

# 基于 TRNSYS 的地埋管换热器温度场变化规律研究

尚少文<sup>1</sup>,朱天然<sup>1</sup>,刘兵红<sup>2</sup>,毕雪<sup>1</sup>,纪淼<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 三祥·万力工业设备(北京)有限公司,北京 102628)

**摘要** 根据地源热泵不同运行模式下对地埋管换热器周围土壤产生不同影响,研究其周围温度场的变化规律。**方法** 运用模拟软件 TRNSYS 对某办公楼建筑全年逐时负荷进行计算,并进行地源热泵的设计,然后模拟地源热泵冬夏两季、只冬季、只夏季运行后土壤温度的变化。**结果** 地源热泵冬夏两季运行1年、5年后土壤温度分别为 9.272 ℃、8.315 ℃;地源热泵只夏季运行1年、5年后土壤温度分别为 11.02 ℃、12.95 ℃;地源热泵只冬季运行1年、5年后土壤温度分别为 8.929 ℃、7.552 ℃。**结论** 地源热泵冬夏两季运行比单季运行时,土壤温度的变化幅度较小,且最终温度更接近土壤初始温度,更有利于地源热泵的长期运行。

**关键词** TRNSYS;地埋管换热器;温度场;恢复规律

中图分类号 TU832.1 文献标志码 A

## Research on the Change Law of Temperature Field of TRNSYS-based Buried Tube Heat Exchangers

SHANG Shaowen<sup>1</sup>, ZHU Tianran<sup>1</sup>, LIU Binghong<sup>2</sup>, BI Xue<sup>1</sup>, JI Miao<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Sanxiang Wanli Industrial Equipment (Beijing) Co. Ltd, Beijing, China, 102628)

**Abstract:** Different influences may be exerted on the soil surrounding the buried tube heat exchanger under different operation modes of the ground source heat pump. Based on this, the change law of the temperature field around the buried tube heat exchanger was studied. With the simulation software TRNSYS, the hourly load of an office building in a whole year was calculated, and a ground source heat pump was designed. Then, the change in soil temperature after the ground source heat pump was operated in summer and winter, in winter only and in summer only was simulated. The soil temperature after the ground source heat pump was operated in summer and winter for one year and for five years was 9.272 ℃ and 8.315 ℃ respectively, while that in summer only for the same periods was 11.02 ℃ and 12.95 ℃ respectively, and that in summer only for the same periods was 8.929 ℃ and 7.552 ℃. Two-season operation of the ground source

收稿日期:2016-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51408376);辽宁省住房和城乡建设厅项目(SZJT2015008)

作者简介:尚少文(1970—),男,副教授,主要从事室内环境质量保障技术和建筑节能方面研究。

heat pump may lead to smaller changing amplitude of the soil temperature and closer final temperature to the initial soil temperature than single-season operation and it is more favorable to the long-term operation of the ground source heat pump.

**Key words:** TRNSYS; buried tube heat exchangers; temperature filed; recovery law

地源热泵技术成为人们应对能源危机、减少建筑能耗的有效措施之一. 这种利用地下浅层地热资源的地源热泵技术,实现向建筑物提供采暖、制冷和生活热水,既高效节能又环保<sup>[1]</sup>. 随着人们对清洁能源的越来越重视和我国政府的大力支持下,地源热泵系统在我国已经有了快速的发展,全国地源热泵面积在 2005—2008 年,已经从 30 km<sup>2</sup>推广到 100 km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>. 可以看出,短短几年时间,我国地源热泵面积已经扩展到原来的 3 倍多,发展势头迅猛. 其中,地源热泵在北方地区推广应用比南方好<sup>[3]</sup>,这是因为我国北方处于纬度较高的地区,冬季气候比南方寒冷,地源热泵系统用于冬季供暖的利用价值更大<sup>[4]</sup>.

