

文章编号: 1001-1455(2012)03-0333-04

冲击载荷下岩石压胀对其性质的影响^{*}

王俊奇, 王亮, 张杰

(西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 采用落锤动态加载岩石实验系统, 通过调节落锤质量、下落距离及活塞杆垫板材料, 记录岩石瞬间形成冲击压力脉冲, 研究压胀对不同岩石性质影响的规律。实验结果表明, 压胀产生后岩石的性质发生了改变, 岩石的渗透率有不同程度的增加, 且岩石越致密, 渗透率增加倍数越大; 岩石的弹性模量和弹性极限随岩石体积的增加而降低; 压胀产生后纵波和横波在岩石中的传播速度减小, 岩样内部产生了微裂纹或原有微裂纹延伸扩展造成孔隙度增加。

关键词: 固体力学; 压胀; 冲击载荷; 岩石; 渗透率

中图分类号: O347

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

压胀是存在于岩石中的一种较为特殊的力学特性, 主要特征是在一定的三轴不均匀压应力作用下, 岩石体积不缩小反而增加, 同时孔隙度和渗透率也增加, 强度下降^[1]。尽管岩石的压胀特性很早就被人们发现, 但由于实验条件所限, 对岩石压胀特性的研究主要还集中在静态条件下(应变率小于 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), 对动态条件下(应变率大于 10^{-4} s^{-1})压胀后岩石的性质还缺乏深入研究^[2], 岩石压胀特性利用方面的研究较少。乌克兰 1975 年开始利用压胀特性进行油井增油试验, 我国于 1998 年在延长油田试验压胀增产技术^[3-5]取得了一定的效果, 但一些机理问题需要进行深入研究。本文中立足试验, 研究压胀后岩石渗透率、弹性模量、声速特性等参数的变化规律, 为压胀增产技术的应用提供理论基础。

1 实验装置及方法

目前国内外还没有专门用于研究空间载荷下岩石压胀特性的实验设备。由于压胀实验要求岩样受到的空间应力和应变张量都是冲击性的, 因此, 要求实验装置必需能模拟地应力和地层压力(孔隙压力)的初始应力状态, 能连续记录应力和应变张量所有的分量及其随时间的变化, 并根据实验记录进行分析研究^[6]。岩石压胀动态实验系统由实验台、落锤加载系统、岩样室、测试系统和泵压系统组成, 系统的总体设计如图 1 所示。

实验台的运行参数如下: 轴向最大冲击应力, 1.5 GPa; 侧向最大冲击应力, 200 MPa; 额定静态侧向压力, 100 MPa; 额定孔隙压力, 50 MPa; 可靠响应频率, 20 kHz; 载荷脉冲时间, 0.2~20 ms。

实验时将准备好的岩样置于厚壁圆筒中, 重锤自由下落对活塞杆施加非完全弹性碰撞并将冲击载荷传递到

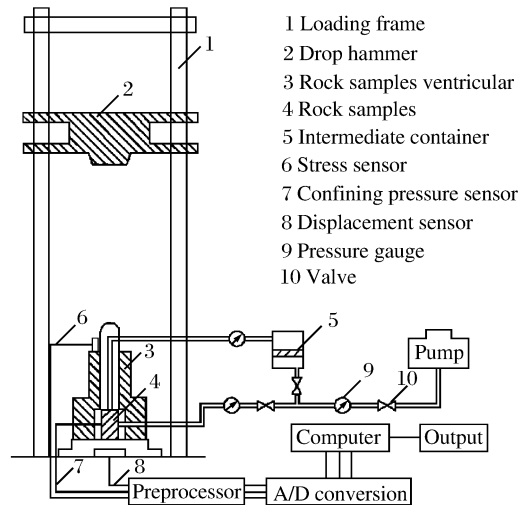


图 1 落锤加载岩石压胀实验系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of drop hammer loading experimental system

* 收稿日期: 2011-03-22; 修回日期: 2011-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174162); 陕西省高校省级重点实验室重点科研项目(2010JS034); 陕西省教育厅专项科研项目(11JK0100)

