

MTS 系统中模拟储层埋藏条件 140MPa/200℃下砂岩结构变化的研究

刘岫峰 黄思静 李余生 胡孝林

《油气藏地质及开发工程》国家重点实验室、地矿部开放研究实验室
成都理工学院沉积地质研究所,成都 610059



【摘要】 在 MTS 系统中模拟储层埋藏状态并于 140 MPa/200℃(保持 180 min 和 100 MPa/120℃,393 min)条件下用状态差法研究了饱和水长石英砂岩的结构变化。同常温常压条件相比,上述条件下,砂岩骨架颗粒和填隙物晶格主峰 d 值减少 0.7%—0.24%,全部衍射峰 d/nm 值平均减小 0.026 6—0.001 2,骨架颗粒间距减小 5.3 μm ,骨架矿物粒度平均值减小 16.8 μm ;岩石结构向紧密压缩状态变化;石英颗粒波状消光增加,电子致光性增强,其裂纹增加。砂岩的这种变化符合固体物质统计热力学规律。在 $\leq 140 \text{ MPa}/\leq 200^\circ\text{C}$ 的条件砂岩呈弱塑性变形,其变形结果可以保持到常温常压下,因此常温常压下岩石结构特征可反映埋藏结构状态。可用状态差法研究埋藏结构。在本实验的温压及保持时间(最长 393 min)条件下各种矿物特别是粘土矿物在物相上未发生变化。

【关键词】 岩石 矿物 石英砂岩 储层 模拟

目前及历史上,在岩石矿物物理性质领域内有关岩石和矿物结构变化的研究主要在两种条件下进行,一类是常温常压条件,另一类是高温高压。常温常压条件下的研究主要涉及岩石力学并直接服务于工程地质学,而高温高压条件下的研究主要涉及高压物理学、固体物理学及材料学并直接服务于地幔、地核物质及特殊材料探索,条件在 500 MPa/500℃以上。针对储层和沉积岩埋藏成岩条件下岩石矿物结构变化及其对岩石物性影响的研究则尚属空白。储层及沉积成岩埋藏的一般边界条件为 140 MPa/200℃,即大致相当于 5 500 m 的埋深,也与目前世界油气储层埋深 3 000 m—6 000 m 相当。

本文阐明了储层及沉积岩埋藏条件下砂岩岩石结构的变化特征并为用状态差法研究埋藏岩石结构及其物理性质提供了岩石学依据。

收稿日期:1996-05-14 改回日期:1996-08-15

第一作者简介:刘岫峰 59 岁 教授 矿物岩石及沉积学专业 研究方向:沉积岩石学及实验和模拟沉积学

1 岩石样品

本次模拟实验岩样为四川地区三叠系须家河组长石石英砂岩,其中 MTS-1 号为粘土质(伊利石)、钙质填隙,骨架颗粒中 $\varphi_{\text{石英}}75\%$, $\varphi_{\text{长石}}20\%$,孔隙度为 8.25% ,渗透率为 $29 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (0.29 mD),取自四川中坝 46 井,采样深度 2 270.20 m,MTS-2 样品为硅质、粘土质填隙,硅质呈次生加大和微晶石英,粘土质为伊利石和绿泥石,骨架中 $\varphi_{\text{石英}}80\%$, $\varphi_{\text{长石}}10\%$,含粘土质岩屑,孔隙 8.25% ,渗透率 $7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (0.17 mD),采自四川大兴场,井深/m 4 203.35—4 203.40。

2 模拟描述

2.1 实验条件

实验模拟条件由《油气藏地质及开发工程》国家重点实验室(四川成都)拥有的美国 MTS 公司制造的 MTS 岩石物性测试系统提供,岩石结构分析亦由该国家重点实验室储层实验室负责。MTS-1 号样为 140 MPa/200℃,保持 180 min;MTS-2 号样为 100 MPa/120℃,保持 393 min。岩样饱和水。

2.2 实验方法

由于 MTS 系统未设置高温高压物质结构观测窗口(专用样品室),故本实验采用状态差示法,即同一块岩样在未做高温高压实验前于常温常压下进行一次岩石结构测试,在高温高压试验后退到常温常压条件再做一次测试,以其参数变化反映模拟埋藏条件下的岩石结构状态。显然本方法的应用条件是岩石结构要均一并在实验条件下达到塑性变形状态。

