

多场耦合作用下某槽式光热电站熔盐储罐基础 温度分布与沉降变形

梁甜¹, 糜又晚¹, 李清元¹, 谭争光¹, 何锐杰², 康馨²

(1.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司; 2.湖南大学土木工程学院)

[摘要] 对某槽式光热电站熔盐储罐基础进行研究, 通过数值模拟方法, 建立一般地基情况下熔盐储罐模型, 对储罐基础在热力耦合情况下温度分布与沉降变形进行分析。结果表明: 陶粒土隔热效果突出, 可作为基础隔热材料; 常规基础在一般地基条件下具有良好的适应性, 沉降变形控制在合理范围内; 采取温度控制措施可有效控制基础沉降, 减少高温熔盐对地基土产生的不利影响。

[关键词] 熔盐储罐基础; 热力耦合; 温度分布; 沉降变形

[中图分类号] TU 47

[文献标志码] B

[文章编号] 1001-523X(2022)05-0120-07

TEMPERATURE DISTRIBUTION AND SETTLEMENT DEFORMATION OF MOLTEN SALT STORAGE TANK FOUNDATION OF A TROUGH TYPE OPTICAL THERMAL POWER STATION UNDER MULTI FIELD COUPLING

Liang Tian, Mi You-wan, Li Qing-yuan, Tan Zheng-guang, He Rui-jie, Kang Xin

[Abstract] Based on the design and research of the foundation of the molten salt storage tank in a trough-type optical thermal power station, a model of the molten salt storage tank under general geological conditions was established by numerical simulation method, and the temperature distribution and settlement deformation of the storage tank foundation under the condition of thermodynamic coupling were analyzed. The results show that ceramicsite has outstanding heat insulation effect and can be used as basic heat insulation material. The conventional foundation has good adaptability under general geological conditions, and the settlement deformation is controlled within a reasonable range. Temperature control measures can effectively control foundation settlement and reduce the adverse effect of high temperature of molten salt on foundation soil.

[Keywords] molten salt storage tank foundation; thermodynamic coupling; temperature distribution; settlement deformation

熔盐储热技术是利用硝酸盐等原料作为储热介质, 通过新能源发出的热能与熔盐的内能转换来存储或发出能量。熔盐储罐作为熔盐储热技术的关键组成部分, 是由钢板焊成的薄壁容器结构。其具有柔性大、刚度小的特点, 能承受一定的地基沉降变形。国内外学者对熔盐储罐进行了大量的研究, 但主要集中在储罐本体或罐体材料上面, 更注重选材和壁厚设计、膨胀及应力分析。然而, 实际应用中, 作为熔盐储罐底部隔热层的基础则直接关系到其安全性和经济性。但关于熔盐储罐基础结构设计, 目前尚无系统的研究成果与标准, 因此, 需对熔盐储罐隔热基础的结构设计展开系统研究。

通过数值模拟研究方法, 建立一般地基情况下储罐基础模型, 确定合理本构模型、材料属性、边界条件及荷载输入, 对模型进行有限元求解, 针对关键技术指标进行量化分析并形成对比图表, 并得出结论性

意见, 以揭示储罐基础承载形式、储罐基础热-力耦合情况下应力及应变分布及储罐基础底部土体在热-力耦合情况下物理力学性质变化及应力、应变分布。

1 土体本构模型

本研究将采用Drucker-Prager准则分析土体的应力应变情况, 是在摩尔-库伦准则的基础上通过对等效屈服准则进行修改而得到的, 这一准则不仅将库仑摩擦纳入考虑范畴, 还建立了与流体静压的依赖关系:

$$f_y(\sigma) = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k \quad (1)$$

这个方程表示主应力平面内的平滑圆锥, 而不是六棱锥。如果系数 α 和 k 与摩尔-库伦准则中的系数互相匹配, 即如下所示:

$$\alpha = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sin\phi}{3 \pm \sin\phi}, \quad k = \frac{2\sqrt{3} c \cos\phi}{3 \pm \sin\phi} \quad (2)$$

由于涉及热-力耦合下无粘性土本构模型的研究较少, 根据沈阳工业大学李英明对型砂的高温变形和破坏方式的研究, 材料在高温(400~600℃)下的强度

收稿日期: 2022-01-25

作者简介: 梁甜(1987—), 湖南长沙人, 高级工程师, 主要研究方向为新能源发电结构设计。

折减为常温状态下的63%，并发生塑性破坏。因此，引入一强度折减参数 η 描述无粘性土强度受温度升高的影响。假设强度折减随温度变化呈线性关系，则 η 取 $0.7 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ，折减后的土体强度可表示为：

$$\begin{cases} C=c(1-(\eta(T-T_0))) \\ \varphi=atan(\tan(\varphi)\eta(T-T_0)) \end{cases} \quad (3)$$

