

# 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性 研究进展与思考

陈卫忠<sup>1,2</sup>, 谭贤君<sup>2</sup>, 于洪丹<sup>2</sup>, 袁克阔<sup>2</sup>, 李术才<sup>1</sup>

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

2. 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)

**摘要:** 研究低温及冻融循环条件下岩体热、水、力特性对于寒区工程冻胀机理研究及防寒保温设计具有十分重要的指导意义。综述国内外低温及冻融循环条件下岩石的物理力学特性, 温度, 渗流特性以及水、热、力耦合特性4个方面的研究现状以及取得的研究成果, 并结合寒区隧道的特点, 提出以现场监测、大量室内冻融试验和单轴、三轴压缩试验为手段, 以研究低温相变条件下的导热系数等热、水、力学参数为基础, 以建立含相变低温岩体水热耦合模型和考虑空气温度和湿度影响的隧道风流场湍流模型为前提, 以获得通风条件下寒区隧道温度-渗流-应力-损伤耦合模型为目的, 用以研究寒区隧道围岩的冻胀破坏机制; 同时, 开发出兼具轻质、保温、抗冻、抗裂和抗震等功能的泡沫混凝土, 用于寒区工程保温层及抗震层使用的基本思路。

**关键词:** 岩石力学; 寒区隧道; 温度-渗流-应力-损伤耦合; 冰/水相变; 防寒保温

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2011)07-1318-19

## ADVANCE AND REVIEW ON THERMO-HYDRO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCK MASS UNDER CONDITION OF LOW TEMPERATURE AND FREEZE-THAW CYCLES

CHEN Weizhong<sup>1,2</sup>, TAN Xianjun<sup>2</sup>, YU Hongdan<sup>2</sup>, YUAN Kekuo<sup>2</sup>, LI Shucan<sup>1</sup>

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** It is of significance to research the thermo-hydro-mechanical characteristics of rock mass under the condition of low temperature and freeze-thaw cycles for engineering construction in cold regions. The four aspects: physico-mechanical properties of rock, temperatures, seepage characteristics and thermo-hydro-mechanical coupling characteristics under the condition of low temperature and freeze-thaw cycles were reviewed; and combining with the characteristics of tunnel in cold regions, a new idea to research the frost heave of surrounding rock and its insulation measure were put forward; firstly, based on field monitoring, a large number of freeze-thaw tests, uniaxial compression tests and triaxial compression tests, the thermo-hydro-mechanical parameters, such as coefficient of thermal conductivity should be obtained exactly; and then a proper coupled thermo-hydraulic model for low temperature rock including phase change should be established; after this, a damage factor is proposed to consider the freeze-thaw effect in rock and the thermo-hydro-mechano-damage

**收稿日期:** 2011-03-30; **修回日期:** 2011-05-16

**基金项目:** 国家自然科学基金重大国际合作项目(50720135906); 国家自然科学基金资助项目(41072238); 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划

**作者简介:** 陈卫忠(1968-), 男, 博士, 1990年毕业于山东矿业学院采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

coupled model considering the effect of volumetric strain on temperature and seepage field of surrounding rock and the effect of temperature gradient, seepage pressure and frost heave pressure on mechanical field for tunnel in cold region can be established to study the frost heave of surrounding rock; meanwhile, a high-performance foamed concrete is designed as an insulation material used in tunnel, which has the characteristics of lightweight, insulation, cold-proof, crack resistance and aseismic.

**Key words:** rock mechanics; tunnel in cold regions; thermo-hydro-mechano-damage coupling; ice/water phase change; insulation

## 1 引言

据统计,地球上多年冻土、季节冻土和瞬时冻土区的面积约占陆地面积的50%,主要分布在俄罗斯、加拿大、中国和美国的阿拉斯加及北欧等地,其中多年冻土面积占陆地面积的25%。我国永久性冻土和季节性冻土的分布区域占国土面积的70%以上,主要分布在西部和北部<sup>[1]</sup>。

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、严寒和冰川堆积体等条件下修建隧道及其他交通工程的数量在不断增加。东北高纬度地区修建了数十座寒区隧道,如嫩林线的西岭1#及2#隧道、西罗奇2#隧道、白卡门隧道,卡图们的土门隧道等,洞外的最低气温均在-50℃以下。近年来,随着西部大开发的深入进行,我国修建了大坂山公路隧道(海拔3 790 m,最低气温-30℃)、鹳鹑山隧道(海拔3 300 m,最低气温-31℃)等寒区隧道。青藏铁路开工后,2003年建成昆仑山隧道(海拔4 600 m,最低气温-36℃)、风火山隧道(海拔4 800 m,最低气温-37℃)。迄今为止,在我国东北和西北修建的将近40个隧道中,由于冻害的原因,有很多隧道将近半年以上的时间不能使用,有些完全报废。日本道路公团和日本铁道综合技术研究所最近的统计表明,日本全国3 800座铁路隧道中有1 100座因冻害原因,在冬季运营期间危及到行车安全。公路隧道中,仅北海道地区的302座大型公路隧道中发生严重冻害的就达104座,为消除侧墙壁冰和拱部冰柱,在较多隧道设置了电加热装置,投入的整治费用十分惊人。又如我国新疆天山2#隧道,由于隧道渗漏极为严重,漏水又在冬季结冰,无法保证正常通车,目前几乎报废;甘肃七道梁隧道,由于冬季排水沟冻结而使隧道排水不畅,造成衬砌背后产生冻胀现象,诱发衬砌混凝土开裂,隧道渗漏、路面结冰,影响行车安全。产生这些问题的根源在于对寒区岩土工程的特殊工程地质环境和灾害机制认识不够。

因此,研究低温及冻融循环条件下岩体热、水、力特性对于寒区工程建设、经济发展、资源的开发和利用具有重要意义,其发展历史和研究成果可以总结为以下几个方面:低温条件下岩土介质物理力学特性、冻岩冻融过程热力学特性、冻岩冻融过程渗流特性、冻岩水、热、力耦合特性。

## 2 低温条件下岩土介质物理力学特性研究

### 2.1 物理特性研究

#### (1) 冻岩质量变化规律

岩石在冻融过程中,质量会随着冻融次数的变化而变化,它是反映岩石抗冻性的一个非常直观的指标,也是研究岩石劣化机制的一个重要参考量。

朱立平等<sup>[2]</sup>将单轴挤压后出现表面裂隙的立方体花岗岩岩块分成干燥、水饱和与硫酸钠溶液饱和3组,以西藏那曲气象站的温度记录为依据对其进行循环冻融试验,通过在冻融前、后对岩样的质量测得到在试验前、后各岩样的质量变化很小的结论。何国梁等<sup>[3]</sup>将采自焦作的大理岩和砂岩分成干燥和饱和2组岩样,进行了循环冻融试验来模拟岩石的风化,通过不同冻融次数后量测岩样的质量分析了循环冻融对岩石质量损失影响。刘成禹等<sup>[4]</sup>在对花岗岩的低温冻融损伤特性进行研究时发现:试件经20次冻融循环后质量均有所下降,但下降的幅度不是很大。吴刚等<sup>[5]</sup>通过对大理岩进行了60次循环冻融(温度范围-20℃~50℃)后发现:干燥大理岩质量上升而饱水大理岩质量下降。所有的岩样均没有破碎,也没有碎块剥落,因此,他们认为导致岩样冻融后质量变化的主要因素应是含水量的变化,干燥大理岩吸收了空气中的水分而饱水,而大理岩则是有少量水分蒸发。张继周等<sup>[6]</sup>通过对3种岩石(粉砂质泥岩、辉绿岩和白云质灰岩)在2种水化环境下(蒸馏水饱和、饱和并经1%硝酸溶液浸泡侵蚀)分别进行循环冻融试验(每循环冻融各4 h,共8 h)研究发现:辉绿岩和白云质灰岩随冻融循环次

数的增加，质量缓慢减小，粉砂质泥岩在最初 15 次冻融循环过程中，质量有增大(约增加 0.27%)的现象，其原因主要是由于岩样在每次冻融循环过程中冰的冻胀和融化造成岩石内部微孔隙不断增大，从而使水分向内迁移的结果。

迄今为止，冻融循环后的岩石质量变化趋势并不能一概而论，它与岩石的组成成分、所处环境和水分补给条件有关，目前对冻融循环条件下岩石质量变化的研究还处在定性描述阶段。

(2) 未冻水含量

孔隙介质如岩石或土冻结后，并非其中所有的液态水都转变成固态的冰，而由于颗粒表面能的作用，始终会保留一定量值的液态水<sup>[1]</sup>。未冻水含量的任何变化，将导致岩石或土的力学性质出现非常明显、有时是很剧烈的改变，所以未冻水含量的研究一直是一个热点方向，特别是近年来各种先进科学设备的出现，为该问题的研究提供了更有力的手段和更科学的方法，总结下来，关于这方面的研究成果主要通过以下测试手段得到：

① 量热法

所谓量热法就是通过测定冻土中的温度分布和变化，来间接确定冻土中未冻水含量的大小，该方法首先由 J. H. Kolaian 和 P. F. Low<sup>[7]</sup>提出。后来 D. M. Anderson 和 A. R. Tice<sup>[8]</sup>依据该测量原理，得出了一个著名的未冻水含量经验公式，其表达式如下：

$$w = w^* + (\bar{w} - w^*)e^{a(T-T_0)} \tag{1}$$

式中： $w$  为未冻水含量， $w^*$  为残余未冻水含量， $T_0$  为相变温度， $\bar{w}$  为  $T_0$  温度时的最小含水量， $a$  为与介质性质相关的参数， $T$  为冻土的温度。

② 差示扫描法

Y. P. Handa 等<sup>[9]</sup>首先提出了该测量方法，后来 T. Kozlowski<sup>[10-11]</sup>利用差示扫描法先后对土的未冻水含量的计算公式和相变温度的影响因素进行了相关试验研究，并且通过对比分析，得出了用差示扫描法测量冻土的未冻水含量比其他试验手段得到的结果更准确、全面的结论。

③ 核磁共振法

核磁共振法是利用试样中的氢核受到射频场的干扰后，松弛时间不同产生的信号强度也不同的原理，来测定试样温度和含水量之间的关系。自从 A. R. Tice 等<sup>[12]</sup>将核磁共振应用到冻土的未冻水含量测试以来，该方法就一直经久不衰。T. Ishizaki 等<sup>[13]</sup>提出粉土的未冻水含量与温度的关系可由以下幂函

数表示：

$$\theta_u = 19.48T^{-0.318} \tag{2}$$

式中： $\theta_u$  为未冻水含量。

此后，徐敦祖等<sup>[1, 14-15]</sup>也通过试验回归，得到未冻水含量和负温绝对值之间存在指数关系。T. Sparrman 等<sup>[16]</sup>在原来的核磁共振法的基础上，通过一系列的改进，还得到了新一代的核磁共振法。

④ 时域反射法

时域反射法是一种利用电磁脉冲，根据电磁波在土体中的传播速度来间接测定未冻含水量的方法，它由 D. E. Patterson 和 M. W. Smith<sup>[17]</sup>率先开始用于未冻水含量的测量。E. J. A. Spaans 和 J. M. Baker<sup>[18]</sup>发明了一种基于该原理测量未冻水含量的装置；M. Christ 和 Y. C. Kim<sup>[19]</sup>利用时域反射法对 3 种类型的土进行了未冻水含量监测，发现土颗粒越粗，未冻水的含量越低。

⑤ 超声波法

M. R. Wyllie 等<sup>[20]</sup>首先发现超声波可以用来测定未冻水含量，并提出了相应的计算公式：

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi}{V_1} + \frac{1-\phi}{V_2} \tag{3}$$

式中： $V$  为冻土的波速； $V_1$ ， $V_2$  分别为水和固体介质的波速； $\phi$  为孔隙度。

后来，A. Timur<sup>[21]</sup>将式(3)的两相扩展成三相，得到计算公式如下：

$$\frac{1}{V} = \frac{\phi_w}{V_1} + \frac{\phi_i}{V_2} + \frac{\phi_s}{V_3} \tag{4}$$

式中： $\phi_w$ ， $\phi_i$ ， $\phi_s$  分别为水、冰和固体介质的波速； $V_w$ ， $V_i$ ， $V_s$  分别为水、冰和固体介质的体积含量。

