

拼装式蓄能竖井热交换效率与结构稳定性研究

徐杰

[上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200433]

摘要: 为推动滨海城市浅层地热资源高效开发,解决传统能源地下结构热交换效率有限、地埋管技术适配性不足的问题,以上海市某拼装式蓄能竖井试验段为研究对象,构建包含混凝土衬砌管片、周围土体与PERT换热管的热-力耦合数值模型,系统探究关键设计参数对热交换效率的影响及结构稳定性规律。结果表明,换热介质流速控制在0.6~0.9 m/s时既能保证换热效率又可避免运行成本浪费;管间距优选0.25~0.30 m,此范围可有效减弱管道间的热干扰,同时兼顾衬砌单位面积传热效率。在结构变形方面,衬砌受低温流体作用持续压缩,换热管入口附近测点变形最为显著;在应力分布上,换热管入口附近衬砌的外缘底部为结构抗拉薄弱区域,最大压应力处于材料安全范围;周围土体呈现“先压缩、后拉伸”特征。

关键词: 浅层地热能;拼装式蓄能竖井;参数优化;热交换效率;热力响应;结构变形;应力分布

中图分类号: TU96+2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0108-07

Research on Heat Exchange Efficiency and Structural Stability of Assembled Energy Shafts

XU Jie

[Shanghai Road and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: To promote the efficient development of shallow geothermal resources in coastal cities and address the issues of limited heat exchange efficiency of traditional energy underground structures and insufficient adaptability of ground burial pipe technology, taking the test section of an assembled energy shaft in Shanghai as the research object, a thermodynamic coupling numerical model including concrete lining segment, surrounding soil and PERT heat exchange tubes is constructed to systematically explore the influence of key design parameters on the heat exchange efficiency and the law of structural stability. The results show that the flow rate of the heat exchange medium should be controlled at 0.6~0.9 m/s, which can not only ensure the heat exchange efficiency, but also avoid the waste of operating costs. The pipe spacing is preferably 0.25~0.30 m, which can effectively reduce the thermal interference between pipes while also taking into account the heat transfer efficiency per unit area of the lining. In terms of structural deformation, the lining is continuously compressed under the action of low-temperature fluid, and the deformation at the measurement points near the inlet of the heat exchange tubes is the most significant. In terms of stress distribution, the bottom of the outer edge of the lining near the inlet of the heat exchange tube is the weak tensile area of the structure. The maximum compressive stress is within the material safety range. The surrounding soil shows the characteristic of “first compression, and then tension”.

Keywords: shallow geothermal energy; assembled energy shaft; parameter optimization; heat exchange efficiency; thermal response; structural deformation; stress distribution

0 引言

随着“双碳”目标进程的加速推进,城市浅层地热能作为清洁能源重新得到重视^[1-2]。

传统能源地下结构主要通过建筑桩基(能源桩)、地下连续墙(能源墙)或隧道衬砌(能源隧道)等工程构件中预埋换热管,实现结构与地热采集功能的一体化^[3-6]。该类系统的性能受结构几何参数、材料热物性、流体工质特性及运行工况等多尺度设计参数共同影响,这些参数通过热-力-渗流等多物理场的耦合作用,直接决定地热交换效率与结构的长期稳定性^[7-11]。Huang等^[12]研究了管径、管长等变量对钻孔换热器性能的影响,指出较小的内管半径

收稿日期: 2025-11-24

基金项目: 上海市2023年度“科技创新行动计划”(23DZ1202200);

上海市青年科技启明星计划(24QB2702200)

作者简介: 徐杰(1989—),男,博士,高级工程师,从事超深拼装式竖井智能建造等领域的研究工作。

与较低的管材导热系数将增大热阻,而增大外管半径与提高导热系数则有助于强化传热。Wang 等^[13]分析地理管传热性能的影响因素,发现提高循环水流量、增加埋深、选用高导热性能管材以及优化回填材料导热系数均可增强传热效果。Yu 等^[14]通过实验验证,提高入口水温、流速与钻孔深度,并合理选择埋管类型,可显著提升系统换热能力。此外,国家标准《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2005)(2009 版)为地源热泵系统提供设计指导。

