

第一届

高温高压岩石力学学术讨论会论文集

PAPERS OF THE FIRST WORKSHOP
ON HIGH TEMPERATURE AND HIGH
PRESSURE ROCK MECHANICS



学术期刊出版社

第一届高温高压岩石力学 学术讨论会论文集

中国岩石力学与工程学会 编
高温高压岩石力学专业委员会

学 术 期 刊 出 版 社

**第一届高温高压岩石力学
学术讨论会论文集**

中国岩石力学与工程学会 编
高温高压岩石力学专业委员会
责任编辑 沈国峰

※

学术期刊出版社出版

(北京海淀区学院南路86号)

北京昌平百善印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

※

787×1092毫米16开 12.75印张

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数: 1000册 字数: 303千字

ISBN 7-80045-012-0/N·1

定价: 8.00元

前 言

第一届高温高压岩石力学学术讨论会由中国岩石力学与工程学会高温高压岩石力学专业委员会和中国科学院地球物理研究所共同主办，于1986年6月在北京召开。

研究地下深处岩石力学性质和变形特点是我国很多地学工作者多年的愿望，但由于各种困难，这方面的工作未能得到很好开展。这次会议的召开，标志着我国高温高压岩石力学的研究已经进入了一个新阶段。

会议上共宣读了35篇论文，本文集收入了其中32篇（包括5篇摘要）。论文涉及本学科的理论、实验、研究动态以及实验设备和实验技术等方面。这表明，目前我国已具备了研究地壳温压条件下岩石力学性质的设备和技术；同时，也正在创造更符合地壳上地幔实际情况的实验条件和实验技术，开展相应的实验研究。理论和实验研究涉及岩石力学参数、波速、声发射、摩擦滑动性状、失稳条件、岩石变形破坏的微观特征以及影响岩石变形的破坏因素等。此外，还进行一些与国民经济建设有关的课题研究。

我们希望这次会议的召开和论文集的出版有助于促进同行们的相互了解，进一步切磋学问，研讨技术，加强合作。在加强岩石宏观力学性质与变形破坏微观机制研究的结合，岩石形变、相变、质变研究的结合，以及变形过程的物理效应与化学效应研究的结合的基础上，深化对高温高压岩石力学的了解。我们也希望本论文集的出版有助于相近专业的同行们了解我们工作的进展，使高温高压岩石力学在我国资源开发、能源利用、灾害防治中，发挥更大的作用。

中国岩石力学与工程学会
高温高压岩石力学专业委员会

中国岩石力学与工程学会 高温高压岩石力学专业委员会

主任委员：陈宗基

副主任委员：马 瑾

委 员：马 瑾

孙天泽

吴云华

信礼田

郝晋升

熊大和

石泽全

王绳祖

刘远惠

李纪汉

施良骥

康文法

王善伟

刘 雄

吴学益

赵树清

傅芳才

王智济

陈子光

张伯崇

钟德义

彭恩生

石泽全

陈宗基

周瑞光

耿乃光

詹 谦

目 录

前 言 评 述

高温高压岩石力学发展中的若干问题	王绳祖 (1)
岩石高压状态参数实验研究的进展	耿乃光 郝晋升 李纪汉 (8)
钾长石高温高压实验变形研究的意义	张曾荣 何绍勋 (10)
岩石的实验变形研究在构造地质学中的运用	周 翊 (14)
从美国地调局岩石力学实验室看我国高温高压岩石力学实验室的	

建设(摘要)	张伯崇 (20)
--------------	----------

高温高压下岩石的物理力学性质 (摘要)	黄理兴 (21)
---------------------------	----------

实验与理论研究

介质在断层运动中的作用及其地震地质意义	马 瑾 马胜利 (22)
---------------------------	--------------

不同类型脉状钨矿形成深度的探讨	彭恩生 (34)
-----------------------	----------

利用盐岩的单轴高温蠕变试验确定石油钻井的合理泥浆密度

..... 黄荣椿 周祖辉 张克勤 庄锦江 (39)

西北地区地壳典型岩石高压下的状态参数

..... 郝晋升 刘晓红 方亚如 蔡戴恩 李纪汉 耿乃光 (46)

岩石热开裂声发射 m 值的变化

..... 李纪汉 蔡戴恩 方亚如 刘晓红 郝晋升 耿乃光 (54)