其中， T_0 、 T 分别为常温(20 $^{\circ}\text{C}$)与升高后的温度， c 、 φ 分别为常温下土体的粘聚力与内摩擦角。

2 地质条件

2.1 地层岩性

根据地质勘探结果，拟建储罐下方土层在勘探深度范围内揭露的主要地层岩性自上而下分别为冲、洪积(Q_3^{al+pl})圆砾层和卵石层，勘探地层中未有地下水发育。

各层岩性及分布特征描述如下：②圆砾(Q_3^{al+pl})：灰色~青灰色，中密~密实，干燥~稍湿。主要成分以花岗岩、石英岩、片麻岩为主。磨圆度常规，多呈亚圆状，常规粒径在2~30 mm，最大约40~60 mm，主要充填物以中粗砂及砾砂为主，胶结程度常规，表面呈弱风化状，局部卵石颗粒富集。③卵石(Q_3^{al+pl})：青灰色，密实，稍湿，常规粒径在20~40 mm，最大粒径约100 mm，成分以石英岩、花岗岩、片麻岩为主，磨圆度较好，胶结程度常规，以中粗砂、砾砂为主要充填物，局部与②层圆砾呈交错状分布。

2.2 岩土体主要物理力学参数

依据地质勘察及原位测试结果，各层土的主要物理力学性质指标经验值见表1。需要说明的是：①层细砂为风积作用形成，呈松散状态，厚度较小(0.2~0.4 m)，仅分布在地表，工程实际意义不大，故未提供该层土的物理力学性质指标。

表1 一般地基各岩土层地基土力学参数

指标层序	天然重度/ γ (kN/m^3)	内摩擦角/ φ ($^{\circ}$)	变形模量/ E_0 (MPa)	渗透系数/ k (cm/s)	承载力特征值/ kPa
②圆砾	20	35	35	2×10^{-1}	350
③卵石	22	40	45	2×10^{-1}	500

3 基础设计模型

3.1 基础设计

熔盐储罐基础在正常使用过程中受到储罐的温度与荷载效应。其中，储热罐本体重量为530t，罐壁保温及附件重量为150t，储热罐工作最高液位时熔盐重量为18670t，储热罐工作温度区间为390~550 $^{\circ}\text{C}$ 。

根据国内外与熔盐储罐基础设计相关的文献调研，一般将熔盐储罐基础。基础中的环形钢板填充有隔热材料，该材料的选择需同时满足隔热要求与基础承重要求。根据熔盐储罐基础相关的文献调研，一般采用隔热耐火砖、陶粒、泡沫玻璃、硅酸钙、耐热混凝土等材料，作为基础填充层(图1)。

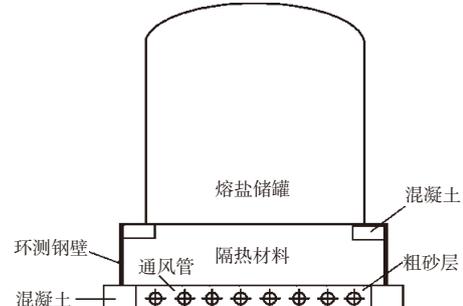


图1 常见熔盐储罐基础设计形式

3.2 保温材料确定

综合考虑保温能力、抗震性、耐久性 & 场地适应性等多方面因素，本研究的熔盐储罐隔热材料拟选择高温陶粒。其中，高温陶粒是用 Al_2O_3 为33%的软质粘土和 Al_2O_3 为18%的页岩混磨成球，经1450 $^{\circ}\text{C}$ 烧制而成。而在罐壁下方或环形钢板下方等应力集中处则设置强度较高的耐热混凝土垫块，耐热混凝土牌号取NRH-600，强度等级为C30，耐热度为600 $^{\circ}\text{C}$ ，设计使用年限为30年，在设计使用年限内必须满足结构承载和正常使用的功能要求。相关材料物性参数见表2。

表2 保温材料参数

材料名称	密度/ (kg/m^3)	热导率/ $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	耐火温度/ $(^{\circ}\text{C})$	抗压强度/ (MPa)
隔热陶粒	580	0.28	1550 $^{\circ}\text{C}$	35
耐热混凝土	2200	0.2	600 $^{\circ}\text{C}$	3e4

