

文章编号: 1671-6612 (2019) 05-502-07

Excel 迭代在冷水管绝热层厚度计算中的应用

邱爱杰 张涛 沈程

(中国汽车工业工程有限公司 天津 300013)

【摘要】 根据 GB 50264—2013《工业设备及管道绝热工程设计规范》(以下简称《规范》)和 GB/T 8175《设备及管道绝热设计导则》(以下简称《导则》)的相关计算公式和参数确定方法,以柳州地区冷水管绝热为例,采用 Excel 表格迭代的方法,计算了柔性泡沫橡塑、离心玻璃棉、硬质聚氨酯泡沫作为冷水管绝热材料时的绝热层厚度。该计算方法具有简便、快捷、准确的优点,计算结果与文献数据有较好的一致性。

【关键词】 管道绝热; Excel 表格迭代计算; 绝热层厚度

中图分类号 TU86 文献标识码 B

The Application of Excel Iteration in Calculation of Insulation Layer Thickness of Cold Water Pipeline

Hou Aijie Zhang Tao Shen Cheng

(China Automotive Engineering Corporation, Tianjin, 300013)

【Abstract】 According to the relevant calculation formulas and methods of parameter determined which are from GB50264-2013 Industrial Equipment and Pipeline Thermal Insulation Engineering Design Specification" (hereinafter referred to as "Specifications") and GB/T8175 Guidelines for Equipment and Pipeline Thermal Insulation Design (hereinafter referred to as "Guidelines"), and taking the cold water pipeline insulation in Liuzhou area as an example, the iterative method of Excel table is used to calculate the thickness of the insulation layer when flexible foam rubber, centrifugal glass wool and rigid polyurethane foam are used as insulation materials for cold water pipelines. The iteration calculation method is simple, fast and accurate, and in good agreement with the data from specification.

【Keywords】 pipeline insulation; excel iteration calculation; insulation layer thickness

0 前言

空调系统通过管道,以输送低温或高温介质的形式为末端提供冷量或热量,管道绝热是防止输送过程中能量过多损失、节约能源、实现节能的重要技术措施。

影响管道保冷绝热层厚度的环境因素很多,如温度、湿度、风速、雨淋等,很难用一两个绝热层厚度选用表说明问题,因此设计人员应根据具体环境条件,按《规范》与《导则》规定的方法计算确定绝热层厚度^[1];管道绝热层厚度计算公式为超越方程,需要迭代计算,现有文献中的计算方法通常

步骤较多、计算繁琐;当年运行时间 t 等参数与规范不同时,使用规范中的绝热层厚度数据具有较大的盲目性和局限性。基于上述原因,本文在相关计算公式和参数确定的基础上,给出了用 Excel 表格迭代工具快速、准确计算管道绝热层厚度的方法。

1 公式及参数选择

1.1 经济绝热层厚度计算

根据《规范》的要求,管道保冷绝热层厚度应取绝热层经济厚度与防结露厚度两者中的较大值。为方便与文献[2]附表 K.0.2 中“空调设备与管道保

作者(通讯作者)简介:邱爱杰(1988.12-),男,工程硕士,工程师,E-mail:houaijie1218@163.com

收稿日期:2019-08-09

冷厚度”对比, 本文能量价格 P_E 、年运行时间 t 等部分参数的选取参考了文献[1]。

以单根敷设的圆筒型单层绝热为例^[3,4], 按绝热层经济厚度计算时, 冷水管绝热层外径 D_1 应满足公式 (1) 的要求:

$$D_1 \ln \frac{D_1}{D_0} = 3.795 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{P_E \cdot \lambda \cdot t \cdot |T_0 - T_a|}{P_T \cdot S} - \frac{2\lambda}{\alpha_s}} \quad (1)$$

