

DOI: 10.7652/xjtuxb201305001

太阳能热发电用高温混凝土储热系统性能分析

吴明, 李明佳, 何雅玲, 陶文铨

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 采用修正集总热容法对太阳能热发电中混凝土储热整体系统的热性能进行研究。修正的固液换热系数将计算的适用范围扩展到大 Biot 数的情况。发现放热时固体混凝土和流体沿着流程方向都存在一个温跃层区域, 并且随着放热的进行, 温跃层逐渐向下游移动并且占据的长度也逐渐增加。分别讨论了混凝土导热系数、模块串联总长度以及储热单元当量外径与钢管内径比值对储热系统放热性能的影响。计算发现, 提高混凝土导热系数可以有效提高储热系统的热性能, 并且随着导热系数的增加, 放热效率的增加会逐渐变慢; 增加串联总长度可以有效提高系统的热性能, 但是当串联总长度大于 1 km 时, 继续增加串联总长度对于特征固体温度分布的影响很小; 当量直径比的增加会减小温跃层区沿流程方向的温度梯度, 增大温跃层区占据的长度。

关键词: 混凝土储热系统; 修正集总热容法; 温跃层; 放热效率

中图分类号: TK02 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0001-05

Thermal Performance of High Temperature Concrete Thermal Storage System for Solar Thermal Power Generation

WU Ming, LI Mingjia, HE Yaling, TAO Wenquan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The thermal performance of a concrete thermal storage system was investigated by the lumped parameter method. The application range of the lumped parameter method was extended to large Biot numbers by using the corrected heat transfer coefficient between the solid and the fluid. The development of the thermocline region and its influence on the thermal performance of the concrete thermal storage system were examined. The effects of three parameters on the discharging performance were explored. The results show that there exists a thermocline region along the flow path, and it moves downstream and the region area increases gradually. The thermal performance of the whole system can be improved by increasing thermal conductivity of concrete but the rate of thermal performance improvement will be smaller with an increase in the conductivity. The increase in the total length of series modules can effectively enhance the system thermal performance while the influence could be ignored when the total length is greater than 1 km. Increasing the equivalent ratio of the outer diameter of the heat storage unit to the inner diameter of the steel tube will reduce the temperature gradient of the thermocline region along the flow path and increase the thermocline region area.

Keywords: concrete thermal energy storage system; corrected lumped parameter method; thermocline region; discharging efficiency

收稿日期: 2012-11-10。 作者简介: 吴明(1979—),男,博士生;何雅玲(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB228304);国家自然科学基金资助项目(51176155)。

网络出版时间: 2013-02-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130225.1723.001.html>

可集成储热系统是聚光太阳能热发电相比其他可再生能源发电技术的主要优势之一,储热技术也成为太阳能热发电中的一项核心技术^[1]。目前商业化的太阳能热发电站普遍采用使用熔融盐作为储热介质的双罐储热技术,这也是国际上目前唯一得到商业化应用的储热技术。但是,熔融盐双罐储热技术的成本可以下降的空间较小,不能满足大幅度降低太阳能热发电电成本的需求。目前,国际上正在开发新型低成本的高温储热技术,其中使用高温混凝土作为储热介质的混凝土储热技术正在得到越来越多的关注。

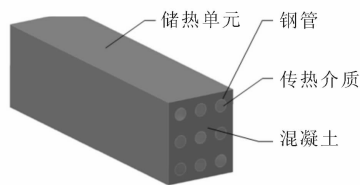
混凝土具有成本低、化学稳定性好、工作温度范围广、使用寿命长等优点,适合作为大规模储热用的储热材料。但是,混凝土的导热系数较低,通常需要通过增加换热面积或提高混凝土导热系数来强化传热流体和储热介质间的热交换,而这又可能会引起储热成本的大幅度增加。德国宇航中心(DLR)Doerte Laing 的团队针对混凝土储热技术进行了大量的试验,包括材料性能测试、强化换热方法研究以及开发测试了几代高温混凝土储热示范模块^[2-3]。他们的研究表明,混凝土储热技术是一种非常有前景的低成本太阳能高温储热技术。美国阿肯色大学的 Skinner 等开发了可以耐 500 °C 高温的混凝土,并使用熔融盐作为传热流体对混凝土储热模块进行了测试,验证了添加界面缓冲材料对克服混凝土开裂问题的有效性^[4]。国内武汉理工大学朱教群等也开发了耐高温混凝土,并对混凝土储热系统的强化换热以及提高混凝土的导热系数方法进行了研究^[5]。

