

(20) 121-126

内纵翅片套管相变蓄热器的性能实验*

Experiments on Performance of Phase Change Accumulator with Inner Fined Casing-tube

王裕民
Wang Yuming

孙泽权 ✓
Sun Zequan

彭 岚
Pen Lan

TK513.5

(重庆大学热力工程系, 重庆, 630044)

A 摘 要 以水和结晶醋酸钠作换热和蓄热介质, 对内纵翅片套管相变蓄热器的充、放热特性进行了实验。实验结果表明: 水流速增加, 充、放热速度增加; 进口水温升高, 充热速度越快, 放热越慢。此外, 综合实验数据得到了两个有关蓄热器性能的关系式。

关键词 内纵翅片套管蓄热器; 自然对流效应; 蓄热特性; 实验
中国图书资料分类法分类号 TK513.5

相变材料

ABSTRACT This paper presents the experimental results of charge and discharge performance in phase change accumulator with inner fined casing-tube. This experiment was carried out using water and $\text{Na}_2\text{CH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ as heat transfer and accumulate media with the various velocity and inlet temperature of water. The results show that the imcrease of water volocity causes the in-crease of heat charge and discharge volocity; the higher inlet temperature of water is the faster the heat charge, but the slower the discharge. Two general correlations for heat charge and discharge are obtained according to the experimental data.

KEYWORDS accumulator with inner fined casing-tube; nature-convection effect; heat accumulate performance; experiments

0 引 言

近年来, 余热和太阳能等资源的有效利用, 迫切要求设计和发展高效率、低成本相变蓄热器。这种蓄热器是利用相变材料的相变过程来完成热能的充入和放出, 具有单位体积的蓄热量大, 蓄热过程可在基本恒定的相变温度上完成之特点。已在室温蓄热、熔盐发电和太阳能方面广泛应用^[1]。目前采用的中低温相变材料的导热性能差, 必须采用强化传热结构来体现它的优越性。以内纵翅片套管作换热面, 不仅扩大了有效换热面积, 且改变了其充热和放热方式, 是一种强化传热的换热元件。翅片管不仅有效地强化了凝固换热, 且自然对流效应存在时, 能够使凝固终止比光管发生得更晚^[2]。在众多的强化传热方法中, 纵翅片管是特别有效的^[3]。纵翅片管外的凝固或熔化速度比光管快, 传热得到强化, 还使两个过程进行得

* 收文日期 1993-12-13

更为完善。因此,内纵翅片套管相变蓄热器能充分体现各种优越性能。但,国内对它的研究尚未见诸文献。本文实验研究了它的充热和放热过程及其热力特性。

1 充、放热过程的机理

相变蓄热器的充热是利用固态相变材料加热熔化吸收大量的相变潜热,从而把外部热能贮存到相变材料中的传热过程;放热则是已熔化的液态材料放热凝固,把自身具有的大量潜热传给外部介质的过程。两个过程都是移动固—液界面的不稳定导热或自然对流过程。

经典理论认为:在熔化和凝固两过程的传热中,导热是唯一的传热途径^[3]。即充热和放热过程中热量在相变材料中都以导热的方式传入和传出。见图1左边示。由此可知,充、放热两个过程的实质性质是一致的。只是传热方向相反而已。但,近期的理论及实验结果表明,自然对流效应在两过程中起到了重要作用,且其作用是不同的,这使两过程区别明显。自然对流作用加速了熔化过程的进行,却减缓、并最终终止凝固的完善。因相变材料的自绝热特性及自然对流的影响,恶化了凝固过程的传热^[4]。熔化过程中,熔化层达到一定厚度时,因温度梯度及密度差的存在和作用,液态中必产生自然对流效应,见图1右边示。液态中的初始温度等于相变温度,且没有温度梯度时,凝固过程不产生自然对流效应,只受导热控制^[4]。但,其初始温度高于相变温度,将产生自然对流效应^[4]。