张晓明<sup>[5]</sup>等以天津地区某实际垂直埋管工程周围的土壤温度场进行了 30 a 的模拟,得到不同土壤物性时单根埋管换热后的土壤温度变化;姜振涛<sup>[6]</sup>等实现了对大面积密集型桩埋换热管群周围土壤温度进行 6 a 的数值模拟,并提出土壤换热中热屏障的概念;宋伟<sup>[7]</sup>利用有限元传热分析计算平台,求解了群井吸多热源系统的吸热过程对埋管管群周围土壤温度场的影响. 在严寒地区,建筑物的热负荷往往大于冷负荷,若地源热泵系统承担所有的建筑负荷,则会导致埋管周围的土壤温度逐年下降,产生土壤的冷堆积. 基于此,笔者针对吉林省四平地区的某建筑物进行地源热泵的设计,并通过模拟软件 TRNSYS 进行逐时负荷计算,并对地源热泵冬夏两季运行、只冬季运行以及只夏季运行后的土壤温度进行模拟并总结规律. 结果表明地源热泵冬夏两季运行比单季运行时,土壤温度的变化幅度较小,且最终温度更接近土壤初始温度,更有利于地源热泵的长期运行.

# 1 办公建筑物概况及负荷模拟

## 1.1 办公建筑物概况

笔者以吉林省四平地区某办公楼为例,进行地源热泵的模拟设计. 该建筑共 3 层,首层高 4.1 m,标准层高 3.6 m,总的建筑面积约为 1 700 m<sup>2</sup>. 所选办公楼的建筑平面图如图 1 所示. 建筑物围护结构的各个参数均符合严寒地区建筑节能的设计要求,建筑物围护结构传热系数如下:地面,0.332 W/(m<sup>2</sup>·K);墙体,0.37 W/(m<sup>2</sup>·K);楼板,3.07 W/(m<sup>2</sup>·K);屋顶,0.31 W/(m<sup>2</sup>·K);窗,2.0 W/(m<sup>2</sup>·K).

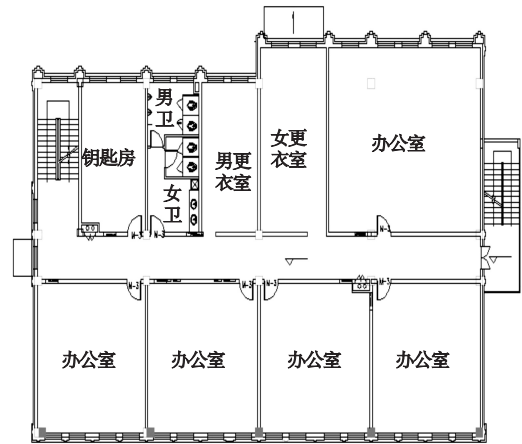


图 1 建筑平面图

Fig. 1 The floor plan

## 1.2 办公建筑物逐时负荷模拟计算

该建筑物所在地区处于北温带,四季分明,春季干燥多风,夏季温热多雨,秋季温和凉爽,冬季漫长寒冷,全年平均温度为 5.9 ℃,年平均降水量为 572.8 mm<sup>[8]</sup>. 最热月平均温度为 28.2 ℃,极端最高温度达到 37.3 ℃,极端最低温度达到 -32.3 ℃<sup>[9]</sup>. 夏季室内设计温度为 26 ℃,冬季室内采暖温度为 18 ℃.

笔者利用 TRNSYS 软件中的 TRNbuild 建立建筑物的物理模型,输入建筑物的墙窗

面积比、墙体材料、楼板面积等信息,形成一个 building 的建筑信息文件,导入 TRNSYS 中的 Type56 模块,建立负荷计算系统,对该建筑 1 年的负荷进行模拟,建筑物 1 年逐时负荷如图 2 所示。

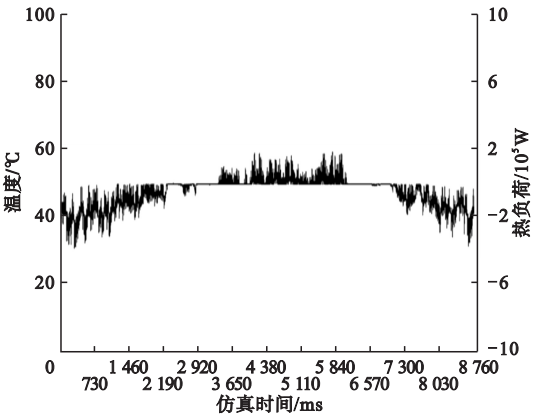


图2 建筑物1年逐时负荷图

Fig.2 Hot and cold throughout the year when the building-by-load curve

得出该建筑物的最大热负荷为 101 kW,最大冷负荷为 52.5 kW,全年累计热负荷为  $4.32 \times 10^8$  kJ,全年累计冷负荷为  $7.4 \times 10^7$  kJ,建筑物的全年累计热负荷大于全年累计冷负荷,由此可计算得负荷的不平衡率为 82.8%。

