

深低温环境岩石力学与工程研究进展

谭贤君¹, 刘显欢², 陈卫忠¹, 贾海梁², 郑培超^{1,3}, 刘杰⁴, 赵延兴⁵, 肖红梅⁵, 李娜娜⁶, 赵晏强⁶

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院 化学研究所, 北京 100049; 5. 中国科学院 理化技术研究所, 北京 100049; 6. 中国科学院武汉文献情报中心 科技大数据湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 在低温环境下, 受水-冰相变的影响, 岩石物理力学性质及其工程行为与常温状态存在显著差异, 且这种差异随温度降低而加剧。结合不同行业的低温分区标准和岩土工程所处的低温环境, 提出适用于岩土力学学科的低温分区建议, 明确界定“深低温”的起始温度及其亚类分区(“极低温”和“超低温”)。基于室内试验、理论分析与数值模拟等方面的研究成果, 对深低温环境下岩石物理力学特性开展系统综述, 着重探讨孔隙度、弹性波速、导热系数、弹性模量及力学强度等关键参数随温度变化的演化规律; 结合热-水-力多场耦合模型, 深入分析深低温环境下冻胀效应、热应力分布及水分迁移对岩石损伤的影响机制, 并通过数值模拟揭示温度场、应力场与渗流场的耦合演化特征及其在岩石损伤累积过程中的作用机制。进一步地, 针对地下能源存储、液氮无水压裂、极地工程与深空资源开发等典型工程场景, 梳理并分析深低温岩石力学问题的关键科学与技术挑战。最后, 基于当前理论、技术研究进展和实际工程需求, 提出深低温环境下岩石力学未来研究的若干方向, 包括深低温岩石微观相变动力学与多尺度损伤机制、非平衡态多场耦合理论的构建及深低温环境下岩石长期服役性能的时空演化预测等。

关键词: 岩石力学; 深低温; 热应力; 冻胀应力; 多场耦合效应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)07-1671-24

Advances in rock mechanics and engineering research in deep low-temperature environments

TAN Xianjun¹, LIU Xianhuan², CHEN Weizhong¹, JIA Hailiang², ZHENG Peichao^{1,3}, LIU Jie⁴,
ZHAO Yanxing⁵, XIAO Hongmei⁵, LI Nana⁶, ZHAO Yanqiang⁶

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology, National Science Library (Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In low-temperature environments, the physical and mechanical properties of rocks, as well as their engineering behavior, differ significantly from those at ambient temperature, primarily due to water-ice phase transitions. These differences become more pronounced as the temperature decreases. Considering industry-specific

收稿日期: 2024-11-18; **修回日期:** 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U24A20184, XZ202201ZY0021G)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U24A20184 and XZ202201ZY0021G)

作者简介: 谭贤君 (1984-), 男, 2010 年于中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位, 现任研究员, 主要从事寒区及软岩大变形地下工程灾变机制与防控方面的研究工作。E-mail: xjtan@whrsm.ac.cn. 通讯作者: 陈卫忠 (1968-), 男, 博士, 现任研究员。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0891

low-temperature classification standards and the environmental conditions of geotechnical engineering, a refined low-temperature zoning framework tailored to geomechanics is proposed, defining the threshold for “deep low temperatures” and further subdividing it into “extreme low temperatures” and “ultra-low temperatures.” Based on findings from laboratory experiments, theoretical analyses, and numerical simulations, this study provides a systematic review of the physical and mechanical properties of rocks under deep low-temperature, with a particular focus on the temperature-dependent evolution of key parameters such as porosity, elastic wave velocity, thermal conductivity, elastic modulus, and mechanical strength. Furthermore, by employing the thermo-hydro-mechanical (THM) coupling models, the mechanisms by which frost heave effects, thermal stress distribution, and water migration contribute to rock damage are analyzed. Numerical simulations reveal the coupled evolution characteristics of the temperature, stress, and seepage fields, as well as their underlying roles in the accumulation and progression of rock damage. Additionally, key scientific and technological challenges associated with deep low-temperature rock mechanics are examined in the context of engineering applications, such as underground energy storage, liquid nitrogen-based waterless fracturing, polar infrastructure, and deep-space resource extraction. Finally, based on current theoretical advancements, technological developments, and engineering demands, several future research directions in rock mechanics under deep low-temperature conditions are proposed. These include investigations into the micro-scale phase transition dynamics and multi-scale damage mechanisms of rocks in deep low temperatures, the development of non-equilibrium multi-field coupling theoretical frameworks, and the spatiotemporal prediction of long-term rock performance under deep low-temperature conditions.

Key words: rock mechanics; deep low-temperature; thermal stress; frost heaving pressure; multi-field coupling effects

1 引言

资源与能源作为国家经济持续发展以及产业体系稳定运行的双重支柱,在构建高效、协同且可持续的国民经济体系中占据重要地位。面对地球浅表资源日益枯竭的严峻现实,向地球深部、极地等极端自然环境乃至深空领域探索并开发新型资源,已成为当前发展阶段人类亟需积极应对的重要方向与现实挑战。国际上的先行实践,如哈利伯顿公司在美国肯塔基州东部泥盆纪页岩中成功实施的液氮压裂技术^[1],俄罗斯北极区域大型液化天然气储存设施的顺利运行^[2-3],显著提升了资源开采和储存效率。同时,国内连接新疆与西藏的铁路交通大动脉工程亦已完成初步勘测(线路平均海拔超过 4 000 m),正加速推进后续筹备工作;液化石油($-89\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -42\text{ }^{\circ}\text{C}$)、液化天然气($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$)等资源的地下储库建设可行性研究正在有条不紊的进行^[4];月球与火星载人探测及基地构建的规划提上议程^[5-6]等,这些均标志着我国向极端低温及深空领域迈进的坚定步伐。

近 30 年来, T. Wang 等^[7-13]围绕低温条件下岩石物理力学性质开展了广泛的试验研究,揭示了温度降低对岩石强度、变形及破坏机制的影响。例如,

低温诱导矿物颗粒收缩,使颗粒间接触更加紧密,增强了应力集中效应,进而导致岩石脆性增加、韧性降低^[14-16]。冻融循环加剧岩石劣化,孔隙水的周期性冻结-融化诱发微裂纹扩展,削弱结构的稳定性^[17-21]。然而,大多数研究聚焦于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,而在更低温条件下,岩石表现出更复杂的热-水-力耦合效应。低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,孔隙内毛细水冻结膨胀范围扩大,导致冻胀应力显著增加^[22-23]。同时,较大的温度梯度引发更强的冷缩效应,使岩石内部热应力显著提升。冻胀应力与热应力的共同作用,加剧了岩石微观结构的破坏,进一步影响其整体力学稳定性。因此,深入认识 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下低温环境中岩石材料性能演化规律的机制、理论创新和技术突破,具有重要的理论和实践需求。

鉴于此,本文首先结合不同行业的低温分区标准和岩土工程所处的低温环境,提出了适用于岩土力学学科特点的低温分区建议,明确界定了“深低温”的起始温度及其亚类分区(“极低温”和“超低温”)的划分标准。在此基础上,系统综述了深低温环境下岩石力学与工程研究的最新进展,从室内试验、理论研究和数值模拟 3 个方面,总结了深低温环境下岩石力学的研究现状,并针对不同工程应用中涉及的岩土力学问题进行了梳理和分析。最后,

基于当前理论、技术研究进展和实际工程需求，提出了深低温环境下岩石力学未来研究的若干方向。抛砖引玉，以期为同行提供参考和启示。

2 深低温环境岩石力学研究现状

2.1 岩石力学与工程低温分区的界定

温度变化对材料的物理、化学以及力学性能的影响不容忽视，尤其是在低温条件下，材料性能会发生显著改变。因此，在各行业工程及科学研究中，系统地对低温进行分区分类，能够有效指导不同领域的工程设计、施工及科研工作，确保工程安全与经济效益。

在我国工程建设、低温管道技术及冷链物流等领域，涉及低温分区和分类的规范、标准中，既有国家标准，也有行业标准。在工程领域，城市轨道交通和煤矿冻结法施工规范中强调了冻结深度对温度选择的重要性，并依据冲积层厚度或开挖深度优化冻结壁温度，以保障施工安全与效率^[24-25]。隧道联络通道冻结法施工及验收规范依据冻结壁平均温度，将盐水最低温度设计值分为3类^[26]。在岩土抗冻试验标准方面，公路与铁路工程均采用最低月均气温作为冻融循环控制参数，但温度界定存在差异^[27-28]。在能源领域，液化天然气管道设计规范依据管道温度选取保冷材料，温度越低，导热系数要求越小^[29]。瓶装气体按临界温度分类为低温液化气体与液化气体，以确保安全储运^[30]。在冷链物流领域，冷冻物流规范划分4个温度带，以满足食品、药品等易腐产品的存储与运输需求^[31]。不同行业领域标准按低温分区详细分类情况如表1所示。

此外，还有其他行业领域依据不同低温进行划分。例如，根据制冷物质的不同，可分为盐水循环氨制冷冻结（ $-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、干冰冻结（ $-70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、液氮冻结（ $-150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）以及混合冻结（ $-70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。在岩石冻融循环试验中，针对不同岩石类型的温度选择也有所差异。较软岩（如砂岩、页岩）常采用“冻结温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，融化温度为常温（ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）”的循环条件，而对于结构致密的硬岩（如花岗岩、灰岩、安山岩）倾向于使用更极端的冻融循环方案，采用“ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结，常温或更高（ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）融化”^[32]。生命科学领域则依据生物样本的保存需求，将低温划分为冷藏（ $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、冷冻（ $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）和超低温（ $-196\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），以满足不同的试验或储存要求^[33]。此外，在摩擦学

表1 不同行业领域低温分类与标准概览

Table 1 Overview of low-temperature classification and standards across different industry sectors

来源	低温分类及要求
规范 ^[24]	根据施工深度，冻结壁的平均温度可分为两类：开挖深度 $H_j \leq 30\text{ m}$ ，冻结壁的平均温度 $T_p \leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；开挖深度 $H_j > 30\text{ m}$ ，冻结壁的平均温度 $T_p \leq -12\text{ }^{\circ}\text{C}$
规范 ^[25]	有效冻结壁的平均温度根据冲积层厚度进行分类：当冲积层厚 $< 120\text{ m}$ ，冻结壁平均温度取 $-7\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；当冲积层厚为 $120 \sim 250\text{ m}$ ，冻结壁平均温度取 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；当冲积层厚为 $250 \sim 400\text{ m}$ ，冻结壁平均温度取 $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；当冲积层厚 $> 400\text{ m}$ ，冻结壁平均温度取小于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$
规范 ^[26]	根据冻结壁的平均温度 T_p ，将最低盐水温度设计值 T_y 分为三类：当 $T_p = -8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， T_y 取 $-26\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；当 $T_p = -10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， T_y 取 $-28\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；当 $T_p < -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， T_y 取 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -28\text{ }^{\circ}\text{C}$
规程 ^[27]	在公路工程抗冻性试验中，根据最冷月的月平均气温来分类：最低月平均气温 $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，定义为寒冷地区；最低月平均气温 $< -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，则定义为严寒地区
规程 ^[28]	在铁路工程抗冻性试验中，根据最冷月的月平均气温来分类：最低月平均气温 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，定义为寒冷地区；最低月平均气温 $< -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，则定义为严寒地区
规范 ^[29]	保冷材料的导热系数根据管道内的温度来选择：当温度为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，取 $\lambda \leq 0.026$ ；当温度为 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，取 $\lambda \leq 0.022$ ；当温度为 $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，取 $\lambda \leq 0.017$
《瓶装气体分类》 ^[30]	按照临界温度将瓶装气体分为两类：临界温度 $\leq -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的气体为压缩气体、低温液化气体（深冷型）；临界温度 $> -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的气体为液化气体
《冷链物流分类与基本要求》 ^[31]	冷冻(F)物流温度带可分4类：I类（ $-18\text{ }^{\circ}\text{C} < F_1 \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）；II类（ $-30\text{ }^{\circ}\text{C} < F_2 \leq -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）；III类（ $-55\text{ }^{\circ}\text{C} < F_3 \leq -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）；IV类（ $F_4 \leq -55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）

和航空材料领域，超低温（ $< -153\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）通常是指使用液氮作为降温介质，以此提高材料在特殊环境下的性能^[34]。

综上所述，现有各行业的低温分区标准均基于特定技术需求与应用背景建立，其适用范围大多局限于专项工程或科研领域。针对岩土力学与工程学科，目前尚未形成具有普适性的低温环境分类体系。笔者通过系统梳理跨行业低温分类标准，并结合岩土工程典型低温应用场景及实证研究数据（包括但不限于地下食品冷藏仓储（ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、常规冻结岩石物理力学试验（ $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、液化石油气/天然气地下存储（ $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、液氮压裂技术（ $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 岩石脆性增强效应）、极地资源开采（ $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极端环境）、深空探测（月球夜间 $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境）），据此

提出符合岩土力学学科特征的低温环境分级建议：将 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 定义为常规低温环境(I 类)，低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 划归为深低温环境(II 类)。其中，II 类可细分为极低温($-160\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$)与超低温($<-160\text{ }^{\circ}\text{C}$) 2 个亚类。该分级体系明确界定了深低温岩土力学研究范畴，为不同温区岩土体力学响应研究提供了工程背景框架。具体分区情况见表 2^[3, 35-53]。

表 2 岩土工程中不同低温区间内的应用类型与研究分类^[3, 35-53]

Table 2 Application types and research categories in geotechnical engineering across different low-temperature ranges ^[3, 35-53]		
类型	温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	典型岩土工程应用及研究
常规低温	$-40\sim 0$	寒区建筑基础工程 ^[35] 、地下食品长期冷藏仓库 ^[36] 、液化氨气存储库 ^[37] 、盐水循环氨制冷冻结法 ^[38] 以及常规冻结岩石的物理力学性质试验研究 ^[39]
		液化丙烷地下存储库 ^[40] 、干冰冻结法 ^[41] 、矿井工作面冻结 ^[42] 以及极地岩土勘探及工程建设 ^[3]
极低温	$-70\sim -40$	
	$-120\sim -70$	液化乙烷 ^[43] 、液化乙烯能源存储 ^[44]
深低温	$-160\sim -120$	火星岩土勘探中的低温环境 ^[45] 、液氮冻结法 ^[46]
	$-180\sim -160$	液化天然气(LNG)地下存储库 ^[47]
超低温	$-200\sim -180$	液氮压裂 ^[48] 、液化空气储能 ^[49] 、月球岩土勘探中的低温环境 ^[50]
	<-200	液氢存储 ^[51] 、液氮存储 ^[52] 以及超导材料的力学特性 ^[53]

2.2 深低温环境岩石物理力学性质研究

在深低温岩石工程中，岩石通常同时受到热收缩、冻胀应力以及冻融循环等多种环境因素的耦合作用，导致其物理力学性质显著变化，损伤演化速度也加剧。因此，系统研究深低温冷却过程中的热变形行为、冻胀应力驱动下的裂纹扩展过程及冻融循环诱发的微观结构累积劣化，对于揭示深低温环境下岩石的损伤机制具有重要意义。目前，关于低温环境下岩石物理力学性质的研究较为广泛，但多集中在常规低温的温度范围内。对于深低温环境下岩石的物理力学特性，相关研究较为匮乏，已发表的成果相对较少。

2.2.1 冻结条件下岩石物理力学性质

深低温冻结过程中，热应力-相变耦合作用会诱导岩石微观结构重构，进而调控其宏观物理力学响应特征。当前研究揭示了 3 个核心作用机制：(1) 多相矿物颗粒的冷收缩效应；(2) 孔隙流体相变诱致体积膨胀的晶格畸变效应；(3) 冰晶成核生长过程中的胶结强化效应。上述机制通过协同改变岩石

