

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.007

# 湖南地区土壤源热泵制冷运行特性的实验研究

李鹏辉, 刘泽华

(南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**以南华大学土壤源热泵系统为研究对象,对夏季制冷运行特性进行实验研究。测得了热泵运行前土壤原始温度分布,测试了热泵机组连续和间隙运行时,管壁处土壤温度变化情况,埋管侧进出口水温的变化情况以及埋管换热器的换热情况。研究表明:土壤原始温度为 $19.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与连续运行相比,间隙运行下管壁处土壤温度降低了 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,埋管侧进出口水温分别降低了 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,单位管长深换热量提高了25%。

**关键词:**土壤源热泵; 制冷工况; 换热特性; 实验研究

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)05-0030-03

## Experimental Study on Cooling Operation Characteristics of Soil Source Heat Pump in Hunan

Li Penghui, Liu Zehua

(School of Urban Construction, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

**Abstract:** With the soil source heat pump system of Nanhua University as an example, investigated the operating characteristics of cooling conditions in summer. Measured the initial soil temperature distribution before heat pump operating, and tested respectively the soil temperature changed, the inlet and outlet water temperature in the underground exchanger and the heat transfer capacity under continuous and intermittent cooling operation. The results indicated that under the intermittent operation at the soil initial temperature of  $19.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the soil temperature was increased by  $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , inlet and outlet water temperature were increased by  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the unit well depth change heat increased by 25%, respectively, when compared with continuous operation.

**Keywords:** soil source heat pump; refrigeration conditions; heat transfer characteristics; experimental study

## 0 引言

土壤源热泵因具有节能、环保、高效等优点而被广泛应用<sup>[1-4]</sup>。近年来,国内外学者对土壤源热泵运行特性进行了一些相关的研究,如Omer Ozyurt等人<sup>[5]</sup>通过对土耳其一土壤源热泵运行性能进行实验研究,测得了机组冷凝器出水温度基本能保持所期

望的值 $42\sim 48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,同时计算了热泵机组和整个系统的能效比(coefficient of performance, COP)分别为 $2.43\sim 3.55$ 和 $2.07\sim 3.04$ 。Arif Hepbasli等人<sup>[6]</sup>通过对地源热泵的运行情况进行实验,测试了埋管侧进出口水温,并提出了一个最佳循环介质流量的结论。毕月虹等人<sup>[7-8]</sup>对地源热泵系统的运行性能及地下温度场分布情况进行研究,结果表明,与水平埋管热泵系

收稿日期: 2012-08-07

作者简介: 李鹏辉(1985-),男,湖南娄底人,南华大学硕士生,主要研究方向为热泵节能及工程应用,

E-mail: lipenghui08@126.com

统相比,垂直双螺旋埋管热泵系统的性能系数提高了21%。郑红旗等人<sup>[9]</sup>对外径为25 mm和32 mm的单U形与双U形埋管换热器换热性能进行了研究,结果表明,工程应用中,在地埋管用地面积充足时,建议选用外径25 mm的单U形埋管换热器。由于不同的地区气候和地质条件有较大差异,因此,对适合推广这项技术的湖南地区进行相关的实验研究是必要的。

本文在借助南华大学建立的土壤源热泵实验平台,分析热泵不同运行工况下管壁处土壤温度变化情况,探讨热泵不同运行工况下埋管侧进出口水温的变化规律,计算不同运行工况下单位井深换热量,同时也为相邻地区土壤源热泵的应用提供基础数据。

## 1 实验系统简介

南华大学的实验系统是一套完整的土壤源热泵系统,主要包括室外埋管换热器、热泵主机、风机盘管,实验系统见图1。室外地下埋管系统有3口井,钻孔直径为150 mm,井间间距为3 m,井深为30 m,埋管换热器以水为循环介质,采用导热性能较好的PPR管U型埋管换热器,直径为25 mm。在井内10 m,15 m,20 m,25 m和30 m深处分别安装1个PT100热电阻,用来测量井内土壤温度的变化。回填料采用性能较好的碎沙,以减少埋管和回填料之间的接触热阻。在埋管侧安装一水泵,通过阀门调节水的流量。

