

# 从文献统计分析看中国岩石力学进展

余诗刚<sup>1</sup>, 董陇军<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 基于国内外重要文献数据库, 采用文献计量技术, 通过统计近 30 a 来岩石力学与岩土工程有关期刊中国作者论文信息和被引特征, 窥察我国岩石力学与岩土工程学科发展状况与研究进展。总结分析近 30 a 尤其是近 10 a 来岩石强度与变形理论、岩石断裂与损伤力学、岩石动力学与本构关系、岩石非线性、岩石多场耦合、岩石加固与稳定性分析等方面的若干进展, 同时展望岩石力学十大挑战性难题。

**关键词:** 岩石力学; 期刊发表论文; 统计分析; 研究进展; 挑战性难题

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2013)03-0442-23

## STATISTICS AND ANALYSIS OF ACADEMIC PUBLICATIONS FOR DEVELOPMENT OF ROCK MECHANICS IN CHINA

SHE Shigang<sup>1</sup>, DONG Longjun<sup>2</sup>

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China*)

**Abstract:** This paper presents the statistics and analysis of academic papers published by Chinese authors in recent 30 years in rock mechanics and geotechnical engineering journals published in Chinese and English. The statistics and analysis also include academic papers citations in the key databases such as EI and SCI. The paper tries to summarize and analyze the situation and development of rock mechanics and geotechnical engineering in China in the last 30 years, especially in the last 10 years. The developments are mainly focused on rock strength and deformation theories, rock fracture and damage mechanics, rock dynamics and constitutive relationships, rock nonlinearity and rock multifield coupling, rock reinforcement and stability analysis. Finally, ten challenging issues are proposed in the field of rock mechanics and rock engineering.

**Key words:** rock mechanics; journal papers; statistics and analysis; research development; challenging issues

## 1 引言

我国的岩石工程历史悠久, 都江堰水利工程、赵州桥、万里长城以及历代帝王规模恢宏的地下陵寝等都是古代岩石工程的杰出代表。它们不但外观优美, 而且结构受力合理, 历经千年依然稳固, 凝聚着我国古代人民的坚强毅力和高度智慧, 不但体现了我国古代工程技术的非凡成就<sup>[1]</sup>, 而且展现了岩石力学与岩土工程设计与施工概念的初步应用。

20 世纪 50 年代末, 我国开展大型水利水电工

程的勘测设计和施工, 为岩石力学的试验与理论研究以及工程应用注入了巨大的活力。20 世纪 80 年代, 我国决定兴建长江三峡工程, 大量的岩石力学与岩土工程问题摆在我国科技工作者面前, 我国的岩石力学学科也面临着巨大的机遇与挑战, 如长达 1.6 km, 最大坡高 170 m 的永久船闸高边坡岩体开挖的整体稳定性及变形控制, 节理岩体流变与地下水渗流规律等, 都是当时极为复杂、未有先例且亟待解决的关键岩石力学课题。科学家们通过大量的室内和现场研究, 在地质勘察、资料采集、围岩分类、现场地应力测试与岩性判别、复杂岩体开挖及关于岩

**收稿日期:** 2012-04-17; **修回日期:** 2012-12-06

**作者简介:** 余诗刚(1953-), 男, 1976 年毕业于武汉大学法语专业, 现任研究员, 主要从事岩石力学文献情报、学报等方面的研究和管理工。E-mail: sgshe@whrsm.ac.cn

爆和冲击地压的理论与实践等方面都取得了重要进展。

进入 21 世纪，我国各类基础设施建设和资源开发处于快速发展阶段，水利水电开发、矿山与能源开采、能源储存与废弃物地下处置、地面与地下交通建设及其他许多岩土工程的建设促进了我国岩石力学的快速发展，但同时也面临着许多新的挑战性问题，例如特殊的区域性构造地质条件(如膨胀岩、地下暗河和岩溶、松散破碎复杂岩基、高地应力作用下的软硬岩)、大跨洞室围岩的大变形控制、水工隧洞洞群之间的相互作用、复杂坝基稳定、深部岩爆、岩体内的裂隙网络渗流、“三下”(重要道路下、水下和建筑物下)采矿、自然或人工开挖高陡岩质边坡的长期稳定、尾矿坝溃坝、地下空间利用、防护工程、海底隧道以及其他工程岩石力学问题。上述交通、能源、水利水电与采矿工业等各个领域的需求，有力地促进了我国岩石力学与岩土工程学科的发展。

本文统计近 30 a 国内外有关期刊发表的岩石力学与岩土工程学科文章，重点结合中国作者发表的论文被 EI 和 SCI 数据库收录和引用的情况进行分析，探讨我国岩石力学学科发展若干进展，并分析目前亟待解决的问题，在分析现有研究成果的基础上给出建议，其分析思路如图 1 所示。

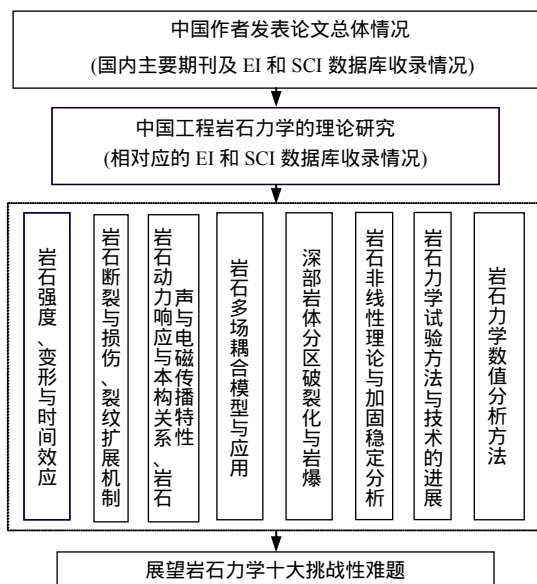


图 1 分析思路  
Fig.1 Analysis procedure

## 2 中国作者发表岩石力学论文概况

### 2.1 国内主要期刊发表的岩石力学与岩土工程论文情况

目前与岩石力学有关的全国性刊物主要有《岩石力学与工程学报》、《岩土工程学报》、《岩土力学》、

《煤炭学报》、《土木工程学报》、《水利学报》、《中国公路学报》、《工程地质学报》、《地下空间与工程学报》、《石油勘探与开发》、《Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》(英文版)以及《中国矿业大学学报》等一些大学学报。上述期刊大部分被 EI 收录。发表岩石力学与岩土工程类论文较多的期刊主要集中在前 4 种。2012 年 12 月 26 日清华大学发布了国际最具影响力学术期刊，其中《岩石力学与工程学报》的他引影响因子和他引频次分别为 0.268 和 1 289，《岩土力学》为 0.067 和 506，《岩土工程学报》为 0.066 和 408。因此，为了清楚地了解我国学者发表的岩石力学类文章，对上述 4 种代表性期刊近 30 a(1982~2012 年)发表的论文分别进行统计和分类。表 1 给出了 4 种期刊在综合研究与理论分析、设计施工与工程应用、试验研究与测试技术、数值分析与计算方面的整体分布情况。由此可知，结合工程实践，理论联系实际、试验与测试、重大岩土工程关键技术与计算分析并重所占比例较高，是当前的研究趋势。

表 1 4 种岩石力学类期刊的发文分类与比较

Table 1 Classification and comparison of papers published in four representative rock mechanics journals

期刊名称	综合研究与理论分析		设计施工与工程应用		试验研究与测试技术		数值分析与计算		总篇数/篇
	论文数/篇	比例/%	论文数/篇	比例/%	论文数/篇	比例/%	论文数/篇	比例/%	
《岩石力学与工程学报》	2 083	25.9	1 311	16.3	3 094	38.5	1 540	19.3	8 028
《岩土工程学报》	1 224	21.9	1 342	24.1	2 248	40.3	703	13.7	5 577
《岩土力学》	1 788	24.4	1 273	17.4	2 837	38.7	1 436	19.5	7 334
《煤炭学报》	1 185	25.1	1 917	40.5	1 156	24.4	473	10.0	4 731
总计	6 280	24.5	5 843	22.8	9 335	36.4	4 152	16.2	25 670

### 2.2 EI 数据库收录的中国作者发表岩石力学与岩土工程论文情况

在美国 EI 数据库 1990 年 1 月~2012 年 9 月收录的岩石力学与岩土工程方面的论文中，检索到中国作者论文 14 513 篇。

#### (1) 每年发文的检索情况

图 2 为 EI 数据库收录的中国作者论文年度统计。由图 2 可知，1990~1996 年 EI 数据库收录的我国论文数量还处于很低的水平。从 1996 年开始，被 EI 数据库收录的论文数量逐渐增加，特别是从 1997 年的 180 余篇增加到 1998 年的 401 篇，又从 2001 年的 531 篇达到 2005 年的较高水平 1 600 余篇，在 2011 年达到高峰(1 800 余篇)，预计 2012 年的论文收录数会更高。这 3 次明显的突增说明，近

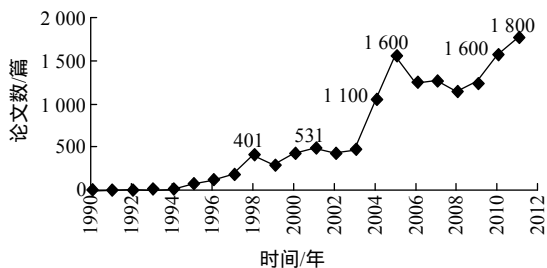


图2 EI数据库收录的中国作者论文年度统计

Fig.2 Annual statistics of EI indexed papers written by Chinese authors

20 a 我国广大从事岩石力学与岩土工程的科技人员不但紧密服务于国家重大基础建设工程,也极大促进了我国岩石力学学科的发展。在2005年以后,期间尽管有少量波动,但EI收录率一直保持在一个较高的水平。

(2) 学科分类统计情况

中国作者发表与岩石力学有关学科的文章(EI数据库收录)可分为40多种。对具有代表性的10个学科进行统计和分析后发现,EI数据库收录的岩石力学文章数量大增,我国岩石力学界进入了研究活跃期,学科领域主要集中在岩石静(动)态力学试验、锚固机制、岩石本构模型、岩石非线性破坏机制、岩爆、岩体(边坡、地下洞室)工程稳定性以及数值仿真技术(有限元、离散元、边界元、有限差分法、无网络法、数值流形法)等。这从一个侧面说明我国学术期刊已处于一个发展较为平稳且态势良好的阶段,文章的学术水平稳步提高。

2.3 SCI数据库收录的中国作者文章

(1) 论文年度分布情况

SCI数据库2000年1月~2012年9月收录中国作者发表岩石力学与岩土工程类论文数量达10700余篇,其年度分布情况见图3。从图3可以看出,我国学者每年在SCI期刊上发表的文章稳步增加,尤其是从2000年的441篇增至2004年的751篇,再从2007年的1066篇达到2011年最高1465篇,2012年预计可达1800篇。这说明我国岩石力学学

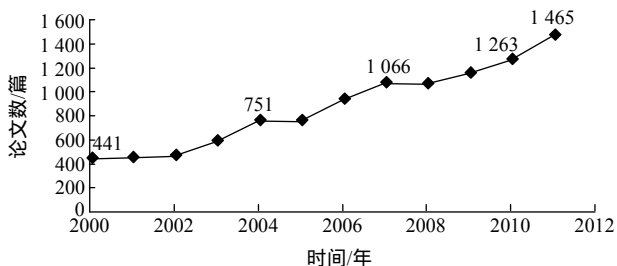


图3 SCI数据库收录的中国作者论文年度统计

Fig.3 Annual statistics of SCI indexed papers written by Chinese authors

科的国际交流日益活跃,研究水平和质量不断提高,研究成果不断得到国际社会认可,这特别有利于我国岩石力学研究成果走向世界,产生国际影响力。

(2) 中国作者在国外6种英文期刊发文量统计

张海峰和余诗刚<sup>[2]</sup>对SCI数据库中影响因子居前列且具有代表性的6种岩石力学类期刊于1982~2011年刊发的中国作者(包括香港和台湾作者)的文章进行了统计与分析,统计的文章包括研究论文、综述和会议论文。主要指标有发文量、主要发文机构、文章的地区分布和作者分布等。

具体统计结果见表2。由表2可知,近30a来,6种英文期刊共发表论文9947篇,其中中国作者发表1246篇,占发文总量的12.5%。1982~1996年间,中国作者年均发文量不足7篇,仅占总发文量的2.3%~3.6%;1997~2011年间,发文量显著增加,年均发文量达到56.8~103.8篇,占总发文量的13.3%~17.0%,由此可见,无论从文章比例还是发文量来看,30a来,尤其是近15a来,中国在国际岩土工程界的影响进一步扩大,国际学术地位也得到进一步提升。

表2 1982~2011年中国作者在6种英文期刊上的发文量统计  
Table 2 Statistics of papers written by Chinese authors published in six journals in English from 1982 to 2011

时间/年	中国作者 发文量/篇	中国作者年均 发文量/篇	6种期刊累计 发文量/篇	比例/%
1982~1986	16	3.2	691	2.3
1987~1991	24	4.8	672	3.6
1992~1996	31	6.2	870	3.6
1997~2001	284	56.8	2140	13.3
2002~2006	372	74.4	2528	14.7
2007~2011	519	103.8	3046	17.0
总计	1246	41.5	9947	12.5

注:比例为中国作者发文量占6种期刊累计发文量的比值。6种英文期刊为:International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Rock Mechanics and Rock Engineering, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Geotechnique, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Canadian Geotechnical Journal.

(3) 发文机构分布情况

利用SCI数据库统计近30a来在6种英文期刊发文的机构,居前20位为高校和中国科学院(见表3),且各高校和中国科学院岩土力学专家培养并建立了一支有相当经验和水平的年轻队伍,表明我国的岩石力学与岩土工程的研究正处于蓬勃发展期。

2.4 主要岩土类学报发表论文被SCI引用情况分析

表4,5分别为三大学报被SCI期刊引用论文次数和两大学报被引频次居前列的作者排序。由表5可

表3 1982 ~ 2011年在6种英文期刊发文量前20位的机构

Table 3 Top 20 institutions in six journals published in English from 1982 to 2011

排名	机构名称	发文量/篇	排名	机构名称	发文量/篇
1	香港科技大学	164	11	台湾大学	34
2	中国科学院	134	12	清华大学	32
3	香港大学	118	12	台湾科技大学	32
4	香港理工大学	83	12	上海交通大学	32
5	中国矿业大学	50	15	中南大学	31
6	浙江大学	46	15	台湾交通大学	31
7	同济大学	44	17	武汉大学	30
8	东北大学	39	18	河海大学	29
9	台湾成功大学	36	19	北京科技大学	25
10	大连理工大学	35	20	台湾中央大学	21

表 4 三大学报被 SCI 期刊引用论文次数

Table 4 Statistics of SCI citation of papers published in three Chinese journals

期刊名称	总被引次数	总被引论文数	总被引作者数	单篇论文被引最大次数	作者最大累计被引次数	作者平均被引次数
《岩石力学与工程学报》	2 942/ 5 466	1 790(23.4%)/ 2 900(35.2%)	1 101/ 1 805	13/37	49/90	2.67/3.28
《岩土工程学报》	151/ 278	106(2.2%)/ 156(3.8%)	103/ 145	4/21	5/21	1.47/1.93
《岩土力学》	955/ 2 021	718(10.4%)/ 1 463(18.6%)	563/ 1 134	7/8	13/29	1.70/1.78

注：表中每项 2 组数据的检索时间分别为 2010 年 12 月和 2012 年 8 月，用“/”区分。括号内的数字为总被引论文数与该刊总论文数的比值。

知，我国 70 余位岩土力学专家发表论文被引较高，特别是何满潮《深部开采岩体力学研究》一文的单篇被引次数达到 37 次，黄润秋、唐春安、郑颖人、刘建军、葛修润、谢和平和王学滨等单篇被引频次也接近 20 次，且总被引次数较高，具有一定代表性。

### 3 中国岩石力学理论研究

美国 EI 数据库在 2003 年 1 月 ~ 2012 年 12 月收录岩石力学理论方面的论文 25 254 篇。其主控词分布和近 10 a 发表的论文情况见图 4。由图 4 可知，EI 收录论文数量呈逐年递增的趋势，说明中国学者在岩石力学理论与岩土工程应用领域的研究日益活跃。

