

文章编号: 0559-9350(2023)04-0405-09

## 输水隧洞水温模型

杨开林

(流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 输水隧洞是长距离渠系输水工程的重要组成部分, 北方输水隧洞水温的变化严重影响下游渠道冰情的发展。研究了输水隧洞水体的热交换, 包括无压隧洞气体与洞壁和水面的热交换, 提出了计算水体热交换的参数化方程和水温模型, 并分析有压隧洞和无压隧洞水温的时空变化规律。结果表明: 有压和无压隧洞水温均随着时间或者离开隧洞进口距离的增加呈指数规律变化, 分别逐渐趋近于一个大于 0 °C 的定值, 其大小与围岩恒温层温度、水温及隧洞结构和热力学参数有关。

**关键词:** 输水; 有压隧洞; 无压隧洞; 热交换; 水温

**中图分类号:** TV672

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20220602

## 1 研究背景

长距离渠系输水工程, 除了通过明渠和渡槽输水外, 还依靠隧洞和倒虹吸等水工建筑物输水。以南水北调中线干渠工程为例, 总长约 1277 km, 其中很多地段采用隧洞输水: 穿黄隧洞, 长 3450 m, 最大埋深 35 m, 最小埋深 23 m; 雾山隧洞, 全长 2509 m; 吴庄隧洞, 洞身长 2207 m; 岗头隧洞, 全长 1800 m 等。由于隧洞和倒虹吸为深埋地下的水道, 从而使得长距离渠系输水工程的冰情与天然河道显著不同。

南水北调中线干渠工程自 2014 年全线正式通水以来, 进行了连续多年的冰情原型观测<sup>[1-3]</sup>, 除 2015—2016 年度极端寒潮期冰情严重外, 其它冬季以暖冬为主, 例如 2019—2020 年冬季, 日平均气温 -0.5 ~ -2.7 °C, 最低气温 -7.3 ~ -14.7 °C, 水温变化范围 0.82 ~ 8.5 °C, 各测站断面平均水温 2.97 ~ 5.34 °C, 实测最低水温 0.82 ~ 4.24 °C; 主要冰情为岸冰、流冰, 未形成持续冰盖, 但是, 采用河道冰水力学理论模型数值模拟的计算结果是会形成连续冰盖及冰盖较厚<sup>[4-5]</sup>。这就提出了一个急待解决的科学问题: 产生这种理论与实际偏差较大的主要原因是什么。

在过去的冰水力学计算分析中, 一般采用 Ashton<sup>[6]</sup>和沈洪道<sup>[7]</sup>的传统线性热交换模型分析冰情, 并且忽略了水体和河床之间的热交换。为了解南水北调中线工程理论计算与实际产生较大偏差的原因, 杨开林研究了冰期明渠和渡槽水体与大气及床底的热交换<sup>[8]</sup>, 考虑了太阳辐射和反照率、地面与大气的长波辐射、水面蒸发和对流及地面反射的热交换<sup>[9-11]</sup>, 并分析了这些因素对水温和产生冰花时断面含冰率的时空变化规律<sup>[12]</sup>, 结果表明: (1) 正确考虑水面与大气热交换各因素的影响是提高冰情预测准确性的发展方向; (2) 水体与渠床和渡槽的热交换必须考虑, 否则不能正确地确定水温。目前存在的问题是, 在冰水力学研究方面缺乏描述输水隧洞水温时空变化规律的数学模型。输水隧洞可划分为有压隧洞和无压隧洞。水体通过有压隧洞时只与洞壁发生热交换, 水温取决于洞壁围岩的地温;

收稿日期: 2022-07-29; 网络首发日期: 2023-02-26

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20230223.1725.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202503); 国家自然科学基金项目(U2243221, U2243239, 51979291, 52009144);

中国水科院科研专项(HY0145B032021); 水利部公益性行业科研专项(211501025)

作者简介: 杨开林(1955—), 教授级高级工程师, 主要从事冰水力学研究。E-mail: ykcliwhr@sohu.com

而当水体通过无压隧洞时，水体不仅与洞壁发生热交换，并且与水面气体发生热交换，水温取决于洞壁围岩的地温和气体温度的变化。

本文的主要研究内容是，首先建立有压隧洞水体与洞壁热交换的参数化方程和水温模型，并分析水温的时空变化规律；然后建立无压隧洞水体与洞壁和气体热交换的参数化方程及水温模型，并分析气温和水温的时空变化规律。

## 2 有压隧洞的热交换

在地壳表层，由于太阳辐射的影响，其温度常有昼夜变化、季节变化和多年周期变化，这一层称为外热层。在外热层的下界处，温度常年保持不变，等于或略高于年平均气温，这一深度带称为恒温层或者恒温带。在恒温层以下，由于受地球内部热源的影响，温度开始随深度逐渐增高。

隧洞洞身通常位于恒温层，随着隧洞的开挖和通水，隧洞衬砌和周围围岩原来的热平衡被打破，形成新的热平衡，隧洞衬砌和近洞围岩一定范围内成为变温层。

为了避免较复杂的不稳定温度场的计算，下面采用稳定温度场来分析水体与隧洞的热交换。研究表明埋深超过 10 m，地温通常不受地面温度年周期波动的影响，可视为深埋隧洞<sup>[13]</sup>。

