

含相变低温岩体水 - 热 - 力特性研究进展与展望

刘乃飞^{1, 2, 3, 4}, 李 宁², 汪双杰⁴, 宋战平^{1, 3}, 王莉平^{2, 3}, 徐拴海⁵

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 3. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 博士后科研工作站, 陕西 西安 710075; 5. 中煤科工集团 西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 裂隙使得岩体和土体的水热力特性明显不同, 现有冻土理论难以解决低温岩体工程的冻融灾害问题。冻融过程中裂隙水的迁移机制、裂隙部位的传热机制、裂隙参数的动态演化以及非均质岩体水 - 热 - 力多场耦合作用是研究低温岩体冻融灾害的关键。从低温岩体水分迁移特性、热质传输特性、物理力学特性和水 - 热 - 力耦合特性 4 个方面分析了含相变低温岩体的研究进展。国内外在低温岩体方面的研究成果丰硕, 但未充分考虑裂隙导致的非均质性和相变条件下裂隙部位水热力性能的特殊性; 尚未探明低温岩体裂隙部位的水热迁移机制, 缺乏真正意义上的用于研究低温裂隙岩体水热力特性的大型试验设备; 虽开展了冻胀裂隙扩展研究, 但尚未建立起考虑冻融全过程以及冻融循环作用的裂隙动态演化方程; 低温岩体冻融灾害涉及微观层面的水热迁移、细观层面的裂隙演化和宏观层面的变形破坏, 目前尚未建立起综合微观 - 细观 - 宏观成果的水 - 热 - 力耦合模型。要探明低温岩体的水热力特性, 应以冰水相变为切入点, 紧扣裂隙引起的非连续特性, 研发大型试验设备、探明裂隙水热迁移机制、推导裂隙演化方程、构建水 - 热 - 力耦合模型, 开发数值模拟程序, 最终实现对低温岩体冻融灾害的仿真模拟研究。

关键词: 岩石力学; 低温裂隙岩体; 冰 - 水相变; 水分迁移; 热质传输; 物理力学特性; 水 - 热 - 力耦合

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2025)03 - 0521 - 22

Progress and prospects of thermo-hydro-mechanical characteristics of low temperature rock mass with phase transition

LIU Naifei^{1, 2, 3, 4}, LI Ning², WANG Shuangjie⁴, SONG Zhanping^{1, 3}, WANG Liping^{2, 3}, XU Shuanhai⁵

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 4. Post-Doctoral Research Center, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China; 5. Xi'an Research Institute, CCTEG, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: The fractures make the thermal-hydro-mechanical (THM) characteristics of rock mass and soil mass obviously different, and the existing frozen soil theory is difficult to solve the freeze-thaw disaster problem of low temperature rock mass. The migration mechanism of fracture water, the heat transfer mechanism of fracture, the

收稿日期: 2024 - 08 - 12; **修回日期:** 2024 - 10 - 11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278370, 42172314); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JM - 190)

Supported by the Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52278370 and 42172314) and Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (Grant No. 2022JM - 190)

作者简介: 刘乃飞(1985 -), 男, 博士, 2009年毕业于西安理工大学水利水电工程专业, 现任教授, 主要从事低温岩体多场耦合和隧道工程方面的研究工作。E-mail: liunaifei@xauat.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0591

dynamic evolution of fracture characteristics and the multi-field coupling of thermal-hydro-mechanical in heterogeneous rock mass are the key to study the freeze-thaw disaster of low-temperature rock mass. In this paper, the research progress of low-temperature rock mass with phase change is analyzed from four aspects: water migration mechanism, heat and mass transport characteristics, physical and mechanical characteristics and THM coupling characteristics. The research results on low-temperature rock mass at home and abroad are abundant, but the heterogeneity caused by fractures and the special characteristics of the THM properties of fractures under the condition of phase change are not fully considered. The mechanism of hydrothermal migration in fracture of low-temperature rock mass has not been proved, and there is lack of large-scale test equipment for studying the THM characteristics of low-temperature fractured rock mass. Although the fracture propagation caused by frost heave has been studied, the dynamic fracture evolution equation considering the whole process of freeze-thaw and the freeze-thaw cycle has not been established. The freeze-thaw disaster of low-temperature rock mass involves hydrothermal migration at the micro-level, fracture evolution at the meso-level and deformation and failure at the macro-level. So far, no THM coupling model has been established which integrates the results of micro-meso- macro. In order to explore the THM characteristics of low-temperature rock mass, the ice-water phase should be taken as the breakthrough point, the discontinuous characteristics caused by fractures should be closely linked, large-scale laboratory equipment should be developed, the mechanism of hydrothermal migration in fractures should be verified, the fracture evolution equation should be derived, the THM coupling model should be constructed, and numerical simulation programs should be developed, to finally realize the simulation of freeze-thaw disasters in low-temperature rock mass.

Key words: rock mechanics; low temperature fractured rock mass; ice-water phase transition; water migration; heat and mass transfer; physical and mechanical properties; thermal-hydro-mechanical(THM) coupling

1 引 言

随着全球气温变暖, 北极冰层开始融化, 世界强国展开了激烈的北极资源争夺战。相关勘探数据表明^[1], 北极圈的石油和天然气储量分别占全球预估尚未开发储量的 13%(900 亿桶)和 30%(1669 万亿立方英尺)。除化石燃料外, 北极地区低温岩体中还赋存着镍、铅、锌和稀有元素等矿产资源。事实上, 广大冻土区均像北极那样赋存有丰富的矿产资源^[2-3]。

世界范围内冻土区分布广泛, 据统计, 地球陆地面积的近 1/2 被各类冻土区所覆盖。中国是继俄罗斯和加拿大之后的第三大冻土国, 冻土区面积约占全国陆地面积的 75%, 主要分布在东北、青藏高原等地^[4]。近年来, 随着国家“一带一路”倡议的顺利实施及西部大开发的持续推进, 大量交通运输工程(公路工程和铁路工程)、水利水电工程、矿业工程以及工业与民用建筑工程在寒区开工建设。在寒区开展工程建设和资源开采, 经常会遇到低温岩体及各种冻融灾害, 严重威胁工程的安全和正常运行。寒区隧道甚至有十洞九害的说法^[5](新疆国道 217 线玉希莫勒盖隧道因冻害而报废、青藏铁路西

宁—格尔木段的关角隧道道床冬季上鼓、夏季翻浆冒泥、衬砌开裂), 公路路面存在路面翻浆、裂缝、鼓包、沉陷和抬升等病害^[6](青藏公路等), 低温岩体边坡存在热融滑塌等(西藏墨竹滑坡、青海木里露天矿边坡等)^[7-8]。此外, 各种地下低温储库、建筑物基础、地下管道以及冻结法施工等都会遇到岩体冻害问题^[9-11]。冻融灾害发生的根本原因是对低温岩体的特性认识不清、致灾机制尚未探明。因此, 开展考虑冰/水相变作用的低温裂隙岩体水-热-力(THM)特性方面的研究、探明寒区岩体冻融致灾机制, 对于确保低温工程安全建设和长期运营具有重要意义。

20 世纪以来, 随着寒区工程项目的增多, 大量学者开始关注低温岩体并采用室内外试验、理论分析和数值模拟等方法对低温岩体展开研究, 积累了大量研究成果^[3, 12-14](以“低温/寒区/冻融/冻结+岩体/岩石”作为主题词进行检索, 近 10 a 发表中文期刊论文 1 034 篇, 英文期刊论文 1 634 篇)。本文拟从低温岩体水分迁移特性、热质传输特性、物理力学特性及水-热-力耦合特性等方面对低温岩体的研究进展进行综述, 并对低温岩体水-热-力特性领域亟待解决的关键问题进行探讨。

2 低温岩体和冻结土体之异同

早在20世纪30年代,前苏联就开始了冻土方面的相关研究^[15],但对于低温岩体(或称冻岩),由于工程项目相对较少,在过去相当长时间内并未引起足够重视^[12-14]。低温岩体方面的研究相对滞后,目前不少关于低温岩体的研究均借鉴冻土的成果。虽然,广义的冻土既包含冻结土体(即狭义的冻土),也包含处于冻结状态的岩体,但二者存在巨大区别。冻结土体是岩石风化的产物,是多孔连续介质,可看作各向同性材料(见图1(a));而冻结岩体是完整岩块、结构面、未冻水和裂隙冰的共存体,属于非连续介质,具有明显的各向异性(见图1(b))。

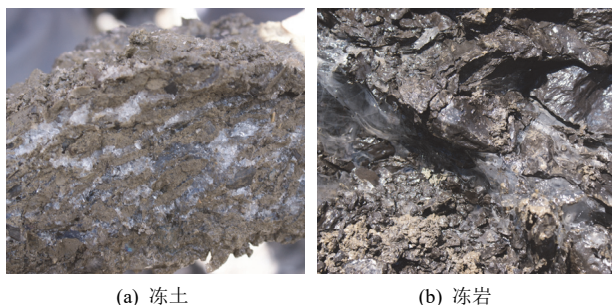


图1 广义的冻土

Fig.1 Generalized frozen earth

相较于狭义冻土,低温岩体(冻岩)有着自身独特的性质。由于裂隙的存在,低温岩体的水、热、力特性均与冻土截然不同。寒区四季变换和昼夜交替产生的温差会引起岩体裂隙水的循环冻融,致使低温岩体各项性质动态变化。对于低温裂隙岩体,裂隙为水分迁移提供场所和通道,同时也会截断热传导的路径。当温度降至冰点时,裂隙水会逐渐相变为冰,从而削弱裂隙水的对流传热能力,同时提高裂隙岩体的热传导能力;当温度升高时,裂隙冰又会逐渐相变为水,从而削弱裂隙岩体的热传导能力,同时提高裂隙水的对流传热能力。裂隙水的反复冻融,致使低温岩体力学性质不断劣化、强度不断降低,诱发各种类型的冻融灾害。随着国家“一带一路”倡议的顺利实施,大批交通建设工程及矿业工程在寒区岩体中兴建,低温岩体水热力特性已成为该领域面临的重要科学问题。

3 低温岩体水分迁移特性研究

工程实践表明岩体工程冻融灾害是水分迁移及冰水相变的结果。探明低温岩体的水分迁移机制和

迁移特性对于防治岩体工程冻融灾害及确保工程安全运营具有重要的意义。目前,低温岩土水分迁移的研究主要集中于冻土领域,先后提出了14种关于迁移驱动力的假说。陈飞熊^[16]将这些假说归纳为四类观点,即流体动力学-热力学观点、物理化学观点、结晶力观点以及构造形成观点,并指出无论是假说还是观点并非孤立存在而是彼此互为补充,只是所占的比重有所不同。但是,针对低温岩体水分迁移的研究成果相对较少,特别是尚未形成公认的裂隙水迁移机制,研究工作大致可以归结为水分迁移试验和水分迁移模型2个方面,还有极少数学者开展了数值模拟方面的研究。

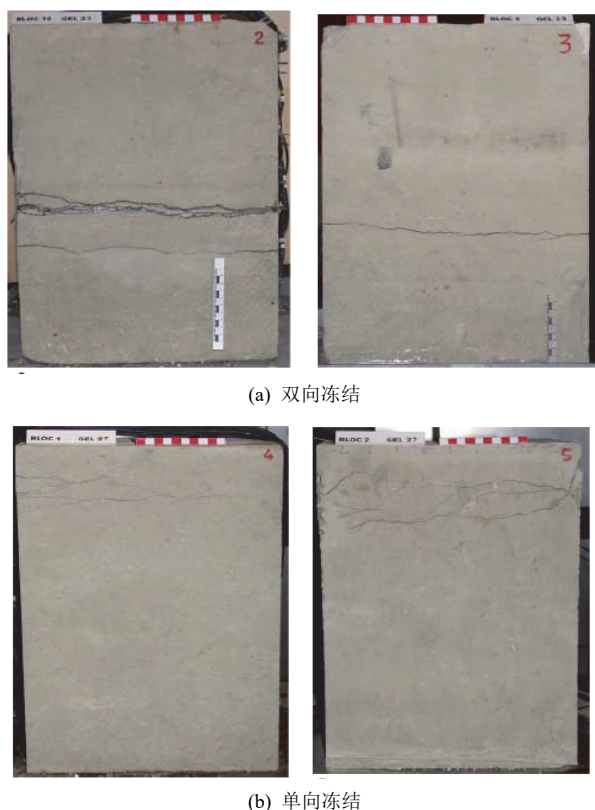
3.1 水分迁移试验

鉴于低温岩体复杂的结构特征,目前开展的低温岩体水分迁移试验研究可以大致分为两类:即无宏观裂隙岩块中孔隙水的迁移(孔隙水迁移)和岩体裂隙水的迁移(裂隙水迁移)。

对于不含宏观裂隙的均质岩块,已有的试验结果和冻土非常类似,认为在温度梯度作用下未冻水向冻结缘迁移,冰分凝是水分迁移的主要驱动力。

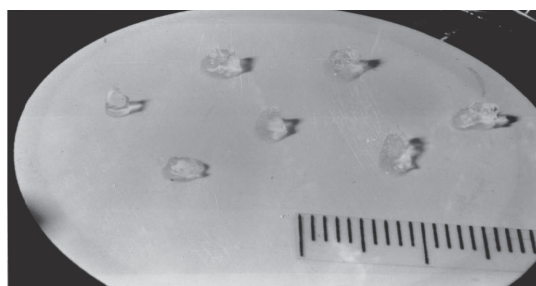
A. Akagawa 和 M. Fukuda^[17]对流纹状凝灰岩开展了冻胀试验,揭示了冰透镜生长、孔隙水流动和将水分驱至冻结锋面的水力梯度的存在,证明了岩石中确实存在分凝冻结,并指出分凝冻结是导致流纹状凝灰岩破裂的主要原因。在此基础上,J. B. Murton等^[18-19]针对无裂隙岩块开展了更为系统的试验研究,在水分迁移过程方面取得了突破性认识。