目前,受限于城市密集狭窄区域,地下空间开发面临诸多挑战,拼装式竖井作为一种高效的解决方案,已逐步应用于城市地下工程中^[15-16]。该类竖井结构-土体接触界面面积大,具有良好的热交换潜力。然而,现有竖井设计暂未考虑其热交换功能。基于目前针对传统能源地下结构传热性能与热交换效率的研究方法^[17-18],可对拼装式竖井作为地下换热器的相关性能进行深入研究。若能充分利用城市地下广泛分布的拼装式竖井作为地下换热器,或许可以极大地推动城市浅层地热资源的开发利用。

在传统能源地下结构(如能源桩)中,预埋换热管中流体温度的变化会引发结构内部产生附加温度应力^[19-20],从而影响桩的力学性能。目前,已有学者对能源桩、能源隧道等结构在温度荷载下的力学响应开展研究。Laloui 等^[21]对能源桩进行热力响应试验,发现热荷载引起的附加温度应力可能超过结构荷载所产生的压应力。Barla 等^[22]指出,隧道衬砌在温度变化 10 ℃时最大应力变化小于 1 MPa。在都灵地铁的实测结果表明,能源隧道衬砌在运行期间的应力应变变化幅度较小,远低于由大气温度波动所引起的波动范围^[23]。尽管如此,由温度引起的最大附加应力仍是导致结构潜在变形的重要因素,目前对其分布规律的研究尚不充分。因此,明确蓄能竖井中温度应力的分布特征,对现场应力监测与结构安全评估具有重要意义。

本文以上海市某拼装式蓄能竖井试验段为研究对象,系统分析关键设计参数对其换热性能的影响,阐明最优参数组合下蓄能竖井的热响应特性,论证其在沿海城市地热开发中的应用潜力,并为相关工程设计与优化提供理论依据。

1 工程概况

本文所研究的蓄能竖井是上海市某污水处理厂扩建工程的一部分,该竖井在本工程中作为顶管工

作井,其所处区位如图 1 所示。本文选取 17#拼装式竖井的第 11 层管段进行试验。该层段位于上海地区软土层的中间,是沿海地区的软土层的典型代表。蓄能竖井实验段管片展开示意图如图 2 所示。

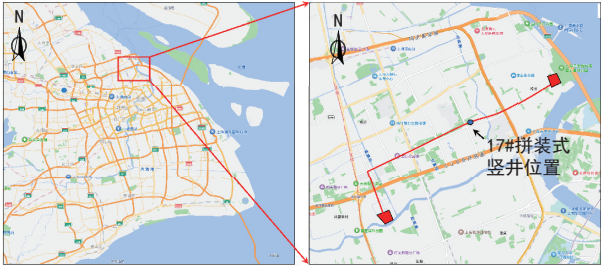


图 1 蓄能竖井位置示意图

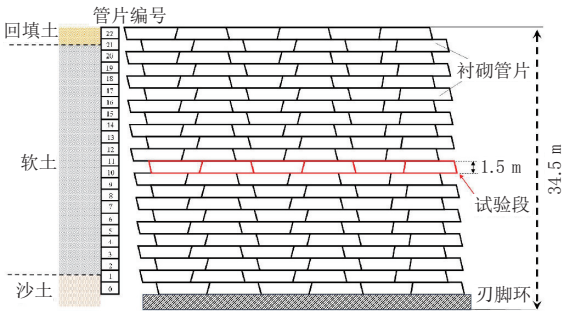


图 2 管片展开图

2 数值模型

2.1 模型描述

基于 COMSOL Multiphysics,建立了模拟蓄能竖井内部传热动力学的数值模型。蓄能竖井数值模型如图 3 所示。依据实际结构确定模型几何尺寸(见表 1),周围土体、混凝土管片及换热管的具体参数如表 2 所示^[24-25]。模型主要包括 3 个部分:(1)混凝土管片(厚度 0.40 m);(2)周围土层(厚度 6.40 m);(3)埋置于管片内的换热管。换热管采用导热性能优良的 PERT 材料,沿竖井轴向平行布置,以兼顾散热效率与控制水头损失。管道外径为 30 mm,壁厚为 5 mm,有助于增大传热表面积,降低循环流体与周围介质之间的传导热阻。