Y. Nakano 等<sup>[22]</sup>通过比较冻土的横波和纵波特征发现，当水变成冰时纵波波速会迅速减少，横波波速随冰含量的增加而增加。D. Y. Wang 等<sup>[23]</sup>测量了 3 种土在冻结条件下的波速，从而得到了其各自的未冻水含量，并将测试结果与 A. Timur<sup>[21]</sup>的进行对比，显示了很好的一致性。

盛煜等<sup>[24]</sup>根据 T. Ishizaki 等<sup>[13]</sup>的成果，推算出含有轮胎碎屑的 Tomakomai 粉土的体积未冻水含量：

$$W_u = [\gamma_d / (1 + \beta) \rho_w] \theta_u \tag{5}$$

式中： $W_u$  为冻土体积未冻水含量， $\gamma_d$  为冻土干容重， $\rho_w$  为水的密度， $\beta$  为轮胎碎屑混合比， $\theta_u$  由式(2)给出。

盛煜等<sup>[24]</sup>通过进一步研究指出, 冻土的超声波速度与体积未冻水含量基本可用线性关系来描述:

$$V = AW_u + B \quad (6)$$

式中:  $A$ ,  $B$  均为回归系数。

上述测定方法中, 量热法(包括膨胀计测量法和绝热测热法)测定未冻水含量的精度较差, 尤其是绝热测热法的测量装置复杂且试验控制边界条件要求严格; 核磁共振法具有快速和精确等优点, 但仪器设备昂贵; 时域反射法具有简单、精度高和可直接用于现场(室内)的原状(原位土样)测定等优点, 但仍需和其他方法(如核磁共振法)联合起来应用; 另外, 超声波速度与未冻水含量之间存在很好的函数关系, 它提示了超声波速度用于冻土未冻水含量测试的可能性。

## 2.2 冻岩力学特性研究

冻岩的基本力学性质包括强度、变形特征和冻融损伤特征等, 这从冻岩力学形成初期就得到了关注, 后来在冻岩力学发展的几十年里, 冻岩的基本力学性质研究又得到了极大的补充和完善。

在研究的初期人们对其冻融破坏特征进行了大量的试验研究。N. Matsuoka<sup>[25]</sup>通过室内试验, 研究了三大岩类(28种沉积岩、8种火成岩和1种变质岩)半浸在水中的冻融破坏过程, 指出毛细吸力和孔隙冰的冻胀联合作用是引起岩石冻融破坏的内在机制。D. T. Nicholson 和 F. H. Nicholson<sup>[26]</sup>通过对 10 种含有原生裂隙的沉积岩进行冻融循环试验, 分析了原生裂隙对岩石冻融破坏的影响, 并将其归类成 4 种冻融破坏模式。M. Mutlutük 等<sup>[27]</sup>在对 10 种不同类型岩石进行反复冻融循环试验的基础上, 得出了随温度反复变化岩石完整性会受到一定的损失, 且冻融循环变化频率越高、波动越剧烈, 岩石的完整性损失就越大的结论。T. C. Chen 等<sup>[28]</sup>研究了日本 Sapporo 凝灰岩在不同含水量下的冻融破坏试验, 发现当这种岩石含水量低于 60% 时, 岩石冻融劣化很小, 而当含水量高于 70%, 岩石发生冻融破坏。

在总结冻融破坏特征的同时, 人们对不同温度条件下的岩石强度和变形特征进行了大量的研究:

(1) 在强度特性研究方面: Y. Inada 和 K. Yokota<sup>[29]</sup>通过单轴压缩和拉伸试验, 分别研究了花岗岩和安山岩在干燥和饱和时,  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的抗压强度与抗拉强度以及经历 1 和 3 次冻融循环后室温下抗压强度与抗拉强度, 指出花岗岩和安山岩无论是饱和状态还是干燥状态, 抗拉和抗压强度均

随温度降低而增大。徐光苗等<sup>[30]</sup>以江西红砂岩和湖北页岩为代表, 分别进行了不同冻结温度( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和不同含水状态(饱和与干燥)下的岩石单轴压缩试验与三轴压缩试验, 探讨了温度和强度的关系。杨更社等<sup>[31]</sup>以陕西彬长矿区胡家河煤矿冻结立井为背景, 以现场采集的煤岩和砂岩为代表, 进行了常温( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和不同冻结温度( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、不同围压条件下的三轴压缩试验, 分别探讨了围压和冻结温度对冻结岩石三轴强度特性的影响规律。

(2) 在变形特性研究方面: T. Yamabe 和 K. M. Neaupane<sup>[32]</sup>选取日本 Sirahama 砂岩, 分别进行了岩石在一次冻融循环( $20\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow -20\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )内热膨胀应变测试, 不同温度( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下单轴压缩试验及  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  下不同围压(0, 1, 3 MPa)三轴压缩试验, 发现在一次冻融循环下, 干燥岩样的轴向变形为弹性变形, 而饱和岩样则发生了塑性变形。程磊<sup>[33]</sup>和李慧军<sup>[34]</sup>分别选取 2 种典型岩石——煤岩和砂岩, 进行了系统的单轴、三轴压缩试验, 分析了煤岩和砂岩在不同冻结温度、不同受力状态条件下的力学特性和变形特性, 并对他们的同一性和差异性进行了比较分析。

在对低温及冻融循环后的岩石强度和变形特征进行分析的过程中, 人们通过对其损伤劣化规律进行了分析, 发展了不同损伤模型。

赖远明等<sup>[35-37]</sup>借助 CT 扫描设备, 研究了岩石的冻融损伤规律, 分析了冻融循环次数与 CT 数、岩石强度的关系。K. Watanabe<sup>[38]</sup>研究了含水量与未冻水含量对岩石冻融损伤强度的影响规律。李宁等<sup>[39]</sup>通过在砂岩中预制裂隙来模拟裂隙岩体, 研究了其在干燥、饱水及饱水冻结情况下的低周疲劳损伤特性, 发现冻结对裂隙的低周疲劳特性影响较小, 而裂隙对砂岩的疲劳损伤特性有很大影响。徐光苗<sup>[40]</sup>将岩石的总损伤考虑为冻融损伤和受荷损伤的耦合, 建立了冻融环境中的岩石总损伤演化方程和总损伤演化率方程, 并给出了 2 种岩石不同冻融次数下总损伤率随应变的演化曲线。张慧梅和杨更社<sup>[41]</sup>针对寒区工程结构的冻融受荷岩石, 通过研究指出冻融与荷载的共同作用使岩石总损伤加剧, 并表现出明显的非线性特征。

关于低温及冻融条件下岩石力学特性的研究主要集中在试验层面上, 涉及低温及冻融条件下岩土介质的本构模型的研究有待进一步深化。

### 3 冻岩冻融过程热力学特性研究

岩土介质在冻融过程中的温度变化机制很复杂。到目前为止,冻土温度场的研究已经有170多年的历史了,但直到20世纪前期,基本上都处于前期探索阶段,只得到了一些大为简化的经验公式和计算一些经过近似处理的均质一维、二维线性稳定问题及一维非稳定线性问题,20世纪70年代以来,随着计算技术的发展,数值计算方法在冻土温度场研究中得到了广泛应用,使以前由于几何形状复杂、地质条件特殊而难以解决的有关冻土温度场的一些难题都得到了不同程度的解决,尤其是非稳定相变温度场理论的问世以及在数值分析中的成功实现,使得寒区温度场的研究更趋完善和符合实际。

#### 3.1 试验研究

M. Y. Zhang等<sup>[42]</sup>通过室内试验,研究了不同温度条件下西藏铁路路基的热对流情况,确定了路基基石的最佳粒径。赖远明等<sup>[43]</sup>对大坂山隧道进行了长期现场观测,并根据观测到的隧道围岩温度,确定了围岩最大冻结深度。谢红强等<sup>[44]</sup>根据鹧鸪山隧道区水文、地质条件,进行了隧道主体结构及围岩温度的现场测试研究,得出了隧道区环境温度、隧道结构体和围岩的温度场变化规律。陈建勋和罗彦斌<sup>[45]</sup>以某寒冷地区公路隧道为依托,对隧道温度进行1.5 a的长期测试,结果表明,隧道洞内的年气温变化具有周期性,随时间大致呈正弦曲线变化;隧道内纵向气温随着进入隧道距离的增大,年平均温度逐渐下降,年温度振幅也下降,其变化规律呈指数函数曲线变化关系。W. Ma等<sup>[46]</sup>对西藏铁路路基温度进行了多个断面的测试,测试结果表明,路基的冻结温度随着时间的增长在不断增加。张德华等<sup>[47]</sup>结合青藏铁路二期工程格尔木—拉萨段风火山隧道的修建,对多年冻土隧道开挖直到贯通引起的围岩热学响应规律进行了现场试验研究。

#### 3.2 冻岩热力学参数确定

在温度场的控制方程中,涉及到一些重要的热力学参数,例如:导热系数、体积热容等,这些参数取值的合理与否直接关系到温度场求解的正确性。因此,很多学者也通过不同途径对这些参数进行了分析和研究。C. Park等<sup>[48]</sup>通过试验研究了韩国典型花岗岩和砂岩的热物理参数与温度的关系,发现当温度从40℃→-160℃变化时,岩石的导热系数随温度降低而增大,但变化不大,而比热容和热膨胀系数随温度降低而降低,且降幅较大。吕康成

等<sup>[49-50]</sup>根据实测隧道围岩温度,采用一维热传导模型、古典显式差分格式和最小二乘法,对一寒区隧道围岩(强风化花岗岩)的导温系数进行了反分析;H. F. Zhang等<sup>[51]</sup>提出了一种计算土的导热系数的新方法——随机混合介质模型;D. J. Nicolsky等<sup>[52]</sup>根据现场实测温度场,对土的热力学参数进行了反演分析。

#### 3.3 温度场控制方程

温度场控制方程是得到温度场的解析解和数值解的核心与关键,因此,该领域的研究一直以来方兴未艾。这些年来,关于温度场控制方程的主要成果有:D. Mottaghy和V. Rath<sup>[53]</sup>研究了相变潜热对温度的影响;L. Bronfenbrener<sup>[54]</sup>利用经典的Stefan问题求解方法,得出了土在冻结过程中温度场的解析解。我国研究起步较晚,但成果显著。20世纪50年代,余力教授开始对人工凿井温度场的研究;赖远明等<sup>[55]</sup>运用量纲一的数量和摄动技术求出了寒区圆形截面隧道温度场的解析解;何春雄等<sup>[56]</sup>分析了隧道内空气分别为层流和紊流情况时,隧道内气温及围岩冻结、融化状况,并根据壁面温度随气温周期性变化的情况;张学富等<sup>[57]</sup>对一已建成寒区隧道进行了算例分析,结果表明沿隧道轴向的初始温度不是均匀的,并且沿轴向也有热量传递,隧道围岩冻结深度沿轴向分布与隧道内大气平均温度沿轴向分布的规律不同,因而,他指出对寒区隧道进行三维温度场分析是必要的;徐敦祖等<sup>[58-59]</sup>也从不同侧面论述了有关寒区岩土介质温度场的问题,在温度场研究方面作出了重大贡献。

需要指出的是,以上绝大部分研究成果,都是基于将冻融过程中的岩土介质假设为2个部分——冻结区(frozen zone)和未冻区(unfrozen zone)的前提下得到的,然而,近些年来,已有不少学者通过试验研究<sup>[60-61]</sup>和理论分析<sup>[62-64]</sup>,发现二区域(已冻区和未冻区)模型没能准确反映岩土介质冻融过程中的温度状态,他们认为在已冻区和未冻区之间存在一个相变集中区——正冻区(freezing zone)或冻结缘(frozen fringe),该区域的大小主要取决于岩土介质的性质和温度条件,即所谓的“三区域”模型。由于寒区岩土工程的复杂性和多变性,再加上具体条件的差异性,传统的温度场的解析解不能给出复杂边界条件下的温度场分布,可以采用数值仿真方法获得比较准确的温度场分布。因此,根据试验结果,建立合理的温度场数学模型及其参数取值方法显得至关重要。

