

高火炬设计

南京化学工业公司设计院 王伟沧

高火炬是石油化工厂中目前应用最广的排放可燃性气体的装置。其系统的示意流程见图1。本文就高火炬装置的火炬筒、火炬头、

分液罐、水封罐、输气管等进行设计计算并讨论。

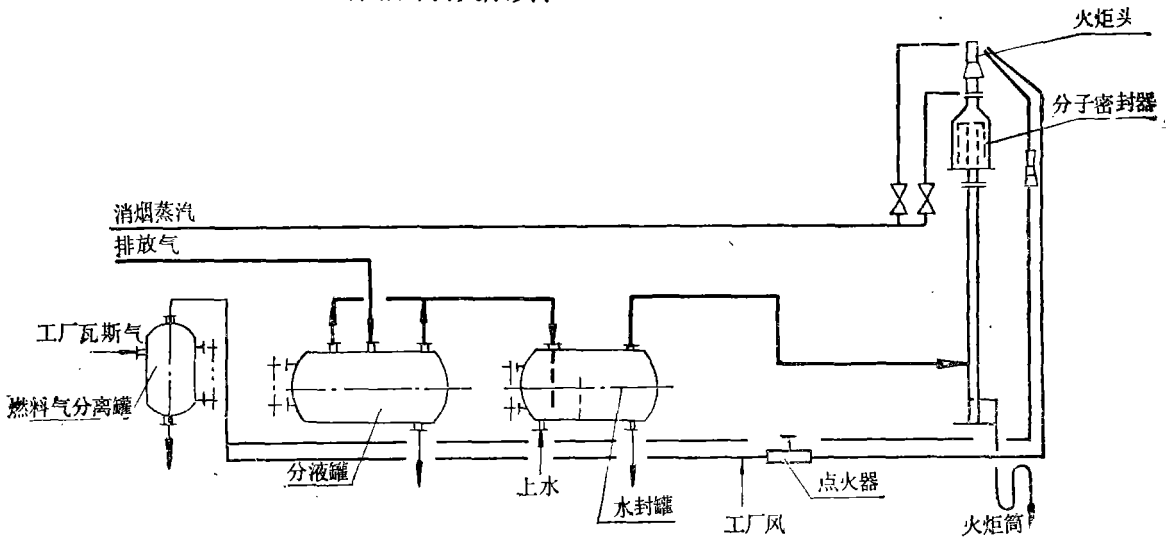


图1 火炬系统示意流程

一、火炬筒直径计算

排放气体在火炬筒内的流速通常用火炬排出口的马赫数 m 表示：

$$m = \frac{W}{W_{音}} \quad (1)$$

$W_{音}$ ——火炬气音速，米/秒；

W ——排放气流速，米/秒；

$$W_{音} = \sqrt{\frac{gkRT}{M}} \quad (2)$$

式中 g ——重力加速度，9.8米/秒²；

k ——火炬气体绝热指数，

单组份气体 $k = C_p/C_v$ ；

多组份气体 $k = \frac{\sum X_i M_i k_i}{\sum X_i M_i}$ ；

一般情况下可取 $k \approx 1.2$ ；

R ——通用气体常数， $R = 848$ 公斤·米/公斤分子·°K；

T ——火炬气排放温度，°K；

M ——排放气平均分子量，

$M = \sum X_i M_i$ 。

火炬气在火炬筒内的计算流速一般取如下值：

$W = (0.1 \sim 0.15) W_{音}$ 米/秒，（按常遇事故设计）；

$W = (0.2 \sim 0.3) W_{音}$ 米/秒，（按最大排放量设计）。

由于最大排放量的机遇甚少，一般大约每两年生产装置大修时才发生一次。为节省投资，按最大排放量设计的火炬马赫数可以取得更高，有的已达0.5~1.0。但要考虑排放设备安全阀的背压将升高。

由(1)式和(2)式导出火炬筒直径D:

$$D = 5.4 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{G}{m}} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (3)$$

G为火炬气的排放量，公斤/时。

为方便起见，火炬筒直径可由列线图(图2)查得。由设计排放量、排放气温度和平均分子量，即可查出火炬筒直径。

图2是在火炬气排放马赫数 $m=0.2$ ，排放气绝热指数 $k=1.2$ 的条件下作出的，适用于一般情况的火炬。当绝热指数相差较大时，查得的火炬直径须乘以 $1.05k^{0.25}$ 。从图2查得的火炬直径与一般无烟火炬的数据非常吻合。对于非无烟火炬，由图2查得的火炬筒体排放能力允许提高约30%。因此，由图查得的火炬筒直径应乘以0.85。

