砂岩回弹物理模拟实验

姜振学1,2),田丰华1,2),夏淑华1,2)

- 1) 中国石油大学盆地与油藏研究中心,北京,102249
- 2) 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室,北京,102249

内容提要:地层剥蚀会造成下伏砂岩的回弹,而砂岩回弹可为油气聚集提供更多的空间。在地质条件下,砂岩回弹受哪些因素的影响,能有多大的回弹量?本文在前人研究的基础上,采用从美国引进的全伺服三轴岩石力学实验装置及正交实验方法,分别对人造砂岩和大庆长垣的实际砂岩进行物理模拟实验,探讨砂体回弹的回弹量及其影响因素。实验结果表明:在岩石弹性范围内,卸载会造成下伏砂体回弹,且回弹量是可观的,可超过1%;岩性是影响砂体回弹的最主要的因素,围压次之;砂体回弹过程与有效上覆压力关系密切,可以用对数模型来描述。

关键词:砂岩回弹;物理模拟;正交实验;卸压;有效上覆压力。

负荷减少会引起饱和介质回弹(Terzaghi, 1923a, 1923b)。对含油气盆地的研究表明,在绝大 多数含油气盆地的目的层之上存在着数个剥蚀面, 也就是说发生过多次的剥蚀卸载过程。地层抬升剥 蚀,对于埋藏在其下砂岩地层是一个压力卸载的过 程,在岩石的弹性范围内,也会引起砂岩地层的回 弹。在骨架体积不变的假设下,砂岩地层的回弹将 会导致砂岩地层孔隙扩容(Lutton,1970),为油气聚 集提供更多的空间。曾经有很多学者已经注意到了 这种现象,并认为它可能是一种新的油气成藏机理 (关德范,1981;孙雄等,1996;庞雄奇等,2000;关德 范等,2004;郝芳等,2006)。受岩石力学手段的限 制,前人在研究岩石卸载过程中的力学特性时,一般 都是借鉴岩石在加载过程中的力学特性,再进行逆 推导,大多数情况只是一种描述性的推导(Fatt, 1958; Mchlatchie et al., 1958; Neuzil, 1983; Neuzil et al., 1983; Parks et al., 1995), 结论也相对简单。 姜振学等(2004)用散沙模拟卸载后的回弹量,取得 了比较积极的成果。但是,实际地质条件下,岩石的 回弹过程如何?它受哪些因素的影响?回弹量有多 大?这些基本的问题都没有一个准确的回答。本文 以人造岩心及大庆长垣的天然岩心为研究对象,采 用正交实验的方法,借助于美国先进的全伺服三轴 岩石力学实验装置,进行了岩石在卸载条件下力学 实验。实验证明岩石在卸载过程中的回弹量是可观的,它极有可能对油气成藏产生积极的影响。

1 实验原理与装置

负荷减少会引起饱和介质的回弹(或膨胀)是一个基本的物理现象,也是本实验的理论基础(陶振宇,1981;尤明庆,2000)。

该实验是在中国石油勘探开发研究院廊坊分院 的压裂酸化中心,采用美国引进的全伺服三轴岩石 力学实验系统进行的(图 1),所有的岩样加工、实验 方法、数据处理等都严格按照国际岩石力学学会推 荐的方法进行。

2 实验参数的选取与实验设计

2.1 实验参数的选取

由于自然界影响岩石变形的因素十分复杂,要 想将这些复杂因素完全反映出来,抽象为一个力学 模型来充分表达,目前还存在一定的困难,尤其是地 质时期中形成的地质体,除了各种影响因素外,还可 能经受过反复的加载、卸载,使岩石组构更加复杂, 建立统一的模型则更加困难和复杂。目前所观察到 的构造形迹大多是经受过几次强烈的地壳运动叠加 后的产物。前期构造运动在地质体中残留一部分应 力与变形,后期运动又在这个基础上产生新的附加

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40472078、40372071)和国家"973"项目(编号 G1999043310)资助成果。