2.3 结构参数

本次实验涉及的参数有:晶格面网间距 d 值,矿物偏光性,矿物发光性,骨架颗粒的填集度、粒度及裂隙发育程度。

2.4 实验结果

2.4.1 MTS-1 号样粘土质长石石英砂岩

砂岩骨架颗粒和胶结物的 X 衍射主峰 d 值减小(表 1)。由表 1 可见,主峰 d 值平均减小 0.54%,其中绿泥石减少最大,石英减少最小,其减小程度与 d 大小有关,并且 d 与 $|\Delta d|$ 呈良好的线性关系(图 1),显然 Δd 的大小是由矿物的刚性决定的,矿物刚性越大, $|\Delta d|$ 越小。

砂岩中全部矿物主衍射峰 d 值平均数常温常压下为 0.796 3 nm,140 MPa/200℃ 下为 0.792 0 nm,减小 0.004 3 nm,即减小 0.54%。石英颗粒波状消光略有增加,其电子致光(阴极发光)强度亦有加强,激发电压降低 2 kV。石英颗粒裂隙增多。砂岩骨架颗粒任意截线上的粒间截线距离由 25.93 μm 减至 20.63 μm 。

2.4.2 MTS-2 号样粘土质硅质石英砂岩 骨架和胶结物中矿物的 X 射线衍射主峰 d 值有所

表 1 140 MPa/200℃ 条件下砂岩中矿物 X 射线衍射主峰 d 值变化

Table 1 The d values of minerals in experimental sandstone before and after experiments (experimental condition, 140 MPa/200℃)

实验条件	常温常压 d/nm	140 MPa/200℃ d/nm	$\Delta d/\text{nm}$	变化率 /%
绿泥石	1.423 2	1.412 4	-0.010 8	-0.759
伊利石	1.002 8	0.997 3	-0.005 5	-0.548
长石	0.425 4	0.424 5	-0.000 9	-0.212
石英	0.334 3	0.333 7	-0.000 6	-0.179
平均	0.796 3	0.792 0	-0.004 3	-0.540

减小,平均减小0.24%,如表2。矿物全部衍射峰平均 d/nm 值由0.7964降至0.7945,减小0.0019。将表2同表1比较发现,MTS-2号样较MTS-1号样 d 值减少量小得多,其中MTS-2号中伊利石未变化。石英颗粒光学性质无变化。

岩石中骨架颗粒度平均值由常温常压下的 $285.2\text{ }\mu\text{m}$ (1.8100Φ) 于100 MPa/200℃时降至 $268.4\text{ }\mu\text{m}$,减小 $16.8\text{ }\mu\text{m}$ 即降低0.59%。两个样品中岩石矿物成分特别是粘土矿物未发生变化。

3 数据分析

根据高温高压下固体物质状态方程

$$\Delta V/V_0 = -ap + bp^2 \quad (1)$$

系数 a 在 10^{-7} 数量级上, b 在 10^{-13} 数量级上, V_0 为常温常压下物质体积,则在一定压力 p 下体积增量 ΔV 呈负值,显然是压缩的结果。在本实验中 $-\Delta V$ 由三部分构成,第一由骨架颗粒和胶结物质点压缩而来,表现为晶粒 d 值的减少,第二由砂岩整体压缩而来,这表现为砂岩骨架间间距减小,第三是由压缩和饱和水压溶两种作用复合使骨架颗粒粒度减小而来。但对压溶作用尚需进一步观测。因此,砂岩总体表现结构紧密压缩。

对于固体热容变化则有

$$C_V = f(T, \theta) \quad (2)$$

$$\theta = h\nu/K \quad (3)$$

其中 h 是普朗克常数, K 是波尔兹曼常数, ν 是物质内部质点振动频率, θ 是固体特征温度。在本实验中由于矿物颗粒 ΔV 极小,并未发生相变或产生新矿物,可近似地看作等容过程,则温度的升高直接使系统热容升高,导致系统内能增加。系统内能提高主要使晶格内部质点振动频率提高而抗拒压缩位移以保持晶格平衡,从而保持颗粒的刚度,但可产生新的非平衡发光中心(缺陷)使晶粒发光性增强。

对于饱和水,按方程式

$$pV = nRt \quad (4)$$

对于体系近于等容,压力 p 和温度 t 的升高,将产生内压力而保持岩石颗粒间的支撑性。

p, t, V 三因素综合分析,在本实验中岩石呈现压缩现象,岩石结构趋于紧密。矿物颗粒晶格亦有微小压缩或显示压缩痕迹。

从岩石形变来看,在本实验条件下砂岩已达到塑性变形阶段,导致岩样在退出高温高压条

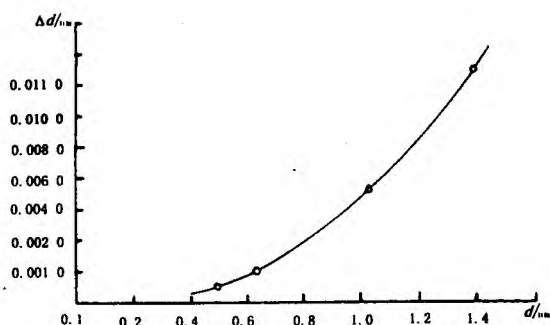


图1 140 MPa/200℃下长石石英砂岩中矿物主衍射峰 d 值的变化趋势图

Fig. 1 The change tendency of d value of minerals in experimental sandstone (experimental condition, 140 MPa/200℃)

