出口管壁温度变化曲线，计算结果如图 9 所示。由图 9 可知，离散程度越高出口管壁温度越高，模型精度也就越高。这主要是因为管壁模型采用一维建模方法，忽略了轴向导热，而离散化程度越高相邻单元间的轴向导热热量越小，计算误差也就越小，模型精度越高。因此，本文在兼顾减少计算资源和满足模型精度的条件下，选取单位长度为 0.36 m 的数学模型。

3.2 熔盐流量扰动

当电负荷保持不变，在 20 s 时熔盐流量从 36 kg/s

突减为 18 kg/s，电加热器出口熔盐温度和壁温随时间变化曲线如图 10 所示。

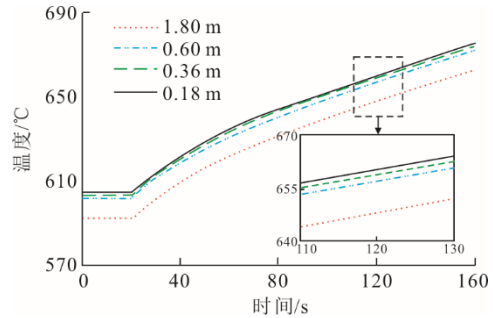


图 9 不同离散程度下电加热器出口管壁温度变化曲线
Fig.9 Temperature change curve of electric heater outlet pipe wall under different dispersion degrees

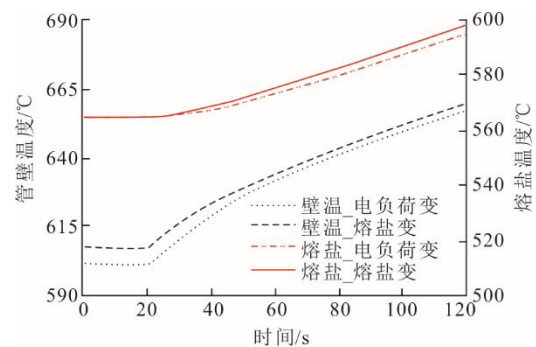


图 10 电负荷和熔盐流量同一扰动程度下电加热器出口温度变化曲线
Fig.10 Electric heater outlet temperature change curve under the same disturbance degree of electric load and molten salt flow

由图 10 可知，电加热器出口管壁温度快速升高而熔盐温度升高缓慢，在熔盐流量扰动 105 s 后，出口熔盐温度达到危险温度 600 °C，此时电加热管壁温为 662 °C。将电负荷扰动和熔盐流量扰动计算结果对比来看，在扰动程度相同时，电加热器出口熔盐温度变化速率在熔盐流量扰动时要表现的更快，而壁温变化速率的对比结果则相反，这主要是因为熔盐流量扰动时整体熔盐速率要高于电负荷扰动时的熔盐速率，进而导致较高的对流传热系数和熔盐温度变化率。但整体来看，电负荷和熔盐流量在同一扰动程度下的动态性能趋于一致，只不过熔盐流量在实际运行时受制于阀门动作速度、逻辑判断过程的限制无法达到如电负荷一样较快的变化速率。

3.3 电负荷和熔盐流量同时变化

在电负荷从 7.5 MW 突增为 15.0 MW，熔盐流量从 18 kg/s 变为 36 kg/s 分别经历 25、50、100、200 s 时，电加热器出口熔盐温度和壁温变化曲线如图 11 及图 12 所示。

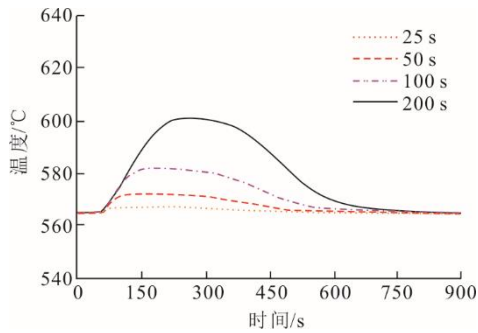


图 11 熔盐流量和电负荷同时变化时电加热器出口熔盐温度变化曲线

Fig.11 Change curve of molten salt temperature at electric heater outlet when molten salt flow and electric load change simultaneously

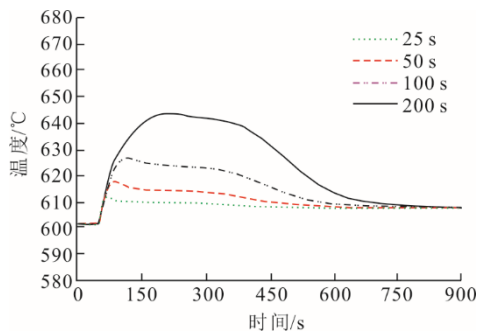


图 12 熔盐流量和电负荷同时变化时电加热器出口管壁温度变化曲线

Fig.12 Temperature change curve of electric heater outlet pipe wall when molten salt flow and electric load change simultaneously

