

寒区隧道二衬混凝土冬季施工温控技术研究

谭贤君¹, 陈卫忠^{1,2}, 王 辉³, 赵武胜¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. 山东科技大学 资源与土木工程系, 山东 泰安 271019)

摘要: 冬季寒区隧道二衬模筑混凝土施工由于低温水泥水化不充分、不均匀, 极易出现强度不达标、表面出现贯穿性裂缝等问题。根据含低温相变岩体温度场控制方程, 从研究开挖时间对围岩温度影响入手, 在充分考虑混凝土水化热影响条件下, 分析寒区隧道围岩与二衬混凝土热量迁移传递规律, 研究隧道内环境温度、浇注时洞内加热温度和加热时间对二衬模筑混凝土温度影响规律。研究结果表明, 随着开挖时间的增加, 围岩温度受环境温度影响的范围逐渐增大; 围岩被加温一段时间后, 表面温度和深部围岩温度较高, 中间温度较低, 形成了两头热, 中间冷的温度分布情况; 二衬混凝土 24 h 内的最低温度随着加热时间、加热温度和环境温度的增加(升高)而升高。在此基础上, 提出一种简洁、实用的加热时间计算公式。现场实施效果表明, 应用该计算公式, 可实现嘎隆拉隧道冬季低温环境条件下二衬模筑混凝土高效不间断施工、表面无裂纹且现场实测强度大于 C30 强度等级的目标。

关键词: 隧道工程; 寒区隧道; 混凝土衬砌; 冬季施工; 温控技术

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)01-0150-11

RESEARCH ON TEMPERATURE CONTROL TECHNOLOGY FOR WINTER CONSTRUCTION OF TUNNEL CONCRETE LINING IN COLD REGIONS

TAN Xianjun¹, CHEN Weizhong^{1,2}, WANG Hui³, ZHAO Wusheng¹

(1. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*; 3. *Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271019, China*)

Abstract: The cement can not hydrate sufficiently and uniformly at low temperature, so it's easy to arouse rise the problem with lack of strength and appearing penetration cracks for tunnel concrete lining in cold regions during winter. According to the temperature control equation including low temperature phase transition, beginning with the study of influence of excavation time on temperature distribution of surrounding rock, considering the heat of hydration of concrete, the heat transfer law between surrounding rock and concrete lining was analyzed, and the influence of environment temperature in tunnel, heating temperature and time on the change rule of concrete temperature was studied. The results show that the influence scope of environmental temperature on the temperature of surrounding rock increased with the increase of excavation time; after a period of heated time, the temperature of surface and deep surrounding rock became higher than the middle's, formed a temperature

收稿日期: 2012-06-20; 修回日期: 2012-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072238, 51208499); 国家自然科学基金杰出青年基金项目(51225902)

作者简介: 谭贤君(1984-), 男, 博士, 2005年毕业于石家庄铁道学院地下工程专业, 现任副研究员, 主要从事寒区隧道及地下工程温度-渗流-应力三场耦合理论与稳定性控制方面的研究工作。E-mail: xjtan@whrsm.ac.cn

distribution of hot at two head , cold in the middle ; the lowest temperature of concrete lining in 24 hours increased with increasing of heating time , heating temperature and environmental temperature. Based on this , a concise and practical heating time calculation formula was put forward. The in-situ results show that the goals were realized about the lining concrete can continuously and efficiently constructing , its surface has no crack and the actual strength > C30 by applying the proposed calculation formula.

Key words : tunnelling engineering ; tunnel in cold regions ; concrete lining ; winter construction ; temperature control technology

1 引言

我国广大北方和西部高原地区，冬季气温低，延续时间长，有的省区每年负温天气甚至长达 5~6 个月。随着我国经济建设的蓬勃发展及西部大开发政策的进一步落实，在高海拔、严寒等条件下修建隧道及其他交通工程的数量在不断增加，所以解决冬季混凝土施工技术，尽可能地延长有效施工时间，具有重要的现实意义。

目前，国内外关于寒区混凝土施工及温控技术研究现主要集中在以下 3 个方面：一是混凝土在严寒条件下的冻融破坏机制^[1-2]；二是施工过程中混凝土的加热及保温技术^[3-7]；三是混凝土外加剂的使用研究及其效果分析^[8-11]。尽管取得了许多可喜成就，但目前寒区隧道很少选择在冬季施工二衬混凝土，究其原因，主要是因为以往的研究成果绝大多数关注的是混凝土在搅拌、运输以及浇灌过程中的防寒保温，很少涉及到养护过程中混凝土温度的变化对其施工质量的影响。寒区隧道二衬混凝土温控技术的难点在于：它不仅与环境温度及混凝土自身的水化热有关，还很大程度上受到围岩温度的影响，施作二衬混凝土前寒区隧道围岩的温度较低，如采取措施不当，很可能使得混凝土出现低于 5℃ 的不利工况。

针对寒区隧道二衬混凝土养护期间温控技术难题，目前的措施主要是从两方面入手：一是抵御环境温度影响；一般选用表面铺设保温棉被、毛毯等方式保温；二是抵御围岩温度影响，比较流行的方法有暖棚法、蓄热法、掺防冻剂法、电加热法和蒸汽养护法。其中，蓄热法以实施方便、成本低廉和效果显著，在寒区混凝土施工中得到了广泛应用。该方法在应用的过程中，其中最关键的一环是蓄热时间的控制，时间太短达不到加热效果，蓄热太长又会浪费宝贵的施工时间。如何选择加温时间成为保证隧道衬砌高质量、高效施工的关键，但已有成

果均只对蓄热法的有效性进行了简单的定性分析，还未见能准确预测不同环境温度、加热温度等条件下的蓄热时间的报道。

鉴于此，笔者在对寒区隧道二衬混凝土与围岩热量传输机制进行认真分析的基础上，从寒区隧道开挖时间对围岩温度影响入手，在充分考虑模筑混凝土自身水化热影响的条件下，系统研究了隧道内环境温度、浇注时洞内加热温度和加热时间对二衬模筑混凝土温度变化规律的影响，并提出了一种简洁、实用的加热时间计算公式。为冬季低温环境条件下寒区隧道二衬模筑混凝土高效、不间断施工提供了理论支撑。

2 寒区隧道二衬浇筑过程中围岩及衬砌热传导机制

对于寒区隧道而言，其围岩一般由岩石(土)骨架颗粒、孔隙水(或裂隙水)、冰以及空气组成，为突出主要问题，本文暂不考虑空气影响，即假定围岩为饱和状态，并作如下简化假定：

