

咸化湖盆中酸性流体对碎屑岩储层的改造作用

黄成刚^{1,2}, 袁剑英^{1,2}, 曹正林^{1,2}, 张世铭^{1,2}, 王莹³, 余敏³

(1. 中国石油天然气集团公司 油藏描述重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020; 3. 中国石油杭州地质研究院 碳酸盐岩储层重点实验室, 浙江 杭州 310023)

摘要:柴达木盆地西部南区新生界主要为咸化湖盆沉积, 咸化环境提高了其烃类转化率, 但其对储层的控制作用尚待进一步明确。通过高温高压试验模拟了地层条件下成岩流体与岩石矿物之间的物理化学作用, 进而研究咸化环境中有机质演化过程中产生的有机酸对储层的改造作用。结果表明: 酸性流体对岩石矿物的溶蚀作用增加了其孔隙度, 但渗透率的变化存在差异性; 当岩石中含有石膏和铁白云石时, 铁白云石在石膏的催化作用下极易发生溶蚀作用, 反应生成的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 促进了高岭石向针叶状绿泥石的转化, 从而堵塞孔隙喉道, 造成岩石渗透率的下降; 岩石中石膏的发育是造成高温高压地层中方解石发生沉淀的主要原因, 相同条件下石膏比方解石更易溶解, 其产生的过饱和钙造成方解石的沉淀, 但岩石的孔隙度有所增大, 因为方解石的沉淀作用造成的储集空间减小量小于石膏和长石等易溶矿物溶解造成的储集空间增大。

关键词:咸化湖盆; 有机酸; 高温高压; 石膏; 方解石; 白云石; 绿泥石; 柴达木盆地

中图分类号:TE122.2; P618.130.2⁺1

文献标志码:A

Reconstruction of Acid Fluid on Clastic Reservoir in Saline Lacustrine Basin

HUANG Cheng-gang^{1,2}, YUAN Jian-ying^{1,2}, CAO Zheng-lin^{1,2},
ZHANG Shi-ming^{1,2}, WANG Ying³, SHE Min³

(1. Key Laboratory of Reservoir Description, CNPC, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Northwest Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, Hangzhou Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: The sedimentary environment in the south area of western Qaidam Basin is mainly saline lacustrine basin in Cenozoic. Saline environment improves the conversion rate of hydrocarbon, but the control on reservoir is not clear. Based on the high-temperature and high-pressure test, the physical-chemical reaction between diagenetic fluid and mineral in geological condition was simulated, and the reconstruction of organic acid produced in the process of evolution of organic matter on reservoir in saline environment was discussed. The results show that the dissolution of acid fluid on mineral increases the porosity, but the change of permeability is different; when the rocks contain plaster and ankerite, the ankerite dissolves easily under the catalysis of plaster, and Fe^{2+} and Mg^{2+} formed by the chemical reaction improve the conversion of

收稿日期: 2014-06-23

基金项目: 中国石油重大科技专项项目(2011E-03); 国家科技重大专项项目(2011ZX05003);
中国石油勘探开发研究院青年创新基金项目

作者简介: 黄成刚(1979-), 男, 湖北荆州人, 工程师, E-mail: klhcg@163.com。

kaolinite to needle-shaped chlorite, and consequently pore throat blocked decreases the permeability; the precipitation of calcite in high-temperature and high-pressure stratum is caused by the development of plaster in rock, and the plaster dissolves more easier than the calcite under the same condition; the supersaturated Ca causes the precipitation of calcite, and the porosity of rock increases because the reservoir space reduced by precipitation of calcite is less than that released by the dissolution of deliquescent minerals such as plaster and feldspar.

Key words: saline lacustrine basin; organic acid; high-temperature and high-pressure; plaster; calcite; ankerite; chlorite; Qaidam Basin

0 引言

自从沉积盆地油田水中检测出高浓度的有机酸以来^[1-2],储层中流体与岩石的相互作用备受关注^[3],相关领域的研究工作已取得了一定进展^[4]。Sjoberg 等利用静态流体对碳酸盐岩进行了大量溶解动力学试验研究^[5-9];后来,Zhang 等研究了方解石、莹石和钠长石等矿物与水溶液的反应动力学问题^[10-11]。通过一系列水岩作用试验研究,王琪等发现储层的物理性质受到储层中水岩作用的影响最为重要,水岩作用特征主要受控于储层的成岩环境,例如温度、压力、储层矿物成分、水动力条件、孔隙流体性质等^[12]。

对于储层岩石中主要矿物的溶解作用,国内外学者已得出系列成果^[13-22]。于川淇等认为长石为砂岩储层中分布最为广泛的易溶骨架颗粒,其溶蚀作用在砂岩次生孔隙形成过程中占有重要地位,是次生孔隙形成的主要原因^[23]。罗静兰等通过对延长油区侏罗系上三叠统砂岩的研究,指出孔隙水中大量的有机酸对储层骨架岩石的溶解是造成孔隙度增加的主要原因,其中以斜长石和钾长石的溶解最为显著^[24]。张萌等通过对鄂尔多斯盆地上古生界和四川盆地三叠系须家河组砂岩成岩作用和次生孔隙形成机制的研究,认为碎屑岩成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换对其次生孔隙的形成具有重要影响,在热力学上最不稳定且低温条件下更易溶解的偏基性斜长石在同生到埋藏成岩作用初期时已大量溶解,并伴随高岭石的沉淀,在热力学上相对稳定的钾长石是保存时间最长的长石类型,在后期埋藏成岩过程中对次生孔隙贡献最大^[14,25-26]。碳酸盐颗粒或者胶结物为碎屑岩储层中较为普遍存在的一种岩石组分,因占据大量粒间孔隙而对岩石物性主要起负面作用。黄思静等研究认为分散的早期胶结作用可以提升岩石机械强度,增加岩石抗压实能力^[27],晚期溶蚀作用可以产生次生孔隙。郭春

