

文章编号:1673-9469(2008)01-0063-05

蓄热技术在太阳能-地源热泵中的应用及模拟

王侃宏¹,谷铁柱¹,桂林平²,王丽辉¹

(1.河北工程大学 城建学院,河北 邯郸 056038;2.西北综合勘探设计研究院,陕西 西安 710003)

摘要:从太阳能-地源热泵系统中蓄热技术的运行方式入手,通过对太阳能显热蓄热过程的模拟,指出了邯郸地区的太阳能-地源热泵采用无相变蓄热技术时,存在的问题和解决方法。同时,对相变蓄热技术在太阳能-地源热泵应用进行了探讨,并对蓄热体的蓄热过程进行了模拟与分析,结果表明:蓄热材料发生相变的时间与蓄热体半径密切相关,在实际应用时可以通过改变后者来控制前者;离外边界越远,相邻点温差越小;由于相变边界点一直低于流体温度,这将导致在8h内具有热流的存在,从而可延缓水温升高速度。

关键词:太阳能;地源热泵;蓄热;相变材料

中图分类号: TU831

文献标识码: A

Application of heat storage in solar-assisted ground-source heat pump system and numerical simulation

WANG Kan-hong¹, GU Tie-zhu¹, GUI Lin-ping², WANG Li-hui¹

(1. College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an 710003, China)

Abstract: The operation way of the experimental system was obtained by according to simulating the sensible heat storage of solar energy. The way to solving problem existing was pointed out when SAGSHPs have no heat storage of PCM. The application of heat storage of PCM in SAGSHPs was introduced and the procedure of heat storage of the heat storage body was simulated. The conclusion is that the time of phase change is in touch with the radius of the heat storage body, so it can be controlled later. More farther from outside, more lower the temperature difference of the point is. Because the temperature of the point outside of PCM is lower than fluent, this can produce heat flow within 8 hours, these can postpone the velocity of the temperature elevating.

Key words: solar energy; ground-source heat pump; heat storage; PCM

地源热泵技术是以地下浅层土壤为热源,利用地下土壤相对稳定的特性,通过消耗电能对建筑物进行空气调节的技术。建筑的冷热负荷与地区的气候、房间围护结构的热工性能、空调房间的室内扰动有关。在北方地区可能出现建筑的热负荷远大于冷负荷,冬季热泵机组向地下埋管的吸热量大于夏季向地下的排热量,如果按冬季工况必然增加投资,使地下温度场冬夏季不均衡,如果减少埋管数量,使埋管承担的负荷加大,冬季必然导致土壤温度下降过快,从而使蒸发温度迅速

下降,使机组保护频繁停机^[1]。所以,在此种情况下,使单一的土壤源热泵系统受到限制,太阳能作为一种清洁能源,其利用的潜力巨大。太阳能集热器和埋入土壤的盘管组合,其设想是 Penrod 于 1956 年首次提出^[2],但由于太阳能的能流密度低、受天气影响具有不稳定的特点,以及在冬季工况太阳能集热器的效率较低,阻碍了太阳能-土壤源热泵的发展。从最近的国内外的文献看,土耳其太阳能研究所的 Onder Ozgener 对太阳能辅助地源热泵用于温室供热系统的研究,从 2003 年 12 月

收稿日期:2007-11-22

基金项目:河北省科技攻关资助项目(06276903D-2,07276712D-2)

作者简介:王侃宏(1966-),男,陕西眉县人,博士,教授,从事暖通空调技术研究。

16日到2004年3月31日进行实验,结果表明COP从2.00到3.125变化,并指出采用分析法对研究此系统具有重要的意义^[3]。哈尔滨工业大学采用CaCl₂作为太阳蓄热的工质,进行了相关研究。结果表明,系统中蓄热水箱调节了集热器集热量与房间负荷在时间上的供需相位差,应用相变蓄热材料(PCM)大大提高了水箱的蓄热能力,同时提高了过渡季集热器的集热效率,使系统运行更加稳定^[4]。本文针对太阳能的不稳定性特点,通过蓄热技术在系统中的应用,分析其蓄热材料蓄热过程,以便更有效的利用太阳能。