式 (1) 中, D_0 为管道外径, 绝热层内径, m; P_E 为能量价格, 元/GJ, 取 75 元/GJ^[1]; P_T 为绝热结构单元造价, 元/m³, 指每立方米保冷工程量所消耗的投资费用。我国大部分地区绝热结构造价相差不大, 不同绝热材料 P_T 的取值见表 1; t 为年运行时间, h, 取为 2880h, 按每天 12h, 8 个月运行计算^[1]; T_0 为管道或设备的外表面温度, °C, 取冷冻水的供水温度 7°C, 规范数值为 5°C; 采用硬质聚氨酯泡沫绝热材料时, 取为 -10°C^[1]; T_a 为环境温度, °C, 经济厚度计算时, 常年运行时取为历年的年平均温度的平均值, 柳州地区为 20.7°C; $|T_0 - T_a|$ 为 $(T_0 - T_a)$ 的绝对值; S 为绝热工程投资年摊销率, %, 可由式 (2) 计算得到:

$$S = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

式 (2) 中, i 为贷款的年利率, %; n 为还贷年限, a。根据《导则》和贷款的年利率情况, i 取为 10%, n 取为 6a。经计算, $S = 22.96\%$ 。

α_s 为绝热层外表面与周围空气的换热系数, W/(m²·K), 经济厚度计算中, α_s 按式 (3) 取值:

$$\alpha_s = 11.63 + 7\sqrt{W} \quad (3)$$

式 (3) 中, W 为历年年平均风速, m/s, 柳州地区取为 1.6m/s, 经计算 α_s 为 20.48W/(m²·K)。

λ 为绝热材料在平均温度下的导热系数, W/(m·K), λ 取值见表 2; t_m 为绝热材料内、外表面温度的平均值。表 2 中导热系数 λ 随温度的变化可表示为式 (4):

$$\lambda = \lambda_0 + b \cdot \frac{T_i + T_o}{2} \quad (4)$$

式 (4) 中, λ_0 为绝热材料 0°C 时的导热系数; b 为常数; T_i 、 T_o 为材料的内、外表面温度。 T_i 取冷冻水供水温度 7°C, T_o 可由式 (5) ^[3,5] 计算得到:

$$T_o = T_a - 0.527 \times \frac{10^3}{\alpha_s} \sqrt{\frac{P_T \cdot S \cdot |T_i - T_a|}{P_E \cdot t}} \cdot \sqrt{\lambda_0 + \frac{b}{2}(T_i + T_o)} \quad (5)$$

经计算, 柳州地区柔性泡沫橡塑、离心玻璃棉、硬质聚氨酯泡沫绝热层的外表面温度分别为 19.6°C、20.0°C、19.8°C; t_m 分别为 13.3°C、13.5°C、13.4°C; 对应的 λ 值分别为 0.0357W/(m·K)、0.0333W/(m·K)、0.0287W/(m·K)。

表 1 绝热结构单位造价^[1]

| 绝热材料名称 | 密度 (kg/m ³) | 保护层材料 | 平均结构造价 (元/m ³) |
|----------|-------------------------|-------|----------------------------|
| 闭孔柔性泡沫橡塑 | 40~80 | — | 3400 |
| 离心玻璃棉 | 64 | 复合铝箔 | 1600 |
| 硬质聚氨酯泡沫 | 30~60 | 玻璃钢 | 2700 |

表 2 常用绝热材料性能表^[1]

Table 2 The common thermal insulation material performance table^[1]

| 绝热材料名称 | 最高使用温度 / °C | 适用温度范围 / °C | 使用密度 / kg/m ³ | 导热系数 λ / W/(m·K) |
|----------|-------------|-------------|--------------------------|----------------------------------|
| 闭孔柔性泡沫橡塑 | 105 | -50~105 | 40~80 | $\lambda = 0.034 + 0.00013 t_m$ |
| 离心玻璃棉制品 | 450 | -5~450 | ≥45 | $\lambda = 0.031 + 0.00017 t_m$ |
| 硬质聚氨酯泡沫 | 120 | ≤120 | 30~60 | $\lambda = 0.0275 + 0.00009 t_m$ |

1.2 防结露绝热层厚度计算

以单根敷设的圆筒型单层绝热为例^[3], 按防结露绝热层厚度计算时, 冷水管绝热层外径 D_1 应满足公式 (6) 的要求:

$$D_1 \ln \frac{D_1}{D_0} = \frac{2\lambda}{\alpha_s} \cdot \frac{T_s - T_0}{T_a - T_s} \quad (6)$$

式 (6) 中, T_s 为绝热层外表面温度, °C, 在

防结露厚度计算中, 为露点温度 T_d 加 0.3°C; T_d 根据夏季空调室外计算干球温度和最热月月平均相对湿度 φ 查表得到, 柳州地区为 31°C, T_s 取为 31.3°C; T_a 为环境温度, °C, 防结露厚度计算时, 取为夏季空气调节室外计算干球温度, 柳州地区为 34.8°C; α_s 为绝热层外表面与周围空气的换热系数, W/(m²·K), 防结露厚度计算中, α_s 取为

