

文章编号: 1671-6612 (2019) 02-193-10

地源热泵—辐射供冷/暖复合系统研究现状与展望

隋学敏¹ 刘佳露² 黄李雪子¹ 江超¹

(1. 长安大学建工学院 西安 710061; 2. 长安大学环工学院 西安 710054)

【摘要】 对地源热泵与辐射供冷/暖系统的特点和基本原理进行了介绍, 分析了两系统相结合的原因和优势, 从节能经济性、运行特性、控制策略及焓分析在系统中的应用四方面对地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的国内外研究现状进行了综述, 并阐述了目前该复合系统研究与应用中有待解决的问题, 为地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的进一步研究提供参考。

【关键词】 地源热泵; 辐射供冷/暖; 研究现状; 关键问题
中图分类号 TU831 文献标识码 A

Research Status and Prospect of Ground Source Heat Pump Combined with Radiant Cooling/Heating System

Sui Xuemin¹ Liu Jialu² Huang Lixuezi¹ Jiang Chao¹

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710061;

2. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710054)

【Abstract】 The characteristics and basic principles of ground source heat pump and radiant cooling/heating system were introduced in this paper, and the reasons and advantages of the combination of these two systems were analyzed. Then, the domestic and foreign research status of ground source heat pump combined with radiant cooling/heating system were summarized from four aspects including energy saving and economy, operation characteristics, control strategy, and application of exergy analysis method. At last, the problems to be solved in the research and application of the composite system were discussed. The research work and conclusions can provide a reference for the further study of the ground source heat pump combined with cooling/heating system.

【Keywords】 ground source heat pump; radiant cooling/heating; research status; key problem

0 引言

近年来能源消耗不断增加, 2017 年全球能源需求增长 2.2%, 高于过去十年均值, 能源需求增加将加剧能源短缺和环境污染。全球每年约有 40% 的能源被建筑物消耗, 同时建筑能耗一半以上被空调系统所消耗^[1]。因此, 提高空调系统的能效和开发可再生能源系统在建筑节能领域具有重要意义。

地源热泵利用地下浅层地热能作为冷热源, 地下浅层收集了约 47% 的太阳能量, 高于人类每年利用能量的 500 倍^[2], 这种能量是近乎无限的可再生能源, 符合能源可持续性发展的趋势。地源热泵还具有节能、环保、性能稳定等优点, 是一种能耗较低的新型空调系统冷热源装置。辐射空调系统具有热性能稳定、室温均匀、舒适节能、噪音低、节省室内空间等优点, 是一种理想的节能空调形式。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51308049); 陕西省住房城乡建设科技计划项目 (2015—K72); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (300102288202)

作者 (通讯作者) 简介: 隋学敏 (1981-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: suixuemin@163.com
收稿日期: 2019-03-04

研究表明,同等的舒适度条件下,辐射供暖比传统对流散热器供暖节能 20%~30%^[3];辐射供冷系统比常规对流式空调系统节能 28%~40%^[4]。辐射系统采用低温热水/高温冷水进行供暖/供冷,与地源热泵结合使用时,能有效提高热泵系统的 COP。合理地将地源热泵和辐射空调相结合,可有效地降低建筑能耗,减少环境污染,并提高室内环境的热舒适性。

本文对地源热泵和辐射供冷/暖系统的原理和特性进行了介绍,综述了地源热泵与辐射系统联合运用的研究现状,总结了焓分析在系统研究中的应用,并阐述了系统研究与应用中有待解决的问题,为该复合系统的进一步研究和优化提供参考。

1 地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的构成及原理

1.1 地源热泵系统

地源热泵利用地下浅层低温地热能(岩土体、地表水或地下水等),通过输入少量的高品位能源,实现低品位热能向高品位热能转移并与建筑物完成热交换,可同时实现供暖、供冷、供生活热水等。

地源热泵在瑞士等欧洲国家应用较早,我国到 2004 年才逐步进入推广普及的阶段^[5]。地源热泵是一种节能环保型系统,有研究表明其污染物排放量为空气源热泵的 60%左右,普通锅炉供暖系统的 30%左右,比传统中央空调系统节能及节约运行费用 40%左右^[2],且其利用的地能温度相对稳定,使得地源热泵拥有较高的 COP 值,夏季约为 4.1(传统冷源 2.9),冬季约为 3.1(传统热泵 2.8)^[6]。

地源热泵按换热介质的不同分为土壤源热泵、地下水源热泵及地表水源热泵三种类型。目前,土壤源热泵的应用较为广泛,其核心为埋管换热器^[7]。对于土壤源热泵的研究,主要集中于传热机理、土壤热失衡问题、控制策略等方面^[8,9]。例如,早在 1948 年,Ingersoll L R^[10,11]对埋管换热器的传热理论进行研究,提出埋管的中心轴线为热源,热量以定流量的方式向周围辐射散热的线热源和圆柱源模型。马宏权等^[12-14]分析了土壤热失衡的原因及影响因素,并提出了优化建议。於仲义

等^[15]根据实测得出间歇运行能更高效利用土壤蓄能特性,相比连续运行方式埋管换热能力提高 33.9%。对于地下水、地表水热泵的研究方面,主要集中于换热性能、水温变化的影响、地下水回灌等方面^[5,16]。

1.2 辐射供冷/暖系统

辐射供冷/暖系统通过埋设于板内的管材把辐射板冷却或加热,通过辐射板与围护结构及家具等进行辐射换热,与室内空气进行对流换热。该系统以高温冷水和低温热水为冷热媒,以地板(楼板或墙体)表面为末端来实现供暖与供冷。

