

空分装置冷箱基础和管道的保温设计

曹 琪

(包头钢铁设计研究院)

1. 空分装置冷箱基础的外表面温度标准和设计改进

1.1 冷箱基础的种类和事故

目前,我国现有制氧机空分装置的冷箱基础主要分为两大类:一是不带通风的大块式地下基础;二是带通风的地下基础。两类基础均分为两层,上层均采用珠光砂混凝土的隔冷材料,下层采用钢筋混凝土的承重结构。但是带通风的则在珠光砂混凝土层之下,在钢筋混凝土上半部加通风孔,或者在钢筋混凝土底部采用通风框架。

近年来,钢铁企业内连续发生冷箱基础下部土壤冻胀事故,如武钢、柳钢、大冶和鄂城钢厂等,迫使冷箱基础上拱、裂缝,大量跑冷,且设备倾斜,无法继续生产出氧,造成严重后果,有的甚至搬迁重建。

关于冷箱基础冻胀事故的原因是多方面的,这里只就传冷热工计算有关问题进行分析。

冷箱基础隔冷设计是属于控制外表面温度而确定厚度,即安全厚度。外表面温度即基础底部温度,应保证高于 0°C 而不结冻。

冷箱基础传冷热工计算的数学分析与传热计算相同,是属于稳定状态下多层平壁的传热问题。由于冷量传递的方向与温度增加的方向一致,所以傅立叶定律的导热基本方程式中的符号采用正号。

$$Q = +\lambda F \frac{dt}{dx}, \text{ kcal/h}$$

移项并积分可得:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \int_0^L \frac{Q}{\lambda F} dx$$

$$\therefore q = \frac{Q}{F} = \frac{t_2 - t_1}{\frac{L}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{R}, \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

对于多层平壁的冷损失(例如四层):

$$q = \frac{t_4 - t_0}{\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{L_4}{\lambda_4}} = \frac{t_4 - t_0}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}, \text{ kcal/m}^2\text{h}$$

式中: t_0, t_4 ——为冷源,热源温度, $^{\circ}\text{C}$;
 L_1, L_2, L_3, L_4 ——各层厚度, m;
 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ——各层导热系数, $\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$

1.2 冷箱基础设计改进

对天津二钢日立3200空分冷箱基础进行了改进。将原日立提供的大块式地下基础修改为带通风的地下框架式。

原日立提供的冷箱基础平面尺寸为:

$$11.4 \times 12.8 = 145.92\text{m}^2; \text{剖面尺寸见图1。}$$

下塔底部表面温度 $t_0 = -180^{\circ}\text{C}$ 。各层隔冷材料分别为:下塔和基础顶面之间填充散状珠光砂(珍珠岩),基础本体上层为珠光砂混凝土,基础本体下层为钢筋混凝土,基础置于带地下水的土壤中。

天津地区地下水位为 -1.45m ,地温资料为: -4.00m 处地下稳定温度 $+15.5^{\circ}\text{C}$ 。

各隔冷层材料和土壤的导热系数见表1。

现分析该基础底部外表面是否结冻:

(1) 各隔冷层热阻 $\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C/kcal}$

$$\text{散状珠光砂层: } R_1 = \frac{L_1}{\lambda_1} = \frac{0.150}{0.04} = 3.75,$$

$$\text{珠光砂混凝土层: } R_2 = \frac{L_2}{\lambda_2} = \frac{1.2}{0.2} = 6.00,$$

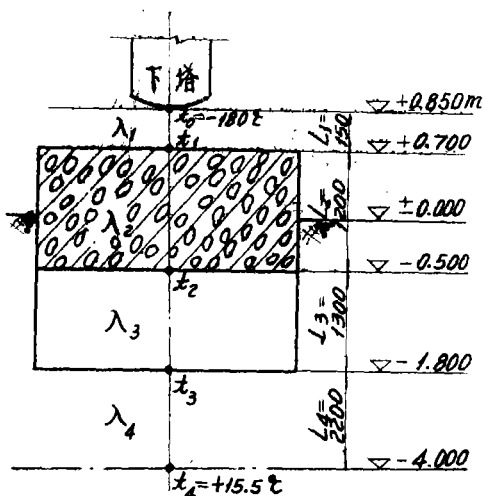


图1 日立提供的冷箱基础合地图

$$\text{钢筋混凝土层: } R_3 = \frac{L_3}{\lambda_3} = \frac{1.3}{1.4} = 0.93,$$

$$\text{土壤层: } R_4 = \frac{L_4}{\lambda_4} = \frac{2.2}{1.5} = 1.47,$$

(2) 基础总热阻

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \\ = 12.15, \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} / \text{kcal}$$

