

露天压力钢管冻结时间与保温层厚度关系探讨

Discussion on the Relationship between Freezing Time of Open Penstock and Thickness of Insulation Layer

丁新涛

Xintao Ding

新疆巴州水利水电勘察设计有限公司 中国·新疆巴州 841000

Xinjiang Bazhou Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Co., Ltd., Bazhou, Xinjiang, 841000, China

摘要: 目前中国大多数管道埋设在地下,而且一般只要埋设在冰冻线以下,管道内的水就不会发生冻结。但是现在有许多水利水电工程因局部地形的局限,不得不将管道露天,比如水电站压力钢管、倒虹吸、架空钢管等。而在中国有些寒冷和严寒地区就存在管道内水冻结的问题。论文主要通过计算压力钢管内的水冻结时间和明设钢管保温层厚度,为水利设计人员和具体运行管理人员提供相关的参考依据。

Abstract: Currently, most pipelines in China are buried underground, and generally, as long as they are buried below the freezing line, the water inside the pipelines will not freeze. However, there are still many water conservancy and hydropower projects that have to open the pipeline due to the limitation of local terrain, such as penstock, inverted siphon, overhead steel pipe, etc. In some cold and severe regions of China, there is a problem of water freezing inside pipelines. This paper mainly calculates the water freezing time in the Penstock and the thickness of the exposed steel pipe insulation layer to provide relevant reference for water conservancy designers and specific operation management personnel.

关键词: 冻结时间;保温层厚度;露天压力钢管

Keywords: freezing time; insulation layer thickness; outdoor penstock

DOI: 10.12346/edwch.v1i3.8403

1 引言

当压力钢管露天布置时,设计人员总会想到使用保温材料防冻,而且会使用《工业设备及管道绝热工程设计规范》中的方法来计算保温层厚度,一般有四种:①通过一些经济参数计算出最经济保温层厚度。②通过控制散热损失方法计算保温层厚度。③通过控制外表面温度计算保温层厚度。④通过外表面散热损失和外表面温度计算保温层厚度。通过几种计算方法发现只有第二种方法,即通过控制散热损失的方法勉强可以计算出来保温层的厚度,其他三种计算方法有的通过计算,发现不需要保温,有的参数不符合本工程实际情况,根本没法往下算。

最后发现,无论四种计算方法的哪一种,前提就是液体都是流动的,而我们需要计算的是:保温厚度为多少时,在一定的时间范围内,管道内的水才不会冻结。因为架空后管道不能吸收地下的热量,所以如果管道内的水不流动,时间太久,管道内的水最终会都会被冻结。因此,下文介绍计算

管道内的水冻结时间和明设钢管保温层厚度。

2 计算过程及公式

计算露天压力钢管内的水冻结至 0℃所需时间 T_1 (h):

$$T_1 = \frac{1046d_B t_B}{\alpha_H(t_B - t_H)} \quad (\text{h})$$

式中, d_B ——钢管外径 (m);

t_B ——管道内温度 (K);

α_H ——管壁向外部空气的散热系数。当水沿着金属管道流动时可近似的取 $\alpha_H = 50.2 [\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})]$;

t_H ——管外空气温度 (K)。

计算钢管截面冻结 30% 所需时间 T_2 (h):

$$T_2 = \frac{B}{A} \ln \frac{t_x - t_H}{-t_H} \quad (\text{h})$$

$$A = \frac{1}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_A}{d_B} + \frac{1}{\alpha\pi d_A}} \quad (\text{h})$$

$$B = c_1 m_1 + c_2 m_2 + c_3 h$$

【作者简介】丁新涛(1995-),男,中国新疆奇台人,本科,从事水工设计研究。

$$h = \frac{2d_B - d_A}{3(d_B + d_A)}$$

$$t_x = \frac{nr_0}{c_1}$$

式中, λ ——保温材料导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$];

