



## 罐体的能量损耗

在很多制程工业中，液体在罐体内加热在整个制程中是一个很重要的环节，例如牛奶、金属处理和纺织工业中都有大量的这种应用。水需要被加热为热水然后使用，或者，液体由于其自身工艺的要求被加热到一定温度而不论是否发生了化学反应。这些制程有：锅炉给水箱、清洗水箱、蒸发器、沸腾锅、铜煮锅、加热器和再沸器等。罐体被用在加热制程中主要可以分为两种：

- 全封闭罐体，如那些用来储存燃料油的罐，热负荷的计算非常简单。
- 顶部开口罐体，这些罐体的热负荷计算需要综合考虑其内的物品和材料，并计算蒸发损失。

开式和闭式罐广泛应用于各种制程中：

- 锅炉给水箱 – 锅炉给水箱是蒸汽发生系统的关键部分，它是一个储存回收的冷凝水和经过处理的补给水的容器，然后供给锅炉。这些水需要加热的其中一个原因是为了减少进入锅炉的水中含有的氧，理论上在100°C时含氧量为0ppm。锅炉给水箱的工作温度一般在80°C到90°C之间。
- 热水箱 – 很多工业制程中需要用到热水，这些加热方式一般比较简单，采用开式或闭式的用蒸汽作为加热介质的水箱。这些水箱的工作温度随制程应用而不同一般介于40°C到85°C之间。
- 脱油脂箱 – 脱油脂是在产品经过机械加工之后但在最终装配之前进行的，从金属表面去掉沉积的油脂或冷却油的工艺。在脱油脂箱中，材料被浸没在被盘管加热到90°C到95°C的溶液中。
- 金属处理箱 – 金属处理箱有些时候被称为桶，应用于很多不同的制程中：
  - 去除杂质或锈；
  - 在表面镀金属涂层；
 这些处理温度范围一般为7°C到85°C。
- 储油罐 – 储油罐是用来储存那些在常温下无法被泵输送的油，比如锅炉用的重油。在常温下，重油很粘稠，必须加热到30°C – 40°C以降低它的粘度，从而可以用泵输送。这就意味着所有的重油储油罐必须被加热以方便泵送。
- 制程工业中的加热容器 – 加热容器被应用在大量制程工业中，见表2.9.1。

表2.9.1 使用加热容器的制程工业

工业	制程	典型温度(°C)
制糖	原汁加热	80~85
乳制品	产生热水	80
电镀	金属沉淀	70~85
金属/钢铁	除锈/除垢	90~95
制药	清洗水箱	70
橡胶	加热腐蚀性油	140

在有些应用中，制程流体已经达到它的工作温度，这里所需要补充的热量就是从罐的固体表面和液体表面的散热损失。

本节主要讲述如何计算罐体的能量需求，接下去的两节(2.10和2.11)将介绍怎样提供这些能量。

当计算制程流体的罐体需要的热量时，需要的总热量包含部分或全部下列热量：

1. 把制程流体加热到工作温度需要的热量。
2. 把容器材料加热到工作温度需要的热量。
3. 从容器表面散失到大气环境的热损失。
4. 从液体表面散失到大气环境的热损失。
5. 其它冷的物体浸入制程流体时吸收的热量。

但是，在很多应用中仅有某几项比较突出，例如，在一个完全密闭的保温良好的散装油储存罐中，需要的总热量主要是提高流体温度所需要的热量。

第1、第2项 – 用来加热流体和罐体温度的热量和第5项 – 被冷的物体吸收的热量，可以用公式2.6.1来计算。通常，这些数据很容易得到，因此这些热量计算相对比较简单且精确。

$$\dot{Q} = \frac{m c_p \Delta T}{t} \quad \text{公式2.6.1}$$

第3和第4项, 罐体和液体表面的散热损失可以用公式2.5.3来计算。

但是, 散热损失计算要复杂的多, 通常使用的是经验数据, 或者那些可以信赖的图表, 这就说明, 散热损失的计算精度要差一些。

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad \text{公式2.5.3}$$

### 罐体表面的散热损失

热量仅在表面与环境之间存在温差的时候才会发生热传递。

图 2.9.1 给出的是裸露的钢制平板表面向环境空气散热时的典型的总传热系数。如果罐体的底部没有暴露在空气中, 而是放置在地上, 通常, 这部分的散热损失可以被忽略。