高温高压下岩石中纵波速度的测量	郭才华 宋瑞卿 (61)
-----------------------	--------------

地壳温压条件下济南辉长岩蠕变破坏的实验研究

..... 赵阿兴 王子潮 崇秀兰 王绳祖 (67)

岩石摩擦时的失稳型式、应力降及塑性成分的影响	池 江 王绳祖 (75)
------------------------------	--------------

地壳温压条件下的迁安石英岩强度特性	王子潮 王绳祖 (85)
-------------------------	--------------

错动带端部刚度效应的实验研究	石桂梅 王绳祖 (96)
----------------------	--------------

岩化断层泥的变形与破坏特征	李建国 王绳祖 石桂梅 (102)
---------------------	-------------------

高温高压下岩石的剪切破裂能 (摘要)	张 流 鲁梅尔 F (109)
--------------------------	-----------------

颗粒成分对断层泥力学行为的影响 (摘要)	王宝生 许秀琴 马 瑾 刘天昌 (110)
----------------------------	-----------------------

仪器设备研制

800T 高温高压伺服三轴流变仪的研制	石泽全 于智海 (111)
---------------------------	---------------

固体传压三轴流变仪的研制	孙天泽 (117)
--------------------	-----------

2GPa 固体围压三轴试验装置的设计研究	施良骥 刘树山 (122)
----------------------------	---------------

具有孔隙水压的400MPa超高压三轴仪的设计与研制

..... 徐祥文 孔庆峦 杜尧俊 吴云华 李荣筠 (130)

构造地球化学高温高压模拟实验	钟德义 吴学益 周文华 (139)
----------------------	-------------------

研究岩石动力性质的两种实验设备	信礼田 (145)
-----------------------	-----------

岩石单轴快速加载机的改进	徐兆有 (153)
高温高压三轴仪内部载荷传感器的研制	于智海 (160)
岩石三轴仪内加热器的实验研究	任爱华 (166)
岩石三轴实验用数据采集系统	崔效锋 王 威 施良骥 (171)
固体围压介质岩石三轴实验装置的压力标定: 一种自检标定方法	王 威 崔效锋 王绳祖 (179)
超高压三轴仪的密封设计研究	杜尧俊 孔庆峦 李荣筠 陈爱娣 顾仲春 (186)
2SY-83型真三轴压力室的研制 (摘要)	李佩林 华培忠 许昭永 (194)

CONTENTS

PREFACE

REVIEWS

- Some Problems in the Development of Rock Mechanics at High Temperature
and High Pressure *Wang Shengzu* (1)
- The Development of Studies on High Pressure State Parameters of Rocks
..... *Geng Naiguang Hao Jinsheng Li Jihan* (8)
- The Significance of Experimental Deformation of Potash Feldspars at High
Temperature and High Pressure..... *Zhang Zengrong He Shaoxun* (10)
- The Application of Rock Deformation Experiment in Structural Geology
..... *Zhou Yi* (14)
- Enlightenment from Rock Mechanics Laboratory at USGS (Abstract)
..... *Zhang Bochong* (20)
- The Physico-mechanical Properties of Rocks at High Temperature and
High Pressure (Abstract) *Huang Lixing* (21)

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES

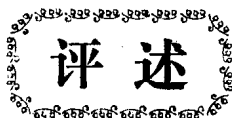
- The Role of Fault Material in its Movement and Seismogeological
Significance *Ma Jin Ma Shengli* (22)
- The Primary Study to the Formation Depth of Different Kinds of Vein
Tungsten Ore *Peng Ensheng* (34)
- Determining of Available Mud-density at Drilling for Oil Based on the
Creep Test Data of Halite
Huang Rongzun Zhou Zuhui Zhang Keqin Zhuang Jinjiang (39)
- The High Pressure State Parameters of Typical Rocks in NW China.....
..... *Hao Jinsheng*
Liu Xiaohong Fang Yaru Cai Daien Li Jihan Geng Naiguang (46)
- The Change in m -Value of AE Events during Thermal Cracking
of Rocks *Li Jihan Cai Daien*
Fang Yaru Liu Xiaohong Hao Jinsheng Geng Naiguang (54)
- The Measurement of V_p in Rocks at High Temperature and High pressure
..... *Guo Caihua Song Ruiqing* (61)

