

文章编号: 0253-3782(2003)05-0528-07

我国实验岩石力学与构造物理学 研究的若干新进展^{*}

马胜利 马瑾

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所构造物理开放实验室)

摘要 简述了近年来我国学者在与地震学和地球内部物理学相关的实验岩石力学和构造物理学研究方面的进展。在此领域的进展主要体现在: 大量实验以及数学模拟结果丰富了对岩石脆性破裂过程, 特别是结构和介质非均匀条件下破裂过程的认识; 在非均匀断层的摩擦行为与失稳成核方面取得了一些新结果, 揭示了断层滑动行为的复杂性; 在岩石脆-塑性转换和塑性流变方面取得了一些新结果, 特别是在下地壳和上地幔物质的流变性质方面取得了重要进展; 在高温高压岩石物理方面取得了一批实验结果, 并应用于地球内部物质的组成和状态的研究。这些结果为深入理解地球内部物质的物理性质、变形机制及地震物理过程提供了有价值的参考资料。

关键词 脆性破裂 断层摩擦 塑性流变 岩石物理 地震机理

中图分类号: P315.8; P313

文献标识码: A

引言

本文简述近年来(1999~2002年)我国学者在实验岩石力学和构造物理学研究方面取得的主要进展, 其中仅涉及地震学和地球内部物理学领域内相关的研究, 而未涉及工程岩石力学、构造地质学等领域的相关研究。我们将从岩石脆性破裂及其伴生的物理现象、岩石摩擦及断层相互作用、岩石的脆-塑性转换及塑性流变, 地球内部物质的物理性质等4个方面简述主要的研究结果, 并对其进行简单的小结。

1 岩石脆性破裂及其伴生的物理现象

岩石的脆性破裂过程及其伴生的物理现象涉及地震机制及地震前兆机理等问题, 过去4年来在此方面开展了许多工作。其中大部分工作集中在利用声发射、应变测量及其它技术, 研究岩石或相似材料标本的变形和破坏过程, 由此讨论地震过程特别是地震前兆问题。刘力强等(1999a,b)在三轴压缩条件下研究了两种花岗岩变形过程中的声发射特征, 提出岩石构造对微破裂的时空分布及统计特征有重要影响。蒋海昆等(2000a,b,c)研究了不同温度和围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征, 并据此讨论了强震发生前的地震活动性(蒋海昆等, 2002a)。刘力强等(2001)分析了不同结构岩石标本声发射 b 值和频

* 国家重点基础研究发展计划项目(1998040704)。

2003-02-19 收到初稿, 2003-05-20 收到修改稿, 2003-06-01 决定采用。

谱的时间变化特征,认为其变化与主导变形方式(破裂或摩擦)有关。蒋海昆等(2002b)研究了含雁列式断层标本变形破坏过程中的声发射特征。马瑾等(1999)基于对含有不同断层组合的标本的声发射、应变和断层位移实验结果,讨论了断层几何与前兆偏离的关系。李世愚等(2000)和滕春凯等(2001)利用光学透射方法,研究了含典型构造的大理岩标本破裂过程中微破裂的演化和集结特征,并讨论了其在地震前兆中的意义。Wu等(2000a)利用光学和电子显微镜,研究了砂岩压缩破坏的微观力学及各向异性损伤的空间演化。Xu等(2002)和许昭永等(2002a)利用实时全息干涉计量方法和焦散阴影光学法,研究了含预制裂纹标本加载破裂和卸载破裂的焦散阴影区的动态特征。王凯英等(2002)基于对两种含有预制断层的标本的应变测量结果,讨论了地震前兆的非均匀性问题。一些学者采用数值模拟方法开展了岩石破裂与地震过程的研究。例如,林鹏等(1999)、唐春安等(2001)、焦明若等(2002a)的工作。