- (1) 围岩为均质、各向同性孔隙介质，并由骨架、水和冰组成，满足混合物理论的基本假定。
- (2) 围岩的孔隙率(裂隙率)为恒定值，不随温度、时间及空间的变化而变化，且在介质中均匀分布。
- (3) 不考虑水分的蒸发。

基于以上假设，根据以往研究成果^[12-13]，在冻融环境中，低温岩土介质热传导问题的控制方程可写为

$$C_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_L L \frac{\partial \theta_L}{\partial t} + \nabla[-\lambda_{ef} \nabla T] = Q_T \quad (1)$$

式中： C_{ef} 为等效比热容； T 为温度； ρ_L 为液态水的密度； L 为单位质量的水变为冰时释放的潜热值； θ_L 为液态水的体积含量； λ_{ef} 为岩体(或混凝土)等效导热系数； Q_T 为外部热源、混凝土水化热等。

式(1)给出的能量守恒控制方程实际上描述了

低温岩土及混凝土介质冻融区满足的一般形式，由于该式中的各项基本物理参数在已冻区和未冻区不连续，并均随温度的变化而变化，因此在数值计算中需特别谨慎处理，本文方法是引入 Heaviside 二阶阶跃平滑函数，具体思路可参见笔者^[14]的研究成果，根据该思路，等效比热容和等效导热系数可由下式得到：

$$C_{ef} = \frac{\theta_s \rho_s C_s + \theta_L \rho_L C_L + \theta_i \rho_i C_i}{\theta_s + \theta_L + \theta_i} \quad (2)$$

$$\lambda_{ef} = (\lambda_s)^{\theta_s} (\lambda_L)^{\theta_L} (\lambda_i)^{\theta_i} \quad (3)$$

式中： θ ， ρ ， C 和 λ 分别为体积含量、密度、比热容和导热系数；下标“s”，“L”，“i”分别表示围岩骨架、液态水和冰。

混凝土水化热的放热速率是一随温度、时间变化的函数，根据大量的试验资料和工程经验，水泥的累积水化热可以用指数型数学表达式^[15]表示：

$$Q_t = Q_0(1 - e^{-at^b}) \quad (4)$$

式中： Q_t 为不同龄期时的累积水化热(kJ/kg)； Q_0 为水泥最终发热量(kJ/kg)； t 为龄期； a ， b 均为与水泥品种、混凝土入模有关的经验系数，本文计算时分别取1和0.3。

由式(4)可得水化热速率 q_t 为

$$q_t = mQ_0(1 - e^{-mt}) \quad (5)$$

3 嘎隆拉隧道二衬冬季施工温控技术

3.1 工程概况

嘎隆拉隧道是西藏林芝—墨脱公路新改扩建工

程的控制性工程，现场条件恶劣，隧道进口端一年冰冻期达8个月，剩下的4个月还有2个月雨季。隧道全长3310m，坡度4.1%。该隧道于2008年9月16日开始修建，于2010年12月15日贯通。它使得中国目前唯一不通公路的县——西藏墨脱县告别了没有公路的历史。隧道穿越的山脉岗日嘎布山海拔4000m，具有“一山有四季，十里不同天”的典型环境垂直分带特征，地震、滑坡、崩塌、泥石流、雪崩、水毁随时可见。青藏高原寒冷气流和印度洋暖湿气流在这里相融交汇，隧道进洞口穿越现代海洋性冰川，1a中冰冻期达8个月，剩下的4个月还有2个月雨季，冰冻层平均厚度5~6m，最厚达15m。多年平均气温为1.1℃，最冷月(1月)平均气温为-7.6℃，最热月(7月)平均气温为9.0℃；极端最高气温23.6℃，极端最低气温-27.7℃；无霜期176d，昼夜温差大；温度垂直变化明显，其规律大约为每升高100m，气温下降0.74℃。隧道进口端(波密)纵剖面如图1所示，由于施工条件恶劣，隧道施工工法及支护措施成为影响施工进度、投资成本的关键因素。

经综合比较与分析，嘎隆拉隧道二衬模筑混凝土施工保温措施决定采用洞室内加温(电加热、木炭生火和软管热水循环)+表面棉被保温的方式，借助大型多物理场耦合分析软件COMSOL Multiphysics，利用有限元数值分析方法对其有效性和关键参数进行研究。

3.2 有限元计算模型

由于山体地热等因素的影响，隧道围岩受环境温度影响的范围主要集中在洞口，因此，本文计算选在靠近洞口位置(洞深10m左右)；另外，由于隧

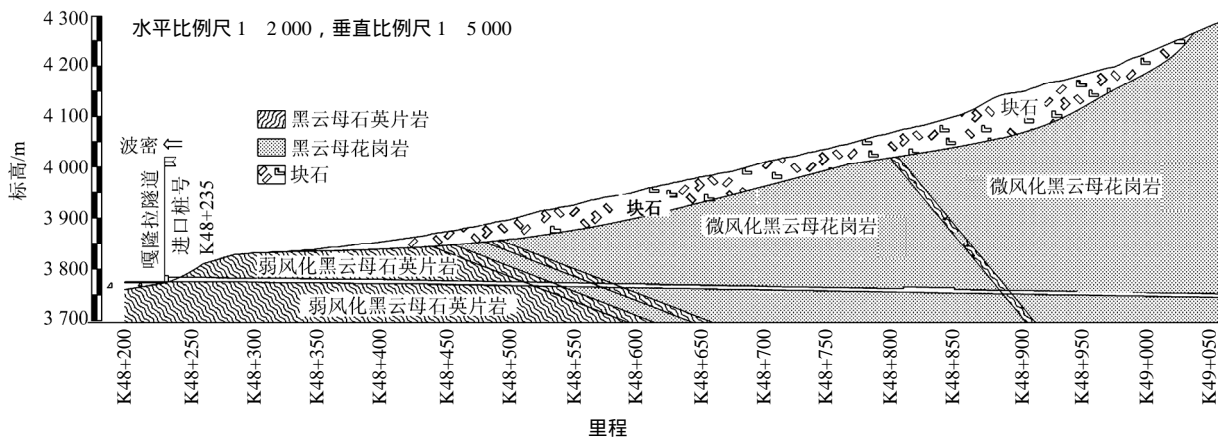


图1 嘎隆拉隧道进口端(波密)纵剖面图

Fig.1 Longitudinal profile of Galongla tunnel at entrance(Bomi)

道围岩温度场一般主要受壁面温度较大，围岩内部纵向传热较少，为方便计算，本文选取平面二维模型来代替现场三维情况，具体计算模型如图 2 所示。该位置围岩受现代海洋冰川影响，属冰川堆积地层，按围岩分类为 V 类围岩。