α ——保温材料表面放热系数 [$\text{kW}/(\text{°C}\cdot\text{m}^2)$];

d_A ——保温材料外径 (m);

n ——管断面冻结率 (%);

r_0 ——冻结潜热, 取 $334 (\text{kJ/kg})$;

c ——比热 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{°C})$]; 下标 1、2、3 分别指流体、管道、保温材料;

m ——单位长度质量; 下标 1、2、3 分别指流体、管道、保温材料。

计算保温层厚度 δ_x (m):

$$\delta_x = 0.004I_m^{0.5}$$

式中, δ_x ——聚苯乙烯泡沫板的厚度 (m);

I_m ——历年最大冻结指数 ($\text{°C}\cdot\text{d}$)。

计算使用保温材料后冻结时间 T_3 :

$$\ln \frac{d_A}{d_B} = 5.37\lambda \left\{ \frac{KT_3}{(C_1G_1 + C_2G_2) \ln \frac{t_D - t_H}{t_D - t_H}} - R_1 \right\}$$

式中, K ——支吊架影响系数, 室内 $K=1.2$, 室外 $K=1.25$;

R_1 ——管道保温层的放热阻力 [$\frac{1}{1.163} (\text{m}\cdot\text{°C})/\text{W}$];

C_1 ——水的比热, 取 $4.2 [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})]$;

C_2 ——管材的比热, 对于钢管取 $0.46 [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})]$;

G_1 ——管道单位长度内水的重量 (kg/m);

C_2 ——管材单位长度的重量 (kg/m);

t_D ——水冻结时的温度 (K)。

3 计算例题

某工程压力钢管, 直径为 1m, 钢管壁厚 10mm, 设计

流量 $Q=1.15\text{m}^3/\text{s}$, 水力坡度 $i=0.0035$, 前 400m 为露天布置, 从水库引水初始温度为 4°C , 该地区 1 月平均气温为 -7.5°C , 极端气温 -40°C , 取冻结指数 675, 最大风速为 24m/s 。计算该管道不保温时最大容许检修时间、采取保温措施后, 使用聚苯乙烯泡沫板保温, 导热系数 $\lambda = 0.0275 + t_B \times 0.0014 = 0.02806\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的冻结时间^[1]。

计算钢管内水的冻结时间 T_1 :

$$T_1 = \frac{1046 \times 1.022 \times 4}{50.2 \times (4 - (-40))} = 1.89(\text{h})$$

计算钢管截面冻结 30% 所需时间 T_2 :

$$T_2 = \frac{B}{A} \ln \frac{t_d - t_H}{-t_H} (h)$$

因式中计算不计保温层,

$$A = \alpha \times \pi \times d_B = 14 \times 3.14 \times 1.024 = 45$$

因管壁较薄, 可忽略较小的 C_2 。

$$B = c_1 m_1 = c_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_B^2 \cdot \rho_{\text{水}} = 4.18 \times 10^3 \times \frac{\pi}{4} \times 1.024 \times 10^3 = 3.4 \times 10^6$$

$$t_x = n \cdot r_0 / c_1 = 30\% \times 334 \times 10^3 / 4.18 \times 10^3 = 24\text{°C}$$

$$T_2 = \frac{3.4 \times 10^6}{45} \ln \frac{24 - (-40)}{-(-40)} = 35924\text{s} = 10(\text{h})。$$

因此, 没有保温材料时, 天气又比较严寒时, 检修时间最好不超过 $T=T_1+T_2=11.89\text{h}$ 。

计算保温层厚度 δ_x :

$$\delta_x = 0.004 \times 675^{0.5} = 0.104\text{m}$$

计算使用保温材料后冻结时间 T_3 :

通过表 1 可知 $\lambda = 0.02806\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、钢材重度 $\gamma_{\text{钢}} = 78.5\text{kn}/\text{m}^3$ 、水重 $\gamma_{\text{水}} = 1\text{kn}/\text{m}^3$ 、当管径 1m, 聚氨酯泡沫保温厚度为 10cm 时 $G_1 = 785\text{kg/m}$, $G_2 = 248.95\text{kg/m}$, 放热阻力系数 $R_1 = \frac{0.02}{1.163} = 0.0172$ 。

