

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.014

# 太阳能供暖系统室内地下储热水箱的散热规律

崔俊奎, 宋 检

(辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**针对太阳能地下储热水箱布置位置的不同,利用 Fluent 程序对太阳能储热水箱散热进行数值模拟和计算,得出在不同工况下,储热水箱周围土壤的温度场分布。同时,建立地下储热水箱的物理模型和数学模型,分析地下储热水箱的换热特性,并结合实际工程,验证其地下储热水箱全年散热量和储能量,获得水箱顶板损失量与总散热量关系。计算结果表明,在相同工况下,冬季室外储水箱能量的散失量远高于室内,室内地下储热水箱顶部散热量减少,因此该方法可以用来抵消这部分能量所需的集热器面积的减少,提高储热水箱的储热效率以及减少用户投资。

**关键词:**太阳能;地下储热水箱;散热;模拟

**中图分类号:**TK512.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S2-0056-04

## Study on Underground Hot Water Storage Tank Cooling of Solar Energy Heating System

Cui Junkui, Song Jian

(College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning Project Technology University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** In view of the different of the underground heat storage water tank of solar position arrangement, make use of the Fluent software program numerical simulation and calculation, it is concluded that under different conditions the heat storage water tank temperature field distribution of the soil around. At the same time, establishing physical model and mathematical model of underground heat storage water tank and combined with practical engineering, verify the underground storage tank for heat and energy storage, to obtain the relationship between the tank roof loss and total heat release. Calculation results show that under the same conditions, outdoor storage tank at the top of the heat dissipating capacity to reduce, so the method can be used to offset at the top of the energy required collector to reduce, so the method can be used to offset this part of the energy required collector area of the cut, improve thermal efficiency and reduce the user store hot water tank of the store.

**Key words:** solar energy; underground hot water storage tank; cooling; simulation

随着新能源的发展与利用,太阳能作为一种可再生绿色能源,且技术逐渐成熟,越来越受到人们的重视。特别是在发展社会主义新农村中,地域广成为农村发展太阳能供暖的有利条件,且重点在中国农村居民节能的炊事、热水和采暖上。在太阳能采暖系统中,太阳能集热器和土壤蓄热的结合有很大的优势,为了实现太阳能的合理高效利用,采用太阳能跨季节贮存技术成为必须。

其他国家已经对太阳能跨季节储存供热方式进行了多年的研究,并有工程项目上的应用<sup>[1-2]</sup>。在太阳能地下储热系统中,储热设备是实现太阳能热利用的重要组成部分。由于太阳能集热器的得热量有限,且由于冬季环境温度较低,储热水箱的散热一直是被重点考虑的问题,研究人员通过各种方式减少其散热量。中国已有学者对太阳能储热水箱的散热进行了一些理论模拟<sup>[3]</sup>;对于影响储热水箱保温效果的因素主要取决于保温材料的种类和厚度,得出不同的保温材料

和厚度的优化配置关系,从而可以减少储水箱的热量散失问题。基于前者的研究基础,针对太阳能供暖系统地下储水箱布置位置的不同,笔者对储热水箱全年运行工况下的散热量分布进行研究,并对储热设备的储热效率及经济可行性进行分析。

### 1 系统工作原理与模型

太阳能地下储热系统,利用水和土壤的显热储存能量<sup>[4]</sup>,在春、夏、秋季利用太阳能加热法把水箱中的水加热,水箱中的水又把周围土壤加热。当冬季地下水箱向房间提供热时,水箱内的水温会降低。当水箱内水温低于周围土壤温度时,土壤中的热量就会向水箱内的水中传导,返回到水中,再向房间供热,这样就实现了太阳能的连续利用,其中太阳能加热法是利用太阳能集热系统完成热能的采集和传输<sup>[5-6]</sup>。在该储热系统中,储热水箱和太阳能集热器之间由

收稿日期:2013-09-30

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目课题(2012BAA10B02)

作者简介:崔俊奎(1974-),男,副教授,博士,主要从事太阳能、地热能等新能源与可再生能源的规模化应用研究,(E-mail)cuijunkui@tju.edu.cn.