收稿日期:2006-12-17;改回日期:2007-01-10;责任编辑:周健。

作者简介:姜振学,男,1963年生,博士,教授。1986年毕业于大庆石油学院石油地质专业。研究方向:油气形成与分布规律,盆地分析与油气资源评价。通讯地址:102249,北京昌平,中国石油大学盆地与油藏研究中心; Email:jiangzx@cup. edu. cn。

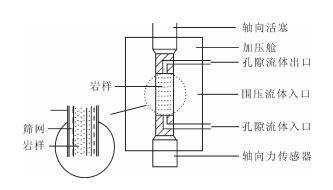


图 1 三轴压力实验装置示意图
Fig. 1 Sketch map of triaxial-pressure
experiment equipment

应力与变形。就其地质过程而言,多具有缓变一突变一缓变的反复过程,既有继承性,又有发展性。这些复杂因素直到目前还没有彻底搞清,因此,目前只能抓住一些主要因素,忽略一些次要、不影响本质的因素,将岩石抽象为一个较理想的力学模型。在本实验中先假定:岩石的骨架在压实和卸载过程中其体积是不变化的,而只是出现不同的变形,存在体积变化的只是岩石中的孔隙,包括裂隙和孔隙(陈庆宣等,1998; 谭成轩等,2006)。

岩石的回弹,或者说孔隙扩容是卸荷过程中的一种变形特征,其影响因素很多,例如岩石的类型、组构、围压、温度、含水量、载荷时间及载荷性质等等。在充分查阅前人研究成果的基础上,受实验条件的制约,初步确定以下7个影响砂体回弹的主要因素。

岩性:砂岩是本次研究的主要岩性,本实验主要考虑砂岩粒度对回弹量的影响,包括人造粗砂岩、细砂岩、粉砂岩;天然中砂岩、细砂岩5个等级。其中人造岩心由华北油田研究院压制,主要成分为石英砂;天然岩心采至大庆长垣,埋藏深度1600 m。粒度等级的划分采用1990年石油天然气总公司颁布的"石油行业碎屑岩颗粒粒度分级标准"(冯增昭,1993)。

上覆压力、围压、孔压:实验中称上覆压力为轴向压力。根据大庆油田 37 口井不同深度水力压裂测试数据(谢富仁等,2003),参考实际的实验条件,实验中压力取值为:轴向压力取 57 MPa、54 MPa、51 MPa、48 MPa、45 MPa 5 个压力水平;围压取 42 MPa、39 MPa、36 MPa、33 MPa、30 MPa 5 个压力水平;孔隙流体压力取 30 MPa、20 MPa、10 MPa、5 MPa、0 MPa 5 个压力水平。

卸压速率包括围压、孔压和轴压卸压速率:在上面的设定中已经分别给出了轴压、围压和孔压的最大值,为了保证孔压始终小于围压,围压和孔压将以相同的速率变化。速率值的选定是在国内外盆地剥蚀量和剥蚀时间统计的基础上,给出的极具代表性的值,具体经过如下步骤计算:①剥蚀速率=剥蚀量/剥蚀时间;②将剥蚀速率换算成卸压速率,每立方米的岩石按2300 kg 计算;③再将实际地质历史时期的卸压速率按照:实验室1 s=自然界100 Ma的时间比例尺(周建勋等,1996)换算成实验室可操作的量。经过上面的处理,得到如图2 所示的数据,根据图中所给速率,取典型值分别为0.2 MPa/s、0.02 MPa/s、0.01 MPa/s、0.006 MPa/s、0.003 MPa/s 5 个水平。