清等研究认为有机酸与 CO₂ 一起共同控制着体系中碳酸盐矿物的溶解或沉淀^[28]。Sjoberg 等通过酸性流体对碳酸盐岩中方解石矿物溶蚀作用的试验研究,认为温度对方解石的溶解度具有一定影响^[5]。范明等认为温度在 60 °C~90 °C 时,乙酸对方解石的溶解能力最强,当温度大于 90 °C 时,其溶解能力逐步减弱^[29];但是,曹中宏等对此持不同观点,认为在温度由 50 °C 升高至 250 °C 的过程中,方解石的溶解速度都是逐步增大的,到 250 °C 时才达到最大值,之后随着温度的升高而开始减小^[30]。关于白云岩的溶蚀作用,金振奎等研究证明酸性流体会对白云岩进行溶蚀,形成次生孔隙^[31],石膏的存在可不同程度地加速白云岩的溶解,但随着试验温度和压力的升高,石膏对白云岩溶解的这种积极作用逐渐降低^[32]。

咸化湖盆沉积的碎屑岩储层中因沉积了大量盐类矿物,且孔隙水中含有一定盐度,而使得水岩作用具有一定特殊性,有机质演化过程中释放的有机酸对其碎屑岩储层具有一定的改造作用,其反应机理与非咸化湖盆具有一定差异性^[33-35]。本次试验模拟了地层条件下咸化湖盆中有机酸与岩石矿物间的反应过程,并研究了这一反应过程对岩石物性和孔隙结构的影响及其形成机理。

1 地质概况

研究区红柳泉和砂西地区位于柴达木盆地西南部南区(图 1),北抵七个泉油田,南靠尕斯湖岸,是盆地内勘探程度最高的地区之一。本次试验选取的两个样品分别位于红 17 井 3 661.66 m 处岩芯(样品编号为 H17,岩性为深灰色含膏细砂岩)和砂西 35 井 3 883.20 m 处岩芯(样品编号为 SX35,岩性为灰色含膏细砂岩),其所属层位均为始新统下干柴沟组下段(E₂x)。钻井成果揭示了研究区该层段烃源岩较为发育,其中亦发育扇三角洲前缘分流河道相的储层砂体。这些储集岩在地质历史时期与临近的烃源