1 太阳能-土壤源热泵系统及运行方式介绍

1.1 系统简介

河北工程大学城市建设学院实验楼太阳能-地源热泵实验系统,由五部分构成:地埋管换热系统、热泵机组、末端系统、太阳能辅助系统和数据采集系统。地埋管系统为单U型HDPE-100塑料管,埋管井两口,埋管直径为25mm和32mm,埋管深度为120m,另设测试井三口,井深90m,两口埋管井间距5.0m,热泵机组压缩机为涡旋压缩机,冷凝器蒸发器为板式换热器,采用热力膨胀阀,热泵工质为R134a;太阳能系统包括集热器、贮热装置、循环水泵、板式换热器,具体连接见图1。夏季,热泵机组蒸发器侧提供冷水供风机盘管,冷凝器排热通过水管路到地下换热器;冬季通过阀门转换,使蒸发器与地埋管连接,冷凝器与风机盘管连接,提取浅层土壤实现冬季供暖。对于太阳能系统与地埋管系统的连接形式有两种:(1)直接连接:即采用两个系统直接串联或并联;(2)间接连接:即两系统采用换热器进行连接。两种方式各有优缺点,考虑到直接连接能量损失较小,但水力工况不太稳定;间接连接虽存在不可逆损失,但水力工况较为稳定。所以,本系统通过板式交换器与地源热泵的地埋管进水间接连接。

1.2 运行方式

由于太阳存在间歇性与不稳定性,同时太阳辐射的作用也会减少建筑的负荷,因此当太阳辐射较强时,室内的负荷反而较小,因此热泵系统与房间的负荷有个匹配问题。本文采用如下运行方式:晴天白天,埋管井1、2通过热泵机组的蒸发器的吸热,满足供暖要求,同时太阳对蓄热装置进行

蓄热;夜晚蓄热装置通过板式换热器满足夜晚负荷的同时,对地下温度场有相应的恢复作用。

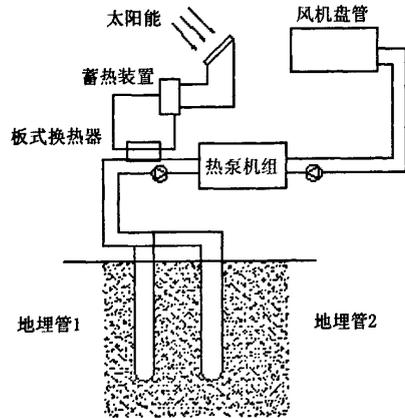


图1 太阳能地源热泵系统图

Fig.1 Solar-assisted ground-source heat pump system

表1 运行方式表

Tab.1 The table about the operation way

时间分类	埋管井1	埋管井2	蓄热装置吸热	蓄热装置放热
晴天白天	▲	▲	▲	
晴天夜晚	▲	▲		▲
阴天	▲	▲		

2 蓄热方式的比较

2.1 显热存储

对于太阳能系统,水在集热器中被太阳能加热后泵入水箱,当需要使用存储热量时,水泵将水箱内热水泵入负荷,放出热量后返回水箱。如果水在水箱内充分混合,即水箱内水温是均匀一致的,则热分析要简单得多。对于白天蓄热晚上使用的系统,以水箱为开口体系,水的热焓增量等于集热器传给水箱的热量减去热损失^[5]。

$$(mc_p) \frac{dT_i}{dt} = (m'c_p)(T_{C,0} - T_i) - UA_s(T_i - T_a) \quad (1)$$

式中 m - 水箱的水量, Kg; c_p - 水的定压比热 J/kg·°C; m' - 集热器水的流量, kg/s; $T_{C,0}$ - 水箱的进水温度, °C; T_i - 水箱的温度, °C; T_a - 环境温度, °C; U - 水箱的热损系数 W/m·K; A - 水箱的表面积 m²。

