

蓄热器放热规律的实验研究

石文卿 陈世意 (江苏化工学院)

孙泽权 (重庆大学)

【摘要】 本文对蓄热器的放热规律进行了实验研究,提出了蓄热器放热特性的数值计算方法。根据此方法,分析了蒸发速率等特性变化规律,发现蒸发速率不一定随压力降低而单调下降,显示出与前人不同的规律。对此现象进行了分析,指出当蓄热器结构特性一定时,蒸发速率取决于放热时压降速度和当时的热力状态。实验所得出的规律与数值解相吻合。最后还进行了数学论证。

关键词 蓄热器 蒸发速率 汽空间

符号

G : 质量 V : 体积 D : 蒸发量 E : 内能 ρ : 密度 W : 重量蒸发强度
 τ : 时间 φ : 充水系数 H_y : 水位高度 i : 焓 P : 压力

1 前言

随着经济建设的发展,蓄热器用于化学工业,冶金工业的余热利用越来越普遍。但对蓄热器的充、放热过程及设计研究还很不充分,本文结合作者所从事的实际工程,进行了大量的实验研究。

蓄热器的放热过程是一降压自蒸发过程,随着压力的降低,其内部饱和水便不断释放出蒸汽,为了保证供汽品质,为了检验蓄热器工作情况是否正常,运行是否经济,放热速率是否跟得上用户需要等,都要求对蓄热器放热规律有较深入的研究。蓄热器放热规律与锅炉汽包放热规律有着本质区别,沿用汽包的放热规律来分析蓄热器是欠妥的。前人^[1]对放热过程作了一些动态曲线,分析了蒸汽带水与蒸发强度、汽空间高度之间的关系。但蒸发强度本身变化规律如何?目前文献检索结果未见这方面研究报告。本

实验经多工况测定发现蒸发速率不随压力降低而单调下降,显示出与前人实验不同的规律。实验所得结论与数值解结果相吻合。

2 实验的理论依据

由于热力学状态参数之间的相互依存关系,决定了蓄热器的蒸发速率,压降速率之间的内在联系,可以在局部实验基础上进行理论分析,则可用较易测准的状态参数来计算蓄热器其它特性。当蓄热器结构特性一定时,其内部热特性便由运行方式所决定,即由用户的用汽要求所决定。假定蓄热器从压力 P_1 放热至任意压力 P ,汽相为干饱和蒸汽,则有下列质量和能量方程组:

$$G_1 - G_p = \Delta G \quad (1)$$

$$E_1 - E_p = \int_0^1 i_j'' dG, j \in [p_2, p_1] \quad (2)$$

由于蓄热器运行时,在其工作压差范围内,蒸汽焓值变化不大,可将方程(2)简化为:

收稿日期 1991-05-10

修改定稿 1991-07-21

本文联系人 石文卿 男 52 副教授 213016 江苏常州 江苏化工学院热能工程教研室

$$E_i - E_p = \Delta G i_a \quad (3)$$

其中 $i_a = \frac{1}{2} (i_1'' + i_p'')$

尽管蒸发是一非稳态过程，但热力状态参数与过程无关，从这可得如下补充方程组：

$$E_i = V_1' \gamma_1' i_1' + (V - V_1') i'' \gamma_p'' - p_1 V \quad (4)$$

$$E_p = V_1' \gamma_p' i_p' + (V - V_p') i_p'' \gamma_p'' - p_p V \quad (5)$$

$$G_1 = V_1' \gamma_1' + (V - V_1') \gamma_1'' \quad (6)$$

$$G_p = V_p' \gamma_p' + (V - V_p') \gamma_p'' \quad (7)$$

$$V_1' = \varphi V \quad (8)$$

本文选用压力曲线 $P(\tau)$ 作为实验曲线，其它特性曲线则可根据压力曲线计算。解上述方程组可以求得任意压力下蓄热器内饱和水的容积：

$$V_p' = \frac{\varphi V (\gamma_1' i_a + \gamma_1'' i_1'' - \gamma_1'' i_a - \gamma_1' i_1')}{\gamma_p' (i_a - i_p) - \gamma_p'' (i_a - i_p'')} - \frac{V (i_1'' \gamma_1'' + \gamma_p'' i_a - i_p'' \gamma_p'' - \gamma_1'' i_a) - V (p_1 - p_p)}{\gamma_p' (i_a - i_p) - \gamma_p'' (i_a - i_p'')} \quad (9)$$