J. B. Murton等^[18]将石灰岩(试样取自数米深的地下,未发生风化也无可见节理,可视为各向同性体)制备成10个具有不同补水条件的试样,用来模拟永冻区的双向冻结和季冻区的单向冻结(见图2),试验表明冰分凝使得石灰岩块开裂。但他们对相变体积膨胀可能致裂持怀疑态度,因为他们测到的试样出现宏观裂缝时的含水率仅为65%,远远小于J. Walder和B. Hallet^[20]预测的阈值饱和度(约为91%)。此外,从图2中还可以看出冻结机制决定了裂缝的位置^[18]。双向冻结时裂缝出,现在永冻层的上部和活动层的下部,单向冻结时裂缝出现在岩样的近表面。这个差异反映了热质迁移方向随冻土类型的不同,单向向下冻结时水分向上迁移(季节性冻土),有利于在试样近表面出现分凝冰。双向冻结使得活动层中部的水分分别向上和向下迁移(永久性冻土),分凝冰就会在永冻层的上部和活动层近地表聚集。

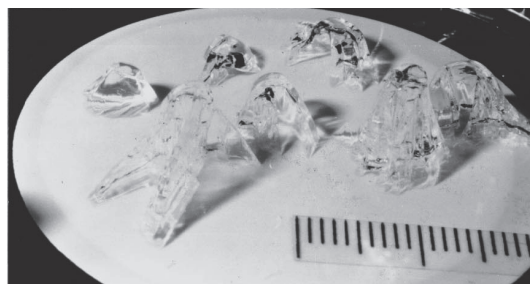
图2 冰分凝致使石灰岩开裂^[18]Fig.2 Ice fragmentation causes cracking of limestone^[18]

我国学者杨更社等^[19]在同年开展了类似工作,研究了低温条件下软岩的水热迁移特性(水泥砂浆试样),指出不同类型的软岩水热迁移过程不同,但温度梯度仍是软岩水分迁移的主要驱动力。同时,杨更社等^[19]还对比分析了软岩水热迁移过程和冻土水热迁移过程的异同。

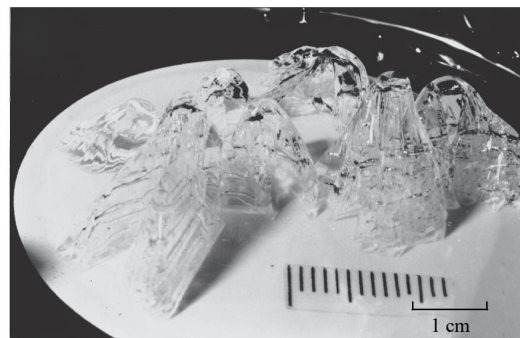
此外,为了避免考虑岩土体性质对水分迁移的影响, H. Ozawa^[21]采用微孔透水薄膜将冰和水分开,研究了低温条件下孔隙水的迁移问题。试验所用微孔透水薄膜的最小孔径为 $0.05\ \mu\text{m}$, 实验室温度为 $-0.5\ ^\circ\text{C} \pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 。研究表明,当孔隙直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 时保持过冷状态的水能够克服重力的作用下从薄膜底部流向冰的底部(见图3)。显然,此时的水分迁移不满足冰分凝理论的条件,水分迁移的驱动势并非分凝势。H. Ozawa^[21]认为该条件下的水分迁移不是



(a) 0 h



(b) 3 h



(c) 5 h

图3 微孔过滤器上冰生长照片^[21]Fig.3 Successive photographs of the ice growth on a microporous filter^[21]

由机械力引起的,而是由整个系统保持在过冷(非平衡)状态时熵增加的热力学势引起的。此外, H. Ozawa^[21]还探讨了融化过程中的水分迁移,他认为融化过程中的水主要以蒸发升华(气态迁移)和冰体融化(重力水迁移)2种方式实现,且较冻结过程更缓慢。

遗憾的是,上述关于低温岩体水分迁移的研究对象,都是完整岩块而非裂隙岩体,将岩体当做多孔连续介质,忽略了裂隙才是水分赋存的主要场所和迁移通道(岩块的孔隙率连通性差,相对于裂隙部位而言岩块孔隙中的水分迁移可以忽略),因此关于无裂隙岩体水分迁移的结论和冻土类似^[22]。上述冻岩水分迁移成果能较好解决无裂隙软岩的水分迁移问题,但对于含裂隙岩体还值得商榷。

随着寒区工程建设的推进,研究人员对低温条件下裂隙水的迁移特性和驱动机制开展了探索性的试验研究。M. Vignes 和 K. M. Dijkema^[23]通过试验研究了未冻水在毛细槽中的运移过程,试验表明毛细槽中冰的生长与温度梯度无关,其生长速率与相变界面处的温度成函数关系; L. J. V. Alst^[24]通过试验研究发现,分凝阶段微裂隙中的水可为宏观裂隙水迁移提供水源,由于界面效应的存在微裂隙中的水在冰点以下不发生相变,而较大裂隙中的水会相变为冰,并通过分凝作用将微裂隙中的水吸附过来;王莉平等^[25-26]开展了预设人工裂隙砂浆样的水分迁移试验,证实了岩体裂隙中确实存在水分迁移,迁移

形态可分为气态与液态,且2种状态的迁移水量基本相当,同时利用毛细理论对液态迁移进行了分析,指出温度梯度确实是裂隙中未冻水迁移的驱动力。

极少数学者还通过现场实测的方式研究低温裂隙岩体的水分迁移特性。O. Sass^[27]为了确定岩体中水分的变化,在阿尔卑斯北部石灰岩岩壁上进行了电阻率测量,以确定岩体水分的变化。在数据记录仪的帮助下,通过过渡电阻率测量获得了时间水分波动,而通过二维地电测量(ERT)确定了小尺度空间水分变化(见图4)。这2种方法都证明了在冻结过程中水压增加的事实,孔隙水被从冻结锋面推入到岩体。此外,还检测到未冻水向冻结区移动,在浅层冻结岩层下存在大量未冻结的过冷水,这可能为分凝冰的形成提供了水源。此外,C. Harris等^[28]对北极冻结岩层进行了测试并基于实测数据指出,位于数米厚冻结层的裂隙岩体中也存在水分迁移。这证明了在冻结层中同样可能存在水分迁移现象。

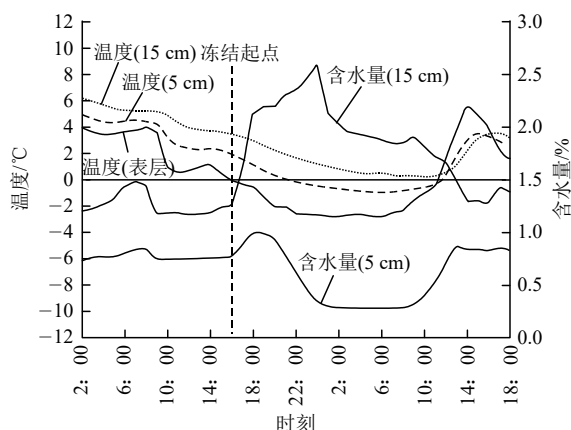


图4 Alps 山北部石灰岩实测温度和含水量曲线^[27]

Fig.4 Measured temperature and water content curves of limestone in the northern Alps Mountains^[27]

可以看出,国内外学者针对低温岩体裂隙水迁移开展了试验研究和现场测试,证明了低温条件下裂隙水确实存在迁移,且初步揭示了低温条件下裂隙水迁移的特性,但鉴于其复杂性,目前对裂隙水迁移的驱动势尚未形成统一认识(到底是温度还是温度梯度,或者是其他势能),对于裂隙水发生迁移的条件(即外部环境条件及裂隙特征条件)也没有研究清楚。笔者认为,应立足于裂隙的特殊性,基于学科交叉的测试手段,开展更为全面和有针对性的低温裂隙岩体水分迁移试验。

3.2 水分迁移机制及迁移模型

低温裂隙岩体水分迁移模型是寒区岩体工程多场耦合分析的基础,许多学者试图揭示裂隙水迁移机制并建立水分迁移模型。研究表明,低温裂隙岩

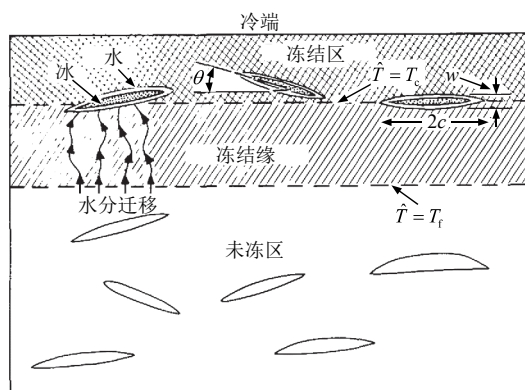
体的冰-岩界面处有未冻水膜的存在,而且该水膜就是未冻水迁移的通道。部分研究人员尝试用分离压力来揭示低温岩体裂隙中薄膜水的运移过程。B. V. Derjaguin 和 N. V. Churaev^[29]最早给出了薄膜水上的分离压力的定义式,即分离压力为岩土体上或冰体上压力和未冻水膜上水压力的差值。

然而遗憾的是,对于未冻水膜的产生原因尚未形成共识,目前认可度较高的主要有:压力溶解,摩擦热融和冰体自身的预融特性。为了解决寒区岩体的冻融灾害,不少科技工作者仍投身于未冻水膜的相关研究。L. A. Wilen 和 J. G. Dash^[30]研究了单晶冰的表面冻胀力演化规律,指出相变区确实存在运动的未冻水膜,并认为界面预融是未冻水存在的主要原因;J. S. Wettlaufer 和 M. G. Worster^[31]提出了固体材料裂隙相平衡理论,建立了平衡时未冻水膜厚度与温度间的数学关系,并指出当温度或荷载发生变化时未冻水就会发生迁移,直至再次平衡。所建立在数学关系如下:

$$b = \lambda \left(\frac{T_m - T}{T_m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: b 为平衡时水膜厚度; T_m 为相变温度; T 为实际温度; $\lambda^3 = -A / (6\pi\rho_s L)$, A 为Hamaker常数, L 为融化潜热, ρ_s 为固相的密度。

T. Wang等^[32]则探讨了未冻水膜厚度与岩体解冻软化的关系,认为未冻水膜的增厚降低了冰与岩石骨架之间的胶结强度。此外,I. Vlahou 和 M. G. Worster^[33]通过冰球在多孔岩石的球形空腔中对称生长的理想情况,分析了低温岩体的水分迁移过程;当腔体中的水在冻结膨胀时,腔内就会产生高压,致使空腔中的未冻水通过岩石孔隙流出腔体;当冰填满腔体时,由于分离力的作用,仍然有一层微观的水膜将冰和岩石分开,这些力会对岩石施加压力,并有可能使岩石破裂并吸附围岩中的未冻水。部分学者则对低温裂隙岩体开展了研究,J. Walder 和 B. Hallrt^[20]假定裂隙为钱币状(见图5),通过一个将水分迁移与裂纹缓慢扩展耦合的模型,定量地探讨了低于冻结时岩体中水分迁移及透镜体增长模式;谭贤君^[34]综合考虑压力势和温度势的影响,推导了低温条件下岩体中孔隙水的运移方程,并与传热方程进行了耦合求解。N. F. Liu等^[35]借鉴多孔介质的吸附薄膜理论和Clapeyron方程,建立了低温裂隙岩体水分迁移的温度驱动势模型,以此为基础,考虑裂隙几何参数对岩体渗透性的影响,构建了含多组裂隙岩体的各向异性水分迁移模型。遗憾

图5 裂隙岩体的理想化冻结过程^[20]Fig.5 Idealized freezing process of fractured rock mass^[20]

的是,该模型虽然考虑了低温裂隙岩体的特性,但是模型的建立仍是基于现有的冻土理论,且缺乏充分的试验成果支持。

可以看出,现有的低温岩体水分迁移模型大多把岩体当做孔隙介质或者对裂隙进行了高度理想化处理(球形、币形),对于解决实际低温岩体水分迁移问题尚有差距。目前针对实际裂隙的水分迁移机制及模型研究才刚刚起步,构建更为真实的水分迁移模型需要基于大量的室内外试验,并综合流体力学、断裂力学和热力学等学科的最新研究成果。

低温裂隙岩体的水分迁移机制及迁移模型作为低温裂隙岩体多场耦合理论的核心内容,是揭示寒区岩体冻融灾害的关键,关于低温岩体水分迁移方面的进一步研究,可以从以下几个方面展开:

(1) 基于水热最新监测技术,研发低温裂隙岩体水分迁移设备,系统开展低温岩体水分迁移试验,揭示低温岩体裂隙水的迁移机制(为什么迁移)、迁移驱动力(动力是什么)和迁移阈值(何时迁移)。

(2) 研究不同温度、压力和裂隙条件下裂隙水的相变机制和冰水相变模型,为裂隙水迁移模型构建提供理论支撑(实际的水分迁移和冰水相变过程关系极其密切)。

(3) 研发适用于现场的水分传感器和智能监测设备,对实际低温裂隙岩体工程水分场进行长期监测,获取实际低温裂隙岩体的水分时空分布特性。

(4) 基于室内外试验结果,综合流体力学、断裂力学和热力学等学科最新研究成果,构建基于学科交叉的低温裂隙岩体水分迁移模型,并开发相应的数值分析程序。

4 低温岩体热质传输特性研究

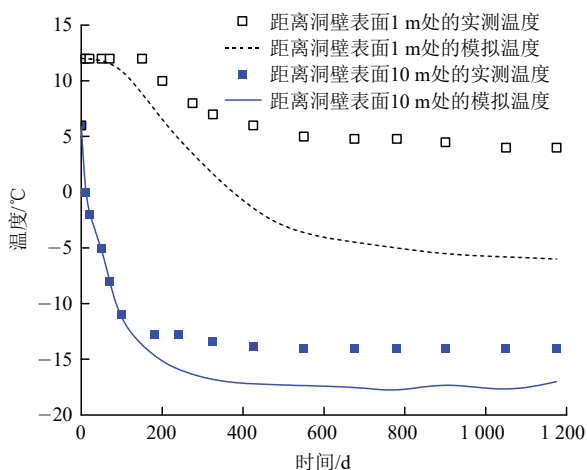
岩体所处温度随季节交替和昼夜变换在冰点附近波动,引起岩体中水分的冻结和融化。水相变为