8.141W/(m²·K); T₀、D₀、λ 为参数取值同绝热层经济厚度计算。

由公式 (1) 和 (6) 计算得到绝热层外径 D₁, 进一步由式 (7) 可计算得到冷水管道保冷绝热层厚度 σ_c:

$$\sigma_c = \frac{D_1 - D_0}{2} \tag{7}$$

由于绝热层厚度计算时各参数取值与实际气象、材料性能等数据有一定误差; 且随使用时间延长, 绝热材料老化、吸湿, 保冷效果下降, 因此需用修正因子 K 对公式 (7) 计算得到的绝热层厚度 σ_c 进行修正, 得到实际绝热层厚度 σ, 如式 (8) 所示。修正因子的取值详见《规范》。

$$\sigma = K\sigma_c \tag{8}$$

2 迭代计算方法

冷水管道绝热层厚度计算公式 (1) 和 (6) 均为超越方程, 需要迭代求解。本文采用 Excel 表格自带的迭代工具, 计算管道保冷绝热层厚度, 满足工程精度的同时, 具有简单、快捷等优势, 提高了设计效率。Excel 表格迭代计算步骤为: 改写目标方程、Excel 表格迭代计算。

2.1 改写目标方程

公式 (1) 和 (6) 等式的右侧均为常数, 可在

本文第 1 部分“公式及参数选择”的基础上求得, 分别设为 C₁ 和 C₂, 则公式 (1) 和 (6) 可改写为如下目标方程形式:

$$D_1 \ln \frac{D_1}{D_0} - C_1 = 0 \tag{9}$$

$$D_1 \ln \frac{D_1}{D_0} - C_2 = 0 \tag{10}$$

式 (9) 和 (10) 中, 绝热层外径 D₁ 为自由变量。

2.2 Excel 表格迭代计算

(1) 如图 1 所示, Excel 表格迭代计算路径为“数据—模拟分析—单变量求解”, 这里的单变量即为冷水管道外径 D₁。

(2) 根据冷水管道外径 D₀, 预设初值 D₁, 在 Excel 表格“目标单元格”中输入公式 (9) 或 (10), 得到的数值作为“目标单元格值”, 该“目标单元格”的“目标值”为 0, 二者差值则表示了迭代计算的精度水平。迭代计算时, 按照 (1) 中所述的计算路径, 目标值与可变单元格的设置如图 2 所示。

(3) 迭代计算过程与结果如图 3、4 所示, 计算结束时, “目标单元格值”接近为 0, 对应的 D₁ 即为要求的冷水管道外径。需要说明的是, 实际计算中“目标单元格值”多在 10⁻⁵ 以下, 符合实际工程的精度要求。

| 序号 | 公称直径 | 管道外径 D ₀ (m) | 绝热层外径 D ₁ (m) | C ₁ 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ _c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 |
|----|------|-------------------------|--------------------------|------------------|---------|----------------------------|------|---------|
| 1 | 20 | 0.027 | 0.06600 | 0.0589 | 0.00009 | 0.01950 | 1.15 | 0.02243 |
| 2 | 25 | 0.032 | 0.07230 | 0.0589 | 0.00003 | 0.02015 | 1.15 | 0.02317 |
| 3 | 32 | 0.038 | 0.07963 | 0.0589 | 0.00001 | 0.02082 | 1.15 | 0.02394 |
| 4 | 40 | 0.045 | 0.08795 | 0.0589 | 0.00004 | 0.02148 | 1.15 | 0.02470 |
| 5 | 50 | 0.057 | 0.10174 | 0.0589 | 0.00003 | 0.02237 | 1.15 | 0.02572 |
| 6 | 70 | 0.076 | 0.12279 | 0.0589 | 0.00001 | 0.02340 | 1.15 | 0.02691 |
| 7 | 80 | 0.089 | 0.13688 | 0.0589 | 0.00002 | 0.02394 | 1.15 | 0.02753 |
| 8 | 100 | 0.108 | 0.15713 | 0.0589 | 0.00002 | 0.02457 | 1.15 | 0.02825 |
| 9 | 125 | 0.133 | 0.18339 | 0.0589 | 0.00001 | 0.02520 | 1.15 | 0.02897 |
| 10 | 150 | 0.159 | 0.21040 | 0.0589 | 0.00003 | 0.02570 | 1.15 | 0.02955 |
| 11 | 200 | 0.219 | 0.27196 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02648 | 1.15 | 0.03045 |
| 12 | 250 | 0.273 | 0.32690 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02695 | 1.15 | 0.03099 |