表 1 详细数据

管径 (m)	d	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
壁厚 (m)	c_1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
保温层厚度 (m)	c	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100
保温层外径 (m)	da	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.22
钢管外径 (m)	da	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
支吊架影响系数	K	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
冻结时间 (h)	Z	145.99	174.83	203.15	230.95	260.47	287.23	315.72
水的比热, 取 $4.2 [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})]$	C_1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
管道单位长度内水的重量 (kg/m)	G_1	785.00	785.00	785.00	785.00	785.00	785.00	785.00
管材的比热, 对于钢管取 $0.46 [\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{°C})]$	C_2	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
管材单位长度的重量 (kg/m)	G_2	248.95	248.95	248.95	248.95	248.95	248.95	248.95
起始水温 (K)	T_B	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
环境温度 (K)	t_H	-40.0	-40.0	-40.0	-40.0	-40.0	-40.0	-40.0
冻结温度 (K)	t_D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
管道保温层的放热阻力 [$1/1.163 [(\text{m}\cdot\text{°C})/\text{W}]$]	R_1	0.0602	0.0516	0.0430	0.0344	0.0344	0.0258	0.0258
保温材料导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	λ	0.0281	0.0281	0.0281	0.0281	0.0281	0.0281	0.0281

$$\ln \frac{1.22}{1.02} = 5.37 \times 0.0281 \left\{ \frac{1.25 \times T_3}{(4.2 \times 785 + 0.46 \times 248.98) \ln \frac{4 - (-40)}{0 - (-40)}} - 0.0172 \right\}$$

得到 $T_3=315$ (h)。

表 1 计算了直径 1m 的压力钢管，在同样物理条件下，聚氨酯泡沫保护层厚 $\delta_x=40 \sim 100\text{mm}$ 时的冻结时间 [2]。

图 1 为直径 1m 的压力钢管，在同样物理条件下，冻结时间与聚氨酯泡沫保护层厚度关系图 [3]。

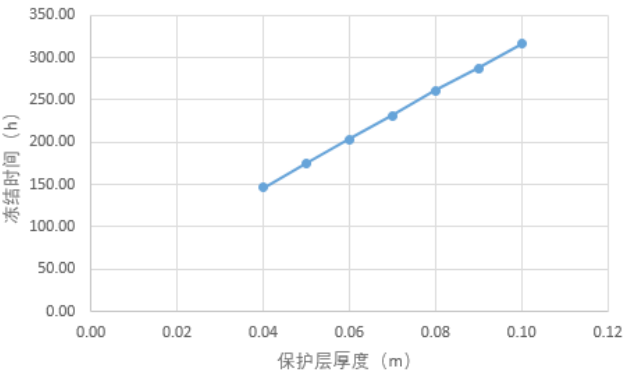


图 1 冻结时间与聚氨酯泡沫保护层厚度关系图

4 结论与建议

论文通过实际例题证明了冻结时间与钢管管径、保温层厚度、保温材料导热系数、气候等条件息息相关。在气温很低的情况下，水如果静止不流动，无论钢管使用或者不使用保温材料，管道内的水最终都会被冻结，保温材料只是延长钢管内的水冻结时间 [4]。

水冻结后体积膨胀，对管道和阀门有很大的危害，因此在管道冬季不运行或者检修时间较长时，运行管理人员要及时将管道内的水排空，防止冻结管内水冻结。

露天环境下，建议在钢管外表面喷覆聚苯乙烯或者包覆聚苯乙烯泡沫板保温，其外层用不透光的防水材料密封。

参考文献

[1] 中国市政工程西南设计研究院.给排水设计手册(第一册)常用材料(第二版)[M].中国建筑工业出版社,2000.

[2] 王维新,陆亚俊.寒冷地区给水管道热工计算探讨[J].建筑技术通讯(给水排水),1988(2):8-14.

[3] 中国市政工程西南设计研究院.给排水设计手册(第一册)城镇给水(第二版)[M].中国建筑工业出版社,2004.

[4] SL211—2006 水工建筑物抗冻胀设计规范[S].