- 对25mm的隔热层, 换热系数U需要乘以系数0.2
- 对50mm的隔热层, 换热系数U需要乘以系数0.1

图2.9.1中给出的是静止的空气条件下的总的传热系数。

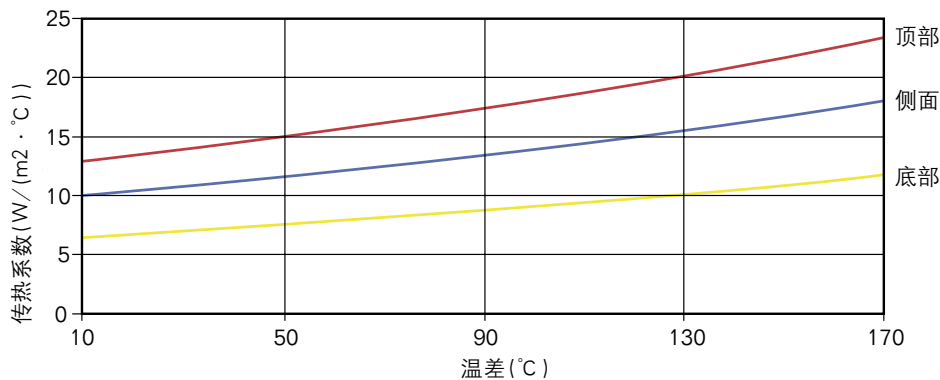


图2.9.1 典型的钢制平板的总的传热系数

表2.9.2给出的是当空气流速需要考虑的时候的系数。但是, 如果表面绝热良好的话, 即使在空旷的条件下, 空气流速对散热损失的影响也不会超过10%

表2.9.2 空气流动对热传递的影响

流速(m/s)	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16
流速 (km/h)	0	3.6	7.2	14.4	21.6	28.8	36	43.2	50.4	57.6
系数 X	1	1.4	1.7	2.4	3.0	3.6	4.1	4.5	4.9	5.2

流速小于1m/s可以认为是受保护的条件, 5m/s可以认为是微风 (相当于蒲福风级风力3级), 10m/s为劲风 (相当于5级风), 16m/s就是强风 (相当于7级风)。

对散装储油罐来说, 总的换热系数可以用表2.9.3中的数据。

表2.9.3 油罐的总换热系数

罐体位置	油和空气之间的温差	总换热系数(W/(m²·°C))	
		无保温层	有保温层
掩蔽状态	最高达10°C	6.8	1.7
	最高达27°C	7.4	1.8
	最高达38°C	8.0	2.0
暴露状态	最高达10°C	8.0	2.0
	最高达27°C	8.5	2.1
	最高达38°C	9.1	2.3
地底下	任何温度	6.8	-

水箱:从水面到大气中的散热损失

图2.9.2给出了水面的散热损失与空气速度以及表面温度的关系,在这个图中,1m/s的风速被认为是静止的,水箱在受保护条件下的风速大约为4m/s,但是水箱放置在室外开放环境下的风速大致认为是8m/s。

图中热损失的单位是 $W/m^2$ ,而不是总的传热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,这就是意味着要得到总的传热量,需要再乘以换热面积,但是水与空气之间的温差已经考虑进去了。

图2.9.2中所示的水表面的散热损失因空气湿度的影响并不明显。实践中,曲线的宽度已经包含了整个湿度范围的影响。但是,图中显示的热损失考虑的空气条件为温度 $15.6^\circ C$ ,湿度为55%,不同条件下的值可以从斯派莎克网站上的工程支持中心得到相关内容。

