

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.05.002

# 熔盐储罐热分层混温过程研究

Research on thermal stratification and control process in molten salt storage tanks

崔凯平<sup>1</sup>, 韩伟<sup>1\*</sup>, 倪煜<sup>2</sup>, 韩振兴<sup>3</sup>, Francisco MANGAS<sup>4</sup>  
CUI Kaiping<sup>1</sup>, HAN Wei<sup>1\*</sup>, NI Yu<sup>2</sup>, HAN Zhenxing<sup>3</sup>, Francisco MANGAS<sup>4</sup>

(1.中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075; 2.中国能源建设集团规划设计有限公司, 北京 100120; 3.山东电力建设第三工程有限公司, 山东 青岛 266000; 4.Emypro S.A., Sabadell 08203, Spain)  
(1.Northwest Electric Power Design Institute Company Limited, Xi'an 710075, China; 2.China Energy Engineering Group Planning and Engineering Company Limited, 100120 Beijing, China; 3.SEPCOIII Electric Power Construction Company Limited, Qingdao 266000, China; 4.Emypro SA, Sabadell 08203, Spain)

**摘要:** 储热系统是太阳能热发电系统的核心系统之一,在调试、大修以及连续较差气象条件下,储罐面临较长时间的停机,从而形成热分层现象,对储罐安全性造成影响。加大储罐内的扰动是破坏热分层现象的最有效手段,目前在储罐设计研究中对热分层现象破坏研究内容较少。通过流体力学(CFD)模拟计算分析了熔盐储罐发生热分层现象后通过再循环扰动热分层被破坏现象。计算结果显示熔盐在储罐内部以 100 kg/s 流量再循环扰动时能够在 2.8 h 得到充分混合。在低温熔盐储罐采用分配环进行混温时,需要 3.1 h,储罐内熔盐最大温差下降至 14.5 °C。因此可将此流量作为该项目实际运行阶段发生热分层现象后的再循环扰动流量。

**关键词:** 太阳能热发电;熔盐储罐;分层混温;CFD;分配环;储热系统

**中图分类号:** TK 514 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)05-0008-06

**Abstract:** Heat storage system is one of the core systems in a CSP plant. During the commissioning, overhaul or under continuous poor weather conditions, storage tanks will encounter long-period shutdowns, resulting in thermal stratification which will affect the storage tank security. Intensifying the disturbance in storage tanks is the most effective means to eliminating the thermal stratification phenomenon, but there is little research on this method in storage tank design. The thermal stratification elimination realized by recirculation disturbance after the formation of thermal stratification in molten salt storage tanks was analyzed by CFD simulation. The results show that the molten salt recirculating inside the tanks can be fully mixed in 2.8 h when it is disturbed by a 100 kg/s flow. In a cold tank with a circulation pipe, it takes 3.1 h for mixing, and the maximum temperature difference of the molten salt in the storage tank drops to 14.5 °C. Therefore, this flow can be regarded as the recirculating disturbance flow after thermal stratification in the operation phase of the project.

**Keywords:** CSP; molten salt storage tank; thermal stratification; CFD; circulation pipe; heat storage system

## 0 引言

太阳能热发电技术是一种可持续稳定发电的新能源发电技术,在太阳能热发电系统中,储热系统是使光热技术具备在非光照条件下发电能力的关键设备。光热发电站中储热系统通常采用双罐熔盐储热技术,通过熔盐显热来储存吸收太阳辐照热能。近年来,随着多能互补项目以及储热供热项目的不断增加,光热电站的储热规模也不断扩大。因此对储热系统的精细化设计要求也不断加大。

但是,储热系统面对的工况较为复杂,且近年来尚没有针对高温熔盐储罐的设计规范,目前对光热电站熔盐储罐的设计还普遍采用 API650 标准,并辅之以有限元应力计算做局部调整。但是由于有一些复杂工况没有在设计过程中充分考虑,储罐在运行过程中将面临一些较为苛刻的工况从而导致一定的泄漏隐患。以新月沙丘项目为例,由于储罐泄漏造成了长达 8 个月的停机,每个月的经济损失预计在 400 万美元左右<sup>[1]</sup>。而国际上部分研究人员认为该次泄漏有可能是因为局部应力集中导致<sup>[2]</sup>。