#### 3.1 岩石强度、变形及时间效应

岩石作为自然界的一种天然材料，对其变形和破坏特性的研究是沿着材料力学、弹性力学、塑性力学、断裂力学和损伤力学等逐步发展的<sup>[1]</sup>。由于水库大坝、山岭隧道、跨江(海)桥隧等重大工程项

表 5 两大学报论文被 SCI 引用次数(含自引)列前 38 位的作者  
Table 5 Top 38 authors of SCI citation in two Chinese journals

序号	《岩石力学与工程学报》 (1982 ~ 2012 年)			《岩土力学》 (1979 ~ 2012 年)		
	姓名	论文数	单篇最高被引频次/总被引频次	姓名	论文数	单篇最高被引频次/总被引频次
1	He Manchao	18	37/90	Liu Handong	12	7/29
2	Xie Heping	11	14/73	Luan Maotian	5	6/14
3	Wang Xuebin	12	13/56	Xu Weiya	4	4/14
4	Huang Runqiu	13	19/50	Zhou Jian	7	4/12
5	Tang Chun'an	8	13/50	Chen Shouyi	2	6/11
6	Zheng Yingren	15	11/47	Wang Zhiliang	8	3/11
7	Cai Meifeng	12	9/39	Zhu Zhende	6	3/10
8	Li Shucai	11	9/38	Bai Bing	3	6/9
9	You Mingqing	15	6/36	Liu Jun	2	7/9
10	Pan Yishan	10	9/35	Shen Z J	5	3/9
11	Feng Xiating	15	7/32	Ding Zhenming	1	8/8
12	Zhu Weishen	12	6/31	Liu Yanfeng	1	8/8
13	Liu Jianjun	5	17/30	Pan Yue	6	2/8
14	Sun Jun	11	8/28	Zhang P W	3	6/8
15	Zhao Yangsheng	12	5/27	Zhang Qiangyong	2	7/8
16	Ge Xiurun	4	14/25	He Siming	3	3/7
17	Liu Quansheng	8	5/25	Jia Shanpo	2	5/7
18	Li Xibing	10	9/24	Xu D J	3	3/7
19	Yang Chunhe	8	7/23	Yao Hailin	4	4/7
20	Wang Mingyang	9	7/22	Zhao Minghua	5	2/7
21	Wu Lixin	8	5/22	Jia Yonggang	4	2/6
22	Zheng Hong	8	7/22	Ma W	1	1/6
23	Chen Weizhong	13	3/21	Wang Chenghua	4	1/6
24	Jiang Yaodong	9	3/21	Yang Guangqing	2	5/6
25	Tang Lizhong	3	10/21	Zhang Chao	4	3/6
26	Yang Gengshe	4	5/21	Zhang Ga	4	2/6
27	Cao W G	6	9/18	Zhao Jian	1	6/6
28	Li Ning	10	5/18	Zhou Cuiying	4	3/6
29	Liu W N	3	3/18	Zhu Weishen	3	3/6
30	Tan Y L	8	5/18	Fan X F	1	5/5
31	Yang Qiang	9	5/18	Ge X R	5	1/5
32	Zhang Dingli	8	4/18	Guo Mingwei	2	4/5
33	Zhu Zhende	9	3/18	Hu Mingjian	4	2/5
34	Yue Zhongqi	3	8/17	Li Liang	3	3/5
35	Zhang Mengtao	4	13/17	Li Zongli	2	4/5
36	Zhu Hehua	10	4/17	Liu Jiang	2	3/5
37	Chen Zhonghui	4	8/16	Liu Xinxi	3	3/5
38	Liao Qiulin	3	9/16	Mei Guoxiong	2	3/5
总计		341	1 118		135	302

注：1. 《岩石力学与工程学报》论文被引数共计 341 篇，占总被引数 2 900 次的 11.75%；总被引频次共计 1 118 次，占 5 466 次的 20.4%(见表 4)；2. 《岩土力学》论文被引数共计 135 篇，占总被引频次 1 463 次的 9%；总被引频次共计 302 次，占 2 021 次的 14.9%(见表 4)。

目的兴建，以及地下采矿工程、人防工程及地下空间利用的快速发展，促进科技工作者对岩石力学性质与时间效应的持续研究，天然岩石材料的复杂性也越来越为人们所认识。

2003 ~ 2012 年，岩石强度、变形及时间效应领域 EI 数据库共收录 15 689 篇文献，其中 2005 年和 2011 年文献数量达到峰值，分别为 1 565 和 2 125

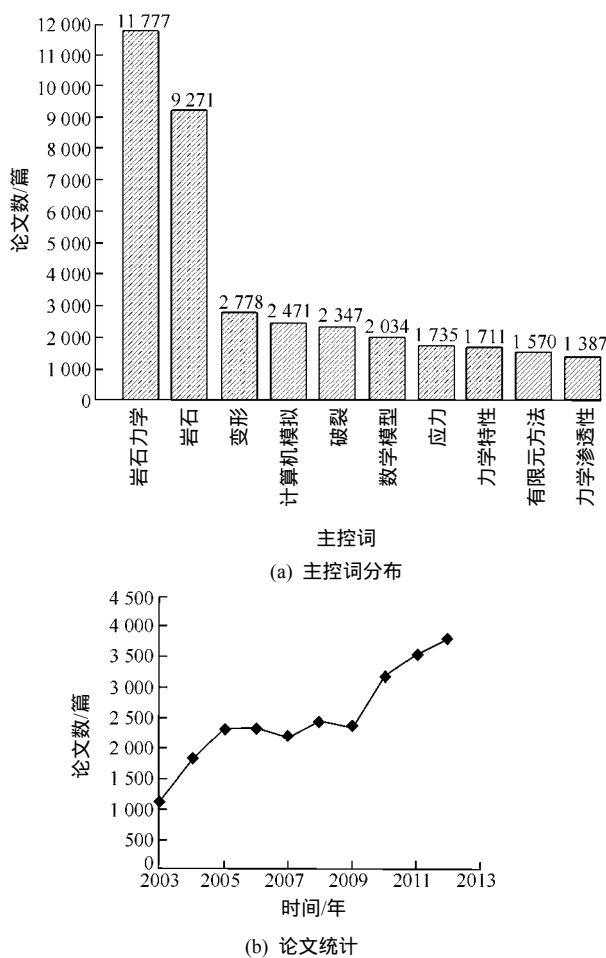


图4 近10 a 岩石力学理论领域 EI 收录论文统计  
Fig.4 Statistics of EI indexed papers about rock mechanics theories in last decade

篇(见图 5(a))。SCI 数据库中检索到 2 340 篇，平均每年的引用次数达 2 294 次。由图 5(b)可知，引用篇次逐年增长，可见我国学者在该领域取得的科研成果在国际上越来越受到重视。

### 3.1.1 岩石强度和强度准则

岩石强度理论或强度准则是岩体工程设计、结构安全性分析的基础知识，一直是工程力学界的一个热门课题。以最大剪应力为基础的 Mohr 强度理论没有考虑中间主应力对材料强度的影响，俞茂宏在 1961 年提出了双剪概念，并在 1991 年发表统一强度理论公式，后又提出非线性统一强度理论，可以将经典理论作为该理论的特例或线性逼近。经过 50 a 来的持续研究，该理论已经形成众多系列，融入塑性力学、断裂力学、损伤力学等学科，并广泛应用于机械零件、混凝土构件以及岩土工程的强度分析<sup>[3]</sup>。统一强度理论扩展到三向拉伸区，更适用于岩土材料和岩土工程，也使统一强度理论在理论

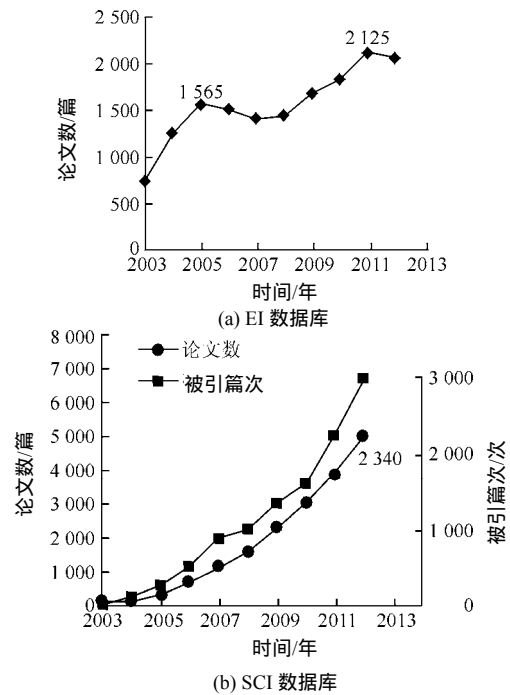


图5 近10 a 岩石强度、变形及时间效应领域发表的论文统计  
Fig.5 Statistics of papers about rock strength, deformation and time effect in last decade

上更趋完善，该成果于 2012 年获得国家自然科学基金二等奖。

郑颖人和殷有泉等发展了岩土塑性力学及其本构模型，并在应变空间塑性理论、多重屈服面理论及建立广义塑性力学理论方面取得了较大进展，特别是郑颖人与高红等<sup>[4]</sup>以考虑岩石内摩擦特性的剪切应变能达到某个极限屈服值为假设前提，从理论上建立了岩土材料的抗剪能量屈服准则，它是考虑中间主应力的摩擦材料屈服准则，当内摩擦角为 0 时立即退化为米赛斯准则；当罗德角为 ±30° 时，或不考虑中间主应力时，退化为 Mohr-Coulomb 准则。殷有泉<sup>[5]</sup>对岩土在三维应变空间屈服面问题进行研究，提出用应变空间表达岩土的本构关系，使岩土的应变软化硬化问题、弹塑性耦合问题得到较好的解决。哈秋龄<sup>[6]</sup>提出卸载条件下的岩体本构模型。李建林<sup>[7]</sup>进一步研究了节理岩体卸载非线性力学特性，并应用于实际工程。许东俊和耿乃光<sup>[8]</sup>以软弱砂岩和致密坚硬的花岗岩以及中硬大理岩为研究对象，通过把中间主应力  $\sigma_2$  从  $\sigma_2 = \sigma_3$  的下限值增加到  $\sigma_2 = \sigma_1$  的上限值，进一步研究了强度随中间主应力  $\sigma_2$  的增加而变化的规律。曹文贵等<sup>[9-10]</sup>引进基于 Mohr-Coulomb 以及 Drucker-Prager 岩石强度判据的岩石微元强度表示方法，从岩石微元强度服从 Weibull 随机分布的角度出发，基于岩石三轴应力-应变试验曲线建立了特定围压下反映岩石破裂全过

程的损伤软化统计本构模型；并对 Mohr-Coulomb 和 Drucker-Prager 岩石强度判据进行了修正。周辉等<sup>[11-12]</sup>通过试验研究了硬岩强度的演化规律，提出了高应力条件下硬脆性岩石的弹塑性耦合力学模型。白冰等<sup>[13]</sup>新近提出无需先验假设硬化模式、直接通过拟合强度准则参数来实现塑性硬化的方法。

### 3.1.2 岩石的变形与流变性状

#### (1) 岩石的变形

岩石在外力作用下产生变形，其变形按性质分为理想弹性、弹塑性和黏弹塑性变形。岩石的变形特征一般用杨氏模量和泊松比 2 个指标来表示。岩石不是理想弹性体，其变形与荷载之间并非线性关系，其变形参数的确定和使用方法受到学术界与工程界的注意。尤明庆和苏承东<sup>[14]</sup>基于试样压缩过程中应力、应变数据的计算机连续采样，提出以应力差为强度 50% 的两点的最大割线模量作为岩石的杨氏模量，多个试样的试验值采用调和平均而不是算术平均；提出利用固定轴向变形时围压与轴向应力的变化关系确定泊松比，以体现该参数在应力平衡方程中的作用。岩石在应力-应变全过程曲线中，不同应力状态对应的弹性模量和泊松比是不同的，卢应发等<sup>[15-16]</sup>对任意地质材料进行围压加卸载确定弹性模量和泊松比，讨论不同应力状态下的损伤模量，指出岩石的流变与黏性变形时效与其力学状态相关，并论证圆柱形试样较适宜于各向同性材料试验。对于软岩和节理裂隙发育或高地应力条件下的岩体，黏性变形时间效应更为明显，是工程设计与计算中必须考虑的主要因素。何满潮等<sup>[17-18]</sup>根据理论分析和工程实践，初步将深部软岩的变形力学机制归纳为物化膨胀型(I)、应力扩容型(II)和结构变形型(III) 3 大类和 13 种亚类。同时指出，软岩工程大变形难以控制的根本原因是其具有复合型变形力学机制；软岩大变形控制的三大关键因素为：正确地确定软岩的复合型变形机制、有效地转化复合型为单一型以及合理地应用转化技术。不同地区的岩石其基本力学特性差异巨大。

#### (2) 岩石流(蠕)变模型

20 世纪 20~30 年代，流变力学形成了独立的学科。流变是岩石材料的重要力学特征，许多工程问题(采矿、大坝、桥墩、石油开采、能源和放射性核废料储存、边坡及地下构筑物的稳定性等)都与岩石的流变特性密切相关。

岩石流变模型的研究是岩石流变力学理论研究热点和核心之一。随着一些新的理论和方法逐渐被采用，岩石流变模型理论也得到了一定程度的发展，包括用流变经验模型、元件模型、损伤断裂模型来

研究并发展岩石流变模型<sup>[19-36]</sup>。

我国岩石流(蠕)变的研究始于 1958 年。当时陈宗基指导了长江三峡平硐围岩的蠕变试验研究，提出了岩石蠕变的特性，他认为人们普遍采用的普氏理论存在不合理性。后来根据对长江葛州坝工程地基泥化夹层的研究，又提出了确定岩体长期稳定强度的本构方程。20 世纪 60~70 年代，陈宗基<sup>[19]</sup>率先对宜昌砂岩进行了扭转蠕变试验，研究了岩石的封闭应力和蠕变扩容现象，并指出蠕变和封闭应力是岩石性状中的 2 个基本因素。陈宗基从宏观和微观 2 个方面先后提出黏土的流变本构方程、二次时间效应及片架结构理论。

目前，岩石流变损伤断裂的研究主要集中在探讨岩石蠕变损伤、蠕变断裂及其耦合机制。如孙钧等<sup>[20-23, 25]</sup>对软岩的非线性流变力学特性进行了理论预测和试验研究，提出了统一的三维大变形非线性黏弹塑性流变本构模型及其算法，并将其应用于地下工程中。同时，还分析了含 I 型裂纹岩石的流变断裂特性，提出 I 型裂纹流变断裂韧度的 3 个阈值，然后应用断裂力学和黏弹塑性理论，在考虑屈服、蠕变和 II 型裂纹扩展等物理力学特性的基础上，得到了岩体隧洞衬砌与围岩应力解析式。之后采用直接拉伸试验，对红砂岩进行了拉伸断裂和拉伸流变断裂试验，得到了该类岩石流变断裂准则。杨春和等<sup>[35-36]</sup>在盐岩工程力学试验及理论研究方面，建立了能有效反映深层盐岩流变特性的数学力学模型和计算分析方法，主要研究成果已应用于我国盐岩能源地下储库的选址、设计和运营参数评估中。

#### (3) 岩石的流(蠕)变试验

岩石流变试验主要分为室内岩石流变试验和现场岩体流变试验。室内试验具有能够长期观测、较严格控制试验条件、重复次数多等优点。现场试验耗资费时、难度较大，因而对现场岩体流变力学特性的试验研究成果相对较少。因此，岩石流变力学特性的试验研究成果也主要集中在室内试验方面。孙钧等<sup>[20-23]</sup>对三峡花岗岩进行了劈裂拉伸蠕变试验，指出岩石的蠕变拉伸强度与加载速率有关，并研究了水对岩石拉伸蠕变特性的影响；同时，利用三点弯曲试验方法对层状岩石进行了试验研究与理论分析，利用重正化群变换理论对岩石的流变断裂机制进行了定量分析，建立了岩石流变断裂准则，同时验证了直接拉伸试验所得到的试验结果。夏才初等<sup>[26-27]</sup>开展了深部节理岩体在高应力下的卸载流变力学特性的研究。袁龙蔚等<sup>[37-38]</sup>求出了 3 种煤系岩石的蠕变参数值，并初步证明了这 3 种岩石的蠕