(3) 基础允许散冷量 (冷损失)

$$q = \frac{\Delta t}{\Sigma R} = \frac{t_4 - t_0}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \\ = 16.09, \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$$

(4) 各隔冷层温度变化

$$t_0 = -180^\circ\text{C} \text{ (已知)}$$

$$t_1 = t_0 + qR_1 = -119.7^\circ\text{C}$$

$$t_2 = t_1 + qR_2 = -23.2^\circ\text{C}$$

$$t_3 = t_2 + qR_3 = -8.2^\circ\text{C}$$

$$t_4 = +15.5^\circ\text{C} \text{ (已知)}$$

(5) 基础底部外表面温度校核

$$t_3 = t_4 - qR_4 = 15.5 - 16.09 \times 1.47 \\ = -8.2^\circ\text{C}$$

说明 $t_3 = -8.2^\circ\text{C}$, 计算正确无误。业已结冻, 需进行设计方案修改, 改为通风式基础。

1.3 改进设计分析意见和运行

(1) 对国外提供资料要严格进行审校。

表1 各隔冷层材料和土壤的 λ

部 位	材 料	厚度 mm	导热系数 λ kcal/m h $^\circ\text{C}$
下塔和基础 顶面之间	散状珠光砂	$L_1=150$	$\lambda_1=0.04$
基础上层	珠光砂混凝土	$L_2=1200$	$\lambda_2=0.2$
基础下层	钢筋混凝土	$L_3=1300$	$\lambda_3=1.4$
基础底部 外表面	带地下水的土壤	$L_4=2200$	$\lambda_4=1.5$

日立3200空分冷箱基础经审校计算, 说明基础底部外表面温度 $t_3 = -8.2^\circ\text{C}$ 已低于 0°C 而结冻。故日立提供资料有误。

(2) 冷箱基础设计要重视地下水位资料。

日立3200冷箱基础底部原埋设深度为 -1.80m , 而天津地下水位较高, 为 -1.45m , 基础下层浸泡在水中。大量的水分是结冰的根本原因。

(3) 冷箱基础设计要结合地温。

(4) 任何空分装置都会发生不正常情况。因此, 设计时要考虑不正常情况下是否结冻。本设计如考虑漏液为 100mm , 则散状珠光砂层有效厚度只有 50mm 了。据此, 再计算基础底部外表面温度已达 -14°C 。

(5) 改进方案。已将大块式基础改进为带通风散冷、地下框架式, 基础底部标高为 -1.2m , 高于地下水位 -1.45m 的冷箱基础。

(6) 投产运行。

修改后, 按修改方案进行施工。现已投产数年, 生产运行正常。实践证明, 设计改进是合理的。

2. 管道保温层经济厚度与热损失标准

2.1 管道经济厚度计算式

增加管道与设备的保温层厚度, 则热损失可以降低, 但却增大了保温结构的基建投资费用。如保温层厚度减少, 则热损失将增大。因此, 必须通过技术经济详细比较, 确定既是合理的热损失, 又是经济的保温结构。热损失标准和经济厚度就是为解决这一

问题而提出来的。

当保温结构在一定保温层厚度下, 全年热损失价值和保温投资的年管理、折旧费用两者之间的和为最小值。这个保温厚度就是经济厚度, 相应的热损失就是允许热损失标准。

保温经济厚度, 可由下列计算式算出:

$$Y = b \cdot Q + P_0 \cdot S_0 = \text{最小值, 元/年} \cdots \cdots (1)$$

式中: b ——热能单价, 元/ 10^6 kcal ;

Q ——全年热损失, 10^6 kcal/年 ;

P_0 ——保温结构每年的管理、折旧率, %;

S_0 ——管道保温结构的基建投资费用, 元。

$$P_0 = P + \frac{1}{T}, \% \cdots \cdots (2)$$

式中: P ——保温结构检修折旧每年分摊率, %;

T ——保温投资回收年限, 年;

$$S_0 = SV + SuF, \text{元} \cdots \cdots (3)$$

式中: S ——主保温层单价, 元/ m^3 ;

V ——主保温层体积, m^3 ;

Su ——保护层单价, 元/ m^2 ;

F ——保护层面积, m^2 。

$$Q = n \cdot q = \frac{n(t_0 - t_k)}{\frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2}}, \text{kcal/年} \cdots \cdots (4)$$

