

利用加卸载滞后效应研究岩石非线性变形机理

唐杰* 方兵 蓝阳

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266555)

唐杰, 方兵, 蓝阳. 利用加卸载滞后效应研究岩石非线性变形机理. 石油地球物理勘探, 2014, 49(6): 1131-1137.

摘要 页岩气储层及碳酸盐岩储层的微、细观结构对其宏观的力学响应特性有显著的影响, 本文通过不同应力水平下的循环荷载实验, 分析了岩石在循环荷载下的应力—应变滞后曲线、瞬时杨氏模量、动静态杨氏模量及泊松比的变化曲线, 并分析了施加外力幅度对滞后循环的影响。主要结论包括: ①储层岩石中存在不同尺度的微、细观结构差异性, 这种非均匀性会导致其宏观响应特性的非线性; ②通过分析不同应力水平条件下的瞬时模量, 静态模量以及动态模量, 表明同一状态有不同的弹性模量值, 弹性模量具有应力历史及应力状态的依赖性; ③岩石内部的颗粒接触粘合和黏滑摩擦是岩石在循环荷载作用下产生滞后的原因, 黏附和摩擦在应力不同阶段的相对占比不同, 接触面粗糙度对于非线性响应过程具有重要影响。

关键词 循环荷载 非线性特性 黏附滞后 摩擦滞后 瞬时模量

中图分类号: P631 **文献标识码**: A

1 引言

储层岩石的微、细观结构对宏观的力学和声学等响应特性有显著影响^[1]。多孔介质孔隙结构的不规则性及孔隙所含介质的多相性构成其非均匀性, 岩石中相邻的颗粒紧密接触组成固体骨架, 颗粒间存在裂纹和微结构边界。固结岩石由矿物颗粒组成, 颗粒的接触面间有一些粗糙结构, 在应力加载过程中, 颗粒中心距离会随着外部应力的加载而改变, 两个粗糙面会相互接触, 用颗粒接触粘合滞后和黏滑摩擦机制能够解释实验观察到的岩石的滞后现象。利用细观模型预测宏观地层属性依赖于对其关系的研究, 分析岩石的力学响应特性, 对发展多尺度模型有重要意义^[2]。Spencer^[3]研究了岩石中的应力弛豫、衰减和模量弥散现象; Holcomb^[4]通过循环应力实验, 研究了岩石的记忆、弛豫和损伤特性; Tutuncu等^[5]、Vernik等^[6]指出应力—应变滞后回线的特征与施加荷载的速度、应变振幅以及岩石的饱和流体特性等因素有关; 陈运平等^[7,8]、Xi等^[9]、唐杰等^[10]以及席道瑛等^[11]分析了不同岩石在不同

频率下的循环加载试验。

岩石的宏观力学特性取决于其微、细观结构, 需要深入研究岩石的细观尺度以及毫微尺度的结构、矿物、孔隙、生物成分特性, 以及岩石在外部环境内部颗粒间摩擦和吸附力等所起的作用及其演化特性。本文从岩石单轴循环荷载实验入手, 研究摩擦和黏附力滞后效应对岩石非线性变形特性的影响, 分析细观结构对宏观响应特性的影响。

2 摩擦与黏附滞后效应分析

近年来关于摩擦力的实验分析了分子尺度和微观尺度的表面粗糙度和变形对吸附力和摩擦力的影响, 研究表明即使外表看来很平滑的表面, 在分子尺寸的距离上也是不规则的^[12]。两个粗糙面开始接触时, 最初为点接触, 即使总负荷很小, 在这些接触面积上也会产生很高的局部应力。粗糙接触面上的凹凸体被拉开和推挤在一起时可能发生机械失稳(颗粒接触粘合滞后), 此外在加载过程中在颗粒接触面上还会产生摩擦滑动^[13]。在加载时, 外力需要克服表面力达到力学平衡; 而在卸载时, 除了克服

* 山东省青岛市开发区长江西路 66 号中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 266580。Email: tangjie@upc.edu.cn。

本文于 2013 年 7 月 29 日收到, 最终修改稿于 2014 年 9 月 9 日收到。

本研究受山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ020)、国家自然科学基金项目(41374123)及国家“973”计划项目(2013CB228604)联合资助。