集热器的效率为在稳态(或准稳态)条件下,集热器传热工质在规定时段内输出的能量与规定的集热器面积和同一时段内入射在集热器上的太

阳辐射照量的乘积之比,即

$$\eta = \frac{Q_U}{AI} \quad (2)$$

式中 Q_U - 有用能量, W; A - 集热器面积; I - 太阳辐射照量。

对于给定集热器的效率可以按如下公式^[6]:

$$\eta = 0.614 - 2.06 \left(\frac{T_i - T_a}{I} \right) \quad (3)$$

式中 T_i - 环境温度, °C; T_a - 集热器进水温度, °C。忽略管道热损失, 则太阳能的有效集热量应等于水箱的进出口的能量之差, 即

$$IA\eta = (m'c_p)(T_{G,0} - T_i) \quad (4)$$

整理如上方程, 得

$$(mc_p)_s \frac{dT_s}{dt} = IA_e \left(0.614 - 2.06 \left(\frac{T_s - T_a}{I} \right) \right) - UA_s(T_s - T_a) \quad (5)$$

化简得

$$\frac{dT_s}{dt} + \frac{2.06A_e + A_sU}{(mc_p)_s} T_s = \frac{0.614IA_e}{(mc_p)_s} + \frac{2.06A_eT_a + UA_sT_a}{(mc_p)_s} \quad (6)$$

对于太阳能的总辐射度按文献^[7]提供的方法进行计算, 并得出供暖期间最小日平均辐射强度作为分析工况, 并采用最小二乘法拟合成从 8:00 变化到下午 4:00 的随时间变化的曲线方程为 $I = 128.8 + 7.9047 \times 10^{-2} \tau - 2.7058 \times 10^{-6} \tau^2$ (7) 式中为 τ 从 8:00 起的时间, s。

各参数如下: 水箱分别取 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$, $0.8\text{m} \times 0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$, $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 正方体, 集热器有效采光面积为 4.46m^2 , 水的密度 $1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 水热容 $4.2 \times 10^3 \text{J/kg}^\circ\text{C}$, 水箱热损失系数 $2.0 \text{W/m}^2 \text{K}$ 。水箱初始温度为 16°C , 室外温度按采暖日平均温度 -1°C 。对于方程(6)为一阶非齐次方程, 可以得出分析解, 但通用性较差, 因此本文采用数值解法, 通过计算机模拟可得到三条曲线, 见图 2。

水箱 1、2、3 的最终温度为 46.76°C , 29.61°C , 22.77°C , 其集热量为 27.9MJ 、 29.2MJ 、 28.4MJ , 可以看出随着时间的推移, 温度升高, 但幅度降低, 主要因为集热器的效率随水温的升高而降低; 水箱的温度变化随水箱中水的质量的增加温度变化缓慢, 集热量为先增大后减小, 主要受水箱的损失因素有关。对于显热蓄热辅助地源系统, 当采用白天蓄热晚上辅助的运行方式时, 为了减少板式换热器的不可逆损失, 应尽量减少水箱的温度, 而通过增加水箱体积的方式可以达到此目的, 但实

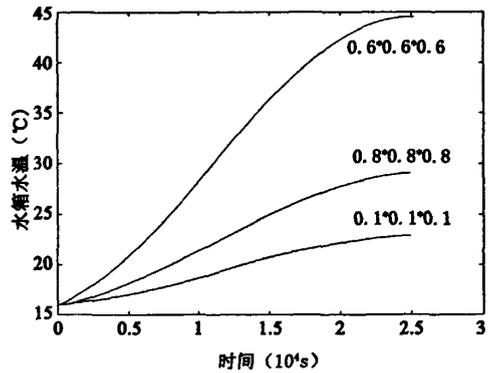


图 2 水箱的温度变化图

Fig. 2 The change of temperature of water tank

际工程中应考虑热损失的影响; 当对于大面积的太阳能集热建筑, 水箱体积可能受到建筑空间的限制, 因此可以采用相变蓄热技术, 认为在(5)式中增加了蓄热项 L , 即

$$(mc_p)_s \frac{dT_s}{dt} = IA_e \left(0.614 - 2.06 \left(\frac{T_s - T_a}{I} \right) \right) - UA_s(T_s - T_a) - L \quad (8)$$

2.2 相变存储

1) 相变材料的选择。对于蓄热方式, 常用的有两种: 较多采用相变材料封装在容器中构成蓄热体; 采用定形相变材料作为蓄热体。对于蓄热介质选择, 在实际应用中很重要是相变温度合适, 相变潜热高和价格便宜, 对于过冷与腐蚀也应给以足够的重视^[5]。通过对产品进行的调研, 20号石蜡具有较好的相变温度, 因此采用此物质作为本实验系统太阳蓄热的工质。综合考虑如上因素, 本实验系统采用如下方案: 用塑料桶隔离水与蓄热材料, 把塑料桶放于蓄热槽中, 如图 3 所示。