3.3 结构确定

本项目中储罐罐内壁半径为16.5 m，罐壁外侧有0.5 m厚的保温层覆盖，储罐罐壁与保温层作用在环形耐热混凝土垫块上。该混凝土垫块厚0.45 m，截面宽0.94 m，其外侧覆盖有0.15 m厚的保温棉，防止高温传递到环形钢板，避免引起过高的热应力。环形钢板厚0.04 m，高1.8 m，由数十块碳钢板焊接而成，其内侧从上至下依次填充有0.1 m厚的细砂层与1.7 m厚的隔热陶粒层，环形钢板对填充材料起到约束作用，防止罐体产生不均匀沉降或过大沉降。环形钢板下方有环形耐热混凝土环支承，厚0.35 m，截面宽0.45 m。混凝土环下方也有环形卵石环作为支承，厚0.3 m，截面上宽1.3 m，下宽1.05 m。2个支撑的设置可避免环形钢板直接与地基土接触，产生应力集中。

在基础的温度控制方面，主要由测温电阻与通风管控制基础底面温度（图2）。其中，陶粒层内沿竖直方向每隔0.4m埋置1层钢丝网，钢丝网与测温电阻相连接，可对基础的纵向温度分布实时监测。在隔热陶粒下方有0.35m厚的粗砂层，其中沿水平方向埋置数十根直径为0.2m的通风管，通风管间距为0.8m，通风管将伸出地表，一侧与风机相连。

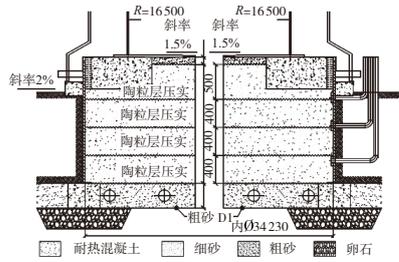
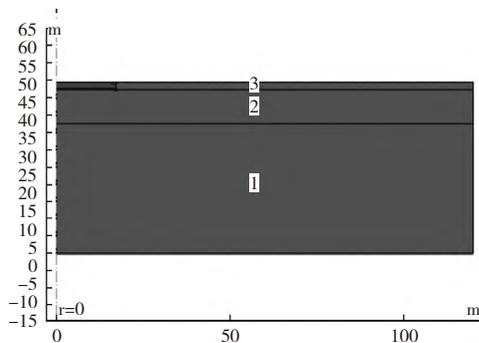


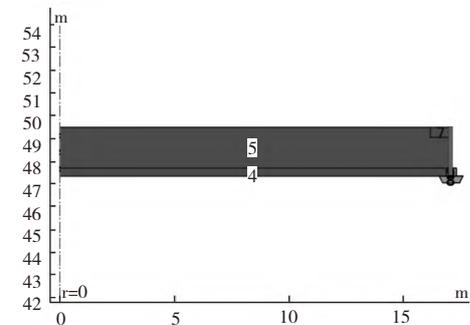
图2 常规熔盐储罐隔热基础结构设计

3.4 模型几何设置

模型单元分为地基土、基础钢环及基础隔热层3组（图3）。其中，常规基础隔热层主要由陶粒层与粗砂层组成；粗砂层埋置的散热管产生的散热效果在温度场中作为热力学参数输入，在几何模型中不予构建；基础钢环厚度相对模型整体尺寸很小，采用壳单元构建，可避免网格大小差异造成的不收敛现象。为避免模型中地基边界对分析结果造成的干扰，模型地基土半径取100m，深度取至地下50m。



(a)



(b)

图3 一般地基常规基础几何模型（域1~3：地基土；域：4~7基础隔热层）

(a)整体模型；(b)常规基础模型

表3 一般地基几何模型参数 m

几何域	高度	长度
域1卵石层	38	100
域2圆砾层	9.85	100
域3圆砾层	2.15	82.885
域4粗砂层	0.35	3.5
域5陶粒层	1.8	3.5
域6耐热混凝土1	0.35	0.45
域7耐热混凝土2	0.45	0.94
域8砾石环	0.3	(上)1.3(下)1.05

3.5 荷载输入条件及边界设置

一般地基条件下，没有地下水分布，模型仅涉及热-力场耦合。根据前述设计方案及项目实际情况，本次模拟的上部荷载输入及边界设置如下。

(1) 上部荷载输入：热罐罐体重530t，保温及附件材料重150t，工作时达最高液位时熔盐重18670t，以上重量看作面荷载均匀分布在基础顶面，罐底面积为854.87m²，计算得基础顶面均布荷载为214kN/m²；