表 1 蓄能竖井模型尺寸 单位:m

参数	值
竖井内径	12.80
土体厚度	6.40
管片厚度	0.40
管片高度	1.50

有限元模型选取高度为 1.5 m 的典型井段作为分析对象。整个模型域初始温度设为 19 ℃,与试验测得的初始土壤温度一致。土体与衬砌的上下表面设为绝热边界,土壤径向外边界设为恒定温度边界

表2 材料参数

材料	参数	值
土体	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 776
	比热容/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	3 857
	导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	1.33
	杨氏模量/MPa	2.30
	泊松比	0.48
	热扩散系数/ $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	50
	孔隙率	1.402
混凝土	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 115
	热扩散系数/ $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	10
	比热容/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	1 862
	导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	1.60
	杨氏模量/GPa	30
水	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 000
	比热容/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	4 200
	导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.58
	外经/mm	30
换热管道	壁厚/mm	5
	导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.4

(19℃)。考虑到井筒内空气流动微弱(风速<0.1 m/s),衬砌-空气界面忽略对流换热,同样设为绝热边界。衬砌厚度取0.4 m,周围土体厚度依据“大于10倍衬砌厚度”的标准设定为6.4 m。后续分析表明,衬砌换热对边界的影响远小于换热管主体。换热管入口设置为恒定水温5℃,出口为自由对流边界。力学边界方面,在土壤外边界、土壤上表面及衬砌上表面施加法向边界荷载,土壤及衬砌底部则施加法向位移约束。衬砌-土壤接触面设置为坐标位移约束条件。

模型采用四面体与边界层混合网格划分方式,近壁区设置3层边界层,尺寸为5 mm,土壤区域网格尺寸为50 mm。通过网格独立性验证,确认10 mm与5 mm网格的计算结果偏差小于2%,保证了数值解的可靠性。蓄能竖井网格划分如图4所示。为模拟衬砌-土壤传热、管道流动及其耦合过程,模型中集成了固体传热、固体力学、非等温管道流动与层流等物理模块。

2.2 分析方法

首先,对蓄能竖井的地应力进行地层平衡;其次,构造几何模型内的换热管,将计算得到的平衡地应力作为初始应力纳入模型;最后建立最终数值模型的热耦合物理场,并分析传热过程。根据图5设置的测点,对换热过程中的出口温度、周围土壤温度、温度应力进行监测和评价。

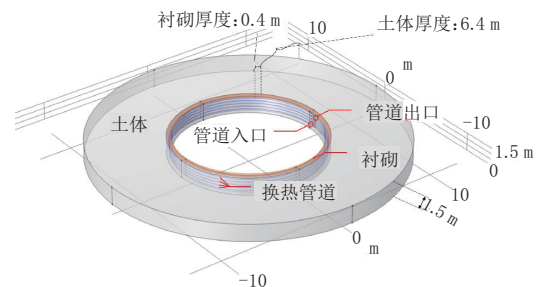


图3 蓄能竖井数值三维模型

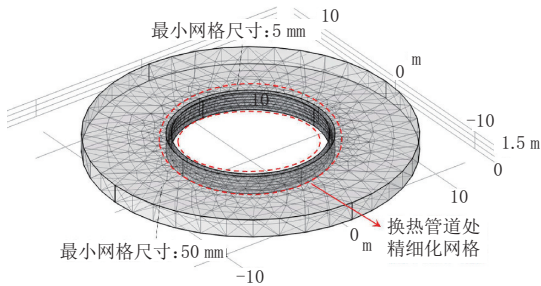


图4 蓄能竖井网格划分

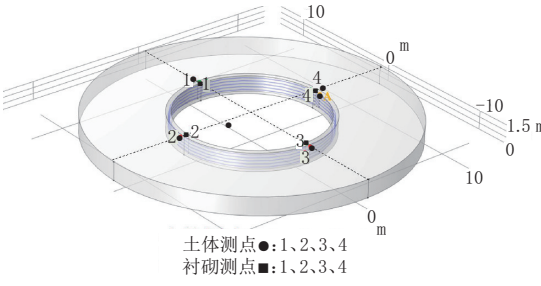


图5 蓄能竖井测点划分

3 结果与讨论

3.1 关键设计参数优化

3.1.1 换热介质流速

换热介质流动速度对蓄能竖井的换热性能具有重要影响。在换热系统中,合理调控流体流速有助于提升蓄能竖井的换热效率,从而优化整个系统的经济性^[26]。本文针对0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 m/s 5种流速条件开展研究并进行对比分析。不同流速条件下单位面积换热量的变化情况如图6所示。