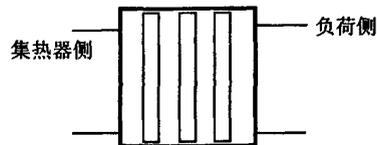


图 3 蓄热槽

Fig. 3 Heat storage installment

2) 蓄热体数学模型。为了分析方便做如下假设:

- (1) 相变介质固、液相比热与固、液相导热系数不随温度发生改变。
- (2) PCM 固、液相密度相同并为常数。
- (3) 蓄热体周围水温度视为同一值。

(4)相变介质中热量传递以导热为主,忽略自然对流的影响。(5)忽略蓄热体封装材料对传热的影响。(6)蓄热体 PCM 的热流为只延半径方向。

目前数值解法求解蓄热问题的数学模型主要有:热容法、和焓法,本文采用热容法进行求解。导热微分方程为^[8]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (9)$$

$$T_p|_{t=0} = T_0 \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial T_p}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (11)$$

$$-\lambda p \left. \frac{\partial T_p}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T_p|_{r=R} - T_f) \quad (12)$$

热容法是把相变导热问题看作比热随温度改变的变物性问题,其热容和导热系数与温度的关

系为

$$c = c_s, T \leq T_m - \epsilon$$

$$H_m / (2\epsilon), T_m - \epsilon \leq T \leq T_m + \epsilon$$

$$c_l, T \geq T_m + \epsilon \quad (13)$$

假设导热系数变化在相变区间为线型,则

$$\lambda = \lambda_s, T \leq T_m - \Delta T$$

$$\lambda_s + (T - T_m + \epsilon) \cdot (\lambda_l - \lambda_s) / (2\epsilon), T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T$$

$$\lambda_l, T \geq T_m + \Delta T \quad (14)$$

各项参数:相变温度 $20 \pm 2.5^\circ\text{C}$;蓄热体初始温度 16°C ;固态导热系数 $1.57\text{W/m}\cdot\text{K}$;液态导热系数 $0.45\text{W/m}\cdot\text{K}$;液体热容 $3.14\text{KJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$;固体热容 $1.84\text{KJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$;相变潜热 $L = 140\text{KJ/Kg}$;密度 800kg/m^3 ;水箱长 1m 、宽 1m 、高 1m ;蓄热体半径 0.2

表 2 各点温度变化图

Tab.2 The change of temperature of point

时间(h)	网 格 点								
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1	16.01	16.02	16.03	16.07	16.17	16.38	16.82	17.53	19.62
2	16.30	16.33	16.42	16.59	16.84	17.16	17.51	18.13	21.09
3	16.80	16.83	16.91	17.05	17.23	17.44	17.67	18.65	21.43
4	17.18	17.19	17.25	17.33	17.43	17.54	17.89	19.03	21.57
5	17.39	17.40	17.43	17.47	17.51	17.63	18.11	19.33	21.66
6	17.48	17.49	17.49	17.50	17.55	17.74	18.30	19.56	21.73
7	17.50	17.50	17.50	17.52	17.60	17.85	18.49	19.75	21.78
8	17.50	17.50	17.51	17.54	17.66	17.97	18.65	19.91	21.83