因此对储罐进行精细化的设计,在设计过程中充分考虑工况影响,是目前储罐设计研究过程中的共识。

收稿日期:2020-03-20;修回日期:2020-05-02  
基金项目:西北电力设计院有限公司科研项目(XB1-JX02-2020)

早在2012年 Carlos 等人<sup>[3]</sup>就建立了储罐的热力学模型,通过热力学模型计算来对储罐进行精细化设计。2015年, Suáñez 等人<sup>[4]</sup>针对储罐基础散热进行了数值分析,研究发现储罐基础具有较大的散热损失,需要在设计过程中引起充分重视。2018年, Iranzo 等人<sup>[5]</sup>对储罐内的分配环混合特性进行了研究,提出了采用喷嘴的分配环能够具备更好的混合特性,并研究了喷嘴的尺寸和喷射角度。2020年, 韩伟等人<sup>[6]</sup>对储罐精细化设计进行了研究,并将研究结果应用于商业项目中,采用精细化设计的熔盐储罐经受住了预热、化盐、升温等阶段的考验,验证了其设计方案的可行性和安全性。

除了上述工况外,当储罐在调试阶段、大修阶段以及长时间恶劣环境下会有较长时间的停机,这会导致储罐的熔盐处于长期的静止状态,由于储罐基础强烈的散热作用,储罐会产生热分层现象,当沿储罐垂直方向产生较大的温差时会对储罐产生一定的危害,从而导致泄漏或其他更严重的事故发生。因此,需要对热分层现象进行破坏,使储罐内熔盐温度充分混合。本文拟对热分层现象的破坏方案进行研究,计算采用的是某商业项目的实际储罐模型,冷、热储罐分别采用2种不同混温方案,其中高温熔盐储罐采用再循环管道混温,低温熔盐储罐采用分配环喷嘴混温。

## 1 储罐模型参数及边界条件

### 1.1 储罐物理模型

某项目储罐直径30.0 m,高14.5 m。有效容积为9 773 m<sup>3</sup>。储罐外侧壁用岩棉保温层包裹,厚度为450 mm,密度约为100 kg/m<sup>3</sup>,内部包含分配环和再循环管道。建立模型如图1所示<sup>[7-8]</sup>。

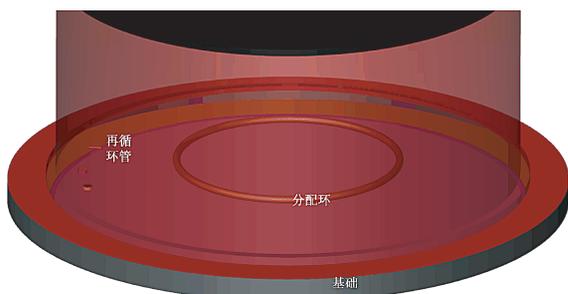


图1 某项目储罐模型建立

Fig. 1 Model of a tank in a project

储罐基础主要采用陶粒土铺设,深度约为1.4 m,底部是通风管,用于减少储罐底部热蓄积现象<sup>[9-10]</sup>。

储罐内设置再循环口:直径219 mm,壁厚10 mm。

储罐内设置分配环:管道直径480 mm,壁厚24 mm,分配环上部喷嘴直径20 mm。储罐内熔盐的参数见表1<sup>[11]</sup>。

表1 熔盐参数

Tab. 1 Parameters of the molten salt

温度/ ℃	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	动力黏度/ (Pa·S)	比热/ [kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	导热系数/ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]
350	1 875	0.002 35	1.50	0.595

### 1.2 储罐数学模型

储罐模型采用三维模型,物理边界条件、收敛条件等设置如下。

(1)入口边界(分配环喷嘴出口和再循环熔盐流出口)。选择质量入口条件,紊流强度和紊流黏性比根据储罐中介质的压力、质量流率对应的物性确定。

(2)出口边界。再循环吸入口选质量出口流量作为边界条件。出口流量与入口流量相同。顶部排气孔选择压力出口边界。

(3)其他边界。四周壁面和顶盖保温层外壁为热对流边界。储罐基础采用热流密度边界条件,根据测算,储罐的基础散热量为76.92 W/m<sup>2</sup>。

(4)模拟目标。储罐内熔盐垂直方向最大温差不高于15℃。

(5)网格独立性验证。取再循环熔盐流出口流速进行网格独立性验证,经验证,网格加密到840万后具备网格独立性,因此最终计算选取网格数量为840万网格。

本模拟采用控制方程组如下<sup>[12]</sup>。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0,$$