(2) 力学边界设置：地基土底面设置为固定约束；地基土侧壁设置为辊支承来约束土体的侧向变形，其余边界为自由边界；基础环形钢板与下方混凝土接触的结点设置为固定接触。所有域均受到重力场作用。常规基础中的环形钢板与耐热混凝土分别采用的计算模型为线弹性模型与BP准则，其余单元均采用温度影响下Drucker-Prager模型进行计算；

(3) 温度场设置：基础顶面作用有从罐体内熔盐传递来的高温作用，按照工作温度上限取为550℃，在采取散热措施的情况下，一般将基础底面温度控制在80℃；地基土底部与侧壁及地表处设置为常温20℃；温度在模型中的传递满足热力学三大定律。根据《工程地质手册》、GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》与《热力学手册》，模型各单元的材料输入参数见表4。

3.6 网格剖分

模型采用三角形网格进行剖分，共剖分出8966个单元，其中地基土单元共计4781个，常规基础单元共计4185个，如图4所示。

考虑到常规基础几何尺寸与地基土几何尺寸差异较大，将常规基础单元网格剖分大小设置为极细化，网格单元质量设置在0.02~0.06，地基土单元剖分大小设置为较细化，网格单元质量设置在0.5~1，两单元交界处网格大小设置为光滑过渡。

表4 一般地基模型各单元输入参数

参数(单位)	常规基础					地基土		孔隙流体
	粗砂	陶粒	砾石	耐热混凝土	钢	圆砾	卵石	
模型	Drucker-Prager模型			BP准则	线弹性	Drucker-Prager模型		—
泊松比 ν	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	—
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2080	580	2100	2200	7850	2041	2245	1.3
$k/[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	0.87	0.28	1.13	0.2	44.5	1.13	1.13	0.023
比热容 $C_p/[J/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	840	2047	1000	880	475	1000	1000	1000
热膨胀系数 $\alpha/(1/\text{K})$	4×10^{-6}	1×10^{-6}	4×10^{-6}	10×10^{-6}	12.3×10^{-6}	4×10^{-6}	4×10^{-6}	0
初始空隙比 e	0.33	0.33	0.33	—	—	0.33	0.33	—
内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	30	10	35	—	—	35	40	—
粘聚力 $c/(\text{kPa})$	0	0	0	—	—	0	0	—
压缩模量 $E_v/(\text{MPa})$	30	35	35	3×10^4	2×10^5	35	40	—
单轴抗拉强度 f_{ut}	—	—	—	1.43×10^6	—	—	—	—
单轴抗压强度 f_{uc}	—	—	—	14.3×10^6	—	—	—	—
双轴抗压强度 f_{bc}	—	—	—	16×10^6	—	—	—	—

4 计算方案与结果分析

开展一般地基条件下常规基础以及地基土的热-力耦合有限元分析,对构建的模型施加力学场及温度场后的受力、变形及温度分布状态进行分析,同时对基础底部采取的散热措施有效性进行验证。工况0先计算地基土在自重应力下的原位初始应力;工况1在工况0的基础上将常规基础顶面施加均布荷载(214 kPa),模拟罐体中熔盐在最高液位时对基础和地基土产生的影响,常规基础顶面温度设置为550 °C,模拟熔盐达到最高温度时对基础及地基土产生的影响;工况2在工况1的基础上在常规基础底面采取温控措施,模拟基底散热管工作后对基础及地基土产生的影响,见表5。

表5 计算工况

工况	施加条件
0	原位初始应力
1	重力荷载+550 °C高温熔盐+基底未采取温控措施
2	重力荷载+550 °C高温熔盐+基底采取温控措施

4.1 工况1分析结果

在荷载及高温影响下模型的地基土中心附加应力随土层深度变化如图5所示。基底中心附加应力为185.4 kPa,基底以下8 m深度中心附加应力增至最大值210.5 kPa;随后附加应力逐渐减小,当土层深度为23 m时,中心附加应力与地基土自重应力比值为19%,表明在23 m时已达到常规压缩层深度的下限;当土层深度为50 m时,中心附加应力趋向于0。

而该曲线中的一些点在局部范围内上下起伏的原因是由模型网格划分较大造成的,靠近基础及地基土地面处网格划分较密,地基土中部网格划分较稀疏,但起伏范围不大,对模型计算结果的影响可忽略不计。此外,计算得基底压力为230 kPa,低于基底下方圆砾层的地基承载力特征值(350 kPa),故地基承载力满足要求。

