

---

# 第九章

## 厌氧发酵设备

- 发酵设备是发酵工厂中主要的设备，它提供了一个适应微生物生命活动和生物代谢的场所。
- 由于微生物分厌氧和通风两大类，故供微生物生存和代谢的生产设备也就各不相同。
- 不论厌氧或通风发酵设备，除了满足微生物培养所必要的工艺要求外，还得考虑材质的要求以及加工制造难易程度等因素。

---

# 本章主要讲述的内容

第一节 酒精发酵设备及计算

第二节 啤酒发酵设备及计算

# 第一节 酒精发酵设备及计算

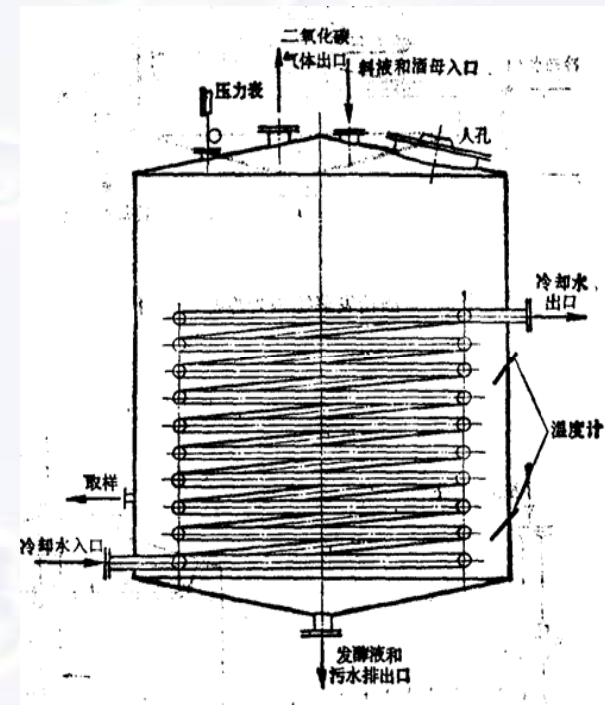
- 满足酒精发酵的工艺要求
  - 满足酒精酵母生长和代谢的必要工艺条件
  - 将发酵产生的热量及时移走
- 有利于发酵液的排出，设备的清洗、维修以及设备制造安装方便等问题。



# 一、酒精发酵罐的结构

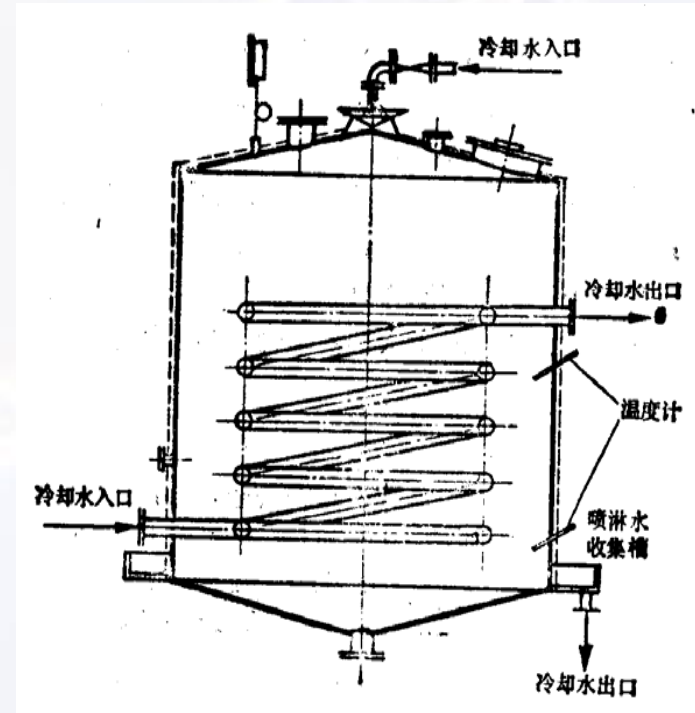
## 1, 基本结构

- 酒精发酵罐筒体为圆柱形
- 底盖和顶盖均为碟形或锥形的立式金属容器
- 罐顶装有废汽回收管，进料管，接种管，压力表、各种测量仪表接口管及供观察清洗和检修罐体内部的人孔等
- 罐底装有排料口和排污口对于大型发酵罐，为了便于维修和清洗，往往在近罐底也装有人孔
- 罐身上下部装有取样口和温度计接口