变过程服从线性变形定律。雷承弟<sup>[39]</sup>对二滩正长岩蚀变玄武岩进行了现场承压板压缩蠕变试验,拟合得到了蠕变经验公式。周火明<sup>[40]</sup>在三峡工程坝址试验洞内开展了岩体单轴、三轴压缩蠕变试验和岩体剪切蠕变试验,研究表明岩体应变与时间曲线与室内试验具有相同特征,而且在低应力水平下的蠕变特性仍可用广义 Kelvin 模型来描述;同时,对岩体结构面进行了现场剪切蠕变试验,给出了岩体结构面的蠕变模型及相应的蠕变参数。

### 3.2 岩石断裂与损伤力学

近 10 a 来, EI 数据库收录岩石断裂与损伤力学方面的文章 2 463 篇,其年度分布情况见图 6(a)。由图 6(a)可见,自 2004 年开始,该领域的论文数呈上升趋势,从 2004 年的 217 篇增加到 2011 年的 457 篇。SCI 数据库共收录该领域文章 215 篇,累计被引 548 次,去除自引的他引频次 522 次,被引文献 488 篇,每项平均被引 2.533 次(见图 6(b))。

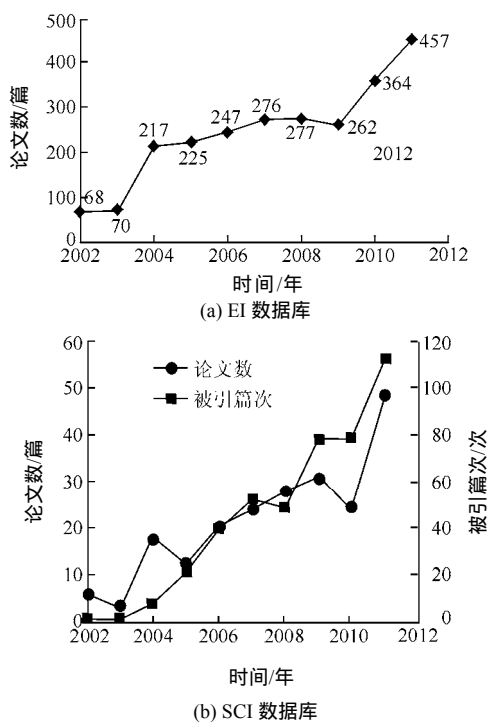


图 6 近 10 a 岩石断裂与损伤力学领域发表的论文统计  
Fig.6 Statistics of papers about rock damage and fracture mechanics in last decade

#### 3.2.1 断裂与损伤机制

岩石断裂与损伤力学是岩石力学的一个重要分支。岩石和金属断裂与损伤力学的根本区别在于研究材料的特性、断裂机制及工作条件。于学馥<sup>[41]</sup>详细论述了岩石力学与断裂力学的关系。寇绍全<sup>[42]</sup>也谈到了岩石断裂力学的基本特征问题。

周维垣等<sup>[43-44]</sup>提出了一种描述岩石、混凝土类

材料断裂损伤过程区的细观力学模型,用于分析材料的非线性断裂,模型考虑了岩石、混凝土材料内部随机分布的骨料、胶结质、微裂隙和孔洞等不均质因素。谢和平和高 峰<sup>[45]</sup>开展了非线性有限元的节理岩体损伤模型的研究。开展岩石断裂与损伤力学的研究大多从试验开始,如徐卫亚和韦立德<sup>[46]</sup>基于概率论和损伤力学对岩石在荷载作用下的破坏、损伤和弹塑性变形等特征进行了探讨,建立了弹塑性损伤统计本构模型。周家文等<sup>[47]</sup>结合向家坝砂岩单轴循环加卸载室内试验,对脆性岩石单轴循环加卸载的应力-应变曲线特征、峰值强度及断裂损伤力学特性等进行研究,指出岩石宏观力学特性取决于岩石内部微裂纹的细观力学响应。杨更社等<sup>[48]</sup>采用试验研究了岩石单轴受力 CT 识别损伤本构关系。王思敬等<sup>[1,49]</sup>在常温、常压、循环条件下,对不同化学性质的水溶液作用下的 2 种花岗岩和 2 种砂岩进行了断裂力学指标  $K_{IC}$  和  $\delta_c$  的三点弯曲试验。朱珍德等<sup>[50]</sup>通过不同层次的试验研究与理论分析,给出了渗透水压作用下岩石破裂产生的微观破坏力学机制,为进一步分析暴雨入渗状态下水压急升与骤降对裂隙岩体高边坡失稳的影响机制提供了可靠的试验依据。王启智和贾学明<sup>[51]</sup>,张 盛等<sup>[52]</sup>开展了岩石破坏的尺度律及其岩石力学试验研究。

这方面的理论研究较多,如朱乃龙和饶云刚<sup>[53]</sup>以椭圆盘裂纹模型模拟岩石内的缺陷,基于最弱链环节假设和统计断裂力学理论,推导出多轴应力状态下岩石类材料的损伤模型,并根据应变等价性假说研究了包含损伤的岩石类材料的基本本构关系。秦跃平等<sup>[54]</sup>分析了岩石全应力-应变曲线的峰值点参数,用数学方法证明了损伤变量定义的随意性和不同损伤变量的等效性,说明了同一数学模型可用不同的方式表示;给出了损伤变化速率曲线,分析了其变化特点及其与全应力-应变曲线的关系,解释了岩石试验中声发射规律。

#### 3.2.2 裂纹扩展机制

20 世纪 80 年代,在含裂纹岩石的开裂破坏研究上更注重理论与试验相结合。王 仁等<sup>[55]</sup>用含预置倾斜裂纹的模拟材料或大理岩材料来研究裂纹的萌生、演化和破坏过程,以及裂缝的逆向共轭剪破坏问题等;用线弹性断裂力学理论研究单个、多个和多组雁行排列预置张开裂纹的萌生、扩展和贯通机制,并提出相应的裂纹扩展模型。此阶段对含裂纹岩石破坏研究应用比较多的理论是节理损伤力学,它是损伤力学理论与岩石力学、工程地质学之



间的交叉学科，把岩石中的节理裂隙看成是岩石内部的初始损伤，通过引入一种所谓“损伤变量”的内部状态变量来描述受损材料的力学行为，从而研究其裂隙的产生、演化、体积元破坏、直至断裂的全过程，并建立相应的裂纹扩展损伤模型，如非弹性滑动模型等。

20 世纪 90 年代至今，随着计算机的发展和人们对现实世界的认识加深，结合传统的理论分析，运用新的试验和数值分析方法对含裂纹岩石的开裂破坏开展了更深入的研究。王庚荪<sup>[56]</sup>和林鹏等<sup>[57-59]</sup>研究了单轴、多轴条件下含单双裂纹与多裂纹、开闭裂纹、相交不重叠裂纹、不相交重叠裂纹缺陷岩体的开裂、扩展、贯通相互作用机制以及破坏行为。李世愚等<sup>[60-61]</sup>使得节理岩体的蠕变损伤断裂机制、损伤演化方程和本构关系、岩石损伤局部化研究得到了进一步的发展，克服了传统模型中缺少反映材料细观特性的内禀长度因子；在局部化分岔现象进行数值模拟时，避免局部化分析结果对网格疏密或走向的敏感性等，在实际应用中取得了较好的效果。李术才和朱维申<sup>[62-63]</sup>也从弹性断裂入手对弹性体中的三维裂纹扩展理论问题进行探索，并采用数值方法对三维开裂机制进行模拟，这些研究为真实反映三维裂纹的开裂机制、对三维开裂的控制和加固研究提供了有益的参考。葛修润等<sup>[64-65]</sup>借助 CT 技术对三维裂纹开裂问题、破坏机制进行了有益探索。近年来，诸多学者从宏观角度对节理岩体的渐进破坏和锚杆加固止裂进行研究。周宏伟和谢和平<sup>[66]</sup>探讨了岩石破裂面的各向异性特征。张强勇等<sup>[67]</sup>应用断裂损伤力学研究断续节理岩体开挖卸载过程中渐近破坏的力学机制，从压剪和拉剪 2 种应力状态出发，建立了复杂应力状态下加锚断续节理岩体的损伤演化方程，并根据预应力锚索与裂隙岩体的联合作用机制，研究了裂隙岩体的损伤断裂变形特性以及锚索的空间锚固效应，并将其应用于水利、采矿等地下工程的破坏稳定分析中。杨强等<sup>[68-69]</sup>基于经典弹塑性理论，开展了水利工程中岩石破坏的损伤变形破坏研究，并已取得一定实际应用成果。

### 3.3 岩石动力响应

近 10 a 来，EI 数据库收录岩石动力响应方面的论文 3 640 篇，从 2002 年开始，该领域论文数几乎呈直线增长，从 2002 年的 63 篇增加到 2011 年的 698 篇(见图 7(a))。SCI 数据库共收录该领域文

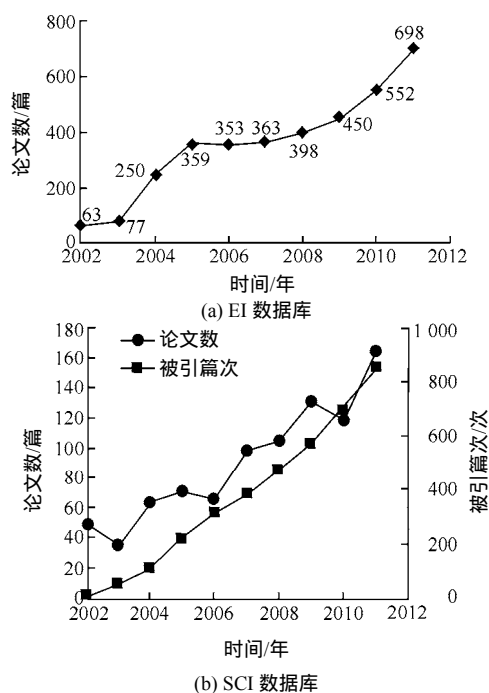


图 7 近 10 a 岩石动力响应领域发表的论文统计

Fig.7 Statistics of papers about rock dynamic response in last decade

章 931 篇，累计被引 4 452 次，去除自引的被引频次 4 234 次，被引文献 3 759 篇，每项平均被引 4.78 次。该领域的研究十分活跃，其引用次数亦呈直线上升，2011 年超过 800 次(见图 7(b))。

#### 3.3.1 岩石动力特性

岩石动力特性的研究主要包括冲击动力学和爆炸动力学两大方面。冲击动力学必须考虑率效应带来的影响，针对不同加载率或应变率段的动力学试验，借助不同的加载试验机进行。李海波等<sup>[70-71]</sup>利用动载试验机系统研究了应变率小于  $10 \text{ s}^{-1}$  时岩石的动力学特性；针对应变率为  $10^1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  的岩石力学特性试验研究，主要利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验机及轻气炮等进行。在 SHPB 试验中，利用常规的矩形波加载会带来很大的试验误差。为此，李夕兵等<sup>[72]</sup>提出了获得岩石动态应力-应变全图测试合理加载波形的试验方法，在此基础上，提出利用半正弦波加载是 SHPB 岩石冲击试验的理想波形，目前该方法已经被国际岩石力学学会动力学委员会推荐为建议方法，并被应用到深部岩石力学的研究热点——岩石动静组合加载和诱导致裂试验研究中<sup>[73-74]</sup>。在岩石爆炸动力学特性研究中，研究应力波在岩土介质中传播与衰减规律具有很重要的理论意义和工程实践价值。在地下工程中，可以借助应力波在岩石介质中传播与衰减的规律，达到减少爆炸波对地下工程及建筑物破坏效应的目的；在



矿山破岩等实际工程中,充分利用其爆炸能量以获得最佳破坏效果;在地震工程中,要了解地震波对地面建筑物、构筑物的破坏效应。为此,夏祥等<sup>[75]</sup>对广东岭澳核电站爆破开挖岩体的损伤特征进行了系统研究。王辉<sup>[76]</sup>通过力学分析和数值计算,讨论了球形装药在岩体内爆炸后冲击波的传播规律,以及介质内各点应变率的估算方法。

钱七虎等<sup>[77-78]</sup>结合工程地质特点,根据断层与节理裂隙带的几何关系,研究爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律。李夕兵等<sup>[72]</sup>研究了应力波与非固结或可滑移岩石结构面的相互作用。鞠杨等<sup>[79]</sup>应用 SHPB 试验和分形方法,研究节理岩石的应力波动与能量耗散关系,分析节理面不规则结构对应力波穿越节理时的波动性质、非弹性变形和能量耗散的影响。

席道瑛等<sup>[80]</sup>采用低频共振(0.1 ~ 10.0 Hz)的方法,研究了饱和流体大理岩和砂岩的衰减与模量色散,发现不同的饱和流体和岩石,其衰减峰的位置及其宽度等均不相同。王占江等<sup>[81]</sup>总结分析了在花岗岩中进行的系列化爆试验应力波测试数据,按岩性区分,给出了自由场应力波衰减规律。李欢秋等<sup>[82]</sup>对应力波在有软回填层的地下复合圆形结构的介质中传播规律及与复合结构体系的相互作用进行了研究,给出了应力波在有软回填层的地下复合圆形结构介质中的传播规律。卢文波和 W. Hustrulid<sup>[83]</sup>基于柱面波理论、长柱状装药中的子波理论以及短柱状药包激发的应力波场 Heelan 解的分析,推导了岩石爆破中质点峰值振动速度衰减公式,可反映诸如炸药种类和特性、钻孔孔径、装药结构及岩性参数等因素对质点峰值振动速度的综合影响。

### 3.3.2 岩石动力本构关系

李夕兵等<sup>[84]</sup>通过对试验结果的分析,获得加载频率和表面形态对节理闭合变形性质的影响规律,从而建立考虑率效应的节理本构模型。王武林等<sup>[85]</sup>通过室内大块度岩石球面波爆炸试验,用拉格朗日多点测量和分析方法对实测结果进行数值计算,获得了大理岩材料在弹塑性区的本构关系。唐春安<sup>[86]</sup>采用长杆自由下落冲击圆球形岩石试样,通过测量杆端荷载,建立荷载-位移-落高的关系,得到 3 种岩石试样的荷载-位移全过程曲线。王礼立<sup>[87]</sup>基于拉格朗日分析方法研究率型材料的动态力学性能,对传统拉格朗日分析方法,从理论分析和数值模拟 2 个方面相结合进行了检验分析,建立拉氏分析

与 ZWT 本构模型之间的定量关系。席道瑛等<sup>[88]</sup>通过岩石长杆冲击试验,获得了大理岩、砂岩在干燥、饱水、饱油情况下的衰减系数及其动态本构关系。尚嘉兰等<sup>[89]</sup>用预埋于不同位置的应力探头监测冲击产生的平面应力波在岩样中的应力历史波形,获得花岗岩的动态本构关系。杨军等<sup>[90]</sup>通过岩石冲击损伤试验获得岩石动态损伤与超声波衰减规律的关系,并建立基于声波衰减规律及其与能量耗散率关系的岩石爆破损伤模型。王明洋等<sup>[91-92]</sup>对爆炸与冲击作用下的岩体真实破坏过程作了微细观研究,建立了工程实用的介质在爆炸和冲击作用下统一分阶段连贯的、不同时空尺寸的动力本构模型。为模拟深部岩体的赋存环境,研究了单轴无侧限压缩、具有初始静水压力时的加载与卸载条件下的岩石应力状态。单仁亮等<sup>[93]</sup>结合对花岗岩和大理岩实测冲击破坏本构曲线的分析,将统计损伤模型和黏弹性模型相结合,建立了考虑应变率效应的岩石冲击破坏时效损伤模型。

在爆破破岩效应研究方面,王靖涛<sup>[94]</sup>提出了裁剪脉冲加载法的概念,用应力波在孔边的绕射理论阐明了产生多裂纹的机制。林俊德<sup>[95]</sup>研究发现,岩石的非线性应力-应变关系、岩体中的低刚性夹层和区域性非均质决定于早期爆炸地震波的频率特性演化。千吨和万吨地下爆炸的地震实测数据表明:在数公里到数千公里爆心距范围内,频谱曲线的差别不显著,爆炸当量、爆心距和爆点地质的影响不显著,地运动速度频谱的卓越频率为 2 ~ 4 Hz。