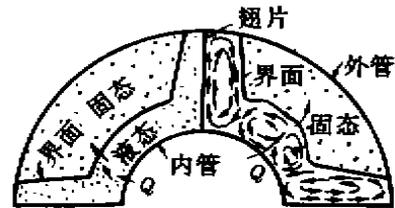


图1 导热或自然对流效应控制的充热

2 实验装置及系统

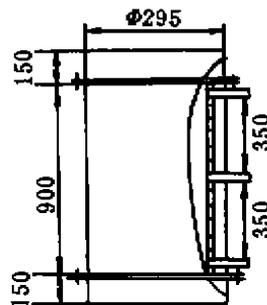


图2 内纵翅片套管相变蓄热器

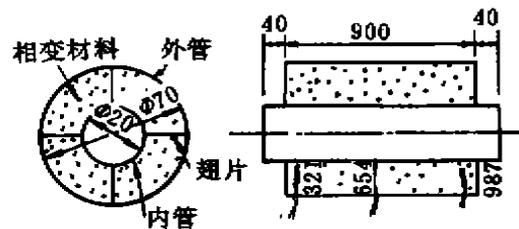


图3 内纵翅片套管结构图

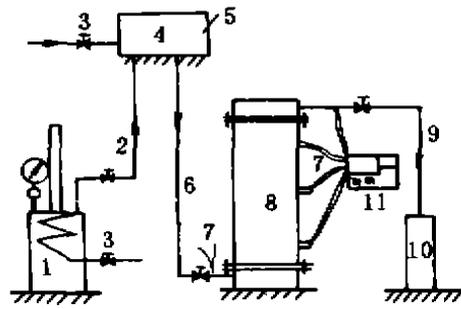
实验中以水作外部换热介质,结晶醋酸钠为蓄热材料,其热物性参数如表1示^[5]。

实验装置如图2示,其内部以90 mm 间距正方形排列四根套管;套管的结构尺寸如图3示;系统如图4示。蒸发器产生蒸汽;水箱中蒸汽和水混合成一定温度要求的水并具有恒定

表1 结晶醋酸钠的热物性参数

相变温度	$t_f/^\circ\text{C}$	56~58
相变潜热	$L/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	225
平均密度	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1450
平均比热容	$C_p/\text{kJ}(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	3.18
导热系数	$\lambda/\text{kg}(\text{m}\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{s})^{-1}$	0.75

位能；用温度采集自动记录仪及铜-康铜热电偶测试记录相变材料中各点温度和水进、出口温度的瞬时值；用桶和计时法测定水流量。相变材料中各点温度测点布置及标号见图3示。实验完成了恒定水流速变进口温度、恒定进口温度变流速下的多组正交实验。



- | | |
|---------|---------------------|
| 1. 蒸发器 | 7. 热电偶 |
| 2. 蒸汽管道 | 8. 相变蓄热器 |
| 3. 自来水管 | 9. 出水管 |
| 4. 高位水箱 | 10. 水桶 |
| 5. 温度计 | 11. 温度自动采集
测试记录仪 |
| 6. 进水管 | |

图4 实验系统布置图

3 实验数据与结果分析

3.1 无因次参数的定义

理论和实验证明：充热和放热过程受水流速 V 和进口温度 T_i 、时间 t 的共同作用，还受到相变材料和水的热物性性能参数、蓄热器的结构尺寸影响。为使实验结果能为工程设计和计算提供合理的理论依据，必须综合这些因素的影响。本文参照文献[3]定义反映 V, T_i, t 变化影响的三个无因次参数 Re, φ, τ 。用它们表示蓄热器的性能。

Re ——水的雷诺数；

φ ——充、放热无因次温差；

充热过程： $\varphi = (T_s - T_m) / (T_i - T_m)$

放热过程： $\varphi = (T_m - T_s) / (T_m - T_i)$

式中： T ——温度，(°C)

下标：

m ——相变材料；

i ——水进口；

m' ——相变材料的初始。

φ 反映了实际介质温差、水进口温度及相变材料的初始温度对充热、放热过程的影响。

τ ——充、放热过程的无因次进行时间；

充热过程：

$$\tau = \frac{a_m t}{(r_o - r_i)^2} \cdot \frac{C_m (T_s - T_m)}{L} = \frac{\lambda_m (T_s - T_m) t}{\rho_m (r_o - r_i)^2 L}$$

放热过程：

$$\tau = \frac{a_m t}{(r_o - r_i)^2} \cdot \frac{C_m (T_m - T_s)}{L} = \frac{\lambda_m (T_m - T_s) t}{\rho_m (r_o - r_i)^2 L}$$

式中 α_m ——相变材料的热扩散系数, ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
 λ_m ——相变材料导热系数, ($\text{kJ} \cdot (\text{m} \cdot \text{C} \cdot \text{s})^{-1}$);
 C_m ——相变材料比热容, ($\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{C})^{-1}$);
 t ——充、放热进行时间, (s)
 L ——相变材料的潜热值, ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

τ 表示 t 时间内单位管长上通过导热传输给蓄热材料的热量与单位管长上蓄热材料的潜热之比。 τ 既反映了 t 的变化, 又综合了相变材料的 λ, C, ρ, L 和传热温差及套管尺寸的影响。

3.2 实验结果与分析

过程初期, 相变材料与热水之间的换热温差大, 且处于显热充热阶段。因此, 图 5 曲线表明充热早期温度上升很快; 在相变温度附近, 相变材料在基本恒定的温度下吸收大量的热以完成相变过程, 曲线平坦, 温度变化小; 之后, 因温差不断减小, 自然对流效应加强, 温度上升逐渐缓慢。图中还表明放热时, 早期温度下降很快; 在相变点附近, 温度变化很小; 相变凝固后, 温度下降越来越慢。

