

# QB

## 中华人民共和国行业标准

QB/T 1927、1928—93

---

### 制浆造纸设备能量平衡及 热效率计算方法

1994—01—06 发布

1994—08—01 实施

---

中华人民共和国轻工业部 发布

## 中华人民共和国行业标准

QB/T 1927.2-93

## 酸法蒸煮锅能量平衡及热效率计算方法

## 1 主题内容与适用范围

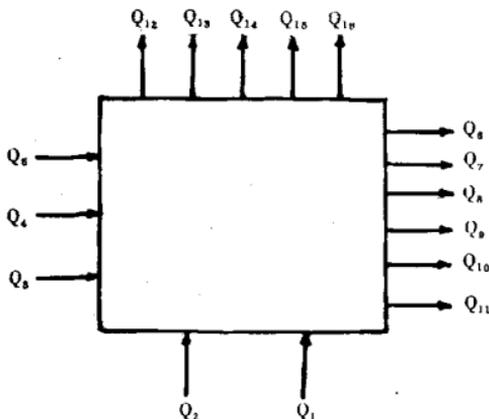
本标准规定了制浆造纸企业酸法蒸煮锅能量平衡和热效率计算方法。

本计算方法适用于制浆造纸企业以木材和非木材(指芦苇、芒秆、竹子、蔗渣等)为原料,用酸法制浆的蒸煮锅的能量平衡及热效率测试计算。

## 2 引用标准

QB/T 1927.1 制浆造纸企业设备能量平衡计算方法通则

## 3 能量平衡方框图



3.1 能量平衡方框图的体系从进入蒸煮的蒸汽流量表开始至放锅止(以1个蒸煮锅为体系)。

3.2 图中符号均以每蒸煮一锅浆的热量计,它们是:

- $Q_1$ ——直接加热蒸煮液供给的热量,kJ;
- $Q_2$ ——间接加热蒸煮液供给的热量,kJ;
- $Q_3$ ——蒸煮液带入蒸煮锅内的热量,kJ;
- $Q_4$ ——装锅时,原料具有的热量,kJ;
- $Q_5$ ——装锅时,原料中水分具有的热量,kJ;

- $Q_6$ ——加热绝干原料用的热量, kJ;  
 $Q_7$ ——加热原料中水分用的热量, kJ;  
 $Q_8$ ——小放汽(小瓦斯)回收热量, kJ;  
 $Q_9$ ——从蒸煮锅内移出作下锅次蒸煮回用的蒸煮液带出的热量, kJ;  
 $Q_{10}$ ——大放汽回收热量, kJ;  
 $Q_{11}$ ——加热蒸煮液耗热量, kJ;  
 $Q_{12}$ ——蒸煮锅体加热耗用的热量, kJ;  
 $Q_{13}$ ——蒸煮锅体散热损失的热量, kJ;  
 $Q_{14}$ ——蒸煮锅管道及附属设备热损失, kJ;  
 $Q_{15}$ ——间接加热蒸煮液蒸汽凝结水热损失, kJ;  
 $Q_{16}$ ——蒸煮锅其他热损失, kJ。

3.3 本方框图所标明的各项热量,是根据一般酸法蒸煮锅设备及生产工艺划分确定,如被测对象与上述情况有异,则各项热量的划分应按实际情况进行确定。

#### 4 能量平衡及设备热效率计算

4.1 热效率测试数据(根据测试数字列表)。

4.2 每蒸煮一锅实际供给总热量  $Q_{GG}$ , kJ, 按(1)式计算

$$Q_{GG} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \dots \dots \dots (1)$$

4.2.1 每锅直接加热蒸煮液供给的热量  $Q_1$ , kJ, 按(2)式计算

$$Q_1 = D_1 (i_1 - i_2) \dots \dots \dots (2)$$

式中:  $D_1$ ——直接加热蒸煮液所耗用的蒸汽量, kg;

$i_1$ ——蒸汽的焓值, kJ/kg;

$i_2$ ——环境温度下水的焓, kJ/kg。

4.2.2 每锅间接加热蒸煮液供给的热量  $Q_2$ , kJ, 按(3)式计算

$$Q_2 = D_2 (i_1 - i_2) \dots \dots \dots (3)$$

式中:  $D_2$ ——间接加热蒸煮液所耗用的蒸汽量, kg。

4.2.3 每锅由蒸煮液带入蒸煮锅内的热量  $Q_3$ , kJ, 按(4)式计算

$$Q_3 = G_1 \cdot c_1 (t_1 - t_0) \dots \dots \dots (4)$$

式中:  $G_1$ ——装锅时加入蒸煮锅的总蒸煮液重量, kg;

