

一种新型单罐多层填充床蓄热器蓄热性能研究

李梦杰, 邱 羽, 何雅玲

(西安交通大学能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 针对单罐熔盐填充床蓄热器中斜温层影响蓄热性能的问题,以控制斜温层厚度扩展进而提高蓄热性能为研究目标,建立蓄热器二维、瞬态、轴对称流动传热数值模型。基于此模型,研究填料比热容和导热率关键热物性参数对斜温层扩展与蓄热性能的影响规律,并对比5种典型填料的斜温层扩展与各项蓄热性能。在此基础上,提出一种可控制斜温层厚度扩展的新型多层填充床蓄热器设计方法。与传统单层石英岩蓄热器相比,利用该方法设计的一种石英岩-铸铁-高温混凝土三层蓄热器可在放热效率仅降低0.64%的情况下,使有效蓄热量提高27.09%。

关键词: 太阳能; 储能; 热能; 斜温层; 填充床蓄热; 多层填充床蓄热器

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

0 引 言

化石能源消耗量随社会经济的快速发展而急剧增长。同时化石燃料的大量燃烧也带来了日益严重的环境问题,并对公众健康和社会经济发展带来了不利影响^[1]。因此,加快发展清洁的可再生能源成为各国面临的重要课题。太阳能是最丰富、清洁并可广泛获取的可再生能源,高效利用太阳能可改善我国能源短缺与不合理的能源结构^[2-4]。太阳能热发电技术是一种前景广阔的太阳能利用技术^[5-7],而蓄热装置是该系统的重要组成部分。在夜间和白天光照不足时,系统可使用蓄热装置中储存的热能来维持连续稳定运行。因此,针对蓄热技术开发方面的研究也成为国际前沿的研究热点^[8,9]。

单罐熔盐填充床斜温层蓄热系统结构简单,且可使用价格低廉的固体填充材料代替昂贵的熔盐作为蓄热介质。与传统双罐熔盐蓄热系统相比,可降低20%~37%的投资成本^[10]。因此,单罐斜温层蓄热系统在工业应用领域尤其是太阳能热发电领域获得越来越多的关注。国内外学者在实验和理论方面均对其开展了大量工作。在实验研究方面,美国桑迪亚国家实验室在2002年建立了一个蓄热量为2.3 MWh_t的单罐蓄热器^[11],实验结果表明单罐蓄热系统是一种可行的蓄热技术。左远志等^[12]提

出的一种由管壳式相变结构与填充床结构组成的混合蓄热单罐蓄热器,证实了其斜温层在放热与吸热循环运行中能保持稳定。在理论研究方面,Xu等^[13,14]对比了填料与熔盐的几种常用导热率关联式对斜温层蓄热器蓄热性能数值计算结果的差异,同时讨论了填料直径与不同种类填料对蓄热性能的影响。Bayón等^[15]采用无量纲化的方法来分析蓄热器的蓄热特性,研究了斜温层区域的利用比例对改善蓄热系统性能的影响。

虽然斜温层厚度的扩展对单罐填充床蓄热器蓄热性能有重要影响,但通过文献综述可见,目前鲜有研究着眼于从控制斜温层厚度扩展的角度来优化蓄热性能。本文针对该问题建立单罐填充床蓄热器数值计算模型。从熔盐斜温层厚度扩展的角度,首先研究填料比热容与导热率对蓄热性能的影响;接着对比分析5种典型填料对斜温层厚度扩展与蓄热性能的影响;最后基于上述研究结果提出一种可控制斜温层厚度扩展的新型多层填充床蓄热器,并对蓄热器进行优化研究。

1 物理模型与数值模型

1.1 模型建立

本文研究的单罐熔盐填充床斜温层蓄热器基

收稿日期: 2017-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(51436007)

通信作者: 何雅玲(1963—),女,博士、教授,主要从事工程热物理及能源高效利用等方面的研究。yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

本几何结构和尺寸与桑迪亚国家实验室的实验系统一致^[11],其主要由进出口结构、分配器、填充床与3层壁面组成,如图1a所示。填充床由均匀填充的直径(d_p)为19.05 mm的石英岩固体球状填料组成,填充床孔隙率(ε)为0.22。该区域高(H)为5.9 m,直径(D)为3 m。蓄热器钢板壁面厚(l_{st})为0.04 m,钢板内外的保温层厚度(l_{in})均为0.2 m。在本文研究的放热过程中,初始时刻蓄热器中充满了温度(T_2)为390 ℃的高温熔盐与填料。放热过程开始后,温度(T_1)为290 ℃的低温熔盐从下部入口进入并与内部填料换热,而高温熔盐则从上部出口流出并带走蓄热器所存储的热能。各材料物性参数如表1所示。