一些实验和理论工作是围绕某些孕震模型和预报理论进行的。围绕坚固体孕震模型,王彬等(1999)研究了含坚固体试样破裂孕育过程中的声发射强度特征;崔晓峰等(1999)研究了含典型裂纹系硬包体复合模型的应力场及破裂特征;许昭永等(1999)研究了组合坚固体破裂前的应变扰动及波速异常等前兆现象;Yin等(2000)对其提出的加卸载响应比预报方法进行了一系列新的工作;许昭永等(2002b)也讨论了负坡段加卸载响应比的物理意义及预测效能。

一些学者在岩石破裂过程中的电磁响应方面进行了许多工作。郭自强等(1999)研究了岩石破裂中的电声效应,通过分析电磁辐射与声发射的关系,认为除微破裂产生的电磁辐射外,可能存在产生电磁辐射的非破裂机制。郭子祺和郭自强(1999)根据实验结果,提出了多裂纹同步扩展模型,并计算了相应的电磁辐射场的特征。陈峰等(2000)开展了岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位的实验研究,提出了利用各向异性探测岩石破裂前兆并确定主破裂扩展方向的方法。郝锦绮等(2002)研究了岩石破裂过程中电阻率的变化机理,认为岩石中裂隙的存在和液体的饱和状态是在岩石主破裂前控制电阻率变化的两个最重要的因素。

结合地震预报的新技术和新方法研究开展了一些工作,拓宽了实验研究的领域。高原等(1999)以及高原(2000)研究了大理岩的剪切波分裂对差应力变化的响应,提出剪切波的分裂敏感于介质微裂隙状态的变化,剪切波分裂的时间延迟的变化能够反映出岩石破坏的临界状态的到来。Wu等(2000b, 2002)总结了遥感岩石力学实验的进展并进行了新的实验。尹京苑等(2000)基于实验结果,讨论了红外遥感用于地震预测的可能性及其物理机制。房宗纬等(2000)对不同岩石进行了无源微波遥感用于地震预测的实验研究,提出了由无源微波遥感探测结果反演介质应力状态的方法。郝锦绮等(2000)发展了采用高密度的电极阵列研究标本电阻率图象的技术。

2 岩石摩擦及断层相互作用

对断层摩擦的研究可为断层行为和地震震源力学提供物理理解。Ma和He(2001)研究了均匀和非均匀标本的摩擦形状,提出摩擦非均匀性是引起断层滑动非线性行为的原因,并系统讨论了倍周期分叉这种非线性现象。马胜利等(2002)还分析了断层粘滑失稳对应的声发射波形及断层位移,提出了非均匀断层的粘滑失稳存在两种不同的成核相;在断层摩

擦方面也开展了一些理论和数值模拟工作。何昌荣(1999)讨论了两种速率-状态摩擦本构关系的异同及其在地震力学研究中的意义。何昌荣(2000)基于速率-状态摩擦定律, 模拟了断层上的地震成核过程。刘桂萍等(2000)以及刘桂萍和傅征祥(2001)建立了依赖于时间的摩擦细胞自动机模型来模拟地震活动及其非均匀性, 认为较小震级和较大震级范围中的事件, 分别遵从明显不同的累积频度-震级关系。

考虑到实际地壳中断层系统的复杂性, 研究断层的相互作用对理解地震机制是有益的。马瑾等(2000)实验研究了交叉断层的活动特征, 认为其所表现出的交替活动性受控于块体运动。焦明若和张国民(2001)以及焦明若等(2002a, b)实验研究了滑动方向相同和相反的含障碍体平行断层的相互作用。马瑾等(2002)基于一系列实验结果讨论了断层相互作用问题, 提出了断层相互作用的4种型式, 并分析了其对应的构造和力学条件及其对地震活动性的可能影响。