冰时体积会膨胀 9%(包括原位水和外部迁移水),可能诱发裂隙的萌生和扩展;冰融化为水时可能进一步渗入新生裂隙,并在下次温度降低时冻结成冰。随着冻融循环次数的增加,岩体的物理力学性质不断劣化,进而可能诱发冻融灾害。可见,温度场的时空变化是低温岩体工程冻融灾害频发的主要诱因。低温岩体传热特性作为岩体温度场分析的基础,逐渐引起了国内外学者的关注。目前关于低温岩体传热特性的研究大概可以分为传热特性试验和传热模型两大方面。

4.1 传热特性试验

关于寒区岩土传热特性研究主要集中于冻土领域,对低温岩体传热特性的研究相对滞后。随着寒区岩体工程建设的蓬勃发展,不少学者采用试验方法研究了低温岩体的热学特性。C. Park 等^[36]对韩国典型花岗岩和砂岩的热学特性进行了研究,发现当温度降低时岩石的导热系数缓慢增大,而比热容和热膨胀系数则逐渐减小;徐光苗^[37]测试了红砂岩和页岩在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的导热系数,指出这 2 种岩石在温度从 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时导热系数均有所增大;屈永龙^[38]测试了白垩系砂岩的热传导系数,指出其随温度的降低而增大;刘巍等^[39]测试了细砂岩、粉砂岩和砂质泥岩试件的比热、导热系数和结冰温度等热参数。此外,徐拴海等^[40]利用室内试验和数值计算方法分别研究了冻结和融化过程中试样温度平衡的过程和时程规律,认为冻结和融化过程的试样温度均存在显著的 3 段式变化特征(即预冷阶段、相变阶段和深冷阶段);M. Y. Zhang 等^[41]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,发现碎石层顶部开放的冷却效果要小于闭合情况。以上关于寒区岩体传热性能试验的研究对象主要是无裂隙岩块,探明了无裂隙低温岩体的传热特性,能够较好地解决裂隙较少或各向异性不明显的低温岩体传热问题,但是对于含多组优势裂隙或各向异性显著的低温岩体,则力有不逮。

实测低温储库围岩温度表明,由于采用岩石参数代替裂隙岩体参数,数值分析预测的温度总是比实测值要低。韩国 Gonjiam 地下食品冷藏库^[42],1997~2000 年监测的温度数据表明,在距洞壁 10 m 的测点,3 a 后的预测温度比实测温度低 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,且该差值随时间和测点埋深的增加而增大(见图 6)。同样,挪威 Glomfjord 地下冷却液氨储库^[43]洞顶上方靠近储库围岩的预测值比实测值低 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,J. H. Synn 等^[44]采用数值模拟方法对某冷库围岩温

图 6 韩国 Gonjiam 地下食品冷藏库温度曲线^[42]Fig.6 Temperature curves of Gonjiam underground food cold storage in South Korea^[42]

度场进行了研究,发现只有增大实测岩块比热(约25%)同时减小导热系数(23%)才能得到与现场监测值较吻合的结果。

可见,岩块的传热特性不等于含裂隙岩体,为了满足实际工程建设需要,必须开展含裂隙低温岩体传热特性的试验研究工作。张德华等^[45]对风火山隧道从开挖到贯通整个过程中引起的围岩热学响应规律进行了现场试验研究;陈建勋和罗彦斌^[46]对某公路隧道进行了历时 1.5 a 的现场测试,得到了洞内气温的时空分布特征;李 思等^[47]采用现场实测和数值仿真方法研究了寒区隧道温度场分布和其对热学参数的敏感性;宋 雷等^[48]推导了人工冻结岩体温度场的相似准则,并开展了裂隙岩体双管冻结温度场的模型试验;郭 瑞等^[49]采用自制试验装置研究了隧道温度场,指出洞口风速、洞口气温以及隧道长度等因素对温度场的影响程度逐渐减弱。

可以发现,关于低温岩体传热特性的室内试验和现场测试尚处于起步阶段,相关成果和数据均较少,目前还停留在对无裂隙岩块的测试或寒区隧道温度场监测阶段,综合考虑裂隙形态、裂隙空间分布、冰水相变及水分迁移作用的低温岩体传热试验成果鲜见报道。

4.2 传热机制及传热模型

低温岩体传热模型及相关理论是进行寒区岩体温度场分析和多场耦合理论研究的前提,裂隙岩体传热模型大多是从传热学的角度根据能量守恒原理建立的。然而,直到 20 世纪 70 年代,随着计算机技术和非稳定相变温度场理论的问世,才使得传热理论和温度场的研究高速发展起来。徐光苗^[37]基于混合物理理论研究了低温条件下无裂隙岩体的热学参

数;谭贤君等^[50]考虑岩土各相的随机分布,提出了应用计算机对冻结岩石导热系数进行预估的方法;李云鹏和王芝银^[51]根据变物性参数的非线性热弹性理论,建立了考虑热力系数和冰胀力系数的本构方程;Y. J. Shen 等^[52]探讨了随着冻结发展,含表面裂隙硬岩内部温度场的演化过程;N. F. Liu 等^[53]根据热阻的定义,建立了考虑冰水相变作用的裂隙热阻模型,提出了含系统裂隙岩体的等效热传导系数计算方法,并通过引入裂隙参数(走向、倾向、倾角)将该方法进一步推广至含多组裂隙岩体:

$$[\lambda_{ij}^e] = \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} N_{11}^{(m)} & N_{12}^{(m)} \\ N_{21}^{(m)} & N_{22}^{(m)} \end{bmatrix} \lambda_r - (M-1)(1-\phi) \begin{bmatrix} \lambda_r & 0 \\ 0 & \lambda_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: λ_{ij}^e 为裂隙岩体总热传导系数张量, N 为裂隙岩体传热特性张量, M 为裂隙组数, λ_r 为无裂隙岩块的热传导系数, ϕ 为岩体的裂隙度。

由于实际工程建设需要,低温岩体传热方面的研究成果主要集中于寒区隧道和冻结法施工领域。在寒区隧道领域,赖远明等推导了寒区圆形隧道温度场的解析解^[54],并建立了能考虑隧道围岩传热和洞壁对流换热耦合问题的三维模型^[55];夏才初等^[56]建立了隧道内气体的气-固耦合传热模型,并推导了洞内气体年平均温度和振幅的显式解;周小涵等^[57]则以洞口纵向冻结长度指标对影响隧道温度场的各因素进行了敏感度研究;孙克国等^[58]基于流固耦合传热理论,分析了围岩初始地温和导热系数对寒区隧道温度场的影响规律;L. Chen 等^[59]研究了风沙堵塞和气候变化对青藏铁路碎石夹层路堤传热的影响,并对其长期工作性能进行了评价;那通兴等^[60]基于 COMSOL 软件建立考虑相变的围岩温度场与渗流场耦合模型,指出渗流速率改变对温度场有明显影响;雷飞亚^[61]推导了不同孔隙率下岩体的热学参数计算公式,基于多孔介质模型建立了考虑相变过程的围岩温度场计算模型;王志杰等^[62]以冬奥会保障项目金家庄隧道为依托,建立了隧道围岩区的随机裂隙模型,研究了孔隙率、渗透率、随机裂隙孔径等对温度场的影响;H. Liu 等^[63]研究了寒区隧道通风和初始条件等因素对隧道温度场的影响,指出气温越低,风速越大,岩体温度影响圈越大,冻结深度越大;W. W. He 等^[64]利用现场数据建立了两个数值模型(有限差分法和有限元法)来预测冻结岩石的温度状态,并对江仓煤矿井筒周围岩体最大解冻深度进行了分析。在冻结法施工领域,高 娟等^[65]建立了双孔冻结下裂隙岩体数值模型,实现了裂隙岩体冻

结过程中耦合及相变问题的模拟; M. A. Alzoubi 等^[66]对人工冻结问题的传热建模进行了研究, 提出了 2 种常用的方法, 即表观热容公式和焓-孔隙率公式。

上述研究成果在解决实际低温岩体传热问题方面做出了巨大贡献, 但由于低温裂隙岩体结构的复杂性和试验成果的限制, 已有的传热模型大多将低温岩体分为已冻区和未冻区^[67], 对正冻区水分迁移引发的对流传热和热学参数随温度变化考虑不足; 多场耦合模型中也大多直接用热传导系数来反应岩体的传热性能, 未探讨其来源和本质, 从而对低温裂隙岩体温度场分析产生显著不利影响。笔者认为, 应在以下几个方面开展进一步的研究:

(1) 基于热物理领域最新技术, 研发能考虑冰水相变作用的低温裂隙岩体传热特性试验设备, 系统开展低温裂隙岩体传热试验, 揭示低温裂隙岩体的传热机制, 尤其是考虑冰水相变的接触传热问题。

(2) 研发适用于现场的温度传感器和智能监测设备, 对实际低温岩体温度场进行长期监测, 获取实际低温裂隙岩体的温度场时空分布特性。

(3) 基于室内外测试结果, 建立考虑裂隙形态、裂隙空间分布、冰水相变及水分迁移作用的低温裂隙岩体传热模型, 并开发相应的数值分析程序。

5 低温岩体物理力学特性研究

随着寒区工程的增多, 低温岩体冻融引发的地质灾害逐渐凸显。反复冻融作用下岩体的物理力学性质不断劣化、强度持续降低, 进而威胁寒区岩体工程的安全性, 甚至诱发各种地质灾害。为了确保低温岩体工程安全稳定, 国内外学者针对低温岩体(石)的物理力学性质开展了大量研究。然而, 在低温岩体物理力学特性研究方面国外明显早于国内, 且美国和苏联两国相对更早, 加拿大、法国、芬兰、日本等国则相对较晚, 但也取得了大量成果^[68]。目前关于冻岩物理力学特性的研究主要采用室内试验和数学建模的方法, 大概可分为物理性质、力学特性和冻胀模型 3 个方面。

5.1 物理性质研究

裂(孔)隙中的冰水相变会改变岩体的结构, 进而导致岩体弹性模量、密度、孔隙率等物理性质动态变化。国外学者通过室内试验对低温岩体的物理性质展开了研究。T. Yambae 和 K. M. Neaupane^[69]对 Sirahama 砂岩进行了冻融试验, 指出干燥试样的杨氏弹性模量比湿样大得多; H. Yavuz 等^[70]开展了

安山岩冻融循环试验, 研究表明岩样的纵波波速降低, 但吸水率和孔隙率增大; J. Park 等^[71]利用 X 射线、CT 扫描图像和电子显微镜等手段研究了冻融循环作用下岩石细观结构演化情况, 发现随着冻融循环次数的增加, 岩石孔隙结构会破坏迅速; E. Kolay^[72]在土耳其约兹加特区域采集了 8 种不同类型的沉积岩(SR)和火山沉积岩(VSR)开展冻融循环试验, 获得了 25 次冻融循环过程中岩石质量和孔隙率的变化规律(见图 7)。

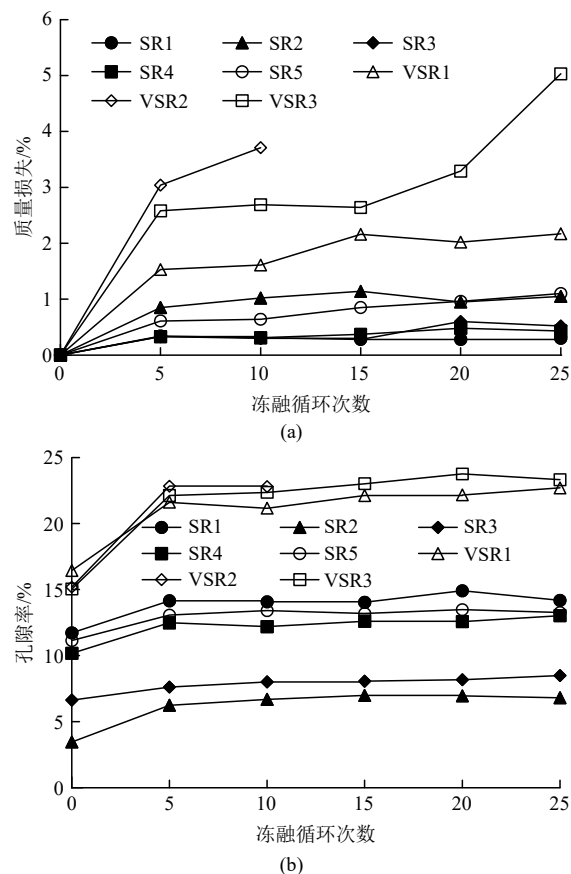


图 7 物理参数随冻融循环次数的变化^[72]

Fig.7 Some engineering properties under freeze-thaw^[72]

国内关于冻岩物理性质方面的研究虽然起步较晚, 但是在孔隙率、弹性模量和质量损失等方面也取得了一系列的研究成果。闻磊等^[73]开展了花岗岩的冻融循环试验, 表明随着冻融温度下限的降低花岗岩质量损失率略有增大而弹性模量有所减小; 傅鹤林等^[74]研究了不同层理倾角板岩在冻融作用下弹性参数的演化特征, 指出板岩弹性模量和剪切模量均随冻融循环次数增加呈指数下降趋势; X. J. Tan 等^[75]开展了花岗岩冻融循环前后不同围压下的三轴压缩试验, 结果表明岩石的弹性模量随冻融循环次数呈指数衰减; 贾海梁等^[76]对饱和砂岩冻融循环过程中的物理性质进行了观测, 指出岩石孔隙率是能够较好反映冻融损伤程度的可靠指标; 奚家米

等^[77]通过试验研究了冻融循环对泥岩、粗/中粒砂岩孔隙率的影响,发现多次冻融循环后粗粒砂岩的孔隙率变化最大,损伤最为严重;L. P. Wang 等^[78]指出在冻融循环作用下,细砂岩和粗砂岩孔隙度均增大,且与冻融循环具有良好的线性拟合关系。田森等^[79]指出在冻融循环作用下,岩体饱和质量呈先增后减、纵波波速呈减速衰减趋势。