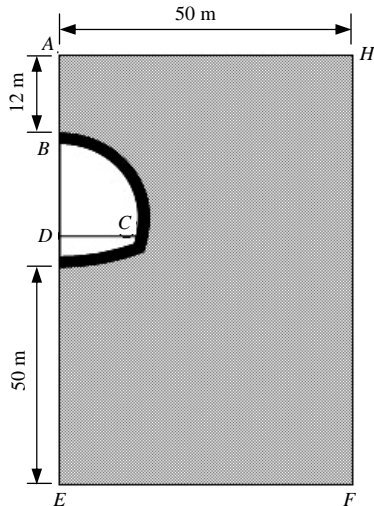


图 2 计算模型示意图

Fig.2 Calculation model

3.3 计算参数与边界条件

空气流过各种不同的围护结构的表面时，被空气包围的固体介质表面上，发生 2 种彼此独立的热交换：由于辐射引起的热交换以及由于传导和对流引起的热传播。二衬施作时，隧道还未贯通，隧道内的空气流动主要由射流风机引起，风速较小，因此不考虑气量、流程、糙率、气体流速等对流换热系数的影响。在该条件下，根据张学富等^[16-17]的研究成果，空气与围岩的对流换热系数 $\alpha = 15.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；根据中交第二公路设计研究院提供的内部勘察报告：围岩初始温度 T_0 按多年冻岩下限 1.5% 的地热梯度确定；温度垂直变化规律设为：每升高 100 m，气温下降 0.74；围岩的含水量为 35%；围岩骨架、水、冰和混凝土的导热系数分别为 3.00, 0.56, 2.24, 2.33 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，围岩骨架、水、冰和混凝土的比热容和 850, 4 180, 2 090 和 950 $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ；围岩骨架、水、冰和混凝土的密度分别为 2 300, 1 000, 917 和 2 500 kg/m^3 。混凝土放热可以延续很长时间，但大部分热量是在早期，特别是在最初 3 d 内放出，即混凝土在入模后 0~3 d 内放出水化热使其升温。采用混凝土绝热温升的温度作为混凝土的初始温度。根据现场条件，混凝土入模温度控制取 5，水泥最终发热量 $Q_0 = 330 \text{ kJ}/\text{kg}$ ^[18]。边界条件如下：施工时隧道洞内(BCD)温度为 -10；AB 和 DE 为对称边界，AH, HF 和

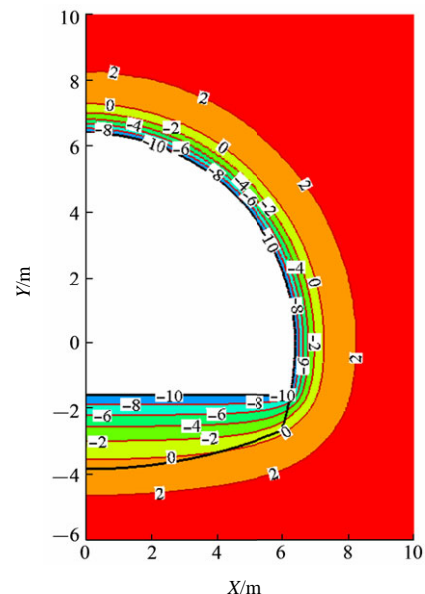
EF 为绝热边界。

3.4 计算结果

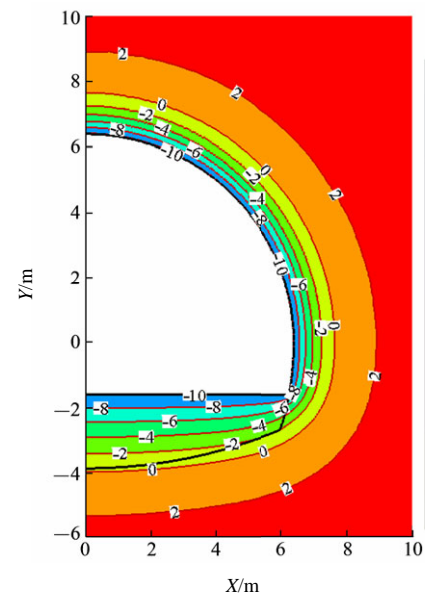
(1) 围岩温度随隧道开挖时间的变化规律

由于大地地热的影响，山体一定厚度内的温度即使是在高原寒冷地区一般也不会低于 0，但是当隧道开挖以后，环境温度与隧道壁面直接接触，将使得洞周围岩温度重分布，除了环境温度条件影响温度重分布状态以外，开挖时间也是一个重要因素，因此首先对隧道开挖时间和洞周围岩温度变化规律作相关探讨。

图 3 为环境温度为 -10 条件下，隧道开挖 10, 20 和 30 d 时洞周围岩温度场，从图可以看出，随着开挖时间的增加，围岩温度受环境温度影响的范围逐渐增大。



(a) 10 d



(b) 20 d

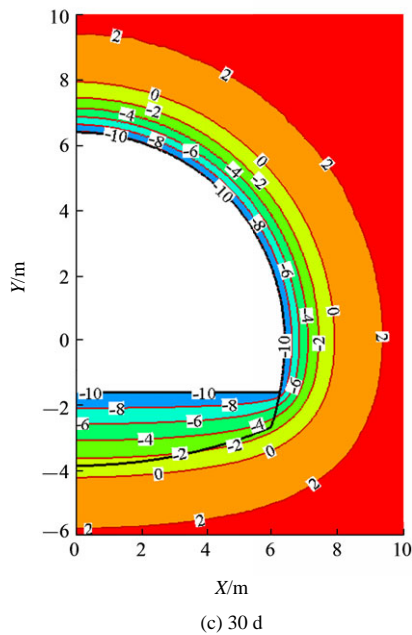


图3 开挖时间与围岩温度场的关系

Fig.3 Relationship between excavation time and temperature field of surrounding rock

图4为环境温度条件下，不同开挖时间围岩温度随埋深的变化曲线。开挖10 d后，围岩温度受影响范围为2.2 m，开挖20 d后，其影响深度达到了3.0 m，开挖30 d后，影响范围进一步加深，达到3.3 m，但其影响速率较前期已经明显减缓。