方程右端为压力函数，则令其为 $U[P(\tau)]$ ，式 (9) 可写为：

$$V_p' = U[p(\tau)] \quad (10)$$

蓄热器内饱和水容积的几何方程可表示为：

$$V_p' = f(H_y) \quad (11)$$

联立解式 (10) 与 (11) 可得：

$$H_y = f^{-1}\{U[p(\tau)]\} \quad (12)$$

汽空间容积：

$$V_p'' = V - V_p'$$

放热速率 $D(\tau)$ ：式 (7) 给出了任意压力下蓄热器内部的汽、水总质量，则放热速率

$$D(\tau) = - \frac{dG_p}{d\tau} = - \frac{dG_p}{dp} \cdot \frac{dp}{d\tau} \quad (13)$$

将 $P(\tau)$ 曲线代入上式即可进行数值求解，利用向后差分法求解式 (13)：

$$D(\tau_i) = - \frac{G_p(\tau_i + \Delta\tau) - G_p(\tau_i)}{\Delta\tau} = \frac{G_p(P_i + \Delta P) - G_p(p_i)}{\Delta P} \times \frac{P(\tau_i + \Delta\tau) - P(\tau_i)}{\Delta\tau}$$

蒸发强度 $W(\tau)$ ：

$$W(\tau) = \frac{D(\tau)}{V_p''} = - \frac{1}{V_p''} \frac{dG_p}{dp} \times \frac{dp}{d\tau} \quad (14)$$

3 实验与装置

在蓄热器实验中，影响蒸发强度的因素较多，但主要因素是蓄热器汽空间与蒸发面积，以汽空间影响最显著。所以实验将蓄热器立式布置，以获得较大的汽空间范围。实验装置简图如图 1 所示。

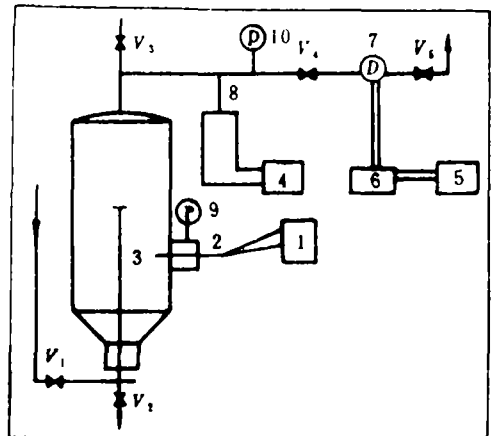


图 1 实验装置示意图

- 1, 4. 电桥 2, 8. 热电阻温度计 3. 充汽管
- 5. 记录仪 6. 差压变送器 7. 流量计
- 9, 10. 压力表 V_1 . 进汽阀 V_2 . 排水阀
- V_3 . 排汽阀进水阀 V_4 . 放汽阀 V_5 . 开度调节阀

实验汽源为锅炉房饱和蒸汽，压力可达 0.8 MPa (绝)， $\phi 25$ 的充汽管伸入蓄热器的水空间充汽，充汽管上钻有 $\phi 5$ 的小孔，沿周向 120° 分布，垂直方向上节距 50 mm，错列，

以便使器内温度分布均匀。充汽管下端兼作排水管。蓄热器直径0.5 m，总高1.25 m，承压能力1.6 MPa。实验装置搭成后，试压无泄漏，安全可靠。实验前用90~100℃水充入蓄热器以减少冲击，充汽过程中，先打开排汽阀，待水沸腾后排出器内空气，关闭排汽阀，加热到预定压力，测得此时压力与相应饱和温度，绝对误差（多次的平均值）为1.32℃，故可认为初始状态达到饱和，初始状态可靠。根据理论分析及实验目的要求，实验待测参数有蓄热器内部压力、温度、初始状态水位高度和蒸汽流量，分别由经校验合格的仪器测量记录。

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

本实验作了三类工况测试：（1）蓄热器初压、初水位一定时，不同阀开度；（2）蓄热器初压和阀开度一定时，不同的初水位；（3）蓄热器初水位和阀开度一定时，不同初压。实验结果分别如图2~6所示。

4.1.1 当蓄热器压力升至一个定值时，打开开放汽阀，器内压力陡降，十多秒后压力有所回升，在此之后压力几乎平稳下降。由于记录仪器限制未能记下回升波形。放压初期压力波动现象即是蓄热器的“时滞”。当放汽阀打开时，器内汽空间蒸汽立即外排，因而蓄热器内压力陡降，此时水空间内汽泡正在产生、长大和上升，此过程需时间，即为“时滞”。“时滞”后期，大量汽泡升至汽空间，压力有所回升。由于器内壁粗糙，还有充热管存在，核化不均匀，汽泡可连续产生，故“时滞”期后压力下降是平稳的。