除了采用常规冻融循环试验研究冻岩的物理性质外,不少学者还借助先进的无损探测技术(如CT、核磁共振及超声等)对冻岩的物理性质展开研究。杨更社等^[80]从损伤力学角度出发,首次提出利用CT数的变化表征冻融循环对岩石损伤程度的影响;周科平等^[81]则利用核磁共振技术(NMR)对花岗岩进行了测试,认为NMR成像能显示岩石的孔隙结构特征和冻融损伤情况;J. L. Li 等^[82]对经历多次冻融循环的花岗岩进行了核磁共振测试,分析了横向弛豫时间T2分布和核磁共振图像,获得了岩样孔隙度、孔隙空间分布特征的变化规律(见图8);宋勇军等^[83]基于NMR技术指出,岩样未冻水含量随温度降低呈指数型衰减,未冻水含量与冻融循环次数线性负相关;而刘泉声等^[84]则认为纵波波速是容易获取且能够较好表征冻融损伤的物理参数,并建立了以纵波波速为损伤变量的冻融损伤模型;S. B. Huang 等^[85]提出了一种利用超声速度估计低温饱和砂岩未冻水含量的新方法,并基于孔隙冰结晶理论建立了超声速度与未冻水含量之间的线性关系:

$$W_u = \frac{V_k^f - V_k}{V_k^d} \quad (3)$$

式中: W_u 为未冻水含量, V_k 为砂岩的超声速度计算值, V_k^f 为完全冻结状态砂岩的超声波速度, V_k^d 为完全冻结后与冻结前砂岩的超声声速之差。

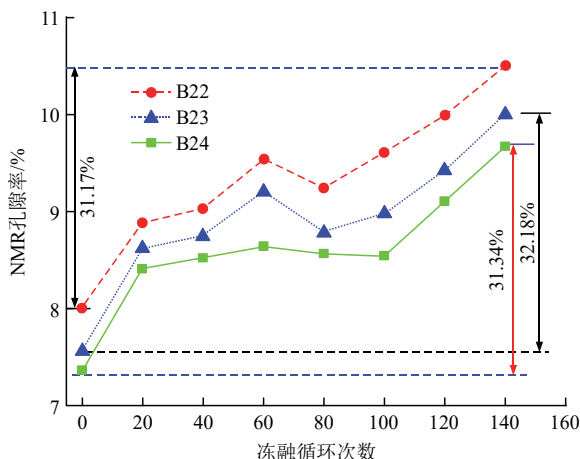


图8 基于NMR的岩样孔隙度随冻融循环变化规律^[82]

Fig.8 Changes of NMR porosity under freeze-thaw^[82]

可以看出,国内外学者采用常规冻融循环试验及无损探测技术对低温岩体的物理性质开展了大量研究,证明了冻融作用下岩石的物理性质发生了显著的变化,且这种变化与岩石自身的性质密切相关。但现有研究鲜有涉及裂隙,对于含裂隙岩体在冻融循环作用下物理性质的变化规律尚未揭示清楚。笔者认为,应立足于实际工程,考虑裂隙对低温岩体物理性质的影响,开展更为全面和有针对性的低温裂隙岩体物理性质试验和理论研究。

5.2 力学特性研究

岩体在冻融作用下的力学性质直接关系着低温岩体工程的安全稳定,因此低温岩体的力学性质研究备受国内外学者关注。研究成果可归纳为冻胀力、抗压/拉强度、蠕变特性及冻融损伤等几个方面。

在冻胀力方面,G. P. Davidson 等^[86]利用光弹效应测量了岩石(有机玻璃代替)因裂隙水冻胀而产生的压力,发现宽度为1 mm时的冻胀力高达1.1 MPa;黄诗冰等^[87]也开展了低温下饱和裂隙的冻胀力测试试验,认为冻结过程中,岩体裂隙中冻胀力的萌生是一个突发的过程,其演化过程可分为孕育阶段、爆发阶段、跌落阶段以及平衡阶段(见图9);而田森等^[79]则将冻胀力演化分为了孕育段、起胀段、稳定段、二次起胀段、消融段5个阶段,且认为冻胀力产生、达到峰值所需时间以及峰值大小与裂隙倾角均呈正相关;单仁亮等^[88]将含贯通裂隙岩体的冻胀力演化过程划分为初始冻结阶段、迅速上升阶段、卸荷阶段、维持阶段、消散阶段5个阶段。此外,部分学者从理论角度对冻胀力开展了研究。H. Liu 等^[89]从断裂力学角度探讨了冻融岩体的损伤机制,并建立了裂隙长度与冻胀力的关系;申艳军等^[90]则推导了硬岩的冻胀荷载解析式,并分析了冻结过程中含裂隙硬岩冻胀荷载的演化规律。

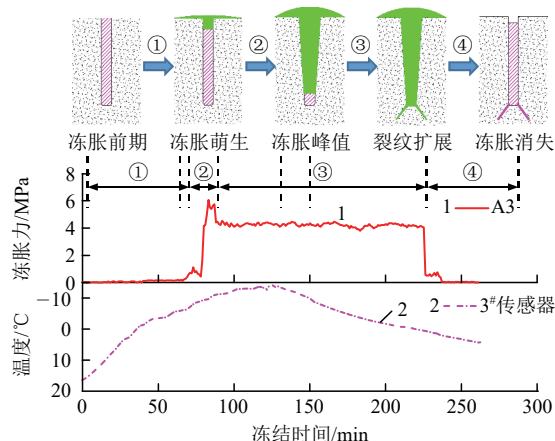


图9 裂隙冻胀扩展过程示意图^[87]

Fig.9 Crack propagation caused by frost heaving pressure^[87]

在冻岩强度方面, J. Kodama 等^[91]通过试验研究发现岩石强度随含水量和加载速率的增加而增加, 并且在温度较低时这种趋势更加明显; 唐明明等^[92]对花岗岩开展了低温压缩试验, 指出无论干燥还是饱和花岗岩其单轴及三轴抗压强度均随温度的降低而提高, 呈现非线性增加的趋势(见表 1^[92]); 奚家米等^[93]对砂质泥岩开展了低温压缩试验, 表明强度基本参数值(抗压强度、黏聚力、内摩擦角和残余强度)均随温度的降低而有不同程度的增大; 李纯纯等^[94]则探究了超低温下花岗岩的力学特性, 指出当温度从 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 饱和花岗岩的抗压强度和弹性模量分别提高了 31.1%和 24%, 干燥状态花岗岩的弹性模量提高了 12.8%, 而抗压强度变化不明显; S. T. Zhou 等^[95]采用先进的机器学习技术并考虑特征阻抗对动态抗压强度的影响, 建立了一种快速确定冻融岩石动态抗压强度的方法。上述研究主要针对冻结岩块, 难以解决实际冻结裂隙岩体问题, 鉴于此, 部分学者对含裂隙低温岩体的强度特性展开了研究。H. Yang 等^[96]指出低温条件下 2 个交叉裂隙的倾斜度对岩体的强度和破坏模式有显著影响; 赵涛等^[97]则研究了冰充填裂隙对冻结岩体压缩破坏特征的影响, 指出冻结裂隙砂岩的力学性质受冻结作用和裂隙倾角双重控制, 认为冰均起到了支撑、填充和黏结作用; 而 K. Liu 和 T. T. Wang^[98]认为寒区饱和砂岩的动态断裂韧性、裂纹扩展速度、动态抗拉强度、动态抗压强度和破坏模式具有显著的温度和速率依赖性, 且随着环境温度的降低而增加。

表 1 花岗岩抗压强度 ^[92]						
Table 1 Triaxial compressive strength of granite ^[92]						
试验围压/MPa	含水状态	抗压强度/MPa				
		$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-50\text{ }^{\circ}\text{C}$
0	干燥	67.21	72.34	75.73	77.82	79.06
	饱和	69.02	75.59	82.07	84.75	86.48
3	干燥	103.52	111.06	117.62	121.81	124.35
	饱和	113.14	124.15	130.14	133.94	137.02
7	干燥	156.54	165.08	170.24	171.85	174.89
	饱和	157.42	168.59	175.41	178.84	181.84
10	干燥	172.98	179.94	187.10	190.36	192.03
	饱和	179.41	196.39	205.40	211.60	214.94

此外, 部分学者还研究了冻融循环作用下岩石的强度特性。T. Yamabe 和 K. M. Neaupane^[69]开展了岩石冻融循环试验, 发现试样抗拉和抗压强度均随冻融循环次数增加而降低, 但前者的降低更甚于后者; T. C. Chen 等^[99]对凝灰岩开展了单循环冻融试

验, 认为临界饱和度约为 70%, 当试样初始饱和度超过 70%时, 岩石会出现明显破坏; Q. Ma 等^[100]采用 SHPB 装置对冻融循环作用下的泥岩和砂质泥岩进行压缩试验, 指出单轴抗压强度随冻融次数的衰减呈对数函数; 徐拴海等^[101]对粗砂岩开展了三轴压缩试验, 随着冻融循环次数的增加, 岩石的抗压强度逐渐减小, 而峰值应力对应的轴向应变逐渐增加(见图 10); 李平等^[102]针对双裂隙类砂岩材料开展了不同冻融循环下的单轴压缩试验, 认为裂隙水是产生冻胀裂纹的关键因素, 对于岩桥倾角不同的双裂隙试样, 其单轴抗压强度呈现先下降后上升的趋势; 乔趁等^[103-104]指出随着冻融循环次数增加, 岩样峰值应力损失率呈幂函数增长, 峰值应变呈二次多项式增长。

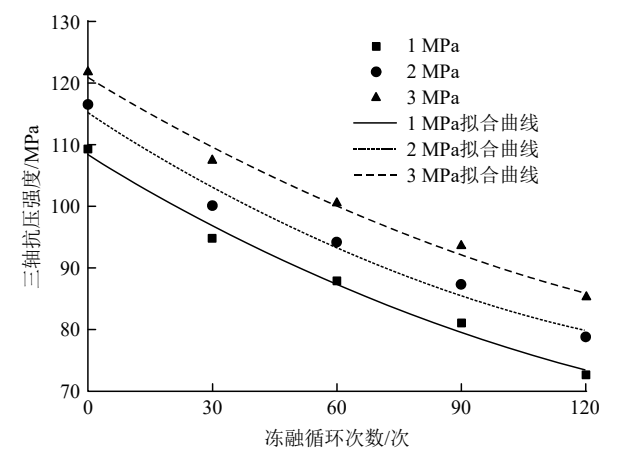
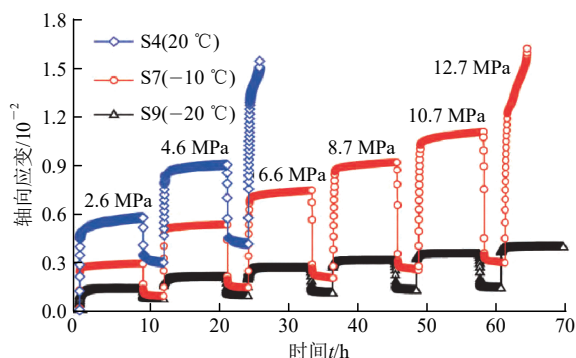


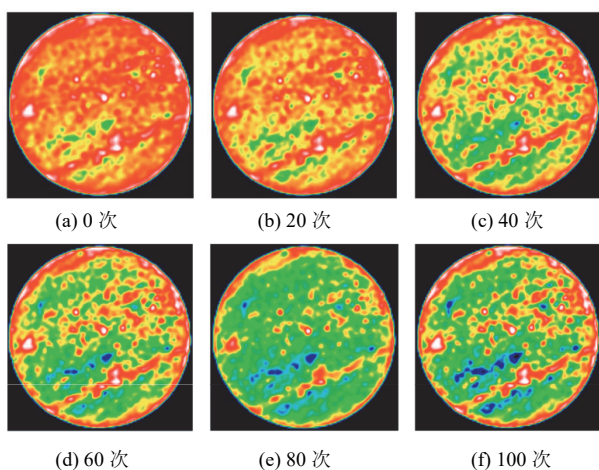
图 10 三轴抗压强度随冻融循环次数变化规律^[102]
Fig.10 Triaxial compressive strength vs. freeze-thaw^[102]

在蠕变特性方面, 李栋伟等^[105]基于三轴蠕变试验结果和线性组合流变模型, 建立了白垩系冻结软岩的非线性蠕变方程; 单仁亮等^[106]采用自主研发的低温岩石三轴试验系统, 对不同节理面倾角的层状红砂岩开展了三轴蠕变试验, 建立了冻结层状红砂岩三维蠕变模型; 宋勇军等^[107]开展了不同低温条件下红砂岩的分级加卸载蠕变试验, 研究了不同温度条件下红砂岩的蠕变特性及温度对岩石蠕变特性的影响(见图 11); Z. Y. Li 等^[108]开展了白垩系饱和和冻结砂岩蠕变试验, 建立了考虑温度-损伤-应力耦合的六元冻结砂岩非线性蠕变本构方程, 并通过试验数据进行了验证; 赵越等^[109]指出在同一冻融循环次数条件下, 酸性溶液中的蠕变应变量及蠕变速率均最大, 碱性溶液次之, 中性溶液最小。

在冻融损伤方面, 张慧梅等^[110-111]定量表述了冻融与荷载的耦合作用对岩石总损伤的影响规律, 建立了考虑残余强度特征的冻融受荷岩石损伤本构

图 11 不同温度下单轴蠕变加卸载曲线^[108]Fig.11 Creep curves at different temperature^[108]

