文章编号: 0253-374X(2024)12-1854-08

基于田口法的隧道围岩蓄热系统性能优化及工程 应用

张瑶¹,夏才初^{2,3},周舒威¹,张建新⁴

(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;2. 宁波大学 岩石力学研究所,浙江 宁波 315211;3. 宁波市能源地下结构重点实验室,浙江 宁波 315211;4. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司 岩石力学研究所,新疆 乌鲁木齐 830022)

摘要:不稳定可再生能源的大规模存储具有很大发展潜力。 为此,提出隧道围岩蓄热型热泵系统并建立三维隧道围岩蓄 热换热器耦合传热模型,同时,基于田口试验设计,提出了隧 道围岩热泵系统蓄热性能优化方法,并应用于 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道工程。在用现场热响应试验数据验证 模型合理性的基础上,蓄热隧道的蓄热性能模拟结果表明, 隧道围岩蓄热型热泵系统储热效能优于传统垂直钻孔埋管 蓄热系统,且不需要高的前期钻孔成本和占地面积。建立4 因子3水平下的L₁₀(3⁴)田口试验正交表,利用 Minitab 数据统 计分析软件进行信噪比和方差分析,得出最优控制参数组合 及各参数贡献率。工程应用结果表明:蓄热与取热温差的贡 献率最高,依次为运行蓄取比、围岩初始温度、围岩导热系 数;最优参数组合为围岩初始温度18℃,围岩导热系数1.5 W•m⁻¹•K⁻¹,蓄取比1:2,蓄热与取热温差45℃。研究成果可 为隧道围岩蓄热性能优化提供理论方法及技术支持。

关键词:隧道围岩蓄热型热泵系统;田口方法;运行优化;蓄 热性能

中图分类号: TU45 文献标志码: A

Performance Optimization of Tunnel Surrounding Rock Heat Storage System Using Taguchi Design and Its Engineering Application

ZHANG Yao¹, XIA Caichu^{2,3}, ZHOU Shuwei¹, ZHANG Jianxin⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Ningbo Key Laboratory of Energy Geostructure, Ningbo, 315211, China; 4. Xinjiang Transportation Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Urumchi, 830022, China)

Abstract: The large-scale storage of unstable renewable energy has great potential. Therefore, a heat storage heat pump system for tunnel surrounding rock is proposed, and a 3D heat exchanger coupled model in tunnel surrounding rock is developed. Additionally, an optimization method for heat storage performance of tunnel surrounding rock heat pump system is proposed using Taguchi design, and applied to the Stuttgart-Fasanenhof energy tunnel project. The rationality of the model is well verified by on-site thermal response test data, and the simulation results of the heat storage performance of the thermal tunnel show that, the heat storage efficiency of the tunnel surrounding rock heat storage heat exchanger system is at least comparable to that of the traditional vertical borehole heat exchanger heat storage system, Moreover this system reduces the high borehole construction costs and minimizes the required underground area. Four operating parameters for the heat storage tunnel at three levels are assumed, and $L_{10}(3^4)$ orthogonal array is employed. The optimal control parameter combination and the contribution rate of each parameter are obtained by conducting signal-to-noise ratio and ANOVA analysis using Minitab statistical analysis software. The maximum percentage contribution is observed in factor D (heat storage and extraction temperature difference), followed by the operating ratio, the initial temperature of the surrounding rock and the thermal conductivity of the surrounding rock, respectively. The optimal parameter combination is obtained, i.e., the initial temperature of the surrounding rock is 18 °C, the thermal conductivity of the surrounding rock is $1.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, the operating ratio is 1: 2, and the temperature difference between heat storage and extraction is 45 °C. The research results can provide theoretical methods and technical support for the optimization of heat storage performance of tunnel

第一作者:张 瑶,工学博士,主要研究方向为隧道地温能利用。E-mail: zhangyao1910399@tongji.edu.cn

通信作者:夏才初,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为能源地下结构。E-mail:tjxiacca@126.com



收稿日期: 2023-02-16

基金项目:新疆维吾尔自治区科技重大专项(2020A03003-2);浙江省自然科学基金重点项目(LZ22E080008)

surrounding rock.