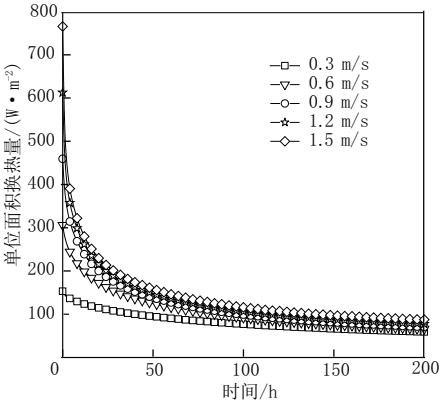


图6 流体流速对热交换的影响

由图 6 可知,随着运行时间的增加,传热量逐渐下降并最终趋于稳定。在初始阶段,换热量波动较为显著。值得注意的是,进口流速较低时,传热性能对流速的变化更为敏感。

通过 100、150 h 的换热实验,分析了流体流速对换热性能的影响,如图 7 所示。在运行至 100 h 时,流速从 0.3 m/s 增至 0.6 m/s,换热量显著提高 31.72%;而当流速从 0.6 m/s 进一步提升至 0.9 m/s 时,换热量增幅为 10.6%。在 150 h 阶段,流速从 0.3 m/s 增至 0.6 m/s 时,换热量上升 19.49%;从 0.6 m/s 增至 0.9 m/s 时,换热量增幅为 7.86%。上述结果表明,随着流速逐渐超过某一临界值,其对换热的增强作用逐步减弱,系统逐渐趋于稳定。

因此,在能源隧道系统设计中,建议将进口流速控制在 0.6 ~ 0.9 m/s。过高的流速不仅无法显著提升换热效率,反而会增加运行成本。

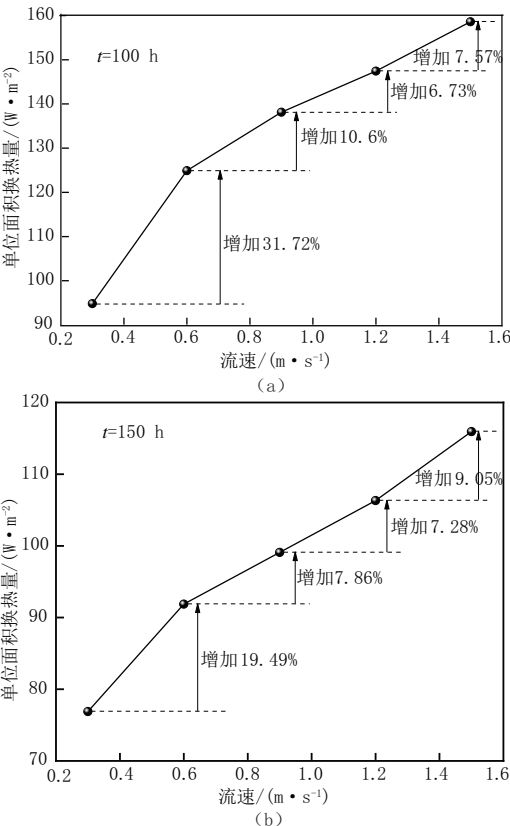


图 7 100 h 和 150 h 时单位面积换热量变化特征

3.1.2 换热管道间距

由于换热管道紧密地集中在一个密闭的换热区域内,管道之间的热干扰会严重影响换热性能,导致热量积聚。热积累的程度随埋管间距的变化而变化。分别以 0.20、0.25、0.30、0.35 m 的间距对换热过程进行分析。

