

岩体开挖损伤区的表征及热-流-力耦合模型： 研究现状及展望^{*}

朱万成^{1**} 魏晨慧¹ 唐春安² 杨天鸿¹ 李连崇²

1 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110004; 2 大连理工大学岩石破裂与失稳研究中心 大连 116024

摘要 地下岩体工程的开挖必然在巷道周边形成了开挖损伤区, 认清开挖损伤区的物理力学性质及其时空演化规律, 对于工程稳定性和安全性评价及支护参数优化是至关重要的. 针对能源深部战略储备和核废料深部地下处置等工程问题, 近年来岩体开挖损伤区表征及其热-流-力 (THM) 耦合模型方面取得了较大的进展. 文中对岩体开挖损伤区的表征方法及岩体多场耦合模型的研究现状进行了综述和归纳, 对其中的一些关键和热点问题进行了分析, 并对今后需要开展的研究工作提出了一些看法.

关键词 岩体 开挖损伤区 热-流-力 (THM) 耦合 数值模拟

在岩体工程中普遍存在着开挖岩体和保护围岩稳定这一相互矛盾而且必须解决的问题. 无论是采用钻爆法还是全断面法进行开挖, 都必然对保留岩体造成损伤和破坏, 使围岩的物理力学性能发生扰动, 形成所谓的开挖扰动区 (excavation disturbed zone) 或开挖损伤区 (excavation damaged zone). 我国学者也提出了围岩松动圈的概念^[1], 用于表示松动破碎范围. 损伤区内围岩的力学特性及渗流特性都将发生变化, 即便是在廓线上的爆破采用预裂或光面爆破技术, 围岩的损伤也在所难免^[1-7]. 针对不同的岩石种类, 在其中开挖时的损伤区的特征也有所差异, 但其共同特征体现在损伤对于岩体承载能力、渗流特性、热传导系数和扩散系数等的改变^[8-11]. 例如深部致密的花岗岩, 开挖损伤区渗透系数的增加可达 10^4 倍^[12], 渗透性的增加也是岩体发生损伤的重要宏观体现. 当温度和渗流作用都不可忽略时, 开挖损伤区中岩石处于温度场、渗流场、应力场的耦合作用之下. 这种耦合表现在: 岩

体的变形会不可避免地引起岩体孔隙率、渗透率、热传导系数和热容等的变化, 同时也带来固体内能的变化; 渗流场的存在不仅体现在由于水压力引起了有效应力的降低, 而且也同时通过引起热对流来影响温度场; 温度场通过产生温度应力来影响应力场, 并通过改变流体粘度等参数而影响渗流场. 目前, 普通意义上的三场 (温度、渗流场和应力场, 简称为 THM) 耦合问题一般不探讨岩体的损伤及其演化过程. 但实际上, 岩体的损伤直接造成岩体结构的改变, 对于其力学性质、渗流和热学特性都产生显著的影响. 因此, 开挖损伤区的形成及后续的时空演化过程必然是一个温度场、渗流场、应力场和损伤场耦合作用的过程.

由于地下工程的开挖, 原有含水裂隙岩体所处地下水渗流场、温度场与地应力场的动态平衡体系被破坏. 但在一定的时间和空间范围内, 通过质量和能量的交换, 整个体系会重新达到三场之间新的动态平衡^[8, 13]. 开挖完成后, 临近巷道的开挖或地

2008-01-17 收稿, 2008-03-10 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 50504005, 50674025)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB209405)、教育部科技研究重点项目 (批准号: 108038)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-06-0291, NCET-05-0290) 和中澳科技合作特别基金 (批准号: 50711120188) 资助项目

^{**} E-mail: zhuwancheng@mail.neu.edu.cn

震等外部扰动、温度的升高(核废料衰变产生的热)以及孔隙水压力的变化都会使多物理场之间的平衡被打破,围岩发生进一步的损伤,从而使开挖损伤区进一步演化。为了工程长期稳定性和安全性的需要,我们必须对开挖损伤区的多物理场耦合效应进行预测分析,并揭示其中蕴涵的交叉耦合机制。

开挖损伤区范围及其损伤程度的估算以及损伤区围岩物理力学特性的研究,对于岩体工程稳定性设计是至关重要的^[1,4]。开挖损伤区的范围直接决定锚杆的长度及布置方式。在我国现行的《工程岩体分级标准》(GB50218—94)中也强调:对于矿山采掘工程的围岩进行工程定级时应该考虑爆破开挖对围岩稳定性的影响。大量工程实践证明,根据开挖损伤区厚度值进行支护设计比传统的工程类比法设计更具有显著的技术经济与社会效益。随着浅部资源的减少和枯竭,越来越多的矿山转入深部开采。随着开采深度的增加,一系列工程灾害日益严重。同时,深部与浅部的区别在于“三高”(高应力、高温度和高水压)环境及极强的时间效应^[14],深部巷道围岩表现出分区破裂机制^[15]。深部岩体处于“三高—扰动”(高应力、高温、高水压和开采或开挖扰动)的恶劣环境^[16],深部巷道与采场维护理论也与浅部有明显的区别。因此,深部采矿的核心主题是研究深部岩体在“三高”环境下由于采矿(开挖)扰动所表现出的特殊行为。由此可见,开挖损伤区及其多物理场耦合效应是深部采矿所需要解决的核心问题。

在能源深部战略储备和核废料深部地下处置等方面,认清开挖损伤区的弹性模量、渗透系数、热传导系数和溶质扩散系数等参数与开挖过程的相互关系及其时空演化规律,对于评价工程稳定性和安全性是非常重要的。随着我国能源需求的增长和核电站数量的增加,预计到2010年这些核废物的积存量将达到1000 t。中国的最终高放废物处置场要在2050年左右投入运行,几乎与西方各工业国同步^[17]。因此,开挖损伤区是国际学术界共同关心的热点问题。结合我国国情,开展核废物处置库开挖损伤区的物理力学特性及其多物理场耦合效应的研究将变得更为重要和紧迫。此外,在深部防护工程建设、深部能源开发和战略储备、南水北调工程和西部水电开发等诸多方面,深部地下空间的开发都