Key words: tunnel surrounding rock heat storage heat pump system; Taguchi method; operation optimization; thermal storage performance

在双碳目标的引领下,构建绿色清洁高效的可 再生能源储存体系尤为重要。而由于太阳能、风能 等可再生能源的间歇性和波动性,使能源产生极大 的浪费,需要一种经济有效的方法将这些能量进行 大规模存储,以便在没有太阳能等资源的时间段使 用。目前我国大力支持浅层地温能的开发利用,在 寒冷或严寒地区,取暖的热负荷远大于冷负荷,造成 岩土体温度逐年持续下降,大大制约了热泵的运行 效率,限制了地温能利用技术在严寒地区的发展。 为弥补这种冷热不平衡,多个学者[1-3]提出利用太阳 能储热与钻孔埋管地源热泵系统相结合,不但提高 了热泵机组的工作效率(COP),而且还实现了太阳 能的跨季蓄热。Dupray^[4]通过数值模拟研究了储能 混凝土能源桩的热力学特性并评估了其对桩基受力 的影响,为建筑地下桩基区域季节性储能的推广应 用提供了更系统的理论。基于以上研究,提出一种 新型经济有效的隧道围岩蓄热型地源热泵技术,将 不稳定可再生能源转化为稳定的地温能,实现太阳 能的大规模存储。

在隧道中铺设热交换管提取地温能的研究已屡 见不鲜。Adam^[5]在奥地利用新奥法施工的Lainzer 隧道中将铺设于初衬与二衬之间的防水卷材用作热 交换构件(称作能源土工布)以提取地温能。夏才初 等^[6-8]在国内率先开展了山岭隧道衬砌换热器的传热 理论和工程应用研究,在隧道的初衬与二衬之间埋 设热交换管提取地温能,并建立了山岭隧道衬砌换 热器三维传热模型,建成了首个山岭隧道衬砌围岩 换热器试验段,有效节能地解决了寒区隧道洞口段 冻害问题。Ogunleye^[9]建立了装配式管片衬砌换热 器的传热模型,研究了间歇运行和隧道内气温变化 对衬砌换热器长期换热性能的影响。以上研究成果 均为隧道围岩蓄热换热器的蓄热性能研究提供了有 益的参考。但目前对隧道换热器蓄热储能的研究却 很少, Mimouni^[10]探讨了将明挖隧道的锚杆作为热 交换器与隧道围岩进行季节性蓄热的地热潜力。 Green^[11]提出了一种大规模存储可再生能源方法 一地热电池储能,并提出其潜在的经济效益。 Loria^[12] 首次评估了地下隧道热交换器的热能储存

潜力并初步定义了用于评估其储热性能的基本物理 变量,并用数值方法研究了不同运行工况下储热性 能响应。但只是进行了初步的研究,且只对某些因 素进行单一变量分析。田口试验方法^[13]可以用较少 的试验得到更加准确的分析结果,并分析各类因素 对其性能的影响程度,已被广泛应用于地埋管地源 热泵系统领域^[14-15],但在隧道换热器系统性能优化领 域并未应用。

基于田口试验设计,提出了隧道围岩热泵系统蓄 热性能优化方法,并应用于德国Stuttgart-Fasanenhof 城市轨道能源隧道换热器系统。首先,建立了三维隧 道围岩蓄热换热器系统耦合模型,通过将现场热响应 试验实测数据与模拟结果相对比,验证了该模型用于 隧道围岩蓄热系统研究的合理性;其次,从蓄能隧道围 岩储能效率角度建立了评价指标,对影响隧道围岩蓄 能特性的围岩初始温度、围岩导热系数、运行模式(蓄 热与取热时间比)、蓄热与取热温差4个控制因子,采 用田口方法进行正交试验设计,对各因素的影响程度 进行排序并找到最优因素参4数组合,对隧道围岩蓄 热系统进行运行优化分析。

1 隧道围岩蓄热型热泵系统工作原理

隧道围岩蓄热型热泵系统是将热交换管埋设在隧 道衬砌与围岩之间,以不稳定的可再生能源太阳能等 作为热源,将隧道围岩作为大型蓄能容器,通过热交换 管中的循环介质与隧道围岩进行热交换,从而实现隧 道围岩的蓄热储能。储存在围岩中的热量可用于冬季 隧道洞口段的防冻加热,也可用于附近建筑的供热。 隧道围岩蓄热型热泵系统如图1所示。