3 岩石的脆-塑性转换及塑性流变

岩石变形的脆-塑性转换涉及岩石圈强度、地震发生的条件和地震机制等问题, 而岩石的塑性流变性质是地球动力学的重要参数。刘俊来和岛田充彦(2000)系统分析了中上地壳主要岩石——花岗岩力学行为和变形机制随温度和压力条件的变化, 讨论了大陆岩石圈的强度和变形机制, 并提出一种新的断层带模型。桑祖南等(2001)研究了下地壳常见岩石——辉长岩的脆-塑性转化及其影响因素。何昌荣(2002)利用高温高压实验, 研究了辉长岩的半脆性-塑性流变特征, 获得了系统的流变参数, 并讨论了其在岩石圈强度和地震活动性中的意义。Jin等(2001)在高温高压条件下对上地幔物质榴辉岩和方辉橄榄岩的流变性质进行了实验研究, 获得了榴辉岩的流变参数, 并据此讨论了深俯冲大洋岩石圈的流变性质(金振民等, 2001)。赵永红等(2001)研究了地幔主要造岩矿物之一镍镁尖晶石在位错域的高温蠕变性质。王绳祖等(2001)用相似材料模拟岩石圈的延性层, 研究了边界驱动下岩石圈塑性流动波的传播。王绳祖等(2000)还开展了地幔对流的实验研究, 模拟了非立柱状幔柱和地幔涡旋。

4 地球内部物质的物理性质

岩石物理性质的实验研究可为研究地球内部物质的状态和性质、地球内部结构及动力学提供必要的约束条件。过去4年中, 中国学者在此方面开展了大量研究。其中大多数研究集中在影响岩石物理性质的因素方面。刘斌等(1999)研究了水饱和裂纹对地壳岩样中地震波速及各向异性的影响, 认为利用横波的速度和偏振特性可以推断岩样中定向排列微裂纹的空间取向, 利用 v_p/v_s 比值可以给出有关颗粒边界流体的证据, 并可以估计岩样中的裂纹密度。葛洪魁等(2001)基于一系列实验结果, 讨论了有效应力对岩石弹性波速度的影响。朱茂旭等(1999)研究了高温高压下蛇纹岩的电导率, 表明蛇纹石脱水后电导率急剧增大, 认为这一机制可形成高导层。周文戈等(1999)研究了高温高压下粗面玄武岩的纵波速度, 认为相变是影响波速的主要因素。谢鸿森等(2000)研究了高温高压下蛇纹岩脱水的弹性特征, 表明蛇纹岩脱水伴随着波速的突然下降和振幅增大。柳江林等(2001)研究了在高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄榄岩电导率的变化特征, 讨论了电导率随温度的变化趋势, 表明电导率随温度增加可升高3~5个量级。

一些研究则是针对具体地区的深部介质和结构问题开展的。张友南和孙君秀(1999)研究了华北北部克拉通地壳岩石的波速特征与地壳物质组成。孙君秀等(2000)讨论了华北太古宙长英质岩石的波速及其在地壳中的可能位置。林传勇等(2001)测量了采自华北北部的下地壳麻粒岩包体的波速,并讨论了其地质意义。王多君等(2001)测量了高温高压下纯橄榄岩的电导率,并据此讨论了青藏高原改则—鲁谷存在冷地幔的问题。朱茂旭等(2001)研究了大别超高压榴辉岩在高温高压下的电导率,并据此讨论了大别地区的高导层问题。

5 小结

过去4年中,中国在与地震学和地球内部物理学相关的实验岩石力学与构造物理学方面的进展主要体现在以下几方面:

- 1) 大量实验以及数学模拟结果丰富了对岩石脆性破裂过程,特别是结构和介质非均匀条件下破裂过程的认识,为深入理解地震机制和地震前兆机理提供了有用的资料。
- 2) 在非均匀断层的摩擦行为与地震成核方面取得了一些新结果,这将有助于理解地震动力学过程的复杂性。
- 3) 在岩石脆-塑性转换和塑性流变方面取得了一些新结果,特别是在下地壳和上地幔物质的流变性质方面取得了重要进展,为地震成因和地球动力学研究提供了有价值的资料。
- 4) 在高温高压岩石物理方面取得了一批实验结果,为深入研究地球内部物质的组成和状态、结构和动力学提供了约束条件。

由于任何实验均不可能完全复制自然界的条件,实验研究的主要作用在于建立模型并检验理论。尽管如此,实验研究的发展仍依赖于野外观测和研究。近来的研究表明,介质和结构的非均匀性以及时间过程的复杂性,仍将是地震学和地球内部物理学研究中的核心问题之一。因此,基于地质和地球物理观测,开展地震和地球动力学过程复杂性的研究,从复杂性中寻找主导因素进而建立物理模型,应是未来实验岩石力学和构造物理学研究的方向之一。