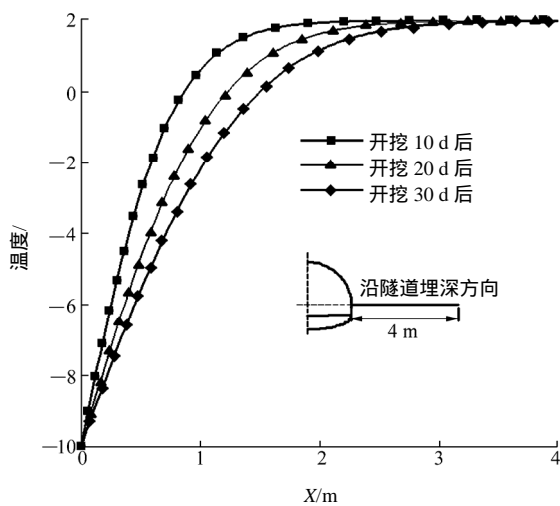


图4 不同开挖时间围岩温度随埋深的变化曲线

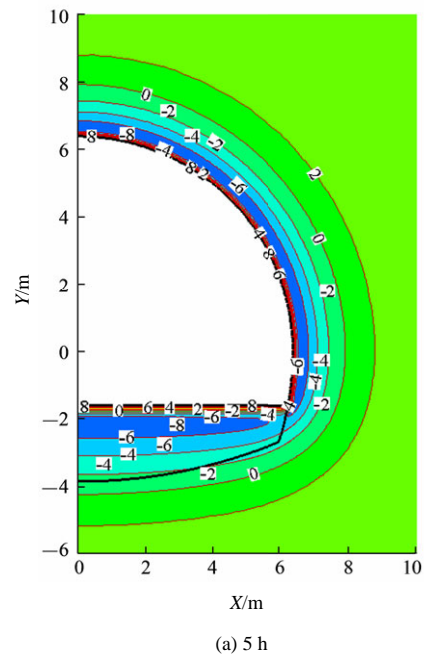
Fig.4 Change curves of surrounding rock temperature with depth under different excavation times

(2) 不同加热时间对围岩温度的影响规律研究

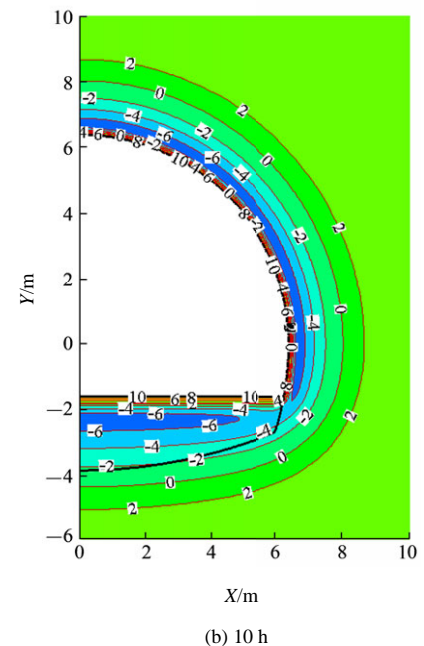
从以上分析可以得出：隧道在-10 温度条件下开挖暴露一个月后，围岩表面温度受到了很大影响，因此，在施作二次衬砌之前，必须对围岩进行加热，否则很可能使得混凝土出现低于5 的不利

工况。

图5为不同加热时间对围岩温度场的影响。从图中可以看到，围岩被加热一段时间后，围岩表面温度和深部围岩温度较高，中间形成了一层低温带。形成了两头热，中间冷的温度分布情况，其主要原因是：隧道表面被加热后，热量逐步向围岩深处转移，但是由于时间较短，之前被环境冷空气冷却的围岩，温度还没有恢复到开挖前的水平。为了对这一变化趋势进行一个更直观的表达，图6给出了不同加热时间特定位置围岩温度随埋深的变化曲线，该图更清晰地展现了随着加热时间的增长，浅部围岩温度逐渐被加温的过程。可以看到，加热20 h后，围岩被加温的厚度达到了0.5 m。



(a) 5 h



(b) 10 h

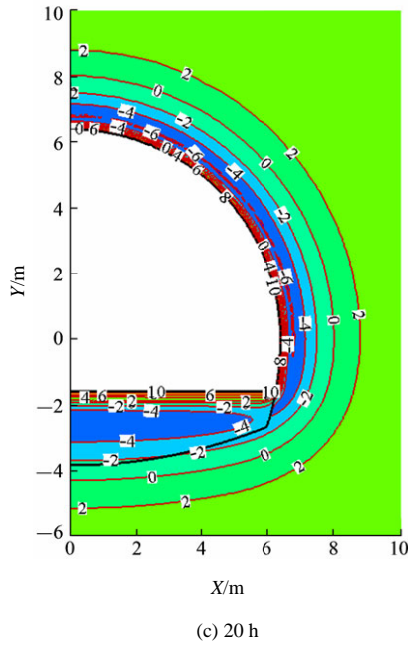


图 5 不同加温时间对围岩温度场的影响

Fig.5 Influence of different heating times on temperature field of surrounding rock

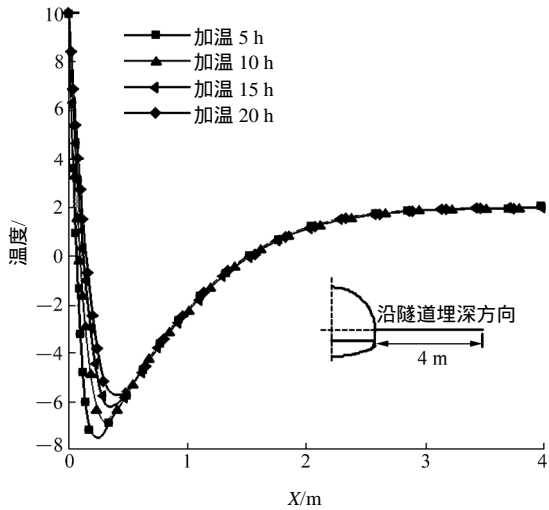
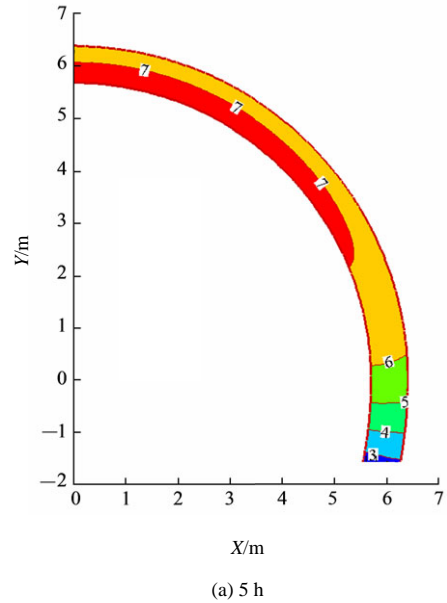