图1中隧道围岩蓄热型热泵系统工作原理如下:





位于衬砌和围岩之间的热交换管通过分、集水管与太 阳能集热器相连,形成封闭系统,在太阳能充足的季节, 太阳能集热系统开始向隧道围岩储热,通过横向(或纵 向)蓄热管与低温围岩进行热交换,将太阳能集热器收 集的热能以稳定的地温能的形式储存在隧道围岩中; 在冬季供热时,供热管路由横向(或纵向)蓄热管,经由 热泵系统与建筑用户末端相连,形成封闭系统,由系统 内注满的传热循环介质,将储存在围岩的热量经过热 交换管提取出来,提取出的低品质地温能再由热泵系 统提升后,用于附近建筑的供暖,从而实现太阳能在隧 道围岩中的跨季蓄能和提取。

与钻孔地埋管蓄能和能源桩蓄能相比,隧道围岩 蓄热有更显著的优势:①隧道拥有更大的地下体表面 积来大规模储能;②相对于钻孔埋管蓄热,大大节省 了前期钻孔成本以及占地面积。此外,目前我国隧道 基础建设蓬勃发展,应抓住这一契机,以期为双碳目标 的实现做出一些贡献,同时也为太阳能丰富的高寒隧 道(如新疆天山胜利隧道)的蓄能防冻提供指导。

2 热力学模型和田口设计方法

2.1 热力学模型

隧道衬砌和围岩温度场瞬态传热控制方程为

$$\rho_{s}C_{p}\frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = Q \qquad (1)$$

式中:其中 ρ_s 、 C_p 、k分别为固体(即围岩、混凝土衬砌)的密度、恒压热容和导热系数;T为温度;Q为热源蓄热换热器。

蓄热换热器采用非等温管道流模型,在管道轴 线上将其简化为一维曲线,并忽略管壁温度的变化, 管内水通过管壁与管周环境换热使用等效传热系数 计算。其能量方程为

$$\rho_{\rm L}AC_{\rm p}\frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{\rm L}AC_{\rm p}\boldsymbol{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot Ak \nabla T + f_{\rm d}\frac{\rho A}{2d_{\rm H}} |\boldsymbol{u}|^3 + Q_{\rm w}$$
(2)

式中: ρ_L 、 C_P 、k分别为流体的密度、恒压热容和导热 系数; A 为换热管横截面积; T 为流体截面平均温 度; u 为流体速度场; f_a为达西摩擦系数; d_H为平均水 力直径; Q_w为管壁与周围环境热交换的源项。

式(2)中左端第一项为非稳态项,表示流体温度 随时间的变化,第二项为对流项,表示流体循环净带 走的热量;等号右端第一项为扩散项,表示由流体热 传导而净导入的热量,第二项表示由粘性剪切耗散 的摩擦热。 管壁与周围环境的热交换方程为

$$Q_{\rm w} = Z_{\rm eff}(T_{\rm ext} - T) \tag{3}$$

式中:Z_{eff}为管内流体与外界进行热交换的等效传热 系数,其值为等效传热热阻R的倒数,其中包含了管 壁、管壁外表面传热等对热传导的贡献。

$$R = \frac{\frac{1}{r_1 h_{\text{int}}} + \frac{1}{r_2 h_{\text{ext}}} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{k_{\text{wall}}}}{2\pi}$$
(4)

式中:r₁、r₂分别为换热管内、外半径; k_{wall}为换热管导 热系数; h_{int}、h_{ext}为换热管内表面和外表面的壁面换 热系数。

2.2 田口设计方法

田口优化设计方法,是一种使用标准正交矩阵 形成试验矩阵,且从最少的试验次数中获得每个参 数最佳水平的试验优化方法。在数据分析中,信噪 比(*S/N*)用于分析其响应,分析信噪比的特性性能 分为三种:望大、望小、望目。另外,利用方差分析 (ANOVA)得到各个参数的贡献百分比。

在隧道围岩蓄热换热器性能优化分析中,优化 的目标是尽可能提高储能效率,因此取望大特性信 噪比:

$$S/N = -10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{Y_i^2} \right)$$
 (5)