因此,上述实验条件和实验水平是在综合考虑 实际地质条件和现有实验室条件的基础上给出的, 它不但根源于实际地质条件,而且可操作性强。

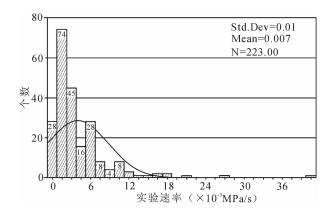


图 2 剥蚀速率分布直方图

Fig. 2 Histogram of erosion rate

2.2 正交实验设计

要考虑这么多因素对回弹量的影响,势必要做很多的实验,为了减少实验的次数,并达到实验目的,本次引进了一种科学的实验设计方案——正交实验设计方案。

正交实验设计是以概率论和数理统计为理论基础,科学地安排多因素实验的一类实用性很强的数学方法,它所研究的主要内容是如何合理地安排实验以使实验次数尽可能的少,并能正确地分析实验数据,其真实的目的是找出较优(或最优)实验方案的一种科学方法,具体来说,它能明确回答两个方面的问题(吴翊等,1995):① 因素的主次,即各因素对所考察指标影响的大小顺序;② 因素与指标的

关系,即每个因素各水平不同时,指标是怎样变化的。

本次实验考虑了 6 个因素,每个因素有 5 个水平,因此选用 $L_{25}(5^6)$ 正交表来安排实验,总共实验次数为 25 次(表 1)。

表 1 砂体回弹正交实验安排表

Table 1 Orthogonal experiment table of sandstone rebounding

Table	1 Orth	ogonai e	speriment	table of	Sanustoi	ie rebounding		
	岩心号	实验条件						
序号		目标值 (MPa)	由压 卸压速率 (MPa/s)	围压 (MPa)	孔压 (MPa)	围压、孔压 卸压速率 (MPa/s)		
1	C1	51	0.006	33	10	0.003		
2	C5	48	0.01	42	20	0.02		
3	C6	54	0.003	39	5	0.01		
4	C7	45	0.02	36	30	0.006		
5	C12	57	0.2	30	0	0.2		
6	X2	51	0.003	36	20	0.2		
7	X11	48	0.006	30	30	0.01		
8	X12	57	0.02	33	5	0.02		
9	X13	54	0.2	42	10	0.006		
10	X16	45	0.01	39	0	0.003		
11	F1	51	0.2	39	30	0.02		
12	F2	45	0.006	42	5	0.2		
13	F3	48	0.003	33	0	0.006		
14	F10	54	0.02	33	20	0.003		
15	F11	57	0.01	36	10	0.01		
16	DX1	51	0.02	42	0	0.01		
17	DX2	45	0.003	30	10	0.02		
18	DX4	57	0.006	39	20	0.006		
19	DX5	48	0.2	36	5	0.003		
20	DX7	54	0.01	30	30	0.2		
21	DZ1	48	0.02	39	10	0.2		
22	DZ2	45	0.2	33	20	0.01		
23	DZ4	51	0.01	30	5	0.006		
24	DZ5	57	0.003	42	30	0.003		
25	DZ6	54	0.006	36	0	0.02		

注:表中岩心号"C"表示人造粗砂岩,"X"表示人造细砂岩,"F"表示人造粉砂岩,"DZ"表示采至大庆油田的天然中砂岩,"DX"表示采至大庆油田的天然细砂岩。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

表 2 为实验的部分数据,每一个类型的岩心,选择了两个作为代表。表中分别统计轴向回弹量、径向回弹量和体积回弹量,回弹量的单位为百分数,其计算方式如下:

回弹量=(卸压后的尺寸—卸压前的尺寸)/ 卸压前的尺寸×100%

3.2 实验结果分析

在石油行业中, 孔隙体积的变化才能引起真正的兴趣, 因此, 下面仅对体积回弹量进行分析。

表 2 天然岩心和人造岩芯部分实验数据
Table 2 Partial experiment data of natural cores
and artificial cores

		实验结果					
序号	岩心号	轴向回弹 量(%)	径向回弹 量(%)	体积回弹 量(%)	杨氏模量 (MPa)	泊松比	
1	C1	0.82	0.715	1.85	2820	0.19	
5	C12	0.513	0.803	1.352	1170	0.21	
7	X11	1.129	0.583	1.423	1410	0.17	
6	X16	1.234	0.714	2.592	3090	0.18	
11	F1	0.861	0.333	1.214	3720	0.37	
14	F10	0.934	0.821	1.97	3620	0.35	
19	DX5	0.304	0.262	0.825	20390	0.19	
20	DX7	0.358	0.128	0.405	7750	0.15	
21	DZ1	0.512	0.314	1.143	4270	0.12	
22	DZ2	0.239	0.206	0.621	18810	0.24	