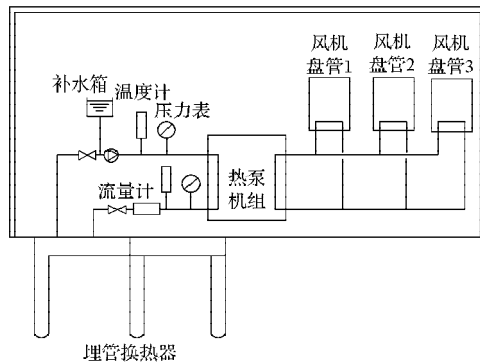


图1 实验系统示意图

Fig. 1 The diagram of experimental system

在整个实验过程中,使用的仪表设备主要有:速度式水表(威胜集团生产,计量等级精度为B级),循环水泵(浙江浪奇泵业有限公司生产,最大流量50 L/min,最大扬程14 m,转速为2 900 r/min),金属套温度计(常州市瑞明仪表厂生产,精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),压力表(红旗仪表有限公司生产,压力传感器精度等级0.1),热电偶(正龙电热器厂生产)。地面上采用的传感器是PT100热电阻,温度传感器测量精度等级为0.5。所有温度传感器在安装前均进行了标定。热

泵机组型号为KR/W-05S,额定制冷量为11.6 kW,制冷额定输入功率为3.6 kW,工质为R22。

## 2 数据处理

埋管换热器进出口水温通过金属套温度计测量,埋管内循环介质体积流量通过速度式水表测量。实验期间采集埋管换热器进出口水温及土壤温度,待热泵机组基本达到稳定时,记录埋管内循环介质体积流量。根据埋管侧冷却水温差法可以计算出地下埋管换热量,计算公式如下所示。

地下埋管换热量

$$Q = \rho c_p v (t_{in} - t_{out}), \quad (1)$$

式中:  $Q$  为埋管换热器换热量, kW;

$\rho$  为循环介质密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$c_p$  为循环介质比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

$v$  为循环介质体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$t_{in}$  为埋管换热器进口水温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{out}$  为埋管换热器出口水温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

单位管长换热量

$$q = Q \times 1000/l, \quad (2)$$

式中:  $q$  为单位管长换热量,  $\text{W}/\text{m}$ ;

$l$  为埋管深度,  $\text{m}$ 。

## 3 结果分析

### 3.1 实验前土壤温度的变化

为了解地下土壤温度的变化情况,对地下15 m深处的土壤温度进行实测,测试日期为2012-07-09,实验前15 m深处土壤温度变化规律如图2所示。

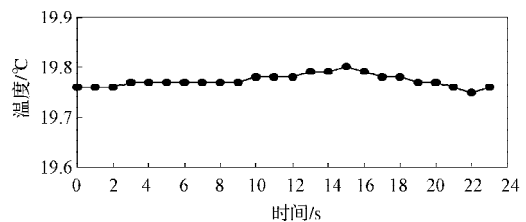


图2 地下15 m处土壤初始温度变化规律

Fig. 2 The soil initial temperature change at 15 m underground

通过分析测试数据可知,湖南夏季地下15 m深处土壤温度基本保持一致,平均温度为 $19.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可作为良好冷源。

### 3.2 不同运行工况下管壁处土壤温度的变化

为测试连续运行工况和间隙运行工况下15 m深管壁处土壤温度的变化情况,采用启停时间比为8:16,让热泵机组间隙运行48 h,待土壤温度恢复后,再让热泵机组连续运行48 h。15 m深管壁处土壤温度,测

试结果如图3所示。

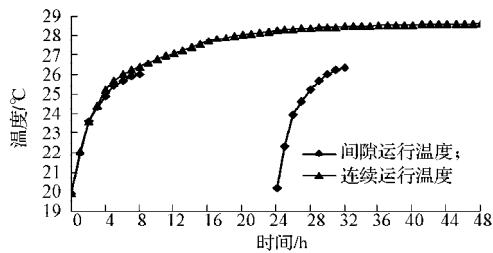


图3 连续/间隙工况下管壁处土壤温度随时间的变化

Fig. 3 Soil temperature around tube change with time in continuous/discontinuous operation

从图可看出,不论是连续运行工况,还是间隙运行工况,管壁处土壤温度都是在热泵机组启动后前段时间内上升的较快,随后变慢。例如:在第1个小时内,管壁处土壤温度上升了 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而在第8个小时内,基本上达到平稳,管壁处土壤温度只上升了 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是因为土壤向埋管换热器的传热率小于埋管内循环介质向热泵机组的传热率。由图还可看出,与连续运行工况相比,间隙运行工况下的管壁处温度较低,间隙运行工况下土壤温度有较好的恢复,在第2天基本能恢复到初始温度,这使得埋管换热器的换热量有较好的保证。因此,适当的间隙时间能为热泵提供良好的运行环境。