模型, 并基于变形特征推导了模型参数理论表达式; H. Liu 等^[112-113]基于 CT 扫描技术和数字图像处理理论, 定量表征了不同冻融循环次数下砂岩的空间结构的损伤演化(见图 12), 并提出了细观结构损伤演化模型; Y. C. Zhao 等^[114]根据冻结砂岩的变形特征, 建立了考虑低温对屈服过程和变形影响的弹塑性损伤模型。部分学者还研究了含裂隙低温岩体的冻融损伤特性, 李 宁等^[115]指出在加载低周次循环荷载作用下冻结裂隙砂岩会产生明显的疲劳, 且该疲劳特性与砂岩冻结与否、有无裂隙等条件密切相关; 李新平等^[116]开展了闭合无水裂隙的冻融循环试验, 获得了冻融后裂隙岩样的力学特性及其破坏形态; 阎锡东等^[117]将岩石冻融条件下的应变分解为初始损伤应变、附加损伤应变和塑性应变, 建立了弹塑性冻融损伤本构模型; 王永岩和朱思文^[118]对含不同倾角的无水贯通裂隙试样进行了冻融循环试验, 建立了单轴抗压强度与冻融循环次数间的定量关系。

图 12 不同冻融循环后砂岩样 CT 图像^[112-113]Fig.12 CT images of sandstone sample after freeze-thaw cycles^[112-113]

此外, 部分学者还研究了冻融条件下低温岩体裂隙的扩展情况。刘泉声等^[119]利用断裂力学理论和

应力外推原理, 给出了裂隙尖端应力强度因子的数值近似解法; 徐拴海等^[120]考虑了岩石在冻融循环过程中的微裂隙变化, 提出并推导了微裂隙扩展因子; 刘艳章等^[121]通过在类砂岩试样中预制不同倾角的单开口裂隙, 探究了冻结方式和裂隙倾角对裂隙冻胀扩展过程和断裂破坏特征的影响机制。

可以看出, 针对低温岩体力学特性的研究成果丰硕(冻结时岩体力学特性会提高, 但冻融作用下岩体性质会发生劣化), 主要集中在完整岩块、闭合裂隙岩体、无水裂隙岩体的冻胀力及冻融损伤方面, 但考虑裂隙水相变的低温岩体冻融损伤研究较少, 尤其是冻胀作用下裂隙的扩展机制还不清楚, 更没有考虑多条裂隙冻胀扩展的相互影响。

5.3 冻胀模型研究

冻胀作用会促使低温岩体裂隙扩展, 强度降低, 进而诱发各种冻融灾害。J. Walder 和 B. Hallet^[20]提出了多孔岩石因裂缝内冰的生长而破裂的数学模型, 该模型能清楚地描述材料参数(如弹性模量)、环境条件(如温度)和时间在岩石冻损中的作用; N. Matsuoka^[122]模拟了含人工裂缝花岗岩的冻胀开裂过程, 提出了裂缝中发生冻结膨胀的热状态初步数据。国内关于低温岩体冻胀研究起步较晚, 但发展很快, 目前已建立了多种冻胀模型。康永水等^[123]将低温岩石因温度变化产生的应变视为岩石骨架热胀冷缩应变与冻胀应变之和, 针对非饱和岩石, 求解了“假饱和”后的冻胀阶段产生的冻胀力及冻胀应变; 刘红岩和赵雨霞^[124]考虑冻融循环对岩石弹性模量、孔隙率及冻胀率的影响, 建立了考虑冻融循环下岩石损伤的圆形隧道围岩冻胀力的损伤力学模型; 刘泉声等^[125]利用应变等价原理将孔隙中的冰压力等效为岩石表面的三向拉应力, 从而根据弹性理论建立了有效冻胀力下低温饱和岩石冻胀变形模型:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \left[\alpha_s (T_f - T_0) - n \frac{p_i}{3K_s} \mu \right] \delta_{ij} & (\Delta T \leq 0) \\ \alpha_s (T_f - T_0) \delta_{ij} & (\Delta T > 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ε_{ij} 为岩石低温冻胀应变, p_i 为低温岩石冻结后的孔隙冰压力, K_s 为岩石的体积模量, α_s 为岩石的热膨胀系数, n 为岩石的初始孔隙率, μ 为岩石的冻结率, T_0 为初始温度, T_f 为冻结温度。

此外, 黄诗冰等^[126]考虑孔隙几何形态和温度应力的影响, 建立了椭圆孔隙中的冻胀力计算模型, 得到了椭圆孔隙冻胀开裂特征; 严 健等^[127]考虑静水压力作用, 提出了裂隙贯通成环原位冻胀时的隧道宏观冻胀力理论模型; J. M. Zhang 和 L. Guo^[128]

采用基于状态的周动力理论建立了考虑冻胀效应的热-力全耦合模型,并对冻岩的开裂特性进行了分析。此外,部分学者还采用数值分析方法研究岩体冻胀,吕志涛等^[129]采用相场法描述裂隙冻胀扩展,推导了岩体裂隙冰-岩相互作用力学场控制方程和裂隙冻胀扩展相场演化控制方程。L. Sun 等^[130]基于有限元-离散元联合方法(FDEM)建立了新的三维冻胀模型,该模型可模拟了岩体中的热传递、水迁移、水-冰相变(冰生长)和冰-岩相互作用。Y. Zhou 等^[131]基于体积膨胀理论和扩展有限元法(XFEM)提出了可考虑冻结岩体中多裂缝相互作用的数值方法。

可以看出,针对岩石的冻胀研究已较为成熟,建立了多种冻胀模型和数值方法,但对含裂隙低温岩体的冻胀机制却尚不清楚,裂隙岩体低温冻胀模型方面的研究较少,主要原因之一就是裂隙岩体中的未冻水迁移机制不明,而未冻水直接影响岩体的冻胀变形。笔者认为,对于低温裂隙岩体冻胀特性研究应立足于水分迁移过程,并考虑冰水相变对岩体裂隙网络演化的影响,只有如此才能真正揭示低温岩体的冻胀机制,进而建立冻胀模型,为低温裂隙岩体数值模拟提供理论基础。

6 低温岩体水-热-力耦合特性研究

工程实践表明:低温岩体冻融灾害是冰-水相变条件下岩体水-热-力(THM)三场耦合作用的结果。寒区温度在冰点附近频繁波动,当温度低于冰点时,岩体中的水分会相变为冰并产生冻胀力影响应力场;应力场反过来会对裂(孔)隙产生影响,进而改变温度场和水分场。当温度升至冰点以上,冰发生融化,同样对温度场和应力场产生影响。如此往复,使得岩体的各项性能劣化,进而诱发冻融灾害。低温岩体 THM 耦合过程如图 13^[132]所示。

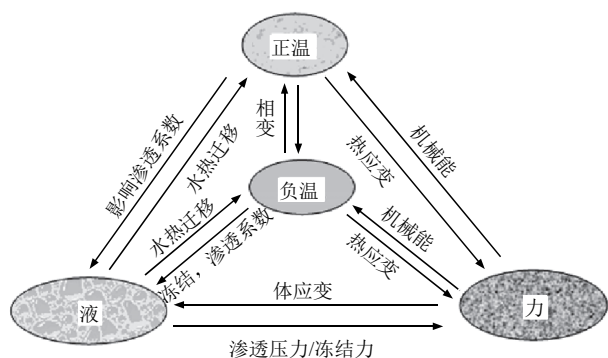


图 13 低温岩体 THM 耦合过程示意图^[132]

Fig.13 The THM coupling process in frozen rock mass^[132]

目前冻土的水热力多场耦合和常温岩体的水热力多场耦合研究已比较深入,但关于含水/冰相变低温裂隙岩体水-热-力耦合机制方面的研究才刚刚起步。K. M. Neaupane 等^[133]假定岩石为孔隙热弹性体,提出了线性应力-应变本构关系的理论公式,并建立了热-水-力耦合数值模型;O. Nasir 等^[134]研究了安大略省南部的海底岩石由于长期的气候变化和冰期循环的热-水-力-化学(THMC)耦合过程。随着国内寒区工程建设的蓬勃发展,以中国科学院武汉岩土力学研究所和寒旱所以及西安科技大学为代表的一些学者逐渐加入了寒区岩体多场耦合方面的研究。徐光苗等^[135]根据不可逆过程热力学和连续介质力学理论,推导了低温岩体 THM 耦合控制方程,分析了冻结温度下冰与岩石的膨胀耦合关系;Y. M. Lai 等^[136]考虑隧道围岩热传导和隧道内空气与围岩的热对流耦合问题,建立了隧道耦合传热三维计算模型,并利用该模型对青藏铁路风火山隧道的传热过程进行了三维非线性分析;马静嵘和杨更社^[137]基于软岩水热迁移机制提出了软岩 THM 三场耦合数学模型;X. Tan 等^[138-139]推导了非饱和岩石在温度-渗流-应力耦合作用下的静力平衡方程、流体物质守恒方程、气体质量守恒方程和能量方程,并将建立的多场耦合模型应用于某泥岩竖井的开挖、支护过程;Y. S. Kang 等^[140]基于水-冰相变理论和能量守恒原理建立了冻结条件下裂隙岩体的 THM 耦合控制方程,并对连霍高速乌鞘岭隧道进行了模拟分析;S. B. Huang 等^[141-142]建立了冻结岩石的单轴压缩强度和水热力三场耦合模型并探讨了相关分析参数的确定方法;黄诗冰等^[143]建立了冻融循环作用下裂隙岩体的水-热耦合模型,并采用仿真模拟构建了冻结法施工中的裂隙网络,探讨了低温冻结过程中裂隙水渗流对裂隙冻结交圈的影响;刘乃飞^[144]紧抓低温裂隙岩体的各向异性特性,基于经典热力学和岩体力学理论等,初步探讨了裂隙岩体变形-水分-热质-化学耦合作用机制;G. F. Li 等^[145]基于 FLAC3D 数值分析软件提出了一种简化的寒区岩石 THM 数值模拟方法。以上研究一定程度上填补了低温裂隙岩体多场耦合研究的空白,助力了低温岩体工程建设,但遗憾的是上述耦合模型均未充分考虑低温裂隙岩体水热迁移的各向异性特性(虽然渗透系数采用了渗透张量,但未开展水分迁移机制方面的研究)以及在实际应用中如何处理含多组裂隙岩体水热迁移的各向异性(如果所有裂隙均建立裂隙单元显然也不现实)。同时,目前对寒区岩体 THM 耦合的研究大多以冻胀力及隧道洞周变

形为目的, 并没有将温度、应力和水分三场真正耦合起来, 也没有将冻融损伤对岩体水热力特性的影响反映出来。

综上可知, 目前岩土学术界和工程界关于寒区裂隙岩体多场耦合方面的研究尚不成熟, 研究成果难以用于解决复杂的低温裂隙岩体工程问题。低温裂隙岩体最大的特点就是与水/冰相变过程有关的水分迁移、热质迁移和力学特性的各向异性特性, 若不考虑裂隙岩体的各向异性就无法真正模拟低温岩体工程。笔者认为, 要构建考虑水-冰相变的低温裂隙岩体多场耦合理论模型, 就需要从构建低温单裂隙介质水分迁移模型、传热模型、力学本构模型和裂隙扩展模型入手, 进而研究多裂隙间的相互影响并建立含多组优势裂隙低温岩体的水分迁移模型、传热模型、力学本构模型及裂隙扩展模型, 以此为基础构建考虑水/冰相变作用的低温裂隙岩体THM多场耦合模型。

7 展 望

随着东北老工业基地振兴和西部大开发的持续推进以及“一带一路”的顺利实施, 必将有更多的低温岩体工程开工建设。季节交替和昼夜变换产生的温差引起岩体裂(孔)隙水的反复冻融。当温度降至冰点时, 裂(孔)隙水会相变为冰, 产生的体积

膨胀可能诱发裂隙的萌生和扩展, 从而造成岩体损伤; 当温度升高后, 岩体中的冰会融化为水并进入新生裂隙^[3, 12]。如此往复, 造成低温岩体水、热、力学性质动态演化、水热力作用相互耦合、岩体强度不断降低, 威胁寒区岩体工程的稳定性。遗憾的是, 目前对低温岩体的相关研究尚处起步阶段, 亟需有待研究的问题、研究的重难点及研究思路进行展望和讨论(见图14)。当前, 关于低温裂隙岩体水-热-力特性研究存在的主要难点有:

(1) 冰水相变是低温岩体工程发生冻融灾害的根本原因, 而水是相变的物质基础, 如何针对裂隙岩体特征, 在构建裂隙水相变及裂隙冰生长模型的基础上, 建立综合考虑孔隙水迁移、裂隙水迁移以及孔隙水-裂隙水相互补给作用的低温岩体水分迁移模型成为了第一大难点。

(2) 季节交替和昼夜变换的温度环境是寒区岩体工程发生冻融灾害的主要诱因, 而寒区岩体的温度场时空分布受岩石基质的热学特性、冰水相变过程以及裂隙特征的控制, 如何结合冰水相变及水分迁移模型构建考虑裂隙和裂隙水对流作用的低温岩体传热模型则是第二大难点。

(3) 力学特性的周期性演化和劣化是寒区岩体工程发生冻融灾害的直接原因, 而低温岩体的力学特性和强度受冰水相变过程和裂隙特征及分布控制, 裂隙的萌生、扩展又与冻胀力密切相关, 如何