其中,熔盐粘度($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)可表示为:

$$\mu = [22.714 - 0.12T + 2.281 \times 10^{-4}T^2 - 1.474 \times 10^{-7}T^3] \times 10^{-3} \quad (1)$$

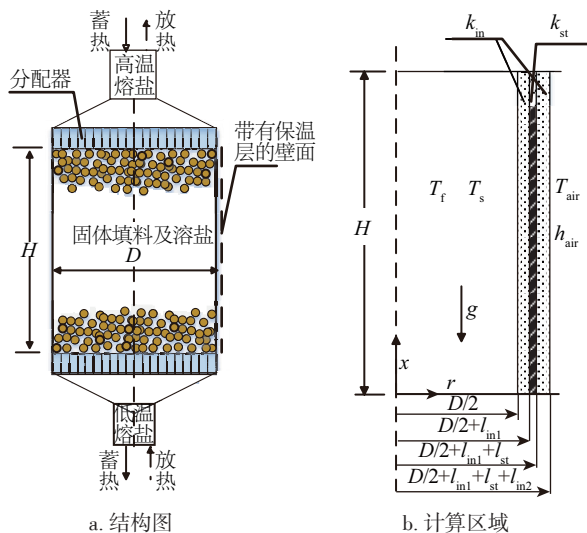


图1 单罐熔盐填充床斜温层蓄热器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of packed-bed thermocline thermal storage tank

表1 材料物性参数

Table 1 Material properties

物性参数	石英岩	绝热层	钢板	熔盐
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2500	2000	7800	2090-0.636T
$c_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	830	960	470	1443+0.172T
$k/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	5.6	0.1	35	0.44+1.9×10 ⁻⁴ T

注: T—温度,℃。

针对以上物理模型,选取如图1b所示的填充床区域为数值模型计算区域。为简化计算进行如

下假设:

1)填充床区域内无周向流动和传热;

2)填料视为连续、均匀的多孔介质,流体在填充床区域是层流、不可压缩流动;

3)填料视为常物性。

基于以上假设,建立计算区域的二维轴对称、瞬态、多孔介质非热平衡流动传热模型。模型控制方程、边界条件与初始条件如下:

熔盐连续性方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_f \vec{u}] = 0 \quad (2)$$

熔盐动量方程:

$$\frac{\partial(\rho_f \vec{u})}{\partial t} + \nabla[\rho_f \vec{u} \vec{u}] = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) - \nabla p + \rho_f \vec{g} - \frac{\mu}{K} \vec{u} - C_2 \cdot \frac{1}{2} \rho_f |\vec{u}| \vec{u} \quad (3)$$

式中, ε ——孔隙率; K ——粘性阻力系数, $K = d_p^2 \varepsilon^3 / [150(1-\varepsilon)^2]$; C_2 ——惯性阻力系数, $C_2 = 3.5 / \sqrt{150K\varepsilon^3}$ 。

熔盐能量方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho c_p)_f T_f}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho c_p)_f T_f \vec{u}] = \nabla \cdot (k_{f,\text{eff}} \nabla T_f) + h_v (T_s - T_f) \quad (4)$$

填料能量方程:

$$\frac{\partial[(1-\varepsilon)(\rho c_p)_s T_s]}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{s,\text{eff}} \nabla T_s) - h_v (T_s - T_f) \quad (5)$$

绝热层和罐体钢板壁面能量方程:

$$\frac{\partial(\rho_i c_{p,i} T_i)}{\partial t} = \nabla \cdot (k_i \nabla T_i) \quad (6)$$

蓄热器单位体积中填料与熔盐之间的对流换热系数(h_v)(下文简称为体对流换热系数):

$$h_v = \frac{6(1-\varepsilon)k_f[2 + 1.1Re_p^{0.6}Pr^{1/3}]}{d_p^2} \quad (7)$$

填料有效导热率($k_{s,\text{eff}}$)、熔盐有效导热率($k_{f,\text{eff}}$):

$$k_{f,\text{eff}} = \begin{cases} 0.7\varepsilon k_f, & Re_p \leq 0.8 \\ 0.5PrRe_p k_f, & Re_p > 0.8 \end{cases}; k_{s,\text{eff}} = k_{\text{all,eff}} - k_{f,\text{eff}} \quad (8)$$