### 3.3.3 岩石声、电磁传播特性

岩石声学特性理论是超声波测试技术及其工程应用的理论基础,主要包含岩石超声波和超声衰减理论研究 2 个部分。张晖辉等<sup>[96]</sup>开展了循环荷载下大试样岩石的破坏前兆声发射试验。张茹等<sup>[97]</sup>研究了单轴多级加载岩石的破坏声发射特性。赵明阶和吴德伦<sup>[98]</sup>从岩石的变形特性出发,通过等效裂纹模型的建立,建立了岩石在单轴加载、卸载和重加载过程中声传播特性的理论模型,利用广泛采用的超声波纵波速度与孔隙率的关系式,最终导出单轴压缩荷载作用下岩石超声纵波速度与应力的理论关系式。李月等<sup>[99]</sup>对地基层状岩石纵波波速与密度相关性开展试验研究。

岩石电磁学主要研究岩石电学性质的频率特性、岩石电阻率与岩性、孔隙率和饱和度之间的关系。李夕兵和古德生<sup>[100]</sup>基于地壳中的众多岩石具有压电晶体结构物质的事实,利用长波近似,最早

提出应力波和电磁波在岩体中相互耦合的理论，给出 P 波、S 波和表面波与所耦合的电磁波间的定量关系；后来系统研究了应力波作用下节理面前后电磁辐射强度的变化规律，以及岩石破裂电磁辐射频率与岩石属性参数的关系。冯启宁和郑学新<sup>[101]</sup>对岩石电学性质的试验进行了深入研究，建成从低频(100 Hz)到超高频(3 000 MHz)全频段内测量岩石电阻率、介电常数、阳离子交换量和激发极化电位的物理模拟装置。孙钧等<sup>[20-23]</sup>通过电磁辐射试验，研究了长江三峡船闸工程边坡岩体在不同含水状态(饱水、自然、干燥)、不同受载和不同应力水平下，闪云斜长花岗岩流变属性与其电磁辐射脉冲强度之间的依附关系，以及岩石破碎、断裂程度与其电磁辐射脉冲之间的关系，探究了各个不同加载环境下岩石蠕变变形孕育、发生和发展过程中的电磁辐射效应及其现象规律，以获求岩石蠕变断裂的电磁辐射信号特征。

对于岩石脆性材料开裂时伴随的物理现象，除人们很早关注的声发射、热等现象以外，开裂破坏时的电磁信号特征也是最近研究的热点和难点。王恩元等<sup>[102-103]</sup>对岩石脆性材料的研究表明，在应力梯度作用下，带电粒子向开裂界面聚集，同时由于裂纹尖端的电场强度高达 10 V/m，可能有带电粒子被加速并发射出去，这也将导致裂纹尖端电荷量的增加，当应力达到一定水平时，首先在最薄弱的截面上开裂；同时，带电粒子随着裂纹的开裂并加速扩展而一起作加速运动，产生电磁辐射。对岩石破裂出现的电磁现象研究，最早来源于对地震减灾的研究，除了大量的现场观测研究外，一些实验室的研究主要集中在以下几方面：(1) 研究岩石磁性随应力变化的磁化率、剩磁强度；(2) 研究岩石电性随应力变化的视电阻率；(3) 研究岩石破裂时的电场变化的自电位；(4) 研究岩石破裂时的电磁辐射的电磁波。

对于脆性材料断裂过程中的力-电-磁耦合的理论研究，目前主要包括公理化方法和变分原理方法建立的模型等<sup>[104]</sup>。关于岩石缺陷的断裂全过程中起裂、裂纹稳定到非稳定扩展瞬态的力电磁响应的理论和试验研究，还鲜见文献报道。

### 3.4 岩石多场耦合模型与应用

近 10 a 来，EI 数据库收录岩石多场耦合模型与应用方面的论文 1 646 篇，且呈增加趋势，2011 年达 334 条(见图 8(a))。该领域在 SCI 数据库中共 783 篇，总被引频次 6 040 次，去除自引的被引频次

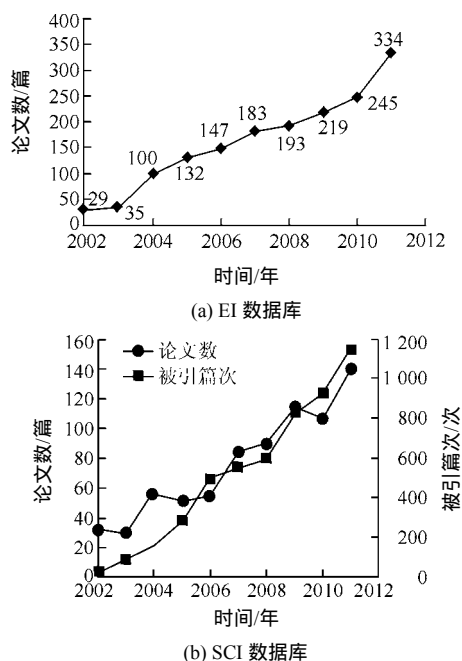


图 8 近 10 a 岩石多场耦合模型与应用领域发表的论文统计  
Fig.8 Statistics of papers about multifield coupling model of rocks and application in last decade

5 772 次，施引文献 4 188 篇，去除自引的施引文献 4 020 篇，每项平均引用 7.71 次(见图 8(b))。

岩石介质多场耦合主要研究在温度场(T)、渗流场(H)、应力场(M)和化学场(C)的耦合作用下(以下称 THMC)，气体、液体、气液二相流体或化学流体在岩石的孔隙中传输，固体骨架和流体中的温度分布及其骨架变形与破坏规律。DECOVALEX 项目是研究高放核废料深埋性能与安全评价的一项国际合作项目，始于 1992 年，目前已经滚动开展了 5 期，它致力于对岩体 THMC 耦合过程进行理论和试验分析。中国科学院武汉岩土力学研究所和武汉大学加入了 DECOVALEX 第 4 和 5 期的研究工作。我国诸多学者在多场耦合方面做了大量的研究工作。周创兵等<sup>[105-106]</sup>提出了水利水电工程渗流多层次控制理论，对岩石渗流-应力场进行了较深入的研究，同时研究了广义多场耦合概念，在 THMC 耦合系统中考虑了工程作用(E)，形成 THMC-E 广义耦合系统。赵阳升<sup>[107]</sup>对多孔介质耦合作用进行了系统研究，在理论方面做了许多有益的工作。王媛等<sup>[108-109]</sup>研究了单裂隙面渗流与应力的耦合特性、耦合机制与渗控关键技术。冯夏庭等<sup>[110-112]</sup>对岩石化学-应力-渗流耦合开展了细观力学试验，同时利用自开发的 EPCA 程序进行数值模拟研究，二者进行了对比验证，并提出岩石工程设计新方法和岩爆演化机制。张玉军等<sup>[113-114]</sup>利用自开发的有限元

程序对孔隙-裂隙介质中热-水-应力进行了数值模拟，同时考虑了核素迁移、应力腐蚀和压力溶解等效应。唐春安等<sup>[115]</sup>对岩石破裂过程中的渗流-应力-温度耦合进行了大量的数值模拟。刘泉声等<sup>[116]</sup>开展了三峡花岗岩温度与时间相关的力学性质试验，并对岩石时温等效效应与煤矿深部岩巷围岩稳定控制进行了较系统的研究。陈卫忠等<sup>[117]</sup>以岩石孔隙比和含水量 2 个基本量为出发点，考虑温度对渗流黏滞系数和孔隙比的影响、温度梯度引起的流体流动以及流体流动引起的热对流的影响，推导了非饱和岩石在温度-渗流-应力耦合作用下的平衡方程、流体物质守恒方程。周辉等<sup>[118-119]</sup>分析了岩石材料变形破坏过程中的有效应力系数和渗透性演化规律，研究了高渗透压、非 Darcy 流条件下的理论模型。陈益峰等<sup>[120]</sup>针对核废料地质处置问题，建立了岩土介质多相流 THM 全耦合模型。这些成果对我国水利水电、采矿、油气开发、核废料处置、CO<sub>2</sub> 储存以及地下洞室的工程设计与施工具有重要的指导意义<sup>[121-124]</sup>。

### 3.5 深部岩体分区破裂化与岩爆

#### 3.5.1 分区破裂化

随着深部工程的不断增加，深部一些新的岩石力学现象不断出现。自 2003 年，中国学者开始关注并开展了分区破裂化现象的研究。被 SCI 数据库收录论文 15 篇，被引用 8 次。EI 数据库收录情况见图 9 (2012 年的数字下降为收录时间滞后所致，下同)。

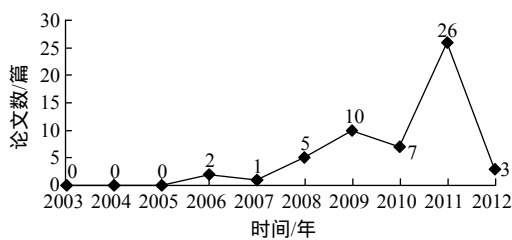


图 9 近 10 a 分区破裂化领域 EI 收录的论文统计

Fig.9 Statistics of EI indexed papers about zonal fracturing in last decade

钱七虎和李树忱<sup>[125]</sup>在国内率先介绍了国外学者关于分区破裂化现象研究的成果，指出了今后的研究方向及其关键问题，提出了深部围岩分区破裂化现象是一个与空间、时间效应密切相关的科学现象，认为分区破裂化效应的产生，一方面是由于高地应力和开挖卸载导致的围岩“劈裂”效应引起的，另一方面是由于围岩深部高地应力和开挖面应力释放所形成的应力梯度而产生的能量流引起的；并强调高应力条件下因卸载形成应力梯度，导致径

向加速度和位移，因此高应力条件下开挖卸载的动力过程是形成分区破裂的重要原因。分区破裂化的定性规律(影响因素)中应该考虑巷道、洞室开挖的速度(卸载速度)；指出分区破裂化与应变型岩爆是一个问题的 2 个侧面，都决定于岩体开挖后岩石积聚的变形势能转变为动能和破坏能的分配比例。

近几年以来，中国学者在一些学报上发表了分区破裂化效应研究的成果。在围岩分区破裂形成机制方面，顾金才等<sup>[126]</sup>通过模拟试验认为轴压力较大是轴向断裂的重要原因。周小平和钱七虎<sup>[127]</sup>计算了不同荷载速率影响下的破裂区数量和大小。戚承志等<sup>[128]</sup>分析了围岩变形破坏随时间演化和破裂区分布问题。另外，贺永年和张后全<sup>[129]</sup>认为能量分布曲线的峰值点是不稳定能态位置，而张拉破坏将形成能耗最小的稳定态，因此可通过围岩能量分布曲线来确定张拉断裂发生位置。

#### 3.5.2 岩爆

岩爆是一种世界性的地质灾害，极大地威胁着矿山和岩土工程施工人员和设备的安全。EI 和 SCI 数据库近 10 a 收录岩爆领域论文情况见图 10(SCI 数据库中累计论文 182 篇，累计被引 369 次，篇均被引 2.03 次)。

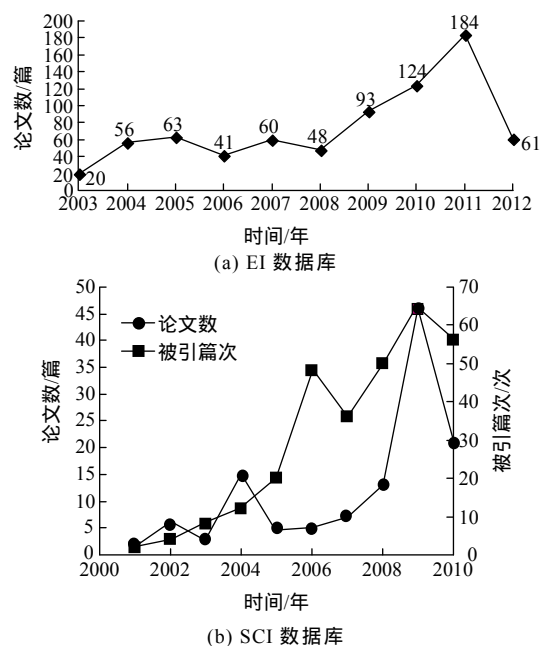


图 10 近 10 a 岩爆领域发表的论文统计

Fig.10 Statistics of papers about rockburst in last decade

目前，冯夏庭等<sup>[130-134]</sup>在岩爆方面做了大量的研究工作。但是，由于岩爆问题极为复杂，还没有成熟的理论和方法。研究岩爆发生的原因、条件以及各种因素的相互作用，是预测、预报和控制岩爆

发生的理论基础，得到国内外学术界和工程界的广泛重视。在实验室研究和现场监测与调查的基础上，各国学者从不同的角度先后提出强度理论、刚度理论、能量理论、岩爆倾向理论、三准则理论、失稳理论、三因素理论、孕育规律等一系列重要成果，其中强度理论、能量理论和冲击倾向理论占主导地位。岩爆倾向性研究中采用统计学方法、模糊数学、神经网络、支持向量机、随机森林等多种方法。岩爆的室内试验一直是岩爆机制研究的难点，何满潮等<sup>[135]</sup>研发了应变岩爆机制试验系统和冲击型岩爆试验系统，在室内完成了近300次岩爆试验，并为意大利、伊朗、新加坡、加拿大等国家做了同类试验，代表了目前岩爆试验的先进水平。宫凤强等<sup>[74, 136]</sup>利用多功能岩石动静组合试验系统，确认了“一维及三维静应力+冲击扰动”组合加载下岩爆的释能现象，为发展大尺寸岩石真三轴电液伺服诱变(扰动)试验系统提供了重要参考。预测及评价岩爆危险性最为有效的手段是微震监测，广大学者在该领域开展了大量的研究，并在水电、矿山和隧道工程中得到了广泛应用。

### 3.6 岩体非线性理论与加固稳定分析

#### 3.6.1 岩体非线性理论

岩体稳定性评价的困难在于岩体系统高度非线性，这使得人们对岩体变形破坏机制缺乏足够认识，引进的数学、力学理论有时失效，定量化描述难以实现。非线性问题的解析求解一般较为困难，需要具体问题具体分析。岩体失稳的表现形式各异，但都是在外界影响下介质物理力学性质的突变引起的，相关研究更具有理论指导作用。

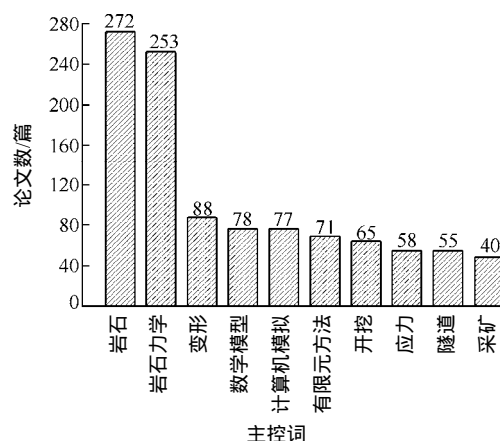
近年来，在岩石工程中应用的非线性理论主要有耗散结构理论、协同论、分叉、分形、突变、混沌、支持向量机、神经网络、遗传算法、随机森林、统计学方法等理论，其中文献较多的是遗传算法(SCI数据库共检索到52篇，累计被引156次，每项平均被引3次)，神经网络(SCI数据库共检索到27篇，累计被引85次)，支持向量机(SCI数据库共检索到20篇，累计被引18次)。以上非线性分析方法主要应用于岩体分级、边坡稳定等级分类、岩体参数确定、岩爆等级计算等领域，这些理论正成为解决非线性复杂大系统问题的有力工具，也是研究岩石非线性系统理论的数理基础。