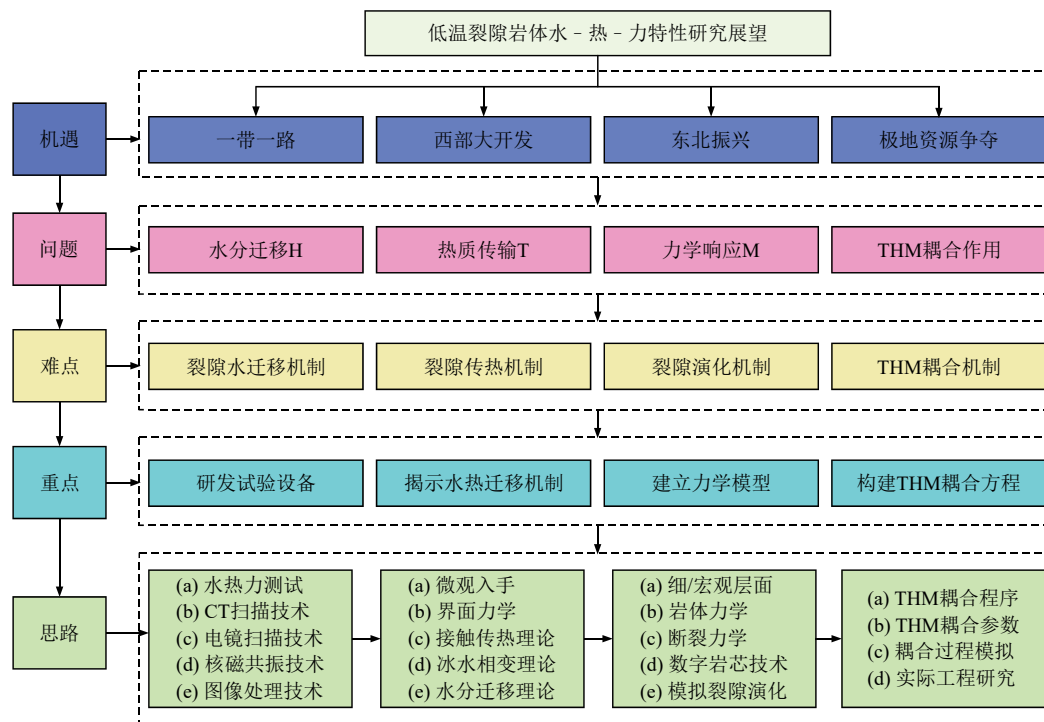


图14 低温裂隙岩体研究展望思维导图

Fig.14 Mind map of frozen rock mass research prospect

在建立冻胀力求解方法和揭示裂隙演化机制的基础上,建立综合考虑冰水相变、裂隙特征及分布的低温裂隙岩体非线性力学模型成为了第三大难点。

(4) 冻融过程中寒区岩体的水分场、温度场、应力场相互作用、相互耦合。水分场通过相变对应力场产生影响,通过对流对温度场产生影响;温度梯度则是低温条件下水分迁移的主要驱动力,同时水相变为冰产生的冻胀力会对应力场产生影响;而应力场会改变裂隙孔隙的分布和特性,进而对水分场和温度场产生影响。如何建立包括水分迁移方程(连续性方程)、传热方程(能量守恒方程)以及力学方程(力学平衡方程)在内的 THM 耦合数学模型并开发能够考虑裂隙扩展演化的数值模拟方法是第四大难题。

低温裂隙岩体冻融灾害实质上是冰水相变作用下非连续岩体介质水-热-力三场耦合作用的结果,属于低温环境下裂隙岩体的 THM 多场耦合问题。笔者认为,研究含裂隙低温岩体的冻融灾害,应以冰水相变为切入点,紧扣裂隙引起的非连续特性,重点从以下几个方面着手:

(1) 研发真正意义上的用于研究低温裂隙岩体水热力耦合特性的大型试验设备。设备应能够实时测试不同应力、不同温度、不同水分环境下裂隙岩体的水热力响应。设备至少应具备长时间-周期性冻融、流量及水压可控、稳压(水压、外压)、温度可控(岩体、流体)、相关参量可测等方面的要求^[146]。在此基础上,引进并发展现代无损探测手段,如实时的 CT 扫描技术、电镜扫描技术、核磁共振技术等,让研究人员能有效获取岩体内部结构的分布,并且利用现代计算机图像处理技术方便地处理和分析这些数据。这两者相结合,就能既无损观测到岩体孔隙细观结构的演化过程,又能测得低温岩体水热力特性之间的宏观关系,进而从宏-细观相结合的角度研究岩体的水-热-力耦合作用机制。此外,还应加强现场监测设备研发和相关测试工作。

(2) 揭示真正考虑裂隙影响的低温裂隙岩体水热迁移机制。冻融灾害发生的根本原因是冰点附近变动的温度诱发岩体裂(孔)隙水发生相变,而裂隙部位的水热迁移又占主导地位。对于低温裂隙岩体的水热迁移特性研究,既要关注冻结过程也不能忽视融化过程。应基于冻土等孔隙介质的水热迁移理论并关注纳米级薄膜水迁移过程,探究考虑冻融全过程的低温岩体裂隙部位水热迁移机制,建立低温相变条件下裂隙接触部位的传热模型。同时还要考

虑裂隙演化和多裂隙间的相互影响。

(3) 建立考虑冰水相变作用的裂隙演化方程及力学模型。温度和荷载均会引起裂隙的动态变化,而低温岩体既经受周期性的温度变化又承受相变引起的动态荷载(如冻胀力),致使低温岩体裂隙演化过程异常复杂。应综合材料力学、断裂力学等相关理论建立考虑冰水相变作用的裂隙演化方程,真实描述冻融作用下低温岩体裂隙的演化过程^[147]。依此为基础,建立考虑裂隙非连续特征和岩体参数动态变化(受冻融影响)的力学模型。

(4) 构建考虑裂隙演化和冰水相变作用的低温岩体水热力耦合模型并开发可靠的数值模拟方法。耦合模型应包括水分迁移方程、传热方程、力学方程、裂隙演化方程以及相关耦合参数。借助数字岩芯技术开发能反应裂隙动态演化和岩体非均质特征的数值模拟方法,验证低温岩体的水分迁移、热质传输以及裂隙扩展演化过程。综合微观测试、细观试验及数值试验等探讨低温裂隙岩体微观-细观-宏观不同尺度的水热力耦合机制。

低温裂隙岩体冻融灾害是冰水相变作用下水热力耦合作用的结果,对于低温裂隙岩体耦合问题的研究应该从微观入手^[12],结合界面力学、接触传热理论、水冰相变理论以及冻土水分迁移理论探究低温裂隙岩体的水热迁移机制;进而上升到宏/细观层面,结合岩体力学、断裂力学相关理论和数字岩芯技术解决裂隙动态演化机制和非线性力学本构等问题,并采用数值模拟方法对岩体裂隙扩展演化过程进行分析,最终实现对低温裂隙岩体水热力耦合过程的真实模拟和寒区岩体工程稳定性的定量研究,从而为西部大开发的推进和“一带一路”倡议的实施贡献力量。

8 结 论

本文阐释了低温岩体和土体的区别与联系,从低温岩体水分迁移特性、热质传输特性、物理力学特性和水-热-力耦合特性 4 个方面分析了含相变低温岩体的研究进展,探讨了低温裂隙岩体研究存在的主要难点并指出了应重点研究的问题,初步形成了以下几点认识:

(1) 国内外学者对低温岩体水-热-力特性开展了大量研究,取得了丰硕的成果,表明低温岩体是岩土工程领域研究的热点,但大多数研究将岩体视作多孔介质,未充分考虑裂隙导致的非均质性和

相变条件下裂隙部位水热力性能的特殊性。

(2) 尚未探明低温岩体裂隙部位的水热迁移机制, 缺乏真正意义上的用于研究低温裂隙岩体水-热-力耦合特性的大型试验设备和现场实测设备, 特别是缺乏水热方面的现场实测资料。

(3) 对冻胀引起的裂隙扩展演化已引起关注, 但对融化及温度变化引起的裂隙动态变化考虑不足(须知隧洞是以冻胀破坏为主, 但边坡则以热融滑塌为主)。尚未建立起考虑冻融全过程以及冻融循环作用的低温岩体裂隙动态演化方程, 真实反映裂隙演化过程的数值模拟方法更是鲜有报道。

(4) 低温岩体冻融灾害涉及微观层面的水热迁移、细观层面的裂隙演化和宏观层面的变形破坏, 目前尚未建立起综合考虑微-细-宏观试验结果和测试分析的水-热-力耦合模型, 更没有开发出可靠的考虑低温相变和裂隙演化的多场耦合数值分析程序。

参考文献(References):

- [1] BIRD K J, CHARPENTIER R R, GAUTIER D L, et al. Circum-arctic resource appraisal: Estimates of undiscovered oil and north of the arctic circle[J]. USGS Fact Sheet, 2008, 3049: 1-4.
- [2] 康永水. 裂隙岩体冻融损伤力学特性及多场耦合过程研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.(KANG Yongshui. Study on mechanical characteristics of damage due to freeze-thaw action in fractured rock mass and multi-field coupling in freezing rock[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.(in Chinese))
- [3] 陈卫忠, 谭贤君, 于洪丹, 等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1318-1336.(CHEN Weizhong, TAN Xianjun, YU Hongdan, et al. Advance and review on thermo-hydro-mechanical characteristics of rock mass under condition of flow temperature and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1318-1336.(in Chinese))
- [4] 陈仁升, 康尔泗, 吴立宗, 等. 中国寒区分布探讨[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 469-474.(CHEN Rensheng, KANG Ersi, WU Lizong, et al. Cold regions in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4): 469-474.(in Chinese))
- [5] 孙太岩. 国内外寒区隧道冻害现状综述[J]. 科技风, 2014, (21): 129.(SUN Taiyan. Summary of the current situation of tunnel frost damage in cold regions at home and abroad[J]. Technology Wind, 2014, (21): 129.(in Chinese))
- [6] 李建军, 朱玉. 高速公路季节性冻土路基设计理论及病害防治对策研究[J]. 公路交通科技, 2016, 12(1): 10-12.(LI Jianjun, ZHU Yu. Study on the design theory and disease prevention measures of seasonal frozen soil roadbed on freeways[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 12(1): 10-12.(in Chinese))
- [7] 闫永富, 王文才, 师强强. 白云西矿冻融期软岩边坡变形分析[J]. 金属矿山, 2022, (6): 160-166.(YAN Yongfu, WANG Wencai, SHI Qiangqiang, et al. Analysis of deformation of soft rock slope during freeze-melting period of Baiyun West Mine[J]. Metal Mine, 2022, (6): 160-166.(in Chinese))
- [8] 徐拴海, 李 宁, 袁克阔, 等. 融化作用下含冰裂隙冻岩强度特性及寒区边坡失稳研究现状[J]. 冰川冻土, 2016, 38(4): 1106-1120.(XU Shuanhai, LI Ning, YUAN Kekuo, et al. Strength behavior of frozen fractured ice-filled rock mass and research status of slope instability during thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(4): 1106-1120.(in Chinese))
- [9] 徐 彬, 李 宁, 李仲奎, 等. 低温液化石油气和液化天然气储库及相关岩石力学研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 2977-2993.(XU Bin, LI Ning, LI Zhongkui, et al. Low-temperature lpg and lng storage caverns and related research review of rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 2977-2993.(in Chinese))
- [10] 敖 松. 复杂空间条件下冻结帷幕与冻结孔布置可视化设计[J]. 市政技术, 2022, (6): 40.(AO Song. Visualized design for freezing wall and freezing hole layout under complex space condition[J]. Municipal Engineering Technology, 2022, (6): 40.(in Chinese))
- [11] 崔 凯, 刘桂山, 吴国鹏, 等. 不同条件下贺兰口岩画载体岩石冻融损伤特征与机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1797-1808.(CUI Kai, LIU Guishan, WU Guopeng, et al. Study on the characteristics and mechanisms of freeze-thaw damage of rock carrier of Helankou rock paintings under different conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1797-1808.(in Chinese))
- [12] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 452-471.(LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Advance and review on freezing-thawing damage of fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 452-471.(in Chinese))
- [13] 杨更社. 冻结岩石力学的研究现状与展望分析[J]. 力学与实践, 2009, 31(6): 11-18.(YANG Gengshe. A review on frozen rock mechanics[J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(6): 11-18.(in Chinese))
- [14] GAMBINO G F, HARRISON J P. Rock Engineering design in frozen and thawing rock: current approaches and future directions[J].

- Procedia Engineering, 2017, 191: 656 – 665.
- [15] LAI Y M, XU X T, DONG Y H, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 87: 6 – 28.
- [16] 陈飞熊. 饱和正冻土温度场、水分场和变形场三场耦合理论构架[博士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2001.(CHEN Feixiong. The fully coupled modeling of the thermal-moisture-deformation behavior for the saturated freezing soils[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2001.(in Chinese))
- [17] AKAGAWA S, FUKUDA M. Frost heave mechanism in welded tuff[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1991, 2(4): 301 – 309.
- [18] MURTON J B, PETERSON R, OZOUF J C. Bedrock fracture by ice segregation in cold regions[J]. Science, 2006, 314: 1127.
- [19] 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))
- [20] WALDER J, HALLET B. A theoretical model of the fracture of rock during freezing[J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, 96(3): 336 – 346.
- [21] OZAWA H. Thermodynamics of frost heaving: A thermodynamic proposition for dynamic phenomena[J]. Physical Review E, 1997, 56(3): 2 811 – 2 816.
- [22] 刘乃飞, 李 宁, 宋战平, 等. 低温裂隙岩体的各向异性传热模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增 1): 2 625 – 2 635.(LIU Naifei, LI Ning, SONG Zhanping, et al. The anisotropic heat-transfer model of fractured rock mass in cold regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Supp.1): 2 625 – 2 635. (in Chinese))
- [23] VIGNES M, DIJKEMA K M. A model for the freezing of water in a dispersed medium[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1974, 49(2): 165 – 172.
- [24] ALST L J V. Laboratory experiments in cold temperature rock deformation[Ph. D. Thesis][D]. Oregon: University of Oregon, 2011.
- [25] 王莉平, 李 宁, 刘乃飞, 等. 低温岩体裂隙中水分迁移机制试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 999 – 1 006.(WANG Liping, LI Ning, LIU Naifei, et al. Experimental research on mechanism of water migration in rock fracture at low temperature[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 999 – 1 006.(in Chinese))
- [26] WANG L P, LI N, TIAN Y Z, et al. Experimental study of capillary water migration in vertically parallel-plate fractures in rock masses in cold regions[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(1): 128.
- [27] SASS O. Rock moisture fluctuations during freeze-thaw cycles: preliminary results from electrical resistivity measurements[J]. Polar Geography, 2004, 28(1): 13 – 31.
- [28] HARRIS C, ARENSON L U, CHRISTIANSEN H H, et al. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modeling thermal, geomorphological and geotechnical responses[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(3): 117 – 171.
- [29] DERJAGUIN B V, CHURAEV N V. The definition of disjoining pressure and its importance in the equilibrium and flow of thin films[J]. Research Gate, 1976, 38(3): 402 – 410.
- [30] WILEN L A, DASH J G. Frost heave dynamics at a single crystal interface[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(25): 5 076 – 5 082.
- [31] WETTLAUFER J S, WORSTER M G. Preemmelting dynamics[J]. Annu Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 427 – 452.
- [32] WANG T, JIA H L, SUN Q, et al. Effects of thawing-induced softening on fracture behaviors of frozen rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(3): 979 – 989.
- [33] VLAHOU I, WORSTER M G. Ice growth in a spherical cavity of a porous medium[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(196): 271 – 277.
- [34] 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))
- [35] LIU N F, LI N, WANG S J, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for fractured rock masses in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 205(1): 103707.
- [36] PARK C, SYNN J H, SHIN H S, et al. Experimental study on the thermal characteristics of rock at low temperatures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 1 – 6.
- [37] 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 and multiphysical coupling problems of rock at low temperatures[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [38] 屈永龙. 新庄煤矿白垩系砂岩冻结状态下物理力学特性试验研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西安科技大学, 2014.(QU Yonglong. Experimental study on physical and mechanical properties of xinzhuang mine cretaceous sandstone under freezing conditions[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014.(in Chinese))
- [39] 刘 巍, 张进鹏, 刘立民, 等. 袁大滩煤矿风化岩土体冻结热参数及单轴压缩试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版,