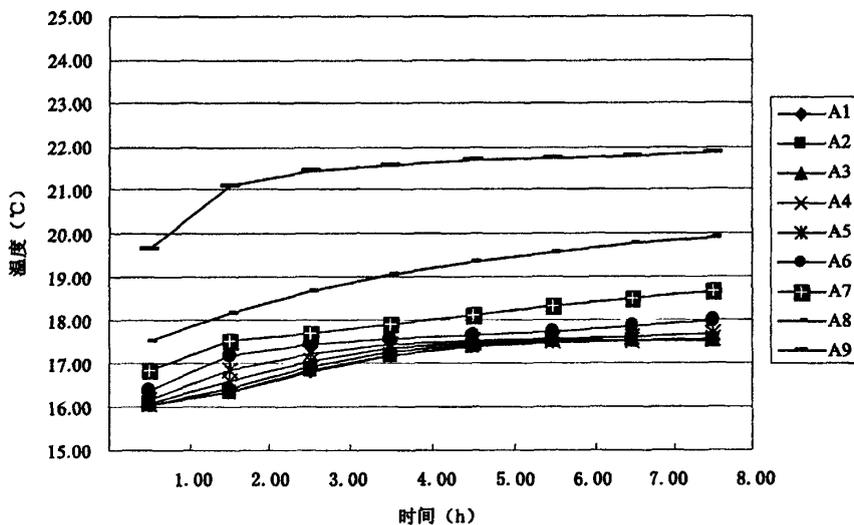


图4 各点温度变化曲线

Fig.4 Curve of change of temperature of point

m;可以计算出周围水的体积为 0.5m^3 ,由于周围流体温度受太阳能及蓄热量影响,模型较为复杂,因此本文假设周围流体的平均温度为 25°C 做数值实验。

由于为一维模型,从圆柱蓄热体轴线到半径处划分为8份,共9个点,并从内向外编号为A1、A2、……A9。

3)模拟结果。本实验系统的蓄热材料熔点为 $20 \pm 2.5^\circ\text{C}$,可以通过温度来判断相变界面的移动,从表2、图4中,可以分析出此模型在大约6h后相变界面传入到中线点A1;离流体越近,发生相变的时间越早;如果想较早使蓄热材料发生相变可以通过减少蓄热体半径加以解决;各点在外界流体的传热下,温度不断升高;离边界点A9越远,相邻点温差越小;此蓄热体的体积为 0.5m^3 ,而周围水的体积为 0.5m^3 ,相当于在 0.5m^3 的流体边界创造了延缓其升高的蓄热体,由于流体的边界点A9在8h内一直具有热流L的存在,从而推迟了水温的升高速度。

3 结论及展望

1)显热存储应与地埋管温度相匹配,在保证负荷要求的前提下,应尽量降低水箱的温度来减少不可逆损失,提高集热器效率。

2)当通过增加水箱体积来延缓水的温度升高时,存在随水箱体积增大而集热量减少的问题。

3)相变蓄热可以作为太阳能蓄热来辅助地源热泵的低位热源,与显热蓄热相比,可延缓水温的升高速度。

4)相变蓄热和太阳能的耦合问题,还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王侃宏,毕文峰,乔华,等. 太阳能辅助加热土壤源热泵系统理论分析[J]. 河北建筑科技学院学报, 2005, 22(1):10-14.
- [2] PENROND E B, PRASANNA K V. Design of a flat - plate collector for a solar earth heat pump[J]. Solar Energy, 1962, 6(1):9-22.
- [3] ONDER OZGENER, ARIF HEPBASLI. A review on the energy and exergy analysis of solar assisted heat pump systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, (11):482-496.
- [4] 韩宗伟,郑茂余,刘威,等. 严寒地区太阳能-土壤源热泵相变蓄热供暖系统[J]. 太阳能学报, 2006, (12):1214-1218.
- [5] 崔海亭,杨锋. 蓄热技术及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [6] 张鹤飞,俞金婧. 太阳能热利用原理与计算机模拟[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1990.
- [7] 陈卫星. 双热源太阳能热泵模式研究[D]. 南京:南京理工大学, 2004.
- [8] 王昊. 采用新型相变材料蓄热槽蓄放热特性数值计算方法探讨[D]. 北京:北京工业大学, 2003.

(责任编辑 闫纯有)

(上接第37页)

4 结束语

顶板次生离层水尽管是一种少见的水害形式,但因其发生突然,危害很大。在水文地质和工程地质条件分析的前提下,相似材料模拟、数值模拟和冲击水压试验是确定灾害源成因的有效方法。针对离层水的成因,采取了防治方法,使得此类水害在本矿类似的水文地质和工程地质条件下开采的其他工作面没有再发生顶板水害事故。这一问题的研究成果已被应用于顶板为巨厚砂岩的杨庄煤矿,取得了较好效果,因此该成果对全国类似条件的煤矿业具有推广价值。

参考文献:

- [1] 王经明,马茂盛,王勇. 沙下大采高采煤导水裂隙带高度的确定[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(1): 45-48.
- [2] 煤炭科学研究总院北京开采研究所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1981.
- [3] 杨本水,王从书,阎昌银. 中等含水层下留设防沙煤柱开采的试验与研究[J]. 煤炭学报, 2002(4): 34-37.
- [4] 孟凡龙. “两硬”大采高工作面顶板控制设计技术[J]. 煤炭工程, 2007, (9): 7-9.
- [5] 王金华. 我国高效综采成套技术的发展与现状[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(1): 5-8.

