

上水道的热力計算

黃 斌 編 著

科技卫生出版社

上水道的热力计算

李 强 编著

中国水利水电出版社

內 容 提 要

本書闡述上水道熱力計算與確定水管的埋設深度，對於埋管的工程造價、施工进度以及維護費用等方面有很多的經濟效用，為一種新發展的科學技術，書中着重在實際設計與計算方面，故敘述較詳。可供本專業工程技術人員作參考之用。

上 水 道 的 熱 力 計 算

黃 斌 編 著

科 技 衛 生 出 版 社 出 版

(上海南京西路2004號)

上海市書刊出版業營業許可證出093號

大眾文化印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

開本 787 × 1092 1/32 印張 1 1/8 字數 24,000

1958年12月第1版 1958年12月第1版第1次印刷

印數 1—2,500

統一書號: 15110·1022

定價: (十) 0.17 元

序

本書的編寫有兩種目的：一則是為了實際設計上水道工作中的需要，從而提供了輸水管最新的热力計算方法与設計数据；再則是為了有關從事教學及科學研究工作人員在教、研工作中的需要，提供一部分參考資料。

本書系參考蘇聯最新科學技術并結合多年來在設計工作中的實際經驗而編寫成的，其中一小部分曾在工程建設雜誌上發表過。由於热力計算是一門新發展的科學，各地讀者對之極其注意，常來信有所詢問，復承工程建設編輯部的鼓勵支持，因而促使我將本書全稿寫了出來。

為了結合當前工作需要，本書編寫時着重在實際設計與計算方面，故敘述較詳，而有關理論性分析與推導方面則較簡略，待有機會時當再予以補充。

由於作者對這門新的科學知識有限，謬誤之處在所難免，敬希讀者予以指正。

黃 斌于武漢

1958 年 9 月

目 錄

序	
概 說	1
一、 热力計算的一般情况	1
二、 土壤的热物理特性	2
三、 上水道內水在流动时之水温計算	9
四、 水在水管停止輸水时的冷却持續時間之計算	18
五、 水管在土壤中变热的計算	22
六、 部分充滿水的上水道热力計算	24
七、 上水道热力計算之結論	31

概 說

上水道埋設的深淺，必須通過地面荷載的計算和管道的熱力計算才能確定，在我國南方地區，由於土壤冰凍深度較淺，上水道的埋深盡考慮地面荷載的計算，但在我國北方地區，由於土壤冰凍深度較深，為了防止上水道不受凍裂的影響，管道就相應地埋設得較深，有時規定管頂必須敷設在土壤凍結綫以下 200~300 公厘，這種埋深在大多數情況下很顯然是過大了，即使個別有所減小，一般的埋深也無適當根據。但是經驗證明，高出土壤冰凍綫以及甚至敷設在地面上的上水道，有時也能完全正常地工作着。

這說明了我國北方地區減小上水道的埋深問題是完全可能實現的，但必須要通過正確的熱力計算才能確定上水道的埋設深度。為此，將上水道的熱力計算問題，作一個全面的介紹。

一、熱力計算的一般情況

上水道的熱力計算目的是在於：最大限度地確定當冬季時輸水管內水溫下降的情況下，而水在輸水管內乃不致凍結或從輸水管末端出來的水溫不低於最小的允許溫度。

選擇此溫度時必須區別二種情況：

1. 如把水送至處理站，則其溫度一般高於 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ ，或在受冷時，輸水管末端可採用近於 0°C 。
2. 如把水送到貯水池，管網等處，還繼續受冷時，則必須考

慮水在輸水管時應有適當的溫度餘額。

為了進行熱力計算，必須知道埋管地區的土壤溫度以及輸水管與土壤之間的热交換的規律。土壤凍結深度和各層土壤的溫度由很多條件決定（如：土壤種類、溫度、復蓋物之性質、積雪層厚度、日射條件、氣溫等）。因為這些條件隨着管道的長度以及逐年逐月都可變化，所以要正確地計算它們是不可能的。

輸水管和周圍介質間之熱交換條件非常複雜，因此引用計算公式時往往允許某些與實際條件不相符合的情況存在，使問題易于解決。如：輸水管周圍的土壤是假定完全一樣的，假定無論在土壤內或沿管綫無熱流發生，管道上的土壤表面溫度恒定，管道周圍土壤的等溫綫與管道同一軸心綫等。這些假設使熱力計算公式成為近似的公式。

