



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309106

引用格式:张玉龙,施雷庭,兰林,等.致密砂砾岩与CO₂和水相互作用规律[J].科学技术与工程,2025,25(3):1028-1038.

Zhang Yulong, Shi Leitong, Lan Lin, et al. Interaction pattern of dense sandstone with CO₂ and water [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1028-1038.

致密砂砾岩与CO₂和水相互作用规律

张玉龙¹, 施雷庭², 兰林¹, 潘宝凤¹, 邹天赐¹, 张言亮³, 王晓²

(1. 中国石化西南油气分公司工程技术研究院, 德阳 618000; 2. 油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 成都 610500;
3 长庆油田分公司工程监督处, 西安 710018)

摘要 为研究致密砂砾岩与CO₂和水相互作用规律,基于准噶尔盆地玛湖致密砂砾岩油藏储层条件,开展致密砂砾岩与CO₂和水相互作用实验。结果表明:CO₂溶于水后生成碳酸主要与致密砂砾岩砾石间胶结物中长石、方解石发生化学作用,形成强烈的绕砾溶蚀现象,以溶蚀为主,沉淀为辅,最终使岩石孔隙度和渗透率增加,储层流体渗流能力变强,其中孔隙度和渗透率最大增量分别为3.65%和87.36%。同时,作用后岩石表面粗糙度增加,亲水矿物石英裸露在表面,岩石水相润湿接触角降低7.4°亲水性增强。对CO₂吞吐提高原油采收率具有积极作用,主要增油机理包括以下两点:一是增大孔隙空间提高流体渗流能力;二是改善岩石水相润湿性,提高油藏水相渗吸能力和原油流动能力,从而提高原油采收率。

关键词 致密砂砾岩; CO₂; 相互作用; 渗透率; 提高采收率

中图分类号 TE357; 文献标志码 A

Interaction Pattern of Dense Sandstone with CO₂ and Water

ZHANG Yu-long¹, SHI Lei-ting², LAN Lin¹, PAN Bao-feng¹, ZOU Tian-ci¹,
ZHANG Yan-liang³, WANG Xiao²

(1. Engineering Technology Research Institute of Sinopec Southwest Oil and Gas Branch, Deyang 618000, China;
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu 610500, China;
3 Engineering Supervision Department of Changqing Oilfield Branch, Xi'an 710018, China)

[Abstract] Based on the reservoir conditions of tight conglomerate reservoirs in the Mahu area of the Junggar Basin, an experiment was conducted to study the interaction between tight conglomerates, CO₂, and water. The results indicate that after CO₂ dissolves in water to form carbonic acid, it primarily reacts chemically with feldspar and calcite in the cement between the conglomerate grains. This leads to significant around-grain dissolution, with dissolution being the main process and precipitation being secondary. Ultimately, this increases the porosity and permeability of the rock, enhancing the reservoir fluid seepage capacity. The maximum increases in porosity and permeability are 3.65% and 87.36%, respectively. Additionally, the surface roughness of the rock increases after the interaction, with hydrophilic mineral quartz exposed on the surface. The water-phase wetting contact angle of the rock decreases by 7.4°, enhancing hydrophilicity. The CO₂ huff and puff process has a positive effect on improving oil recovery, with the main oil-increasing mechanisms being the enlargement of pore space to enhance fluid seepage capacity and the improvement of rock water-phase wettability, which increases reservoir water-phase imbibition capacity and crude oil mobility, thereby improving oil recovery.

[Keywords] dense sandstone; CO₂; interaction; permeability; enhanced recovery

致密油作为一种重要的油气资源,具有较大的勘探开发潜力,受到了广泛关注。准噶尔盆地的致密油资源量约为 29.4×10^8 t,占盆地油气总量的三分之一,是中国当前勘探中仅有的致密砂砾岩油藏,加大该类油藏的开发对提高中国油气产量和保障中国能源安全具有重要意义^[1-3]。致密砂砾岩油藏储层孔隙度和渗透率极低,常规的注水方式难以在该类油藏实施^[4]。研究表明,注CO₂吞吐既能实

现该类油藏高效开发又能将CO₂进行地质埋存,达到提高原油采收率和减少CO₂排放双赢的效果^[5]。但CO₂气体活性极强,注入储层后极易与储层流体和矿物发生反应,而不同油藏矿物组成和流体性质存在差异,导致注CO₂后提高采收率效果差异明显^[6]。针对CO₂-岩石-水的相互作用学者们进行了以下研究:于志超等^[7]在研究饱和CO₂地层水驱替过程中的水-岩石作用实验时得出,方解石溶解程度

收稿日期:2023-11-20 修订日期:2024-06-24

基金项目:四川省科技计划(2022YFSY0007);四川省国际科技创新合作项目(2023YFH0005)