将涉及与开挖损伤区相关的科学问题。因此,提出合理而有效的开挖损伤区表征模型,并预测开挖损伤区温度场、渗流场和应力场的时空响应,具有重要的理论意义与工程应用前景。

1 开挖损伤区的研究现状

开挖损伤区的理论研究远远滞后于工程实践。目前,开挖损伤区的研究主要依赖于现场测试提出经验公式。开挖损伤区的范围及损伤程度取决于岩体结构、原岩地应力和开挖方法。对于工程应用而言,了解开挖损伤区的物理力学特征是进行其多物理场耦合效应时空预测的基础。鉴于此,本节从开挖损伤区的研究方法现状、基于微震(或声发射)信息的开挖损伤区表征方法、开挖损伤区的多物理场耦合模型等几个方面对研究现状进行评述,并提炼出该领域急需解决的科学问题。

1.1 开挖损伤区的现场测试

由于岩体本身的非均匀、各向异性和所处地质环境(包括地应力条件及温度和渗流场的分布等)的复杂性,从理论上给出开挖损伤区的范围是很困难的。在地下洞室开挖损伤区预测的计算中,较难解决问题是岩体非均匀物理力学参数(例如弹性模量和渗透系数等)的确定。

为了全面认识开挖损伤区的各种物理力学参数,开展单一的测试是无法实现该目标的。因此,工程中必须开展尽可能多种方式的多个参数的测试,才能对开挖损伤区有较为全面的认识。目前开挖损伤区范围的确定几乎全部靠现场实测,而且已经形成了多种较为成熟的监测技术。常用的测试方法主要有声波法、微震监测法、多点位移计法、地质雷达法、地震波法、电阻率法、渗透法、钻孔光学电镜法和放射性元素法等^[18-21]。为了解损伤区的长期发展规律,势必需要开展长期不间断的实地监测,由于现场环境比较艰苦,这无疑是一项耗时和耗钱的繁琐工作。与声波探测方法相比,由于传感器安装完毕后,人不用逗留在测试现场,借助光纤数据传输和数据的计算机自动存储,声发射或微震监测方法可以实现24小时不间断的实时量测。基于现场测试和松动圈支护理论的围岩稳定性分类表和支护设计方法在煤矿得到了大量应用,取得了

良好的经济和技术效果^[1]。

针对核废物处理这一国际上共同关注的热点问题,从1992年起,由瑞典、美国、加拿大、芬兰、日本、瑞士等9个国家的15个科研机构联合开展了国际合作研究项目 DECOVALEX (Development of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation)^[22-25]。中国科学院武汉岩土力学研究所于2003年加入了国际 DECOVALEX 计划第四阶段的合作研究^[17]。该项目以建立地质介质中热-水-力-化学(thermal, hydrological, mechanical, chemical, THMC)全耦合过程数学模型及其基于试验的验证为目标。DECOVALEX 已对岩体的热-水-力耦合模型进行了一系列的案例标定试验(test cases, TC)及基准试验(bench mark tests, BMT),以用于验证数值模型的可靠性^[22-27]。许多西方国家都建立了地下岩石工程实验室,并用微震监测等多种测试手段研究围岩的开挖损伤区。例如,早在1982年,加拿大核能研究公司(AECL)的地下研究实验室(underground research laboratory, URL)^[28-32]就开展了开挖损伤区研究。研究者们使用了16通道的微震监测系统来监测试验巷道的开挖损伤区。开挖前,他们把频率响应为50 Hz—10 kHz的传感器固定在巷道轮廓线周围的钻孔中,在巷道开挖中和开挖后,利用计算机可以实时记录巷道周边的微震信息。微震监测的数据研究表明,微震事件的密度与损伤区域具有较好的对应的关系;相对于应力重新分布的作用而言,开挖方法(机械开挖或钻爆开挖)所引起的损伤区是有限的,越是处于深部的巷道,应力重分布对于开挖损伤区的作用越显著。Pettitt等^[33]在瑞典的Aspo Hard Rock Laboratory(简称为HRL)开展了开挖损伤区的声发射和微震活动规律研究,很好的揭示了开挖和应力重分布诱致的开挖损伤区形成机制。其他的国家也建立了类似的地下岩石力学实验室,用于研究核废物处置场的多物理场耦合问题,这包括美国内华达州的Yucca Mountain地下实验室^[34-36]、瑞士的Mont Terri Rock Laboratory^[37]和日本在Kamaishi Mine的Underground Experimental Site^[38,39]等。近来,美国自然科学基金会又资助1500万美元用于建立一个更深部的地下科学研究实验室(Deep Underground Science and Engineering

Laboratory-DUSEL),用于深部资源勘探、核废料储存等问题,其中岩体开挖损伤区是一个主要的研究主题。

1.2 基于声发射 微震的损伤区表征方法

在外载荷作用下,裂纹从萌生、稳定扩展到最后的失稳扩展,是一个过程。对于岩石(或岩体)来说,要研究其受力后的变形和破坏过程,不但要研究已存在裂纹的扩展,而且必须研究新裂纹的萌生、扩展及裂纹间的贯通过程。损伤力学可在连续介质力学和热力学的基础上,用固体力学方法研究材料宏观力学性能的演化直至破坏全过程。借助于损伤力学研究岩体的断裂过程是一种有效的途径。但是,如何对损伤进行量化往往是损伤力学应用于工程实践时所面临的共同问题。

材料在外界应力作用下会引起微裂隙的产生与扩展,微裂隙的产生与扩展伴随有弹性波或应力波的传播,其后果就是产生声发射(acoustic emission, AE)。对于工程尺度的岩体,这种波在地质上也称为微地震(microseismic, MS),它在周围岩体中快速释放和传播^[39]。自20世纪50年代Kaiser效应被发现以来,声发射与微震被广泛应用于无损检测、油气勘探、地热开发、核废料储存、矿业灾害预测等领域,声发射技术已经成为人们研究岩石损伤与断裂的一种重要手段^[40-50]。

Lockner^[40]提出了微破裂(损伤)与声发射一致性的重要看法,并认为,虽然检测到的声发射数量不到岩石样本中实际微破裂数目的1%,但声发射信号还是给出了丰富的信息,包含了微破裂的位置、模式、震级(强弱)和能量释放率等重要信息。声发射与材料内部的初始损伤和损伤演化有直接的对应关系,新的损伤的产生一定伴随着声发射的发生,故唐春安等提出了“声发射率与岩石的损伤变量具有一致性”的学术观点^[41,42]。