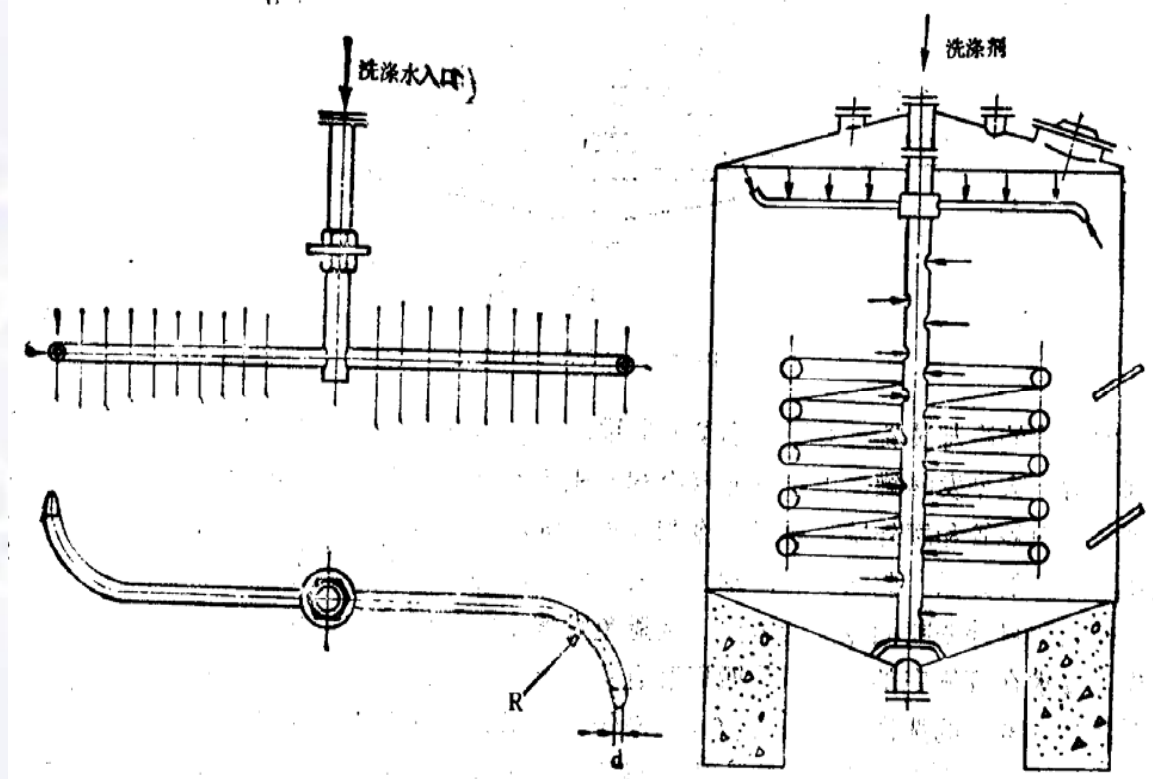
## 2, 发酵罐的冷却装置

- 中小型发酵罐：多采用罐顶喷水淋于罐外壁表面进行膜状冷却；
- 大型发酵罐：由于罐外壁冷却面积不能满足冷却要求，所以，罐内装有冷却蛇管或罐内蛇管和罐外壁喷洒联合冷却装置。
- 此外，也有采用罐外列管式喷淋冷却的方法，此法具有冷却发酵液均匀、冷却效率高优点。



### 3, 发酵罐的洗涤装置

大型酒精发酵罐采用水力喷射洗涤装置



## 二、酒精发酵罐的计算

### 1, 发酵罐结构尺寸的确定

发酵罐全容积的计算:

$$V = \frac{V_0}{\phi}$$

式中:  $V$ -发酵罐的全容积 (米<sup>3</sup>)

$V_0$ -发酵罐中的装液量 (米<sup>3</sup>)

$\phi$ -装液系数 (一般取0.85~0.90)



- 帶有锥形底、盖的圆柱形发酵罐全容积为：  
：

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \left( H + \frac{h_1}{3} + \frac{h_2}{3} \right)$$