表面力之外,还必须克服颗粒之间的吸引力,这就导致了卸载过程比加载过程中的变形要大,导致了滞后的产生^[14,15]。

2.1 不同岩性岩心加载试验

依据实验要求,将岩石样品制成圆柱状,直径为25mm,长度为50mm,两端面磨平抛光,岩心参数如表1所示。全岩矿物分析采用X射线衍射仪测试完成,孔隙度测试采用氦孔隙度测试仪完成。将样品放入烘箱内,烘干140h成为干燥样品。进行室内物理模型的超声波实验测试时,由于模型较小、所用

的超声波频率高,其波长往往只有几个毫米,实验测试时各项变形量(如长度、系统变形等)做了校正以保证测试结果的正确和达到要求的精度。

循环加载实验采用TAW-1000型微机控制岩石三轴试验机提供压力(图1a),声波测试采用HF-G型智能超声多分量综合测试仪,TAW-1000型微机控制岩石三轴试验机的控制系统采用德国DOLI公司原装进口的EDC全数字伺服测控器,该试验机可以控制加载应力幅度、速度等;纵横波探头接在岩心两侧,测量引伸计已固定好,能够同时给出应

表1 测试岩心参数表

岩样类型	孔隙度/%	干岩样密度/g/cm ³	矿物成分/(%)										
			石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	铁白云石	石膏	菱铁矿	黄铁矿	赤铁矿	黏土矿物
中砾岩	4.5	2.45	9	2	6	31	37	13	0	0	0	0	2
白云岩	1.4	2.66	8	0	0	83	1	0	0	0	1	0	7
砂岩	3.4	2.37	17	2	5	29	42	0	0	0	2	0	3
灰岩	1.6	2.67	1	0	0	97	0	0	0	0	0	0	2
泥岩	1.3	2.69	40	10	16	3	1	1	0	0	0	0	29
页岩	1.4	2.34	8	2	3	64	11	4	0	0	2	0	6

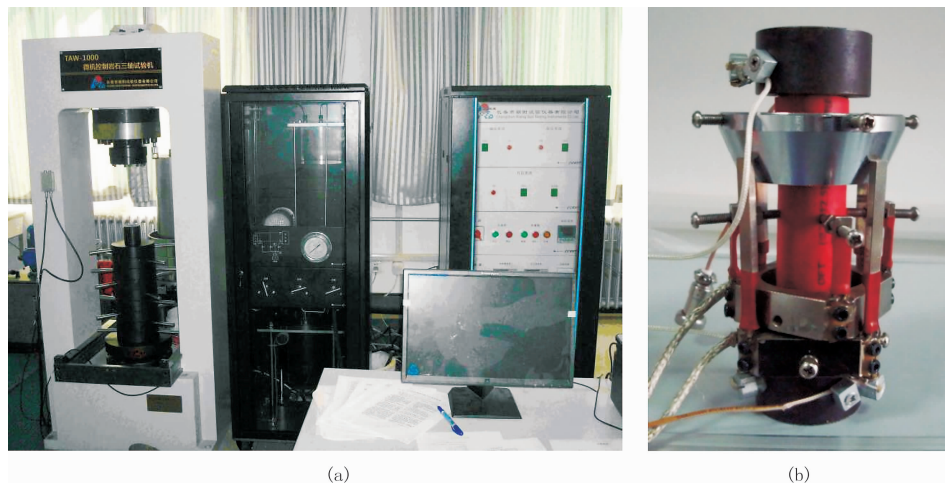


图1 实验设备(a)和岩心密封装置(b)

力、轴向与径向应变及纵横波波速等信息(图1b)。

图2给出了不同类型的岩心在低应力水平下循环加载过程中的岩石力学测试结果。岩石在循环荷载作用下的应力—应变关系呈尖叶状的滞后回线,说明岩石作为一种非均匀材料,在不同的程度上都具有滞后的特性。从应力—应变滞后曲线可以看出,由于泥岩、白云岩及灰岩孔隙度很小,滞后程度小,滞后回线包围的面积较小,而砂岩由于孔隙度较大,在加载与卸载过程孔隙的闭合与张开导致较大的滞后,滞后回线包围的面积较大。