2 办公建筑物地源热泵设计

2.1 计算基本参数

该建筑物的地理管敷设形式为垂直单 U 型管,根据地源热泵设计规范<sup>[10]</sup>,考虑到土壤对地埋管的腐蚀等作用,选择 PE 管,外径为 32 mm,内径为 26 mm,钻孔深度为 80 m,钻孔直径为 250 mm,地埋管之间的间距为 4 m.循环液采用质量分数为 30% 的乙二醇溶液,导热系数为 0.44 W/(m·K),密度为 1 050 kg/m<sup>3</sup>,比热为 3 603 J/(kg·K).土壤的热物性参数见表 1.

表1 土壤热物性参数

Table 1 The soil thermal parameters

导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	扩散率/10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	体积比热容/(kJ·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup> )
2.57	0.25	1 980	1 900

2.2 计算公式

循环液与地埋管内壁的对流换热热阻  $R_f$  为

$$R_f = \frac{1}{\pi d_i h}, \tag{1}$$

$$h = \frac{N_f \cdot \lambda}{d}, \tag{2}$$

$$N_f = 0.023 R_{ef}^{0.8} P_{rf}^{0.4}, \tag{3}$$

$$P_{rf} = \frac{\nu}{\alpha}, \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}. \tag{5}$$

式中: $d_i$ 为地埋管内径,m; $h$ 为循环液对内壁的对流换热系数,W/(m<sup>2</sup>·K); $N_f$ 为努谢尔特准则数,无量纲数; $\lambda$ 为管内流体的导热系数 W/(m·K); $R_{ef}$ 为雷诺数,无量纲数; $P_{rf}$ 为普朗特数,无量纲数; $\nu$ 为换热液体的运动黏度

系数 m<sup>2</sup>/s; $\alpha$ 为导热系数,m<sup>2</sup>/s; $c$ 为管内流体的定压比热容,J/(kg·K); $\rho$ 为管内流体的密度,kg/m<sup>3</sup>.

地埋管管壁热阻  $R_{pe}$  为

$$R_{pe} = \frac{1}{2\pi\lambda_p} \ln\left(\frac{d_e}{d_e - (d_o - d_i)}\right). \tag{6}$$

式中: $d_e$ 、 $d_o$ 分别为地埋管的当量直径和外径,m; $\lambda_p$ 为地埋管的导热系数,W/(m·K).

回填材料的热阻  $R_b$  为

$$R_b = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \ln\left(\frac{d_b}{d_e}\right). \tag{7}$$

式中: $\lambda_b$ 为回填材料的导热系数,W/(m·K); $d_b$ 为回填直径,m.

地层热阻是指从孔壁到无穷远处的热阻.

当有单个钻孔时,地层热阻  $R_s$  为

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} I\left(\frac{r_b^2}{4a\tau}\right).$$

(8)

$$I_u = \frac{1}{2} \int_u^\infty \frac{e^{-s}}{s} ds.$$

(9)

当有多个钻孔时,地层热阻  $R_s$  为

$$R_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s} \left[ I\left(\frac{r_b^2}{4a\tau}\right) + \sum_{i=2}^N I\left(\frac{x_i^2}{4a\tau}\right) \right].$$

(10)

式中: $I$  为指数积分因子; $\alpha$  为土壤扩散率,  $m^2/s$ ;  $\lambda_s$  为土壤的平均导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;  $\tau$  为运行时间,  $s$ ;  $r_b$  为钻孔半径,  $m$ ;  $x_i$  为第  $i$  个钻孔到所计算钻孔之间的距离,  $m$ .

短期连续脉冲负荷产生的附加热阻  $R_{sp}$  为

$$R_{sp} = \frac{1}{2\pi\lambda_s} I\left(\frac{r_b}{2\sqrt{\alpha\tau_p}}\right).$$

(11)

式中: $\tau_p$  为短期脉冲负荷连续运行时间,  $s$ .