式中 D: 罐的直径(米)

H: 罐的圆柱部分高度(米)

$h_1$ : 罐底高度(米)

$h_2$ : 盖高度(米)

通常:  $H=1.1\sim 1.5D$ ,  $h_1=0.1\sim 0.4D$ ,

$h_2=0.05\sim 0.1D$

## 2, 发酵罐罐数的确定

对于间歇发酵, 发酵罐罐数可按下式计算:

$$N = \frac{nt}{24} + 1$$

式中 N: 发酵罐个数 (个)

n: 每24小时内进行加料的发酵罐数

t: 发酵周期 (小时)

### 3, 发酵罐冷却面积的计算

发酵罐冷却面积的计算可按传热基本方程式来确定, 即:

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_m}$$

式中 F: 冷却面积(米<sup>2</sup>)

Q: 总的发酵热(焦耳/小时)

K: 传热总系数(焦耳/米<sup>2</sup>.小时.°C)

$\Delta t_m$ : 对数平均温度差(°C)

### (1) 总发酵热的估算

微生物在厌氧发酵过程中总的发酵热，一般由生物合成热 $Q_1$ ，蒸发热损失 $Q_2$ ，罐壁向周围散失的热损失 $Q_3$ 等三部分热量所组成。即：

$$Q = Q_1 - (Q_2 + Q_3)$$

## Q<sub>1</sub>的估算

- 按发酵最旺盛时单位时间糖度降低的百分值来计算
- 计算方法：在发酵最旺盛时，测定小型试验箱冷却水的进出口温度和单位时间内的耗水量，从而得出其放热量（Q<sub>1</sub>'）。

$$Q_1' = WC_p(t_2 - t_1)$$

由Q<sub>1</sub>'扩大到生产罐，则生产罐的Q<sub>1</sub>为：

$$\delta^I = \frac{\Lambda^I}{\delta_{T_1}^I} \Lambda^I$$

Q<sub>2</sub>一般取Q<sub>1</sub>的5%~6%左右。

Q<sub>3</sub>这部分热量由对流和辐射组成，可查阅相关手册。

## (2) 对数平均温度差 $\Delta t_m$ 的计算

$$\Delta t_m = \frac{(t_F - t_1) - (t_F - t_2)}{\ln \frac{t_F - t_1}{t_F - t_2}}$$

$t_F$ : 主发酵时的发酵温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_1$ : 冷却水进口温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_2$ : 冷却水出口温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

### (3) 传热总系数K值的确定

- 传热总系数可由两部分组成。
  - 发酵液到蛇管壁的传热分系数  $\alpha_1$
  - 从冷却管壁到冷却水的传热系数  $\alpha_2$

- $\alpha_1$ 一般依据生产经验数据或直接测定为准，对酒精发酵液而言，其 $\alpha_1$ 值可取2300~2700千焦/米<sup>2</sup>.小时.°C



- $\alpha_2$ 可分为两种情况计算。  
若采用蛇管冷却，以水为冷却剂：

$$\alpha_2 = 4.186 A \frac{(\rho\omega)^{0.8}}{d^{0.2}} \left(1 + 1.77 \frac{d}{R}\right)$$

$\alpha_2$ ：蛇管的传热分系数（千焦/米<sup>2</sup>.小时.°C）

A：常数，在水温为20 °C时，可取6.45

$\rho$ ：水的密度（公斤/米<sup>3</sup>）

$\omega$ ：蛇管内水的流速（米/秒）

d：蛇管直径（米）

R：蛇管圈半径（米）

若采用罐外壁喷淋冷却，则  $\alpha_2$  为：

$$\alpha_2 = 167 \frac{G^{0.4}}{D_m^{0.6}}$$

$G$ ：喷淋密度（公斤/米.小时）

$D_m$ ：罐外径（米）

本公式适应范围：喷淋密度在100~1500公斤/米.小时。

### 三、计算举例

某酒精工厂，每发酵罐的进料量为24吨 / 小时，每4小时盛满一罐，发酵周期为72小时，冷却水的初、终温分别为20°C和25 °C，若罐内采用蛇管冷却，试确定：  
发酵罐的结构尺寸，  
罐数，  
冷却水耗量，  
冷却面积和冷却装置的主要结构尺寸。(糖化醪密度为1076公斤 / 米<sup>3</sup>)。