末端采用辐射空调,在节能、舒适性上有很大优势。节能性主要体现在以下方面:采用辐射末端时,室内设计温度冬季可降低 2℃,夏季可提升 0.5~1.5℃,从而使得空调系统负荷降低;水的热容量远高于空气,用水代替空气来消除热负荷,大大降低了输送冷量的动力能耗;辐射系统采用高温冷水、低温热水,可提高冷热源能效比;高冷冻水温为自然冷源提供了可能性,在部分季节可使用自然冷源直接供冷^[17,18]。舒适性方面,采用辐射末端可降低室内垂直温度梯度,克服冷风吹风感及室内噪音问题,且冬季供暖可提高室内平均辐射温度,大大减小了人体辐射散热,夏季供冷可增加人体辐射散热比例,使人体热舒适性得到提升^[3]。

对于辐射空调系统的现有研究主要集中于传热理论与性能、节能与舒适性、防结露、优化控制等方面^[19-21]。例如,Stand R K 等^[22]对辐射传热理论进行分析,构建了结合能耗模拟程序的辐射系统模型。Jin X 等^[23]利用有限体积法建立数值模型,得出管道导热系数较低会影响地板辐射供冷性能,而水流速度对系统影响不大。裴凤等^[24]通过实验发现,相同条件下,辐射吊顶的供冷能力强于地板辐射。Lim J H 等^[25]通过实验与模拟,得出对地板辐射供冷系统采用水温控制优于流量控制,提出以最潮湿房间的露点温度控制供水温度的方法来防结露。袁旭东^[26]根据控制变量将地板辐射系统的控制方法分为四类,方法分类如图 1 所示,得出“室外温度补偿+室温反馈控制”精度最高,但初投资较大。而“室外温度补偿+脉冲式控制”的控制精度虽略低,但投资较少,且易于施工和维护,为目前较好的控制方法。

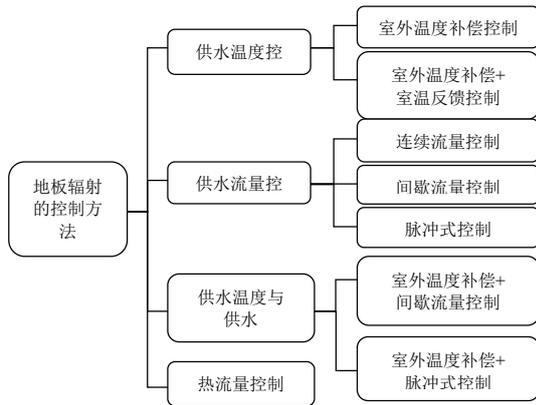


图 1 地板辐射的控制方法分类

Fig.1 Classification of Control Methods for Floor Radiation

1.3 地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的原理及优势

地源热泵—辐射空调系统采用地源热泵作为冷热源，辐射空调系统作为末端，冬季工作时，地理管吸收地能中的热量，通过热泵主机将热量传递至辐射末端供热水循环水，以满足室内供暖需求；夏季，将室内的余热通过热泵主机传递至地源一侧，以满足室内供冷需求。其原理如图 2 所示。

地源热泵利用地下浅层低温地热能源，地能温度全年较为稳定，夏季温度低于空气温度，冬季高于空气温度，能有效提升热泵机组效率。而辐射空调系统冬季采用低温热水，夏季采用高温冷水，与地源热泵系统配合使用，可进一步有效提高热泵机组 COP，提高系统节能性。

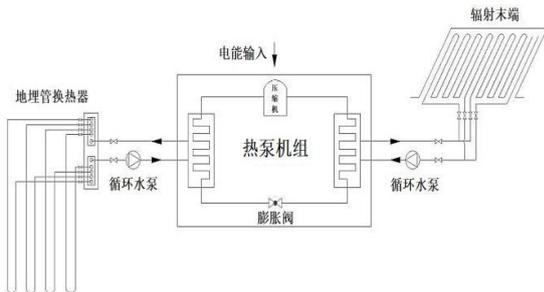


图 2 地源热泵—辐射供冷/暖复合系统原理图

Fig.2 Principle Diagram of Ground Source Heat Pump—Radiation Cooling/Heating Composite System

2 国内外研究现状

目前对于地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的研究主要集中于系统的节能经济性、运行特性及控制策略等方面，焓分析在该系统研究中的应用也得

到了一定关注。

2.1 地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的节能经济性研究

地源热泵—辐射系统能同时满足供冷和供暖两种需求，且辐射系统采用低温热水/高温冷水进行供暖/供冷，能有效提高系统的 COP，在节能经济性等方面有一定的优势。国内外不少学者在此方面开展了相关的研究工作。

国外，Romaní J 等^[27]通过搭建实验台进行研究，得出与空气源热泵—辐射供暖系统相比，地源热泵和辐射供暖系统相结合可节能 20% 以上。Gantiez C 等^[28]对两座位于德国的办公建筑进行数据监测，得出与传统冷水机组制冷和市政集中供暖相比，地源热泵与辐射供冷/暖系统结合可使运行成本降低 50%，且减少 40% 的 CO₂ 排放。Bojić M 等^[29]针对住宅建筑，利用 EnergyPlus 软件模拟得出末端为辐射供暖时，热源采用地源热泵比燃气锅炉的总能耗低 58%、运行成本约减少 67%。Villarino J I 等^[30]采用 EnergyPlus 软件模拟结合实测研究，对西班牙一座办公建筑的土壤源热泵—地板辐射系统进行研究，得出采用该复合系统供暖的 COP 分别为燃气锅炉—散热器的 3.7 倍左右。Sarbu I 及 Sebarchievici C^[31]利用 TRNSYS 软件进行模拟，比较了在住宅建筑中采用地源热泵与辐射板结合及与散热器结合的优势，得出在热舒适情况相同的目标下，在保温良好的建筑中，采用辐射板供暖比散热器供暖节省约 10% 的能耗，且 CO₂ 排放减少 10% 左右。次年，Sarbu I 及 Sebarchievici C^[32]又针对热源为地源热泵的办公建筑，利用 TRNSYS 软件模拟并结合实测得出，散热器采暖比地板辐射系统的 COP 低 4.5%，且其开/关切换次数高于辐射系统的三倍，会加剧设备的磨损。