$c_1$ ——蒸煮液的比热, kJ/(kg·K);

$t_1$ ——蒸煮液开始温度(入锅前未加热蒸煮液温度), °C;

$t_0$ ——周围环境温度, °C。

4.2.4 装锅时由一锅纤维原料带入的热量  $Q_4$ , kJ, 按(5)式计算

$$Q_4 = G_2 \cdot c_2 (t_2 - t_0) \dots \dots \dots (5)$$

式中:  $G_2$ ——每锅次装绝干原料的重量, kg;

$c_2$ ——原料的比热, kJ/(kg·K);

$t_2$ ——装锅时原料具有的温度, °C。

4.2.5 装锅时一锅原料中水分具有的热量  $Q_5$ , kJ, 按(6)式计算

$$Q_5 = G_3 \cdot c_3 \cdot (t_3 - t_0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:  $G_3$ ——每锅原料中所含水分的重量, kg;

$c_3$ ——水的比热, kJ/(kg·K)。

4.3 每蒸煮一锅有效耗热总量  $Q_{yx}$ , kJ, 按(7)式计算

$$Q_{yx} = Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} \quad \dots\dots\dots (7)$$

4.3.1 加热绝干原料一锅用的热量  $Q_6$ , kJ, 按(8)式计算

$$Q_6 = G_2 \cdot c_2 \cdot (t_3 - t_2) \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:  $t_3$ ——蒸煮最高温度, °C。

4.3.2 加热一锅原料中水分用的热量  $Q_7$ , kJ, 按(9)式计算

$$Q_7 = G_3 \cdot c_3 \cdot (t_3 - t_2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

4.3.3 一锅小放汽回收热量  $Q_8$ , kJ, 按(10)式计算

$$Q_8 = G_4 \cdot c_4 \cdot (t_4 - t_5) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:  $G_4$ ——小放汽(小瓦斯)回收量, kg;

$c_4$ ——小瓦斯的比热, kJ/(kg·K)

$t_4$ ——放小瓦斯前后锅内的平均温度, °C;

$t_5$ ——高压回收锅内的实际温度, °C。

4.3.4 从一锅内移出作下次蒸煮回用的蒸煮液带出的热量  $Q_9$ , kJ, 按(11)式计算

$$Q_9 = G_5 \cdot c_1 \cdot (t_6 - t_5) \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:  $G_5$ ——从蒸煮锅内移出作下次蒸煮回用的蒸煮液量, kg;

$t_6$ ——回收蒸煮液的平均温度, °C。

4.3.5 每锅大放汽回收热量  $Q_{10}$ , kJ, 按(12)式计算

$$Q_{10} = G_6 \cdot (i_3 - i_4) \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:  $G_6$ ——大放汽回收量, kg;

$i_3$ ——大放汽在平均压力、温度下的热焓, kJ/kg;

$i_4$ ——回收完后低压回收锅内液体的焓, kJ/kg。

4.3.6 加热每锅蒸煮液耗热量  $Q_{11}$ , kJ, 按(13)式计算

$$Q_{11} = (G_1 - G_4 - G_5) \cdot c_1 \cdot (t_6 - t_1) + (G_1 - G_4 - G_5 - G_6) \cdot c_1 \cdot (t_3 - t_6) \quad \dots\dots\dots (13)$$

4.4 每蒸煮一锅总热损失  $Q_{ss}$ , kJ, 按(14)式计算

$$Q_{ss} = Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15} + Q_{16} \quad \dots\dots\dots (14)$$

4.4.1 每蒸煮锅体加热耗用的热量  $Q_{12}$ , kJ, 按(15)式计算

$$Q_{12} = Q_{12a} + Q_{12b} + Q_{12c} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:  $Q_{12a}$ ——锅体钢板加热耗用的热量, kJ;

$Q_{12b}$ ——锅体保温层加热耗用的热量, kJ;

$Q_{12c}$ ——锅体砖衬加热耗用的热量, kJ。

4.4.1.1  $Q_{12a} = G_7 \cdot c_5 \cdot (t'_{\text{锅}} - t_{\text{锅}}) \quad \dots\dots\dots (15a)$ 

式中:  $G_7$ ——锅体钢板的总重量, kg;