## 1, 发酵罐的个数和结构尺寸的确定

按题意,

$$N = \frac{nt}{24} + 1$$

$$n = \frac{24}{4} = 6$$

所以,

$$N = \frac{6 \times 72}{24} + 1 \\ = 19(\text{个})$$

发酵罐容积:

$$V = \frac{24 \times 4 \times 1000}{1076 \times 0.9} \\ \approx 100(\text{米}^3)$$

0.9——发酵罐的装料系数

发酵罐采用圆柱形器身，底和顶为锥形盖，选取结构尺寸的比例关系如下：

$$H=1.2D \quad h_1=h_2=0.1D$$

$$V=0.785D^2\left(H+\frac{1}{3}h_1+\frac{1}{3}h_2\right)$$

$$100=0.785D^2\left(1.2D+\frac{0.2D}{3}\right)$$

$$D \approx 4.7(\text{米})$$

则

$$H=1.2D=5.6(\text{米})$$

$$h_1=h_2=0.1D=0.47(\text{米})$$

由发酵罐的基本结构尺寸，可确定全罐表面积，罐体圆柱部分表面积  $F_1$  和罐底、罐高表面积  $F_2, F_3$  分别为：

$$\begin{aligned} F_1 &= \pi DH = 3.14 \times 4.7 \times 5.6 \\ &= 82(\text{米}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_2 = F_3 &= \pi r \sqrt{r^2 + h^2} \\ &= 3.14 \times 2.35 \sqrt{(2.35)^2 + (0.47)^2} \\ &= 18(\text{米}^2) \end{aligned}$$

$r$ ——罐的半径（米）

$$\begin{aligned} \text{所以全罐表面积 } F &= F_1 + F_2 + F_3 \\ &= 118(\text{米}^2) \end{aligned}$$

## 2, 冷却面积和冷却装置主要结构尺寸的确定

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_m}$$

(1) 总的发酵热  $Q$

$$Q = Q_1 - (Q_2 + Q_3)$$

$$Q_1 = G S q$$

式中  $G$ ——每罐发酵醪量 (公斤)

$S$ ——糖度降低百分值 (%)

$q$ ——每公斤糖发酵放出的热量 (焦耳)

(  $Q_1$ ——主发酵期, 每小时糖度降低 1 度所放出的热量 (焦耳) )

$$\begin{aligned}\therefore Q_1 &= 24 \times 4 \times 1000 \times 1\% \times 418.6 \\ &= 4 \times 10^5 \text{ (千焦/小时)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_2 &= 5\% Q_1 \\ &= 5\% \times 4 \times 10^5\end{aligned}$$

$$= 0.2 \times 10^5 \text{ (千焦/小时)}$$

$$Q_3 = F \alpha_c (t_w - t_B)$$



假定罐壁不包扎保护层，壁温最高可达 35°C，生产厂所在地区的夏季平均温度可查阅有关资料，现假定为 32°C。

$$\therefore \alpha_c = \alpha_{\text{对}} + \alpha_{\text{幅}}$$

$$= 1.7 \sqrt[4]{t_w - t_B} + \frac{C \left[ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_B}{100} \right)^4 \right]}{t_w - t_B}$$

$$= 1.7 \sqrt[4]{35 - 32} + \frac{4.88 \left[ \left( \frac{273 + 35}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + 32}{100} \right)^4 \right]}{35 - 32}$$

$$= 8 \text{ (千卡/米}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{°C)}$$

$$= 33.5 \text{ (千焦/米}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{°C)}$$

$$\therefore Q_3 = 118 \times 33.5 \times (35 - 32) \doteq 0.12 \times 10^5 \text{ (千焦/小时)}$$

$$\therefore Q = Q_1 - (Q_2 + Q_3)$$

$$\therefore Q = 4 \times 10^5 - (0.2 \times 10^5 + 0.12 \times 10^5)$$

$$= 3.68 \times 10^5 \text{ (千焦/小时)}$$

## (2) 冷却水耗量的计算

$$Q_A = Q_B = W C_p (t_2 - t_1)$$

$$\therefore W = \frac{Q_B}{C_p (t_2 - t_1)}$$

$$= \frac{3.68 \times 10^5}{4.186 \times (25 - 20)}$$

$$= 17600 \text{ (公斤/小时)}$$

### (3) 对数平均温度差的计算

$$\Delta t_m = \frac{(t_F - t_1) - (t_F - t_2)}{2.3 \log \frac{t_F - t_1}{t_F - t_2}}$$