4.1.2 阀开度大时，压降速度是递减的（图2）。

4.1.3 充水系数 φ 小时，压降速度大（图3）。从式（13）可知蒸发速度正比于压降速度，为了获得较大的蒸发速率，以适应用

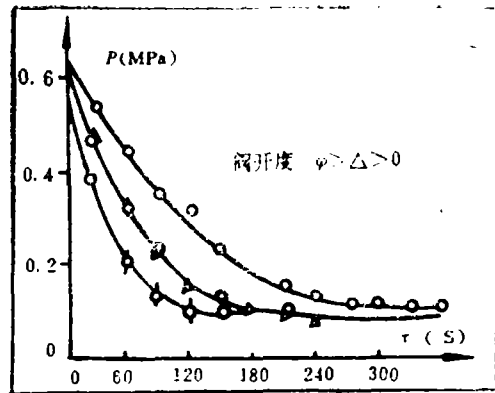


图 2 不同阀开度下的压降曲线

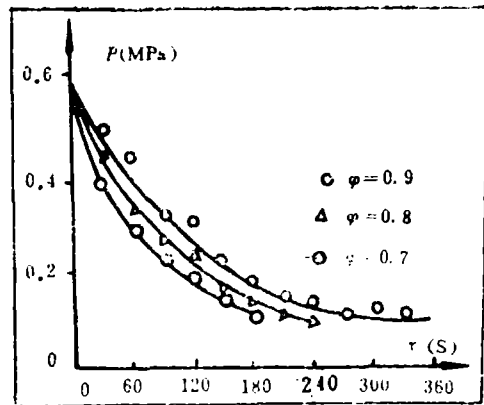


图 3 不同充水系数下的压降曲线

户高峰用汽需要，应保证一定的汽空间高度。

4.1.4 过热度是波动的（图4）。说明被测点蒸发是间隙性的。当过热度增加到一定程度时，第一批汽泡产生并逸出，液体的过热度随之下降，至过热度不足。但随着压力下降，过热度又积累到第二批汽泡产生。压力曲线末呈现波动，是液体各处汽泡形成产生条件之差别，因而总体蒸发是连续的。