如图 1 所示深埋隧洞，可将温度的分布划分为三层<sup>[13]</sup>，第一层为衬砌层， $R \leq r \leq R_1$ ，其中  $R$  和  $R_1$  分别为隧洞内径和衬砌外径；第二层为围岩变温层， $R_1 < r \leq R_2$ ，其中  $R_2$  变温层外径；第三层为围岩恒温层， $r > R_2$ ，地温  $T_0$  为常数。

假设衬砌层和围岩变温层相同半径上的温度相同且与纵坐标无关，则圆柱坐标系下的稳定温度场的热传导方程是

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (1)$$

式中： $T$  为衬砌或围岩的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $r$  为半径，m。

求解式(1)常微分方程得

$$T = C \ln r + D \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C}{r} \quad (3)$$

衬砌层边界条件：当  $r=R$  时， $T=T_s$ ；当  $r=R_1$  时， $T=T_1$ ，其中： $T_s$  为隧洞内壁温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_1$  为衬砌外侧表面温度， $^{\circ}\text{C}$ 。把这些边界条件代入式(2)(3)可得

$$C = \frac{T_1 - T_s}{\ln(R_1/R)} \quad (4)$$

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} = \frac{T_1 - T_s}{R \ln(R_1/R)} \quad (5)$$

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R_1} = \frac{T_1 - T_s}{R_1 \ln(R_1/R)} \quad (6)$$

围岩变温层边界条件：当  $r=R_1$  时， $T=T_1$ ；当  $r=R_2$  时， $T=T_0$ ，其中变温层外侧温度  $T_0$  可视为常数。把这些边界条件代入式(2)(3)可得

$$C = \frac{T_0 - T_1}{\ln(R_2/R_1)} \quad (7)$$

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R_1} = \frac{1}{R_1} \frac{T_0 - T_1}{\ln(R_2/R_1)} \quad (8)$$

根据热平衡原理，在衬砌层和变温层的交界面上  $k_1 \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R_1} = k_2 \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R_1}$ ，联立求解式(6)(8)可得衬

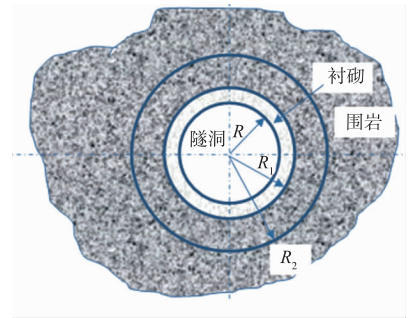


图 1 有压隧洞温度分层示意

砌外侧温度

$$T_1 = \frac{T_s(\ln R_2/R_1)/k_2 + T_D(\ln R_1/R)/k_1}{(\ln R_1/R)/k_1 + (\ln R_2/R_1)/k_2} \quad (9)$$

隧洞衬砌内表面的热通量

$$\varphi_{wb} = -k_1 \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} = -\frac{k_1}{R} \frac{T_1 - T_s}{\ln R_1/R} \quad (10)$$

式中： $\varphi_{wb}$ 为隧洞衬砌内表面净热通量， $W/m^2$ ； $k_1$ 为衬砌导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； $k_2$ 为围岩变温层导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ；

将式(9)代入式(10)可得

$$\varphi_{wb} = k_E (T_s - T_D) \quad (11)$$

$$k_E = \frac{1}{R} \frac{1}{(\ln R_1/R)/k_1 + (\ln R_2/R_1)/k_2} \quad (12)$$

式中： $k_E$ 为隧洞等效导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。在计算的过程中，一般可取围岩变温层外径  $R_2 = (2 \sim 3)R$ <sup>[13-14]</sup>，或者变温层厚度  $R_2 - R = (1 \sim 2)R$ 。

类似地，当衬砌层和围岩变温层可划分为  $m$  层时，隧洞等效导热系数

$$k_E = \frac{1}{R} \frac{1}{(\ln R_1/R)/k_1 + \sum_{j=1}^{m-1} (\ln R_{j+1}/R_j)/k_{j+1}} \quad (13)$$

由于水体与隧洞衬砌内表面的水温  $T_w \approx T_s$ <sup>[10]</sup>，所以式(11)可改写为

$$\varphi_{wb} = h_{wb} (T_w - T_D) \quad (14)$$

式中  $h_{wb}$  为水体与隧洞的热交换系数，表示水体与隧洞表面热交换能力的系数，这时  $h_{wb} = k_E$ ， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

### 3 有压隧洞水温的时空变化规律

随着有压隧洞水体与洞壁的热交换，热量通过水流的运动和紊动向下游和整个过水断面传递，在一维条件下，沿流向的对流-热扩散方程是

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p A T_w) + \frac{\partial}{\partial x} (AV \rho C_p T_w) - \frac{\partial}{\partial x} \left( AE_x \rho C_p \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) = -\chi \varphi_{wb} \quad (15)$$

式中： $T_w$ 为水的断面平均温度， $^\circ C$ ； $t$ 为时间， $s$ ； $x$ 为距离， $m$ ； $\rho$ 为水的密度， $kg/m^3$ ，常温下  $\rho \approx 1000 kg/m^3$ ； $C_p$ 为水的比热，在  $0^\circ C$  时  $C_p = 4217.7 J/(kg \cdot ^\circ C)$ ； $A$ 为隧洞过水断面面积， $m^2$ ； $V$ 为水的断面平均流速， $m/s$ ； $E_x$ 为热扩散系数； $\chi$ 为湿周， $m$ 。式(15)等号左边第一项表示过水断面热量随时间的变化；第二项表示过水断面热量随水体运动的变化，又称为热量的对流传递；第三项表示过水断面热量随水体热扩散的变化。式(15)等号右边为水体与隧洞的热交换量。

