

文章编号:0253-4339(2021)01-0014-09  
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.01.014

# 地热能供热技术研究现状及展望

王沅浩<sup>1,2</sup> 蔡皖龙<sup>1</sup> 王 铭<sup>1</sup> 高 远<sup>1</sup> 刘 俊<sup>1,2</sup> 王志华<sup>1</sup> 徐 晗<sup>1</sup>

(1 西安交通大学人居环境与建筑工程学院 西安 710049; 2 国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室 西安 710021)

**摘 要** 地热能因具有稳定、储量大、分布广泛等特点,在建筑供热领域得到广泛应用。本文从地热能供热技术分类出发,详细阐述了浅层地源热泵技术、水热型供热技术及中深层地埋管供热技术的基本概念、发展沿革及应用现状。通过对现有报道的地热能供热技术研究方向和相关成果进行总结,从运行机理和应用实践角度出发,对该领域技术发展做出展望。未来地热能供热技术领域研究方向主要包括大型浅层地埋管管群热平衡分析、水热型供热高效回灌技术研究及中深层地埋管管群换热性能评估等。

**关键词** 地热热泵;供热技术;地埋管换热器;热平衡;性能优化

**中图分类号**:TK529;TU833 **文献标识码**:A

## Status and Outlook for Research on Geothermal Heating Technology

Wang Fenghao<sup>1,2</sup> Cai Wanlong<sup>1</sup> Wang Ming<sup>1</sup> Gao Yuan<sup>1</sup>  
Liu Jun<sup>1,2</sup> Wang Zhihua<sup>1</sup> Xu Han<sup>1</sup>

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an, 710021, China)

**Abstract** Geothermal energy is widely used in building heating owing to its stability, large reserves, and wide distribution. Beginning from the classification of geothermal energy heating technology, this paper elaborates on the basic concepts, development history, and application status of shallow ground source heat pump technology, hydrothermal heating technology, and medium-deep borehole heat exchanger heating technology. Based on the reported research, future directions for investigation of geothermal energy heating technology are summarized, from the perspective of the operation mechanism and application practice. These future research directions mainly include heat balance analysis of large-scale shallow borehole heat exchanger arrays, high-efficiency water recharge technology of hydrothermal heating, and evaluation of the heat transfer performance of medium and deep borehole heat exchanger arrays.

**Keywords** geothermal heat pump; heating technology; borehole heat exchanger; thermal balance; performance optimization

为了满足人类持续增长的能源消耗需求,传统以不可再生化石能源为主的能源结构亟待调整。2018 年,我国建筑能耗约为 10 亿吨标煤,约占社会总能耗的 22%,其中北方城镇供暖约占建筑能耗的 21.2%<sup>[1]</sup>。目前,北方城镇供热面积超过 147 亿 m<sup>2</sup> 且仍在高速增长,因此研究利用清洁可再生能源的高效建筑供热技术十分必要。

地热能因具有稳定、储量大、分布广泛等特点,在建筑供热领域受到广泛关注。21 世纪初期,我国开始在部分地区试点发展浅层土壤源热泵及地下水源热泵,而后逐步在全国范围推广。至今我国已成为世界最大地热能资源利用国,在浅层地热能以及水热型地热能资源直接利用量、供热面积、装机容量等方面

均位居世界第一<sup>[2]</sup>。2012 年,我国科研人员尝试使用区别于传统浅层地埋管(深度约为 200 m 以浅)的中深层地埋管换热器(深度为 2~3 km)提取深层地热用于建筑供热,并取得了成功。经过数年发展,目前已有超过 1 000 万 m<sup>2</sup> 建筑使用中深层地埋管供热技术供热,发展规模和技术水平居于世界前列。

考虑到建筑供热是北方城镇居民刚需,且近年来南方部分地区也开始试点推广集中供热,因此国家近年来发布多项相关规划,大力推动地热能供热技术发展。2016 年,我国在《可再生能源发展“十三五”规划》<sup>[3]</sup>中针对地热能确立了“技术先进、环境友好、经济可行”的发展要求,以期全面促进地热能资源的合理有效利用。2017 年 1 月,国家发改委、能源局、国

土资源部联合发布《地热能开发利用“十三五”规划》<sup>[4]</sup>,详细阐述了地热能开发利用的指导方针和目标、重点任务、重大布局。更进一步,2017 年 12 月,国家发改委、能源局、财政部、环保部、住建部等 10 个部门联合发布《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021 年)》<sup>[5]</sup>,规划中重点强调依照“取热不取水”原则积极推进地热能供热技术发展。2020 年 4 月,国家能源局组织召开《可再生能源发展“十四五”规划研究(地热部分)》讨论会,会上专家明确强调了推进北方冬季清洁取暖的必要性<sup>[6]</sup>。

综上可知,地热能供热技术近年来在我国蓬勃发展,故系统梳理地热能供热技术领域国内外发展及研究现状,并进一步展望未来研究方向十分必要。本文将从地热能供热技术的分类、应用情况出发,全面分析目前相关技术领域的发展沿革、研究手段及最新研究进展,最后总结并展望未来地热能供热技术的发展方向,以期对相关研究人员、工程技术人员以及政策制定部门提供参考。

1 分类与应用现状

1.1 地热资源涵义及分类

地热资源一般指地热过程的全部产物,包括天然蒸汽、热(卤)水等,或由人工引入(回灌)热储的水、气或者其它流体产生的二次蒸汽和热(卤)水等,以及由上述产物带出的矿物质副产品。全球范围内地热能主要应用于发电和供热,而我国则是直接使用地热能的最大消费国,约占全球总量的 75%<sup>[7]</sup>。

地热资源按照分布位置和赋存状态可分为三大类<sup>[8]</sup>,如表 1 所示。

1.2 地热能供热技术分类与应用现状

对标不同类别的地热资源,多种与之对应的地热能开发利用技术应运而生。在地热能供热技术领域,同样可依照其所利用地热资源的不同分为如下三类:浅层地源热泵技术、水热型供热技术与中深层地埋管供热技术。