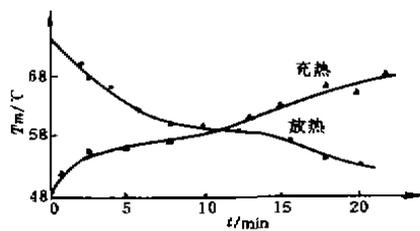


图 5 相变材料温度变化曲线

充热 $V = 0.035 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $T_i = 80^\circ\text{C}$
 放热 $V = 0.024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $T_i = 30^\circ\text{C}$

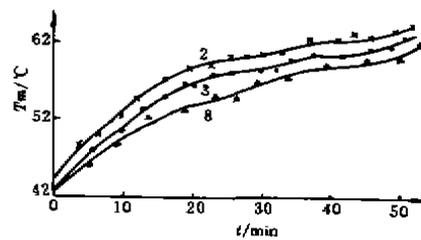


图 6 充热时相变材料径向轴向温度与时间的关系曲线

$T_i = 80^\circ\text{C}$; $V = 0.0129 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 2, 3, 8 表示测点编号

水流速 V 和进口温度 T_i 为定值时, 相变材料的径向温度变化曲线如图 6 的 2, 3 和图 7 的 7, 8 测点曲线示。它们表示径向各点温度变化趋势及规律一致。但随时间变化有一定的超前或滞后现象, 即充热时越靠近加热面的测点其温度同一时刻越高, 放热时则越低, 这些点均较早达到相变温度并发生相变过程。因这些点相变吸收了大量热量, 此时传输到径向其它点的热量小, 使其温度也几乎保持不变, 随时间增加, 各点温差越来越小。图 6 和 7 的测点 2, 8 曲线表明, 沿水流动方向, 轴向各点温度变化不同, 且沿轴向呈梯度分布, 即越靠近热水进口处的点其温度同一时刻越高, 越靠近冷水进口处的点温度越低。这些点越先产生相变过程。这是因为: 沿流动方向, 热水不断放出热量, 冷水不断吸收热量, 使自身与相变材料间换热能力减小。

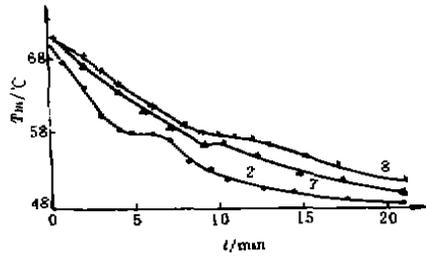


图7 放热时相变材料径轴向轴向温度变化曲线

$T_1 = 39^\circ\text{C}$; $V = 0.024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
2, 7, 8 表示测点编号

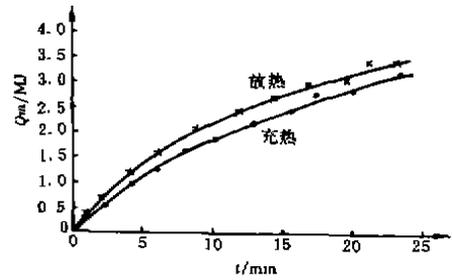


图8 充热和放热量随时间变化曲线

充热 $V = 0.073 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $T_1 = 80^\circ\text{C}$
放热 $V = 0.024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $T_1 = 30^\circ\text{C}$

充热过程早期相变材料与热水之间的换热温差大,充热能力大。相变产生后,液态相变材料层中产生了自然对流效应,这种效应总是把加热面处的热液体传输到固-液界面,使固态相变材料不断熔化吸收大量相变潜热。因此,充热前期充热量 Q_m 随时间上升很快;后期,自然对流作用虽有一定加强,但因传输距离增加和固-液界面面积减小,换热能力小。同时,传热温差减小,传热逐渐困难。故, Q_m 上升逐渐缓慢,见图8示。图中还表明放热量 Q_m 随时间的变化与充热过程有相似的变化规律,即前期 Q_m 上升快,后期 Q_m 上升缓慢。

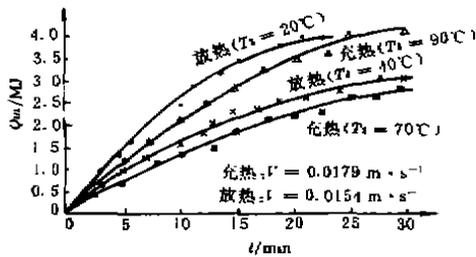


图9 相同流速,不同进口温度下 Q_m 变化曲线

充热 $V = 0.0179 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 $T_1 = 90^\circ\text{C}$ $T_1 = 70^\circ\text{C}$
放热 $V = 0.0154 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 $T_1 = 20^\circ\text{C}$ $T_1 = 40^\circ\text{C}$