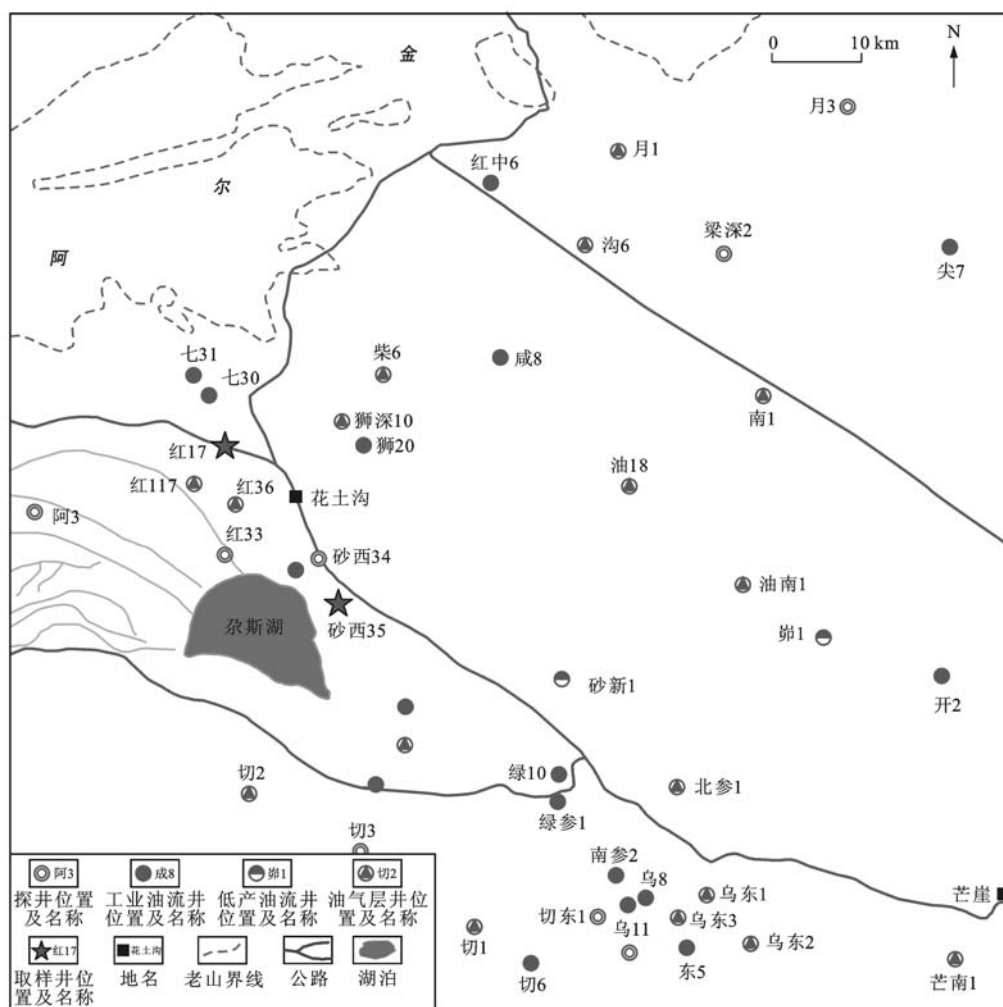


图1 研究区位置

Fig. 1 Position of Study Area

岩在有机质成熟过程中产生的有机酸发生着复杂的物理化学反应。

2 试验方法及条件

2.1 试验方法

在矿物与孔隙流体之间的相互作用方面,流体流动是影响成岩作用的关键因素^[4,15],因此,本次模拟试验采用了流动的酸性流体,让其在设定的高温高压条件下通过具有一定渗透性的储层砂岩样品的孔喉,并在其内与岩石矿物发生反应,试验后通过一系列分析测试手段来对比模拟试验前、后岩石物性和孔隙结构的差异。岩芯样品被钻成直径为 2.5 cm 的圆柱体(高约 8 cm),用岩芯夹持器密封,固定于高温高压反应釜内,让流体仅通过岩石孔隙,从圆柱体的一端进入,与岩石矿物反应一段时间后从另一端流出。模拟试验开始前,首先对所选样品做一系列分析测试,包括薄片鉴定、物性

分析、X 衍射分析、扫描电镜晶体形貌的观察及能谱测试、毛管压力测试等,试验结束后再次对试验后的样品做上述分析测试,对比试验前、后的分析测试结果;此外,对各个温度-压力点的反应后的生成物溶液进行离子浓度测试(电感耦合等离子体发射光谱分析)。

常规物性分析结果显示:样品 H17 的孔隙度和渗透率分别为 10.2%、 $2.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;样品 SX35 的孔隙度和渗透率分别为 14.4%、 $31.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;两块岩石样品均达到流体在一定压力下能被渗透过的标准。样品 H17 取自地温梯度为每 100 m 上升 3.2 °C 的井,样品 SX35 取自地温梯度为每 100 m 上升 3.6 °C 的井。圆柱体样品被装入高温高压反应釜,根据研究区埋藏史和烃源岩演化史^[36]设置两个样品的试验温度分别为 60 °C、90 °C、120 °C、150 °C、180 °C,每个温度对应压力值见表 1。在上述 5 个温度-压力点,试验反应时间都为 2 h,酸性流

体的流速为 $1\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在每个温度-压力点取试验后的溶液量约 10 mL 进行分析测试。

表 1 模拟试验的温度、压力条件

Tab. 1 Condition of Temperature and Pressure for Simulated Test

样品编号	参数	温压 点 1	温压 点 2	温压 点 3	温压 点 4	温压 点 5
H17	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	60	90	120	150	180
	压力/ MPa	11.1	21.1	31.0	41.0	50.9
SX35	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	60	90	120	150	180
	压力/ MPa	9.4	18.3	27.1	35.9	44.8

2.2 试验流体

据 Surdam 等的研究^[13,37],地层水中的有机酸主要由干酪根断裂产生。干酪根上含有丰富的含氧基团,其中主要为不饱和脂肪酸、直链一元羧酸和二元羧酸等;这些基团在热降解早期被释放出来,产生多种羧酸和酚类。原油微生物的降解、游离氧的氧化作用^[38]、石油的热降解作用和由围岩矿物中高价元素组成的离子或化合物与有机质之间发生的作用均可产生有机酸。相对于碳酸,有机酸具有更强的酸性以及与铝硅酸盐络合的能力,对矿物的溶蚀作用更加显著,乙酸对长石颗粒溶解所需要的自由能比有碳酸存在的情况下所需的自由能低^[39-40]。

MacGowan 等认为在一定地质条件下,即使温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,甚至在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,乙酸根仍然是热稳定的^[41]。本次模拟试验采用油田水中最常见的有机酸类型——乙酸(质量浓度为 $2\text{ }000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)作为溶解介质来模拟高温高压地层条件下储层

砂岩与酸性流体间的化学反应过程,进而研究酸性流体对储层的改造作用。

2.3 试验装置

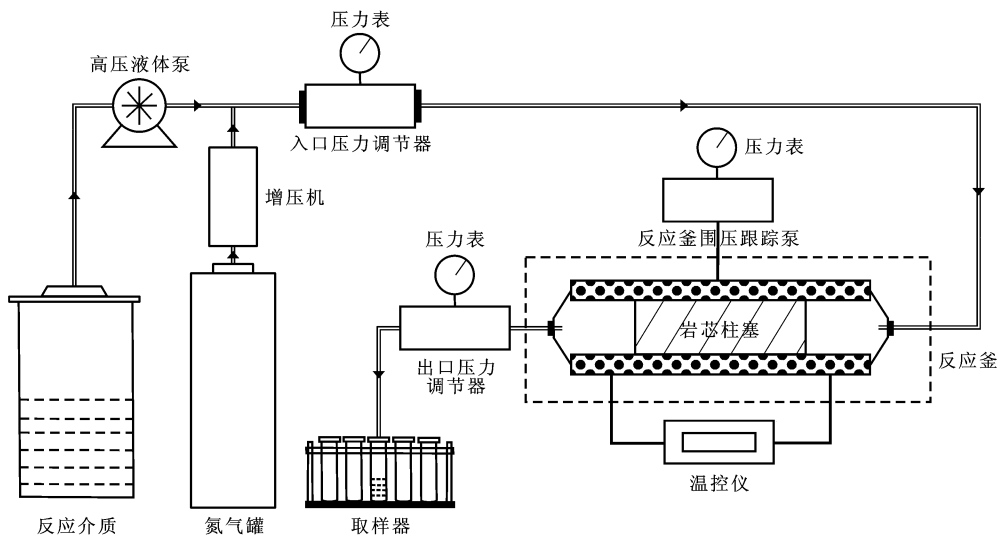
高温高压试验装置可以模拟地质条件下热液体系中的流体-岩石在连续流动或静态体系中的化学反应;模拟温度为室温至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,模拟压力为常压至 70 MPa ,液体流速为 $0.1 \sim 10\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;反应装置主要由反应介质容器、高压液体泵、温度-压力调节设备、反应釜组成(图 2)。高压液体泵驱动系统内,在溶液流出方向上安装背压阀控制器来稳定流体压力,保证高温高压下流体恒压、恒速流动。反应釜岩芯夹持器围压由围压泵驱动水溶液控制,围压泵自动跟踪岩芯夹持器入口流体压力,同时确保围压比入口压力恒定大 2.5 MPa 。