$c_5$ ——钢板的比热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$t'_{\text{钢}}$ ——钢板在蒸煮过程中达到的最高温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{钢}}$ ——钢板在蒸煮过程中达到的最低温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

4.4.1.2 
$$Q_{12b} = G_8 \cdot c_6 (t'_{\text{层}} - t_{\text{层}}) \dots\dots\dots (15b)$$

式中:  $G_8$ ——锅体保温层的总重量,  $\text{kg}$ ;

$c_6$ ——保温层材料的比热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$t'_{\text{层}}$ ——保温层在蒸煮过程中达到的最高温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{层}}$ ——保温层在蒸煮过程中达到的最低温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

4.4.1.3 
$$Q_{12c} = G_9 \cdot c_7 (t'_{\text{砖}} - t_{\text{砖}}) \dots\dots\dots (15c)$$

式中:  $G_9$ ——锅体砖衬的总重量,  $\text{kg}$ ;

$c_7$ ——砖衬材料的比热,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$t'_{\text{砖}}$ ——砖衬在蒸煮过程中达到的最高温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{砖}}$ ——砖衬在蒸煮过程中达到的最低温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

4.4.2 每个蒸煮锅体散热损失的热量  $Q_{13}$ ,  $\text{kJ}$ , 按(16)式计算

$$Q_{13} = Q_{13a} + Q_{13b} + Q_{13c} \dots\dots\dots (16)$$

式中:  $Q_{13a}$ ——蒸煮升温阶段锅体散热损失热量,  $\text{kJ}$ ;

$Q_{13b}$ ——蒸煮保温阶段锅体散热损失热量,  $\text{kJ}$ ;

$Q_{13c}$ ——蒸煮最高保持温度后至放锅前锅体散热损失热量,  $\text{kJ}$ 。

4.4.2.1 
$$Q_{13a} = F \cdot K \left( \frac{t_3 + t_1}{2} - t_0 \right) \cdot Z_n \dots\dots\dots (16a)$$

式中:  $F$ ——蒸煮锅体总表面积,  $\text{m}^2$ ;

$K$ ——传热系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ 。

注: 为便于计算本标准的传热系数, 没有用“SI”单位, 即  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ , 如有要求, 可按  $1\text{W} = 3.5965\text{kJ}/\text{h}$  进行换算。

$Z_n$ ——蒸煮升温时间,  $\text{h}$ 。

传热系数  $K$  的计算如下:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{钢}}}{\lambda_{\text{钢}}} + \frac{\delta_{\text{钢}}}{\lambda_{\text{钢}}} + \frac{\delta_{\text{层}}}{\lambda_{\text{层}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$$

式中:  $\delta_{\text{钢}}$ ——锅体钢板的厚度,  $\text{m}$ ;

$\delta_{\text{层}}$ ——锅体保温层的厚度,  $\text{m}$ ;

$\delta_{\text{砖}}$ ——锅体砖衬的厚度,  $\text{m}$ ;

$\lambda_{\text{钢}}$ ——锅体钢板的导热系数,  $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ ;

$\lambda_{\text{层}}$ ——锅体保温层的导热系数,  $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ ;

$\lambda_{\text{砖}}$ ——锅体砖衬的导热系数,  $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ ;

$\alpha_1$ ——锅内蒸煮物对锅内壁的换热系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ ;

$\alpha_2$ ——锅外壁对外界的换热系数且有  $\alpha_2 = \alpha_c + \alpha_r$

式中:  $\alpha_c$ ——对流换热系数;

$\alpha_r$ ——辐射换热系数。

计算公式：
$$\alpha_c = 9.211 \times \sqrt{\theta_2 - t_0} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$$

式中： $\theta_2$ ——锅外壁的平均温度，℃。

计算公式：
$$\alpha_r = 4.1868 \times C \times C', \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$$

式中：C——温度系数；

$$C = \frac{\left(\frac{273 + \theta_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 + t_0}{100}\right)^4}{\theta_2 - t_0}$$