其中, $k_{\text{all,eff}} = k_i(k_s/k_i)^m + 0.5k_i Pr Re_p$; $m = 0.28 - 0.757 \ln \varepsilon - 0.057 \ln(k_s/k_i)$ 。

式中, ρ ——密度, kg/m^3 ; c_p ——定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; k ——导热率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; \vec{u} ——流体表观速度, m/s ; h_v ——熔盐与填料的体对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$; 下标 f 与 s 分别表示熔盐与填料;下标 eff 表示有效值;下标 i 表示绝热层 1、蓄热器钢板壁面,绝热

层 2。

边界条件:入口为均匀速度与均匀温度边界条件,其中熔盐进口温度 $T_{in}=290\text{ }^{\circ}\text{C}$,进口速度 $u_{in}=4.186\times 10^{-4}\text{ m/s}$;出口为充分发展边界条件;蓄热器中轴线为对称边界条件;蓄热器外壁与环境空气为强制对流换热边界条件,其中对流换热系数为 $h_{air}=10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,空气温度为 $T_{air}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$;进出口壁面截面为绝热边界条件;熔盐与内壁面为无滑移边界条件。

初始条件:在放热初始时刻蓄热器内填料与熔盐温度相同,均为 $390\text{ }^{\circ}\text{C}$,蓄热器壁面与内部高温介质、外部环境空气处于稳态换热状态。

蓄热性能表征参数定义为:

1)斜温层厚度(L_{te},m)^[13]:

$$L_{te} = \begin{cases} H(T_{crit,h}) - H(T_{crit,l}), & T_{s,in} \leq T_{crit,l} \text{ 或 } T_{s,out} \geq T_{crit,h} \\ H(T_{crit,h}) - 0, & T_{s,in} > T_{crit,l} \\ H - H(T_{crit,l}), & T_{s,out} < T_{crit,h} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $T_{crit,l}$ ——斜温层熔盐的临界最低温度,本文中 $T_{crit,l}=295\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{crit,h}$ ——斜温层熔盐临界最高温度,本文中 $T_{crit,h}=385\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{s,in}$ ——进口处填料温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{s,out}$ ——出口处填料温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2)有效放热时间(t_d,h)为从开始放热至熔盐出口温度(T_{out})降至临界温度 $T_{cr}=370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所需的时间。

3)总蓄热量(Q,W):

$$Q = (1 - \varepsilon)c_{p,s}\rho_s V(T_2 - T_1) + \varepsilon c_{p,f}\rho_f V(T_2 - T_1) \quad (10)$$

式中, V ——填充体积, m^3 。

4)放热功率(p):

$$p = c_{p,f}u_{in}A\rho_f(T_{out}(t) - T_{in}) \quad (11)$$

5)有效蓄热量(Q_{flow},J):

$$Q_{flow} = \int_0^{t_d} c_{p,f}u_{in}A\rho_f\{T_{out}(t) - T_{in}\}dt \quad (12)$$

6)放热效率(η):

$$\eta = Q_{flow}/Q \times 100\% \quad (13)$$

1.2 网格考核与模型准确性验证

采用 2 个放热时间时刻($t_1=56\text{ min}$, $t_2=146\text{ min}$)中轴线上的 2 处熔盐温度($x_1=2.5\text{ m}$, $x_2=5.0\text{ m}$)来考核网格独立性。图 2 为对 7 种网格的考核计算结果,网格模型(轴向网格数 \times 径向网格数)分别为:

60×35 、 80×45 、 100×55 、 110×65 、 120×75 、 140×90 、 160×110 。通过综合考量计算精度与计算量,最终选用网格数量为 9000 的网格模型(120×75)进行计算。