第一作者:张玉龙(1992—),男,汉族,四川眉山人,博士,工程师。研究方向:提高采收率理论与技术。E-mail:563197326@qq.com。

最高,铁白云石最低,实验后生成了少量的高岭石,且随着驱替的持续进行,部分高岭石发生运移,堵塞孔隙,降低了储层渗透率。汤瑞佳等^[8]在研究延长油田 CO₂-岩石-水的相互作用规律中得出,CO₂注入压力越高,矿物的溶蚀现象越严重,温度和地层水矿化度越高,CO₂溶解度越低,CO₂注入致密砂岩油藏后主要溶解钾长石和钠长石。曹冲等^[9]在研究注 CO₂提高采收率和埋存过程中 CO₂与岩石和水作用关系时得出,CO₂与水作用生成碳酸,碳酸会分解出 HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻,再与黄铁矿作用生成 Fe(OH)₃ 沉淀,当沉淀作用大于溶蚀作用时,储层物性就会变差。肖娜等^[10]以延长油田 35-3 井为研究对象,研究 CO₂-水-岩石相互作用对储层孔渗参数和孔隙结构的影响,结果表明储层孔渗变化受矿物溶蚀、运移和离子沉淀等因素的共同影响,CO₂-岩石-地层水作用后,渗透率随反应时间增加持续降低,孔隙度随反应时间增加先减小后增加;随着注入压力的增加,渗透率也是逐渐降低,孔隙度先增加后降低。Niu 等^[11],在研究 CO₂-岩石-水相互作用对盖层岩石力学性质及微观孔隙结构的影响时得出,超临界 CO₂-水-岩石反应通过增大过渡孔、中孔和大孔,减少微孔的体积,促进了溶蚀孔洞的形成,使得矿物的表面变得粗糙,大大增加了储层渗透率,降低了岩石力学强度。

以上研究表明,CO₂与矿物之间的作用关系复杂需要结合目标油藏条件,不同条件会使得 CO₂与储层矿物和流体作用效果不同。因此本次研究主要结合油藏条件开展致密砂砾岩与 CO₂和水相互作用规律研究,期望获得目标油藏注 CO₂后与储层矿物和流体的作用关系及作用后储层物性变化规律,

明确注 CO₂提高致密砂砾岩油藏采收率适应性,指导致密砂砾岩油藏高效开发。

1 实验部分

1.1 致密砂砾岩矿物组成分析

采用 XRD 衍射分析、薄片鉴定和扫描电镜对致密砂砾岩矿物进行全岩、砾石和砾石与砾石间胶结基质进行组成矿物类型、含量、微观形貌特征和致密砂砾岩油藏主要成岩过程等进行分析研究。

1.1.1 实验材料和仪器

实验材料:M 油藏致密砂砾岩岩心、研钵、研磨机、烧杯、玻璃棒、载玻片、30~50 目过滤筛。

实验仪器:场发射扫描电子显微镜(GeminiSEM 500,德国)、X 射线衍射仪(Smartlab SE,日本)、偏光显微镜(SteReo Discovery V20,德国)。

1.1.2 实验步骤

X 射线衍射分析参照 SY/T 5163—2010《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》,扫描电子显微镜分析参照 SY/T 5162—1997《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》,岩石薄片分析参照 SY/T 5913—2021《岩石制片方法》、SY/T 5368—2016《岩石薄片鉴定》,详细制备过程及成品展示见图 1。

1.2 致密砂砾岩与 CO₂和水相互作用

1.2.1 实验材料

致密砂砾岩岩心(基本物性参数见表 1)、岩心切片(φ2.5 cm×3~5 mm)、岩心薄片(φ2.5 cm×0.8~1.2 mm)见图 2,模拟地层水(根据地层水离子组成表 2 配制),CO₂(气瓶,纯度 99%,成都市新都区正蓉气体有限公司)。