$C'$ ——辐射系数。

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_D}$$

式中： $C_A$ ——无光泽铁板的辐射系数 4.4；

$C_B$ ——砖衬的辐射系数 4.3；

$C_D$ ——完全黑体辐射系数 4.7。

4.4.2.2 
$$Q_{13b} = F \cdot K(t_7 - t_0) \cdot Z_b \dots\dots\dots (16b)$$

式中： $t_7$ ——蒸煮保温阶段平均温度，℃；

$Z_b$ ——保持保温时间，h。

4.4.2.3 
$$Q_{13c} = F \cdot K(t_8 - t_0) \cdot Z_c \dots\dots\dots (16c)$$

式中： $t_8$ ——大放汽期间蒸煮锅内的平均温度，℃；

$Z_c$ ——大放汽用的时间，h。

4.4.3 蒸煮锅管道及附属设备热损失  $Q_{14}$ ，kJ，按(17)式计算

$$Q_{14} = 0.04Q_{yx} \dots\dots\dots (17)$$

$Q_{14}$ 为蒸煮锅管道及附属设备(如循环泵、加热器、预热器等)热损失，亦包括加热损失和散热损失两部分，可分别进行计算，计算困难时，可进行估算，取该项热损失为蒸煮有效热总量  $Q_{yx}$  的 4%。

4.4.4 间接加热—锅蒸煮液蒸汽凝结水热损失  $Q_{15}$ ，kJ，按(18)式计算

$$Q_{15} = D_2(i_5 - i_2) \dots\dots\dots (18)$$

式中： $i_5$ ——间接加热蒸汽凝结水的焓值，kJ/kg。

4.4.5  $Q_{16}$ ，蒸煮锅其他热损失，包括蒸汽的泄漏损失，大放汽、小放汽时的热损失，蒸煮液移出热损失等，可视具体情况进行计算或估算，亦可用反算法求得，按(19)式计算

$$Q_{16} = Q_{GG} - Q_{yx} - (Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15}) \dots\dots\dots (19)$$

## 5 蒸煮锅热效率

5.1 正平衡热效率  $\eta_{正}$ ，%，按(20)式计算

$$\eta_{正} = \frac{Q_{yx}}{Q_{GG}} \times 100\% \dots\dots\dots (20)$$

5.2 反平衡热效率  $\eta_{反}$ ，%，按(21)式计算

$$\eta_{反} = \left(1 - \frac{Q_{散}}{Q_{GG}}\right) \times 100\% \dots\dots\dots (21)$$

5.3 蒸煮有效单位(千克浆)耗热量  $Q'_{yx}$

$$Q'_{yx} = \frac{Q_{yx}}{G'}, \text{kJ/kg 风干浆} \dots\dots\dots (22)$$

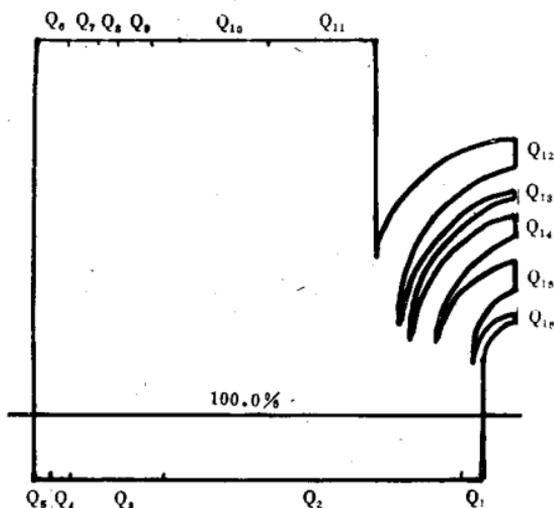
式中:  $G'$  —— 每锅浆实际收获量, kg 风干浆。

6 能量平衡表(表格式)

能量平衡表(根据测试及计算结果画表)

序号	输入 能量			输出 能量		
	项目	数量	%	项目	数量	%
1						
2						
3						
	合计		100	合计		100

7 能量流向图



附录 A

蒸煮锅能量平衡及设备热效率计算实例

(参考件)

某纸厂对具有耐酸砖衬里的蒸煮锅(亚硫酸钙盐蒸煮马尾松木浆)进行能量平衡测试取得数据,并计算如下。

A1 每蒸煮一锅实际供给总热量  $Q_{GG}$ , kJ

$$Q_{GG} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad \text{kJ}$$

A1.1  $Q_1 = D_1 \cdot (i_1 - i_2) \quad \text{kJ}$

式中:  $D_1$ ——直接加热蒸煮液所耗用的蒸汽量,因无直接加热用汽,故  $D_1 = 0$   
 $\therefore Q_1 = 0$

A1.2  $Q_2 = D_2 \cdot (i_1 - i_2) \quad \text{kJ}$

式中:  $D_2$ ——间接加热蒸煮液所耗用的蒸汽量, kg;

a. 药液加热期间,供汽量 4000kg,热焓 2906kJ/kg (测定);

b. 第一次升温期间供汽量 8800kg,热焓 2944kJ/kg (测定);

c. 第二次升温期间供汽量 4000kg,热焓 2854kJ/kg (测定);