Experimental Study on Greep Failure of Jinan Gabbro at Crustal Temperature and Pressure.....	
.....Zhao Axing Wang Zichao Chong Xiulan Wang Shengzu (67)	
Effects of Plastic Components on the Types of Frictional Instabilities and Stress Drop.....	
.....Chi Jiang Wang Shengzu (75)	
Strength of Qianan Quartzite at Temperatures and Pressure of the Earth's Crust.....	
.....Wang Zichao Wang Shengzu (85)	
Experimental Study on Stiffness Effect of Fault End.....	
.....Shi Guimei Wang Shengzu (96)	
Deformation and Failure of Lithified Fault Gouge	
.....Li Jianguo Wang Shengzu Shi Guimei (102)	
The Shear Fracture Energy of Rocks at High Temperature and High Pressure (Abstract)	
.....Zhang Liu Rummel F (109)	
Effects of the Granular Composition on Mechanical Behavior of Simulated Gouge (Abstract)	
.....Wang Baosheng Xu Xiuqin Ma Jin Liu Tianchang (110)	

DESIGN OF THE TESTING APPARATUS

Designing of the 800T High Temperature and High Pressure Servocontrolled Triaxial Rheology Testing System	
.....Shi Zequan Yu Zhihai (111)	
Designing of A Triaxial Rheology Testing Apparatus With Solid Confining Medium.....	
.....Sun Tianze (117)	
Designing of A Triaxial Testing Apparatus (2GPa) With Solid Confining Medium.....	
.....Shi Liangqi Liu Shushan (122)	
The Design and Manufacture of 400 MPa Ultra-high Pressure Triaxial Apparatus With Pore Pressure.....	
.....Xu Xiangwen Kong Qingluan Du Yaojun Wu Yunhua Li Rongjun (130)	
Tectonogeochemical Simulating Experiments at High Temperature and High Pressure.....	
.....Zhong Deyi Wu Xueyi Zhou Wenhua (139)	
The Experimental Equipments for Studying Rock Dynamic Properties	
.....Xin Litian (145)	
Improvement of Rock Rapid Loading Testing Machine.....	
.....Xu Zhaoyou (153)	
Designing of the Internal Load Cell for High Temperature and High Pressure Triaxial Testing Apparatus.....	
.....Yu Zhihai (160)	
Experimental Study on Internal Heater for Triaxial Testing Apparatus	
.....Ren Aihua (166)	
A Data Acquisition and Processing System for Triaxial Experiments of	

Rocks.....	Cui Xiaofeng Wang Wei Shi Liangqi (171)
Calibration of Pressure in Solid Confining Medium Triaxial Apparatus ,	
A Self-test Stress Calibration Method.....	
.....	Wang Wei Cui Xiaofeng Wang Shengzu (179)
Designing of the Hermetic Seal for Ultra-high Pressure Triaxial Testing	
Apparatus	Du Yaojun
Kong Qingluan Li Rongjun Chen Aidi Gu Zhongchun (186)	
Designing of the 2SY-83 Type True-triaxial Testing Apparatus	
(Abstract)	Li Peilin Hua Peizhong Xu Zhaoyong (194)



高温高压岩石力学发展中的若干问题

王绳祖

(国家地震局地质研究所)

摘 要

在高温、高压、强约束、宽时域条件下,岩石的张裂和扩容受到不同程度的抑制,破裂扩展失稳与摩擦错动失稳之间、渐进失稳与突发失稳之间的差别得以展现,这在脆性-延性转变及高压脆化、高温脆化的研究中占有重要地位。文中在论述以上特殊性的基础上,就实验技术的发展提出若干建议,并强调重视“破裂-摩擦-流变”的联合作用,促进宏观力学性状与微观机制的结合。