质量输运方程

$$\frac{\partial (\rho c)}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial (\rho u_j c)}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\eta}{Pr_1(c)} \frac{\partial (\rho c)}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' c'} \right],$$

Reynolds 方程

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \sum_j \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \eta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right],$$

式中: $x_i, x_j$ 为空间坐标; $u_i, u_j$ 为空间时均速度分量; $u_i', u_j'$ 为脉动速度分量; $\rho$ 为熔盐密度; $g_i$ 为质量力矢量; $p$ 为压力; $\eta$ 为层流动力黏度; $c'$ 为前行油品脉质量浓度; $c$ 为前行油品的质量浓度; $Pr_1(c)$ 为层流施密特数。

本项目采用工程计算应用中最为广泛的双方程  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型<sup>[13]</sup>。

$\kappa$  方程

$$\rho \left[ \frac{\partial \kappa}{\partial \tau} + u_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + \eta_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \overline{u'_i \rho g_i} - \rho \varepsilon,$$

$\varepsilon$  方程

$$\rho \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + u_\kappa \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_\kappa} \right] = \frac{\partial}{\partial x_\kappa} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_\kappa} \right] + C_1 \eta_t \frac{\varepsilon}{\kappa} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa},$$

式中： $k$ 为紊流脉动动能， $J$ ； $\varepsilon$ 为紊流脉动动能的耗散率， $\%$ ； $\sigma$ 为湍流普朗特数； $\eta_t$ 为湍流黏度系数；常数  $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92$ 。

计算所用求解器设置见表 2。

表 2 求解器设置

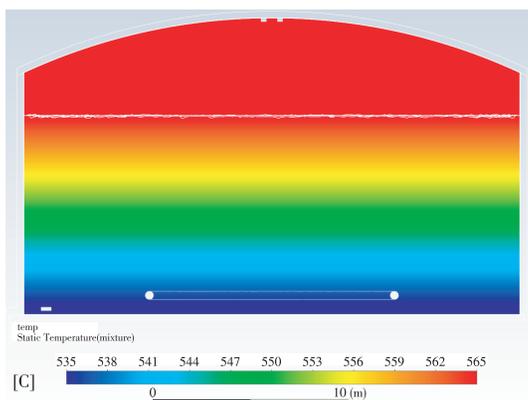
Tab. 2 Settings of the solver

计算模型	模型设定
求解器	耦合求解器
湍流模型	$\kappa$ - $\varepsilon$ 双方程模型
壁面函数	非平衡壁面函数
求解精度	二阶精度

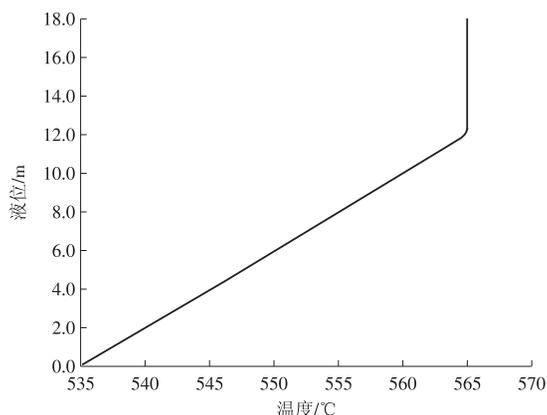
## 2 热分层破坏 CFD 计算

### 2.1 高温熔盐罐再循环扰动模拟

由于调试进度、大修以及环境条件等因素影响，储罐可能需要静置较长时间从而产生一定的液位温差，或者当电站运行期间需要长期停机检修时，需要开启再循环增大储罐内扰动，减小罐内温差。储罐内初始温差如图 2 所示。



a 温度分布  
a Temperature contour



b 温度分布曲线  
b Temperature distribution

图 2 高温熔盐储罐初始温度分布 ( $t=0$  s)

Fig.2 Initial temperature distribution of the hot tank ( $t=0$  s)