主发酵期控制发酵液温度  $t_F$  为  $30^\circ\text{C}$ ，按题意，冷却水进出口温度分别为  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ， $t_2 = 25^\circ\text{C}$ 。

$$\begin{aligned} \therefore \Delta t_m &= \frac{(30 - 20) - (30 - 25)}{2.3 \log \frac{30 - 20}{30 - 25}} \\ &= 7.2(^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

#### (4) 传热总系数 $K$ 值的确定

选取蛇管为水、煤气输送钢管，其规格为 53/60(毫米)，则管的横截面积为：

$$0.785(0.053)^2 = 0.0022(\text{米}^2)$$

考虑罐径较大，设罐内同心装两列蛇管，并同时进入冷却水，则水在管内流速为：

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{17600}{2 \times 3600 \times 0.0022 \times 1000} \\ &= 1.12(\text{米/秒})\end{aligned}$$

设蛇管圈的直径为 3 米，并由水温查表得  $A = 6.45$ 。

$$\begin{aligned}\therefore \alpha_2 &= 4.186 A \frac{(\rho\omega)^{0.8}}{d^{0.2}} \left(1 + 1.77 \frac{d}{R}\right) \\ &= 4.186 \times 6.45 \frac{(1.12 \times 1000)^{0.8}}{(0.053)^{0.2}} \cdot \left(1 + 1.77 \frac{0.053}{1.5}\right) \\ &= 1.45 \times 10^4 (\text{千焦/米}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{°C})\end{aligned}$$

$\alpha_1$  值按生产经验数据取 2700(千焦/米<sup>2</sup>·小时·°C)

故传热总系数为：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{14500} + \frac{1}{2700} + \frac{0.0265}{188} + \frac{1}{16750}} = 1562 (\text{千焦/米}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{°C})$$

式中 188——钢管的导热系数(千焦/米<sup>2</sup>·小时·°C)

1/16750——管壁水污垢层的热阻(米<sup>2</sup>·时·°C/千焦)

### (5) 冷却面积和主要尺寸的确定

$$\begin{aligned} F &= \frac{Q}{K \Delta t_m} \\ &= \frac{3.68 \times 10^5}{1562 \times 7.2} \\ &\approx 33 (\text{米}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{两列蛇管总长度 } L &= \frac{F}{\pi d_{cP}} \\ &= \frac{33}{3.14 \times 0.056} \\ &= 188 (\text{米}) \end{aligned}$$

式中  $d_{cP}$ ——蛇管的平均直径(米)

$$\text{每圈蛇管的长度 } l = \sqrt{(\pi d_P)^2 + h_P^2}$$

式中  $d_P$ ——蛇管圈直径(米)