## 4 冻岩冻融过程渗流特性研究

由于冻土(岩)介质的特殊性和土中水分在其中运动的重要性, 冻土(岩)中水分运动的研究受到世界上许多国家的重视。第七届国际多年冻土会议就对这方面的研究进展设置了专题, 美国公路研究部门及其他国家的类似组织也多次组织了有关专题会议, 近 100 多年来, 各相关学科的研究工作者从不同角度和研究目的出发, 对冻融过程中土中水的迁移问题进行了多角度的研究, 在试验研究、参数取值方法及水分迁移数学模型等方面取得了一系列的重要成果。

### 4.1 试验研究

20 世纪 80 年代, 美国陆地寒区研究与工程试验室(US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 简称 CRREL), 进行了一系列室内试验, 以探索冻土中水分迁移的机制。Y. Nakano<sup>[65]</sup>对等温条件下的水分迁移进行了系列室内试验研究, 指出冻融土中水分迁移的推动力主要包括土含水量梯度(土水势梯度)和温度梯度, 二者既可以相互独立, 也可以相互依赖。

国内从 20 世纪 60 年代开始, 先后有东北水利科学研究院、长春水利科学研究所、哈尔滨工业大学土木工程系、北京建筑科学研究院以及中国科学院兰州冰川冻土研究所开展了冻土中的水相成分测试。进入 70 年代后, 铁路、交通、水利和林业部门的有关单位逐步开展了现场观测。徐敦祖等<sup>[66-67]</sup>对土冻结特性、冻结条件下的水分迁移、成冰作用、冻胀、盐分迁移及盐胀等问题进行了大量的室内试验研究。结果表明: 冻土中的水分迁移与冻结缘中的土水势梯度有关, 而该梯度主要取决于土体的性质、边界条件、冻结速度和冻胀速率等因素。

### 4.2 冻岩渗透系数取值方法

当应用数学物理方法对冻融条件下岩土介质的渗透特性进行定量分析时, 无论是解析法还是数值法, 都离不开相应的物理参数确定问题。冻土(岩)的物理参数是随未冻水含量和温度变化的, 当温度低于 0 °C 后, 孔隙中的部分水凝结成冰, 这将直接导致介质的渗透系数降低, 从而影响整个水分场的分布, 因此, 在研究冻融条件下岩土介质的渗流场规律时, 就不可避免的遇到了渗透系数的确定问题。关于这方面的研究成果, 归纳起来, 目前有以下 4 种思路:

#### (1) 引入冰的阻抗系数的概念

G. S. Taylor 和 J. N. Luthin<sup>[68]</sup>在研究冻土的渗透特性时发现: 土冻结后, 冰占据了原来水的位置, 对水的流动产生了阻碍作用。为了反映这种作用的影响, 他引用了“阻抗系数”这个概念, 这样, 冻结区的渗透系数的表达式就变为

$$k_f = 10^{-\Omega} k_u \quad (7)$$

式中:  $k_f$ ,  $k_u$  分别为冻结区和未冻区的渗透系数;  $\Omega$  为阻抗系数。

后来 Y. W. Jame 等<sup>[69-70]</sup>都延续了这个概念, 但是尚松浩等<sup>[71]</sup>通过对比不引入和引入冰的阻抗系数的计算结果, 发现计算结果对于冰的阻抗系数不敏感, 他进而指出: 在低含水量条件下, 不需要人为引入阻抗系数。这样不仅可以使计算简化, 且避免了人为假定的引入, 使模拟更趋于真实可信。

#### (2) 引入非饱和介质中的相对渗透系数的概念

R. W. R. Koopmans 和 R. D. Miller<sup>[72]</sup>提出低温饱和状态下的冰/水两相共存与非饱和状态下的气/水两相共存具有相同的机制, J. M. McKenzie 等<sup>[73]</sup>依据此观点, 提出了冰存在时孔隙的相对渗透系数的计算公式:

$$k_r = \begin{cases} \left( \frac{10^{-6} - 1}{B_T} \right) T + 1 & (T \geq T_0) \\ 10^{-6} & (T < T_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $k_r$  为相对渗透系数;  $T$  为介质温度;  $T_0$  为相变温度;  $B_T$  为与温度和饱和度相关参数。

#### (3) 构造 Heaviside 函数

徐光苗<sup>[40]</sup>认为, 当温度为 0 °C ~ -1 °C 时, 实测未冻水体积含量  $\chi$  值随温度的降低急剧降低, 而当温度低于 -1 °C, 则  $\chi$  值趋于稳定值。因此, 可以构造一个 Heaviside 阶跃函数, 使得  $\chi$  值随温度的变化关系用连续型函数  $H(T)$  来表示。Heaviside 函数为

$$H(T - T_{ref}, \Delta T) = \begin{cases} 0 & (T - T_{ref} \leq -\Delta T) \\ 1 & (T - T_{ref} > \Delta T) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $T_{ref}$  为参考温度, 在即为水的相变点温度, 通常取 0 °C (或 273.15 K);  $\Delta T$  为步宽。

他进一步指出: 岩(土)体在温度低于  $(T_{ref} - \Delta T)$  的冻结区和未冻区的渗透系数均为常数, 则整个温度区间内的渗透系数, 可以用 Heaviside 二阶阶跃函数表示为

$$k = k_f + (k_u - k_f)H(T - T_{ref}, \Delta T) \quad (10)$$

式中： $k$ ， $k_f$ 和 $k_u$ 分别为整个区域、完全冻结区和未冻区的渗透系数。

#### (4) 构造与温度相关的函数

Y. Zhu 和 D. L. Carbee<sup>[74]</sup>提出了温度与渗透系数具有如下形式的关系：

$$k = \alpha e^{\beta T} \quad (11)$$

式中： $\alpha$ ， $\beta$ 均为材料参数。

N. Li 等<sup>[75]</sup>利用该取值方法准确地验证了自己提出的数学模型。

### 4.3 数学模型研究

对于冻土的渗流问题，普遍的方法是将非饱和土的达西定律与水流连续方程相结合来得到土中水分非稳定运动的基本方程(Richards 方程)：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla q_1 = \nabla [K(\psi_m) \nabla \psi] \quad (12)$$

式中： $\theta$ ， $t$ 分别为含水量和时间； $q_1$ 为水分迁移通量； $\psi$ 为土水势； $\psi_m$ 为基质势。

盛煜等<sup>[76]</sup>通过引入迁移势(广义分凝势)的概念，提出了正冻土中水分场计算的一维数学模型，确定冻结前缘区的水分迁移，从而可通过达西定律、迁移势确定整个正冻土的水分场。王铁行和胡长顺<sup>[77]</sup>给出了冻土路基水分迁移问题的二维数值模型，提出水头应由重力水头，吸力水头，温度水头和相变界面水头4个部分组成，定义了温度水头和相变界面水头，并给出了相应的确定方法。

在冻土(岩)渗流特性3个方面的研究内容中，核心的问题即为水分的迁移动力，自19世纪末以来，关于冻土中水分驱动力，曾提出过14种假说<sup>[1]</sup>。其中包括：结晶力理论、薄膜水迁移理论、水土势能理论和分凝势理论等。水分迁移取决于力学、物理和物理化学因素，合理渗流场模型应能反映低温岩土介质水分迁移规律。

## 5 冻岩水、热、力耦合特性研究

### 5.1 温度 - 渗流耦合特性研究

在寒区岩土工程中，温度场分布和水分迁移规律对其物理力学性质及工程安全具有重要的影响，因此，研究岩体在不同施工环境及气候条件下温度场与渗流场的耦合具有重要的指导意义。冻融条件下的土壤水热迁移是一个多因素综合作用的复杂物理过程，对该问题的研究50a来已取得重要的进展，下面分2个方面来分别叙述。

#### (1) 温度 - 渗流耦合模型研究

J. R. Philip 和 D. A. De Vries<sup>[78]</sup>开创了土壤温度 - 渗流耦合研究的先河，基于多孔介质中液态黏性流动及热平衡原理，提出了水热迁移耦合模型。此后，许多科技工作者对这一问题进行了深入的研究，提出了各种各样的数学模型，这些模型大致可以分为2类：第一类是与岩土介质冻结和融化过程发生相变有关的热传导问题，该类问题仅研究岩土介质在冻结和融化过程中与相变有关的热传导，即斯蒂芬(Stefan)问题。这方面的主要成果包括：L. Bronfenbrener 等<sup>[79-81]</sup>。第二类为当系统发生热输运和相变时，同时伴随出现水分迁移，即所谓温度 - 渗流输运问题。这类问题主要强调由于热输运引起的与岩土介质冻结和融化过程有关的水分迁移，以及由此导致的成冰特征和冻胀现象。针对第二类问题，又存在着2个分支：

① 第一个分支是在 Philip-Veries 模型基础上建立的所谓机制模型。目前这类模型应用的较多。M. Fukuda 等<sup>[82-83]</sup>等先后采用了机制模型模拟了冻土系统中的水热迁移，在模型中考虑了地气间的显热交换，但没有考虑潜热交换和地表蒸发。国内方面，赖远明等<sup>[84-85]</sup>先后根据经典传热学和渗流理论，给出了考虑相变过程的寒区隧道围岩温度场 - 渗流场耦合控制方程，并运用 Galerkin 方法，对这一问题进行了有限元数值模拟。毛雪松等<sup>[86]</sup>从水分场与温度场相互作用的角度，分别建立温度场单场控制方程和温度 - 渗流耦合效应的控制方程，应用有限元方法进行计算，并通过对比单因素温度场的计算结果与温度 - 渗流耦合作用下的温度场计算结果比较，分析了水分迁移作用对路基温度场的影响。汪仁和和李栋伟<sup>[87]</sup>基于相似理论原理和人工多圈管冻结模型试验，提出渗流方程中的导水系数是温度梯度的函数，建立了多圈管正冻土中温度 - 渗流耦合数学模型，并采用有限元方法实现了对多圈管冻结温度场和水分场耦合的数值分析。

② 第二个分支是应用不可逆过程热力学原理描述岩土介质温度 - 渗流通量，称为热力学模型<sup>[88-89]</sup>。这一模型与机制模型在未冻区一致，其区别在于冻结区。模型中考虑了在温度梯度及水(包括固、液、气三相)势梯度作用下的水、气、热迁移。假定岩土介质中冰与水处于动平衡，其化学势相等，且冰压力为0，忽略重力影响，利用 Clapeyron 方程，得到冻结区未冻水的压力，因此在冻结区的未知量只有温度  $T$ ，水、气、热通量均为温度及温度梯度的函数。将这些通量关系与质量、能量守恒原理结合即

可得到岩土介质中温度 - 渗流耦合迁移的热力学模型。S. K. J. Kung 和 T. S. Steenhuis<sup>[90]</sup>利用该原理模拟了土柱一端突然降到负温的土壤冻结过程, 其结果与试验规律相一致。计算结果表明, 水气迁移量比液态水迁移量小 2 个数量级, 而对流传热量也比传导热量小 2 个数量级。因此, 忽略土壤冻结过程的水气迁移、对流传热对计算结果的影响较小。郭力等<sup>[91]</sup>应用连续介质混合物理论研究了饱和正冻土的水热迁移问题, 提出了一个新的热力学模型。

## (2) 温度 - 渗流耦合试验研究

J. M. Konrad 和 N. R. Morgenstern<sup>[92]</sup>进行了不同温度梯度下冻土的水分迁移试验。根据试验结果得出了水分迁移通量与温度梯度成正比的结论。翁家杰等<sup>[93]</sup>就冻结过程发生的黏性土水分向冻结锋面迁移和集聚现象, 论述了正冻土水分迁移现象及其原因。杨更社等<sup>[94-95]</sup>研究了寒区冻融环境条件下软岩的水热迁移规律, 对 2 种不同类型的软岩材料进行了开放系统下具有温度梯度的水热迁移试验研究。汪仁和和李栋伟<sup>[96]</sup>根据相似理论推导出人工冻结温度场和水分场模型试验相似准则。以淮南一煤矿矿井井筒工程条件为背景, 进行了人工多圈管冻结模型试验, 获得冻结壁形成过程中, 温度场和水分场的变化规律, 证实了温度梯度是引起人工正冻土中水分迁移的主要原因。

总结这些研究成果, 可以发现针对冻融条件下温度 - 渗流耦合问题的研究主要集中在温度 - 渗流耦合机制和数学模型的建立上。目前, 对冻融条件下的温度 - 渗流耦合机制的认识方面已基本达成共识, 但在耦合模型的建立上, 由于研究对象的差异等原因, 至今仍是讨论的热点。合理的耦合模型应该考虑热传导、相变潜热和水分迁移对温度场和渗流场的影响。