一、引 言

随着地球科学的发展和工程设施的深延,高温高压岩石力学已涉及越来越多的学科,并越来越受到有关部门的重视。

自本世纪初期 von Kármán T (1911)、Adams F D (1912) 和 Boker R (1915) 等人发表岩石高压三轴试验最初的一批结果以后,高温高压岩石力学在实验技术和理论水平上经历了相当长时期的酝酿、发展过程。本世纪30—40年代,诺贝尔物理奖获得者 Bridgman P W 在高温高压准静岩压容器的发展和高压剪切试验技术的探索方面所作出的贡献,无疑对以后高温高压岩石力学的发展有着深远的影响。30年代中期,Griggs D T (1936) 在液体介质三轴试验技术方面的工作,特别是50—60年代以来,Griggs D T 等 (1951)、Handin J (1953)、Лучицкий И В (1968)、Heard H G 等 (1968, 1980) 和 Paterson M S (1970, 1980) 等人发展的气体介质三轴试验装置以及60年代 Griggs D T (1967) 建立的固体围压介质三轴试验装置,大大地推动了高温高压岩石力学实验技术的发展。岩石变形的微观机制研究是高温高压岩石力学的重要一翼,在这方面,Griggs D T (1940)、Parterson M S (1959)、Carter N L 等 (1961)、Poirier J P (1972)、Nicolas A (1976) 等积累了不少有价值的资料。

自50年代后期陈宗基先生主持下研制“长江500型”液体介质三轴试验系统以来,经过近30年的努力,我国高温高压岩石力学在实验技术、微观观测和理论分析等方面都已有一定的进展。尤其中国科学院地球物理所3GPa固体围压三轴试验系统的筹建,将在温度、压力和应变率等指标方面达到或超过国际水平。本文就高温高压岩石力学及其发展中的若干问题作一粗浅的讨论,着重述及的是有关本学科在研究对象,研究手段及高温高压下岩石变形破坏过程等方面的特殊性。

二、研究对象的特殊性

作为变形固体力学的一个特殊分支,岩石力学以地质材料受力变形破坏过程和规律作为其基本研究对象。岩石在自然或人为的驱动力作用下,缓慢地或快速地发生变形破坏,同时引起各种物理、化学响应,而整个作用过程或其中各个阶段又受到介质、构造、物理环境和驱动方式等方面因素的影响,具体地说,其中包括固体与流体介质、弱面、温度、压力、刚度、时间、空间尺度和载荷方式等多种效应的综合作用。同一般变形固体力学相比较,岩石力学研究对象的特点主要表现于以下三方面:

岩石的不均匀性——尤其是岩石中不同尺度(10^{-10} — 10^7 m)、不同性质(随机的或定向的,有摩擦或无摩擦)的弱面(或弱层)的存在,对介质的本构关系起着控制作用。

岩石-水相互作用——水或其他流体介质不仅通过孔隙压和渗透作用等物理效应直接与岩石的力学过程(Terzaghi K, 1945; Skempton A W, 1961; Handin J等, 1963),而且通过水解弱化、应力腐蚀、湿致张裂、压溶蠕变以及水热条件下固态扩散等化学效应(Kirby S H, 1984),改变岩石的力学性质,影响岩石的力学运动状况。

载荷的复杂性——受到岩石重力、构造运动以及其他自然或人为载荷的作用。多数情况下,载荷未知,并且随着岩石的变形破坏有可能出现载荷的重新分布。

同地球动力学和构造物理学紧密结合的高温高压岩石力学,主要以地球内部不同层次地质材料的运动过程和运动规律作为研究对象。同一般工程岩石力学比较,除了上述特点外,还具有高温、高压、强约束、宽时域等四个方面的特殊性。

(1) 高温 参照地球内部温度-深度梯度,可大致对温度作如下的划分:常温,10—50℃,浅表地壳;中温,50—100℃,热泉;次高温,100—500℃,中、上地壳;高温,500—1000℃,中、下地壳;甚高温,1000—1500℃,岩石圈底层;超高温, >1500 ℃,地球深部。温度升高导致岩石和流体介质的活化,促使岩石变形破坏机制发生变化。

(2) 高压 根据地球内部压力-深度梯度,并参考 Corell J A (1965) 的建议,可作如下的划分:低压,0.1—3.0 MPa,浅表地壳;中压,3.0—100 MPa,浅层地壳;次高压,100—300 MPa,上地壳;高压,0.3—1.0 GPa,中、下地壳;甚高压,1.0—3.0 GPa,岩石圈底层;超高压, >3.0 GPa,地球深部。围压增大对岩石变形所起的作用,主要表现为抑制张裂和强化摩擦,从而从另一侧面为岩石介质的变形活化提供条件。当前高温高压岩石力学研究中涉及的围压主要分布在中压至甚高压的范围内。

(3) 强约束 地球内部块体处于周围岩体的包围之中,它的运动受到明显的约束。以地震发震过程为例,震源块体的错动不仅受其后方岩体回弹推力的作用,而且还受到前方岩体的阻挡,从而抑制地震能量的快速释放。地球内部的这种强约束状态,对于岩体失稳型式的影响尤为明显。