参 考 文 献

- 陈峰,修济刚,安金珍,等. 2000. 岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位实验研究[J]. 地震学报, 22(3): 310~318
- 崔晓峰,宋锦良,方陆鹏,等. 1999. 含典型裂纹系硬包体复合模型的应力场及破裂特征[J]. 地震学报, 21(6): 591~596
- 房宗纬,邓明德,钱家栋,等. 2000. 无源微波遥感用于地震预测及物理机制研究[J]. 地球物理学报, 43(4): 464~470
- 高原,李世愚,周蕙兰,等. 1999. 大理岩的剪切波分裂对差应力变化响应的实验研究[J]. 地球物理学报, 42(6): 778~784
- 高原. 2000. 破裂临界状态下大理岩的剪切波分裂特征[J]. 中国地震, 16(3): 197~202
- 葛洪魁,陈颙,韩德华. 2001. 有效应力对岩石弹性波速度的影响[J]. 地球物理学报, 44(增刊): 152~160
- 郭自强,郭子祺,钱书清,等. 1999. 岩石破裂中的电声效应[J]. 地球物理学报, 42(1): 74~83
- 郭子祺,郭自强. 1999. 岩石破裂中多裂纹辐射模型[J]. 地球物理学报, 42(增刊): 172~177
- 郝锦绮,冯锐,周建国,等. 2000. 岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J]. 地球物理学报, 45(3): 426~434
- 郝锦绮,冯锐,李晓琴,等. 2002. 对样品含水结构的电阻率CT研究[J]. 地震学报, 22(3): 305~309
- 何昌荣. 1999. 两种摩擦本构关系的比较研究[J]. 地震地质, 21(2): 137~146