循环水泵来实现储热工质的循环过程。

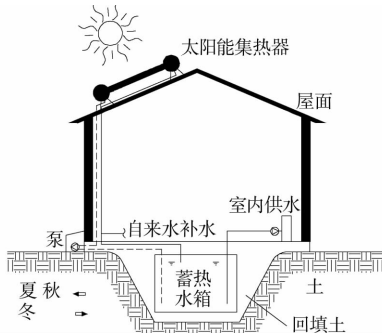


图 1 地下储热水箱储热的太阳能跨季节存储系统

### 1.1 模拟对象

针对北方某村镇住宅太阳能供暖系统的保温水箱进行模拟研究。由于该保温水箱置于室内地下土壤中,水箱的尺寸为  $\Phi 7\text{ m} \times 5\text{ m}$  圆柱体,水箱材质 Q235B 钢板。水箱周围填充聚氨酯作为保温层,厚度为 200 mm,最外层与土壤接触的地方填充防水材料。不同土壤的比热、密度、导热系数差异比较大<sup>[7]</sup>,此处回填土选择热扩散率和导热系数小的粘土,其吸收的热量能够很好的保持在水箱附近的土壤中,有利于热量长期(跨季节)利用。设农户住宅供暖面积  $100\text{ m}^2$ ,由于储水箱的容积与集热器面积、房屋面积有一定的优化匹配关系,选择的水箱的容积为  $192\text{ m}^3$ 。

### 1.2 储热水箱物理模型

在储热过程中,吸收了热量的储热介质通过重力作用下送进储热水箱。埋在地下的储热水箱的散热情况与保温材料、水箱形状、布置方式以及周围土壤的类型、土壤的含水率等因素相关。主要考虑室内储热水箱通过水箱壁的传热损失。通过分析储热水箱的散热情况来考察水箱的储热能力。为了便于理论分析,做以下假设:

- 1) 地下储热水箱内的水混合均匀,不产生分层现象。
- 2) 流体介质的热物理性质为常数。
- 3) 水箱周围土壤物性均匀一致,且当地气温冬季和夏季时分别保持不变。
- 4) 土壤的传热为纯导热,不考虑水分的热湿迁移。

根据上述假设条件,建立物理模型如下:

对于水箱内的水,考虑到自然对流。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

导热微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

保温层间、保温层和土壤间边界层均设置为热耦合边界层。周期性大地自然温度随深度和时间变化的关系式,距地表较浅处的土壤温度随季节变化的趋势较明显,当深度达到一定时,土壤温度保持在  $15^\circ\text{C}$  左右<sup>[8]</sup>。

### 1.3 储热水箱数学模型

地下储热水箱的热损失  $Q$  根据以下公式计算:

$$Q = \sum_i^3 Q_i \quad (4)$$

式中:每天向外的散热量  $Q_i = \frac{\lambda \times \Delta T \times A}{\delta} \times 3600 \times 24$ ;  $i$  分别代表地下储热水箱的顶盖、底板和侧壁, ( $i=1,2,3$ );  $A$  分别对应的水箱顶盖、底板、侧壁的散热面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta T$  为储热水箱的平均温差,  $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda$  为隔热材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\delta$  为隔热材料厚度,  $\text{mm}$ 。

### 1.4 储能分析

在工程中建筑物辐射采暖设计热负荷可以近似按下式计算:

$$Q_d = Q_F F (1 - n_{ch}) \Phi \quad (5)$$

式中:  $Q_d$  为全面辐射采暖的设计耗热量,  $\text{W}$ ;  $F$  为建筑物的采暖面积,  $\text{m}^2$ ;  $Q_F$  为住宅面积热指标  $\text{W}/\text{m}^2$ , 取  $30\text{ W}/\text{m}^2$ ;  $\Phi$  为修正系数, 取 0.85;  $n_{ch}$  为通过窗户传入室内的热量相当于采暖面积负荷的百分数, 取 20%。