假设在某个情况下，高温熔盐储罐发生了热分层现象，其熔盐温度呈现上高下低的情况，总温差为  $30\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于储罐基础的散热较大，因此出现上高下低的温度分布情况的可能性较大<sup>[12]</sup>。此时需要开启再循环管道将底部熔盐吸入再循环管道中，并将等量熔盐打出储罐底部再循环排盐口。

通过模拟发现，在再循环的扰动下，储罐内的垂直温差逐渐缩小，混合 1.7 h 后熔盐垂直温差降低至  $14\text{ }^\circ\text{C}$  (如图 3 所示)，混合 2.8 h 后，储罐内熔盐垂直方向上最大温差从最初的  $30\text{ }^\circ\text{C}$  缩小到  $10\text{ }^\circ\text{C}$  以内 (如图 4 所示)，计算所用流量为  $100\text{ kg/s}$ ，能够满足项目破坏热分层现象需求。需要注意的是，在模拟中发现，储罐液位上表面中心区域的温度较高，这是由于在储罐内形成了稳定环流，上表面中心区域液体流动性较差，因此温度较高。但这并不影响储罐的壁面温度，因此不会造成安全隐患。

储罐内不同液位处熔盐的温度变化情况如图 5 所示。通过模拟可以看出，通过开启热泵再循环，储罐内熔盐温度整体向混合均匀的方向调整，证明该设计合理可靠。通过流体动力学 (CFD) 模拟分析可得不同阶段储罐内熔盐及液面上空气的温度特征，如图 5—8 所示。

### 2.2 低温熔盐罐分配环扰动模拟

与高温熔盐罐不同，低温熔盐罐采用分配环作为扰动源。通过模拟计算，其温度场变化特征如下。

假设在某情况下，低温熔盐储罐发生热分层现象，其熔盐温度呈现上高下低状态，总温差为  $30\text{ }^\circ\text{C}$ 。此时需要开启分配环管道，将底部熔盐吸入再循环管道中，并将等量熔盐打出储罐底部分配环的喷嘴，流量选择  $200\text{ kg/s}$ ，2.1 h 后流量升高至  $300\text{ kg/s}$ 。

与热罐采用再循环管道作为扰动源不同，低温

熔盐罐采用分配环作为扰动源,由于分配环的喷嘴直径较小,总阻力较大,因此需要更大的流量才能提供有效的扰动作用,在低温熔盐罐计算中采用的流量为 200~300 kg/s。

通过计算发现,虽然低温熔盐罐扰动流量大于高温熔盐罐,但是由于分配环阻力作用,其扰动区

域较小,在扰动 3.1 h 后的温差依然有近 14.5 °C,高于采用再循环管道的扰动作用。

通过对比发现,采用分配环和再循环管道均能够实现对储罐的热分层扰动,仅从热分层破坏角度来看,采用再循环管道的破坏效果更为明显,且所需流量较小,但是也可以看出,采用再循环管道扰

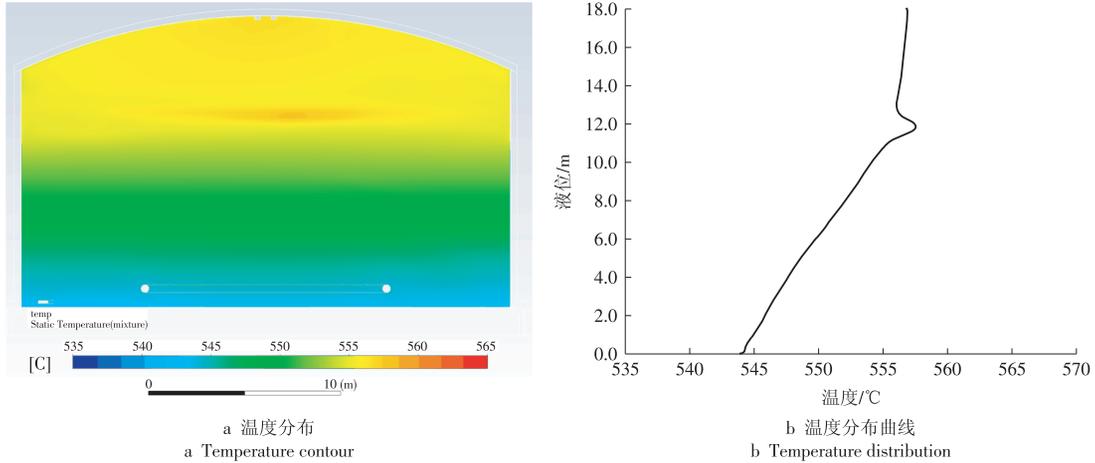


图 3 高温熔盐储罐混合 1.7 h 后的温度分布  
Fig. 3 Temperature distribution after 1.7 h mixture of the hot tank