上述各项热阻求解结果为:  $R_f = 0.005 \ \Omega$ ;  $R_{pe} = 0.02 \ \Omega$ ;  $R_b = 0.075 \ \Omega$ ;  $R_s = 0.175 \ \Omega$ ;  $R_{sp} = 0.1658 \ \Omega$ .

根据地源热泵系统工程技术规范<sup>[10]</sup>,按照埋管钻孔长度的计算方法,可以得到,制冷工况下需要的埋管长度为1 266 m,制热工况下需要的埋管长度为2 750 m,在埋管换热器设计时需要满足冬季需求,所以埋管的长度取决于冬季.最终算得埋管参数如下:土壤蓄热体的体积为64 000  $m^3$ ;土壤初始温度为10  $^{\circ}C$ ;钻井深80 m,半径为0.125 m,共36个,间距为4 m;源流循环流量为32 000  $kg/h$ ;管材导热系数为0.45  $W/(m \cdot K)$ ;循环液导热系数为0.44  $W/(m \cdot K)$ ;回填土导热系数为2.0  $W/(m \cdot K)$ .

### 3 地源热泵模拟系统的建立

在 TRNSYS 中需要将各个模块之间建立起关系,实现各个模块之间的参数传输<sup>[11-14]</sup>.在模拟地源热泵系统时,地源热泵的运行取决于各个模块的性能及相互配合,建立控制函数来实现系统在设定的时间段和工况下运行.地源热泵系统主要用到的模块有<sup>[15-18]</sup>:建筑负荷、埋管、热泵机组、水泵、

控制函数.建筑负荷输入的是软件模拟出的逐时冷热负荷,其与热泵机组负荷侧相连接;热泵机组通过运行计算从热源中获取热量提高负荷侧的温度,然后负荷侧介质温度会输入到建筑物中;埋管与热泵机组也是通过温度和流量相连接,在埋管换热器模块中可以看到土壤温度变化、埋管与土壤的换热量、介质的出口温度等,在此模块中需要输入如下参数<sup>[19-20]</sup>:土壤及管内介质的热物性参数、埋管的钻井深度及半径、埋管个数、埋管间距、土壤表面空气温度及太阳辐射量等.制热控制函数设定了热泵系统夏季运行时间,制冷控制函数设定了热泵系统的冬季运行时间.笔者设计了3种情况:①地源热泵冬夏两季运行;②地源热泵只冬季运行;③地源热泵只夏季运行.比较3种不同情况下地源热泵系统运行后土壤温度恢复情况,地源热泵系统模拟图如图3所示.

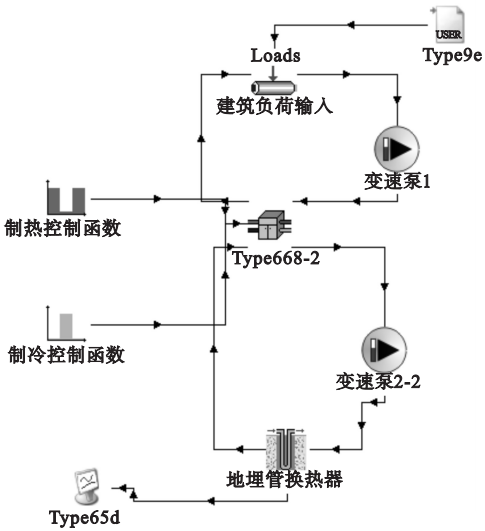


图3 地源热泵系统模拟图

Fig. 3 Ground source heat pump system simulation map

### 4 模拟结果与分析

#### 4.1 冬夏两季运行

图4为地源热泵冬夏两季运行1年时土壤平均温度的变化情况.该图系统模拟时间

从冬季供暖期开始到第二年的冬季供暖期开始. 根据系统中设定,供暖期开始时土壤初始温度为 10 ℃,由于冬季运行时地埋管从土壤中吸取热量,使得土壤温度不断下降,到供暖期结束时,即从 7 200 ~ 10 920 h 时,土壤的温度降低为 7.701 ℃. 供暖结束后,土壤进行自然恢复期,一直到热泵进入夏季运行前,即 10 920 ~ 12 360 h 时,土壤的温度为 8.165 ℃,土壤温度有所回升. 夏季供冷开始后,地埋管换热器向土壤释放热量,使土壤温度继续升高,当夏季供冷结束时,即到 14 520 h 时,土壤的温度为 9.062 ℃. 夏季供冷结束后,土壤再次进行自然恢复,到第 2 年供暖季开始时,土壤的温度为 9.272 ℃,此时地源热泵运行 1 年,土壤温度降低 0.728 ℃.