在冰水力学分析中，水体热扩散项可忽略不计<sup>[7]</sup>，这时式(15)可改写为

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{bT_w + c}{\rho C_p A} \quad (16)$$

$$dx/dt = V \quad (17)$$

式中： $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x}$ ； $b = -2\pi R h_{wb} < 0$ ； $c = 2\pi R h_{wb} T_D$ ； $x$ 为液体质点随时间  $t$  变化的运动轨迹，称为特征线。

当把隧洞分成为  $m$  段，在每一段参数  $b$ 、 $c$ 、 $A$  为常数，则对式(16)沿特征线积分得水温和推计算公式

$$T_{wp,i} = (-c_i + (b_i T_{wp,i-1} + c_i) \exp(b_i \Delta t_i / (\rho C_p A_i))) / b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

式中：下标“ $i$ ”为洞段编号； $T_{wp,i-1}$ 为洞段  $i$  进口时刻  $t_{i-1}$  的水温， $^\circ C$ ； $T_{wp,i}$ 为洞段  $i$  出口时刻  $t_i$  的水温， $^\circ C$ ； $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ ， $s$ 。

对式(17)积分可得  $\Delta t_i = \Delta x_i / V_i$ , 所以式(18)可改写为

$$T_{wp,i} = (-c_i + (b_i T_{wp,i-1} + c_i) \exp(b_i \Delta x_i / (\rho C_p Q))) / b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

式中  $Q = A_i V_i$  为隧洞流量,  $m^3/s$ 。

由于系数  $b_i < 0$  总是成立, 所以, 不论隧洞进口水温  $T_{wp,0}$  是大于还是小于  $0^\circ C$ , 水温  $T_{wp,i}$  随着时间  $t_i = t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_i$  或者距离  $x_i = x_0 + \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_i$  的增加呈指数规律变化, 逐渐趋近于一个洞段恒温层温度

$$T_{wc,i} \approx -c_i / b_i = -2\pi R_i h_{wbi} T_{Di} / (-2\pi R_i h_{wbi}) = T_{Di} \quad (20)$$

综上所述, 可得重要结论: 如果有压隧洞足够长到冰期出口水温大于  $0^\circ C$ , 则隧洞出口下游渠道一定长度不会发生流冰现象。

#### 4 无压隧洞内的气温

无压隧洞进出口与大气相通, 大气温度的变化必然影响洞内气温的沿程分布和随时间的变化, 而洞壁温度和水温也会影响洞内气温的变化, 与此同时, 洞内气温的变化也会影响水温的变化, 所以了解洞内气温变化规律是分析水温变化规律的基础。以输水工程普遍采用的城门洞型无压隧洞为例, 如图 2 所示, 分析洞内气温的变化规律。

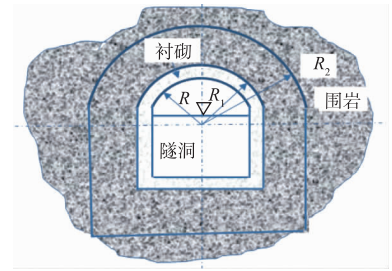


图 2 城门洞型无压隧洞示意图

冬季冰情原型观测表明, 明渠输水工程水道上的相对湿度较大, 以南水北调中线工程京石段为例, 日平均相对湿度为  $57.5\% \sim 71.1\%$ , 最高日相对湿度为  $81.5\% \sim 96.10\%$  [3]。

考虑到无压隧洞内的气体空间有限, 大气进入隧道后在水体蒸发作用下易达到饱和状态, 即相对湿度  $R_h = 100\%$ , 在此条件下, 水面蒸发的影响可忽略不计, 无压隧洞内气体与水体的热交换主要受对流影响, 基于俄罗斯冬季公式 [9], 对流的热通量是

$$\varphi_{wa} = h_{wa} (T_w - T_a) + 0.158 \times 10^{-3} p_a (T_w - T_a)^2 \quad (21)$$

$$h_{wa} = 6 \times 10^{-4} p_a (6.04 + 2.95U) \quad (22)$$

式中:  $\varphi_{wa}$  为气水热交换净热通量,  $W/m^2$ ;  $h_{wa}$  为气水对流热交换系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $U$  为洞内气体相对于水流的运动速度,  $m/s$ ;  $p_a$  为当地大气压,  $hPa$ 。当假设气流与水流的大小和方向相同, 则  $U = 0$ 。

式(21)可改写为

$$\varphi_{wa} = f_1 T_a^2 - f_2 T_a + f_3 \quad (23)$$

式中:  $f_1 = 0.158 \times 10^{-3} p_a$ ;  $f_2 = h_{wa} + 2f_1 T_w$ ;  $f_3 = h_{wa} T_w + f_1 T_w^2$ 。