式中: n ——年工作小时;

d_1, d_2 ——主保温层内、外直径, m ;

λ_1 ——保温材料的导热系数,

$\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$;

t_0 ——热介质的温度, $^\circ\text{C}$;

t_k ——保护层周围空气温度, $^\circ\text{C}$;

α_2 ——保护层外表面放热系数,

$\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

2.2 保温层经济厚度图解法

上述公式(1)可以用图解法求出经济厚度。

如图2, 曲线①为全年热损失费用, 随

着保温厚度增加而减少; 曲线②为保温结构年管理折旧费用, 随着厚度的增加而提高。两者相加, 求得年总运行费用曲线③。

由曲线③找出最低点M, 它的横坐标就是保温层的经济厚度 δ_e , 由纵坐标N再折算出允许的热损失标准 q_0 。

2.3 保温层经济厚度数学分析法

数学分析法是根据数学原理, 求得全年的热损失费用和全年的保温结构管理、折旧费用之和为最小值, 导出保温层的经济厚度的计算公式。

由公式(1)得:

$$Y = b \cdot Q + P_0 \cdot S_0$$

$$\therefore Y = \frac{n \cdot b \cdot \pi (t_0 - t_k)}{10^6 \left(\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)} + \left(P + \frac{1}{T} \right) \left[S \cdot \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) + Su \pi d_2 \right]$$

对上式取Y对 d_2 的微分, 并令导数等于零, 即 $\frac{dY}{dd_2} = 0$, 可求得最经济的 d_2 值。而 $\delta_e = \frac{1}{2} (d_2 - d_1)$, 即保温的经济厚度。

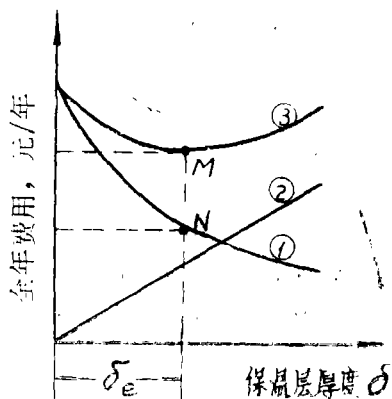


图2)保温层经济厚度图解

$$\frac{dY}{dd_2} = \frac{nb\pi (t_o - t_k)}{10^8 \left(\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)^2} (-1)$$

$$\left[\frac{1}{2\lambda_1} \frac{1}{d_2} \frac{1}{d_1} - \left(\frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)^2 \alpha_2 \right]$$

$$+ \left(P + \frac{1}{T} \right) \left[S \frac{\pi}{4} \cdot 2d_2 + Su\pi \right]$$

$$= \frac{-nb\pi (t_o - t_k)}{10^8 \left(\frac{1}{2\lambda_1} \frac{1}{d_2} \right)^2 \left[\frac{d_2}{d_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{2\lambda_1}{\alpha_2 d_1} \right]^2}$$

$$\cdot \frac{1}{2\lambda_1 d_2} \left[1 - \frac{2\lambda_1}{\alpha_2 d_2} \right]$$

$$+ \left(P + \frac{1}{T} \right) \frac{\pi d_2}{2} \left[S + \frac{2Su}{d_2} \right] = 0$$

$$\text{即 } \frac{-nb (t_o - t_k) \lambda_1 \left(1 - \frac{2\lambda_1}{\alpha_2 d_2} \right)}{10^8 \left(\frac{1}{d_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{2\lambda_1}{\alpha_2 d_1} \right)^2 \cdot \frac{d_2^2}{4}}$$

$$+ \left(P + \frac{1}{T} \right) \left(S + \frac{2Su}{d_2} \right) = 0$$

将上式移项并开方, 得到

$$\frac{2}{d_1} \sqrt{\frac{nb (t_o - t_k) \lambda_1}{10^8 \left(P + \frac{1}{T} \right) \left(S + \frac{2Su}{d_2} \right)}}$$

$$= \frac{\frac{d_2}{d_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{2\lambda_1}{\alpha_2 d_1}}{\sqrt{1 - \frac{2\lambda_1}{\alpha_2 d_2}}} \dots\dots (5)$$

2.4 包头地区管道保温经济厚度和允许热损失

敷设在包头地区室外露天的热力管道: 热介质为450℃的过热蒸汽, 管道外径D219。保温层为水泥珍珠岩制品, 其导热系数 $\lambda_2 = 0.09 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$, 保护层为水泥石棉硅藻土, 厚度为15mm, 其导热系数 $\lambda_3 = 0.2 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 。周围空气温度为+5℃, 放热系数 $\alpha_2 = 22 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ 。年工作小时 $n = 7500$ 。

