

太阳能热发电站高温熔盐罐基础设计关键参数研究

易自砚, 李红星, 何邵华, 赵晴, 姜东

(西北电力设计院有限公司, 西安 710075)

摘要: 为实现高温熔盐罐基础在多场耦合作用下的结构设计, 通过有限元对熔盐罐基础的温度场和应力场分布规律及关键参数敏感性进行分析。结果表明: 初始环境温度与钢环板应力成反比; 昼夜温差对基础影响较小, 季节温差对基础影响较大; 自重荷载作用下钢环板应力为温度作用下钢环板应力的3%, 温度应力是熔盐罐基础结构设计的关键。

关键词: 太阳能热发电站; 温度场; 应力场; 敏感性分析; 熔盐罐基础

中图分类号: TU475⁺.9

文献标志码: A

0 引言

目前国内外利用太阳能热发电的方式主要有太阳能热发电和光伏发电两种。太阳能具有能量密度低、随机性和间歇性的特点, 同时受日夜交替、季节变化、气候、地理位置差异的影响大, 因此太阳能光伏发电存在发电不稳定、对电网影响大等问题。太阳能热发电通过自身配置的储热系统, 能把太阳能有效储存起来, 从而克服了光伏发电的弊端, 保证了电力的稳定输出。目前太阳能热发电站储热方式很多, 主要采用以熔盐为储热介质的储热方式, 即采用一个高温熔盐罐和一个低温熔盐罐。

在太阳能热发电站中, 为增大发电容量或延长发电时间, 储能系统对熔盐量的需求非常大, 一般可达上万吨, 同时为提高汽轮机的发电效率, 熔盐的温度通常被加热至约600℃。这对储热罐基础本身不管从承载能力、保温性能, 还是从安全性能上都提出更高的要求。

目前国内外关于高温储热罐基础设计的研究很少, 主要集中在储热罐本身结构分析、储热罐基础热损失及储热罐基础保温材料性能等方面。如文献[1]分析了储热罐在温度波动下罐体的应力状况; 文献[2]研究了储热罐在预热过程中的温度及热应力分布; 文献[3]开发了一种分析模型, 用于估算储热罐底部总热损及组成部分; 文献[4]提出一种耦合热性能评估模型用以评估储热罐的热损失和温度分布, 并通过有限元分析认为储热罐基础的温度较高, 储热罐基础的冷却系统是必要的; 文献[5]设计了一种设备, 用以研究不同粒径、密度和孔隙率的陶粒热性能; 文献[6]通过数模研究了熔盐泄露后对陶粒热物性的影响; 文献[7]通过数模分析了储热罐基础的温度场, 但仅对结果进行了说明, 并未给出边界条件取值

方法。

现阶段关于高温储热罐基础的设计主要是参考类似的设计标准, 如 GB 50341^[8]、SH/T3068^[9]、API650^[10]和相应的一些通用标准。虽然高温储热罐基础类似于油罐基础, 但其承受的荷载类型及功能需求等均不同于油罐基础, 主要表现在储热罐基础需要具有较好的保温性能以减少储热罐的热量损失, 具有承受高达约600℃的温度作用和上万吨荷载的承载能力、高温下储热罐热膨胀及储热罐基础自身热变形等的相互影响等, 这些特征决定了储热罐基础的设计与常油罐基础有较大不同。本文结合文献[11]保温材料的研究成果, 对高温熔盐罐基础进行有限元分析, 以确定关键参数的选取方法, 分析关键构件的受力规律。

1 工程概况

某国外塔式太阳能热发电站装机容量100 MW, 采用高温熔盐储热系统, 单冷罐+单热罐的设计方案, 罐体直径51.3 m, 罐体高度14 m, 罐体自重800 t, 储盐量31500 t。冷、热罐设计温度分别为400、570℃, 工作温度分别为299、555℃。该厂区10 m高度处50年一遇3 s时距的设计风速为63.1 m/s。根据美国 UBC 规范, 该光热发电站位于地震分区的2A区, 50年内超越概率为10%的地震加速度为0.15g。50年一遇的基本雪压为1.0 kN/m²。

高温熔盐罐基础^[12]采用以陶粒为主要保温材料的基础型式, 基础布置及计算边界如图1所示, 图1中1a为熔盐罐, 1为熔盐罐保温层, 2为钢垫板, 3为细砂层, 4为碎石垫层, 5为陶粒, 6为隔热砖, 6a为黏土砖, 7为钢环板, 8为温控通风管。钢垫板生根在碎石垫层中, 可有效扩散熔盐罐侧壁产生的集中应力; 沙垫层保证了熔盐罐底板的平整; 碎石垫层作