1) 浅层地源热泵技术

传统浅层地源热泵技术以浅层岩土体、地下水或地表水作为低位热源,通过付出少量的电能代价将无法直接利用的低品位热能转化为高品位热能,从而为建筑提供所需的冷、热负荷<sup>[9]</sup>。根据地热能交换系统形式及所利用的低位热源不同,将浅层地源热泵系统分为地埋管地源热泵系统、地下水地源热泵系统及地表水地源热泵系统<sup>[10]</sup>,行业内一般分别简称为土壤源热泵(ground-source heat pump)、地下水源热泵(ground-water heat pump)及地表水源热泵(surface-

water heat pump)。近年还出现了以城市污水为热源的污水源热泵,原则上也可划分至广义浅层地源热泵范围内<sup>[11]</sup>。

表 1 地热资源按分布位置和赋存状态分类  
Tab.1 Geothermal resources classified by distribution location and occurrence state

| 分类          | 分布位置      | 赋存状态                            | 主要用途                            |
|-------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 浅层<br>地热资源  | 不超过 200 m | 赋存于土壤或地下水中的热量。                  | 可利用地源热泵技术为建筑物供热或制冷。             |
| 水热型<br>地热资源 | 3 km 以浅   | 以地下水或蒸汽作为载体。                    | 中低温可直接用于建筑采暖、制冷、干燥、农业等,高温可用于发电。 |
| 中深层<br>地热资源 | 2~3 km    | 赋存于中深层岩体内,通过人工建造热储和构建流体循环的方式开采。 | 一般用于供热或发电。                      |

1912 年,开发浅层地热能的热泵技术在瑞士首次被提出,1946 年在美国俄勒冈州诞生第一个热泵系统,20 世纪 70 年代起,北欧国家开始逐步发展该技术,同时在北美、西欧、北欧、东亚等地也有较多推广应用<sup>[12]</sup>。20 世纪 90 年代起,我国浅层地源热泵技术开始逐步发展,2010 年后随城市化进程加速推进。截止 2017 年底,我国浅层地源热泵装机容量达 2 万 MW,实现供热(制冷)面积超过 5 亿 m<sup>2</sup>,位居世界第一<sup>[2]</sup>。我国 31 个省会城市浅层地温调查结果显示浅层地热资源可开采量约为 4.67×10<sup>8</sup> 吨标煤,能源利用效率按 35%计可提供能量约 1.63×10<sup>8</sup> 吨标煤,是我国建筑物供暖制冷能源消耗的 1.42 倍,由此表明浅层地热能仍有较大开发潜力<sup>[13]</sup>。

2) 水热型供热技术

地下热水是水热型地热资源的主要赋存形式,常按流体介质温度可分为 3 类,如表 2 所示。水热型供热技术抽取中深层地下水并直接用于建筑供热,主要使用低温型水热资源<sup>[14]</sup>。

20 世纪末,国外学者已开始针对水热型地热能资源开发及产业发展开展研究。水热型地热资源综

合梯级利用率先在冰岛东北部地区开展,综合地热采暖、工业利用、水产养殖等方式挖掘水热型地热资源潜在价值<sup>[15]</sup>。我国水热型地热资源的应用历史悠久,但截至 20 世纪末,全国范围内水热型地热能供热面积仅为 190 万 m<sup>2</sup><sup>[21]</sup>。21 世纪初开始,我国水热型供热技术高速发展,特别是在西北及华北平原部分地区,由于水热型地热资源禀赋优越,近 10 年来直接利用量不断增长。2017 年底,全国水热型地热能供暖面积已超过 1.5 亿 m<sup>2</sup>,其中河北省雄县水热型供热面积达 450 万 m<sup>2</sup>,可满足县城 95% 的供热需求,创立了中国地热能利用“雄县模式”。预计至 2023 年,还将新增水热型地热供热面积 1 亿 m<sup>2</sup>,体量稳居世界首位<sup>[16]</sup>。

表 2 水热型地热资源按温度分级

Tab.2 Hydrothermal geothermal resources classified by temperature range

| 分类  | 温度/℃   | 流体形式   | 主要用途          |
|-----|--------|--------|---------------|
| 低温型 | 25~40  | 温水     | 农业养殖、温室、洗浴    |
|     | 40~60  | 温热水    | 建筑采暖、养殖、温室、康养 |
|     | 60~90  | 热水     | 建筑采暖、洗浴       |
| 中温型 | 90~150 | 热水或水蒸气 | 烘干、发电、工业      |
| 高温型 | ≥150   | 水蒸气    | 发电            |

3) 中深层地埋管供热技术

中深层地埋管供热技术,也称中深层地源热泵技术、中深层无干扰地热供热技术,是指布置深至地下 2~3 km 的中深层地埋管换热器,通过换热器套管内部流动介质的闭式循环抽取深部岩土内赋存的热量,并进一步通过热泵提升能量品位为建筑供热的新型地热供热技术。

20 世纪末,T. Kohl 等<sup>[17]</sup>最早明确提出利用深层地埋管换热器(deep borehole heat exchanger, DBHE)开采中深层岩土中赋存热量,并于瑞士维吉斯开展了试点项目实验。在美国夏威夷、德国普伦茨劳和亚琛工大校区等地也有多个试点工程,但由于钻井成本高以及缺乏运行经验,没有得到较大范围推广<sup>[18-19]</sup>。国内应用方面,2012 年,我国科研人员开始尝试通过使用 2 km 以深的地埋管换热器耦合热泵系统提取深部地热并获得了成功,经过数年对钻完井、固井及运行控制等方面的技术探索,实现了该技术的商业化应

用。而后中深层地埋管供热技术在中国西部科技创新港、沔西新城总部经济园能源站等多个项目中得到应用。截止 2019 年底,该技术应用面积已超过 1 300 万 m<sup>2</sup>,在建项目超过 2 000 万 m<sup>2</sup>,供热面积及工程体量世界领先。