介质内部缺陷的拓扑构型与能量分布状态，共同调控其表观物理力学参数的时变特性。

在物理性质方面，冻结温度的降低对岩石物理参数有着显著的影响。温度降低导致岩石弹性波速增加，当温度降至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，干燥安山岩的 P 波速度可提升 2%~5%，这源于矿物颗粒接触的冷收缩效应，而饱水安山岩的异常响应则揭示了相变主导机制： $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温域内波速突增 10%~12%，对应孔隙水发生膨胀性冻结，填充孔隙并增加岩石刚度与密实度^[54]。岩石导热系数的变化规律受到矿物组构的显著调控。花岗岩在 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的导热系数较室温提升 9.7%，而砂岩仅提升 5.3%，这与其石英含量差异直接相关^[55]。热膨胀系数的降低则反映了微观结构的收缩效应，在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结温度范围内岩石的平均热膨胀系数分别为 $4.13\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 和 $3.52\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ^[56]。特别是 M. Kuriyagawa 等^[57]的研究表明，水分含量对热膨胀系数的影响呈现明显的非线性效应，这一发现对于湿润岩石热力学性质的建模具有重要意义。比热的显著降低揭示了深低温冻结条件下岩石热能传递机制的基本特征，U. E. Lindblom^[58]研究数据与 U. Jakobsson^[59]试验结果的比较显示，比热的温度依赖性在不同岩石类型中表现出良好的相似性。在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，岩石比热基本呈线性下降，约下降了 25%，这一规律为深低温条件下岩石热学性质的理论模型提供了重要支撑。

在力学性质方面，冻结温度的降低普遍导致岩石力学参数的提升。Y. Inada 和 K. Yokata^[60]的研究指出花岗岩和安山岩在 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}\sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围，其抗压强度随温度降低而增加。相比之下，Z. Ren 等^[61]以超低温冻土为研究对象，全面分析了未冻水含量、温度与抗压强度之间的关系，并探讨了不同温度区间的破坏模式差异。当温度高于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，冻土表现为弹塑性破坏；而低于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，则表现为脆性破坏。K. Aoki 等^[62]的系统试验揭示了典型岩石(花岗岩、砂岩、泥岩)在 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下的弹性响应特征：与常温环境相比，岩石的弹性模量平均提升约 20%，验证了深低温冻结显著增强岩石刚度的作用。同时，冰在岩石孔隙中的胶结作用强化了岩石的抗拉性能。在 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，饱水岩石的抗拉强度较室温提高了 50%~100%。基于此，相关学者发现冰-岩复合体系的力学强化效应同样表现在抗剪强度上。崔江磊^[63]的研究指出，在超低温($-160\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下，冰的形成不仅提升了试样承载能力，还通过

减少孔隙体积来增加有效承载面积, 进一步增强了岩石的抗剪强度。此外, 岩石的断裂韧度在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内显著高于室温, 断裂韧度随温度降低呈增大趋势^[64]。唐明明等^[65]的试验发现岩石的内摩擦角在饱和条件下亦随温度降低($-50\text{ }^{\circ}\text{C}\sim10\text{ }^{\circ}\text{C}$)而逐渐增大, 内摩擦角增长幅度约为3.43%。

综上所述, 深低温冻结下岩石物理力学性质的演化本质上是热应力-相变多场耦合作用下微观结构重组与宏观响应映射的过程。现有研究取得了三方面的进展: (1) 揭示了冰晶填充效应与矿物颗粒收缩共同作用下, 岩石弹性波速随温度降低而显著增加的趋势; (2) 明确了深低温下岩石热学参数的变化规律, 证实导热系数的矿物调控机制及比热的温度依赖性; (3) 阐明了温度降低对岩石力学性能的提升, 特别是在湿润岩石中, 冰的胶结作用显著增强抗拉强度和抗剪强度。这些发现为岩石在深低温环境下的行为提供了试验依据, 也为工程应用中岩土材料的性能预测和优化提供了重要参考。然而, 现有研究仍存在局限, 即多集中于单一因素(如温度或水分)影响, 忽视了裂隙网络等复杂结构特征下的多因素耦合机制。此外, 岩石微观结构与宏观力学响应的关联仍不清晰, 尤其不同矿物组成与孔隙结构的差异性响应尚待深入探讨。未来研究应强化多场耦合作用, 系统揭示裂隙岩体在深低温冻结下的力学演化机制, 为岩土工程中的性能预测与优化提供更精准的理论支撑。

2.2.2 冻融循环下岩石物理力学性质

深低温冻融循环通过温度梯度交变载荷作用引发岩石微观结构的损伤累积与重组演化, 加剧岩石微观结构的破坏与重组。现有研究表明, 冻融循环过程中的反复温度波动与水分相变相结合, 导致岩石物理力学参数呈现显著衰减的时变特征。已有研究揭示冻融循环作用机制主要包括: (1) 多相矿物颗粒的热疲劳效应; (2) 水-冰相变往复作用下的晶格畸变叠加效应; (3) 微裂纹累积损伤的时变扩展效应。通过这些机制, 冻融循环在不同岩石类型和条件下产生复杂的物理力学响应, 对岩石的稳定性与承载能力产生深远影响。

在物理性质方面, 试验研究能观察到深低温冻融循环对岩石孔隙结构的改造作用: 液氮处理后($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), 导致岩石内部微裂隙扩展, 孔隙连通性增强, 甚至孔隙尺度也增大, 从而增加了岩石的孔隙率^[66]。L. Qin 等^[67]进一步研究了液氮冻融循环次数对岩石孔隙结构的影响, 分析了微裂隙网络的贯

通导致有效孔隙率的增长速率与液氮冻融循环次数呈正相关。需要特别指出的是, 现有研究在孔隙尺度表征方法上存在显著差异。多数研究采用超声波和核磁共振技术来捕捉孔隙结构的变化^[68], 但这些技术在获取孔隙分布和形态方面存在一定的局限性。相比之下, X-CT 成像技术能够提供更高的三维重构精度, 量化孔隙结构的能力较强^[69], 但其应用相对较少。这种技术选择的差异可能导致不同研究在“有效孔隙率”定义上的系统性偏差。反复冻融循环削弱岩石结构完整性, 导致弹性波速下降, 且在湿润条件下更为显著。任韶然等^[70]的研究结果表明, 超低温处理使煤岩波速下降13%~31%, 其中饱水煤岩降幅大于干燥煤岩。H. Wang 等^[71]进一步指出, 延长液氮冻结时间和增加冻融循环次数会加剧微观裂纹扩展, 显著降低纵波波速。此外, 对片岩与流纹岩进行300次冻融循环($-45\text{ }^{\circ}\text{C}\sim15\text{ }^{\circ}\text{C}$)的研究显示, 波速衰减率初期陡增, 随后趋缓, 且湿润状态下衰减更明显^[62]。这项研究揭示了长期冻融循环对岩石物理性质的渐进性损伤, 尤其在湿润条件下, 其劣化效应更为突出。

在力学性质方面, 饱和页岩在超低温状态恢复至室温的过程中, 弹性模量的变化与冷冻速率密切相关。当冷冻速率达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时, 饱和页岩弹性模量下降了42.2%^[72]。于恩毅等^[73]在 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对灰岩进行冻融循环(0~12次)后, 开展单轴压缩试验, 得出岩石的抗压强度随冻融次数增加呈非线性下降的结论。张牡丹等^[74]对不同冻融循环温度(最低温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$)下花岗岩进行单轴压缩试验, 发现冻融冻结温度越低, 花岗岩的单轴抗压强度下降越显著, 且二者呈近似线性关系。吕敦波等^[75]深入研究了 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻融循环对花岗岩I型裂缝尖端局部破坏特征及断裂韧度的影响, 在超低温条件下, 岩石的冻胀力显著高于常规低温条件, 且当断裂韧度下降幅度相近时, 冻融循环($-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim20\text{ }^{\circ}\text{C}$)所需的次数明显更多。相比之下, P. Hou 等^[76]的研究更贴合工程实际岩体受力情况, 且探讨了不同围岩条件下液氮冻融循环对煤岩力学性能的影响, 发现液氮冻融循环对煤岩的力学参数和破坏行为有明显的围压效应。在低围压下, 冻融循环导致煤岩的力学性能显著减弱; 而在高围压下, 微裂纹趋于闭合, 力学弱化作用得到缓解。

综上所述, 深低温冻融循环下岩石物理力学响应本质上是温度梯度交变载荷与水-冰相变耦合驱动的“微观损伤累积-宏观性能劣化”过程。现有

研究取得的重要进展包括：(1) 揭示了液氮超低温 (−196 °C) 冻融对岩石孔隙结构、微裂纹扩展及晶格畸变的影响，明确其对弹性波衰减的关键作用；(2) 探讨了岩石类型、冷冻速率、冻融温度及围压等因素对力学性能的影响。这些成果为揭示冻融循环对岩石物理力学响应的影响提供了关键试验依据，并为液氮压裂、液化天然气储库等深低温岩体工程的稳定性评估奠定了理论基础。

然而，现有研究在工程应用中的系统验证仍不足，主要体现在：(1) 试验多基于理想化岩样，忽视天然岩体裂隙网络对冻融损伤的导向作用，导致尺度效应偏差；(2) 室内试验难以全面反映深低温环境下岩石在长期负载及复杂应力状态下的真实行为；(3) 温度梯度、冻融循环及水分迁移对岩石结构的影响尚未充分评估，缺乏相应的实际工程环境的试验验证。未来研究应聚焦在裂隙岩体在冻融循环下的力学演化及其在复杂应力环境中的稳定性方面，为工程中岩土材料的性能优化与预判提供精准理论支撑。

2.3 深低温环境岩石耦合效应理论研究

岩石在深低温环境下的耦合效应主要体现在 2 个方面：一方面，急剧降温会在岩石内部形成较大的温度梯度，使不同区域的收缩程度存在差异，尤其是岩石基质的收缩变形程度加剧，进而产生显著的热应力。与此同时，岩石颗粒的形变对温度传导产生反馈作用，改变了岩石内部的温度分布，形成温度场与应力场的相互耦合作用，即热 - 力耦合效应。另一方面，较大的温度梯度促进了水分迁移，水分在更大范围的孔径内发生结冰现象，产生显著的冻胀应力。温度梯度、水分迁移、冻胀效应与岩石裂隙扩展相互作用，形成温度场、渗流场和应力场的耦合作用，即热 - 水 - 力耦合效应。

2.3.1 岩石热 - 力耦合效应理论

热 - 力耦合效应理论指出，深低温环境下岩石因温度变化会产生显著的热应力。这种应力的来源可分为 2 类：一类是由于整体温度降低导致相邻矿物颗粒共同收缩，在颗粒边界处形成拉应力，从而产生晶间裂缝^[77]；另一类是因岩石内部温度梯度骤增，导致矿物颗粒在不同方向上发生不均匀变形，形成剪应力，进而产生穿晶裂缝^[78]。根据是否考虑温度场的热传导，可将热 - 力耦合效应分为 2 类。

(1) 未考虑温度场传导的热应变理论

根据热应变理论^[79]，岩石热应变大小主要受其热膨胀系数和温度差的影响，计算公式如下：

$$\varepsilon_T = \alpha_T (T - T_0) \quad (1)$$

式中： ε_T 为热应变， α_T 为热膨胀系数， T 为岩石实时温度， T_0 为岩石初始温度。温度载荷作用下应力 - 应变关系如下：

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{vol} \delta_{ij} + 2G \varepsilon_{ij} + 3\alpha_T K (T - T_0) \delta_{ij} \quad (2)$$

式中： σ_{ij} 为应力张量； λ ， G 为拉梅系数； ε_{ij} 为应变张量； ε_{vol} 为体积应变； δ_{ij} 为克罗内克符号； K 为体积模量； T 为岩石实时温度； T_0 为岩石初始温度。

热应变理论仅通过岩石的热膨胀系数和温差来计算应变，并根据应力 - 应变关系计算出温度作用下岩石内部的热应力大小。赵波^[80]基于热应变理论分析了液氮冷却对致密砂岩的作用机制，致密砂岩从常温 25 °C 降至 −196 °C 过程中，其热应变增至 4.42×10^{-3} ，并产生显著的拉伸应力。曹钰等^[78]借助岩石的热变形机制，指出温度梯度作为反映不同位置温度变化率的关键参数，与热应力大小密切相关：温度梯度越大，产生的热应力越强；反之，热应力则较小。

(2) 考虑温度场传导的热 - 力耦合理论

相较于热应变理论中基于静态温差与热膨胀系数的简化计算方式，热 - 力耦合理论通过考虑温度场的动态传导过程，更精确地刻画了岩石内部温度梯度的时空演化特性及其与应力场的交互作用。其核心在于不仅描述温度梯度引起的瞬态热流扩散，还量化了热膨胀变形与应力重分布之间的动态反馈机制，从而克服了单一场理论在表征岩石非均匀温度场及热 - 力耦合效应方面的局限。现有应用于深低温环境下考虑温度场传导的热 - 力耦合的理论主要包括热弹性理论和热 - 力耦合本构模型。热弹性理论侧重于描述温度变化引发的热应力和弹性变形，而热 - 力耦合本构模型则考虑了更多物理场的相互作用，能够更全面地反映岩石的非线性和塑性变形，提供更符合工程实际的描述。

热弹性理论结合热传导和热弹性力学，分析温度变化对材料应力和变形的影响^[81]。唐世斌等^[82]针对宽度为 b 的板状模型，假设其顶面受到深低温作用，而其余表面为绝热状态，从而将问题简化为一维导热问题(温度自上而上传导)。并通过求解热弹性力学方程和二维固体热传导微分方程，得到岩石内部温度场和应力场演化的理论解：

$$\left. \begin{aligned} \frac{T(y, t) - T_0(y)}{T_L - T_0(y)} &= \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \exp\left(\frac{Hy}{\lambda} + \frac{H^2 \alpha t}{\lambda^2}\right) \cdot \\ &\quad \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{H\sqrt{\alpha t}}{\lambda}\right) \\ \sigma_x &= -\alpha E T(y, t) + \frac{\alpha E}{b} \int_0^b T(y, t) dy + \\ &\quad \frac{12\alpha E}{b^3} \int_0^b T(y, t) y dy \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: σ_x 为温度产生的 x 方向应力; α 为热膨胀系数; H 为固体表面与液体的对流换热系数; E 为弹性模量; $T(y, t)$ 为任意时刻固体温度场分布; $T_0(y)$ 为固体初始温度场分布; $\alpha = \lambda / (\rho c)$ 为热扩散率, λ 为材料的热传导系数, ρ 为材料的密度, c 为固体的比定压热容; $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为高斯互补误差函数。

该理论计算结果表明, 在深低温冷却过程中, 边界降温速率的加快会显著增大温度梯度, 并呈现出先上升后下降的趋势。当边界温度降至 -180°C 时, 仅需 1 s 便可产生高达 16.7 MPa 的拉应力, 足以引发大多数岩石的拉伸破坏。

热-力耦合本构模型的构建基于能量和动量守恒原理^[83-85], 通过引入 Cauchy 应力分量, 并将其与形函数及微分算子相结合, 运用虚功原理和有限元方法求得温度场与应力场的解析方程:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_N^T [\mathbf{K}_u \mathbf{u}_N(t) + \mathbf{M}_T \mathbf{T}_N(t) - \mathbf{F}(t)] &= 0 \\ \mathbf{T}_N^T(t) [\mathbf{C}_u \mathbf{T}_N(t) + \mathbf{M}_u \mathbf{u}_N(t) - \mathbf{D} - \mathbf{R} - \mathbf{K}_T \mathbf{T}_N(t)] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}_N(t)$ 为节点位移向量, $\mathbf{T}_N(t)$ 为节点温度向量, $\mathbf{K}_u$ 为应力场刚度矩阵, $\mathbf{M}_T$ 为温度场刚度矩阵, $\mathbf{F}(t)$ 为应力向量, $\mathbf{C}_u$ 为热熔矩阵, $\mathbf{K}_T$ 为导热系数矩阵, $\mathbf{M}_u$ 为热-力耦合矩阵, $\mathbf{D}$ 为能量耗散向量, $\mathbf{R}$ 为温度荷载向量。