收稿日期: 2023-04-12

通信作者: 易自砚(1986—), 男, 硕士、高级工程师, 主要从事电力行业结构设计方面的研究。sunyan87@163.com

表 2 陶粒的导热系数

Table 2 Thermal conductivity of ceramsite

温度/°C	70	180	275	360	448	530
导热系数/[W/(m·°C)]	0.105	0.155	0.189	0.226	0.267	0.309

3 计算结果分析

在高温熔盐罐基础中,钢环板为主要受力构件,因此本文主要分析钢环板的温度和应力分布。

3.1 温度场分析

为研究罐体中刚加入热盐时,储热罐基础内温度场的变化规律,对高温熔盐罐基础进行瞬态分析,取初始环境温度为 20 °C。图 4 为不同位置处钢环板温度随时间的变化曲线,结果表明。前 10 天钢环板温度升高的较为迅速,此时间段内约完成传热平衡的 80%;10 d 后钢环板温度升高的较为缓慢;熔盐罐基础与外界空气达到温度传热平衡时需约 90 d。

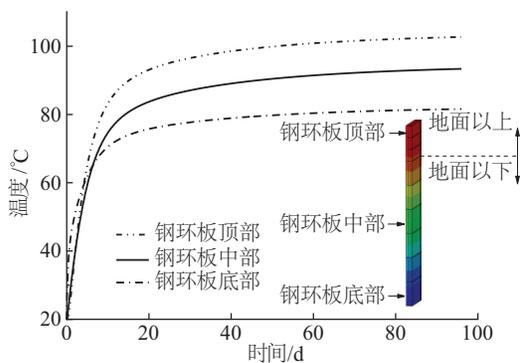


图 4 钢环板温度随时间变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curve of steel ring plate with time

为研究环境温度变化对钢环板温度的影响,分两个步骤模拟环境温度变化。如图 5 所示,第 1 步设置外界环境温度为 20 °C 先对温度场进行稳态分析;第 2 步模拟环境温度昼夜变化,环境温度变幅为 40 °C 对温度场进行瞬态分析。

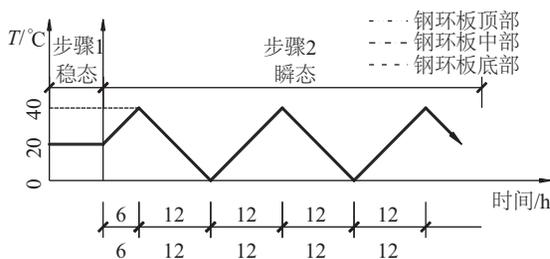
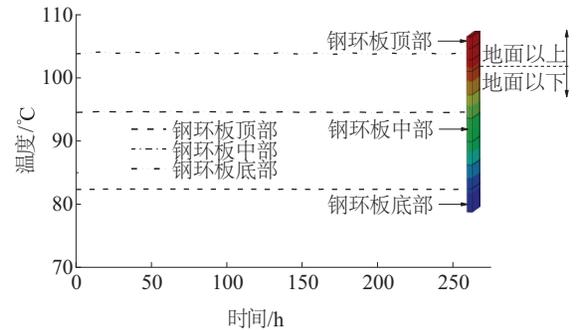


图 5 环境温度变化曲线

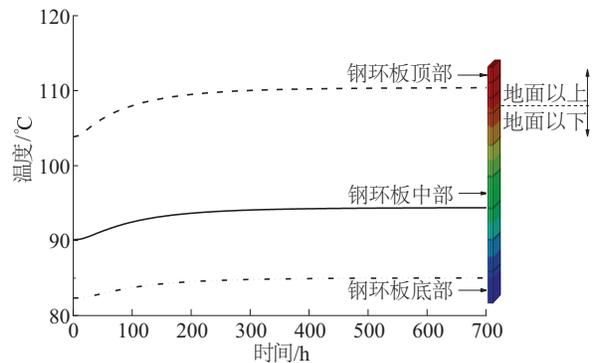
Fig. 5 Curve of environmental temperature with time