过去的研究主要集中在耐高温、高导热系数混凝土材料开发以及混凝土储热系统单个模块的热性能和机械性能的研究上,而对整体储热系统的储热性能的研究较少。本文采用修正集总热容法来对混凝土储热系统的热性能进行研究。该方法基于 Xu 等最近推导的适用于混凝土储热的修正的固-液换热系数^[6],使用此修正的换热系数可以将应用集总热容法进行储热系统热性能计算的适用范围从小 Biot 数扩展到大 Biot 数,从而使得本文能够应用集总热容法对不同 Biot 数情况下的混凝土储热整体系统进行热性能的分析研究。

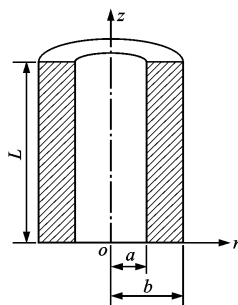
1 数值模型和求解方法

混凝土储热系统一般由通过串、并联连接的多个混凝土储热模块组成,参见图 1。每个模块(如图

1a 所示)又包括固体混凝土储热材料和其内部集成的由多个钢管排列组成的换热器。系统设计时通常通过多个模块的串联来实现高效率的充放热,又通过多个串联模块的并联来实现储热容量的扩充。串联模块的总长度对于系统性能的影响是设计时需要重点考虑的因素。



(a) 混凝土储热模块



(b) 简化的储热单元

图 1 混凝土储热系统示意图

基于 Xu 等的工作^[6],本文的研究同样基于简化的储热单元,如图 1b 所示。储热单元的沿程长度 L 代表了储热系统的串联模块的总长度,即它是由多个储热模块的长度累加而成,而多个储热单元的并联可以构成整体的混凝土储热系统。建模时引入的主要简化还包括:①忽略混凝土沿流道方向的热传导;②固体和流体的热物性为常数;③忽略钢管的影响;④沿程环境热损失为 0。

基于上述简化的储热单元和假设,可以得到流体能量方程为^[6]

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial z} = \frac{h_{\text{eff}} s_s}{\rho_f C_f \epsilon \pi R^2} (T_s - T_f) \quad (1)$$

固体混凝土能量方程为

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = - \frac{h_{\text{eff}} s_s}{\rho_s C_s (1 - \epsilon) \pi R^2} (T_s - T_f) \quad (2)$$

式中: T_s 为混凝土沿径向的平均温度;流体速度 $v = \dot{m} / \rho_f \epsilon \pi R^2$;有效孔隙率 $\epsilon = d_{\text{in}}^2 / d_{\text{out}}^2$;单位长度换热面积 $s_s = \pi d_{\text{in}}$;修正的固-液换热系数^[6]

$$h_{\text{eff}} = 1 / (1/h + (1/k_s) [a^3 (4b^2 - a^2) + ab^4 (4 \ln(b/a) - 3)] / [4(b^2 - a^2)^2]) \quad (3)$$

其中 h 由适用于管内湍流强制对流换热的 Dittus-

Boelter 公式确定

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.3} \quad (4)$$

上述控制方程式(1)和(2)为 Schumann 方程^[7],其分析解为

$$\frac{T_s - T_h}{T_0 - T_h} = e^{-\eta \zeta} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\eta^m \zeta^{m+n}}{m!(m+n)!} \quad (5)$$

$$\frac{T_f - T_h}{T_0 - T_h} = e^{-\eta \zeta} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\eta^m \zeta^{m+n}}{m!(m+n)!} \quad (6)$$

其中

$$\eta = \frac{h_{\text{eff}} s_s}{\rho_f C_f \epsilon \pi R^2} \frac{z}{v}$$

$$\zeta = \frac{h_{\text{eff}} s_s}{\rho_s C_s (1 - \epsilon) \pi R^2} \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

模拟中选取高温导热油作为传热流体,其物性作为常数处理,采用其在 340 °C 时的物性: $\rho_f = 773 \text{ kg/m}^3$; $C_f = 2\,425 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; $k_f = 0.089 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

高温混凝土的物性为

$$\rho_s = 2\,750 \text{ kg/m}^3; C_s = 916 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

选取钢管内径 $a = 15 \text{ mm}$, 储热单元当量外径与钢管内径的比值 $d_r = b/a$ 。

本文仅对放热过程进行模拟,混凝土的初始温度为 390 °C,放热过程中进口流体的温度为 290 °C。当 $L = 50 \text{ m}$ 、 $d_r = 9$ 时进口流速 $v = 0.1 \text{ m/s}$,其他情况时 $v = 0.1(L/50)(d_r^2/81)$,此定义在储热单元的几何参数不同时,也能保证对应的通过储热系统的总体积流量恒定。