$i_2$ ——环境温度下水的焓 80kJ/kg (测定);

$$Q_2 = 4000 \times (2906 - 80) + 8800 \times (2944 - 80) + 4000 \times (2854 - 80) = 47603200 \text{kJ}.$$

A1.3  $Q_3 = G_1 \cdot c_1(t_1 - t_0)$

式中:  $G_1$ ——装锅时加入蒸煮锅的总蒸煮液重量, kJ;

$$G_1 = 78 \text{m}^2 \times (1.058 \times 1000) \text{kg/m}^2 = 82524 \text{kg}$$

$c_1$ ——蒸煮液的比热 4.1868, kJ/kg · K (查表);

$t_1$ ——蒸煮液开始温度 52.5℃ (测定);

$t_0$ ——周围环境温度 19℃ (测定);

$$Q_3 = 82524 \times 4.1868 \times (52.5 - 19) = 11574634 \text{kJ}.$$

A1.4  $Q_4 = G_2 \cdot c_2(t_2 - t_0) \quad \text{kJ}$

式中:  $G_2$ ——每锅次装绝干原料的重量, kg;

经测定,每锅装木片量 35m<sup>3</sup>,木片水分化验得 44.05%,木片的密度测定为 0.45t/m<sup>3</sup>。

$$\therefore G_2 = 35 \times 0.45 \times 1000 \times (1 - 0.4405) = 8812 \text{kg}$$

$c_2$ ——木片的比热 2.721, kJ/(kg · K) (测定);

$t_2$ ——装锅时木片的温度 32℃ (测定);

$$Q_4 = 8812 \times 2.721 \times (32 - 19) = 311707 \text{kJ}.$$

A1.5  $Q_5 = G_3 \cdot c_3(t_2 - t_0) \quad \text{kJ}$

式中:  $G_3$ ——木片中所含水分的重量, 44.05% (测定);

$c_3$ ——水的比热, 4.1868 kJ/(kg · K) (测定);

$$Q_5 = 35 \times 0.45 \times 1000 \times 4.1868 \times 0.4405 \times (32 - 19) = 3776171 \text{kJ}.$$

A1.6  $Q_{GG} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$

$$=47603200+11574634+311707+377617=59867158 \text{ kJ}$$

## A2 每蒸煮一锅有效耗热总量 $Q_{yx}$ , kJ

$$Q_{yx}=Q_6+Q_7+Q_8+Q_9+Q_{10}+Q_{11}$$

### A2.1 $Q_6=G_2 \cdot c_2(t_3-t_2)$ kJ

式中:  $t_3$ ——蒸煮最高温度  $137^\circ\text{C}$ (测定);

$$Q_6=8812 \times 2.721 \times (137-32)=2517632 \text{ kJ}.$$

### A2.2 $Q_7=G_3 \cdot c_3(t_3-t_2)$ kJ

$$=6938 \times 4.1868 \times (137-32)=3050042 \text{ kJ}.$$

### A2.3 $Q_8=G_4 \cdot c_4(t_4-t_5)$ kJ

式中:  $G_4$ ——小放汽(小瓦斯)回收量  $10580\text{kg}$ (测定);

$c_4$ ——小瓦斯的比热  $4.1868 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (测定);

$t_4$ ——放小瓦斯前后锅内的平均温度  $117^\circ\text{C}$ (测定);

$t_5$ ——高压回收锅内的实际温度  $65^\circ\text{C}$ (测定);

$$Q_8=10580 \times 4.1868 \times (117-65)=2303409 \text{ kJ}.$$

### A2.4 $Q_9=G_5 \cdot c_1(t_6-t_5)$ kJ

式中:  $G_5$ ——从蒸煮锅内移出作下锅次蒸煮回用的蒸煮液量  $22430\text{kg}$ (测定);

$t_6$ ——回收蒸煮液的平均温度  $118^\circ\text{C}$ (测定);

$$Q_9=22430 \times 4.1868 \times (118-65)=4977226 \text{ kJ}.$$

### A2.5 $Q_{10}=G_6 \cdot (i_3-i_4)$ kJ

式中:  $G_6$ ——大放汽回收量  $6348\text{kg}$ (测定);