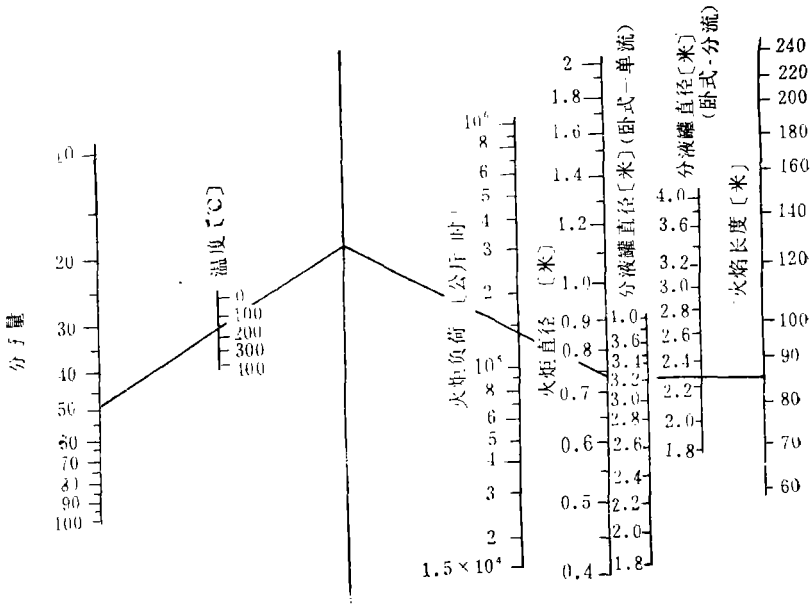


图2 火炬直径、分液罐直径和火焰长度列线图

二、火炬高度计算

火炬高度通常按地面允许的辐射热强度来决定。考虑到事故排放时，操作人员撤离现场需要一定时间，为使人体不受火炬辐射热的伤害，设计中允许辐射热强度可取如下数值：

- 无操作人员时， $[q]=4000$ 千卡/米²·时；
- 有操作人员时， $[q]=1200$ 千卡/米²·时；
- 对于不经常操作的设备， $[q]=8000$

千卡/米²·时。

上述的允许辐射热强度考虑了太阳对地面的辐射能， $q \approx 700$ 千卡/米²·时)。

火炬对地面上任一点A的辐射热强度可用下式表示：

$$q = \frac{\epsilon Q}{4\pi R^2} \text{千卡/米}^2 \cdot \text{时} \quad (4)$$

式中 q ——火炬对地面某点A的辐射热强度，千卡/米²·时；

Q ——火炬燃烧产生的热量，千卡/

小时;

R——火焰中心至A点的距离, 米;

ϵ ——火焰辐射率。

ϵ 取决于火焰的亮度。对分子量16的甲烷, $\epsilon=0.20$; 分子量44的丙烷, $\epsilon=0.33$; 对分子量较高的烃, $\epsilon=0.40$ 。 ϵ 值可近似地用下式表示:

$$\epsilon = 0.048 \bar{M}^{0.5} \quad (5)$$

\bar{M} 为排放气的平均分子量。

ϵ 值也可用气体的低发热值表示:

$$\epsilon = 0.2 \left(\frac{Q_H'}{8000} \right)^{0.5} \quad (6)$$

式中 Q_H' 为排放气体在15.6℃, 一大气压下气体的发热值, 千卡/标米³。

对单组分烃 $Q_H' = 8.899(50M+100)$ 千卡/标米³;

对多组分烃 $Q_H' = \sum X_i Q_{H_i}'$ 千卡/标米³

火炬燃烧产生的热量Q由下式计算:

$$Q = Q_H' V \text{ 千卡/时} \quad (7)$$

$$\text{或 } Q = Q_H^* G \text{ 千卡/时} \quad (8)$$

式中 V——火炬气排放量, 标米³/时;

G——火炬气排放量, 公斤/时;

Q_H^* ——火炬气低发热值, 千卡/公斤。

1. 静风条件下火炬高度计算

由图3可见在静风下稳定燃烧的火炬在底部B点有最大辐射热强度 q_{max} 。设火焰释

放热量沿火焰长度L均匀分布, 则 q_{max} 可用下式表示:

$$q_{max} = \frac{\epsilon Q}{4\pi H(H+L)} \leq [q] \quad (9)$$

在B点 $X=0$, 于是:

$$R = Y_A = [H_A(H_A+L)]^{0.5} \quad (10)$$

解(9)和(10)式得静风时稳定燃烧的火炬高度表达式:

$$H_A = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + \frac{\epsilon Q_H^* G}{\pi [q]} - \frac{L}{2}} \text{ 米}$$

将 $\epsilon=0.048M^{0.5}$ 代入上式得:

$$H_A = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + 1.528 \times 10^{-2} \bar{M}^{0.5} Q_H^* G - \frac{L}{2}} \text{ 米} \quad (11)$$

当 $[q] = 1200$ 千卡/米²·时(火炬下无操作人员):

$$H_A = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + 1.273 \times 10^{-5} \bar{M}^{0.5} Q_H^* G - \frac{L}{2}} \text{ 米} \quad (12)$$

