

裂隙岩体冻融损伤研究进展与思考

刘泉声^{1,2}, 黄诗冰¹, 康永水¹, 崔先泽¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 裂隙岩体具有不同于土体的结构和强度特征, 现有冻土理论不能解决低温岩体裂隙冻胀开裂、扩展演化问题, 冻融过程中水分迁移机制、冻胀力的量值与萌生消散机制以及裂隙冻融扩展演化机制等是研究裂隙岩体冻融损伤的关键问题。对裂隙岩体中的水分迁移机制研究应立足于微观尺度, 从分凝冰理论入手, 关注于未冻水膜的迁移机制。低温裂隙岩体冻融损伤程度受到裂隙中冻胀力大小控制, 而冻胀力大小和裂隙冻融扩展机制与裂隙的空间位置形态、未冻水含量、冻结温度以及岩石的物理力学性质等因素有关。几十年来, 对岩体冻融裂隙扩展的研究主要集中在理论模型探究、室内裂隙岩体冻融试验和现场监测分析 3 个方面, 取得了丰硕的成果, 但目前关于冻岩的研究还远未成熟, 要深入揭示裂隙岩体冻融损伤演化机制, 还应借助于室内试验从裂隙岩体冻融水分迁移机制入手, 以探究冻胀力量值的求解方法为初步目标, 进而结合岩体裂隙扩展准则研究冻胀力对岩体裂隙网络发展的影响。

关键词: 岩石力学; 裂隙岩体; 水分迁移; 冻胀力; 冻融扩展

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)03-0452-20

ADVANCE AND REVIEW ON FREEZING-THAWING DAMAGE OF FRACTURED ROCK

LIU Quansheng^{1,2}, HUANG Shibing¹, KANG Yongshui¹, CUI Xianze¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of

Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: The structure and strength of fractured rock mass are different from those of soil, so the existing theory for frozen soil is not applicable to the problems of crack initiation, propagation and network development in rock mass under low temperature. The moisture migration and the pressure due to frost heaving in freezing-thawing process and the crack propagation after freezing-thawing process have been the key issues. The research on the mechanism of moisture migration should be based on the micro-scale and more attentions should be focused on the flow characteristics of unfrozen water film considering ice segregation. The damage degree of fractured rock under freezing-thawing is directly affected by the frost heaving pressure. However, the frost heaving pressure and crack extension are affected by many factors, such as the crack shape and the spatial position, the unfrozen-water content, the freezing temperature and the rock properties. During the last several decades, the efforts have been focused on the investigation of the extension of frost cracks with theoretical analysis, laboratory tests and field monitoring. Although remarkable achievements have been obtained, research on freezing fractured rock at

收稿日期: 2014-04-10; **修回日期:** 2014-07-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046904); 国家自然科学基金重点项目(41130742); 国家自然科学基金青年基金项目(41302237)

作者简介: 刘泉声(1962-), 男, 博士, 1983年毕业于山东矿业学院矿山建设专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn。通讯作者: 黄诗冰(1989-), 男, 现为博士研究生, 主要从事于低温岩体冻融损伤特性与低温多场耦合方面的研究工作。E-mail: huang1989.9@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.03.003

present is far from mature. In order to reveal the mechanism of damage development of fractured rock mass under freezing-thawing, future studies should be based on the investigation of water migration in fractured rock mass with laboratory tests and the establishment of calculation method of frost heaving pressure. Then, the influence of frost heaving pressure on the development of fracture network can be studied combined with the criterion of crack extension.

Key words : rock mechanics ; fractured rock mass ; water migration ; frost heaving pressure ; frost crack propagation

1 引言

寒区岩土工程、液化天然气和石油气低温地质储存^[1]以及冻结法施工^[2-3]等低温岩土工程建设都涉及岩土体的冻胀融缩问题。目前关于寒区冻土和浅表冻土层冻胀研究较多^[4-7]，而对寒区岩体、尤其是裂隙岩体的冻胀问题研究较少。富含大量宏观或微观裂隙是岩体的重要特征，是影响岩体强度的主要因素，也是影响岩体中工程建设安全重要的地质条件。邓红卫等^[8]指出，土与岩体的根本区别就是岩体中含有裂隙，影响岩体冻胀特性的主要因素是裂隙冰。水分在岩体裂隙中冻结成冰从而产生冻胀力，当冻胀力超过裂隙的扩展阈值时会驱动岩体裂隙扩展，甚至导致整个岩体的冻裂破坏。其中，裂隙岩体中的水分迁移机制、冻胀力的量值及其萌生消散机制、裂隙冻融开裂扩展机制和岩体多次冻融强度损失及稳定性评价等都是研究冻岩过程中亟待解决的关键问题。本文从裂隙岩体冻融损伤机制这一关键科学问题出发，主要对裂隙岩体中的冻融水分迁移机制、裂隙冻胀力大小及其影响因素和裂隙冻融扩展现场监测的研究进展进行了系统的归纳分析，并对裂隙岩体冻融损伤研究中亟待解决的热点和难点问题进行了探讨。

2 裂隙岩体与土体冻胀机制的差别与联系

由于结构特征和地质环境的差异，岩体与土体冻胀机制存在着很大的差别，研究方法和技术手段也不同。相对于土体而言，岩体强度较高、渗透性低，具有孔隙介质和裂隙介质的双重属性，仅仅利用土体冻胀理论无法解决岩体裂隙中水分迁移、冻胀力萌生消散以及裂隙扩展演化导致岩体损伤等一系列科学问题。此外，岩体中的水-冰-固体基质的时空演化机制也不同于土体(见图 1)，导致岩体与土体中的水冰相变条件和冻胀荷载量值等不同。

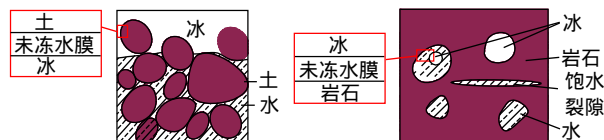


图 1 土体与岩体中水-冰-固体介质空间赋存状态对比

Fig.1 Water-ice-solid partition in soil and rock

但冻土的研究起步较早，目前不少关于裂隙岩体冻胀破坏机制的研究都借鉴冻土的研究成果。

20 世纪初，人们已经开始对冻土的物理性质、水分迁移机制以及冻胀现象等进行了大量的研究，提出了刚冰模型^[9-12]，水动力模型^[13-16]，分凝势模型^[17-19]，水热力耦合模型以及许多经验、半经验模型^[20-21]，李萍等^[22]对冻土中各类冻胀模型的研究也进行了较为系统的总结，赖远明等^[23-25]对冻土的多场耦合模型进行了深入的研究。而冻岩的研究历史却相对短暂，为了解释冻岩中的水冰相变机制，冰分凝理论被广泛接受，低温岩体 THM 耦合模型一直也是研究的热点^[26-28]，但一般仍然将岩体等效为连续介质，借助于各种冻土模型来开展岩体冻融损伤的研究，冻土研究中建立的冻胀模型和水分迁移模型为研究裂隙岩体冻融过程中孔隙介质和裂隙中的水分迁移机制、冻胀力量值和萌生消散机制提供了理论基础。对于均匀非裂隙岩体，S. Akagawa 和 M. Fukuda^[29]通过试验证明冻土中的分凝势理论同样适用，但对于一般性的工程岩体，裂隙的冻胀开裂对岩体的强度起着决定性的作用，如何构建冻融过程中岩体裂隙中的水分迁移理论显得尤为重要。

国内外学者很早以前就对裂隙岩体的冻融损伤机制进行了探索，也取得了较为丰富的成果，从研究内容上可以分为低温裂隙岩体冻融水分迁移机制、冻胀力与裂隙冻胀扩展研究以及现场试验监测 3 个方面。

3 裂隙岩体冻融水分迁移研究状况及关键问题

S. Taber^[30-31]提出土体冻胀不仅仅是由于水冰

相变体积膨胀造成，也是水分向冻结区迁移、聚集结冰的结果，此后陆续有多种不同的水分迁移理论产生。水分迁移被认为是引起岩土体冻胀损伤的主要原因，直接影响冻胀力及寒区岩土工程稳定。李宁等^[32]也指出，冻土的力学性质和冻胀、融沉性质主要取决于土体中的水热质迁移和水冰相变。事实上，现有的对于裂隙岩体冻融过程中的水分迁移基本理论仍是建立在冻土研究的基础之上，根据驱动力不同，主要分为两大类：毛细理论和冻结缘理论。

D. H. Everett^[33]提出的毛细理论，对冻融水分迁移通量和冻胀力进行了定量的分析和估算，认为冻结过程中的水分迁移是由于水冰界面产生的毛细吸力引起的。但毛细理论不能解释冰透镜体的形成，对冻胀力的估计也过低，其应用备受质疑^[32]。

R. D. Miller^[34-35]提出的第二冻胀理论认为冰透镜体下存在一个低含水率、低导湿率的区域——冻结缘，冻结缘的存在可以很好地解释冰透镜体的形成机制。水分在温度梯度等广义牵引力的作用下从未冻区经冻结缘向冰透镜体底端迁移并冻结，这一水分迁移现象已经被土体冻融试验所证实^[36-37]。第二冻胀理论和第一冻胀理论最基本的差别就是冻结缘的存在^[38](见图2)，冻结缘理论在裂隙岩体冻融损伤研究中也得到了广泛应用。

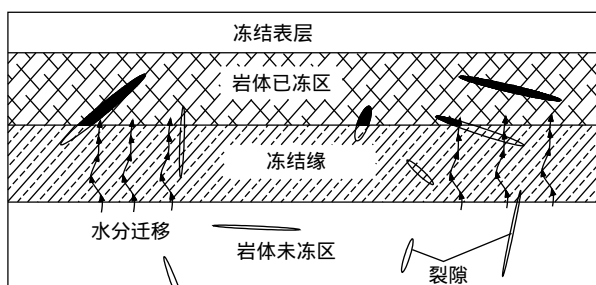


图2 冻岩三区分布图

Fig.2 Distribution of frozen rock with three zones

与土体一样，在冻融过程中裂隙岩体内也存在水分的迁移过程。O. Sass^[39]指出，在冻结点以下的岩层中存在着数量可观的未冻水和过冷水，并监测到水分向冻结区发生迁移，说明在岩体冻结过程中水分迁移现象同样存在。然而，国内外对裂隙岩体的水分迁移过程研究较少，迁移机制尚未达成共识，研究内容上主要集中在理论模型和室内试验2个方面。研究方法也分为2个层次：一是将岩体等效为连续介质，利用冻土相关理论研究低温岩体中的水分迁移机制；二是将裂隙岩体当作双重孔隙介质，主要研究冻融过程中岩体裂隙内的水分迁移机制。

国内外研究主要集中在第一个层次，而对冻融过程中岩体裂隙内的水分迁移机制研究较少。对于没有宏观裂隙的等效连续岩体，第二冻胀理论可以较好地解释未冻水向冻结区的迁移过程，但对于裂隙岩体而言，孔隙介质区域的冻胀损伤相对较小，裂隙中的水分迁移、冻结膨胀驱动裂隙扩展过程决定着岩体的强度。

3.1 水分迁移驱动力

裂隙岩体中的水分迁移研究，首先应该确定驱动力，对于冻土中的水分迁移驱动力，是一系列分子作用力共同作用的结果。为了确定冻土中水分迁移驱动力的大小，曾提出过14种假说^[36]，而关于裂隙岩体中的水分迁移驱动力主要分为以下5种：

(1) 压力势

压力势是岩体孔裂隙中的水压力超过基态静水压力而引起。在外荷载和上覆水层作用下，岩体孔裂隙中的水压会超过基态水压力，此外裂隙水冻结过程中体积膨胀也会产生冻胀压力势。

(2) 基质势

基质势是由于岩体中基质吸力做功引起的。主要由颗粒表面自由能，毛细势等组成。与土体中分布的大量毛细孔隙不同，岩体裂隙网络相对较为致密，连通性差，因此毛细势的作用并不强烈。

(3) 温度梯度势

在温度场作用下各点都存在不同的温度梯度势。分凝冰理论、薄膜水迁移理论都是以温度梯度作为主要驱动力。

(4) 重力势

在重力场作用下产生的相对于参考位置的势能差。在分析冻结缘处的水分迁移时，极少直接考虑重力势的影响，但建立水分迁移方程过程中重力势不容忽视。

(5) 溶质势

岩土介质中的溶质离子与水分子间存在吸引力，由于这些力的作用所产生的低于纯水的势能，也称为渗透势，故溶质势为负值。在含盐性的岩体和混凝土中溶质势是引起水质迁移的主要动力，但对于非盐渍寒区地带的裂隙岩体，可忽略溶质势的作用。