岩石的损伤不仅与其内部的节理裂隙分布(可认为是初始损伤)有关,而且更为重要的是与受载后的损伤演化过程直接相关。在载荷水平较低时,开挖损伤区岩石的损伤多取决于初始的节理裂隙分布状态,而随着载荷水平的提高,应力重分布所引起的损伤占有主要优势。岩石的声发射(微震)活动性反映了岩石内部的损伤演化状况,声发射事件发

生的位置是岩体发生损伤和变形局部化的区域,而且损伤的程度与该位置声发射的能量释放率有着必然的联系.利用高精度的声发射监测技术,借助于小波分析方法开展时域波形的去噪、重构和能量谱密度分析,人们可以在时间和空间上以较高的分辨率对围岩开挖损伤区进行有效地评价和监测^[28, 29, 51-53].这些研究成果为我们对围岩损伤进行定性到定量的表征创造了条件.

姜福兴等^[53-55]通过分析微震发生的四类力学机理,给出了各种机理所对应的微震信号的能级和密度,并基于此试验结果证明微震技术可以有效地确定断裂带与垮落带的区域,认为微震技术是进行煤矿地质灾害监测和预报的有效手段.张银平和刘国清^[56, 57]也进行了微震监测用于矿山动力灾害分析预报的研究.徐东强等^[58]认为岩石声发射积累频次与损伤参量具有线性关系.朱传云和喻胜春^[59]建立了声波的波降率和岩体弹性模量损失系数(损伤变量)之间的关系.Ohtsu和Watanabe^[60]统计了混凝土单轴压缩试样破裂过程中声发射累计次数与加载水平之间的关系,提出了声发射的率过程分析(rate process analysis)方法,并建立了声发射累计次数与损伤之间的定量表达式.Shigeishi和Ohtsu^[61]也使用了声发射瞬时张量(AE moment tensor)分析方法,基于声发射信号来预测混凝土试样中裂纹的位置、方位、类型和扩展方向.Landis^[62]提出了量化声发射(quantitative acoustic emission)的概念,通过对声发射瞬时张量(AE moment tensor)进行分析,获得了混凝土试样中的微裂纹的位置、裂纹扩展方向和裂纹的类型等信息.蔡明等^[63]利用微震(microseismic)信息与损伤变量之间的定量关系,提出了基于岩体微震信息的损伤模型.Eberhardt等^[64]和Diederichs等^[65]基于室内岩石试样声发射时间序列确定了裂纹萌生的阈值(crack initiation threshold)和裂纹相互作用及岩石初始屈服的阈值(crack interaction and initial yield threshold),并证实了这两者所对应的应力水平正是现场岩体的强度的下限和上限.由此可见,基于微震(或声发射)信息不仅可以确定岩石的损伤变量,而且有利于推断岩体强度.作者也使用Hyperion HNSI型声发射仪开展了岩石和混凝土损伤的声发射试验,并在声发射数据的分析方面开展了初步的研究工作^[66-68].

基于现场监测手段,对开挖损伤区,尤其是硬岩的开挖损伤区的岩体物理力学参数进行数值表征,并建立损伤状态下岩体的多物理场耦合模型,是预测开挖损伤区多物理场时空演化规律的基础.开挖损伤区的非均匀性和各向异性对于渗流、热传导和溶质运移过程起重要的控制作用,所以开挖损伤区岩体的多物理场耦合效应也必然受控于岩体的各向异性和非均匀性.由于现场岩体结构及地质环境的复杂性,针对开挖损伤区的形成机理及损伤区的多物理场耦合效应研究方面,目前仍然缺乏损伤机理层面上的数值表征模型和表征方法.

由此可见,鉴于微震(或声发射)事件率与损伤变量之间的一致性关系,基于微震(或声发射)监测数据进行开挖损伤区的定量化数值表征是一种切实可行的手段.但是,由于岩体结构的非均匀性,如何从微震(或声发射)信息中提取准确的损伤信息,还有待于进一步研究.此外,伴随着多物理场环境的变化,开挖损伤区是不断发展的.因此,开挖损伤区的长期监测在现场操作起来是比较困难.因此,多物理场环境下开挖损伤区的长期监测依然需要深入探讨.

1.3 损伤过程中的多物理场(THM)耦合模型

实践证明,许多现场测试结果进行的正确解释也必须依赖于对开挖损伤区物理力学性质的充分认识.例如,对于压水渗透性试验来说,渗透系数(水力传导系数)的计算公式是基于岩体的均匀性假设而给出的,由于节理岩体的非均匀性和各向异性以及巷道周边应力分布的非均匀性,渗透性也必然表现出非均匀性和各向异性^[20].同时,压水试验的渗透系数的测试结果表现出较强的尺寸效应,小尺寸范围内测得的渗透系数可能受控于局部的节理面,测试数据较为离散,故渗透系数的数值随着测试尺寸的增加而增大^[21].而且压水试验测得渗透系数一般比室内试验渗透系数大两个数量级左右.此外,要对核废物处置库在未来万年内的多物理场性能进行预测,在工程的设计阶段,不可能进行长期的现场试验,只能靠岩体损伤区数值表征的基础上进行数值模拟才能预测开挖损伤区的时空演化规律.因此,对开挖损伤区进行有效的数值表征不仅有利于对现场测试结果的解释,更重要的是为认识