图 1 Excel 表格迭代路径

Fig.1 Excel table iteration path

| 序号 | 公称直径 | 管道外径D0 (m) | 绝热层外径D1 (m) | C1 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 |
|----|------|------------|-------------|--------|---------|------------------------|------|---------|
| 1 | 20 | 0.027 | 0.06600 | 0.0589 | 0.00009 | 0.01950 | 1.15 | 0.02243 |
| 2 | 25 | 0.032 | 0.07500 | 0.0589 | 0.00498 | 0.02150 | 1.15 | 0.02473 |
| 3 | 32 | 0.038 | 0.07963 | 0.0589 | 0.00001 | 0.02082 | 1.15 | 0.02394 |
| 4 | 40 | 0.045 | 0.08400 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02148 | 1.15 | 0.02470 |
| 5 | 50 | 0.057 | 0.09000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02237 | 1.15 | 0.02572 |
| 6 | 70 | 0.076 | 0.10000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02340 | 1.15 | 0.02691 |
| 7 | 80 | 0.089 | 0.10500 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02394 | 1.15 | 0.02753 |
| 8 | 100 | 0.108 | 0.11000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02457 | 1.15 | 0.02825 |
| 9 | 125 | 0.133 | 0.11500 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02520 | 1.15 | 0.02897 |
| 10 | 150 | 0.159 | 0.12000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02570 | 1.15 | 0.02955 |
| 11 | 200 | 0.219 | 0.27196 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02648 | 1.15 | 0.03045 |
| 12 | 250 | 0.273 | 0.32690 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02695 | 1.15 | 0.03099 |

图 2 目标值与可变单元格值设置

Fig.2 The target value and variable cell value setting

| 序号 | 公称直径 | 管道外径D0 (m) | 绝热层外径D1 (m) | C1 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 |
|----|------|------------|-------------|--------|---------|------------------------|------|---------|
| 1 | 20 | 0.027 | 0.06600 | 0.0589 | 0.00009 | 0.01950 | 1.15 | 0.02243 |
| 2 | 25 | 0.032 | 0.07575 | 0.0589 | 0.00637 | 0.02188 | 1.15 | 0.02516 |
| 3 | 32 | 0.038 | 0.07963 | 0.0589 | 0.00001 | 0.02082 | 1.15 | 0.02394 |
| 4 | 40 | 0.045 | 0.08400 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02148 | 1.15 | 0.02470 |
| 5 | 50 | 0.057 | 0.09000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02237 | 1.15 | 0.02572 |
| 6 | 70 | 0.076 | 0.10000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02340 | 1.15 | 0.02691 |
| 7 | 80 | 0.089 | 0.10500 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02394 | 1.15 | 0.02753 |
| 8 | 100 | 0.108 | 0.11000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02457 | 1.15 | 0.02825 |
| 9 | 125 | 0.133 | 0.11500 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02520 | 1.15 | 0.02897 |
| 10 | 150 | 0.159 | 0.12000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02570 | 1.15 | 0.02955 |
| 11 | 200 | 0.219 | 0.27196 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02648 | 1.15 | 0.03045 |
| 12 | 250 | 0.273 | 0.32690 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02695 | 1.15 | 0.03099 |