包头地区保温材料价值见表2。

表2 包头地区保温材料价值

项 目	单 位	制作基价 (元)	安装费 (元)	附加费 系 数	单 价 (元)
水泥珍珠岩瓦块	m ²	144	26.12	1.3	220
水泥蛭石瓦块	m ²	101	17.87	1.3	155
石棉硅藻土瓦块	m ²	365.6	26.12	1.3	509
超细玻璃棉毡	m ²	230.80	12.45	1.3	316
矿渣棉制品	m ²	213.91	12.45	1.3	295
石棉硅藻土水泥 保护层 (10mm)	10m ²	31.78			41
保护层 (15mm)		47.30		1.3	62
缠玻璃布保护层	10m ²	20.66		1.3	27

包头市热能单价: $b = 6.5 \text{ 元}/10^6 \text{ kcal}$

投资回收年限: $T = 7 \text{ 年}$,

保温结构检修、折旧费用的每年分摊

率: 取 $P = 12.7\%$

试确定管道保温层的经济厚度及允许热损失标准。

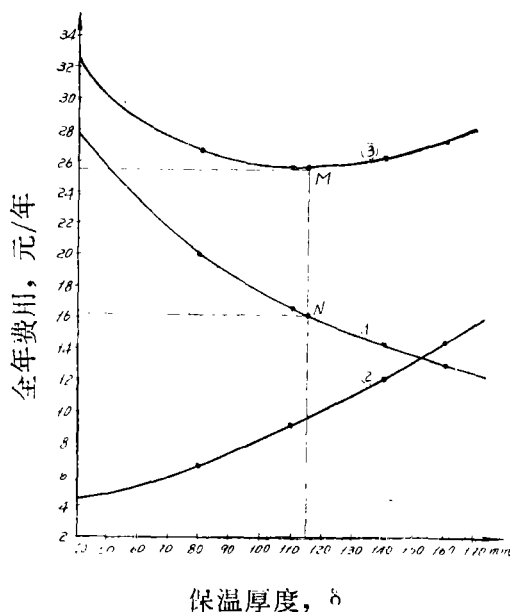


图3 包头地区管道保温经济厚度计算图

先用图解法: 计算数值列表于表3, 全部计算以1米长度管道为基础。厚度分别假定为50、80、110、140和160mm进行计算。

表3热损失详细计算公式为:

表3

计算数值表

项 目	计算公式或已知数	计 算 数 值				
δ (mm)	假 设	40	80	110	140	160
q (kcal/h)	$q = \frac{\Delta t}{\sum R}$	569	414	338.4	296.07	267
bQ (元/年)	$b \cdot Q = \frac{b \cdot n \cdot q}{10^6}$	27.88	20.3	16.58	14.24	13.08
V (m ³)	$V = \frac{\pi}{4} (d_3^2 - d_2^2)$	0.042	0.0751	0.114	0.158	0.189
F (m ²)	$F = \frac{\pi}{4} d_4^2$	1.03	1.22	1.41	1.58	1.8
S_0 (元)	$S_0 = 220V + 6.2F$	15.67	24	33.82	44.56	52.96
$P_0 S_0$ (元/年)	$P_0 S_0 = (P + \frac{1}{T}) S_0 = 0.27 S_0$	4.23	6.48	9.13	12.03	14.3
Y (元/年)	$Y = bQ + P_0 S_0$	32.11	26.78	25.71	26.27	27.38

$$q = \frac{\Delta t}{\sum R} = \frac{t_0 - t_1}{\frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\pi\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_4}}$$

将上表3数值绘成图解曲线, 见图3。

由图3在曲线③上求得最低点M。

$$\delta c = 115 \text{ mm},$$

$$q_c = 330 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}$$

再用数学分析法进行校核:

$$\begin{aligned} \frac{2}{d_2} \sqrt{\frac{nb(t_0 - t_1)\lambda_2}{10^6(P + \frac{1}{T})(S + \frac{2Su}{d_3})}} \\ = \frac{\frac{d_3}{d_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{2\lambda_2}{\alpha_2 d_2}}{\sqrt{1 - \frac{2\lambda_2}{\alpha_2 d_3}}} \end{aligned}$$