#### 3.6.2 岩体加固稳定分析

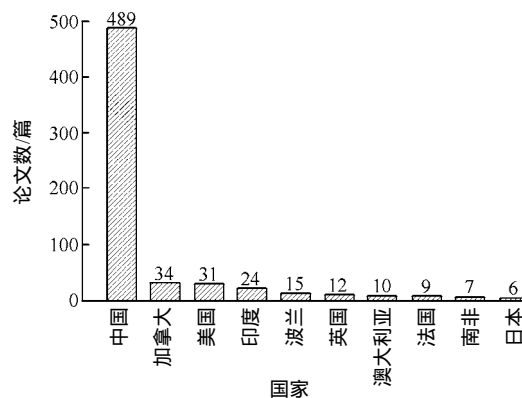
在稳定性分析方面，极限平衡法、块体理论、

强度折减法、矢量和法得到了广泛的应用<sup>[137-142]</sup>。

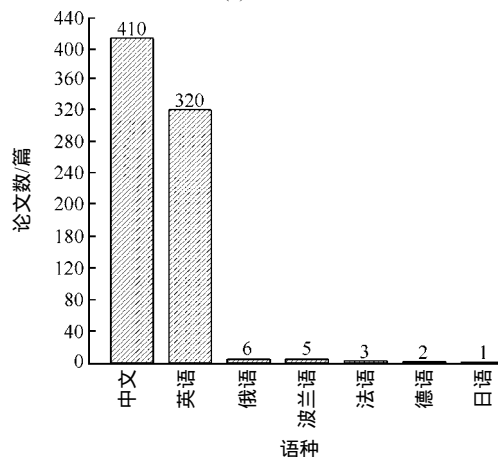
从EI数据库检索结果(见图11)可以看出，岩体加固稳定性分析成果较多涉及工程开挖、隧道和采矿工程领域；国内学者与加拿大、美国、印度等国学者有着较为广泛的交流；文献所用的语种多为中文和英语；研究成果在2007年最多，2008年减小后又回升。SCI数据库检索结果见图12，累计收录文献79篇，被引37次，篇均被引0.47次。显然，相对于岩石力学基础研究而言，该领域文献在SCI和EI数据库中收录较少，即研究成果较少，而相关研究直接服务于岩体工程领域，今后应予以加强。



(a) 主控词分布



(b) 发文国家



(c) 发表语种

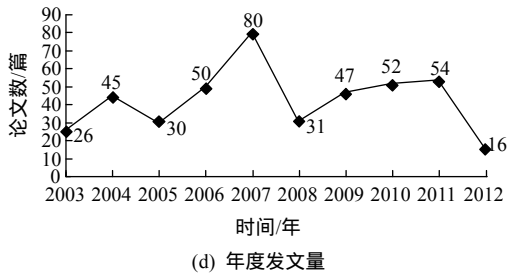


图11 近10 a岩体加固稳定分析领域EI收录的论文统计

Fig.11 Statistics of EI indexed papers about rock mass reinforcement and stability analysis in last decade

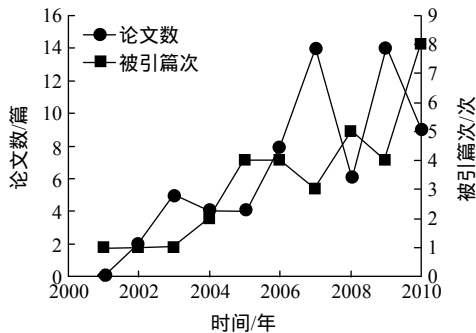


图12 近10 a岩体加固稳定分析领域SCI收录的论文统计

Fig.12 Statistics of SCI indexed papers about rock mass reinforcement and stability analysis in last decade

### 3.6.3 软岩的力学特性与加固理论

工程软岩是指在工程力作用下能产生显著塑性变形的工程岩体。该方向论文在EI数据库中的分布见图13。工程岩体是软岩工程研究的主要对象,是巷道、边坡、基坑开挖扰动影响范围内的岩体。

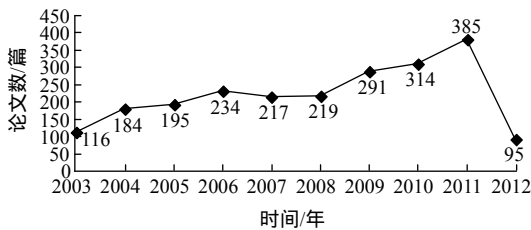


图13 近10 a软岩工程领域EI收录的论文统计

Fig.13 Statistics of EI indexed papers about soft rock engineering in last decade

随着开采深度的增加,巷道工程围岩所处的地质力学环境越来越复杂,采用常规支护设计的深部软岩巷道工程稳定性越来越难以控制,安全事故时有发生。其主要原因在于,在深部高地应力场和开采扰动作用下,巷道工程岩体开挖后处于塑性大变形阶段,采用常规支护方式易使支护体与围岩之间出现刚度、强度和结构不耦合,从而造成巷道变形加剧,难以控制。冯豫、陆家梁、郑雨天、朱效嘉等在不断总结重大工程实践的基础上,在运用新奥

法基本原理的过程中,提出联合支护方法。董方庭、方祖烈研究了松动圈理论和主次承载区支理论。何满潮等<sup>[17-18]</sup>针对此类软岩问题提出了以锚索支护为核心的耦合支理论和技术。

随着岩体工程特别是地下岩体工程规模、数量的不断增大、增多,岩体工程加固理论得到了发展。为了研究荷载超出结构极限承载力后的结构行为,或者说结构失稳行为,杨强等<sup>[68-69]</sup>依托三维弹塑性有限元分析的迭代算法研究了变形加固理论,建立了基于最小塑性余能原理的结构稳定性理论,并采用一些算例和地质力学模型试验对破坏结果进行了验证。李新平等<sup>[143]</sup>将复合材料力学的研究方法和观点引入到层状岩体-锚杆支护系统,将其看成是一种由层状岩体(基体材料)、锚杆(纤维材料)、砂浆(黏结材料)构成的单向复合增强材料,通过理论分析、数值模拟和对比模型试验,定量分析这种等效复合材料的力学性质与各组分材料之间的关系。李纪三<sup>[144]</sup>在调查分析和试验的基础上,研究浆液、钢筋、围岩固结成整体的三位一体联合加固理论。

锚杆支护理论涉及到的研究较多。近10 a来,张乐文和李术才<sup>[145]</sup>对锚杆作用机制做了大量的研究与探讨,在一些经典锚杆支护理论的基础上,进一步揭示了锚杆支护的实质,研究了下面几个具有代表性的理论:全长锚固中性点理论、松动圈理论、围岩强度强化理论、锚固力与围岩变形量关系理论和锚固平衡拱理论。

### 3.6.4 岩质边坡稳定分析

岩质边坡定量分析方法是边坡稳定分析中的核心内容,是判断边坡是否稳定的最重要依据。陈祖煜<sup>[146]</sup>完善了边坡稳定分析的 Morgenstern-Price 法,对其数学力学表达和理论内涵做出了重要改进,给出了力和力矩平衡方程式的解析解,并根据剪应力成对原理提出了求解该方程所必需的边界条件。郑颖人等<sup>[147-156]</sup>的研究表明,各种力学参数的模糊性、随机性对工程稳定性的评价有着至关重要的影响,并且受到越来越多的重视。并应用有限元强度折减法丰富了各类边(滑)坡及其支护的稳定分析方法。

根据现有工程案例进行分析,从而对边坡稳定性的状况及其发展趋势进行定性或半定量的说明和解释。葛修润等<sup>[141-142]</sup>提出了边坡稳定性分析矢量和法,并采用该方法计算地震荷载下边坡的稳定性。李宁和钱七虎<sup>[150]</sup>提出岩质高边坡稳定性分析与评价中的4个准则。汪小刚<sup>[151]</sup>对节理岩体倾覆型滑坡破坏进行稳定性分析。陶振宇等<sup>[152-156]</sup>较系



统地研究了边坡岩体参数模糊性特点及其对边坡稳定性影响。朱大勇和钱七虎<sup>[157]</sup>推导出满足所有 6 个平衡条件的三维边坡严格极限平衡解答和满足 5 个平衡条件的三维边坡准严格极限平衡解答。郑宏等<sup>[158-159]</sup>通过取整个滑体为受力体并基于滑面应力修正,实现满足所有 6 个平衡条件的严格三维极限平衡法,该方法将安全系数的求解归结为一个代数特征值问题,从而解决了解的不收敛难题。房定旺等<sup>[160]</sup>研究了层面和节理变化对安全系数的影响,说明节理力学参数的不确定性对边坡稳定性评价有重大影响。尽管如此,关于节理岩体边坡计算参数模糊不确定性对边坡稳定性评价方面的影响研究还处于起步阶段。周维垣等<sup>[161]</sup>根据节理岩体的力学特征提出了适用于节理岩体的弹塑性断裂模型,该模型可以反映断续节理在荷载作用下的断裂扩展、贯通以及屈服破坏过程,既考虑了三维非正交节理的作用,也考虑了节理面粗糙对节理强度和变形的影响。据此编制了三维有限元程序,并应用于一实际工程的拱坝坝肩岩体稳定性分析。

### 3.7 煤炭矿山压力理论与特殊开采

钱鸣高<sup>[162]</sup>提出了采场上覆岩层在受开采影响而破断后形成的结构模式,即“砌体梁”力学模型,建立了视老顶岩层为弹性基础上暴露板的力学模型,为综采工作面液压支架工作阻力的确定及老顶来压预测预报奠定了基础。宋振骥和蒋金泉<sup>[163]</sup>提出以岩层运动为中心的“传递岩梁”理论,并指出了煤矿岩层控制研究重点与方向。姜耀东等<sup>[164]</sup>在国内外现有研究成果的基础上,总结冲击地压发生特征,结合我国最新冲击地压案例,分析了冲击地压的诱因及控制对策。缪协兴<sup>[165]</sup>长期从事煤矿充填及其对开采岩层控制研究与相关设备的研发,在“三下”充填采煤技术方面取得了良好进展。

## 4 中国岩石力学试验技术的进展

近 10 a 来, EI 数据库收录岩石力学试验技术领域的论文 6 403 篇; SCI 数据库收录 2 343 篇, 总被引频次 8 056 次, 去除自引总频次 7 316 次, 每项平均被引 3.44 次。年度发表文献及引用情况见图 14。由图 14 可见, 该领域每年发表文献及被引次数增加明显。

### 4.1 岩石力学基本试验方法

岩石力学的试验方法包括: 岩石室内试验、现场岩体变形试验、现场岩体强度试验、岩体应力测试、声波法、声发射法等。尽管 20 世纪 60 年代以

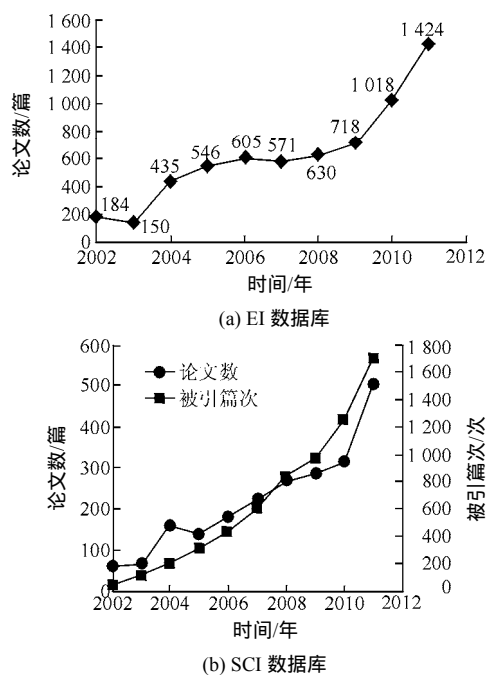


图 14 近 10 a 岩石力学试验技术领域发表的论文统计  
Fig.14 Statistics of papers about rock mechanics testing techniques in last decade

后,大部分试验工作转向现场,有忽视室内试验的倾向,但实践表明室内试验对岩石力学理论的发展仍然非常重要。在进行室内试验时,要重视现场原状岩样的采取,这是目前岩石力学试验的关键所在,此外要求原位试验标准化,这是两项基本原则<sup>[166]</sup>。1982 年,水利电力部颁发了《水利水电工程岩石试验规程》(试行),使岩石试验逐步实现标准化,也使试验目的更加明确。水利水电科学研究院结合小浪底水库工程,用地质力学模型研究了泄洪洞合理间距问题,并给出了试验成果。清华大学彭守拙、谷兆祺等为小浪底水库地下厂房围岩稳定问题进行了平面模型试验,取得了与有限元法分析相符的结果。水电部东北勘测设计院正在研制大型地下结构三轴压力模型试验装置,可用于研究由于开挖洞室或采取支护措施后,在三轴压力条件下围岩的应力、应变状态,为工程设计提供依据<sup>[167]</sup>。

### 4.2 试验仪器设备

葛修润和周百海<sup>[168]</sup>采用先进的设计方案、独特的结构布局、计算机直接控制和自适应控制技术,研制了一套功能多样化、体积小型的 RMT-64 型,以及后续的 RMT-150, RMT-201 和 RMT-301 型岩石和混凝土多功能数控电液伺服试验机系列产品,并进行了大量试验研究。蔡美峰<sup>[169]</sup>采用新研制的仪器成功在 2 800 m 深部进行了水压致裂地应力测量。葛修润和侯明勋<sup>[170]</sup>提出了一种新的三维地应力测量方法,即钻孔局部壁面应力解除法

(BWSRM), 并给出基于 BWSRM 的地应力测井机器人的研制过程和具体实施步骤, 最后给出地应力测井机器人在锦屏水电站埋深达 2 430 m 处科研试验洞内的试验结果。李小春等<sup>[171]</sup>在茂木式真三轴试验机和 RT3 型岩石高压真三轴仪的基础上, 采用多级轨设计实现框架横置, 提高了加载的稳定性且方便试样和传感器装卸, 并首次加入了对中装置, 提高试验的可重复性。

#### 4.3 岩体结构模型试验技术

20 世纪 50 年代中后期, 我国就开展了地质力学模型试验研究。总参工程兵科研三所顾金才等<sup>[127]</sup>进行了长期、大量的各种模型试验研究, 取得丰硕成果。例如通过室内物理模型试验对地下洞室开挖和预应力大锚索加固机制进行了系统研究。自从李干荣<sup>[172]</sup>于 1956 年在我国首次对广东流溪河拱坝进行结构试验以来, 除进行模型材料研究外, 很多学者进行了大量的拱坝坝基和坝肩稳定性模型试验研究<sup>[173-179]</sup>, 先后完成了龙羊峡重力拱坝模型试验和该重力拱坝枢纽整体三维小块体地质力学模型试验, 之后研究了二滩、李家峡、紧水滩、东风、小湾、凤滩、铜头、溪洛渡、锦屏 I 级等拱坝的整体稳定性、大坝超载能力与破坏机制以及基础加固措施的实际效果, 关于这些拱坝稳定、安全系数的研究成果被写入混凝土拱坝设计规范。长江科学院岩基所对构皮滩、江口双曲等拱坝进行了试验研究<sup>[24, 40]</sup>, 他们也以三峡工程为背景做了大量的地质力学模型试验, 取得了很多成果。中国科学院武汉岩土力学研究所对三峡工程左岸厂房坝段进行了深层抗滑稳定性物理模拟试验。近年来, 针对当前一批高拱坝(如溪洛渡、锦屏、小湾等)开展跟踪三维试验研究, 在试验规模、方法和技术方面已经取得了重要成果。

自 20 世纪 70 年代以来, 地质力学模型得到了广泛应用, 扩大了结构模型试验研究的领域。近年来, 张林等<sup>[175, 177]</sup>采用降低断层、夹层等结构面强度的方法对国内一些拱坝和高边坡进行了坝肩稳定分析。地下结构大型三维地质力学模型试验从 21 世纪初有了快速发展。李仲奎等<sup>[178-179]</sup>在 2000 年首先研制了大比尺三维地下洞室群模型试验系统, 该系统最大外部尺寸达到 6.5 m×5.5 m×2.5 m (长×高×宽), 模型本身质量超过 10<sup>5</sup> kg, 采用离散化技术模拟了复杂三维地应力场, 并采用了机械臂和微型 TBM 及内窥技术, 最早实现复杂地下洞室的隐蔽开挖模拟。此后, 张强勇等<sup>[180-181]</sup>研制了可任意拆卸、组合拼装的大比尺三维隧道模型试验

系统, 该系统最大外部尺寸为 5.2 m×4.5 m×2.7 m (长×高×宽), 其自动液压控制系统具有压力高、保压时间长、可进行稳步梯级加载等特点, 能够满足各类地下工程的三维和平面地质力学模型试验的要求, 并可用于分区破裂化研究。