$i_3$ ——大放汽在平均压力、温度下的热焓  $2729\text{kJ}/\text{kg}$ ;

$i_4$ ——回收完后低压回收锅内液体的焓  $188\text{kJ}/\text{kg}$ (测定);

$$Q_{10}=6348 \times (2729-188)=16130268 \text{ kJ}.$$

### A2.6 $Q_{11}=(G_1-G_4-G_5) \cdot c_1(t_6-t_1)+(G_1-G_4-G_5-G_6) \cdot c_1(t_3-t_6)$ kJ

$$=(82524-10580-22430) \times 4.1868 \times (118-52.5) + (82524-10580-22430-6348) \times 4.1868 \times (137-118)=17016700 \text{ kJ}$$

### A2.7 $Q_{yx}=Q_6+Q_7+Q_8+Q_9+Q_{10}+Q_{11}$

$$=2517632+3050042+2303409+4977226+16130268+17016700=45995277 \text{ kJ}$$

## A3 蒸煮锅总热损失 $Q_m$ , kJ

$$Q_m=Q_{12}+Q_{13}+Q_{14}+Q_{15}+Q_{16} \text{ kJ}$$

### A3.1 $Q_{12}=Q_{12a}+Q_{12b}+Q_{12c}$ kJ

### A3.2 $Q_{12a}=G_7 \cdot c_5(t'_{\text{锅}}-t_{\text{锅}})$ kJ

式中:  $G_7$ ——锅体钢板的总重量  $31000 \text{ kg}$ (查设备卡片);

$c_5$ ——钢板的比热  $0.481\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (查手册);

$t'_{\text{钢}}$ ——钢板在蒸煮过程中达到的最高温度 137℃(测定);  
 $t''_{\text{钢}}$ ——钢板在蒸煮过程中达到的最低温度 52.50℃(测定);  
 $Q_{12a}=31000 \times 0.481 \times (137-52.5)=1259980 \text{ kJ}$ 。

**A3.3**  $Q_{12b}=G_9 \cdot c_6 (t'_{\text{层}}-t''_{\text{层}}) \text{ kJ}$

式中:  $G_9$ ——锅体保温层的总重量 2000kg(计算);  
 $c_6$ ——保温层材料的比热 0.75kJ/(kg·K)(查表);  
 $t'_{\text{层}}$ ——保温层在蒸煮过程中达到的最高温度 137℃(测定);  
 $t''_{\text{层}}$ ——保温层在蒸煮过程中达到的最低温度 52.5℃(测定);  
 $Q_{12b}=2000 \times 0.75 \times (137-52.5)=126750 \text{ kJ}$ 。

**A3.4**  $Q_{12c}=G_9 \cdot c_7 (t'_{\text{砖}}-t''_{\text{砖}}) \text{ kJ}$

式中:  $G_9$ ——锅体砖衬的总重量 50000 kg(计算);  
 $c_7$ ——砖衬材料的比热 1.005kJ/(kg·K)(查表);  
 $t'_{\text{砖}}$ ——砖衬在蒸煮过程中达到的最高温度 137℃(测定);  
 $t''_{\text{砖}}$ ——砖衬在蒸煮过程中达到的最低温度 52.5℃(测定);  
 $Q_{12c}=5000 \times 1.005 \times (137-52.5)=4246125 \text{ kJ}$   
 $\therefore Q_{12}=Q_{12a}+Q_{12b}+Q_{12c}=1259980+126750+4246125=5632855 \text{ kJ}$

**A3.5**  $Q_{13}=Q_{13a}+Q_{13b}+Q_{13c} \text{ kJ}$

**A3.6**  $Q_{13a}=F \cdot K \left( \frac{t_3+t_1}{2} - t_0 \right) \cdot Z_a \text{ kJ}$

式中:  $F$ ——蒸煮锅体总表面积 132m<sup>2</sup>(查资料);  
 $K$ ——传热系数, kJ/(m<sup>2</sup>·h·K);  
 $Z_a$ ——蒸煮升温时间 5h(测定);  
 传热系数  $K$  的计算公式如下:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{砖}}}{\lambda_{\text{砖}}} + \frac{\delta_{\text{钢}}}{\lambda_{\text{钢}}} + \frac{\delta_{\text{层}}}{\lambda_{\text{层}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$$

