



2001—2012 年岩石冻融力学研究进展

邓红卫,田维刚,周科平,李杰林

中南大学资源与安全工程学院;中南大学高海拔寒区采矿工程技术研究中心,长沙 410083

摘要 为了解和掌握近 12 年岩石冻融力学的研究进展,检索 2001—2012 年美国 Web of Science 数据库和中国期刊全文数据库收录的岩石冻融力学论文,统计分析发现,近 12 年中,世界范围内岩石冻融力学研究论文数量呈较快增长态势;中国在该领域研究基础较差,研究力量尚显不足,但后 6 年国内相关文献总数和学位论文数比前 6 年分别增长 108.8%,236.4%,表明国内岩石冻融力学发展势头良好。查阅近年发表的岩石冻融力学论文,对岩石冻融力学中的冻岩物理力学基础研究和冻融损伤机理研究分别进行了简单综述,并在此基础上进行了展望分析。

关键词 岩石力学;冻融;冻融损伤

中图分类号 TU45

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.012

Progress in Freezing–thawing Rock Mechanics During the Period of 2001 to 2012

DENG Hongwei, TIAN Weigang, ZHOU Keping, LI Jieli

School of Resources and Safety Engineering; Mining Engineering Technology Research Center for High Altitude Cold Region, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract This paper reviews the research development of freezing–thawing rock mechanics, focusing on papers related with the freezing–thawing rock mechanics in the database of Web of Science and Chinese Academic Periodical Full Text during 2001 to 2012. From the searched results, it can be seen that the number of research papers on freezing–thawing rock mechanics is in rapid growth in the last 12 years and that the research foundation in China is not good and not many papers in the field are published. Meanwhile, it is shown that the number of papers and dissertations during the period of 2007–2012 increases by 108.8% and 236.4% compared to the period of 2001–2006, which indicates that the domestic studies of the freezing–thawing rock mechanics are in a booming state in trends. Some papers related to the freezing–thawing rock mechanics published in these periodicals in recent years are specially analyzed. Studies of physical properties and damage mechanisms are briefly reviewed and some issues worth further studies are pointed out.

Keywords rock mechanics; freezing–thawing; freezing–thawing damage

0 引言

由于受限于自然地理条件和国家宏观政治经济战略的影响,中国西部地区矿产资源开发程度相对较低,开发潜力巨大。但中国西部地区昼夜温差和夏冬温差很大,矿业开发和基础设施建设等岩土工程都面临着复杂的岩石冻融力学问题。

传统的岩石冻融力学研究属于冻土研究的范畴,但冻土研究中土的冻融研究起步较早,也更为深入,岩石的冻融研究是随着寒区大型岩石工程的开工建设才逐渐被重视起来的,研究相对滞后。近年来,国内外逐渐意识到采用一般冻土力学方法研究冻结岩石问题,已很难满足日益增长的工程需要,有必要将冻结岩石问题作为一个新的研究方向提出来^[1]。

收稿日期:2013-04-22;修回日期:2013-05-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51074178);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2012zzts104);国家自然科学基金青年基金项目(51204205)

作者简介:邓红卫,副教授,研究方向为岩石力学、采矿工程与矿山安全等,电子信箱:denghw208@126.com

随着世界范围内矿产资源开采逐渐转向深部、自然环境恶劣地区和中国西部大开发战略的持续大力推进,岩石冻融力学因其极强的寒区工程应用背景,正在或已经成为岩石力学领域的热门方向。

学术论文是反映某一科研领域发展动态的重要依据之一,且目前国内外关于岩石冻融力学研究的学术论文已有一定数量,但还未有相关论文对其进行专门的统计分析研究。为了掌握近年国内外岩石冻融力学的研究进展,笔者将运用文献统计的方法对 2000—2012 年美国 Web of Science 数据库和中国期刊全文数据库收录的关于岩石冻融力学方面的论文进行了检索,并对检索结果进行了统计分析,对岩石冻融力学的研究进展和新动态进行了汇总、归类与相关分析。

1 2001—2012 年岩石冻融力学研究成果的检索与分析

1.1 国际岩石冻融力学研究成果检索与分析

为了更加直观地了解 21 世纪以来岩石冻融的研究现状,笔者以主题=(frozen OR freeze OR frost OR freezing)且主题=(rock)为检索词,剔除部分无关论文,从 Web of Science 数据库中检索到 2001—2012 年该领域文献总计 957 篇,按照论文的发表年份及论文作者国别分别进行统计,如图 1、图 2 所示。