图 3 第 1 次迭代计算

Fig.3 The first iteration calculation

| 序号 | 公称直径 | 管道外径D0 (m) | 绝热层外径D1 (m) | C1 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 |
|----|------|------------|-------------|--------|---------|------------------------|------|---------|
| 1 | 20 | 0.027 | 0.06600 | 0.0589 | 0.00009 | 0.01950 | 1.15 | 0.02243 |
| 2 | 25 | 0.032 | 0.07230 | 0.0589 | 0.00004 | 0.02015 | 1.15 | 0.02317 |
| 3 | 32 | 0.038 | 0.07963 | 0.0589 | 0.00001 | 0.02082 | 1.15 | 0.02394 |
| 4 | 40 | 0.045 | 0.08400 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02148 | 1.15 | 0.02470 |
| 5 | 50 | 0.057 | 0.09000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02237 | 1.15 | 0.02572 |
| 6 | 70 | 0.076 | 0.10000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02340 | 1.15 | 0.02691 |
| 7 | 80 | 0.089 | 0.10500 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02394 | 1.15 | 0.02753 |
| 8 | 100 | 0.108 | 0.11000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02457 | 1.15 | 0.02825 |
| 9 | 125 | 0.133 | 0.11500 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02520 | 1.15 | 0.02897 |
| 10 | 150 | 0.159 | 0.12000 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02570 | 1.15 | 0.02955 |
| 11 | 200 | 0.219 | 0.27196 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02648 | 1.15 | 0.03045 |
| 12 | 250 | 0.273 | 0.32690 | 0.0589 | 0.00000 | 0.02695 | 1.15 | 0.03099 |

图 4 迭代结果的得到

Fig.4 The iteration result is obtained

若实际工程要求迭代计算精度更高,则可采用 Excel 表格进行手动迭代计算。将公式 (9) 改写为如下形式:

$$D_1 = D_0 e^{\frac{C_1}{D_1}} \quad (11)$$

如图 5 所示,以公称直径 DN700 为例,管道外径 D_0 为 0.73m,绝热层外径 D_1 预设初值 0.8m,

由公式 (11) 计算得到新绝热层外径 D_1 ,迭代精度为每次迭代预设 D_1 与新绝热层外径 D_1 的差值。第一次迭代得到的“新绝热层外径 D_1 ”作为第二次迭代的预设 D_1 ,计算结果再赋值给第三次迭代预设 D_1 ,达到要求的迭代精度时结束计算,进而求得管道的绝热层厚度。

| 迭代次数 | 公称直径 | 管道外径 D_0 (m) | 绝热层外径 D_1 (m) | C_1 值 | 新绝热层外径 D_1 (m) | 迭代精度 |
|------|------|----------------|-----------------|---------|------------------|------------------|
| 1 | 700 | 0.73 | 0.8000000000 | 0.0589 | 0.7857742474128 | 0.0142257525872 |
| 2 | 700 | 0.73 | 0.78577424741 | 0.0589 | 0.7868223167861 | -0.0010480693733 |
| 3 | 700 | 0.73 | 0.78682231679 | 0.0589 | 0.7867437596119 | 0.0000785571741 |
| 4 | 700 | 0.73 | 0.78674375961 | 0.0589 | 0.7867496402723 | -0.0000058806604 |
| 5 | 700 | 0.73 | 0.78674964027 | 0.0589 | 0.7867492000136 | 0.0000004402587 |
| 6 | 700 | 0.73 | 0.78674920001 | 0.0589 | 0.7867492329736 | -0.0000000329600 |
| 7 | 700 | 0.73 | 0.78674923297 | 0.0589 | 0.7867492305060 | 0.0000000024675 |
| 8 | 700 | 0.73 | 0.78674923051 | 0.0589 | 0.7867492306908 | -0.0000000001847 |
| 9 | 700 | 0.73 | 0.78674923069 | 0.0589 | 0.7867492306769 | 0.0000000000138 |
| 10 | 700 | 0.73 | 0.78674923068 | 0.0589 | 0.7867492306780 | -0.0000000000010 |
| 11 | 700 | 0.73 | 0.78674923068 | 0.0589 | 0.7867492306779 | 0.0000000000001 |
| 12 | 700 | 0.73 | 0.78674923068 | 0.0589 | 0.7867492306779 | 0.0000000000000 |
| 13 | 700 | 0.73 | 0.78674923068 | 0.0589 | 0.7867492306779 | 0.0000000000000 |
| 14 | 700 | 0.73 | 0.78674923068 | 0.0589 | 0.7867492306779 | 0.0000000000000 |
| 15 | 700 | 0.73 | 0.78674923068 | 0.0589 | 0.7867492306779 | 0.0000000000000 |
| 16 | 700 | 0.73 | 0.78674923068 | 0.0589 | 0.7867492306779 | 0.0000000000000 |