2 技术发展及研究现状

2.1 浅层地源热泵技术

浅层地源热泵技术作为全球范围内技术最成熟的地热能供热技术,在我国同样得到广泛应用<sup>[2]</sup>。关于浅层地源热泵的相关研究可依照其所使用的低温热源进行分类,即针对土壤源、地下水源、地表水源及污水源热泵开展相关研究。

1) 土壤源热泵

作为浅层地源热泵技术中最核心的技术方向和应用方式,土壤源热泵概念的提出最早可追溯到 20 世纪初,但由于当时热泵设备技术水平较低且化石燃料丰沛,该技术并未引起太多重视。直至 20 世纪 70 年代出现石油危机,人们才开始意识到这种可再生能源利用技术的价值。美国、英国、瑞士、德国等国相继开始进行技术研究及优化,并于 20 世纪末初步建立起土壤源热泵系统技术理论体系,涵盖系统设计、施工及运行成本控制等<sup>[20-21]</sup>。

20 世纪 90 年代末,我国开始出现土壤源热泵相关研究报道,湖南大学、同济大学及山东建筑大学的研究人员对土壤源热泵技术的系统原理、启动特性、换热量计算方法等内容进行了研究<sup>[22-24]</sup>。此后重庆大学、天津大学、哈尔滨工业大学等高校的研究人员也相继针对土壤源热泵的换热性能、土壤温度场分布以及热泵机组耦合特性开展研究<sup>[25-27]</sup>。目前国内外相关研究主要集中在土壤源系统与太阳能等辅助系统的耦合系统性能分析<sup>[28-29]</sup>、热响应测试中土壤热物性参数高效辨识方法<sup>[30-31]</sup>、土壤源热泵系统的技术经济性评估<sup>[32]</sup>以及结合先进算法和大数据技术开展土壤源热泵系统运行优化<sup>[33]</sup>。

准确评估地埋管换热器(borehole heat exchanger, BHE)的换热能力,对于土壤源热泵的系统设计至关重要。对地埋管换热器本身的研究甚至早于土壤源热泵技术,最早可追溯到线/柱热源纯导热问题分析以及工业管道换热能力计算领域。目前地埋管换热器耦合周围土壤换热计算已形成涵盖解析解、半解析解及数值解等方法的成熟体系。瑞典隆德大学开发的 EED 软件、美国俄克拉荷马州立大学开发的 GLHEPro 软件等作为浅层土壤源热泵专用设计软件,均具有一定影响力。此外,基于管道蓄热模型

(duct heat storage model, DST) 开发的内置于 TRNSYS 软件的地理管计算模块也得到了广泛应用。系统设计方面,国际地源热泵协会 IGSHPA 及美国暖通空调工程师协会 ASHRAE 均以技术手册形式发布了浅层地理管换热器详细设计步骤<sup>[34-35]</sup>。考虑到工程应用可行性以及对计算速度的要求,以上软件及工程规范均基于解析解(无限线热源、无限柱热源、有限线热源等模型)或半解析解(g 函数)进行计算<sup>[36]</sup>。但由于解析求解需要预设一系列假定条件,因此较难设置与实际情况相匹配的复杂边界条件及岩土热物性参数,与之相比,数值解则更加灵活,因此在科学研究领域得到广泛应用。除了使用 FLUENT、COMSOL 等商业软件进行地理管换热器计算外,基于有限体积、有限差分及有限元方法,通过 FORTRAN、C++ 或 MATLAB 语言编程计算也成为地理管换热器性能分析的重要手段。目前地理管换热器计算领域研究内容主要集中在针对同轴、单 U、双 U、螺旋管等多种形式换热器的管内热阻模型分析<sup>[37]</sup>、多根浅层地理管换热器耦合交互影响评估<sup>[38]</sup>以及考虑地下水渗流的高效快速热渗耦合数值计算方法构建等<sup>[39-40]</sup>。

## 2) 地下水源、地表水源热泵

对于同属于广义浅层地源热泵概念的地下水源、地表水源热泵,应避免使用“水源热泵”代指二者概念之和,否则易与“水源热泵机组”(水-水式热泵机组,适用于不同种类浅层地源热泵系统)概念混淆。不同于土壤源热泵拥有的资源普适性,地下水源、地表水源热泵对自然资源禀赋有较高要求,因此并未得到较大规模推广,仅在某些浅层地下水丰沛或天然拥有江河湖海毗邻的位置有所应用。针对地下水源热泵适宜性以及回灌方式等内容,哈尔滨工业大学、上海交通大学和天津大学等研究人员曾开展深入研究<sup>[41-43]</sup>。但整体而言,目前地下水源、地表水源热泵在我国的应用体量远小于土壤源热泵,回灌不充分易造成浅层地表沉降是其技术应用过程中所面临的主要风险。

此外,中国建筑科学研究院袁东立等<sup>[44]</sup>设计了一种可利用低温水/冰浆作为低位热源的冰源热泵。其与传统热泵循环形式不同,通过在低温水与蒸发器中间加装一套制冰装置,使水在制冰装置中可控结冰,实现对 0℃ 左右地表水中热量的提取和利用,大大拓展了地表水源热泵的适用范围。

## 3) 污水源热泵

城市污水由于其内部不断进行的微生物活动和化学反应可在全年维持较高温度,是一种稳定的低品位热源,因而也被用于热泵供热技术。早在 21 世纪

初,哈尔滨工业大学等学者就对污水源热泵的原理、特点、国内外应用现状和发展前景进行了系统分析<sup>[11]</sup>。由于污水的特殊性,污水源热泵换热器的防腐蚀、防堵塞及强化换热问题是其研究重点,许多研究围绕该主题展开<sup>[45]</sup>。近年来研究重点还转移至污水源热泵供热系统的优化控制<sup>[46]</sup>等方向,可以预见在城市化不断发展的大环境下,污水源热泵也将拥有广阔的发展前景。