式中:S/N为信噪比;Y_i为试验因变量,在此为隧道 围岩蓄热换热器储能效率;n为试验重复次数。

田口优化设计方法的最小实验次数为

$$N_{\text{Tagu}} = 1 + N_{\text{v}}(L - 1)$$
 (6)

式中: N_{Tagu} 为实验次数; N_v 为参数因子数目;L为水 平数。

方差分析主要是通过计算每个参数因子在隧道 围岩蓄热换热器系统热响应中的贡献百分比来估计 各控制参数的相对重要性。方差分析法,即求得各 种参数的平方和(*T*ss)、方差(σ_{MS})、F值以及P值,进 而求得各参数贡献率,用以评判参数的相对重要 程度。

$$T_{\rm SS} = \sum_{i=1}^{n} X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} S_N\right)^2}{n}$$
(7)

式中: X_i 为水平i的信噪比S/N总和;n为总试验 次数。

$$\sigma_{\rm MS} = \frac{T_{\rm SS}}{L-1} \tag{8}$$

式中:L为水平数。

F值是组间平均方差和组内平均方差的比值,

)

用于量化隧道围岩蓄热换热器系统储能效率优化中的各控制因素权重。P值为各控制因子的概率分布,其中概率高对应的权重系数较小,用来测量否定 原假设的证据。概率越低,否定原假设的证据越充 分,当P < 0.05时,则可认为蓄热隧道储能效率与 参数之间的关联具有显著的统计意义。此外,参数 的贡献百分比c表示该参数对蓄热隧道储能效率优 化的贡献程度大小,由式(9)计算得出。

$$c = \frac{T_{\rm ss}}{\sum_{i=1}^{n} T_{\rm ss}} \tag{9}$$

3 工程案例分析

以德国Stuttgart - Fasanenhof 城市轨道能源隧 道^[16]为例,建立三维隧道围岩蓄热换热器耦合模型 并进行性能优化分析。Stuttgart-Fasanenhof隧道的 两个独立的隧道段B73、B82(每段分别长10m,总长 度为20m)中,在隧道初衬与二衬之间沿隧道纵向埋 设热交换管,通过循环介质向隧道围岩提取或注入 热量,用于附近建筑的加热(冬季)或制冷(夏季)。

3.1 隧道围岩蓄热换热器模型验证

采用Comsol Multiphysics数值模拟软件中非等 温管道流模块和固体传热模块来实现2.1节所述隧 道围岩蓄热换热器耦合传热模型的建立。首先,用 Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道现场热响应试验的一 组实测数据来验证该隧道围岩蓄热系统模型的合理 性。该隧道位于地表以下10m,隧道等效直径为10 m,衬砌厚40 cm,单个隧道段(10 m长)布置热交换 管总长为400 m(隧道左右各一个200 m的循环管 路),热交换管外径25mm,壁厚2.3mm,间距0.4 m。按照Stuttgart-Fasanenhof能源隧道实际尺寸及 参数,建立三维隧道围岩蓄热系统耦合模型(图2), 模型尺寸长×高×宽(隧道轴向长度)为120 m×78 m×10 m,模型中所用的热物性参数见表1。 Stuttgart-Fasanenhof隧道位于石灰岩、砂岩和泥灰 岩的岩层中^[16],在文献[16]中,通过对隧道周围400 多个岩样进行测试,得到石灰岩、砂岩导热系数平均 值分别为2.8、4.0 W·m⁻¹·K⁻¹,另外,在泥灰岩层中 进行了现场热响应测试,测出该岩层的综合导热系 数为1.9 W·m⁻¹·K⁻¹。为方便建模计算,将现场多 层地层简化为单一地层,并取围岩导热系数为各岩 层导热系数的平均值2.9 W·m⁻¹·K⁻¹。模型验证 时,采用现场热响应试验中一组实测数据的试验条

件:围岩初始温度 T_{initia} 为9℃,隧道围岩蓄热系统热 交换管入口温度定为20.9℃,在隧道围岩换热器的 入口处,模拟的140 d期间的流速被认为是0.38 m· s⁻¹(体积流量为650 L·h⁻¹),且在隧道衬砌内表面赋 予现场实测得到的温度 $T_{wall,t}$ (图 2b)。模型左右边 界均为绝热边界条件,且由于地表环境气温对围岩 的影响范围为10~15 m,为简化计算,上下边界采用 固定温度边界9℃。