对于冻土而言，各种驱动力在不用情况下起主要作用，应根据实际地质与工程条件分别考虑，对于季节性冻土，原国红^[40]认为，只需考虑基质势和重力势的作用，并对各种水分迁移驱动力进行了详细的探讨。但对于裂隙岩体而言，现有研究一般只

考虑压力势、温度梯度势和重力势的作用。谭贤君等^[41]考虑压力势和温度梯度势的影响建立了岩体冻结过程中孔隙水的渗流输运过程方程，实现了含相变的冻结岩体水热全耦合。杨更社等^[42-43]结合软岩类材料的冻结试验得出温度梯度势是孔隙介质和裂隙中水分迁移的主要驱动力。但目前关于裂隙岩体冻融水分迁移驱动势的研究还不多。

结合对水分迁移驱动势的分析，笔者认为可根据岩体组织结构不同，将裂隙岩体冻融过程中的水分迁移理论分为孔隙介质中的分凝冰理论和裂隙中的薄膜水迁移理论。

3.2 分凝冰理论

分凝冰理论被广泛应用于等效连续岩体冻融损伤的研究，同时也为探究裂隙岩体中的水分迁移机制提供了有力的理论支撑。J. M. Konrad 和 N. R. Morgenstern^[17-18]建立了土体低温冻胀的分凝势模型，给出了正冻区水分迁移速度为

$$v_u = SP \text{grad} T_f \quad (1)$$

式中： v_u 为水分迁移速度， SP 为分凝势， $\text{grad} T_f$ 为冻结缘处的温度梯度。

分凝势是一个难以获取的变量，与冻结缘处的水头差、分凝温度有关。J. M. Konrad^[44]指出，分凝势还与外载荷和土质有关，满足以下关系：

$$SP = SP_0 \exp(aP_c) \quad (2)$$

式中： SP_0 为当外载荷为 0 时的分凝势； a 为土体冻胀受外荷载 P_c 影响的常数，可以表达为细颗粒组分平均粒径的关系式： $a = 5[d_{50}(FF)]^{0.45}$ 。

由于对岩体中的水分迁移机制认识不清楚，裂隙水冻结体积膨胀在很长一段时间一直被认为是岩体开裂破坏的主要原因，而并没有考虑水分迁移的影响。

分凝冰理论的出现为解释岩体冻融损伤提供了强有力的理论支撑。J. B. Murton 等^[45]得到的自然冻结区域试验数据表明，岩体裂隙扩展引起裂隙岩体损伤破坏的主要原因是冰分凝：当温度降低，水分在分凝势作用下向冻结区迁移、冻结；当温度升高，分凝冰融化背离冻结区迁移导致寒区基岩表面沉降。S. Akagawa 和 M. Fukuda^[29]同样认为，分凝冻结也是凝灰岩孔隙水发生迁移的根本原因，在温度梯度作用下冻结区的水头压力比未冻区低，水分会在压力梯度下向冻结区迁移，但研究中仍然把凝灰岩当作均匀连续介质。北极地区现场测试表明，在细骨料孔隙岩体和冻区表层几米厚度内的裂隙岩体中未冻水同样会向正冻区发生迁移，导致冰分凝形

成富冰区^[46]。这些现场和室内试验结果都表明，如果不考虑岩体裂隙的冻胀扩展问题，将岩体当作孔隙介质对待，分凝冰理论可较好地解释岩体中的水分迁移问题，但对于岩体中分凝势的求解却是一大难点。

3.3 分离压力与薄膜水迁移理论

在岩体裂隙中水冰相变引起水分迁移的机制也十分复杂，分离压力的引入被用来解释岩土体的冻胀和开裂破坏过程，许多学者也试图用分离压力来解释水分在岩体裂隙中的迁移机制。事实上，冻结的岩体介质中冰岩界面间存在着一层未冻水膜，未冻水膜的存在为水分迁移提供了通道。在温度梯度下未冻水膜存在厚度差，从而引起未冻水向低温冻结区迁移。

薄膜水上的分离压力是由 B. V. Derjaguin 和 N. V. Churaev^[47]首先定义的，可表达为

$$P_T = P - P_0 \quad (3)$$

式中： P 为岩土体上或是冰体上的压力， P_0 为未冻水膜上的水压力。

N. V. Churaev 和 V. D. Sobolev^[48]指出，孔隙中未冻水膜上的分离压力是由孔隙骨架平衡，如果分离压力超过孔隙骨架能承受的压力，那么孔隙会被拉裂，导致孔隙介质冻胀破坏。然而，冰体表面未冻水膜的形成机制至今没有统一的解释，被广大学者认可的主要有三大理论：压力融化，摩擦热融化和冰体自身具有的预融特性^[49-51]。为了研究岩土体的冻胀机制，许多学者仍然对未冻水膜的流动问题研究有着浓厚的兴趣。

此外，B. V. Derjaguin 和 N. V. Churaev^[52]首先利用不可逆热力学理论建立了粉土含冰孔隙中的未冻薄膜水流动方程，认为分离压力是未冻水膜厚度的函数。I. Vlahou 和 M. G. Worster^[53]建立了冻结岩体孔隙中的水分迁移模型，把岩体中的缺陷当做是球形空穴，该模型认为，在冻结初期水压力升高会拉裂孔隙，从而驱动水分向岩体基质中排出；冻结后期由于分离压力的作用分离岩体与冰介质，同时又将空穴周围的未冻水吸入，冻胀力进一步增大。J. S. Wettlaufer 和 M. G. Worster^[54]利用界面力学和热力学理论建立了封闭系统下固体介质裂隙中的相平衡方程，给出了平衡状态下的未冻水膜厚度与温度的关系，当温度或是外荷载改变时未冻水会发生迁移，直到形成新的平衡；并认为在岩体裂隙中，由于固体界面的曲率作用，冰体并不会侵入到裂隙尖端，代之以液态水的形式存在，随着冰体增大，裂隙水

压力升高会驱动裂隙扩展。

不仅在未冻区岩体裂隙中存在着水分迁移，已冻区和正冻区的裂隙中同样存在着水热流动，而未冻水膜的不均匀分布为裂隙中的水分迁移提供了动力(见图 3(a))。在不考虑压力对冰点的影响下，平衡态未冻水膜厚度只是温度的函数：

$$h = \lambda \left(\frac{T_m - T}{T_m} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

式中： $\lambda = [-A / (6\pi\rho_s\ell)]^{1/3}$ ， A 为 Hamaker 常数， ρ_s 为冰的密度， ℓ 为相变潜热； T_m 为冻结点； $T_m - T$ 表示冻结温度与冻结点的差值。

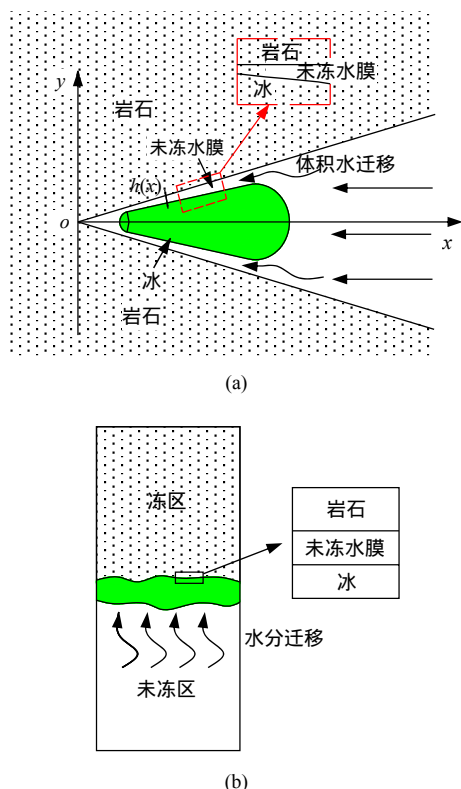


图 3 岩体基质和裂隙中的水分迁移
Fig.3 Water migration in rock matrix and crack

M. J. Setzer^[55]在研究孔(裂)隙介质冻胀力学机制时，经过系统的分析给出了冻胀的 3 个基本特征：(1) 水冰相变，发生相变部分体积会增大约 9%；(2) 在介质间的孔(裂)隙中，即使在冻结点一下仍有部分水保持液态，而不发生冻结；(3) 水冰介质界面上存在着压力差。

笔者认为，M. J. Setzer^[55]给出的这 3 个基本特征是对岩土介质尤其是裂隙岩体冻胀破坏机制关键问题的精确总结：水冰相变为裂隙岩体冻胀过程的基本热力学表征，也是冻胀力的来源，对裂隙岩体的冻胀破坏研究应立足于水冰相变这一基本特征；液态水膜的存在为水分迁移提供了通道，而且未冻

水含量直接影响着冻胀力的量值；在岩体裂隙中水分向尖端迁移根本原因是未冻水膜上存在压力差，该压力差与 B. V. Derjaguin 和 N. V. Churaev^[47]提出的分离压力相同，当分离压力的量值超过固体介质强度时，会引起冻胀破坏。确定水分迁移量也是研究冻胀过程中裂隙扩展问题的主要难点，是否能够用分离压力代替冻胀力来判断裂隙岩体的冻胀开裂问题还应进行深入研究。

3.4 裂隙岩体水分迁移室内试验研究

室内岩体冻融试验包括中对基质中水分迁移试验研究和裂隙中的水分迁移试验研究。对于不含宏观裂隙的试样，试验证明在温度梯度作用下冻结缘处最容易冻胀开裂^[45-56]，说明未冻区水分向冻结缘处发生迁移并聚集冻结，如图 3(b)所示。杨更社和张全胜^[57]采用国际地层冻结协会推荐的“开放系统下按温度梯度”的方法，对寒区冻融环境下的岩石水热迁移进行了研究，认为冻结过程中的水热分布规律与岩土材料介质物理参数有关，同时指出温度梯度仍是冻岩中水分迁移的主要驱动力。但较早以前 M. Vignes 和 K. M. Dijkema^[58]为了探究冻胀过程中的水分迁移机制，将冰透镜体和小水池用毛细槽相连接，观测水分在毛细槽中的迁移现象，得到了冰的生长速率是水冰界面处温度的函数式，却与温度梯度的大小无关这一结论。L. A. Wilen 和 J. G. Dash^[59]对与固体介质接触的单晶冰的表面冻胀动力学特性进行了研究，通过试验证实了相变点附近未冻水流动层的存在，并指出界面预融是液态水存在的一般机制，未冻水膜间的流体黏度比常态下的体积水要大，流动速率非常缓慢。

T. Sandström 等^[60]进行了常温冻融循环和固定温度梯度下的孔隙混凝土吸水量随温度变化规律的研究，在 3 种不同的温度条件下经历相同时间，冻融循环下的孔隙介质吸水量最大，而固定的温度梯度下外界水分向孔隙介质中迁移速度较小。在多次冻融循环下孔隙介质的饱和度最终可以高达 94%，而常温下其最大饱和度不足 88%，冻融循环会引起岩体微裂隙的萌生和新损伤裂隙的出现^[61]，导致岩体强度软化和力学性质恶化，岩体的弹性模型、抗压/抗拉强度都随冻融循环次数的增加而迅速降低^[62-64]，说明岩体中的水分迁移主要是由于多次冻融循环引起的，冻融循环次数较冻胀强度对岩体的损伤更大。试验证明，水分和冻融循环对岩石的力学性质有着重要的影响^[65-66]。

水分在孔隙介质中的迁移还与孔隙空间尺度有关，不同的孔隙尺度水分迁移主要驱动力并不同。

H. Ozawa^[67]通过试验得到了水分迁移方向与孔隙尺度的关系，试验中只有半径小于 1 μm 微观孔隙才会克服重力引起水分向冻结冰体迁移，从而产生材料表面的结晶作用，此时温度梯度是水分迁移的主要驱动力，可以克服重力势的作用。

裂隙岩体中自身也存在着裂隙之间的水分迁移，引起岩体的不均匀冻融变形。对于裂隙岩体在冻结初期，由于冻胀力的增长，会出现一个水分被挤出的过程，如果裂隙介质中有足够的自由空间提供给结冰被挤出的自由水，而冷量又不足以使大量的水结冰产生足够大的宏观冻胀变形，那么裂隙介质就表现为冻结收缩，称之为冻缩。反之，当裂隙介质达到了某一较大的饱和度，没有足够的自由裂隙空间提供给结冰过程中被挤出来的自由水，冰的膨胀会占据主导地位，此时介质骨架也会在冻胀力的作用下产生膨胀变形，表现为冻胀。因此，冻缩需要满足 2 个条件：较低的饱和度以及较高的冻结温度；而冻胀只要岩体达到一定的饱和度，在冻结点以下岩体会随着冻结温度的降低表现为先冻缩后冻胀^[68]。如果岩体与外界水体接触，冻结后期，外界的水分会在冻结过程中向冻结缘处迁移。L. J. van Alst^[69]认为，岩体微裂隙中的预融水在分凝阶段为宏观裂隙提供了水分来源，当温度降低到冻结点以下时微裂隙中的水由于界面效应并不会冻结，界面自由能抑制了冰的分凝，而宏观裂隙中的水会发生相变，从而在分凝势的作用下微裂隙中未冻水向宏观裂隙中迁移，导致宏观裂隙在冻胀力作用下启裂扩展，微观裂隙因为失水而闭合(见图 4)，表现为岩体的不均匀冻胀变形。