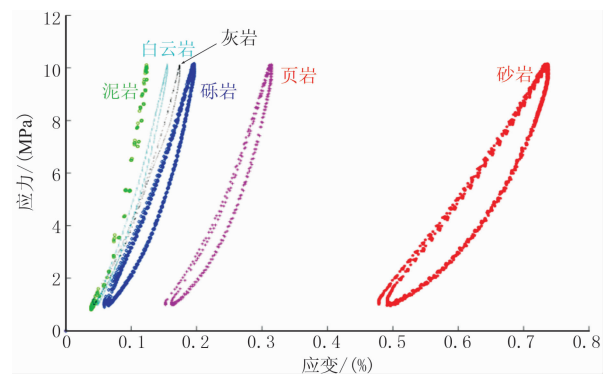


图2 不同类型岩心的应力—应变曲线

2.2 弹性模量特性分析

在循环荷载情况下,岩石在应力—应变图中出现的滞后回线是循环荷载时应力和应变的相位不同步导致的。图 3a 给出了岩石的应力—轴向和径向应变曲线,在荷载反转点上应变的相位进行了调整,使得滞回曲线在应力回转处出现尖叶状而不是椭圆状。如图 3b 所示,在加载阶段应变的相位可能落后于、相等于、或者超前于应力的相位;在卸载阶段应变的相位都落后于应力的相位。

品质因子与应力、应变之间的相位差的关系为

$$\frac{1}{Q} = \tan(\Delta\delta) = \tan(\delta_\sigma - \delta_\epsilon)$$

对于完全弹性材料,应力与应变之间的相位差为零,品质因子 Q 为 ∞ ;而对于完全黏性材料,如牛顿流

体,相位差为 $90^\circ(\Delta\delta=90^\circ)$,使得品质因子 Q 为零。

在循环荷载作用下,对已知岩石的径向应变—轴向应变曲线进行数据分析,曲线在某点斜率为该点的瞬时泊松比;应力—应变(轴向)曲线上的斜率即为该点的瞬时杨氏模量(E)。对曲线进行拟合处理,就可以得到拟合段每一点的斜率值。本文选取了二次曲线拟合和指数曲线拟合两种方法,利用拟合结果,即可得瞬时杨氏模量和泊松比。图 4 给出了瞬时泊松比和瞬时杨氏模量 E 变化曲线,黑色箭头表示加载和卸载过程中杨氏模量的变化方向,可以看出两者在应力的反转点上都是不连续的,瞬时杨氏模量和泊松比都为蝶形的不对称形状,这与岩石的应力—应变滞后回线的形状密切相关,接触面之间的黏附与摩擦可能是观察到蝶形杨氏模量和泊

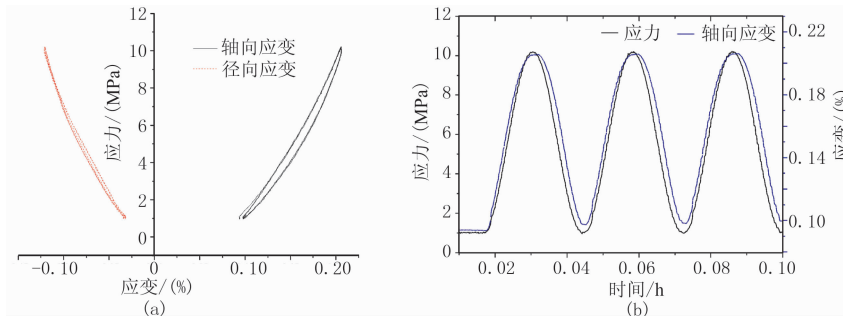


图 3 应力—轴向、径向应变曲线(a)和应力与应变随时间变化曲线(b)