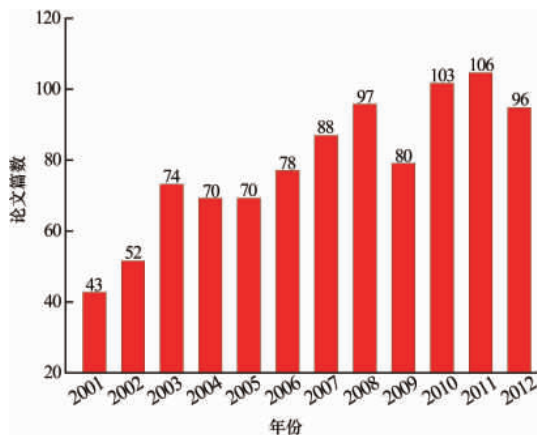


图 1 论文发表的时间分布情况

Fig. 1 Article distribution versus time of publication

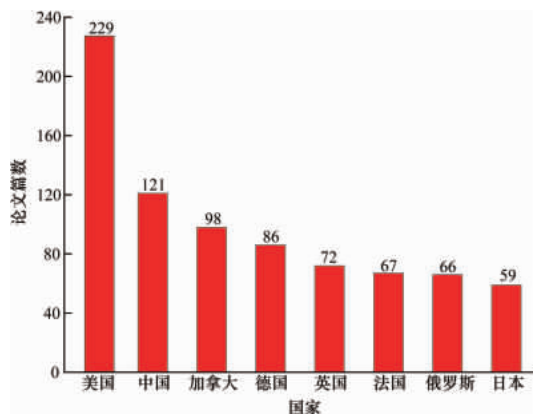


图 2 论文作者的国家分布情况

Fig. 2 Article distribution versus author's countries

统计结果分析如下:

(1) 由图 1 可知,2001—2012 年,世界范围内有关岩石冻融力学的研究总体呈明显增长态势。其中,2001—2006 年论文总数为 391 篇,2007—2012 年论文总数为 566 篇。2001—2012 年总计 12 年间,后 6 年论文总数比前 6 年增加 44.8%,增长幅度较大。

(2) 由图 2 可知,2001—2012 年,发表岩石冻融力学方面论文数量最多的 3 个国家分别是美国、中国、加拿大。美国、英国、德国、日本等国家为传统的科研强国,在大多数研究领域中都比较活跃。同时,加拿大、中国、俄罗斯等国家寒区面积大,岩石冻融力学的实际技术需求可能也是推动相关研究快速发展的重要动力之一。中国的研究论文数量处在世界前列,这可能是由于岩石冻融力学的专门研究在中国起步较晚,21 世纪以来刚好处在一个加速发展的阶段。

1.2 国内岩石冻融力学研究成果检索与分析

为了深入地了解中国岩石冻融力学的研究进展,以检索式:(主题=冻融或冻结)且(主题=岩石),在中国期刊全文数据库,对中国发表的论文进行了系统检索,剔除部分无关论文,检索出岩石冻融力学相关论文 176 篇,对检索结果进行了统计分析。

总计 176 篇岩石冻融力学方面的研究论文中,期刊论文为 122 篇,博士或硕士学位论文 48 篇,会议论文 6 篇。对发表论文的期刊和学位论文的学位授予单位分别进行了排名统计,见表 1 和表 2。

表 1 发表论文的期刊分布情况

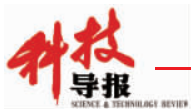
Table 1 Published journal distribution

期刊	论文篇数	占期刊论文总数/%
岩石力学与工程学报	24	19.67
岩土力学	10	8.20
岩土工程学报	5	4.10
冰川冻土	5	4.10
地下空间与工程学报	5	4.10
煤炭学报	4	3.28
其他	69	56.56

表 2 学位授予单位的分布情况

Table 2 Degree-granting institution distribution

学位授予单位	论文篇数	占学位论文总数/%
西安科技大学	12	25.00
安徽理工大学	5	10.42
长安大学	4	8.33
成都理工大学	3	6.25
西南交通大学	3	6.25
中科院武汉岩土力学研究所	3	6.25
中国地质大学(武汉)	3	6.25
其他	15	31.25