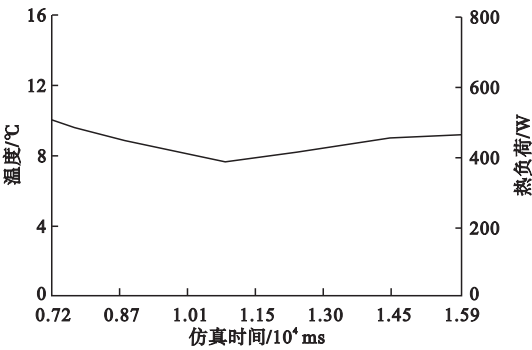


图 4 地源热泵冬夏两季运行 1 年土壤温度变化  
Fig. 4 The soil temperature change through the year GSPH run double cropping

图 5 为地源热泵系统两季运行 5 年的土壤温度变化图. 从第 1 年的冬季供暖期开始运行到第 6 年供暖期开始之前,可以看出,每一年内土壤温度都会有波动,是由于冬季运行后土壤进行自然恢复会使土壤温度有所回升,但回升幅度不足以回到初始温度. 同时夏季运行地埋管向土壤中释放热量,也使得土壤温度上升,冬季运行时间较长,取热和排热不平衡. 综合各方面,土壤整体平均温度有所下降,随着地源热泵的运行每年土壤温度下降的幅度越来越小,运行到第 5 年结束时,土壤的平均温度为 8.315 ℃.

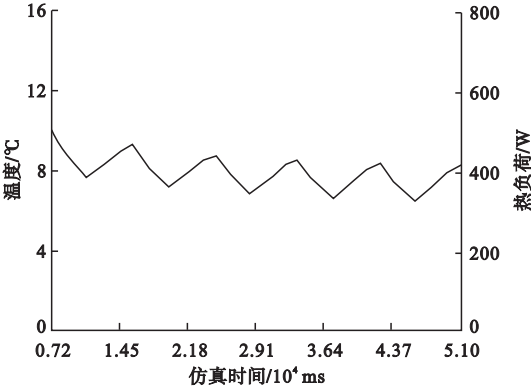


图 5 地源热泵冬夏两季运行 5 年土壤温度变化  
Fig. 5 The soil temperature change through 5 years GSPH run double cropping

4.2 只夏季运行

图 6 为地源热泵只夏季运行时 1 年中土壤温度变化情况. 图中从第 1 年供暖期开始,地源热泵不进行供热,由于太阳的辐射作用,使得土壤温度慢慢升高. 夏季开始供冷后,由于地埋管向土壤排放热量,使得土壤温度出现幅度较大的上升,等夏季运行结束后,土壤开始进行自然恢复,土壤温度升高开始缓慢,到第二个供暖期开始前,土壤温度升高为 11.02 ℃. 图 7 为夏季单独运行 5 年时土壤温度变化情况. 可以看出,地源热泵只夏季运行时,土壤温度每年都会有所上升,随着运行时间越来越长,每年土壤的温升幅度越来越小,到第 6 年供暖期开始前,土壤平均温度为 12.95 ℃.

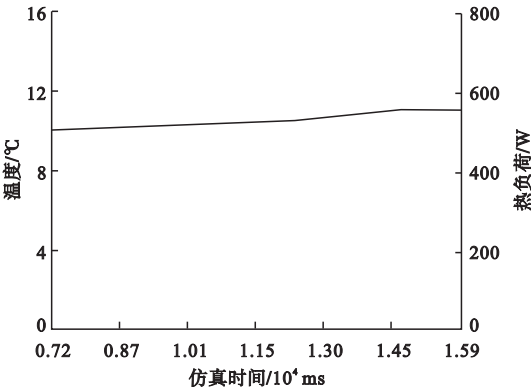


图 6 地源热泵只夏季运行 1 年土壤温度变化  
Fig. 6 The soil temperature change through the year GSPH run single summer