如何从图中得到散热损失,首先从图的上部刻度上找到水面温度,然后向下做垂线与热损失曲线粗(红线)线相交。对室内水箱来说,应从交点再做水平线与左边刻度相交。

对室外的水箱来说,根据水箱处理掩蔽状态和暴露状态的不同,从交点处向左或向右,直到与其对应的状态线相交,然后从此交点做垂直向下的垂线与底部刻度相交得到热损失。

在大多数情况下,从液体表面的散热损失是主要的热损失,在实践中,通常在液体表面覆盖一层塑料来减少热损失,这层塑料被称为绝热毯,如图2.9.2所示,当水箱放在室外暴露环境下的时候,保温显的更为重要。

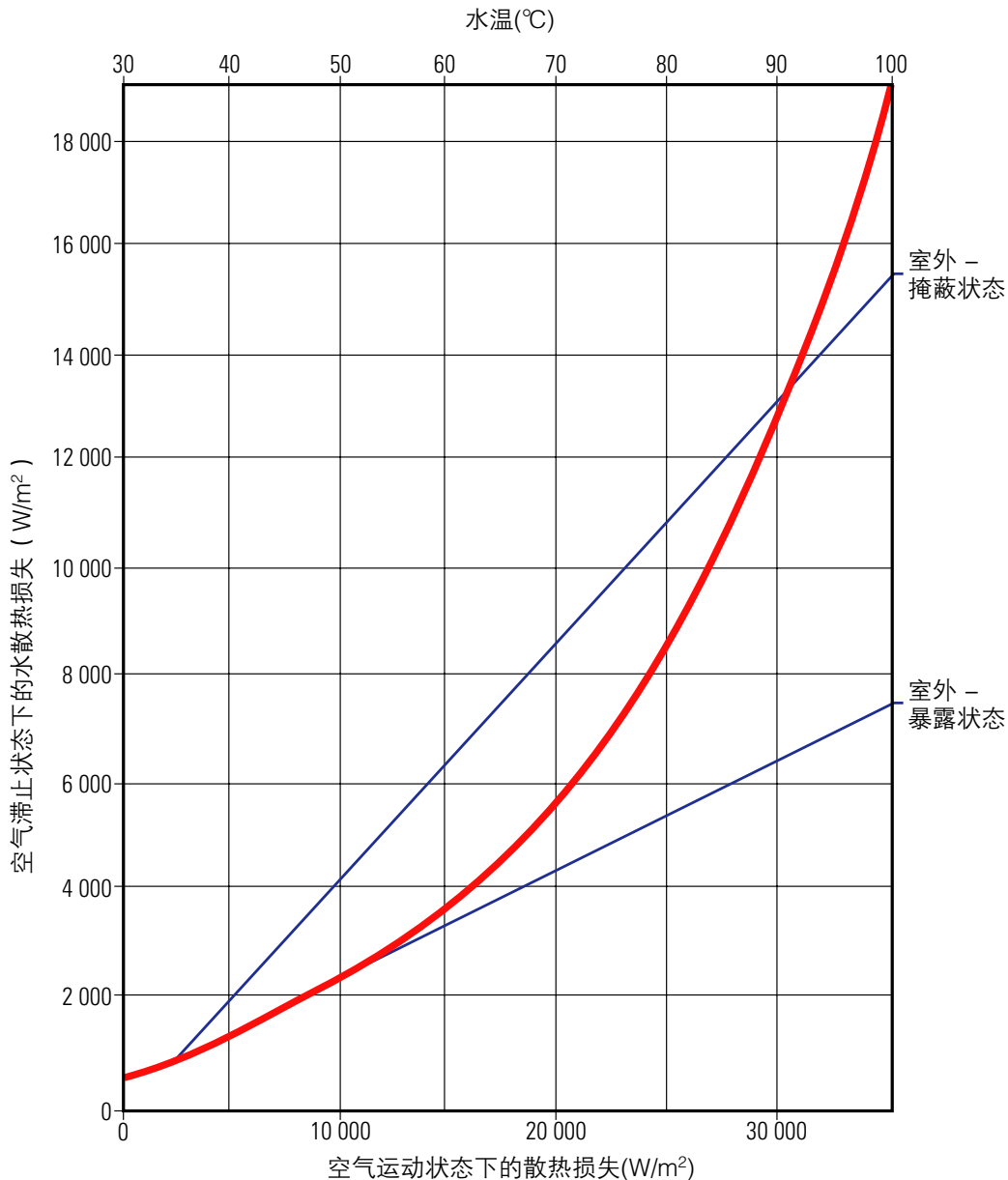


图2.9.2 水面的热损失

## 例 2.9.1

对于图2.9.3所示的水箱，计算：

第1部分 启动时需要的平均换热功率

第2部分 运行过程中最大转换热功率

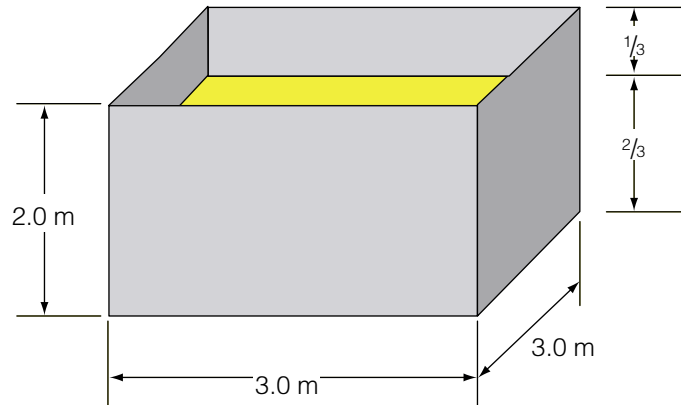


图2.9.3 水箱

- 水箱无保温、顶部开放、放置于工厂内的混凝土地板上。  
长宽高分别为：3 m × 3 m × 2 m。  
水箱表面积 = 24 m<sup>2</sup>(除掉底)。  
水箱与空气的换热系数U<sub>1</sub> = 11 W/(m<sup>2</sup> · °C)。
- 水箱内存放2/3的弱酸溶液(c<sub>p</sub> = 3.9 kJ/(kg · °C))，密度与水相同(1000 kg/m<sup>3</sup>)
- 水箱由15mm厚的钢板制成  
(密度 = 7850 kg/m<sup>3</sup>， c<sub>p</sub> = 0.5 kJ/(kg · °C))
- 水箱每天2h处于备用状态，在这段时间内温度从室温的8°C上升到60°C，然后其余时间保持该温度。
- 当水箱温度到达需要的温度时，一个500kg的钢件浸入液面并保持20min，同时，水箱不会溢流(c<sub>p</sub> = 0.5 kJ/(kg · °C))

第1部分 计算启动时平均换热功率 $\dot{Q}_{M(\text{启动})}$

它是以下各项的总和：

- A1. 加热流体的热量 $\dot{Q}_{M(\text{液体})}$
- A2. 加热水箱材料的热量 $\dot{Q}_{M(\text{水箱})}$
- A3. 水箱侧面的散热损失 $\dot{Q}_{M(\text{侧面})}$