4.1.5 初始压力对压降速度影响较小，从图5看出，初压为0.65 MPa与初压0.5 MPa放热过程基本相同

4.1.6 阀开度一定时，蒸发速率不是随蓄热器压力下降而单调减小，而是呈现出一

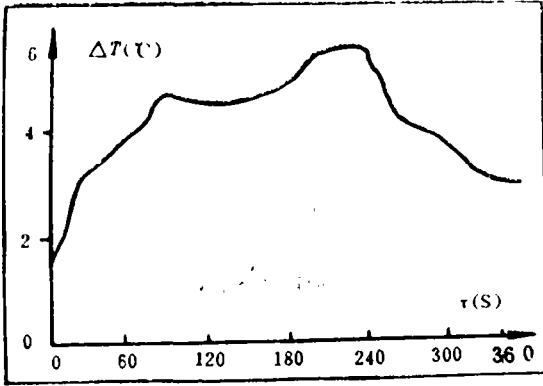


图 4 过热度曲线

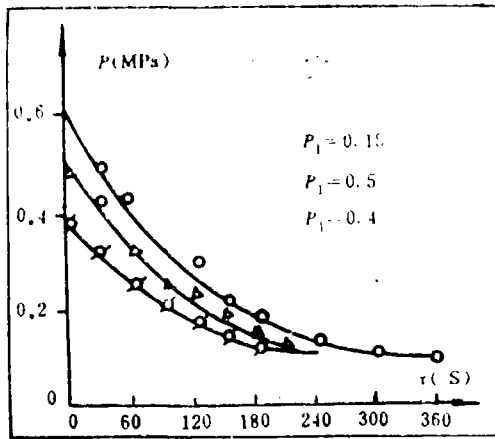


图 5 不同初压下的压降曲线

个峰值(图6)。阀开度大(压降速度大)时曲线左移。后面的理论解与此规律相同(图7)。

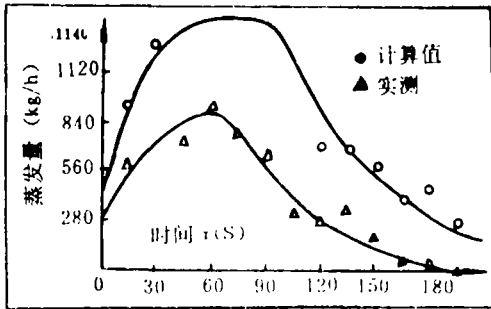


图 6 蒸发速率曲线

4.2 理论分析

从实验(图6)与理论计算(图7)中可得出结论为蒸发速率不是随压力的降低而单

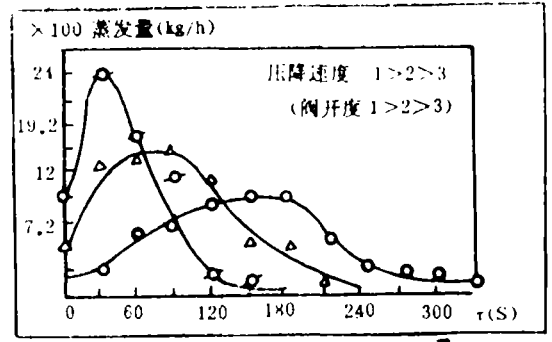


图 7 压降速率对蒸发速率的影响(计算值)

调下降,而是存在一个峰值,且压降速度大时曲线左移。此现象未见文献报导过。我们认为此结论对指导蓄热器的正确设计与运转有重要意义。事实上非单调下降现象是可以解释的,并可用数学方法论证。将式(13)对时间微分可得:

$$\frac{dD}{d\tau} = -\frac{d}{d\tau} \left(\frac{dG_p}{dp} \cdot \frac{dp}{d\tau} \right) \quad (15)$$

$$\frac{dD}{d\tau} = - \left[\left(\frac{dp}{d\tau} \right)^2 \frac{d^2 G_p}{dp^2} + \frac{dG_p}{dp} \times \frac{d^2 p}{d\tau^2} \right] \quad (16)$$

由图8可知曲线上凸,故:

$$-\frac{dG_p}{dp} > 0 \quad \frac{d^2 G_p}{dp^2} > 0 \quad (17)$$

由图2可知 $-\frac{d^2 p}{d\tau^2} > 0 \therefore \left(\frac{dp}{d\tau} \right)^2 \frac{d^2 G_p}{dp^2} < 0$

$$-\frac{dG_p}{dp} \cdot \frac{d^2 p}{d\tau^2} > 0 \quad (18)$$

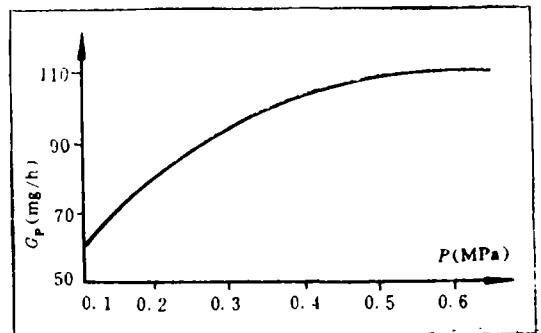


图 8 G_p-p关系曲线

故 $\frac{dp}{d\tau}$ 可正可负。

若 $\frac{dD}{d\tau} > 0$

(1) 存在拐点时, $D(\tau)$ 在拐点前递增如图6和7图所示。

(2) 不存在拐点时, $D(\tau)$ 在整个放热期间单调递增, 该工况在工程上难以实现, 但在理论上是有意义的。如 $\frac{dp}{d\tau} = -m$

($m > 0$) 对应的 $D(\tau)$ 属于这种情况。

若 $\frac{dD}{d\tau} = 0$: 蒸发量达到最大值, 相对应于拐点处。

若 $\frac{dD}{d\tau} < 0$

(1) 存在拐点时, $D(\tau)$ 在拐点后下降 (图6、7)。

(2) 不存在拐点时, $D(\tau)$ 在整个放热期间单调下降。

拐点的位置分析:

$$\text{令 } \frac{dD}{d\tau} = -\frac{d^2G_p}{d\tau^2} = 0 \quad (19)$$

求解得 $G_p(p) = G\tau + C_2$, 积分常数 $C_1 > 0$, $C_2 > 0$ 。

$C_2 = G_p|_{\tau=0} = G_p(P_1)$, 即初始状态时汽水总质量

$$\begin{aligned} C_1 & \Big| = \frac{C_2}{\tau_2} \Big|_{G_p} = G_p(P_2) \\ & = \frac{G_p(p_1) - G_p(p_2)}{\tau_2} \end{aligned} \quad (20)$$

τ_2 : 为放热过程的总时间;

P_2 : 放热终了时压力。

$$\text{令 } g(\tau) = -C_1\tau + C_2,$$

$$\text{则 } G_p[P(\tau)] = g(\tau) \quad (21)$$

对于某一压力曲线 $P(\tau)$, 解此方程可求出拐点的位置, 因 $G_p(\tau)$ 是减函数, 而

$$\frac{dD}{d\tau} = -\frac{d^2G}{d\tau^2}$$

则 $\frac{dD}{d\tau} > 0$ 时, $G_p(\tau)$ 上凸;