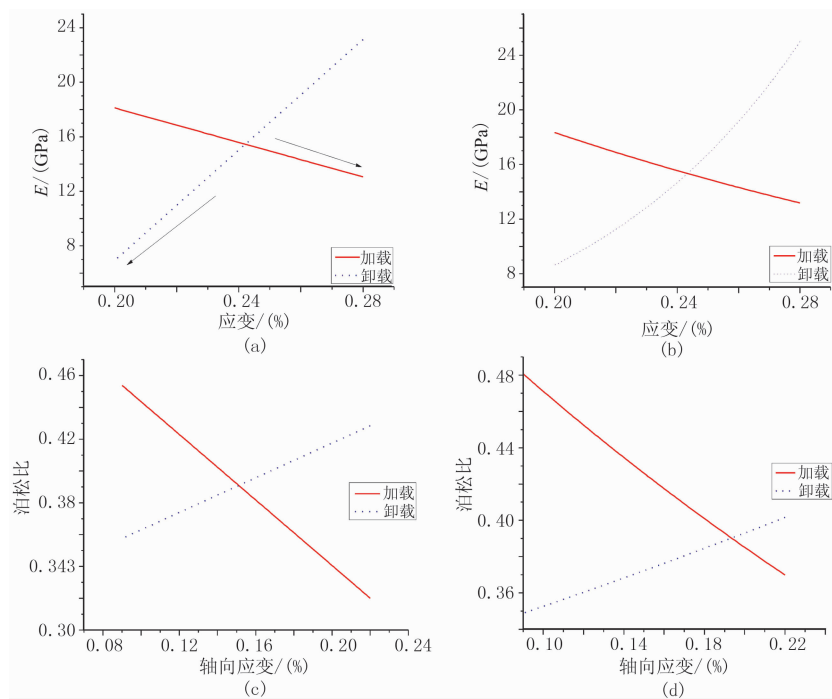


图 4 灰岩岩心加载和卸载阶段杨氏模量和泊松比变化曲线

(a)二次拟合杨氏模量; (b)指数拟合杨氏模量; (c)二次拟合泊松比; (d)指数拟合泊松比

松比的主要原因。二次曲线拟合与指数曲线拟合杨氏模量变化趋势相差不大,以下以指数曲线拟合结果来计算瞬时杨氏模量。

2.3 不同方向岩心加载试验分析

图5给出了通过岩石力学测试获得的不同方向的页岩岩心在循环加载条件下的应力应变曲线以及杨氏模量与应变的关系曲线,从不同方向样品的力学响应可以看出,垂直于层理的样品应变更大,这主

要是垂直层理的岩心加压时平行于层理面的裂隙容易发生闭合导致的。以往的研究表明当垂向主应力小于两个水平主应力时,岩石中容易形成水平裂缝;当垂向主应力大于两个水平主应力时,岩石中容易形成垂直裂缝。此外储层天然裂缝发育,会降低岩石的抗张强度,使得岩石可压裂性高。另外,从图5中可以看出,随着循环过程进行,杨氏模量加载、卸载曲线夹角减小。