开挖损伤区多物理场参数的长期发展规律创造了条件。

损伤力学是在连续介质力学和热力学的基础上,用固体力学方法,研究材料宏观力学性能的演化直至破坏全过程。损伤力学的研究方法主要有两大类:其一是宏观的及唯象学的方法,即宏观损伤力学(即通常所说的连续介质损伤力学(continuum damage mechanics, CDM)方法和微观(细观)方法。宏观方法的共同特点是引入损伤变量作为本构关系中的内变量。微观(细观)方法则是根据材料的微观(或细观)成分(如基体、颗粒、空洞)单独的力学行为以及它们的相互作用来建立宏观的考虑损伤的本构关系,进而给出损伤力学的完整的问题提法。目前,CDM理论基本上都用张量形式的损伤变量表述,损伤本构模型中损伤变量的阶次不具任意性,最高为八阶,另外还可以是四阶、二阶或零阶。例如:Lemaitre^[69]采用的损伤变量与有效应力相联系;村上澄男^[70]等从微裂纹的尺度和分布方面研究了微裂纹对于材料性能的影响。损伤力学在岩石类材料中得到了广泛的应用。例如,文献[71—73]对损伤力学在岩石力学中的应用予以了详细的综述。从理论上讲,损伤张量阶次的增加可以更多地考虑损伤的影响因素,损伤分析自然也就越来越细。但是,建立损伤力学模型的关键在于如何对介质中业已存在的非均匀性结构特征进行合理的描述。对于具有复杂结构的岩体则更是如此。因此,在损伤力学应用于节理岩体研究时,其研究的核心问题不是如何从理论上提出精细的、在力学上是何等严密的、高阶的损伤变量的张量表达式,而是如何对岩体中的节理分布进行合理而有效的数学表达。因此,在节理岩体的损伤力学研究中,大部分学者仍然采用标量的损伤变量,而研究的重点是如何充分考虑岩体结构的物理特征。例如节理的非贯通性以及胶结、充填特性等。基于这一思路,作者在以往的研究岩石的损伤与破裂过程时,在考虑岩体的非均匀性的基础上,采用简单的弹性各向同性损伤模型,通过有限元编程研发了岩石破裂过程分析系统RFPA(rock failure process analysis),用该程序对岩体、混凝土等非均匀性材料的变形、损伤与破裂过程进行了模拟,再现了试验中观测到的许多现象,并对岩层移动、岩爆、煤与瓦斯突出等岩体工

程问题进行了研究^[74—79]。

岩体在外界高温、流体渗流和外部载荷作用下,将出现损伤,并逐步发展成为微裂纹;损伤与裂纹的存在不可避免地影响到渗透性、孔隙率、超声波速等岩体特性参数。岩体的损伤对热传导、地下水渗流和变形起着重要的控制作用;在涉及温度、渗流及应力耦合作用的岩石工程问题中,岩体介质的损伤贯穿于工程开挖及构建之后的整个过程之中;这一过程是岩体损伤演化和多物理场(THM)环境演化之间的一个协同作用过程。

1.3.1 损伤对于 TM 过程的影响 针对高温下岩石(体)产生热开裂的现象,人们开展了大量的试验研究,认清了在高温下岩石的基本力学性质的变化规律,并提出了热损伤的概念和热损伤演化关系。例如,许多学者^[80—85]研究了温度作用下岩石的基本力学性质(包括杨氏模量、poisson比、抗压强度、抗拉强度和断裂韧性等)及岩石的微破裂过程,认清了岩石的基本力学性质随温度的变化规律和岩石的热破坏机理。Wang和陈颢等^[86,87]把声发射技术用于岩石热开裂过程中的监测,这为认识岩石热损伤创造了条件。损伤力学理论的引入使得热损伤成为岩石损伤力学研究中的重要分支。谭启等^[88]对岩石热开裂的新进展进行了评述,人们普遍认识到了热损伤与岩石的物理力学参数(孔隙率、弹性模量、渗透系数、弹性波速等)具有较好的关联性^[89,90]。基于损伤力学原理,一些学者导出了热损伤演化方程和TM耦合弹脆性损伤本构方程^[91—94]。从温度变化引起的损伤本质来看,变温引起的内应力和应变是导致损伤的机制之一。温度变化导致的弹性模量、密度和渗透率的变化就是这种损伤的一种间接体现^[94]。基于这一认识,作者所在的课题组基于试验结果建立了损伤与热传导系数之间的定量关系表达式,提出了岩石高温开裂损伤的本构关系,并利用RFPA程序开展了岩石热开裂过程的数值模拟^[95]。

1.3.2 损伤对于 HM 过程的影响 岩体水力学是研究HM耦合过程的交叉学科^[96]。近年来对岩体水力学的研究,已逐渐成为岩土工程基础理论的重要组成部分之一。许多学者进行了岩石变形与损伤及破裂过程中渗透率演化规律的试验研究^[97—105]。

结果表明,不同的岩石或者相同类型但不同孔隙率的岩石,其损伤过程中渗透率的演化规律表现出很大的差异,但是,渗透性增加的直接原因是岩石的侧向膨胀(dilatancy)变形^[106]. Schulze 等^[100]给出了盐岩发生膨胀并产生膨胀裂纹的必要条件,认为岩石材料的破裂导致损伤和其渗透性具有一致性,并据此建立了裂纹扩展、体积膨胀和渗透率的关系.人们通过开展岩石变形、损伤及破裂过程中的声发射测试,获得了岩石损伤破裂的全过程曲线及其伴随的渗透性和声发射事件数的分布情况,并进一步证实了声发射事件率与岩石损伤及渗透性演化之间的一致性^[100, 101, 107].因此,目前的室内实验研究已经比较全面地揭示了不同岩性应力、损伤和渗透率的关系.虽然针对不同地区岩石的测试较为离散,但这为我们建立开挖损伤区应力场、损伤场和渗流场之间的耦合关系奠定了基础.

基于岩石变形、损伤和渗流的耦合作用机理,一些学者在 FLAC, UDEC 等商业程序或者基于弹塑性力学、断裂力学和损伤力学理论的数值模型中引入介质断裂、损伤判断准则,嵌入描述介质破坏膨胀区的渗透性-损伤演化方程^[107-115].许多学者建立了裂隙岩体渗流场与损伤场耦合分析模型,并成功应用于 TH 耦合诱发岩体破坏过程的数值模拟^[113, 116-119].归纳起来,这些模型可以分为等效连续介质模型、双重介质模型和裂隙网络模型^[120, 121].作者所在的课题组以损伤力学、经典渗流力学基本理论为基础,引入弹性损伤本构关系,基于损伤变量和渗透系数、孔隙水压力关系方程,建立描述岩石渗流-损伤耦合模型^[122, 123].基于耦合模型开发的岩石破裂过程渗流-应力耦合分析程序能够模拟岩石变形、损伤和失稳破裂全过程中损伤变量、渗透性和声发射事件的演化规律^[124-126].