国内，路诗奎等^[33]对一展厅建筑进行现场实测，得出地源热泵与辐射地板相结合，夏季实际运行系统 COP 为 4.31，比同制冷量的常规冷水机组空调系统高出 30%，电耗仅为其 76%，节能率为 24%。张子平等^[34]通过现场实测，对一采用地源热泵—辐射系统与空气源热泵结合辐射系统的别墅建筑的初投资及全年运行情况进行对比，得出采用地源热泵节省的运行费用可在 8 年左右收回多出的初投资。薛文军^[35]采用 EnergyPlus 软件对西安某别墅空调系统进行能耗模拟，通过比较地源热泵

系统分别与辐射板和风机盘管的两种末端结合的模拟结果,得出末端采用辐射板节能 30.9%。

此外,国内外学者还对辐射板的敷设位置对该复合系统节能性的影响进行了研究。路诗奎^[36]采用 TRNSYS 软件对地源热泵—辐射系统进行模拟,得出在同样的热舒适度条件下,辐射地板系统的能耗比辐射顶板高约 16%。Sarbu I^[31]采用 TRNSYS 软件进行模拟,比较了地源热泵与不同敷设位置辐射板结合的能耗,得出采用顶板辐射系统在降低能耗、减少 CO₂ 排放方面具有优势。

综上所述,国内外学者目前主要采用现场实测和软件模拟的方式对该复合系统的节能性进行分析,研究表明,采用地源热泵与辐射系统相结合,相对于常规供暖系统与空调系统,能够有效降低系统的能耗,节能率为 20%~30%,CO₂ 排放量减少 10%~40%。虽然该系统的初投资较高,但运行成本可减少 60%左右,长期运行具有优势,可在 8 年内收回多出的成本。且末端采用顶板辐射系统相较于地板辐射的节能性更佳。

2.2 地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的运行特性研究

对于该复合系统运行特性的研究,现有研究多通过实测和模拟的方式,对地埋管换热器进出水温、辐射板进出水温以及室内热环境参数等进行监测,分析其运行特性,为系统的设计及运行方式的优化提供参考。

黄忠等^[37]对地源热泵—辐射供冷系统进行实测,得出系统长期运行时,地埋管侧出水温度升高并趋于稳定,其对系统能效比的影响是有限的;受结露限制,辐射板盘管进水温度需根据室内空气露点调节,盘管进水温度对于整个夏季运行期的系统能效比影响较大。

王文等^[38]通过地源热泵—辐射地板系统冬夏联供试验,分析了该系统在不结露的前提下的最佳运行工况,得出夏季地埋管侧水量在 860L/h 左右,冬季在 960L/h 左右,冬夏季供水平均温度均为 18.9℃时,系统能效比最高。地下埋管侧换热器进水温度几乎不受室外气温波动影响。受地板结露条件的限制,地板供冷进出水温差控制在 1~1.5℃左右为宜。

张玲等^[39]对地源热泵—辐射地板冬季运行启动特性进行了实验分析,结果表明地埋管换热器的

进出水温度相对稳定,且总高于室外气温;启动阶段,地下换热器供回水温的最低点出现在地源热泵机组运行达到设计水温前的时刻。

王蕾等^[40]针对杭州一别墅地源热泵—辐射空调系统的夏季室内热环境进行测试,研究表明平均辐射温度和作用温度受室外空气温度的影响不大,且存在滞后的现象,露点控制和温湿度控制对于辐射系统十分重要,良好的自控系统是保证辐射板不结露的重要条件。

辐射末端夏季采用高温冷水,为地埋管直接供冷技术提供了应用空间。目前,国内外对于该复合式系统的研究较少,尚处于起步阶段。张琪^[41]基于天津某办公建筑,建立了双 U 型地埋管换热及地板辐射供冷的非稳态传热数学模型,对地埋管直供地板辐射供冷系统运行特性进行了模拟研究,分析了影响其供冷能力的影响因素,研究表明给定土壤平均温度条件下,取冷量随供水流量的增加而降低,随单井深度的增加而增大;系统季节供冷系数随土壤平均温度升高,呈下降趋势;地板表面平均温度随供水温度增加呈线性递增,随着供水流量增加呈线性递减;直接供冷模式比开启冷水机组模式节能 54%。祁英^[42]基于济南某节能示范楼,采用 TRNSYS 软件模拟结合现场实测对地埋管直供地板辐射供冷系统的运行特性进行了研究,实测结果表明地埋管连续 24 小时运行时,地埋管直供系统能连续提供 18~19℃高温冷水,基本满足室内负荷的需求,系统 COP 可达 10 以上;采用 TRNSYS 软件对系统运行特性仿真模拟得出土壤温度在 15℃以下,建筑围护结构保温性好,并利用温湿度独立控制技术的条件下更适用于地埋管直供系统。