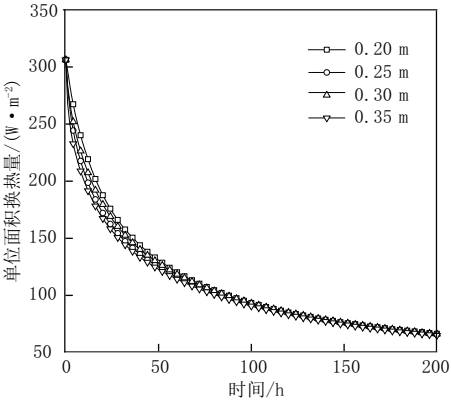


图 8 不同间距下单位面积换热量变化特征

图 8 所示为管间距对衬砌表面单位面积换热的影响。随着管间距的增大,单位面积换热量逐渐减小。这种现象主要是管道间距变化,导致单位衬砌面积内的管道长度不同。为了量化管间距对换热的影响,本文引入单位长度管道换热量的概念,表示为:

$$Q_L = Q/L$$

式中: Q_L 为单位长度管道换热量, W/m ; L 为该管段内换热管长度,m。

图 9 所示为不同管间距条件下单位长度换热量的变化情况。由图可知,随着运行时间的增加,管道换热量逐渐下降,最终趋于稳定。当埋管间距为 0.2 m 时,其换热量显著低于其他间距配置。而当管间距为 0.25 m 与 0.30 m 时,两者的传热曲线随时间变化趋势基本一致,说明进一步增大管间距对传热性能的影响已趋于减弱。

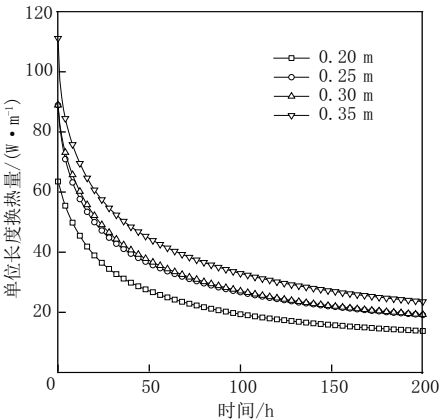


图 9 不同间距下单位长度换热量变化特征

随着管间距的增加,系统在达到稳定前的换热量逐步提高,这主要源于换热管之间热干扰的减弱。管间距越小,热交互作用越强,从而导致换热效果降低。综合单位长度和单位表面积上的换热表现,将管间距控制在 0.25 ~ 0.30 m,可在优化单位长度换热性能的同时,最大化衬砌单位面积的传热效率。

3.2 蓄能竖井变形与应力分布

由于换热管内温度波动,使得整个衬砌管片的应力分布变得不均匀,原有的均匀对称结构丧失。因此,有必要进一步研究管道换热对衬砌变形和应力分布的影响。这项研究将为评估结构的整体稳定性提供重要基础。

3.2.1 衬砌与土体变形规律

蓄能竖井衬砌管片及周围土体的变形对其结构稳定与安全具有重要影响。衬砌变形会削弱井筒的结构完整性,当不均匀变形过大时,可能引发坍塌或失稳,严重影响竖井功能;同时,周围土体的变形也会危及整体稳定性,甚至导致结构破坏。因此,在蓄能竖井的施工与运行过程中,必须对衬砌及土体的变形进行系统监测与有效管控。

基于图5所设置的监测点,衬砌变形如图10所示。从图10可以看出,当低温流体流入管道入口时,衬砌因低温作用产生压缩变形,表现为负应变。随着换热时间延长,压缩变形逐渐增大。在所有测点中,测点4的变形最为显著,这是由于其位于换热管道入口处,较大的初始温差导致该区域产生较高的热应力。相比之下,测点3位于换热管末端,压缩变形最小。该处流经的低温流体温度相对较高,使得管道与衬砌间的温差较小,热应力相应降低,因此压缩应变也较为轻微。