- 2019, 38(5): 31 - 38.(LIU Wei, ZHANG Jinpeng, LIU Limin, et al. Experimental study on freezing thermal parameters and uniaxial compression of weathered rock and soil in Yuandatan coal mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2019, 38(5): 31 - 38.(in Chinese))
- [40] 徐拴海, 李 宁, 许刚刚, 等. 冻融环境中饱和岩石的热量传递与温度平衡规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2 225 - 2 236.(XU Shuanhai, LI Ning, XU Ganggang, et al. Thermal transfer and heat balance of saturated rock under freezing-thawing environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2 225 - 2 236.(in Chinese))
- [41] 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.
- [42] LEE G S, JEON S W, LEE C I. Prediction of the temperature distribution around a food storage cavern: the analysis of three-dimensional heat transfer in a fractured rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 491.
- [43] GOODALL D C, UTHEIM T, THORBERGSEN E. Back analysis of heat loads on selected thermal storage[C]// International Conference on Storage of Gases in Rock Caverns. [S. l.]: [s. n.], 1989: 219 - 226.
- [44] SYNN J H, PARK C, PARK Y, et al. Analysis of heat transfer and heat load on underground cold storage cavern[C]// Proceedings of the 9th International Congress of International Society of Rock Mechanics. Paris: Rotterdam A. A. Balkema, 1999: 57 - 59.
- [45] 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))
- [46] 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): 48 - 52.(CHEN Jianxun, LUO Yanbin. Changing rules of temperature field for tunnel in cold area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 48 - 52.(in Chinese))
- [47] 李 思, 孙克国, 仇文革, 等. 寒区隧道温度场的围岩热学参数影响及敏感性分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增1): 117 - 122.(LI Si, SUN Keguo, QIU Wenge, et al. Influence and sensitivity analysis of surrounding rock thermal parameters on temperature field of cold region tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(Supp.1): 117 - 122.(in Chinese))
- [48] 宋 雷, 王国柱, 杨成立, 等. 渗流裂隙岩体冻结温度场模型试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1 256 - 1 263.(SONG Lei, WANG Guozhu, YANG Chengli, et al. Model test study on freezing temperature field of seepage fissure rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(6): 1 256 - 1 263.(in Chinese))
- [49] 郭 瑞, 郑 波, 方 林, 等. 寒区隧道纵向温度场分布特征的模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 129 - 139.(GUO Rui, ZHENG Bo, FANG Lin, et al. Model test study on distribution characteristics of longitudinal temperature field in tunnels in cold regions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(5): 129 - 139.(in Chinese))
- [50] 谭贤君, 褚以悖, 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))
- [51] 李云鹏, 王芝银. 花岗岩低温热力效应参数及强度规律研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 321 - 326.(LI Yunpeng, WANG Zhiyin. Study of parameters and strength of thermal effects for granite under low temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 321 - 326.(in Chinese))
- [52] SHEN Y J, WANG Y Z, YANG Y, et al. Influence of surface roughness and hydrophilicity on bonding strength of concrete-rock interface[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 213: 156 - 166.
- [53] LIU N F, LIN, LI G F, et al. Method for evaluating the equivalent thermal conductivity of a freezing rock mass containing systematic fractures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 7 333 - 7 355.
- [54] 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, 23(2): 126 - 130.(LAI Yuanming, YU Wenbing, WU Ziwan, et al. Approximate analytical solution for the temperature field of a circular tunnel in cold regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 126 - 130.(in Chinese))
- [55] LAI Y M, ZHANG X F, YU W B, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for the coupled problem of the heat transfer of the surrounding rock and the heat convection between the air and the surrounding rock in cold-region tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 323 - 332.
- [56] 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): 1 767 - 1 773.(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))
- [57] 周小涵, 曾艳华, 白 赟, 等. 基于圆形断面的隧道温度场有限

- 差分计算模型[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1 332 - 1 336.(ZHOU Xiaohan, ZENG Yanhua, BAI Yun, et al. Finite difference calculation model for tunnel temperature field based on circular cross-section[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11): 1 332 - 1 336.(in Chinese))
- [58] 孙克国, 徐雨平, 仇文革, 等. 寒区隧道温度场分布规律及围岩特性影响[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 67 - 72.(SUN Keguo, XU Yuping, QIU Wenge, et al. On temperature field distribution and the effects of surrounding rock properties on tunnels in cold regions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 67 - 72.(in Chinese))
- [59] CHEN L, YU W B, YI X, et al. Numerical simulation of heat transfer of the crushed-rock interlayer embankment of Qinghai - Tibet Railway affected by Aeolian sand clogging and climate change[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155(Nov.): 1 - 10.
- [60] 那通兴, 张国柱, 陈俊栋. 寒区隧道含相变围岩传热渗流耦合数值分析[J]. 隧道建设, 2018, 38(增 2): 153 - 159.(NA Tongxing, ZHANG Guozhu, CHEN Jundong. Coupling numerical analysis of heat transfer and seepage flow of surrounding rocks with phase transition in cold region tunnels[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(Supp.2): 153 - 159.(in Chinese))
- [61] 雷飞亚. 考虑相变过程岩体孔隙率对寒区隧道温度场时空规律影响研究[J]. 隧道建设, 2019, 39(增 1): 245 - 256.(LEI Feiya. Study on influence of rock porosity on time-space laws of rock mass temperature field of tunnel in cold region considering phase transition[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(Supp.1): 245 - 256.(in Chinese))
- [62] 王志杰, 周飞聪, 周 平, 等. 高寒高海拔隧道保温层敷设方式及设计参数优化[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 182 - 194.(WANG Zhijie, ZHOU Feicong, ZHOU Ping, et al. Laying method and design parameter optimization of the thermal insulation layer in alpine and altitude tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8): 182 - 194.(in Chinese))
- [63] LIU H, FENG X Z, YANG G S, et al. Numerical study on surrounding rock mass temperature field of Kangding tunnel No. 2 considering wind flow[J]. Research in Cold and Arid Regions, 2022, 14(5): 298 - 306.
- [64] HE W W, SHENG Y, CAO W, et al. Thermal stability prediction of frozen rocks under fluctuant airflow temperature in a vertical shaft based on finite difference and finite element methods[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 52: 103700.
- [65] 高 娟, 冯梅梅, 杨维好. 渗流作用下裂隙岩体冻结温度场分布规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 68 - 73.(GAO Juan, FENG Meimei, YANG Weihao. Research on distribution law of frozen temperature field of fractured rock mass with groundwater seepage[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(1): 68 - 73.(in Chinese))
- [66] ALZOUBI M A, XU M, HASSANI F P, et al. Artificial ground freezing: A review of thermal and hydraulic aspects[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103534.
- [67] 高 焱, 朱永全, 赵东平, 等. 隧道寒区划分建议及保温排水技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增 1): 3 489 - 3 498.(GAO Yan, ZHU Yongquan, ZHAO Dongping, et al. Study on classified suggestion of tunnel in cold region and thermal insulation-considered drainage technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Supp.1): 3 489 - 3 498.(in Chinese))
- [68] 谌 彪. 冻融循环作用下花岗岩损伤特性的试验研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.(CHEN Biao. Experimental study on the damage characteristics of granite under the effect of freezing and thawing cycles[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.(in Chinese))
- [69] 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 Science, 2001, 38(7): 1 029 - 1 034.
- [70] YAVUZ H, ALTINDAG R, SARAC S, et al. Estimating the index properties of deteriorated carbonate rocks due to freeze-thaw and thermal shock weathering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(5): 767 - 775.
- [71] PARK J, HYUN C U, PARK H D. Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(2): 555 - 565.
- [72] KOLAY E. Modeling the effect of freezing and thawing for sedimentary rocks[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 210(75): 505 - 515.
- [73] 闻 磊, 李夕兵, 唐海燕, 等. 变温度区间冻融作用下岩石物理力学性质研究及工程应用[J]. 工程力学, 2017, 34(5): 247 - 256.(WEN Lei, LI Xibing, TANG Haiyan, et al. Study of physico-mechanical characteristics of rock under different frozen-thawed circle temperature range and its engineering application[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(5): 247 - 256.(in Chinese))
- [74] 傅鹤林, 张加兵, 黄 震, 等. 冻融循环作用下板岩弹性参数及单轴抗压强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2 203 - 2 212.(FU Helin, ZHANG Jiabing, HUANG Zhen, et al. Experimental study on elastic parameters and uniaxial compressive strength of slate under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2 203 - 2 212.(in Chinese))
- [75] TAN X J, YANG J P, CHEN W Z, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68: 130 - 138.
- [76] 贾海梁, 刘清秉, 项 伟, 等. 冻融循环作用下饱和砂岩损伤扩

- 展模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3 049 - 3 055.
- (JIA Hailiang, LIU Qingbing, XIANG Wei, et al. Damage evolution model of saturated sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Supp.2): 3 049 - 3 055.(in Chinese))
- [77] 奚家米, 付 垒, 贾晓峰, 等. 不同冻融状态下白垩系常见岩层物理力学特性对比分析[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 253 - 259.(XI Jiami, FU Lei, JIA Xiaofeng, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of Cretaceous rock under freezing-thawing action[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 253 - 259.(in Chinese))
- [78] WANG L P, LI N, QI J L, et al. A study on the physical index change and triaxial compression test of intact hard rock subjected to freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 39 - 47.
- [79] 田 森, 赵 映, 司 鹄, 等. 寒区露天矿岩质边坡裂隙岩体冻融损伤特征及力学特性试验研究[J/OL]. 煤炭学报, 2024, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0474>.(TIAN Sen, ZHAO Ying, SI Hu, et al. Experimental study on freeze-thaw damage characteristics and mechanical properties of fractured rock mass of open-pit mine slope in cold region[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2024, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.0474>.(in Chinese))
- [80] 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))
- [81] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构特征测定[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(12): 4 796 - 4 800.(ZHOU Keping, LI Jielin, XU Yujuan, et al. Measurement of rock pore structure based on NMR technology[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(12): 4 796 - 4 800.(in Chinese))
- [82] LI J L, KAUNDA R B, ZHOU K P. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154: 133 - 141.
- [83] 宋勇军, 张 君, 陈佳星, 等. 裂隙砂岩未冻水含量演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 575 - 584.(SONG Yongjun, ZHANG Jun, CHEN Jiaying, et al. Study on evolution characteristics of unfrozen water content in fractured sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 575 - 584.(in Chinese))
- [84] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 岩体冻融疲劳损伤模型与评价指标研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1 116 - 1 127.(LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Fatigue damage model and evaluation index for rock mass under freezing-thawing cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1 116 - 1 127.(in Chinese))
- [85] HUANG S B, LIU F, LIU G, et al. Estimation of the unfrozen water content of saturated sandstones by ultrasonic velocity[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, 33(6): 733 - 746.
- [86] DAVIDSON G P, NYE J F. A photoelastic study of ice pressure in rock cracks[J]. Cold Regions Science and Technology, 1985, 11(2): 141 - 153.
- [87] 黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等. 低温岩体裂隙冻胀力与冻胀扩展试验初探[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 78 - 84.(HUANG Shibing, LIU Quansheng, CHENG Aiping, et al. Preliminary experimental study of frost heaving pressure in crack and frost heaving propagation in rock mass under low temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 78 - 84.(in Chinese))
- [88] 单仁亮, 白 瑶, 孙鹏飞, 等. 裂隙红砂岩冻胀力特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1 742 - 1 752.(SHAN Renliang, BAI Yao, SUN Pengfei, et al. Experimental study on frost heaving pressure properties in fractured red sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1 742 - 1 752.(in Chinese))
- [89] LIU H, YUAN X, XIE T. A damage model for frost heaving pressure in circular rock tunnel under freezing-thawing cycles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 401 - 408.
- [90] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 低温环境下含表面裂隙硬岩温度场及冻胀演化过程分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增1): 521 - 529.
- (SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Analysis of evolution of temperature field and frost heaving in hard rock with surface cracks under low temperature environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Supp.1): 521 - 529.(in Chinese))
- [91] KODAMA J, GOTO T, FUJII Y, et al. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 62: 1 - 13.
- [92] 唐明明, 王芝银, 孙毅力, 等. 低温条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 787 - 794.(TANG Mingming, WANG Zhiyin, SUN Yili, et al. Experimental study of mechanical properties of granite under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 787 - 794.(in Chinese))
- [93] 奚家米, 杨更社, 庞 磊, 等. 低温冻结作用下砂质泥岩基本力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1 262 - 1 268.(XI Jiami, YANG Gengshe, PANG Lei, et al. Experimental study on basic mechanical behaviors of sandy mudstone under low freezing temperature[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1 262 -