当 $[q] = 4000$ 千卡/米²·时(火炬下无操作人员):

$$H_A = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + 3.28 \times 10^{-6} \bar{M}^{0.5} Q_H^* G - \frac{L}{2}} \text{ 米} \quad (13)$$

当 $[q] = 8000$ 千卡/米²·时(对需要防护的设备):

$$H_A = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + 1.91 \times 10^{-6} \bar{M}^{0.5} Q_H^* G - \frac{L}{2}} \text{ 米} \quad (14)$$

在静风下, 当火炬气在火炬筒出口的马赫数大于0.5时, 火焰将脱离火炬头而被“托起”(图4)。此时设计的火炬高度 H_B 应由(11)式的 H_A 减去火焰被托起的高度 h :

$$H_B = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + \frac{1.528 \times 10^{-2} \bar{M}^{0.5} Q_H^* G}{[q]} - \frac{L}{2}} - h \text{ 米} \quad (15)$$

$$\text{式中 } h = 25.15 mD \text{ 米} \quad (16)$$

$$\text{或 } h = 5.03 \frac{m}{m'} D \text{ 米} \quad (17)$$

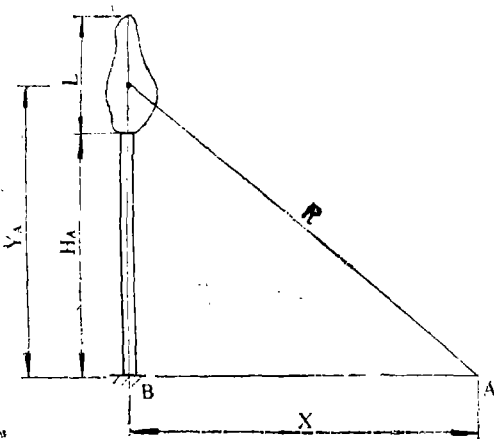


图3 静风下稳定燃烧的火炬

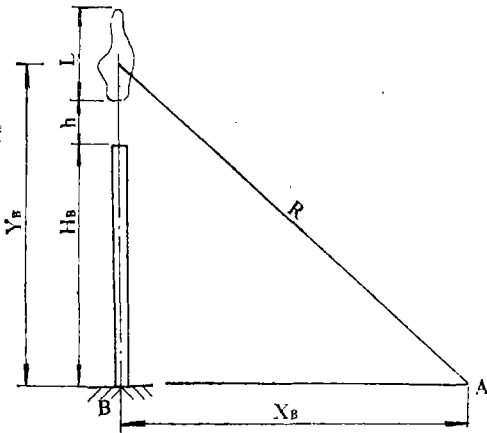


图4 静风下火焰脱离火炬头的火炬

m为火炬筒出口马赫数；m'为火焰根部马赫数，m'≈0.2；D为火炬筒直径（米）

2. 受风影响火焰倾斜时火炬高度计算

受风影响时，火焰将倾斜（图5），倾斜角θ为：

$$\theta = \arctg \frac{W_c}{W} \quad (18)$$

W_c为风速，米/秒；W为火炬气在火炬筒出口的气速，米/秒。

由图可见，火焰对地面的最大辐射点在C点。火焰中心的水平偏移：

$$X_{BC} = (Y_A - H_A) \sin \theta \quad (\text{米}) \quad (19)$$

因火焰倾斜，火焰中心的垂直偏移为：

$$\Delta H_c = (Y_A - H_A) - (Y_A - H_A) \cos \theta \quad (\text{米}) \quad (20)$$

式中H_A为静风下火焰高度，Y_A为静风下火焰的中心高度。

火焰倾斜时的火炬高度：

$$H_c = H_A + \Delta H_c = Y_A - (Y_A - H_A) \cos \theta \quad (\text{米}) \quad (21)$$