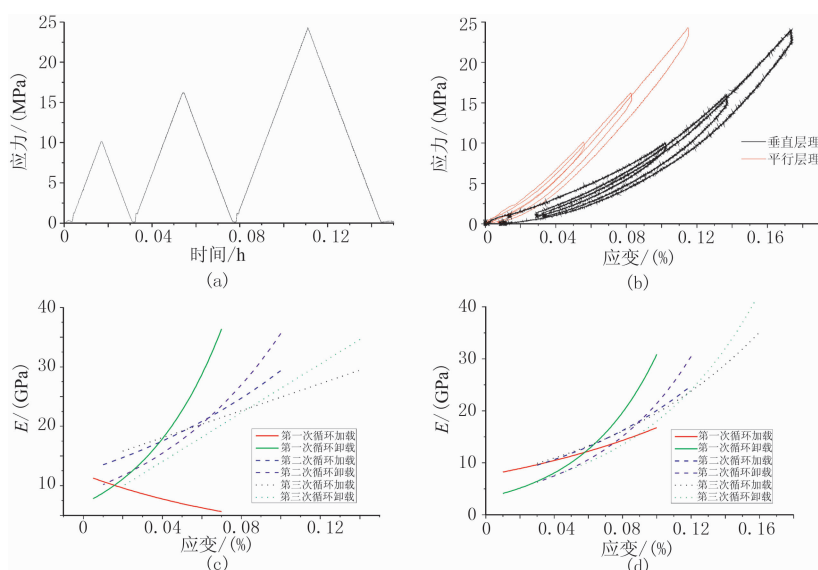


图5 页岩岩心的循环加载条件下的实验结果

(a)应力卸卸载路径; (b)应力应变曲线; (c)平行层理加卸载样品杨氏模量; (d)垂直层理加卸载样品杨氏模量

加载和卸载的差异是滞后效果引起的,因为岩石是在野外现场压力条件下压实,岩石的结构已经承受了它所处位置的最高压力,因此在更高压力条件下岩石才会变形,滞后行为反映了岩石经受的最大应力。但是这种滞后效应不能解释实验结果,首先加载和卸载过程的差异即使在压力低于现场压力条件下也能观测到,另外页岩气储层岩石曾经处在更大的深度更高的压力条件下,理论上不应该观测到滞后行为。这种观测结果显示页岩气储层岩石在地质时间尺度经历了去压实过程,这种去压实是可能的,因为这些储层由于碳氢化合物的产生所导致的超压,使孔隙空间扩展,更短的时间去压实可能是非弹性应变恢复的效果。

3 不同应变振幅下的滞后效应分析

3.1 接触面粗糙度

Tutuncu等^[16]通过整合黏附力和摩擦力效应

改进了早期的模型,模拟结果与实验数据结果吻合较好,相比平滑面接触具有一定粗糙度的表面会有更大的接触面积,在纳米和微尺度的表面粗糙度会明显影响它们的短程相互作用、黏附、摩擦、润滑和破坏行为。根据 Amonton 定律,当施加于一个表面的切向力等于或者大于表面的摩擦力的时候,才能引起滑动^[17]。从分子的观点来讲,这意味着作用力也必须克服接触表面之间的吸引力才能滑动。对要发生的滑动,考虑粗糙度的影响,将传统的 Amonton 定律修正为

$$F_f = \tau_c A + \mu F$$

其中: F_f 为接触面摩擦力; A 是实际接触面积; τ_c 是由于吸附力导致的临界剪切应力; μ 是摩擦系数; F 是外部应力。接触面粗糙度的存在会减少吸附控制的摩擦力,这是由于表面实际接触面积的减少,表观接触面积和实际接触面积的差异会变大^[18]。如图6所示,真实接触面积要比表观接触面积小很多,滞后循环的形状对研究发生在微尺度的变形机制提供了

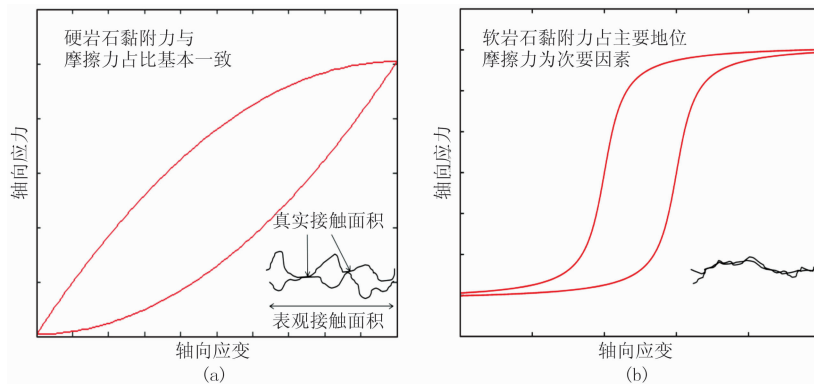


图 6 不同岩石对应的实际与表观接触面积及其使用颗粒接触黏附模型的应力—应变关系示意图
(a)硬岩石; (b)软岩石

重要信息,随着施加在样品上的平均应力的增加,接触面的实际面积近似等于表观面积,吸附力的效果随之增加,导致曲线对称性增加。相对较软的岩石其摩擦力和吸附力效果往往相差不大,吸附和摩擦滞后效果会大于致密岩石。