## 5.2 水力、热力及水热力耦合特性研究

水力、热力及水热力耦合研究均主要是以求得岩土体的本构模型为目的, 基于对温度效应和冻融循环引起岩石损伤的认识, 人们发展了不同的本构模型。

何平等<sup>[97]</sup>根据连续介质力学和热力学原理, 建立了冻土黏弹塑损伤耦合本构理论。在理论分析及试验验证的基础上, 提出损伤演变规律及损伤门槛值的具体形式。同时分析了围压对冻土的强化及弱化机制, 建立了与球应力相关的未冻水含量状态方程以及黏塑性耗散势函数。赖远明等<sup>[98]</sup>从高温冻土内部裂隙、空洞等缺陷的随机分布出发, 基于连

续损伤理论和概率与数理统计理论, 建立了高温冻土的单轴随机损伤本构模型。宁建国和朱志武<sup>[99]</sup>从复合材料的细观力学机制出发, 建立了含损伤的冻土弹性本构模型, 并通过与不同冰体含量和不同温度下的冻结砂土的应力 - 应变关系试验曲线的对比发现, 由该损伤本构模型计算的结果与实测曲线比较吻合。S. Shoop 等<sup>[100]</sup>认真分析了土的融化弱化行为, 通过修正 D-P 准则, 建立了含冻融损伤的应力 - 应变关系。S. Y. Li 等<sup>[101]</sup>建立了高含水率冻土在冻融条件下基于统计损伤理论的本构模型, 对其中涉及到的统计参数等进行了认真的分析和探讨。

研究低温及冻融循环条件下岩土体的本构模型其中一个最主要的任务即求得冻胀量, 基于对岩土介质的冻融破坏过程及其破坏机制的认识, 人们发展了不同的冻胀模型, 主要分为以下几类:

### (1) 毛细理论模型

毛细理论模型发展于 20 世纪 50 年代<sup>[102]</sup>。根据毛细理论, 冻结过程中水的迁移是由于冰/水界面处产生的毛细吸力造成的, 骨架颗粒的大小是影响介质冻胀率大小的最重要的因素, 水和冰的吸力关系式如下:

$$u_i - u_w = \frac{2\sigma_{iw}}{r_{iw}} \quad (13)$$

式中:  $u_i$  为冰的压力,  $u_w$  为孔隙水的压力,  $u_i - u_w$  为吸力,  $\sigma_{iw}$  为冰/水界面上的表面张力(约为 0.033 1 N/m),  $r_{iw}$  为冰/水界面的弯曲半径。

毛细理论模型比较简单, 但是它不能解释“不连续冰透镜的形成”现象, 并且实验室得出来的冻胀力往往比该理论计算出来的要大得多, 所以该理论的正确性一直饱受争议<sup>[103]</sup>。

### (2) 刚冰模型

认识到了毛细理论的不足之处, R. D. Miller<sup>[104]</sup>根据次冻结理论认为, 在冰透镜体底面与冻结锋面之间, 存在着一个低含水量、低导湿率和无冻胀的带, 称为冻结缘, 据此提出了著名的刚冰模型。根据该理论, 在有效应力足够承担上覆荷载的冻结缘区域内, 新的冰透镜体将由此产生。冻结缘理论克服了毛细理论的不足, 得到了广大学者的认可, 后被称为第二冻胀理论。

### (3) 水动力模型

R. L. Harlan<sup>[105]</sup>在非饱和土和非完全冻结土水分迁移理论的基础上, 提出正冻土中热质与水分迁移相互作用的耦合模型。随后不少学者在这种思路指引下, 发展了多种计算冻胀量的方法<sup>[68, 106]</sup>。G. L.

Guymon 等<sup>[107]</sup>提出的模型被认为是最先进的,可求解非塑性土季节性冻融过程问题,并经过了长期的应用与考验。但这些模型也有一大缺点,就是无法描述冰透镜体产生的离散性。

#### (4) 分凝势模型

分凝势模型是由 J. M. Konrad 和 N. R. Morgenstern<sup>[92]</sup>提出来的,他们认为冻结过程中分凝势、温度和水分的迁移速度具有如下关系:

$$V_0 = SP_0 \text{grad}T \quad (14)$$

式中:  $V_0$  为水分迁移速度,  $SP_0$  为分凝势。

J. M. Konrad 和 N. R. Morgenstern<sup>[60]</sup>还提出了考虑外界荷载作用的分凝势表达式:

$$SP = SP_0 e^{-ap_e} \quad (15)$$

式中:  $SP$  为考虑外荷载作用的分凝势,  $p_e$  为外荷载,  $a$  为与材料有关的参数。

冻胀量  $h$  的计算式如下:

$$\frac{dh}{dt} = 1.09SPG_f + 0.09n \frac{dX}{dt} \quad (16)$$

式中:  $n$  为孔隙度,  $G_f$  为温度梯度,  $X$  为冻深。

目前, J. M. Konrad 等<sup>[108-111]</sup>利用分凝势模型和数值分析冻胀量进行过研究。

#### (5) 热力学模型

热力学模型是在冻土微元体中土、冰、水三相介质的质量守恒、能量守恒及熵不等式的理论基础上,提出的多相介质的自由能和耗散能表达式与多相介质的本构方程<sup>[112]</sup>。这个模型可以考虑由于冻胀、水热迁移与水分冻结引起的孔隙吸力。R. Michalowski 等<sup>[113-114]</sup>根据该模型基本原理,建立了孔隙度变化率与冻胀量的关系。

#### (6) 温度 - 渗流 - 力 (THM) 三场耦合模型

K. M. Neaupane 等<sup>[115-116]</sup>分别假定岩石为孔隙热弹性体和理想弹塑性体,基于连续介质力学假定和经典热力学理论,建立了考虑水分相变冻融岩体温度 - 应力 - 渗流耦合的质量、动量及能量控制方程一般形式,并对假想的液化天然气储存库进行有限元计算。赖远明等<sup>[117-118]</sup>运用经典渗流力学和经典传热学原理,分别推导了寒区隧道围岩二维、三维 THM 耦合的控制方程,编制了有限元计算程序,结合青藏公路大阪山隧道、昆仑山隧道和风火山隧道进行了有限元数值模拟。何平等<sup>[119]</sup>根据连续介质力学和热力学原理,建立了土体冻结过程中的三场耦合方程。陆宏轮<sup>[120]</sup>应用混合物的连续介质理论,建立了冻融过程中饱和和多孔介质的水分场、应

力场和温度场耦合作用的数学模型,该模型以多孔骨架位移、水头和温度为基本变量,包括总质量守恒方程、总应力平衡方程和总能量守恒方程。N. Li 等<sup>[121-122]</sup>建立了全面考虑冻土中骨架、冰、水、气四相介质水、热、力与变形耦合作用的数理方程,并在引进国外大型岩土工程分析软件的平台,开发出了饱和与准饱和冻土介质温度场、水分场和应力场三场耦合问题的有限元分析软件。徐光苗等<sup>[123]</sup>从不可逆过程热力学和连续介质力学理论出发,建立了岩石冻结温度下非线性温度 - 渗流 - 应力耦合控制方程,并通过定义冻结岩体与冰的膨胀耦合系数,分析岩石的冻胀力。

总体上,目前对寒区岩土介质水力、热力及水热力耦合特性的研究大多是以温度 - 渗流耦合模型为基础,以冻胀力为研究目的,没有将应力与温度 - 渗流完全耦合起来。目前大部分的温度 - 渗流 - 应力耦合研究成果还没有将岩土介质在冻融过程中产生的损伤对温度 - 渗流 - 应力耦合特性的影响反映出来。

## 6 笔者及其所在团队在该领域的研究思路及成果

基于以上认识,结合寒区隧道的特点,笔者及其所在团队以现场监测、大量室内冻融试验和单轴、三轴压缩试验为手段,以研究低温相变条件下的导热系数等热、水、力学参数为基础,以建立含相变低温岩体水热耦合模型和考虑空气温度和湿度影响的隧道风流场湍流模型为前提,以建立了通风条件下寒区隧道温度 - 渗流 - 应力 - 损伤耦合模型为目的,用以研究寒区隧道施工及运营期间围岩及混凝土的冻胀破坏过程;同时,在防寒保温措施方面,开发出兼具轻质、保温、抗冻和抗裂等功能,特别适合于寒区工程保温层使用的泡沫混凝土。具体研究内容包括 X. J. Tan 等<sup>[124-130]</sup>的研究成果。

### 6.1 寒区隧道温度 - 渗流 - 应力 - 损伤耦合模型

#### (1) 寒区隧道无线监测系统

针对西藏嘎隆拉隧道地处喜马拉雅断裂带、海拔高、气温低、雨量极其丰富、进出口两端气候截然不同等特点,在隧道现场埋设了一大批监测仪器:温度传感器、渗压计、土压力盒、钢筋计、混凝土应变计和地震动加速度计,现场仪器埋设情况见图 1。

结合嘎隆拉隧道工程实际,借助移动通信 GPRS

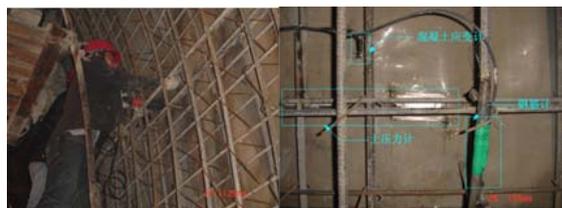


图 1 受力特性测试现场仪器埋设情况

Fig.1 Installing sensors in-situ for mechanical characteristics testing

技术，研制了无线远程监测数据采集系统(见图 2)，实时监测隧道围岩和结构的温度、地下水渗流特征以及结构受力状况，部分监测结果见图 3，4。



图 2 无线远程监测数据采集系统

Fig.2 Wireless remote monitoring data acquisition system

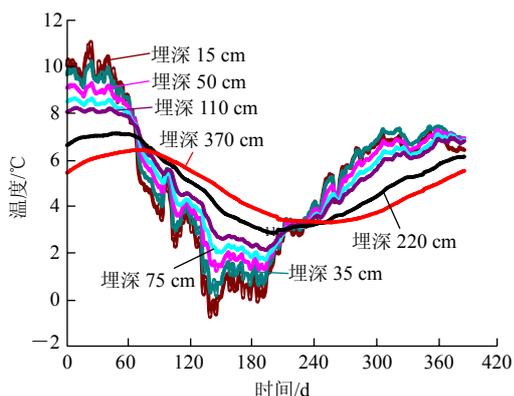


图 3 断面 1 不同埋深围岩温度随时间变化

Fig.3 Variation law of temperature with time at different depths in section 1

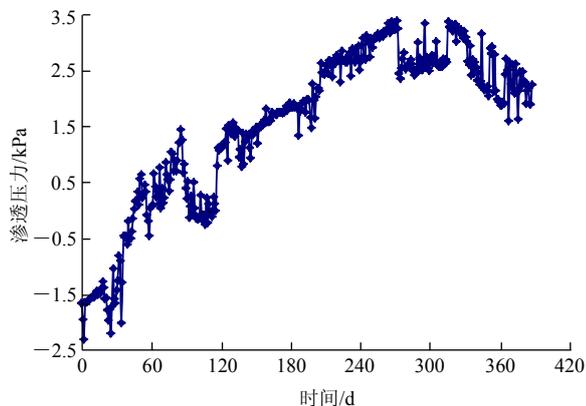


图 4 断面 1 围岩渗透压力随时间变化

Fig.4 Variation law of water pressure with time in section 1

### (2) 室内冻融和单轴、三轴压缩试验

通过对西藏嘎隆拉隧道现场岩样进行系统的冻

融试验和单轴、三轴压缩试验，全面分析了该类岩石在经历不同冻融次数、不同受力状态条件下的破坏形式、强度特性、变形特性和冻融劣化特征，研究表明：单轴条件下岩石破坏形式以劈裂破坏为主，三轴条件下以剪切破坏为主；强度随冻融次数增加而减小；应力峰值对应的轴向应变值随着围压和冻融次数的增加而增加。试验采用的可编程恒温恒湿冻融试验机如图 5 所示。冻融试验岩样破坏形态如图 6 所示。