$h_P$ ——蛇管圈之间的间距(米), 取为 0.15 米

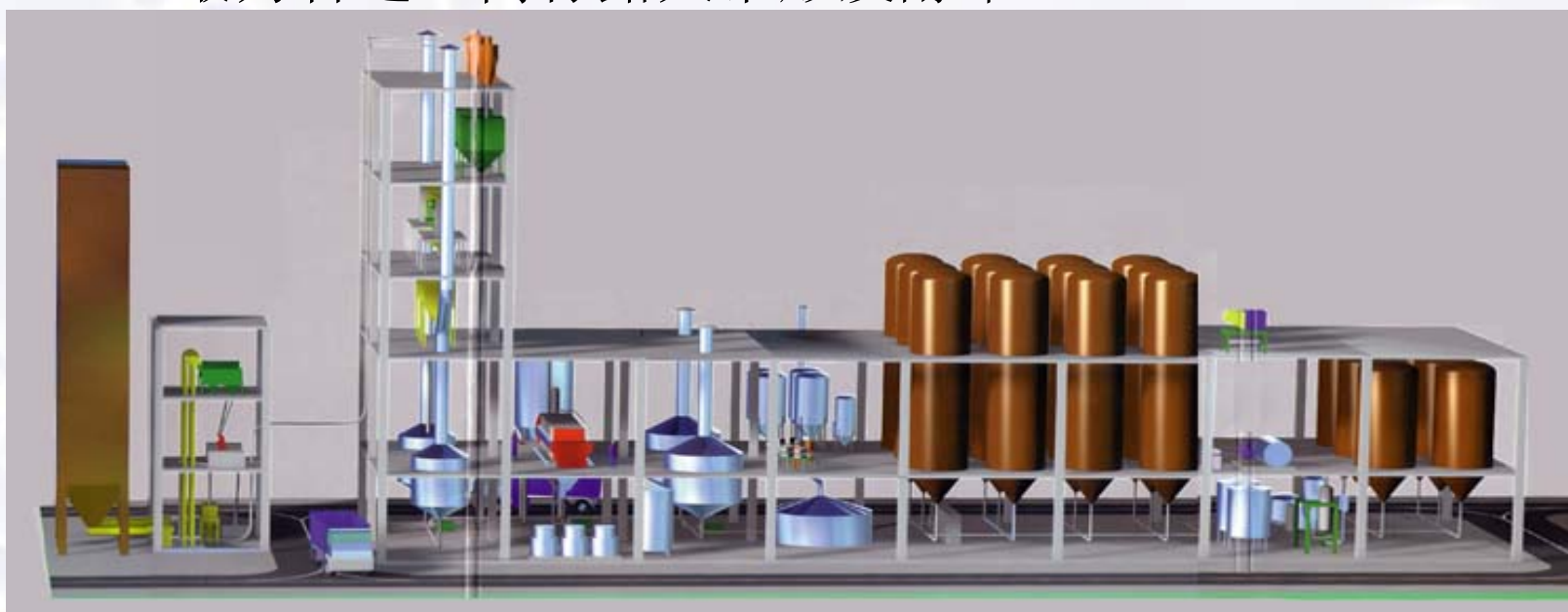
$$\begin{aligned} \therefore l &= \sqrt{(3.14 \times 3)^2 + (0.15)^2} \\ &= 9 (\text{米}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{两列蛇管总圈数 } N_P &= \frac{L}{l} \\ &= \frac{188}{9} \approx 20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{两列蛇管的总高度 } H &= (N_P - 1) h_P \\ &= (20 - 1) \times 0.15 \\ &= 2.85 (\text{米}) \end{aligned}$$