- A4. 液体表面的热损失 $\dot{Q}_{M(\text{表面})}$

1.1 加热液体的热量 $\dot{Q}_{M(\text{液体})}$

$$\begin{aligned} \text{初始状态 } T_1 &= 8^\circ\text{C} \\ \text{最终状态 } T_2 &= 60^\circ\text{C} \\ \text{温度上升 } \Delta T &= 60 - 8 = 52^\circ\text{C} \\ \text{液体体积} &= 2 \times 3 \times 3 \times \frac{2}{3} = 12\text{m}^3 \\ \text{液体质量 } m &= 12000\text{kg} \\ \text{液体比热 } c_p &= 3.9\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \\ \text{加热时间 } t &= 2\text{h} = 7200\text{s} \end{aligned}$$

$$\dot{Q} = \frac{m c_p \Delta T}{t}$$

公式2.6.1

$$Q_{M(液体)} = \frac{mc_p\Delta T}{7200}$$

$$Q_{M(液体)} = \frac{1200 \times 3.9 \times 52}{7200}$$

$$Q_{M(液体)} = 338 \text{ kW}$$

1.2 加热水箱材料所需的热量 $Q_M$  (水箱)

$$\begin{aligned} \text{水箱厚度} &= 0.015 \text{ m} \\ \text{钢的体积} &= ((2 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 4) + (3 \text{ m} \times 3 \text{ m})) \times 0.015 \text{ m} \\ \text{钢的体积} &= 0.495 \text{ m}^3 \\ \text{钢的质量} &= 0.495 \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 \\ \text{钢的质量} &= 3886 \text{ kg} \end{aligned}$$