通过式(5)计算可知,一个普通家庭按  $100\text{ m}^2$  建筑采暖面积,每天的总用热量为  $10\,078\text{ kJ}$ 。

1.4.1 储热水箱散热情况 对于太阳能集热系统、热水系统和采暖系统对工作温度要求是不同的:太阳能集热系统的工作温度越低,热效率越高,对于地板辐射散热系统来说,储水箱温度控制在  $40\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$  即能满足系统供热要求<sup>[9]</sup>,水箱温度取  $45\text{ }^\circ\text{C}$ 。假定冬季室外平均环境温度为  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ,室内温度为  $22\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[10]</sup>。

由于水箱外侧土壤的初始温度是  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ,经过一段时间的运行储热,随着水箱水温的提高,周围土壤的温度也跟着提高,当水温达到  $45\text{ }^\circ\text{C}$  时,保温层外侧的温度完全可能达到  $25\text{ }^\circ\text{C}$  甚至更高。这里按  $25\text{ }^\circ\text{C}$  计算。根据(4)式计算水箱各面的散热量,则可得表 1。

表 1 地下储热水箱散热情况

水箱所处位置	水箱部位	平均温差/ $^\circ\text{C}$	散热面积/ $\text{m}^2$	散热量/ $\text{kJ}$	总散热量/ $\text{kJ}$
室外	顶盖	55	38.5	1 726	
	底板	20	38.5	1 908	5 427
	侧壁	20	110	1 793	
室内	顶盖	23	38.5	722	
	底板	20	38.5	1 908	4 420
	侧壁	20	110	1 973	

由表 1 可见,水箱顶部室外散热量约为室内情况下的 2.4 倍左右,即使水箱不向房间供暖,水箱本身也要损失相应的热量。因为在长期的储存过程中,在设计集热器面积时必须考虑到热损失因素。也就是说在本实例中,冬季室外地下储热水箱每天需要  $15\text{ m}^2$  的太阳能集热器向储热系统供热,才能抵消水箱本身的的散热损失,而对于室内地下储热水箱来说,只需要  $12\text{ m}^2$  的太阳能集热器。集热器面积的减少,通过敏感性分析,对于太阳能地下储热采暖系统,集热器面积的减少进一步说明了在经济上的可行性和良好节能效果。

根据设备的热效率公式(见式(6)),可得到室外地下储热水箱的热效率为 46%,室内地下储热水箱的热效率为 56%,室内的系统效率高于室外,能量损失减少,储热水箱的储热

效率有了提高。

$$\eta = (1 - \frac{Q_s}{Q_c}) \times 100\% \quad (6)$$

式中： $Q_s$  为储热水箱的损失量，kJ； $Q_c$  为供给储热水箱热量，kJ。

1.4.2 储热水箱各部分损失量关系 计算数据显示，储水箱各部分间的损失率关系如下：

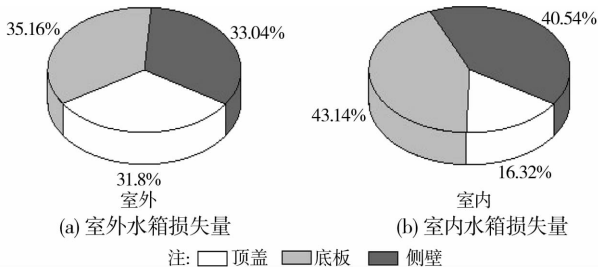


图 2 储水箱各部分散热损失关系

1.5 储热水箱周围土壤传热的数值模拟

1.5.1 几何模型 数值模拟在实际水箱形状完全相同的模型基础上进行，使用建模软件 Gambit 建立几何模型，模型中包括几何体：最内层为  $\Phi 7\text{ m} \times 5\text{ m}$  的圆柱体水箱；其外为聚氨酯保温层 200 mm，最外层土壤尺寸为  $21\text{ m} \times 21\text{ m} \times 15\text{ m}$ ，整个水箱和保温层埋于地下，水箱顶部层与地表面有 2 m 的距离。其中，网格划分的原则是在温度场和速度场变化剧烈的地方和方向密集划分网格，因为散热时温度梯度主要存在与保温层和保温层相邻的土壤区域，因此对以上区域划分网格时进行了加密处理<sup>[11]</sup>，绘制的模拟对象的二维模型如图 3 所示。