式中:  $\delta_{\text{钢}}$ ——锅体钢板的厚度 0.026m(查厂设备手册);  
 $\delta_{\text{层}}$ ——锅体保温层的厚度 0.125m(测定);  
 $\delta_{\text{砖}}$ ——锅体砖衬的厚度 0.115m(查厂设备卡片);  
 $\lambda_{\text{钢}}$ ——锅体钢板的导热系数取 209kJ/(m·h·K)(查表);  
 $\lambda_{\text{层}}$ ——锅体保温层的导热系数取 0.628kJ/(m·h·K)(查表);  
 $\lambda_{\text{砖}}$ ——锅体砖衬的导热系数取 1.507kJ/(m·h·K)(查表);  
 $\alpha_1$ ——锅内蒸煮物对锅内壁的换热系数取 20934kJ/(m<sup>2</sup>·h·K)(查表);  
 $\alpha_2$ ——锅外壁对外界的换热系数且有  $\alpha_2 = \alpha_c + \alpha_r$ ;

其中:  $\alpha_c = 9.211 \times \sqrt{\theta_2 - t_0} \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$

式中:  $\theta_2$ ——锅外壁的平均温度 60℃(测定);

$$\therefore \alpha_c = 9.211 \times \sqrt{60-19} = 23.31$$

$\alpha_r$ ——辐射换热系数;

$$\alpha_7 = C \times C' \times 4.1868 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K});$$

$$C = \frac{\left(\frac{273+\theta_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+t_0}{100}\right)^4}{\theta_2 - t_0} = \frac{\left(\frac{273+60}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+19}{100}\right)^4}{60 - 19} = 1.226$$

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_D}$$

式中:  $C_A$ ——无光泽铁板的辐射系数 4.4(查表);

$C_B$ ——砖衬的辐射系数 4.3(查表);

$C_D$ ——完全黑体辐射系数 4.7(查表)。

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{4.4} + \frac{1}{4.3} + \frac{1}{4.7}$$

$$\therefore C' = 4.0476$$

$$\therefore \alpha_7 = 4.1868 \times C \times C'$$

$$= 4.1868 \times 1.226 \times 4.0476 = 20.78$$

$$\alpha_2 = \alpha_c + \alpha_7 = 23.31 + 20.78 = 44.09$$

$$\therefore K = \frac{1}{\frac{1}{20934} + \frac{0.115}{1.507} + \frac{0.026}{209} + \frac{0.125}{0.628} + \frac{1}{44.09}} = 3.3535$$

$$\therefore Q_{13a} = 132 \times 3.3535 \times \left(\frac{137+52.5}{2} - 19\right) \times 5 = 167658 \text{ kJ}$$

$$\text{A3.7 } Q_{13b} = F \cdot K \cdot (t_7 - t_0) \cdot Z_b \text{ kJ}$$

式中:  $t_7$ ——蒸煮保温阶段平均温度 117℃(测定);

$Z_b$ ——保持保温时间 2h(测定);

$$Q_{13b} = 132 \times 3.3535 \times (117 - 19) \times 2 = 86762 \text{ kJ}.$$

$$\text{A3.8 } Q_{13c} = F \cdot K \cdot (t_8 - t_0) \cdot Z_c \text{ kJ}$$

式中:  $t_8$ ——大放汽期间蒸煮锅内的平均温度 115℃(测定);

$Z_c$ ——大放汽用的时间 1.3h(测定);

$$Q_{13c} = 132 \times 3.3535 \times (115 - 19) \times 1.3 = 55244 \text{ kJ}.$$

$$\therefore A_{13} = Q_{13a} + Q_{13b} + Q_{13c} = 167658 + 86762 + 55244 = 309664 \text{ kJ}$$

$$\text{A3.9 } Q_{14} = 0.04 Q_{yx} \text{ kJ} = 0.04 \times 45995277 = 1839811 \text{ kJ}$$

$$\text{A3.10 } Q_{15} = D_2 \cdot (i_5 - i_2) \text{ kJ}$$

式中:  $i_5$ ——间接加热蒸汽凝结水的焓值 437 kJ/kg(测定);

$$Q_{15} = 16800 \times (437 - 80) = 5997600 \text{ kJ}.$$

$$\text{A3.11 } Q_{16} = Q_{GG} - Q_{yx} - (Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15})$$

$$= 59867158 - 45995277 - (5632855 + 309664 + 1839811 + 5997600) = 91951 \text{ kJ}$$