在风影响下火焰倾斜，并被吹离火炬头而被“托起”时（图6），地面的最大辐射热强度在D点：

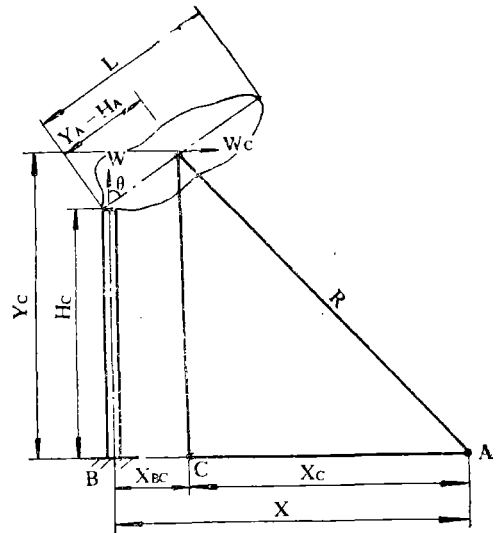


图5 受风影响火焰倾斜时的火炬

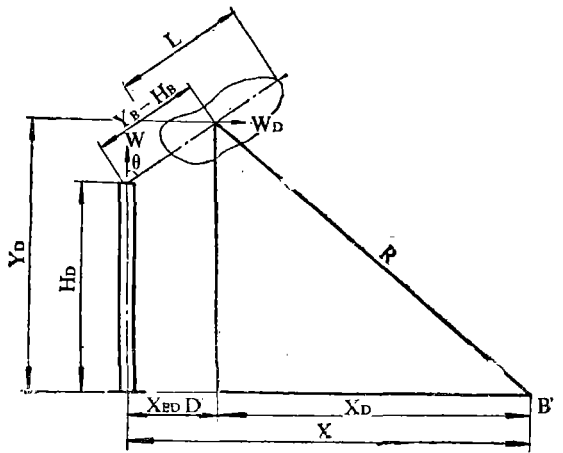


图6 火焰倾斜并脱离火炬头的火炬

火焰中心的水平偏移：

$$X_{BD} = (Y_B - H_B) \sin \theta \quad (\text{米}) \quad (22)$$

火焰中心因风影响的垂直偏离：

$$\Delta H_D = (Y_B - H_B) - (Y_B - H_B) \cos \theta \quad (\text{米}) \quad (23)$$

式中Y_B为无风时火焰被“托起”时的火焰中心高度，H_B为无风时火焰被“托起”的火炬高度。

因此，火焰倾斜并被“托起”时的火炬高

度:

$$H_D = Y_B - (Y_B - H_B) \cos \theta \text{ 米} \quad (24)$$

上述计算中, 火焰高度L取决于排放气的性质和排放速度。当排放气马赫数 $m = 0.1 \sim 0.2$ 时, 可用肯特公式计算:

$$L = 118D \text{ 米} \quad (25)$$

也可以查图7。

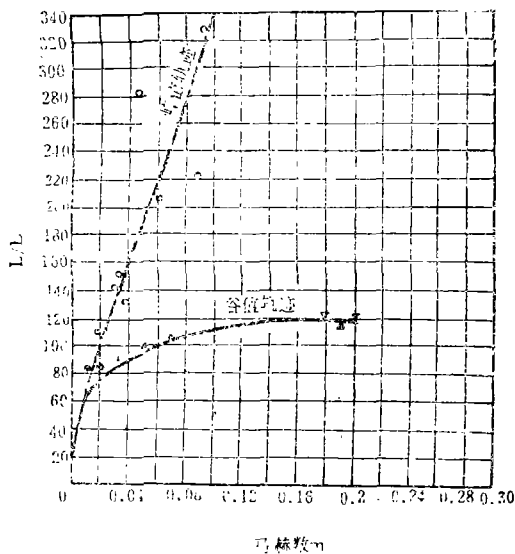


图7 排放到静止大气中火炬的峰值、谷值和吹离点轨迹。

当 $m > 0.2$ 时,

$$L = 2.5\bar{M}D \text{ 米} \quad (26)$$

\bar{M} 为排放气的平均分子量。

也有人推荐用田享公式计算火焰长度:

$$L = 0.72 \times 10^3 D m \text{ 米} \quad (27)$$

式中, D为火炬头直径, m为排放气马赫数。

由上述公式计算的火炬高度, 是以火炬中心在地面上的投影点的辐射热强度不超过允许热强度 $[q]$ 为基准考虑的, 所求得的高度为最大高度。按此计算的高度是安全的, 但却是不经济的。

以静风条件下稳定燃烧为例(见图3), 当 $X \neq 0$ 时, 对于A点, 火炬高度H应按下式计算:

$$X^2 = R^2 - H(H+L) \quad (28)$$

式中R为安全辐射距离, 取式(11)计算的 H_A 值; X为地面A点至火炬中心投影点C的距离, 取决于事故排放时人从火炬下撤离至安全辐射区的速度和时间。

$$X = W_p t \text{ (米)}$$

W_p ——人撤离的速度, 一般取6米/秒;

t——从火炬下撤离至安全区的时间,

可取10~20秒。

由式(28)算出的X的轨迹即为火炬的安全辐射界线, 在轨迹范围以外即为安全辐射区。

三、火炬头

火炬头即火炬燃烧器, 种类繁多, 典型的火炬头结构如图8。

火炬头是实现稳定燃烧的关键部件, 而实现稳定无烟燃烧的关键是消烟蒸汽。消烟蒸汽的压力一般为 $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$, 也有采用 $6 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ 蒸汽的, 通常采用过热蒸汽。消烟蒸汽量为 $0.3 \sim 0.5$ 公斤蒸汽/公斤烃类气体, 对于烷烃和分子量较小的烃类气体取0.3; 对烯烃和分子量较大的烃类气体取0.5; 一般情况下取0.35。一般可按下式计算消烟蒸汽量:

$$G_{H_2O} = G_{HC} \left(0.68 - \frac{10.8}{\bar{M}} \right) \quad (29)$$

式中 G_{H_2O} ——计算的消烟蒸汽量, 公斤/小时;