表2 100 MPa/120℃条件下,砂岩中矿物X衍射主峰 d 值变化表

Table 2 The d values of minerals in experimental sandstone before and after experiments (experimental condition, 100MPa/120℃)

实验条件	常温常压 d/nm	100 MPa/120℃ d/nm	$\Delta d/\text{nm}$
绿泥石	1.423 2	1.416 0	-0.000 7
伊利石	1.002 7	1.002 7	0.000 0
长石	0.425 5	0.425 2	-0.000 3
石英	0.334 3	0.333 9	-0.000 4
平均	0.796 4	0.794 5	-0.001 9

件后保持了(至少部分保持了)高温高压下的岩石结构状态,使我们观测到了该状态下同常温常压状态下的结构参数差值。晶格已呈弱塑性变形,使晶粒波状消光增加。

4 应用意义

在 MTS 系统中模拟的储层埋藏条件和饱和水的情况下砂岩结构呈现全面的压缩调整(晶格压缩、粒间压缩、粒度减小等)而向紧密化方向发展,这种变化是岩石物理性质(弹性、电性、渗透率、光性)变化的基础,从而为 MTS 系统综合测量岩石矿物物性及研究物性变化规律提供了岩石结构依据。通过本次模拟,表明岩样从埋藏条件下变化到地表常温常压条件下以后保持或部分保持了埋藏时原始状态结构,故目前常温常压下测定的岩石结构参数可在一定程度上反映埋藏状态,仍有其实用意义。

5 结论

- 5.1 在 MTS 系统中提供的模拟储层埋藏条件下(140 MPa/200℃和 180 min—393 min)观察了长石石英砂岩的压缩变化,这种变化是由晶格压缩、粒间压缩及颗粒(碎屑)压缩构成的。
- 5.2 在本模拟条件下观察了矿物光学性质的变化,即波状消光和发光性增强。
- 5.3 高温高压 MTS 系统可以作为储层和饱和水沉积岩埋藏模拟实验研究装置。
- 5.4 砂岩样品退出模拟埋藏条件后至常温常压下仍保持或部分保持了埋藏原始结构状态。岩石矿物成分特别是粘土矿物在本实验条件下(最长 393 min)未发生变化。
- 5.5 结构状态差示法(Δ 增量法)可作为研究储层埋藏中岩石结构变化或成岩作用的方法。

在本研究中单钰铭、刘舜华、刘维国、熊舜华、李建林等提供了岩石结构测试数据及最新研究资料,在此表示感谢。

参考文献

- 1 СВЕШОН К. физика высоких давлений, иил. 1963
- 2 多尔特曼 Н.Б. 岩石和矿物的物理性质. 北京: 科学出版社, 1985
- 3 多鲁基安 Y.S. 岩石和矿物的物理性质. 北京: 石油工业出版社, 1990
- 4 岳石等. 实验岩石变形及构造成岩成矿. 长春: 吉林大学出版社, 1990
- 5 刘岫峰. 沉积岩实验室研究方法. 北京: 地质出版社, 1991

SIMULATION EXPERIMENTS FOR TEXTURE CHANGE OF SANDSTONE UNDER THE CONDITION OF BURIAL RESERVOIR AT 140 MPa/200℃ USING MTS

Liu Xiufeng Huang Sijing Li Yusheng Hu Xiaolin

(State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu Institute of Technology, Chengdu 610059)

Abstract Experiments for simulating texture change of sandstone have been done under burial reservoir condition of 140 MPa/200℃ (lasting 180 minutes) and 100 MPa/120℃ (lasting 393 minutes). The experimental equipment employed is MTS. The results show that after experiment, the d values of frame grains and matrix in sandstone decreased 0.7%—0.24%, the distance of frame grains decreased 5.3 μm , and the size of frame grains decreased 16.8 μm . In addition the rock is more tight than before, and the undulatory extinction of quartz is more strong than before, the luminescent intensity increased.

Key words rock, mineral, quartzsandstone, reservoir, simulation

Synopsis of the first author Liu Xiufeng, 59 years old, Professor of Mineralogy, Petrology and Sedimentary Geology with Chengdu Institute of Technology. Now he is engaged in sedimentary petrology and experimental and simulative sedimentology.