## 2.2 水热型供热技术

水热型供热技术的应用依托水热型地热资源,其推广可行性同地下水源热泵一样取决于当地自然资源禀赋。与地下水源热泵相比,主要区别在于水热型供热技术管井深度(2~3 km)远深于地下水源热泵埋管深度(200 m 以浅),并且是直接将地下高温地热水抽至地表进行换热后再回灌至储层,其中不涉及使用热泵提升能量品位的过程。水热型地热资源主要集中于我国西北、华北等地,多出现于拥有沉积盆地或板块断裂等地质特征的区域。最初对水热型地热资源的探索是地热发电技术发展的需要,但在勘察过程中发现部分低温水热型地热资源(60~90℃)恰好与建筑供热所需的温区相契合,因此水热型地热资源在供热领域得到了广泛应用。对于水热型供热技术的相关研究主要集中于水热型地热资源分布和形成机理的勘察和分析,中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质科学院水文地质环境地质研究所及西北大学等开展了相关研究工作<sup>[47-49]</sup>。

## 2.3 中深层地理管供热技术

中深层地理管供热技术最早于 20 世纪末出现类似概念,但名称尚未统一。我国在 2012 年前后出现类似报道,初期将该技术归类于干热岩开发利用技术,但干热岩在地质领域有其严格定义,即:内部不存在或仅存在少量流体,温度高于 180℃ 的异常高温岩体<sup>[50]</sup>。因此中深层地理管供热技术后逐渐被明确为以中深层地理管换热器为核心部件的中深层地热能开发利用技术。此外需要注意的是,长安大学官燕玲团队已有关于 U 型管式中深层地理管换热器用于建筑供热的研究发表<sup>[51]</sup>,但目前该技术绝大部分的使用案例和相关研究均围绕同轴套管式换热器开展,为统一起见,本文中所提到的中深层地理管换热器默认均为同轴套管式。

21 世纪初起,国外已有部分学者开始研究中深层地理管换热器耦合地源热泵系统用于建筑供热的可行性,但受限于国外高昂的钻井成本和低人口密度下的较小供热体量,该技术并未获得太多关注<sup>[52-53]</sup>。得益于我国较为低廉的钻井成本以及高人口密度所

带来的较大供热需求,2012 年在我国陕西省首次工程尝试并取得成功后,该技术在短时间内迅速发展。西安交通大学王泮浩团队分析了西安市一处应用中深层埋管供热技术示范工程的实测数据,使用 FLUENT 软件进行了管井性能优化<sup>[54]</sup>。中国科学院地质与地球物理研究所与德国亥姆霍兹环境研究中心合作,使用开源有限元模拟软件 OpenGeoSys 进行了中深层埋管换热器取热量评估,结果表明,其每延米换热量不超过 150 W/m,为工程应用提供了指导<sup>[55]</sup>。清华大学魏庆芃团队针对中深层埋管供热技术实际应用开展了一系列工程监测,结果表明该技术较传统浅层地源热泵系统而言,系统 COP 更高,可达 4.6~6.4<sup>[56]</sup>。山东建筑大学方肇洪团队使用有限差分法分析了中深层埋管换热器的性能影响因素<sup>[57]</sup>,中国科学院广州能源研究所卜宪标团队使用有限体积法分析了岩土热物性参数对换热性能的影响<sup>[58]</sup>。此外,中国石油大学<sup>[59]</sup>、中国科学技术大学<sup>[60]</sup>、吉林大学<sup>[61]</sup>等单位均针对中深层埋管换热器开展了相关研究,包括对固井材料,管材导热系数等参数进行敏感性分析。以上工作均基于数值模拟开展,由于中深层埋管换热器的横纵向空间尺度差异巨大,导致数值模拟所使用的网格数量较多,长时间尺度运行模拟耗费时间较长。为此,华中科技大学罗勇强团队<sup>[62]</sup>、天津大学赵军团队<sup>[63]</sup>、香港理工大学及山东建筑大学<sup>[64]</sup>等还在解析解领域开展研究,基于分段有限长线热源模型实现了考虑地温梯度的中深层埋管换热器换热模拟。此外,俄克拉荷马州立大学 R. A. Beier 团队<sup>[65]</sup>利用反拉普拉斯变换求解了中深层埋管换热器控制方程,推导得到了考虑地温梯度的解析解计算方法。目前针对中深层埋管换热器,国内外的研究重点主要集中在单根中深层埋管换热器长期稳定性研究<sup>[66]</sup>以及中深层埋管换热器耦合深部岩土高效仿真计算模型开发<sup>[67]</sup>。

## 3 未来研究方向

### 3.1 大型浅层埋管管群热平衡问题

从适用性角度出发,可以预计,未来浅层地源热泵技术中的土壤源热泵将是应用和研究的重点。考虑到土壤源热泵系统可被类比为“蓄热器”,其核心运行机理为冬取夏灌,通过维持全年土壤侧能量平衡实现系统稳定运行。因此对于土壤源热泵而言,土壤侧能否维持能量平衡直接关乎实际工程应用的可持续性<sup>[68-69]</sup>。在我国土壤源热泵的应用过程中,考虑到我国建筑的体量和规模,与国外大多数为小型别墅供冷/供热的使用场景不同,国内实际工程中动辄敷

设数百根甚至上千根埋管,而如此多浅层埋管所构成管群系统的水力耦合特性及管间交互效应将极大影响系统使用性能。目前已有众多相关研究关注管群间交互影响大小对系统性能及土壤热平衡的影响,但大多仅从传统单管角度出发,在研究过程中固定管群内各管进口温度或功率。德国亥姆霍兹环境研究中心邵亥冰团队使用其自主开发的开源软件 OpenGeoSys 耦合 Python 工具包 TESP 实现了地下管群耦合岩土换热及地下管网系统水力特性动态耦合模拟<sup>[70]</sup>,结果表明,大型浅层埋管管群运行过程中可能出现负荷迁移现象,即管群中每根单管所承担的负荷并不一致,与埋管所在位置的土壤温度实时相关且受管网系统水力分配控制。这为浅层埋管管群换热特性分析提供了新思路,值得进一步深入研究。