图 6a 结果表明,当环境温度发生变化时,钢环板温度略有变化但幅度较小。这主要是因为日温度变化时间较短(24 h),而熔盐罐基础与外界空气达到温度传热平衡时需要

时间较长(20~90 d),温度传热滞后太多。为研究季节温度变化对储热罐基础温度场的影响,假定外界环境温度变化幅度为 20 °C,图 6b 为熔盐罐基础温度场达到稳定后环境温度由 20 °C 升至 40 °C 钢环板温度随时间的变化曲线。结果表明,钢环板温度随环境温度的升高而升高,约 500 h 后温度场达到稳定,说明季节温度变化对钢环板温度影响较大。



a. 随昼夜温度变化



b. 随环境温度变化

图 6 钢环板温度随昼夜温度变化曲线

Fig. 6 Temperature variation curves

3.2 参数敏感性分析

影响储热罐基础设计的因素较多,为确定储热罐基础设计的关键参数,对环境温度、对流换热系数及保温材料热膨胀系数变化等对储热罐基础钢环板的温度及应力影响进行研究。

3.2.1 初始环境温度

环境温度是储热罐基础有限元分析时的重要参数,为研究环境温度变化对熔盐罐基础温度、应力分布的影响,取环境温度 $t = -20、0、20$ 及 40 °C 进行数值分析。图 7 结果表明,钢环板温度随环境温度的升高而增大,越接近地面环境温度对钢环板温度的影响越大;钢环板温度应力随环境温度的降

低而增大,越接近地面温度应力越大。这主要是因为当初始环境温度越低,储热罐基础温度场达到稳态时钢环板的始末温差越大,高温作用下钢环板的温度梯度越大,钢环板的温度应力也越大。

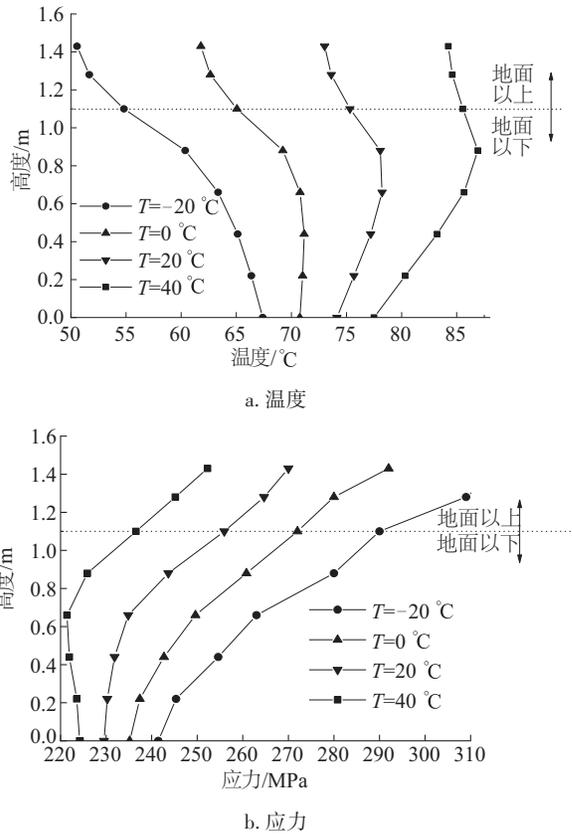


图7 不同初始环境温度下钢环板温度与应力变化曲线
Fig. 7 Temperature and stress variation curve of steel ring plate under different initial environmental temperatures

3.2.2 对流换热系数

在自然对流条件下,气固相对流换热系数一般为 3~12 W/(m²·°C),为确定对流换热系数对钢环板温度场和应力场的影响,分别取对流换热系数 $h=3, 6, 9$ 及 $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$ 进行分析。图 8 结果表明,对流换热系数越大,钢环板的温度越低;当对流换热系数较低时,钢环板的最大温度出现在钢环板的中上部,当对流换热系数较大时,钢环板的最大温度出现在钢环板的底部;越靠近地面,对流换热系数对钢环板的温度影响越显著;对流换热系数越大,钢环板温度差越大,相应温度应力也越大。

3.2.3 陶粒线膨胀系数

不同陶粒的线膨胀系数相差较大,为研究陶粒线膨胀系数对钢环板应力场影响,分别取线膨胀系数为 $7 \times 10^{-8}, 7 \times 10^{-7}, 3.5 \times 10^{-6}$ 和 $7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ 。图 9 为不同温度膨胀系数下钢环板沿高度方向的米塞斯(Mises)应力分布情况。由图 9 可知,当线膨胀系数为 $7 \times 10^{-6}, 3.5 \times 10^{-6}, 7 \times 10^{-7}$ 和 $7 \times 10^{-8} \text{ °C}^{-1}$ 时,钢环

