

文章编号: 1000-0550(2006) 03-0407-07

碎屑岩成岩压实作用模拟实验研究

刘国勇^{1,2} 金之钧^{2,3} 张刘平⁴

(1. 石油大学盆地与油藏研究中心 北京 102249 2 教育部石油天然气成藏机理重点实验室 北京 102249;

3 中国石油化工集团石油勘探开发研究院 北京 100083 4 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘要 实验采用自行设计和组装的压实成岩模拟装置,以中砂级纯净石英碎屑为实验介质,开展压实模拟实验,通过对实验过程中所出现的物理和化学变化进行分析和研究,得到了一些认识:在压实过程中,砂体孔隙度和渗透率的变化具有明显的二分化,即压实初期的陡变带和随后出现的缓变带;缓变带实验数据分析表明,孔隙度和承载压力之间存在着良好的线性关系,孔隙度和渗透率之间存在着良好的半对数关系,渗透率和承载压力之间存在着良好的指数关系。系统流体的实时取样测试表明,压实作用不仅仅是一个物理过程,同时也会发生化学变化,即使在较浅的埋藏条件下,石英砂体也发生了压溶现象。

关键词 压实作用 承载压力 孔隙度 渗透率 压溶作用

第一作者简介 刘国勇 男 1978 年出生 博士研究生 石油地质

中图分类号 P588.2 TE122.2 **文献标识码** A

自从提出成岩作用的概念以来,其研究已经取得了很大进展,它在油气勘探领域具有越来越重要的地位^[1-5]。压实作用作为成岩作用的重要组成部分,它对孔隙演化和储层物性有极大的影响。大量研究表明,压实作用的发生可以使砂体的孔隙结构和分布发生极大的变化,从而导致孔隙空间的大幅缩减,有砂岩的压实减孔率甚至高达到 50% 以上,孔隙流体在砂体中的流动能力也会因此而大大减弱,从而影响砂体的储集物性^[6-9]。但是,多年来,学者们在进行储层成岩作用的研究过程中,对于压实作用关注却不多,往往只是局限于一些简短、定性的描述和分析,在压实模拟实验方面更是浅尝辄止。为了进一步探索压实作用过程中储层孔隙演化规律和渗透率的变化过程,我们采用了模拟实验的手段,希望再现砂体沉积和压实的整个过程,对砂体在压实过程中所出现的各种物理、化学变化进行深入和系统的分析,从而进一步探索储层物性的影响因素。这方面的研究不仅对于成岩作用的研究具有较大的理论意义,而且对于油气勘探和开发也都具有非同寻常的现实意义。

1 实验设计

在成岩压实模拟实验方面,有学者曾进行过一些探索性的研究^[10-15]。他们采用粘土、石英砂,或者是

其混合物进行了压实模拟实验,虽然这些模拟实验取得了一些成果,但由于当时实验条件的限制,在实验设计中并没有充分考虑地层中温度和压力的影响,这与自然条件下的压实过程还存在较大差异,此外,他们实验的过程中还忽略了对压实过程中砂体化学变化的研究。为了弥补这些方面的不足,本次实验中自行设计并组装了一套全新的模拟实验装置(见图 1),可以在充分考虑温度和压力等因素的基础之上来探讨压实作用对于砂体的压实特征、孔隙度和渗透率等方面的影响,并且还可以监测压实过程中出现的化学变化。反应主要在可以进行温度控制的样品室中完成,由自动泵 A 和自动泵 B 对系统流体的推或吸来模拟地层流体的流动,由手动泵对样品室的骨架压力

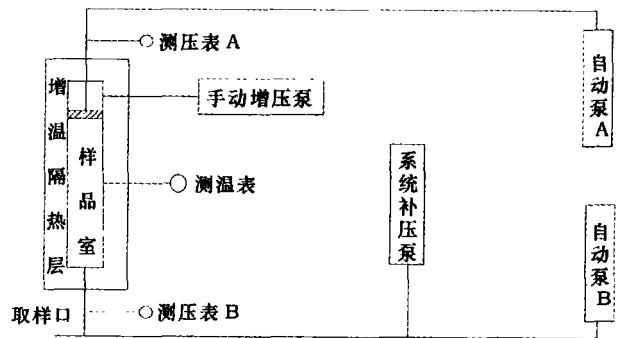


图 1 成岩压实模拟实验装置示意图

Fig 1 Sketch map of diagenetic compaction instrument

中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金项目(编号:2002-CX-3)和国家重点基础研究发展规划“973”项目(2004CB720503)联合资助。