- 何昌荣. 2000. 断层上的地震成核过程与前兆实验研究[J]. 中国地震, **16**(1): 1~13
- 何昌荣. 2002. 攀枝花辉长岩半脆性-塑性流变的实验研究[J]. 中国科学(D辑), **42**(9): 717~726
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000a. 不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征[J]. 地球物理学报, **43**(6): 812~826
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000b. 不同温度条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征[J]. 地震, **20**(3): 87~94
- 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000c. 地壳不同深度温度条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征[J]. 地震学报, **22**(4): 395~403
- 蒋海昆, 张流, 周永胜, 等. 2002a. 基于高温高压岩石破坏实验结果对中强地震前震中附近区域部分地震学现象的初步解释[J]. 西北地震学报, **24**(2): 113~122
- 蒋海昆, 马胜利, 张流, 等. 2002b. 雁列式断层组合变形过程中的声发射活动特征[J]. 地震学报, **24**(4): 385~396
- 焦明若, 张国民. 2001. 滑动方向相反的含障碍体平行断层失稳破坏应变场变化特征的研究[J]. 地震, **21**(3): 21~30
- 焦明若, 张国民, 唐春安, 等. 2002a. 含预制软弱带的岩石破裂过程的数值模拟[J]. 地震学报, **24**(1): 35~41
- 焦明若, 张国民, 马胜利, 等. 2002b. 含障碍体滑动方向相同平行断层失稳破坏应变场、声发射分布特征的研究[J]. 地震学报, **24**(4): 357~365
- 金振民, 章军锋, Green II H W, 等. 2001. 大洋深俯冲流变性质及其地球动力学意义——来自地幔岩高温高压实验的启示[J]. 中国科学(D辑), **31**(12): 969~976
- 李世愚, 滕春凯, 卢振业, 等. 2000. 典型构造微破裂集结的实验研究[J]. 地震学报, **22**(3): 278~287
- 林传勇, 张友南, 史兰斌, 等. 2001. 下地壳麻粒岩包体波速测定及其地质意义[J]. 地质学报, **75**(2): 277~285
- 林鹏, 唐春安, 陈忠辉, 等. 1999. 二岩体系统破坏全过程的数值模拟和实验研究[J]. 地震, **19**(4): 413~418
- 刘斌, 王宝善, 席道瑛. 1999. 水饱和裂纹对地壳岩样中地震波速及各向异性的影响[J]. 地球物理学报, **42**(5): 702~710
- 刘桂萍, 傅征祥, 刘杰. 2000. 摩擦时间依从的地震活动性细胞自动机模型[J]. 地球物理学报, **43**(2): 201~212
- 刘桂萍, 傅征祥. 2001. 地震强度分布不均匀性的摩擦时间依从 CA 模型[J]. 地震, **21**(2): 22~28
- 刘俊来, 岛田充彦. 2000. 大陆地震多震层成因与一个新的地壳断层带模型[J]. 科学通报, **45**(10): 1 085~1 091
- 刘力强, 马胜利, 马瑾, 等. 1999a. 三轴压缩下不同构造花岗岩的微破裂时空分布特征及其地震学意义[J]. 科学通报, **44**(11): 1 194~1 197
- 刘力强, 马胜利, 马瑾, 等. 1999b. 岩石构造对声发射统计特征的影响[J]. 地震地质, **21**(4): 376~386
- 刘力强, 马胜利, 马瑾, 等. 2001. 不同结构岩石标本声发射 b 值和频谱的时间扫描及其物理意义[J]. 地震地质, **23**(4): 481~492
- 柳江林, 白武明, 孔祥儒, 等. 2001. 高温高压下花岗岩、玄武岩和辉橄岩电导率的变化特征[J]. 地球物理学报, **44**(4): 528~533
- 马瑾, 刘力强, 马胜利. 1999. 断层几何与前兆偏离[J]. 中国地震, **15**(2): 105~115
- 马瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 2000. 交叉断层的交替活动与块体运动的实验研究[J]. 地震地质, **22**(1): 65~73
- 马瑾, 马胜利, 刘力强, 等. 2002. 断层相互作用形式的实验研究[J]. 自然科学进展, **12**(5): 503~508
- 马胜利, 马瑾, 刘力强. 2002. 地震成核相的实验证据[J]. 科学通报, **47**(5): 387~391
- 桑祖南, 周永胜, 何昌荣, 等. 2001. 辉长岩脆-塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究[J]. 地质力学学报, **7**(2): 130~138
- 孙君秀, 谢亦汉, 张友南. 2000. 华北太古宙长英质岩石的地震波速度极其在地壳中的位置[J]. 地震学报, **22**(6): 622~631
- 唐春安, 黄明利, 张国民, 等. 2001. 岩石介质中多裂纹扩展相互作用及其贯通机制的数值模拟[J]. 地震, **21**(2): 53~58
- 滕春凯, 李世愚, 和雪松, 等. 2001. 裂纹系微破裂集结和动态扩展的实验研究[J]. 地球物理学报, **44**(增刊): 136~145
- 王彬, 许昭永, 赵晋明, 等. 1999. 含坚固体试样破裂孕育过程中声发射的强度特征及其地震学意义[J]. 地震地质, **21**(4): 411~416
- 王多君, 李和平, 刘丛强, 等. 2001. 高温高压下纯橄榄岩电导率的实验研究: 改则—鲁谷冷地幔的电导率证据[J]. 科