3 试验结果

3.1 物 性

经高温高压试验后,两块样品的孔隙度均有所增大,但渗透率的变化却表现为一个上升而另一个下降:样品 H17 的孔隙度由 10.2% 升高到 12.5% ,样品 SX35 的孔隙度由 14.4% 升高到 17.8% ;样品 H17 的渗透率由 $2.8 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 升高到 $17.3 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$;样品 SX35 的渗透率由 $31.6 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 下降到 $12.4 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。乙酸的溶蚀作用对两个样品均产生了一定量的可容空间,造成孔隙度增大,但是样品 SX35 的孔隙喉道发生了部分堵塞现象,从而造成其渗透率的下降。

通过偏光显微镜对试验前、后岩石样品铸体



图件源自中国石油杭州地质研究院碳酸盐岩储层重点实验室

图 2 高温高压动力学反应装置

Fig. 2 High-temperature and High-pressure Dynamic Reaction Equipment

薄片孔隙发育情况的对比研究,试验后的样品面孔率明显增大:样品 H17 的面孔率由 7.7% 升

高到 8.9%,样品 SX35 的面孔率由 8.2% 升高到 10.9%(图 3)。

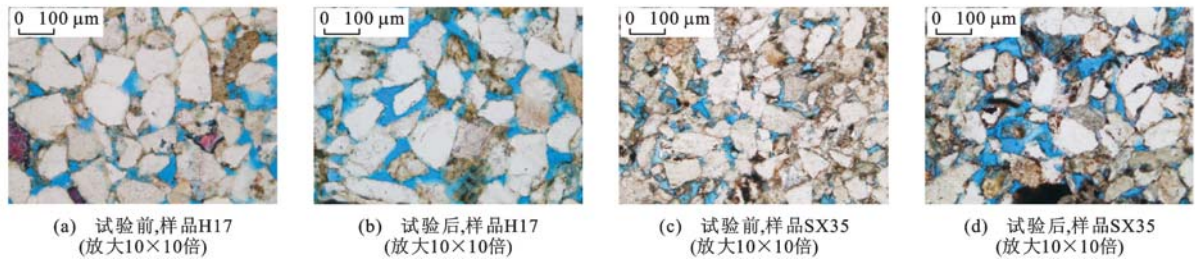


图 3 岩石薄片偏光显微镜照片

Fig. 3 Polarizing Microscopy Photographs of Rock Slices

3.2 孔隙结构

酸性流体对碎屑岩储层的改造作用在岩石孔隙结构方面表现也较为明显(表 2)。通过对试验前、后毛管压力进行测试和对比研究,样品 H17 试验后相对于试验前的变化有:①排驱压力和中值压力均减小,汞更容易渗透,溶蚀作用产生了次生孔隙;②中值半径均增大,溶蚀作用扩大了孔隙半径;③进汞饱和度增大,因溶蚀作用产生了更多可容纳空间,未饱和汞饱和度减小,退汞效率升高,溶蚀作用使得更多的孔喉具有连通性;④试验后对岩石渗透率起主要贡献作用的孔喉数量增多,溶蚀作用使得孔喉对岩石连通性和渗透性的贡献变大。样品 SX35 试验后相对于试验前的变化有:①排驱压力和中值压力均减小,汞更容易渗透,溶蚀作用产生了次生孔隙;

②中值半径均增大,溶蚀作用扩大了孔隙半径;③进汞饱和度略减小,未饱和汞饱和度增大,退汞效率降低,黏土矿物的转化堵塞了部分细喉道,使得部分连通孔隙变为了“死”孔隙;④试验后对岩石渗透率起主要贡献作用的孔喉数量增多,溶蚀作用使得岩石较粗喉道的孔径有所增大,但堵塞了细喉道,从而致使岩石整体渗透率变差。

4 控制因素分析

4.1 主要矿物的溶蚀或沉淀

从图 4 可以得出,模拟试验后,岩石表面形貌均显示溶蚀作用较为明显,在样品 H17 和 SX35 表面均可见 50~60 μm 的溶蚀孔洞,发生溶蚀作用的主矿物包括长石、石膏和铁白云石。X 衍射全岩矿物分析数据显示:样品 H17 中的长石和石膏矿物含量(体积分数,下同)分别由试验前的 22% 和 4.4% 下降为试验后的 19.7% 和 3%;样品 SX35 中的长石、石膏和铁白云石矿物含量分别由试验前的 18.7%、2.5% 和 7.5% 下降为试验后的 17.8%、2% 和 6.6%;这种减少是样品孔隙度增大的最重要因素。发生沉淀作用的主矿物包括样品 H17 中的方解石(含量由试验前的 4.5% 升高为试验后的 6.6%)和样品 SX35 中的钙芒硝(含量由试验前的 1% 升高为试验后的 2.4%)。