统计结果分析如下:

(1) 由表 1 可知,2001—2012 年国内发表的岩石冻融力学的相关论文约 44% 发表在《岩石力学与工程学报》、《岩土力学》、《岩土工程学报》、《冰川冻土》、《地下空间与工程学报》、《煤炭学报》6 种核心期刊上,其中《岩石力学与工程学报》、《岩土力学》、《岩土工程学报》等均为国内岩石和岩土学研究领域的权威刊物,可见岩石冻融力学研究的相关创新成果正在不断涌现。

(2) 由表 2 可知,2001—2012 年国内岩石冻融力学研究的博士或硕士学位论文培养单位较为集中,这可能是由于岩石冻融力学的研究在国内尚属发展阶段,进行专门系统研究的科研院所并不多。其中,仅西安科技大学就培养了 8 名博士或硕士,占到该研究领域学位授予总数的 25%。

考虑到博士或硕士学位论文作为重要的文献情报资源,能够在一定程度上代表相关领域的系统研究水准,故将近 12 年撰写的学位论文数和论文总数进行对比分析,如图 3。

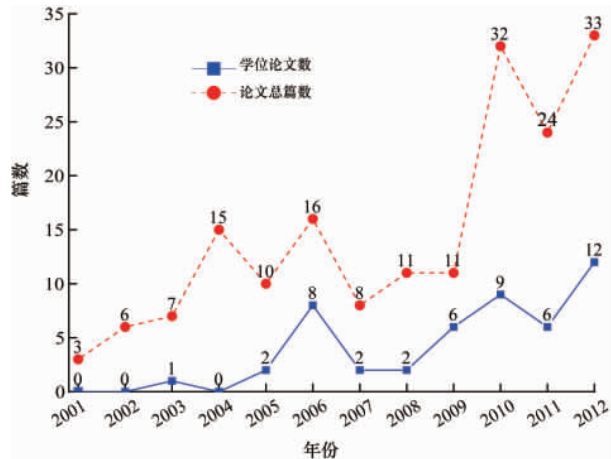


图 3 学位论文与论文总数随时间的分布情况
Fig. 3 Dissertation and article distribution versus time of publication

统计结果显示,2001—2012 年间,论文总数和学位论文总数整体均呈明显增长态势,且两者均在 2006 年、2010 年、2012 年 3 次同时达到一个较高水平。后 6 年论文总数和学位论文总数分别比前 6 年增长 108.8%、236.4%。特别是最近 3 年论文总数和学位论文总数更是显著增长,达到很高水平,可大致表明岩石冻融力学已经成为近 3 年来的研究热点之一,相关研究十分活跃。

对 2001—2012 年中国岩石冻融力学研究领域的论文作者进行了检索统计。结果表明,西安科技大学杨更社教授及其课题团队在该领域的论文成果最多,中国科学院武汉岩土力学研究所刘泉声教授及其课题团队次之。其中,仅以杨更社教授为第一或第二作者(含指导学位论文)署名发表的论文就高达 32 篇,占国内该领域论文总数的 18.2%。这说明杨更社教授及其课题团队在该领域的研究中做出了突出贡献,研究最为深入,同时,也说明中国岩石冻融力学的学术研究

远没能达到百家争鸣的水平,很多研究才刚刚起步,还有大量的工作有待更多的研究学者参与完成。

2 2001—2012 年岩石冻融力学的主要研究内容

岩体冻融损伤力学问题是寒区岩土工程中面临的重大难题。从主要研究内容来看,刘泉声等^[2]指出,目前国内外学者关于冻岩问题的研究可大致归纳为冻岩物理力学性质、低温多场 (THM) 耦合、相变过程、冻融损伤模型及数值分析 4 个大方面。归结起来,可粗略分为冻岩物理力学基础研究和冻融机理研究 2 个层面。近年,国内外岩石冻融力学在上述 2 个层面的研究中均取得了大量成果,特别是高科技手段的引入为相关研究提供了新的思路。

2.1 冻岩物理力学性质研究

冻岩物理力学性质研究属于岩石冻融力学中的重要部分,是进行多场耦合、相变过程和损伤模型等冻岩机理研究的基础。由于不同岩石、不同的冻融条件都直接对冻岩物理力学性质产生很大影响。因此,对于冻岩物理力学性质这一基础性研究,工作量非常巨大,而且试验周期长,试验成本高,国内外有大量的学者进行了相关试验研究。文献[3]~[5]对前人所做的相关工作进行过总结,下文仅就该领域部分学者所做的代表性工作进行简单论述。