气体与隧洞上部洞壁表面的对流热交换可描述为

$$\varphi_{tb} = h_{ts} (T_a - T_s) \quad (24)$$

式中:  $\varphi_{tb}$  为隧洞壁面净热通量,  $W/m^2$ ;  $h_{ts}$  为空气与洞壁的对流热交换系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , 可采用下述经验公式计算 [15]

$$h_{ts} = 6.2 + 4.2U_a \quad (25)$$

式中  $U_a$  为气体的速度,  $m/s$ 。

考虑隧洞衬砌和围岩的热传导, 可得

$$\varphi_{tb} = k_E (T_s - T_D) \quad (26)$$

联立求解式(24)(26)得

$$T_s = \frac{T_a / k_E + T_D / h_{ts}}{1/k_E + 1/h_{ts}} \quad (27)$$

把式(27)代入式(26)得隧洞壁面净热通量

$$\varphi_{tb} = h_{tb} (T_a - T_D) \quad (28)$$

$$h_{tb} = 1/(1/k_E + 1/h_{ts}) \quad (29)$$

式中  $h_{tb}$  为气体与隧洞的热交换系数。对于城门洞型无压隧洞的弧形顶拱,  $k_E$  由式(13)确定, 记为  $h_{tb} = h_{tb,a}$ ; 对于直墙, 根据文献[10]

$$h_{tb} = h_{tb,s} = 1/(\sum_{j=1}^m (h_j/k_j) + 1/h_{ts}) \quad (30)$$

隧洞内空气的温度受沿程洞壁温度和水温的影响, 当假设无压隧洞气体为不可压缩流体, 忽略热扩散的影响, 则气体一维对流方程是

$$\frac{\partial(\rho_a A_a C_{pa} T_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a A_a C_{pa} U_a T_a)}{\partial x} = (\chi_a h_{tb,a} + \chi_s h_{tb,s})(T_D - T_a) + B(f_1 T_a^2 - f_2 T_a + f_3) \quad (31)$$

式中:  $\rho_a$  为空气密度, 在 0 °C 和 1 个标准大气压下,  $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ;  $A_a$  为隧洞截断面上空气的面积,  $\text{m}^2$ ;  $C_{pa}$  为空气比热, 初步计算可取  $1000 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)}$ ;  $\chi_a$  为弧形顶拱的周长,  $\text{m}$ ;  $\chi_s$  为隧洞直墙与气体接触的长度,  $\text{m}$ ;  $B$  为水面宽,  $\text{m}$ 。式(31)等号右边第一项为隧洞围岩恒温层传导给气体的热通量, 而第二项为水面热对流传导给气体的热通量。

在一般情况下, 城门洞型隧洞正常输水的水深  $H$  小于直墙高度  $Z_s$ 。当已知隧洞断面水深  $H$ 、顶拱半径  $R$  和圆心角  $\alpha$ (弧度), 则

$$\chi_a = \alpha R, \chi_s = 2(Z_s - H), A_a = B(Z_s - H) + 0.5\alpha R^2 - \alpha\sqrt{R^2 - \alpha^2} \quad (32)$$

在已知输水流量  $Q$  和隧洞底宽  $B$  时, 可采用下述方法计算水深  $H$ 。假设流动为均匀流, 断面平均流速

$$V = \frac{Q}{BH} = \frac{1}{n} R_w^{2/3} \sqrt{J} = \frac{1}{n} \left( \frac{BH}{B+2H} \right)^{2/3} \sqrt{J}$$

即

$$F = \frac{Q}{BH} - \frac{1}{n} \left( \frac{BH}{B+2H} \right)^{2/3} \sqrt{J} = 0 \quad (33)$$

式中:  $V$  为水流平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $n$  为洞壁曼宁糙率系数, 混凝土衬砌隧洞一般取  $n = 0.014$ ;  $R_w$  为水力半径,  $\text{m}$ ;  $J$  为水力坡度或者底坡。采用数值计算方法可从式(33)解出水深  $H$ 。

采用特征线方法, 式(31)可改写为

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{a_a T_a^2 + b_a T_a + c_a}{\rho_a A_a C_{pa}} \quad (34)$$

$$dx/dt = U_a \quad (35)$$

式中:  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U_a \frac{\partial}{\partial x}$ ;  $a_a = Bf_1$ ;  $b_a = -(\chi_a h_{tb,a} + \chi_s h_{tb,s} + Bf_2)$ ;  $c_a = (\chi_a h_{tb,a} + \chi_s h_{tb,s}) T_D + Bf_3$ 。

由于实际工程中  $b_a^2 - 4a_a c_a > 0$  总是成立, 下面分析一种典型情况:

- (1) 无压隧洞的流动为准稳态均匀流, 水流流速  $V$  沿程不变, 且水温  $T_w$  变化较小, 可视为常数;
- (2) 当假设无压隧洞中气体的流动是由水流的运动引起, 并取风速和水流流速的方向相同, 则  $U = 0$ , 即气体流速  $U_a = V$ ;

(3) 衬砌和围岩特性沿程不变, 包括衬砌厚度、导热系数、围岩温度  $T_D$  等。

在上述假设条件下, 常微分方程式(34)的解是

$$\frac{1}{\sqrt{b_a^2 - 4a_a c_a}} \ln \left( \frac{T_a + r_1}{T_a + r_2} \frac{T_{a0} + r_1}{T_{a0} + r_2} \right) = -\frac{t - t_0}{\rho_a A_a C_{pa}}$$

整理得气温随时间的变化。

$$T_a = \left\{ -r_1 + r_2 \frac{T_{a0} + r_1}{T_{a0} + r_2} \exp(-r_3(t - t_0)) \right\} \left/ \left\{ 1 - \frac{T_{a0} + r_1}{T_{a0} + r_2} \exp(-r_3(t - t_0)) \right\} \right. \quad (36)$$