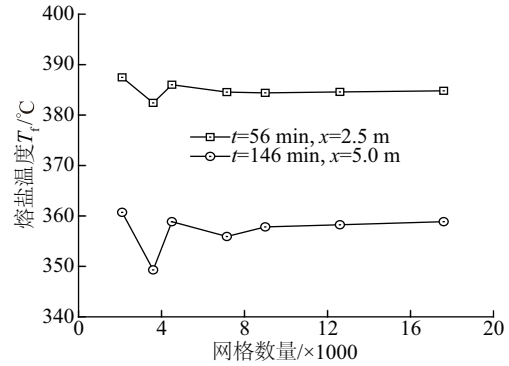


图2 网格独立性考核图

Fig. 2 Grid independence test

同时,为验证模型准确性,将本文计算结果与美国桑迪亚国家实验室(SNL)的实验数据^[11]进行了对比,对比结果如图 3 所示。由图 3 可见,模拟得到的 5 个放热时刻罐体中轴线上的温度分布与实验数据的分布趋势基本相同。由于实验测量时间和测量位置的不连续性和实验与计算误差使两种结果并不完全相同。总体来说,本文计算结果与实验数据符合较好,说明本文计算模型是可靠的。

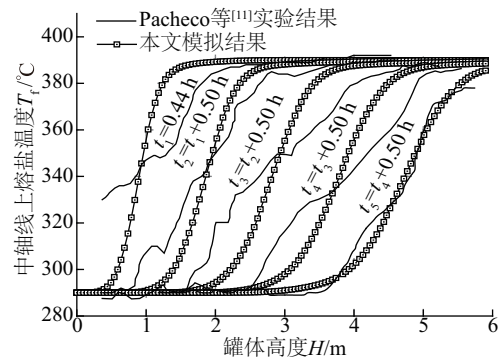


图3 模拟结果与实验数据对比图

Fig. 3 Comparison of numerical and experimental results

流动阻力特性是换热设备的重要评价指标,但实际工程中,单罐熔盐填充床蓄热器直径大,熔盐流速很小,流动阻力小,因此一般不对流阻特性进行单独研究。在本文研究的充放热过程中,熔盐流速为 $4.186\times 10^{-4}\text{ m/s}$,蓄热器最大流动阻力仅为 210 Pa ,对蓄热器性能影响不大。类似结果在文献[16]中

也有报道。

2 填料关键热物性对蓄热性能的影响

2.1 填料比热容的影响

使用不同比热容($c_{p,s}$)填料时蓄热器的熔盐斜温层厚度扩展图参见图 4 所示。表 2 所示为使用不同物性填料的蓄热器的各项蓄热性能参数的比较。由图 4 可见,随着 $c_{p,s}$ 的增大,斜温层厚度扩展速度变慢且斜温层厚度(L_{tc})变大。由表 2 可见, $c_{p,s}$ 越大, L_{tc} 越大, t_d 越大,有效蓄热量 Q_{flow} 越大,但 η 越小。因此,在选择填料时需综合考虑 $c_{p,s}$ 对 Q_{flow} 与 η 的影响。

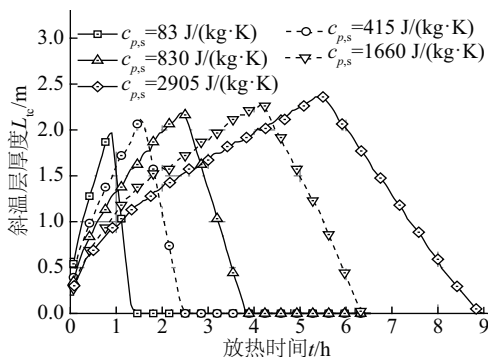


图 4 填料比热容对斜温层厚度扩展的影响
Fig. 4 Effects of heat capacity of solid filler on thermocline thickness with discharging time

表 2 填料不同比热容及导热率下蓄热器性能对比
Table 2 Variations of useful energy, efficiency and effective discharging time with capacity and conductivity of solid filler

填料物性	$Q_{flow} \times 10^6 / \text{kJ}$	$\eta / \%$	t_d / h
$c_{p,s} = 83 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	2.920	89.66	0.97
$c_{p,s} = 415 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	5.191	87.15	1.74
$c_{p,s} = 830 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	8.116	86.98	2.75
$c_{p,s} = 1660 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	13.856	86.17	4.65
$c_{p,s} = 2905 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	22.436	85.62	7.60
$k_s = 0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	8.424	90.28	2.82
$k_s = 5.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	8.116	86.98	2.74
$k_s = 20.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	7.970	85.41	2.68
$k_s = 100.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	7.056	75.62	2.40
$k_s = 400.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	5.876	62.97	2.02