图 6 不同加温时间下围岩温度随埋深的变化曲线

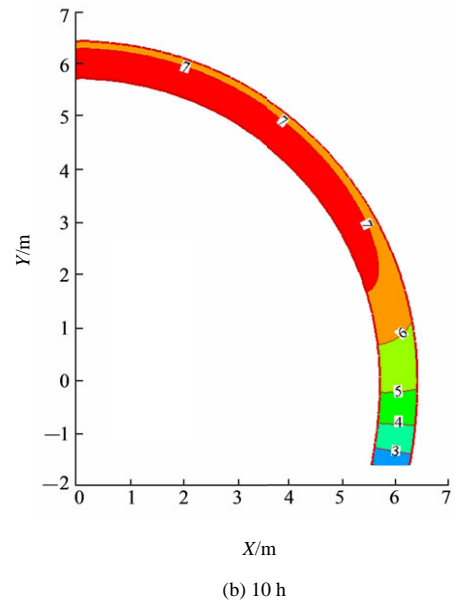
Fig.6 Change rule of temperature with different heated times along depth direction of surrounding rock

(3) 合理加温时间确定

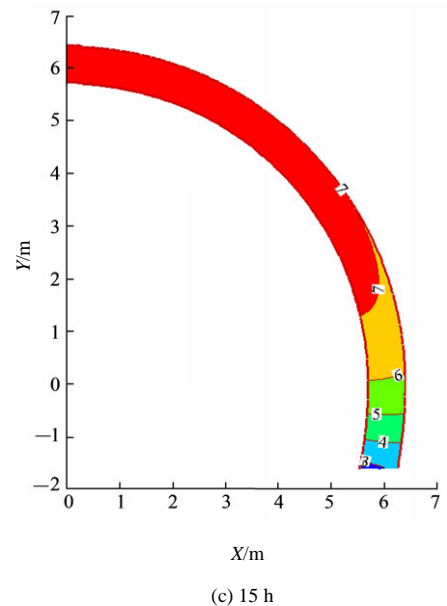
为了进一步研究加温时间对二衬模筑混凝土温度影响规律，从而确定合理的加温时间，保证二衬的高效、高质量浇筑，下面进行不同加温时间条件下二衬模筑混凝土和围岩温度变化规律分析。图 7，8 分别给出了不同加温时间后，浇筑混凝土，28 d 时混凝土和围岩温度分布情况。对比图 7，8 可以发现：浇筑混凝土之前，对围岩进行加温对后续施工的二衬混凝土温度和围岩温度有一定影响，具体表现为：加温时间越长，二衬混凝土和围岩在施工一月内所能达到的最高温度就越高。



(a) 5 h



(b) 10 h



(c) 15 h

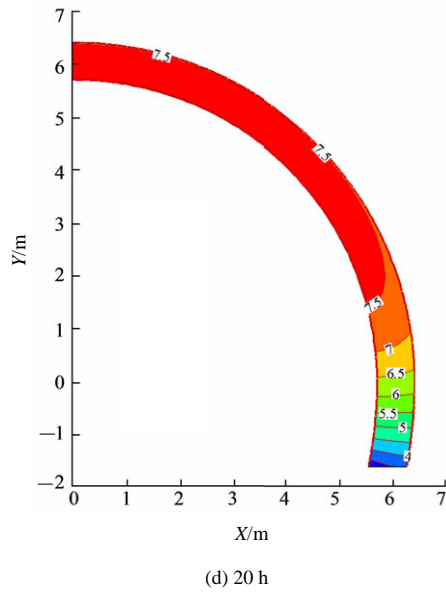


图7 加温不同时间后浇筑混凝土，28 d 时混凝土温度分布情况

Fig.7 Temperature distribution in concrete lining at 28 days in condition of different heated times before pouring concrete lining

为了进一步分析加温时间对二衬混凝土和围岩温度的影响，现取二衬和围岩接触位置点 A 在二衬混凝土施工后温度随时间变化曲线加以分析(见图 9)。从图 9 可以看到，除了反映图 7, 8 所显示的加温时间对围岩的温度影响以外，还可以看到该点在二衬混凝土刚施工后的短时间内出现了温度降低的现象。

由于图 9 反映的是施工一个月内的温度变化曲线，该现象在图 8 中反映的不是很清楚。鉴于此，图 10 给出了不同加温时间后施工 24 h 内点 A 温度变化曲

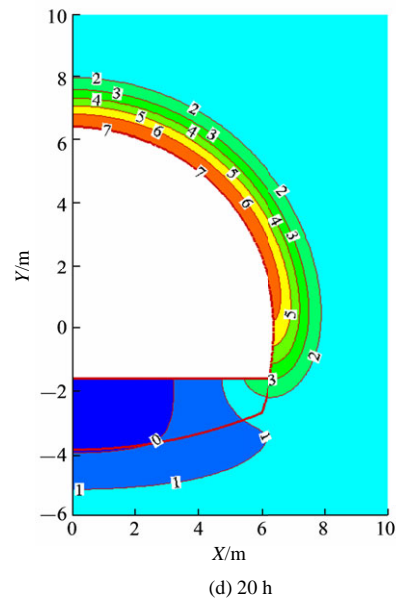
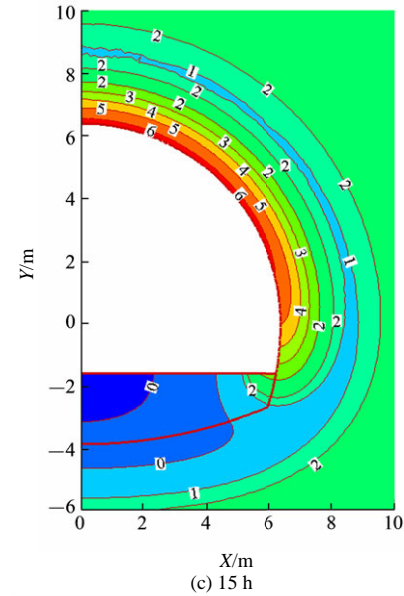
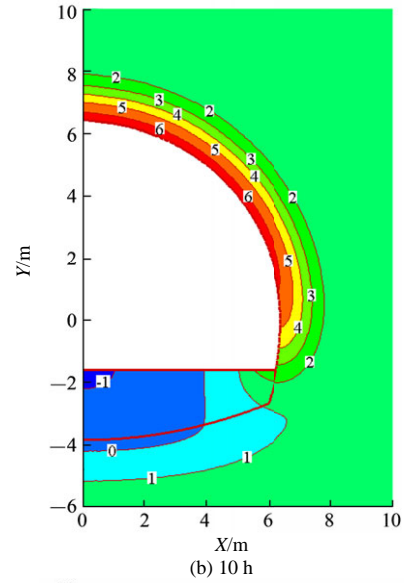
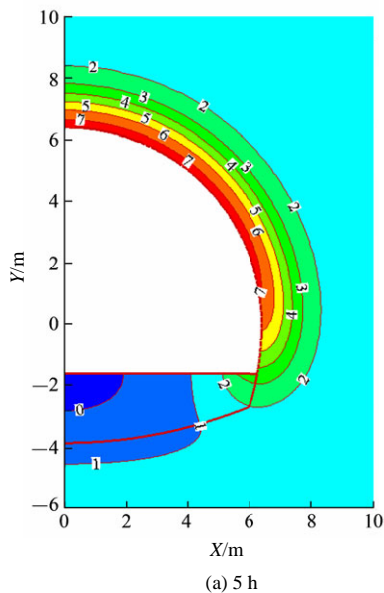