2.1.1 国际冻岩物理力学性质研究现状

Yamabe 等^[6]以日本的 Sirahama 砂岩作为实验样本,进行了不同温度 (+20, -5, -7, -10, -20℃) 下的单轴压缩实验以及 -20℃ 下不同围压 (0, 1, 3MPa) 条件下的三轴压缩实验,结果表明:一次冻融循环下,干燥岩样发生轴向弹性变形,而饱和岩样变形有塑性变形,岩石单轴抗压强度随冻融次数增加而减小,三轴抗压强度随围压的增大而增大。西班牙的 del Roa 等^[7]对不同种类的花岗岩在温度为 -12~20℃ 区间进行了 56 次冻融循环,并测试每次冻融后花岗岩的超声波波速,结果表明:超声波的传播速度穿过样品时会下降,且下降的趋势与岩性和循环时间有关,最大约为 15%,分析认为冻融后岩石孔隙和微裂隙的增大导致了超声波速度的变化。Sonderglid 等^[8]研究了某地砂岩在冻融循环后一些物理参数的变化情况,结果表明:在 6.9MPa 和 -4~6℃ 的变化范围时,压缩系数、剪切率、电阻系数变化分别为 16%、24% 和 500%。Yavuz^[9]选取安山岩岩样,一定次数的冻融循环后进行测试,结果表明岩样的 P 波速、抗压强度和硬度均出现了下降,而孔隙率和水吸收率则增大,通过这些物理力学特性的变化能反映出安山岩的劣化情况。Fatih^[10]对寒区自然岩石经历冻融循环后的强度损失进行了研究,建立了适合特定石灰石冻融循环后单轴抗压强度的预测方程式。Javier 等^[11]对 102 个碳酸盐岩石试样经历 100 次冻融循环后的超声波波速衰减、强度损失、孔隙度变化等进行了测试和分析,并认为超声波波速衰减是最适合用作冻岩损伤程度评价的参数。

2.1.2 国内冻岩物理力学性质研究现状

国内学者在冻岩物理力学性质研究方面也开展了大量

卓有成效的工作。Liu 等^[12]结合青藏铁路工程背景,对花岗岩和安山岩进行了冻融循环试验和超声波检测。结果表明:两种岩石在经历了多次循环冻融后都出现了微细裂纹;超声波波速与冻融循环周期呈指数下降关系,显示了循环冻融对岩石风化的影响以及循环后岩石物理力学参数变化的趋势。同时发现岩石的冻融过程中可能会出现负的泊松比。吴刚等^[13]对焦作大理岩岩样在饱水和干燥条件下 60 次循环冻融后进行检测,得到了冻融前后大理岩的质量、体积变化、抗压强度、动弹性模量、单轴应力-应变全过程曲线、风化程度系数、抗冻系数、超声波速和声发射参数,分析了循环冻融后岩石的物理力学参数的变化规律。高志刚等^[14]对岩石物理力学特性和隧道冻胀力计算方法进行了研究,提出了几种冻害防治方法:改变岩石物理力学性质、减少孔隙水和提高隧道温度等。徐光苗等^[15]选用湖北页岩和江西红砂岩,分别进行了不同冻结温度(-20~20℃)和不同含水状态(饱和与干燥)的岩石单轴压缩与三轴压缩实验,结果表明,在-20~20℃变化时,页岩和红砂岩的弹性模量、单轴抗压强度都随温度的降低而增大,但温度变化对红砂岩强度的影响大于其对页岩强度的影响,且岩石的含水状态对冻岩强度影响显著。刘成禹等^[16]选用吉林花岗岩,在当地最低温度下进行了 20 次冻融循环,结果表明,冻融循环对花岗岩试样质量影响不显著,而对其强度、泊松比及刚度的影响较大。蒋立浩等^[17]通过室内试验研究了花岗岩在不同温度幅值的循环冻融条件下,单轴抗压强度、峰值变形、应力-应变曲线、弹性模量等随循环次数变化的规律。杨更社等^[18]以陕西某煤矿冻结立井为背景,从现场采集的煤岩和砂岩为代表,进行常温(20℃)和不同冻结温度(-5,-10,-20℃)条件下的岩石三轴压缩试验;分别探讨了围压对冻结岩石三轴强度特性的影响和冻结温度对于冻岩三轴强度特性的影响规律,并对 2 种岩样冻结温度的同一性和差异性进行了比较分析。Tan 等^[19]对花岗岩在-40℃~40℃下冻融次数达 150 次,研究了冻融后试样轴向应变、抗压强度与围压大小和循环次数的变化关系,并对低温和冻融环境下岩石力学特性研究进行了系统的思考^[20]。