因此，輸水管熱力計算在目前仍只考慮近似值，上面所談的是熱力計算的準確度問題。

輸水管熱力計算的步驟可分二部分：

1. 確定輸水管軸綫上規定深度內之土壤的計算溫度。
2. 確定在此深度時輸水管內水溫下降的情況。

如採用的埋管深度，在輸管內水溫下降與規定的要求有所不同時，必須用另一種埋度進行計算。

除由計算而得輸水管內的水受冷外，還必須檢查在停止工作後輸水管內的冷卻持續時間。因為這也會影響選擇管子的埋設深度。

二、土壤的熱物理特性

要進行水管的熱力計算前必須首先了解土壤的有關熱的物

理特性,土壤的热特性与其成分、孔隙率、温度、湿度及含冰度有关。

土壤的热特性主要决定于土壤松散性及其颗粒的渗水性。因此,粘土的热特性比砂土的热特性强得多,现将各种特分述于后:

1. 土壤中的温度变化

土壤深度与温度变化的时间平方根成正比:

$$h_1 : h_2 = \sqrt{T_1} : \sqrt{T_2}.$$

在积雪层复盖的情况下较无积雪复盖的土壤冰冻深度有所减少,其值可按下式决定:

$$\Delta h = h_c \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_2}}$$

式中: h_c ——雪的平均厚度(公尺);

a_1 ——土壤的温度传导性公尺²/时;

a_2 ——雪的温度传导性公尺²/时。

土壤中高、低温度变化时间比地面的高,低温度变化时间为迟。其时间差与土壤深度成正比:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{h_1}{h_2}$$

式中: h_1, h_2 ——土壤深度(公尺);

z_1, z_2 ——在相应土层中高、低温度迟来的时间(时)。

土壤中温度变化的周期性随着地表温度变化的周期而变化的,但随着土壤深度的渐增,而温度变化的幅度渐渐减小。

$$A_h = A_0 e^{-h\sqrt{\pi/\alpha\tau}}$$

式中: A_h ——在深度 h 处的温度变化幅度;

A_0 ——在地表处的温度变化幅度;

e ——自然对数的底；

τ ——温度变动的持续时间(小时)(例如一年中 $\tau=8760$ 时)；

a ——土壤的温度传导性,可用下式表之:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \text{公尺}^2/\text{时};$$

λ ——冻土的导热系数——千卡/公尺·时·度；

c ——土壤的比热；

γ ——土壤的重量公斤/公尺³。

2. 不同深度内土壤温度之计算

为了确定离地面某一深处土壤之温度,首先应确定 0°C 掺入土壤中之深度。一般该种深度最正确的求法是用直接测量法。如無此种资料时,可按理论公式进行计算,这些公式的组成原理是按照埋管沿线之土壤性质和日寒冷度数[月平均零下温度乘上相应月分的天数 $= \Sigma(-t)$] 等当地气象条件来决定。

当 $\Sigma(-t)$ 大于 500 时,采用苏联 Г. И. Ланкин 公式计算:

$$h = K \cdot \left[\frac{0.9 \Sigma(-t)}{1000} + 0.7 \right] \times 1.2$$

式中: h ——地面有积雪层时 0°C 掺入土壤中之深度(公尺);

K ——土壤的导热系数,按土壤种类分:

砂质粘土及砂质壩埽(湿度在 30% 以内) $K=1.00$;

砂质粘土及砂质壩埽(湿度在 30% 以上) $K=0.75$;

大块岩石及礫石 $K=1.33$;

当 $\Sigma(-t)$ 在 500 以内时,可采用苏联 В. Будников 公式计算:

$$h = 0.02 \lambda \sqrt{\Sigma(-t)};$$

式中: λ ——导热系数:列于表 1 中。

表 1 冻土及絕热材料的導热系数

名 称	重 量 公斤/公尺 ³	湿 度 %		導 热 系 数 千卡/公尺
		按 体 积	按 重 量	
密实砂土	1640	10	7	1.42
海灘砂	1585	27.5	14	2.40
碎石砂, 河砂	1520	10~15	7~10	1.95
碎石砂, 河砂	—	22~40	15~28	2.10~2.40
夾石砂	1400	16	10	2.25
湿粘土	—	10	6	2.55
湿粘土	—	15~22	10~15	2.65~2.75
湿粘土	—	33~50	22~35	2.85~3.00
砂質粘土	1540	15~22	10~15	1.80~2.20
砂質粘土	—	30~40	20~28	2.50~2.70
夾砂的碎石	2040	16	10	2.90
夾土的碎石	—	16	10	3.00
粉末狀土壤	1330	8	6	1.65
粉末狀土壤	—	18~38.5	13~23	1.95~2.25
泥炭	—	—	—	0.60
石棉水泥	—	—	—	0.45
泡沫水泥	—	—	—	0.13
木屑	—	—	—	0.11
稻草	—	—	—	0.04

以上二个公式适用于地面有積雪層时計算 0°C 摻入土壤內之深度。

圖 1 是按此二个公式所繪制成的可以代替計算用的圖表。

日寒冷度数可根据气象資料內“月平均气温”表确定。即將此表內之月平均零下温度乘上相应月分的日数。再將所得之積綜合起來便得出。按上述公式所求得“在地面積雪条件下确定 0°C 摻入土壤之深度”系平均深度, 为了确定最大深度, 应將平均深度乘系数 1.2。

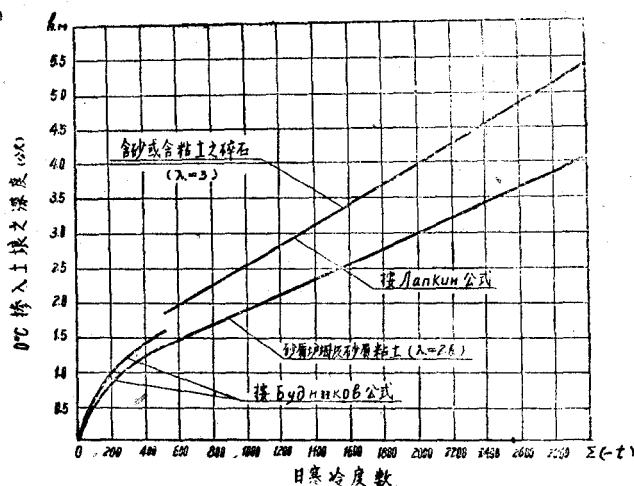


圖 1 0°C 滲入土壤之最大深度(平均系数为 1.3)

各种土壤的温度变化是非常复杂的,例如上層土壤最低温度在一月分,下層土壤最低温度在二月分, 0°C 滲入土壤的最大深度通常在三月分。因此,自地面不同深度的最低温度之計算公式很难得出。

地面無積雪时,小于 0°C 滲入土壤的深度 h_x 处之土壤温度 t_x 近似計算公式:

$$t_x = t \left(1 - \frac{h_x}{h} \right)^2$$

式中: t ——地表面温度(一月分之平均气温);

h —— 0°C 滲入土壤之深度(公尺);

t_x ——深度 h_x 之土壤温度。

此公式內 0°C 滲入土壤之深度 h 及离地面某一深度 h_x 值应预先确定。

为了加快計算,可采用圖 2 替代計算,表內 $a = \left(1 - \frac{h_x}{h}\right)^2$ 是按 $\frac{h_x}{h}$ 決定的。

在有積雪層的情況下,應將用無積雪層之土壤的冻结深度,減去二倍積雪層平均厚度,即求得有積雪層土壤之冻结深度。積雪層平均厚度按气象資料採用之。

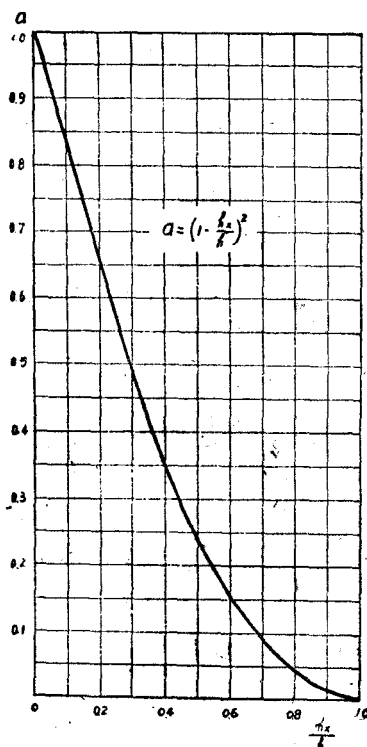


圖 2 按 $\frac{h_x}{h}$ 值來確定 $\left(1 - \frac{h_x}{h}\right)$ 之曲綫圖

3. 土壤中热的傳播

土壤中因含有水分及少量的空气存在,所以土壤中有热的对流及辐射作用。一般土壤中热的对流与辐射作用对于土壤温度的影响很小,通常在計算中可以略而不計,只須考虑热的傳導作用。热傳導对于土壤的温度、湿度、空隙度以及冻土等有如下的关系:

湿度:土中水分含得愈多,热的傳導性愈大,湿度对于热傳導系数(λ)温度傳導系数(a)及比热(c_p)的关系如图 3 所示。

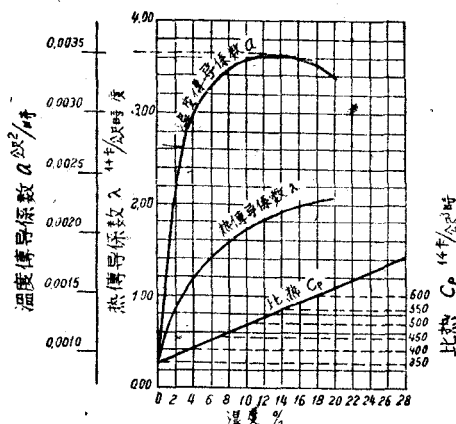


圖 3 砂土的温度对于热傳導系数、温度傳導系数及比热的关系

温度:温度愈高,热的傳導亦愈高,温度与热的傳導成直綫增加。

空隙度:土中空隙度大,說明空气含得多,而空气的热傳導系数很小 (0.02~0.03), 所以空隙度愈大而热傳導性愈小。

石英砂及砂土的空隙率及湿度对热傳導系数的关系如图 4 所示。

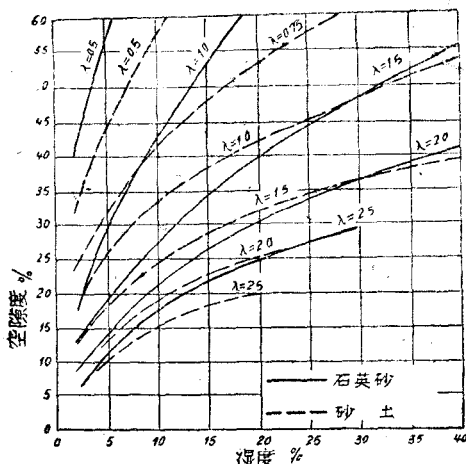


圖 4 石英砂及砂土的空隙率及湿度對熱傳導系數的關係曲線

凍土：由於冰的熱傳導系數較水的熱傳導系數大 ($\lambda_{冰}=2.0$, $\lambda_{水}=0.5$) 故在凍土時熱傳導性增加，其增高值為：

$$\frac{\lambda_{(凍土)}}{\lambda_{(不凍土)}} = 1.10 \sim 1.50.$$

三、上水道內水在流動時之水温計算

冬季气温在零下的地區，輸水管內的水，由於與外界介質（土壤）的熱交換而逐漸變冷。同時也因水經過水泵及水管引起水力損失的摩擦而受熱。

水泵和輸水管內的水因摩擦而升高的水温是不太大的，一般只有幾十分或幾百分之一度，但在個別情況下，水泵和輸水管內水當水源之温度很低時，還是會影響計算結果的，如輸水管直徑在 250 公厘以下，水之摩擦熱可不必考慮，只作計算餘額。如輸水管徑很大時，送入輸水管之水温又很低時，則計算水在水泵

及管道內受熱就對計算結果有很大影響。

1. 水經水泵所產生的摩擦熱

水經過水泵所增高的溫度為：

$$\Delta t = 0.0021 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) H \text{ (度)}$$

式中： η ——水泵之效率；

H ——水泵之總揚程(公尺)。

將在水泵內受熱升高之溫度 Δt 加上水源地之水温，便是進入輸水管時之水温。

2. 水經水管所生的摩擦熱

水通過輸水管內水温度的增高按下列公式確定：

$$\Delta t = 2.34 A F^2 V^2 = 2.34 A Q^2$$

式中： A ——管子單位阻力；

F ——管子斷面積(平方公尺)；

V ——流速(公尺/秒)；

Q ——流量(立方公尺/秒)。

Δt 為一公里管長內水温增高的度數，見表 2。

表 2 1 公里長管道內水温增高度數(°C)