图 5 Excel 表格手动迭代计算

Fig.5 Excel table manual iterative calculation

3 结果及分析

采用 Excel 表格迭代方法,分别计算了柳州地区冷水管道的绝热时柔性泡沫橡塑、离心玻璃棉、硬质聚氨酯泡沫等绝热材料的绝热层经济厚度与防结露厚度,并通过比较确定了管道保冷时绝热层的

厚度。

经计算,冷水管道的绝热材料为柔性泡沫橡塑时,相比防结露厚度,绝热层经济厚度较小,绝热层厚度取为防结露厚度,计算结果详见表 3。

表 3 柔性泡沫橡塑绝热防结露厚度计算

Table 3 The flexible foam rubber anti-condensation insulation thickness calculation

| 管道公称直径 | 管道外径 D_0 (m) | 绝热层外径 D_1 (m) | C_2 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 σ_c (m) | 文献数据 σ_c (m) [1] |
|--------|----------------|-----------------|---------|----------|------------------------|------|------------------------|-------------------------|
| 20 | 0.027 | 0.06703 | 0.06089 | 0.00005 | 0.02001 | 1.3 | 0.02602 | 0.02346 |
| 25 | 0.032 | 0.07341 | 0.06089 | 0.00006 | 0.02071 | 1.3 | 0.02692 | 0.02426 |
| 32 | 0.038 | 0.08080 | 0.06089 | 0.00006 | 0.02140 | 1.3 | 0.02782 | 0.02508 |
| 40 | 0.045 | 0.08910 | 0.06089 | -0.00003 | 0.02205 | 1.3 | 0.02867 | 0.02587 |
| 50 | 0.057 | 0.10299 | 0.06089 | 0.00003 | 0.02299 | 1.3 | 0.02989 | 0.02695 |
| 70 | 0.076 | 0.12416 | 0.06089 | 0.00005 | 0.02408 | 1.3 | 0.03130 | 0.02821 |

续表 3 柔性泡沫橡塑绝热防结露厚度计算

| 管道公称直径 | 管道外径 D_0 (m) | 绝热层外径 D_1 (m) | C_2 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 σ_c (m) | 文献数据 σ_c (m) ^[1] |
|--------|----------------|-----------------|---------|----------|------------------------|------|------------------------|------------------------------------|
| 80 | 0.089 | 0.13827 | 0.06089 | 0.00002 | 0.02463 | 1.3 | 0.03202 | 0.02962 |
| 100 | 0.108 | 0.15858 | 0.06089 | 0.00002 | 0.02529 | 1.3 | 0.03288 | 0.02964 |
| 125 | 0.133 | 0.18491 | 0.06089 | 0.00004 | 0.02596 | 1.3 | 0.03374 | 0.03041 |
| 150 | 0.159 | 0.21193 | 0.06089 | 0.00001 | 0.02646 | 1.3 | 0.03440 | 0.03102 |
| 200 | 0.219 | 0.27359 | 0.06089 | 0.00000 | 0.02729 | 1.3 | 0.03548 | 0.03199 |
| 250 | 0.273 | 0.32864 | 0.06089 | 0.00007 | 0.02782 | 1.3 | 0.03617 | 0.03257 |
| 300 | 0.325 | 0.38127 | 0.06089 | 0.00000 | 0.02814 | 1.3 | 0.03658 | 0.03297 |
| 350 | 0.377 | 0.43385 | 0.06089 | 0.00005 | 0.02843 | 1.3 | 0.03695 | 0.03328 |
| 400 | 0.426 | 0.48321 | 0.06089 | -0.00001 | 0.02860 | 1.3 | 0.03718 | 0.03352 |
| 450 | 0.480 | 0.53756 | 0.06089 | -0.00001 | 0.02878 | 1.3 | 0.03742 | 0.03373 |
| 500 | 0.530 | 0.58784 | 0.06089 | -0.00001 | 0.02892 | 1.3 | 0.03759 | 0.03389 |
| 600 | 0.630 | 0.68827 | 0.06089 | -0.00001 | 0.02913 | 1.3 | 0.03787 | 0.03414 |
| 700 | 0.730 | 0.78859 | 0.06089 | -0.00001 | 0.02930 | 1.3 | 0.03808 | —— |
| 800 | 0.830 | 0.88884 | 0.06089 | -0.00001 | 0.02942 | 1.3 | 0.03825 | 0.03447 |
| 1000 | 1.030 | 1.08921 | 0.06089 | -0.00001 | 0.02960 | 1.3 | 0.03849 | 0.03469 |