徐彬^[86]建立了宽 20 m、高 30 m 的大断面城门洞形低温 LNG(-162°C)地下储库, 对其进行了热-力耦合断裂损伤的有限元分析, 覆盖了从开挖到排水孔停止工作前的全过程。在开挖扰动的背景下, 分析了超低温 LNG(-162°C)注入地下储库过程中围岩温度场、应力场和损伤场的演化规律。结果表明, 受 0.2 m 厚保温层的影响, 温度传播速度较慢。经过 2 年的模拟冷却, 顶拱区域由于温度降低导致的最大主应力达到了 2.0 MPa。

综上所述, 深低温岩石热-力耦合理论已从静态热应变描述发展为动态温度场-应力场耦合表征。热应变理论基于热膨胀系数与温差估算宏观热应力, 为工程风险评估提供初步判据, 但忽略温度梯度时空演化对损伤累积的非线性影响, 适用性受

限。热弹性理论通过求解热弹性力学与热传导方程, 实现温度-应力场的动态反馈, 而热-力耦合本构模型可引入损伤场, 更精准刻画岩石在非均匀变形、热冲击及塑性损伤中的行为, 为深低温环境下岩石行为的精确预测提供了更强的理论支持。然而, 现有理论体系在实际应用中仍面临若干挑战。首先, 虽然现有理论涵盖了裂隙存在下应力场与温度场的相互作用, 但在复杂裂隙结构和岩石损伤的多重机制下, 仍难以提供全面的描述。其次, 跨尺度的热-力耦合机制尚未完善, 尤其是矿物颗粒、裂隙和岩体之间的热力学行为尺度效应, 缺乏普适性模型。未来研究需深化多尺度模型的构建与验证, 结合试验与数值模拟, 突破现有理论在应用中的局限, 提升其在极地岩土工程建设、液氮压裂及深空矿产开采建设中的预测精度与应用潜力。

2.3.2 岩石热-水-力耦合效应理论

岩石的热-水-力耦合效应理论主要研究温度场(T)、渗流场(H)和应力场(M)之间的相互作用, 尤其是在低温条件下, 这种耦合作用对岩石内部水分迁移、冰体生成及其力学行为有着显著影响。目前, 针对常规低温($-40^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$)条件下的 THM 耦合模型研究已经取得了一定进展。谭贤君^[87]建立了考虑分凝势和热扩散对冻土水流的水-热耦合模型, 并在此基础上推导了包含损伤场的 THMD 耦合模型, 分析了恶劣气候条件下隧道的冻融稳定性。L. Sun 等^[88]提出的低温 THM 模型能有效预测冻结介质中的强耦合过程(如传热、水分迁移、冻胀变形等)的演化, 并捕捉到水/冰相变引发的重要现象, 如潜热、低温吸力、冰膨胀和三区分布等, 这些现象在实验室和现场尺度上均得到了验证。鉴于冻结岩石和冻结土体的冻结过程和 THM 耦合机制的差异, S. Huang 等^[89]推导了冻结岩石的 THM 全耦合模型, 并指出关键耦合参数(如孔隙冰压力、渗透率和等效导热系数等)与未冻水含量密切相关, 通过前期相关的室内冻结试验对模型进行了验证, 该模型仅适用于均质和各向同性岩石。相比之下, K. Jiao 等^[90]结合了岩石损伤发展理论, 提出了孔隙尺度的 THM 耦合模型, 重点研究了温差变化和岩石损伤对页岩裂缝扩展的协同影响。随后, N. Liu 等^[91]引入裂隙特征单元, 构建了适用于寒区裂隙岩体的 THM 全耦合模型, 该模型综合考虑了裂隙、水-冰相变、水分迁移及热胀冷缩效应, 并能够退化为非裂隙岩石的 THM 模型, 通过典型冻结岩石试验验证了其准确性, 更加贴近寒区岩土工程中裂

隙岩体的实际情况。表 3 列出了 THM 耦合模型基本控制方程。

这些模型为常规低温条件下岩石热-水-力耦合效应的研究提供了理论基础,但其在深低温环境中的实际应用尚需进一步验证。在深低温环境下,由于热应力和冻胀效应引发的岩体变形和破坏过程更加复杂,譬如:岩石内部毛细水在更大孔径范围内冻结膨胀,产生显著的冻胀应力,深低温引发的更大温差加剧了岩石的收缩变形,导致冻结膨胀区与收缩区差异增大,进一步加剧岩石内部损伤;较大的温度梯度更易于水分迁移,扩大了冻结岩体的水分迁移范围;渗流场与温度场、应力场的耦合作用显著影响了岩体中的水分再分布和水-冰相变过程等。针对深低温环境下的热-水-力耦合过程,

柳程希^[92]结合三区域理论与热-力耦合本构模型,对页岩地层进行液氮(-196℃)冻结冷却模拟。当页岩整体温度降至孔隙水结冰点(-4℃)以下时,页岩从三区模式转变为完全冻结模式。随着与冻结面距离的增加,岩石内部拉应力逐渐降低,冻结面处的最大拉应力达 22 MPa,已接近或超过页岩的抗拉强度。林海飞等^[93]构建了考虑煤岩基质损伤的 THM 耦合模型,并通过三轴煤体瓦斯渗流试验验证了其合理性。研究分析了液氮注入下不同应力比对煤岩裂纹扩展的影响,揭示了压裂过程中煤体损伤、渗透率和温度演化规律。然而,该模型仅进行了二维模拟的初探,需进一步扩展至三维,以更准确地反映实际工程中的裂纹扩展行为。S. Han 等^[94]将现有的冻结岩石理论纳入经典热-孔弹性耦合模型,基于两

表 3 THM 耦合模型基本控制方程的概览

Table 3 Overview of fundamental governing equations in THM coupling models

来源	THM 耦合模型主要基本控制方程	模型假设及场景应用
谭贤君 ^[87]	质量守恒方程: $\theta_w \beta_w \rho_{w0} \frac{\partial p_w}{\partial t} - \theta_w \alpha \rho_{w0} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_w - \rho_i) n \frac{\partial \chi}{\partial t} + \nabla \left[-\frac{\rho_w k_w}{\mu_w} (\nabla p_w + \rho_w g_j) - \rho_w (SP_0 - D_T) \nabla T \right] + \left(\frac{\theta_w}{n} \rho_w + \frac{\theta_i}{n} \rho_i \right) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \rho_w \vec{q}_w$ 能量守恒方程: $C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla [-\lambda_c \nabla T] + [(v_w \nabla)(\rho c T)_w] + (1-n) T \gamma \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = Q_c$ 平衡方程: $\left[\frac{1}{2} \tilde{C}_{ijkl}^e (u_{k,l} + u_{l,k}) - [\alpha_w p_w + \alpha_i p_i + \gamma_s (T_s - T_{s0})] \delta_{ij} \right]_{,j} + \rho_c f_i = 0$	(1) 基于岩石骨架视为理想弹性材料;热传导满足 Fourier 定律;水分运移满足 Darcy 渗流定律等模型假设。 (2) 结合了冻融损伤场的 THM 耦合模型,在寒区粉土中验证了模型对输气管道温度变化及冻胀变形的适用性
L. Sun 等 ^[88]	质量守恒方程: $n \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i S_i + \rho_s S_i) - \nabla (\rho_i q_i) = q_{sh}$ 能量守恒方程: $C_c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla q_t + q_{ph} + C_1 q_i \nabla T = q_{st}$ 平衡方程: $\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon^{pc} - \varepsilon^T - \varepsilon^h - \varepsilon^q)$	(1) 基于多孔介质视为水/冰完全饱和的各向同性弹性材料;孔隙冰相对于固体骨架不可移动;冻结介质的材料特性随成分变化采用混合物理理论等模型假设。 (2) 建立了考虑水-冰相变、潜热释放和低温吸力等物理过程的 THM 模型,并在地面人工冻结管道对含淤泥地层冻胀变形中得到有效验证
S. Huang 等 ^[89]	质量守恒方程: $\frac{\partial(\rho_i w_i n)}{\partial t} + \frac{\partial[\rho_i (1-w_i) n]}{\partial t} + [w_i \rho_i + (1-w_i) \rho_i] \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \nabla [-\rho_i \frac{k_r}{\mu_i} k (\nabla p_i - \rho_i g) - \rho_i SP_0 \nabla T] = 0$ 能量守恒方程: $C_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i c_i v_i (\nabla T) + \nabla (-\lambda_c \nabla T) = q_{si}$ 平衡方程: $C[\varepsilon - \alpha_s (T - T_0) \delta_{ij}] - n[(1-w_i) p_i + w_i p_i] \delta_{ij} + \rho_m g = 0$	(1) 基于热传导遵循 Fourier 定律;水在岩石中渗流遵循达西定律;冻结岩石视为连续各向同性等模型假设。 (2) 考虑相变潜热、分凝势和体积应变的冻结岩石 THM 模型,在冻结红砂岩试验中有效验证了热传递与冻胀效应
K. Liu 等 ^[90]	质量守恒方程: $-(n_r \beta_r + n_w \beta_w + n_i \beta_i) \frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 能量守恒方程: $C_3 \frac{\partial T}{\partial t} + C_1 v_s \nabla T + C_2 v_w \nabla T = \nabla (\lambda \nabla T) - \beta T \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - n_w T \frac{\partial p_w}{\partial t} \nabla v_w - \nabla \left[(n_r \sigma' + n_i p_i) \frac{\partial u}{\partial t} \right] + L \rho_i \frac{\partial n_{wi}}{\partial t}$ 平衡方程: $\{K_{ijkl} [\varepsilon_{kl} - \beta_r (T_r - T_{r0}) \delta_{kl}] + (\alpha_w p_w + \alpha_i p_i) \delta_{ij}\}_{,j} + \rho X_i = 0$	(1) 基于裂缝为宏观断口;裂隙岩体可视为由大量代表性基本体(REV)组成的等效连续体;力学响应遵循小变形等模型假设。 (2) 基于裂隙特征单元构建适用于寒区裂隙岩体的 THM 模型,能够有效预测露天矿开挖边坡的传热、水分迁移及冻胀变形,验证了模型的工程适用性

相流理论和局部热平衡理论, 构建了考虑水-冰相变的 THM 全耦合模型, 成功模拟了液氮($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)注入含水页岩储层的过程。该模型不仅能够有效捕捉页岩储层渗透率、孔隙度及饱和度的演变过程以及流体热力学性质的变化, 还揭示了深低温环境下岩石破裂的多种损伤机制, 包括热应力、孔隙压力和冻胀应力。随后, K. Ren 等^[95-96]基于 S. Han 等^[94]提出的 THM 耦合模型, 进一步研究了液氮注入高温干热岩储层时的传热和应力分布规律。

国内外研究表明, 深低温环境下岩石热-水-力(THM)耦合效应的理论研究取得了一定的进展, 尤其在模型构建与验证方面取得了显著成果, 主要体现在常规低温 THM 耦合模型的基础上进行了适当扩展。这些理论在解释岩石处于深低温环境下的多场耦合行为方面发挥着重要作用, 涵盖了热胀冷缩、水-冰相变、渗流迁移、热应力以及冻胀应力的复杂耦合过程, 为深部页岩气储层改造、极地岩土工程及地下能源存储等工程提供了理论支撑。然而, 现有研究仍受限于岩体多相系统的高度非线性、相变界面的不连续性以及局部热失衡特性。此外, 现有模型的本构关系多依赖于固有连续介质假设, 未能充分动态表征裂隙冰压演化、非均质岩体热传导的各向异性等关键过程, 且对深低温环境下复杂的热应力、冻胀应力和孔隙水相变等物理过程的验证仍显不足。在深低温环境下, 岩体受到更大温度梯度的影响, 热应力与水分迁移的耦合作用更加显著, 冻胀效应也更为复杂。因此, 迫切需要对多场耦合效应和岩石损伤机制进行更加细致的研究。未来的研究应着重于改进和扩展这些 THM 耦合模型, 特别是在更高温度梯度和更复杂相变条件下的验证工作, 以更好地应对深低温岩石工程中的挑战。

2.4 深低温环境岩石耦合效应数值模拟研究

针对深低温环境下岩石耦合效应的研究, 数值分析方法具有广泛的适用性。不少研究者通过有限元法(FEM)、离散元法(DEM)等数值模拟方法, 构建了岩石在深低温环境下的多场耦合数值模型。在热-力耦合模拟中, 研究成果集中于探讨温度变化对岩石内部热应力分布的影响, 分析裂纹的萌生与扩展过程。结果表明, 热应力引发的裂纹扩展受温度梯度、岩石材料特性及初始缺陷等多重因素影响^[97-98]。热-水-力(THM)耦合模拟在深低温环境下主要涉及热传导、相变诱导的水分迁移及其导致的力学响应。温度梯度驱动岩石孔隙及裂隙中的水分重新分布, 深低温条件下孔隙水结冰引发体积膨胀(冻胀效

应), 导致内部应力重新分布, 并诱发微裂纹扩展。此外, 冻融循环过程中, 水-冰相变的体积变化会导致岩石内部应力的周期性调整, 影响其结构稳定性和力学性能。这些相互作用构成了深低温环境下岩石 THM 耦合行为的核心机制, 如图 1^[99]所示。

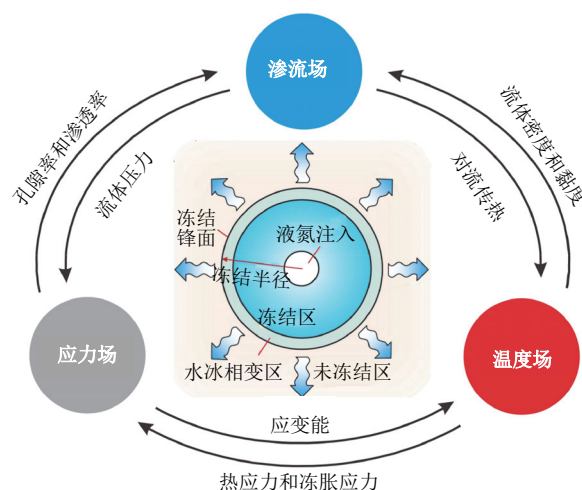


图1 深低温环境下岩体多场耦合示意图^[99]

Fig.1 Multi-field coupling diagram of rock mass under deep low-temperature environment^[99]

2.4.1 岩石热-力耦合效应数值模拟研究

深低温环境下岩石热-力耦合效应的数值模拟主要聚焦于温度场的动态响应和热致损伤演化规律 2 个方面, 其核心挑战在于如何建立符合深低温岩石热应力特征的本构模型与跨尺度损伤判据。

在温度场方面, 初始阶段模型内部的温度梯度逐渐增大, 尤其在模型表面与冷却介质直接接触的区域, 温度迅速下降, 形成明显的冷却层。S. Liu 等^[100]探讨了煤体在液氮冷浸作用下的温度场演化特征, 发现温度以冲击波形式由外向内传播, 并随传播距离增加逐渐衰减。越靠近液氮边界的区域, 温度冲击速度和梯度越大, 稳态建立时间越短, 如图 2^[100]所示。数值模拟结果与试验测得的煤试件温度场变化规律一致, 验证了理论分析与模拟的合理性。K. Monsen 和 N. Barton^[101]对地下开挖中的深低温储存进行了数值模拟。通过将洞室周围环境设定为 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, 经过 50 年的冷却, 围岩温度在距洞壁 25 m 处为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而深部围岩几乎未受影响, 表明深低温效应主要集中于洞壁附近。这与韩国地下 LNG 储存试验中测得的 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线传播至最远 4.4 m 的数据存在一定偏差^[102], 原因可能在于数值模型过于简化, 忽略了节理中的流体泄漏效应, 过度关注温度在岩体中的热传导, 而未充分考虑节