图8 不同加温时间后浇筑混凝土，28 d 时围岩温度分布情况
Fig.8 Temperature distribution in surrounding rock at 28 days in condition of different heated times before pouring concrete lining



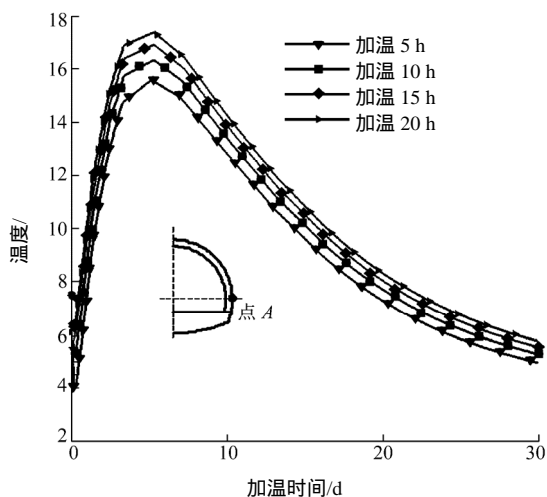


图 9 不同加温时间后施工一个月内的点 A 温度变化曲线
Fig.9 Temperature change law of at point A within a month in condition of different heated times

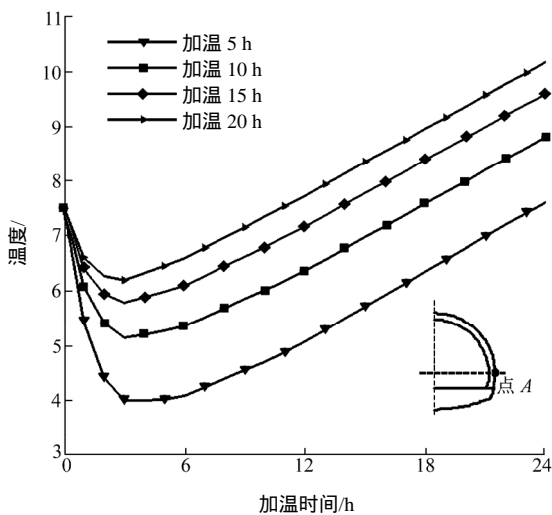


图 10 不同加温时间后施工 24 h 内点 A 温度变化曲线
Fig.10 Temperature change law of at point A in 24 hours in condition of different heated times

线。该图清晰地展现了点 A 位置温度先降低后升高的过程。

不同加温时间后，温度下降到的最低温度见表 1 所示。从表 1 可以看到：当隧道内环境温度为 -10 时，当浇筑混凝土前对隧道壁面加温 5 h 后，浇筑后混凝土 24 h 内的最低温度约为 4，低于 5 的混凝土养护温度，说明在该环境温度条件下，加温 5 h 不能满足浇筑二衬混凝土条件，当浇筑混凝土前对隧道壁面加温 10 h，浇筑后混凝土 24 h 内的最低温度约为 5.2，说明该环境温度条件下，对壁面加温 10 h 以上的时间就能满足混凝土浇筑的要求。

表 1 不同加温时间后二衬内 24 h 内最低温度

Table 1 Lowest temperature in concrete lining in 24 hours in condition of different heated times

加温时间/h	最低温度/
5	3.99
10	5.15
15	5.80
20	6.11

(4) 环境温度对加温时间影响规律

通过以上对加温时间与二衬模筑混凝土最低温度之间的关系研究发现：随着加温时间的增加，二衬混凝土 24 h 内的最低温度不断升高，在浇筑混凝土前，以 10 的温度对隧洞壁面加温 10 h，能满足模筑混凝土最低温度大于 5 的要求。但该结论的前提是在环境温度为 -10 的前提下，下面以此为基础，对隧道不同环境温度条件下，加温时间与二衬模筑混凝土最低温度之间的关系进行探讨。表 2 为不同环境温度和加温时间条件下二衬内最低温度。

表 2 不同环境温度和加温时间条件下二衬内最低温度

Table 2 Lowest temperature in concrete lining in different conditions of environment temperature and heated time

加温时间/h	最低温度/			
	- 5	- 10	- 15	- 20
5	5.16	3.99	2.64	1.10
10	6.05	5.15	4.21	3.10
15	6.53	5.80	5.10	4.19
20	6.84	6.11	5.70	4.94

注：- 5，- 10，- 15 和 - 20 表示环境温度。

从表 2 可以看到：到环境温度为 -5 时，加温 5 h 即能满足二衬混凝土养护要求，当环境温度为 -10 时，加温时间 10 h 能满足要求，当环境温度为 -15 时，加温 15 h 能满足要求，而当环境温度问 -20，加温 20 h 之内已经均不能满足要求。为了进一步对表 2 中的数据进行分析，将其绘制成图 11 的散点图，并将二衬混凝土 24 h 内的最低温度拟合成加温时间和环境温度的函数，拟合关系式如下：