离心玻璃棉用作冷水管绝热材料时, 经计算绝热层厚度按经济厚度确定, 计算结果详见表 4。

硬质聚氨酯泡沫已广泛用于冰蓄冷等冷水管道的绝热材料, 低温状态下具有良好的绝热与隔汽

性能。硬质聚氨酯泡沫用作冷水管绝热材料时, 经计算绝热层厚度按防结露厚度确定, 计算结果详见表 5。

表 4 离心玻璃棉绝热经济厚度计算

Table 4 The centrifugal glass wool anti-condensation insulation thickness calculation

| 管道公称直径 | 管道外径 D_0 (m) | 绝热层外径 D_1 (m) | C_1 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 σ_c (m) | 文献数据 σ_c (m) ^[1] |
|--------|----------------|-----------------|---------|---------|------------------------|------|------------------------|------------------------------------|
| 20 | 0.027 | 0.06600 | 0.05890 | 0.00009 | 0.01950 | 1.15 | 0.02243 | 0.023679 |
| 25 | 0.032 | 0.07230 | 0.05890 | 0.00003 | 0.02015 | 1.15 | 0.02317 | 0.024527 |
| 32 | 0.038 | 0.07963 | 0.05890 | 0.00001 | 0.02082 | 1.15 | 0.02394 | 0.02539 |
| 40 | 0.045 | 0.08795 | 0.05890 | 0.00004 | 0.02148 | 1.15 | 0.02470 | 0.02623 |
| 50 | 0.057 | 0.10174 | 0.05890 | 0.00003 | 0.02237 | 1.15 | 0.02572 | 0.027404 |
| 70 | 0.076 | 0.12279 | 0.05890 | 0.00001 | 0.02340 | 1.15 | 0.02691 | 0.028788 |
| 80 | 0.089 | 0.13688 | 0.05890 | 0.00002 | 0.02394 | 1.15 | 0.02753 | 0.029521 |
| 100 | 0.108 | 0.15713 | 0.05890 | 0.00002 | 0.02457 | 1.15 | 0.02825 | 0.030383 |
| 125 | 0.133 | 0.18339 | 0.05890 | 0.00001 | 0.02520 | 1.15 | 0.02897 | 0.03126 |
| 150 | 0.159 | 0.21040 | 0.05890 | 0.00003 | 0.02570 | 1.15 | 0.02955 | 0.031961 |
| 200 | 0.219 | 0.27196 | 0.05890 | 0.00000 | 0.02648 | 1.15 | 0.03045 | 0.033101 |
| 250 | 0.273 | 0.32690 | 0.05890 | 0.00000 | 0.02695 | 1.15 | 0.03099 | 0.03379 |
| 300 | 0.325 | 0.37957 | 0.05890 | 0.00001 | 0.02728 | 1.15 | 0.03138 | 0.034279 |

续表 4 离心玻璃棉绝热经济厚度计算

| 管道公称直径 | 管道外径 D_0 (m) | 绝热层外径 D_1 (m) | C_1 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 σ_c (m) | 文献数据 σ_c (m) ^[1] |
|--------|----------------|-----------------|---------|----------|------------------------|------|------------------------|------------------------------------|
| 350 | 0.377 | 0.43206 | 0.05890 | 0.00000 | 0.02753 | 1.15 | 0.03166 | 0.034657 |
| 400 | 0.426 | 0.48144 | 0.05890 | 0.00000 | 0.02772 | 1.15 | 0.03188 | 0.034943 |
| 450 | 0.480 | 0.53577 | 0.05890 | -0.00001 | 0.02789 | 1.15 | 0.03207 | 0.035201 |
| 500 | 0.530 | 0.58604 | 0.05890 | 0.00000 | 0.02802 | 1.15 | 0.03222 | 0.035399 |
| 600 | 0.630 | 0.68644 | 0.05890 | -0.00001 | 0.02822 | 1.15 | 0.03245 | 0.035712 |
| 700 | 0.730 | 0.78675 | 0.05890 | -0.00001 | 0.02837 | 1.15 | 0.03263 | — |
| 800 | 0.830 | 0.88698 | 0.05890 | -0.00001 | 0.02849 | 1.15 | 0.03276 | 0.036135 |
| 1000 | 1.030 | 1.08733 | 0.05890 | -0.00001 | 0.02866 | 1.15 | 0.03296 | 0.03641 |