3.2.1 方差分析

方差分析法是正交实验固有的数据分析方法,它可以把因素水平的改变所引起的实验结果的波动与由实验误差引起的实验结果的波动进行比较,并提供一个标准来判断因素的作用是否显著。方差分析结果表明岩性是影响体积回弹量的最显著的因素,也就是说不同的岩性其回弹量会相差很大;围压也是影响回弹量的显著因素之一,但它显然没有岩性对回弹量的影响大;轴向压力对回弹量的影响是最小的(表 3)。

图 3 可以形象地表示这种影响大小,从图中可以看出岩性栏的曲线起伏最大,围压栏次之,轴向压力栏相对来说最为平缓。这说明由于岩性的变化导致的体积回弹量的变化最大,而上覆压力变化导致的体积回弹量的变化最小。

岩性的变化使得岩石的回弹量有着巨大的差别。从表2可以看出各种岩性在给定的实验条件下,回弹量还是很可观的,但是人造岩心和人造岩心的回弹量有很大差别,以1%为分界线,人造岩心一般都大于1%,而天然岩心基本没有超过1%(图4、5)。人造岩心最大体积回弹量达到了2.592%,平均1.774%;而天然岩心最大回弹量才1.143%,平均0.809%,至少比天然岩心的回弹量少一半,这个实验结果和前人的实验结果基本一致。

3.2.2 体积回弹量数学模型的建立

在此先引入一个有效上覆压力的概念。所谓有

表 3 体积回弹量方差分析表

Table 3 Variance analysis table of rebounding bulk

变差来源	S_j	自由度	$\underline{S_j}$	F_j	显著性
岩性	10.669	4	2.66725	13.40327	* *
轴压(误)	0.796	4	0.199	1	
卸压速率	1.444	4	0.361	1.81407	
围压	2.738	4	0.6845	3.439698	*
孔压	1.407	4	0.35175	1.767588	
卸围、孔压速率	1.363	4	0.34075	1.712312	
误	0.796	4	0.199	1	

 $F_{1-0.05}(4,4) = 6.39$

效上覆压力是指上覆地层压力与岩石孔隙内流体压力之差。结合本次实验的条件,该公式可作如下变形:

$$P' = \Delta P + P_{\mathbb{H}} - P$$

式中P'代表有效上覆压力, ΔP 表示轴向压力差, $P_{\mathbb{B}}$ 表示围压,P代表孔压。

在引入了有效上覆压力的概念后,重新处理数据,结果显示:单个实验岩样的形变过程与有效上

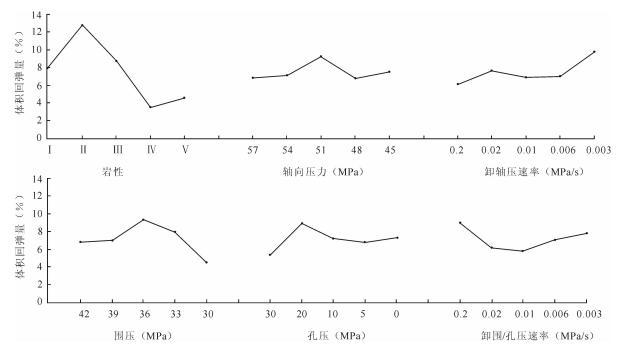


图 3 体积回弹因素-指标图

Fig. 3 Factors vs indexes plot of rebounding bulk I 一人造粗砂; Ⅱ 一人造细砂; Ⅲ 一人造粉砂; Ⅳ 一天然中砂; Ⅴ 一天然细砂

I — Artificial coarse sandstone; II — artificial fine sandstone; III — artificial flour sandstone; IV — natural medium sandstone; V — natural fine sandstone