3.2 瞬时模量演化过程

本文重点研究三种弹性模量:瞬时杨氏模量、静态杨氏模量和动态杨氏模量,其中瞬时杨氏模量如前文所述得到,静态杨氏模量是通过加载循环两端

点连线斜率求得,动态杨氏模量通过波速计算获得。

图 7 和图 8 中给出了不同应力水平下砾岩和白云岩的应力应变滞后回线,瞬时杨氏模量在应力反转点不连续并呈不对称的蝶形,由加载到卸载的应力反转的时间点上,粗糙接触面上的细微结构会从接触变为分离(或具有分离的趋势),机械均衡状态被突然打破,使岩石的物理性质出现了不连续的现象;应力下降时,由于粗糙面间的黏滑运动,使得应变不会即刻松弛,直到作用力大到足够克服摩擦力

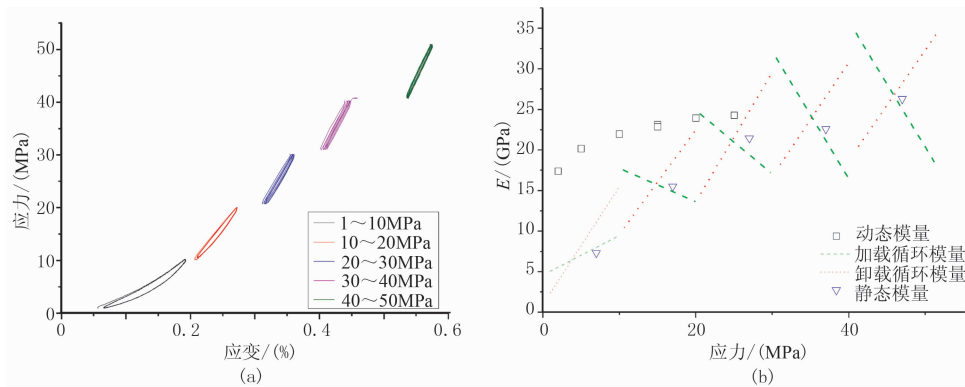


图 7 砾岩不同应力水平下的加卸载曲线(a)和静态、动态模量随轴压变化曲线(b)

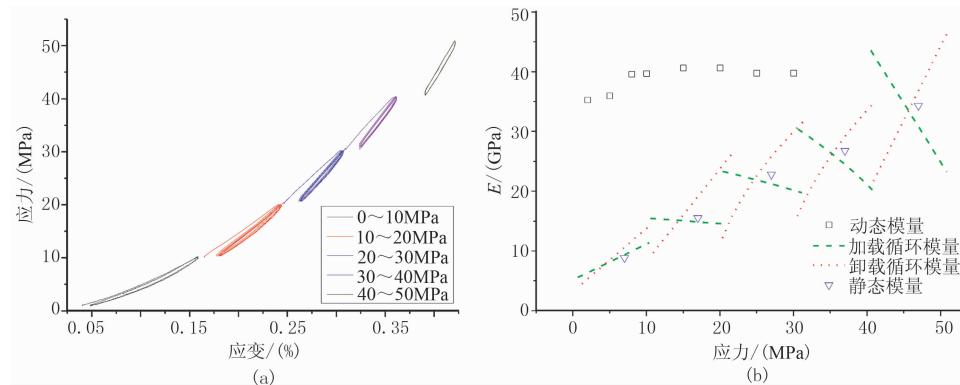


图 8 白云岩不同应力水平下的加卸载曲线(a)和静态、动态模量随轴压变化曲线(b)

为止,从而产生滞后现象;类似的现象在摩擦滑动中也会发生,当两个表面相对滑动时,粘结会不断地被打破和形成。摩擦力由外部施加应力和表面力共同决定,即使没有外部施加应力的时候,也存在由粘结产生的有限摩擦。

滞后效应不仅与岩石自身的内部结构有关,也与施加外力的幅度有关,单独观察图7和图8中的加载阶段,应力较小时,应力—应变关系图上呈现内凹的形状,而应力较大时,加载曲线变成上凸的形状。也可用岩石的模量进行描述,即:应力较小时,岩石的杨氏模量随应力增大呈现增大的趋势;应力较大时,随应力增大岩石的杨氏模量逐渐减小。这可能是岩石内部微裂纹的存在导致的结果。加载应力较小时,岩样中的裂缝孔隙等被压实,当应力增大至一定程度时,原来的微裂缝等不再发生变化。