2 计算结果与分析

2.1 混凝土储热系统的温跃层特性

以 $L = 1 \text{ km}$ 、 $d_r = 9$ 、 $k_s = 5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 的储热单元为例,图 2 给出了其在不同放热时刻的流体和混凝土沿系统串联总长度(即储热单元长度 L)上的温度分布。可以看出,由于放热时高温混凝土释放热量后温度逐渐降低,流体吸收热量后温度沿着流程逐渐升高,这导致了放热时固体混凝土和流体沿着流程方向都存在一个温跃层区域。在温跃层区内混凝土和流体由于存在温差而持续放热。随着放热的进行,更多的上游区域放热完毕而不断变成低温区,温跃层逐渐向下游移动。当温跃层移动到出口时,流体出口温度开始下降。同时发现,随着放热的进行,温跃层占据的长度也逐渐增加。这些特性与颗粒堆积床单罐温跃层储热系统的放热过程类似^[1]。根据文献的研究结果,温跃层的发展对于储热系统的效率具有重要影响,温跃层占据的长度越

小,储热系统的效率越高。混凝土储热系统的温跃层发展的影响因素将在后面讨论。

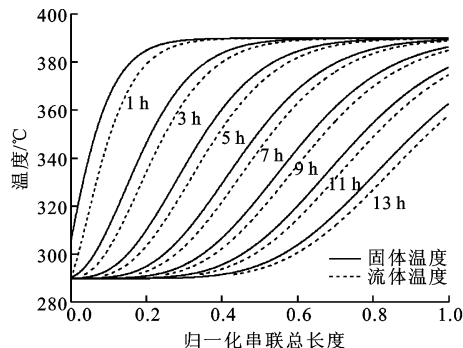


图 2 不同放热时刻固体温度和流体温度的沿程分布

图 3 给出了流体出口温度和释放能量比例随着放热时间的变化,释放能量比例定义为出口流体相对于进口流体的能量的累计增加占总的储热容量的比例^[1]。流体出口温度在放热的最初 7 h 内始终被加热至混凝土的初始高温(390 °C),然后逐渐下降。这是因为随着放热带来的温跃层不断向下游移动,保持初始高温的固体区域逐渐减少,当温跃层到达出口以后,高温区域消失,流体出口温度开始下降。大约 24 h 后流体出口温度变成 290 °C,此时固体储存的热量被完全释放。本文选取 350 °C 为有效出口流体的温度临界值,低于此值后出口流体携带的热能不能被用来有效地产生蒸汽,并定义放热到临界温度时的放热时间为有效放热时间,对应的释放能量比例为放热效率。可以看出,此时的有效放热时间是 13.8 h,放热效率为 84%。

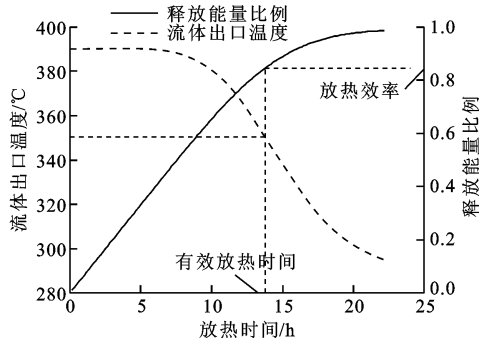


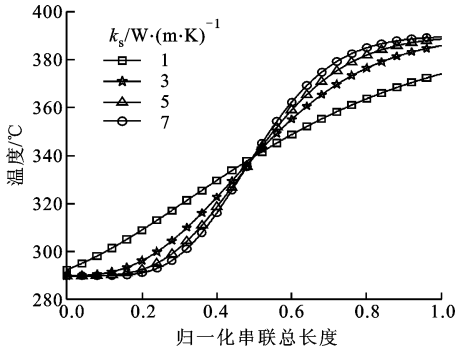
图 3 流体出口温度和释放能量比例随放热时间的变化

2.2 混凝土导热系数的影响

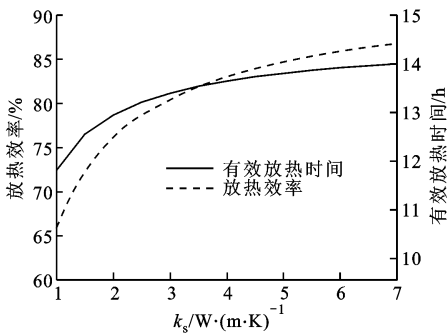
混凝土的导热系数是影响混凝土储热系统的充放热性能和经济性的重要参数。混凝土材料的导热系数不高,通常通过均匀掺混高导热性的组分(如石墨粉、铁丝、钢渣等)来提高储热介质的有效导热系数。本文以 $L = 1 \text{ km}$ 、 $d_r = 9$ 的储热单元为例,研究了 1~7 W/(m · K) 的范围内导热系数对储热系统