- 学通报, **46**(19): 1 659~1 661
- 王凯英, 马胜利, 刘力强, 等. 2002. 地震前兆时空非均匀性指标 C_V 值的实验检验[J]. 地震学报, **24**(1): 82~89
- 王绳祖, 李建国, 张宗淳. 2001. 岩石圈塑性流动波的实验研究(I)、(II)[J]. 地震地质, **23**(3): 407~431
- 王绳祖, 李建国, 张宗淳. 2000. 地幔对流的实验研究: 非立柱状幔柱和地幔涡旋[J]. 地震地质, **22**(2): 155~166
- 谢鸿森, 周文戈, 李玉文, 等. 2000. 高温高压下蛇纹岩脱水的弹性特征及其意义[J]. 地球物理学报, **43**(6): 806~811
- 许昭永, 王斌, 杨润海, 等. 1999. 组合坚固体应变扰动及波速异常的破裂前兆特征研究[J]. 地震, **19**(4): 331~337
- 许昭永, 杨润海, 赵晋明, 等. 2002a. 加载破裂和卸载破裂的焦散阴影区动态特征的实验研究[J]. 地震学报, **24**(2): 186~195
- 许昭永, 杨润海, 王斌, 等. 2002b. 负坡段加卸载响应比的物理意义及预测效能[J]. 地震学报, **24**(1): 42~49
- 尹京苑, 房宗排, 钱家栋, 等. 2000. 红外遥感用于地震预测及其物理机制研究[J]. 中国地震, **16**(2): 140~148
- 张友南, 孙君秀. 1999. 华北北部克拉通地壳岩石的波速特征与地壳物质组成[J]. 地震地质, **21**(2): 147~155
- 赵永红, Lawlis J D, Karato S. 2001. 镍铬尖晶石位错域的高温蠕变实验研究[J]. 地球物理学报, **44**(5): 686~703
- 周文戈, 谢鸿森, 赵志丹, 等. 1999. 高温高压下粗面玄武岩相变对其纵波速度影响的研究[J]. 科学通报, **44**(4): 424~427
- 朱茂旭, 谢鸿森, 郭杰, 等. 1999. 高温高压下蛇纹岩电导率实验研究[J]. 科学通报, **44**(11): 1 198~1 201
- 朱茂旭, 谢鸿森, 赵志丹, 等. 2001. 大别超高压榴辉岩高温高压下电导率实验研究[J]. 地球物理学报, **44**(1): 93~102
- Jin Zhenmin, Zhang Junfeng, Green II H W, et al. 2001, Eclogite rheology: implications for subducted lithosphere[J]. *Geology*, **29**: 667~670
- Ma Shengli, He Changrong. 2001. Period doubling as a result of slip complexities in sliding surfaces with strength heterogeneity[J]. *Tectonophysics*, **337**: 135~145
- Wu Xiangyang, Baud P, Wong T-f. 2000a. Micromechanics of compressive failure and spatial evolution of anisotropic damage in Darley Dale sandstone[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, **37**: 143~160
- Wu Lixin, Cui Chengyu, Geng Naiguang, et al. 2000b. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, **37**: 879~888
- Wu Lixin, Liu Shanjun, Wu Yuhua, et al. 2002. Changes in infrared radiation with rock deformation[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, **39**: 825~831
- Xu Zhaoyong, Yang Runhai, Zhao Jinming, et al. 2002. Experimental study of the process zone, nucleation zone, and plastic area of earthquakes by the shadow optical method of caustics[J]. *Pure Appl Geophys*, **159**: 1 951~1 966
- Yin Xiangchu, Wang Yucang, Peng Keyin, et al. 2000. Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**: 2 365~2 383

RECENT PROGRESS IN STUDIES OF EXPERIMENTAL ROCK MECHANICS AND TECTONOPHYSICS IN CHINA

Ma Shengli Ma Jin

(*Laboratory of Tectonophysics, Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China*)

Abstract: This paper reviews the recent progress in the studies of experimental rock mechanics and tectonophysics concerning seismology and physics of the Earth's interior in China. The progress is presented in the follows aspects: a) A lot of results of experiment and numerical simulation enrich our knowledge of the brittle fracturing process under the condition with heterogeneity in material and structure; b) Some new results on frictional behavior of non-homogeneous faults reveal the complexity of faulting behavior; c) Some new results on the brittle-plastic transition and plastic flow are obtained; especially the important progress is obtained on rheological properties of rocks in the lower crust and the upper mantle; d) A lot of experimental results are obtained on rock physics at high temperature and pressure and have been used in the study of material composition and state. These results provide useful information for understanding the physical properties and deformation mechanisms of material of the Earth's interior and the process of earthquake physics.

Key words: brittle fracture; fault friction; plastic flow; rock physics; earthquake mechanism