$\frac{dD}{d\tau} < 0$ 时, $G_p(\tau)$ 下凹;

$\frac{dD}{d\tau} = 0$ 时, $G_p(\tau)$ 在 $\tau = \tau_{c,r}$ 处为拐点。

拐点位置示意图如图9所示。

从图9可以看出 (1) 在 $0 \rightarrow \tau_2$ 区间若有 $\frac{dD}{d\tau} < 0$, 则 $G_p(\tau)$ 在 $0 \rightarrow \tau_2$ 内无拐点, 曲线

下凹, 如图中曲线1, $G_p[P(\tau)]$ 与 $g(\tau)$ 无交点, 方程式 (21) 无解。 $D(\tau)$ 在 $0 \rightarrow \tau_2$ 内单调下降, 这便是文献[1]作的工况。 (2) 在

$0 \rightarrow \tau_2$ 间, 有 $\frac{dD}{d\tau} > 0$, 则 $G_p(\tau)$ 在 $0 \rightarrow \tau_2$ 间

无拐点, 曲线上凸, 如图9曲线2, 此时 $G_p[P(\tau)]$ 与 $g(\tau)$ 无交点, 方程式 (21) 无解,

$D(\tau)$ 在 $0 \rightarrow \tau_2$ 间单调上升, $-\frac{dD}{d\tau} = -m$ ($m >$

0) 对应的 $D(\tau)$ 曲线为其中一例。 (3) 在

$0 \rightarrow \tau_2$ 间, 若 $\frac{dD}{d\tau}$ 从正变到负, 即 $D(\tau)$ 存在

极值点时, $G_p(\tau)$ 在 $0 \rightarrow \tau_2$ 间先上凸后下凹, 方程式 (21) 有解, $G_p[P(\tau)]$ 与 $g(\tau)$ 交于拐点 $\tau_{c,r}$, 拐点处即是 $D(\tau)$ 的转变点, 如图9中曲线3, 这就是本实验工况。

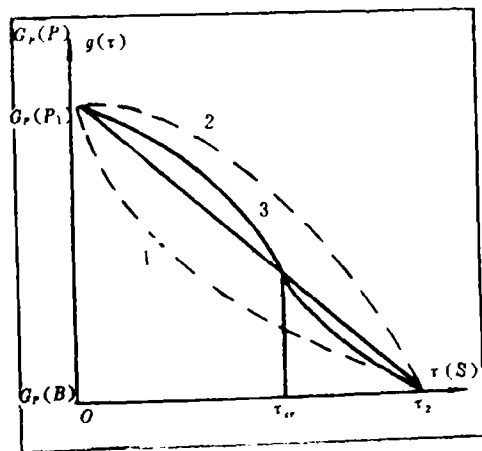


图 9 拐点位置示意图

5 结 论

蓄热器的放热速率取决于压降速度和当时的热力状态,放热速率不一定随压力降低而单调下降。压降速率较小时,可存在 $D(\tau)$ 的拐点。蓄热器结构特性及初始状态一定时,拐点位置取决于压降速度。弄清蓄热器放热规律,对正确的设计与蓄热器运行有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Norman price. Steam accumulator provide uniform loads on boilers. *Chemical engineering*, 1982, 15: 131-135
- 2 陈之航等. 蒸汽蓄热器放热过程蒸汽带水规律研究. *上海机械学院学报*, 1985, 3
- 3 前天利春. アキユムレータ. *日刊工业新闻社*, 1975
- 4 蓄热器译文集. 上海机械学院出版, 1984

An Experimental Study of Heat Accumulator Heat Release Rate

Shi Wenqing, Chen Shiyi

(Jiangsu Chemical Engineering Institute)

Sun Zhequan

(Zhongqing University)

Abstract

This paper deals with an experimental study of the heat release rate of a heat accumulator and presents a numerical method for calculating its heat release characteristics. Based on the said method, an analysis is made of the variation relationship of evaporation rate and other characteristics. It is found that the evaporation rate does not unequivocally decrease with the decrease in pressure drop. A detailed analysis of the newly discovered phenomenon leads one to suggest that, under definite construction characteristics of an accumulator, the evaporation rate shall be dependent on the pressure drop speed during heat release and the thermal state existing at that time. The results obtained through the tests have been found to be in good agreement with those of a numerical solution. The paper ends with a corroboration of the above by mathematical means.

Key words: *heat accumulator, evaporation rate, steam space*