热性能的影响。为便于比较分析,本文选取中心长度 $L/2$ 处的混凝土温度降至 $340\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的混凝土沿流程温度分布为特征固体温度分布。

图 4 给出了不同导热系数对应的特征固体温度分布,以及放热效率和有效放热时间随导热系数的变化曲线。从图 4a 可以看出,当导热系数为 $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,混凝土沿流动方向温度变化比较平缓,此时整个串联长度都被温跃层区域覆盖。这是因为导热系数较低时,存储在固体内部的热量不能迅速地传导,降低了固体和流体的热交换速度,从而使得沿流动方向的热交换区域变长。随着导热系数逐渐增加到 $7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,由于混凝土放热速度明显加快,温跃层占据长度逐渐变小。可以看出,当混凝土导热系数大于 $3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,沿流程方向可以同时出现放热完毕的低温区、正在放热的温跃层区和尚未开始放热的高温区。



(a)不同导热系数对应的特征固体温度分布



(b)放热效率和有效放热时间随导热系数的变化

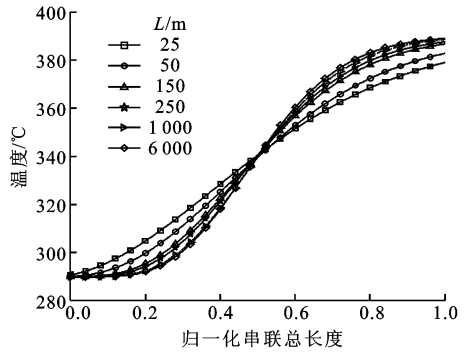
图 4 混凝土导热系数对储热系统热性能的影响

基于上述导热系数对混凝土放热时温度变化的影响,提高混凝土导热系数可以有效地提高系统的有效放热时间和放热效率,如图 4b 所示。同时可以看出,随着导热系数的增加,放热效率的增加逐渐变慢。当导热系数从 $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,放热效率从 66.2% 大幅度提高到 84.7% 左

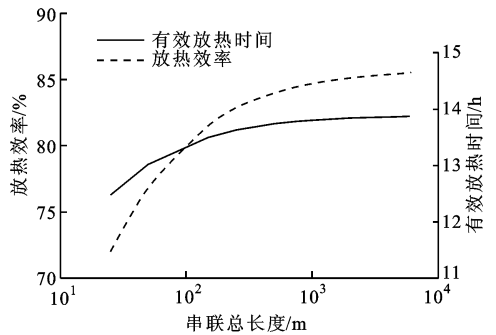
右。导热系数继续增加到 $7\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,放热效率增加到 86.8% 。此外,由于混凝土导热系数的提高可能伴随着材料成本和技术成本的大幅度提高,因此在选取最优的混凝土导热系数时,需要综合考虑混凝土模块的充放热效果和系统成本。

2.3 混凝土模块串联总长度的影响

混凝土储热系统的模块串联总长度是系统的重要设计参数。本文以 $d_r=9$ 、 $k_s=5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的储热单元为例,研究了 $25\sim1\,000\text{ m}$ 的范围内串联总长度对储热系统热性能的影响。图 5 给出了不同串联总长度对应的特征固体温度分布,以及放热效率和有效放热时间随串联总长度的变化曲线。



(a)不同串联总长度对应的特征固体温度分布



(b)放热效率和有效放热时间随串联总长度的变化

图 5 模块串联总长度对储热系统热性能的影响

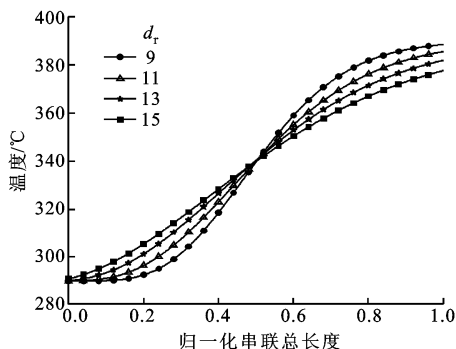
从图 5a 可以看出,随着串联总长度的增加,温跃层区在沿流程方向的温度梯度变大,温跃层区占据的归一化长度减小。同时可以看出,当串联总长度大于 1 km 时,继续增加串联总长度对于特征固体温度分布的影响很小。从图 5b 可以看出,增加串联总长度可以有效地提高系统的有效放热时间和放热效率,但是随着串联总长度的增加,放热效率的增加速度逐渐变小。当串联总长度从 25 m 增加到 1 km 时,放热效率从 72% 提高到 84.7% ,继续增加到 6 km 时,放热效率仅小幅度增加至 85.5% 。但