作者简介: 王俊奇(1966—), 男, 博士, 副教授。

被测岩样上,形成冲击压力脉冲。承压容器的压力腔给被测岩样提供一个初始的受压载荷状态,以模拟地层岩石应力对岩样轴向加载。数据采集系统将位移、孔隙压力、周围压力、应变数据记录并存储在计算机中,通过专用的软件进行数据回放、转换和分析,研究岩石在冲击载荷作用下的压胀规律。

2 实验结果分析

岩石不均匀受压产生的压胀效应提高了孔隙度从而改变了岩石的渗透率,因此,冲击载荷下岩石压胀的变化规律是通过压胀对渗透率、弹性模量、声波速度的分析而获得的。

2.1 压胀对渗透率的影响

渗透率是评价和开发油气田的基本参数之一,对岩样不均匀加载产生的压胀效应改变了岩石渗透率,造成岩石体积增加,更大程度地影响到渗透率。为了研究压胀效应对岩石渗透率的影响,先用岩样流动实验仪测定压胀前饱和标准盐水的岩样的渗透率 K_0 ,然后利用岩石压胀实验系统使岩石产生压胀,最后用岩样流动实验仪测定压胀后饱和标准盐水的岩样的渗透率 K ,实验结果如图 2~3 所示。

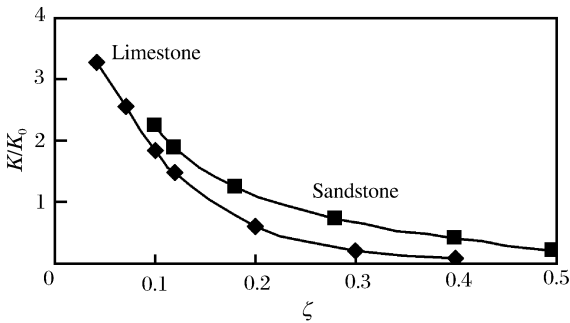


图 2 岩石渗透率比值与加载不均匀度关系
Fig. 2 Relation between permeability ratio and loading unevenness

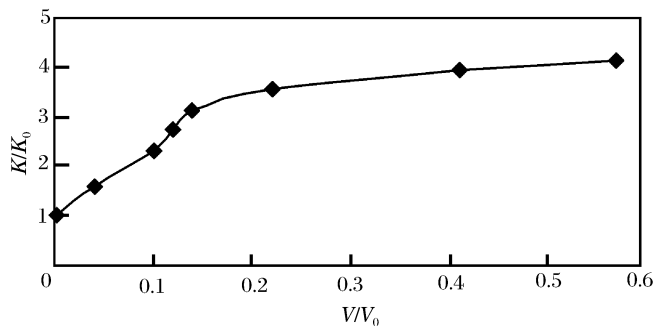


图 3 岩石渗透率比值与压胀量关系
Fig. 3 Relation between permeability ratio and dilatancy ratio

由图 2 中可以看出,渗透率的比值与岩石的性质有关,不同岩质的岩石其渗透率的比值有显著不同;渗透率的比值随岩石不均匀加载系数的增加呈指数关系减小,压胀后渗透率 K 可由下式来表达

$$K = \alpha K_0 \sigma_1 e^{-\beta \zeta} \tag{1}$$

式中: K_0 为原始渗透率, σ_1 为岩石弹性强度极限, α, β 分别为与岩石性质有关常数, ζ 为加载不均匀度。

由图 3 中可以看出,渗透率比值的变化与压胀量(岩石压胀后体积 V 与压胀前体积 V_0 的比值)呈对数关系,开始时随着压胀量的增大而迅速增大,随后逐渐变缓,这主要是压胀造成微裂纹产生和原有微裂纹的扩展和连通造成的。

2.2 压胀对岩石弹性模量的影响

图 4 所示为砂岩和灰岩在单轴条件下不同压胀量与其弹性模量的关系曲线。从图 4 中可以看出,随着压胀量的增加,岩样的单轴弹性模量减小,且在开始阶段,弹性模量随压胀量的增加下降得比较快,之后随压胀量的增加,弹性模量下降得较为缓慢。图 5 所示为弹性模量与不均匀加载次数之间的关系曲线。从图 5 中可以看出,随着不均匀加载次数的增加,岩石的单轴弹性模量降低,说明了重复加载对岩石的体积压胀特性有重要影响。