收稿日期:2005-07-12 收修稿日期:2005-09-20

进行调整来模拟上覆地层压力, 由系统补压泵和取样口开关调节系统中流体的压力, 通过取样口的实时取样和测试来监测系统中所出现的化学变化。

在碎屑岩储集层中, 最常见的碎屑岩矿物是石英, 长石、云母以及一些重矿物和岩屑, 其中, 前两者在碎屑岩颗粒中能占到 95% 以上。考虑到石英的稳定性较强, 在碎屑岩中分布广泛, 而且还要分析压实过程中的化学变化, 因而实验采用了纯净的石英单矿物作为实验介质。此外, 实验过程中温度和压力条件的设定参照了东营凹陷的地质情况: 地温梯度选取 3.8℃/100m (古地温梯度), 岩石密度选取 2.4g/cm³, 水的密度选为 1.0 g/cm³, 压力系数取 1.1。根据以上参数, 可以确定出不同深度的温度和压力条件 (见表 1)。实验开始阶段, 按照温度和压力的匹配关系在 10 小时将系统的温度、流体压力和骨架逐步提升到目标条件, 10 小时后系统的温度和压力条件便会达到稳定值, 这一过程相当于砂体逐渐被埋藏的机械压实过程, 在此过程中, 间隔 2 小时从反应系统中释放出少量液体样品, 以便进行实验的动态测试 (具体参见表 1)。当系统达到目标温度和压力条件之后, 依然间隔取样, 取样时间为达到目标温压条件后的 2、6、12、24、48、96、168、240 小时。

2 实验数据记录与处理

在实验过程中, 计算机全程监控容器内的温度、流体压力、承载压力、流体流速、压实位移以及各泵的压力等相关实验条件和参数的变化情况, 并进行记录, 从

而为实验后的数据处理和分析奠定基础 (见表 2)。

表 1 成岩压实模拟实验升温/升压过程中温压匹配关系表
Table 1 Matching form of the temperature and pressure during diagenetic compaction simulation experiment

时间 /h	埋深 /m	承载压力 /MPa	骨架压力 /MPa	流体压力 /MPa	温度 /℃	备注
0	0	0.1	0.0	0.1	25.0	
1	290	6.9	3.7	3.2	36.0	
2	580	13.7	7.4	6.3	47.0	取样
3	870	20.5	11.1	9.5	58.1	
4	1160	27.4	14.8	12.6	69.1	取样
5	1450	34.2	18.5	15.7	80.1	
6	1740	41.0	22.1	18.8	91.1	取样
7	2030	47.8	25.8	22.0	102.1	
8	2320	54.6	29.5	25.1	113.2	取样
9	2610	61.4	33.2	28.2	124.2	
10	2900	68.2	36.9	31.3	135.2	取样

为了对实验参数进行更好的统计和处理, 实验过程中, 我们还对其他一些数据进行了调研、测量和计算。

首先, 我们查阅了不同温度下水的粘度数值^[16]。然后, 我们利用排水法对石英样品和长石样品的密度进行了测量, 分别为 2.65 g/cm³ 和 2.57 g/cm³。随后, 对实验的样品室进行了测量和计算。样品室呈圆筒形, 其长度为 50 mm, 筒内直径为 3 mm, 由此可以依据以下计算出样品室的横截面积和体积。

$$S_0 = \pi \cdot r^2 = 3.14 \times 1.5 \times 1.5 = 7.065 \quad (1)$$

$$V_0 = L_0 \cdot S_0 = 50 \times 7.065 = 353.25 \quad (2)$$

表 2 石英压实成岩模拟实验原始数据表

Table 2 Original data table of the diagenetic compaction simulation experiment

反应时间 /h	温度 /℃	模拟埋深 /m	流体压力 /MPa	骨架压力 /MPa	承载压力 /MPa	压实位移 /mm	流体流量 / (ml/min)	两泵压差 /MPa
2	36	290	3.2	3.7	6.9	1.105	5	0.074
4	58.1	870	9.5	11	20.5	49.175	5	0.14
6	80.1	1450	15.7	18.5	34.2	50.41	5	0.168
8	102	2030	22	25.8	47.8	51.685	5	0.168
10	124	2610	28.2	33.2	61.4	53.51	0.03	0.003
12	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	55.775	0.05	0.0045
16	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	56.865	0.05	0.005
22	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	57.215	0.05	0.005
34	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	58.895	0.05	0.005
58	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	60.365	0.05	0.0045
106	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	61.15	0.05	0.005
178	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	62.475	0.05	0.005
250	135.2	2900	31.3	36.9	68.2	63.565	0.05	0.005

r : 样品室截面半径, cm ;