式中  $T_{a0}$  为  $t = t_0$  时刻的气温

$$r_1 = \frac{b_a + \sqrt{b_a^2 - 4a_a c_a}}{2a_a}, \quad r_2 = \frac{b_a - \sqrt{b_a^2 - 4a_a c_a}}{2a_a}, \quad r_3 = \frac{\sqrt{b_a^2 - 4a_a c_a}}{\rho_a A_a C_{pa}}$$

常微分方程式(35)的解是

$$x-x_0=U_a(t-t_0) \quad (37)$$

把式(37)代入式(36)消去 $(t-t_0)$ 得气温的沿程分布规律

$$T_a = \left\{ -r_1 + r_2 \frac{T_{a0} + r_1}{T_{a0} + r_2} \exp\left(-\frac{r_3}{U_a}(x-x_0)\right) \right\} / \left\{ 1 - \frac{T_{a0} + r_1}{T_{a0} + r_2} \exp\left(-\frac{r_3}{U_a}(x-x_0)\right) \right\} \quad (38)$$

当取隧洞进口为 $x_0$ , 则 $T_{a0}$ 为隧洞进口大气温度。当 $x \rightarrow +\infty$ ,  $T_a = -r_1$ 。这表明: 不论隧洞进口气温 $T_{a0}$ 大于还是小于隧洞围岩温度和水温, 气温 $T_a$ 随着离开洞口距离的增加都会以指数规律趋近于一个定温 $T_a = -r_1$ , 其大小与围岩温度 $T_D$ 、水温 $T_w$ 及隧洞结构和热力学参数有关。

## 5 无压隧洞内水温的变化规律

对于如图2所示无压隧洞, 考虑隧洞正常输水水位一般在直墙范围内, 水体与隧洞的热交换可描述为<sup>[10-11]</sup>

$$\varphi_{wb} = h_{wb}(T_w - T_D) \quad (39)$$

$$h_{wb} = 1/(h_1/k_1 + h_2/k_2) \quad (40)$$

式中:  $h_1$ 为衬砌直墙或底板的厚度, m;  $h_2$ 为围岩变温层的厚度, m。在初步计算时, 可取 $h_2 = (1 \sim 2)R$ <sup>[13-14]</sup>。

根据式(21), 无压隧洞水面接受的气体对流净热通量可描述为

$$\varphi_T = -\varphi_{wa} = -(F_1 T_w^2 + F_2 T_w + F_3) \quad (41)$$

式中:  $F_1 = 0.158 \times 10^{-3} p_a$ ;  $F_2 = h_{wa} - 2F_1 T_a$ ;  $F_3 = -h_{wa} T_a + F_1 T_a^2$ ;  $h_{wa} = 6 \times 10^{-4} p_a (6.04 + 2.95U)$ 。

隧洞水体与周围环境的热交换包括水面与气体的对流热交换及水体与隧洞的热交换, 即

$$B\varphi_T - \int_0^x \varphi_{wb} ds = -B(F_1 T_w^2 + F_2 T_w + F_3) + \chi_w h_{wb}(T_D - T_w) = aT_w^2 + bT_w + c \quad (42a)$$

$$a = -BF_1, \quad b = -(BF_2 + \chi_w h_{wb}), \quad c = -BF_3 + \chi_w h_{wb} T_D, \quad h_{wb} = 1/(h_1/k_1 + h_2/k_2) \quad (42b)$$

把式(15)等号右边 $-\chi\varphi_{wb}$ 用式(42a)右边 $aT_w^2 + bT_w + c$ 代替, 忽略热扩散项并采用特征线方法可得

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{bT_w + c}{\rho C_p A} \quad (43)$$

对实际输水工程,  $\sqrt{b^2 - 4ac} > 0$ 总是成立。当把隧洞分成为 $m$ 段, 在每一段参数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $A$ 为常数, 则对式(43)沿特征线积分得

$$T_{wp,i} = \frac{-r_{1,i} + r_{2,i} \exp(-r_{3,i} \Delta t_i) (T_{wp,i-1} + r_{1,i}) / (T_{wp,i-1} + r_{2,i})}{1 - \exp(-r_{3,i} \Delta t_i) (T_{wp,i-1} + r_{1,i}) / (T_{wp,i-1} + r_{2,i})}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (44)$$

$$T_{wp,i} = \frac{-r_{1,i} + r_{2,i} \exp(-r_{3,i} \Delta x_i / V_i) (T_{wp,i-1} + r_{1,i}) / (T_{wp,i-1} + r_{2,i})}{1 - \exp(-r_{3,i} \Delta x_i / V_i) (T_{wp,i-1} + r_{1,i}) / (T_{wp,i-1} + r_{2,i})}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (45)$$

式中: 下标“ $i$ ”为洞段编号;  $m$ 为洞段数;  $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ 为洞段 $i$ 的长度, m;  $V_i$ 为洞段 $i$ 的平均流速, m/s;  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1} = \Delta x_i / V_i$ , s;  $T_{wp,i-1}$ 为洞段 $i$ 进口时刻 $t_{i-1}$ 的水温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{wp,i}$ 为洞段 $i$ 出口时刻 $t_i$ 的水温,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$$r_{1,i} = \frac{b_i + \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i}, \quad r_{2,i} = \frac{b_i - \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i}, \quad r_{3,i} = \frac{\sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{\rho A_i C_p} \quad (46)$$