## 5 岩石力学数值分析方法

近 30 a 来, 岩石力学数值分析方法在我国得到了迅速发展, 出现了有限差分、有限元、无网格法、边界元(对连续岩土介质)、离散元、块体元、流形元(对非连续岩土介质)及其耦合方法等各种数值模拟技术, 使复杂岩石力学与工程问题的分析与设计发生了巨大的变化。该方向发表的论文在 EI 数据库中的分布情况如图 15 所示。近 30 a 来, SCI 数据库中检索相关论文 1 360 篇, 累计被引 3 846 次, 每项平均被引 2.83 次, 相比较而言, 该方向收录的论文数仅次于岩石力学基础研究。

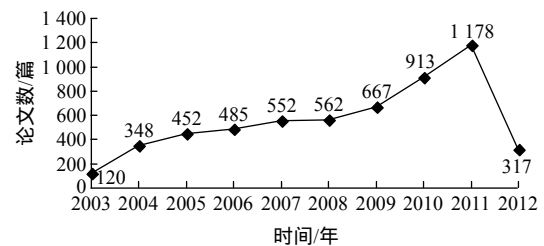


图 15 近 10 a 数值分析领域 EI 收录的论文统计

Fig.15 Statistics of EI indexed papers about numerical analysis in last decade

岩石力学的数值计算不仅取代了传统的线弹性力学试验(如缩尺模型的光弹试验), 而且在指导、优化乃至替代岩石非线性和大变形试验方面显示出重要作用。值得指出的是, 以强度折减法和超载法为基础, 正在发展数值极限分析方法, 通过数值极限分析不仅可以求得应力和应变, 还可求出极限荷载和安全系数, 能直接服务于工程设计。郑颖人和杨明成<sup>[147]</sup>早期引入并采用的强度折减法被广泛应用于水利、公路、露天坑等边坡的稳定性分析, 尤其是应用于隧道的稳定分析, 使隧道稳定首次有了定量的安全系数指标; 发表在《岩土工程学报》和《岩石力学与工程学报》的文献, 被引频次分别为 1 029 和 587 次(数据来源: 中国期刊网), 是这 2 个期刊自创刊以来的最高值。

### 5.1 有限元法

在我国, 紧密围绕重大岩土工程, 有限元数值计算方法现已不仅由线性发展到高度非线性和大变形问题(由二维发展到三维), 同时, 还可以考虑流



变、渗流、温度、热与应力场耦合，损伤、断裂以及波动和动力效应。如围绕着三峡工程，有限元数值分析方法也曾发挥了积极的作用。中国水电科学研究院、清华大学、中国科学院武汉岩土力学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、长江科学院和同济大学等单位都对三峡永久船闸高边坡岩体的稳定与变形控制进行了深入细致的探讨分析。钱七虎<sup>[34]</sup>研究了用动力有限元求解瞬态波动过程中产生的高频振荡和波形畸变的原因，提出了提高计算精度的有效方法及相应的确定单元尺寸及时间步长的方法。卢文波和W. Hustrulid<sup>[83]</sup>应用大型有限元计算软件LS-DYNA对延长装药在岩石介质中爆破破坏过程的应力场、传播过程、岩石爆破漏斗进行了数值模拟，对不同方式下数值模拟的结果与理论解进行了比较，并在爆破漏斗破坏范围的定性和定量确定方面进行了探讨。唐春安和赵文<sup>[182]</sup>建立了用细观非均匀性模拟宏观非线性、用连续介质力学方法解决非连续介质力学问题的新型数值分析方法(RFPA)，实现了岩石破裂全过程的数值模拟，为岩石工程灾害研究提供了新的分析工具，并在岩土工程宏观破裂分析中得到了较好的应用；目前，RFPA方法在国内外的知名度较高。刘耀儒等<sup>[183]</sup>通过基于EBE-PCG方法的有限元法，可避免形成整体刚度矩阵，进而显著减少对内存的需求，可有效地实现并行计算，为水电工程大规模数值计算提供一种新的可能。

## 5.2 离散元法

近年来，离散元法发展迅速，已成为解决岩土力学问题的一个重要方法。离散元法一般认为是P. Cundall于1971年提出的，其后相继出现了圆形(球形)颗粒的离散元法、椭圆形离散元法和离散元法同其他数值方法的耦合，使离散元法的应用得以日益广泛。离散元法首先由王泳嘉和刘连峰<sup>[184]</sup>介绍到我国，并将该方法应用到节理岩体的数值分析，研究了采矿的数值模拟与自然崩落机制。鲁军等<sup>[185]</sup>则建立了三维离散元的自动剖分系统。夏明和周科平<sup>[186]</sup>利用颗粒流对三轴抗压下脆性岩石破裂过程进行了详细的数值模拟。李启月等<sup>[187]</sup>运用三维离散元程序3DEC，对一露天矿高陡节理岩质边坡在自然状态下的静态响应和爆破荷载作用下的动态响应进行了模拟，分析了爆破荷载作用下边坡质点的振动速度以及位移和应力特征。

## 5.3 非连续变形分析法(DDA)

非连续变形分析(DDA)法是石根华<sup>[188]</sup>于20世纪80年代末期发展起来的一种新型的数值计算方法，在结构、岩体和土体的非连续大变形力学过程模拟方面具有较大潜力。石根华分别于1988年和1989年开发了二维DDA程序，包括4个部分：DDA

CUT, DDA FORWARD, DDA BACKWARD和DDA GRAPH, 分别用来进行前处理、正分析、反分析和后处理计算。刘君和孔宪京<sup>[189]</sup>对三维块体进行了有限元网格剖分，采用有限元方法描述块体内部的位移场和应力场，块体运动和块体接触采用DDA方法来模拟；利用完全的一阶多项式作为位移插值函数，研究了三维DDA方法的位移场模式。

## 5.4 三维快速拉格朗日分析

FLAC是美国ITASCA公司开发的连续介质的快速拉格朗日分析程序，FLAC<sup>3D</sup>是其三维版本。FLAC程序由李仲奎等早期引入我国<sup>[190-193]</sup>，其中FLAC<sup>2D</sup>程序于1992年引入，并应用于贵州东风水电站边坡及北京十三陵抽水蓄能电站地下厂房的分析中<sup>[191]</sup>。FLAC<sup>3D</sup>于1996年通过中澳合作的长澳公司引入，并先后应用于澳大利亚煤矿边坡和溪洛渡、锦屏、官地等大型地下厂房分析<sup>[190-191]</sup>。盛谦、吴顺川、周维垣和朱焕春等也都较早将其应用于岩土和水利工程<sup>[194-196]</sup>。

FLAC和FLAC<sup>3D</sup>采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程，并应用混合单元离散模型，可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形，尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析及模拟施工过程等领域有其独到的优点。戴荣等<sup>[191]</sup>还独立开发了拉格朗日并行算法程序，用于大型复杂工程结构的精细模拟，扩大了快速拉格朗日法的应用范围。陈占军等<sup>[197]</sup>运用FLAC<sup>3D</sup>的动力分析模块进行岩石边坡爆破动力响应分析，建立了能够反映主要地质构造的三维岩石边坡数值模型。

## 5.5 无网格法

无网格法采用滑动最小二乘法所产生的光滑函数近似场函数，它可以求解复杂边界条件的边值问题，只需节点信息而不需单元信息，故信息简单，特别适用于岩土工程数值分析。寇晓东等<sup>[190]</sup>在前人的基础上作了改进：(1)对权函数作了研究，并给出新的权函数；(2)采用罚函数法引入边界条件。胡云进等<sup>[195]</sup>借鉴二维无网格法的理论和实现技术，对基于正交基函数的三维滑动最小二乘法、已知位移边界条件的处理以及三维无网格法基本方程的推导和实现方法等进行了探讨，在此基础上，编制了三维线弹性无网格法计算程序，并研究了一种用无网格法模拟弹性体中三维不连续面的处理方法，该法采用可视准则来处理不连续面对高斯点影响域的隔离作用，并考虑不连续面对整体平衡方程组的贡献。为此，还推导了不连续面对整体平衡方程组的贡献方程，研究了模拟不连续面实际接触状态的非线性迭代算法。在上述基础上，编制了模拟三维不连续面的无网格法程序。

## 5.6 数值流形法(NMM)

石根华于1995年提出数值流形法(NMM),并采用有限覆盖体系,使得连续体、非连续体的整体平衡方程都可以用统一的形式来表达,有限元法和DDA均为NMM的特殊形式,NMM使DDA和有限元在理论上和表达形式上得到了统一。NMM在计算连续体与非连续体的大变形或进行动力分析以及开裂追踪方面有着独特的优势,目前已经得到了学术界和工程界的普遍注意,是一个重要的前沿研究领域。

## 5.7 数字图像分析方法

岳中琦等<sup>[198]</sup>综合数字图像处理理论、几何矢量转换技术与有限元网格自动生成原理,提出了岩土工程材料的数字图像有限元分析方法。以岩土工程材料的图像为研究对象,先采用数字图像算法获得材料的真实细观结构,并通过几何矢量转换技术将二元图像的细观结构转化为矢量化的细观结构,在矢量化细观结构的基础上,再利用网格自动生成技术生成材料细观结构的有限元网络。朱珍德等<sup>[199]</sup>还提出用数字图像相关技术处理不同含水状态下红砂岩(含花岗岩)试样随时间动态劣化过程的灰度分布图;进一步探讨不同注水时间的红砂岩细观结构劣化状态及裂纹扩展的定量描述,从而为分析与定量评价膨胀红砂岩随时间膨胀变形破坏机制寻求一种可靠的研究方法。

此外,还有其他新型数值分析方法,比如细胞自动机方法、格构方法、围绕边界元方法的一些数值方法等在此不一一赘述。

# 6 展望岩石力学十大挑战性难题

我国在岩石力学与工程的研究和学科发展中开展了卓有成效的工作,为国家大规模岩石工程建设做出了突出贡献。但是,全面系统的岩石力学研究和工程实践仅有50多年的历史,面临不断涌现的新问题与新挑战,需要进一步创新发展,深化学科内涵,拓展学科领域,协同迎接我国岩石力学与工程研究的百年纪元。

## 6.1 岩石力学与地质学科的交叉融合

岩石力学研究对象与岩石工程载体是不同成因和长期演化形成的地质体。它的物质组成、结构构造和赋存状态构成了它的地质本质性。王思敬<sup>[200]</sup>指出,“岩石的地质本质性、物理本属性和力学的本构性应该是岩石力学与工程的三大属性。这三者的知识贯通和共识必将导致岩石力学与工程研究的深化和总体水平的提升”。岩石力学本构性研究中如

何考虑岩石物质特性、结构性及其赋存状态(如地应力、地下流体、气体和地温等)与工程作用力的相互影响和制约,还有待进一步深入研究。在解决岩石工程问题中,研究岩体的地质本质性和确定设计力学参数及判定岩石工程问题的关系,需要得到进一步重视。工程地区的地质动力过程和地质灾害需要同工程安全分析评价结合起来。地质、地球物理勘测所取得的信息,如何更加充分运用到岩石力学与工程研究中,也仍然是值得关注的问题。地质学家从岩石的地质本质性出发推演岩石力学特性及岩石工程行为自然义不容辞,并为此建立与发展了工程地质学,作为现代地球科学分支,已有百年以上的历史。老一辈岩石力学专家,如,L. Müller,陈宗基先生等,十分重视岩石力学与地质学科的结合,非常强调深入工程现场和把握正确的岩石力学基本概念,指引了岩石力学学科健康发展的方向,进一步的多学科交叉融合也必将将对岩石力学与工程研究有所裨益。

## 6.2 岩石力学中渗流、力学、热力学与化学损伤力学的耦合分析

岩石同赋存环境营力相互作用,不可避免地使其变形和破裂、破坏机制更为复杂,破坏过程体现了强非线性特征。岩石中流体不仅影响到有效应力,而且可造成岩石部分物质软化或溶解,改变应力、应变的条件,同时又会改变渗流场特征。岩石热力学效应、渗流热力学效应及化学损伤效应互相有着密切的联系。对于水库、堤坝、隧道建设、水下采矿,应重点研究场区地下水渗流场分布情况,加强研究大范围高精度探水的装备及技术意义重大。开展这些方面的研究有益于探索岩石力学的协同统一模型,发展多场、多过程和多尺度的耦合分析方法。

## 6.3 岩石力学多尺度问题的协同统一

岩石介质存在固有的空间多尺度特性,反映了不同尺度岩石结构性的构成和分布特征,在复杂工程中研究其性能时必须加以考虑。岩石力学参数的取得离不开试验平台的建设和开发。通过室内试验、大尺度现场试验、工程原型试验和现场监测不同尺度的有机融合分析,可更好地理解岩石的力学性质及其工程行为。因此,发展现场原位试验平台建设和室内小尺寸平台建设同样重要,二者相得益彰,相辅相成。将来利用废弃的矿山、人防工程或地下工程,并结合地下防护、地下能源储存与废弃物处理等领域的研究需要,建立国家层面的岩石力学与工程地下实验室十分重要。由于模型简化和理

想化等原因，借助于室内小尺度和工程现场大尺度融合分析，开展岩石介质、岩石结构面、岩体结构微-细-宏观多尺度试验和数值研究是将来的热点和难点，特别是岩石量子力学的研究有助于将岩石力学推进到一个新水平。

#### 6.4 岩石多时间尺度的时效变形研究

岩石的时效变形中流变特性的研究已经取得了较丰硕的成果，而在不同加载路径及应力变化条件下的岩石时效变形试验和分析研究尚待深入。饱和岩石的蠕变特性已有所研究，而在渗流条件下，渗透压和渗透梯度的影响、渗流流体对岩石化学蚀变影响、温度及热力效应以及岩石破裂过程的时效性等有待进一步研究，以期探索协同时效变形理论和试验研究方法，发展多过程和多尺度耦合流变本构模型。而对各向异性岩石及损伤断裂岩石的非线性流变本构模型也有待进一步完善。

#### 6.5 岩石初始应力场和工程扰动效应统一分析

岩石应力、应力释放及地应力场演化是岩石力学过程中的内在力源，理应受到高度的重视。但是关于岩石的内应力状态及可能的释放条件同岩石的结构和力学性能尚研究得不够深入。岩石初始应力是由自重应力、现今活动构造应力、残余构造应力和成岩结晶和胶结应力等构成。它们对岩石变形和破坏的作用不同，在岩石强度和工程扰动效应的研究中，需要进一步研究与分析非协调变形产生的自平衡封闭应力，以及多年冻土和可燃冰工程热扰动问题。而在深部及破碎岩体中准确测定原岩应力的方向、大小，也是岩石工程中的难点问题。

#### 6.6 岩石工程自然条件与人工影响的协同研究

各种特殊条件下的岩石参数变量，如破碎度、强度、热物理指标以及超长时间(万年以上)条件下的岩石力学性质试验方法获取的参数等；特殊条件有喀斯特地貌、软弱岩层、高密度的破碎体、高应力、高速的水体流动、高温、低温、高低温循环、不利的化学条件、复杂的地质构造等；地下工程(建筑)主要包括大型地下洞室、地下水电站、地下核废料储存工程、CO<sub>2</sub>地质封存、地热开采与利用、盐岩/花岗岩中油气地下储存工程、压气储能工程等，对这些地质因素与人工扰动之间的相互作用还要进一步研究，以确保工程设计和建设的安全可靠与经济合理。

#### 6.7 现场原型监测、地质力学模型与数值计算多手段联合分析

目前，属于中国自己的核心监测技术和设备较为欠缺，建议深化基础研究，研发具有自主知

识产权的核心高性能监测设备和大型结构地质力学模型试验系统。很多数值模拟的研究仅仅是在对商业软件的简单使用上，对其基本理论的研究和进一步开发相对贫乏；而且我国自主创新研发的数值模拟软件较少。建议在基础理论、模型及核心技术问题上深入研究。在这方面，尤其需要加强以现场监测和大型地质力学模型为依据的数值计算综合分析平台的建设，真正实现监测、模型与分析一体化。