2.2 冻岩损伤机理研究

冻岩损伤机理研究是冻岩力学研究中较高层面的部分,是对冻岩损伤破坏模型、破坏过程与原理等规律的总结,也是真正掌握和运用岩石冻融力学解决实际同类问题的关键环节。到目前为止,冻岩损伤的复杂机理还远未被完全掌握。冻岩损伤机理研究内容包括冻融损伤模型与影响因素、微观损伤探测、水热迁移与相变过程、低温多场耦合理论与数值分析等。因冻岩损伤机理研究涵盖内容太多,本文仅对近年国内在冻岩损伤机理的研究现状和损伤检测方面的重要新进展进行简述。

2.2.1 冻岩损伤机理研究现状

通常认为,冻岩损伤的原因是冻岩中的水结冰产生约 9% 的体积膨胀,巨大的体积膨胀力造成冻岩损伤。冻岩损伤的增加会进一步增加冻岩孔隙中的水分含量,从而为冻胀力的发育提供更有利的条件,这种恶性循环会最终导致冻岩的

宏观破坏。

Miller^[21]提出第二冻胀理论:冻结缘带位于冻结锋面和最暖冰透镜之间,造成冻胀的主要原因是冻结缘处水分不断凝成冰。根据第二冻胀理论,O'Neill 等^[22]首先提出了刚冰模型,并分析认为孔隙水和孔隙冰之间应力分布存在一个合适的比例,当有效孔隙应力达到或超过上覆载荷时,新的冰透镜体就会形成。Ishizaki 等^[23]根据刚性冰理论,通过试验进一步解释了水分凝冰的形成过程。

李云鹏等^[24]结合冻结花岗岩单轴压缩力学试验,并以非线性热弹性理论为基础,构建了考虑冰胀效应的冻岩本构方程,探讨和分析了花岗岩单轴抗压强度等物理力学参数与冻融温度的关系。徐光苗等^[25]基于连续介质力学和热力学理论,推导了冻岩的平衡方程、质量及能量守恒方程,研究了冻结冰与岩石的膨胀耦合关系。杨更社等^[26]将冻岩损伤后的 CT 数大小及其分布规律的变化与岩石的损伤变量联系起来,建立了冻岩损伤扩展本构关系。张慧梅等^[27]考虑岩石细观的非均匀性,运用损伤力学理论及应变等价原理建立了冻融受荷损伤扩展本构关系;邓刚等^[28]提出了冻胀压力类似于气体压力的约束冻胀模型。马静嵘等^[29]基于连续介质力学、质量迁移和热传导理论,推导了软岩的水-热-力耦合方程,并运用 ANSYS 软件进行了温度场的数值模拟,对耦合方程进行了验证。

2.2.2 冻融损伤检测新手段的应用

冻岩微观损伤的观测对于建立正确的损伤演化方程和本构模型具有十分重要的意义。冻融岩石微观损伤观察方面,已有的传统方法主要包括超声波探测、压汞法测孔、电子显微镜观察等。近年来,新型无损检测手段被引入,极大地提高了冻融损伤的研究效率。

杨更社等^[30-33]将 CT 扫描技术引入岩石冻融损伤研究,对循环次数、CT 数与岩石强度的关系进行了分析,还通过 CT 技术对冻结温度和速度对冻岩损伤的影响进行了深入研究。陈世杰等^[34]介绍了 CT 扫描技术的特点,系统回顾了冻土研究中 CT 扫描技术的历史和现状,总结了利用 CT 扫描技术进行冻土研究领域中的代表性成果,同时指出了 CT 图像质量受到噪声、射线束硬化、分辨率等多种因素制约的应用问题。