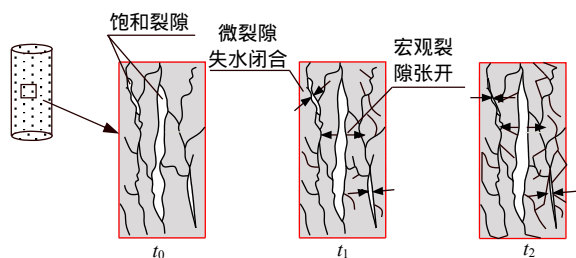


图 4 水分向宏观裂隙中迁移引起裂隙开度变化示意图^[69]

Fig.4 Diagram of crack opening change with moisture migration from micro-cracks to macro-cracks^[69]

在融化过程中，未冻裂隙水压力与冰压力之间的差值减小，融化冰向未冻水迁移，与冻结过程正好相反。H. Ozawa^[67]认为，融化过程中的水分迁移过程较冻结中要慢很多，水分迁移方式主要有 2 种：冰在冻结点以上蒸发升华，以水蒸气的形式迁移最后凝结在液态水膜界面上；水冰接触界面上的冰体

直接融化。

3.5 水分迁移引起裂隙岩体冻融损伤机制

长期以来，低温冰体生长驱动岩体破裂的力学机制有 2 种争议性的说法：一种理论认为水冰相变体积膨胀 9%，导致孔隙中和裂隙尖端产生张力，是引起岩体冻胀开裂的原因；另一种理论认为分凝冰的生长是导致这一结果的根本原因，因为在分凝势的作用下未冻区的水分会通过冻结缘向冰透镜体迁移，冰透镜体不断生长，产生更大的冻胀荷载拉裂岩体裂隙，驱动裂隙扩展。

笔者认为这 2 种情况同时存在：开放系统下岩体裂隙水在冻融过程中会发生迁移，原位裂隙水和迁移而来的水分共同相变、膨胀，引起岩体裂隙启裂扩展，最后导致岩体损伤破坏的发生；而对于含封闭裂隙的低渗透性岩体，水分迁移过程较慢，原位水的冻结膨胀是岩体冻胀破坏的主要原因，但超过临界饱和度的岩体才会引起岩体冻融损伤。

J. P. McGreevy 和 W. B. Whalley^[70]同样认为，这些冻胀理论并不矛盾，可能在岩体中同时存在，或者不同的冻结条件下各自占优，并指出在封闭裂隙中，冻胀过程中水分从冻结处被排出形成较高的水压力是导致岩体孔裂隙拉裂破坏的根本原因。O. Sass^[39]利用电阻率测量技术对 Alps 山北部的石灰岩在冻融下的含水量的变化进行了现场测试(见图 5)，结果表明，冻结过程中水压力升高，孔隙水在冻结过程中从冻结缘处被排出。水冰相变开始后基岩以下 5 cm 处未冻水急剧降低，而 15 cm 处未冻水含量反而升高，说明在冻结过程中冻结缘处的水分向未冻区发生了迁移。根据监测结果，O. Sass^[39]认为，水冰相变后导致岩体中水压力升高是引起岩体冻胀损伤和水化破坏的主要原因。

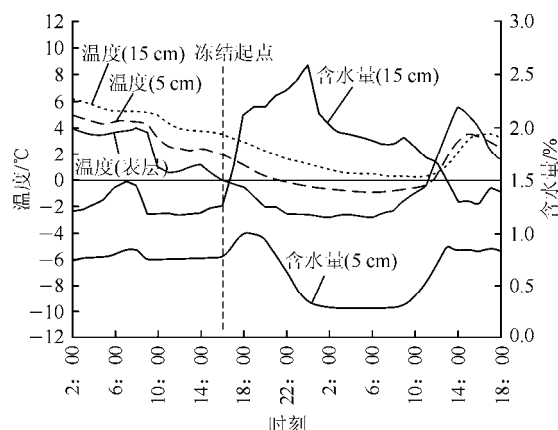


图 5 Karwendelspitze 西测点温度和岩石含水量实测瞬态变化^[39]

Fig.5 Temporal variations of temperature and rock moisture at the Karwendelspitze West site^[39]

当岩体裂隙开始扩展时，水分在化学势梯度的驱动下继续从未冻区向裂隙中的冻结区迁移，该化学势梯度主要是由于沿裂隙走向的温度差产生。虽然未冻水膜厚度只有几纳米^[71]，但在温度梯度方向上其厚度存在差异，外界水分会通过未冻水膜从暖端向冷端的冰透镜体处迁移(见图 3(a))，引起裂隙进一步冻胀扩展，最终表现为岩体的冻胀破坏。

裂隙岩体中的水分迁移机制研究是研究冻融损伤的基础也是主要难点之一，笔者认为可以从以下几个方向进行进一步研究：

(1) 开展相似透明材料试验，观测在温度梯度下相似材料裂隙中的水分迁移方向和迁移通量，为建立水分迁移方程提供支撑。

(2) 开展开放系统下裂隙岩体冻融循环试验，利用 CT 扫描、核磁共振等检测技术观测裂隙与水分迁移分布的相互影响。

(3) 开发寒区岩体工程水分监测设备，对冻结点附近的岩体进行长期观测。在国内还未见对裂隙岩体中水分分布状况现场监测报道。

(4) 进一步研究冰在孔裂隙介质中的生长模型。因为水分迁移与水冰相变过程关系密切，冰体在混凝土孔隙中的生长模型以及水冰介质间的赋存状态有一定的理论研究基础^[72]，但是对于岩体宏观裂隙中的水冰相变时空演化规律以及影响因素的研究较少。

4 冻胀力与裂隙冻融扩展相关问题

从已有的文献来看，较多的是从损伤力学的角度利用损伤变量来进行岩体冻胀模型研究^[73-75]，对岩体裂隙中的冻胀扩展机制研究较少，但裂隙却是决定岩体稳定性的重要地质结构，对于裂隙岩体而言显得尤为重要。夏才初等^[76]对寒区隧道岩体冻胀率取值方法和冻胀敏感性进行了分级研究，认为岩体的冻胀是岩石与裂隙二者冻胀的综合表现；北川修三和川上義輝^[77]也指出，不冻胀的岩石在破碎的情况下也会表现出冻胀性，因而裂隙对岩体冻胀性的影响至关重要。为了研究岩体裂隙冻胀扩展机制，首先必须对冻胀力这一破坏荷载进行研究，岩体裂隙中冻胀力的求解还没有一个完善的模型可以给出，在过去几十年中，国内外学者通过理论分析和试验对影响冻胀力大小和裂隙冻胀扩展机制的相关因素进行了研究，笔者对其中的主要因素进行了系统地归纳总结，供以后的研究者借鉴。

4.1 裂隙几何形态与空间位置

裂隙中的冻胀力大小与裂隙几何形态有关。T. M. Tharp^[78]指出，长宽比大于 0.01 的裂隙容易受到低温冻胀的影响，引起裂隙扩展并终止于裂隙端部较锋利处，而冰在宽裂隙中会发生塑性流动，但不会产生有效的冻胀力。T. M. Tharp^[78]将冰体在低温下岩体裂隙中的生长类比于 2 个硬板中间的材料受压应力，冻结过程中冰体会被裂隙上下面挤出。D. B. Honeyborne 和 P. B. Harris^[79]指出，石灰岩中容易产生冻胀损伤的岩样中包含大量半径为 $(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-5}$ mm 的孔隙。而在抵抗冻胀较强的岩石中，几乎不存在这一孔隙区域。笔者认为，长宽比较大的裂隙容易吸水饱和，而且临界强度因子较小，所以受冻胀影响大；此外，对于孔隙而言，小尺寸孔隙由于界面曲率效应冻结点降低而出现过冷状态，大尺寸孔隙饱和度低冻胀力小，都难以出现明显的冻胀损伤。

为了探究裂隙中冻胀荷载大小，相似材料中预制裂隙是常用方法。G. P. Davidson 和 J. F. Nye^[56]在透明固体材料——有机玻璃表面预制了一个狭槽，利用光弹性技术测试了水在该狭槽中冻结产生冻胀力的大小，得到的最大冰压力为 1.1 MPa。试验中狭槽与外界相连通，因此得到的冻胀力大小与岩体中有一定的差别，同时作者指出冻胀力还与材料力学性质、裂隙形状有关，沿裂隙深度冻胀力大小并不相同。

此外，裂隙的长度也是裂隙启裂准则中的重要参数，对于不同的冻结条件，对应有最小启裂长度。由断裂力学理论可知，岩体裂隙的在冻胀力下开裂屈服与裂隙的长度有关，当岩体裂隙尖端应力强度因子大于其临界值时裂隙开始扩展^[80]。T. M. Tharp^[78]指出，对于封闭裂隙中的承压水和开放裂隙中的非承压水，冻结温度下最小裂隙启裂长度也不同，如图 6 所示。

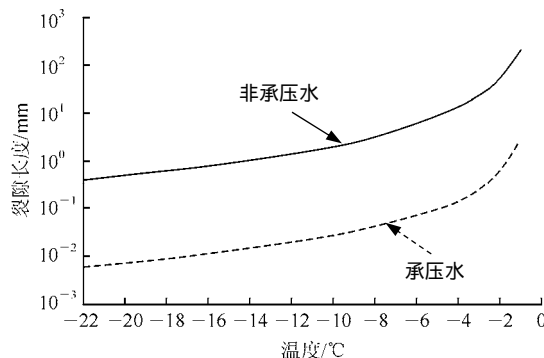


图 6 承压水与非承压水最小启裂长度与温度的关系^[78]
Fig.6 Minimum crack lengths for propagation for confined and unconfined water^[78]

T. M. Tharp^[78]还给出了冻胀裂隙扩展的应力强度因子：

$$K_I = (2/\pi) \cos^{-1}(b/a) \sigma (\pi a)^{1/2} [1 + h(b/a)] \quad (5)$$

式中： σ 为冻胀力常量； h 为用数值方法得到的修正因子，当 $a/b = 0$ 时， $h = 0.12$ ，当 $a/b = 1$ 时， $h = 0$ ， h 随着 a 与 b 比值呈线性变化(荷载位置见图 7)。

当 K_I 、 K_{IC} 裂隙会发生扩展。

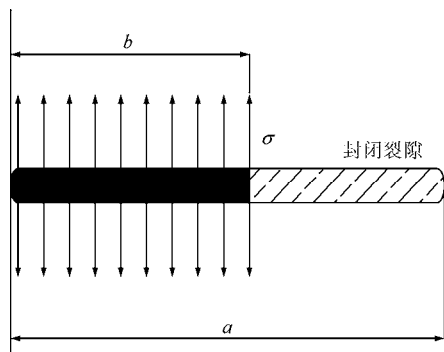


图 7 裂隙长度与冻胀荷载位置

Fig.7 Crack length and frost load position

对于冻胀荷载沿裂隙全长分布，式(5)可简化为

$$K_I = 1.12 \sigma (\pi a)^{1/2} \quad (6)$$

冻胀力大小不仅受裂隙几何形态会影响，也因裂隙与温度梯度空间位置不同而有所差异。对此，笔者进行了详细的分析，认为裂隙与温度梯度的相对空间位置有 2 种极限情景：裂隙平行于冻结锋线和裂隙垂直于冻结锋线(见图 8)。任何一条裂隙都可以通过三角函数关系转化为 2 种模式的组合。裂隙走向的相对方位主要影响冻结渗透速度和热传导效率。定义与冻结锋线平行的结构面为平行裂隙，与冻结锋线垂直的结构面为垂直裂隙。那么平行裂隙中的水分几乎会在同一温度下快速冻结，裂隙中水分没有足够的时间排出，此时能够产生较大的冻胀力。对于垂直裂隙，裂隙水在温度梯度的作用下会沿裂隙走向随时间逐渐冻结，饱和裂隙中未冻水会在冻胀力的驱动下远离冻结缘向外排出；当冻结到某一阶段，温度梯度和分凝势作用下产生的抽吸力大于自由水受到的排挤力时，冰分凝过程产生，水分在温度梯度作用下沿着未冻水膜向冻结缘处迁移，冰体不断长大，随着温度降低未冻水膜厚度减小，水的流动性降低，直到无法为冰分凝提供水分来源而终止(见图 8(a))。垂直裂隙的冻结过程与冻结速率有关，如果冻结速率很快，将以排水过程为主；如果冻结速率较小，水分会向冻结区发生迁移。事实上，开口裂隙中的水分迁移方向还与裂隙中的填充物质以及岩体的冻胀敏感性有关^[76]。垂直