管徑(公厘)	100	150	200	250	300	400	500
增高溫度(°C)	0.047	0.028	0.018	0.014	0.011	0.0072	0.0054
管徑(公厘)	600	700	800	900	1000	1200	
增高溫度(°C)	0.0042	0.0034	0.0029	0.0025	0.0023	0.0017	

注：該表根據管道粗糙係數 $n=0.012$ ，流速 $V=1$ 公尺/秒，計算而得。

关于摩擦热的計算可見下列:

[例] 水泵站內流量 $Q=100$ 公升/秒。揚程 $H=90$ 公尺。300 公厘口徑之鑄鐵管長為 5000 公尺, 管內流速 $V=1.4$ 公尺/秒, 水泵效率為 0.75。求水經過水泵及水管後因摩擦熱所增高的溫度(不計算土中熱損失)。

[解] 已知鑄鐵管 $n=0.012$; 單位阻力 $A=1.025$ (查表得) 水經過水泵所增高之溫度為:

$$\begin{aligned}\Delta t_1 &= 0.0021 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) H = 0.0021 \left(\frac{1}{0.75} - 1 \right) \cdot 90 \\ &= 0.0021 \times 1.333 \times 90 = 0.06^\circ\text{C}\end{aligned}$$

水經過水管所增高之溫度為:

$$\Delta t_2 = 2.34 A Q^2 = 2.34 \times 1.025 \times 0.1 = 0.239$$

故總升高溫度

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 0.06^\circ\text{C} + 0.239 = 0.299^\circ\text{C}$$

3. 水在輸水管內溫度下降計算

由于管道內水溫與土壤起熱交換作用而使水溫漸降。輸水管末端水溫 t_2 按下式確定:

$$t_2 = (t_1 - t_c) e^{-\varphi} + t_c.$$

式中: e ——自然對數之底;

t_1 ——進入輸水管時的水溫(度);

t_c ——水管周圍介質的溫度(度); 埋地下水管 t_c 為管軸綫處之土溫; 地上水管 t_c 為平均最低氣溫。

φ ——溫度系數 $\left(\varphi = \frac{l}{R Q_A} \right)$, 流量 Q_A = 公升/時;

l ——輸水管之長度(公里);

Q ——輸水管內流量(立方公尺/秒);

R ——熱阻 $\left(R = \frac{P}{\lambda} \right)$, 詳見下面計算)。

計算輸水管內流量時, 如果管內有轉輸流量 Q_m 及沿綫流量

Q_n 則其計算可採用:

$$Q = Q_n \frac{1}{\lg e \frac{Q_m + Q_n}{Q_m}}$$

在 $\frac{Q_n}{Q_m} < 1.5$ 時, 可採用 $Q = Q_m + \frac{Q_n}{2}$; 其誤差值不大於 6.8%。

進入輸水管時水溫 t_1 是按根據不同情況而定, I 級水泵站之水溫 t_1 為冬季末期水源中之最低水溫, 在輸水管之直徑大於 250 公厘時, 若由地表水源供水, 則水源之水溫應加上通過水泵時增高之溫度。

II 級水泵站之水溫 t_1 須根據 I 級水泵站及處理站等輸水管內水溫之變化來確定。

輸水管周圍介質溫度 t_e 是按水管埋設情況確定的, 敷設在地表面之水管 t_e 為“平均最低氣溫”可參考當地氣象資料。敷設在地下水管 t_e 為管道軸綫處之土壤溫度。

凍結土壤之導熱係數 λ , 根據表 1 採用。如果從地面到管軸綫深處其各層深度內之土壤成分各有不同時, 應確定導熱係數之當量值:

$$\lambda_{\text{當量}} = \frac{h}{\frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2}}$$

式中: h_1 及 h_2 各為土層之厚度(公尺);

λ_1 及 λ_2 各為相應土層之導熱係數。

土壤之散熱係數 α 系根據風速及地表形式等決定。一般情況下對於不受風力作用之管段為 15, 對經受很強風力之明敷管段為 8, 普通條件下為 10~12。

4. 計算次序