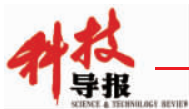
周科平等^[35-37]率先将核磁共振技术和核磁共振成像技术引入冻岩损伤研究,对冻岩损伤程度进行核磁共振测量,分析和讨论了岩石的核磁共振 T_2 谱分布、 T_2 谱面积变化和冻岩内部微孔分布特征;并通过重复无损成像分析,获取冻岩内部损伤的直观变化过程,总结了特定岩石的冻融损伤规律。应用表明,核磁共振技术因其快速无损、直观观测和显示、无放射性危害等优势已经使其成为了冻岩损伤研究的最有效手段之一。

3 展望分析

下文仅结合笔者及其所在团队的研究方向,从冻岩物理力学性质研究方面进行简单展望分析。

3.1 裂隙岩体的冻融力学研究

冻岩问题是从冻土问题研究中逐渐细化分离出来的,岩



和土的最大区别之一就是岩中赋存节理和裂隙,影响冻岩物理力学性质的主要因素是裂隙水(冰)。李宁等^[38]通过在砂岩中预制裂隙来模拟裂隙岩体,对其在干燥、饱水及饱水冻结情况下的低周疲劳损伤特性进行过专门研究。刘泉声等^[39]以水冰相变为切入点,结合断裂力学、弹塑性力学理论,进行数值模拟,分析了冻胀荷载作用下饱和岩体裂隙应力场分布规律与尖端应力强度因子。

实际工程岩体必然是含有缺陷的非均质岩石,但现阶段的冻融力学研究中对节理裂隙发育岩体的关注还远远不够。

3.2 冻岩抗拉强度研究

Winkler^[40]在分析岩石内部水分相变膨胀规律时发现指出,冻结岩石的抗拉强度比抗压强度更应值得关注。而目前的岩石冻融损伤中对于强度损失的研究,抗压强度试验要远多于抗拉强度试验,当然这与抗压强度测试相对方便易行有关。抗压强度测试中存在岩石微裂隙的重新压密过程,而抗拉强度则能更好地反映冻岩内部损伤裂隙的发育情况。由于抗拉强度是岩石强度特征的重要力学指标,具有不可替代性,故应着重加强冻岩的抗拉强度试验研究。

3.3 多因素耦合条件下的冻岩力学研究

以矿业工程岩体为例,冻融损伤往往是在多种复杂环境下发生的,比如,经常受到矿山酸性废水、酸性降雨和除冰盐溶液侵蚀,并且矿山对象岩体大多含有原生或次生裂隙节理,尤其是因爆破等人工开挖产生了新鲜次生裂隙的节理岩体在冻融循环作用下的损伤会更加剧烈。

Hall等^[41-43]在岩石冻融风化的研究方面较为活跃,他曾针对加拿大北部岩石进行研究,并强调指出寒冷地区岩石风化损伤是各种化学和力学机制耦合作用的结果^[44]。张继周等^[45]对3种岩石在2种水化环境下(蒸馏水饱和,饱和并经1%硝酸溶液浸泡侵蚀)分别进行循环冻融实验研究,发现在酸性条件下,岩石冻融强度损伤较纯水化条件下要剧烈得多,因此水化环境的影响不能忽视。

寒区工程中,人们发现使用除冰盐将使混凝土冻害显著加剧,后有大量的学者就除冰盐溶液(质量分数约3%~5%)对混凝土冻融损伤进行了专门研究,同时运用渗透压等冻融破坏理论做了较好的解释,在岩石冻融研究中专门考虑除冰盐溶液影响的论文还很少。

由于工程岩体冻融损伤发生的环境非常复杂,故对于岩石冻融力学研究也应充分考虑岩石裂隙、酸雨环境、盐溶液侵蚀等多因素耦合作用,才能更好地服务寒区工程应用。

4 结论

(1) 世界范围内的岩石冻融力学正处于较快发展阶段,研究成果逐年增加;近12年中国岩石冻融力学领域的Web of Science数据库论文总量居世界第2位。

(2) 国内近44%的岩石冻融力学研究论文集中发表在《岩石力学与工程学报》等6种核心期刊上,学位论文的产出单位也集中在西安科技大学等为数不多的几家科研院所,可见国内该领域的研究总体上还不够活跃,技术报道媒介和研

究力量均显不足。

(3) 2001—2012年间,后6年国内冻岩力学相关论文总数和学位论文总数分别比前6年增长108.8%,236.4%,增幅均很大,表明国内该领域研究发展势头良好,研究潜力巨大。