2.2 填料导热率的影响

使用不同导热率(k_s)的填料蓄热器的熔盐斜温

层厚度扩展图参见图 5 所示。由图 5 可见,随着 k_s 的增大,斜温层厚度扩展速度与 L_{tc} 均随之增大。结合表 2 可知,随着 L_{tc} 的增大, t_d 减小,因而 Q_{flow} 和 η 也减小。可见,选择较小 k_s 的填料有利于提高蓄热器的有效蓄热量与效率等蓄热性能。

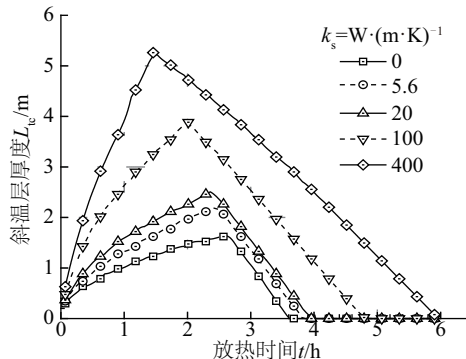


图 5 填料导热率的斜温层厚度扩展的影响
Fig. 5 Effects of conductivity of solid filler on thermocline thickness with discharging time

2.3 5 种典型填料蓄热性能比较

在蓄热系统中,常用的填料有石英岩、高温混凝土、铸铁、碳化硅陶瓷和氧化铝陶瓷,其主要物性参数如表 3 所示。本节对该 5 种填料对蓄热性能的影响进行了对比研究,结果如表 3、图 6 与图 7 所示。

表 3 5 种填料物性参数表
Table 3 Properties of 5 solid filler materials

材料	$k_s / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	$\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_{p,s} / \text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
高温混凝土	1.0	2750	916
碳化硅陶瓷	120.0	3210	750
氧化铝陶瓷	30.0	3750	780
铸铁	29.3	7900	837
石英岩	5.6	2500	830

对比图 6 中的 5 种填料计算结果可见,由于铸铁 ρ_s 最大,因此其 Q_{flow} 最大,若以最大 Q_{flow} 为蓄热器设计目标,则铸铁为最佳填料。但由图 7 可见,以铸铁为填料时其斜温层较厚,储存的热能有很大部分未被利用,因此 η 较低(82.79%)。同时,考虑到铸铁价格昂贵,因此不建议在大型蓄热系统中大量采用。由图 6 可见,若以最大 η 为蓄热器设计目标,则高温混凝土为最佳填料。由于该填料 k_s 最小,因此斜温层厚度扩展最慢且厚度最薄(参见图 7),因而 η

最高(90.18%)。同时由图 6 可见,现在工程中常用作填料的价廉易得的石英岩,其效率较高(86.98%),但蓄热量不大。

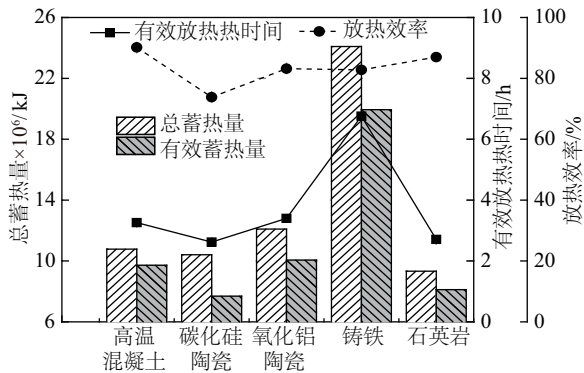


图 6 5 种填料的蓄热量、有效放热时间及放热效率对比

Fig. 6 The tank's stored energy, useful energy and efficiency of 5 solid filler materials

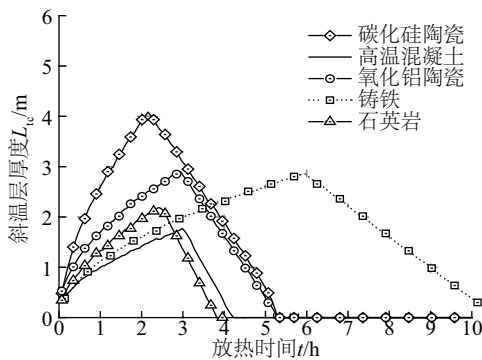


图 7 5 种填料的斜温层厚度扩展图

Fig. 7 Variations in thermocline thickness with discharging time for 5 kinds of solid filler