随着应力水平的提高,应变随之增加,在较低应力水平条件下,由于接触面粗糙度较高,实际接触面积要远小于表观接触面积,随着应力的增大,实际接触面积增大,此时,颗粒粘合滞后对变形起主要作用。随应力增大,岩石应力—应变曲线向右移动,表明在循环荷载过程中存在一定程度的塑性变形,这种塑性变形会显著影响岩石的应力应变行为。从图7和图8中可以看出,砾岩相对较软,在较高压力下会产生较为明显的塑性变形;而白云岩较为致密,在高压条件下塑性形变不明显,同一应力水平下的循环之间吻合较好。当荷载超过上次加载的最大应力时,微裂纹会继续扩展。循环加卸载过程中,脆性岩石内部微裂纹等缺陷在被压密和张开过程中进行着内部调整,循环加载对于脆性岩石强度具有强化效应,岩石内部微裂纹将在每次循环加卸载过程中发生新的断裂扩展,导致岩石损伤累积。外部荷载较小时,岩石的损伤累积程度较小;卸载过程中,微裂纹不断释放,应力—应变曲线出现内凹现象,反映在弹性模量上,那就是微裂纹的不断释放导致岩石的弹性模量逐渐减小。

3.3 动态与静态杨氏模量演化分析

岩石的弹性模量可分为静态模量和动态模量,通过不同方法获得的弹性模量“看”到的裂纹是不一样的。静态模量取决于测量时的应力应变关系,动态模量则取决于测得的波速。实际情况中岩石是一种非均匀材料,其静态和动态模量有很大差别,尤其是在低应力水平下。在石油勘探中了解这种差异是

十分必要的,静态模量在样品的加载历史中会产生许多的变化,而动态模量仅仅对加载历史敏感。除了加载速率的差异外,静态测量和动态测量也包含不同的应变幅度的差异^[19]。图7b和图8b中静态和动态模量不同的主要原因是应变幅度的差异,在高压条件下两者的差别有所减小,所以岩石中的裂缝等可能是静态和动态模量存在差异的内在基础。实验结果表明在低应力水平,静态和动态模量都随应力增加而增大,表明它们对岩石骨架中的相同变化都具有敏感性,这可能是颗粒接触面积的增加导致的;而在高应力水平,动态模量对应力变化不敏感。岩石中有微裂隙存在,超声波测试时超声脉冲几乎不受微裂隙影响,而静态测试时由于压机应力的存在会导致岩石中的微裂隙闭合,对岩石静态变形影响比较大。由趋势线可知,随着压力增加,微裂隙逐渐闭合,岩石变硬,动、静态参数差异变小。

4 结论

本文从岩石单轴循环荷载实验入手,研究摩擦和黏附力滞后效应对岩石非线性变形特性的影响,分析了细观结构对宏观响应特性的影响,主要结论包括:

(1) 储层岩石中存在不同尺度的微细观结构差异性,这种非均匀性会导致其响应特性的非线性,实验得到的蝶形图表明了微观结构特征会影响岩石的宏观力学特性。

(2) 通过分析不同应力水平条件下的瞬时模量,静态模量及动态模量,表明同一状态有不同的弹性模量值,弹性模量具有应力历史的依赖性;瞬时杨氏模量在加载和卸载阶段有很大的不同,瞬时杨氏模量及泊松比呈现不对称的蝶形,反映了岩石内部颗粒接触面之间存在黏滑运动。

(3) 在高应力条件下,岩石内部既有沿着颗粒中心连线做轴向运动的颗粒接触粘合,也有沿着颗粒中心连线做垂向运动的黏滑摩擦,颗粒接触粘合和黏滑摩擦可能是孔隙岩石在循环荷载作用下产生滞后的原因,黏附和摩擦在应力不同阶段的相对占比不同,接触面粗糙度对于非线性响应过程有重要影响。