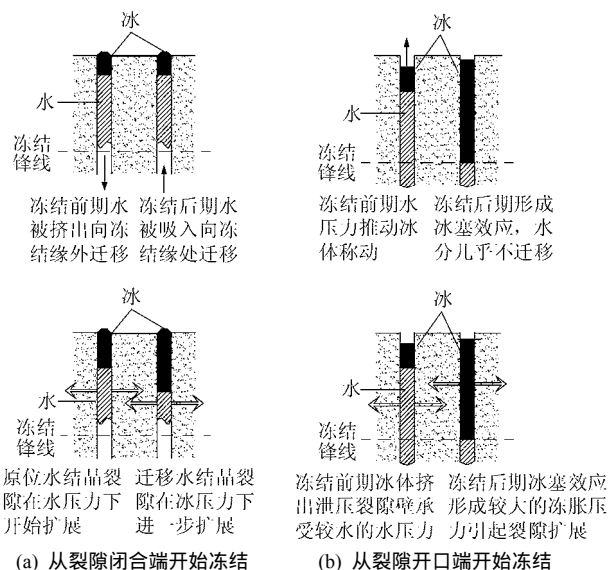


图 8 开口裂隙冻结方向与冻胀模式

Fig.8 Frost heave mode in open cracks for different freezing directions

裂隙因为开口方向不同冻胀开裂过程也有差异，如果从裂隙开口处开始冻结，只需要很少的水分冻结就会形成冰塞效应(见图 8(b))，当冰体与裂隙的摩擦力较大而无法移动时，裂隙中会形成较大的冻胀水压。

H. Kevin^[81]进行了 2 组石英云母片岩的冻融试验，对冻结渗透速度与片理和冻结缘的相对角度关系进行了研究，当片理平行于冻结缘时温度下降速率较垂直时会提高 5 倍，此外岩石的温度下降速率是由岩石冻结历时决定的，与环境的温度变化速率关系不大。在不考虑岩层之间的渗透性的情况下，H. Kevin^[81]认为，可以把垂直于冻结锋线的裂隙看成是开放系统，与外界存在水分交换；而把平行于冻结锋线的裂隙看成是封闭系统，裂隙与外界之间没有水分迁移。这可能是由于平行于冻结锋线的裂隙水会快速冻结而来不及发生迁移的缘故。

4.2 未冻水含量

冻胀力主要是由于已存在于岩体中水分和外界迁移而来的水分冻结体积膨胀产生的，未冻水含量的比例影响冻胀力的大小和岩体的冻融损伤程度。

S. Gruber 和 W. Haeberli^[82]通过对岩质边坡冻胀下的稳定性研究指出：已冻结岩体中不仅存在未冻水，而且冻岩中的液态水还会发生缓慢的迁移，岩体的渗透系数会随着温度的降低而减小，高陡边坡的滑落经常出现在存在冻结的破裂区域。G. P. Davidson 和 J. F. Nye^[56]从试验得到裂隙中的冻胀水压力随冻结率几乎呈线性关系(见图 9)。

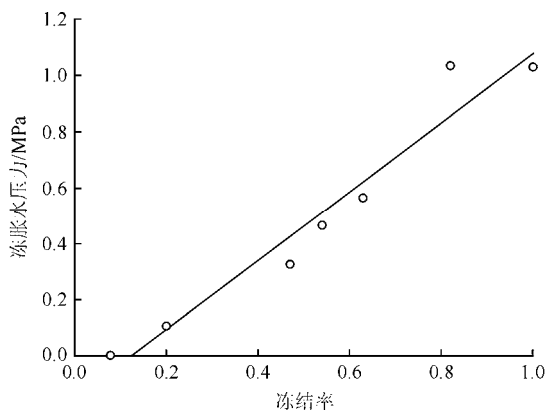


图9 裂隙中冻胀水压力与冻结率呈线性关系^[56]

Fig.9 Water pressure p in freezing crack rises approximately linearly with frozen fraction F of water^[56]

未冻水含量是冻土研究中一个重要的课题，陈卫忠等^[83]将未冻水含量的测试方法归纳为量热法，差示扫描法，核磁共振法，时域反射法以及超声波法5类。但是以上测量方法仍然是针对冻土而言，是否能够应用于冻岩还需进一步研究，尤其是对于裂隙岩体而言由于缺乏可靠的测量手段，现有研究也主要是从理论上对岩体孔隙中的未冻水进行讨论，还未见对裂隙中未冻水含量的研究报道。岩体中未冻水量研究涉及到凝聚态物理、界面力学、热力学等学科交叉而成为了研究冻岩的主要难点之一。

4.3 初始含水率(饱和度)

J. P. McGreevy 和 W. B. Whalley^[70]指出，岩体中的初始含水率决定岩体冻胀损伤程度，其水分含量会随着冻融循环次数、冻结历时和季节变化而波动，工程实际情况下应该考虑岩体中水分含量变化对冻融损伤的影响。岩体是否会产生冻融损伤破坏与其饱和度有极大关系，只有超过临界饱和度的岩体才会产生有效的冻融损伤^[84]。对于饱和岩体，水冰相变大约产生9%的体积膨胀，如果不考虑岩体的承压能力，理论上能够产生高达207 MPa的冻胀力^[85]，任何岩体的抗拉强度都远远低于这一值。非饱和岩体中空气占据的孔隙和裂隙为冰的体积膨胀提供了空间，当岩体饱和度低于91%，在不考虑水分迁移情况下，即使是抗拉强度很低的岩体也不会产生有效的冻胀力。相反，当岩体的饱和度大于91%时，即使岩体的抗拉强度较高，坚硬致密岩体的抗拉强度也不超过10 MPa^[86]，同样很难抵抗相变体积膨胀产生的冻胀力作用。对于有水分补给的寒区岩体，在冻结过程中岩体中未冻区的水分会向冻结区发生迁移，从而导致饱和度远低于91%的冻结区仍会产生剧烈的冻胀破坏，岩体冻胀对初始饱和度的

依赖程度降低。

为了探究岩体的冻融损伤临界饱和度，T. C. Chen 等^[87]对饱和度从0%~95%的凝灰岩进行了一次冻融后的单轴压缩力学试验以及纵波波速和孔隙率测试，结果表明：饱和度小于60%的岩样单轴抗压强度、纵波波速和孔隙率几乎不变；饱和度大于70%的岩样单轴抗压强度和纵波波速急剧降低，而孔隙率却几乎呈直线上升。T. C. Chen 等^[87]认为，70%的饱和度是凝灰岩产生有效冻融损伤的临界值，并给出了单次冻融循环裂隙最大宽度与饱和度之间的关系(见图10)。

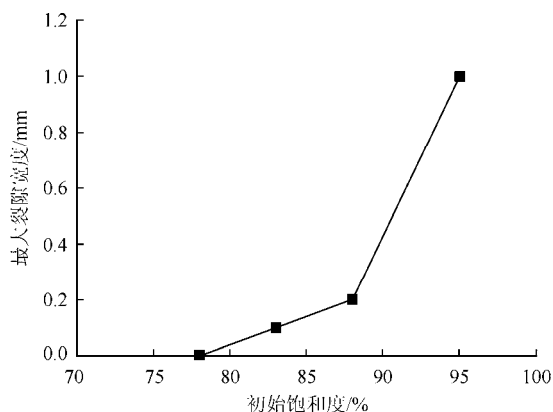


图10 初始饱和度与最大冻胀裂隙宽度的关系^[87]

Fig.10 Relationship between initial degree of saturation and maximum crack width^[87]

冻融循环次数对岩体冻胀损伤程度同样受到初始含水率和水分迁移的控制，K. Hall 等^[88]指出，在过去很长的一段时间里，人们过高的估计了冻融循环次数对冻胀损伤的作用而过低的估计了初始含水率的影响。K. Hall^[89]对取自南极沿海岩石的初始含水率和吸水性能进行了试验研究，覆盖有融雪和多雨环境下的基岩可以达到吸水饱和，并且在快速冻结下能够引起岩体裂隙扩展。对于室内的冻融损伤试验，测得的岩石含水率可以用来估计岩体的冻融损伤程度。王俐^[90]对不同初始含水率的红砂岩进行了冻融循环试验研究，5次冻融循环后岩体的峰值强度损失率和弹性模量损失率都随着初始含水率的增加而急剧上升(见图11)。

N. Matsuoka^[91]认为，对于裂隙岩体的冻胀试验研究应该将重点放在裂隙上，因为裂隙的高渗透性给水分迁移提供了通道，但对宏观裂隙不会产生大的抽吸力，坚硬的低孔隙率裂隙岩体的冻胀研究更符合工程实际需要。只有饱和度超过80%且在快速冻结的条件下才会产生有效的冻胀损伤；相反，当岩体处于开放系统，外界水分供给充足时，即使初

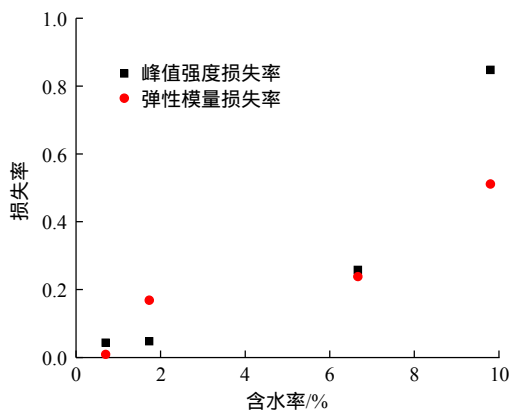


图 11 冻融循环后岩体峰值强度和弹性模量损失率随初始含水率变化^[90]

Fig.11 Ratio of peak strength and elastic modulus loss of rock rises with initial moisture content after freezing and thawing^[90]

始饱和度小于 80%，冻结速度较低会产生较大持久的分凝势，促使水分向冻结区发生迁移，此时也会产生较大的冻胀力驱动裂隙扩展。

N. Matsuoka^[86]对 Alps 山 4 个地点岩体的冻裂速率、表面温度、水分含量以及物理力学性质进行了长达 5 a 的监测，指出岩石冻胀碎裂速率主要由 3 个因素控制：温度、水分和岩石性质。N. Matsuoka^[86]同时指出，对于裂隙岩体饱和度的研究应区分裂隙饱和度和岩石整体饱和度，岩石饱和度对于岩石冻胀的影响并不能代表该饱和度下的裂隙冻胀，因为裂隙中的含水量与岩石平均含水量之间有个本质的区别。一些岩石本身含水率不高，但主要集中在岩石裂隙中，仍然会引起裂隙的冻胀扩展，导致岩体力学强度降低。对于一些致密的岩石，岩石整体含水率不高，但集中在岩石裂隙中；对于较为破碎或是裂隙化岩石，即使含水率很高，并不一定会产生有效的冻胀变形，因为裂隙饱和度并不大。岩石裂隙中是否会产生足够大的冻胀力拉裂岩体，主要是由裂隙的饱和度决定。但对于同地区同一岩性的岩体而言，岩体饱和度一般与岩体含水率正相关，在一定程度上低温岩石的含水率可以用来估计岩石的冻胀变形和损伤程度。

4.4 岩石物理力学性质

岩石基质的颗粒大小、弹性模量、孔隙率、抗拉/压强度等都会影响裂隙岩体中的冻胀力大小，从而导致冻融损伤程度不同。

R. W. Style 和 S. S. L. Peppin^[92]建立了孔隙介质中冰生长速率模型，认为冰的生长速率不仅受温度和外部压力的影响，还与介质粒径有关，冰透镜体在细骨料和粗骨料界面上的生长速率都较低，而在

中等粒径骨料中生长较快。周科平等^[93]对粗细 2 种颗粒花岗岩进行了冻融循环试验研究，利用核磁共振技术对冻融前后的岩样进行了检测，细颗粒花岗岩呈现出较高的冻融耐久性。