此外,考虑到不同气候区的建筑负荷特性,为满足建筑供冷/供热需求,很难做到全年土壤侧能量平衡,因此研究土壤源热泵系统和其它辅助能源耦合的多能互补系统及与其使用特性匹配的控制方法同样十分必要。在东北地区等热负荷占优的区域使用太阳能对地下土壤进行补热,在南方冷负荷占优的区域结合冷却塔甚至蒸发冷却技术等缓解地下土壤热堆积,可为确保土壤源热泵系统长期稳定运行提供理论支撑。

### 3.2 水热型供热高效回灌技术研究

考虑到水热型供热技术主要受制于当地自然资源禀赋,例如对于存在充足地下水资源的岩溶热储层而言发展该技术较为适宜,未来还应着力于其回灌安全性研究和高效回灌技术方法探讨。研究同井回灌、异井回灌、多井回灌等回灌技术的适用性和可行性,以及准确评估取水作业对于地下水储层、流场以及微生物生态环境的影响,从而确保水热型供热技术的推广使用不会对环境造成影响或破坏。

### 3.3 中深层埋管管群换热性能评估及长期稳定性分析

中深层埋管供热技术只在近十年内于我国迅速发展,尚存许多研究方向有待挖掘。目前相关研究多使用数值模拟或解析解作为仿真手段,结合实测数据验证,分析中深层埋管换热器的换热性能及长期稳定性,对管井设计参数、系统运行参数及岩土热物性参数等进行敏感性分析。但目前所报道的几乎所有研究,均只针对单根中深层埋管换热器。但实际应用中,以每延米换热量 120 W/m,系统 COP 为 6.0,单位面积建筑热负荷为 30 W/m<sup>2</sup> 计,一根长 2.5 km 的中深层埋管换热器仅可满足 12 000 m<sup>2</sup> 的供

热需求,对于现今的公共建筑及住宅建筑而言,大多需要 5~8 根中深层地埋管换热器以满足建筑总供热负荷。因此开展中深层地埋管管群换热性能评估,分析管间交互作用大小以及对长期使用稳定性的影响十分必要,所得成果可以对实际工程设计提供指导和帮助。

同时,考虑到中深层地埋管供热系统与浅层土壤源热泵系统的一般使用场景,二者的最大区别在于,前者仅用于供热,而后者需同时满足供热制冷需求。因此不同于浅层土壤源热泵系统可追求全年土壤侧取/释热能量平衡,中深层地埋管供热系统若连续逐年取热将产生一定程度土壤热衰减。目前工程中使用的做法是每年为中深层地埋管换热器周围土壤预留一定的恢复时间(供暖季使用,非供暖季恢复)。因此,在此前提下评估中深层地埋管换热器长期使用工况下地下土壤的温度重分布、最大热影响半径以及土壤热量补给运移机理同样十分重要。此外,考虑到建筑热负荷在供暖季内的波动(初、末供暖季负荷相对较小),如何将建筑负荷特性与中深层地埋管供热技术的运行控制相结合,在负荷较低的特定时期关闭热源侧水泵让深部土壤得以恢复以提高系统长期使用性能,同样值得研究。

## 4 展望

北方地区冬季清洁取暖,关系到广大人民群众生活,是重大的民生工程。发展清洁可再生建筑节能技术,推进地热能供热技术发展,从长远看是能源结构转型调整及人类社会可持续发展背景下的题中应有之义。随着我国经济建设稳步发展,城市化不断推进,地热能供热技术的出现和蓬勃发展正可为建筑供热领域注入新活力。目前,在我国地热能供热技术应用面积及工程体量世界领先的基础上,科研工作者及工程技术人员更应针对以浅层地源热泵技术、水热型供热技术为代表的传统地热能供热技术及中深层地埋管供热技术、污水源热泵技术、冰源热泵技术、多能耦合供热技术等新型供热技术开展产学研用一体化研究,对标国际顶尖技术水平,产出高质量原创性科研成果,同时在技术领域上下游设计、施工、运行维护等各个环节不断努力以期取得更大进步,为国家发展、社会进步、人民生活水平提升贡献力量。

本文受陕西省重点研发计划(2020ZDLSF06-08, S2021-YF-ZDCXL-ZDLSF-0093)资助。(The project was supported by Key Research and Development Project of Shaanxi Province Project (No. 2020ZDLSF06-08 and No. S2021-YF-ZDCXL-

ZDLSF-0093).)

## 参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告(2019)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019. (Building Energy Conservation Research Centre Tsinghua University. Annual research report on development of building energy efficiency for China (2019) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.)
- [2] 中国地质调查局. 中国地热能发展报告(2018)[R]. 北京:中国石化出版社, 2018. (China Geological Survey. Geothermal energy development report for China (2018) [R]. Beijing: China Petrochemical Press, 2018.)
- [3] 国家发改委. 可再生能源发展“十三五”规划[R/OL]. (2016-12-19) [2020-10-10]. [http://www.nea.gov.cn/135916140\\_14821175123931n.pdf](http://www.nea.gov.cn/135916140_14821175123931n.pdf). (National Development and Reform Commission. The 13th Five-Year Plan for renewable energy development [R/OL]. (2016-12-19) [2020-10-10]. [http://www.nea.gov.cn/135916140\\_14821175123931n.pdf](http://www.nea.gov.cn/135916140_14821175123931n.pdf).)
- [4] 国家发改委. 地热能开发利用“十三五”规划[R/OL]. (2017-01-23) [2020-10-10]. [http://www.nea.gov.cn/136035635\\_14863708180701n.pdf](http://www.nea.gov.cn/136035635_14863708180701n.pdf). (National Development and Reform Commission. The 13th Five-Year Plan for geothermal energy development and utilization[R/OL]. (2017-01-23) [2020-10-10]. [http://www.nea.gov.cn/136035635\\_14863708180701n.pdf](http://www.nea.gov.cn/136035635_14863708180701n.pdf).)
- [5] 国家发改委. 北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)[R/OL]. (2017-12-05) [2020-10-10]. <http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/5248855/files/7ed7d7cda8984ae39a4e9620a4660c7f.pdf>. (National Development and Reform Commission. Clean heating plan in winter in northern area (2017—2021) [R/OL]. (2017-12-05) [2020-10-10]. <http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/5248855/files/7ed7d7cda8984ae39a4e9620a4660c7f.pdf>.)
- [6] 我国地热能“十四五”规划研究启动会召开[EB/OL]. (2019-11-19) [2020-9-24]. <http://www.nengyuanjie.net/article/31736.html>. (Research on geothermal energy "14th Five-Year" planning of China kick-off meeting held in Beijing[EB/OL]. (2019-11-19) [2020-9-24]. <http://www.nengyuanjie.net/article/31736.html>.)
- [7] CHEN Siyuan, ZHANG Qi, ANDREWS-SPEED P, et al. Quantitative assessment of the environmental risks of geothermal energy: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 276:111287.
- [8] 张军. 地热能、余热能与热泵技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2014. (ZHANG Jun. Geothermal energy, waste heat energy and heat pump technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.)
- [9] 余红海, 周亚素, 雷鸣. 浅谈地源热泵空调系统的分类及其优越性[J]. 节能技术, 2006, 24(5): 441-445. (YU Honghai, ZHOU Yasu, LEI Ming. Discussion on the