黄思静等研究表明,在高温高压条件下,白云石比方解石更易溶解^[32,42];本次试验结果进一步证明了该结论在咸化湖盆沉积中同样适用,但是方解石的沉淀作用却与非咸化湖盆中的结论截然相反,样品 H17 中的方解石在试验后发生了沉淀作用。一般来说,方解石在酸性环境下会发生溶蚀作用,但研究区沉积环境为咸化湖盆^[43-45],沉积地层中一般多含石膏,在高温高压地层条件下石膏更容易溶解,产生的过饱和钙易造成方解石的沉淀^[2]。

表 2 试验前、后岩石孔隙结构对比

Tab. 2 Comparison of Pore Structures Before and After Tests

参数	样品 H17		样品 SX35	
	试验前	试验后	试验前	试验后
孔隙度/%	10.17	12.52	14.39	17.83
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	2.761 2	17.300 0	31.588 1	12.360 0
大量进汞压力/MPa	0.118 9	0.045 7	0.118 9	0.073 6
排驱压力/MPa	0.118 9	0.045 7	0.118 8	0.073 6
中值压力/MPa	0.193 5	0.136 0	0.275 3	0.179 2
最大进汞饱和度/%	84.162 2	91.326 9	96.910 9	95.057 5
残留汞饱和度/%	55.769 4	48.760 8	62.750 0	56.066 7
进汞 10% 时的孔喉半径/μm	61.798 3	61.283 3	58.832 0	57.905 5
中值半径/μm	3.876 0	5.514 7	2.724 3	4.185 3
未饱和汞饱和度/%	15.837 8	8.673 1	3.089 1	4.942 5
退出效率/%	33.735 8	46.608 5	35.249 8	41.018 1
均值系数	6.098 6	6.346 8	8.890 5	7.567 3
歪度系数	1.409 6	2.024 0	0.924 8	1.435 6
分选系数	2.052 8	2.296 8	2.891 8	2.655 3
变异系数	0.336 6	0.361 9	0.325 3	0.350 9

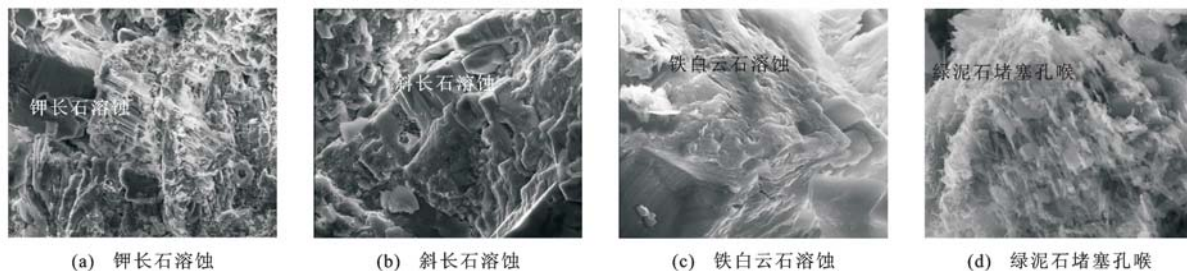


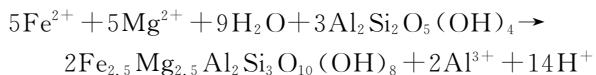
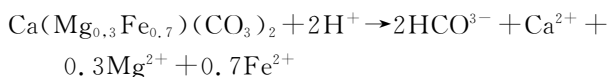
图4 样品SX35模拟试验后各矿物的扫描电镜图片

Fig. 4 SEM Photographs of Different Minerals for Sample SX35 After the Simulated Test

4.2 黏土矿物的转化

X衍射黏土矿物相对含量分析结果显示:试验前样品H17中的黏土矿物种类包括伊利石、高岭石、绿泥石和伊蒙混层,其相对含量分别为66%、3%、17%和14%,试验后变化不大,仅发现1%的伊蒙混层转化为伊利石。

由于 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 离子半径的不同以及白云石和方解石摩尔体积的差异^[46-47],白云石形成过程中自身易形成较多的收缩晶间孔,为溶蚀作用提供了流体通道。虽然随着试验温度和压力的升高,石膏对白云石溶解的积极作用逐渐降低,但咸化湖盆中石膏的存在可不同程度地加速白云石的溶解^[32],起到一个良好的催化作用。扫描电镜下可观察到试验后样品SX35中铁白云石发育大量溶蚀孔洞[图4(c)]。X衍射黏土矿物相对含量分析结果显示,试验前样品SX35中的黏土矿物种类包括伊利石、高岭石、绿泥石和伊蒙混层,其相对含量分别为58%、6%、18%和18%,试验后部分伊蒙混层在富钾的条件下转化为伊利石(钾长石的溶解生成了 K^{+}),使得伊利石含量升高至61%,高岭石在富 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 的条件下(铁白云石的溶蚀作用生成了 Fe^{2+} 、 Mg^{2+})全部转化为绿泥石,使其含量升高至24%。扫描电镜下可见白云石颗粒因溶蚀作用而发育粒内溶蚀孔,其周围可见大量针叶状绿泥石生成,这些极细的黏土矿物极易占据孔隙[图4(d)],从而造成岩石渗透率的下降。其反应机理为



式中: $CaMg(CO_3)_2$ 对应白云石; $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 对应高岭石; $Fe_{2.5}Mg_{2.5}Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$ 对应绿泥石。