针对严寒地区土壤“冷堆积”问题,胡松涛等^[43]阐述了太阳能及地热能作为地板辐射空调系统冷热源的可行性及必要性,提出了一种利用太阳能和土壤源热泵通过地板辐射空调供暖供冷的方案,夏季供冷可通过间歇运行使土壤温度场得到恢复,以此提高热泵的制冷系数;冬季采用交替供暖方式,两种热源各自运行的最佳时间分配比分别为:33%~35%和 50%~70%。

总结现有研究结果得出,室外气温的变化对地下换热器的进出水温度几乎没有影响,且在给定土壤平均温度时,适当增加流量及单井深度可提高取冷量。对于辐射末端,夏季由于结露问题,辐射板

盘管进水温度需根据室内空气露点温度来调节,盘管进水温度对于夏季运行期的系统能效比影响较大。与采用热泵作为冷源相比,地埋管直供辐射供冷系统节能效果显著,有待于进一步应用推广。对于不同气候区,冬季建筑热负荷大于(小于)夏季冷负荷,全年土壤取、排热量的不平衡会产生“冷(热)堆积”问题,从而导致地埋管换热性能降低,影响辐射末端的供暖(冷)效果。对此,可在系统中加入辅助热源(冷源),或从地源热泵—辐射空调系统整体分析,选择合理的运行控制策略。

2.3 地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的控制策略研究

对于地源热泵—辐射供冷/暖复合系统而言,除了要考虑辐射系统的控制,还要考虑地源热泵机组的控制,选取何种控制方式使该复合系统性能达到最优化在实际应用中十分关键。因此,国内外一些学者对该复合系统的控制问题展开了相关研究。

印伟伟等^[44]以重庆地区采用土壤源热泵+地板辐射供暖系统的别墅作为研究对象,对空调系统控制方式进行研究。热泵机组采用地板辐射供暖系统回水温度控制和室内温度控制两种控制方案,通过实验得出采用室温控制(当室内温度高于 18°C 时停机,低于 16°C 时开机)时,供暖系统的平均能效比较高。次年,印伟伟^[45]团队对该系统的控制策略进行了进一步研究,通过建立系统传热过程的数学模型,提出了基于系统传热特性的控制策略,针对不同控制策略进行了实验研究和模型计算,提出了一种“设定室温范围下的间歇运行控制策略”,并通过实验得出室温范围控制的间歇运行策略下系统能效比比机组回水温度控制高0.3,地埋管换热器换热能力高28%,24h运行周期内,总耗电量减少52.7kWh。

陈威^[46]对地源热泵—地板辐射供暖系统的运行情况进行了模拟分析,提出末端以房间温度设定启停,热泵系统以时间设定启停的控制策略。对于锅炉、风冷热泵、地源热泵与地板辐射供暖结合的三种复合系统的运行费用进行了分析,结果表明地源热泵与地板辐射结合的供暖系统在时间控制条件下,运行费用最低,主要原因是时间控制下的间歇运行给予地下土壤温度场低温恢复的时间使得热泵机组有着较高的效率。

当辐射空调系统采用混凝土辐射末端时,由于

该类型的辐射末端具有较强的热惰性,使得系统的控制难度增加。近年来,有学者对其与地源热泵相结合的复合系统的控制方式进行了针对性研究。Tahersima M^[47]团队的实验研究表明可利用大面积混凝土辐射板作为“热电池”,使热泵在晚上8:00到次日早晨8:00非用电高峰时间运行来储存热量,通过采用低谷电力来降低电费且实现节能,且这种夜间运行模式并不会影响建筑热舒适性。Romani J等^[48]发现与地源热泵相结合的混凝土辐射空调系统在供冷方式下具有很高的节能潜力,且室内温度设定点和温度波动余量的选择对系统节能性的提高十分重要。提出了夜间预冷的方式,将负荷转移到夜间,利用低谷电价来减少系统的运行成本。Luisa F等^[49]对混凝土辐射空调系统与地源热泵相结合的复合系统提出了夜间预冷的策略,利用夜间的低谷电价将冷量储存在墙体内,白天进行释放,从而节省了系统运行成本。Lemort V^[50]等针对德国和比利时采用地源热泵—混凝土辐射空调系统的建筑,对不同控制策略的系统运行数据进行监测,得出采用热泵在晚10:00到次日早6:00运行,早6点到晚6点间的室外平均温度低于 17.5°C 时启用供热模式,高于 22°C 开启供冷模式的控制策略时,系统能效比最高,且热泵利用夜间低谷电价,可节省运行成本。

综上所述,现有研究在该复合系统的控制方面已有一定的进展,主要集中于从节能性及经济性角度提出复合系统最优的运行控制策略,主要研究成果表明室内温度控制优于辐射末端回水温度控制。对地源热泵采用间歇运行方式能够较好的解决土壤热失衡问题,提高系统的节能性。与混凝土辐射末端结合时,地源热泵亦采用夜间运行的间歇运行模式,可充分利用夜间低谷电价,节省运行费用。

2.4 地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的焓分析

分析地源热泵及辐射系统时,利用COP作为主要评价指标仅能反映系统外部损失产生的影响,无法得出系统局部由于不可逆造成的能量损失。而焓分析可对整个系统及局部进行全面评估,深刻揭示能量损耗的本质,是评价系统的重要依据。

2.4.1 焓分析的原理

焓(Exergy)是热力学第二定律的一个导出参数,是能量中可转换为有用功的部分。焓分析法从能量“量”与“质”的角度出发,结合热力学第一

定律和第二定律, 准确地反映出能量转换、利用和损耗的实质, 是一种较全面的能效评价标准。焓定义为稳定流动的开口系统从进口状态以可逆的方式转变到与环境相平衡时的出口状态时可作的最大有用功, 对流过的 1kg 工质而言^[51]:

$$ex_h = w_{\max} = h - h_0 - T_0(s - s_0) = C_p(T - T_0) - T_0(C_p \ln \frac{T}{T_0}) \quad (1)$$