(4) 宽时域 地球内部的力学过程涉及非常宽广的时间范围。应变率的范围大致为 10^{-20} — 10^6 /s (Spencer E W, 1977; Heard H C, 1980)。按照事件的延续时间,缓慢地质运动以 10^8 年计,而微震、小震则以 10^{-2} 秒计(笠原庆一, 1983)。与一般工程岩石力学相比,时间效应问题在高温高压岩石力学领域中占有更为重要的位置。在岩石变形过程中,作用时间的延长为岩石介质的活化提供条件,从而改变变形机制,促进岩石由脆性向延性过渡。

上述特点决定了高温高压岩石力学在实验技术和理论规律上的独特性。

三、实验技术的发展趋势

1. 高温高压三轴试验技术的发展

高温高压岩石力学领域中比较广泛地采用了常规三轴试验方法,其中包括利用液体、气体或固体传压介质形成围压。至今已能达到并保证正常使用的温度和围压上限分别为:液体围压:室温/2.5GPa (Heard, 1980), 450°C/0.4GPa (Hennig-Michaeli, 1980); 气体围压:1000°C/1.0GPa (Heard, 1980), 1400°C/0.7GPa (Paterson, 1980); 固体围压:600°C/2.0GPa (Kirby, 1978), 1270°C/1.6GPa (Tullis J, 1984), 1350°C/1.5GPa (Carter, 1970)。

国内相应的情况为:

液体围压:室温/1.0GPa (国家地震局地球物理所, 1981); 气体围压:600°C/0.4GPa (国家地震局地质所, 1985); 固体围压:800°C/0.7GPa (国家地震局地质所, 1982)。

液体围压介质三轴试验,因受传压介质硅油碳化温度的限制,通常不能超过400—450°C。氩气或二氧化碳等气体围压介质三轴试验装置,可以达到1000—1400°C高温,但围压难以超过0.7—1.0GPa,并且危险性较大。Griggs型及其变型的固体围压介质三轴试验装置,以氯化钠、叶腊石、滑石或碳酸钙等为传压介质,虽然在围压和温度分布均匀性及测压精度等方面不如气体介质,但可达到更高的围压,且使用方便、安全,因而对地球动力学和构造物理学的研究来说,具有较大的实用意义。Kirby等(1984)甚至把固体围压介质三轴试验装置的推广应用列为近20年来实验岩石力学的主要进展之一。作者所在实验室五年来的实践还表明,加强对固体围压介质三轴试验装置的压力标定,可以提高测量精度,以满足高温高压岩石力学定量研究的需要。

鉴于岩石-水相互作用以及高温、长时作用下岩石介质活化等特点,孔隙压试验系统的建立日益引起我国高温高压岩石力学界的重视。

2. 从刚性压机到可调环境刚度试验系统

自40年代以来,岩石力学界对于单轴压缩的全过程当应-应变曲线和刚性压机进行了相当广泛的研究,并已形成了“压机-试件”系统和系统刚度的概念,从理论上解释了压机刚度对岩石试件失稳型式的影响规律(Rummel F, Fairhurst C, 1970; Salamon M D G, 1970)。然而,地球内部岩体受周围可变形岩石实体的围限,处于强约束状态之中:沿最大主应力方向(轴压方向)并非理想的刚性加载系统,沿最小主应力方向(围压方向)亦非流动性极强、刚度极低的液体或气体。

60年代已有人注意到了试件的封套对突发失稳的抑制作用(Heard H C, 1960; Brace W F, Byerlee J D, 1970)。固体围压介质的应用,则进一步揭示了围压系统刚度对岩石失稳型式和应力降的影响,并建立了“环境刚度”的概念(王绳祖、施良骐、张流, 1983, 1985)。“系统刚度”的传统概念往往只被理解为轴压系统刚度,而“环境刚度”则比较全面地反映地球内部的强约束力学环境,它同时反映了轴压系统和围压系统的刚度效应。这一点对于地震震源的动态过程来说尤为重要。在模拟系统中则应按震源的实际情况调节环境刚度。因此,所需要的并非刚性压机,而是一种可调环境刚度的试验系统。作者认为,今后有必要加强对于可调环境刚度三轴试验系统的探索和研究。