5 结 语

(1)咸化湖盆沉积的碎屑岩储层中常发育石膏等

盐类矿物,在相同条件下石膏的溶解度(0.255 0,标准状态)远大于方解石(0.001 4,标准状态),因此,石膏在酸性流体的作用下会优先发生溶解作用而使得反应体系中 Ca^{2+} 快速富集,从而抑制方解石的溶解;随着反应的进一步进行,石膏溶解产生的过饱和钙会使得方解石发生沉淀作用。但总体上看,酸性流体对储层的溶蚀作用所新增的可容纳空间大于这一沉淀作用所占据的储集空间,因此,通常情况下酸性流体对碎屑岩储层的改造作用是积极的。

(2)溶蚀作用有助于岩石储集空间的增大,但是渗透率和孔隙结构的变化更为复杂,尤其是咸化湖盆沉积的岩石中矿物种类更具有多样性。当储层中同时含有石膏和铁白云石时,石膏的催化作用促使铁白云石更易在酸性流体作用下发生溶蚀作用,其生成的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 为高岭石转化为绿泥石提供了必要的物质基础;扫描电镜下可见这些生成的针叶状绿泥石极易堵塞孔隙喉道,造成岩石渗透率的下降。

中国石油杭州地质研究院碳酸盐岩储层重点实验室沈安江、蒋义敏高级工程师在分析测试过程中提供了指导,在此一并致谢!

参考文献:

References:

- [1] CAROTHERS W W, KHARAKA Y K. Aliphatic Acid Anions in Oil-field Waters; Implications for Origin of Natural Gas[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(12): 2441-2453.
 - [2] 曹正林, 袁剑英, 黄成刚, 等. 高温高压碎屑岩储层中石膏溶解对方解石沉淀的影响[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 450-454.
- CAO Zheng-lin, YUAN Jian-ying, HUANG Cheng-gang, et al. Influence of Plaster Dissolution on Calcite Precipitation in Clastic Reservoirs Under High-temperature and High-pressure Conditions [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 450-454.

- [3] 蔡春芳,梅博文,李 伟. 塔里木盆地油田水文地球化学[J]. 地球化学,1996,25(6):614-623.
CAI Chun-fang, MEI Bo-wen, LI Wei. The Hydrogeochemistry of Oil-fields in Tarim Basin[J]. Geochimica, 1996, 25(6):614-623.
- [4] 张枝焕,常象春,曾溅辉. 水-岩相互作用研究及其在石油地质中的应用[J]. 地质科技情报,1998,17(3):69-74.
ZHANG Zhi-huan, CHANG Xiang-chun, ZENG Jian-hui. Research on Water-rock Interaction and Its Application on Petroleum Geology[J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(3):69-74.
- [5] SJOBERG E L, RICKARD D T. Temperature Dependence of Calcite Dissolution Kinetics Between 1 °C and 62 °C at pH 2.7 to 8.4 in Aqueous Solutions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, 48(3):485-493.
- [6] AMRHEIN C, JURINAK J J, MOORE W M. Kinetics of Calcite Dissolution as Affected by Carbon Dioxide Partial Pressure[J]. SSSA Journal, 1985, 49(6):1393-1398.
- [7] POKROVSKY O S, GOLUBEV S V, SCHOTT J. Dissolution Kinetics of Calcite, Dolomite and Magnesite at 25 °C and 0 to 50 atm p_{CO_2} [J]. Chemical Geology, 2005, 217(3/4):239-255.
- [8] BUHMANN D, DREYBRODT W. Calcite Dissolution Kinetics in the System $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$ with Participation of Foreign Ions[J]. Chemical Geology, 1987, 64(1/2):89-102.
- [9] SVENSSON U, DREYBRODT W. Dissolution Kinetics of Natural Calcite Minerals in CO_2 -water Systems Approaching Calcite Equilibrium[J]. Chemical Geology, 1992, 100(1/2):129-145.
- [10] ZHANG R H, POSEY-DOWTY J, HELLMANN R, et al. Kinetics Studies of Mineral-water Reactions in Hydrothermal Flow Systems at Elevated Temperatures and Pressures[J]. Science in China: Series B, 1990, 33(9):1136-1152.
- [11] 曲希玉,刘 立,蒙启安,等. 大气水对火山碎屑岩改造作用的研究:以塔木查格盆地为例[J]. 石油实验地质,2012,34(3):285-290.
QU Xi-yu, LIU Li, MENG Qi-an, et al. Reformation Effect of Atmospheric Water on Volcanic Clastic Rocks: A Case Study in Tamtsag Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(3):285-290.
- [12] 王 琪,史基安,薛莲花,等. 碎屑储集岩成岩演化过程中流体-岩石相互作用特征——以塔里木盆地西南坳陷地区为例[J]. 沉积学报,1999,17(4):584-590.
WANG Qi, SHI Ji-an, XUE Lian-hua, et al. Characteristics of Fluid-rock Interaction in Clastic Reservoir Controlled by Evolution of Diagenetic Environment — Taking the Southwest Depression of Tarim Basin as an Example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4):584-590.
- [13] SURDAM R C, CROSSEY L J, HAGEN E S, et al. Organic-inorganic and Sandstone Diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1):1-23.
- [14] 张 萌,黄思静,冯明石,等. 碎屑岩骨架颗粒溶解的热力学模型及地质意义[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4):21-25.
ZHANG Meng, HUANG Si-jing, FENG Ming-shi, et al. Thermodynamics Model for Dissolution of Petrogenetic Minerals of Clastic and Its Geological Significances[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(4):21-25.
- [15] LYNCH F E. Mineral/Water Interaction, Fluid Flow, and Frio Sandstone Diagenesis: Evidence from the Rocks[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(4):486-504.
- [16] 张天付,鲍征宇,崔振昂,等. 碳酸盐岩埋藏溶蚀的热力学分析及其地质意义[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2):179-181.
ZHANG Tian-fu, BAO Zheng-yu, CUI Zhen-ang, et al. Thermodynamic Analysis of Burial Dissolution of Carbonate Rocks and Its Geological Significance[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(2):179-181.
- [17] 赵淑平,王起琮. 鄂尔多斯盆地大牛地气田马家沟组古岩溶储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2):170-174.
ZHAO Shu-ping, WANG Qi-cong. Characteristics of Majiagou Palaeokarstic Reservoir of Ordovician in Daniudi Gas Field of Ordos Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(2):170-174.
- [18] 吴洛菲,师永民,马 伟,等. 致密砂岩储集层孔喉群落发育特征[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(4):428-431.
WU Luo-fei, SHI Yong-min, MA Wei, et al. Characteristics of Pores and Throats Distribution in Tight Sandstone Reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(4):428-431.
- [19] 胡 昊,王振宇,张云峰. 塔中北斜坡鹰山组碳酸盐岩层间岩溶储集层特征[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(3):277-281.
HU Hao, WANG Zhen-yu, ZHANG Yun-feng. Characteristics of Carbonate Interlayer Karst Reservoir of Yingshan Formation in Tazhong Northern Slope, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34