Fig. 2 Schematic of numerical validation model initial and boundary conditions

隧道围岩蓄热换热器系统数值模拟结果与现场 热响应试验数据对比结果如图 3 所示。由图 3a 可 知,从验证模型获得的热交换管中流体出口温度变 化与现场实测结果非常吻合。将该试验条件下数值 模拟获得的距离隧道结构内表面 0.5 m处(在 y 轴 方向,且 z 方向地表以下 15 m)的围岩温度,与现场 实测结果进行比较,显示出较好的一致性(图 3b)。

上述结果表明,该隧道围岩蓄热换热器模型可 以很好地描述和再现现场试验观察到的能源隧道热 响应特性,此外,根据图3结果中,循环液体的出入 口温度的差值以及隧道附近0.5m处围岩温度显著 提升,也初步证明了隧道围岩的蓄热能力。因此,该

			~~
Tab. 1 Materia	l paramet	ters used in valid	ation model
材料	密度 ρ /(kg• m ⁻³)	导热系数λ _s /(W•m ⁻¹ •℃ ⁻¹)	比热容 <i>c</i> _p /(J• kg ⁻¹ •℃ ⁻¹)
隧道衬砌	2 250	2.1	890
围岩	2 400	2.9	1 100
HDPE热交换管	_	0.4	—
循环流体	1 000	0.582	4 180

表1 隊道围岩蓄热模型中各材料参数

模型将在用于后续隧道围岩蓄热换热器性能优化分 析研究中。







3.2 隧道围岩蓄热换热器长期蓄热特性研究

为研究隧道围岩蓄热换热器长期蓄热性能,模 拟其在20年的蓄热和取热循环周期运行下温度变 化规律。由于隧道内表面与空气的对流换热,在蓄 能过程中势必会存在一定的储存损失,因此在蓄能 隧道内侧铺设隔热材料,以避免热损失,而在模型分 析中隧道内表面设为绝热边界条件。

隧道围岩蓄热取热运行模式考虑为6个月的蓄 热期和6个月的取热期(夏季蓄热,冬季取热),蓄热 期间和取热期间热交换管入口温度分别设定为 50℃、5℃,蓄热与取热温差为45℃,热交换管循环 液体流速为1m·s⁻¹,围岩导热系数为1.5W·m⁻¹·K⁻¹,围岩初始温度为9℃。图4为运行工况8下蓄能隧道在20年季节性蓄热运行中的蓄热性能和储能效率的变化趋势。为了更好地观察其蓄热特性,前两年运行周期做了放大显示处理。

图4a中,在蓄热期,循环介质出口温度随蓄热时 间的持续逐渐升高,取热期,出口温度随时间逐渐减 小,热交换管出入口温差均随时间持续而逐渐减小。 根据式(1)可得出换热(蓄热或取热)功率的变化趋 势(图4b),蓄热表示为正,取热表示为负,蓄热(取 热)功率均随蓄热(取热)期的持续大幅度降低,换热 能力减弱;对图4b换热功率按式(2)在一定时间内 积分得到该蓄能隧道的换热量(图4c),蓄热量(取热 量)随着运行周期循环逐渐减小(增大)最终趋于稳 定,并由公式(3)计算出对应的储能效率。图4d为 距隧道内壁0.9 m处围岩温度,岩体温度随着蓄热 时间增加而增加,随取热时间增加而减小,蓄取热循 环20年后,该处岩体年平均温度上升了0.73℃。

在6个月蓄热和6个月取热循环周期运行下,储 能效率持续增大并在运行5个周期后逐渐趋于稳 定,直到充满达到44%。在前5年不断蓄能取能的 周期循环下,围岩平均初始温度持续升高,为隧道围 岩持续蓄能,直到达到该蓄能隧道围岩条件下的最 大地温能存储量。在现有的钻孔埋管蓄能系统中, 蓄能稳定后储能效率大多在40%~60%之间^[1,12], 由此可见,隧道围岩蓄热型地源热泵系统储能效率 可达到与钻孔埋管蓄能一样的蓄能能力,且不需要 高的钻孔前期成本和占地面积。