3. 模拟缓慢自然过程的可能途径

缓慢自然过程和岩石长时流变特性的实验研究,一直是高温高压岩石力学的难题之一。长时蠕变试验可以达到较低的应变率,例如:室温下花岗岩试件弯曲蠕变试验(Kumagai N, Ito H, 1970; Ito H, 1983)延续24年,应变率约 $10^{-14}/s$;辉长岩试件弯曲蠕变试验(Sasajima S, Ito H, 1980),围压0.1GPa,室温下延续800天,或者,180℃延续22天,应变率约为 $4.2 \times 10^{-14}—1.4 \times 10^{-12}/s$;砂岩室温下扭转蠕变(Tan T K, Kang W F, 1980)延续约200天,应变率约为 $3 \times 10^{-11}—8 \times 10^{-10}/s$ 。然而,作为模拟深部环境的高温高压三轴压缩蠕变试验或等应变率试验,应变率一般只能低至 $10^{-8}/s$,同自然界缓慢运动相比,存在着相当大的差距。

为了缩短实验室与自然界之间的上述差距,人们提出了以下两种途径:提高变形测量精度,以相对短的时间和比较小的应变量估计变形趋势,测定稳态蠕变的应变率(伊藤英文, 1977);采取“温度补偿时间”的方法,缩短试验时间,实现时间外推(及川洪, 1974; Paterson M S, 1980)。

随着岩石流动律和变形机制研究的逐步深入,人们注意到相同机制下升高温度与延长时间对于岩石蠕变的等效性,从而形成了“温度补偿时间”的概念。根据橄榄石(Stoeker R L, Ashby M F, 1973)、石英(White S, 1977)等单种矿物集合体的变形机制图进行估计,大致为温度每升高50—200℃允许提高应变率一个数量级。当然,时间外推必须以相同变形机制为前提,因此,“温度补偿时间”原理的应用会有一定的局限性。尽管如此,通过对典型岩石的流动律、变形机制和变形机制图的深入研究,它仍有可能成为解决时间外推这一难题的一条有效途径。

4. 关于试件的尺度效应

导致岩石尺度效应的主要原因可归结为以下三方面:

(1) 试件中应力分布的不均匀性 由于试件的几何形状和边界条件,如试件端面摩擦约束等造成的应力不均匀分布,影响由整体测定的力学参数的代表性。在实验技术上曾采取的措施有两类:保持试件中应力相对均匀分布的区域,诸如增大试件的长宽比(2—3);减轻试件端面摩擦约束,诸如采用低摩擦垫层、板刷状垫块、或锥形端面等。

(2) 岩石组分分布的不均匀性 岩石试件内包含的矿物颗粒数目增加到一定程度即有可能达到统计观点上的均匀性。为了避免尺度的影响,要求试件直径与最大颗粒粒度的比值不小于一定的值,如不小于7—10倍。

(3) 岩石内缺陷分布的不均匀性 尤其是不同尺度弱面的存在是导致尺度效应的重要原因。对于岩石力学性质的测定和表示,可以采用两种不同的处理方法,即整体统计平均取值法和实体单元-弱面单元分别取值法。其中涉及尺度效应的只是前者。

自60年代中期有限单元法引入岩石力学(Zienkiewicz O C等, 1966; Goodman R E等, 1968)以后,为有效地处理尺度效应问题提供了较大的灵活性。基于离散化的原理,采用连续体模型或实体元-弱面元模型,可以通过有限元分析(宫本博, 1970; 王绳祖, 1982),排除试件中的应力、弱面分布不均匀可能造成的影响。

高温高压下,应力、组分和缺陷分布的不均匀性相应减轻,尺度的影响也将有所缓和。同时,与庞大的研究对象相比,试件的尺寸终究是有限的。

基于上述分析可认为,在保证组分统计均匀的前提下,决定试件尺寸的并不是尺度效应问

题,而主要在于使试件或模型满足便于制作、观测等研究课题自身的需要。大尺度和小尺度试件各有利弊,应根据实验的具体需要加以选择。

四、高温高压下的岩石变形破坏

1. 扩容现象的局限性

单轴或较低围压的三轴压缩试验表明,当应力水平增大到峰值应力的 $1/3-2/3$ 时,岩石因纵向张性微破裂的产生而扩容。基于张裂-扩容机制的孕震模式,至今在地震前兆研究中仍有相当广泛的影响。然而,实验表明(王绳祖,1983):方解石质大理岩在围压增大到 $0.15-0.2\text{GPa}$ 时,扩容现象即趋于消失;主破裂贯通试件而转化为摩擦错动之后,出现扩容(剪胀)现象的上限围压大致为 30MPa 。花岗闪长岩在围压达 $0.6-0.7\text{GPa}$ 时,即无明显纵向张裂现象(王绳祖、张流,1984;王绳祖、施良骐、张流,1986)。随着温度的上升,围压对扩容现象的抑制作用更加明显。