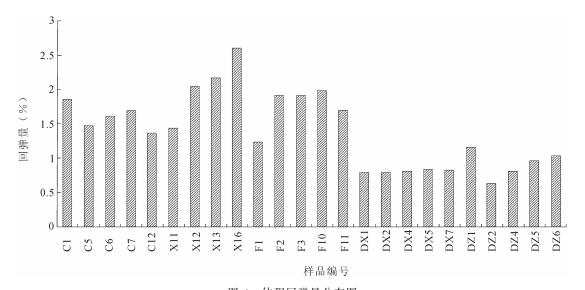


图 4 体积回弹量分布图 Fig. 4 Distribution chart of bulk

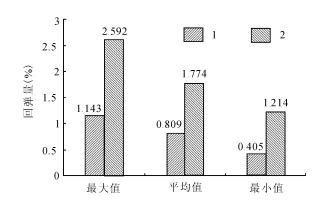


图 5 人造岩心和天然岩心体积回弹量对比

Fig. 5 Rebounding bulk contrast analysis rebounding between artificial cores and natural cores 1—天然岩心;2—人造岩心

1—Natural cores; 2—artificial cores

覆压力的改变存在着很好的对应关系,图 6 为随意抽取的一个大庆长垣天然岩样,从图中可以看出随着有效上覆压力增加、保持到下降,体积应变随之改变,彼此联系十分紧密。图 7 与图 6 是对应的,它是从图 6 中截取的卸压时间段体积应变随有效上覆压力变化关系及其拟合图,从该图可以看出,原始曲线和拟合曲线高度吻合,r²值高达 0.991,完全可以用拟合曲线代替原始曲线。大约 5 MPa 时,出现一个形变量迅速增大的现象,在压力从 5 MPa 卸载至 0 MPa 过程中,其回弹量可占整个回弹量的 80%。

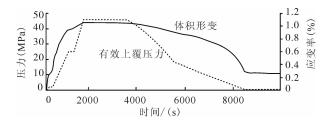


图 6 DZ4 有效上覆压力与体积应变随时间 变化关系图

Fig. 6 Effective overburden pressure fluctuation and volume strain of sample DZ4 vs time

人造岩心的体积形变随有效上覆压力变化而变 化的趋势和关系与天然岩心一致。

在对所有的 25 个实验样品数据做同样的分析后,发现所有样品的体积应变与上覆压力都存在着和样品 DZ4 一样的关系,且实测曲线都可以用相应的对数拟合曲线表示,因此,岩石的卸载过程完全可以用一个经验关系式表示:

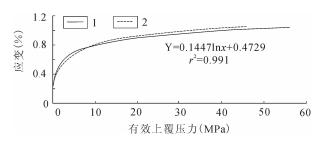


图 7 DZ4 有效上覆压力与体积应变拟合值 与实测值比较

Fig. 7 Contrast analysis between matched curve and real curve of sample DZ4 1—拟合值;2—实测值

1—Real curve;2—matched curve

$$y = aln(x) + b$$

式中:y 表示体积应变(%);x 为岩石有效上覆压力(MPa);a,b 分别代表系数和常数项。

4 结论与讨论

- (1)实验表明,在岩石弹性范围内,卸载会造成下伏砂体回弹,且回弹量是可观的,体积回弹量介于0.405%~2.529%之间。
- (2)影响岩石回弹量的最主要因素是岩性,其次是用压。
- (3)岩石的回弹量与有效上覆压力有着密切的 联系,可用一个对数模型表示,且在 5 MPa 左右出 现一个急速增大的现象,从 5 MPa 降到 0 MPa,其 回弹量可占整个回弹量的 80%。

参考文献

陈庆宣,王维囊,孙叶,等. 1998. 岩石力学与构造应力场分析. 北京: 地质出版社.

冯增昭. 1993. 沉积岩石学(上册). 北京:石油工业出版社,99.

关德范. 1981. 大庆长垣成因及油气生成条件探讨. 大庆石油学院报, $5(1):11\sim22$.

关德范,王国力,张金功,等. 2004. 成盆成烃成藏理论思维——从盆 地到油气藏. 北京:石油工业出版社.