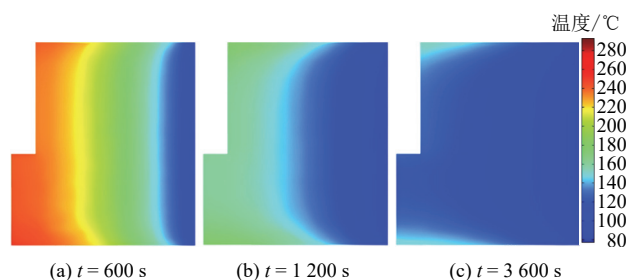


图2 不同液氮冷浸时间下煤岩内部温度场云图^[100]

Fig.2 Temperature field contours of coal rock under different liquid nitrogen soaking durations^[100]

理结构的热-流作用。

在热损伤开裂方面,温度差异引发的热应力在岩石内部产生拉应力区和压应力区,尤其是在拉应力主导的区域,裂纹更容易萌生和扩展。郑学林^[72]研究了超低温诱导下页岩的应力演化过程,并评估了最大拉应力准则与应力强度因子准则在裂缝扩展预测中的适用性。然而,其采用的各向同性强度准则未充分考虑页岩层理结构的正交异性特征,导致模拟过程中平行层理方向的裂缝扩展发生了部分转向,与试验观测的裂缝 S-1, S-2 沿层理方向扩展, A-1 沿垂直层理扩展存在偏差。曹钰等^[78]利用 PFC^{2D} 模拟了由花岗岩颗粒所构建的热传导及热存储过程,进而分析由于温度变化所导致的颗粒位移和热应力变化,模拟液氮冷却后花岗岩的抗压强度为 154.43 MPa,但受其二维建模体系难以协调颗粒尺度热位移与真实宏观断裂力学的尺度效应,比 C. Zhou 等^[103]液氮冷却下的花岗岩试验值偏大了 35.2%。部分学者采用有限元离散元法热-力耦合程序(FDEM-TM),以再现热处理岩石的热/力学行为,解释了超低温(-196℃)热诱导微裂纹对断裂韧性和粗糙度的影响,模拟结果与 SEM 试验观测分析在微裂纹类型上一致:绝大多数失效源于热裂化过程中的拉伸作用,而并非剪切作用。对比试验应力强度因子 K_{Ic} 值,模拟结果因矿物组成简化及晶粒分布与取向考虑不足而有所偏差,但韧性变化趋势一致^[104]。此外,热-力耦合效应对岩石内部渗透率变化具有重要影响。C. Zhang 等^[105]基于体积应变与渗透率之间的关系,提出了体积应变增强型渗透率模型,并通过 FLAC 中的 FISH 函数实现了该模型,模拟了超低温(-196℃)下岩石渗透率的演化,在拉伸破坏区,裂纹的萌生与扩展显著提高了渗透率,然而,模拟的验证仍依赖于 SEM 观察到的煤样裂纹扩展,缺乏对渗透率变化的定量分析,且未充分考虑裂纹间相互作用及其对渗透率的影响,存在验证

深度和精确度不足的问题。

综上所述,深低温环境下岩石热-力耦合效应的数值模拟研究已取得一定成果,现有研究通过有限-离散元耦合法(FDEM-TM)、颗粒流模拟(PFC)等先进数值手段,成功揭示了温度场非稳态传导与热致损伤的时空演化规律,并在拉伸主导型微裂纹萌生机制方面形成理论共识。研究成果为 LNG 地下储库低温防护设计、非常规油气能源(煤层气、页岩气)及极地能源开采提供了重要数值模拟支撑,尤其在储层热损伤预测领域展现出显著应用价值。然而,目前的模拟研究仍面临一定的挑战:在理论层面,各向异性岩石的热-力本构方程尚未突破连续介质假设的局限性,难以精确描述层状或裂隙岩体在极端温度梯度下的正交异性破坏行为;在数值方法层面,现有模型对温度场与应力场耦合的跨尺度关联机制刻画不足,难以准确模拟多尺度效应;在试验验证层面,现有模型的验证深度和精度仍存在不足,亟需更多试验数据和精细化的验证工作。因此,未来的研究需要在理论创新、数值方法优化和试验验证方面进一步深化,以提高模型的精度和实际应用价值。

2.4.2 岩石热-水-力耦合效应数值模拟研究

相比岩石热-力耦合效应的数值模拟,深低温岩石热-水-力耦合数值模拟的核心难点在于水-冰相变过程的表征与多场耦合本构关系的构建。水分在深低温下的冻结过程显著改变裂隙岩体的物理力学性质,从而影响其损伤破裂行为。

在温度场方面,深低温引起的显著温差导致岩体内部形成非均匀的温度分布,这种温度梯度不仅影响岩体的热传导特性,还直接影响水-冰相变的过程。M. Yan 等^[106]研究了液氮流动过程中煤岩温度场及水-冰相变化的时空演化规律,发现热质传递最显著区域位于液氮入口附近及流固交界面。沿埋深方向,温度与水-冰相变化可分为快速变化区、缓慢变化区和稳定区。然而,该数值模型仅基于常规低温土柱试验验证,在液氮实际注入煤岩环境下的适用性仍缺乏实证支持,特别是对实际冻结界面迁移规律的模拟准确性存疑。在渗流场方面,深低温环境下水分的迁移和冻结是影响岩石冻胀效应的关键因素。S. Han 等^[94-99]的模拟结果均表明了液氮注入含水地层后,冻结区内储层温度下降,孔隙水冻结导致渗透率降低,而未冻结区渗透率基本保持初始水平。冻结区与未冻区交界处形成明显的冻结锋面,导致渗透率显著变化,并随冻结区扩展逐步扩大。但模拟研究对冻胀效应的验证主要基于 K. M.

Neaupane 和 T. Yamabe^[107]的常规冻结试验, 仅通过冻胀应变分布的对比进行间接验证, 对液氮作用下冻结区 - 未冻区交界处渗透率的演化缺乏定量刻画。尤其是在液氮实际注入诱发的热 - 水 - 力耦合作用下, 渗透率的动态响应尚无系统试验数据支撑, 使得模型预测的可靠性和适用性仍存在不确定性。

在损伤开裂方面, 温度变化引发的热应力与水 - 冰相变导致的冻胀应力共同作用, 促使岩体内部应力重分布。尤其是在裂隙区域, 冻胀应力可能超过岩石的局部强度, 进而推动裂隙的萌生与扩展, 裂隙的开闭变化改变了未冻水的渗流路径, 进一步加剧了冻胀效应。李和万等^[108]揭示了超低温致裂过程中结构弱面与含水特征对煤体力学响应的协同机制。模拟得出, 当节理倾角为 45° 时, 煤岩单轴抗压强度最低; 在固定节理倾角下, 随含水饱和度增加, 抗压强度显著衰减, 且模拟结果与试验较为吻合。然而, 该模型基于假定液氮作用下的温度、热应力恒定, 未考虑液氮相变渗透过程中的两相流耦合效应, 难以准确表征非稳态温度场对裂隙扩展的驱动机制。J. Tao 等^[109]综合考虑了页岩物理力学性质的非均质性、层理结构影响, 数值模拟揭示了液氮预处理时间越长, 有效连接损伤区越大, 而击穿压力显著降低, 表明液氮注入不仅促进了页岩储层内复杂裂缝网络的形成, 同时降低了气体击穿压力, 其结果与 Y. Wu 等^[110]的试验测得击穿压力的变化趋势一致, 然而, 模拟预测的损伤面积相较试验实测值偏小, 反映出当前各向异性本构模型在损伤演化描述上的局限性, 如图 3^[109]所示。此外, 针对深空地外岩土材料的模拟研究, T. G. Wasilewski 等^[111]探讨了月球冰冻风化层的热物性及其对相变界面运动的影响, 在低真空(13.3~200 Pa)和极低温($>-180^\circ\text{C}$)条件下, 对月球风化层样品的钻孔加热过程进行数值研究, 分析不同冰含量、孔隙率和加热条件下的热传递及相变界面运动, 为月球原位资源利用(ISRU)和行星岩土勘探提供数值支撑。

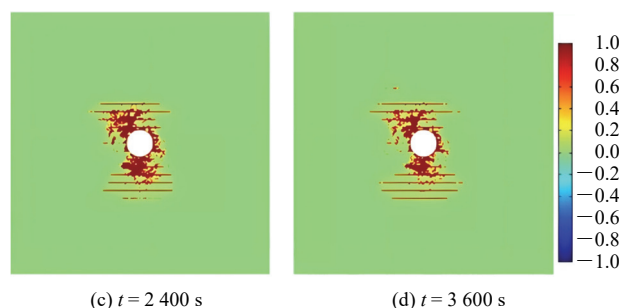
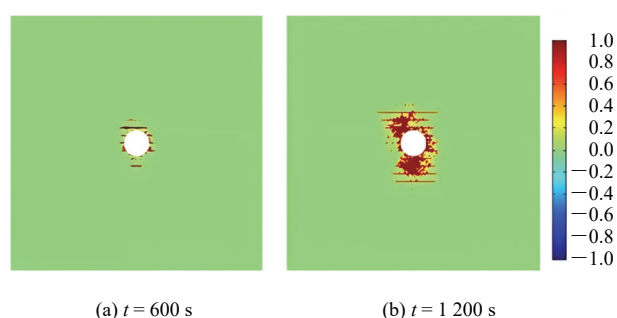


图3 页岩损伤随液氮预处理时间的演化过程^[109]

Fig.3 Evolution of shale damage with liquid nitrogen pretreatment time^[109]

综上所述, 深低温环境下岩石热 - 水 - 力耦合效应的数值模拟仍面临诸多挑战, 核心在于水 - 冰相变过程的精确表征、多场耦合机制的合理描述以及关键物理参数的试验标定。现有研究已揭示深低温诱导的非均匀温度场对水 - 冰相变的影响, 同时验证了冻结区渗透率变化及冻胀效应对岩体损伤破裂行为的控制作用。研究进一步延伸至深空探测领域, 成功模拟了月球风化层在极端低温与低真空条件下的热物性演化, 为行星资源利用及极端环境岩土工程提供了重要理论支持。然而, 当前研究主要集中于超低温(低于 -160°C , 液氮 -196°C)条件, 对其他深低温区间($-40^\circ\text{C} \sim -160^\circ\text{C}$)的系统研究相对有限。同时, 现有数值模型在冻结锋面演化规律、渗透率动态响应及冻胀损伤机制的定量刻画方面仍存在一定偏差, 主要受限于试验数据的匮乏及各向异性本构关系的适用性问题。未来研究需基于深低温试验数据的深入验证, 以优化模型参数, 提高模拟的准确性与适用性。此外, 如何在模拟中充分考虑岩体的非均质性、复杂几何形态及多尺度裂隙系统及深低温诱导的复杂变形破坏机制, 是推动该领域向工程应用迈进的关键。

3 深低温环境岩石工程应用场景情况分析总结

当前, 随着地球深部及极端环境下能源开发和工程建设需求的持续增长, 深低温环境下的岩石力学行为及其工程应用受到了越来越多的关注。中国、美国、俄罗斯以及加拿大等国家在这一领域取得了显著进展, 不仅推动了科学研究的深入, 也为相关工程技术的发展奠定了坚实基础。本节系统总结了当前已投入使用和未来计划实施的深低温环境下岩石工程应用场景, 涵盖了已在服役中的地下能源资

源存储、液氮压裂, 以及计划中的极端环境能源资源开发(如极地和深空探测)等多个领域, 重点梳理了这些领域中与岩石力学问题相关的研究进展。

3.1 地下能源资源存储

随着我国碳达峰与碳中和目标的推进, 新能源在未来电力供应中的地位将愈加重要。储能技术作为提升可再生能源大规模并网能力、优化传统电力系统和区域能源系统效率、安全性与经济性的关键措施, 已被广泛认为是能源变革的重要支撑技术和战略性新兴产业, 受到了全球的高度重视^[112]。地下能源资源存储作为一种具有广泛应用潜力的能源存储技术, 展现出显著的安全性、经济性与环境友好性优势。从安全角度来看, 地下深埋存储能够有效避开火灾和爆炸风险, 可避免空袭威胁, 同时具备良好的破坏防护能力。从经济层面上看, 当储存量超过 20 万 m^3 时, 地下存储的建设、运营和维护成本将会明显低于地面存储, 且成本随着储存量增加逐渐降低。此外, 通过将天然气等气体能源液化, 能够大幅减小其体积, 显著提高存储效率。在环境方面, 地下储库占地较少, 且有效控制了能源渗漏对地下水的污染风险^[113]。

(1) 液化天然气(LNG)

液化天然气(liquefied natural gas, LNG)在气态时的体积是其液态体积的 625 倍, 是一种重要的燃料。液化天然气在常压下必须在超低温($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境中液化储存, 国际上目前提出了超低温 LNG 地下储气库的建设概念模型^[47], 主要分为 2 个阶段: 首先, 在施工和运营初期, 需要将岩体中的地下水位降低至洞库底板以下 8~10 m, 以确保施工环境的稳定和干燥条件, 并对洞壁进行混凝土衬砌、安装隔热层以及钢衬, 该密封系统作为防止泄漏的首要屏障; 其次, 注入超低温 LNG, 在围岩中的 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线扩展到洞壁附近一定范围时, 停止排水, 允许地下水逐渐渗入冻结的岩体区域, 从而形成第二道屏障以防止泄漏, 如图 4 所示。

为评估超低温 LNG 地下储气库概念模型的可行性及其相关技术, 韩国 SK 能源和建设公司在地下 20 m 深的花岗岩中建造了 Daejeon 储库, 使用液氮(LN₂)代替液化天然气(LNG)作为存储介质, 温度保持在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。监测结果表明, 温度下降会导致围岩向内变形, 这对洞室的稳定性有益, 并且洞壁上的节理和裂隙张开较小, 远低于围岩的整体变形^[114-115]。另外, M.J. Yi 等^[116]采用地面钻孔雷达探测

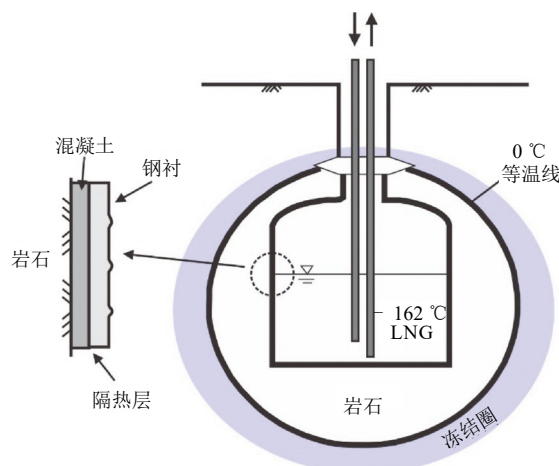


图 4 衬砌地下洞室中液化天然气存储的概念模型图^[47]

Fig.4 Conceptual model of LNG storage in a lined underground cavern^[47]

仪和三维电阻率测量系统对 Daejeon 储库建设过程中冰圈形成及超低温对地层的影响进行了详细监测。与此同时, S. S. Cha 等^[117]专注于研究超低温 LNG 地下储气库的排水系统, 并提出了相应的设计原则。

总而言之, Daejeon 储库的试验验证了低温诱导的围岩内缩效应有助于提升洞室稳定性, 同时节理和裂隙张开受限, 降低了渗漏风险。冰圈的监测研究揭示了冻结效应对地层稳定性的影响, 为储库选址与安全评估提供了关键数据支持。此外, 排水系统的优化设计确保了储库在长期运行中的稳定性。这些研究不仅验证了地下衬砌储库在超低温 LNG 存储中的可行性, 也标志着地下 LNG 储库技术从理论验证迈向工程实用阶段, 为全球能源储备体系奠定了坚实的理论与技术基础。

(2) 液化石油气(LPG)