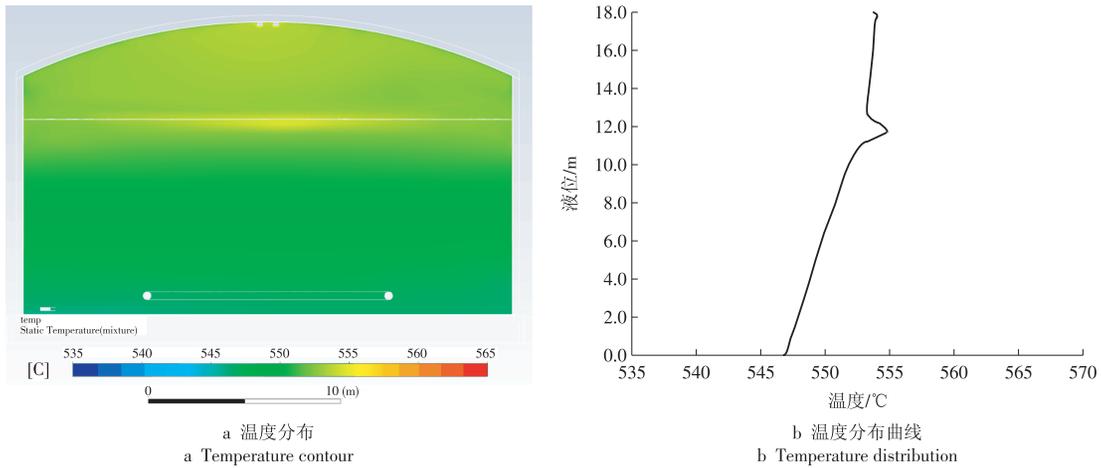


图 4 高温熔盐储罐混合 2.8 h 后的温度分布  
Fig. 4 Temperature distribution after 2.8 h mixture of the hot tank

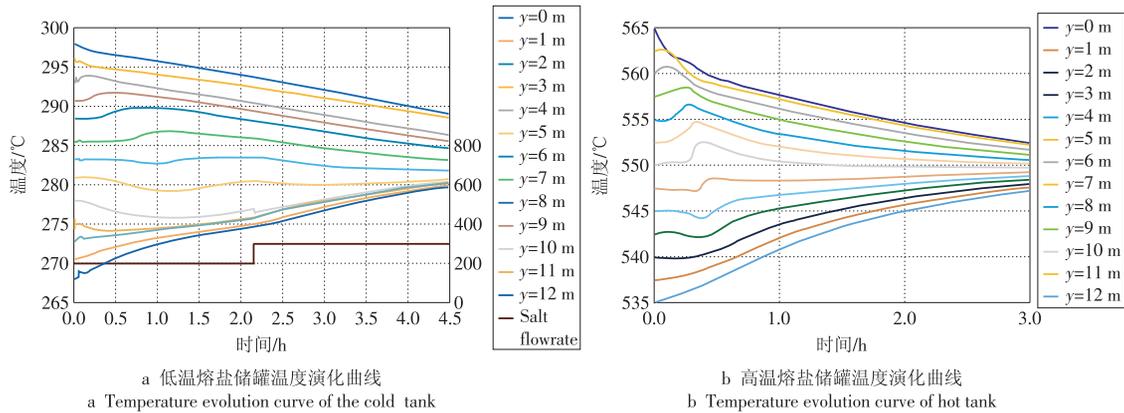


图 5 储罐壁面温度变化特征及温升速率变化  
Fig. 5 Temperature variation and temperature rise rate of the storage tank wall