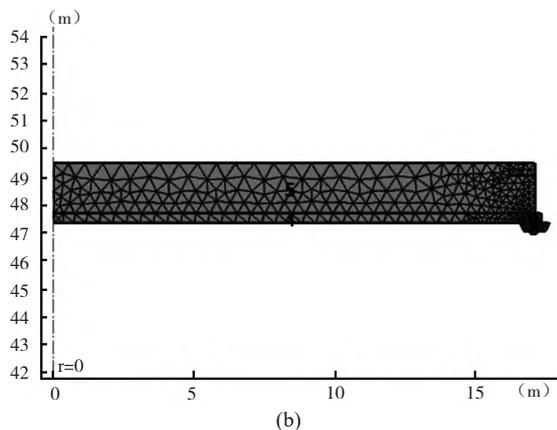
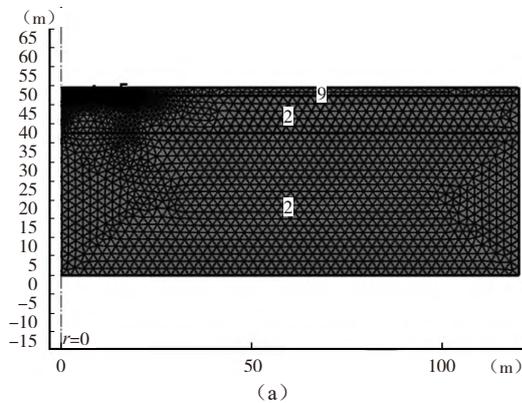


图4 一般地基常规基础模型网格
(a)整体模型; (b)常规基础模型

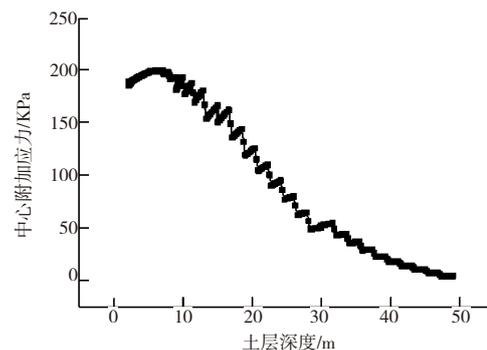


图5 工况1下模型中心附加应力分布

在荷载及高温影响下模型的温度分布如图6所示,可以发现高温作用后基础及其下方的地基土温度显著增加,基础底部中心和边缘温度分别为360℃和140℃。而在地基土中温度影响范围可达30m深度处,影响半径为22m。其中,陶粒土1.8m厚度范围内温度由顶面的550℃降低至底面的340℃,由此可计算出陶粒土单位长度温度可降低116.7℃。而基础下方厚9.85m的圆砾单位长度温度仅下降16.24℃。对比可看出,陶粒土具有优良的隔热性能,其隔热能力为圆砾的7倍,可有效阻隔高温对基础下方地基土的影响。在基础中设置陶粒土作为隔热层,十分必要。

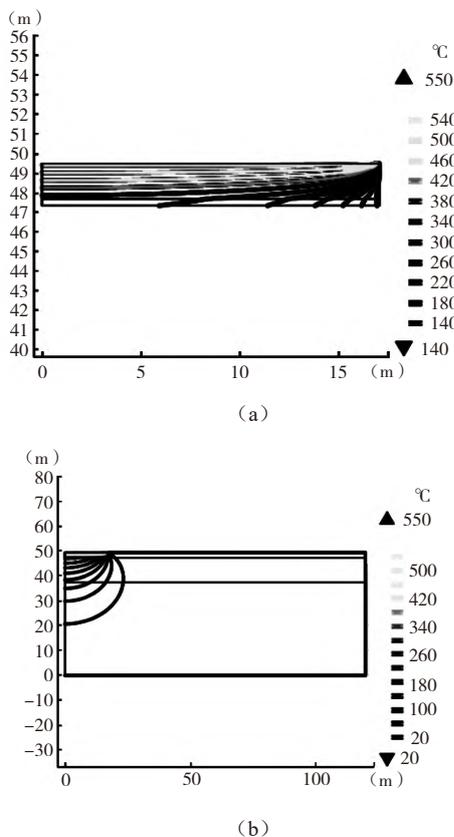


图6 工况1下模型温度分布
(a)常规基础模型;(b)整体模型

基础顶面温度设置为550℃后,模型的竖向位移分布情况如图7所示,可以发现基础顶面中心的沉降最大,对比不加顶面温度沉降增大达到-257mm,其等值线为一半圆形,随深度和半径增大竖向位移逐渐减小,当深度与半径分别达到40m和32m时趋向于0。在基础环外部的土体出现局部的轻微隆起,隆起值为0.5mm。基础顶面边缘的沉降为-160mm,与基础顶面的沉降差为97mm。其中,基础的中心压缩量为36mm,地基土的压缩量为221mm。基础隔热材料与地基土在高温下结构产生破坏,使得强度发生折减,从而导致塑性变形,竖向位移增大。