式中, ex_h 为工质焓焓, kJ/kg; w_{\max} 为工质的最大有用功, kJ/kg; T_0 为环境温度, K; T 为工质进口温度, K; C_p 为定压比热, kJ/(kg·K)。

焓随物质本身温度和环境温度的变化而变化^[52]。当系统温度 T 高于环境温度 T_0 , 通过边界传递的热量所能作的最大有用功为热量焓; 当系统温度 T 低于环境温度 T_0 , 通过边界传递的热量所具有的最大作功能力为冷量焓。记传热过程中系统吸收或放出的热量为 Q , 根据卡诺理论有^[51]:

热量焓:

$$Ex_Q = W_{\max} = (1 - \frac{T_0}{T})Q \quad (2)$$

冷量焓:

$$Ex_Q' = -Ex_Q = (\frac{T_0}{T} - 1)Q \quad (3)$$

对于一般的稳态定常流动过程, 能量平衡可表示为总能量输入等于总能量输出, 即: $E_{\text{输入}} = E_{\text{输出}}$ 。而对于焓平衡, 由于系统内部各个环节在实际运行过程中存在不可逆损失, 若系统是稳定的, 有焓平衡方程:

$$Ex_{\text{输入}} = Ex_{\text{输出}} + Ex_s + \sum Ex_i \quad (4)$$

式中, $Ex_{\text{输入}}$ 为输入焓流, 即系统消耗的总焓量; $Ex_{\text{输出}}$ 为输出焓流, 即所要获得的有用的收益焓; Ex_s 为系统外部焓损失, 以外部焓损失的形式排离系统的焓; $\sum Ex_i$ 为系统内各部分焓损失之和。

不可逆的过程伴有各种损失, 这些损失的大小反映了系统中能量转换的效率和利用程度。在进行焓分析时, 常用焓效率来反映整个系统或设备焓的利用程度, 其定义为收益的焓与作为代价的焓之比^[51], 即:

$$\eta = \frac{Ex_{\text{输出}}}{Ex_{\text{输入}}} = 1 - \frac{Ex_s}{Ex_{\text{输入}}} - \frac{\sum Ex_i}{Ex_{\text{输入}}} \quad (5)$$

由上式可以看出, 焓损失越小, 焓效率就越高,

反之焓损失越多, 焓效率越低。准确地揭示出系统各个部分和各部件所存在的焓损失是对能量转换和利用程度进行焓分析的主要目的, 找到影响焓效率的薄弱环节, 以便采取相应措施, 提高能量转换率。

2.4.2 焓分析在地源热泵—辐射供冷/暖系统研究中的应用

焓分析是评估系统性能和热过程不可逆性的有效工具, 有学者利用焓效率及焓损失等评价指标对地源热泵—辐射供冷/暖系统进行了分析。

地源热泵方面, 2004 年 Hepbasli A 等^[53]应用焓分析法对地源热泵系统及主要组成部件进行性能评价。利用质量、能量、焓和熵平衡方程导出了闭环垂直地源热泵系统的能量和焓分析表达式, 为系统的优化设计提供了依据。次年, Hepbasli A^[54]团队从能量和焓两方面对地源热泵进行了热力分析, 目的在于提高系统的过程效率。接着 Hepbasli A^[55]团队进行了进一步研究, 给出了热泵机组各部件及系统的焓损 (或不可逆性) 以及能量效率和焓效率之间的关系, 指出焓对系统的性能评估更为全面。Li R 等^[56]基于冷热焓的概念, 得出地源热泵相比于空气源热泵具有更高的焓效率。且与除湿模式相比, 系统在供冷模式下焓消耗较低且焓效率较高。Menberg K 等^[57]应用冷热焓的概念, 建立了复合地源热泵系统 (辅助燃气锅炉) 的热力学模型, 对系统在供热和供冷过程中的焓消耗进行了分析, 得出通过改变系统运行条件和改进建筑围护结构来提高系统焓效率, 对供热过程的影响大于供冷过程。Hu P 等^[58]结合 TRNSYS 软件模拟对武汉某公共建筑地源热泵系统在不同控制策略下的能量和焓进行了分析, 得出变频泵变流量控制为最优策略, 且季节焓效率可更好地反映地源热泵系统的性能, 同时焓损失也为重要指标。

辐射末端方面, Wang S 等^[59]研究了冷负荷、相对湿度、辐射板面积等参数对辐射供冷系统焓效率的影响, 得出在一定范围内, 焓效率随冷负荷的减少、相对湿度的增加、辐射板面积的增加降低。隋学敏等^[60]利用焓分析的方法, 得出辐射末端焓效率为普通风机盘管的 1.6~1.9 倍, 且相对焓效率随参考温度的升高而降低, 随辐射空调承担显热负荷比例的增加而增大, 应尽可能提高辐射末端承担的冷负荷比例来实现节能。薛红香等^[61]采用焓分析方

法对毛细管辐射平面、散热器、风机盘管和辐射地板4种供暖末端进行比较,得出毛细管辐射空调系统焓损失最低,节能效果最好。Kilkis B^[62]通过建立焓平衡模型 REMM 得出,由可再生能源驱动的地源热泵—辐射供冷/暖系统比以化石能源驱动的辐射空调系统具有更高的焓效率。