由图 11 及图 12 可知：在整个过程中，出口管壁温度先快速升高后缓慢降低，但最终由于热通量增加壁温稳态温度增加；熔盐流量在跟随电负荷变化时能够有效减少出口熔盐温度的波动，熔盐流量响应时间越短，出口熔盐温度的变化幅度越小。计算得出，当电负荷从 50% 负荷阶跃变为 100% 负荷时，如果在 25 s 内完成熔盐流量响应则出口熔盐能够维持温度不变；但是如果熔盐流量变化响应时间超过 200 s，则在调节过程中熔盐有热分解风险。同时，可以看出熔盐流量在跟随电负荷变化时，熔盐流量受响应时间限制仍然存在一定热分解风险，但是电加热器内电阻丝和填充材料短时间内则不存在融化风险。

3.4 电加热器布置方式

在同一电负荷扰动时，单个电加热器、多个电加热器串联和并联 3 种布置方式下出口熔盐温度变化和壁温变化情况如图 13 及图 14 所示。由图 13 可知，在电负荷扰动 110 s 后，单个电加热器出口熔盐温度达到 600 °C 时，布置方式为串联和并联时出口温度分别为 582 °C 和 579 °C，这种现象

可以通过热容量的增加减缓了温度变化速率来解释。由图 14 可知：多个电加热器运行增加了传热面积，减少热流密度的同时降低了壁温变化速率，提高了电加热器运行稳定性；同时，由于并联下熔盐流通面积的增加，导致了熔盐流速降低及传热系数的减小，所以多个电加热器并联布置时壁温要高于串联布置。值得注意的是，多个电加热器使用虽然能改善电加热器动态性能，降低熔盐热分解风险，但同时也额外增加了系统成本。

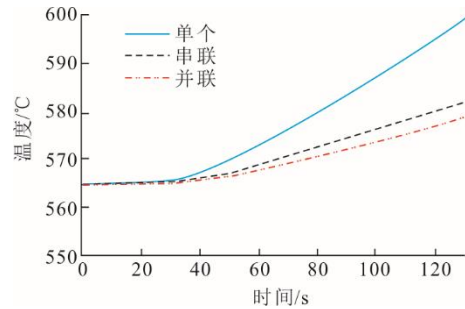


图 13 不同布置方式下电加热出口熔盐温度变化曲线
Fig.13 Molten salt temperature change curve at electric heating outlet under different layout modes

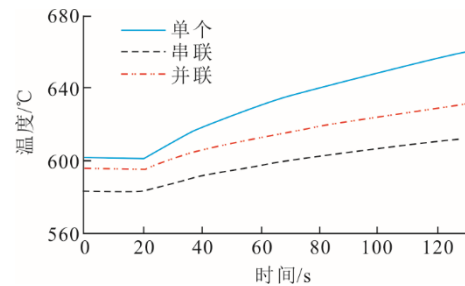


图 14 不同布置方式下电加热出口管壁温度变化曲线
Fig.14 Temperature change curve of electric heating outlet pipe wall under different layout

4 结 论

本文采用离散化集总参数法，建立了电阻式熔盐加热器的数学模型，重点研究了在电负荷和熔盐流量的扰动下及不同布置方式下电阻式熔盐加热器的瞬态特性和内部温度场，主要结论如下。

1) 电阻式熔盐加热器在电负荷扰动和熔盐流量扰动时，在静态工况和动态过程中，温度从入口至出口均保持着线性升高趋势，通过在出口处增加熔盐温度测点就可以掌握内部熔盐温度分布。

2) 电负荷和熔盐流量大扰动对电阻式熔盐加热器动态特性的影响趋同，而实际运行中由于熔盐流量的反应速度受制于阀门动作和控制系统反应往往调节速率不及电负荷。

3) 50% 电负荷突增为 100% 或 100% 熔盐流量

突减为50%，将分别导致电加热器出口熔盐在110s和105s时热分解风险极大增加；而二者协同扰动时，可大幅推迟其极限工况的发生；反应时间越短，出口熔盐温度和管壁温度波动越小。

4) 虽然电加热器传热过程的热阻主要集中在金属外壁和熔盐之间，熔盐温度变化往往滞后于电加热管，但是在50%电负荷突增情况下，出口熔盐发生热分解，电阻丝最高温度为672℃，仍在安全运行范围之内。