1.3.3 THM 三场耦合模型 THM 三场耦合过程的研究开始于 20 世纪 80 年代国外学者^[127-129]基于 Biot 固结理论提出的温度-水压-应力耦合作用 (THM) 的力学模型.90 年代,尤其是由 1992 年开始的 DECOVALEX 国际合作项目,基于质量、能量和动量守恒原理建立了 THM 的耦合数值模型,进而极大地推动了 THM 三场耦合过程的研究^[22-25, 130].针对冻土特性、深部核废物贮存、地

热开发、煤层气和油气开发等问题,国内学者在 THM 耦合模型方面也进行了大量的研究工作^[131-142],并且探讨了岩石应力-化学耦合效应^[17, 143].针对 THMC 耦合问题,作者亦开展了溶质运移和渗流过程耦合过程的 X 光 CT 扫描实验^[144],提出了弹性状态下的 THM 耦合模型,已用于研究地下瓦斯运移和煤地下气化等相关工程问题^[145].

在 DECOVALEX II 的 Task 2C 的研究中,4 个研究机构基于已有的岩石物理力学基本数据,利用各自的有限元程序独立开展了 Kamaishi Mine 的 THM 耦合试验的预测,较好地预测了温度场,合理地预测了渗流场,但是没有正确预测出变形场.其主要原因是未能够对围岩损伤区的物理力学性质(主要是节理的空间分布)有足够认识,数值模型中只是假设岩体为均匀或者含有个别断层,没有考虑围岩损伤区的影响^[24, 25].实际上,渗流场中流体的运移及热对流对较小范围内的岩体损伤及裂纹扩展非常敏感,受到温度场和渗流场的影响,开挖损伤区必然会有一个时空演化过程,而该过程也必然对温度场、渗流场和应力场产生不可忽视的影响.通过 DECOVALEX 的研究,学者们也认识到流体运移和热对流过程对局部岩体损伤和裂纹扩展十分敏感,并认为不考虑岩体开挖损伤和裂纹扩展作用的 THM 耦合数值模型是不切合实际的.

通过对 Yucca Mountain 核废料处置平巷(emplacment drift)的数值模拟, Rutqvist 和 Tsang^[129]发现,把位于开挖损伤区以外的远场区域简化为弹性均匀介质是可取的,但对于开挖损伤区,必须要提出有效的表征模型,以探讨损伤对于其中渗透系数、热传导系数等的影响.因此,DECOVALEX IV(第四期)的课题中,开挖损伤区的研究已被列为重点研究任务之一. Tsang 等^[8]对目前 4 种岩石(结晶类岩石、岩盐、硬化粘土和塑性粘土)中开挖损伤区研究的现状和存在的问题进行了综述,认为开挖造成的应力重新分布是引起岩体开挖损伤区的主要原因.因此,忽略开挖和支护方法,首先开展应力重新分布引起的开挖损伤区特征及其中的多物理场耦合效应是该领域研究的当务之急.

到目前为止,由于岩体所处地质环境的复杂性和诸多因素的不确定性,THM 耦合模型也存在不

足,这主要表现在:岩体普遍都被假设为弹性或者弹塑性介质,虽然也考虑了单个或者裂隙网络的存在对于耦合效应的影响,但普遍没有考虑到开挖损伤区内岩体的各向异性及非均匀性,更未能考虑新裂纹的萌生、扩展和贯通过程及其带来的耦合效应。也就是说,目前的THM耦合模型未能考虑损伤及其演化过程对于耦合过程的影响,是难以实现开挖损伤区多物理场耦合效应分析的。

2 结语与展望

本文对开挖损伤区的定量表征及其热-流-力(THM)耦合模型的研究现状进行综述,探讨现有损伤区表征方法及多物理场耦合模型存在的问题,并提出了以微震(或声发射)监测数据为基础的开挖损伤区表征方法和用损伤过程中THM耦合模型进行开挖损伤区时空演化特征进行预测的基本思路。

由于微震(或声发射)监测数据为我们刻画开挖损伤区内岩体的损伤变量提供了一个有效途径,因此,从微震(或者声发射)的监测数据出发,开展开挖损伤区岩体的数值表征是一个可行思路。从该途径出发寻求开挖损伤区的数值表征,并开展开挖损伤区多物理场耦合效应的时空预测分析,仍有如下科学问题有待于进一步研究:

(1) 非均匀和各向异性岩体结构的定量测试方法;基于微震/声发射数据的岩体损伤表征方法和等效重构的数学模型;

(2) 微震(或声发射)信号的时频特征及空间分布与岩体细观裂纹分布及损伤之间的定量关系;多物理场环境下开挖损伤区的长期监测方法;

(3) 开挖损伤区岩体的损伤演化过程对于各物理场参数(例如弹性模量、强度、孔隙率、渗透率、热传导系数等)及其对THM耦合效应的影响规律;

(4) 热(T)、水(H)、力(M)和损伤(D)场之间的交叉耦合效应的实验研究、理论模型及数值分析方法。

参 考 文 献

- 1 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术. 北京: 煤炭工业出版社, 2001
- 2 钮强. 岩石爆破机理. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990