另外,亦有学者将焓分析与经济学结合,对系统进行综合评价。胡平放等^[63]以热力学焓分析方法的单位焓成本和单位冷热量成本作为评价指标进行经济性分析,得出地源热泵冬季焓效率及总体经济性优于空气源热泵。董现峰^[64]等人对6种供暖系统(水源热泵+地板辐射供暖系统、电热水锅炉+地板辐射供暖系统、燃气热水锅炉+地板辐射供暖系统、集中供热锅炉房+换热器+地板辐射供暖系统、集中供热锅炉房+散热器供暖系统、空气源热泵+地板辐射供暖系统)进行焓经济成本及环境经济成本分析,得出水源热泵结合地板辐射供暖系统的综合经济性较优。郭晓坤等^[65]人利用年度化费用的方法进行热经济分析,得出地板辐射采暖与传统散热器采暖相比节约投资费用10%左右,且最佳管间距可使辐射采暖的年化费用最低,最佳管间距随管材费用的增加而增大,随燃料焓单价的增加而减小。

综上所述,国内外研究采用焓效率和焓经济成本分析法得出了地源热泵及辐射系统具有更高的焓效率和更低的能量消耗,具有节能性及较优的经济性。通过研究发现,焓分析可全面评估整个系统及局部的效率,揭示能量损耗的本质,具体反应系统内部及各设备的焓损失,发现系统的实质问题并判断系统中可以改进的部分,经调节实现真正的节能。且将焓分析与经济学结合起来的热经济学分析法,可详细描述整个系统中成本的形成并进行合理的成本评估,提高系统经济性能。目前,国内外已有很多学者利用焓分析法针对地源热泵或辐射末端进行了探究,但对地源热泵结合辐射供冷/暖的复合系统的综合焓分析研究甚少。

3 尚需解决的问题

虽然国内外对地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的研究已取得了一定的成果,但由于系统本身的复杂性,尚有不少问题有待进一步研究与解决:

(1) 对于不同类型的

地源热泵和不同类型的辐射末端相结合,缺乏针对性的运行策略,需进行深入研究,以达到最优控制。

(2) 根据不同气候区的土壤“冷(热)堆积”问题,土壤源热泵需耦合辅助热源或冷源,而该系统受双热源/冷源耦合特性的影响,与辐射末端相结合采用何种调控方式需进一步研究。

(3) 该复合系统相应的设计规范不够完善,且施工工艺不够规范,对系统的性能、使用寿命和投资费用等有很大影响,应尽快建立相应的规范细则,以便于该技术的应用。

4 结论及展望

由于节能、环保、舒适等优势,地源热泵与辐射供冷/暖系统相结合的复合系统应用越来越广泛,本文对其国内外研究现状进行了综述,总结了目前的主要研究成果及亟待解决的问题,主要得到以下结论:

(1) 目前地源热泵—辐射供冷/暖复合系统的研究主要集中于复合系统的节能经济性、运行特性及控制策略方面。地源热泵与辐射系统相结合可实现优势互补,有效提高地源热泵机组的能效比,节能效果显著,长期运行在经济性方面具有优势。

(2) 地埋管直供辐射供冷系统 COP 可达到10以上,与采用热泵作为冷源的复合式系统相比,节能效果显著。目前,国内外对于此项技术的研究较少,有待于进一步研究、应用推广。地埋管直供辐射供冷系统应用于不同纬度地区及土壤环境中的适应性、运行控制策略及应用效果有待于进一步研究。

(3) 地源热泵与辐射供冷/暖复合系统的运行控制策略是影响该复合系统节能性及应用推广的关键问题,在以下方面还有待于进一步研究:对于不同类型的

地源热泵系统和不同类型的辐射末端的相结合,应研究针对性的运行控制策略;对于耦合辅助热源或冷源的混合式土壤源热泵与辐射末端相结合时最优的运行控制策略有待于研究。

(4) 焓分析可深刻揭示能量损耗的本质,有效改善系统的薄弱之处,且将焓分析与经济学结合,能更全面探究系统的节能与经济性。目前,对于地源热泵结合辐射供冷/暖的复合系统的焓分析少之又少,如何采用焓分析方法对该复合式系统整体及局部进行评估,找到影响复合系统焓效率的薄

薄弱环节,采取相应措施优化系统,进一步提升复合系统的节能潜力,是该复合式系统未来的重要研究方向。

参考文献:

- [1] Man Y, Yang H, Wang J. Study on hybrid ground-coupled heat pump system for air-conditioning in hot-weather areas like Hong Kong[J]. *Applied Energy*, 2010,87(9):2826-2833.
- [2] 寿青云,陈汝东.高效节能的空调—地源热泵[J]. *节能*, 2001(1):41-43.
- [3] 王子介.低温辐射供暖与辐射供冷[M].北京:机械工业出版社,2004:2-5.
- [4] Feustel H E, Stetiu C. Hydronic Radiation Cooling-Preliminary Assessment[J]. *Energy and Buildings*, 1995, 22(3):193-205.
- [5] 韩宗伟,王一茹,杨军,等.严寒地区热泵供暖空调系统的研究现状及展望[J]. *建筑科学*, 2013,29(12):124-133.
- [6] 王勇.地源热泵的技术经济分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2001,20(5):12-13.
- [7] 袁艳平,曹晓玲,雷波,等.中国地区土壤源热泵系统研究进展评述[J]. *四川建筑科学研究*, 2010,36(2):252-257.
- [8] 芦子健,曲世琳,韩金权,等.严寒地区蓄热式太阳能土壤源热泵耦合系统适用性研究[J]. *建筑科学*, 2017, 33(10):97-103.
- [9] 钱程,徐伟.严寒地区土壤源热泵系统的运行性能分析[J]. *建筑科学*, 2008,24(12):77-80.
- [10] Innersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. *ASHRAE Transactions*, 1948,20(7):119-122.
- [11] Innersoll L R, Zobel O J, Innersoll A C. Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications[M]. New York: McGraw-Hill, 1954:250-251.
- [12] 马宏权,龙惟定.地理管地源热泵系统的热平衡[J]. *暖通空调*, 2009,39(1):102-106.
- [13] 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.
- [14] 金光,王正文,吴暄,等.混合式土壤源热泵系统的研究现状及展望[J]. *流体机械*, 2016,44(2):82-88.
- [15] 於仲义,胡平放,袁旭东.土壤源热泵地理管换热实验研究[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2008,25(3): 157-160.
- [16] 徐伟,刘志坚.中国地源热泵技术发展及展望[J]. *建筑科学*, 2013,29(10):26-33.
- [17] JGJ142-2012,辐射供暖供冷技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [18] 李锦堂,孙宗宇,李骥,等.辐射吊顶供冷方式节能舒适性研究[J]. *建筑科学*, 2015,31(10):169-177.
- [19] 廖买利,谢东,丁伟,等.辐射供冷空调系统的研究综述[J]. *湖南工业大学学报*, 2017,31(2):23-27.
- [20] 黄立志,李念平,何颖东,等.不同辐射供冷方式下室内热舒适和能耗模拟分析[J]. *建筑科学*, 2017,33(8):90-96.
- [21] 刘艳超,金梧凤,陈华.地板辐射供冷系统的优化控制[J]. *建筑科学*, 2012,28(8):32-35.
- [22] Stand R K, Baumgartner K T. Modeling Radiant Heating and Cooling Systems: Integration with a Whole Building Simulation Program[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 37(4):389-397.
- [23] Jin X, Zhang X, Luo Y, et al. Numerical Simulation of Radiant Floor Cooling System: Effects of Thermal Resistance of Pipe and Water Velocity on the Performance[J]. *Building and Environment*, 2010,45(11): 2545-2552.
- [24] 裴凤,陈华,金梧凤,等.不同结构毛细管网辐射板供冷性能实验研究[J]. *低温与超导*, 2013,41(7):58-63.
- [25] Lim J H, Jo J H, Kim Y K, et al. Application of the Control Methods for Radiant Floor Cooling System in Residential Buildings[J]. *Building and Environment*, 2006,41(1):60-73.
- [26] 袁旭东,王鑫,柯莹.地板辐射供冷的控制方法[J]. *制冷与空调*, 2007,21(2):41-44.
- [27] Romani J, Perez G, Gracia de A. Experimental evaluation of a heating radiant wall coupled to a ground source heat pump[J]. *Renewable Energy*, 2017,105(5): 520-529.
- [28] Gantiez C, Lemort V, Hoogmartens J, et al. Energy and comfort performance analysis of monitored thermally activated building systems combined with geothermal heat pumps[C]. *International High Performance Buildings Conference*, 2012.
- [29] Bojić M, Cvetković D, Bojić L. Decreasing energy use and influence to environment by radiant panel heating using different energy sources[J]. *Applied Energy*, 2015,

- 138(4):404-413.
- [30] Villarino J I, Villarino A, Fernández F A. Experimental and modeling analysis of an office building HVAC system based in a ground-coupled heat pump and radiant floor[J]. *Applied Energy*, 2017,190(3):1020-1028.
- [31] Sarbu I, Sebarchievici C. A study of the performances of low-temperature heating Systems[J]. *Energy Efficiency*, 2015,8(3):609-627.
- [32] Sarbu I, Sebarchievici C. Using Ground-Source Heat Pump Systems for Heating/Cooling of Buildings[M]. *Advances in Geothermal Energy, InTech*, 2016.
- [33] 路诗奎,宋志雄,陈育平,等.地源热泵辐射供冷技术在展厅的应用[J].*可再生能源*,2011,29(1):129-132.
- [34] 张子平,苏艳红,佟娜娜.辐射空调与地源热泵系统的研究应用[C].2010年建筑环境科学与技术国际学术会议论文集,2010.
- [35] 薛文军.某地源热泵空调系统采用不同末端的能耗分析与对比[J].*绿色科技*,2016(2):102-104.
- [36] Lu S, Zhang X. Thermal comfort assessment and energy consumption analysis of ground-source heat pump system combined with radiant heating/cooling[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2012,28(1):52-57.
- [37] 黄忠,刘宪英,丁勇,等.重庆夏季低温辐射供冷地源热泵空调系统试验研究[J].*暖通空调*,2008,38(7):15-19.
- [38] 王文,何雪冰,刘宪英.地源热泵—辐射地板联供试验[J].*发电与空调*,2002,23(2):12-16.
- [39] 张玲,陈光明,黄奕凌.U型竖埋管地源热泵—辐射地板联合运行冬季启动特性实验研究[J].*流体机械*,2005,33(增刊):108-111.
- [40] 王蕾,陆长华,佟娜娜.杭州某别墅地源热泵辐射空调系统夏季室内热环境测试分析[C].*全国暖通空调制冷2010年学术年会论文集*,2010.
- [41] 张琪.土壤冷源直供地板辐射供冷系统运行特性模拟研究[D].天津:天津大学,2014.
- [42] 祁英.地埋管直接供冷系统供冷特性研究[D].济南:山东建筑大学,2015.
- [43] 胡松涛,张莉,王刚.太阳能-地源热泵与地板辐射空调系统联合运行方式探讨[J].*暖通空调*,2005,35(3):41-44.
- [44] 印伟伟,付祥钊.土壤源热泵+地板辐射供暖系统热源控制方式[J].*煤气与热力*,2013,33(3):23-25.
- [45] 印伟伟.地源热泵-地板辐射空调系统运行控制研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [46] 陈威.地源热泵与地板辐射联合供暖系统控制策略分析[D].重庆:重庆大学,2016.
- [47] Tahersima M, Tikalsky P, Revankar R. An experimental study on using a mass radiant floor with geothermal system as thermal battery of the building[J]. *Building and Environment*, 2018,133(4):8-18.
- [48] Romani J, Pérez G, Gracia A D. Experimental evaluation of a cooling radiant wall coupled to a ground heat exchanger[J]. *Energy and Buildings*, 2016,129(10):484-490.
- [49] Luisa F, Romani J, et al. Experimental testing of cooling internal loads with a radiant wall[J]. *Renewable Energy*, 2018,116(2):1-8.
- [50] Lemort V. Monitoring of real GEO-HP-TABS(Energy performance and control evaluation)[R]. *Université De Liège*, 2013.
- [51] 朱明善.能量系统的焓分析[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [52] Shukuya M. Exergy concept and its application to the built environment[J]. *Building and Environment*, 2009,44(7):1545-1550.
- [53] Hepbasli A, Akdemir O. Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004,45(5):737-753.
- [54] Hepbasli A. Thermodynamics analysis of a ground source heat pump system for district heating[J]. *International Journal of Energy Research*, 2005,29(7):671-687.
- [55] Hepbasli A, Tolga Balta M. A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings[J]. *Building and Environment*, 2007,42(10):3747-3756.
- [56] Li R, Ooka R, Shukuya M. Theoretical analysis on ground source heat pump and air source heat pump systems by the concepts of cool and warm exergy[J]. *Energy and Buildings*, 2014,75(6):447-455.
- [57] Menberg K, Heo Y, Choi W, et al. Exergy analysis of a hybrid ground-source heat pump system[J]. *Applied Energy*, 2017,204(10):31-46.