冻胀力大小还与岩体的弹性模量有关，对于弹性模量较大的岩石，孔隙中抵抗变形的能力较强，容易产生较大的冻胀力。从断裂力学出发，裂隙临界扩展力的平方与岩体的弹性模量成正比，弹性模量越大，裂隙临界断裂应力越大^[94]，可以抵抗较大的冻胀荷载。

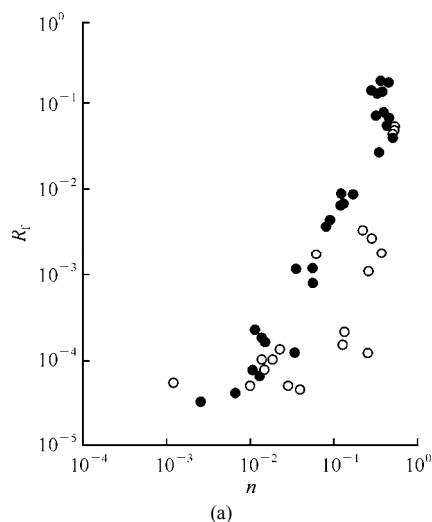
孔隙率对岩体冻融损伤程度的影响主要体现在渗透性上，孔隙率高的岩体一般渗透性较大，岩体渗透性主要影响冻胀过程中水分迁移速度。岩体经历多次冻融循环后会引引起结构损伤，李杰林等^[95]基于核磁共振技术对经历多次冻融循环后的岩石孔隙结构进行了测试。结果表明，孔隙率随着冻融循环次数增加而增大，但每个岩样都存在差异性。

N. Matsuoka^[96]对 47 种致密岩样进行了冻融循环试验，结果表明：岩石的抗拉强度 S_t 、比表面积 S_w 、孔隙率 n 对岩石的冻胀劣化程度影响最大，同时指出岩体裂隙对冻融损伤影响较大，致密岩石的冻胀损伤主要是由一些初始损伤和微裂隙控制。N. Matsuoka^[96]用纵波波速定义了岩石的冻胀碎裂速率 R_f ：

$$R_f = \frac{V_{p0} - V_{pk}}{V_{p0}k} \quad (7)$$

式中： k 为冻融循环次数， V_{p0} 为岩石的初始纵波波速， V_{pk} 为 k 次冻融循环后的纵波波速。

从 N. Matsuoka^[96]的试验结果(见图 12，实心点代表沉积岩；空心点代表火成岩和变质岩)可以看出，岩石的冻胀碎裂速率 R_f 与岩石的孔隙率 n 正相关，与岩石的抗拉强度 S_t 、比表面积 S_w 反相关，而与岩石的平均孔径 \bar{r} 没有表现出相关性。



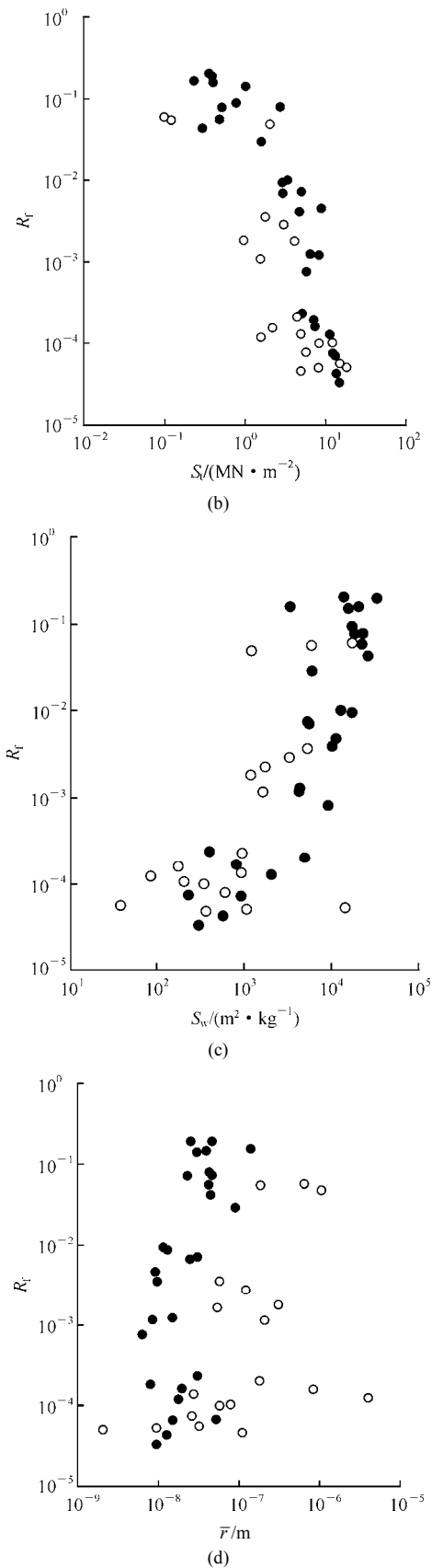


图 12 岩石的冻胀碎裂速率与岩石物理孔隙率、单周抗拉强度、比表面积以及平均孔径的关系^[96]

Fig.12 The crushing rate of rock due to frost as a function of the porosity , tensile strength , specific surface area and mean pore radius^[96]

M. Fukuda^[97]指出，孔隙率在 20%以上的岩石容易受到冻胀损伤，这类岩石在冻融循环 30 次后基本上全部破坏；J. P. Lautridou 和 J. C. Ozouf^[98]认为，孔隙率低于6%的岩石在几百次冻融循环后几乎没有损伤。

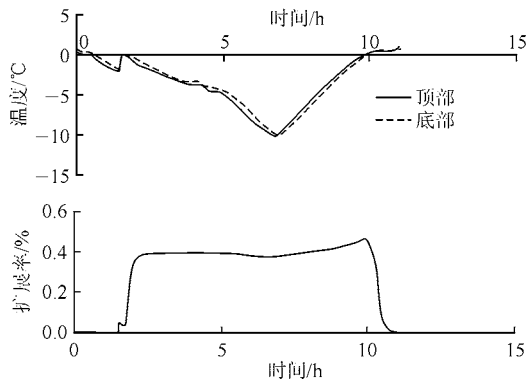
4.5 冻结温度与冻结速率

裂隙岩体产生冻融损伤需要冻结温度至少达到冻结点以下，但并非达到了冻结点就能够产生危害裂隙岩体稳定性的冻胀力。岩体中的孔隙水冻结过程中会出现冻结点降低，M. G. Worster 等^[99-101]认为，孔隙水冻结点与孔隙半径有关，根据界面力学和毛细管学理论导出了冻结点与孔隙半径的关系式，但都没有考虑孔隙在冻胀力下产生的变形，并且忽略了冻胀压力对冻结点的影响。对于微孔隙材料，最低的过冷温度产生在直径为 0.05 μm 的孔隙中，只有温度降低到 -2 $^{\circ}\text{C}$ 以下孔隙中的水才会发生冻结^[102]。

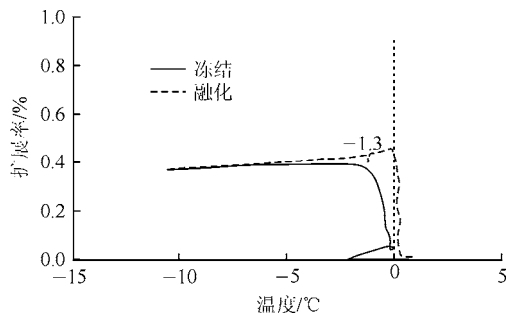
对于岩体的有效冻结温度国内外学者得出了不同的结论。M. Fukuda^[103]认为，岩体中水分在 -4 $^{\circ}\text{C}$ 时才冻结，J. R. Dunn 和 P. P. Hudec^[104]认为冻结开始于 -6 $^{\circ}\text{C}$ ~ -10 $^{\circ}\text{C}$ 范围。W. R. B. Battle^[105]指出，饱和裂隙岩石在 -1.5 $^{\circ}\text{C}$ 和 -3 $^{\circ}\text{C}$ 下没有引起损伤，岩样的损伤出现在冻结温度为 -5 $^{\circ}\text{C}$ ~ -10 $^{\circ}\text{C}$ ，当裂隙岩体从裂隙顶端开始的冻结速率大于 0.1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，可以认为形成了封闭的系统，此时水分来不及从岩体裂隙中排出，裂隙中会产生有效的冻胀破坏。B. Hallet 等^[106]对砂岩试样进行了固定温度梯度下的单向冻结试验，利用声发射设备监测岩石的破裂过程事件数，结果表明：岩石微破裂事件数与岩石的冻结点没有必然联系，大量的微破裂事件数出现在冻结温度为 -3 $^{\circ}\text{C}$ ~ -6 $^{\circ}\text{C}$ 范围内。L. J. van Alst^[69]对波尼亚砂岩进行了冻融试验研究，指出冰分凝速度在 -5 $^{\circ}\text{C}$ ~ -8 $^{\circ}\text{C}$ 时最快。D. Arosio 等^[107]认为，在 -4 $^{\circ}\text{C}$ 时开口裂隙中的冰压力最大，达到了 5 MPa。

D. Nakamura 等^[108]对 4 种不同温度条件下的凝灰岩和砂岩进行了冻结试验，观测到冰透镜体的生长位置和增长温度主要取决于岩体的物理性质，而与冻结温度梯度无关，抗拉强度高的砂岩冰透镜体生长温度平均为 -2.77 $^{\circ}\text{C}$ ，而抗拉强度低的凝灰岩在温度为 -0.92 $^{\circ}\text{C}$ 处出现了冻胀开裂。N. Matsuoka^[109]通过在花岗岩中预制裂隙来模拟裂隙冻胀扩展过程，结果表明：裂隙膨胀在 0 $^{\circ}\text{C}$ ~ -1 $^{\circ}\text{C}$ 范围时最快，低

于 -2℃ 时裂隙宽度几乎保持不变(见图 13(a))，因为此时冰的收缩大于岩体，不能产生有效地冻胀力；当冰融化时，裂隙宽度还会进一步增大(见图 13(b))，说明融化阶段冰的膨胀大于岩体，导致裂隙进一步受力张开。



(a) 裂隙顶部底部温度和裂隙宽度扩展率随冻结时间变化



(b) 裂隙宽度扩展率是冻结温度的函数

图 13 裂隙宽度扩展率与冻结温度、冻融时间的关系曲线^[109]

Fig.13 Curves of crack expansion vs freezing temperatures and freeze-thaw time^[109]

冻胀强度是指岩体冻胀损伤出现的最低冻结温度。J. P. McGreevy 和 W. B. Whalley^[110]认为，-3℃ 是岩石出现有效冻胀的上限温度，并且冻结速率没有冻胀强度的影响大。J. S. Walder 和 B. Hallet^[111-112]认为，坚硬致密岩体的裂隙冻胀扩展有效温度区间为 -4℃ ~ -15℃。N. Matsuoka^[86]采用 -2℃ 作为产生有效冻胀的冻结温度上限值，并认为至少处于 -2℃ ~ 0℃ 的冻融循环才会对岩体产生有效的冻融损伤。杨更社等^[113]对不同冻结温度和冻结速率下的岩体进行了 CT 扫描，指出环境系统和岩石本身的结构构造、物理力学性质的差异会导致相同冻结温度对岩石的冻胀损伤的扩展作用不同。

裂隙岩体的冻胀破坏不仅需要一个低于冻结点的温度，还需要一个合适的冻结速率。Y. Mutou 等^[114]利用一个可控制温度梯度和冻结速率的试验装置对玻璃粉中的微冰透镜的生长过程进行了观测，结果表明：冻结速率越快冰透镜体越薄，因为过快的冻

结速率阻碍了水分迁移过程。K. Hall 和 A. Hall^[115]认为，冻融循环过程中的冻结速率对岩体损伤作用很大，冻结速率比冻结温度的影响更为显著。杨更社等^[116]指出，强度较高、孔隙贯通程度低的硬砂岩容易受到冻结速率的影响。N. Matsuoka^[96]对闭合系统下的饱和安山岩进行了不同冻结速率下的低温冻结试验，结果表明：冻结速率 $v = 6$ °C/h 下的岩体平均应变是 $v = 2$ °C/h 下平均应变的 1.4 倍，快速冻结对于饱和和封闭岩体的冻胀损伤较大。S. Duca^[117]认为，岩体在冻结温度下的水分迁移速度随温度降低而迅速降低，冰分凝的条件为含水丰富的致密岩体低速率的冻结或者是维持在略低于 0℃ 的负温。徐彬等^[118]通过数值方法模拟了冻结温度和冻结速率对液化石油气储库围岩不同长度和不同夹角裂隙开裂的影响，裂隙尖端应力强度因子随降温速率增加而迅速增大。