### 3.3 不同运行工况下埋管侧进出口水温的变化

测试的时间和方法与3.2节相同,图4为连续运行工况和间隙运行工况下埋管侧进出口水温的变化规律。

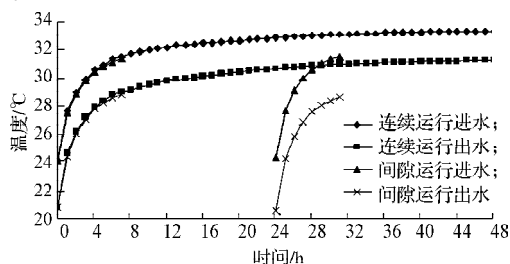


图4 连续/间隙工况下埋管侧进出口水温随时间的变化

Fig. 4 The inlet and outlet water temperature for buried tube side change with time in continuous/discontinuous operation

从图可看出,在这2种运行工况下,埋管侧进出口水温随热泵运行时间的增加而增加,在热泵启动前阶段,进出口水温增加幅度较大,随之幅度平缓。这是因为在启动的前几个小时内,进口循环介质与埋管换热器周围土壤之间温差较大,随着运行时间的增加,这种温差逐渐减小,最后达到稳定。连续运行工况下,埋管侧进出口水温分别为 $24.1\sim 33.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $20.8\sim 31.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温差为 $2.1\sim 3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;间隙运行工况下,埋管侧进出口水温分别为 $24.1\sim 31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $20.8\sim 28.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温差为 $2.7\sim 3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比2种运行工况可知,与连续运

行工况相比,间隙运行工况下埋管侧进出口水温有所提高,温差也有所提高。由此可见,采用间隙运行,提高了进出口水温,有利于热泵机组效率的提高,同时温差的增加,提高了埋管换热器的换热量。对比二次间隙运行可以发现,每次运行时埋管侧进出口水温基本上保持一致,这说明了地下土壤温度得到了较好的恢复。

### 3.4 不同运行工况下单位管长换热量的变化

通过式(1)和(2)可计算出单位管长换热量,图5为连续运行工况和间隙运行工况下,单位管长换热量随时间的变化情况。

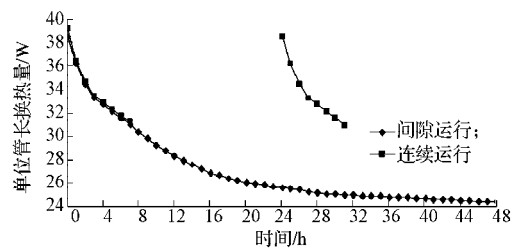


图5 连续/间隙工况下单位管长换热量随时间的变化

Fig. 5 Heat transfer per unit well length change with time in continuous/discontinuous operation

从图可以看出,2种运行工况下,单位管长换热量随热泵运行时间的增加而减少,在热泵运行初始阶段降低幅度较大,随之变得平缓。连续运行工况下,单位管长换热量从 $38.5\text{ W}$ 降至 $24.3\text{ W}$ ,降幅为 $14.2\text{ W}$ ,平均单位管长换热量为 $27\text{ W}$ ;间隙运行工况下,单位管长换热量从 $39.2\text{ W}$ 降至 $31.2\text{ W}$ ,降幅为 $8\text{ W}$ ,平均单位管长换热量为 $33.8\text{ W}$ 。对比2种运行工况可知,采用间隙运行时单位管长换热量较连续运行时有所提高,提高约25%。

## 4 结论

1) 地下深度 $15\text{ m}$ 处土壤温度不受外界环境影响,基本上保持平稳,平均温度为 $19.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,能为热泵运行提供良好的冷源。

2) 连续工况运行和间隙工况运行下,管壁处土壤温度、埋管侧进出口水温随热泵运行时间增加而增加,单位管长换热量随热泵运行时间增加而减少。

3) 通过连续工况和间隙工况运行对比实验发现,间隙工况运行下,管壁处土壤温度降低了 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,埋管侧进出口水温分别降低了 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,单位管长换热量提高了25%。

4) 采用间隙运行,地下管壁处土壤温度能较好得到恢复,有利于提高埋管换热器的换热量,因此在实际应用中应优先考虑间隙运行方式。

(下转第45页)