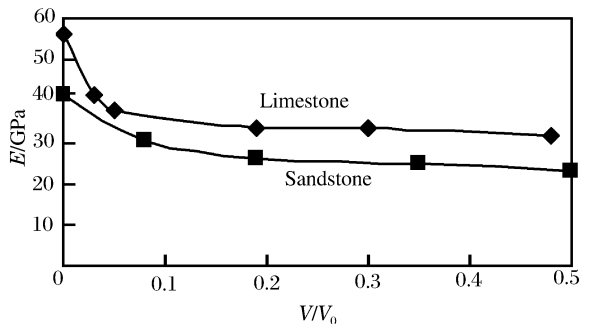


图 4 岩石弹性模量与压胀量关系
Fig. 4 Relation between elasticity modulus and dilatancy ratio

图 6 所示为岩石的弹性极限 σ_1 与压胀量之间的关系图。从图 6 中可以看出,随着压胀量的增大,

其弹性极限 σ_1 减小,且在开始阶段,弹性极限随压胀量的增大下降得比较快,之后随着压胀量增大,岩石的单轴弹性极限下降得较为缓慢,这与弹性模量的变化是一致的。可见压胀效应不仅会导致岩石的孔隙度和渗透率增加,同时还会造成岩石的弹性模量和弹性极限的降低。

岩石压胀后其弹性模量和弹性强度都不同程度减小,这个特点在采矿工程中可以用来增加开采速度,降低采矿成本;另外,在隧道设计和施工过程中必须考虑压胀特性对隧道安全的不利影响以保证隧道围岩在开挖后不发生明显的扩容和破坏。

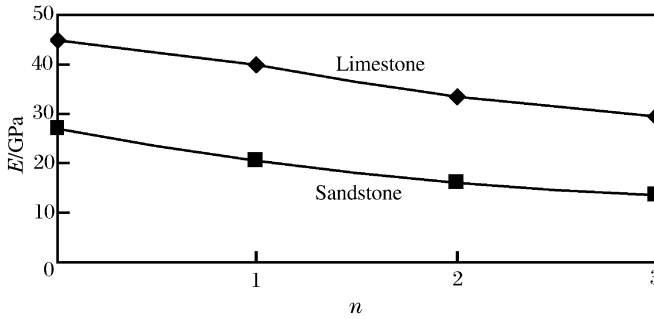


图 5 岩石弹性模量与不均匀加载次数的关系
Fig. 5 Relation between elasticity modulus and nonuniform loading times

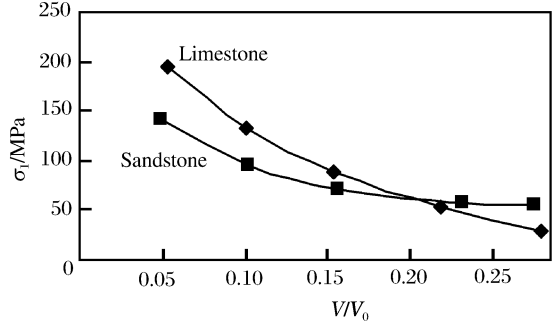


图 6 岩石的弹性极限与压胀量的关系
Fig. 6 Relation between elastic limit and dilatancy ratio

2.3 压胀对岩石声波速度的影响

研究压胀对岩石声波速度影响时,利用声波检测仪进行测试,用横波换能器测出岩样的横波传播时间,得出横波波速,用纵波换能器测出岩样的纵波传播时间,得出纵波波速,测试结果如表 1 所示,表中 v_s 、 v_p 分别为横波和纵波的波速。

表 1 压胀前后岩石中声波速度

Table 1 Sonic velocities before and after dilatancy in rock

n	压胀前			压胀后		
	v_s /(km/s)	v_p /(km/s)	v_p/v_s	v_s /(km/s)	v_p /(km/s)	v_p/v_s
1	4.11	2.20	1.86	3.37	1.94	1.74
2	4.06	2.49	1.63	3.17	2.00	1.58
3	2.63	1.67	1.57	1.92	1.29	1.49
4	2.81	1.55	1.81	2.08	1.27	1.63
5	3.77	2.26	1.67	3.24	2.04	1.59
6	4.18	2.66	1.57	3.30	2.14	1.54