- 3 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 80—85
- 4 杨小林, 员小有, 吴忠, 等. 爆破损伤岩石力学特性的试验研究. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 436—439
- 5 吉小明. 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1697—1702
- 6 盛谦. 深挖岩质边坡开挖扰动区与工程岩体力学性状研究. 中国科学院武汉岩土力学研究所博士学位论文, 2002
- 7 董学晟, 周火明. 三峡永久船闸高边坡开挖扰动区工程岩体力学性状研究. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2003
- 8 Tsang CF, Bernier F, Davies C. Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays in the context of radioactive waste disposal. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42: 109—125
- 9 Bossart P, Meier PM, Moeri A, et al. Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. Engineering Geology, 2002, 66: 19—38
- 10 Hou Z. Mechanical and hydraulic behavior of rock salt in the excavation disturbed zone around underground facilities. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40: 725—738
- 11 Souley M, Homand F, Pepa S, et al. Damage-induced permeability changes in granite: A case example at the URL in Canada. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38: 297—310
- 12 Pusch R, Stanfors R. The zone of disturbance around blasted tunnels at depth. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, 1992, 29(5): 447—456
- 13 黄涛, 杨立中. 渗流-应力-温度耦合下裂隙围岩隧道涌水量的预测. 西南交通大学学报, 1999, 34(5): 554—559
- 14 周宏伟, 谢和平, 左建军. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展. 力学进展, 2005, 35(1): 91—99
- 15 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 448—455
- 16 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803—2813
- 17 周辉, 冯夏庭. 岩石应力-水力-化学耦合过程研究进展. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(4): 855—864
- 18 贾颖绚, 宋宏伟. 巷道围岩松动圈测试技术与探讨. 西部探矿工程, 2004, 101(10): 148—150
- 19 Autio J, Siitari-Kauppi M, Timonen J, et al. Determination of the porosity, permeability and diffusivity of rock in the excavation-disturbed zone around full-scale deposition holes using the C-PMMA and He gas methods. Journal of Contaminant Hydrology, 1998, 35: 19—29

- 20 Kelsall PC, Case JB, Chabannes CR. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, 1984, 21(3): 123—135
- 21 孙蓉琳, 梁杏, 靳孟贵. 基于野外水力试验的玄武岩渗透性及尺度效应. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1490—1494
- 22 Jing L, Tsang CF, Stephansson O. DECOVALEX—An international cooperative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, 1995, 32(5): 389—398
- 23 Tsang CF, Jing L, Stephansson O, et al. The DECOVALEX III project: A summary of activities and lessons learned. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2005, 42: 593—610
- 24 Rutqvist J, Borgesson L, Chijimatsu M, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine—comparison of field results to predictions of four finite element codes. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38: 129—142
- 25 Rutqvist J, Borgesson L, Chijimatsu M, et al. Thermo-hydro-mechanics of partially saturated geological media: Governing equations and formulation of four finite element models. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, 38: 105—127
- 26 Rutqvist J, Tsang CF. Analysis of thermal-hydrologic-mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca Mountain. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62—63: 637—652
- 27 Chan T, Khair K, Jing L, et al. International comparison coupled of thermo-hydro-mechanical models of multiple-fracture benchmark problem: DECOVALEX phase 1, benchmark test 2. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts*, 1995, 32(5): 435—452
- 28 Young RP, Martin CD. Potential role of acoustic emission / microseismicity investigations in the site characterization and performance monitoring of nuclear waste repositories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 1993, 30(7): 797—803
- 29 Falls SD, Young RP. Acoustic emission and ultrasonic velocity methods used to characterize the excavation disturbance associated with deep tunnels in hard rock. *Tectonophysics*, 1998, 289: 1—15
- 30 Thompson PM, Martino JB, Spinney MH. Detailed measurements of deformation in the excavation disturbed zone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 1993, 30(7): 1511—1514
- 31 Read RS. 20 years of excavation response studies at AECLS Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41: 1251—1275
- 32 Martino JB, Chandler NA. Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41: 1413—1426
- 33 Pettitt WS, Baker C, Young RP, et al. The assessment of damage around critical engineering structures using induced seismicity and ultrasonic techniques. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159(1—3): 179—195
- 34 Hinds JJ, Bodvarsson GS, Nieder-Westermann GH. Conceptual evaluation of the potential role of fractures in unsaturated processes at Yucca Mountain. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62—63: 111—132
- 35 Rutqvist J, Tsang CF. Analysis of thermal-hydrologic-mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca Mountain. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62—63: 637—652
- 36 Li GM, Tsang CF. Seepage into drifts with mechanical degradation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62—63: 157—172
- 37 Bossart P, Meier PM, Moeri A, et al. Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. *Engineering Geology*, 2002, 66: 19—38
- 38 Chijimatsu M, Fujita T, Sugita Y, et al. Field experiment results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(1): 67—78
- 39 Nguyen TS, Borgesson L, Chijimatsu M, et al. Hydro-mechanical response of a fractured granitic rock mass to excavation of a test pit—the Kamaishi Mine experiment in Japan. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(1): 79—84
- 40 Lockner D. The role of acoustic-emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 883—899
- 41 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变. 北京: 煤炭工业出版社, 1993
- 42 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2493—2501
- 43 樊运晓. 单轴压缩实验下裂纹闭合阶段岩石 KAISER 效应的研究. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(6): 793—796
- 44 陈忠辉, 唐春安, 徐小荷. 岩石声发射 KAISER 效应的理论和实验研究. *中国有色金属学报*, 1997, 7(1): 9—12
- 45 陈枫, 孙宗顺, 徐纪成. 岩石压剪断裂过程中的超声波波谱特性研究. *工程地质学报*, 2000, 8(2): 164—168
- 46 吴刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特