由以上结果可知,每种填料各有优缺点,若综合利用上述各填料的优点,以控制斜温层厚度扩展为原则,在蓄热器中构建由多种填料组成的多层填充床,可达到既提高蓄热量又保持较高蓄热效率的目的。

3 多层填充床蓄热器蓄热性能分析

3.1 3 种新型多层填充结构

熔盐在放热过程中,斜温层高温位置 $H(T_{\text{crit},h})$ 与低温位置 $H(T_{\text{crit},l})$ 的移动速度不同,且与填料的种类有关,而 $H(T_{\text{crit},h})$ 与 $H(T_{\text{crit},l})$ 的移动速度差会造成斜温层的出现以及扩展。因此可通过优化设计各填料的填充次序与填充厚度来调控填充床中

$H(T_{\text{crit},h})$ 与 $H(T_{\text{crit},l})$ 的移动速度差,从而实现对斜温层厚度扩展的控制。综合石英岩性价比高、铸铁蓄热量大、高温混凝土效率高的优点,以控制斜温层厚度扩展为设计原则构建多层填充床蓄热器。图 8a~图 8d 分别对应 4 种蓄热结构。图 8a 为石英岩单层蓄热结构(结构 a),图 8b 为铸铁-石英岩结构双层蓄热结构(结构 b),图 8c 为石英岩-铸铁双层蓄热结构(结构 c),图 8d 为石英岩-铸铁-高温混凝土三层蓄热结构(结构 d)。

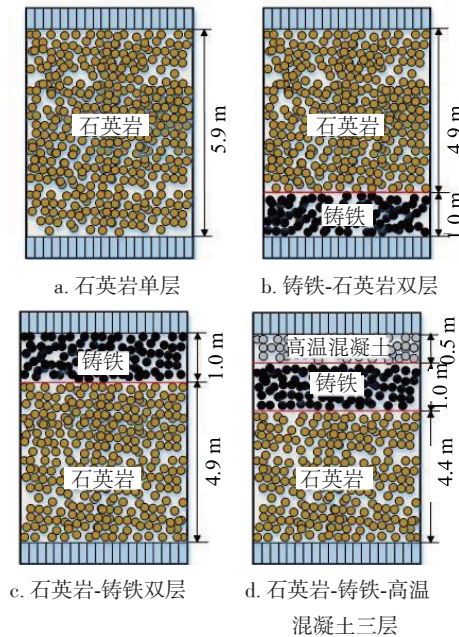


图 8 4 种蓄热结构示意图

Fig. 8 Sketch of 4 packed-beds with different layers

3.2 4 种结构蓄热性能比较

表 4 为 4 种结构的有效蓄热量与放热效率对比表,图 9 为 4 种结构的斜温层厚度扩展图。由图 9 可见,与其他 3 种结构相比,结构 b 的斜温层厚度 (L_{tc}) 很大。其原因是当熔盐斜温层高温位置 $H(T_{\text{crit},h})$ 进入石英岩区域后,由于石英岩 $\rho_s c_{p,s}$ 较小则 $H(T_{\text{crit},h})$ 上移速度加快,而仍处于铸铁区域的斜温层低温位置 $H(T_{\text{crit},l})$ 上移速度较慢,两者上移速度差增大,由此加快了斜温层厚度的扩展,最终增大了最大斜温层厚度 ($L_{tc,max}$)。可见该结构虽然提高了 Q_{flow} ,却大大减小了 η ,因此不宜将铸铁置于底部。

结构 c 的 L_{tc} 较石英岩单层结构 a 来说更小,这是由于进入铸铁区域的 $H(T_{\text{crit},h})$ 上移速度减慢,而仍处于石英岩区域的 $H(T_{\text{crit},l})$ 上移速度不变,两者

上移速度差减小,由此减缓了斜温层的扩展。但由表4可知,结构c与结构a相比, L_{tc} 虽减小,但 η 仍减小了1.7%。这是由于出口温度降至临界温度370℃以下后,铸铁中储存的热能仍有很大部分未被利用,故 L_{tc} 的减小对增加 η 的效果不明显。

基于此,提出一种石英岩-铸铁-高温混凝土三层结构(结构d)。结构d在结构c基础上,在铸铁上部增加一层 $\rho_s c_{p,s}$ 较小且斜温层厚度(L_{tc})扩展速度较慢的高温混凝土。由图9可见,由于三层填料的作用,使斜温层分段发展,在控制 L_{tc} 的同时延长了有效放热时间,从而保持高 η 且增加了 Q_{flow} 。由表4可见,该结构d与石英岩单层结构相比,在 η 仅降低了0.64%的情况下使 Q_{flow} 增加了27.09%。