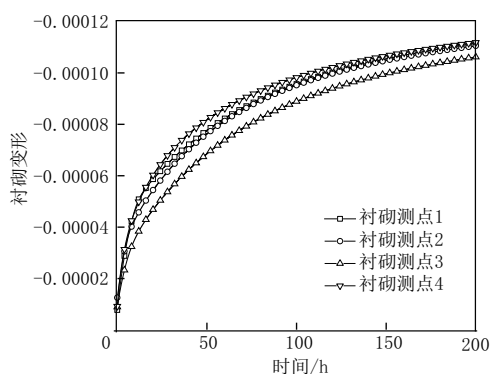


图10 不同测点下衬砌变形特征

衬砌周围土体变形如图11所示。与衬砌的变形行为相比,其周围土体的变形呈现出显著不同的变化规律。随着换热过程的持续,土体整体表现出先压缩、后拉伸的变形特征。在传热初始阶段,衬砌与土体间的热传导效应使得土体在低温条件下发生压缩变形。然而,由于两者热物理参数的差异以及

与换热管距离不同,衬砌所承受的压缩变形远大于土体。这种不协调的变形导致在衬砌与土体接触面附近产生临时的“脱空”区域。与此同时,在地应力作

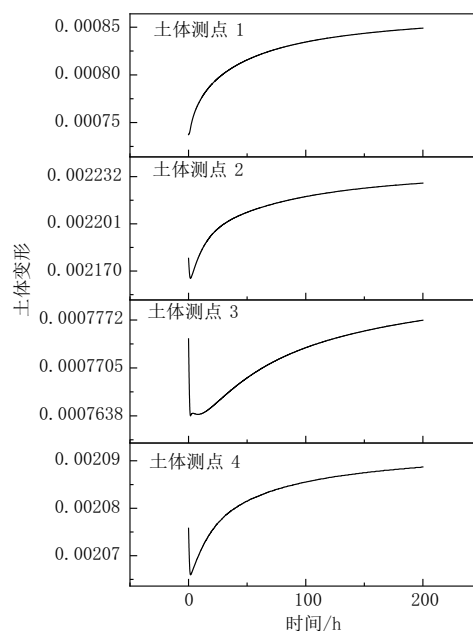


图11 不同测点下土体变形特征

3.2.2 衬砌应力极值点分布规律

蓄能竖井内部的温度波动会引起衬砌材料热胀冷缩,从而产生附加温度应力。当该应力超过材料承载极限时,可能导致衬砌变形甚至开裂。通过分析热交换过程中第一、第二和第三主应力在温度极值下的变化规律,可识别衬砌结构的薄弱区域。

在材料力学中,主应力以代数值表示,拉应力为正,压应力为负。三个主应力的大小和方向共同表征材料的力学性能,如强度、韧性和硬度,并与材料的断裂和变形机制密切相关。例如,裂纹通常沿第一主应力方向扩展,而变形行为则主要受第三主应力影响。通过分析第一主应力的最大值与第三主应力的最小值,可揭示衬砌在换热过程中所经历的最大拉应力与最大压应力的演变规律。

图12所示为传热过程中各阶段拉应力极值的变化情况。分析表明,极限拉应力随时间呈现先增大后减小的趋势,并在换热开始后5 h达到峰值。在换热初期,衬砌与换热管之间存在较大温差,导致显著的温度诱导拉应力;随着换热过程进行,两者间温差因热传导作用逐渐减小,相应的附加温度应力也随之降低。

图13显示了换热过程中衬砌最大拉应力的分布位置。在不同进口温度条件下,最大拉应力均出现在换热管入口附近衬砌外缘的底部区域。这是由于

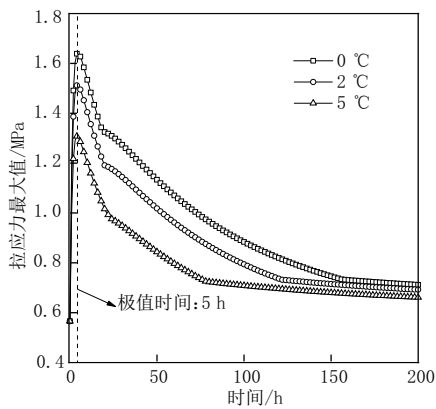


图 12 拉应力极值变化特征

入口处温度场变化剧烈,管道周围混凝土出现明显的温度与应力集中,从而拉应力显著增大。3种工况下该位置的最大拉应力为1.64 MPa,相当于C50混凝土抗拉强度标准值(2.64 MPa)的62.1%,表明该区域为衬砌抗拉的薄弱部位。