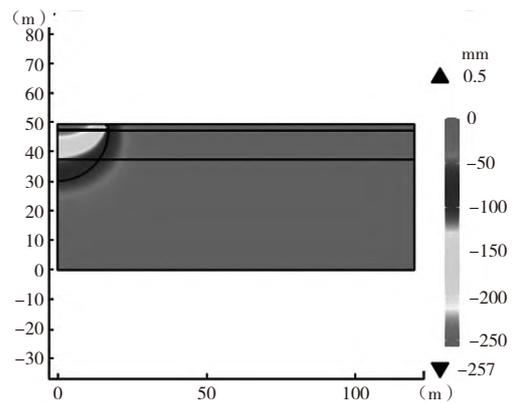


图7 工况1下模型竖向位移分布

基础顶面温度设置为550℃后,模型的塑性区分布如图8所示,环形钢板下方地基土部分区域出现塑性区,分布范围不大,原因是高温作用下地基土强度发生折减,环形钢板下方应力超过土体强度,发生塑性变形。在罐体重力与高温荷载作用下基底压力未超出地基土承载力,符合设计要求。

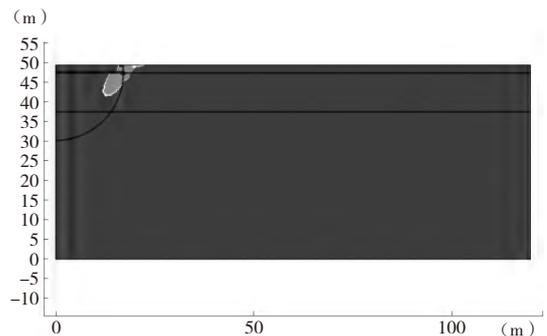


图8 工况1下模型塑性区分布

基础顶面温度设置为550℃后,基础钢环与环形混凝土等效应力分布如图9、图10所示。钢环顶部应力最大,达到155MPa,下方应力逐渐减小,钢环底部应力为51.3MPa。

根据太原科技大学王效岗对Q345D钢在高温作用下力学性能的试验研究,钢环在550℃下的屈服应力将折减为200MPa,故该工况下基础钢环不会出现应力屈服。基础顶部环形混凝土应力在与环形钢板顶部接触处达到最大值809kPa,基础底部环形混凝土应力在与环形钢板底部接触处也达到最大值550kPa,环形混凝土的最小等效应力为152kPa。

根据内蒙古科技大学徐广飞对耐火砖作为骨料的C30耐热混凝土的耐热试验^[8],发现耐热混凝土在500℃下的抗压强度折减为常温下的73%,折减率为0.56%/K。C30混凝土高温折减后的轴心抗压强度设计值为10MPa,故该工况下混凝土不会出现应力屈服。

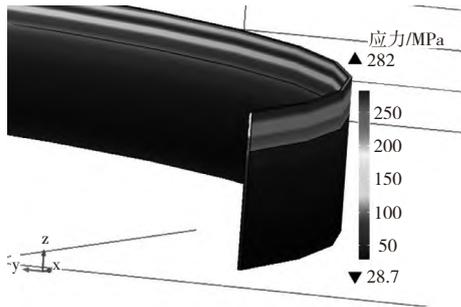


图9 工况1下基础钢环等效应力分布

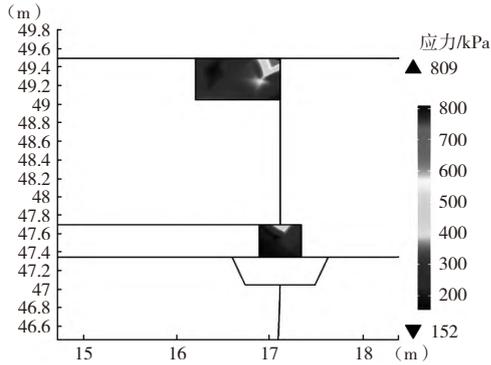


图10 工况1下混凝土等效应力分布

4.2 工况2结果分析

温控措施的采用首先需确定基础底部的最佳温度。基础底部控制温度过高，将导致基顶中心沉降过大，给熔盐罐体的正常运行带来不利影响；基础底部控制温度过低，将增大通风管风机的负荷，而基顶中心沉降无明显变化，故将采取基顶中心沉降随基底温度变化变化曲线拐点对应的温度作为基底控制温度，如图11所示。从中可发现80℃为基础底部的最佳控制温度，接下来的模型将基础底部温度设置为80℃进行分析。