换热功率q由下式计算得出:

$$q = \rho \cdot c_{\rm p} \cdot V \cdot (T_{\rm in} - T_{\rm out}) \tag{10}$$

式中:q为换热(蓄热或取热)功率;ρ、c_p、V为热交换 管内循环介质水的密度、比热容、流量;T_{in}、T_{out}分别 为热交换管内循环介质水的入口温度和出口温度。

换热(蓄热或取热)量由换热功率在一定时间内 积分得到:

$$Q = \left[q \mathrm{d}t \right] \tag{11}$$

式中:Q为换热(蓄热或取热)量;t为运行时间。

储能效率是η在一年运行周期内提取的热量 *Q*_{ext}和存储的热量*Q*_{ini}之比:

$$\eta = \frac{Q_{\text{ext}}}{Q_{\text{inj}}} \tag{12}$$

储能效率是评估地下热能储存系统能源性能最 广泛使用的指标,在隧道围岩蓄热换热器性能优化





Fig. 4 Thermal characteristics of energy storage tunnel in 20 years seasonal operation

分析研究中,采用储能效率指标来评估围岩蓄热换 热器的性能。

3.3 田口方法分析

使用 Minitab 数据统计分析软件中试验设计 (DOE)的田口设计和方差分析(ANOVA)实现隧道 围岩蓄热换热器性能优化分析。

在垂直地埋管换热器中循环流体的热物性参数 和流速对换热性能影响并不大[17],因此在隧道围岩 蓄热换热器储能效率的研究中[12,17],主要考虑的因 素有:(A)围岩初始温度,(B)围岩导热系数,(C)运 行模式,(D)蓄热与取热时温差。根据相关规范和 文献[12,17]:隧道围岩温度一般为7℃~20℃;围岩导 热系数范围一般在1.5~3.5 W·m⁻¹·K⁻¹之间;在一 年内考虑一个蓄热和一个取热循环过程,实际工程 需根据隧址区太阳能辐射条件和气温条件确定运行 模式,本研究运行模式可取"6+6"(6个月蓄热期+6 个月取热期,即蓄取比1:1)、"4+8"(4个月蓄热期 +8个月取热期,蓄取比1:2)或"8+4"(8个月蓄热 期+4个月取热期,蓄取比2:1);对于蓄热与取热温 差,蓄热期间换热管入口温度设定为固定值50℃, 取热期间换热管入口温度设定为5℃、10℃、15℃, 则蓄热与取热温差为45℃、40℃、35℃。因此,研究 隊道围岩蓄热换热器性能洗取4种参数因子的3种 水平进行优化分析,如表2所示。

表2 隧道围岩蓄		热换热器性能	参数】	及其水平	数		
Tab. 2	Pe	erformance	parameters	and	levels	of	heat

storage heat exchangers

编号	参数	水平 1	水平 2	水平3
А	围岩初始地温/℃	18	13	9
В	围岩导热系数/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	1.5	2.5	3.5
С	运行模式(蓄取比)	1	0.5	2
D	蓄热与取热温差/℃	35	40	45

3.3.1 信噪比S/N分析

在隧道围岩蓄热换热器性能优化分析研究中, N,=4,L=3,最小实验次数为9,但如果设计9次试 验,残差误差自由度即为0,无法计算方差,因此也无 法计算 F 值(评估组间差异)、P 值(用来判定假设检 验结果的参数)。因此选择进行10种不同工况(在 田口试验设计9种工况的基础上增加1种工况)的数 值模拟试验,正交试验表排列L₁₀(3⁴)。

模拟分析隧道围岩蓄热换热器系统在不同工况 下运行20年的蓄热特性,得到各工况对应的响应值 (储能效率),见表3。根据不同工况下的响应值进行 田口设计分析,得到各响应的信噪比(如表3)及信噪 比响应表(表4)。表4中,可通过选择每个参数控制 因子的平均信噪比最大值来确定隧道围岩蓄热系统 运行的最优参数组合。平均信噪比的最大值与最小 值之差 Delta值越大,表明该因子对隧道围岩蓄热地 源热泵系统储能效率影响越大。因此,最优控制参 数水平为 A_1 (围岩初始温度 18 \mathbb{C}), B_1 (围岩导热系 数 1.5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), C_2 (运行模式:蓄取比1:2), D_3 (蓄热与取热温差45 \mathbb{C})。