图 5 可编程恒温恒湿冻融试验机

Fig.5 Temperature and humidity controlled container



图 6 冻融试验岩样破坏形态

Fig.6 Damage phenomenon in process of freeze-thaw test

### (3) 基于随机混合模型的导热系数

从随机混合模型(RMM)(见图 7)理念出发，考虑岩石未冻水含量对导热系数的影响，提出了计算低温相变岩土类材料导热系数的新方法，并通过与试验数据进行对比，验证了新方法的可行性。

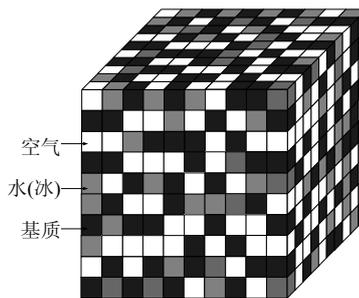


图 7 随机混合模型(RMM)示意图

Fig.7 Sketch of random mixture model(RMM)

① 研究思路

将一定含水量的围岩看作由固体骨架、水分(包括水和冰)和气体组成的 4 组分复合介质, 分别用下标  $s, w, i$  和  $g$  标记。若假定孔隙介质的初始孔隙度为  $n$ , 饱和度为  $S_w$ , 温度低于  $0\text{ }^\circ\text{C}$  时, 未冻水体积含量为  $\chi$ , 则固体骨架、水、冰和气体所占的体积分数分别为  $1-n, \chi n S_w, (1-\chi)n S_w$  和  $(1-S_w)n$ 。

如果围岩中的几种组分形态上都是立方体, 尺寸一样, 且在空间上是随机分布的。则能利用计算机很轻松地建立其空间结构模型, 假设围岩的取样空间尺度为  $L$ , 取统一的离散尺度为  $L_0$ , 则每边切割的份数可表示为

$$d = L_0 / L \quad (17)$$

式中:  $d$  为每边的切割份数。

于是, 取样空间中含有  $d^N$  个小立方体( $N$  为空间维数), 从理论上讲, 只要  $L_0$  足够小, 就能很好地反映围岩的真实热力学特性。

通过计算机生成  $d^3$  个  $0\sim 1$  范围内的随机数  $x$ , 并将  $x$  一一对应的赋值在每个小立方体上, 设定若  $x \geq n$ , 则认为该立方体成分为固体骨架; 若  $n S_w \leq x < n$ , 则认为该立方体成分为气体; 若  $\chi n S_w < x < n S_w$ , 则认为该立方体成分为冰; 若  $x \leq \chi n S_w$ , 则认为该立方体成分为水。这样, 在给定孔隙度  $n$ , 未冻水含量  $\chi$  和饱和度  $S_w$  的条件下, 就生成了一个随机结构的 3 或 4 组分的多孔介质模型(当温度  $T > 0$  时为 3 组分, 当温度  $T < 0$  时为 4 组分)。

② 计算结果

试验与模型计算结果对比情况如图 8 所示。

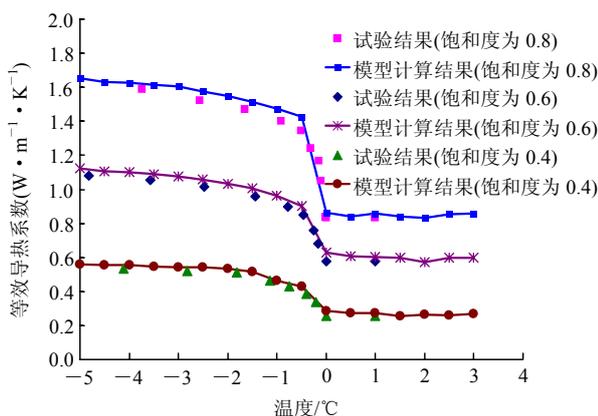


图 8 试验结果与模型计算结果对比

Fig.8 Comparisons between test results and numerical calculation results

(4) 低温相变岩体的温度 - 渗流耦合模型

根据冻融条件下岩体中水、热迁移规律, 基于

连续介质力学、热力学以及分凝势理论, 建立了考虑热传导、相变潜热和渗流速度对温度分布影响的低温相变岩体温度 - 渗流全耦合控制方程, 该模型可反映由 Soret 热扩散效应、分凝势引起的孔隙水流动对渗流速度以及渗透压力分布的影响。并将研究成果与著名的温度 - 渗流耦合室内试验进行了同等条件下的对比分析, 证实了该耦合模型的正确性和参数取值方法的合理性<sup>[70]</sup>。

① 热量的传输迁移过程中, 有

$$C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla[-\lambda_{eq} \nabla T] + [(v_w \nabla)(\rho c)_w T] = Q_{eq} \quad (18a)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} C_{eq} &= \begin{cases} C_a = C_1 + \rho_w L_f \frac{\partial \theta_w}{\partial T} & (T \leq T_0) \\ C_2 & (T > T_0) \end{cases} \\ \lambda_{ef} &= \begin{cases} \lambda_1 & (T \leq T_0) \\ \lambda_2 & (T > T_0) \end{cases} \\ Q_e &= \begin{cases} Q_1 & (T \leq T_0) \\ Q_2 & (T > T_0) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (18b)$$

式中:  $C_{eq}$  为等效热容;  $\rho_w$  为流态水的密度;  $\lambda_{eq}$  为岩体等效导热系数;  $c_w$  为水的比热容;  $v_w$  为流体渗流速度;  $Q_{eq}$  为热源或汇;  $C_1, C_2$  分别为已冻区和未冻区岩体的等效体积热容, 它表示的是密度与体积热容的乘积;  $\rho_w$  为水的密度;  $L_f$  为相变潜热;  $\theta_w$  为水的体积分数;  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为已冻区和未冻区岩体的热传导系数;  $Q_1, Q_2$  分别为已冻区和未冻区内部加热(放热)使控制体产生(消耗)的热量。

② 水的渗流输运过程中, 有

$$\frac{\partial(\rho_w \theta_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i \theta_i)}{\partial t} + \nabla \left[ -\frac{\rho_w k_w}{\mu_w} (\nabla p_w + \rho_w g_j) - \rho_w (S P_0 - D_T) \nabla T \right] = \rho_w \bar{q}_w \quad (19)$$

$$v_w = -\frac{k_w}{\mu_w} (\nabla p_w + \rho_w g_j) + (S P_0 - D_T) \nabla T \quad (20)$$

式中:  $\theta_w, \theta_i$  为水和冰的体积含量;  $\beta_w$  为水的压缩系数;  $\rho_{w0}$  为初始密度;  $\alpha$  为水的热膨胀系数;  $\rho_w, \rho_i$  分别为水和冰的密度;  $k_w$  为水的渗透系数,  $\mu_w$  为水的动力黏滞系数;  $D_T$  为温差作用下的水流扩散率;  $p_w$  为孔隙水压力;  $g_j$  为重力加速度;  $\bar{q}_w$  为源或汇。

(5) 隧道通风风流场湍流模型

应用流体力学、传热学和空气动力学的基本原理与方法，推导出隧道通风风流场湍流模型，应用该模型数值仿真空气的温度、湿度以及风速对围岩温度场的影响规律，研究表明：风速一定时，围岩温度随着风温的增加而增加；温度一定时，围岩温度随着风速的增加而降低，当风速大于 10 m/s，围岩温度场趋于稳定(见图 9)。

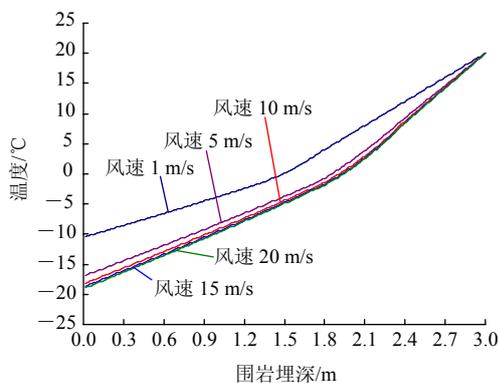


图 9 不同埋深围岩温度随风速变化曲线图

Fig.9 Variation law of temperature with wind speed at different depths

① 连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u}) = 0 \quad (21)$$

式中： $\bar{u}$  为空气运动速度； $\rho$  为空气的密度，可以由气体的状态方程确定。

② 运动方程为

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u}) \bar{u} = \nabla \left\{ -p \mathbf{I} + (\mu + \mu_t) \cdot \left[ \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \bar{u}) \mathbf{I} \right] - \frac{2\rho k}{3} \mathbf{I} \right\} + \bar{S}_M \quad (22)$$

式中： $\mathbf{I}$  为单位向量， $p$  为气体的压强； $\mu$  为空气的动力黏滞系数； $\mu_t$  为涡黏系数，也叫湍流黏性系数； $\bar{S}_M = \rho X - \partial(\mu \nabla \bar{u}) / \partial x$ ， $X$  为沿坐标方向的体积力， $\mu'$  为第二黏度系数，它是一个将应力与体积变形联系起来的量。有关第二黏度的研究较少，因为实际应用中其作用很小。对于气体，一个有效的近似取值是： $\mu' = 2/3 \mu (\nabla \bar{u})$ 。

③ 能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \nabla(\rho c_p \bar{u} T) = \nabla \left[ \left( \lambda_g + c_p \frac{\mu_t}{P_{Tr}} \right) \nabla T \right] + Q_T \quad (23)$$

式中： $c_p$  为空气的体积热容； $D_{12}$  为水分扩散系数；

$C_{p1}$ ， $C_{p2}$  分别为水蒸气和空气的热容； $\lambda_g$  为空气的导热系数； $P_{Tr}$  为湍流普朗特数； $Q_T$  为内部热源。

④ 理想气体的状态方程为

$$p = \rho RT \quad (24)$$

式(21)~(24)为经过时均化处理后控制湍流运动的几个基本方程。在这组方程中除了时均速度、压力等基本变量外，尚未确定的未知量还有湍流黏性系数  $\mu_t$  和湍流脉动动能  $k$ ，如果能确定计算域内及其边界上的量值，那么上述方程完全封闭，通过数值计算就能求得湍流运动的解。

⑤  $k$ - $\varepsilon$  两方程湍流模型为

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\rho k) \bar{u} &= \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t P(\bar{u}) - \frac{2\rho k}{3} \nabla \bar{u} - \rho \varepsilon \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \varepsilon) \bar{u} &= \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon}{k} \left[ \mu_t P(\bar{u}) - \frac{2\rho k}{3} \nabla \bar{u} \right] - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \right\} \quad (25a)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} P(\bar{u}) &= \nabla \bar{u} : [\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T] - 2/3 (\nabla \bar{u})^2 \\ \mu_t &= \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (25b)$$

式中： $C_\mu$ ， $\sigma_k$ ， $\sigma_\varepsilon$ ， $C_{\varepsilon 1}$  和  $C_{\varepsilon 2}$  均为经验常数，一般取  $C_\mu = 0.07$ ， $\sigma_k = 1.00$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.30$ ， $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ， $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ 。

(6) 寒区隧道温度 - 渗流 - 应力 - 损伤耦合模型

根据某寒区隧道风化花岗岩冻融循环后的单轴、三轴压缩试验结果，研究冻融循环过程中岩石强度的劣化规律，提出了考虑岩石冻融的损伤本构模型。通过考虑体积变形、温度梯度、渗透压力和冻胀压力对岩石力学特性的影响，将温度 - 渗流耦合模型和冻融损伤本构模型融合在一起，建立能够反映寒区破碎地层岩石温度 - 渗流 - 应力 - 冻融损伤耦合模型，数值仿真某寒区管道工程的冻胀过程，通过与现场的实测结果对比表明：该模型能很好的反映围岩体由于负温所产生的冻胀现象(见图 10, 11)。在此基础上，确定了某寒区隧道防寒保温材料的类型、厚度、安装位置和设防长度，得到了极端气候条件下围岩冻胀力大小，并对其在冻融循环荷载作用下的稳定性进行了分析。

① 温度场控制方程为

$$C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla[-\lambda_{eq} \nabla T] + [(v_w \nabla)(\rho c T)_w] +$$