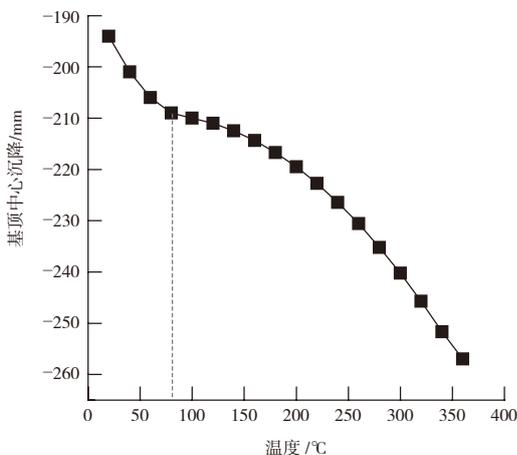
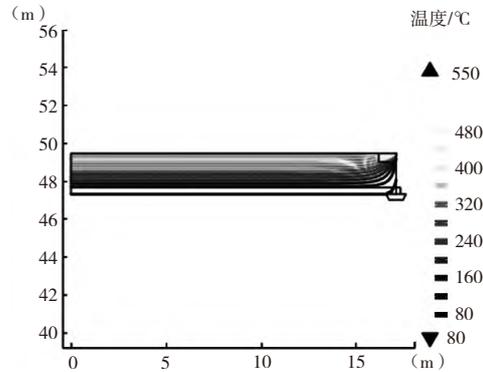


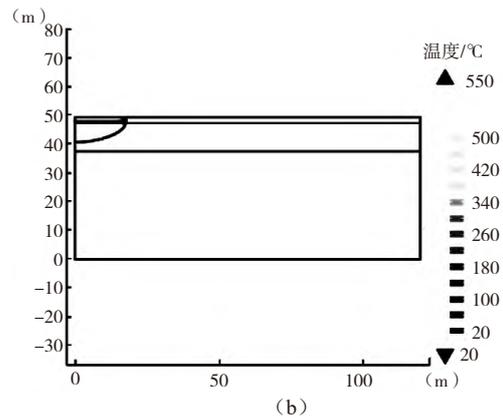
图11 基顶中心沉降随基底温度变化曲线

该工况中，基于工况1基础上采取散热措施将基

础底面温度设置为80℃，散热后模型的温度分布如图12所示，可发现基础底部的地基土温度明显下降，基础底部中心和边缘温度分别为360℃和140℃。而在地基土中温度影响的范围缩小为9 m深度处，影响半径为18 m。



(a)



(b)

图12 工况2下模型温度分布

(a)示意一；(b)示意二

采取散热措施后，模型的竖向位移分布情况如图13所示，可以发现基础顶面中心的沉降最大，与工况1相比降低至-210 mm，其等值线为一半圆形，随深度和半径增大竖向位移逐渐减小，当深度与半径分别达到36 m和30 m时趋向于0。在基础环外部的土体出现局部的轻微隆起，隆起值为0.3 mm。基础顶面边缘的沉降为-142 mm，与基础顶面的沉降差为68 mm。基础的中心压缩量为28 mm，地基土的压缩量182 mm。

采取散热措施后，模型的塑性区分布如图14所示，与工况1相比，环形钢板下方地基土的塑性区分布范围有所减少。采取温度控制措施下基底压力未超出地基土承载力，符合设计要求。