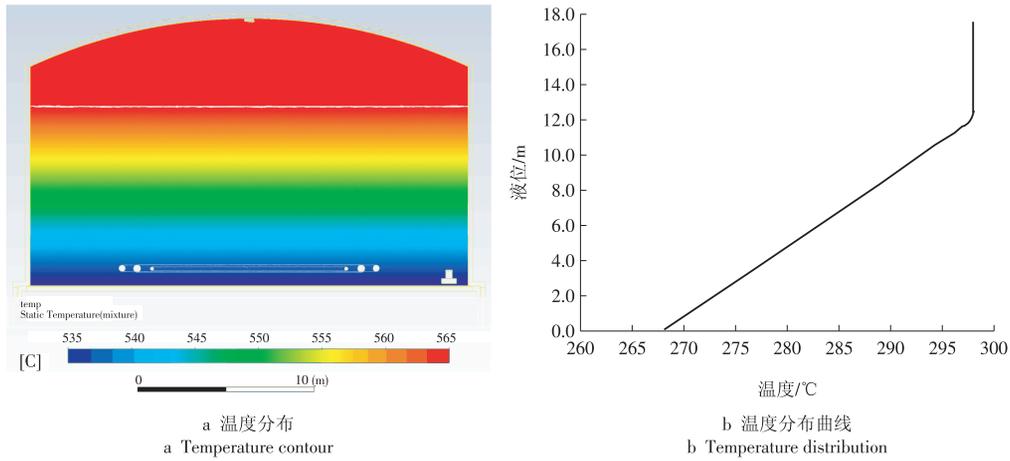


图 6 低温熔盐储罐初始温度分布(  $t=0$  s)

Fig.6 Initial temperature distribution of the cold tank (  $t=0$  s)

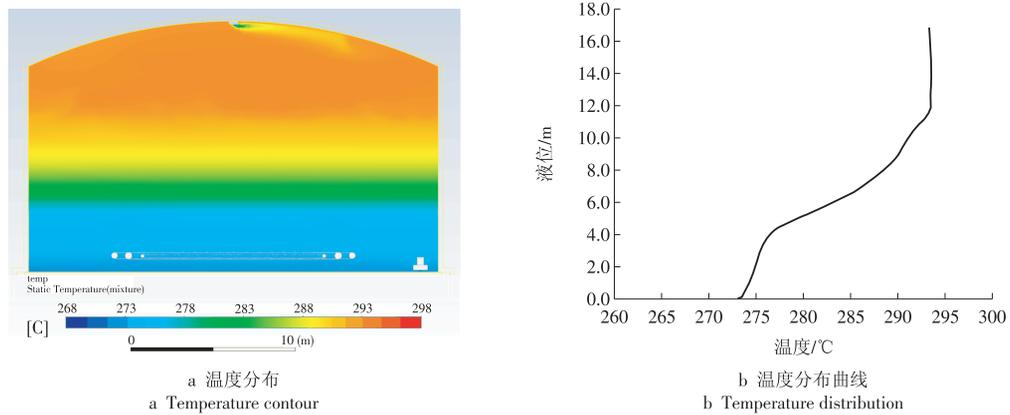


图 7 低温熔盐储罐混合 1.7 h 后的温度分布

Fig.7 Temperature distribution after 1.7 h mixture of the cold tank

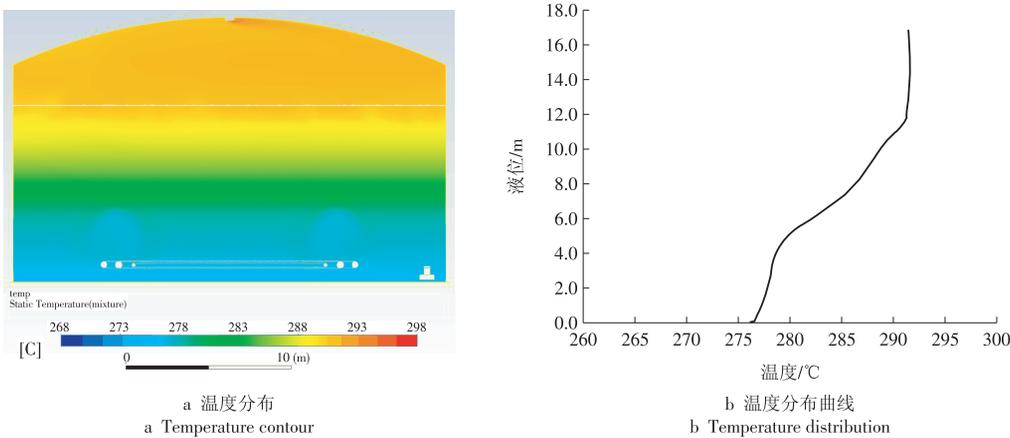


图 8 低温熔盐储罐混合 3.1 h 后的温度分布

Fig.8 Temperature distribution after 3.1 h mixture of the cold tank

动,会在储罐中形成大环流,在液面中心位置造成较高的温度区域,因此上述 2 种方案均可作为热分层现象的破坏方案,如流量能满足模拟结果要求,则可根据储罐所配熔盐泵流量参数选择方案。