G_{HC} ——烃类气体排放量, 公斤/时;

\bar{M} ——排放气平均分子量。

由式(29)计算的消烟蒸汽量, 对于平均分子量较大的烃类气体, 结果要偏大一些。也有人根据消烟蒸汽所带入的一次空气量来计算消烟蒸汽量。消烟蒸汽量也可由计算图(图9)查得。

由于火炬头的操作条件比较苛刻, 且高

火炬头的检修更换困难，所以长明灯、聚火块、喷嘴等关键部位通常采用Cr25Ni12、Cr25Ni20、Cr20Ni32等高铬镍合金钢；火

炬头的筒体温度大约800~900℃，常采用1Cr18Ni9Ti。

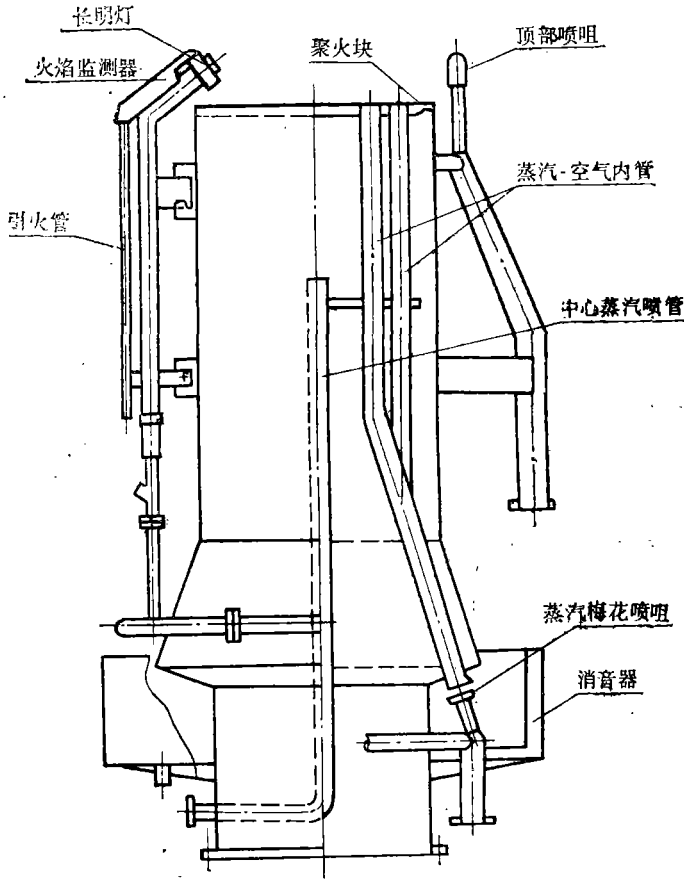


图8 典型火炬头结构

火炬头的火焰受风影响发生倾斜，倾斜的方向又经常改变。受风面筒体表面温度较低；背风面因受火焰辐射，筒体表面温度较高，使筒体承受着交变的温差应力，极易导致筒体焊缝发生裂纹。故对火炬筒体的焊接应按二类容器的焊缝要求进行。