应该认为,扩容是岩石在一定温、压条件下和某种变形阶段内特有的现象。孕震过程扩容模式的适用深度问题值得慎重考虑。

2. 破裂扩展失稳与摩擦错动失稳

单轴或低围压三轴压缩试验中,主破裂贯通试件时,往往伴随以整体的崩塌和突发失稳,对于坚硬的岩石来说,即使采用的是刚性试验机,也难以避免这种突然破裂的现象。在这种情况下,主破裂的扩展失稳和试件整体的突发失稳似乎是不可区分的。然而,较高围压的三轴试验(王绳祖、张流,1984;王绳祖、施良骐、张流,1986)进一步揭示:岩石试件在达到峰值应力状况前后,开始出现跨晶粒的斜向宏观剪切裂缝;宏观剪切裂缝继续扩展,直至峰值后某一点,主破裂贯通试件,试件被分割为二;然后是试件被分隔块体之间的错动,应力水平继续沿应力-应变曲线的负坡段下降到剩余强度水平。以主破裂贯通试件的瞬间为界,可以划分为两个不同的阶段:贯通之前是包含着局部错动的破裂扩展阶段,而贯通之后则是包含着局部破裂的摩擦错动阶段。因此,一般地说,岩石的失稳包括依次发生的破裂扩展失稳和摩擦错动失稳两个过程,并且,二者都有渐进失稳和突发失稳之分。与浅源强震相对应的是摩擦错动的突发失稳过程,而破裂扩展失稳主要是强震孕育过程的组成部分。这一点对于传统断裂力学应用于地震前兆和发展机制的研究来说,尤其应该引起注意。

3. 两种突发失稳及“高压脆化”

随着围压的升高,破裂受到抑制,岩石有向延性过渡的趋势。然而,在一定的较高围压范围内,又有“脆化”的现象发生。固体围压介质三轴试验结果(王绳祖、施良骐,1985)表明,一般地说,岩石具有低压突发失稳、中压渐进失稳和高压突发失稳等三种失稳形式。所谓“高压脆化”现象,实质上就是高压突发失稳。低压和高压突发失稳具有不同的机制。所谓“低压”和“高压”仅指围压的相对高低,而两种突发失稳的基本区别在于“非匀阻”和“匀阻”。在克服各种闭锁阻挡、铲平凹凸不平之后,仍能具有足够长度的平直舒展的错动带,是发生匀阻突发失稳或“高压脆化”现象的必要条件。浅源强震是一种高压、匀阻突发失稳,在判断强震危险性时,不应忽视错动带的匀阻判据。

4. 高温脆化

随着温度升高导致岩石介质活化和塑性成分增加,从而促进脆性向延性转化。然而,在某些情况下出现的高温脆化现象引起了人们的注意。例如,蛇纹石(Paterson M S,

1978), 围压0.35GPa, 当温度超过500℃时, 因脱水转变为橄榄石而引起的高温脆化现象, 已为人们所熟知。又如黄玉单晶 (Lee R W, Kirby S H, 1984), 在1.5GPa的固体围压下, 当温度达到400℃时, 由渐进失稳转变为突发失稳, 且应力降幅度随温度继续上升而增大。这一现象被解释为起因于升温时矿物脱水, 氢、羟基或水的晶内扩散, 微裂纹端部水的积聚和水解作用, 以至裂纹迅速扩展至临界尺寸, 试件突然破坏。再如, 含膨润土断层泥夹层的花岗岩试件 (Logan J M等, 1981), 在0.15GPa围压下, 当温度为300℃时, 出现粘滑, 而25℃、150℃和450℃时均为稳滑。研究者认为, 这是升温时因粘土矿物脱水和水气逃逸所致, 而升温至450℃, 水分完全逸失, 故粘滑又受到抑制。伊利石断层泥的研究 (马瑾等, 1985) 表明, 在0.35GPa的气体围压下, 400℃伊利石被压密、干燥而发生粘滑; 600℃时, 伊利石因脱水转变为白云母而恢复稳滑。