- 1 268.(in Chinese))
- [94] 李纯纯, 熊 峰, 张国华, 等. 超低温作用下花岗岩力学特性及地下 LNG 储库稳定性研究[J/OL]. 岩土工程学报, 2024, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20240925.1124.016.html>.(LI Chunchun, XIONG Feng, ZHANG Guohua, et al. Study on mechanical properties of granite under ultra-low temperature and stability of underground LNG storage facility[J/OL]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20240925.1124.016.html>.(in Chinese))
- [95] ZHOU S T, ZHANG Z X, LUO X D, et al. Predicting dynamic compressive strength of frozen-thawed rocks by characteristic impedance and data-driven methods[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16: 2 591 – 2 606.
- [96] YANG H, SHAN R L, ZHANG J X, et al. Mechanical properties of frozen rock mass with two diagonal intersected fractures[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(4): 631 – 638.
- [97] 赵 涛, 冯云枫, 贾海梁, 等. 冰充填裂隙对冻结岩体压缩破坏特征的影响研究[J]. 冰川冻土, 2024, 46(4): 1 246 – 1 258.(ZHAO Tao, FENG Yunfeng, JIA Hailiang, et al. Study on the effects of the ice-filled fissure on the failure features of frozen rock mass[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024, 46(4): 1 246 – 1 258. (in Chinese))
- [98] LIU K, WANG T T. Dynamic mechanical behaviours of frozen rock under sub-zero temperatures and dynamic loads[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2024, 180: 105813.
- [99] 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.
- [100] MA Q, MA D, YAO Z. Influence of freeze – thaw cycles on dynamic compressive strength and energy distribution of soft rock specimen[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153(SEP.): 10 – 17.
- [101] 徐拴海, 田延哲, 李 宁. 冻融循环条件下粗砂岩物理力学性质变化规律[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5): 102 – 107.(XU Shuanhai, TIAN Yanzhe, LI Ning, et al. Variation of physical and mechanical characteristics of coarse sandstone during freezing and thawing cycles[J]. Coal Geology and Exploration, 2016, 44(5): 102 – 107.(in Chinese)).
- [102] 李 平, 唐旭海, 刘泉声, 等. 双裂隙类砂岩冻胀断裂特征与强度损失研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 115 – 125.(LI Ping, TANG Xuhai, LIU Quansheng, et al. Experimental study on fracture characteristics and strength loss of intermittent fractured quasi-sandstone under freezing and thawing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 115 – 125.(in Chinese))
- [103] 乔 趁, 王 宇, 宋正阳, 等. 饱水裂隙花岗岩周期冻胀力演化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2 141 – 2 150.(QIAO Chen, WANG Yu, SONG Zhengyang, et al. Experimental study on the evolution characteristics of cyclic frost heaving pressure of saturated fractured granite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2 141 – 2 150.(in Chinese))
- [104] 乔 趁, 李长洪, 王 宇, 等. 冻融循环作用下中部锁固岩桥破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1 094 – 1 103. (QIAO Chen, LI Changhong, WANG Yu, et al. Experimental study on failure of central rock bridge under freeze-thaw cycle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(6): 1 094 – 1 103.(in Chinese))
- [105] 李栋伟, 汪仁和, 范菊红. 白垩系冻结软岩非线性流变模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 398 – 403.(LI Dongwei, WANG Renhe, FAN Juhong. Nonlinear rheological model for frozen soft rock during Cretaceous period[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 398 – 403.(in Chinese))
- [106] 单仁亮, 白 瑶, 孙鹏飞, 等. 冻结层状红砂岩三轴蠕变特性及本构模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 12 – 22.(SHAN Renliang, BAI Yao, SUN Pengfei, et al. Study of triaxial creep mechanical properties and constitutive model of frozen stratified red sandstone[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(1): 12 – 22.(in Chinese))
- [107] 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 低温环境下红砂岩蠕变特性及其模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2 795 – 2 803.(SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Creep property and model of red sandstone under low temperature environment[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2 795 – 2 803.(in Chinese))
- [108] LI Z Y, YANG G S, WEI Y, et al. Construction of nonlinear creep damage model of frozen sandstone based on fractional-order theory[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 196: 103517.
- [109] 赵 越, 李 磊, 闫 晗, 等. 水化 – 冻融耦合作用下大理岩单轴蠕变力学特性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2023, 53(4): 1 195 – 1 203.(ZHAO Yue, LI Lei, YAN Han, et al. Uniaxial creep mechanical properties of marble under hydration freeze-thaw coupling[J]. Journal of Jilin University: Earth Science, 2023, 53(4): 1 195 – 1 203.(in Chinese))
- [110] 张慧梅, 孟祥振, 彭 川, 等. 冻融 – 荷载作用下基于残余强度特征的岩石损伤模型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3 404 – 3 411. (ZHANG Huimei, MENG Xiangzhen, PENG Chuan, et al. Rock damage constitutive model based on residual intensity characteristics under freeze-thaw and load[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3 404 – 3 411.(in Chinese))
- [111] 张慧梅, 孟祥振, 彭 川, 等. 岩石变形全过程冻融损伤模型及其参数[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(2): 260 – 265.(ZHANG Huimei, MENG Xiangzhen, PENG Chuan, et al. Freeze-thaw damage model and parameters of rock deformation in whole process[J].

- Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(2): 260 - 265.(in Chinese))
- [112] LIU H, YANG G, YUN Y, et al. Investigation of sandstone mesostructure damage caused by freeze - thaw cycles via ct image enhancement technology[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 155: 8875814.
- [113] 刘 慧, 杨更社, 申艳军. 冻融 - 受荷协同作用下砂岩细观损伤演化 CT 可视化定量表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(5): 1 136 - 1 149.(LIU Hui, YANG Gengshe, SHEN Yanjun. CT visual quantitative characterization of meso-damage evolution of sandstone under freeze-thaw-loading synergistic effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(5): 1 136 - 1 149.(in Chinese))
- [114] ZHAO Y C, LI S Y, ZHAO J Y, et al. A temperature-dependent elastoplastic damage model for frozen sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 208: 103792.
- [115] 李 宁, 张 平, 程国栋. 冻结裂隙砂岩低周循环动力特性试验研究[J]. 自然科学进展, 2001, (11): 57 - 62.(LI Ning, ZHANG Ping, CHENG Guodong. Experimental study on dynamic characteristics of frozen crack sandstone[J]. Progress in Natural Science, 2001, (11): 57 - 62.(in Chinese))
- [116] 李新平, 路亚妮, 王仰君. 冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2 307 - 2 315.(LI Xinping, LU Yani, WANG Yangjun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2 307 - 2 315.(in Chinese))
- [117] 阎锡东, 刘红岩, 邢闯锋, 等. 基于微裂隙变形与扩展的岩石冻融损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3 489 - 3 499.(YAN Xidong, LIU Hongyan, XING Chuangfeng, et al. Constitutive model research on freezing-thawing damage of rock based on deformation and propagation of microcracks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3 489 - 3 499.(in Chinese))
- [118] 王永岩, 朱思文. 冻融循环下含裂隙类岩石试件强度特性的研究[J]. 徐州工程学院学报: 自然科学版, 2018, 33(2): 25 - 29.(WANG Yongyan, ZHU Siwen. Study on strength characteristics of fractured rock specimens under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Science, 2018, 33(2): 25 - 29.(in Chinese))
- [119] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温冻结岩体单裂隙冻胀力与数值计算研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1 572 - 1 580.(LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Numerical and theoretical studies on frost heaving pressure in a single fracture of frozen rock mass under low temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1 572 - 1 580.(in Chinese))
- [120] 徐拴海, 李 宁, 王晓东, 等. 露天煤矿冻岩边坡饱和砂岩冻融损伤试验与劣化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2 561 - 2 571.(XU Shuanhai, LI Ning, WANG Xiaodong, et al. Damage test and degradation model of saturated sandstone due to cyclic freezing and thawing of rock slopes of open-pit coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2 561 - 2 571.(in Chinese))
- [121] 刘艳章, 郭赞林, 黄诗冰, 等. 冻融作用下裂隙类砂岩断裂特征与强度损失研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增 2): 62 - 71.(LIU Yanzhang, GUO Yunlin, HUANG Shibing, et al. Study of fracture characteristics and strength loss of crack quasi-sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Supp.2): 62 - 71.(in Chinese))
- [122] MATSUOKA N. A laboratory simulation on freezing expansion of a fractured rock: preliminary data[R]. Tsukuba: The University of Tsukuba, 1995.
- [123] 康永水, 刘泉声, 赵 军, 等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2 518 - 2 526.(KANG Yongshui, LIU Quansheng, ZHAO Jun, et al. Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2 518 - 2 526.(in Chinese))
- [124] 刘红岩, 赵雨霞. 冻融循环下隧道围岩冻胀力理论计算[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51(4): 1 049 - 1 058.(LIU Hongyan, ZHAO Yuxia. Theoretical calculation of frost heaving pressure in tunnel surrounding rock during freeze-thaw cycles[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51(4): 1 049 - 1 058.(in Chinese))
- [125] 刘泉声, 黄诗冰, 康永水, 等. 低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2 000 - 2 012.(LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2 000 - 2 012.(in Chinese))
- [126] 黄诗冰, 刘泉声, 刘艳章, 等. 低温热力耦合下岩体椭圆孔(裂隙)中冻胀力与冻胀开裂特征研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 459 - 467.(HUANG Shibing, LIU Quansheng, LIU Yanzhang, et al. Frost heaving pressure and characteristics of frost cracking in elliptical cavity(crack) of rock mass under coupled thermal-mechanical condition at low temperature[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 459 - 467.(in Chinese))
- [127] 严 健, 何 川, 周子寒, 等. 寒区裂隙冻岩隧道岩-水-冰力原位测试及冻胀力模型[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增 1): 300 - 305.(YAN Jian, HE Chuan, ZHOU Zihan, et al. Frost heaving force computational model of tunnel with frozen rock containing fissures and rock- hydraulic- ice pressure in situ test in cold region[J].

- China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Supp.1): 300 - 305.(in Chinese))
- [128] ZHANG J M, GUO L. A fully coupled thermo-mechanical peridynamic model for cracking analysis of frozen rocks[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 164: 105809.
- [129] 吕志涛, 吴明超, 段君义, 等. 冻结岩体裂隙冻胀扩展的相场法模拟[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11): 2 258 - 2 267.(LÜ Zhitao, WU Mingchao, DUAN Junyi, et al. Phase-field modeling of frost propagation of cracks for rock mass under frost action[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2 258 - 2 267.(in Chinese))
- [130] SUN L, TANG X H, ZEEMAN B, et al. Numerical investigation of the path-dependent frost heave process in frozen rock under different freezing conditions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.02.031.
- [131] ZHOU Y, TIAN X J, YANG D S. A numerical method to consider the interaction between multiple fractures in frozen rocks based on XFEM[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 169: 106240.
- [132] 刘泉声, 康永水, 刘 滨, 等. 裂隙岩体水 - 冰相变及低温温度场 - 渗流场 - 应力场耦合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2 181 - 2 188.(LIU Quansheng, KANG Yongshui, LIU Bin, et al. Water-ice phase transition and thermo-hydro-mechanical coupling at low temperature in fractured rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2 181 - 2 188.(in Chinese))
- [133] 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.
- [134] NASIR O, FALL M, NGUYEN S T, EVGIN E. Modeling of the thermo-hydro-mechanical-chemical response of sedimentary rocks to past glaciations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 64: 160 - 174.
- [135] 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))
- [136] LAI Y M, ZHANG X F, YU W B, et al. Three - dimensional nonlinear analysis for the coupled problem of the heat transfer of the surrounding rock and the heat convection between the air and the surrounding rock in cold-region tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(4): 323 - 332.
- [137] 马静嵘, 杨更社. 软岩冻融损伤的水 - 热 - 力耦合研究初探[J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 5.(MA Jingrong, YANG Gengshe. Preliminary study on moisture-heat-stress couple of soft rock freezing-thawing damage[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 5.(in Chinese))
- [138] TAN X, CHEN W, LIU H, et al. A unified model for frost heave pressure in the rock with a penny-shaped fracture during freezing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153(SEP): 1 - 9.
- [139] CHEN W, TAN X, YU H, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for unsaturated porous media[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 1(1): 31 - 40.
- [140] KANG Y S, LIU Q S, HUANG S B. A fully coupled thermos-hydro-mechanical model for rock mass under freezing/thawing condition[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 95: 19 - 26.
- [141] HUANG S B, LIU Q S, CHENG A P, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model including the determination of coupling parameters for freezing rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 205 - 214.
- [142] LIU Q S, HUANG S B, KANG Y S, et al. A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 120: 96 - 107.
- [143] 黄诗冰, 刘泉声, 程爱平, 等. 低温裂隙岩体水 - 热耦合模型研究及数值分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 735 - 744.(HUANG Shibing, LIU Quansheng, CHENG Aiping, et al. A coupled hydro-thermal model of fractured rock mass under low temperature and its numerical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 735 - 744.(in Chinese))
- [144] 刘乃飞. 寒区裂隙岩体变形 - 水分 - 热质 - 化学四场耦合理论构架研究[博士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2017.(LIU Naifei. The fully coupled modeling of the deformation-hydraulic-thermal-chemical behavior for the fractured rock mass in cold regions[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.(in Chinese))
- [145] LI G F, LI N, BAI Y, et al. A novel simple practical thermal-hydraulic-mechanical(THM) coupling model with water-ice phase change[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118: 103357.
- [146] 盛金昌, 许孝臣, 姚德生, 等. 流固化学耦合作用下裂隙岩体渗透特性研究进展[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 996 - 1 006.(SHENG Jinchang, XU Xiaochen, YAO Desheng, et al. Advances in permeability evolution in fractured rocks during hydro-mechanical-chemical processes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(7): 996 - 1 006.(in Chinese))
- [147] 刘泉声, 康永水, 黄 兴, 等. 裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 971 - 978.(LIU Quansheng, KANG Yongshui, HUANG Xing, et al. Critical problems of freeze-thaw damage in fractured rock and their research status[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 971 - 978.(in Chinese))