四、分液罐

火炬系统的分液罐用于分离排放气体所夹带的烃类液滴，防止在火炬周围下“火雨”。分液罐大多为单流或双流式卧式罐（图10）。

分液罐的直径为火炬筒体直径的3~4.5倍。粗略计算可根据图2的列线图查得。

由图2的列线图查分液罐的直径，适用分离400微米直径液滴的情况，对于其它直径的液滴可近似地按下式考虑：

$$d = 400 \left(\frac{D_0}{D} \right)^4 \tag{30}$$

式中d为要分离的液滴直径，微米；D₀为从图2查得的分液罐直径。要分离直径为150微米液滴的分液罐，其直径为：

$$D = 1.278 D_0 \tag{31}$$

分液罐直径的详细计算可按式：

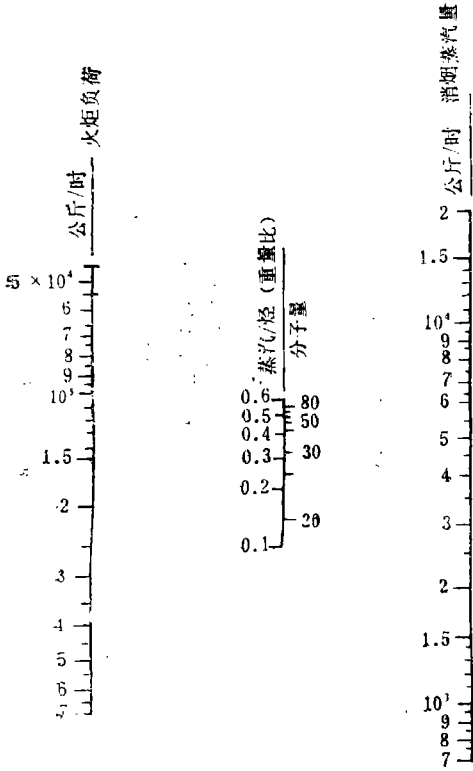
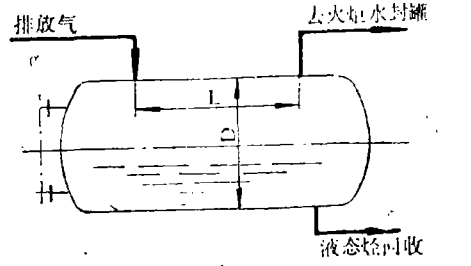
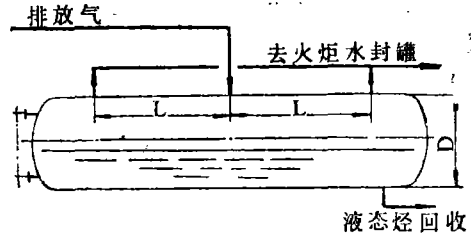


图9 消烟蒸汽量计算图



a 单流式分液罐



b 双流式分液罐

图10 卧式分液罐

单流式分液罐:

$$D^2 = \frac{G}{530} \sqrt{\frac{T}{\gamma_L P \bar{M}}} \quad (32)$$

双流式分液罐:

$$D^2 = \frac{G}{1060} \sqrt{\frac{T}{\gamma_L P \bar{M}}} \quad (33)$$

- 式中 D——分液罐直径, 米;
 T——分液罐操作温度, °K;
 P——分液罐操作压力, kg/cm² (绝压);
 \bar{M} ——火炬气平均分子量;
 γ_L ——分离液体的重度, 公斤/厘米³;
 G——通过分液罐的火炬气重量流率, 公斤/时。

分液罐气相进口与出口之间的距离L一般为2~3D。可按下式计算:

$$L \geq \frac{Vt}{A_c} \text{ 米} \quad (34)$$

式中 V——火炬气通过分液罐的体积流量, 米³/秒;

t——火炬气在分液罐内停留时间, 秒;

A_c ——分液罐内气相通道截面积, 米²。

$$A_c = 0.785aD^2$$

式中a是气相空间的有效截面系数, 决定于分液罐的存液量。存液量可按停留20~30分钟考虑, 一般取a=0.7。

火炬气在分液罐内的停留时间t应大于液滴在罐内的沉降时间 t_d 。

$$t_d = \frac{D}{W_d} \text{ 秒} \quad (35)$$

W_d 为液滴沉降速度, 米/秒。

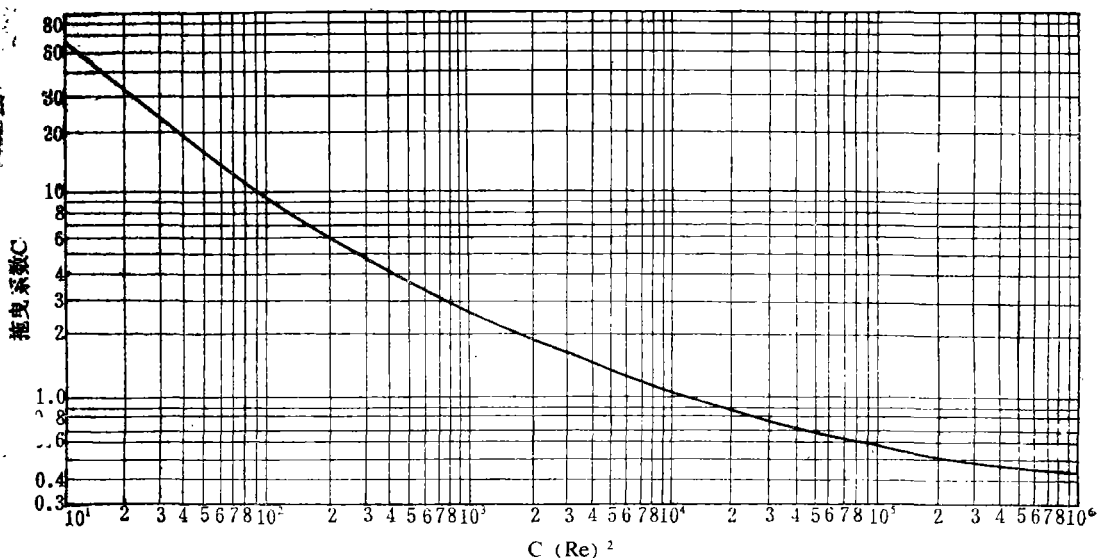


图11 拖曳系数C(分离液滴直径d=150微米)