- classifications and advantages of ground source heatpump [J]. Energy Conservation Technology, 2006, 24(5):441-445.)
- [10] 地源热泵系统工程技术规范:GB 50366—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009. (Technical code for ground-source heat pump system: GB 50366—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.)
- [11] 马最良, 姚杨, 赵丽莹. 污水源热泵系统的应用前景[J]. 中国给水排水, 2003, 19(7):41-43. (MA Zuiliang, YAO Yang, ZHAO Liying. Application prospect of sewage source heat pump system[J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(7):41-43.)
- [12] 龚明启, 冀兆良. 地源热泵的分类及其若干问题的看法[J]. 能源技术, 2005, 26(3):120-123. (GONG Mingqi, JI Zhaoliang. The classification of the ground source heat pump and the views of several questions[J]. Energy Technology, 2005, 26(3):120-123.)
- [13] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1):312-321. (LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China, 2013, 40(1):312-321.)
- [14] KONG Yanlong, PANG Zhonghe, SHAO Haibing, et al. Recent studies on hydrothermal systems in China: a review [J]. Geothermal Energy, 2014, 2(1):19.
- [15] AXELSSON G, FLOVENZ O G, HAUKSDOTTIR S, et al. Analysis of tracer test data, and injection-induced cooling, in the Laugaland geothermal field, N-Iceland[J]. Geothermics, 2001, 30(6):697-725.
- [16] 国家能源局. 全国水热型地热能供暖面积超过 1.5 亿  $\text{m}^2$  [EB/OL]. (2018-11-27) [2020-09-24]. <http://www.nationalee.com/newsinfo/618056.html>. (National Energy Administration. The national hydrothermal geothermal heating area exceeds 150 million  $\text{m}^2$  [EB/OL]. (2018-11-27) [2020-09-24]. <http://www.nationalee.com/newsinfo/618056.html>.)
- [17] KOHL T, BRENNI R, EUGSTER W. System performance of a deep borehole heat exchanger[J]. Geothermics, 2002, 31(6):687-708.
- [18] SAPINSKA-SLIWA A, ROSEN M A, GONET A, et al. Deep borehole heat exchangers—a conceptual and comparative review [J]. International Journal of Air-conditioning and Refrigeration, 2016, 24(1):1630001.
- [19] DIJKSHOORN L, SPEER S, PECHNIG R. Measurements and design calculations for a deep coaxial borehole heat exchanger in Aachen, Germany[J]. International Journal of Geophysics, 2013:916541.
- [20] RAWLINGS R H, SYKULSKI J R. Ground source heat pumps: a technology review [J]. Building Services Engineering Research and Technology, 1999, 20(3):119-129.
- [21] SANNER B, KARYTSAS C, MENDRINOS D, et al. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe[J]. Geothermics, 2003, 32(4/5/6):579-588.
- [22] 宋春玲. 土壤源热泵——一种节能的中央空调系统冷热源[J]. 节能, 1998(12):3-5. (SONG Chunling. Ground source heat pump — an energy saving cold and heat source of central air conditioning system[J]. Energy Conservation, 1998(12):3-5.)
- [23] 李元旦, 张旭, 周亚素, 等. 土壤源热泵冬季工况启动特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2001, 31(1):17-20. (LI Yuandan, ZHANG Xu, ZHOU Yasu, et al. Startup characteristics of the ground source heat pump in the mode of heating [J]. Journal of HV & AC, 2001, 31(1):17-20.)
- [24] 曾和义, 刁乃仁, 方肇洪. 竖直埋管地热泵换热器的稳态温度场分析[J]. 山东建筑工程学院学报, 2002, 17(1):1-6. (ZENG Heyi, DIAO Nairen, FANG Zhaozhong. Analysis on steady-state temperature field around a vertical borehole in geothermal heat exchangers[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 2002, 17(1):1-6.)
- [25] 魏唐棣. 地源热泵地下套管式埋管换热器性能研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2001. (WEI Tangli. Study on characteristics of buried pipe-in-pipe heat exchanger in ground source heat pump system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.)
- [26] 李新国, 赵军, 周倩. U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5):703-707. (LI Xinguo, ZHAO Jun, ZHOU Qian. Numerical simulation on the ground temperature field around U pipe underground heat exchangers [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2004, 25(5):703-707.)
- [27] 马最良, 姚杨, 姜益强. 哈尔滨工业大学热泵研究工作的回顾[J]. 制冷空调与电力机械, 2004, 25(3):1-7. (MA Zuiliang, YAO Yang, JIANG Yiqiang. Review of heat pump research in Harbin Institute of Technology in China [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2004, 25(3):1-7.)
- [28] 张伟, 朱家玲, 胡涛. 太阳能与土壤源耦合供暖系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(4):496-500. (ZHANG Wei, ZHU Jialing, HU Tao. Experimental research on solar-ground source heat pump heating system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011, 32(4):496-500.)
- [29] 刘杰, 万鹏, 郭健翔, 等. 太阳能-土壤源热泵联合供暖系统优化研究[J]. 热科学与技术, 2019, 18(2):155-162. (LIU Jie, WAN Peng, GUO Jianxiang, et al. Optimization of combined solar-ground source heat pump heating system [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2019, 18(2):155-162.)
- [30] 胡平放, 雷飞, 孙启明, 等. 岩土热物性测试影响因素的研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(3):123-127. (HU Pingfang, LEI Fei, SUN Qimin, et al. Study on influence factors for thermo-physical property of soil [J]. Journal of HV & AC, 2009, 39(3):123-127.)
- [31] 王德敬, 马凌, 陈惠民, 等. 岩土热响应散热修正瞬态