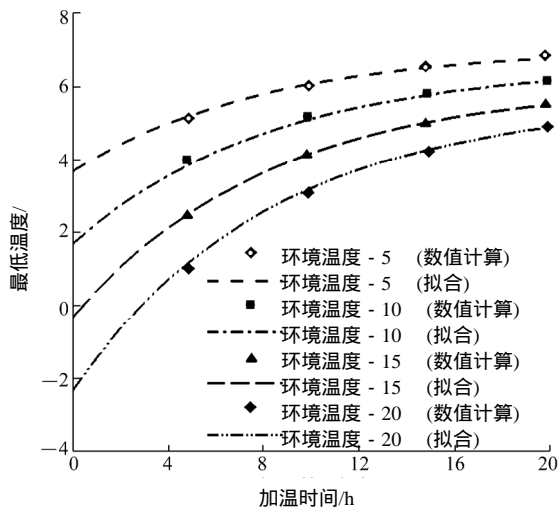


图 11 不同环境温度、不同加温时间施工 24 h 内二衬内最低温度随时间变化曲线

Fig.11 Lowest temperature in concrete lining in 24 hours in different conditions of environment temperature and heated time

$$Y = f(T_1, t_1) = 0.1T_1 + (0.3T_1 - 1.9)e^{-0.12t_1} + 7.6 \quad (6)$$

式中： Y 为二衬混凝土施工 24 h 内的最低温度， T_1 为洞内环境温度， t_1 为加温时间。

从图 11 可以看出：式(6)能够很好地反映表 2 所出现的规律。假设混凝土最低养护温度为 5，令 $Y = 5$ ，在环境温度已知的情况下，即可通过式(6)计算出最短的加温时间。

(5) 加热温度对加温时间影响规律

以上研究结论都是在加热温度为 10 条件下得到的，在实际工程中，壁面加热温度可能会根据现场条件有所调整，下面以此为基础，对不同加热温度条件下，加温时间与二衬模筑混凝土最低温度之间的关系进行探讨。表 3 为不同加热温度条件下施工 24 h 内二衬内最低温度。

表 3 不同加热温度条件下施工 24 h 内二衬内最低温度
Table 3 Lowest temperature in concrete lining in 24 hours in different conditions of heated temperature

加温时间/h	最低温度/			
	5	10	15	20
5	2.48	3.99	5.43	6.72
10	3.37	5.15	6.95	8.67
15	3.86	5.80	7.77	9.72
20	4.16	6.11	8.27	10.38

从表 3 可以看到：当加热温度为 5 时，加温

20 h 之内均不能满足二衬混凝土养护要求；当加热温度为 10 时；加温时间 10 h 能满足要求；当加热温度为 15 和 20 时，加温 5 h 均已能满足要求。

为了进一步分析表 3 所反映的内在规律，现对表 3 中的数据作归一化处理，即：在加温时间一定的情况下，以加热温度为 10 时二衬混凝土 24 h 内最低温度为标准，其他不同加热温度(5, 10 和 15)条件下得到的温度值除以该值，计算结果见表 4。

表 4 不同条件下二衬内最低温度归一化处理结果

Table 4 Normalization results of the lowest temperature in concrete lining in different conditions

时间/h	最低温度归一化值			
	5	10	15	20
5	0.62	1.00	1.36	1.68
10	0.65	1.00	1.35	1.68
15	0.67	1.00	1.34	1.68
20	0.67	1.00	1.33	1.67

将表 4 中的数据整理成随加温时间变化的散点图(见图 12)，其线性拟合表达式如下：

$$y = 0.072T_2 + 0.25 \quad (7)$$

式中： y 为不同加温时间二衬混凝土施工 24 h 内最低温度归一化值， T_2 为加热温度。

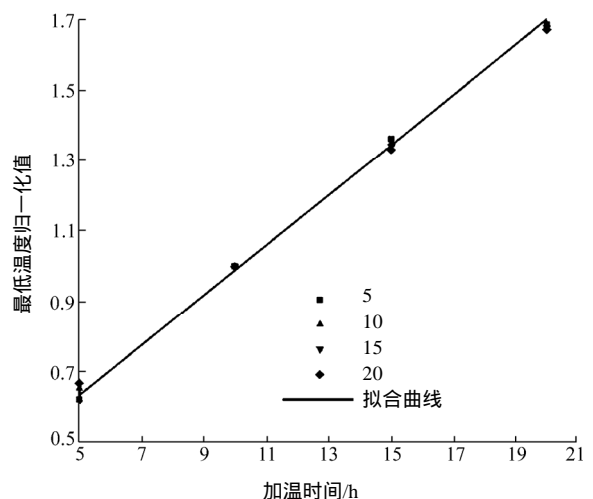


图 12 不同条件下施工 24 h 内特定点最低温度随加温时间变化归一化曲线

Fig.12 Normalization results of the lowest temperature in concrete lining in 24 h in different conditions of heated time

结合式(6)和(7)即可得到二衬混凝土施工 24 h 内最低温度随环境温度 T_1 、壁面加热温度 T_2 和加温时间 t_1 变化规律表达式：

$$Y = f(T_1, T_2, t_1) = [0.1T_1 + (0.3T_1 - 1.9)e^{-0.12t_1} + 7.6](0.072T_2 + 0.25) \quad (8)$$

为了确保式(8)所反映规律的正确性，下面运用有限元和理论公式 2 种方法，对环境温度为 -15℃，壁面不同加热温度和不同加热时间条件下的二衬混凝土施工 24 h 内最低温度进行预测，经验公式和数值分析结果如图 13 所示，从图上可以看到，式(8)很好地反映了数值分析结果，说明式(8)计算结果有效。

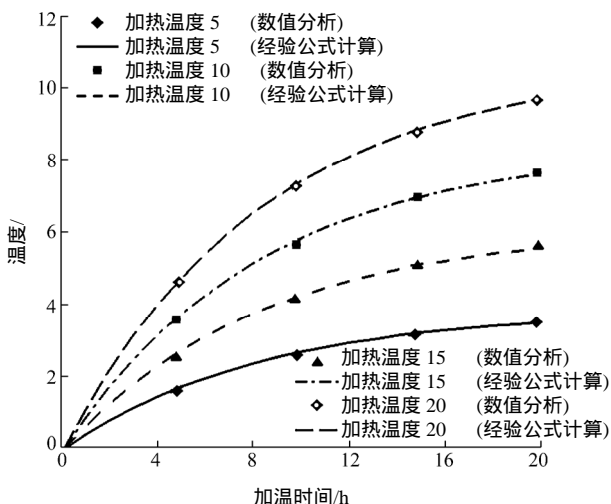


图 13 环境温度 -15℃ 时数值分析与经验公式计算结果对比

Fig.13 Numerical analysis and experience formula calculation results during environmental temperature of 15

3.5 嘎隆拉隧道最佳加温时间确定

根据混凝土养护标准及嘎隆拉隧道现场实际情况，得到如下已知条件：(1) 混凝土最低养护温度为 5℃；(2) 木炭加热温度为 10℃；(3) 二衬浇筑时的环境温度为 -10℃。

因此，令 $Y = 5$ ，则不同环境温度和壁面加热温度条件下的最终加热时间可表示为

$$t_1 = -8.33 \ln \frac{3.1 - 0.072T_1T_2 - 0.025T_1 - 0.55T_2}{(0.3T_1 - 1.9)(0.072T_2 + 0.25)} \quad (9)$$