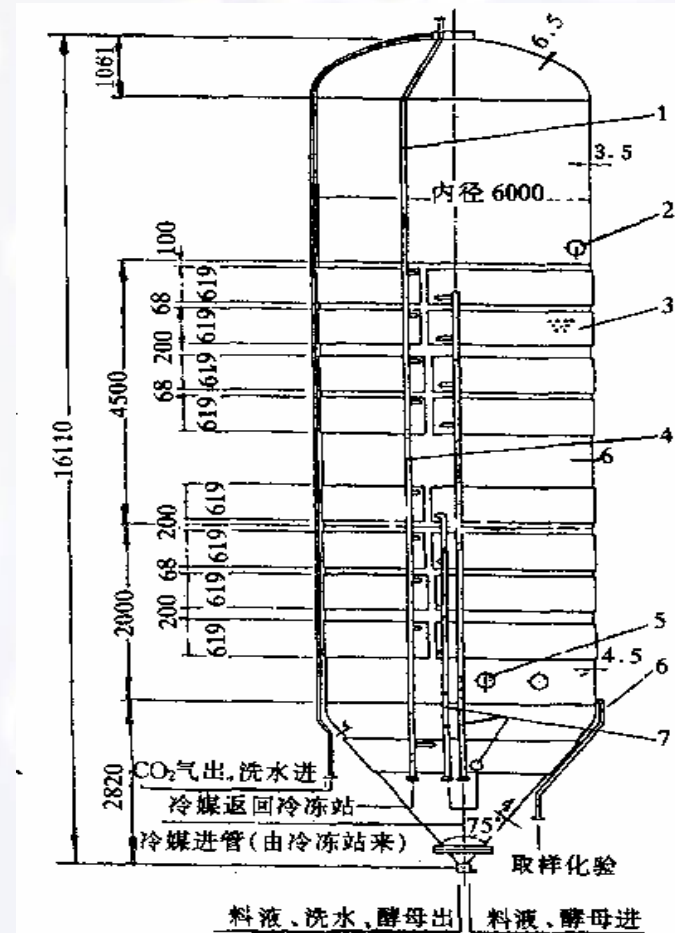
## 第二节 啤酒发酵设备及计算

- 传统的啤酒发酵设备是由分别设在发酵间的发酵池和贮酒间内的贮酒罐组成的。
- 目前圆筒体锥底罐（C.C.T）在露天大罐工艺中使用最为普遍，简称露天锥形发酵罐。



# 一、圆筒体锥底罐 (C.C.T)的结构及特点

- C.C.T发酵最大特点在于大型化，容积从100~600m<sup>3</sup>(国内也有60m<sup>3</sup>小型的)。



## 1, 设备的外型特点

- 外筒体蝶形或拱形盖，锥形体底，罐筒体壁和锥底有各种形式的冷却夹套。
- 筒体直径(D)和筒体高度(H)是主要特性参数。对单酿罐一般是D: H=1: 1~2。对两罐法的发酵罐D: H=1: 3~4，对两罐法的贮酒罐D: H=1: 1~2，也有采用直径为3~4m的卧式圆筒体罐作贮酒罐。增加H有利于加速发酵，降低H有利于啤酒的自然澄清。
- 发酵罐锥底角，考虑到发酵中酵母自然沉降最有利，取排出角为73~75°(一定体积沉降酵母在锥底中占有最小比表面积时摩接力最小)，对于贮酒罐，因沉淀物很少，主要考虑材料利用率常取锥角为120~150°。

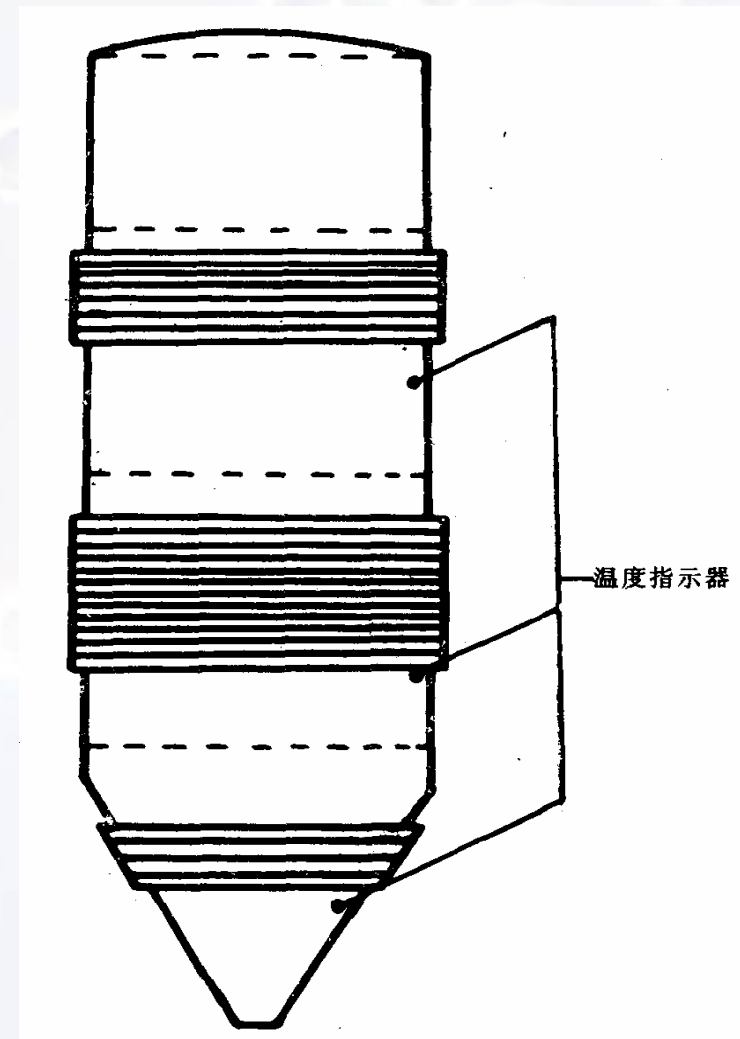


## 2, 罐材料

- 大型C.C.T均采用碳钢加涂料或不锈钢两种材料制成。啤酒是酸性液体，能造成铁的电化学腐蚀，啤酒发酵时产生的 $H_2S$ 、 $SO_2$ 对铁材料会造成氧化还原腐蚀。