是,增加串联总长度会同时引起传热流体泵功的增加,所以串联总长度并不是越大越好,需要综合考虑增加串联总长度对于系统性能的改善程度以及消耗的泵功。

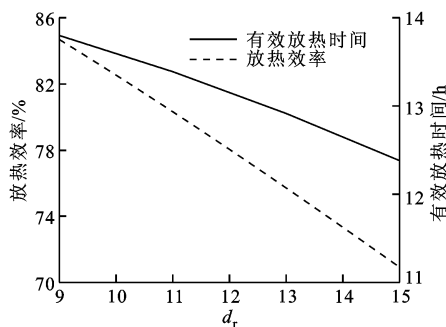
2.4 储热单元当量外径与钢管内径比值的影响

当量直径比 d_r 决定了系统中所用钢管的数量,因此对于系统的成本有很重要的影响。 d_r 越大,系统所用钢管越少,成本越低。

本节以 $L=1\text{ km}$ 、 $k_s=5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 的储热单元为例,研究了 9~15 的范围内 d_r 对储热系统热性能的影响,其对应的特征固体温度分布,以及放热效率和有效放热时间随 d_r 的变化曲线分别如图 6a 和 6b 所示。可以看出,随着 d_r 从 9 增加到 15,温跃层区沿流程方向的温度梯度变小,温跃层区占据的长



(a) 不同当量直径比对应的特征固体温度分布



(b) 放热效率和有效放热时间随当量直径比的变化

图6 不同当量直径比对储热系统热性能的影响

度增加,其对应的放热效率也近似线性地从 84.7% 显著下降到 70.9%,有效放热时间从 13.8 h 缩短至 12.4 h。因此,当量直径比的选择也要综合考虑它的增加所引起的成本降低和系统性能的下降。

3 结论

本文采用修正集总热容法来对混凝土储热整体系统的热性能进行研究。采用适用于混凝土储热的

修正的固-液换热系数,使得即便在大 Biot 数的情况下也可以使用集总热容法。选取高温导热油作为传热流体对放热过程进行了模拟,得到以下结论。

(1)研究了混凝土储热系统温跃层的发展及对储热系统效率的影响,发现放热时固体混凝土和流体沿着流程方向都存在一个温跃层区域,在温跃层区内混凝土和流体由于存在温差而持续放热,并且随着放热的进行,温跃层逐渐向下游移动;同时发现,随着放热的进行,温跃层占据的长度也逐渐增加;算例中计算出有效放热时间为 13.8 h,放热效率为 84%。

(2)计算了 1~7 W/(m·K) 的范围内导热系数对储热系统热性能的影响,计算发现提高混凝土导热系数可以有效提高储热系统的热性能,并且随着导热系数的增加,放热效率的增加会逐渐变慢。

(3)计算了模块串联总长度对储热系统热性能的影响,发现增加串联总长度可以有效提高系统的热性能,但是当串联总长度大于 1 km 时,继续增加串联总长度对于特征固体温度分布的影响很小,由于在增加串联总长度的同时会引起传热流体泵功的增加,因此串联总长度并不是越大越好。

(4)计算了储热单元当量外径与钢管内径比值对储热系统充放热性能的影响,发现当量直径比的增加会减小温跃层区沿流程方向的温度梯度,增大温跃层区占据的长度,会影响储热系统的热性能。

计算结果和讨论可以用来指导混凝土储热系统的整体设计,以达到系统热性能与系统成本之间更好的平衡。

参考文献:

- [1] XU Chao, WANG Zhifeng, HE Yaling, et al. Sensitivity analysis of the numerical study on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline thermal storage system [J]. Applied Energy, 2012, 92(1): 65-75.
- [2] LAING D, LEHMANN D, FIB M, et al. Test results of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131(4): 0410071-0410076
- [3] LAING D, STEINMANN W, FIB M, et al. Solid media thermal storage development and analysis of modular storage operation concepts for parabolic trough power plants [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130(1): 011006.

(下转第 43 页)