5) 多个电加热运行时由于热容量增加，相比于单个电加热器运行其“热惰性”更大。在同一电负荷扰动情况下，单个电加热器出口熔盐温度达到危险温度600℃时，串联和并联2种布置下的出口熔盐温度分别为582℃和579℃。而以上多个电加热器运行，在改善动态性能的同时也额外增加了系统成本。

值得注意的是，本文未考虑温度变化对电阻丝阻值的影响，这对本文来说不是一个关键因素，后续更详细的研究可以考虑重视。

[参考文献]

- [1] TAN K M, BABU T S, RAMACHANDARAMURTHY V K, et al. Empowering smart grid: a comprehensive review of energy storage technology and application with renewable energy integration[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 39: 102591.
- [2] O'DONOVAN A, GRIMES R, SIKORA P. Enhanced performance of air-cooled thermal power plants using low temperature thermal storage[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 1673-1685.
- [3] 肖春梅. 电储能提升火电机组调频性能研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(6): 98-105.
XIAO Chunmei. Research on using electric energy storage to improve frequency regulation performance of thermal power units[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(6): 98-105.
- [4] YONG Q, TIAN Y, QIAN X, et al. Retrofitting coal-fired power plants for grid energy storage by coupling with thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 119048.
- [5] BASTA A, BASTA V, SPALE J, et al. Conversion of combined heat and power coal-fired plants to Carnot batteries-Prospective sites for early grid-scale applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105548.
- [6] OKAZAKI T. Electric thermal energy storage and advantage of rotating heater having synchronous inertia[J]. *Renewable Energy*, 2020, 151: 563-74.
- [7] GUO S, HE Y, PEI H, et al. The multi-objective capacity optimization of wind-photovoltaic-thermal energy storage hybrid power system with electric heater[J]. *Solar Energy*, 2020, 195: 138-149.
- [8] YANG Y, GUO S, LIU D, et al. Operation optimization strategy for wind-concentrated solar power hybrid power generation system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 160: 243-250.
- [9] TRIEB F, LIU P, KOLL G. Thermal storage power plants (TSPP): operation modes for flexible renewable power supply [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104282.
- [10] ELMQVIST H, MATTSSON S-E. Modelica-the next generation modeling language-an international design effort[C]. *Proceedings of First World Congress of System Simulation*, 1997: 1-3.
- [11] FRITZSON P, ENGELSON V. Modelica-a unified object-oriented language for system modeling and simulation[C]. *Proceedings of the European Conference on Object-Oriented Programming*, 1998: 67-90.
- [12] WETTER M, ZUO W, NOUIDUI T S, et al. Modelica buildings library[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2014, 7(4): 253-270.
- [13] NUNES V M B, QUEIROS C S, LOURENCO M J V, et al. Molten salts as engineering fluids: a review Part I. molten alkali nitrates[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 603-611.
- [14] SKRBEC K, BARTŮŇEK V, SEDMIDUBSKÝ D. Molten salt-based nanocomposites for thermal energy storage: materials, preparation techniques and properties[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 164: 112548.
- [15] 吴旺松, 匡敬柱, 毛正江, 等. 管内加装电伴热装置时熔盐熔化过程研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(3): 79-87.
WU Wangsong, KUANG Jingzhu, MAO Zhengjiang, et al. Study on melting process of molten salt in pipe equipped with a built-in electric tracing heater[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(3): 79-87.
- [16] MUÑOZ-SÁNCHEZ B, NIETO-MAESTRE J, IPARRA-GUIRRE-TORRES I, et al. Molten salt-based nanofluids as efficient heat transfer and storage materials at high temperatures. An overview of the literature[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 3924-3945.
- [17] HEYDE M V D. Electric thermal energy storage based on packed beds for renewable energy integration[D]. Hamburg: Technische Universität Hamburg, 2022: 1.
- [18] DUMONT O, FRATE G F, PILLAI A, et al. Carnot battery technology: a state-of-the-art review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32:101756.
- [19] ZHANG Q, LI X, WANG Z, et al. Modeling and simulation of a molten salt cavity receiver with Dymola [J]. *Energy*, 2015, 93: 1373-1384.
- [20] HE S, LU J, DING J, et al. Convective heat transfer of molten salt outside the tube bundle of heat exchanger[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 59: 9-14.
- [21] SHEN X, LU J, DING J, et al. Transient heat transfer performance of molten salt tubular receiver[J]. *Energy Procedia*, 2019, 158: 541-546.
- [22] BONK A, BRAUN M, SÖTZ V A, et al. Solar salt-pushing an old material for energy storage to a new limit [J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114535.
- [23] SOLEIMANI DORCHEH A, DURHAM R N, GALETZ M C. Corrosion behavior of stainless and low-chromium steels and IN625 in molten nitrate salts at 600℃[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 144: 109-16.

(责任编辑 邓玲惠)