- 性. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82—85
- 47 陈文化, 景立平, 徐兵. 岩石声发射监测技术应用分析——对三峡水利枢纽运行时库区内滑坡实时动态监测的建议. 自然灾害学报, 1999, 8(2): 103—109
- 48 唐绍辉, 吴壮军. 岩石声发射活动规律的理论与实验研究. 矿业研究与开发, 2000, 20(1): 16—18
- 49 李俊平, 余志雄, 周创兵, 等. 水力耦合下岩石的声发射特征试验研究. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 492—498
- 50 万志军, 李学华, 刘长友. 加载速率对岩石声发射活动的影响. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 469—471
- 51 巴晶, 刘力强, 马胜利. 岩石力学试验中的声发射源定位技术. 无损检测, 2004, 26(7): 342—348
- 52 王更峰. 基于小波分析的岩石声发射信号处理技术. 矿业工程, 2006, 4(5): 11—14
- 53 逢焕东, 张兴民, 姜福兴. 岩石类材料声发射事件的波谱分析. 煤炭学报, 2004, 29(5): 540—544
- 54 姜福兴, Xun Luo. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147—149
- 55 逢焕东, 姜福兴, 张兴民. 微地震监测技术在矿井灾害防治中的应用. 金属矿山, 2004, 12: 58—61
- 56 张银平. 岩体声发射与微震监测定位技术及其应用. 工程爆破, 2002, 8(1): 58—61
- 57 刘国清. 基于声发射的岩体工程灾害微震监测系统. 采矿技术, 2005, 5(1): 38—39
- 58 徐东强, 单晓云, 甄在学. 双向压缩下岩石声发射特性损伤力学分析. 矿山压力与顶板管理, 2000, 3: 82—84
- 59 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究. 工程爆破, 2001, 7(1): 12—16
- 60 Ohtsu M, Watanabe H. Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission. Construction and Building Materials, 2001, 15: 217—224
- 61 Shigeishi M, Ohtsu M. Acoustic emission moment tensor analysis: Development for crack identification in concrete materials. Construction and Building Materials, 2001, 15: 311—319
- 62 Landis EN. Micro-macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete. Construction and Building Materials, 1999, 13: 65—72
- 63 Cai M, Kaiser PK. Assessment of excavation damaged zone using a micromechanical model. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20: 301—310
- 64 Eberhardt E, Stead D, Stimpson B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(2): 222—233
- 65 Diederichs MS, Kaiser PK, Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41: 785—812
- 66 Kang Yumei, Tang Chun'an, Bian Jingmei, et al. Improved algorithm for ground motion inversion and structural parameters identification. Proceedings of 2006(Shenyang) Proceeding of the International Colloquium on Safety Science and Technology. (ISBN 7-5381-4821-3), 2006: 117—121
- 67 Kang Yumei, Tang Chun'an, Liang Zhengzhao, et al. Numerical simulation on AE characteristics of rock and concrete materials. Key Engineering Materials, 2006, 353—358; 961—964
- 68 康玉梅, 白泉, 陈百玲, 等. 基于广义逆理论的转角信息重构近似算法. 东北大学学报, 2006, 27(3): 316—319
- 69 Lemaitre J, Cheboche JL. A non-linear model of creep-fatigue damage culmination and interaction. Mechanics of visco-elastic media and bodies. In: Hult J, editors. Proc. IUTAM Symposium, 1975, 291—292
- 70 村上澄男, 大野信忠. 微观的空けきによつた有効面積の減小を陽に表した多軸アソヘゴ损伤変数. 日本机械学会论文集(A编), 昭和54年, 46: 409
- 71 袁建新. 岩体损伤问题. 岩石力学, 1993, 14(1): 1—31
- 72 李树茂, 齐伟, 刘红帅. 岩体损伤力学理论进展. 世界地质, 2001, 20(1): 73—78
- 73 凌建明. 节理裂隙岩体损伤力学研究中的若干问题. 力学进展, 1994, 25(2): 257—263
- 74 朱万成, 唐春安, 杨天鸿, 等. 岩石破裂过程分析(RFPA2D)系统的细观单元本构关系及验证. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 24—29
- 75 Zhu WC, Tang CA. Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model. Construction and Building Materials, 2002, 16(8): 453—463
- 76 Zhu WC, Teng JG, Tang CA. Numerical simulation of strength envelope and fracture patterns of concrete under biaxial loading. Magazine of Concrete Research, 2002, 54(6): 395—409
- 77 朱万成, 唐春安, 黄志平, 等. 静态和动载荷作用下岩石劈裂破坏模式的数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 1—7
- 78 唐春安, 于广明, 刘红元, 等. 采动岩体破裂与岩层移动数值试验. 长春: 吉林大学出版社, 2003
- 79 朱万成, 左宇军, 尚世明, 等. 动态扰动触发深部巷道发生失稳破裂的数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 915—921
- 80 Oda M. Modern developments in rock structure characterization. In: Comprehensive Rock Engineering, 1993, 1: 185—200
- 81 Germanovich LN. Percolation theory, Thermoelasticity and discrete hydrothermal venting in the earth's crust. Science, 1992, 255(3): 1564—1566
- 82 Martin JT. On thermoelasticity and silica precipitation in hydrothermal systems: Numerical modeling of laboratory experiments. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B6): 12095—12107