液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG)的主要成分包括丙烷、丁烷、丙烯和丁烯等。液化后, LPG 的体积可缩小 250~300 倍, 大大提高了储存和运输的效率^[118]。目前, 低温 LPG 已经成功在非衬砌地下洞库中储存了超过 40 年。例如, 1999 年在挪威, 地下洞库在 $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的深低温环境下成功储存了丙烷。然而, 后期运营期间发现由于储库在冷却过程中采用了丙烷降温, 但未进行充分的灌浆处理, 水幕系统中的水分渗入储库并结冰, 占据了约 1/3 的储存空间。这些冰的形成还导致了新的微裂隙产生, 阻碍了储库围岩有效冻结圈的形成^[40]。因此, 后续研究建议, 在注入 LPG 前, 需采取分阶段降温措施。首先, 第一阶段采用冷空气进行初步冷却, 以便在冷却后进入洞库内部检查并监测岩体的稳定

性; 第二阶段则使用储存介质本身进行进一步冷却^[119]。表4列出了挪威主要的LPG低温储库^[40]。

表4 挪威主要的低温LPG储库概况^[40]

Table 4 Overview of major low-temperature LPG storage facilities in Norway^[40]

项目地点	完成时间	岩石类型	存储体积/(10 ⁴ m ³)	长×宽×高/(m×m×m)	温度/压力/℃ MPa	检验结果
Rafness	1977年	花岗岩	10	256×19×22	~9 0.65	无渗漏
Mongstad	1989年	片麻岩	3	64×13×16	6~7 0.60	无渗漏
Mongstad	1999年	片麻岩	6	134×21×33	-42 0.15	容积减少
Sture	1999年	片麻岩	6	118×21×30	-35 0.10	-
Kårstø	2000年	千枚岩	25	250×20×30	-42 0.15	无渗漏
Mongstad	2003年	片麻岩	6	134×21×33	-42 0.15	建设中

目前, 瑞典查尔姆斯理工大学已开展多年针对低温LPG非衬砌地下储库的小型模拟试验。试验从10℃开始逐步降温至-40℃并保持, 随后升温, 整个过程持续了415 d。试验中共安装了约200个温度计、140个变形测量仪及裂缝监测设备, 监测内容包括岩石温度、应变、裂缝扩展和变形等关键参数。研究明确了设计非衬砌低温LPG地下储库的2个重要因素: 裂缝初次张开的临界温度及进一步冷却时裂缝张开的幅度^[120]。此外, PB-KBB Inc对废弃矿井用于低温LPG储存的可行性及相关关键问题进行了全面分析^[121], 包括研究当地储库建设的经济性与适宜的储库规模。同时, 还评估了矿井的稳定性以及低温气体对其结构稳定性可能产生的影响。

总而言之, 挪威的长期储存经验表明, 合理的降温策略及防渗措施对于维持储库稳定性至关重要。瑞典查尔姆斯理工大学的试验进一步量化了岩体在深低温环境下的热-力响应特性, 为非衬砌储库的结构设计提供了科学依据。同时, PB-KBB Inc的研究拓展了废弃矿井在低温LPG储存中的应用潜力, 综合评估了经济性与结构稳定性。这些成果不仅提升了低温LPG储库的工程可行性, 也为深低温能源储存技术的发展提供了重要理论和实践指导。

(3) 其他液化气体

除了液化天然气(LNG)和液化石油气(LPG)外, 氨气(<-33.5℃)、空气(-183℃)、氢气(-253℃)和氦气(-269℃)等液化气体同样值得关注。目前, 这些液化气体主要以低温储罐存储为主, 但地下存储同样具有重要的研究价值和应用前景。1984年, 挪威Glomfjord修建了地下冷却液氨储库, 整个储库的容积为60 000 m³, 深度为60 m, 位于花岗片麻岩地层中, 用于评估地下冷却液氨储存的安全性

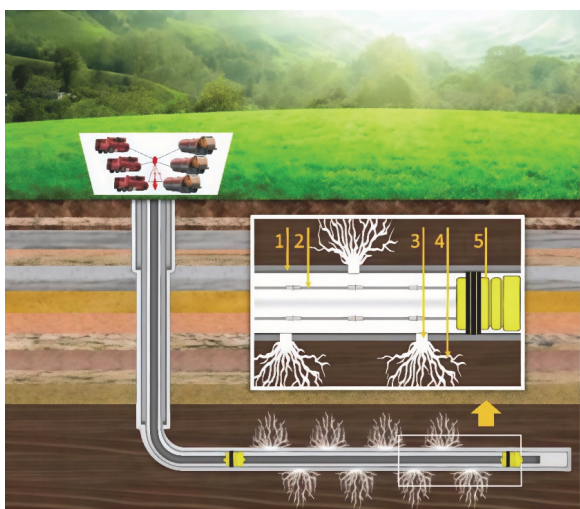
和经济性^[37]。在氨液化储存技术方面, 地下储库在储存液氨时相较于液氨储罐具有成本优势, 主要特点是大容量、对储存纯度要求较低, 且适合用于调峰存储^[122]。此外, 俄罗斯为了能够储备过剩的氨资源, 计划在东西伯利亚建立地下储氨库, 但由于储存纯氨的技术复杂性较高, 其可行性仍需进一步研究和论证^[52]。关于液态空气/液氢虽尚无真正运行的地下储库, 但已有相关技术将空气/氢气压缩至地下洞穴, 用于解决可再生能源发电平衡和能源储存的问题^[123-124], 这为液态空气和液氢的地下存储提供了新的研究方向。

在地下能源资源储库领域, 国内外学者已广泛开展了研究并取得了一定成果。无论是液化天然气储库设计的可行性研究, 还是液化石油气的施工应用以及其他液化气体的地下存储方案, 这些研究都为深低温环境下的地下储库建设奠定了坚实的基础。然而, 深低温环境也带来了一系列新的技术挑战: 深低温环境下岩体热-力耦合机制尚未完全解明, 密封系统在热循环载荷下的耐久性需长期验证, LPG储库冻胀效应引发的二次裂隙风险仍需防控。尤其是液化天然气储存面临-162℃极端工况下的材料脆变和微渗漏控制等技术瓶颈, 天然气储存纯度维持与废弃矿井改造的地质适配性仍需突破。未来研究需聚焦于多场耦合数值模拟技术提升、新型复合衬砌材料开发, 以及智能化监测预警系统构建, 通过多学科交叉创新推动地下储库技术向更深低温域、更高安全等级发展。

3.2 液氮无水压裂技术

当前, 由于水力压裂技术在多个国家被禁用, 迫切需要开发环保高效的无水压裂方法^[99]。液氮压裂是一种无水压裂技术, 其基本原理是通过液氮(-196℃)与地层之间的巨大温差引发超低温效应, 促使岩石内部产生新的微裂缝并扩展现有裂缝。随着高流量液氮的注入, 当液氮气化时产生的气体可进一步推动裂缝延伸和扩展^[125], 如图5所示。这一技术被视为水力压裂的潜在替代方案。

从技术发展历程来看, 液氮压裂技术起源于美国, 其发展可划分为3个阶段: (1) 萌生发展阶段: J. C. Allen和C. L. Bauer^[126]提出利用冷热交替的方法破岩, 通过低温流体(如液氮或低温盐水)与压裂地层之间的温差削弱岩体力学性能。随后, I. Finnie等^[127]通过实验室尺度物理模拟, 观测到了液氮在井壁岩体中的多级裂缝网络生成现象, 验证了超低温介质在岩石破裂控制中的独特优势, 为技术工程化

图5 液氮压裂示意图^[125]Fig.5 Schematic diagram of liquid nitrogen fracturing^[125]

奠定了基础。(2) 现场测试阶段: 直至 20 世纪 90 年代, 液氮压裂技术在非常规油气储层增产改造中得到现场验证。B. W. McDaniel 等^[128]采用玻璃管作为耐低温压裂管柱, 成功实施 5 次液氮压裂试验, 涉及 4 口煤层气井和 1 口低渗透砂岩井, 其中 3 口煤层气井实现增产。现场应用表明, 液氮作为压裂液可提高返排效率并减少污染。S. R. Grundmann 等^[129]在美国肯塔基州页岩储层开展测试, 采用优化施工方案, 在 1 000 m 深的页岩气井中成功实施液氮压裂, 并计算了液氮作用下的热应力。相较氮气压裂, 储层渗透率提升约 8%, 增产效果得到验证。(3) 研究停滞阶段: 20 世纪 90 年代末, 美国煤层气资源开采逐步满足市场需求, 加上液氮压裂面临深层储层热交换效率低、低温管柱可靠性不足等技术瓶颈, 导致研发投入锐减。

近年来, 由于对高效储层改造和环境保护的需求不断增加, 液氮压裂重新成为国内外学者的研究焦点。在试验研究方面, M. Cha 等^[130-131]开发了一种适用于真三轴加载条件的液氮压裂试验系统。研究表明, 无论采用高压或低压液氮压裂, 均可显著提高岩石渗透率。其中, 低压液氮流通的深冷处理可使击穿压力降低逾 40%。R. Yang 等^[132]在三轴约束应力下对不同温度的花岗岩样品进行了系统试验, 对比分析了液氮处理前后的岩石破裂特征, 并验证了液氮压裂在地热储层改造中的可行性。针对高温、高压、高三轴应力及大尺寸岩石样品, P. Huang 等^[133]设计了一种新型液氮致裂试验装置, 该系统由高压液氮供给、控制与数据采集、真三轴加载与加热三大单元构成。初步试验结果表明, 该装置可在高温高压条件下实现不同尺寸岩石样品的液氮致

裂, 具备良好的试验适用性。在数值模拟方面, S. Zhang 等^[134]模拟了高温岩石在高压液氮射流冲击下的最大拉应力可达数十兆帕, 远超其抗拉强度, 且 200 °C 岩石在射流作用下形成显著热应力分布, 立方体形状更易沿轴向破碎。H. Wen 等^[135]则聚焦于液氮压裂过程中支撑剂的运移特性, 采用混合欧拉-拉格朗日方法构建支撑剂运移模型, 并结合试验验证, 得出提高流体流速、降低支撑剂浓度、减小粒径及密度均可优化液氮压裂的支撑剂铺置效果, 提升裂缝导流能力。此外, 在液氮致裂增产工艺方面, 李子丰^[136]提出了一种新型增产工艺, 旨在解决低渗透和超低渗透储层的问题, 即“液化液氮在油层气内气化进行压裂的方法”。李波等^[137]则提出了一种基于增压波的氨-氨气交替致裂增透方法。该工艺利用液氨与氨气交替作用, 有效克服了液氮致裂主要形成单一主裂缝的局限性, 从而促进煤层的高效立体开发。

综上所述, 液氮压裂技术作为一种无水储层改造方法, 在理论研究、试验验证及工程应用方面取得了重要进展。研究表明, 该技术可有效诱导岩石微裂缝网络扩展, 提高储层渗透性, 并在煤层气、页岩气及地热储层改造中展现出广阔前景。然而, 该领域仍面临诸多关键科学与工程挑战。深层储层的热交换效率受限于液氮相变速率与储层非均质性, 亟需开发高效热传导增强剂, 以优化深低温致裂效应; 液氮诱导的剧烈热应力场使岩石产生非均匀膨胀与脆性破裂, 但其在不同构造条件下的裂纹萌生机制及演化规律尚不清晰, 需进一步建立基于热-力耦合的破裂模型; 超低温流场中支撑剂的动态铺置规律及裂缝导流能力维持机制尚存理论空白, 亟待结合原位 CT 监测与多相流模拟开展深化研究。经济性方面, 液氮的规模化制备、储运及循环利用成本较传统压裂液高出 30%~50%, 需通过工艺优化与装备智能化降本增效。未来, 液氮压裂技术的突破有赖于材料科学、热力学与岩石力学的深度融合, 并需在干热岩地热开发等新兴领域实现应用验证, 以确立其在“双碳”行动下的储层改造优势。

3.3 极地能源资源开发利用

随着全球能源需求的增长, 极地能源开发已成为各国竞争的焦点领域, 这为极地岩土工程行业的发展带来了新的机遇和挑战。然而, 极地地区特殊的环境条件下, 冬季气温低至 -50 °C 以下, 夏季局部气温可达 10 °C 左右。在此环境中, 岩石经受极大温差的冻融循环和深低温条件导致的脆性增强等因

素加速了岩石结构的劣化,对现有岩土工程设计和结构的长期稳定性提出了新的技术挑战。

极地地区拥有丰富的油气及矿产资源^[138],全球气候变暖和极地冰盖逐渐融化使得开发这些资源的可能性不断上升,成为国际社会的关注热点。数据显示,北极地区已探明的油气田数量高达454个,石油储量为1599亿桶,天然气储量达1654万亿立方英尺^[139]。多个国家已在极地地区展开能源资源开发的规划性布局,例如2020年9月,美国能源部在阿拉斯加设立了北极能源办公室,旨在协调北极地区的跨部门行动,并在国防事务中发挥作用^[140]。同时,2020年初,俄罗斯相继发布了《北方航道计划》和《2035年前国家北极基本政策》,明确表示将推动对北极自然资源的大规模开发^[141]。目前,极地能源资源开发正在稳步推进,尤其是在北极地区,天然气液化厂、油气开采设施以及交通基础设施等建设项目逐渐展开。2021年,中俄亚马尔液化天然气项目成为了“冰上丝绸之路”的重要支点,如图6所示。同年8月,中国交建承接了位于俄罗斯堪察加半岛的液化天然气站项目,这一项目使得俄罗斯液化天然气的运输范围扩展至更远的亚洲市场。同时,国家和相关企业也在积极探索应对极地恶劣环境下的岩土工程挑战,以确保这些设施在极端气候条件下能够实现长期稳定运行。

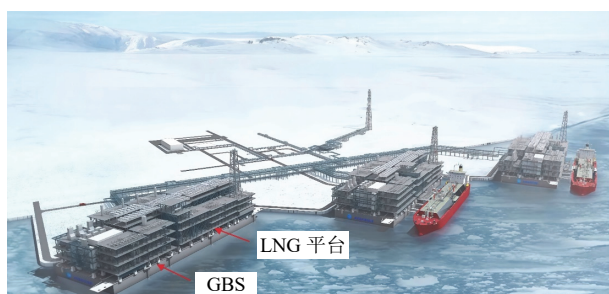


图6 北极液化天然气2号项目的混凝土重力结构(GBS)平台^[3]

Fig.6 Concrete gravity-based structure(GBS) platform of the Arctic LNG 2 Project^[3]

极地岩土工程的基础研究重点包括深低温环境下冰岩的相互作用、冻土路基和基础设施的长期稳定性以及冻融循环对工程材料的劣化等方面。杨成^[142]针对极地冰岩复合地层钻进过程开展了系统性理论研究,建立了基于岩石-冰体多相介质力学特性的金刚石钻头碎岩动力学模型。该研究通过解析钻进系统扭矩-转速耦合关系与岩冰介质强度参数的映射规律,揭示了冰岩复合地层钻进过程以跳跃式脆性剪切为主导的碎岩机制。极地环境下混凝

土断裂参数的确定有助于建立裂缝扩展准则,谢剑等^[143]针对 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围混凝土断裂特性开展的试验发现,深低温环境显著提升了混凝土材料的断裂性能指标,其起裂断裂韧度、失稳断裂韧度及断裂能均呈现随温度降低而单调递增的特征,并提出了混凝土断裂能计算模型。此外,极低温冻土的非线性力学行为及其在不同围压条件下的响应也逐步被关注,相关模型为进一步理解极地岩土材料在极端条件下的性能提供了理论支撑^[144]。在应用研究方面,主要围绕如何在极端环境下确保施工质量和材料性能展开。以极地环境下的混凝土施工为例,H. Li等^[145]通过对32个北极工程项目的统计分析发现,其中10个项目成功采用重力式混凝土平台结构,工程实践进一步验证了该结构在极地环境下的适用性。同时,在极地天然气储层开采和油气资源运输过程中,如何设计适应极端低温的基础设施也成为应用研究的关键方向。