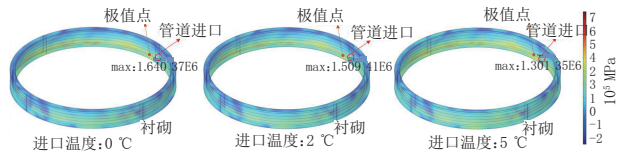


图 13 衬砌最大拉应力的分布位置

图 14 所示为压应力极值随时间的变化规律。其变化趋势与拉应力类似,亦为先上升后下降,在换热至31 h时达到压应力极值。

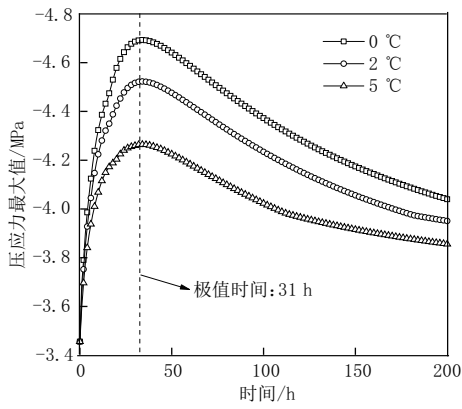


图 14 压应力极值变化特征

图 15 进一步给出了最大压应力的位置分布。在不同进口温度条件下,该位置保持一致,位于换热管入口对称侧的衬砌接头内缘顶部。3种工况下该处最大压应力为4.69 MPa,约为C50混凝土抗压强度标准值(50 MPa)的9.4%,说明压应力水平在材料允许范围内。

综合最大拉、压应力的位置分析可知,在结构设计阶段应避免将换热管入口布置于管片接缝处,而应尽量将其设置于管片中心区域,以降低应力集中

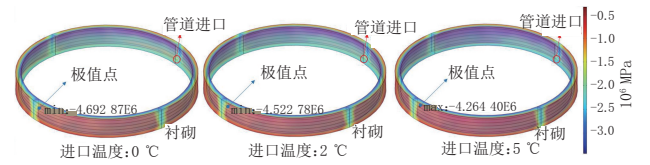


图 15 衬砌最大压应力的分布位置

风险,提升结构耐久性。

4 结 论

本文围绕滨海城市浅层地热开发需求,以上海市某拼装式蓄能竖井试验段为研究载体,通过热-力耦合数值模拟,系统分析了关键设计参数对热交换效率的调控作用,以及换热过程中结构的变形与应力分布规律,核心研究结论如下。

(1)换热介质流速与管道间距是调控热交换效率的核心因素,最优组合为流速0.6~0.9 m/s、管间距0.25~0.30 m。此范围内既能保证换热效率(流速从0.3 m/s增至0.6 m/s时,100 h换热量增幅达31.72%,管间距过小则热干扰强,过大则单位面积传热效率降低),又可避免运行成本浪费或性能冗余。

(2)低温流体作用下,衬砌持续压缩且换热管入口附近变形最显著,周围土体呈“先压缩、后拉伸”特征(后期因衬砌-土体变形不协调产生“脱空”并在地应力下拉伸);应力方面,最大拉应力1.64 MPa(达C50混凝土抗拉强度标准值的62.1%)集中于换热管入口附近衬砌外缘底部,为主要薄弱区,最大压应力为4.69 MPa(仅为C50混凝土抗压强度标准值的9.4%)处于安全范围。建议设计时将换热管入口避开管片接缝、优先设于管片中心,降低应力集中风险。

(3)研究结论可为滨海城市浅层地热开发工程的参数设计、施工监测及安全评估提供直接参考,对推动地下空间与浅层地热资源协同利用具有实践价值。

参考文献:

[1] 钱七虎.能源地下结构与工程——助力“双碳”目标,赋能绿色城市[J].深圳大学学报(理工版),2022,39(1):1-2.
[2] 温继伟,侯珺尧,刘星宏,等.能源地下结构研究及应用进展[J].煤田地质与勘探,2022,50(10):119-130.
[3] Ioan Sarbu S, Calin S. General Review of Ground-source Heat Pump Systems for Heating and Cooling of Buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 70: 441-54.
[4] Kong G Q, Chen Y, Wang L H, et al. Seasonal Performance of an Energy Pile Heat Pump System and Prediction of Building Thermal Load[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 214: 122359.
[5] Liu Z J, Xu W, Zhai X, et al. Feasibility and Performance Study of the