郝芳,邹华耀,龚再升,等. 2006. 新(晚期)构造运动的物质、能量效应与油气成藏. 地质学报,80(3):424~431.

姜振学,庞雄奇,金之钧,等. 2004. 地层抬升过程中的砂体回弹作用及其油气成藏效应. 地球科学——中国地质大学学报,29(4): 420~426

庞雄奇,金之均,左胜杰. 2000. 油气藏动力学成因模式与分类. 地学前缘,7(4):507~514.

孙雄,马宗晋,洪汉静. 1996. 初论"构造流体动力学". 地学前缘,3 (3):138~144.

谭成轩,孙炜锋,孙叶,等. 2006. 地应力测量及其地下工程应用的思

- 考. 地质学报,80(10):1627~1632.
- 陶振宇. 1981. 岩石力学的理论与实践. 北京:石油工业出版社.
- 吴翊,李永乐,胡庆军,等.1995.应用数理统计.长沙:国防科技大学出版社.
- 谢富仁,陈群策,崔效峰,等. 2003. 中国大陆地壳应力环境研究. 北京:地质出版社,234~239.
- 尤明庆. 2000. 岩石式样的强度及变形破坏过程. 北京:地质出版社. 周建勋,漆家福,童亨茂. 1996. 盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法. 北京:地震出版社: $6\sim10$.
- Fatt I. 1958. Compressibility of sandstones at low to moderate pressure. AAPG Bull., 42(12):1924~1957.
- Lutton R J. 1970. Rock slope chart from empirical slope date. Transactions of the Society of Mining Engineers of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. Incorporated (AIME), 247(2):160~162.
- Mchlatchie A S, Hemstock R A, Young J W. 1958. The effective compressibility of reservoir rock and its effect on permeability. AIME Trans., 23(3): $386 \sim 388$.

- Neuzil C E. 1983. Low fluid pressure within the pierre shale: A transient response to erosion. Water Resour. Res., 29(6): $2007 \sim 2020$.
- Neuzil C E, Pollock D W. 1983. Erosional unloading and fluid and fluid pressures in hydraulically "tight" rocks. Journal of Geology, $91:179\sim193$.
- Parks K P, Toth I. 1995. Field evidence of Erosion-induced underpressing in upper Cretaceous and Tertiary strata, west central Alberta, Canada. Bullentin of Canadian. Petroleum Geology, 43(3):281~292.
- Terzaghi K Van. 1923a. Die Berechnung der Durchlassigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf Der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen, Sber. Akad. Wiss. Wien, 105~132.
- Terzaghi K Van. 1923b. Discussion on: J. Feld, Lateral earth pressure; the accurate experimental determination of the lateral earth pressure, together with a resume of previous experiments. American, Society of Civil Engineers. Transactions, 86:1525~1543.

Physical Simulation Experiments of Sandstone Rebounding

JIANG Zhenxue^{1,2)}, TIAN Fenghua^{1,2)}, XIA Shuhua^{1,2)}

- 1) Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing, 102249
- 2) Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing, 102249

Abstract

All forms of matter have the property of elasticity that can be compressed when the load increases and can spring when the load decreases, so do the porosity rock. The investigation of petroliferous basins over the world showed that one or more erosions had occurred after its reservoirs deposit which means unloading and leads to sandstone spring or interstice expanding so that the pressure fall in the reservoir underneath the erosion surface. The process could offer not only extra spaces for oil and gas accumulation but also the power to pump oil and gas. Based on geological analysis, a physical simulation experiment has been done, and the result of the experiment indicates that the lithology is the uppermost factor controlling the sandstone spring, and the confining pressure takes second place. And a mathematical model has been found between the sandstone spring process and the effective overburden pressure depending on the analysis of the experimental result. A comparison of sandstone-spring quantities between natural cores and artificial cores showed that the former is usually less than 1% and the last is usually more than 1%.

Key words: sandstone rebound; physical simulation; orthogonal experiment; unloading pressure; effective overburden pressure