综上所述,极地岩土工程领域已取得重要进展,从基础理论到工程实践,研究不断深化对极端低温环境下材料与结构行为的认知。通过构建岩石-冰体多相介质力学模型、系统解析低温混凝土断裂特性及冻融循环影响,研究揭示了极地环境下岩土材料的劣化机制,为工程设计提供了理论支撑。同时,重力式混凝土平台等结构在北极工程中的成功应用,验证了其应对极端温差和冻融挑战的工程适用性。当前,极地基础设施建设、能源资源开发及环境保护对岩土工程提出了更高要求,需重点突破以下关键技术难题:确保冰积物与冻土环境下工程结构的长期稳定性,制定冰雪融化及极地泥石流等灾害的预测与防护策略,研发适用于极地条件的高效破岩与精细开挖技术,以及具备优异抗寒耐久性性能的工程材料。此外,极低温环境下材料测试方法的创新、智能化与模块化工程装备的研发,以及极地岩土工程系统研究体系的构建,均是推动极地资源开发与基础设施建设可持续发展的重要方向。

3.4 深空能源资源开发利用

深空能源资源的开发利用已成为未来航天科技和人类探索宇宙的关键方向。特别是深空水冰资源的开采,不仅在为深空基地和科研站提供生命支持系统及能源储备方面具有重要的应用价值,也由于其特殊环境与作业条件,对现有的岩土力学理论和工程技术提出了严峻挑战。在极端温度、低重力和强辐射等深空环境下,水冰资源的赋存形式、物理力学特性以及其与周围岩土介质的相互作用复杂多

变,亟需深入的力学分析和创新的工程解决方案,以确保深空资源开发的安全性和可行性。

在深空能源开发方面,月球和火星作为当前深空探测的主要目标,其极地地区被认为蕴藏着丰富的水冰资源。据探测任务的数据显示,月球两极区域存在广泛的水冰分布,推测其储量可达数十亿吨^[146-147];同时,火星北极层状沉积单元中也储藏有大量水冰^[148]。这些水冰资源以纯水冰或与土壤混合的形式存在,为未来的资源利用提供了潜在可能。为了开发这些资源,多个国际空间任务已经展开。2017年,美国提出了“阿尔忒弥斯”(Artemis)月球载人探测计划^[149];俄罗斯瞄准可能存在大量水冰的月球南极,制定了“月球26~28号”任务,一系列深空探测器和着陆器的设计目标之一即是对月壤、火星土壤等地外岩土材料进行取样与测试。然而,深空资源开发过程中存在着显著的技术难题,尤其是在月球极地永久阴影区的表层取样、月壤与月岩的取样分析以及地外岩土材料的原位成型与力学性能测试等方面。

在深空岩土工程方面,与地球相比,月球、火星等地外天体的岩土材料具有独特的赋存环境,如极端温度、极端温差(月球日夜温差近300℃,火星日夜温差近200℃)、稀薄甚至缺失的大气层等^[150],这些都显著影响了地外岩土材料的力学性质。目前,研究重点在于通过有限探测数据、采用地球模拟星壤或微观数值模拟了解这些地外岩土材料的物理力学特性。已有研究表明,热循环是月球和火星等天体岩石破裂的主要原因^[151-152],而热疲劳则是影响小行星表面风化层更新的重要因素^[153]。在基础研究领域,众多学者基于地面力学理论,通过分析地表痕迹(如车辙、压痕等),反演星壤的力学参数,并结合类星壤材料开展试验研究,系统探讨其黏聚力、内摩擦角和剪切模量等关键力学特性。研究表明,地外岩土材料在承载与剪切特性方面与地球岩土材料具有显著差异。如S. Xiao等^[154]针对浅基础在1/6 g~2 g重力条件下的极限承载力进行了试验,发现地基砂的内摩擦角随重力水平降低而增大,且基于Mohr-Coulomb模型的高级任意拉格朗日-欧拉有限元模拟得到了验证。此外,薛龙等^[155-156]通过对月表机械臂压痕的分析,评估了月壤的承载能力及剪切力学特性。J. Atkinson等^[157]在77 K条件下开展了冻结月壤的穿透试验,当冻结月壤的含水量低于饱和状态时,穿透阻力和弛豫效应对冰含量表现出显著敏感性;然而,一旦含水量超过饱和水

平,这种敏感性则明显减弱。在应用研究领域,丁烈云等^[158]提出一种可持续且相对可靠的地外岩土材料原位成型方法,主要包括烧结熔融成型和黏结成型2项技术。其中,太阳能原位烧结成型技术已被列为嫦娥八号探测器的科学任务之一。研究表明,烧结后的样品抗压强度具有较大范围,在5~152 MPa范围^[159-160],尤其是热压熔铸法生产的材料强度最高,达到152 MPa。

综上所述,针对月球和火星等地外岩土材料的力学特性及其工程应用的研究已取得重要进展。从基础理论到试验验证,学者们通过地面模拟星壤试验、数值模拟与实测数据分析,揭示了地外岩土材料在低重力、极端温差及复杂辐照条件下的独特力学行为。同时,烧结熔融和黏结等成型技术在实验室中取得了良好效果,显示出一定的应用潜力。然而,深空岩土工程仍面临诸多技术挑战。深空环境的极端温差、超低气压及真空环境对水冰开采、地外岩土力学测试与原位施工带来严峻考验,亟需突破适应深空环境的采掘、成型与测试技术。同时,受限于探测数据不足,地外岩土长期演化及力学响应的认知仍待深化,需结合探测任务优化试验与模型。未来,依托深空探测技术进步,融合原位资源利用(ISRU)技术、智能工程装备与数字孪生建模,将有望推动深空岩土工程从理论向应用迈进,为深空基地建设与能源开发提供坚实支撑。

4 未来研究方向与展望

随着人类对极地、深空等极端环境的探索与资源开发的不断深入,深低温环境下岩石力学与工程研究已在室内试验、理论模型、数值模拟和工程应用等方面取得了重要进展。在室内试验方面,岩石在深低温环境下的物理力学特性,包括孔隙率、导热系数、抗压强度和弹性模量等,得到了广泛的研究;在理论模型方面,各类耦合模型初步揭示了岩石在深低温环境下的复杂力学响应机制,如水-冰相变、渗流迁移、热应力和冻胀应力的多场耦合过程;在数值模拟方面,基于有限元、离散元等方法的多场耦合模型,较准确地描述了热应力诱导的微裂纹扩展及孔隙水冻结-渗流效应对损伤演化的影响。在工程应用中,地下能源资源存储和液氮压裂的现场应用已取得显著成功,相关研究成果得到了实际工程的验证;极地和深空资源开发虽仍处于规划和试验阶段,但为深低温环境岩石力学与工程领域的

未来发展提供了新的应用场景。这些研究为进一步深化深低温岩石力学研究奠定了坚实基础,但仍存在诸多知识空白,未来研究方向应聚焦以下几个方面,以推动该研究领域的进一步发展:

(1) 深低温岩石微观相变动力学与多尺度损伤机制研究。当前对深低温环境下岩石的宏观力学行为已有一定认识,但岩石基质-孔隙冰-未冻水三相体系的微观演化机制尚缺乏系统解析。未来研究需依托原位低温扫描电子显微镜(Cryo-SEM)、低温原子力显微镜及纳米压痕等先进测试技术,结合分子动力学和量子力学,重点揭示以下关键科学问题:微纳米孔隙内水-冰相变的成核势垒与界面能演化机制;冰晶生长诱导的矿物晶格畸变与分子键断裂阈值;温度梯度作用下裂隙扩展的跨尺度传递机制(纳米级位错→微米级裂纹→宏观破裂)。特别需要建立深低温脆性-延性转变温度(DBTT)与矿物组成、孔隙结构之间的定量关系,为深低温岩石本构模型提供微观物理基础。

(2) 非平衡态多场耦合理论体系的构建与验证。现有多场耦合模型多基于静态平衡假设,其验证主要依赖常规低温试验,难以准确描述深低温岩石在急剧温度变化(如液氮循环注入)下的非稳态响应。未来研究应发展更具物理真实感的非平衡态多场耦合理论框架,包括:引入非平衡态热力学,刻画相变滞后效应及温度弛豫过程;建立渗流-热应力-冻胀力-损伤的多场耦合微分控制方程,重点解析矿物晶格膨胀、冻结收缩及相变潜热对温度场的反馈机制;开发基于相场理论的破裂预测模型,综合考虑冰楔作用与基质塑性变形对岩石破裂过程的影响。此外,需通过同步辐射CT等原位成像技术实时获取岩石内部结构与损伤演化数据,为模型参数校准和机制验证提供支撑,并利用机器学习优化多场耦合参数辨识,以提高模型的适用性与预测精度。

(3) 深低温环境岩石长期服役性能的时空演化预测。深低温环境中,岩石材料的长期稳定性与耐久性工程应用的核心问题。目前的研究主要集中于短期试验和数值模拟分析,对深低温岩石的时变特性认知存在明显研究空白:长期冻融循环作用下岩石孔隙结构和力学参数的劣化机制及未冻水膜迁移导致的累积损伤阈值;冰-岩界面在地质时间尺度上的蠕变-再结晶协同效应;宇宙射线、月尘等深空环境因子对岩石长期蠕变及疲劳损伤的影响。建议搭建“温度-应力-辐射”多因子加速老化试

验平台,并发展基于分数阶导数的时效本构模型。同时,构建深低温数字孪生系统,集成原位监测数据与机器视觉技术,实现工程结构全寿命周期性能的动态评估与预警。

(4) 深低温环境岩石工程技术的应用转化。针对地下能源存储微泄漏、液氮压裂诱发井筒塌陷、极地岩土破岩及深空原位资源勘探等工程难题,需突破以下核心技术:研制深低温自修复支护材料(如形状记忆合金-气凝胶复合结构);开发仿生梯度孔隙调控技术,以缓解冻胀应力集中;研制适用于深低温环境的高性能耐寒混凝土、抗冻岩土改性材料及复合防护材料;优化深低温岩土工程施工工艺,研发适用于极端环境的钻探、爆破与加固装备;推进小型化、轻量化、智能化原位岩土测试载荷的研制,构建适用于地外极端环境的多场耦合试验平台,并建立深空原位资源利用(ISRU)条件下的岩石原位测试数据库。建议在青藏高原冻土区建立极地-深空联合模拟试验场,通过多尺度工程验证推动理论模型向设计规范的转化。

5 结 论

本文首先提出了适用于岩土力学学科特点的低温分区建议,明确界定了“深低温”的起始温度。随后,系统综述了深低温岩石力学与工程研究的最新进展,重点分析了当前深低温环境下岩石的室内试验、理论模型以及数值模拟的研究现状,同时总结了深低温岩石工程的典型应用场景。通过对现有文献的深入梳理和分析,得出以下主要结论:

(1) 深低温环境对岩石的力学性质产生显著影响,其抗压强度、弹性模量、断裂韧性等参数表现出非线性温度依赖性。超低温条件下,岩石内部微观结构的温度诱导演化及相变过程显著改变其力学响应,导致材料脆性增强、断裂模式演变及局部损伤积累,从而影响工程稳定性。

(2) 现有多场耦合理论模型通过引入水-冰相变、温度梯度、渗流场及热应力作用,揭示了深低温条件下岩石内部热-水-力耦合效应。水-冰相变诱发的体积膨胀、渗透率变化及应力重分布是影响岩石稳定性的关键因素,为预测深低温岩石力学行为提供了理论支撑。

(3) 数值方法已较为系统地重现了深低温环境下岩体的多场耦合过程,揭示了热应力、水分迁移及冻胀效应对岩体温度场、渗透率演化及损伤破裂特征的影响。然而,现有模型在微观尺度的冰-岩

相互作用、孔隙结构演化及断裂机制刻画方面仍有待进一步完善,以提高模拟结果的可靠性与工程适用性。

(4) 深低温环境下的岩石工程应用场景面临诸多力学挑战,包括储库围岩脆性增强导致的裂隙扩展与能源泄漏风险、极地冻土与冰积物的稳定性问题,以及极端低温、低重力和强辐射等地外环境下岩土材料的力学特性演变尚缺乏系统研究,亟需深入研究以支撑工程设计与安全评估。

参考文献(References):

- [1] QU H, TANG S, LIU Y, et al. Characteristics of complex fractures by liquid nitrogen fracturing in brittle shales[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(4): 1 807 – 1 822.
- [2] LIN H, HAN Y, LIANG S, et al. Effects of low temperatures and cryogenic freeze-thaw cycles on concrete mechanical properties: A literature review[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 345: 128287.
- [3] EVGENIYA KRIVONOS. Stakeholder engagement plan: Arctic LNG2 project-environmental, social and health impact assessment[R]. Moscow: Ramboll CIS/LLC, 2021.
- [4] CHA S, BAE G, LEE K, et al. Evaluation of drainage system around a lined pilot cavern for underground cryogenic LNG storage[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2008, 23(4): 360 – 372.
- [5] XU L, PEI Z, ZOU Y, et al. China's lunar and deep space exploration program for the next decade(2020 – 2030)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(5): 615 – 617.
- [6] 高朝辉, 童科伟, 时剑波, 等. 载人火星和小行星探测任务初步分析[J]. *深空探测学报*, 2015, 2(1): 10 – 19.(GAO Zhaohui, TONG Kewei, SHI Jianbo, et al. Analysis of the manned mars and asteroid missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 2(1): 10 – 19.(in Chinese))
- [7] WANG T, SUN Q, JIA H, et al. Fracture mechanical properties of frozen sandstone at different initial saturation degrees[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(6): 3 235 – 3 252.
- [8] 贾海梁, 王亚彪, 魏 尧, 等. 基于电阻的冻结砂砾土孔隙冰压融效应研究[J]. *岩土力学*, 2024, 45(8): 2 221 – 2 231.(JIA Hailiang, WANG Yabiao, WEI Yao, et al. A resistivity-based study on the pressure melting of pore ice in frozen gravel soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(8): 2 221 – 2 231.(in Chinese))
- [9] WANG T, SUN Q, JIA H, et al. Linking the mechanical properties of frozen sandstone to phase composition of pore water measured by LF-NMR at subzero temperatures[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(6): 4 501 – 4 513.
- [10] 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))
- [11] WANG T, JIA H, SUN Q, et al. Pressure melting of pore ice in frozen rock under compression[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 210: 103856.
- [12] ZHENG P, TAN X, JIA H, et al. A unified model for frost wedging in an open fissure under unidirectional freezing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 176: 105726.
- [13] YANG L, JIA H, HAN L, et al. Hysteresis in the ultrasonic parameters of saturated sandstone during freezing and thawing and correlations with unfrozen water content[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(5): 1 078 – 1 092.
- [14] CHRISTIANSEN H H. Thermal regime of ice - wedge cracking in Adventdalen, Svalbard[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, 16(1): 87 – 98.
- [15] HALES T C, ROERING J J. Climatic controls on frost cracking and implications for the evolution of bedrock landscapes[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2): F02033.
- [16] ISHIKAWA M, KURASHIGE Y, HIRAKAWA K. Analysis of crack movements observed in an alpine bedrock cliff[J]. *Earth Surface Processes and Landforms: the Journal of the British Geomorphological Research Group*, 2004, 29(7): 883 – 891.
- [17] SU Z, TAN X, CHEN W, et al. A model of unfrozen water content in rock during freezing and thawing with experimental validation by nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(5): 1 545 – 1 555.
- [18] TAN X, CHEN W, TIAN H, et al. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 68(1/2): 74 – 84.
- [19] SU Z, MA Y, TAN X, et al. Experimental and theoretical study of the shear strength of ice-rock interface[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2024, 218: 104076.
- [20] JIA H, LEITH K, KRAUTBLATTER M. Path-dependent frost-wedging experiments in fractured, low-permeability granite[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, 28(4): 698 – 709.
- [21] 贾海梁, 赵思琪, 丁 顺, 等. 含水裂隙冻融过程中冻胀力演化及影响因素研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1 832 – 1 845. (JIA Hailiang, ZHAO Siqi, DING Shun, et al. Study on the evolution and influencing factors of frost heaving force of water-bearing cracks during freezing-thawing process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1 832 – 1 845.(in Chinese))
- [22] 谢 剑, 崔 宁, 姜晓峰. 混凝土超低温冻融循环损伤机制及控制措施[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(8): 2 367 – 2 371.(XIE Jian, CUI Ning, JIANG Xiaofeng. Mechanism and improvement of freeze-thaw deterioration of concrete under ultra-low temperature[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(8): 2 367 – 2 371.(in Chinese))
- [23] 贾海梁, 项 伟, 谭 龙, 等. 砂岩冻融损伤机制的理论分析和试