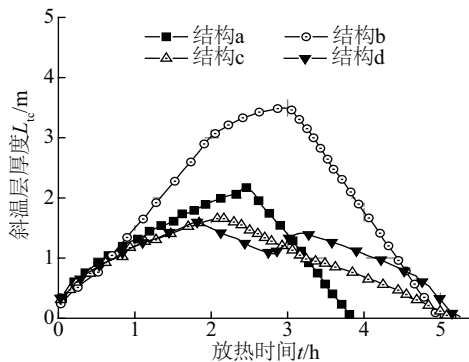


图9 4种结构的斜温层厚度扩展对比图

Fig. 9 Variations in the thermocline thicknesses with discharging time for 4 packed-beds with different layers

表4 4种蓄热结构有效蓄热量与放热效率对比

Table 4 The useful energy and efficiency for the 4 structures

蓄热结构	$Q_{flow} \times 10^6 / \text{kJ}$	$\eta / \%$
结构a	8.12	86.98
结构b	9.93	83.90
结构c	10.09	85.28
结构d	10.32	86.34

4种蓄热结构的放热功率随放热时间的变化规律参见图10所示。由图10可见,在一定放热时间内,4种结构放热功率不变,为0.83 MW。这是由于斜温层到达出口前,熔盐出口流速与出口温度保持不变,放热功率不变。多层结构由于铸铁的添加,总蓄热量大于结构a,故功率维持稳定的时间段较长。当斜温层到达出口时,熔盐出口温度开始下降,功率下降。分析可知,合理的多层结构不仅能维持较高放热效率,提高有效蓄热量,同时还能使

放热功率在较长时间内保持稳定,有利于蓄热系统的连续、稳定高效运行。

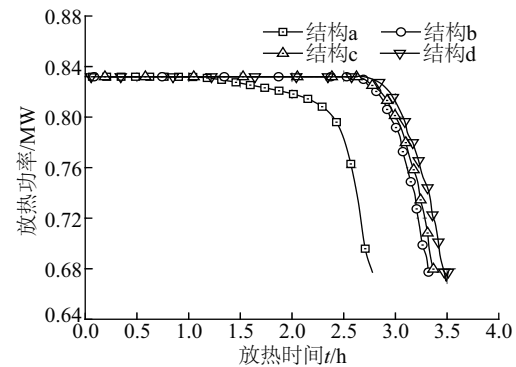


图10 4种结构的放热功率对比图

Fig. 10 Variations in discharging power with discharging time for 4 packed-beds with different layers

4 结 论

本文针对单罐熔盐填充床蓄热器中斜温层影响蓄热性能的问题,对填料比热容与导热率的影响进行了分析,对填充结构进行了优化设计。相关研究结果可进一步指导蓄热器设计和优化。具体结论如下:

1)从熔盐斜温层厚度扩展的角度研究了填料比热容与导热率对蓄热器蓄热性能的影响规律,结果表明比热容越大,斜温层厚度扩展越慢,有效蓄热量(Q_{flow})越大,但效率(η)越小;而导热率越大,斜温层厚度扩展越快, Q_{flow} 与 η 均越小。故单罐填充床的蓄热填料应优选导热率较小且比热容适中的材料。

2)对比研究了石英岩、高温混凝土、铸铁、碳化硅陶瓷和氧化铝陶瓷5种典型填料的蓄热性能,研究表明石英岩效率较高,但蓄热量最小;铸铁蓄热量最大,但效率低;高温混凝土斜温层扩展最慢,效率最高,但蓄热量较小。

3)基于上述研究,利用各填料的蓄热性能特性,提出一种通过使用多种填料分层放置以改变 $H(T_{crit,h})$ 与 $H(T_{crit,l})$ 的移动速度差来控制斜温层厚度扩展的填充床蓄热器填料分层设计方法。设计思路为将常用且性价比高的石英岩置于蓄热器底层作为基础填料,斜温层界面移动速度慢且蓄热密度较大的填料(如铸铁)置于中层,蓄热密度较小且斜温层扩展慢的填料(如高温混凝土)置于顶层,再根