$$\text{A3.12 } Q_m = Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} + Q_{15} + Q_{16}$$

$$= 5632855 + 309664 + 1839811 + 5997600 + 91951 = 13871881 \text{ kJ}$$

**A4 蒸煮锅正平衡热效率  $\eta$ (%)**

$$\eta_{\text{正}} = \frac{Q_{yx}}{Q_{GG}} \times 100 = \frac{45995277}{59867158} \times 100 = 76.83\%$$

$$\eta_{\text{E}}(\%) = (1 - \frac{Q_{\text{m}}}{Q_{\text{GG}}}) \times 100 = (1 - \frac{13871881}{59867158}) \times 100 = 76.83\%$$

**A5 蒸煮有效单位(kg 浆)耗热量  $Q'_{\text{yx}}$**

计算公式:  $Q'_{\text{yx}} = \frac{Q_{\text{yx}}}{G'}$  kJ/kg 风干浆

式中:  $G'$  —— 每锅浆实际收获量 7800kg 风干浆(测定)。

$$Q'_{\text{yx}} = \frac{45995277}{7800} = 5897 \text{ kJ/kg 风干浆}$$

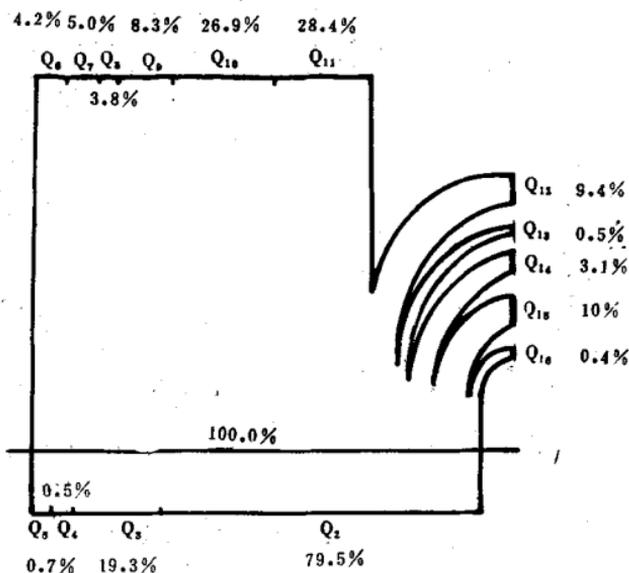
**A6 能量平衡表**

序号	输入能量			输出能量		
	项目	数量 kJ	百分数 %	项目	数量 kJ	百分数 %
1	直接加热蒸煮液供给的热量	$Q_1=0$	0			
2	间接加热蒸煮液供给的热量	$Q_2=47603200$	79.5			
3	蒸煮液带入蒸煮锅内的热量	$Q_3=11574634$	19.3			
4	装锅时,原料具有的热量	$Q_4=311707$	0.5			
5	装锅时,原料中水分具有的热量	$Q_5=377617$	0.7			
6				加热绝干原料用的热量	$Q_6=2517632$	4.2
7				加热绝干原料中水分用的热量	$Q_7=3050042$	5.0
8				小放汽(小瓦斯)回收热量	$Q_8=2303409$	3.8
9				从蒸煮锅内移出作下锅次蒸煮回用的蒸煮液带出热量	$Q_9=4977226$	8.3
10				大放汽回收热量	$Q_{10}=16130268$	26.9
11				加热蒸煮液耗热量	$Q_{11}=17016700$	28.4
12				蒸煮锅体加热耗用的热量	$Q_{12}=5632855$	9.4
13				蒸煮锅体散热耗用的热量	$Q_{13}=309664$	0.5
14				蒸煮锅管道及附属设备热损失	$Q_{14}=1839811$	3.1

续表

序号	输入能量			输出能量		
	项目	数量 kJ	百分数 %	项目	数量 kJ	百分数 %
15				间接加热蒸煮液蒸汽凝结水热损失	$Q_{15}=5997600$	10.0
16				蒸煮锅其他热损失	$Q_{16}=91951$	0.4
	合计	59867158	100	合计	59867158	100

A7 能流图



附加说明:

本标准由轻工业部造纸工业司提出。

本标准由全国造纸标准化中心归口。

本标准由广州造纸厂、轻工业部造纸工业科学研究所负责起草。

本标准主要起草人:过盘兴、邹荣、刘江毅、张少玲。