L_0 : 样品室的长度, cm ;

S_0 : 样品室的横截面积, cm^2 ;

V_0 : 样品室的总体积, cm^3 。

我们可以根据以下公式压实位移计算出压实样品所占的体积。

$$V = S_0 \cdot (L_0 - L_1) \quad (3)$$

L_1 : 实验记录的压实位移量。

岩样的总孔隙度采用, 并以百分数的形式表示:

$$\phi = \frac{\sum V_\phi}{V_r} \times 100\% \quad (4)$$

式中 ϕ —孔隙度;

$\sum V_\phi$ —岩样中所有孔隙体积之和;

V_r —岩样总体积。

每次实验之前, 我们对实验中所加入的样品质量进行称量, 在已知样品密度和总量的情况下, 可以计算样品的总体积, 进而计算出样品的孔隙度。

岩石的渗透率采用以下公式计算:

$$K = Q \cdot \mu \cdot L / (\Delta P \cdot S_0) \quad (5)$$

$$\text{即 } K = Q \cdot \mu \cdot (L_0 - L_1) / (\Delta P \cdot S_0) \quad (6)$$

式中 Q —单位时间内液体通过岩石的流量, cm^3 / s ;

S —液体通过岩石的截面积, cm^2 ;

μ —液体的粘度, $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$;

L —岩石的长度, cm ;

ΔP —液体通过岩石前后的压差, MPa ;

式中的比例系数 K 即为岩石的渗透率, 它表示在一定的压差下, 液体通过岩石的能力。

根据以上的公式, 利用表 2 的实验数据和水的粘度值, 就可以计算出砂体的渗透率、孔隙度等相关参数 (见表 3)。

3 实验结果分析

通过原始数据的记录和测算, 在已知孔隙度和渗透率等物性参数的基础之上, 就可以对砂体的压实过程进行分析。

3.1 孔隙度的变化

实验开始前, 反应釜中的石英砂体的原始孔隙度分别为 46.47%, 这与前人的研究结果一致。有学者曾对东营凹陷不同地区、不同类型的砂岩进行了原始孔隙度的外推, 地表孔隙度的外推值达到了 47.32%^[17]。还有学者曾对东营凹陷的砂岩样品进行粉碎和烘干后, 对其初始孔隙度进行了恢复, 中砂级砂岩的原始孔隙度值也达到了 44%~48%^[18]。这些研究成果与我们实验所得到的砂岩的初始孔隙度值基本吻合, 因而从这些原始孔隙度数据来看, 模拟沉积的过程与自然过程是比较接近的。

在石英砂体的压实过程中, 在承载压力的作用下, 石英砂体的孔隙度发生了显著变化 (见图 2), 其孔隙度由初始的 46.59% 减少到 38.81%, 压实减孔量为 7.78%。大量研究表明, 压实作用可以使孔隙减少 5%~32%, 有的地方甚至达到 50%, 但本次实验中的压实减孔量较小, 这一结果的出现与实验的条件和过程有关。地质条件下, 碎屑颗粒在沉积的过程中, 一般伴随大量塑性或柔性矿物或岩屑, 在埋藏的

表 3 石英压实成岩模拟实验结果

Table 3 Result of the diagenetic compaction simulation experiment

反应时间	温度	模拟埋深	水的粘度	岩心长度	砂体体积	孔隙度	渗透率
/h	/°C	m	mPa·s	/cm	/cm ³	%	/μm ²
2	36.0	290.0	0.7085	49.8895	352.47	46.47	5.6341
4	58.1	870.0	0.4832	45.0825	318.51	40.76	1.8353
6	80.1	1450.0	0.3544	44.959	317.64	40.60	1.0109
8	102.1	2030.0	0.28	44.8315	316.73	40.43	0.5813
10	124.2	2610.0	0.2395	44.649	315.45	40.19	0.2523
12	135.2	2900.0	0.2274	44.4225	313.84	39.88	0.2648
16	135.2	2900.0	0.2274	44.3135	313.07	39.73	0.2377
22	135.2	2900.0	0.2274	44.2785	312.83	39.69	0.2375
34	135.2	2900.0	0.2274	44.1105	311.64	39.46	0.2366
58	135.2	2900.0	0.2274	43.9635	310.60	39.25	0.2620
106	135.2	2900.0	0.2274	43.885	310.05	39.15	0.2354
178	135.2	2900.0	0.2274	43.7525	309.11	38.96	0.2347
250	135.2	2900.0	0.2274	43.6435	308.34	38.81	0.2341