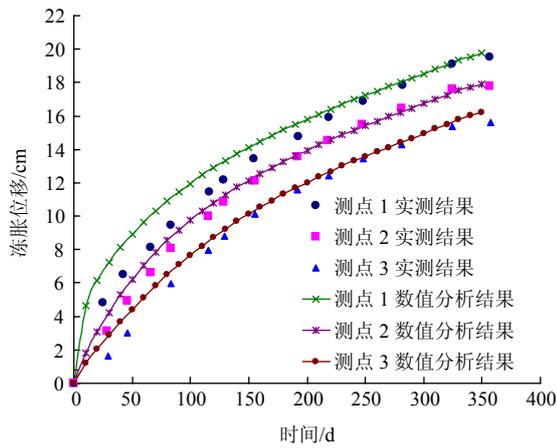


图10 观测点冻胀实测结果与数值分析结果对比图

Fig.10 Comparisons between result of measured frost heaving and numerical analysis result

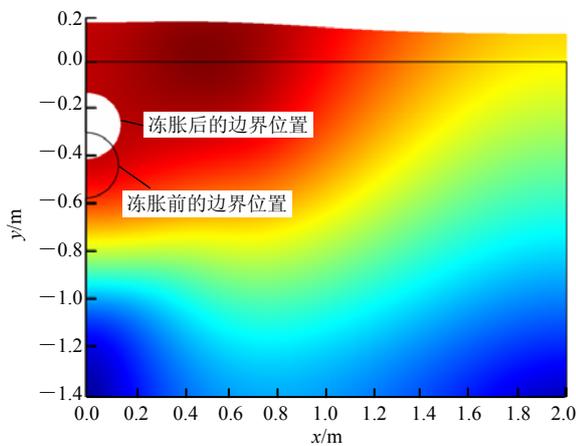


图11 第350天寒区管道围岩冻胀变形图

Fig.11 Deformations of surrounding rock for pipe in cold regions at the 350th day

$$(1-n)T\gamma \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = Q_{eq} \quad (26a)$$

其中,

$$\gamma = (2\mu + 3\lambda)\beta_s \quad (26b)$$

式中:  $G$ ,  $\lambda$  均为拉梅常数;  $\beta_s$  为各向同性固体的线性热膨胀系数;  $\varepsilon_v$  为岩体的体应变。

② 地下水渗流场控制方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_w \theta_w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i \theta_i)}{\partial t} + \\ & \nabla[-\frac{\rho_w k_w}{\mu_w}(\nabla p_w + \rho_w g_j) - \rho_w(Sp_0 - D_T)\nabla T] + \\ & \left(\frac{\theta_w}{n}\rho_w + \frac{\theta_i}{n}\rho_i\right) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \rho_w \bar{q}_w \end{aligned} \quad (27)$$

③ 考虑冻融损伤, 用位移形式表达的热弹性平衡方程可写为

$$\left[ \frac{1}{2} \tilde{C}_{ijkl}^e (u_{k,l} + u_{l,k}) - [\alpha_w p_w + \alpha_i p_i + \gamma(T_s - T_{s0})] \delta_{ij} \right]_{,j} + \rho_e f_i = 0 \quad (28)$$

式中:  $u_i$  为岩体骨架的位移分量;  $p_w$ ,  $p_i$  分别为孔隙水压力和冰压力;  $\alpha_w$ ,  $\alpha_i$  为增量有效应力系数;  $T_s$ ,  $T_{s0}$  分别为岩体的温度和参考温度;  $\rho_e$  为岩体介质(骨架+水+空气+冰)的密度;  $f_i$  为岩体介质的体积力分量, 当只考虑重力时, 有  $f_i = g_i = \{0, 0, g\}^T$ ,  $g$  为重力加速度竖向分量;  $\delta_{ij}$  为 Kronecker 符号, 当  $i=j$  时,  $\delta_{ij}=1$ , 当  $i \neq j$  时,  $\delta_{ij}=0$ ;  $\tilde{C}_{ijkl}^e$  为考虑冻融损伤的岩体骨架材料的弹性矩阵, 其具体表达式为

$$\tilde{C}_{ijkl}^e = \frac{E_0[1-D(N)]}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ S & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$D(N) = 1 - \frac{E(N)}{E_0} \quad (30)$$

式中:  $D(N)$  为冻融  $N$  次后的损伤因子;  $E_0$ ,  $E(N)$  分别为冻融 0 和  $N$  次后的弹性模量。

### 6.2 一种高性能泡沫混凝土防寒保温材料研制

针对寒区隧道的特点, 在对泡沫混凝土产品及其研究现状进行充分调研的基础上, 比选出闭孔珍珠岩、聚丙烯纤维等 9 种材料作为本次高性能泡沫混凝土研制的基本原料; 采用正交试验方法, 研究了各种原材料对泡沫混凝土的密度、吸水率、抗压强度、劈裂抗拉强度等一系列基本性能的影响, 试验结果显示: 泡沫、闭孔珍珠岩和纤维含量是影响泡沫混凝土各项性能的最主要的几个因素。并根据正交试验的结果, 优选出一种泡沫混凝土配方(见表 1), 重点对其保温性能和冻融特性进行研究, 开发出兼具轻质、保温、抗冻、抗裂和抗震等功能, 特别适合于寒区工程保温层及抗震层使用的泡沫混凝土(见图 12)。在此基础上, 通过数值分析研究了其在寒区隧道中的保温效果。

表1 最佳配比方案

Table 1 Best ratio scheme

水泥 /kg	珍珠岩 /kg	泡沫量 /L	聚丙烯纤维 /kg	水 /L	防水剂 /L	防冻剂 /kg	减水剂 /L	促凝剂 /kg
7.2	1.3	14.4	0.012	3	0.02	0.156	0.078	0.36

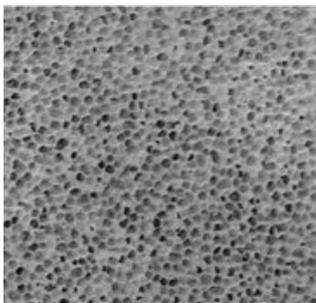


图12 泡沫混凝土孔隙结构

Fig.12 Pore structure for foamed concrete

## 7 结论与展望

本文对低温及冻融循环条件下岩体热、水、力特性研究现状进行综述，探讨其中存在的问题，并提出以导热系数等热、水、力学参数研究为基础，以建立含相变低温岩体水热耦合模型为前提，通过大量冻融试验和单轴、三轴压缩试验，建立寒区隧道温度-渗流-应力-损伤耦合模型，用以研究寒区隧道围岩的冻胀破坏机制，同时开发出兼具轻质、保温、抗冻、抗裂和抗震等功能的泡沫混凝土，用于寒区工程保温层及抗震层使用的基本思路。从该途径出发开展岩体的冻融损伤涉及低温环境下复杂的温度场、渗流场和应力场的耦合问题分析，仍有如下科学问题有待于进一步研究：

(1) 国内外学者对低温及冻融循环条件下的岩土介质热、水、力特性进行了大量的研究，取得了丰硕的成果，但绝大部分研究成果把岩体视为各向同性孔隙介质，未考虑岩土介质的非均质性对其冻胀特性的影响，裂隙岩体在三场耦合及冻胀作用下裂隙扩展机制的研究尚属起步，有待在试验、理论和仿真等方面进一步深化。

(2) 结缘对冻冻结锋面水分补给和热迁移有重要影响，前人的研究多集中在冻土上，而对冻岩的研究较少。因裂隙网络的复杂性，岩体中的冻结过程更为复杂，冻结锋面附近的水分迁移是一个值得深入研究的问题。

(3) 裂隙岩体的冻融损伤涉及温度场、渗流场和应力场的耦合问题。要研究水/冰相变对岩体裂隙网络的损伤，必须考察冻融损伤的2个关键环节：

其一，水/冰相变对岩体裂隙网络渗透性的影响。这也是区别岩体冻融损伤与土体冻融破坏的重要标志。当温度降至一定值时，岩体裂隙中的部分水会结冰，产生体积膨胀力造成裂隙扩展。围岩温度升高后，冰融化为水进入新生成的裂隙，冻结成冰的过程中再次产生冻胀作用，造成新的损伤，如此反复循环引起岩体裂隙网络的扩展演化和渗透性的改变。其二，低温 THM 耦合过程中温度场、应力场以及裂隙网络的损伤演化对水冰相变过程的影响。水冰相变的诱导因素是温度在冰点附近的交替变化，温度场直接影响冻结率，且温度梯度是未冻水迁移的重要驱动力；岩体所处的应力状态控制裂隙的张开度，从而影响裂隙对冻胀融缩的约束作用。通过研究上述2个关键环节，对揭示岩体冻融损伤机制，预防控制寒区工程岩体冻害具有十分重要的意义。

## 参考文献(References):

- [1] 徐教祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1 - 3.(XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1 - 3.(in Chinese))
- [2] 朱立平, WHALLEY W B, 王家澄. 寒冻条件下花岗岩小块体的风化模拟试验及其分析[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 312 - 320.(ZHU Liping, WHALLEY W B, WANG Jiacheng. A simulated weathering experiment of small free granite blocks under freeze-thaw conditions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(4): 312 - 320.(in Chinese))
- [3] 何国梁, 张磊, 吴刚. 循环冻融条件下岩石物理特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2): 52 - 56.(HE Guoliang, ZHANG Lei, WU Gang. Test study on physical characteristics of rock under freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (Supp.2): 52 - 56.(in Chinese))
- [4] 刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, 20(1): 37 - 40.(LIU Chengyu, HE Manchao, WANG Shuren, et al. Experimental study on low temperature freeze-thaw damage characteristics of granite[J]. Journal of Hunan Technology University: Natural Science, 2005, 20(1): 37 - 40.(in Chinese))
- [5] 吴刚, 何国梁, 张磊, 等. 大理岩循环冻融试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2 930 - 2 938.(WU Gang, HE Guoliang, ZHANG Lei, et al. Experimental study on cycles of freeze-thaw of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 930 - 2 938.(in Chinese))
- [6] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1 688 - 1 694.(ZHANG Jizhou, MIAO Linchang, YANG Zhenfeng. Research on rock degradation and deterioration mechanisms and mechanical