(4) 2001—2012年间,冻岩物理力学性质这一基础性研究内容仍是现阶段岩石冻融力学的研究热点之一,CT扫描和核磁共振技术是近年被引入的十分有效的微观探测手段。

(5) 裂隙岩体的冻融力学、冻岩抗拉强度损失、多因素耦合条件下的冻岩力学等方面研究还不够深入,是今后岩石冻融力学中值得关注的研究方向。

参考文献 (References)

- [1] 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. Mechanics in Engineering, 2009, 31(6): 9-16.
- [2] 刘泉声, 康永水, 黄兴, 等. 裂隙岩体冻融损伤关键问题及研究状况 [J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 971-978.
Liu Quansheng, Kang Yongshui, Huang Xing, et al. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 971-978.
- [3] 徐光苗, 刘泉声. 岩石冻融破坏机理分析及冻融力学试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3076-3082.
Xu Guangmiao, Liu Quansheng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3076-3082.
- [4] 李慧军. 冻结条件下岩石力学特性的实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2009: 6-8.
Li Huijun. Experimental study on rock mechanical properties under freezing conditions [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009: 6-8.
- [5] 苏伟. 冻融循环对岩石物理力学性质及边坡稳定性影响的研究 [D]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2012: 2-5.
Su Wei. Study on physical and mechanical properties of rocks and slope stability under freeze-thaw cycle [D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2012: 2-5.
- [6] Yamabe T, Neaupane K M. Determination of some thermo mechanical properties of Siahama sandstone under subzero temperature condition [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1029-1034.
- [7] del Roa L M, Lopez F, Esteban F J, et al. Ultrasonic study of alteration processes in granites caused by freezing and thawing [C]. 2005 IEEE Ultrasonics Symposium, 2005, 1: 415-418.
- [8] Sonderegld C H, Rai C S. Velocity and resistivity changes during freeze-thaw cycles in Berea sandstone [J]. Geophysics, 2007, 72(2): 99-105.
- [9] Yavuz H. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering on the physical and mechanical properties of an andesite stone [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(2): 187-192.
- [10] Fatih B. Predicting mechanical strength loss of natural stones after freeze-thaw in cold regions [J]. Cold Regions Science and Technology 2012, 83-84: 98-102.
- [11] Javier M M, David B, Miguel G H, et al. Non-linear decay of building stones during freeze-thaw weathering processes [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 443-454.
- [12] Liu H, Niu F J, Xu Z Y, et al. Acoustic experimental study of two types of rock from the Tibetan Plateau under the condition of freeze-thaw cycles [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2012, 4(1): 21-27.
- [13] 吴刚, 何国梁, 张磊, 等. 大理岩循环冻融试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2930-2938.
Wu Gang, He Guoliang, Zhang Lei, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 2930-2938.