(责任编辑 刘存英)

蓄热技术在太阳能-地源热泵中的应用及模拟

作者: [王侃宏](#), [谷铁柱](#), [桂林平](#), [王丽辉](#), [WANG Kan-hong](#), [GU Tie-zhu](#), [GUI Lin-ping](#),
[WANG Li-hui](#)

作者单位: [王侃宏, 谷铁柱, 王丽辉, WANG Kan-hong, GU Tie-zhu, WANG Li-hui \(河北工程大学, 城建学院, 河北, 邯郸, 056038\)](#), [桂林平, GUI Lin-ping \(西北综合勘探设计研究院, 陕西, 西安, 710003\)](#)

刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2008, 25(1)

参考文献(8条)

1. [王侃宏; 毕文峰; 乔华](#) [太阳能辅助加热土壤源热泵系统理论分析](#) [期刊论文]-[河北建筑科技学院学报](#) 2005(01)
2. [PENROND E B; PRASANNA K V](#) [Design of a flat-plate collector for a solar earth heat pump](#) 1962(01)
3. [ONDER OZGENER; ARIF HEPBASLI](#) [A review on the enegy and exergy analysis if solar assisted heat pump systems](#) [外文期刊] 2007(11)
4. [韩宗伟; 郑茂余; 刘威](#) [严寒地区太阳能-土壤源热泵相变蓄热供暖系统](#) [期刊论文]-[太阳能学报](#) 2006(12)
5. [崔海亭; 杨锋](#) [蓄热技术及其应用](#) 2004
6. [张鹤飞; 俞金嫡](#) [太阳能热利用原理与计算机模拟](#) 1990
7. [陈卫星](#) [双热源太阳能热泵模式研究](#) [学位论文] 2004
8. [王昊](#) [采用新型相变材料蓄热槽蓄放热特性数值计算方法探讨](#) [学位论文] 2003

本文读者也读过(8条)

1. [李爱彦; 荣文涛; 范思波; LI Ai-yan; RONG Wen-tao; FAN Si-bo](#) [太阳能-地源热泵应用探讨](#) [期刊论文]-[工程建设与设计](#) 2005(12)
2. [张莉; 施志钢; 胡松涛; 王刚](#) [太阳能-地源热泵空调系统特性分析及运行方式探讨](#) [期刊论文]-[建筑科学](#) 2004, 20(z1)
3. [优化太阳能和水蓄热技术用于生活热水的研究](#) [期刊论文]-[给水排水](#) 2005, 31(10)
4. [王侃宏; 李永; 侯立泉; 王宏伟; Wang Kanhong; Li Yong; Hou Liqun; Wang Hongwei](#) [太阳能-土壤复合式地源热泵供暖的实验研究](#) [期刊论文]-[暖通空调](#) 2008, 38(2)
5. [刘飞; 张栋梁; LIU Fei; ZHANG Dong-liang](#) [太阳能-地源热泵组合空调/热水系统简介](#) [期刊论文]-[桂林航天工业高等专科学校学报](#) 2008, 13(1)
6. [陈云昊; 郑兵; Chen Yunhao; Zheng Bing](#) [埋管地源热泵-太阳能系统用于夏热冬冷地区居住建筑的若干考虑](#) [期刊论文]-[暖通空调](#) 2008, 38(6)
7. [张方方; 崔萍; 樊玉杰; 方肇洪](#) [太阳能与地源热泵结合的复合新能源系统](#) [会议论文]-2009
8. [李朝佳; 孙友宏; 吴晓寒; LI Zhao-jia; SUN You-hong; Wu Xiao-han](#) [太阳能辅助地源热泵联合供暖\(制冷\)运行模式分析](#) [期刊论文]-[能源工程](#) 2008(6)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200801017.aspx