参考文献

[1] 唐杰,郭渊,孙成禹等. 碳酸盐岩波速与弹性模量变

- 化规律试验研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 62-66.
- Tang Jie, Guo Yuan, Sun Chengyu et al. Experiment study of wave velocity and elastic modules variation characteristics for carbonates. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2012, 36(5): 62-66.
- [2] Behura J, Batzle M, Hofmann R et al. The shear properties of oil shales. The Leading Edge, 2009, 28(7): 850-855.
- [3] Spencer J W. Stress relaxation at low frequencies in fluid saturated rocks; Attenuation and modulus dispersion. J Geophys Res, 1981, 86(B3): 1803-1812.
- [4] Holcomb D J. Memory, relaxation, and microfracturing in dilatant rock. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1981, 86(B7): 6235-6248.
- [5] Tutuncu A N, Podio A L, Gregory A R et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rocks, Part I: Effect of frequency and strain amplitude. Geophysics, 1998, 63(1): 184-194.
- [6] Vernik L, Liu X. Velocity anisotropy in shales: A petrophysical study. Geophysics, 1997, 62(2): 521-532.
- [7] 陈运平, 席道瑛, 薛彦伟. 循环荷载下饱和岩石的滞后和衰减. 地球物理学报, 2004, 47(4): 766-774.
Chen Yunping, Xi Daoying and Xue Yanwei. Hysteresis and attenuation of saturated rocks under cyclic loading. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 766-774.
- [8] 陈运平, 席道瑛, 薛彦伟. 循环荷载下饱和岩石的应力—应变动态响应. 石油地球物理勘探, 2003, 38(4): 409-413.
Chen Yunping, Xi Daoying and Xue Yanwei. Dynamic stress-strain response in saturated rocks under cycling load. OGP, 2003, 38(4): 409-413.
- [9] Xi D Y, Liu X Y, Zhang C Y. The corresponding relationship between time and temperature on relaxation attenuation of saturated rocks. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(11): 2157-2173.
- [10] 唐杰, 孙成禹, 周家惠等. 岩石非线性阻尼滞后响应特性研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2948-2955.
Tang Jie, Sun Chengyu, Zhou Jiahui et al. Study of nonlinear damping hysteresis response character for rock sample. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S 1): 2948-2955.
- [11] 席道瑛, 易良坤, 席军等. 用应力—应变法研究饱和砂岩的黏弹性特征. 石油地球物理勘探, 2012, 47(4): 619-623.
- Xi Daoying, Yi Liangkun, Xi Jun et al. Saturated sandstone viscoelastic behavior analysis by stress-strain approach. OGP, 2012, 47(4): 619-623.
- [12] Tutuncu A N, Podio A L, Sharma M M. An experimental investigation of factors influencing compressional- and shear-wave velocities and attenuations in tight gas sandstones. Geophysics, 1994, 59(1): 77-86.
- [13] Aleshin V, Van Den Abeele K. Micro-potential model for stress-strain hysteresis of micro-cracked materials. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005, 53(4): 795-824.
- [14] Vakhnenko V O, Vakhnenko O O, TenCate J A et al. Modeling of stress-strain dependences for Berea sandstone under quasistatic loading. Physical Review B, 2007, 76(18): 184108(8).
- [15] Aleshin V, Van Den Abeele K. Friction in unconforming grain contacts as a mechanism for tensorial stress-strain hysteresis. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007, 55(4): 765-787.
- [16] Tutuncu A N, Podio A L, Gregory A R. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, Part II: Hysteresis effects and influence of type of fluid on elastic moduli. Geophysics, 1998, 63(1): 195-203.
- [17] Hornby B E. Experimental laboratory determination of the dynamic elastic properties of wet drained shales. J Geophys Res, 1998, 103(B12): 29945-29964.
- [18] Yoshizawa H, Israelachvili J. Fundamental mechanisms of interfacial friction, 2: Stick-slip friction of spherical and chain molecules. The Journal of Physical Chemistry, 1993, 97(43): 11300-11313.
- [19] Guyer R A, Johnson P A. Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials. Physics Today, 2008, 52(4): 30-36.

(本文编辑: 宣明理)

作者简介



唐杰 博士, 副教授, 1980 年生; 2003 年本科毕业于中国科技大学地球物理专业, 2008 年博士毕业于中国科技大学地球物理专业; 现在中国石油大学(华东)地球科学与技术学院主要从事地震岩石物理方面的研究。