- characteristics under cyclic freezing thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1 688 - 1 694.(in Chinese))
- [7] KOLAIAN J H, LOW P F. Calorimetric determination of unfrozen water in montmorillonite pastes[J]. Soil Science, 1963, 95(6): 376 - 384.
- [8] ANDERSON D M, TICE A R. Low temperature phases of interfacial water in clay-water systems[J]. Soil Science Society of America, 1971, 35(1): 47 - 54.
- [9] HANDA Y P, ZAKRZEWSKI M, FAIRBRIDGE C. Effect of restricted geometries on the structure and thermodynamic properties of ice[J]. Physics and Chemistry, 1992, 96(21): 8 594 - 8 599.
- [10] KOZLOWSKI T. A comprehensive method of determining the soil unfrozen water curves 1: application of the term of convolution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 36(1): 71 - 79.
- [11] KOZLOWSKI T. Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil-water systems[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 59(1): 25 - 33.
- [12] TICE A R, BURROUS C M, ANDERSON D M. Phase composition measurements on soils at very high water contents by the pulsed nuclear magnetic resonance technique[J]. Transportation Research Record, 1978, 675(3): 11 - 14.
- [13] ISHIZAKI T, MARUYAMA M, FURUKAWAY, et al. Preempting of ice in porous silica glass[J]. Journal of Crystal Growth, 1996, 163(4): 455 - 460.
- [14] 王丽霞, 胡庆立, 凌贤长, 等. 青藏铁路冻土未冻水含量与热参数试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1 660 - 1 663.(WANG Lixia, HU Qingli, LING Xianzhang, et al. Experimental study on dynamic shear modulus of remolded frozen silty clay for Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1 660 - 1 663.(in Chinese))
- [15] 覃英宏, 张建明, 郑波, 等. 基于连续介质热力学的冻土中未冻水含量与温度的关系[J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2008, 23(1): 77 - 82.(QIN Yinghong, ZHANG Jianming, ZHENG Bo, et al. The relationship between unfrozen water content and temperature based on continuum thermodynamics[J]. Journal of Qingdao University: Engineering and Technology, 2008, 23(1): 77 - 82.(in Chinese))
- [16] SPARRMAN T, ÖQUIST M, KLEMEDTSSON L, et al. Quantifying unfrozen water in frozen soil by high-field 2H NMR[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(20): 5 420 - 5 425.
- [17] PATTERSON D E, SMITH M W. The use of time domain reflectometry for measurement of unfrozen water content in frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 1980, 3(3): 205 - 210.
- [18] SPAANS E J A, BAKER J M. Examining the use of time domain reflectometry for measuring liquid water content in frozen soil[J]. Water Resources Research, 1995, 31(12): 2 917 - 2 925.
- [19] CHRIST M, KIM Y C. Experimental study on the physico-mechanical properties of frozen silt[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2009, 13(5): 317 - 324.
- [20] WYLLIE M R, GREGORY A E, GARDNER L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. Geophysics, 1956, 21(1): 41 - 70.
- [21] TIMUR A. Velocity of compressional waves in porous media at permafrost temperatures[J]. Geophysics, 1968, 33(4): 584 - 595.
- [22] NAKANO Y, MARTIN R J, SMITH M. Ultrasonic velocities of the dilatational and shear waves in frozen soils[J]. Water Resources Research, 1972, 8(4): 1 024 - 1 030.
- [23] WANG D Y, ZHU Y L, MA W, et al. Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 44(1): 12 - 19.
- [24] 盛煜, 福田正己, 金学三, 等. 未冻水含量对含废弃轮胎碎屑冻土超声波速度的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 716 - 719.(SHENG Yu, FUKUDA Masami, KIM Haksam, et al. Effect of unfrozen water content on the ultrasonic velocities in tire mixed frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(6): 716 - 719.(in Chinese))
- [25] MATSUOKA N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach[J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 17(3): 253 - 270.
- [26] NICHOLSON D T, NICHOLSON F H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(12): 1 295 - 1 307.
- [27] MUTLUTÜK M, ALTINDAG R, TÜRK G. A decay function model for the integrity loss of rock when subjected to recurrent cycles of freezing-thawing and heating-cooling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(2): 237 - 244.
- [28] CHEN T C, YEUNG M R, MORI N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2): 127 - 136.
- [29] INADA Y, YOKOTA K. Some studies of low temperature rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3): 145 - 153.
- [30] 徐光苗, 刘泉声, 彭万巍, 等. 低温作用下岩石基本力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2 502 - 2 508.(XU Guangmiao, LIU Quansheng, PENG Wanwei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of rocks under low temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2 502 - 2 508.(in Chinese))
- [31] 杨更社, 奚家米, 李慧军. 三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 459 - 464.(YANG Gengshe, XI Jiami, LI Huijun. Experimental study of rock mechanical properties under triaxial compressive and frozen conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 459 - 464.(in Chinese))
- [32] YAMABE T, NEAUPANE K M. Determination of some thermo-mechanical properties of Sirahama sandstone under subzero temperature conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1 029 - 1 034.

- [33] 程磊. 冻结条件下岩石力学特性实验研究及工程应用[硕士学位论文][D]. 西安: 西安科技大学, 2009.(CHENG Lei. Experimental study on rock mechanical properties under freezing conditions and application in project[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.(in Chinese))
- [34] 李慧军. 冻结条件下岩石力学特性的实验研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西安科技大学, 2009.(LI Huijun. Experimental study on rock mechanical properties under freezing conditions[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.(in Chinese))
- [35] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的CT分析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 206 - 210.(LAI Yuanming, WU Ziwang, ZHU Yuanlin, et al. CT analysis of frost damage of the surrounding rocks of a tunnel in the Daban mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(3): 206 - 210.(in Chinese))
- [36] 杨更社, 张全胜, 任建喜, 等. 冻结速度对铜川砂岩损伤CT数变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 099 - 4 104.(YANG Gengshe, ZHANG Quansheng, REN Jianxi, et al. Study on the effect of freezing rate on the damage CT values of Tongchuan sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 099 - 4 104.(in Chinese))
- [37] 张淑娟, 赖远明, 苏新民, 等. 风火山隧道冻融循环条件下岩石损伤扩展室内模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 105 - 4 111.(ZHANG Shujuan, LAI Yuanming, SU Xinmin, et al. A laboratory study on the damage propagation of rocks under freeze-thaw cycle condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 105 - 4 111.(in Chinese))
- [38] WATANABE K. Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 34(2): 103 - 110.
- [39] 李宁, 张平, 程国栋. 冻结裂隙砂岩低频率循环动力特性试验研究[J]. 自然科学进展, 2001, 11(11): 1 175 - 1 180.(LI Ning, ZHANG Ping, CHENG Guodong. Experimental study on low frequency cyclic dynamic characteristics of freezing fissure sandstone[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(11): 1 175 - 1 180.(in Chinese))
- [40] 徐光苗. 寒区岩体低温、冻融损伤力学特性及多场耦合研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.(XU Guangmiao. Study on mechanical characteristics of rock at low temperature, damage due to freezing and thawing and mutiphysical coupling problems of rock in cold regions[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [41] 张慧梅, 杨更社. 冻融与荷载耦合作用下岩石损伤模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 471 - 476.(ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Research on damage model of rock under coupling action of freeze-thaw and load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471 - 476.(in Chinese))
- [42] ZHANG M Y, LAI Y M, YU W B. Experimental study on influence of particle size on cooling effect of crushed-rock layer under closed and open tops[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(3): 232 - 238.
- [43] 赖远明, 吴紫汪, 张淑娟, 等. 寒区隧道保温效果的现场观察研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(1): 81 - 86.(LAI Yuanming, WU Ziwang, ZHANG Shujuan, et al. In-situ observed study for effect of heat preservation in cold regions tunnels[J]. Journal of The China Railway Society, 2003, 25(1): 81 - 86.(in Chinese))
- [44] 谢红强, 何川, 李永林. 寒区隧道结构抗防冻试验研究及仿真分析[J]. 公路, 2006, (2): 184 - 188.(XIE Hongqiang, HE Chuan, LI Yonglin. A study on frost resistance test of tunnel structure in cold areas and numerical simulation[J]. Highway, 2006, (2): 184 - 188.(in Chinese))
- [45] 陈建勋, 罗彦斌. 寒冷地区隧道温度场的变化规律[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 44 - 48.(CHEN Jianxun, LUO Yanbin. Changing rules of temperature field for tunnel in cold area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 44 - 48.(in Chinese))
- [46] MA W, FENG G L, WU Q B, et al. Analysis of temperature fields under the embankment with crushed-rock structures along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 53(3): 259 - 270.
- [47] 张德华, 王梦恕, 任少强. 青藏铁路多年冻土隧道围岩季节活动层温度及响应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 614 - 619.(ZHANG Dehua, WANG Mengshu, REN Shaoqiang. Experimental study on temperature and response of seasonal active layer of tunnels surrounding rock in permafrost region on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 614 - 619.(in Chinese))
- [48] PARK C, SYNN J H, SHIN D S. Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(Supp.1): 81 - 86.
- [49] 吕康成, 解赴东, 张翊翔. 寒区隧道围岩导热系数反分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2000, 32(4): 379 - 381.(LU Kangcheng, XIE Fudong, ZHANG Yao, et al. Back analysis of the thermal conductivity of the enclosure rocks in a cold region tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science, 2000, 32(4): 379 - 381.(in Chinese))
- [50] 水伟厚, 高广运, 韩晓雷, 等. 寒区隧道围岩导热系数及其冻深分析[J]. 地下空间, 2002, 22(4): 343 - 346.(SHUI Weihou, GAO Guangyun, HAN Xiaolei, et al. Analysis of thermal conductivity and frost depth of enclosing rock of tunnel in cold region[J]. Underground Space, 2002, 22(4): 343 - 346.(in Chinese))
- [51] ZHANG H F, GE X S, YE H. Heat conduction and heat storage characteristics of soils[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2): 369 - 373.
- [52] NICOLSKY D J, ROMANOVSKY V E, PANTELEEVA G G. Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55(1): 120 - 129.
- [53] MOTTAGHY D, RATH V. Latent heat effects in subsurface heat transport modelling and their impact on palaeo temperature reconstructions[J]. Geophysical Journal International, 2006, 164(1):

- 236 - 245
- [54] BRONFENBRENER L. The modelling of the freezing process in fine-grained porous media: Application to the frost heave estimation[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 56(2): 120 - 134.
- [55] 赖远明, 喻文兵, 吴紫汪, 等. 寒区圆形截面隧道温度场的解析解[J]. *冰川冻土*, 2001, 2(2): 126 - 130.(LAI Yuanming, YU Wenbing, WU Ziwan, et al. Approximate analytical solution for the temperature fields of a circular tunnel in cold regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 2(2): 126 - 130.(in Chinese))
- [56] 何春雄, 吴紫汪, 朱林楠. 严寒地区隧道围岩冻融状况分析的导热与对流换热模型[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(增 1): 1 - 7.(HE Chunxiong, WU Ziwan, ZHU Linnan. Freeze-thaw condition analysis for heat transfer and convective heat transfer model of Surrounding rock in cold region[J]. *Science in China: Series D*, 1999, 29(Supp.1): 1 - 7.(in Chinese))
- [57] 张学富, 赖远明, 喻文兵, 等. 风火山隧道多年冻土回冻预测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(24): 4 170 - 4 178.(ZHANG Xuefu, LAI Yuanming, YU Wenbing, et al. Forecast and analysis of refreezing in Fenghuoshan permafrost tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(24): 4 170 - 4 178.(in Chinese))
- [58] 徐教祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 83 - 85.(XU Xiaozu, DENG Yousheng. Experiment study on water migration in freezing and frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 1991: 83 - 85.(in Chinese))
- [59] 李述训, 程国栋. 冻融土中的温度 - 渗流运输问题[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995: 103 - 104.(LI Shuxun, CHENG Guodong. The temperature seepage transport problems in freeze-thaw soils[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995: 103 - 104.(in Chinese))
- [60] KONRAD J M, MORGENSTEM N R. Effects of applied pressure on freezing soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1982, 19(4): 494 - 505.
- [61] NAKANO Y. Quasi-steady problems in freezing soils, I. Analysis of the steady growth of an ice layer[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1990, 17(3): 207 - 226.
- [62] FURUKAWA Y, SHIMADA W. 3-dimensional pattern-formation during growth of ice dendrites, its relation to universal law of dendritic growth[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1993, 128(2): 234 - 249.
- [63] BRONFENBRENER L, KORIN E. Kinetic model for crystallization in porous media[J]. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1997, 40(6): 1 053 - 1 059.
- [64] LUNARDINI V J. Heat transfer with freezing and thawing[M]. New York: Elsevier Science Publishers, 1991: 34 - 35.
- [65] NAKANO Y. Quasi-steady problems in freezing soils: IV. Analysis of the steady growth of an ice layer[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1994, 23(1): 1 - 17.
- [66] 徐教祖, 王家澄, 张立新, 等. 土体冻胀和盐胀机制[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 77 - 80.(XU Xiaozu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin, et al. The soil frost heaving and salt expansion mechanism[M]. Beijing: Science Press, 1995: 77 - 80.(in Chinese))
- [67] 王家澄, 张学珍, 王玉杰. 扫描电子显微镜在冻土研究中的应用[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(2): 184 - 189.(WANG Jiacheng, ZHANG Xuezen, WANG Yujie. Application of scanning electronic microscope in study of geocryology[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(2): 184 - 189.(in Chinese))
- [68] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(4): 548 - 555.
- [69] JAME Y W, NORUM D I. Heat and mass transfer in a freezing unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(4): 811 - 819.
- [70] HANSSON K, IM NEK J, MIZOGUCHI M. Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and freeze-thaw applications[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2): 693 - 704.
- [71] 尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀. 冻结条件下土壤温度 - 渗流耦合迁移数值模拟的改进[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 1997, 37(8): 62 - 64.(SHANG Songhao, LEI Zhidong, YANG Shixiu. Numerical simulation improvement of coupled moisture and heat transfer during soil freezing[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1997, 37(8): 62 - 64.(in Chinese))
- [72] KOOPMANS R W R, MILLER R D. Soil freezing and soil water characteristic curves[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1966, 30(6): 680 - 685.
- [73] MCKENZIE J M, VOSS C I, SIEGEL D I. Groundwater flow with energy transport and water-ice phase change: numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 966 - 983.
- [74] ZHU Y, CARBEE D L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1984, 9(1): 3 - 15.
- [75] LI N, CHEN F X, SU B. Theoretical frame of the saturated freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 35(2): 73 - 80.
- [76] 盛煜, 马巍, 侯仲杰. 正冻土中水分迁移的迁移势模型[J]. *冰川冻土*, 1993, 15(1): 140 - 143.(CHENG Yu, MA Wei, HOU Zhongjie. Migration potential model of moisture migration in freezing soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15(1): 140 - 143.(in Chinese))
- [77] 王铁行, 胡长顺. 冻土路基水分迁移数值模型[J]. *中国公路学报*, 2001, 14(4): 5 - 9.(WANG Tiehang, HU Changshun. A numerical model of moisture migration for frozen soil subgrade[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(4): 5 - 9.(in Chinese))
- [78] PHILIP J R, DE VERIES D A. Moisture movement in porous material under temperature gradient[J]. *Transactions of American Geophysical Union*, 1957, 38(2): 222 - 232.
- [79] BRONFENBRENER L, KORIN E. Thawing and refreezing around a buried pipe[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 1999, 38(3): 239 - 247.
- [80] LUNARDINI V J. Phase-change around insulated buried pipes: quasi-steady method[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1981, 103(1): 201 - 207.
- [81] 苗天德, 郭力, 牛永红, 等. 正冻土中水热迁移问题的混合物理理论模型[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(增 1): 8 - 14.(MIAO Tiande, GUO Li, NIU Yonghong, et al. Mixture theory model of the water heat transfer in freezing soil[J]. *Journal of Chinese Science: Series D*, 1999, 29(Supp.1): 8 - 14.(in Chinese))