- 验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 879 - 895.(JIA Hailiang, XIANG Wei, TAN Long, et al. Theoretical analysis and experimental verifications of frost damage mechanism of sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 879 - 895.(in Chinese))
- [24] 中华人民共和国行业标准编写组. DB11/T 1972—2022 城市轨道交通工程冻结法施工技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DB11/T 1972—2022 Code for freezing method construction in urban rail transit projects[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.(in Chinese))
- [25] 中华人民共和国行业标准编写组. NB/T 10222—2019 隧道联络通道冻结法施工及验收规范[S]. 北京: 应急管理出版社, 2019.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. NB/T 10222—2019 Code for freezing method construction and acceptance of tunnel connecting passage[S]. Beijing: China Emergency Management Press, 2019.(in Chinese))
- [26] 中华人民共和国行业标准编写组. MT/T 1124—2011 煤矿冻结法开凿立井工程技术规范[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. MT/T 1124—2011 Technical code for shaft construction using freezing method in coal mines[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.(in Chinese))
- [27] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG 3431—2024 公路工程岩石试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG 3431—2024 Specifications for rock testing in highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2024.(in Chinese))
- [28] 中华人民共和国行业标准编写组. TB 10115—2023 铁路工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB 10115—2023 Specifications for rock testing in railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2023.(in Chinese))
- [29] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 51257—2017 液化天然气低温管道设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 51257—2017 Code for design of low-temperature pipelines for liquefied natural gas[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2017.(in Chinese))
- [30] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 16163—2012 瓶装气体分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 16163—2012 Classification of bottled gases[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.(in Chinese))
- [31] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 28577—2021 冷链物流分类与基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T 28577—2021 Classification and basic requirements of cold chain logistics[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese))
- [32] 申艳军, 杨更社, 荣腾龙, 等. 岩石冻融循环试验建议性方案探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1 775 - 1 782.(SHEN Yanjun, YANG Gengshe, RONG Tenglong, et al. Proposed scheme for freeze-thaw cycle tests on rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1 775 - 1 782.(in Chinese))
- [33] 张安阔, 修吉军, 吴一骁, 等. 生物样品低温存储制冷技术研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(6): 1 109 - 1 122.(ZHANG Ankao, XIU Jijun, WU Yixiao, et al. Research progress in refrigeration technology for cryogenic storage of biological samples[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(6): 1 109 - 1 122.(in Chinese))
- [34] 古乐, 王黎钦, 李秀娟, 等. 超低温环境固体润滑研究的发展现状[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(4): 314 - 320.(GU Le, WANG Liqin, LI Xiujuan, et al. Research status of cryogenic solid lubrication[J]. Tribology, 2002, 22(4): 314 - 320.(in Chinese))
- [35] SHANG Y H, NIU F J, YUAN K, et al. Thermal and mechanical characteristics of a thermal pile in permafrost regions[J]. Advances in Climate Change Research, 2023, 14(2): 255 - 266.
- [36] THORBERGSEN E. Back analysis of heat loads on selected thermal storages[C]// Storage of Gases in Rock Caverns: Proceedings of the International Conference on Storage of Gases in Rock Caverns/Trondheim/26-28 June 1989. Routledge: [s. n.], 2022: 229.
- [37] GOODALL D C, UTHEIM T, THORBERGSEN E. Back analysis of heat loads on selected thermal storages[M]. London: Routledge, 2022: 229 - 236.
- [38] 江杰, 邱居涛, 陈先枝, 等. 人工冻结法在圆砾地层地铁联络通道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 192 - 197.(JIANG Jie, QIU Jutao, CHEN Xianzhi, et al. Application of artificial freezing method in construction of metro cross passage in gravel stratum[J]. Modern Tunnel Technology, 2020, 57(2): 192 - 197.(in Chinese))
- [39] 杨更社, 魏尧, 申艳军, 等. 冻结饱和砂岩三轴压缩力学特性及强度预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 683 - 694.(YANG Gengshe, WEI Yao, SHEN Yanjun, et al. Mechanical behavior and strength forecast model of frozen saturated sandstone under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 683 - 694.(in Chinese))
- [40] BLINDHEIM O T, BROCH E, GRØV E. Gas storage in inlined caverns-Norwegian experience over 25 years[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(4/5): 367.
- [41] 孙余好, 吴亚华, 邢鹏飞, 等. 软弱富水地层干冰冻结隧道钻爆开挖施工方法[P]. 中国: CN202210492995.2, 2024 - 11 - 26.(SUN Yuhao, WU Yahua, XING Pengfei, et al. Construction method of drilling and blasting excavation of dry ice frozen tunnel in weak water-rich stratum[P]. China: CN202210492995.2, 2024 - 11 - 26.(in Chinese))
- [42] 秦伟, 秦松, 高杰, 等. 基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置及方法[P]. 中国: CN202110031185.2, 2022 - 03 - 25.(QIN Wei, QIN Song, GAO Jie, et al. Physical simulation experiment device and method of mine shaft temperature-

- displacement field coupling based on freezing method construction [P]. China: CN202110031185.2, 2022 - 03 - 25.(in Chinese))
- [43] PIROUZFAR V, SU C H. Developed liquified ethane production, storage and transportation using optimized liquefaction process : Design , energy optimization , and techno-economic feasibility[J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2025, 44(2): e14552.
- [44] TAN H, SUN N, ZHAO Q, et al. An ejector-enhanced re-liquefaction process(EERP) for liquid ethylene vessels[J]. International Journal of Energy Research, 2017, 41(5): 658 - 672.
- [45] DELAGE P, KARAKOSTAS F, DHEMAIED A, et al. An investigation of the mechanical properties of some Martian regolith simulants with respect to the surface properties at the InSight mission landing site[J]. Space Science Reviews, 2017, 211(1/4): 215.
- [46] 杨 平, 毛一样, 姚梦威. 盾尾刷更换时液氮冻结温度场及冻结参数影响的数值模拟分析[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(1): 69 - 77.(YANG Ping, MAO Yixiang, YAO Mengwei. Numerical simulation analysis of the influence of liquid nitrogen freezing temperature field and freezing parameters on shield tail brush replacement[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(1): 69 - 77.(in Chinese))
- [47] LEE D H, LEE H S, KIM H Y, et al. Measurements and analysis of rock mass responses around a pilot lined rock cavern for LNG underground storage[C]// Eurock 2005: Impact of Human Activity on the Geological Environment. Brno: International Symposium of the International-Society-for-Rock-Mechanics, 2005: 287 - 292.
- [48] YANG R, HONG C, HUANG Z, et al. Coal breakage using abrasive liquid nitrogen jet and its implications for coalbed methane recovery[J]. Applied Energy, 2019, 253: 113485.
- [49] RABI A M, RADULOVIC J, BUICK J M. Comprehensive review of liquid air energy storage(LAES) technologies[J]. Energies, 2023, 16(17): 6 216.
- [50] 孙泽洲, 张有为, 陈向东, 等. 基于嫦娥四号任务的月球背面浅层月壤温度原位测量[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(9): 1 447 - 1 455.(SUN Zezhou, ZHANG Youwei, CHEN Xiangdong, et al. In-situ measurement of shallow lunar regolith temperature on the back of the moon based on the Chang'e - 4 mission[J]. China Science : Technical Science, 2022, 52(9): 1 447 - 1 455.(in Chinese))
- [51] ONI B A, BADE S O, SANNI S E, et al. Underground hydrogen storage in salt caverns: recent advances, modeling approaches, barriers, and future outlook[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 107: 114951.
- [52] SIVTSEV A I, ALEKSANDROV A R, PETROV D M. Means to solve the problems of the development of helium resources in eastern siberia[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [S. l.]: IOP Publishing, 2020: 042097.
- [53] GUAN M, WANG X, ZHOU Y. Cryogenic temperature dependence of tensile response of NbTi/Cu superconducting composite wires[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(6): 8401106 - 8401106.
- [54] INADA Y, YOKOTA K. Some studies of low temperature rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1984, 21(3): 145 - 153.
- [55] 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): 367 - 386.
- [56] MELLOR M. Phase composition of pore water in cold rocks[M]. [S. l.]: Corps of Engineers, US Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1970: 39 - 40
- [57] KURIYAGAWA M, MATSUNAGA I, KINOSHITA N, et al. Rock behavior of underground cavern with the storage of cryogenic liquified gas[C]// ISRM International Symposium-Rockstore. Stockholm : Elsevier, 1981: 665 - 671.
- [58] LINDBLOM U E. A conceptual design for compressed hydrogen storage in mined caverns[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1985, 10(10): 667 - 675.
- [59] JACOBSSON U. Storage for liquified gases in unlined, refrigerated rock caverns[C]//Storage in Excavated Rock Caverns: Rockstore 77. Stockholm: Elsevier, 1978: 449 - 458.
- [60] INADA Y, YOKOTA K. Some studies of low temperature rock strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1984, 21(3): 145 - 153.
- [61] REN Z, WANG E, LIU J, et al. Characterization and prediction of compressive strength in ultralow-temperature frozen soil using nuclear magnetic resonance and WOA-ENN model[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 43: 101143.
- [62] AOKI K, HIBIYA K, YOSHIDA T. Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns: characteristics of rock under very low temperatures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4): 319 - 325.
- [63] 崔江磊. 低温月壤水冰模拟样本静力学特性研究[硕士学位论文][D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.(CUI Jianglei. Study on static characteristics of low temperature simulation sample of icy lunar regolith[M. S. Thesis][D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.(in Chinese))
- [64] DWIVEDI R D, SONI A K, GOEL R K, et al. Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(8): 1 267 - 1 275.
- [65] 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))
- [66] CAI C Z, LI G S, HUANG Z W, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 507 - 517.
- [67] QIN L, ZHAI C, LIU S, et al. Failure mechanism of coal after cryogenic

- freezing with cyclic liquid nitrogen and its influences on coalbed methane exploitation[J]. *Energy and Fuels*, 2016, 30(10): 8 567 – 8 578.
- [68] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮冻结条件下岩石孔隙结构损伤试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(4): 965 – 971.(CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experiment study of rock porous structure damage under cryogenic nitrogen freezing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(4): 965 – 971.(in Chinese))
- [69] CNUDDÉ V, BOONE M N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 123: 1 – 17.
- [70] 任韶然, 范志坤, 张亮, 等. 液氮对煤岩的冷冲击作用机制及试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增 2): 3 790 – 3 794.(REN Shaoran, FAN Zhikun, ZHANG Liang, et al. Mechanisms and experimental study of thermal-shock effect on coal-rock using liquid nitrogen[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(Supp.2): 3 790 – 3 794.(in Chinese))
- [71] WANG H, PAN J, WANG S, et al. Relationship between macro-fracture density, P-wave velocity, and permeability of coal[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 117: 111 – 117.
- [72] 郑学林. 页岩超低温诱导裂缝机制研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.(ZHENG Xuelin. Formation mechanism investigation on cryogenic-induced fractures in shale[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.(in Chinese))
- [73] 于恩毅, 金爱兵, 孙浩, 等. 超低温冻融循环下灰岩抗压强度与孔隙率的演化特征及衰减模型[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(10): 55 – 60.(YU Enyi, JIN Aibing, SUN Hao, et al. Evolution characteristics and attenuation model of compressive strength and porosity of limestone under ultra-low temperature freeze-thaw cycles[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(10): 55 – 60.(in Chinese))
- [74] 张牡丹, 王苏然, 曾健霜, 等. 花岗岩超低温冻融循环后力学特性研究[J]. *上海理工大学学报*, 2017, 39(5): 484 – 489.(ZHANG Mudan, WANG Suran, ZENG Jianshuang, et al. Study on mechanical properties of granite after ultra-low temperature freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Shanghai University of Science and Technology*, 2017, 39(5): 484 – 489.(in Chinese))
- [75] 吕敦波, 张帆, 张益峰, 等. $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冻融循环后花岗岩三点弯曲试验研究[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(6): 1 796 – 1 806.(LV Dunbo, ZHANG Fan, ZHANG Yifeng, et al. Experimental study on three-point bending of granite after cryogenic freeze-thaw cycles at $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(6): 1 796 – 1 806.(in Chinese))
- [76] HOU P, SU S, GAO F, et al. Influence of liquid nitrogen freeze-thaw cycles on mechanical behaviors and permeability properties of coal under different confining pressures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(4): 2 625 – 2 644.
- [77] WANNE T, YOUNG R. Bonded-particle modeling of thermally fractured granite[J]. *International Journal of Rock mechanics and mining Sciences*, 2008, 45(5): 789 – 799.
- [78] 曹钰, 郜保平, 赵璐敏, 等. 液氮深冷冲击作用下岩石传热规律试验研究[J]. *太原理工大学学报*, 2022, 53(6): 1 014 – 1 023.(CAO Yu, XI Baoping, ZHAO Lumin, et al. Experimental study on rock heat transfer under cryogenic impact of liquid nitrogen[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2022, 53(6): 1 014 – 1 023.(in Chinese))
- [79] SUNDBERG J, BACK P, CHRISTIANSSON R, et al. Modelling of thermal rock mass properties at the potential sites of a Swedish nuclear waste repository[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(6): 1 042 – 1 054.
- [80] 赵波. 超低温环境下致密岩石孔隙力学特性研究及应用[博士学位论文][D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.(ZHAO Bo. Research and application of pore-related mechanical properties of tight rocks at ultra-low temperature[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019.(in Chinese))
- [81] NESPOLI M, YU H, RINALDI A P, et al. Applications and future developments of the(thermo-) poro-elastic theory in geophysics[J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 260: 104996.
- [82] 唐世斌, 罗江, 唐春安. 低温诱发岩石破裂的理论及数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(7): 1 596 – 1 607.(TANG Shibin, LUO Jiang, TANG Chun'an. Theoretical and numerical study on the cryogenic fracturing in rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(7): 1 596 – 1 607.(in Chinese))
- [83] 左建平, 满轲, 曹浩, 等. 热力耦合作用下岩石流变模型的本构研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增 1): 2 610 – 2 616.(ZUO Jianping, MAN Ke, CAO Hao, et al. Study on constitutive equation of rock rheological model with thermo-mechanical coupling effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.1): 2 610 – 2 616.(in Chinese))
- [84] 郜保平, 赵阳升, 万志军, 等. 热力耦合作用下花岗岩流变模型的本构关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(5): 956 – 967.(XI Baoping, ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, et al. Study of constitutive equation of granite rheological model with thermo-mechanical coupling effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 956 – 967.(in Chinese))
- [85] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 热力耦合作用鲁灰花岗岩蠕变声发射规律[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增 1): 3 061 – 3 067.(WU Jinwen, ZHAO Yangsheng, WAN Zhijun, et al. Creep acoustic emission rule of gray granite from shandong province with thermo-mechanical coupling effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Supp.1): 3 061 – 3 067.(in Chinese))
- [86] 徐彬. 大型低温液化天然气(LNG)地下储气库裂隙围岩的热力耦合断裂损伤分析研究[博士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2008.(XU Bin. Research on thermo-mechanical coupling damage behavior in jointed rock surrounding large-scale rock cavern for refrigerated LNG(liquified natural gas) storage[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.(in Chinese))
- [87] 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))
- [88] SUN L, TANG X, ABOYANAH K R, et al. A coupled cryogenic thermo-hydro-mechanical model for frozen medium: Theory and implementation in FDEM[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(11): 4 335 – 4 353.
- [89] HUANG S, LIU Q, CHENG A, 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.
- [90] JIAO K, HAN D, WANG D, et al. Investigation of thermal-hydro-mechanical coupled fracture propagation considering rock damage[J]. *Computational Geosciences*, 2022, 26(5): 1 167 – 1 187.
- [91] LIU N, LIN W, WANG S, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for fractured rock masses in cold regions[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 205: 103707.
- [92] 柳程希. 液氮作用下页岩冻融应力损伤分析[硕士学位论文][D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.(LIU Chengxi. Damage analysis on freeze-thaw stress of shale under liquid nitrogen condition[M. S. Thesis][D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2018.(in Chinese))
- [93] 林海飞, 李博涛, 李树刚, 等. 液氮致裂层理煤体热-流-固-损伤耦合模型及数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(5): 1 110 – 1 123.(LIN Haifei, LI Botao, LI Shugang, et al. Study on thermal-fluid-solid-damage coupling model and numerical simulation of liquid nitrogen fracturing bedding coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(5): 1 110 – 1 123.(in Chinese))
- [94] HAN S, CHENG Y, GAO Q, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model with ice-water phase change for liquid nitrogen injection simulation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203: 108676.
- [95] REN K, CAI C. Numerical investigation into the distributions of temperature and stress around wellbore during the injection of cryogenic liquid nitrogen into hot dry rock reservoir[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021(1): 9913321.
- [96] SHI Y, SONG X, SHEN Z, et al. Numerical investigation on heat extraction performance of a CO₂ enhanced geothermal system with multilateral wells[J]. *Energy*, 2018, 163: 38 – 51.
- [97] 黄鑫, 唐世斌, 包春燕, 等. 热应力与膨胀力耦合作用下岩石破裂机制的数值模拟研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(4): 611 – 620.(HUANG Xin, TANG Shibin, BAO Chunyan, et al. Numerical simulation of rock failure process under coupling effect of thermal stress and inner pressure[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(4): 611 – 620.(in Chinese))
- [98] CAI C, HUANG Z, LI G, et al. Feasibility of reservoir fracturing stimulation with liquid nitrogen jet[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 144: 59 – 65.
- [99] LIN H, LI B, LI S, et al. Enhancing coalbed methane recovery using liquid nitrogen as a fracturing fluid: A coupled thermal-hydro-mechanical modeling and evaluation in water-bearing coal seam[J]. *Energy*, 2024, 291: 130445.
- [100] LIU S, LI X, WANG D. Numerical simulation of the coal temperature field evolution under the liquid nitrogen cold soaking[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13: 1 – 10.
- [101] MONSEN K, BARTON N. A numerical study of cryogenic storage in underground excavations with emphasis on the rock joint response[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(7): 1 035 – 1 045.
- [102] KIM H, AMANTINI E, CHANFREAU E. Pilot project: lined cavern LNG storage[J]. *The Korean Society for Geosystem Engineering*, 2003, 40(2): 140 – 145.
- [103] ZHOU C, GAO F, CAI C, et al. Mechanical properties and damage evolution of heated granite subjected to liquid nitrogen cooling[J]. *Applied Sciences*, 2022, 20(12): 10615.
- [104] SHAO Z, SUN L, ABOYANAH K R, et al. Investigate the mode I fracture characteristics of granite after heating-LN₂ cooling treatments[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(7): 4 477 – 4 496.
- [105] ZHANG C, WANG L, DU J, et al. Numerical modelling rock deformation subject to nitrogen cooling to study permeability evolution[J]. *International Journal of Coal Science and Technology*, 2015, 2(4): 293 – 298.
- [106] YAN M, FAN Y, YUE M, et al. Heat-mass transfer coupling effects in water-ice phase transformation of water-bearing coal frozen with liquid nitrogen[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 118902.
- [107] NEAUPANE K M, YAMABE T. A fully coupled thermo-hydro-mechanical nonlinear model for a frozen medium[J]. *Computers and Geotechnics*, 2001, 28(8): 613 – 637.
- [108] 李和万, 刘戡, 高熹才, 等. 液氮冷加载对不同含水饱和度节理煤样损伤的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 413 – 420.(LI Hewan, LIU Jian, GAO Xicai, et al. Effect of liquid nitrogen cold loading on damage of jointed coal samples with different water saturation[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(2): 413 – 420.(in Chinese))
- [109] TAO J, WU Y, LI S, et al. Coupled simulations on fracture network evolution during nitrogen fracturing after liquid nitrogen pre-conditioning in shale[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(12): 468.
- [110] WU Y, TAO J, WANG J, et al. Experimental investigation of shale breakdown pressure under liquid nitrogen pre-conditioning before nitrogen fracturing[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(4): 611 – 620.
- [111] WASILEWSKI T G, BARCIŃSKI T, MARCHEWKA M. Experimental investigations of thermal properties of icy lunar regolith