$$C(Re)^2 = \frac{119 \times 10^{-4} \rho_v (\rho_L - \rho_v)}{\mu_2}$$

μ —气体粘度, 厘泊; ρ_v —气体密度, 磅/英尺³;
 ρ_L —液体密度, 磅/英尺³。

$$W_d = 2 \sqrt{\frac{gd(\gamma_L - \gamma_g)}{\gamma_g \cdot C}} \quad (36)$$

当被分离的液滴直径d=150微米, 并忽略气相重度 γ_g 的影响, 则(36)式可简化为:

$$W_d = 0.07 \sqrt{\frac{T \gamma_L}{MPC}} \quad (37)$$

式中, C为拖曳系数, 可查图11。P为分液罐的设计压力, 应大于分液罐出口端至火炬排放点的总阻力降, 且不小于2kg/cm²。

对于立式分液罐, 通常需要较大直径, 一般大致相当于单流式卧式分液罐直径的1.4倍。

五、水封罐

水封罐在火炬系统中起防止火炬回火的安全保护作用。卧式水封罐结构如图12。

水封罐直径可按下式计算:

$$D^2 = \frac{G}{757(1-b)} \sqrt{\frac{T}{\gamma_L P M}} \quad (38)$$

式中 G—排放气重量流量, 公斤/时;

T—排放气温度, °K;

P—水封罐操作压力(绝压), kg/cm²;

γ_L —液沫重度, kg/m³。一般取水的重度;

M—排放气平均分子量;

b—系数, 取决于h/D, h为堰高。b可查表1。

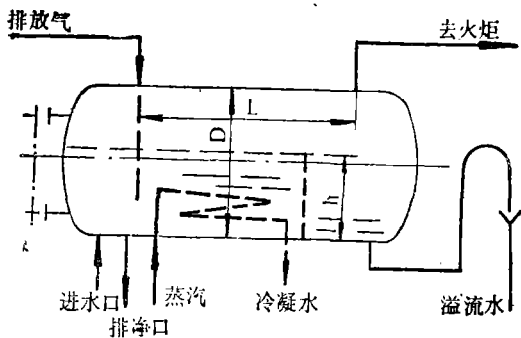


图12 水封罐

溢流堰高度h应考虑水封罐内气相空间的气流速度不大于W, 以免发生液沫夹带。

$$W = 0.08138 \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (39)$$

式中 ρ_L —进罐流体密度, 公斤/米³, 取水的密度;

ρ_g ——气相密度,公斤/米³。

水封罐气相进出口间的距离 $L = (2 \sim 3)D$

气体入口管线应伸入密封水中200~300毫米管端开锯齿形缺口。

表 1

h/D	b	h/D	b	h/D	b	h/D	b
0.22	0.163	0.38	0.349	0.54	0.551	0.70	0.748
0.24	0.185	0.40	0.374	0.56	0.576	0.72	0.771
0.26	0.207	0.42	0.399	0.58	0.601	0.74	0.793
0.28	0.229	0.44	0.424	0.60	0.627	0.76	0.816
0.30	0.252	0.46	0.449	0.62	0.651	0.78	0.837
0.32	0.276	0.48	0.475	0.64	0.676	0.80	0.858
0.34	0.300	0.50	0.500	0.66	0.700		
0.36	0.324	0.52	0.526	0.68	0.724		

溢流堰的位置应考虑水封罐下游回爆时能提供足够的水封高度,一般认为水封高度至少应3米。排液管应有适当的水封高度。

水封罐设计压力取火炬回爆时的回爆压力。水封罐常流水量取0.5~5.0米³/时。

六、输气管

火炬系统的输气管规格由气体的排放量和系统的压降决定。管内气速按火炬满负荷时的排放量确定。有时输气管终端的气速接近于音速。

输气管直径可按下列适用公式计算:

$$d^2 = 5.43 \times 10^{-5} \frac{G}{P_2} \sqrt{\frac{T}{M}} \left(\frac{P_2/P_1}{G/G_{max}} \right)$$

式中 d ——输气管直径,米;

G ——排气重量流量或火炬能力,公斤/时;

P_2 ——排气管终端压力(绝压),公斤/厘米²;

T ——排放气温度,°K;

M ——排放气平均分子量;

$\left(\frac{P_2/P_1}{G/G_{max}} \right)$ ——输气管终、始端压力

之比和正常、最大排放量之比的参数;

其大致范围为:

安全阀上游管线: 2~4;

安全阀下游管线: 1~2;

火炬总管: 1~2;