- (3):277-281.
- [20] 廖明光,裴钰,陈培元,等.塔河油田4区岩溶缝洞型储层及其控制因素[J].西南石油大学学报:自然科学版,2013,35(4):1-8.
- LIAO Ming-guang, PEI Yu, CHEN Pei-yuan, et al. Formation and Controlling Factors of Karst Fracture-cave Reservoir in the 4th Block of Tahe Oilfield [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(4): 1-8.
- [21] 张军涛,吴世祥,唐德海,等.含泥碳酸盐岩埋藏条件下溶蚀作用的实验模拟[J].石油实验地质,2013,35(2):220-223.
- ZHANG Jun-tao, WU Shi-xiang, TANG De-hai, et al. Experimental Simulation of Burial Dissolution of Clay-bearing Carbonate [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(2): 220-223.
- [22] 于川淇,宋晓蛟,李景景,等.长石溶蚀作用对储层物性的影响:以渤海湾盆地东营凹陷为例[J].石油与天然气地质,2013,34(6):765-770.
- YU Chuan-qi, SONG Xiao-jiao, LI Jing-jing, et al. Impact of Feldspar Dissolution on Reservoir Physical Properties: A Case from Dongying Sag, the Bohai Bay Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(6): 765-770.
- [23] 于川淇,宋晓蛟,李景景,等.长石溶蚀作用对储层物性的影响——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J].石油与天然气地质,2013,34(6):765-770.
- YU Chuan-qi, SONG Xiao-jiao, LI Jing-jing, et al. Impact of Feldspar Dissolution on Reservoir Physical Properties—A Case from Dongying Sag, the Bohai Bay Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2013, 34(6): 765-770.
- [24] 罗静兰, MORAD S, 阎世可, 等.河流-湖泊三角洲相砂岩成岩作用的重建及其对储层物性演化的影响[J].中国科学:D辑, 2001, 31(12):1006-1016.
- LUO Jing-lan, MORAD S, YAN Shi-ke, et al. Fluvial Facies, Lacustrine Facies and Delta Facies Sandstone Diagenesis Reconstruction and Its Effect on Reservoir Quality Evolution [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(12): 1006-1016.
- [25] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等.成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成:来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J].地球化学, 2009, 38(5):498-506.
- HUANG Si-jing, HUANG Ke-ke, FENG Wen-li, et al. Mass Exchanges Among Feldspar, Kaolinite and Illite and Their Influences on Secondary Porosity Formation in Clastic Diagenesis: A Case Study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression [J]. Geochimica, 2009, 38(5): 498-506.
- [26] 黄思静, 刘洁, 沈立成, 等.碎屑岩成岩过程中中浊沸石形成条件的热力学解释[J].地质论评, 2001, 47(3):301-308.
- HUANG Si-jing, LIU Jie, SHEN Li-cheng, et al. Thermodynamic Interpretation for the Conditions of the Formation of Laumontite Related to Clastic Diagenesis [J]. Geological Review, 2001, 47(3): 301-308.
- [27] 黄思静, 黄培培, 王庆东, 等.胶结作用在深埋藏砂岩孔隙保存中的意义[J].岩性油气藏, 2007, 19(3):7-13.
- HUANG Si-jing, HUANG Pei-pei, WANG Qing-dong, et al. The Significance of Cementation in Porosity Preservation in Deep-buried Sandstones [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 7-13.
- [28] 郭春清, 沈忠明, 张林晔, 等.砂岩储层中有机酸对主要矿物的溶蚀作用及机理研究综述[J].地质地球化学, 2003, 31(3):53-57.
- GUO Chun-qing, SHEN Zhong-ming, ZHANG Lin-ye, et al. The Corrosion and Its Mechanism of Organic Acids on Main Minerals in Oil-gas Reservoir Sand Rocks [J]. Geology-geochemistry, 2003, 31(3): 53-57.
- [29] 范明, 胡凯, 蒋小琼, 等.酸性流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J].地球化学, 2009, 38(1):20-26.
- FAN Ming, HU Kai, JIANG Xiao-qiong, et al. Effect of Acid Fluid on Carbonate Reservoir Reconstruction [J]. Geochimica, 2009, 38(1): 20-26.
- [30] 曹中宏, 刘国勇, 张红臣, 等.南堡凹陷及周边凸起区古生界碳酸盐岩溶解特性的试验研究[J].中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38(1):8-13.
- CAO Zhong-hong, LIU Guo-yong, ZHANG Hong-chen, et al. Experimental Research of Carbonate Rocks Dissolution Characteristics in Paleozoic Group of Nanpu Sag and Surrounding Bulge Areas [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 38(1): 8-13.
- [31] 金振奎, 余宽宏.白云岩储集层埋藏溶蚀作用特征及意义——以塔里木盆地东部下古生界为例[J].石油勘探与开发, 2011, 38(4):428-434.
- JIN Zhen-kui, YU Kuan-hong. Characteristics and Significance of the Burial Dissolution of Dolomite Reservoirs—Taking the Lower Palaeozoic in Eastern Tarim Basin as an Example [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 428-434.
- [32] 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等.石膏对白云岩溶解影响的实验模拟研究[J].沉积学报, 1996, 14(1):103-109.
- HUANG Si-jing, YANG Jun-jie, ZHANG Wen-zheng, et al. Effects of Gypsum(or Anhydrite) on Dissolution of Dolomite Under Different Temperatures and Pressures of Epigenesis and Burial Diagenesis [J]. Acta