- 83 寇绍全. 热开裂损伤对花岗岩变形及破坏特性的影响. 力学学报, 1987, 19(6): 550—556
- 84 张静华, 王靖涛, 赵爱国. 高温下花岗岩断裂特征的研究. 岩土力学, 1987, 8(4): 11—16
- 85 王绳祖. 高温高岩石力学—历史、现状、展望. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 1—10
- 86 Wang HF, Bonner B. Thermal stress cracking in granite. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B2): 1745—1758
- 87 陈 颢, 吴晓东, 张福勤. 岩石热开裂的实验研究. 科学通报, 1999, 4(8): 880—883
- 88 谭 启, 骆 循, 李仕雄, 等. 岩石热破裂研究进展评述. 露天采矿技术, 2006, 6: 16—19
- 89 David C, Menéndez B, Darot M. Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36: 433—448
- 90 Reusché T, Haore SG, Darot M. The effect of heating on the microstructural evolution of La Peyratte granite deduced from acoustic velocity measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243: 692—700
- 91 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 408—411
- 92 王青海, 田 瑛. 中低放核废料地下处置对围岩介质(花岗岩体)温度场的影响. 地质灾害与环境保护, 1997, 12, 8(4): 54—58
- 93 陈剑文, 杨春和, 高小平, 等. 盐岩温度与应力耦合损伤研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1986—1991
- 94 席道瑛, 谢 端, 易良坤. 温度对岩石模量和波速的影响. 岩石力学与工程学报, 1998, 11, 17(增): 802—807
- 95 唐世斌, 唐春安, 朱万成, 等. 热应力作用下的岩石破裂过程分析. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2071—2078
- 96 仵颜卿, 张卓元. 岩体水力学导论. 成都: 西南交通大学出版社, 1995
- 97 Paterson S. *Experimental Deformation of Rocks; The Brittle Field*. Berlin: Springer, 1978
- 98 Li SP, Wu DX. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of Yinzhuan sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 435—441
- 99 Zoback MD, Byerlee JD. The effect of microcracks dilatancy on the permeability of Westerly granite. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 752—755
- 100 Schulze O, Popp T, Kern H. Development of damage and permeability in deforming rock salt. *Engineering Geology*, 2001, 61: 163—180
- 101 Oda MT, Takemura A, Aoki T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite. *Mechanics of Materials*, 2002, 34: 313—331
- 102 Schulze O, Popp T, Kern H. Development of damage and permeability in deforming rock salt. *Engineering Geology*, 2001, 61: 163—180
- 103 韩宝平, 冯启言, 等. 全应力应变过程中碳酸盐岩渗透性研究. 工程地质学报, 2000, 8(2): 127—128
- 104 李树刚, 徐精彩. 软煤样渗透特性的电液伺服试验研究. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 68—70
- 105 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力应变过程渗透性试验研究. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 153—156
- 106 Zhu W, Wong TF. The transition from brittle faulting to cataclastic flow: Permeability evolution. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B2): 3027—3041
- 107 Wang JA, Park HD. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process. *Engineering Geology*, 2002, 63: 291—300
- 108 杨 栋, 赵阳升. 裂隙底板采场流固耦合作用的数值模拟. 煤炭学报, 1998, 23(1): 37—41
- 109 Wang JA, Park HD. Coal mining above a confined aquifer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40(4): 537—551
- 110 郑少河, 朱维申, 王书法. 承压水上采煤的流固耦合问题研究. 岩石力学与工程学报, 2000, (7): 421—424
- 111 Wu Q, Wang M, Wu X. Investigations of groundwater bursting into coal mine seam floors from fault zones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41: 557—571
- 112 Zhang JC, Shen BH. A Coal mining under aquifers in China: A case study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41: 629—639
- 113 Valko B, Economides MJ. Propagation of hydraulically induced fractures—a continuum damage mechanics approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1994, 31(3): 221—229
- 114 王 媛. 裂隙岩体渗流与应力耦全分析的四自由度全耦合法. 水利学报, 1998, (7): 55—59
- 115 陈 平, 张有天. 裂隙岩体渗流与应力耦合分析. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 299—308
- 116 杨延毅, 周维垣. 裂隙岩体的渗流-损伤耦合分析模型及其工程应用. 水力学报, 1991, 5: 19—27
- 117 杨太华, 曾德顺. 三峡船闸高边坡裂隙岩体的渗流损伤特征. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(2): 13—18
- 118 朱珍德, 孙 钧. 裂隙岩体非稳定渗流场与损伤场耦合分析模型. 水文地质工程地质, 1999, 26(2): 35—42
- 119 郑少河, 朱维申. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型的理论分析. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 156—159
- 120 柴军瑞, 仵彦卿. 岩体渗流与应力相互作用关系综述. 第六届岩石力学与工程会议论文集. 武汉: 2000, 11, 366—368
- 121 盛金昌, 速宝玉. 裂隙岩体渗流应力耦合研究综述. 岩土力

- 学, 1998, 2: 92—98
- 122 Tang CA, Tham LG, Lee PKK, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39: 477—489
- 123 朱万成, 康玉梅, 杨天鸿, 等. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术在流固耦合分析中的应用. *岩土工程学报*, 2006, 28(12): 2087—2091
- 124 Zhu WC, Liu J, Yang TH, et al. Effects of local rock heterogeneities on the hydromechanics of fractured rocks using a digital-image-based technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(8): 1182—1199
- 125 杨天鸿, 唐春安, 朱万成. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 489—493
- 126 杨天鸿, 唐春安, 刘红元, 等. 承压水底板突水失稳过程的数值模型初探. *地质力学学报*, 2003, 9(3): 281—287
- 127 Noorishad J, Tsang CF, Witherspoon PA. Coupled thermo-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: Numerical approach. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: 10365—10373
- 128 Tsang CF. *Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories*. New York: Academic Press, 1987
- 129 Tsang CF. Coupled thermomechanical and hydrochemical processes in rock fractures. *Review of Geophysics*, 1991, 29: 537—548
- 130 Stephansson O, Jing L, Tsang CF. *Coupled Thermo-hydro-mechanical Processes of Fractured Media*. Rotterdam: Elsevier, 1996
- 131 刘亚晨, 吴玉山, 刘泉声. 核废料贮存裂隙岩体耦合分析研究综述. *地质灾害与环境保护*, 1999, 10(3): 72—78
- 132 韦立德, 杨春和. 考虑饱和—非饱和渗流、温度和应力耦合的三维有限元程序研制. *岩土力学*, 2005, 26(6): 1000—1004
- 133 赵阳升, 胡耀青. 高温岩体地热开发的块裂介质固流热耦合三维数值模拟. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21: 1751—1755
- 134 赖远明, 刘松玉. 寒区挡土墙温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析. *土木工程学报*, 2003, 36(6): 88—95
- 135 李 宁, 陈 波, 党发宁. 裂隙岩体介质温度、渗流、变形耦合模型与有限元解析. *自然科学进展*, 2000, 10(8): 722—728
- 136 黄 涛. 裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(1): 77—82
- 137 柴军瑞, 仵彦卿. 耦合水头梯度、温度梯度及应力影响的一维渗流模型分析. *岩土力学与工程学报*, 2001, 20(s1): 1026—1028
- 138 孔祥言, 李道伦, 徐献芝, 等. 热-流-固耦合渗流的数学模型研究. *水动力学研究与进展*, 2005, 20(2): 269—275
- 139 刘建军, 冯夏庭. 我国油藏渗流-温度-应力耦合的研究进展. *岩土力学*, 2003, 24(增2): 645—650
- 140 吉小明. 饱和多孔岩体中温度场渗流场应力场耦合分析. *广东工业大学学报*, 2006, 23(3): 46—53
- 141 杨立中, 黄 涛. 初论环境地质中裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究. *水文地质工程地质*, 2000, (2): 33—35
- 142 柴军瑞, 韩群柱. 岩体渗流场与温度场耦合的连续介质模型. *地下水*, 1997, 19(2): 59—62
- 143 冯夏庭, 丁梧秀. 应力-水流-化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1465—1473
- 144 Zhu WC, Liu J, Elsworth D, et al. Tracer transport in a fractured chalk: X-ray ct characterization and digital-image-based (DIB) simulation. *Transport in Porous Media*, 2007, 70(1): 25—42
- 145 Zhu WC, Liu J, Sheng JC, et al. Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seam. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(7): 971—980