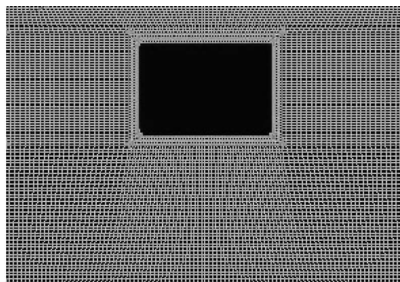


图 3 剖面网格划分图

1.5.2 边界条件 对储热水箱在土壤中的传热进行数值求解时，将半无限大的土壤介质简化为有限的求解区域。保温层间、保温层和土壤间边界层均设置为热耦合边界层，其中土壤边界温度设置为恒温  $15\text{ }^\circ\text{C}$ 。冬季室外地面平均温度  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 。在地板辐射采暖中，根据人体的舒适感生理条件要求，地面温度为  $24\sim 28\text{ }^\circ\text{C}$ ，认为混合流储热水箱内部混合均匀，水箱内部的温度完全一致取值在  $45\text{ }^\circ\text{C}$ ，其物性参数见表 2。

表 2 物性参数<sup>[12-13]</sup>

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热/ $\text{J}(\text{K} \cdot \text{kg})$	导热/ ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ )
聚氨酯	60	700	0.033
粘土	1 600	2 200	1.395

1.5.3 储热水箱周围土壤温度场的对比分析 基于温度边界条件对土壤区域温度场的影响，在计算分析中应该将过度季和冬季分别加以考虑，在 Fluent 中设定边界条件进行二维稳态计算，初始的水温设定为  $45\text{ }^\circ\text{C}$ ，按 30 a 一个气候段考虑，工程设计中以近 30 a 气象数据的统计值较为合理<sup>[14]</sup>，冬季时取地表平均温度为  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ，而过渡季室外地表平均温度取为  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ，室内温度取为  $27\text{ }^\circ\text{C}$ 。在 Fluent 软件中进行模拟计算，把输出的文件夹放在 Tecplot 中进行处理，得到了室外与室内两种情况下水箱周围土壤温度场分布

图 4、图 5 为冬室内(外)地下储热温度分布图，经过一段时间的储热运行，随着水箱温度的不断升高，底部土壤的温度也随之慢慢升高。土壤的初始温度为  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ，当水箱水温达到  $45\text{ }^\circ\text{C}$  时，下方土壤的温度会形成一个由近及远年度逐渐下降的温度梯度，从图中可发现，水箱底部的土壤温度变化稳定，4 种情况下的温度基本趋于一致，不受外界自然条件的影响。在近地表面处，由于受自然条件的影响，室外水箱周围土壤温度变化较大，热量损失大，储热量减少。图 6、图 7 显示在夏秋季土壤温度分布变化没有冬季明显，温差变小，但室外土壤散热量仍大于室内。