表 5 硬质聚氨酯泡沫绝热防结露厚度计算

Table 5 The rigid polyurethane foam anti-condensation insulation thickness calculation

| 管道公称直径 | 管道外径 D_0 (m) | 绝热层外径 D_1 (m) | C_1 值 | 目标单元格值 | 计算绝热层厚度 σ_c (m) | 修正因子 | 实际绝热层厚度 σ_c (m) | 文献数据 σ_c (m) ^[1] |
|--------|----------------|-----------------|---------|----------|------------------------|------|------------------------|------------------------------------|
| 20 | 0.027 | 0.07822 | 0.08319 | 0.00001 | 0.02561 | 1.3 | 0.03329 | 0.029913 |
| 25 | 0.032 | 0.08500 | 0.08319 | -0.00015 | 0.02650 | 1.3 | 0.03445 | 0.030986 |
| 32 | 0.038 | 0.09315 | 0.08319 | 0.00032 | 0.02757 | 1.3 | 0.03585 | 0.032077 |
| 40 | 0.045 | 0.10221 | 0.08319 | 0.00066 | 0.02861 | 1.3 | 0.03719 | 0.033150 |
| 50 | 0.057 | 0.11676 | 0.08319 | 0.00054 | 0.02988 | 1.3 | 0.03885 | 0.034632 |
| 70 | 0.076 | 0.13827 | 0.08319 | -0.00044 | 0.03114 | 1.3 | 0.04048 | 0.036389 |
| 80 | 0.089 | 0.15318 | 0.08319 | -0.00002 | 0.03209 | 1.3 | 0.04171 | 0.037318 |
| 100 | 0.108 | 0.17418 | 0.08319 | 0.00007 | 0.03309 | 1.3 | 0.04302 | 0.038410 |
| 125 | 0.133 | 0.20110 | 0.08319 | -0.00004 | 0.03405 | 1.3 | 0.04427 | 0.039528 |
| 150 | 0.159 | 0.22867 | 0.08319 | -0.00010 | 0.03483 | 1.3 | 0.04528 | 0.040420 |
| 200 | 0.219 | 0.29120 | 0.08319 | -0.00021 | 0.03610 | 1.3 | 0.04693 | 0.041876 |
| 250 | 0.273 | 0.34669 | 0.08319 | -0.00035 | 0.03684 | 1.3 | 0.04790 | 0.042755 |
| 300 | 0.325 | 0.39990 | 0.08319 | -0.00026 | 0.03745 | 1.3 | 0.04868 | 0.043380 |
| 350 | 0.377 | 0.45295 | 0.08319 | -0.00005 | 0.03798 | 1.3 | 0.04937 | 0.043863 |
| 400 | 0.426 | 0.50267 | 0.08319 | -0.00001 | 0.03833 | 1.3 | 0.04983 | 0.044228 |
| 450 | 0.48 | 0.55729 | 0.08319 | 0.00001 | 0.03864 | 1.3 | 0.05024 | 0.044560 |
| 500 | 0.53 | 0.60765 | 0.08319 | -0.00012 | 0.03882 | 1.3 | 0.05047 | 0.044810 |
| 600 | 0.63 | 0.70767 | 0.08319 | -0.00092 | 0.03883 | 1.3 | 0.05048 | 0.045211 |
| 700 | 0.73 | 0.80832 | 0.08319 | -0.00081 | 0.03916 | 1.3 | 0.05091 | — |
| 800 | 0.83 | 0.90945 | 0.08319 | -0.00006 | 0.03972 | 1.3 | 0.05164 | 0.045752 |
| 1000 | 1.03 | 1.11008 | 0.08319 | -0.00007 | 0.04004 | 1.3 | 0.05205 | 0.046101 |

4 结语

本文采用 Excel 表格迭代的方法,以柳州地区冷水管道的保冷绝热为例,分别计算了柔性泡沫橡

塑、离心玻璃棉、硬质聚氨酯泡沫作为冷水管道的绝热材料时的绝热层厚度,得到如下结论:

(下转第 520 页)