- Hybrid Ground-source Heat Pump System for One Office Building in Chinese Heating Dominated Areas[J]. *Renew Energy*, 2017, 101: 1131-40.
- [6] Spitler D, Gehlin E A. Thermal Response Testing for Ground Source Heat Pump Systems—An Historical Review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 1125-37.
- [7] Dai X, Bidarmaghz A, Narsilio G A. Energy Tunnels: A Review of the State of the Art and Knowledge Gaps to Harness Renewable Energy from Underground Infrastructure[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 142: 105431.
- [8] Magdy A, Ogunleye O, Mroueh H, et al. A Review of Exploiting Shallow Geothermal Energy through Tunnels: Current Status and Future Prospects[J]. *Renew Energy*, 2024, 238: 121958.
- [9] Mohamad Z, Fardoun F, Meftah F. A Review on Energy Piles Design, Evaluation, and Optimization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 125802.
- [10] Hamada Y, Saitoh H, Nakamura M. Field Performance of an Energy Pile System for Space Heating[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 39: 517-52.
- [11] Liu J, Wang F H, Yuan G A. Influencing Factors Analysis and Operation Optimization for the Long-term Performance of Medium-deep Borehole Heat Exchanger Coupled Ground Source Heat Pump System[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 226: 1-13.
- [12] Huang Y B, Zhang Y J, Xie Y Y. Thermal Performance Analysis on the Composition Attributes of Deep Coaxial Borehole Heat Exchanger for Building Heating[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 221: 110019.
- [13] 王艳,刁乃仁,王京.U型管地热换热器热作用半径的数值模拟[J]. *建筑热能通风空调*, 2011, 30(3): 46-49.
- [14] Yu Z Y, Hu P F, Yuan X D. Experimental Study on Buried Pipe Heat Transfer for Soil Source Heat Pump[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008(25): 157-61.
- [15] 姜弘,包鹤立,林咏梅.拼装式竖井设计与施工技术应用研究——以南京某沉井式地下车库项目为例[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(3): 463-470.
- [16] Zhou J, Liu C J, Xu J, et al. Deformation Mechanism and Control of In-situ Assembling Caisson Technology in Soft Soil Area under Field Measurement and Numerical Simulation[J]. *Materials*, 2023, 16: 1125.
- [17] Rotta Loria A F, Laloui L. The Interaction Factor Method for Energy Pile Groups[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 80: 121-137.
- [18] Barla M, Di Donna A, Perino A. Application of Energy Tunnels to an Urban Environment[J]. *Geothermics*, 2016, 61: 104-113.
- [19] Amatya B L, Soga K, Bourne P J. Thermo-mechanical Behaviour of energy piles[J]. *Géotechnique*, 2012, 62: 503-19.
- [20] Bourne P J, Amatya B, Soga K. Energy Pile Test at Lambeth College, London: Geotechnical and Thermodynamic Aspects of Pile Response to Heat Cycles[J]. *Géotechnique*, 2009, 59: 237-48.
- [21] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. Experimental and Numerical Investigations of the Behaviour of a Heat Exchanger Pile[J]. *International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, 2006, 30: 763-81.
- [22] Barla M, Di Donna A. Energy Tunnels: Concept and Design Aspects. *Underground Space*, 2018, 3(4): 268-76.
- [23] Cartney J S, Murphy K D. Strain Distributions in Full-scale Energy Foundations[J]. *DFI Journal - the Journal of the Deep Foundations Institute*, 2012(6): 26-38.
- [24] Cui H Z, Li Y H, Bao X H, et al. Thermal Performance and Parameter Study of Steel Fiber-reinforced Concrete Segment Lining in Energy Subway Tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 128: 104647.
- [25] 祝振南.能源盾构隧道换热、受力及施工问题分析[D].北京:清华大学, 2020.
- [26] Cousin B, Rotta Loria A F, Bourget A, Rognon F, Laloui L. Energy Performance and Economic Feasibility of Energy Segmental Linings for Subway Tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 102997.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com



广 告