对于冻结速率对岩体裂隙扩展的影响，笔者认为岩体中裂隙形态和所处环境不同，冻胀扩展需要的冻结速率相差很大。对封闭饱和裂隙和平行裂隙而言，快速冻结过程会产生较大的冻胀力，因为水分没有时间向周围岩体中排出(见图 14)；而岩体有水分供给的开口裂隙和低饱和裂隙低速率冻结容易产生较大的冻胀力，因为此时在冻结过程中，冻结后期以分凝势作用下水分向裂隙区的迁移为主，快速冻结反而会阻碍水分的迁移过程。

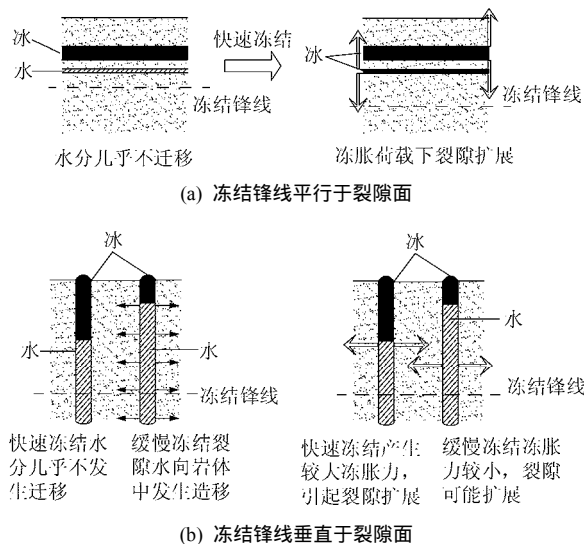


图 14 快速冻结下的裂隙冻胀扩展

Fig.14 Crack extension under high freezing rate

4.6 裂隙冻胀扩展现场试验研究

岩体裂隙的冻胀扩展速率很慢，每次冻融循环裂隙宽度变化通常要小于 0.1 mm，所以对裂隙岩体冻胀扩展的现场监测需要几个月甚至数年的时间。

寒区高山岩体经常出现裂隙冻胀开裂从而诱发滑坡和岩崩等自然灾害的发生，为了研究寒区岩体中裂隙冻胀扩展机制和启裂条件，一些学者对冻胀过程中的裂隙宽度进行了长期的现场监测。结果表明，虽然影响寒区裂隙在冻胀力下的启裂扩展因素较多，但对现场裂隙岩体而言，温度和降水量是诱发岩体裂隙冻胀扩展的两大主要环境因素^[119-120]。

M. Ishikawa 等^[121]对日本北部某山顶部悬崖基岩的裂隙宽度和内部温度进行了一个月的监测，记录了一条裂隙宽度逐渐连续扩展到破坏的全过程。监测数据表明，液态水渗透到裂隙尖端后冻结是引起裂隙扩展和破坏最重要的因素(见图 15)。对于没有水分进入裂隙尖端的扩展并没有引起岩体的破坏，而随后的雨水渗入、冻结导致了现场岩体裂隙迅速扩展和岩体滑落现象发生。但裂隙宽度最大扩展速率并非发生在温度最低时，存在明显的滞后效应。说明对于现场裂隙岩体而言，雨水渗透是导致岩体冻胀裂隙扩展的主要因素。在工程实际中，高山寒区破裂岩体也主要沿水流和湖泊分布，因为这些区域也为岩体冻胀提供了水分来源^[122-123]。

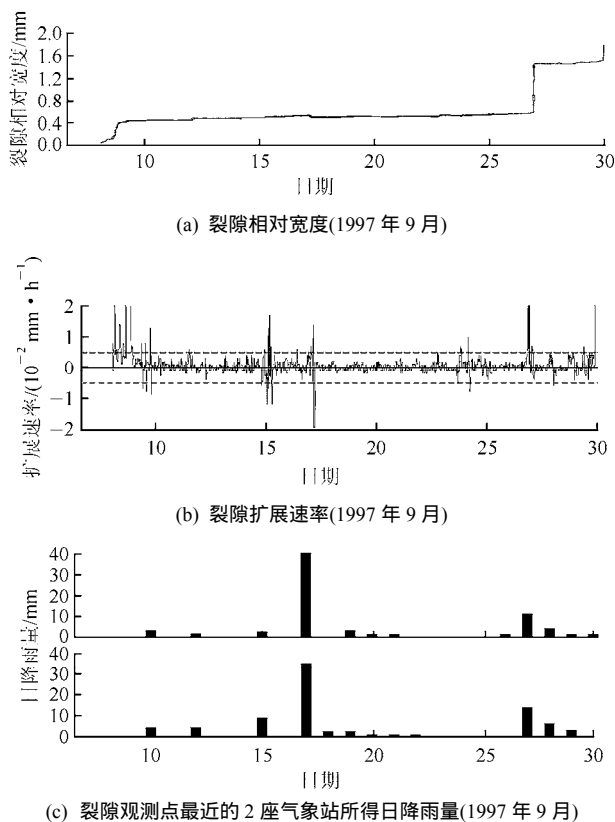


图 15 裂隙宽度与降雨量的对应关系^[121]

Fig.15 Crack width varied with rainfall^[121]

N. Matsuoka^[124]对日本 Alps 山上的砂岩裂隙宽度和温度进行了长达 3 a 的自动监测，结果表明：

裂隙宽度在秋季和春季达到了最大值，并且与裂隙顶端的负温度绝对值呈正相关(见图 16)。L. Girard 等^[119]指出，裂隙扩展过程在岩体温度位于 0 ~ -15 范围一直存在。此外，裂隙的宽度变化(张开/闭合度)还与冻融循环周期有关^[125]。

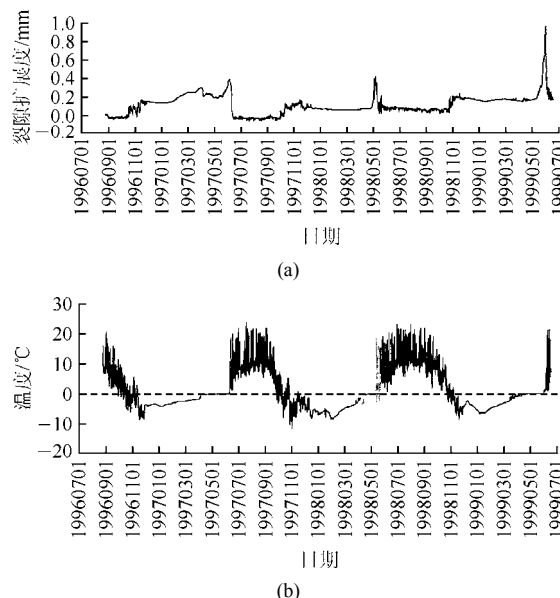


图 16 裂隙扩展度和裂隙顶部温度随时间的变化^[124]

Fig.16 Temporal variations of the width expansion and crack-top temperature of the monitored crack^[124]

D. Amitrano 等^[126]对高山岩体进行了自然条件下的热循环和冻融循环声发射现场试验，试验结果表明：细观破裂事件随着岩石受热变化和冻融循环的过程而大量发生。AE 事件数在负温下增加，当温度降低到 0 时 AE 事件达到了一个峰值，但并不会随着温度的降低而停止，因为不同孔隙几何尺寸的孔隙水冻结温度不同，孔隙水的冻结在低于 0 时仍然在不断的发生。H. H. Christiansen^[127]对挪威 Svalbard 岛上的冰楔裂隙进行了 1 a 的监测，裂隙在地表温度降低到 -15 时才开始启裂扩展。A. Hasler 等^[128]对瑞士山体岩石滑坡行为进行了现场监测，发现裂隙扩展长度随温度的降低而增加，岩体的剪切膨胀主要是在融冻季节出现，由于裂隙冰融化后对裂隙界面的弱化，裂隙岩体剪切强度降低，易发生剪切破坏和坡体滑落。

裂隙的冻胀扩展不仅体现在裂隙宽度的变化，裂隙扩展长度和方向对判断裂隙岩体冻胀损伤程度是更加重要的 2 个物理量，但在现场试验监测中对裂隙长度扩展度的获取很难，如何监测裂隙尖端的扩展长度和方向是裂隙岩体冻融损伤研究中一大难点和关键点，并且，现有的对现场岩体裂隙冻胀扩展行为的观测多是基于寒区高山岩体，对于寒区隧

道等人工建设岩土工程中的裂隙追踪研究还很少。

值得庆幸的是，近期国内也已有部分学者开始着手于室内冻融循环下的裂隙岩体损伤与扩展机制研究，如李新平等^[129-130]开展了单裂隙岩体冻融循环强度损伤试验和裂隙贯通机制研究，刘红岩等^[131]进行了节理岩体冻融加载下的损伤破坏和裂纹扩展试验初步研究，但关于裂隙岩体冻融损伤试验的研究在国内才刚刚开始，而且由于室内冻融环境与现场条件的巨大差异，研究现场寒区工程岩体冻胀行为监测仪器和方法也势必将会成为研究裂隙岩体冻融损伤的重要方向之一。

5 讨论

岩体内的微裂隙成核、扩展聚集和新旧裂隙间的相互贯通会显著影响裂隙岩体的力学强度，威胁岩土工程的安全与稳定。裂隙在低温 THM 耦合下的水冰相变、冻胀力的产生，会导致裂隙的萌生、扩展演化，严重威胁寒区岩土工程稳定性。但对冻岩的研究才刚刚起步，许多问题亟待解决，主要存在以下几个难点：

(1) 水是冻胀力的根本物质来源，水分迁移机制是研究裂隙岩体冻胀机制的基本内容，如何针对裂隙岩体，在孔裂隙冰生长过程模型的基础之上，分别建立岩体基质中和裂隙中的水分迁移模型是第一大难点。

(2) 裂隙的冻胀扩展过程与冻胀力密切相关，影响冻胀力量值的因素众多，但裂隙中的冻胀力是水冰相变的结果，与裂隙间存在膨胀耦合关系，重点应该抓住裂隙与水之间的相互作用过程，如何结合试验构建不同地质环境下的冻胀力求解方法是第二大难点。

(3) 裂隙扩展演化机制是目前岩石领域的研究热点，将温度荷载和冻胀力引入其中将更具有挑战性。况且冻胀力随着环境不断变化，低温裂隙岩体也具有其独特的力学性质，导致冻胀力下的裂隙扩展机制成为了研究冻岩的另一大热点和难点。

(4) 所有的理论都离不开室内与现场试验，尤其是对冻岩而言，现场环境与室内存在着较大差别，冻胀力对环境和岩体本身的依耐性很强，基于现场岩体裂隙的冻胀扩展试验为建立和检验裂隙岩体冻胀理论提供了依据和保障，但现有的监测多针对环境温度、降雨量以及裂隙宽度等方面，裂隙的扩展长度和方向以及岩体内部水分时空演化规律等重要物理量都难以取得，如何获取现场裂隙岩体冻胀参

数是第四大难点。

低温裂隙岩体冻融损伤实质上是涉及相变下的复杂 THM 耦合作用结果。笔者认为，研究裂隙岩体的冻融损伤应以水冰相变为切入点，研究温度场、渗流场和应力场与裂隙网络之间的相互作用机制：

(1) 低温 THM 耦合下的冻胀融缩作用导致裂隙网络扩展演化，渗流场和温度场的作用分别表现为裂隙中的水分迁移、水冰相变和冻胀力的萌生与消散，冻胀荷载的出现改变了岩体中的原有应力场，进而引起裂隙启裂扩展和裂隙网络的演化。

(2) 裂隙网络作为岩体的结构特征，在扩展和演化过程中也会反作用于岩体的温度场、应力场和渗流场。

这一作用过程相当于内部荷载与结构之间的相互反馈与调整，最终岩体的冻融损伤体现在岩体结构的改变上。结合以上分析，笔者认为对裂隙岩体冻融损伤的研究可以从微观入手，结合界面力学、相变理论和渗流力学探究岩体的水分迁移机制；进而上升到细/宏观层面，结合弹塑性力学、岩石力学和断裂力学相关理论解决冻胀力的量值、裂隙冻胀扩展机制等关键问题，并采用当前热门的数值计算方法^[132]对岩体裂隙网络扩展演化进行模拟分析，最终实现对裂隙岩体冻融损伤程度的量化计算和寒区岩体工程稳定性研究。

6 结论

本文对裂隙岩体冻融损伤和岩体裂隙冻胀扩展研究现状进行了概括，归纳了裂隙岩体冻融损伤的关键科学问题，包括：岩体基质和裂隙中的水分迁移机制，岩体裂隙中的冻胀力萌生消散机制，岩体裂隙冻胀扩展准则以及冻融循环下岩体冻胀裂隙扩展机制等，并阐述了各关键问题的研究状况，结合本文可以得出以下几点结论：