过程中,这些组分在地层压力的作用下容易发生形变,充填碎屑颗粒之间的孔隙空间,从而导致原始孔隙度大幅减小。而本次实验介质为中砂级石英碎屑颗粒单矿物,成份为刚性,在压实的过程中,这些颗粒不易发生明显的塑性形变,大量的孔隙空间得以保留,这就是压实减孔率较小的主要原因。

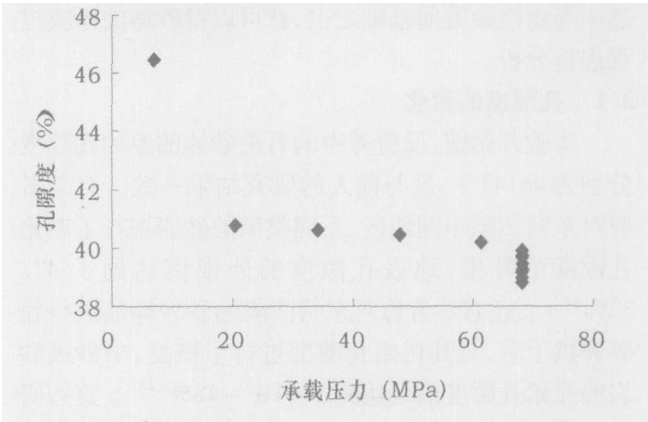


图 2 压实过程中石英砂体孔隙度随承载压力变化曲线图

Fig 2 Plot of porosity varying with bearing pressure in the experiment

实验中,孔隙度的变化呈现出明显的分段性,在压实过程的初期,孔隙度出现了一个急速衰减的过程,随后这种变化趋势变缓,而出现了一段缓慢变化的阶段。孔隙度的这种分段性特征与前人的研究结果相吻合^[10]。在模拟埋藏初期,孔隙度随承载压力的增加而大幅减小而出现了个陡变过程,这是因为在自然条件下,已经沉积的碎屑颗粒在压实的初期存在一个位置调整的过程,在这个过程中,碎屑颗粒主要有两种表现:刚性碎屑表面的脆性微裂纹及其位移和重新排列;碎屑颗粒的紧密填集。随着外加压力的不断增加,压实作用会不断增强,石英和长石碎屑颗粒会发生滑动、转动、位移、变形和破裂,进而导致颗粒的重新排列和某些结构构造的改变,从而达到一个位能最低的紧密堆积状态,在这个过程中就会出现一个孔隙度的陡变阶段。随着碎屑颗粒达到稳定堆积的状态,当承载压力的继续增加时,碎屑颗粒不会再发生以上变化,只是堆积的紧密程度进一步增加,孔隙度也只是慢慢减小,于是就出现了孔隙度的缓变带。当压力到达设定值以后,随着时间的推移,孔隙度仍然会减少,但幅度较小,这是由于时间因素对于压实有一定的影响^[3],这也提醒我们在研究压实作用的时候应该充分考虑时间因素的影响。

3.2 渗透率的变化

在压实过程中,石英砂体的渗透率也发生了显著的变化,而且也呈现出明显的分段性(见图 3)。出现这种分段性的原因在于孔隙度的变化分段性。在石英砂体中,流体主要在碎屑颗粒之间的孔隙中流动,当孔隙空间因上覆压力的加载而缩减时,流体的流动能力必然会受到影响,所以孔隙度的分段性变化必然会导致渗透率的分段性变化。