#### 6.8 岩石热力学与地热、非常规油气开发利用

地球内部蕴藏着极为巨大的热能和非常规油气能源，其开发利用极为重要，但是在科学技术上具有很大的挑战，要求多学科协同研究。岩石力学通过岩石热力学、岩石破裂力学、岩石渗流力学等耦合研究可以对地热和非常规油气开发利用做出重要贡献。此外，致密岩油气、页岩气、煤层气、天然气水合物等开发利用、深部矿井热害控制与资源化、CO<sub>2</sub>地质封存与核废料地质处置等也都属于相类似的新领域研究。这要求对地球深部岩石力学特性及深部岩石致裂机制、压裂控制及渗流特征做进一步创新研究。岩石内部气体对岩石破裂及碎裂化作用有待进一步开展试验和理论研究。

#### 6.9 岩体中非协调变形和破坏研究

岩体一般都具有初始的微观和细观裂纹，这些初始微、细裂纹对岩体的连续性和变形协调性的影响是一个值得研究的问题。地下工程(含巷道、隧道和洞室)开挖卸荷将会造成围岩中产生更多的次生微、细和宏观裂纹，从而使得裂纹的密度和尺寸发生变化，相应地也会对岩体变形非协调性产生新的重要影响，这也许是产生深部围岩分区破裂化、围岩深部岩体破裂和岩爆的力学本质，因此值得下大功夫对深部岩石力学中非连续性、非协调变形和破坏进行深入研究。

#### 6.10 岩石静、动力学协同统一

静态与动态岩石力学均有甚多的深入研究成果，然而不同加载速率及加载波形对岩石变形、破裂和破坏的协同统一研究尚嫌不够。通过系统的静、动态岩石力学试验，了解其机制的异同性，探索统一的破坏判据和强度理论十分必要。不同的静、动荷载在岩石中的应力分布和超应力荷载有所区别，破裂、破坏耗散能量不同。这反映了岩石固有的碎裂化能的不同，因而动、静态岩石强度存在某种关联性。当动载作用于具有一定静应力状态的岩石，其动、静荷载的综合效应机制尚未得到充分的

研究。岩石爆破动力学的理论研究,以及在爆炸力作用下岩石的变形场及本构模型均有待进一步完善。高能爆炸和核爆炸中岩石受到超高温、高压作用,岩石的局部熔融和挤压碎裂化使得其本构方程极为复杂,目前的研究尚嫌不够。

上述十大挑战性难题和重要问题或许可通过运用现代岩石力学理论和方法与古代大型地下空间实例(如中国龙游2000 a前古人凿大型近地面地下空间群等)研究分析相结合而有望得到解决。至少,开展这方面的研究对解决大型地下空间围岩百年或千年以上的长期稳定和完整性会有所启迪和发现,以期找到解决思路和方法。

岩石力学博大精深,拙稿仅从文献统计角度总结和分析 30 a 来我国学者在岩石力学方面(岩石工程进展将另文介绍)取得的研究进展,在此基础上提出了未来岩石力学十大挑战性难题。期望引起我国岩石力学与岩土工程界的关注,推进我国岩石力学持续发展。尽管投入不少精力和时间,但限于水平,不当与错误在所难免,敬请大家斧正。

**致谢** 感谢王思敬院士、杨林德等教授认真审阅及研究生夏明、戴兵、程立和柳姣在收集数据和资料整理方面所做的工作。

### 参考文献(References, 多为中文):

- [1] WANG Sijing, YANG Zhifa, FU Bingjun. Century achievement of rock mechanics and rock engineering in China[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004.
- [2] ZHANG Haifeng, SHE Shigang. Selection of domestic high-quality papers for China's geotechnical journals in English edition[J]. Chinese Journal of Scientific and Technical Periodical, 2013, 24(2): 379-382.
- [3] YU Maohong, LIU Jiming, ODA Yoshiya, et al. On basic characteristics and innovation of yield criteria for geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1745-1758.
- [4] GAO Hong, ZHENG Yingren, FENG Xiating. Deduction of failure criterion for geomaterials based on maximum principal shear strain[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 518-524.
- [5] YIN Youquan. Stability of rock mechanics and rock engineering[M]. Beijing: Beijing University Press, 2011.
- [6] HA Qiuling. Study on the anisotropic unloading rock mass mechanics for the steep-high rock slope of the Three Gorges project permanent shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 603-618.
- [7] LI Jianlin. Unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.
- [8] XU Dongjun, GENG Naiguang. The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1985, (1): 72-80.
- [9] CAO Wengui, ZHAO Minghua. Study of rectified method of Mohr-Coulomb strength criterion for rock based on statistical damage theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2043-2049.
- [10] CAO Wengui, ZHAO Minghua, LIU Chengxue. Modified Drucker-Prager strength criterion based on statistical damage theory for rock[J]. Water Conservancy and Hydropower, 2004, (9): 18-24.
- [11] ZHOU Hui, ZHANG Kai, FENG Xiating, et al. Elastoplastic coupling mechanical model for brittle marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2398-2409.
- [12] ZHANG Kai, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Experimental research on elastoplastic coupling character of marble[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2425-2434.
- [13] BAI Bing, LI Xiaochun, SHI Lu, et al. A plastic hardening mode based on virtual strength parameters[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(8): 24-28.
- [14] YOU Mingqing, SU Chengdong. Heterogeneity of rock and the definition of Young's modulus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 757-761.
- [15] LU Yingfa, TIAN Bin, YU Tiantang. Testing study of mechanical properties of saturated rock by different loading paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Sup.1): 5065-5071.
- [16] LU Yingfa, WU Xinxing, SHAO Jianfu. Anisotropic damage coupled modeling of saturated porous rock[J]. Science China, 2010, 53(10): 2681-2690.
- [17] HE Manchao, WANG Shuren. Application of numerical method of large deformation to soft rock engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 185-189.
- [18] HE Manchao, CHEN Xin, LIANG Guoping, et al. Software system for large deformation mechanical analysis of soft rock engineering at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 931-944.
- [19] TAN Tjongkie. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 1-20.
- [20] SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [21] SUN Jun. Rheology of rock and soil materials and its application to engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [22] LIU Baoguo, SUN Jun. Identification of rheological constitutive model of rock mass and its application[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 1998, 22(4): 10-14.
- [23] SUN Jun. Study of long-term deformation and stability of the high rock slope of Three Gorges Project on Yangtze River[J]. Journal of Tongji University, 2001, 29(3): 253-258.
- [24] ZHOU Huoming, XU Ping, WANG Fuxing. In-situ compressive creep testing study of shiplock slope rock mass of Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Sup.1): 1882-1885.
- [25] CHEN Youliang, SUN Jun. Rheological fracture of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(4): 323-327.
- [26] XIA Caichu, SUN Jun. Distinction of rheological model and determination of parameters on creep tests[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1996, 24(5): 498-503.
- [27] XIA Caichu, WANG Xiaodong, XU Chongbang. Method to identify rheological models by unified rheological model theory and case study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1594-1600.
- [28] LIU Baoguo, SUN Jun. Rock viscoelastic constitutive model identification method[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(1): 18-25.
- [29] XIA Caichu, Yan Zhijian. Research on elasto-viscoplastic constitutive relation of marble under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 459-466.
- [30] WANG Laigui, HE Feng, LIU Xiangfeng, et al. Nonlinear creep model and stability analysis of rock specimens[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1640-1642.
- [31] XUE Lin. Determination of creep compliance of surrounding rock of a circular tunnel and identification of its mechanical model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 338-344.
- [32] ZHANG Xiangdong, LI Yongjing, ZHANG Shuguang, et al. Creep theory of soft rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1635-1639.

- [33] JING L, TANG C F, STEPHANSSON O. DECOVALEX—an international cooperative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics abstracts*, 1995, 32(5): 389–398.
- [34] QIAN Qihu. Some advances in rock blasting dynamics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 1945–1967.
- [35] YANG Chunhe, CHEN Feng, ZENG Yijin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(11): 1602–1604.
- [36] YANG Chunhe, LIANG Weiguo, WEI Donghou, et al. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4409–4417.
- [37] YUAN Longwei. *Rheological mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 1986: 3–33.
- [38] WANG Delin, ZHANG Mengtao, WANG Baolun. Creep bending test of rock specimens[J]. *Journal of China Coal Society*, 1982, 7(2): 64–69.
- [39] LEI Chengdi. Creep test of rocks at Ertan hydropower project[J]. *Hydropower Engineering Research*, 1989, (1): 1–11.
- [40] ZHOU Huoming. Experimental study of mechanical properties of rock mass in excavation-disturbed zone of Three Gorges Project shiplock slope[C]// *Engineering Rock Mechanics*. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1998: 157–160.
- [41] YU Xuefu. Discussion on rock mechanics and reply to the paper “some comments on rock mechanics and fracture mechanics” [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(5): 498–510.
- [42] KOU Shaoquan. Rock fracture mechanics[J]. *Mechanics in Engineering*, 1989, 11(6): 1–4.
- [43] ZHOU Wei yuan, YAN Gongrui. Micro-mechanical research on fracture process zone in rock-concrete materials[J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 1997, 13(1): 1–9.
- [44] LIU Yuangao, ZHOU Wei yuan, ZHAO Jidong, et al. Discontinuous bifurcation model of damage localization for jointed rocks and its application[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 35(4): 411–418.
- [45] XIE Heping, GAO Feng. The fractal features of the damage evolution of rock materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1991, 10(1): 74–82.
- [46] XU Weiya, WEI Lide. Study of statistical damage constitutive model of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 787–791.
- [47] ZHOU Jiawen, YANG Xingguo, FU Wenxi, et al. Experimental test and fracture damage mechanical characteristics of brittle rock under uniaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(6): 1172–1183.
- [48] YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing, et al. The discussion about damage constitutive relation of rock under uniaxial stress identified by CT[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1997, 18(2): 29–34.
- [49] TANG Liansheng, ZHANG Pengcheng, WANG Sijing. Testing study of effects of chemical action of aqueous solution on crack propagation in rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 822–827.
- [50] ZHU Zhende, XU Weiya, ZHANG Aijun. Mechanism analysis and testing study of damage and fracture of brittle rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1411–1416.
- [51] WANG Qizhi, JIA Xueming. Determination of elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks by using flattened Brazilian disk specimen—part 1: analytical and numerical results[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1285–1289.
- [52] ZHANG Sheng, WANG Qizhi, LIANG Yalei. Research on influence of crack length on test values of rock dynamic fracture toughness[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1691–1696.
- [53] ZHU Nailong, RAO Yungang. Study of constitutive model for quasi-rock materials based on statistical fracture theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3939–3944.
- [54] QIN Yueping, SUN Wenbiao, WANG Lei. Analysis of damage mechanics model of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 702–705.
- [55] WANG Ren, ZHAO Yusheng, CHEN Yong, et al. Development of conjugate-shear fracture from a crack in marble[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1986, 8(2): 191–196.
- [56] WANG Gengsun. Study of multi-crack interaction[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1993.
- [57] LIN Peng. Brittle failure behaviour of medium containing flaws and pores[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(8): 1283.
- [58] HUANG Kaizhu, LIN Peng, TANG Chun'an, et al. Mechanisms of crack coalescence of pre-existing flaws under biaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 808–816.
- [59] ZHU Weishen, CHEN Weizhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study of propagation of echelon pattern cracks[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 1998, 19(4): 355–360.
- [60] LI Shiyu. Normal stress criterion of three-dimensional brittle fracture[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1990, 33(5): 547–555.
- [61] TENG Chunkai, YIN Xiangchu, LI Shiyu, et al. Experimental study of three-dimensional fracture in plate specimens with nonpenetrating crack[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1987, 30(4): 371–378.
- [62] LI Shucai, ZHU Weishen. Fracture damage mechanism of discontinuous jointed rock mass under the state of complex stress and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(2): 142–146.
- [63] LI Shucai, ZHU Weishen. An application of anchoring fracture-damage model to the stability analysis of the underground chambers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, (8): 52–56.
- [64] GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. A real in-time CT triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(5): 497–503.
- [65] GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. Primary study of CT real-time testing of fatigue meso-damage propagation law of rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(2): 191–196.
- [66] ZHOU Hongwei, XIE Heping. Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis[J]. *Physics Letters A*, 2004, 325(5-6): 355–362.
- [67] ZHANG Qiangyong, LI Shucai, CHEN Weizhong. Reinforcing model for anchor cable in jointed rock mass and its application to engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(9): 1465–1468.
- [68] YANG Qiang, XUE Lijun, WANG Renkun, et al. Reinforcement theory considering deformation mechanism of rock mass and non-equilibrium elasto-plastic mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(20): 3704–3712.
- [69] YANG Qiang, LIU Yaoru, CHEN Yingru, et al. Deformation reinforcement theory and global stability and reinforcement of high arch dams[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1121–1136.
- [70] LI H B, ZHAO J, LI T J. Triaxial compression tests of a granite at different strain rates and confining pressures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(8): 1057–1063.
- [71] ZHAO J, LI H B, WU M B, et al. Dynamic uniaxial compression tests on granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(2): 273–277.
- [72] LI Xibing, GU Desheng, LAI Haihui. On the reasonable loading stress waveforms determined by dynamic stress-strain curves of rocks by SHPB[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(2): 125–130.
- [73] GU Desheng, LI Xibing. Modern mining techniques for metallic ore deposits[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [74] GONG Fengqiang, LI Xibing, LIU Xiling, et al. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(10): 2076–2085.
- [75] XIA Xiang, LI Junru, LI Haibo, et al. Study of damage characteristics