- [14] 高志刚, 李浩霞, 田俊峰. 寒区软岩隧道的冻胀力及冻害防治浅析[J]. 山西建筑, 2008, 34(24): 323-324.
Gao Zhigang, Li Haoxia, Tian Junfeng. Shanxi Architecture, 2008, 34(24): 323-324.
- [15] 徐光苗. 寒区岩体低温、冻融损伤力学特性及多场耦合研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
Xu Guangmiao. Study on mechanical characteristics and multiphysical coupling problems of rock at low temperatures [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [16] 刘成禹, 何满潮, 王树仁, 等. 花岗岩低温冻融损伤特性的实验研究 [J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, 20(1): 37-40.
Liu Chengyu, He Manchao, Wang Shuren, et al. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2005, 20(1): 37-40.
- [17] 蒋立浩, 陈有亮, 刘明亮. 高低温冻融循环条件下花岗岩力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 319-323.
Jiang Lihao, Chen Youliang, Liu Mingliang. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 319-323.
- [18] 杨更社, 奚家米, 李慧军, 等. 三向受力条件下冻结岩石力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 459-464.
Yang Gengshe, Xi Jiami, Li Huijun, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 459-464.
- [19] Tan X J, Chen W Z, Yang J P, et al. Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze-thaw cycles [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 68: 130-138.
- [20] 陈卫忠, 谭贤君, 于洪丹, 等. 低温及冻融环境下岩体热、水、力特性研究进展与思考[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1318-1336.
Chen Weizhong, Tan Xianjun, Yu Hongdan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1318-1336.
- [21] Miller R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. Highway Research Record, 1972, 393 (1): 1-11.
- [22] O'Neill K, Miller R D. Exploration of a rigid ice model of frost heave[J]. Water Resources Research, 1985, 21(3): 281-296.
- [23] Ishizaki T, Nishio N. Experimental study of frost heaving of saturated soils [C]/The 5th International Symposium on Ground Freezing. UK: Balkema, Rotterdam, 1988.
- [24] 李云鹏, 王芝银. 岩石低温单轴压缩力学特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(6): 671-675.
Li Yunpeng, Wang Zhiyin. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(6): 671-675.
- [25] 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): 3709-3713.
Xu Guangmiao, Liu Quansheng, Zhang Xiuli. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3709-3713.
- [26] 杨更社, 蒲毅彬, 马巍. 寒区冻融环境条件下岩石损伤扩展研究探讨 [J]. 实验力学, 2002, 17(2): 220-226.
Yang Gengshe, Pu Yibin, Ma Wei. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(2): 220-226.
- [27] 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 471-476.
- [28] 邓刚, 王建房, 郑金龙. 寒区隧道冻胀压力的约束冻胀模型 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 80-86.
Deng Gang, Wang Jianyu, Zheng Jinlong. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 80-86.
- [29] 马静嵘, 杨更社. 软岩冻融损伤的水-热-力耦合研究初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S1): 4373-4377.
Ma Jingrong, Yang Gengshe. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4373-4377.
- [30] Yang G S, Zhang Q S, Pu Y B. Study on the damage propagation characteristics of rock under the frost and thaw condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 838-842.
- [31] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度影响下岩石细观损伤演化 CT 扫描[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(6): 40-42.
Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 40-42.
- [32] 赖远明, 吴紫汪, 朱元林, 等. 大坂山隧道围岩冻融损伤的 CT 分析 [J]. 冰川冻土, 2000, 22(3): 206-210.
Lai Yuanming, Wu Ziwan, Zhu Yuanlin, et al. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(3): 206-210.
- [33] 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): 4099-4104.
Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Ren Jianxi, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4099-4104.
- [34] 陈世杰, 赵淑萍, 马巍, 等. 利用 CT 扫描技术进行冻土研究的现状和展望[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 193-200.
Chen Shijie, Zhao Shuping, Ma Wei, et al. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 193-200.
- [35] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 731-737.
Zhou Keping, Li Jielin, Xu Yujuan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 731-737.
- [36] 李杰林. 基于核磁共振技术的寒区岩石冻融损伤机理试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 43-120.
Li Jielin. Experiment study on deterioration mechanism of rock under conditions of freezing-thawing cycles in cold regions based on NMR technology[D]. Changsha: Central South University, 2012: 43-120.
- [37] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 基于核磁共振技术的岩石孔隙结构特征测定[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(12): 4796-4800.
Zhou Keping, Li Jielin, Xu Yujuan, et al. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2012, 43(12): 4796-4800.
- [38] 李宁, 张平, 程国栋. 冻结裂隙砂岩低周循环动力特性试验研究[J]. 自然科学进展, 2001, 11(11): 1175-1180.
Li Ning, Zhang Ping, Cheng Guodong. Progress in Natural Science, 2001, 11(11): 1175-1180.
- [39] 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): 217-223.
Liu Quansheng, Kang Yongshui, Liu Xiaoyan. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 217-223.
- [40] Winkler E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations[J]. Engineering Geology, 1968, 2(5): 315-323.
- [41] Hall K. Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada: II. The temperature at which water freezes in rock [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32: 242-259.
- [42] Hall K. A laboratory simulation of rock breakdown due to freeze-thaw in a maritime Antarctic environment [J]. Earth Surface Processes and Landforms 1988, 13(4): 369-382.
- [43] Hall K, Andre M F. Rock thermal data at the grain scale: applicability to granular disintegration in cold environments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(8): 823-836.
- [44] Hall K. Evidence for freeze-thaw events and their implications for rock weathering in northern Canada [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(1): 43-57.
- [45] 张继周, 缪林昌, 杨振峰. 冻融条件下岩石损伤劣化机制和力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1688-1694.
Zhang Jizhou, Miao Linchang, Yang Zhenfeng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1688-1694.

(责任编辑 吴晓丽)