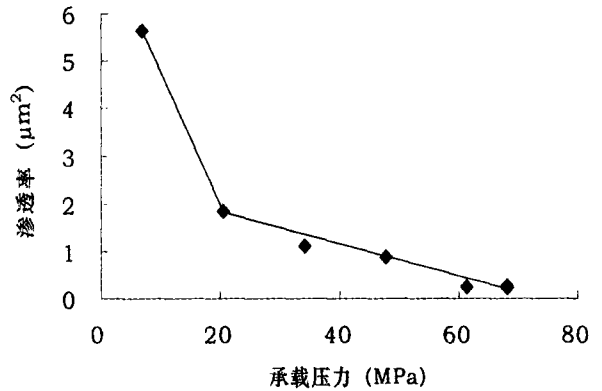


图 3 压实过程中石英砂体渗透率随承载压力变化曲线图

Fig 3 Plot of permeability varying with bearing pressure in the experiment

3.3 孔隙度、渗透率和承载压力之间的关系

在研究孔隙度、渗透率和承载压力之间的关系时,我们主要采用了缓变带的数据来研究碎屑岩的压实作用,这是因为缓变阶段对应于大多数盆地的储层发育段,这一阶段也具有相同的时间效应的作用,而且这一过程的各种实验参数都有详细记录。

在压实过程中,承载压力的增加使得大量砂体的粒间孔隙被压缩,孔隙度大幅减小。从图 4 中可以看到,砂体孔隙度与其所受的承载压力呈现出较好的线性关系,这与前人的研究结果相吻合^[10]。在承载压力的作用下,砂体孔隙空间的缩减意味着流体流动能力的减弱,砂体渗透率也会降低,从图 5 中可以看到,孔隙度与渗透率之间存在半对数关系,这种半对数关系也可以与实际工作中的研究结果相吻合^[18, 19]。

承载压力和孔隙度之间存在线性关系,孔隙度和渗透率之间存在半对数关系,这两种关系的存在已经得到了证实和认可,如果按照前两种关系来推测的话,在承载压力和渗透率之间应该存在良好的指数关系,从图 6 可以看到,这种指数关系确实存在,这也为承载压力和孔隙度之间的线性关系以及孔隙度和渗透率之间的半对数关系提供了佐证。

承载压力、砂体孔隙度和渗透率之间线性、指数

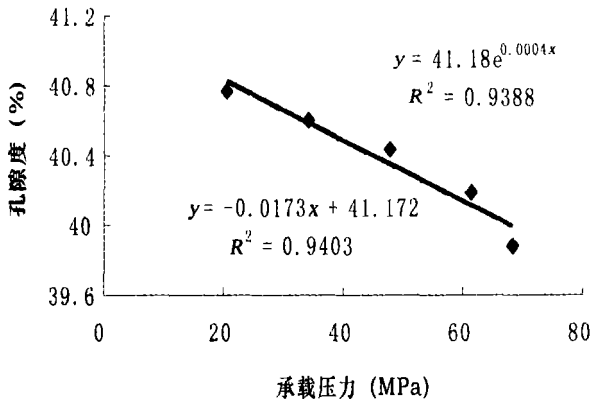


图 4 压实过程中石英砂体孔隙度随承载压力变化曲线图

Fig 4 Plot of porosity varying with bearing pressure in the experiment

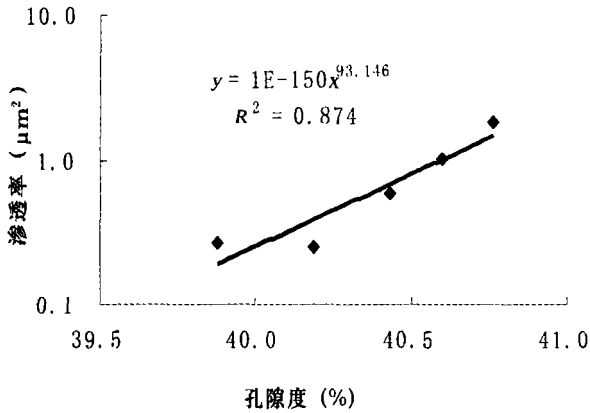


图 5 压实过程中石英砂体孔隙度—渗透率关系

Fig 5 Plot of the relationship between porosity and permeability in the experiment

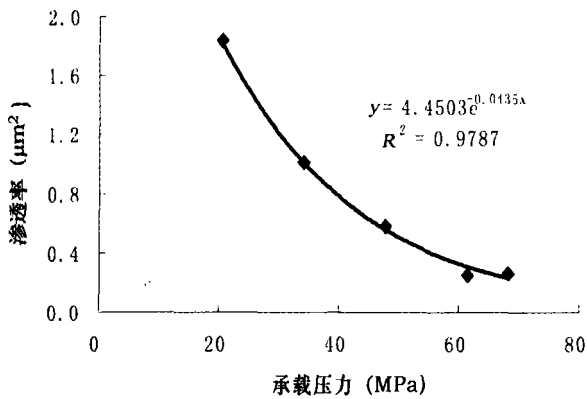


图 6 压实过程中石英砂体渗透率随承载压力变化曲线图

Fig 6 Plot of the relationship between permeability and bearing pressure in the experiment