### 3 结论

通过对储罐热分层现象进行模拟,验证了某项

目在高低温熔盐储罐中采用再循环管道和分配环进行扰动产生的热分层破坏现象,通过研究发现,在高温熔盐储罐采用再循环管道进行扰动,采用 100 kg/s 扰动 2.8 h 后能够将温差控制在 10 °C 以内,但是会在储罐液面中心位置处形成稳定大环流,在低温熔盐储罐采用分配环进行扰动,采用 200 kg/s 扰动 2.1 h,300 kg/s 流量扰动 3.1 h 后能够将温

差控制在 15 °C 以内。上述过程均满足项目对储罐热分层现象的破坏要求,可在项目中实施。

#### 参考文献:

- [1] 导致新月沙丘光热电站熔盐泄漏事故的七个原因分析 [EB/OL]. (2016-12-06). <http://www.cspplaza.com/article-8519-1.html>.
- [2] JIN Huashan, JING Ding, JIAN Fenglu. Numerical investigation of high-temperature molten salt leakage [J]. Energy Procedia, 2015, 69(3): 2072-2080.
- [3] PÉREZ-SEGARRA C D, RODRÍGUEZ I, OLIVA-LIENA A, et al. Detailed numerical model for the resolution of molten salt storage tanks for CSP plants [C]//International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, 2012: 1-8.
- [4] SUÁREZ C, PINO J, ROSA F, et al. Analytical approach to ground heat losses for high temperature thermal storage systems [J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(14): 439-454.
- [5] IRANZO A, SUÁREZ C, GUERRA J. Mixing enhancement in thermal energy storage molten salt tanks [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 168(15): 320-328.
- [6] 韩伟, 崔凯平, 赵晓辉, 等. 光热电站储热系统设计与储罐预热方案研究 [J]. 华电技术, 2020, 42(4): 42-46.  
HAN Wei, CUI Kaiping, ZHAO Xiaohui, et al. Energy storage system design for the CSP plants and tank preheating strategy research [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 42-46.
- [7] 韩伟, 赵晓辉, 张智博, 等. 弃风弃光电量的光热回收系统运行特征研究 [J]. 电力建设, 2019, 40(S1): 90-97.  
HAN Wei, ZHAO Xiaohui, ZHANG Zhibo, et al. Performance analysis on CSP plant with dumped energy recovery system [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(S1): 90-97.
- [8] SCHULTE-FISCHEDICK J, TAMME R, HERRMANN U. CFD analysis of the cool down behaviour of molten salt thermal storage systems [C]// ASME 2008 2nd International Conference on Energy Sustainability, 2008: 1-10.
- [9] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [10] ZAVERSKY F, SÁNCHEZ M, ASTRAIN D, et al. Transient molten salt two-tank thermal storage modeling for CSP performance simulations [J]. Solar Energy, 2013, 93: 294-311.
- [11] VILLADA C, BOLÍVAR F, JARAMILLO F, et al. Thermal evaluation of molten salts for solar thermal energy storage [C]//International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2014.
- [12] KUDARIYAWAR J Y, SRIVASTAVA A K, VAIDYA A M, et al. Computational and experimental investigation of steady state and transient characteristics of molten salt natural circulation loop [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 560-571.
- [13] PATWARDHAN A W. CFD modeling of jet mixed tanks [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(8): 1307-1318.

(本文责编: 齐琳)

#### 作者简介:

崔凯平(1971—), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 从事新能源发电技术设计和研究方面的工作 (E-mail: cuiqp@nwepdi.com)。

韩伟\*(1986—), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 工学博士, 从事光热发电技术研究和设计方面的工作 (E-mail: hanweib@nwepdi.com)。