火炬烟囱: 2~3。

利用Lapple图(13)计算排气管直径最方便。Lapple图适用于

$$k = \frac{C_p}{C_v} = 1.4 \text{ 的气体, 但对于 } k \neq 1.4$$

的气体也不会产生太大误差,特别是摩擦系数 $N \geq 3$ 时。

先假定一输气管直径 d ,计算摩擦系数 N ,根据 P_2/P_1 和 N 查图13,得

$$\left(\frac{P_2/P_1}{G/G_{max}} \right) \text{ 由式(40)核算排气管直}$$

径 d ,直到假定的 d 和计算的 d 相近为止。

阻力系数 N 可按下式求取:

$$N = 9.67 \times 10^{-3} \frac{L}{d^{1.23}} + \sum K \quad (41)$$

式中 N ——摩擦阻力系数,

L ——输气管直管长度,米;

d ——输气管直径,米;

K ——管件阻力系数, $K = (0.389/d^{0.23}) Le$

Le ——管件当量长度,米,可查有关手册。

需要注意的是, $\left(\frac{P_2/P_1}{G/G_{max}} \right)$ 的值不

能小于0.5,最好不小于1.0,否则管内气速太高,运行中会产生高噪音。

排入火炬系统的安全阀,通常允许背压为安全阀定压的1/10。

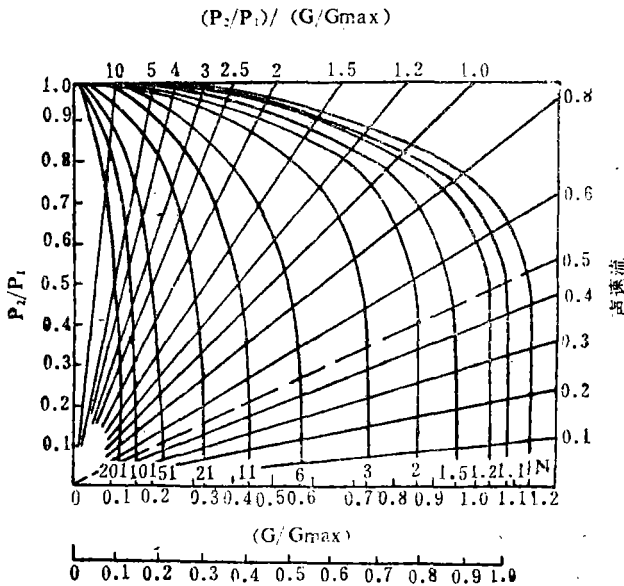


图13 修正的Lapple图 (k=1.4)

火炬系统输气总管的正常负荷，取一个生产装置事故状态下最大排放量。火炬系统的最大负荷取所有连接火炬系统的安全阀同时排放量之和。

对于给定的流率和排放压力，输气管的阻力 ΔP 近似地与输气管直径 d 的五次方成反比，据此可对管线压降作粗略估计。

(上接第64页)

为在塔内对传质结构进行研究，安装三个截面为 $500 \times 150\text{mm}$ ，高 300mm 的塔段。采用舌孔截面为 $0.3\text{m}^2/\text{m}^2$ 的舌型塔盘，高 260mm 的强化器装在塔盘上方，与塔盘保持 30mm 的间隙。用水-空气系统研究其流体力学特征；用光电比色方法计量带液量，从空气水溶液中解吸 CO_2 ，对传质进行研究；并用实验方法来确定其最佳结构及几何尺寸。

于在下列条件下操作：

溢流强度 $L = 5 \sim 20\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{h}$ ；

空塔气速 W 上限 $3 \sim 4\text{m/s}$

下限 $1.6 \sim 2.0\text{m/s}$ ，

在流体阻力不大，液相负荷低，气相负荷高，且液体较脏或有沉淀的物料分离时，推荐使用上述的传质设备。

实验研究证明，这种特殊结构的塔盘适

刘燕龄摘译自《ХИМИЧЕСКОЕ И НЕФТЯНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ》
No.3 1986

书讯：《美国石油学会文件选编油品储运部分》出版

本书包括下列八个文件。1.API通报2513《石油工业蒸发损耗的起因和控制》(1973年版)；2.API通报2516《低压罐的蒸发损耗》(1962年版)；3.API出版物2517《外浮顶油罐的蒸发损耗》(1980年版)；4.API通报2518《固定顶罐的蒸发损耗》(1962年版)；5.API通报2512《常压储罐用呼吸阀降低蒸发损耗》(1966年版)；6.API

标准2000《常压储罐和低压蒸罐的通气》(1982年版)；7.API出版物931《炼厂废气排放手册第15章火炬》(1977年版)；8.API推荐实用规程520《炼油厂压力泄放系统的设计和安装》第一部分设计(1976年版)。全书约270页，定价8.50元(包括邮寄费)。由中国石化总公司设备中心站出版。通讯处：北京949信箱，需要者请从速订购。