或者对数关系都是独立存在的, 而且这三种关系都可

以互相推导和证明, 这也说明石英砂体在压实过程中, 其所受的上覆压力的增加、孔隙空间的缩减和渗透率的变化确实存在这种规律性。

3.4 压实过程中的化学作用分析

在压实作用的过程中, 往往会出现压溶作用。随着沉积物埋藏深度的增加, 碎屑颗粒接触点所承受的来自上覆地层的压力或者来自构造作用的侧向应力超过正常孔隙流体压力时 (达到 2~2.5 倍), 颗粒接触处的溶解度增高, 发生晶格变形和溶解作用^[1,2]。在压实模拟实验的过程中, 通过对流体的取样和测试, 结果证明了石英和长石的确发生了溶解。

将不同温度条件下石英的溶解度参数 (见图 7 表 4) 与系统中所取样品的测试结果 (见表 4) 对比, 结果表明, 当系统温度低于 80℃ 时, 溶液中 Si 浓度小于石英正常溶解所产生的 Si 浓度; 温度达到 80~100℃ 时, 溶液中 Si 浓度与石英正常溶解所产生的 Si 浓度基本一致; 当系统达到温度 102~150℃, 溶液中 Si 浓度为对应温度时石英溶解度的 1.4 倍, 随着温度的进一步升高, 溶液中 Si 浓度可以达到对应温度下所溶解石英产生 Si 浓度的 4.3 倍。溶液中的 Si 浓度之所以出现这种异常情况, 压溶作用的发生是这种现象唯一合理的解释: 石英的碎屑颗粒在压实的过程中, 大部分颗粒是以点接触的形式存在的, 上覆压力往往是由点接触的石英颗粒来承受, 当承载压力逐渐增加时, 较小的接触面积上承受的压力逐渐增大, 因而此处晶格更容易发生变形和溶解, 当压力达到流体压力时 (达到 2~2.5 倍) 就会发生压溶, 从而导致系统溶液中 Si 浓度的异常。

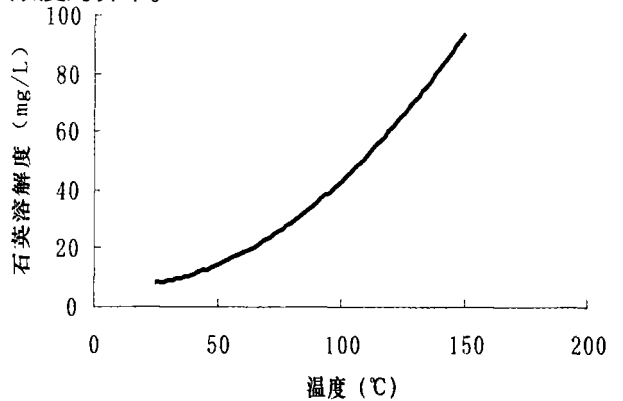


图 7 石英溶解度随温度变化曲线图

(据 Loretta 等, 1985 转引自刘宝, 1992 有改动)

Fig 7 Dissolving curve of quartz changing with temperature (after Loretta et al., 1985)

表 4 石英溶解度与溶液中 Si 浓度对比表

Table 4 Comparison between solubility and content of quartz in solution

温度 /C	模拟埋深 /m	石英的溶解度 /(mg/L)	对应的 S 浓度 /(mg/L)	溶液中 Si 含量 /(mg/L)
36	290	12.91	6.03	3.8
58.1	870	22.06	10.30	6
80.1	1450	35.44	16.54	16.5
102.1	2030	53.08	24.77	34.4
124.2	2610	75.08	35.04	160.3
135.2	2900	87.64	40.90	177.1
135.2	2900	87.64	40.90	176.5
135.2	2900	87.64	40.90	177.8
135.2	2900	87.64	40.90	171.5
135.2	2900	87.64	40.90	161.7
135.2	2900	87.64	40.90	142.9
135.2	2900	87.64	40.90	133.4
135.2	2900	87.64	40.90	126.1