- of rock mass under blasting load in Ling'ao nuclear power station , Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(12) : 2 510 – 2 516.
- [76] WANG Hui. Study of mechanism of rock damage and crack by explosion loading[M. S. Thesis][D]. Xi'an : Xi'an University of Science and Technology , 2003.
- [77] QIAN Qihu , CHEN Shihai. Blasting vibration effect[J]. Blasting , 2004 , 21(2) : 1 – 5.
- [78] WANG Mingyang , QIAN Qihu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1995 , 17(2) : 42 – 46.
- [79] JU Yang , LI Yexue , XIE Heping , et al. Stress wave propagation and energy dissipation in jointed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(12) : 2 426 – 2 434.
- [80] XI Daoying , LIU Wei , YI Liangkun , et al. Attenuation of stress wave in different fluid-saturated marble and sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1996 , 15(Supp.1) : 456 – 459.
- [81] WANG Zhanjiang , LI Xiaolan , GE Kai , et al. Free-field stress wave propagation induced by underground chemical explosion in granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22(11) : 1 827 – 1 831.
- [82] LI Huanqiu , LU Fangyun , WU Xiangyun , et al. Study of regulation of stress wave propagation in rock mass with compound structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22(11) : 1 832 – 1 836.
- [83] LU Wenbo , HUSTRULID W. An improvement to the equation for the attenuation of the peak particle velocity[J]. Engineering Blasting , 2002 , 8(3) : 1 – 4.
- [84] LI Xibing , WANG Weihua , MA Chunde. Constitutive model of rock joints under compression loads with different frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(2) : 247 – 253.
- [85] WANG Wulin , HUANG Lixing , LU Tongsheng. Determination of dynamic constitutive relation of rock by using Lagrange multi-point measurement and analytical method[C]// Buildings on Complex Rocks. Beijing : Science Press , 1986.
- [86] TANG Chun'an. Catastrophe during rock fracture[M]. Beijing : China Coal Industry Publishing House , 1993.
- [87] WANG Lili. Progress in studies of dynamic response of structures and materials under explosive/impact loading[J]. Explosion and Shock Waves , 2001 , 21(2) : 37 – 42.
- [88] XI Daoying , ZHENG Yonglai , ZHANG Tao. The experimental research into dynamic constitutive laws of marble and shale[J]. Explosion and Shock Waves , 1995 , 15(3) : 259 – 266.
- [89] SHANG Jialan , SHEN Letian , ZHAO Yuhui , et al. Dynamic constitutive equation of the Bukit Timah granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1998 , 17(6) : 634 – 641.
- [90] YANG Jun , GAO Wenxue , JIN Qiankun. Experiment on dynamic damage property of rock and new damage model for rock fragmentation by blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2001 , 20(3) : 320 – 323.
- [91] WANG Mingyang , QIN Chengzhi , QIAN Qihu. Study of rock failure under blasting and impact[J]. Journal of Liaoning Technical University : Natural Science , 2001 , 20(4) : 385 – 389.
- [92] WANG Mingyang , FAN Pengxian , LI Wenpei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2010 , 29(2) : 234 – 239.
- [93] SHAN Renliang , XUE Yousong , ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22(11) : 1 771 – 1 776.
- [94] WANG Jingtao. Study of cutting pulse loading method[J]. Scientia Sinica , 1987 , (10) : 1 113 – 1 120.
- [95] LIN Junde. Analysis of frequency characteristics of explosive seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1996 , 15(Supp.1) : 476 – 480.
- [96] ZHANG Huihui , YAN Yuding , YU Huaizhong , et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load—fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(21) : 3 621 – 3 628.
- [97] ZHANG Ru , XIE Heping , LIU Jianfeng , et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multi-level loadings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2006 , 25(12) : 2 584 – 2 588.
- [98] ZHAO Mingjie , WU Delun. Ultrasonic properties of rock under loading and unloading : theoretical model and experimental research[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1999 , 21(5) : 540 – 546.
- [99] LI Yue , LIU Li , LI Yumei , et al. Testing study of relativity between longitudinal wave speed and density of layered rock[J]. Sichuan Building Science , 2009 , 35(1) : 125 – 128.
- [100] LI Xibing , GU Desheng. Investigation on couplings of stress wave and electromagnetic wave in rocks[J]. Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy , 1992 , 23(3) : 260 – 266.
- [101] FENG Qining , ZHENG Xuexin. Principle of well logging devices[M]. Dongying : China University of Petroleum Press , 1991.
- [102] WANG Enyuan , HE Xueqiu , LIU Zhentang , et al. Frequency spectrum characteristics of electromagnetic emission of loaded coal[J]. Journal of China University of Mining and Technology , 2003 , 32(5) : 487 – 490.
- [103] WANG Enyuan , HE Xueqiu , LIU Zhentang , et al. Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application[J]. Journal of China Coal Society , 2003 , 28(4) : 366 – 369.
- [104] LI Xibing , WAN Guoxiang , ZHOU Zilong. The relationship between the electromagnetic radiation and rock masses parameters during rock failure[J]. Chinese Journal of Geophysics , 2009 , 52(1) : 253 – 259.
- [105] ZHOU Chuangbing , CHEN Yifeng , JIANG Qinghui , et al. Introduction to generalized multi-field coupling analysis for complex rock masses[M]. Beijing : China Water Power Press , 2008.
- [106] ZHOU Chuangbing , CHEN Yifeng , Jiang Qinghui , et al. On generalized multi-field coupling for fractured rock masses and its applications to rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2008 , 27(7) : 1 329 – 1 340.
- [107] ZHAO Yangsheng. Multi-field coupling in porous media and its engineering response[M]. Beijing : Science Press , 2010.
- [108] WANG Yuan , XU Zhiying , SU Baoyu. Complete coupled analysis of fluid flow and elastoplastic stress in complicated fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2000 , 19(2) : 177 – 181.
- [109] SU Baoyu , ZHAN Meili , WANG Yuan. Experimental study of seepage and stress coupling characteristics of fracture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 1997 , 19(4) : 73 – 77.
- [110] FENG X T , CHEN S L , ZHOU H. Real-time computerized tomography(CT) experiments on sandstone damage evolution during triaxial compression with chemical corrosion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2004 , 41(2) : 181 – 192.
- [111] PAN P Z , FENG X T , HUANG X H , et al. Coupled THM processes in EDZ of crystalline rocks using an elasto-plastic cellular automaton[J]. Environmental Geology , 2009 , 57(6) : 1 299 – 1 311.
- [112] FENG Xiating , HUDSON J A. Rock engineering design[M]. London : Taylor and Francis , 2011.
- [113] ZHANG Yujun , ZHANG Weiqing. 3D thermo-hydro-mechanical-migratory coupling model and FEM analyses for dual-porosity medium[J]. Scientia Sinica Technologica , 2010 , 40(12) : 1 426 – 1 436.
- [114] ZHANG Yujun. Coupled thermo-hydro-mechanical model and finite element analyses of dual-porosity fractured medium for ubiquitous-joint rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2009 , 28(5) : 947 – 955.
- [115] TANG Chun'an , MA Tianhui , LI Lianchong , et al. Rock failure issues in geological disposal of high-level radioactive wastes under multi-field coupling function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(Supp.2) : 3 932 – 3 938.
- [116] LIU Quansheng , XU Xichang , YAMAGUCHI T , et al. Testing study of mechanical properties of the three gorges granite concerning temperature and time[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2001 , 20(5) : 715 – 719.
- [117] CHEN Weizhong , TAN Xianjun , WU Guojun , et al. Study of thermo-hydro-mechanical coupling model for unsaturated rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2007 , 26(12) : 2 395 – 2 403.

- [118] ZHOU Hui, ZHANG Kai, FENG Xiating, et al. Elasto-plastic coupling mechanical model for brittle marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2 398–2 409.
- [119] HU Dawei, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, et al. Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2 749–2 754.
- [120] CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing, TONG Fuguo, et al. A mathematical model for fully coupled THM processes with multiphase flow and code validation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 649–665.
- [121] LIU Jianjun, LIU Xiangui, HU Yareng, et al. Study of fluid-solid coupling flow in low permeable oil reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 88–92.
- [122] WANG Enzhi, WANG Hongtao, SUN Yi. Study of seepage flow model in double fracture systems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(4): 400–406.
- [123] WEI Ning, LI Xiaochun, WANG Ying, et al. Development of rock-fluid reaction-flow coupling testing apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 29(7): 1 499–1 505.
- [124] ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study of propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 109–113.
- [125] QIAN Qihu, LI Shuchen. A review of research on zonal disintegration phenomenon in deep rock mass engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1 278–1 284.
- [126] GU Jincui, GU Leiyu, CHEN Anmin, et al. Model test study of mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433–438.
- [127] ZHOU Xiaoping, QIAN Qihu. Zonal fracturing mechanism in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 877–885.
- [128] QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang. Constitutive relations of porous elasto-plastic media[J]. Journal of Mining Science, 2009, 45(4): 339–346.
- [129] HE Yongnian, ZHANG Houquan. Discussion on theory and practice of zonal disintegration in surrounding rocks of deep roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 369–2 376.
- [130] FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433–444.
- [131] CHEN Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561–569.
- [132] DONG Longjun, LI Xibing, TANG Lizhong, et al. Mathematical functions and parameters for microseismic source location without premeasuring speed[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2 057–2 067.
- [133] TANG Lizhong, WANG Linghui, ZHANG Jun, et al. Seismic apparent stress and deformation in a deep mine under large-scale mining and zonal hazardous seismic prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1 168–1 178.
- [134] GONG Fengqiang, LI Xibing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 012–1 018.
- [135] HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study of rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 856–876.
- [136] GONG Fengqiang, LI Xibing, LIU Xiling. Preliminary experimental study of characteristic of rock subjected to 3D coupled static and dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1 179–1 190.
- [137] SHI Genhua. Geometrical approach of rock mass stabilization in rock mass stability analysis[J]. Scientia Sinica, 1978, (4): 487–495.
- [138] WANG Sijing, YANG Zhifa, LIU Zhuhua. The rock mass stability analysis for underground engineering[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [139] ZHANG Qihua, WU Aiqing, SHI Genhua. Application of key block theory to analysis of rock stability for underground plant in Baise hydraulic project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 609–2 614.
- [140] ZHANG Zixin, SUN Jun. Stereo-analytic method for block theory and its application to stability analysis of a cave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 756–1 760.
- [141] LIU Yanzhang, GE Xiurun, LI Chunguang, et al. Stability analysis of slope and dam foundation based on vector method safety factor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 130–2 140.
- [142] GUO M W, GE X R, WANG S L. Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(3): 282–288.
- [143] LI Xiping, WANG Tao, SONG Guihong, et al. Study of composite anchoring theory and numerical simulation test on layered rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 654–3 661.
- [144] LI Jisan. Preliminary study of the theory of combined trinity-reinforcement and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 1989, 10(1): 43–53.
- [145] ZHANG Lewen, LI Shucui. Current state and development of anchorage support for rocks and soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2 214–2 221.
- [146] CHEN Zuyu. The generalized method of slices for slope stability analysis and its modifications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(4): 11–27.
- [147] ZHENG Yingren, YANG Mingcheng. Classification unification of calculation formulation for safety factor of slope stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 836–2 841.
- [148] ZOU Guangdian, WEI Rulong. Study of theory and method for numerical solution of general limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 363–370.
- [149] ZHENG Hong, THAM L G, LIU Defu. A slice-free method for stability analysis of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 27(7): 1 285–1 291.
- [150] LI Ning, QIAN Qihu. Four criteria of stability analysis and assessment of high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1 754–1 759.
- [151] WANG Xiaogang, JIA Zhixin, CHEN Zuyu. The research on stability analysis of toppling failure of jointed rock slopes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, (3): 7–12, 21.
- [152] TAO Zhenyu, PENG Zuzeng. Fuzzy mathematical method for the classification of rock mass[J]. Journal of Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering, 1981, (3): 20–28.
- [153] LI Wenxiu. Problem of fuzzy probability for slope failure of opening mine[J]. China Civil Engineering Journal, 1988, 21(3): 81–89.
- [154] JIANG Zhongming, ZHANG Xinmin, XU Weiya. Stability analysis of slope based on analyzing fuzzy character of parameters[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Science, 2003, 25(1): 52–55.
- [155] XU Weiya, JIANG Zhongming, SHI Anchi. Slope stability analysis using fuzzy sets theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 409–413.
- [156] JIANG Zhongming, ZHANG Xinmin, XU Weiya. Study of fuzzy finite element method of rock and soil slope analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 922–927.
- [157] ZHU Dayong, QIAN Qihu. Rigorous and quasi-rigorous limit equilibrium solutions of 3D slope stability and application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1 513–1 528.
- [158] ZHENG Hong. A rigorous three-dimensional limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1 529–1 538.
- [159] ZHENG H, YANG Z L, SUN G H. Extremum solutions to the limit equilibrium method subjected to physical admissibility[J]. Natural



- Hazards, 2013, 65(1): 79–96.
- [160] FANG Dingwang, XU Chuanhua, MAO Quansheng. Slip-split failure of rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 688–671.
- [161] ZHOU Weiyuan, YANG Ruoqiong, ZHOU Litian. A three-dimensional finite element stability analysis of jointed rock masses at dam abutment using elasto-plastic fracture model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 20(4): 39–48.
- [162] QIAN Minggao. A structural model of overlaying strata in longwall and its application[J]. Journal of China Institute of Mining and Technology, 1982, (2): 1–11.
- [163] SONG Zhenqi, JIANG Jinquan. The current research situation and developing orientation of strata control in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2): 128–134.
- [164] JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, HE Manchao, et al. Investigation on mechanism of coal mine bumps based on mesoscopic experiments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 901–907.
- [165] MIAO Xiexing. Review of research on mechanical behaviors of mining rock mass and its related engineering technological innovation progress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1988–1998.
- [166] FU Bingjun, YUAN Chengwen, YANG Ziwen, et al. Research progress of rock mechanics tests in hydraulic construction[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1985, (5): 34–41.
- [167] SHAO Hegao, HUANG Renfu. Research progress of rock mechanics tests in Chinese hydraulic engineering[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1987, (4): 17–23.
- [168] GE Xiurun, ZHOU Baihai. New development of rock mechanics laboratory testing devices—rock mechanics testing device RMT-64[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(1): 50–56.
- [169] CAI Meifeng. Techniques for in-situ stress measurement at great depth[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 11(6): 486–488.
- [170] GE Xiurun, HOU Mingxun. A new 3D in-situ rock stress measuring method—borehole wall stress relief method(BWSRM) and development of geostress measuring instrument based on BWSRM and its primary applications to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2161–2180.
- [171] LI X C, SHI L, BAI B, et al. True triaxial testing techniques for rocks—state of art and future perspectives[C]// True Triaxial of Rocks. Rotterdam: Balkema, 2011: 1–18.
- [172] LI Ganrong. Model test and stress analysis of arch dam of Xiaocheng hydropower station at Liuxi river[J]. Water Power, 1958, (15): 25–29.
- [173] Nanjing Hydraulic Research Institute. Hydraulic model test[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 1985.
- [174] WU A Q, YANG Q G, DING X L, et al. Key rock mechanical problems of underground powerhouse in Shuibuya hydropower station[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(1): 64–72.
- [175] ZHANG Lin, FEI Wenping, LI Guilin, et al. Experimental study on global geomechanical model for stability analysis of high arch dam foundation and abutment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3465–3469.
- [176] ZHOU Weiyuan, LIN Peng, YANG Ruoqiong, et al. Method and application of geomechanics model test on high arch dam[J]. Beijing: China Water Power Press, 2008.
- [177] ZHANG L, CHEN Y, YANG B Q, et al. A comprehensive testing method for global stability analysis of high arch dams[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(1): 73–81.
- [178] LI Zhongkui, XU Qianjun, WANG Aimin. 3D geomechanical model test for large-scaled underground hydropower station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (5): 31–36.
- [179] LI Zhongkui, LU Darong, NAKAYAMA H, et al. Development and application of new technology for 3D geo-mechanics model test of large underground houses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1430–1436.
- [180] ZHANG Qiangyong, CHEN Xuguang, LIN Bo, et al. Development and application of high-geostress true 3D loading geomechanics model test system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1588–1593.
- [181] LI Shucai, LIU Qin, LI Liping, et al. Development of large-scale geomechanical model test system for tunnel construction and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1368–1374.
- [182] TANG Chun'an, ZHAO Wen. The whole process of rock failure analysis software system RFPA<sup>2D</sup>[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 507–508.
- [183] LIU Yaoru, ZHOU Weiyuan, YANG Qiang. Parallel finite element analysis based on element-by-element method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3023–3028.
- [184] WANG Yongjia, LIU Lianfeng. Formulation of a three-dimensional discrete element model system TRUDEC[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 201–210.
- [185] LU Jun, ZHANG Chuhan, WANG Guangjun, et al. Three-dimensional distinct element numerical model for static and dynamic analysis of rock bodies[J]. Journal of Tsinghua University, 1996, 36(10): 98–104.
- [186] XIA M, ZHOU K P. Particle simulation of failure process of brittle rock under triaxial compression[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2010, 17(5): 507–513.
- [187] LI Qiyue, LI Xibing, GU Chunhong, et al. 3DEC simulation of dynamic response of high-steep jointed rock slope under blast load[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(5): 18–22.
- [188] SHI G H. Block system modeling by discontinuous deformation analysis[M]. South Ampton: Computational Mechanics Publications, 1993.
- [189] LIU Jun, KONG Xianjing. Three-dimensional continuous and discontinuous deformation analysis[J]. Acta Mechanica Sinica, 2002, 11(6): 941–947.
- [190] KOU Xiaodong, ZHOU Weiyuan, YANG Ruoqiong. Stability analysis of the high slopes of Three Gorges shiplock using FLAC<sup>3D</sup>[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 6–11.
- [191] DAI Rong, LI Zhongkui, LIU Hui. Research and implementation of serial-parallel explicit Lagrangian finite difference method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1591–1597.
- [192] KOU Xiaodong, ZHOU Weiyuan. Using element-free method to trace crack propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 18–23.
- [193] LIANG Haibo, LI Zhongkui, GU Zhaoqi. FLAC and its application for hydropower projects in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(3): 225–230.
- [194] SHENG Qian, HUANG Zhengjia, WU Aiqing. Numerical simulating test on joint rock mass properties in Three Gorges Project[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18(1): 35–37.
- [195] HU Yunjin, ZHOU Weiyuan, KOU Xiaodong. Three-dimensional element-free method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1136–1140.
- [196] ZHU Huanchun, BRUMMER R, ANDRIEUX P. Numerical methods and application for jointed rock mass, part 1: approaches and discussions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3444–3449.
- [197] CHEN Zhanjun, ZHU Chuanyun, ZHOU Xiaoheng. FLAC<sup>3D</sup> simulation for dynamic response of rock slope under explosion[J]. Blasting, 2005, 22(4): 8–13.
- [198] YUE Zhongqi, CHEN Sha, ZHENG Hong, et al. Digital image processing based on finite element method for geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 889–897.
- [199] ZHU Zhende, YANG Yongjie, JIANG Zhijian, et al. Research on mesostructure dynamic damage characteristics of expansive red sandstone with digital image processing technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2007–2013.
- [200] WANG Sijing. Geological nature of rock and its deduction for rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 433–450.