将 $T_1 = -10$ 和 $T_2 = 10$ 代入式(9)中可得 $t_1 = 10$ h，加温 10 h 后施工二衬模筑混凝土的现场效果如图 14 所示。



图 14 二衬模筑混凝土施工现场效果

Fig.14 Construction site of pouring concrete lining

4 结 论

根据含低温相变岩体温度场控制方程，从研究开挖时间对围岩温度影响入手，在充分混凝土水化热影响条件下，分析了寒区隧道围岩与二衬混凝土热量迁移传递规律，系统研究了隧道内环境温度、浇注时洞内加热温度和加温时间对二衬模筑混凝土温度变化规律的影响，主要结论如下：

(1) 随着开挖时间的增加，围岩温度受环境温度影响的范围逐渐增大，因此，从减小环境对围岩温度扰动角度讲，越早封闭围岩越好。

(2) 二衬混凝土 24 h 内的最低温度随着加温时间、加热温度和环境温度的增加(升高)而升高，并且满足一定的关系式。

(3) 从同等条件下有限元和本文提出的理论公式计算结果来看，公式很好地反映了有限元计算结果。现场实施效果表明，应用该计算公式，实现了冬季低温环境条件下二衬模筑混凝土高效不间断施工、表面无裂纹且现场实测强度大于 C30 强度等级的目标。

参考文献(References)：

[1] 张勇进,李 源. 冬季混凝土受冻机理及施工温控技术[J]. 中外公路, 2007, 27(5): 123-126.(ZHANG Yongjin, LI Yuan. Frost mechanism of concrete and construction temperature control technology in winter[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2007, 27(5): 123-126. (in Chinese))

[2] 夏才初,张国柱,肖素光. 考虑衬砌和隔热层的寒区隧道温度场解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1767-1773.(XIA Caichu, ZHANG Guozhu, XIAO Suguang. Analytical solution to

- temperature fields of tunnel in cold region considering lining and insulation layer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1 767–1 773.(in Chinese))
- [3] 郭全生, 朱明峰. 冬季大体积混凝土施工的控温及养护[J]. 混凝土, 1997, (5): 46–47.(GUO Quansheng, ZHU Mingfeng. Temperature control and maintenance in the process of construction of mass concrete in winter[J]. Concrete, 1997, (5): 46–47.(in Chinese))
- [4] 唐林, 李正超. 满拉水利枢纽工程冬季混凝土施工措施[J]. 水利水电技术, 2000, 31(12): 32–33.(TANG Lin, LI Zhengchao. Concrete construction measures for Raman large-scale water projects in winter[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, 31(12): 32–33.(in Chinese))
- [5] 尚军. 湾湾川隧道混凝土工程冬季施工技术方案[J]. 山西建筑, 2010, 36(17): 338–339.(SHANG Jun. Winter constructional technology plan for the concrete project of Wanwanchuan tunnel[J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(17): 338–339.(in Chinese))
- [6] 金连才. 西藏地区冬季混凝土施工利用太阳能供热的探讨[J]. 水力发电, 2005, 31(9): 42–43.(JIN Liancai. Discussions on the solar heat supply in the concrete construction in winter in Tibet Region[J]. Water Power, 2005, 31(9): 42–43.(in Chinese))
- [7] 刘延熙, 周昭强. 羊湖电站冬季混凝土施工技术措施[J]. 水利水电技术, 1995, (1): 36–39.(LIU Yanxi, ZHOU Zhaoqiang. Construction measures for Yanghu power station in winter[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1995, (1): 36–39.(in Chinese))
- [8] 迟宗立, 任光月. 硫铝酸盐水泥在冬季泵送混凝土施工中的试验研究[J]. 混凝土, 1999, (1): 44–46.(CI Zongli, REN Guangyue. Experimental research of sulphoaluminate cement in winter pumping concrete construction[J]. Concrete, 1999, (1): 44–46.(in Chinese))
- [9] 吕宝玉, 单大力. 有关防冻泵送剂的若干思考[J]. 混凝土, 2002, (9): 14–16.(LU Baoyu, SHAN Dali. Some considerations on anti-freezing pumping aid[J]. Concrete, 2002, (9): 14–16.(in Chinese))
- [10] 李秋启, 公衍丽, 王广通. 几种常见防冻剂各组分掺量对混凝土冬期施工的影响[J]. 混凝土, 1997, (3): 49–51.(LI Qiuqi, GONG Yanli, WANG Guangtong. The influence of several common antifreezing admixture on the various components of the winter concrete construction[J]. Concrete, 1997, (3): 49–51.(in Chinese))
- [11] 韩亚飞. 浅谈沈阳市五爱隧道大体积混凝土冬季施工防裂抗渗技术措施[J]. 北方交通, 2008, (7): 144–146.(HAN Yafei. Large volume concrete winter construction anti-cracking anti-permeability technical measures of Shenyang Wuai tunnel[J]. North Traffic, 2008, (7): 144–146.(in Chinese))
- [12] TAN X J, CHEN W Z, TIAN H M, et al. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68(1): 74–84.
- [13] 谭贤君, 陈卫忠, 贾善坡, 等. 含相变低温岩体水热耦合模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1 455–1 461.(TAN Xianjun, CHEN Weizhong, JIA Shanbo, et al. A coupled hydro-thermal model for low temperature rock including phase change[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1 455–1 461.(in Chinese))
- [14] 谭贤君. 高海拔寒区隧道冻胀机制及其保温技术研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2010.(TAN Xianjun. Study on the mechanism of frost heave of tunnel in cold region with high altitude and related insulation technology[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010.(in Chinese))
- [15] 熊炜, 刘明贵. 多年冻土区桩基温度场模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1 658–1 664.(XIONG Wei, LIU Minggui. Temperature distribution along piles in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1 658–1 664.(in Chinese))
- [16] 张学富, 喻文兵, 刘志强. 寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的三维非线性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1 095–1 100.(ZHANG Xuefu, YU Wenbing, LIU Zhiqiang. Three-dimensional nonlinear analysis for coupled problem of seepage field and temperature field of cold regions tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1 095–1 100.(in Chinese))
- [17] 张正荣. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982: 15–17.(ZHANG Zhengrong. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1982: 15–17.(in Chinese))
- [18] 苟季. 大体积混凝土水化热对结构的影响研究[硕士学位论文][D]. 广西: 广西大学, 2008: 20–23.(GOU Ji. Study on the effect of mass concrete hydration heat on structure[M. S. Thesis][D]. Guangxi: Guangxi University, 2008: 20–23.(in Chinese))