当压溶作用发生以后,随着实验条件的逐步趋于稳定,砂体所受的承载压力不再继续增加,而此时溶液中 Si 含量却出现明显的下降,由 177.8 mg/L 降至 126.1 mg/L,其浓度降低了约 30%,这种现象的出现是由于砂体中压溶作用的停止和溶液中出现了析晶现象的出现。在压实过程中,压溶作用的发生也并不是一个断续的过程,当地层压力达到一定程度时,在颗粒接触处会因应力集中、局部压强增大而出现压溶现象,但随着压溶现象的发生,颗粒接触面积变大,局部压强降低,压溶现象会停止,此时溶液中过量的 Si 会以析晶的方式离开溶液,从而出现浓度的降低。

石英的压溶的过程其实就是其分子在水溶液的作用下发生溶解的过程,其反应存在以下机理:在石英颗粒表面常能形成一层水膜,其厚度仅为几个分子厚。石英颗粒接触处常为应力集中的地方,在水的参与下,颗粒接触处发生溶解,溶解的 SiO_2 水化为 H_4SiO_4 分子,并以水膜为通道向周围孔隙运移,从而得以进入溶液中。这种反应在自然界中普遍存在,只是在反应的强度和规模会有些差异,有的学者认为只有在较深的埋藏条件下才会出现压溶现象,而模拟实验研究表明,在较浅的埋藏条件也可以发生压溶。

4 结论

通过此次压实作用模拟实验研究,得到了以下几点认识:首先,通过对碎屑岩原始孔隙度的恢复和计算表明,中砂岩的原始孔隙度值为 44%~48%。其次,实验过程中实验参数的计算和分析表明,在压实过程中,孔隙度和承载压力之间存在着良好的线性关

系,孔隙度和渗透率之间存在着良好的半对数关系,渗透率和承载压力之间存在着良好的指数关系。本次模拟实验研究还表明,压实作用不仅是一个物理作用的过程,也是一个化学作用的过程,在压实作用的初始阶段就出现了化学变化。石英的压溶作用在浅部作用带(1450 m)就可以发生,而且这个过程也并不是一个连续的过程。这也提醒我们,在较浅的埋藏条件下所出现的石英次生加大现象,并不一定都是酸性流体作用的产物,也有可能是压溶作用后的重结晶。以上这些规律可以为盆地模拟工作中储层物性研究提供重要参考。本次模拟实验研究在许多方面也还有待进一步深化,假以时日,如果能够系统开展不同粒径、不同分选程度单矿物砂和混合砂的模拟实验研究,将更有利于揭示压实作用规律。

参考文献 (References)

- 赵澄林. 沉积学原理. 北京:石油工业出版社, 2001. 1~214 [Zhao Chenglin. Sedimentology Theory. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. 1~214]
- 冯增昭. 沉积岩石学(上册). 第二版. 北京:石油工业出版社, 1993. 1~368 [Feng Zhenzhao. Sedimentology. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. 1~368]
- 刘宝训, 张锦泉. 沉积成岩作用. 北京:科学出版社, 1992. 1~271 [Liu Baojun, Zhang Jinquan. Sedimentary Diagenesis. Beijing: Science Press, 1992. 1~271]
- 傅强. 成岩作用对储层孔隙的影响——以辽河盆地荣 37 块气田下第三系为例. 沉积学报, 1998, 16(3): 92~96 [Fu Qiang. Diagenesis effect on reservoir pores-taking the Rong-37 Block of the lower tertiary Liaohe Basin as an example. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3): 92~96]
- 王宝清, 张荻楠, 刘淑芹, 等. 龙虎泡地区高台子油层成岩作用及其对储集岩孔隙演化的影响. 沉积学报, 2000, 18(3): 414~419 [Wang Baoqing, Zhang Dinan, Liu Shuqin, et al. Diagenesis of reservoir rocks of Gaotaizi Oil Bed (Cretaceous) and its influence on porosity modification in Longhupao field area. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 414~419]
- 张枝焕, 王泽中, 李艳霞, 等. 黄骅坳陷三马地区中—深部储层成岩作用及主控因素分析. 沉积学报, 2003, 21(4): 593~600 [Zhang Zhihuan, Wang Zezhong, Li Yanxia, et al. Diagenesis of middle deep clastic reservoir rocks and its controlling factors in Sanma Area, Huanghua Depression. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(4): 593~600]
- 况军, 唐勇, 朱国华, 等. 准噶尔盆地侏罗系储层的基本特征及其主控因素分析. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 52~56 [Kuang Jun, Tang Yong, Zhu Guohua, et al. The origin of favourable sandstone reservoir of Sangonghe Formation, lower Jurassic in central Junggar Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 29(1): 52~56]
- 陈刚, 刘爱永, 刘林玉, 等. 吐哈盆地三叠系储层特征与成岩作用