表 3 田口正交 L₁₀(3⁴)排列以及不同运行工况的储能效率 和相应信噪比

Tab. 3Taguchi $L_{10}(3^4)$ experimental plan - standard
orthogonal array and corresponding S/N

序号	А	В	С	D	储能效率η	信噪比 S/N
1	18	1.5	1	35	0.486	-6.26727
2	18	2.5	0.5	40	0.766	-2.31542
3	18	3.5	2	45	0.585	-4.65688
4	13	1.5	0.5	45	0.878	-1.13011
5	13	2.5	2	35	0.411	-7.72316
6	13	3.5	1	40	0.543	-5.30400
7	9	1.5	2	40	0.506	-5.91699
8	9	2.5	1	45	0.441	-7.11123
9	9	3.5	0.5	35	0.396	-8.04610
10	13	2.5	1	35	0.408	-6.12546

表4 田口正交试验信噪比响应表

 Tab. 4
 Taguchi response for storage efficiency in energy storage tunnels

水平数	А	В	С	D
1	-4.413	-4.438	-6.617	-7.456
2	-5.486	-6.234	-3.831	-4.512
3	-7.025	-6.002	-6.099	-4.299
Delta	2.612	1.796	2.787	3.156
排秩	3	4	2	1

3.3.2 方差分析 ANOVA

在隧道围岩蓄热换热器系统储能效率最大的优 化目标下,影响储能效率的各参数控制因子的自由 度、平方和(SS)、方差(MS)、F值、P值和贡献百分 比,如方差分析表5所示。

表5 参数方差分析 Tab.5 Analysis of variance(ANOVA)

参数	自由 度	平方和	方差	F值	P值	贡献 率/%
А	2	10.3608	6.26446	2 978. 52	0.013	20.79
В	2	6.4060	2.100 30	998.62	0.022	12.85
С	2	13.7030	5.62266	$2\ 673.\ 37$	0.014	27.50
D	2	19.3698	9.68489	$4\ 604.\ 81$	0.010	38.86
误差	1	0.0021	0.00210			
ム社	9	19 8/16				

从表5可以看出,四种控制参数的P值均小于 0.05,表明蓄热隧道储能效率与各参数之间的关联 具有显著的统计意义。对于隧道围岩蓄热换热器系 统储能效率优化设计的4个控制因子中,D因子(蓄 热与取热温差)的贡献率最大,为38.86%,其次是C 因子(运行模式:蓄取比)的贡献率,为27.50%,A 因子(围岩初始温度)的贡献率为20.79%,而B因 子(围岩导热系数)的贡献率相对较低,仅为 12.85%。

4 结语

提出可实现不稳定能源大规模存储的隧道围岩 蓄热型热泵系统,基于田口试验方法建立该系统的 蓄热性能优化方法,并应用于Stuttgart-Fasanenhof 能源隧道。建立三维隧道围岩蓄热换热器系统耦合 传热模型,通过现场热响应试验数据验证该模型可 靠性基础上,分析蓄热隧道在20年循环周期运行下 的蓄热特性及储热效率,基于Minitab数据统计分析 软件构建4因子3水平下的L₁₀(3⁴)正交试验表,通过 信噪比和方差分析,获得最优控制参数组合和各参 数贡献率。研究结果可为蓄热隧道的性能评估提供 一些有益的参考。主要结论如下:

(1)在蓄热与取热循环周期运行下,围岩初始温 度不断升高,为隧道围岩持续充电蓄能,直到达到该 蓄能隧道围岩条件下的最大储能量。通过对蓄热隧 道的不同参数工况蓄热性能模拟,表明隧道围岩蓄 热型热泵系统储热效能不亚于传统垂直钻孔埋管蓄 热系统,且不需要高的钻孔前期成本和占地面积。

(2)基于田口试验方法,得到最优控制参数水平为A1(围岩初始温度18℃),B1(围岩导热系数1.5
 W·m⁻¹·K⁻¹),C2(运行模式与蓄取之比为1:2),D3
 (蓄热与取热温差45℃)。