采取散热措施后，基础钢环等效应力分布如图15、图16所示。钢环顶部应力最大，达到155 MPa，下方应力逐渐减小，钢环底部应力为28.4 MPa。钢环

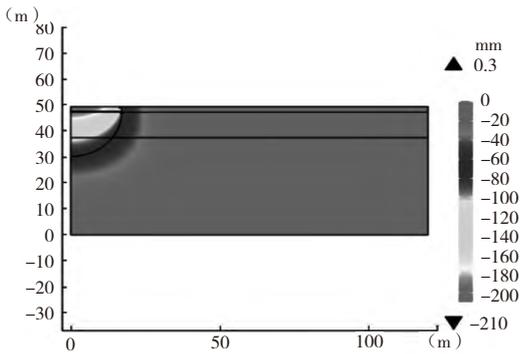


图13 工况2下模型竖向位移分布

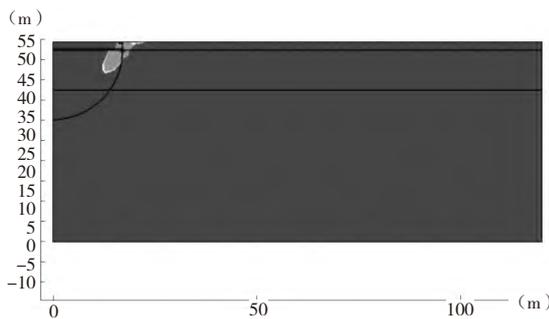


图14 工况2下模型塑性区分布

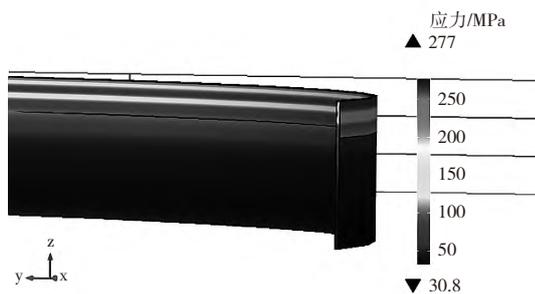


图15 工况2下基础钢环等效应力分布

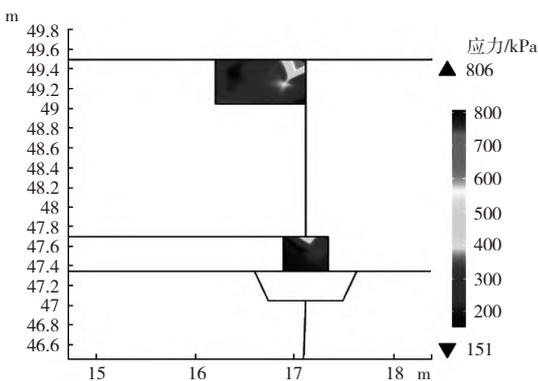


图16 工况2下混凝土等效应力分布

在550℃下的屈服应力将折减为200 MPa，故该工况下基础钢环不会出现应力屈服。基础顶部环形混凝土应力在与环形钢板顶部接触处达到最大值806 kPa，基础底部环形混凝土应力在与环形钢板底部接触处也达到最大值500 kPa，环形混凝土的最小等效应力为151 kPa。C30混凝土高温折减后的轴心抗压强度设计

值为10 MPa，故该工况下混凝土不会出现应力屈服。

5 常规基础一般地基条件下适应性分析

由于目前国内尚缺少与熔盐储罐基础设计的规范，因此将参考SH/T 3068—2007《石油化工钢储罐地基与基础设计规范》中对罐基础地基变形的要求，即地基沉降须小于0.009倍的罐底圈内直径，在本项目中取306 mm；基础顶面坡度变形小于7‰，在本项目中取119 mm。

经过对比基础与地基土的沉降、塑性区发展与温度分布情况，可得出以下主要结论。

(1) 常规基础在一般地基条件下具有较好的适应性，不同工况下模型的变形情况见表6，各工况下地基土变形均满足规范要求。

表6 不同工况下模型变形情况 mm

工况	基础顶面中心沉降量	基础顶面沉降差	基础中心压缩量	地基土中心压缩量
重力荷载+550℃高温熔盐+基底未采取温控措施	-257	97	36	221
重力荷载+550℃高温熔盐+基底采取温控措施	-210	68	28	182

(2) 当采取散热措施后，地基土沉降变形得到有效控制，有效降低高温对地基土变形产生的不利影响。

(3) 基础钢环在各工况中的最大应力均未超过屈服应力，不会产生破坏。

参考文献

- [1] 沈向阳, 丁静, 彭强, 等. 高温熔盐在太阳能热发电中的应用[J]. 广东化工, 2007, 8 (11): 49-52.
- [2] 周颖霏, 钱伯章. 聚光类太阳能热发电技术进展及工程市场动态[J]. 太阳能, 2010 (9): 30-34.
- [3] GABBRIELLI R, ZAMPARELLI C. Optimal design of a molten salt thermal storage tank for parabolic trough solar power plants[J]. Journal of solar energy engineering, 2009, 131 (4).
- [4] Kopp J E. Two-tank indirect thermal storage designs for solar parabolic trough power plants[D]. University of Nevada, Las Vegas, 2009.
- [5] 田增华, 张钧. 槽式太阳能热发电双罐式熔盐间接储热系统设计研究[J]. 太阳能, 2012, 11 (28).
- [6] 李磊. 熔盐储热技术在光热电站中的应用[J]. 能源与环境, 2018, 10 (30).
- [7] 李英民, 于震宗, 林家骊. 型砂的高温变形及破坏方式[J]. 沈阳工业大学学报, 1992 (1): 1-9.
- [8] 徐广飞, 杭美艳. 利用耐火砖做骨料配制耐热混凝土的研究[J]. 包钢科技, 2020, 46 (1): 79-82.