### 3, 冷却夹套

- 先进的C.C.T均采用换热片式(爆炸成型)一次性冷媒直接蒸发式换热, 一次性冷媒(如氨蒸发温度为 $-3\sim-4^{\circ}\text{C}$ )蒸发后的压力在 $1.0\text{MPa}\sim 1.2\text{MPa}$ , 也就是说换热片需耐高压。
- 发酵罐或单酿罐内的冷却夹套一般分成三段, 上段距发酵液面 $15\text{cm}$ 向下排列, 中段在筒体的下部距支撑裙座 $15\text{cm}$ 向上排列, 锥底段尽可能接近排酵母口, 向上排列。



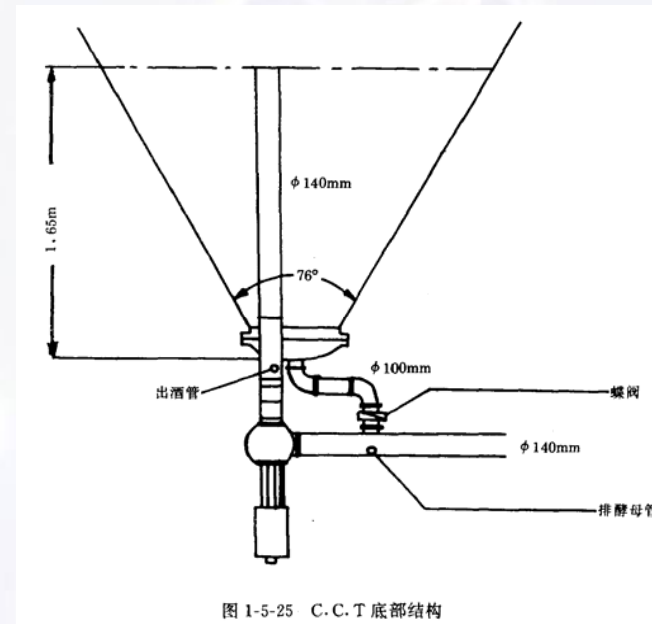
#### 4, 隔热层和防护层

- 绝热层材料应具有：导热系数低、体积质量低、吸水小、不易燃等特性。
- 啤酒C.C.T绝热层常用如下材料：聚酰氨树脂和自熄式聚苯乙烯泡沫塑料。采用上述两种绝热材料只需厚度150~200mm。膨胀珍珠岩粉和矿渣棉价格低，因吸水性大需增加厚度200~250mm。
- 外防护层一般采用0.7~1.5mm厚的合金铝板或0.5~0.7mm的不锈钢板，特别是瓦楞型板更受欢迎



## 5, 罐主要附件

- 在上中下三段冷却介质进口位置下装智能型铂温度传感器。
- 在圆筒形下部装可清洗取样阀。
- 罐顶部应有安全阀、真空破坏阀。
- 在液面上150mm 装有CIP装置。
- 还应装上视镜、灯镜、空气和二氧化碳排出管等装置。
- 锥底有直径500mm的快开人孔。如做单酿罐应具有深入锥底800-1200mm的出酒管和排酵母底阀及四通视镜。



---

---

## 二，圆筒体锥底发酵罐的优点

- 加速发酵，C.C.T发酵和传统发酵相比，由于发酵基质(麦汁)和酵母对流获得强化，可加速发酵。
- 厂房投资节省。
- 冷耗节省。
- C.C.T 发酵可依赖CIP自动程序清洗消毒，工艺卫生更易得到保证。

### 三、圆筒体锥底发酵罐的缺点

- 由于罐体比较高，酵母沉降层厚度大，酵母泥使用代数一般比传统低(只能使用5~6代)；
- 贮酒时，澄清比较困难(特别在使用非凝聚性酵母)，过滤必须强化；
- 若采用单酿发酵，罐壁温度和罐中心温度一致，一般要5~7d以上，短期贮酒不能保证温度一致

---

## 四、圆筒体锥底发酵罐的计算

- 罐的容积及尺寸
- 罐数的确定
- 冷却面积的计算