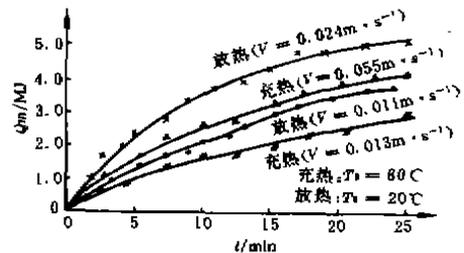


图10 相同进口温度、不同流速下 Q_m 变化曲线

充热 $V = 0.055 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 $T_1 = 80^\circ\text{C}$ $V = 0.013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
放热 $V = 0.024 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
 $T_1 = 20^\circ\text{C}$ $V = 0.011 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

根据对流换热可知,充热时如水的进口温度越高,则换热温差越大,单位时间内换热量越多。特别是存在自然对流效应时,因换热温差大使自然对流作用更强烈,充热各环节均被强化,充热量 Q_m 上升快,见图9。曲线表明: V 相同 T_1 越高,则充热量上升越快,同一时刻 Q_m 值越大;图中曲线还表明:放热时, T_1 越高,换热温差越小,自然对流作用弱,放热量 Q_m 上升越慢,同一时刻 Q_m 值越小。

在进口温度 T_1 一定时,水与管壁间的对流换热能力取决于对流换热系数 α ,且 α 又取决于雷诺数 Re ,即 V 越大 α 越大,换热能力越大。因此,同一时刻的充热量和放热量越大。图10

中的曲线表明： V 越大， Q_m 上升越快。

4 充热和放热性能关系式

实验结果与分析表明： V 、 T_i 、 t 三个参数相互影响着蓄热器的充热和放热性能。本文采用 Re 、 ϕ 、 τ 无因次参数综合大量实验数据回归得到了这三个参数对性能作用的关系式。

$$\text{充热性能关系式: } Q_m = 1.62 Re^{0.494} \cdot \phi^{-0.887} \cdot \tau^{0.841}$$

$$\text{放热性能关系式: } Q_m = 20.68 Re^{0.195} \cdot \phi^{-0.563} \cdot \tau^{0.871}$$

关系式的计算值与实验值之最大误差均小于 10%，二者吻合较好。上式表明充热和放热量 Q_m 与 Re 、 ϕ 、 τ 三者之间关系如下：

- 1) ϕ 、 τ 为定值时， Q_m 随 Re 增大而增大。即水流速 V 越大， Q_m 也越大。
- 2) Re 、 τ 为定值时， Q_m 随 ϕ 减小而增大。即充、放热过程进行到 t 时刻， ϕ 值越小说明充热和放热温度差越小，即充入和放出的热量越多；
- 3) Re 、 ϕ 为定值时， Q_m 随 τ 增大而增大。即充热或放热时间越长，充入或放出热量越多；
- 4) 充热和放热性能受传热方式的影响，三个无因次参数对两过程的作用程度明显不同。

5 结 语

1) 本文完成了内纵翅片套管相变蓄热器的充热和放热实验。重点分析了三个参数：水流速 V 和进口温度 T_i ，充热或放热时间 t 。得到了相变材料的温度和各种工况下充热和放热量与时间的变化曲线。

2) 实验结果表明：三个参数是通过影响水与管壁间的换热以及相变材料中的导热和自然对流来影响两个过程的。水进口温度 T_i 恒定时，其流速 V 越大，则充热或放热量 Q_m 随时间上升越快； V 恒定时， T_i 越高，充热进行越快，放热越慢。 V 和 T_i 都为定值时，充热和放热早期， Q_m 随时间上升快。后期上升逐渐缓慢。

3) 无因次参数 Re 、 ϕ 、 τ 既反映 V 、 T_i 和 t 变化，又反映热物性及蓄热器结构尺寸影响，回归得到的具有实用性的两个性能关系式，正确合理地反映了三个参数的影响，为工程设计此种蓄热器提供了合理的理论依据。

参 考 文 献

- 1 付丰, 陈之航. 相变潜热蓄热. 能源研究信息, 1991, 3(3), 2
- 2 Sparrow E M, Larson E D, Ramsey J W. Freezing on a finned tube for either conduction-controlled or Nature-convection-controlled Heat transfer, Int. J. Heat Mass Transfer, 1991, 24(2), 2, 4
- 3 Kengo Sasaguchi et al. Effect of Nature-convection on Melting of a phase change Material around a finned tube. Heat Transfer, 1990, 8(5), 3
- 4 王超, 王启杰等. 相变储热装置中凝固换热的强化, 太阳能学报, 1992, Apr 13(2), 4
- 5 Fernanda Coen Porisini, Salt Hydrate used for Latent Heat Storage, Corrosion of Metals and Reliability of Thermal Performance, Solar Energy, 1989, 41(2), 5