板的最大米塞斯应力依次为 297、229、167 和 152 MPa。结果表明,当线膨胀系数由 $7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ 降低至 $3.5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$,最大 Mises 应力减小了 22.9%;当线膨胀系数缩由 $7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ 降低至 $3.5 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$,最大米塞斯应力减小了 43.8%;当线膨胀系数由 $7 \times 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ 降低至 $7 \times 10^{-8} \text{ °C}^{-1}$,最大 Mises 应力减小了 48.8%,此时材料的热膨胀变形较小,由膨胀变形引起的钢环板应力相对较小。因此保温材料的热膨胀变形是引起钢环板处于高应力状态的关键,钢环板的应力主要是由温度作用引起的。

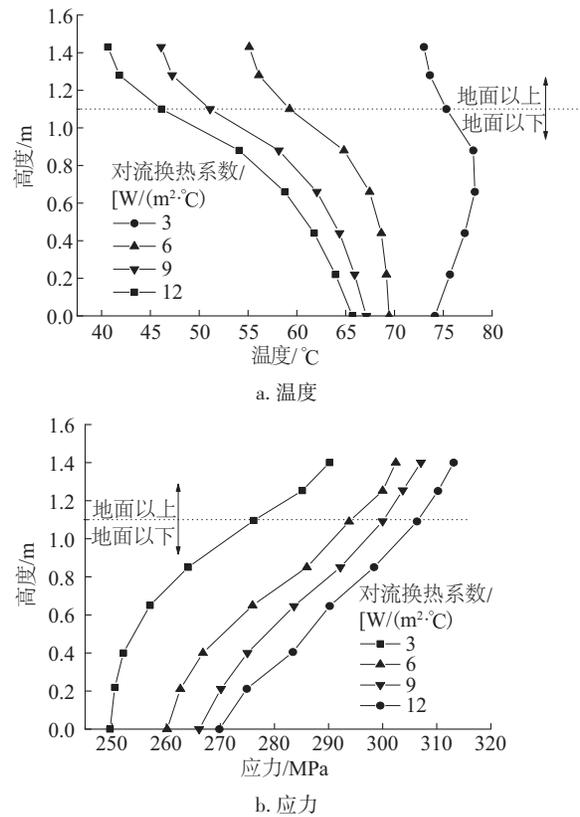


图8 不同对流换热系数下钢环板温度与应力变化曲线
Fig. 8 Temperature and stress variation curve of steel ring plate under different convective heat transfer coefficients

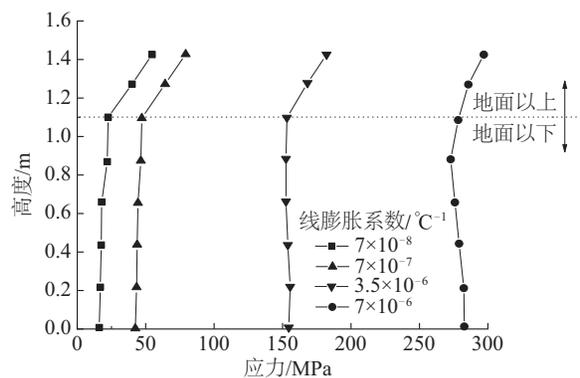


图9 不同线膨胀系数下钢环板应力变化曲线
Fig. 9 Stress variation curve of steel ring plate under different linear expansion coefficients

3.3 熔盐及罐体自重

图 10 为罐体及熔盐自重作用下钢环板应力分布,即在储热罐底部施加 160 kN/m^2 的均布荷载下钢环板的应力分布。结果表明:沿钢环板高度方向应力呈先减小后增大的趋势。这是由于土体的约束使得钢环板在地面处变形减小。在罐体及熔盐自重作用下,钢环板的最大应力为 9.24 MPa ,仅占温度荷载作用下钢环板应力的 3% ,因此温度应力的控制是保证整个熔盐罐基础安全的关键。

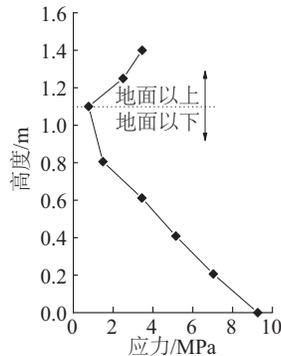


图 10 自重荷载下钢环板应力

Fig. 10 Stress of steel ring plate under self-weight load

4 结 论

通过对数值结果分析,关于熔盐罐基础的设计得出如下主要结论:

1) 初始环境温度与钢环板温度成正比,与钢环板温度应力成反比,建议在熔盐罐基础设计时初始环境温度取最低温度。

2) 昼夜温差对钢环板温度及应力影响较小,季节温差对钢环板温度及应力影响较大,建议在熔盐罐基础设计时初始环境温度取全年月平均温度。

3) 钢环板最大温度应力随对流换热系数的变化较小,随陶粒线膨胀系数的变化较大,因此陶粒线膨胀系数是钢环板温度应力控制的关键。

4) 熔盐及罐体自重下钢环板应力仅占钢环板温度应力约 3% ,因此温度应力的控制是保证熔盐罐基础结构安全的关键。

5) 钢环板温差越大,温度应力越大,因此在结构布置中应采取的措施,减小钢环板温差。

[参考文献]

[1] 蔡君,刘长军,郭洪辛,等.循环载荷作用下的高温熔盐储罐设计分析[J].太阳能学报,2023,44(4):516-521.
CAI J, LIU C J, GUO H X, et al. Design and analysis of high temperature molten-salt storage tank under cyclic loading[J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(4): 516-521.

[2] 岳松,陈宇轩,肖虎,等.熔盐储罐预热过程优化研究[J].太阳能学报,2022,43(10):113-118.
YUE S, CHEN Y X, XIAO H, et al. Study on optimization of preheating process of molten salt storage tank[J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(10): 113-118.

[3] SUÁREZ C, PINO F J, ROSA F, et al. Heat loss from thermal energy storage ventilated tank foundations[J]. Solar energy, 2015, 122: 783-794.

[4] WAN Z J, WEI J J, QAISRANI M A, et al. Evaluation on thermal and mechanical performance of the hot tank in the two-tank molten salt heat storage system[J]. Applied thermal engineering, 2020, 167: 114775.

[5] ZHOU H, WANG Z W, ZHOU M X, et al. Experimental measurements and XCT based simulation of effective thermal conductivity of stacked ceramsites in molten-salt tank foundation[J]. Heat and mass transfer, 2019, 55(11): 3103-3115.

[6] 王墨文,周昊,罗佳伟,等.储罐地基材料在熔盐泄露后的导热系数研究[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(1):137-143.
WANG Z W, ZHOU H, LUO J W, et al. Research on thermal conductivity of storage tank foundation materials after molten salt leakage[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2022, 56(1): 137-143.

[7] 田强,王建平,卜亚军.基于热分析的高温熔盐储罐基础研究[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(增刊1):282-284.
TIAN Q, WANG J P, BU Y J. Study on the foundation of high temperature molten salt storage tank based on thermal analysis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(Sup 1): 282-284.

[8] GB 50341—2014,立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S].
GB 50341—2014, Code for design of vertical cylindrical welded steel oil tanks[S].

[9] SH/T 3068—2018,石油化工钢储罐地基与基础设计规范[S].
SH/T 3068—2018, Specification for design of steel storage tanks subgrade and foundation in petrochemical industry [S].

[10] API650-2016, Welded tanks for oil storage[S].

[11] 易自砚,李红星,何邵华,等.高温熔盐储罐基础中陶粒的材料性能试验研究[J].太阳能学报,2024,45(7):584-589.
YI Z Y, LI H X, HE S H, et al. Study on material properties of ceramsite in the foundation of high temperature molten salt storage tank [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(7): 584-589.

[12] 李红星, 易自砚, 何邵华. 一种高温罐保温基础:
CN206941630U[P]. 2018-01-30.

LI H X, YI Z Y, HE S H. A insulation foundation for high-
temperature tank: CN201720765196.2[P]. 2018-01-30

STUDY ON KEY PARAMETER OF HIGH TEMPERATURE MOLTEN SALT TANK FOUNDATION DESIGN IN SOLAR POWER STATION

Yi Ziyang, Li Hongxing, He Shaohua, Zhao Qing, Jiang Dong

(Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: To achieve the structural design of high-temperature molten salt tank foundation under multi field coupling, the distribution of temperature field and stress field and the sensitivity of the initial environmental temperature, convective heat transfer coefficient, and coefficient of thermal expansion of the molten salt tank foundation were analyzed by finite element analysis. The results show that the initial ambient temperature was inversely proportional to the stress of the steel ring plate. Diurnal temperature difference has little effect on foundation, while seasonal temperature difference has great effect on foundation. The stress of the steel ring plate under self-weight load is 3% of the stress of the steel ring plate under the action of temperature, so it is necessary to take insulation measures for the steel ring plate in the structural layout.

Keywords: solar thermal power station; temperature field; stress field; sensitivity analysis; molten salt tank foundation