- [58] Hu P, Hu Q, Lin Y, et al. Energy and exergy analysis of a ground source heat pump system for a public building in Wuhan, China under different control strategies[J]. Energy and Buildings, 2017,152(10):301-312.
- [59] Wang S, Morimoto M, Soeda H, et al. Evaluating the low exergy of chilled water in a radiant cooling system[J]. Energy and Buildings, 2018,40(10):1856-1865.
- [60] 隋学敏,张旭.辐射空调末端的分析与评价[J].流体机械, 2010,38(4):71-73.
- [61] 薛红香,张霞,王雷.基于焓分析的供暖末端设备节能性研究[J].可再生能源,2010,28(6):118-120.
- [62] Kilkis B. Exergy metrication of radiant panel heating and cooling with heat pumps[J]. Energy Conversion and Management, 2012,63(11):218-224.
- [63] 胡平放,李芬容,孙启明,等.地源热泵系统经济性的热力学分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009, 37(4):97-100.
- [64] 董现峰,谢慧,范慧芳.水源热泵结合地板辐射供暖的经济性分析[J].煤气与热力,2008,28(6): 36-38.
- [65] 郭晓坤,傅秦生,雷军拓,等.地面辐射采暖的热经济学分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2007,34(2): 58-60.

(上接第 192 页)

风增压波动性较大;对表 6 中不同行车速度下增压做平均, V_0 每增加 5m/s, 模拟计算得到平均增压约以 50%左右递增(以表 1 和表 3 数据为基本参数)。

3 结论和建议

通过对模拟计算结果分析,本文给出如下结论和建议:

(1) 本文以英国 Patchway 隧道为物理模型进行数值模拟,通过计算值与实测值对比表明本文计算方法正确,计算结果可靠性高;

(2) 随着列车行车速度提高,平均活塞风速和风压呈增大趋势;

(3) 以表 1 和表 3 数据为基本参数, V_0 每增加 5m/s, 平均活塞风速约以 19.48%递增,平均增压约以 50%左右递增;

(4) 根据结论 3,以国内常见单线隧道和列车参数为基本参数,通过系列计算,可以建立活塞风速和增压相应数据库,为工程上估算活塞风速和风压提供借鉴。

参考文献:

- [1] 曾艳华,白赟,周小涵,等.列车停靠隧道内救援站过程中活塞风变化数值模拟分析[J].中国铁道科学,2016, 37(4):128-133.
- [2] 闫春利,雷波.行车对数和位置对活塞风井通风特性的影响[J].制冷与空调,2018,32(1):1-6.
- [3] 甘甜,王伟,赵耀华,等.地铁活塞风 Fluent 动网格模型建立与验证[J].建筑科学,2011,27(8):75-81.
- [4] 陈荣,王国志,邓斌,等.列车通过隧道时流场二维数值模拟分析[J].铁道建筑,2013(1):52-55.
- [5] JYKim, KYKim. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007,22(2):166-172.
- [6] KE Mingsun, CHENG Tsungche. Numerical Simulation for Optimizing the Design of Subway Environmental Control System[J]. Building and Environment, 2002,37(11):1139-1152.
- [7] JKMok, JYoo. Numerical study on high speed train and tunnel hood interaction[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2001,89:17-29.
- [8] Chang-Hoon Shin, Warn-Gyu Park. Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel[J]. Mechanics Research Communications,2003, 30:287-296.
- [9] 王从陆,吴超.基于移动参考框架矿内运输工具活塞风数值模拟[J].煤炭学报,2007(8):838-841.
- [10] 邬长福,邓权龙,李乐农.基于动网格井巷活塞风影响因素数值模拟研究[J].中国矿业,2015,24(8):110-114.
- [11] 李炎.铁路隧道列车活塞风特性分析及理论研究[D].兰州:兰州交通大学,2010.