使用公式2.6.1:

$$Q_{M(水箱)} = \frac{mc_p\Delta T}{7200}$$

$$Q_{M(水箱)} = \frac{3886 \times 0.5 \times 52}{7200}$$

$$Q_{M(水箱)} = 14 \text{ kW}$$

1.3 水箱侧面的热损失 $Q_M$  (侧面)

$$Q = UA\Delta T$$

公式2.5.3

式中:

 $\Delta T$ 为平均温差 $\Delta T_M$ 

$$\Delta T_M = T_m - T_{amb}$$

 $T_m$  = 平均液体温度 $T_{amb}$  = 设计环境温度

$$Q_{M(侧面)} = \frac{U_1 A \Delta T_M}{1000}$$

$$T_m = \frac{8+60}{2} = 34^\circ\text{C}$$

$$T_{amb} = 8^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_M = T_m - T_{amb}$$

$$Q_{M(侧面)} = \frac{11 \times 24 \times 26}{1000}$$

$$Q_{M(侧面)} = 7 \text{ kW}$$

1.4 液体表面的热损失 $Q_M$  (表面)

$$\begin{aligned} \text{表面积 } A &= 9 \text{ m}^2 \\ \text{初始温度 } T_1 &= 8^\circ\text{C} \\ \text{最终温度 } T_2 &= 60^\circ\text{C} \\ \text{平均温度 } T_m &= \frac{8 + 60}{2} \\ T_m &= 34^\circ\text{C} \end{aligned}$$

根据图2.9.2, 在平均温度 $34^\circ\text{C}$ 时, 表面热损失 =  $880 \text{ W/m}^2$ 

$$\text{水的表面积} = 9 \text{ m}^2$$

$$\text{因此: 热损失} = 9 \text{ m}^2 \times \frac{880 \text{ W}}{\text{m}^2} \times \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}}$$

$$Q_{M(表面)} = 8 \text{ kW}$$

1.5 总的平均需要传热量 $Q_M$  (start-up)

$$\begin{aligned} Q_{M(起动)} &= Q_{M(液体)} + Q_{M(水箱)} + Q_{M(侧面)} + Q_{M(表面)} \\ Q_{M(起动)} &= 338 \text{ kW} + 14 \text{ kW} + 7 \text{ kW} + 8 \text{ kW} \\ Q_{M(起动)} &= 367 \text{ kW} \end{aligned}$$

第2部分 计算运行负荷，也就是运行中最大的换热功率 ( $\dot{Q}_{(运行)}$ )

- 运行条件下，液体和水箱温度已经到达工作温度(2.9.5页中的A1和A2)，因此加热部分=0。
- 运行条件下，从液体和水箱表面的热损失就会增加(2.9.5页中的A3和A4)，这是因为液体和水箱与环境之间的温差变大。
- 把物体浸入液体显然属于工艺要求，因此这部分负荷也要算作运行热损失。

### 2.1 水箱壁的热损失

$$Q = UA\Delta T$$

公式2.5.3

式中:

$$\Delta T = T_f - T_{amb}$$

$$T_f = \text{最终液体温度}$$

$$T_{amb} = \text{设计环境温度}$$

$$Q_{(侧面)} = \frac{U_1 \times A \times \Delta T}{1000}$$

$$\Delta T = T_f - T_{amb}$$

$$\Delta T = 60^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 52^\circ\text{C}$$