在已知时刻 $t_0 = 0$ 洞段1起始点 $x_0$ 处的水温 $T_{wp,0}$ 的条件下, 利用式(44)或者式(45)可以递推计算出洞段 $i$ 出口 $x_i$ 在时段 $\Delta t_i$ 末了的水温 $T_{wp,i}$ 。由于系数 $r_{3,i} > 0$ 总是成立, 水温 $T_{wp,i}$ 随时间 $t_i = t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_i$ 或者距离 $x_i = x_0 + \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_i$ 的增加呈指数规律趋近于 $-r_{1,i} > 0$ 。

## 6 算例

以南水北调中线京石段吴庄隧洞为例, 定量分析洞内气温和水温的时空变化。

**6.1 洞内气温随不同进口大气温度和流量的变化** 吴庄隧洞长 2373 m，其中洞身长 2207 m，底坡 1/5870；采用双洞线布置，设计流量 125 m<sup>3</sup>/s，校核流量 150 m<sup>3</sup>/s；隧洞断面为圆拱直墙型，净宽  $B=7.8$  m、洞高  $H_w=8.15$  m；洞身段主要采用混凝土衬砌，衬砌厚度  $h_1=0.25$  m，内设单层钢筋网<sup>[16-17]</sup>。当校核流量为 150 m<sup>3</sup>/s 和糙率系数  $n=0.014$  时，洞内均匀流流速  $V=1.64$  m/s 和水深  $H=5.85$  m。当 2015—2016 年冬季输水流量 45.72 m<sup>3</sup>/s 和  $n=0.014$  时， $V=1.22$  m/s 和  $H=2.41$  m。计算取直墙高度  $Z_s=5.9$  m，顶拱半径  $R=4.5$  m，衬砌外径  $R_1=R+h_1=4.75$  m，取围岩变温层半径  $R_2=2.0R=9.0$  m，钢筋混凝土  $k_1=1.74$  W/(m·℃)，围岩变温层厚度  $h_2=R_2-R_1=4.25$  m，设围岩为花岗岩的导热系数  $k_2=3.0$  W/(m·℃)，气体密度  $\rho_a=1.29$  kg/m<sup>3</sup>，空气比热  $C_{pa}=1000$  J/(kg·℃)。

根据参考文献[18]，恒温层温度与海拔高度成正比，可采用下述经验公式估计

$$T_D = 20.66 - 0.0073Z \quad (47)$$

式中  $Z$  为地面点海拔高度，m。当取恒温层温度  $T_D=10.0$  ℃、 $U_a=V$  和气体相对水流的风速  $U=0$  时，可得表 1 计算特征参数值，其中  $V=1.22$  m/s 和  $V=1.64$  m/s 工况分别是冬季输水和校核工况输水。

表 1 计算特征参数值

$V/(m/s)$	$H/m$	$T_w/℃$	$h_{wa}/$ (W/(m <sup>2</sup> ·℃))	$h_{ls}/$ (W/(m <sup>2</sup> ·℃))	$h_{th,a}/$ (W/(m <sup>2</sup> ·℃))	$h_{th,s}/$ (W/(m <sup>2</sup> ·℃))	$\chi_a/m$	$\chi_s/m$	$A_a/m^2$	$r_1$	$r_2$	$r_3$
1.22	2.41	1	3.62	11.32	0.84	0.61	9.42	6.98	39.64	-3.98	-30.83	$6.47 \times 10^{-4}$
1.22	2.41	4	3.62	11.32	0.84	0.61	9.42	6.98	39.64	-5.92	-34.89	$6.98 \times 10^{-4}$
1.64	5.85	1	3.62	13.09	0.84	0.61	9.42	0.10	12.81	-3.16	-28.33	$1.88 \times 10^{-3}$
1.64	5.85	4	3.62	13.09	0.84	0.61	9.42	0.10	12.81	-5.40	-32.09	$1.99 \times 10^{-3}$

图 3 示出了模拟的冬季输水时不同大气温度  $T_{a0}(x=0)$  条件下隧洞气温的沿程分布。当隧洞进口大气温度大于 0 ℃ 时，洞内气温随离开洞口距离的增加近似线性下降。当隧洞进口大气温度小于 0 ℃ 时，洞内气温随离开洞口距离的增加呈指数规律迅速增加接近甚至超过 0 ℃，例如：大气温度  $T_{a0}=-18$  ℃、水温  $T_w=1$  ℃ 和围岩恒温层温度  $T_D=10$  ℃ 时，隧洞出口气温  $T_a$  上升到 -0.4 ℃ 左右； $T_{a0}=-18$  ℃、 $T_w=4$  ℃ 和  $T_D=10$  ℃ 时，隧洞出口气温  $T_a$  上升到 1.7 ℃ 左右。