据工程实际需求调整各填料的填充比例。如与传统单层石英岩蓄热器相比,利用该方法设计的一种新型石英岩-铸铁-高温混凝土三层填充床蓄热器可在放热效率仅降低 0.64% 的情况下,使有效蓄热量提高了 27.09%。

[参考文献]

- [1] Li Mingjia, Song Chenxi, Tao Wenquan. A hybrid model for explaining the short-term dynamics of energy efficiency of China's thermal power plants[J]. *Applied Energy*, 2016, 169: 738—747.
- [2] He Yaling, Xiao Jie, Cheng Zedong, et al. A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(3): 976—985.
- [3] Qiu Yu, He Yaling, Wu Ming, et al. A comprehensive model for optical and thermal characterization of a linear Fresnel solar reflector with a trapezoidal cavity receiver[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 129—144.
- [4] 何雅玲, 王 坤, 杜保存, 等. 聚光型太阳能热发电系统非均匀辐射能流特性及解决方法的研究进展[J]. *科学通报*, 2016, 61(30): 3208—3237.
- [4] He Yaling, Wang Kun, Du Baocun, et al. Non-uniform characteristics of solar flux distribution in the concentrating solar power systems and its corresponding solutions: A review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(30): 3208—3237.
- [5] Xu Yang, Ren Qinlong, Zheng Zhangjing, et al. Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media[J]. *Applied Energy*, 2017, 193: 84—95.
- [6] Qiu Yu, He Yaling, Cheng Zedong, et al. Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods[J]. *Applied Energy*, 2015, 146: 162—173.
- [7] Li Mengjie, Qu Yu, Li Mingjia. Cyclic thermal performance analysis of a traditional single-layered and of a novel multi-layered packed-bed molten salt thermocline tank[J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 565—578.
- [8] Wu Ming, Xu Chao, He Yaling. Cyclic behaviors of the molten-salt packed-bed thermal storage system filled with cascaded phase change material capsules[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 93: 1061—1073.
- [9] Tao Yubing, He Yaling. Effects of natural convection on latent heat storage performance of salt in a horizontal concentric tube[J]. *Applied Energy*, 2015, 143: 38—46.
- [10] Libby C. Solar thermocline storage system, 1019581, in: Preliminary design study[A]. Electric Power Research Institute[C], Palo Alto, CA, 2010, 1019581.
- [11] Pacheco J E, Showalter S K, Kolb W J. Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2002, 124(2): 153—159.
- [12] 左远志, 李熙亚. 熔融盐斜温层混合蓄热单罐系统及其实验研究[J]. *化工进展*, 2007, 26(7): 1018—1022.
- [12] Zuo Yuanzhi, Li Xiya. Scheme and experiments of a molten-salt hybrid thermocline thermal storage system[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2007, 26(7): 1018—1022.
- [13] 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: 65—75.
- [14] Xu Chao, Li Xin, Wang Zhifeng, et al. Effects of solid particle properties on the thermal performance of a packed-bed molten-salt thermocline thermal storage system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 57(1): 69—80.
- [15] Bayón R, Rojas E. Simulation of thermocline storage for solar thermal power plants: From dimensionless results to prototypes and real-size tanks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 60(1): 713—721.
- [16] Klein P, Roos T H, Sheer T J. Parametric analysis of a high temperature packed bed thermal storage design for a solar gas turbine[J]. *Solar Energy*, 2015, 118: 59—73.

HEAT STORAGE PERFORMANCE RESEARCH OF A NOVEL MULTI-LAYERED PACKED-BED THERMOCLINE TANK

Li Mengjie, Qiu Yu, He Yaling

*(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)*

Abstract: In this paper, a transient, two-dimensional, axisymmetric porous medium model was developed for analyzing the effects of thermocline thickness on the thermal performance of a packed-bed molten salt thermocline tank. Based on the model, the effects of the filler's thermal physical properties, including the heat capacity and conductivity, were investigated. And the variations of thermocline thickness and performance of tanks using five fillers were compared. Based on the above results, a novel multi-layered packed-bed molten salt thermocline tank was designed for controlling the thermocline expansion. An increase of 27.09% in useful thermal energy with a drop of 0.64% in thermal efficiency was observed in the quartzite-cast iron-high temperature concrete three-layered thermocline tank compared with that of traditional quartzite single-layered thermocline tank.

Keywords: solar energy; energy storage; thermal energy; thermocline; packed-bed thermal storage; multi-layered packed-bed thermal storage