- Sedimentologica Sinica, 1996, 14(1): 103-109.
- [33] 施 辉, 刘 震, 连良达, 等. 高原咸化湖盆岩性油气藏富集规律——以柴达木盆地西南区为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 701-711.
- SHI Hui, LIU Zhen, LIAN Liang-da, et al. Enrichment Regularity of Lithologic Reservoirs in Plateau Saline Lacustrine Basin—Taking the Southwestern Qaidam Basin for Example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 701-711.
- [34] 徐 伟, 陈开远, 曹正林, 等. 咸化湖盆混积岩成因机理研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1804-1816.
- XU Wei, CHEN Kai-yuan, CAO Zheng-lin, et al. Original Mechanism of Mixed Sediments in the Saline Lacustrine Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(6): 1804-1816.
- [35] 陈世悦, 王 玲, 李 聪, 等. 歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 40-47.
- CHEN Shi-yue, WANG Ling, LI Cong, et al. The Saline Genesis of Lacustrine Basin in the Lower Section of the First Member of Shahejie Formation in Qikou Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 40-47.
- [36] 邱楠生, 顾先觉, 丁丽华, 等. 柴达木盆地西部新生代的构造-热演化研究[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 456-464.
- QIU Nan-sheng, GU Xian-jue, DING Li-hua, et al. Tectono-thermal Evolution of Western Qaidam Basin, Northwest China[J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4): 456-464.
- [37] SURDAM R C, BOESE S W, CROSSEY L J. The Chemistry of Secondary Porosity[C]// MCDONALD D A, SURDAM R C. Clastic Diagenesis. Boulder: AAPG, 1984: 127-149.
- [38] HELGESON H C, KNOX A M, OWENS C E, et al. Petroleum, Oil Field Waters, and Authigenic Mineral Assemblages: Are They in Metastable Equilibrium in Hydrocarbon Reservoirs [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(14): 3295-3339.
- [39] LUNDEGARD P D, LAND L S, GALLOWAY W E. Problem of Secondary Porosity: Frio Formation (Oligocene), Texas Gulf Coast[J]. Geology, 1984, 12(7): 399-402.
- [40] MCSHRII D. On There Activity of Carbonic and Organic Acid Sand Generation of Secondary Porosity[C]// GAUTIER D L. Roles of Organic Matters in Sediment Diagenesis. Darlington: SEPM, 1986: 147-155.
- [41] MACGOWAN D B, SURDAN R C, EWING R E. 油层中羧酸阴离子对骨架矿物颗粒稳定性的影响[C]// 梅博文. 储层地球化学译文集. 西安: 西北大学出版社, 1991: 83-94.
- MACGOWAN D B, SURDAN R C, EWING R E. The Effect of Carboxylic Acid Carboxylic Anions on the Steady of Framework Particles [C] // MEI Bo-wen. Translated Essays of Reservoir Geochemistry. Xi'an: Northwest University Press, 1991: 83-94.
- [42] HUANG S J, XIAO L P, YANG J J, et al. Experimental Simulation of Dolomite Dissolution Under Burial Diagenesis Conditions and Thermodynamic Interpretation [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2000, 19(1): 58-64.
- [43] 金 强, 朱光有. 中国中新生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 483-492.
- JIN Qiang, ZHU Guang-you. Progress in Research of Deposition of Oil Source Rocks in Saline Lakes and Their Hydrocarbon Generation[J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12(4): 483-492.
- [44] 金 强. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩微量元素组成及其地球化学特征[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(2): 1-5.
- JIN Qiang. Geochemistry Characteristics of Trace Elements in Evaporates of the Tertiary in Western Qaidam Basin[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2003, 27(2): 1-5.
- [45] 张晓宝, 胡 勇, 马立元, 等. 柴达木盆地西部第三系盐湖相天然气碳同位素特征、成因与分布[J]. 中国科学: D辑, 2002, 32(7): 598-608.
- ZHANG Xiao-bao, HU Yong, MA Li-yuan, et al. Carbon Isotope Compositions of Natural Gases from Saline Sediments in Qaidam Basin and Their Origin and Distribution[J]. Science in China: Series D, 2002, 32(7): 598-608.
- [46] 朱东亚, 金之均, 胡文瑄. 塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(2): 156-170.
- ZHU Dong-ya, JIN Zhi-jun, HU Wen-xuan. Hydrothermal Recrystallization of the Lower Ordovician Dolomite and Its Significance to Reservoir in Northern Tarim Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 40(2): 156-170.
- [47] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- HAN Yin-wen, MA Zhen-dong. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2003.