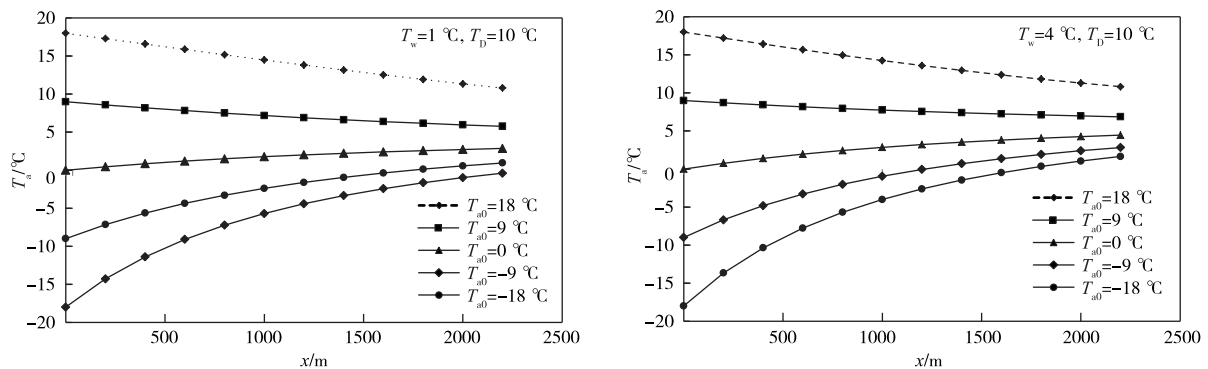


图 3 冬季输水工况隧洞气温的沿程分布

图 4 示出了模拟的不同输水流量时隧洞气温的沿程分布，其中：气体截面积  $A_a=39.64$  m<sup>2</sup> 对应冬季输水流量 45.72 m<sup>3</sup>/s， $A_a=12.81$  m<sup>2</sup> 对应校核工况输水流量 150.0 m<sup>3</sup>/s。显然，隧洞内的气体空间随着输水流量的增加而减小；气体空间越大，洞内气温沿程分布变化比较平缓，而气体空间越小，洞内气温分布变化较大，特别是靠近隧洞进口处。例如：在校核流量工况，吴庄隧洞进口气温为 -18 ℃，而在距离隧洞进口 500 m 处，气温上升超过 -7 ℃。

**6.2 洞内水温随不同围岩恒温层温度和进口大气温度的变化** 假设吴庄隧洞进口存在冰盖，冰下水温  $T_{w0}=0.00$  ℃。在下面分析水温  $T_w$  的变化过程中，无压隧洞内的气温  $T_a$  可采用式(36)或式(38)计算，

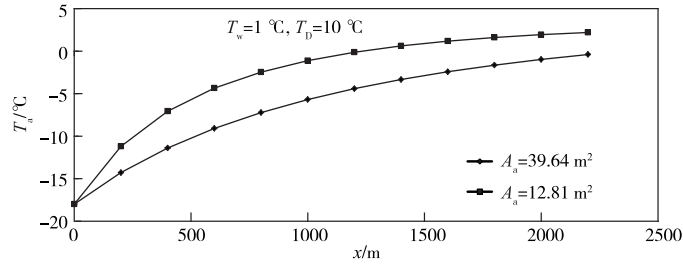


图4 不同水流流量时隧洞气温的沿程分布

为已知量。图5示出了模拟的冬季输水时不同围岩恒温层温度和大气温( $x=0$ )条件下隧洞水温的沿程分布,其中输水流量为 $150.0\text{ m}^3/\text{s}$ 、隧洞进口大气温 $T_{a0}=-18\sim-6\text{ }^\circ\text{C}$ 、隧洞恒温层温度 $T_D$ 分别为5和 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 。

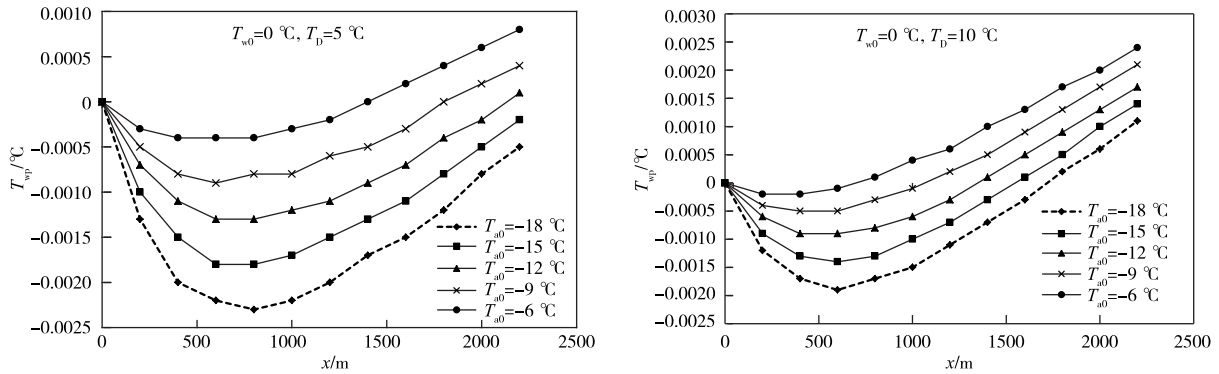


图5 吴庄隧洞水温的沿程分布

观察图5可见,不论 $T_D=5\text{ }^\circ\text{C}$ 还是 $10\text{ }^\circ\text{C}$ ,水温 $T_{wp}$ 随离开隧洞进口距离 $x$ 的增加从水温 $T_{w0}=0.00\text{ }^\circ\text{C}$ 先下降到 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,然后随着 $x$ 的增加逐渐上升,甚至超过 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,其原因这是由于隧洞进口气温为负且随着 $x$ 的增加而迅速升高,甚至转正(见图3)。从中可得一个结论:当无压隧洞进口存在冰盖时,在大气温度小于零的条件下,隧洞进口部分洞段水温将下降到 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,成为过冷水,可能产生冰花,但随着离开洞口距离的增加,冰花会随着水温的升高而消失。