- 的关系. 西北大学学报, 2002, 32(6): 659~662 [Chen Gang, Liu Aiyong, Liu Linyu, *et al.* The characteristics of Triassic reservoir and its relation to diagenesis in Tuluhan-Hami Basin. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2002, 32(6): 659~662]
- 9 Quentin J Fisher, Martin Casey M, Ben C Kennell, *et al.* Mechanical compaction of deeply buried sandstones of the North Sea. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 605~618
- 10 郑浚茂, 庞明. 碎屑储集岩的成岩作用研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989, 1~133 [Zheng Junmao, Pang Ming. The Research of Diagenesis of Clastic Reservoir. Wuhan: China Geology University Press, 1989, 1~133]
- 11 Rieke H H, Chilingarian G V. 泥质沉积物压实. 徐怀大译. 北京: 地质出版社, 1984, 1~254 [Rieke H H, Chilingarian G V, eds. Translated by Xu Huaida. The Compaction of Shaly Sediment. Beijing: Geological Publishing House, 1984, 1~254]
- 12 Mollema P N, Antonellini M A. Compaction bands: a structural analog for anti-mode I cracks in aeolian sandstone. Tectonophysics, 1996, 267: 209~228
- 13 Patrick Baud, Emmanuelle Klein, Teng-fong Wong. Compaction localization in porous sandstones: spatial evolution of damage and acoustic emission activity. Journal of Structural Geology, 2004, 26: 603~624
- 14 Chester J S, Lenz S C, Chester F M, *et al.* Mechanisms of compaction of quartz sand at diagenetic conditions. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220: 435~451
- 15 贝丰, 王允诚. 沉积物的压实作用和烃类初次运移. 有机地球化学和陆相生油文集. 北京: 石油工业出版社, 1985, 257~264 [Bei Feng, Wang Yuncheng. Compaction of sediment and first migration of hydrocarbon. Corpus of Organic Geochemistry and Continental Origin of Oil. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985, 257~264]
- 16 《常用化学手册》编写组. 常用化学手册. 北京: 地质出版社, 1997, 1~682 [Compile Group of Service Chemistry Handbook. Service Chemistry Handbook. Beijing: Geological Publishing House, 1997, 1~682]
- 17 钟大康, 朱筱敏, 张枝焕, 等. 东营凹陷古近系砂岩储集层物性控制因素评价. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 95~98 [Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Zhihuan, *et al.* Controlling factors of sandstone reservoir of the Paleogene in Dongying Sag. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 95~98]
- 18 蔡进功, 谢忠怀, 田芳, 等. 济阳拗陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 84~88 [Cai Jingong, Xie Zhonghuai, Tian Fang, *et al.* Diagenesis and pore evolution of deep sandstones in Jiyang Depression. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 84~88]
- 19 王永兴, 刘玉洁, 卢宏, 等. 高孔隙度砂岩储层中砂体成因类型、孔隙结构与渗透率的关系. 大庆石油学院学报, 1997, 21(1): 12~16 [Wang Yongxing, Liu Yujie, Lu Hong, *et al.* Relationship of genetic types of sandbodies, pore texture and permeability in the sandstone reservoir with high porosity. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1997, 21(1): 12~16]

Simulation Study on Clastic Rock Diagenetic Compaction

LU Guo-yong^{1,2} JN Zhijun^{2,3} ZHANG Liuping⁴

(1 Basin & Reservoir Research Center, Petroleum University, Beijing 102249;

2 Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Beijing 102249;

3 Research Institute of Petroleum Exploration & Development SINOPEC, Beijing 100083;

4 Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A set of new equipment has been designed and applied to simulate the diagenetic compaction. Medium quartz sand is selected as material to carry out the experiment. In order to do further research, physical and chemical change have both been detected, and some new conclusion have been reached. During compaction, the porosity and permeability are not varied regularly, and it can be divided into two sections: a sudden change section and a uniform change section. In the uniform change section, the porosity decreases with the increase of the pressure, and they have a linear relation. The permeability decreases with the increase of the pressure either, and they have an exponential relation. The porosity and permeability also have semi-logarithmic relation. The testing and analysis of solution manifest that compaction is not only a physical change, but also a chemical change, indicating that the dissolution may occur even at the lower burial depth.

Key words compaction, bearing pressure, porosity, permeability, dissolution