(1) 裂隙岩体的冻融损伤和冻胀裂隙扩展是水分迁移、聚集冻胀的结果，岩体中的水分向冻结区迁移的广义驱动力以温度梯度势为主，裂隙岩体中的水分迁移机制研究应以分凝冰理论为基本出发点，关注纳米级未冻水膜上的动力学过程，重点研究岩体裂隙冻融过程中的水分迁移。

(2) 冻胀力的研究是核心，也是连接水冰相变与裂隙岩体冻融损伤的关键，冻胀力受岩体初始饱和度、冻结率、岩体物理参数(渗透系数、孔隙率)、强度参数(弹性模量、泊松比)和冻结温度等因素的

影响较大,对于裂隙而言,裂隙的几何形态、冻结方向和断裂韧度等也会影响裂隙中冻胀力大小。在不同地质条件和冻融环境下各因素对冻胀力量值的影响程度不同,应区别对待。

(3) 裂隙的冻胀扩展以冻胀荷载为主,但现有关于裂隙岩体冻融损伤和冻胀力下裂隙扩展机制研究的室内和现场试验开展较少,裂隙网络冻胀扩展演化数值模拟方法也不成熟。

上述 3 个部分的研究,对于揭示裂隙岩体的冻融损伤机制和维护寒区岩土工程安全稳定具有重大意义。

参考文献(References):

- [1] 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 1): 2 977–2 993.(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.1): 2 977–2 993.(in Chinese))
- [2] 乔京生,陶龙光,弼尚银. 地铁隧道水平冻结施工地表变形特性的模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 643–2 646. (QIAO Jingsheng, TAO Longguang, MI Shangyin. Simulation study on deformation characteristics of ground surface in horizontal freezing construction of metro tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 643–2 646.(in Chinese))
- [3] 杨更社,奚家米. 煤矿立井冻结设计理论的研究现状与展望分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 627–635.(YANG Gengshe, XI Jiami. Review and prospects of research on freezing design theory of coal mine shaft[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 627–635.(in Chinese))
- [4] 张建明,刘 端,齐吉琳. 青藏铁路冻土路基沉降变形预测[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 12–17.(ZHANG Jianming, LIU Duan, QI Jilin. Estimation on the settlement and deformation of embankment along Qinghai—Tibet railway in permafrost regions[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 12–17.(in Chinese))
- [5] 齐吉琳,马 巍. 冻土的力学性质及研究现状[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 133–143.(QI Jilin, MA Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 133–143.(in Chinese))
- [6] 马 巍,王大雁. 中国冻土力学研究 50 年回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 625–640.(MA Wei, WANG Dayan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625–640.(in Chinese))
- [7] 盛岱超,张 升,贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 594–605.(SHENG Daichao, ZHANG Sheng, HE Zuoyue. Assessing frost susceptibility of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 594–605.(in Chinese))
- [8] 邓红卫,田维刚,周科平,等. 2001~2012 年岩石冻融力学研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(24): 74–79.(DENG Hongwei, TIAN Weigang, ZHOU Keping, et al. Progress in freezing-thawing rock mechanics during the period of 2001 to 2012[J]. Science and Technology Review, 2013, 31(24): 74–79.(in Chinese))
- [9] MILLER R D. Frost heaving in non-colloidal soils[C]// Proceedings of the 3rd International Conference Permafrost. [S. l.]: [s. n.], 1978: 707–713.
- [10] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. Water Resources Research, 1980, 16(5): 918–930.
- [11] O'NEILL K, MILLER R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, 21(3): 281–296.
- [12] NIXON J F. Discrete ice lens theory for frost heave in soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(6): 843–859.
- [13] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1 314–1 323.
- [14] GUYMON G L, LUTHIN J N. A coupled heat and moisture transport model for arctic soils[J]. Water Resources Research, 1974, 10(5): 995–1 001.
- [15] NEWMAN G P, WILSON G W. Heat and mass transfer in unsaturated soils during freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(1): 63–70.
- [16] HANSSON K, LUNDIN L C. Equifinality and sensitivity in freezing and thawing simulations of laboratory and in situ data[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 44(1): 20–37.
- [17] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1980, 17(4): 473–486.
- [18] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. The segregation potential of a freezing soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(4): 482–491.
- [19] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. Effects of applied pressure on freezing soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1982, 19(4): 494–505.
- [20] SELVADURAI A P S, HU J, KONUK I. Computational modelling of frost heave induced soil-pipeline interaction: I. Modelling of frost heave[J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29(3): 215–228.
- [21] SELVADURAI A P S, HU J, KONUK I. Computational modelling of

- frost heave induced soil-pipeline interaction : II. Modelling of experiments at the Caen test facility[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29(3) : 229–257.
- [22] 李 萍,徐敦祖,陈峰峰. 冻结缘和冻胀模型的研究现状与进展[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1) : 90–95.(LI Ping, XU Xiaozu, CHEN Fengfeng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1) : 90–95.(in Chinese))
- [23] 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))
- [24] 赖远明,刘松玉,吴紫汪. 寒区挡土墙温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(6) : 88–95.(LAI Yuanming, LIU Songyu, WU Ziwan. Nonlinear analyses for retaining walls in frigid zone—a coupled problem of temperature, seepage, and stress fields[J]. *China Civil Engineer Journal*, 2003, 36(6) : 88–95.(in Chinese))
- [25] LAI Y, XU X, DONG Y, et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 87(1) : 6–18.
- [26] 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.
- [27] 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 of 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))
- [28] KANG Y, LIU Q, HUANG S. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for rock mass under freezing/thawing condition[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 95(1) : 19–26.
- [29] AKAGAWA S, FUKUDA M. Frost heave mechanism in welded tuff[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1991, 2(4) : 301–309.
- [30] TABER S. Frost heaving[J]. *The Journal of Geology*, 1929, 37(5) : 428–461.
- [31] TABER S. The mechanics of frost heaving[J]. *The Journal of Geology*, 1930, 38(4) : 303–317.
- [32] 李 宁,程国栋,徐敦祖,等. 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, et al. The advance and review on frozen soil mechanics[J]. *Advances in Mechanics*, 2001, 31(1) : 95–102.(in Chinese))
- [33] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1961, 57 : 1 541–1 551.
- [34] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. *Highway Research Record*, 1972, 393 : 1–11.
- [35] MILLER R D. Lens initiation in secondary heaving[C]// *Proceedings of the International Symposium on Frost Action in Soils*. [S. l.] : [s. n.], 1977 : 68–74.
- [36] 徐敦祖,邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991 : 36–69.(XU Xiaozu, DENG Yousheng. Experimental study on water migration in freezing and frozen soils[M]. Beijing : Science Press, 1991 : 36–69.(in Chinese))
- [37] 赵 刚,陶夏新,刘 兵. 原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12) : 1 952–1 957.(ZHAO Gang, TAO Xiaxin, LIU Bing. Experimental study on water migration in undisturbed soil during freezing and thawing process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12) : 1 952–1 957.(in Chinese))
- [38] NOON C. Secondary frost heave in freezing soils[Ph. D. Thesis][D]. Oxford : University of Oxford, 1996.
- [39] SASS O. Rock moisture fluctuations during freeze-thaw cycles : preliminary results from electrical resistivity measurements[J]. *Polar Geography*, 2004, 28(1) : 13–31.
- [40] 原国红. 季节冻土水分迁移的机制及数值模拟[博士学位论文][D]. 长春 : 吉林大学, 2006.(YUAN Guohong. The mechanism and numerical simulation of water transfer in seasonal freezing soil[Ph. D. Thesis][D]. Changchun : Jilin University, 2006.(in Chinese))
- [41] 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))
- [42] 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 freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9) : 1 765–1 770.(in Chinese))
- [43] 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) : 9–16.(YANG Gengshe. A review on frozen rock mechanics[J]. *Mechanics in Engineering*, 2009, 31(6) : 9–16.(in Chinese))
- [44] KONRAD J M. Estimation of the segregation potential of fine-grained

- soils using the frost heave response of two reference soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 38–50.
- [45] MURTON J B, PETERSON R, OZOUF J C. Bedrock fracture by ice segregation in cold regions[J]. Science, 2006, 314: 1 127–1 129.
- [46] 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.
- [47] DERJAGUIN B V, CHURAEV N V. The definition of disjoining pressure and its importance in the equilibrium and flow of thin films[J]. Colloid Journal of the USSR, 1976, 38(3): 402–410.
- [48] CHURAEV N V, SOBOLEV V D. Disjoining pressure of thin unfreezing water layers between the pore walls and ice in porous bodies[J]. Colloid Journal, 2002, 64(4): 508–511.
- [49] DASH J G, FU H, WETTLAUFER J S. The premelting of ice and its environmental consequences[J]. Reports on Progress in Physics, 1995, 58(1): 115–167.
- [50] ROSENBERG R. Why is ice slippery?[J]. Physics Today, 2005, 58(12): 50–55.
- [51] DASH J G, REMPEL A W, WETTLAUFER J S. The physics of premelted ice and its geophysical consequences[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, 78(3): 695–741.
- [52] DERJAGUIN B V, CHURAEV N V. Flow of nonfreezing water interlayers and frost heaving[J]. Cold Regions Science and Technology, 1986, 12(1): 57–66.
- [53] VLAHOU I, WORSTER M G. Ice growth in a spherical cavity of a porous medium[J]. Journal of Glaciology, 2010, 56(196): 271–277.
- [54] WETTLAUFER J S, WORSTER M G. Premelting dynamics[J]. Annu Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 427–452.
- [55] SETZER M J. Development of the micro-ice-lens model[C]// International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete. [S. l.]: RILEM Publications SARL, 2002: 133–145.
- [56] 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.
- [57] 杨更社, 张全胜. 冻融环境下岩体微观损伤及水热迁移机制分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006: 20–45.(YANG Gengshe, ZHANG Quansheng. Analysis of mechanism of rock microscopic damage and moisture heat transfer under the frost and thaw condition[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2006: 20–45.(in Chinese))
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] SANDSTRÖM T, FRIDH K, EMBORG M, et al. The influence of temperature on water absorption in concrete during freezing[J]. Nordic Concrete Research, 2002, 45(1): 45–58.
- [61] 杨更社, 蒲毅彬. 冻融循环条件下岩石损伤扩展研究初探[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 357–360.(YANG Gengshe, PU Yibin. Initial discussion on the damage propagation of rock under the frost and thaw condition[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 357–360. (in Chinese))
- [62] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机制分析及冻融力学试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3 076–3 082.(XU Guangmiao, LIU Quansheng. Analysis of mechanism of rock failure due to freeze-thaw cycling and mechanical testing study on frozen-thawed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 076–3 082.(in Chinese))
- [63] 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))
- [64] 张慧梅, 杨更社. 冻融岩石损伤劣化及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1 756–1 762.(ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Experimental study of damage deterioration and mechanical properties for freezing-thawing rock[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1 756–1 762.(in Chinese))
- [65] 张慧梅, 杨更社. 水分及冻融循环对红砂岩物理力学特性的影响[J]. 实验力学, 2013, 28(5): 635–641.(ZHANG Huimei, YANG Gengshe. On the influence of moisture and freeze-thaw cycle on physical and mechanical properties of red sandstone[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(5): 635–641.(in Chinese))
- [66] 张慧梅, 杨更社. 水分及冻融效应对页岩力学特性影响的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(2): 95–99.(ZHANG Huimei, YANG Gengshe. Experimental studies on moisture and freeze-thaw effect of mechanical properties of shale[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(2): 95–99.(in Chinese))
- [67] OZAWA H. Thermodynamics of frost heaving: A thermodynamic proposition for dynamic phenomena[J]. Physical Review E, 1997, 56(3): 2 811–2 816.
- [68] 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))
- [69] VAN ALST L J. Laboratory experiments in cold temperature rock deformation[Ph. D. Thesis][D]. Oregon: University of Oregon, 2011.
- [70] MCGREEVY J P, WHALLEY W B. Rock moisture content and frost weathering under natural and experimental conditions: a comparative discussion[J]. Arctic and Alpine Research, 1985, 17(3): 337–346.
- [71] DÖPPENSCHMIDT A, BUTT H J. Measuring the thickness of the liquid-like layer on ice surfaces with atomic force microscopy[J]. Langmuir, 2000, 16(16): 6 709–6 714.
- [72] ZUBER B, MARCHAND J. Modeling the deterioration of hydrated cement systems exposed to frost action: Part 1: Description of the mathematical model[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(12): 1 929–1 939.
- [73] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30–34.(ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30–34.(in Chinese))
- [74] 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))
- [75] 谭贤君, 陈卫忠, 杨建平, 等. 盐岩储气库温度–渗流–应力–损伤耦合模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3 633–3 641.(TAN Xianjun, CHEN Weizhong, YANG Jianping, et al. Study of THM-damage coupling model of gas storage in salt rock with interlayer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3 633–3 641.(in Chinese))
- [76] 夏才初, 黄继辉, 韩常领, 等. 寒区隧道岩体冻胀率的取值方法和冻胀敏感性分级[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1 876–1 885.(XIA Caichu, HUANG Jihui, HAN Changling, et al. Methods of frost-heave ratio evaluation and classification of frost-heave susceptibility of tunnel surrounding rock in cold regions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1 876–1 885.(in Chinese))
- [77] 北川修三, 川上義輝. 凍上試験による地山の凍上性の判定[J]. 応用地質, 1986, 27(2): 11–20.(KITAGAWA Shuzo, KAWAKAMI Yoshiteru. Judgment of frost heaving of rocks by freezing test[J]. Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 1986, 27(2): 11–20.(in Japanese))
- [78] THARP T M. Conditions for crack propagation by frost wedging[J]. Geological Society of America Bulletin, 1987, 99(1): 94–102.
- [79] HONEYBORNE D B, HARRIS P B. The structure of porous building stone and its relation to weathering behaviour[C]// Proceedings of the Tenth Symposium of the Colston Research Society. [S. l.]: [s. n.], 1958: 343–365.
- [80] 刘泉声, 康永水, 刘小燕. 冻结岩体单裂隙应力场分析及热–力耦合模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 217–225.(LIU Quansheng, KANG Yongshui, LIU Xiaoyan. Analysis of stress field and coupled thermo-mechanical simulation of single-fracture frozen rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 217–225.(in Chinese))
- [81] KEVIN H. Freeze-thaw simulation on quartzmicaschist and their implications for weathering studies on Signy Island, Antarctica[J]. British Antarctic Survey, 1986, 73(1): 19–30.
- [82] GRUBER S, HAEBERLI W. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface(2003–2012), 2007, 112(F2): 1–10.
- [83] 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): 1 318–1 336.(CHEN Weizhong, TAN Xianjun, YU Hongdan, et al. Advance and review on thermo-hydro-mechanical characteristics of rock mass under condition of low temperature and freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1 318–1 336.(in Chinese))
- [84] PRICK A. Critical degree of saturation as a threshold moisture level in frost weathering of limestones[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1997, 8(1): 91–99.
- [85] BRIDGMAN P W. Water, in the liquid and five solid forms, under pressure[C]// Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences. [S. l.]: American Academy of Arts and Sciences, 1912: 441–558.
- [86] MATSUOKA N. The rate of bedrock weathering by frost action: field measurements and a predictive model[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(1): 73–90.
- [87] 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.
- [88] HALL K, THORN C E, MATSUOKA N, et al. Weathering in cold regions: some thoughts and perspectives[J]. Progress in Physical Geography, 2002, 26(4): 577–603.
- [89] HALL K. Rock moisture content in the field and the laboratory and its relationship to mechanical weathering studies[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(2): 131–142.
- [90] 王 俐. 不同初始含水率红砂岩冻融损伤的试验研究及其机制分析[硕士学位论文][D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.(WANG Li. Experiment studies and mechanism analysis on different initial water-saturated red sandstones under condition of freeze and thaw[M.