## 7 结论

(1)本文提出了计算有压隧洞等效导热系数的公式,研究表明有压隧洞的水温随时间或者距离的增加呈指数规律变化,逐渐趋近于一个洞段恒温层温度。当冰期有压隧洞进口水温小于隧洞恒温层温度时,经过隧洞后水温将升高。如果有压隧洞足够长到冰期出口水温大于 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,则隧洞出口下游渠道一定长度不会发生流冰现象。

(2)对于无压隧洞,不论隧洞进口气温大于还是小于隧洞围岩温度和水温,洞内气温随时间或者距离的增加都会以指数规律趋近于一个定温,其大小与围岩温度、水温及隧洞结构和热力学参数有关。隧洞内的气体空间随着输水流量的增加而减小;气体空间越大,洞内气温沿程分布变化比较平缓,而气体空间越小,洞内气温分布变化较大,特别是靠近隧洞进口处。

(3)无压隧洞的水温随时间或者距离的增加呈指数规律趋近于一个大于 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 的值。当无压隧洞进口存在冰盖时,在大气温度小于零的条件下,隧洞进口部分洞段水温将下降到 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,成为过冷水,可能产生冰花,但随着离开洞口距离的增加,冰花会随着水温的升高而消失。如果无压隧洞足够长,则隧洞出口下游渠道一定长度不会发生流冰现象。

如果将输水倒虹吸视为有压隧洞的特例,则有压隧洞的热交换参数化方法和水温模型也适用于输水倒虹吸。



## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 段文刚, 黄国兵, 杨金波. 长距离调水明渠冬季输水冰情分析与安全调度[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 96-104.
- [ 2 ] 黄国兵, 杨金波, 段文刚. 典型长距离调水工程冬季冰凌危害调查及分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 144-149.
- [ 3 ] 胡五星, 杨金波, 黄明海, 等. 南水北调中线干线工程 2019-2020 年度冰期输水冰情原型观测[R]. 北京: 中国电建集团北京勘测设计研究有限公司, 长江水利委员会长江科学院, 2020.
- [ 4 ] 杨开林, 王涛, 郭新蕾, 等. 南水北调中线冰期输水安全调度分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 1-4, 8.
- [ 5 ] 郭新蕾, 杨开林, 王涛, 等. 南水北调中线工程冬季输水数值模拟[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1268-1276.
- [ 6 ] ASHTON G D. River and Lake Ice Engineering[M]. Water Resources Pub., Littleton, Co., 1986.
- [ 7 ] 沈洪道. 河冰研究[M]. 霍世青等译, 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
- [ 8 ] 杨开林. 水冰雪反照率参数化通用模型[J]. 水利水运工程学报, 2020(4): 1-10.
- [ 9 ] 杨开林. 冰期河湖与大气的热交换模型[J]. 水利学报, 2021, 52(5): 556-564, 577.
- [ 10 ] 杨开林. 冰期明渠水温模型[J]. 水利学报, 2022, 53(1): 20-30.
- [ 11 ] 杨开林. 太阳辐射和地温对冰盖下水温的影响[J]. 水利学报, 2022, 53(5): 530-538, 548.
- [ 12 ] 杨开林. 渡槽水体的热交换及水温和含冰率的时空变化[J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1317-1327.
- [ 13 ] 蔡晓鸿. 水工有压隧洞衬砌伸缩缝间距设计新法[J]. 江西水利科技, 1994, 20(4): 303-309.
- [ 14 ] 李俊, 方朝阳. 围岩特性与衬砌厚度对隧洞衬砌混凝土温度应力的影响[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3): 132-136.
- [ 15 ] 刘胜, 李权谋, 张国柱, 等. 隧道通风对围岩地温能的影响研究[J]. 公路, 2016, 61(7): 330-335.
- [ 16 ] 武爱玲, 宋宝生. 京石段吴庄隧洞洞间距确定的分析探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 367-368, 425.
- [ 17 ] 阎忠. 南水北调中线吴庄隧洞工程设计要点[J]. 水科学与工程学报, 2014(2): 66-68.
- [ 18 ] 黄凯. 秦岭越岭深埋隧道地温预测方法[J]. 山西建筑, 2009, 35(18): 295-296.

## Simulation to water temperature in tunnels

YANG Kailin

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Water conveyance tunnel is an important part of long-distance canal system water diversion project. The change of water temperature in the north tunnel seriously affects the development of downstream canal ice condition. The heat exchange of the water body in the water conveyance tunnel is studied, including the heat exchange between the gas in the unpressured tunnel and the tunnel wall and water surface. The parametric equation and water temperature model for calculating the heat exchange of the water body are proposed, and the temporal and spatial variation law of the water temperature in the pressured tunnel and the unpressured tunnel is analyzed. The results show that the water temperature of both pressured and unpressured tunnels changes exponentially with time or with the increase of distance from the tunnel inlet, and gradually approaches a fixed value, greater than 0 °C, respectively, related to the temperature of surrounding rock constant temperature layer, water temperature, tunnel structure and thermodynamic parameters.

**Keywords:** water conveyance; pressurized tunnel; unpressured tunnel; heat exchange; water temperature

(责任编辑: 李福田)