(3)根据方差分析结果,在隧道围岩蓄热换热器 系统储能效率优化设计的4个控制因子中D因子 (蓄热与取热温差)的贡献率最大,为38.86%,其次 依次为是C因子(运行模式与蓄取之比)27.50%,A 因子(围岩初始温度)20.79%,B因子(围岩导热系 数)12.85%。

作者贡献声明:

张 瑶:初稿撰写,模拟分析,论文思路构思。 夏才初:论文审阅和修改。 周舒威:论文审阅。 张建新:项目的资金支持。

参考文献:

[1] RAD F M, FUNG A S. Solar community heating and cooling

system with borehole thermal energy storage—Review of systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1550.

 [2] 杨卫波,陈振乾,施明恒.跨季节蓄能型地源热泵地下蓄能与 释能特性[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40
 (5):973.

YANG Weibo, CHEN Zhenqian, SHI Mingheng. Underground energy storage and release characteristics of ground source heat pump with seasonal energy storage [J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2010, 40 (5): 973.

- [3] 姚乐恒, 卢星宇, 孙东亮, 等. 太阳能跨季节土壤蓄热简化快速计算方法构建及性能分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43
 (6): 1617.
 YAO Leheng, LU Xingyu, SUN Dongliang, *et al.* Construction and performance analysis of an simplified simulation method for solar energy trans-seasonal soil heat storage system [J]. Journal of Engineering Thermophysics,
- [4] DUPRAY F, LALOUI L, KAZANGBA A. Numerical analysis of seasonal heat storage in an energy pile foundation [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 67.

2022, 43(6): 1617.

- [5] ADAM D, MARKIEWICZ R. Energy from earth-coupled structures, foundation, tunnel and sewers [J]. Geotechnique, 2009, 59 (3): 229.
- [6] ZHANG G Z, XIA C C, YANG Y, et al. Experimental study on the thermal performance of tunnel lining ground heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2014, 77: 149.
- [7] ZHANG G Z, XIA C C, SUN M, et al. A new model and analytical solution for the heat conduction of tunnel lining ground heat exchanges [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 88: 59.
- [8] 张国柱,夏才初,马绪光,等.寒区隧道地源热泵型供热系统 岩土热响应试验[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1):99.
 ZHANG Guozhu, XIA Caichu, MA Xuguang, et al. Rock-soil

thermal response test of tunnel heating system using heat pump in cold region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 99.

- [9] OGUNLEYE O, Singh R M, CECINATO F, et al. Effect of intermittent operation on the thermal efficiency of energy tunnels under varying tunnel air temperature[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 146: 2646.
- [10] MIMOUNI T, DUPRAY F, LALOUI L. Estimating the geothermal potential of heat-exchanger anchors on a cut-andcover tunnel[J]. Geothermics, 2014, 51: 380.
- [11] GREEN S, MCLENNAN J, PANJA P, et al. Geothermal battery energy storage[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 777.
- [12] LORIA A F R. The thermal energy storage potential of underground tunnels used as heat exchangers [J]. Renewable Energy, 2021, 176: 214.
- [13] CHEN W, HUANG S, LIN Y. Performance analysis and optimum operation of a thermoelectric generator by Taguchi method[J]. Appllied Energy, 2015, 158: 44.
- [14] 周坤, 茅靳丰, 李永, 等. 基于田口方法的垂直单U地埋管钻 孔热阻优化分析[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 493.
 ZHOU Kun, MAO Jinfeng, LI Yong, CHEN F, *et al.* Analysis and optimization of borehole thermal resistance of vertical single U-tube ground heat exchanger using Taguchi method [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42(6): 493.
- [15] ESEN H, TURGUT E. Optimization of operating parameters of a ground coupled heat pump system by Taguchi method [J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 329.
- [16] BUHMANN P, MOORMANN C, WESTRICH B, et al. Tunnel geothermics—A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2016, 8: 1.
- [17] PANDEY N, MURUGESAN K, THOMAS H. Optimization of ground heat exchangers for space heating and cooling applications using Taguchi method and utility concept [J]. Applied Energy, 2017, 190: 421.