- 模拟及关键参数研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2701–2707. (WANG Dejing, MA Ling, CHEN Huimin, et al. A thermal-dissipation-corrected transient simulation on trt and key parameters study[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40(10): 2701–2707.)
- [32] 徐辉, 林丽琼, 谭忠富. 地源热泵全寿命周期节能减排技术经济模型及应用[J]. 运筹与管理, 2018, 27(2): 159–167. (XU Hui, LIN Liqiong, TAN Zhongfu. Ground source heat hump's life-cycle energy conservation and technical economy analysis models with their application[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(2): 159–167.)
- [33] 钟寒露, 朱尧星, 徐成良, 等. 地源热泵系统能耗预测及实例验证研究[J]. 制冷技术, 2020, 40(1): 54–58. (ZHONG Hanlu, ZHU Yaoxing, XU Chengliang, et al. Study on energy consumption prediction and case verification for ground-source heat pump system [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2020, 40(1): 54–58.)
- [34] Closed-loop/geothermal heat pump systems: Design and installation standards[S]. USA: IGSHPA, 2017.
- [35] KAVANAUGH S P, RAFFERTY K D. Geothermal heating and cooling design of ground-source heat pump systems: ASHRAE RP-1674-2014[S]. USA: ASHRAE, 2014.
- [36] LI Min, LAI A C K. Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): a perspective of time and space scales[J]. Applied Energy, 2015, 151: 178–191.
- [37] CLAESSEON J, JAVED S. Explicit multipole formulas and thermal network models for calculating thermal resistances of double U-pipe borehole heat exchangers[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2019, 25(8): 980–992.
- [38] 刘斯佳, 张山, 刁乃仁. 埋管群换热冷热负荷比和布置形式的影响[J]. 煤气与热力, 2019, 39(2): 20–24, 43. (LIU Sijia, ZHANG Shan, DIAO Nairen. Influence of cooling heat load ratio for heat transfer and layout form of buried pipe group[J]. Gas & Heat, 2019, 39(2): 20–24, 43.)
- [39] GUSTAFSSON AM, WESTERLUND L, HELLSTRÖM G. CFD-modelling of natural convection in a groundwater-filled borehole heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(6/7): 683–691.
- [40] 刘卫, 张之强, 刘琬铭, 等. 地下水渗流对竖直 U 型埋管周围土壤温度场的影响[J]. 建筑节能, 2020, 48(7): 21–26. (LIU Wei, ZHANG Zhiqiang, LIU Wanming, et al. Effects of groundwater seepage on soil temperature field around vertical u-shaped buried[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(7): 21–26.)
- [41] 倪龙, 封家平, 马最良. 地下水源热泵的研究现状与进展[J]. 建筑热能通风空调, 2004, 23(2): 26–31. (NI Long, FENG Jiaping, MA Zuiliang. The state of research and development of ground water heat pump systems [J]. Building Energy & Environment, 2004, 23(2): 26–31.)
- [42] 杨昭, 张世钢, 孙政, 等. 地下水源热泵的最优化研究[J]. 太阳能学报, 2002, 23(6): 687–691. (YANG Zhao, ZHANG Shigang, SUN Zheng, et al. Optimization of a groungwanter-source heat pump[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002, 23(6): 687–691.)
- [43] 郭小波. 地下含水层储能和地下水源热泵系统中地下水回路与回灌技术现状[J]. 暖通空调, 2004, 34(1): 19–22. (WU Xiaobo. Development of ground water loop for ATEs and ground water source heat pump systems [J]. Journal of HV & AC, 2004, 34(1): 19–22.)
- [44] 袁东立, 胡志高, 沈健, 等. 一种冰源热泵供能系统: CN206037200U[P]. 2017-03-22. (YUAN Dongli, HU Zhigao, SHEN Jian, et al. An ice-source heat pump energy supply system: CN206037200U[P]. 2017-03-22.)
- [45] 钱剑峰, 任启峰, 徐莹, 等. 污水源热泵系统污水侧声空化防除垢与强化换热特性研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2728–2736. (QIAN Jianfeng, REN Qifeng, XU Ying, et al. Characteristic research on anti-descaling and heat transfer enhancement in sewage side of sewage-source heat pump system with acoustic cavitation [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2728–2736.)
- [46] 付云坤, 潘雷, 刘昱瞳, 等. 污水源热泵系统的节能控制方法研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(9): 80–88. (FU Yunkun, PAN Lei, LIU Yutong, et al. Research on energy saving control method of waste water source heat pump system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(9): 80–88.)
- [47] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224–1230. (PANG Zhonghe, KONG Yanlong, PANG Jumei, et al. Geothermal resources and development in xiongan new area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(11): 1224–1230.)
- [48] 王贵玲, 蔺文静. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1923–1937. (WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1923–1937.)
- [49] 郭森, 马致远, 李劲彬, 等. 我国地热供暖的现状 & 展望[J]. 西北地质, 2015, 48(4): 204–209. (GUO Sen, MA Zhiyuan, LI Jinbin, et al. Status and prospects of geothermal heating in China[J]. Northwestern Geology, 2015, 48(4): 204–209.)
- [50] 地热能术语: NB/T 10097—2018[S]. 北京: 国家能源局, 2018. (Terminology of geothermal energy: NB/T 10097—2018 [S]. Beijing: National Energy Administration, 2018.)
- [51] 王兴, 李超, 官燕玲, 等. 竖向 U 型深埋管建筑供暖连续及间歇运行的现场实验[J]. 区域供热, 2018(3): 8–12, 21. (WANG Xing, LI Chao, GUAN Yanling, et al. In-situ experiment of continuous and intermittent operation of