- [82] FUKUDA M, NAKAGAWA S. Numerical analysis of frost heaving based upon the coupled heat and water flow model[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing. [S.l.]: [s.n.], 1985: 71 - 75.
- [83] LUNDIN L. Hydraulic properties in an operational model of frozen soil[J]. *Journal of Hydrology*, 1990, 118(1): 289 - 310.
- [84] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林. 寒区隧道温度场和渗流场耦合问题的非线性分析[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(增 1): 21 - 26.(LAI Yuanming, WU Ziwan, ZHU Yuanlin. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature and seepage in cold region tunnels[J]. *Science in China: Series D*, 1999, 29(Supp.1): 21 - 26.(in Chinese))
- [85] 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))
- [86] 毛雪松, 王秉纲, 胡长顺. 多年冻土路基水分迁移热力学性能分析[J]. *路基工程*, 2006, 127(4): 1 - 4.(MAO Xuesong, WANG Binggang, HU Changshun. Permafrost thermodynamic performance analysis of roadbed moisture transfer[J]. *Subgrade Engineering*, 2006, 127(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [87] 汪仁和, 李栋伟. 人工多圈管冻结温度 - 渗流耦合数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 355 - 359.(WANG Renhe, LI Dongwei. Research on hydro-thermal coupling numerical simulation with artificial multi-freezing-tube cycles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 355 - 359.(in Chinese))
- [88] KAY B D, GROENEVELT P H. On the interaction of water and heat transport in frozen and unfrozen soils: I. basic theory; the vapor phase[J]. *Soil Science Society of America*, 1974, 38(3): 395 - 400.
- [89] GROENEVELT P H, KAY B D. On the interaction of water and heat transport in frozen and unfrozen soils: II. the liquid phase[J]. *Soil Science Society of America*, 1974, 38(3): 401 - 404.
- [90] KUNG S K J, STEENHUIS T S. Heat and moisture transfer in a partly frozen nonheaving soil[J]. *Soil Science Society of America*, 1986, 50(5): 1 114 - 1 122.
- [91] 郭力, 苗天德, 张慧, 等. 饱和正冻土中水热迁移的热力学模型[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(5): 87 - 91.(GUO Li, MIAO Tiande, ZHANG Hui, et al. Thermodynamic models of heat moisture migration in saturated freezing soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(5): 87 - 91.(in Chinese))
- [92] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. The segregation potential of a freezing soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1981, 18(4): 482 - 491.
- [93] 翁家杰, 周希圣, 陈明雄, 等. 冻结土体的水分迁移和固结作用[J]. *地下工程与隧道*, 1999, (1): 2 - 10.(WENG Jiajie, ZHOU Xisheng, CHEN Mingxiong, et al. The underground water migration and consolidation effect of the frozen soil[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1999, (1): 2 - 10.(in Chinese))
- [94] 杨更社, 周春华, 田应国, 等. 软岩类材料冻融过程水热迁移的实验研究初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(9): 1 765 - 1 770.(YANG Gengshe, ZHOU Chunhua, TIAN Yingguo, et al. Primary experimental study on moisture and heat transfer of soft rock material during its freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9): 1 765 - 1 770.(in Chinese))
- [95] 杨更社, 周春华, 田应国, 等. 软岩材料冻融过程中的水热迁移实验研究[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(5): 566 - 570.(YANG Gengshe, ZHOU Chunhua, TIAN Yingguo, et al. Experiment study on the moisture and heat transfer of soft rock material under the condition of freezing and thawing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(5): 566 - 570.(in Chinese))
- [96] 汪仁和, 李栋伟. 多圈管冻结模型试验及温度 - 渗流耦合数学模型研究[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2007, 30(11): 1 481 - 1 484.(WANG Renhe, LI Dongwei. Study on model experiment with multi-freezing-tube cycles and the mathematic model of moisture-heat coupling in frozen soil[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2007, 30(11): 1 481 - 1 484.(in Chinese))
- [97] 何平, 程国栋, 朱元林. 冻土黏弹塑损伤耦合本构理论[J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(增 1): 34 - 39.(HE Ping, CHENG Guodong, ZHU Yuanlin. Damage and viscoelastic-plastic coupling constitutive theory[J]. *Science in China: Series D*, 1999, 29(Supp.1): 34 - 39.(in Chinese))
- [98] 赖远明, 李双洋, 高志华, 等. 高温冻结黏土单轴随机损伤本构模型及强度分布规律[J]. *冰川冻土*, 2007, 39(12): 969 - 976.(LAI Yuanming, LI Shuangyang, GAO Zhihua, et al. Stochastic damage constitutive model for warm frozen soil under uniaxial compression and its strength distribution[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 39(12): 969 - 976.(in Chinese))
- [99] 宁建国, 朱志武. 含损伤的冻土本构模型及耦合问题数值分析[J]. *力学学报*, 2007, 39(1): 70 - 76.(NING Jianguo, ZHU Zhiwu. Constitutive model of frozen soil with damage and numerical simulation of the coupled problem[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(1): 70 - 76.(in Chinese))
- [100] SHOOP S, AFFLECK R, HAEHNEL R, et al. Mechanical behavior modeling of thaw-weakened soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 52(2): 191 - 206.
- [101] LI S Y, LAI Y M, ZHANG S J, et al. An improved statistical damage constitutive model for warm frozen clay based on Mohr-Coulomb criterion[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 57(2): 154 - 159.
- [102] PENNER E. The mechanism of frost heaving in soils[J]. *Highway Research Board Bulletin*, 1959, 225(1): 1 - 13.
- [103] 李宁, 程国栋, 徐敦祖. 冻土力学的研究进展与思考[J]. *力学进展*, 2001, 31(1): 95 - 102.(LI Ning, CHENG Guodong, XU Xiaozu. The advance and review on frozen soil mechanics[J]. *Advances in Mechanics*, 2001, 31(1): 95 - 102.(in Chinese))
- [104] MILLER R D. Frost heaving in non-colloidal softs[C]// Proceedings of the Third Int. Conf. Permafrost. Edmonton, Alberta: [s.n.], 1978: 707 - 713.
- [105] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(5): 1 314 - 1 323.
- [106] MU S, LADANYI B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1987, 14(3): 237 - 246.

- [107] GUYMON G L, HROMADKA II T V, BERG R L. A one-dimensional frost heave model based upon simulation of simultaneous heat and water flux[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1980, 3(3): 253 - 262.
- [108] KONRAD J M, MORGENSTEM N R. Frost heave prediction of chilled pipelines buried in unfrozen soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984, 21(1): 100 - 115.
- [109] KONRAD J M. Influence of freezing mode on frost heave characteristics[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1988, 15(2): 161 - 175.
- [110] KONRAD J M, SHEN M. 2D frost action modeling using the segregation potential of soils[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1996, 24(3): 263 - 278.
- [111] NIXON J F. Thermally induced heave beneath chilled pipelines in frozen ground[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1987, 24(22): 260 - 266.
- [112] LI N, CHEN F X, XU B, et al. Theoretical modeling framework for an unsaturated freezing soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(1): 19 - 35.
- [113] MICHALOWSKI R. A constitutive model of saturated soils for frost heave simulations[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1993, 22(1): 47 - 63.
- [114] MICHALOWSKI R L, ZHU M. Frost heave modelling using porosity rate function[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, 30(8): 703 - 722.
- [115] NEAUPANE K M, YAMABE T, YOSHINAKA R. Simulation of a fully coupled thermo-hydro-mechanical system in freezing and thawing rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(5): 563 - 580.
- [116] NEAUPANE K M, YAMABE T. A fully coupled thermo-hydro-mechanical nonlinear model for a frozen medium[J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28(8): 613 - 637.
- [117] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 寒区隧道温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 529 - 533.(LAI Yuanming, WU Ziwan, ZHU Yuanlin, et al. Nonlinear analyses for the couple problem of temperature, seepage and stress fields in cold region tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 529 - 533.(in Chinese))
- [118] 张富. 寒区隧道多场耦合问题的计算模型研究及其有限元分析[博士学位论文][D]. 兰州: 中国科学院寒区与旱区环境与工程研究所, 2004.(ZHANG Xuefu. Computational models' study and their finite element analyses for the coupled problems of several fields in cold regions tunnels[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2004.(in Chinese))
- [119] 何平, 程国栋, 俞祁浩, 等. 饱和正冻土中的水、热、力场耦合模型[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 135 - 138.(HE Ping, CHENG Guodong, YU Qihao, et al. A couple model of heat, water and stress fields of saturated soil during freezing[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 135 - 138.(in Chinese))
- [120] 陆宏轮. 饱和多孔介质冻融过程的混合物连续介质理论[J]. *西南交通大学学报*, 2001, 36(6): 599 - 603.(LU Honglun. Continuum theory of mixture for freezing and thawing of water-saturated porous media[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2001, 36(6): 599 - 603.(in Chinese))
- [121] LI N, CHEN B, CHEN F X. The coupled heat-moisture-mechanic model of the frozen soil[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2000, 31(3): 199 - 205.
- [122] 李宁, 陈波, 陈飞熊. 寒区复合路基温度场、水分场、应力场三场耦合分析[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(10): 66 - 71.(LI Ning, CHEN Bo, CHEN Feixiong. Heat-moisture-deformation coupled model for composite foundation in cold zone[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(10): 66 - 71.(in Chinese))
- [123] 徐光苗, 刘泉声, 张秀丽. 冻结温度下岩体 THM 完全耦合的理论初步分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3 709 - 3 713.(XU Guangmiao, LIU Quansheng, ZHANG Xiuli. Theoretical analysis on full thermo-hydro-mechanical coupling for rocks under freezing temperature[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3 709 - 3 713.(in Chinese))
- [124] 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*, doi: 10.1016/j.coldregions, 2011.(to be published)
- [125] TAN X J, CHEN W Z, YANG J P, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycle[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 68(1): 74 - 84.(to be published)
- [126] CHEN W Z, TAN X J, YANG J P, et al. Study on the range of frost-thaw of surrounding rock and the effects of insulation material in cold regions[C]// ISRM International Symposium 2008, the 5th Asian Rock Mechanics Symposium(ARMS5). [S.l.]: [s.n.], 2008: 1 455 - 1 461.
- [127] CHEN W Z, TAN X J, YU H D, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for unsaturated porous media[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009, 1(1): 32 - 40.
- [128] 谭贤君, 褚以惇, 陈卫忠, 等. 考虑冻融影响的岩土类材料导热系数计算新方法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(增2): 70 - 74.(TAN Xianjun, CHU Yidun, CHEN Weizhong, et al. A new method to study thermal conductivity of geomaterials considering phase change[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Supp.2): 70 - 74.(in Chinese))
- [129] 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 Shanpo, 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))
- [130] 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))