- and their influence on phase change interface movement[J]. Planetary and Space Science, 2021, 200: 105197.
- [112] 郑 琼, 江丽霞, 徐玉杰, 等. 碳达峰、碳中和背景下储能技术研究进展与发展建议[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 529 – 540.(ZHENG Qiong, JIANG Lixia, XU Yujie, et al. Research progress and development suggestions of energy storage technology under background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 529 – 540.(in Chinese))
- [113] 黄 宽, 张万益, 王丰翔, 等. 地下空间储能国内外发展现状 & 调查建议[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 105 – 117.(HUANG Kuan, ZHANG Wanyi, WANG Fengxiang, et al. Development status of underground space energy storage at home and abroad and geological survey suggestions[J]. Geological Journal of China, 2024, 51(1): 105 – 117.(in Chinese))
- [114] PARK E S, JUNG Y B, SONG W K, et al. Pilot study on the underground lined rock cavern for LNG storage[J]. Engineering Geology, 2010, 116(1/2): 44 – 52.
- [115] Park E, Chung S, Lee H, et al. Design and operation of a pilot plant for underground LNG storage[C]//ARMA Canada-US Rock Mechanics Symposium. Alexandria: ARMA, 2007: ARMA – 07 – 150.
- [116] YIM J, KIM J H, PARK S G, et al. Investigation of ground condition changes due to cryogenic conditions in an underground LNG storage plant[J]. Exploration Geophysics, 2005, 36(1): 67 – 72.
- [117] CHA S S, LEE J Y, LEE D H, et al. Engineering characterization of hydraulic properties in a pilot rock cavern for underground LNG storage[J]. Engineering geology, 2006, 84(3/4): 229 – 243.
- [118] 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): 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.2): 2 977 – 2 993.(in Chinese))
- [119] MIK A. Vest process propane cavern project, Norway[EB/OL]. <http://www.mika.no/upload/referanselister/westprosesspropanecavern>, 2002 – 07 – 01.
- [120] GLAMHEDEN R, LINDBLOM U. Thermal and mechanical behaviour of refrigerated caverns in hard rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(4): 341 – 353.
- [121] PB-KBB INC. Advanced underground gas storage concepts : refrigerated- mined cavern storage[R]. Houston: PB-KBB Inc., 1998.
- [122] 丁国生, 丁一宸, 李 洋, 等. 碳中和行动下的中国地下储气库发展前景[J]. 油气储运, 2022, 41(1): 1 – 9.(DING Guosheng, DING Yichen, LI Yang, et al. Prospects of underground gas storage in China under the strategy of carbon neutrality[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2022, 41(1): 1 – 9.(in Chinese))
- [123] CROTOGINO F, DONADEI S, BÜNGER U, et al. Large-scale hydrogen underground storage for securing future energy supplies[C]//The 18th World Hydrogen Energy Conference. Forschungszentrum: Zentralbibliothek, 2010: 37 – 45.
- [124] FORSBERG C W. Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(4): 431 – 439.
- [125] LI Z, XU H, ZHANG C. Liquid nitrogen gasification fracturing technology for shale gas development[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 138: 253 – 256.
- [126] ALLEN J C, BAUER C L. Method of increasing the permeability of a subterranean hydrocarbon bearing formation[P]. America: US3638727 A, 1968 – 09 – 27.
- [127] FINNIE I, COOPER G A, BERLIE J. Fracture propagation in rock by transient cooling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1979, 16(1): 11 – 21.
- [128] MCDANIEL B W, GRUNDMANN S R, KENDRICK W D, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition?. Richardson: SPE, 1997: SPE – 38623 – MS.
- [129] GRUNDMANN S R, RODVELT G D, DIALS G A, et al. Cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid in the devonian shale[C]// SPE Eastern Regional Meeting. Richardson: SPE, 1998: SPE – 51067 – MS.
- [130] CHA M, ALQAHTANI N B, YIN X, et al. Laboratory system for studying cryogenic thermal rock fracturing for well stimulation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 156: 780 – 789.
- [131] ALQATAHNI N B, CHAM, YAO B, et al. Experimental investigation of cryogenic fracturing of rock specimens under true triaxial confining stresses[C]// SPE Europec featured at EAGE Conference and Exhibition?. Richardson: SPE, 2016: SPE – 180071 – MS.
- [132] YANG R, HUANG Z, SHI Y, et al. Laboratory investigation on cryogenic fracturing of hot dry rock under triaxial-confining stresses[J]. Geothermics, 2019, 79: 46 – 60.
- [133] HUANG P, HUANG Z, YANG Z, et al. An innovative experimental equipment for liquid nitrogen fracturing[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(3): 036104.
- [134] ZHANG S, HUANG Z, LI G, et al. Numerical analysis of transient conjugate heat transfer and thermal stress distribution in geothermal drilling with high-pressure liquid nitrogen jet[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 1 348 – 1 357.
- [135] WEN H, YANG R, HUANG Z, et al. Numerical simulation of proppant transport in liquid nitrogen fracturing[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 84: 103657.
- [136] 李子丰. 液化氮气在油气层内气化压裂方法[P]. 中国: CN201110361327.8, 2024 – 06 – 10.(LI Zifeng. Nitrogen liquefaction gas fracturing method in oil and gas reservoirs[P]. China : CN201110361327.8, 2024 – 06 – 10.(in Chinese))
- [137] 李 波, 王泽祺, 张路路, 等. 可增压液氮与氮气耦合致裂增透装置及增透实验方法[P]. 中国: CN201910849842.7, 2023 – 06 – 23.(LI Bo, WANG Zeqi, ZHANG Lulu, et al. Pressurized liquid

- nitrogen and nitrogen coupling fracturing antireflection device and antireflection experimental method[P]. China: CN201910849842.7, 2023 - 06 - 23.(in Chinese))
- [138] BIRD K J, CHARPENTIER R R, GAUTIER D L, et al. Circum-Arctic resource appraisal: Estimates of undiscovered oil and gas north of the Arctic Circle[R]. Virginia: US Geological Survey, 2008.
- [139] 孙迪, 张厚和, 郝婧, 等. 北极地区油气资源分布特征与开发利用分析[J]. 极地研究, 2024, 36(2): 286 - 303.(SUN Di, ZHANG Houhe, HAO Jing, et al. Analysis of distribution and exploitation of oil and gas resources in the Arctic region[J]. Polar Research, 2024, 36(2): 286 - 303.(in Chinese))
- [140] DEPARTMENT OF ENERGY. US Department of energy announces establishment of office of Arctic energy[EB/OL]. <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-establishment-office-arctic-energy>, 2020 - 09 - 17.
- [141] П Л А Н. Развития инфраструктуры северного морского пути на период до 2035 года[EB/OL]. <https://seanews.ru/wp-content/uploads/2019/12/plan-smp.pdf>, 2019 - 12 - 31.
- [142] 杨成. 极地冰岩夹层钻进碎岩机制分析及试验研究[博士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2016.(YANG Cheng. Theoretical and experimental study on fragmentation mechanism during polar debris-rich ice drilling[Ph. D.Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2016.(in Chinese))
- [143] 谢剑, 刘洋, 严加宝, 等. 极地低温环境下混凝土断裂性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增1): 341 - 350.(XIE Jian, LIU Yang, YAN Jiabao, et al. Experimental study on fracture properties of concrete in polar low temperature environment[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Supp.1): 341 - 350.(in Chinese))
- [144] LORIA A F R, FRIGO B, CHIAIA B. A non-linear constitutive model for describing the mechanical behaviour of frozen ground and permafrost[J]. Cold regions Science and Technology, 2017, 133: 63 - 69.
- [145] LI H, DANG X, ZHU K, et al. Review and outlook on arctic offshore facilities and technologies[C]// OTC Arctic Technology Conference 2015. Houston: Offshore Technology Conferenc, 2015: 777 - 800.
- [146] FELDMAN W C, MAURICE S, BINDER A B, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles[J]. Science, 1998, 281: 1496 - 1500.
- [147] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M, et al. Evidence for water ice on the Moon: Results for anomalous polar craters from the LRO Mini - RF imaging radar[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2013, 118(10): 2016 - 2029.
- [148] SELVANS M M, PLAUT J J, AHARONSON O, et al. Internal structure of Planum Boreum, from Mars advanced radar for subsurface and ionospheric sounding data[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2010, 115(E9): E09003.
- [149] NASA. Artemis accords[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/artemis-accords/>, 2020 - 10 - 13.
- [150] ZHANG T, WANG B, WEI H, et al. Review on planetary regolith-sampling technology[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 127: 100760.
- [151] VILES H, MESSENZEHL K, MAYAUD J, et al. Stress histories control rock-breakdown trajectories in arid environments[J]. Geology, 2018, 46(5): 419 - 422.
- [152] VILES H, EHLMANN B, WILSON C F, et al. Simulating weathering of basalt on Mars and Earth by thermal cycling[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(18): L18201
- [153] DELBO M, LIBOUREL G, WILKERSON J, et al. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids[J]. Nature, 2014, 508: 233 - 236.
- [154] XIAO S, CHENG X, HOU M, et al. Analysis of experimental results on the bearing capacity of sand in low-gravity conditions[J]. Microgravity Science and Technology, 2022, 34(2): 16.
- [155] 薛龙, 姚猛, 李立桦, 等. 基于触月压痕的表层月壤力学状态试验分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(3): 497 - 503.(XUE Long, YAO Meng, LI Liben, et al. Experimental analysis of mechanical properties of surface lunar soil based on lunar indentation[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2022, 52(3): 497 - 503.(in Chinese))
- [156] 王康, 姚猛, 李立桦, 等. 基于月面表取采样触月压痕的月壤力学状态分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51(3): 1146 - 1152.(WANG Kang, YAO Meng, LI Liben, et al. Mechanical performance identification for lunar soil in lunar surface sampling[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2021, 51(3): 1146 - 1152.(in Chinese))
- [157] ATKINSON J, PRASAD M, ABBUD-MADRID A, et al. Penetration and relaxation behavior of JSC-1A lunar regolith simulant under cryogenic conditions[J]. Icarus, 2020, 346: 113812.
- [158] 丁烈云, 周诚, 高玉月, 等. 地外建造研究进展与科学技术挑战[J]. 土木工程学报, 2024, 57(6): 26 - 42.(DING Lieyun, ZHOU Cheng, GAO Yuyue, et al. Research progress and scientific and technological challenges in extraterrestrial construction[J]. Journal of Civil Engineering, 2024, 57(6): 26 - 42.(in Chinese))
- [159] HAN W, DING L, CAI L, et al. Sintering of HUST-1 lunar regolith simulant[J]. Construction and Building Materials, 2022, 324: 126655.
- [160] WANG R, QIAO G, SONG G. Additive manufacturing by laser powder bed fusion and thermal post-treatment of the lunar-regolith-based glass-ceramics for in-situ resource utilization[J]. Construction and Building Materials, 2023, 392: 132051.