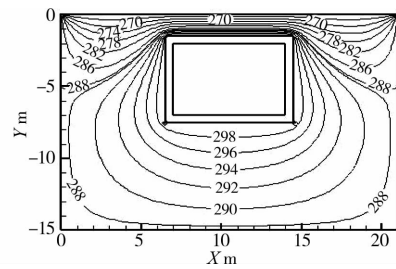


图 4 冬季室外地下储热温度分布

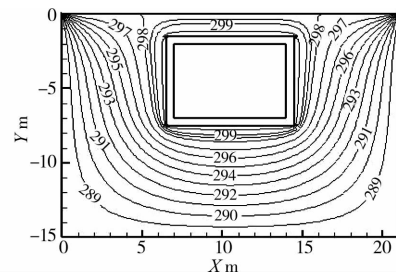


图 5 冬季室内地下储热温度分布

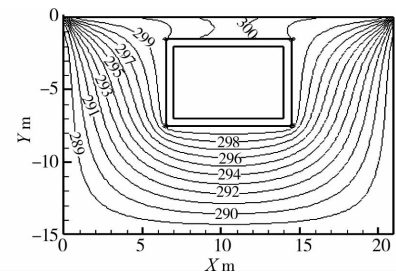


图 6 夏秋季室内地下储热温度分布

由温度分布图可见，地下储水箱两侧及底部的温度分布不受自然条件的影响，土壤主要起到储热功能，温度变化趋于一致。此处考察水箱上部 1 m 左右土壤的温度变化情况，

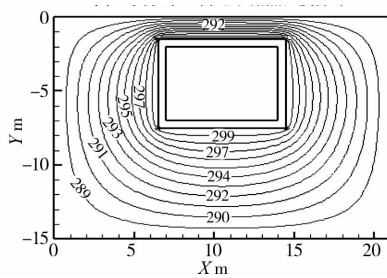


图 7 夏秋季室外地下储热温度分布

如图 8 所示。冬季土壤温差变化明显,冬季温差最大相差 24 °C,最小也相差 11 °C,温度波动的范围较深;而夏秋季温差最大相差 9 °C。在储水箱相同工况条件的基础上,不仅反映了温度边条件多储水箱周围土壤温度的影响,同时也反映了储热水箱位置对热量散失的影响。

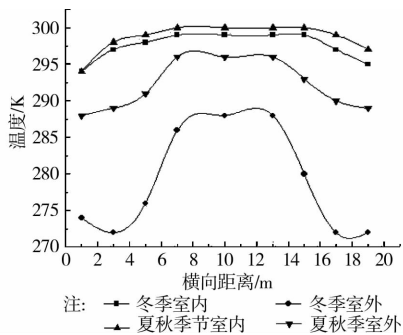


图 8 地下 1 m 温度分布图

## 2 结论

通过对太阳能地下储热系统中储热水箱散热模拟计算,以北方某村镇 100 m<sup>2</sup> 的建筑面积供暖为实例,对系统在全年运行情况下的散热效果进行模拟计算和对比分析,得出在冬季布置在室外地下储热水箱顶盖的散热量是室内的 2.4 倍。夏季室外储水箱顶部散热量是室内的 1.6 倍。由于散热量大,从而导致为了抵消散热损失量,室外地下储热水箱所需的集热器的面积大于室内情况下所需的集热器的面积 3 m<sup>2</sup> 左右。通过室内地下储热水箱存储既可以满足良好的节能效果,又减少了用户的投资,经济合理可行,同时使系统的储热效率提高。

## 参考文献:

- [1] Schmidt T, Mangold D, Müller-Steinhagen H. Central solar heating plants with seasonal storage in Germany [J]. Solar Energy, 2004, 76(1/2/3):165-174.
- [2] Meliß M, Spate F. The solar heating system with seasonal storage at the Solar-Campus Jülich [J]. Solar Energy, 2000, 69(6):525-533.
- [3] 周志培,孙保民. 太阳能储热水箱保温计算[J]. 现代电力, 2009, 26(5):53-55.
- [4] 贾英洲. 太阳能供暖系统设计与安装[M]. 北京:人民邮电出版社, 2011:97-98.
- [5] Alkhamis T M, El-Khazali R, Kablan M M, et al. Heating of a biogas reactor using a solar energy system with temperature control unit [J]. Solar Energy, 2000(3): 239-247.
- [6] Axaopoulos P, Panagakis P. Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings [J]. Biomass and Bioenergy, 2003(24):239-248.
- [7] Diana G, Deponte S, Zasso A. A new large wind tunnel for civil-environmental and aeronautical applications [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998(74/75/76):553-565.
- [8] 张国忠. 埋地热油管道准周期运行温度研究[J]. 油气储运, 2001, 20(6):4-7.
- [9] 朱敦智,刘君,芦潮. 太阳能采暖技术在新农村建设中应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(Suppl1):167-170.
- [10] 陆耀庆. 供暖通风设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1987.
- [11] Eltimasahy A H, Copass C H. Solar heating system simulation model [C]// Modeling Annual Pittsburgh Conference, April 26-27, 1976, Pittsburgh, Pa. Part2. (A77-3817617-66) Instrument Society of America, 1976:1092-1097.
- [12] 陕西省建筑设计院. 建筑材料手册[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社, 1984:340-342.
- [13] GB/T 10801.1—2002 绝热用模塑聚苯乙烯泡沫塑料[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- [14] 周长吉,丁小明. 温室采暖设计室外计算温度取值方法探讨[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10):161-165.