由此可见, 高温脆化并非升温过程的偶然现象。在岩石和所含流体介质活化的总趋势下, 由于矿物的脱水、相变以及其他物理、化学效应, 促成有利于突发失稳的条件, 导致了高温脆化。而岩石-水相互作用, 使高温脆化过程更为复杂化。

5. 破裂-摩擦-流变的联合作用

岩石力学是在一般变形固体力学基础上, 以摩擦学、流变学和破裂学三学科为支柱, 逐步发展起来的。这三门学科在各自的发展中, 实际都已经在不同程度上注意到相互之间的渗透和联系。例如, 在摩擦机制研究中, 早已涉及接触部塑性流动或破裂对摩擦的控制作用 (Rabinowicz E, 1965; 曾田范宗, 1978); 在断裂力学研究中, 考虑到了裂纹尖端的塑性区 (Boyd G M, 1972), 有人甚至还强调要综合考虑裂纹型缺陷和位错型缺陷 (横堀武夫, 1977), 从而在一定程度上体现了破裂学与流变学相互结合的这种观点; 在流变学研究中, 则注意到了蠕变破裂现象的存在 (Kachanov L M, 1961)。岩石变形的特殊性, 促使人们加强探索三者相互渗透、相互结合的途径, 下面列举的若干研究结果和观念从不同方面反映了已经取得的进展情况: 岩石的假塑性 (Цылев Н А, 1959; 王绳祖, 1962)、假延性流动 (Dieterich J H, 1981); 岩石变形破坏的脆性-延性过渡 (Griggs D T, Handin J, 1960; Heard H G, 1960, 1976; Paterson M S, 1978); 岩石的脆性蠕变、半脆性蠕变和延性蠕变 (Kirby S H等, 1984); 完整岩石变形破坏过程中由破裂扩展过渡到摩擦滑动 (王绳祖, 张流, 1984); 岩石摩擦与流动的联合效应, 随滑移速度的增大, 从流动律控制过渡为摩擦律控制 (Shimamoto T, 1985); 岩石的断裂力学研究中, 考虑裂纹壁的剩余摩擦作用 (Rice J R, 1980), 但对于高压下摩擦作用的重要性尚未给予足够的重视。

总的看来, 在促进三者结合的问题上, 尚有待于付出更大的努力。高温高压岩石力学领域中, 破裂、摩擦和流变三种现象往往并存的事实, 要求我们最终以“破裂-摩擦-流变”的综合理论去代替传统的断裂力学、摩擦学和流变学, 而近期尤其应加强以下三方面的研究:

(1) 高围压、强摩擦状况下破裂扩展的机制及特殊性; (2) 脆性、半脆性蠕变的机制和本构律; (3) 摩擦错动带的塑性流动和局部破裂。

五、结 论

(1) 高温高压岩石力学以复杂的物理、化学环境和驱动力源条件下岩石的变形破坏过程为基本研究对象。同一般的工程岩石力学相比, 它具有高温、高压、强约束和宽时域等特

点。岩石力学是在一般变形固体力学的基础上,运用摩擦学、破裂学和流变学的基本原理和方法而发展起来的。然而,高温高压岩石力学的继续发展则有待于进一步认识其研究对象的特殊性,逐步建立起本学科相对独立的体系,其中包括以“破裂-摩擦-流变”的综合观念代替三者分离的观念。

(2) 常规三轴、真三轴、双轴、剪切、弯曲等实验方法以其各自的特点,从不同方面积累了资料,促进了高温高压岩石力学的发展,并将继续发挥它们的积极作用。针对我国现有的状况,除了在较低温度下充分利用液体围压介质三轴试验装置外,似应在重点地少量建立气体围压介质三轴试验系统的同时,完善和推广应用固体围压介质三轴试验技术。

(3) 鉴于高温高压岩石力学的特殊性,促进岩石表观力学性状的现象学研究与变形破坏的微观机制研究之间,岩石的“形变”与“相变”、“质变”之间,变形过程的物理效应与化学效应之间的相互结合,对于学科的发展具有十分重要的意义。