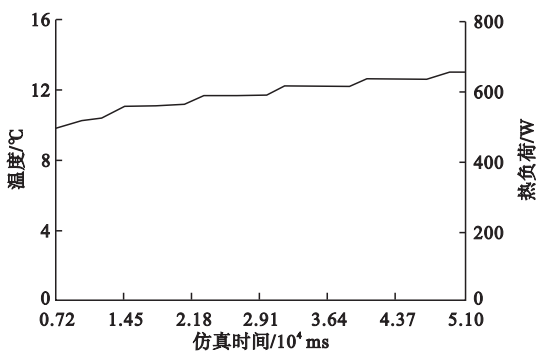


图7 地源热泵只夏季运行5年土壤温度变化

Fig.7 The soil temperature change through 5years

GSPH run single summer

4.3 只冬季运行

图8为地源热泵只冬季运行1年土壤温度变化情况。地源热泵从第1年的供暖期开始运行,由于埋管从土壤中吸取热量,土壤温度随着地源热泵的运行而逐渐下降,与双季运行时一样,供暖期结束时土壤温度降低为7.701℃。地源热泵进行冬季运行后的自然恢复,由于不进行夏季供冷,所以土壤温度到第2年供暖期开始一直回升,且回升幅度不高,温度回升到8.929℃。

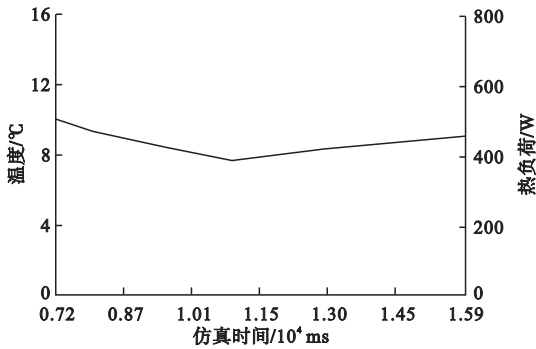


图8 地源热泵只冬季运行1年土壤温度变化

Fig.8 The soil temperature change through the

year GSPH run single winter

图9为地源热泵只进行冬季供暖运行5年的土壤温度变化。由图可以看出,冬季运行结束后,每一年土壤温度都会有所回升,回升幅度比双季运行时要小,整体仍然呈下降趋势,到地源热泵运行5年时,土壤温度下降为7.552℃。

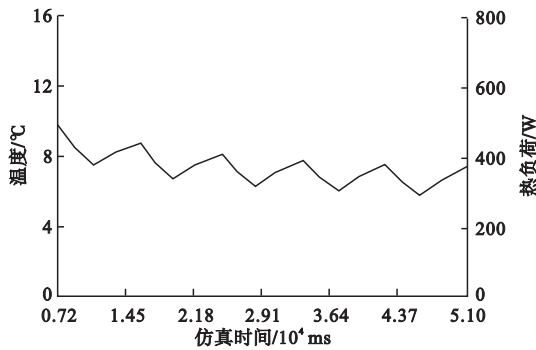


图9 地源热泵只冬季运行5年土壤温度变化

Fig.9 The soil temperature change through 5years

GSPH run single winter

5 结 论

当地源热泵冬夏两季运行时,在1年内土壤温度变化有降有升,且出现不同的升高但整体呈下降趋势,之后的每年出现相同的变化趋势,但每年温度下降得越来越少;当地源热泵只在冬季运行时,土壤温度在1年内出现一次下降和一次回升,比两季运行时下降幅度大;当地源热泵只在夏季运行时,1年内土壤温度一直处于升高的状态,出现两个不同的升高幅度。由此可知,地源热泵冬夏两季运行时,冬季的取热和夏季的排热可以进行互补,使得土壤温度变化更接近初始温度,减小冷堆积现象,更利于地源热泵的长期运行。

参考文献

[1] 于玮. 基于建筑负荷动态模拟的埋管换热器设计及参数分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2008.

(YU Wei. Ground heat exchanger design and parametric analysis based on the simulation of dynamic building load [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2008. )

[2] 严福城. 土壤源热泵热水系统换热器周围土壤温度场研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

(YAN Fucheng. The research of the ground temperature field around the heat exchanger in ground-coupled source heat pump hot water system [D]. Changsha: Hunan University, 2012. )

[3] LI Shuhong, YANG Weihua, ZHANG Xiaosong. Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system[J]. Applied thermal engineering, 2009, 29( 17/18 ): 3679 – 3686.