- vertical U-bend deep-buried pipe to supply heat in buildings [J]. *District Heating*, 2018(3):8–12, 21.)
- [52] HUCHTEMANN K, MÜLLER D. Combined simulation of a deep ground source heat exchanger and an office building [J]. *Building and Environment*, 2014, 73:97–105.
- [53] HOLMBERG H, ACUÑA J, NÆSS E, et al. Thermal evaluation of coaxial deep borehole heat exchangers [J]. *Renewable Energy*, 2016, 97:65–76.
- [54] WANG Zhihua, WANG Fenghao, LIU Jun, et al. Field test and numerical investigation on the heat transfer characteristics and optimal design of the heat exchangers of a deep borehole ground source heat pump system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 153:603–615.
- [55] 孔彦龙, 陈超凡, 邵亥冰, 等. 深井换热技术原理及其换热量评估 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12):4741–4752. (KONG Yanlong, CHEN Chaofan, SHAO Haibing, et al. Principle and capacity quantification of deep-borehole heat exchangers [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(12):4741–4752.)
- [56] 邓杰文, 魏庆芑, 张辉, 等. 中深层地源热泵供暖系统能耗和能效实测分析 [J]. *暖通空调*, 2017, 47(8):150–154. (DENG Jiewen, WEI Qingpeng, ZHANG Hui, et al. On-site measurement and analysis on energy consumption and energy efficiency ratio of medium-depth geothermal heat pump systems for space heating [J]. *Journal of HV & AC*, 2017, 47(8):150–154.)
- [57] 杜甜甜, 满意, 姜国心, 等. 套管式中深层地埋管换热器传热建模及取热分析 [J]. *可再生能源*, 2020, 38(7):887–892. (DU Tiantian, MAN Yi, JIANG Guoxin, et al. Transfer modeling and heat extraction analysis of coaxial tubes deep borehole heat exchanger [J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(7):887–892.
- [58] 卜宪标, 冉运敏, 王令宝, 等. 单井地热供暖关键因素分析 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(5):957–964. (BU Xianbiao, RAN Yunmin, WANG Lingbao, et al. Analysis of key factors affecting single well geothermal heating [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(5):957–964.)
- [59] SONG Xianzhi, WANG Gaosheng, SHI Yu, et al. Numerical analysis of heat extraction performance of a deep coaxial borehole heat exchanger geothermal system [J]. *Energy*, 2018, 164:1298–1310.
- [60] NIAN Yongle, CHENG Wenlong, YANG Xingyu, et al. Simulation of a novel deep ground source heat pump system using abandoned oil wells with coaxial BHE [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137:400–412.
- [61] HUANG Yibin, ZHANG Yanjun, XIE Yangyang, et al. Thermal performance analysis on the composition attributes of deep coaxial borehole heat exchanger for building heating [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 221:110019.
- [62] LUO Yongqiang, GUO Hongshan, MEGGERS F, et al. Deep coaxial borehole heat exchanger: analytical modeling and thermal analysis [J]. *Energy*, 2019, 185:1298–1313.
- [63] MA Ling, ZHAO Yazhou, YIN Hongmei, et al. A coupled heat transfer model of medium-depth downhole coaxial heat exchanger based on the piecewise analytical solution [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 204:112308.
- [64] PAN Aiqiang, LU Lin, CUI Ping, et al. A new analytical heat transfer model for deep borehole heat exchangers with coaxial tubes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141:1056–1065.
- [65] BEIER R A. Thermal response tests on deep borehole heat exchangers with geothermal gradient [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020: 115447.
- [66] CAI Wanlong, WANG Fenghao, LIU Jun, et al. Experimental and numerical investigation of heat transfer performance and sustainability of deep borehole heat exchangers coupled with ground source heat pump systems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149:975–986.
- [67] CHEN Chaofan, SHAO Haibing, NAUMOV D, et al. Numerical investigation on the performance, sustainability, and efficiency of the deep borehole heat exchanger system for building heating [J]. *Geothermal Energy*, 2019, 7(1):18.
- [68] 马宏权, 龙惟定. 地埋管地源热泵系统的热平衡 [J]. *暖通空调*, 2009, 39(1):102–106. (MA Hongquan, LONG Weiding. Ground heat balance in GSHP [J]. *Journal of HV & AC*, 2009, 39(1):102–106.)
- [69] 杨卫波, 张苏苏. 冷热负荷非平衡地区土壤源热泵土壤热失衡研究现状及其关键问题 [J]. *流体机械*, 2014, 42(1):80–87. (YANG Weibo, ZHANG Susu. Research status and key problem of underground thermal unbalance of ground coupled heat pump operated in districts with unbalanced cooling and heating load [J]. *Fluid Machinery*, 2014, 42(1):80–87.)
- [70] CHEN Shuang, WITTE F, KOLDITZ O, et al. Shifted thermal extraction rates in large borehole heat exchanger array—a numerical experiment [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 167:114750.

#### 通信作者简介

王洋浩,男,教授,西安交通大学人居环境与建筑工程学院,13227006940, E-mail: fhwang@mail.xjtu.edu.cn. 研究方向:建筑节能与可再生能源利用技术。

#### About the corresponding author

Wang Fenghao, male, professor, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, + 86 13227006940, E-mail: fhwang@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: building energy conservation and renewable energy utilization technology.