从表 1 中的实验数据可以看出,岩石出现压胀效应以后,其横波和纵波速度都比实验前有所减小,这是由于压胀后岩样内部产生微裂纹及原有微裂纹延伸和扩展所造成孔隙度增加;同时,压胀后岩石的纵波速度与横波速度的比值减小,这将会影响岩石的动态弹性模量和泊松比。

3 结 论

从岩石压胀动态实验入手,通过室内实验对压胀产生后岩石性质的变化进行研究,得到以下结论:

- (1) 岩石压胀后其渗透率和孔隙度增加,渗透率增加与岩石不均匀加载系数有关,随不均匀加载系数的增加,岩石的渗透率减小。
- (2) 岩石压胀后不同的岩石声波传播速度都有不同程度地降低,同时弹性模量和弹性极限降低,表现为岩石的弱化。
- (3) 压胀特性在采矿工程、隧道设计、地质灾害分析方面也有着重要的意义。它涉及岩石力学、爆炸力学、材料力学、石油工程等多个学科,对其规律的更深入的认识,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈宗基,康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. 岩石力学与工程学报,1983,13(1):11-21.
CHEN Zong-ji, KANG Wen-fa, et al. Before the earthquake, the rock destruction and expansion of time-related [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983,13(1):11-21.
- [2] 陈宗基,石泽全,于智海,等. 用 8000 kN 多功能三轴仪测量脆性岩石的扩容、蠕变及松弛[J]. 岩石力学与工程学报,1989(2):97-118.
CHEN Zong-ji, SHI Ze-quan, YU Zhi-hai, et al. Multi-axis measured with 8000 kN brittle rock expansion, creep and relaxation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1989(2):97-118.
- [3] 田和金,薛中天,张杰,等. “压胀松动”增产技术现场试验研究[J]. 石油钻采工艺,2000,22(2):46-50.
TIAN He-jin, XUE Zhong-tian, ZHANG Jie, et al. Stimulation technique of “loosening rock by the dilatancy of explosive waves” field test research[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000,22(2):46-50.
- [4] 张杰,田和金,王爱华,等. 子长油矿 4207 裸眼井“压胀松动”增产技术现场试验[J]. 西安石油学院学报,2000,15(1):21-22.
ZHANG Jie, TIAN He-jin, WANG Ai-hua, et al. Field test of “loosening rock by the dilatancy of explosive waves” in the open hole well 4207 in Zichang oil field[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2000,15(1):21-22.
- [5] 王爱华,田和金,张杰,等. 套管井“压胀松动”增产技术现场试验研究[J]. 西安石油学院学报,2000,15(1):17-19.
WANG Ai-hua, TIAN He-jin, ZHANG Jie, et al. Field test of “loosening rock by the dilatancy of explosive waves” in the casing well 4242 in Zichang oil field[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2000,15(1):17-19.
- [6] 张杰,廖红伟,薛中天,等. “压胀松动”增产技术[J]. 天然气工业,2006,26(8):107-109.
ZHANG Jie, LIAO Hong-wei, XUE Zhong-tian, et al. Stimulation technique of “loosening rock by the dilatancy of explosive waves” [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(8):107-109.

Influences of dilatancy on rock properties under shock loading*

WANG Jun-qi, WANG Liang, ZHANG Jie

(College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University,
Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: Drop-hammer load experiments were performed on different rock samples. By changing the drop hammer weight, drop height and piston rod spacer material, transient shock pressure pulses in the rock samples were recorded by the pressure gauges. Experimental results indicate that the properties of the rocks undergo the following changes induced by dilatancy: (1) the permeability of the rocks increases in varying degrees, and the denser the rock is, the greater the increase multiple of the permeability is; (2) the elastic modulus and elastic limit decrease with the increase of rock volume; (3) the propagation velocities of longitudinal and transverse waves decrease in the rocks; (4) the porosities in the rocks increase due to the extension of the new-produced or inherent micro-cracks in the rocks.

Key words: solid mechanics; dilatancy; impact load; rock; permeability

* Received 22 March 2011; Revised 21 June 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51174162)

Corresponding author: WANG Jun-qi, wjq_xasy@163.com