用试算法, 先令 $\delta = 110 \text{ mm}$,

$$\therefore d_2 = 0.219 + 2 \times 0.110 = 0.439, \text{ 代入上式:}$$

$$\begin{aligned} q_c &= \frac{1}{2\pi \times 0.09} \ln \frac{0.449}{0.219} + \frac{1}{2\pi \times 0.2} \ln \frac{0.479}{0.449} + \frac{1}{\pi \times 22 \times 0.479} \\ &= 329.3 \approx 330 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}. \end{aligned}$$

2.5 对包头地区的管道经济厚度和允许热损失的分析意见。

(1) 从上计算, D219管道、 $t_0 = 450^\circ\text{C}$, 包头地区经济厚度 $\delta = 115 \text{ mm}$, 允许

$$\begin{aligned} \text{左式} &= \frac{2}{0.219} \sqrt{\frac{7500 \times 6.5(450 - 5) \times 0.09}{10^6(0.127 + \frac{1}{T})}} \\ &= \frac{2}{0.219} > 0.1707 = 1.5587 \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{d_3}{d_2} \ln \frac{d_3}{d_2}$$

$$= \text{左式} \times \sqrt{1 - \frac{2\lambda_2}{\alpha_2 d_3} - \frac{2\lambda_2}{\alpha_2 d_2}}$$

$$= 1.5587 \times \sqrt{1 - \frac{2 \times 0.09}{22 \times 0.439}}$$

$$- \frac{2 \times 0.09}{22 \times 0.219} = 1.507$$

$$\text{求得 } \frac{d_3}{d_2} = 2.07,$$

$$\therefore d_3 = \frac{d_2}{2} \left(\frac{d_3}{d_2} - 1 \right) = \frac{0.219}{2} (2.07 - 1)$$

$$\therefore d_3 = 0.117 \text{ m} \approx 115 \text{ mm}. \text{ 与图解法相同.}$$

允许热损失标准:

热损失为 $q_c = 330 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}$, 与电力部《暂行规定》中的允许热损失 $302 \text{ kcal/m} \cdot \text{h}$ 相比, 显然包头地区允许热损失偏大, 保温经济厚度偏薄。

(2) 包头地区热能单价偏低。

原热能单价为每 10^6kcal 6.5元。如改用 $b=10\text{元}/10^6\text{kcal}$ 计算,则经济厚度为130mm,相应的热损失为 $300\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}$,与《暂行规定》的允许热损失相接近。

在目前能源紧张情况下,能源单价全世界各国早已上涨,而我国能源单价普遍偏低。从保温经济厚度这个角度来看,由于热能单价偏低,增大热损失也不值多少钱,实际上造成浪费,应适当调整能源单价。

(3) 保温材料价格偏高,也是造成保温经济厚度偏薄的另一原因。

目前有些制作单位不专业化,生产不计

成本。不但质量不高,制造费用也增大了。建议今后应该正规化、专业化建立保温材料厂,以提高产品质量,降低保温材料单价。这样可适当增大经济厚度,以减少热损失。

(4) 加强技术管理,降低管理、折旧费用。

目前有些单位对保温的设备和管道管理不良,维修支出费用较大,造成保温结构管理、折旧费用增大。因而使保温经济厚度偏薄。建议今后应该加强技术管理,减少维护、检修费用开支,这样来加厚保温经济厚度,避免浪费,节约能源。

(黄仁祥编发)

会 议 报 导

中国金属学会炼铁烧结年会于1982年10月7日至13日在上海宝钢召开。会议对高炉的大型化及大中并举、降低吨铁能耗、炼铁

节能技术、高炉喷吹煤粉、烧结技术等一系列技术问题进行了大会发言和小组讨论。

(蒋 明)

全国烧结节能情报交流会在鞍山召开

由冶金部烧结球团情报网主持的科技情报交流大会,于1982年10月12日~17日在鞍山烧结总厂召开。

大会就改造点火器可降低能耗、延长寿命节省检修费用进行广泛深入讨论,与会代表一致认为:鞍山烧结总厂、梅山烧结厂、新余钢铁厂等单位在点火器改造中所走的路子是对头的,方向是正确的。此外,大会还

介绍了马钢二烧81年改造点火器,采用冷却烧结矿所得 200°C 左右的热风助燃点火,可节省煤气(热值 $1558\text{kcal}/\text{m}^3$) $523\text{m}^3/\text{h}$,即降低12.2%,每年可获利6.6万元,一年回收全部投资。通过技术情报交流有些厂已达到国外同年代的先进水平。今后应及时总结经验,继续研究和推广新型点火保温炉及行之有效的烧结技术,研究余热利用。

(沈新城)