$$Q_{(侧面)} = \frac{11 \times 24 \times 52}{1000}$$

$$\dot{Q}_M (侧面) = 14\text{kW}$$

### 2.2 从液体表面的热损失 $\dot{Q}_{(表面)}$

$$\text{表面积 } A = 9\text{m}^2$$

$$\text{最终水温 } T_f = 60^\circ\text{C}$$

$$\text{根据2.9.2估计热损失} = 3700 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{(表面)} = 9\text{m}^2 \times 3700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times \frac{1\text{kW}}{1000\text{W}}$$

$$Q_{(表面)} = 34\text{kW}$$

### 2.3 加热浸入水箱钢件的热量 $\dot{Q}_{(物品)}$

$$\text{钢件质量 } m = 500 \text{ kg}$$

$$\text{钢件比热 } c_p = 0.5 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$\text{当浸入液体时钢件温度 } T_1 = 8^\circ\text{C}$$

$$\text{离开液体时钢件温度 } T_2 = 60^\circ\text{C}$$

$$\text{温度变化 } \Delta T = 60 - 8$$

$$\Delta T = 52^\circ\text{C}$$

$$\text{在水箱中的时间 } t = 20\text{min}$$

$$t = 1200\text{s}$$

$$\dot{Q} = \frac{m c_p \Delta T}{t}$$

公式2.6.1

$$Q_{(物品)} = \frac{m \times c_p \times \Delta T}{1200}$$

$$\text{kW} = \frac{500 \times 0.5 \times 52}{1200}$$

$$Q_{(物品)} = \text{kW}$$

## 2.4 总的平均需求传热率 $Q_{(运行)}$ (运行负荷)

$$Q_{(运行)} = Q_{(侧面)} + Q_{(表面)} + Q_{(物品)}$$

$$Q_{(运行)} = 14 + 34 + 11 \text{ kW}$$

$$Q_{(运行)} = 59 \text{ kW}$$

由上述结果看到：运行时需要的能量(59 kW)比启动时的能量(367 kW)小的多。这个是典型的情况，如果可能，可以延长启动过程，这样可以降低最大传热率，对锅炉的运行有好处，而且对温度控制系统的要求也降低了。

对于水箱的持续运行来说，只需要按照第2部分所示计算运行需要的热量。

## Questions

1. An indoors open-topped tank of water, 1.5 m wide x 2.0 m long x 1.5 m high is maintained at 85°C. The water is 1.4 m deep. The ambient temperature is 20°C and the tank is lagged with 50 mm thick insulation. There is negligible air movement over the tank. Approximately how much heat is lost from the sides of the tank?
  - a| 6 960 W
  - b| 8 190 W
  - c| 819 W
  - d| 2 071 W
  
2. Referring to Question 1, what will be the approximate heat loss from the liquid surface if the air velocity across the liquid surface was about 4 m/s to 5 m/s?
  - a| 82 kW
  - b| 57 kW
  - c| 75 kW
  - d| 18 kW
  
3. Referring to Question 2, roughly how much steam at 4 bar g is required to offset the heat lost from the liquid surface?
  - a| 13 kg/s
  - b| 28 kg/h
  - c| 46 kg/h
  - d| 128 kg/h
  
4. 200 kg of copper at 25°C is immersed into a tank of water based solution at 70°C. It is held there for 15 minutes. Approximately how much extra heat load is put onto the tank ( $c_p$  copper = 0.4 kJ/kg°C)?
  - a| 10 kW
  - b| 15 kW
  - c| 18 kW
  - d| 4 kW
  
5. Water at the rate of 1 l/s is drawn off a coil heated tank operating at 60°C and replaced with cold water at 10°C. Steam is supplied to the coil at 7 bar g. How much steam is required to maintain the tank temperature?
  - a| 316 kg/h
  - b| 387 kg/h
  - c| 352 kg/h
  - d| 368 kg/h

6. For any particular tank temperature how does the heat loss from the lid of a closed tank compare with that of the bottom?
- a| They are approximately the same
  - b| Losses from the top are approximately double those from the bottom
  - c| Losses from the bottom are approximately double those from the top
  - d| Losses from the top are approximately 4 times those from the bottom

## Answers

1: c, 2: c, 3: d, 4: d, 5: d, 6: b