- S. Thesis[D]. Beijing : Chinese Academy of Sciences ,2006.(in Chinese)
- [91] MATSUOKA N. Microgelivation versus macrogelivation : towards bridging the gap between laboratory and field frost weathering[J]. *Permafrost and Periglacial Processes* , 2001 , 12(3) : 299 – 313.
- [92] STYLE R W , PEPPIN S S L. The kinetics of ice-lens growth in porous media[J]. *Journal of Fluid Mechanics* , 2012 , 692 : 482 – 498.
- [93] 周科平, 张亚民, 李杰林, 等. 粗、细粒径花岗岩冻融损伤机制及其演化规律[J]. *北京科技大学学报*, 2013 , 35(10) : 1 249 – 1 255. (ZHOU Keping , ZHANG Yanmin , LI Jielin , et al. Degradation mechanism and evolutionary pattern of granites with coarse and fine grains in freeing-thawing condition[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing* , 2013 , 35(10) : 1 249 – 1 255.(in Chinese))
- [94] 杨 卫. 宏微观断裂力学[M]. 北京 : 国防工业出版社, 1995 : 37 – 40.(YANG Wei. *Macroscale and microscale fracture mechanics*[M]. Beijing :National Defense Industry Press ,1995 :37 – 40.(in Chinese))
- [95] 李杰林, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构冻融损伤试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012 , 31(6) : 1 208 – 1 214.(LI Jielin , ZHOU Keping , ZHANG Yanmin , et al. Experimental study of rock porous structure damage characteristics under condition of freezing-thawing cycles based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* , 2012 , 31(6) : 1 208 – 1 214.(in Chinese))
- [96] MATSUOKA N. Mechanisms of rock breakdown by frost action : an experimental approach[J]. *Cold Regions Science and Technology* , 1990 , 17(3) : 253 – 270.
- [97] FUKUDA M. Rock weathering by freezing-thawing cycles[J]. *Low Temperature Science , Series A* , 1974 , 32 : 243 – 249.
- [98] LAUTRIDOU J P , OZOUF J C. Experimental frost shattering 15 years of research at the Centre de Géomorphologie du CNRS[J]. *Progress in Physical Geography* , 1982 , 6(2) : 215 – 232.
- [99] WORSTER M G , WETTLAUFER J S. The fluid mechanics of premelted liquid films , in fluid dynamics at interfaces[M]. [S. l.] : [s. n.] , 1999 : 339 – 351.
- [100] SETZER M J. Action of frost and deicing chemical : Basic phenomena and testing[C]// MARCHAND J , PIGEON M , ZETZER M , ed. *Freeze-thaw Durability of Concrete*. London : E&FN Spon , 1997 : 3 – 21.
- [101] WETTLAUFER J S. Ice surfaces : macroscopic effects of microscopic structure[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London , Series A : Mathematical , Physical and Engineering Sciences* , 1999 , 357(1763) : 3 403 – 3 425.
- [102] OZAWA H , KINOSITA S. Segregated ice growth on a microporous filter[J]. *Journal of Colloid and Interface Science* , 1989 , 132(1) : 113 – 124.
- [103] FUKUDA M. Freezing-thawing process of water in pore space of rocks[J]. *Low Temperature Science , Series A* , 1971 , 29 : 225 – 229.
- [104] DUNN J R , HUDEC P P. Water , clay and rock soundness[J]. *Ohio Journal of Science* , 1966 , 66(2) : 153 – 168.
- [105] BATTLE W R B. Temperature observations in bergschrunds and their relationship to frost shattering[J]. *Norwegian Cirque Glaciers* , 1960 , (4) : 83 – 95.
- [106] HALLET B , WALDER J S , STUBBS C W. Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained subzero temperatures : Verification from an experimental study using acoustic emissions[J]. *Permafrost and Periglacial Processes* , 1991 , 2(4) : 283 – 300.
- [107] AROSIO D , LONGONI L , MAZZA F , et al. Freeze-thaw cycle and rockfall monitoring[M]. [S. l.] : Springer Berlin Heidelberg , 2013 : 385 – 390.
- [108] NAKAMURA D , GOTO T , ITO Y , et al. Basic study on the frost heave pressure of rocks-dependence of the location of frost heave on the strength of the rock[J]. *Journal of MMIJ* , 2011 , 127(9) : 558 – 564.
- [109] MATSUOKA N. A laboratory simulation on freezing expansion of a fractured rock : preliminary data[R]. Tokyo : University of Tsukuba , 1995 : 5 – 8.
- [110] MCGREEVY J P , WHALLEY W B. The geomorphic significance of rock temperature variations in cold environments : a discussion[J]. *Arctic and Alpine Research* , 1982 , 14(2) : 157 – 162.
- [111] WALDER J S , HALLET B. A theoretical model of the fracture of rock during freezing[J]. *Geological Society of America Bulletin* , 1985 , 96(3) : 336 – 346.
- [112] WALDER J S , HALLET B. The physical basis of frost weathering : toward a more fundamental and unified perspective[J]. *Arctic and Alpine Research* , 1986 , 18(1) : 27 – 32.
- [113] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石细观损伤扩展特性影响研究初探[J]. *岩土力学*, 2004 , 25(9) : 1 409 – 1 412.(YANG Gengshe , ZHANG Quansheng , PU Yibin. Preliminary study on meso-damage propagation characteristics of rock under condition of freezing temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics* , 2004 , 25(9) : 1 409 – 1 412. (in Chinese))
- [114] MUTOU Y , WATANABE K , ISHIZAKI T , et al. Microscopic observation of ice lensing and frost heave in glass beads[C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost*. [S. l.] : [s. n.] , 1998 : 783 – 787.
- [115] HALL K , HALL A. Thermal gradients and rock weathering at low temperatures : some simulation data[J]. *Permafrost and Periglacial Processes* , 1991 , 2(2) : 103 – 112.
- [116] 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))
- [117] DUCA S. Design of an experimental procedure and set up for the detection of ice segregation phenomena in rock by acoustic emissions[Ph. D. Thesis][D]. Torino : Politecnico di Torino, 2013.
- [118] 徐 彬, 闫 娜, 李 宁, 等. 温降对液化石油气储库围岩裂隙开裂影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4) : 718 – 726.(XU Bin, YAN Na, LI Ning, et al. Numerical analysis of effect of temperature decreasing on crack of chilled LPG unlined storage cavern[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4) : 718 – 726.(in Chinese))
- [119] GIRARD L, GRUBER S, WEBER S, et al. Environmental controls of frost cracking revealed through in situ acoustic emission measurements in steep bedrock[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(9) : 1 748 – 1 753.
- [120] PRICK A. Frost weathering and rock fall in an arctic environment, Longyearbyen, Svalbard[C]// Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost. [S. l.] : [s. n.], 2003 : 907 – 912.
- [121] ISHIKAWA M, KURASHIGE Y, HIRAKAWA K. Analysis of crack movements observed in an alpine bedrock cliff[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(7) : 883 – 891.
- [122] MATTHEWS J A, DAWSON A G, SHAKESBY R A. Lake shoreline development, frost weathering and rock platform erosion in an alpine periglacial environment, Jotunheimen, southern Norway[J]. Boreas, 1986, 15(1) : 33 – 50.
- [123] MATSUOKA N. Frost weathering and rockwall erosion in the southeastern Swiss Alps : long-term(1994-2006) observations[J]. Geomorphology, 2008, 99(1) : 353 – 368.
- [124] MATSUOKA N. Direct observation of frost wedging in alpine bedrock[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(6) : 601 – 614.
- [125] MATSUOKA N. Frost wedging and rockfalls on high mountain rock slopes : 11 years of observations in the Swiss Alps[C]// Geophys. Res. Abstr.. [S. l.] : [s. n.], 2006 : 05344.
- [126] AMITRANO D, GRUBER S, GIRARD L. Evidence of frost-cracking inferred from acoustic emissions in a high-alpine rock-wall[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 341 : 86 – 93.
- [127] CHRISTIANSEN H H. Thermal regime of ice-wedge cracking in Adventdalen, Svalbard[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2005, 16(1) : 87 – 98.
- [128] HASLER A, GRUBER S, BEUTEL J. Kinematics of steep bedrock permafrost[J]. Journal of Geophysical Research : Earth Surface(2003 – 2012), 2012, 117(F1) : 1 – 17.
- [129] 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. Resresearch 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))
- [130] 路亚妮, 李新平, 吴兴宏. 三轴压缩条件下冻融单裂隙岩样裂缝贯通机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(6) : 1 579 – 1 584.(LU Yani, LI Xinping, WU Xinghong. Fracture coalescence mechanism of single flaw rock specimen due to freeze-thaw under triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6) : 1 579 – 1 584.(in Chinese))
- [131] 刘红岩, 刘 冶, 邢闯锋, 等. 循环冻融条件下节理岩体损伤破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6) : 1 547 – 1 554.(LIU Hongyan, LIU Ye, XING Chuangfeng, et al. Test study of damage failure of jointed rock mass under freezing-thawing cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6) : 1 547 – 1 554.(in Chinese))
- [132] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2) : 305 – 320.(LIU Quansheng, LIU Xuewei. Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multi-field coupling of fractured rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2) : 305 – 320.(in Chinese))