- [4] 任艳. 中埋双U管地源热泵系统运行特性的分析与实验研究[D]. 北京:北京工业大学,2010.  
(REN Yan. Performance characteristic analysis and experimental study of moderate-buried double-U tube ground-source heat pump system[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2010.)
- [5] 张晓明,吴建坤,魏凌敏. 垂直U型管换热器土壤温度场的数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(1):111-114.  
(ZHANG Xiaoming, WU Jiankun, WEI Lingmin. Numerical simulation on soil temperature field around vertical U-Tube heat exchangers[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2011,27(1):111-114.)
- [6] 姜振涛. 单U型垂直直埋管换热器放热器土壤温度场的试验研究及数值分析[D]. 太原:太原理工大学,2012.  
(JIANG Zhentao. Experimental research and numerical analysis on soil temperature field of single U-tube heat exchanger vertically buried in heat period[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2012.)
- [7] 宋伟. 单井循环地下换热系统地下水流动及其传热特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.  
(SONG Wei. Research on groundwater and heat transfer characteristics of single well cycling ground heat exchanger system[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2014.)
- [8] 张坤. 地下水渗流对管束式地埋管换热器的影响[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2010.  
(ZHANG Kun. Heat exchanger effects of the underground tube bundle by groundwater seepage[D]. Shenyang:Shenyang Jianzhu University,2010.)
- [9] 刘东林. 水-热耦合作用下地埋管换热特性研究[D]. 北京:中国地质大学,2011.  
(LIU Donglin. A study of the characteristics of ground heat exchanger under the coupled heat conduction and groundwater advection conditions[D]. Beijing:China University of Geosciences,2011.)
- [10] 梁艳艳. 地源热泵管群换热器的三维数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.  
(LIANG Yanyan. Three-dimensional numerical simulation of heat pump tube heat exchanger[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2011.)
- [11] 吴辉. 低碳经济环境下的新能源技术发展研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.  
(WU Hui. Research on the new energy technology development in low carbon economy environment[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2012.)
- [12] 鲍建镇. 地埋管换热器三维非稳态传热数值模拟[D]. 重庆:重庆大学,2011.  
(BAO Jianzhen. Numerical simulation of three dimensional unsteady heat transfer of the ground heat exchanger [D]. Chongqing:Chongqing University,2011.)
- [13] 王鹏轩. 严寒地区土壤源热泵系统热平衡问题分析[D]. 长春:吉林建筑大学,2014.  
(WANG Pengxuan. Analysis of ground-coupled heat pump thermal equilibrium in the severe cold regions [D]. Changchun:Jilin Jianzhu University,2014.)
- [14] 杨鹏. 基于TRNSYS地源热泵系统模型的建立与应用[D]. 邯郸:河北工程大学,2012.  
(YANG Peng. Based on TRNSYS software building ground source heat pump system model and application[D]. Handan:Hebei University of Engineering,2012.)
- [15] 高艺珂. 土壤源热泵埋管换热器热性能模拟及实验研究[D]. 北京:北京建筑大学,2014.  
(GAO Yike. Simulation and experiment on thermal performance of ground coupled heat exchanger[D]. Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2014.)
- [16] 王琪. 寒冷地区太阳能土壤源热泵供热供冷及经济性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.  
(WANG Qi. Heating, cooling and economy analysis of solar-ground coupled heat pump system in cold regions[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2012.)
- [17] 何海龙. 动态负荷下混合式土壤源热泵的模拟研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2011.  
(HE Hailong. Simulation research of hybrid ground-source heat pump based on the dynamic load [D]. Qingdao:Qingdao University of Technology,2011.)
- [18] 杨志昆. 地埋管地源热泵换热器的热响应测试与数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.  
(YANG Zhikun. Thermal response test and numerical simulation of vertical heat exchanger of ground source heat pump [D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2011.)
- [19] 陈敏. 地埋管地源热泵系统的设计参数耦合分析研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.  
(CHEN Min. Coupled analysis and research of design parameters for the ground source heat pump systems[D]. Changsha:Hunan University,2014.)
- [20] YANG Wei, ZHOU Jin, XU Wei, et al. Current status of ground-source heat pumps in China[J]. Energy policy,2010,38(1):323-332.