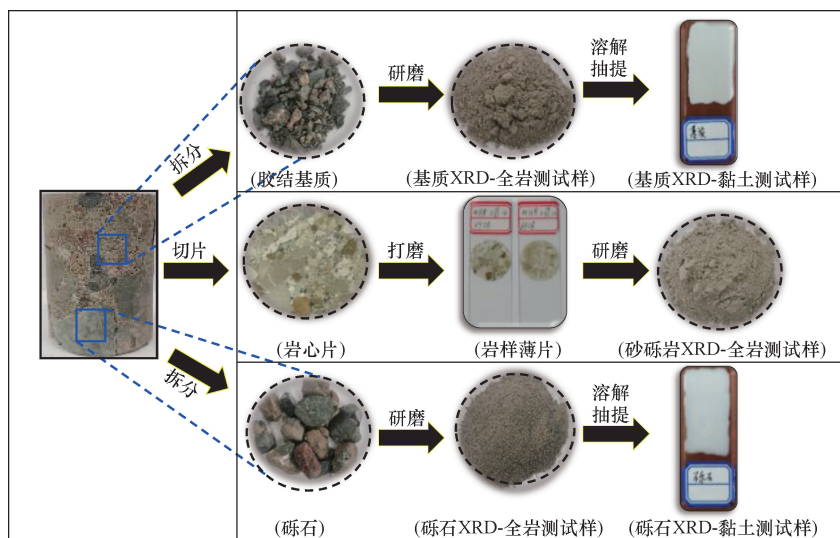


图 1 实验测试分析样品制备过程

Fig. 1 Sample preparation process for experimental testing and analysis

1.2.2 实验仪器

超临界 CO₂ 高温高压反应装置(自制)、场发射扫描电子显微镜(GeminiSEM 500, 德国)、偏光显微镜(SteReo Discovery V20, 德国)、高温高压三轴流变仪(TRC-100, 北京拓新诚信科技有限公司)、岩样切割机(成都岩心科技有限公司)、金相试样抛光机(PG-1B, 上海金相设备有限公司)、光学接触角(液-液-固型)测量仪(DSA100, 德国 KRUSS)、全自动孔渗联测仪(LkiQR-168, 成都岩心科技有限公司)、精密电子天平(精度 0.01 g)。

表 1 实验用致密砂砾岩岩心基本物性参数

Table 1 Basic physical property parameters of dense sandstone core for experimental purposes

岩心编号	长度/ cm	直径/ cm	质量/ g	孔隙度/ %	气测渗透率/ mD
M202005-1	6.61	2.50	76.06	9.24	0.182
M202005-2	6.62	2.51	76.09	9.12	0.214
M202005-3	6.64	2.50	76.11	9.31	0.223
M202005-4	6.64	2.51	76.15	9.17	0.162

表 2 地层水离子组成

Table 2 Composition of formation water ions

离子浓度/(mg·L ⁻¹)						总矿化度/ (mg·L ⁻¹)	水型
K ⁺ + Na ⁺ + Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	20 512.59	CaCl ₂
5 362.45	0	2 377.04	49	12 032.84	690.87	0	

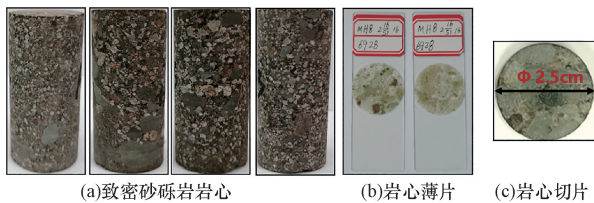


图 2 实验材料

Fig. 2 Experimental materials

1.2.3 实验步骤

(1) 实验样品制备: 取单支致密砂砾岩岩心用岩样切割机切取直径 2.5 cm, 长度 3 ~ 5 mm 若干, 使用金相抛光机打磨切割出岩心片端面, 保证样品端面光滑平整, 无明显凹槽及孔洞。制备完成后将岩心片置于 50 °C 恒温烘箱中 24 h 后备用。

(2) 反应前样品基本参数测定: 使用接触角测试仪测定反应前样品饱和地层水后水相润湿接触角及岩样其他基本物性参数。

(3) 高温高压反应实验: 将致密砂砾岩岩心、岩心片、岩心薄片放入盛满地层水的岩心杯中并用高密铁丝网密封置于 CO₂ 高温高压反应装置反应釜中, 打开超临界 CO₂ 高温高压反应装置并检查装置

气密性, 气密性检查完毕后向反应釜中缓慢通入 CO₂ 排尽釜内空气, 打开温控系统采用逐级升温方式将实验温度调整至 70 °C, 然后通入 CO₂ 并打开 CO₂ 增压泵将系统压力升至 20 MPa, 待反应 120 h 后缓慢泄去装置中的压力, 并取出反应后致密砂砾岩岩心、岩心片、岩心薄片及地层水样。

(4) 反应后样品参数测定: 使用电子天平称量反应后致密砂砾岩岩心质量; 使用全自动孔渗联测仪测定反应后致密砂砾岩岩心孔隙度、渗透率; 扫描电镜测试反应后样品在不同倍数下微观形貌变化; 接触角测试仪测定反应后水相润湿接触角; 离子色谱仪测试反应后地层水离子组成; 高温高压三轴流变仪测试反应后致密砂砾岩岩心抗压强度。

2 结果及分析

2.1 致密砂砾岩矿物组成

2.1.1 X 射线衍射分析

实验获得不同矿物的衍射分析图谱见图 3, 参照石油行业标准 SY/T 5163—2010《沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法》对 X 射线衍射图谱进行分析, 获得组成矿物类型及含量见表 3。可知: 致密砂砾岩全岩组成及含量为石英(36.48%)、钾长石(9.81%)、斜长石(19.63%)、方解石(16.32%)、白云石(5.25%)和黏土矿物(12.51%)。砾石全岩组成及含量为石英(59.52%)、钾长石(9.47%)、斜长石(20.40%)和黏土矿物(10.61%)。胶结基质全岩组成及含量为石英(25.41%)、钾长石(11.01%)、斜长石(23.14%)、方解石(18.23%)、白云石(6.41%)和黏土矿物(15.80%)。

同时为了准确获得砂砾岩矿物中黏土矿物组成类型及含量, 对砾石和基质进行黏土矿物类型和含量的测定, 获得了砾石和基质黏土矿物的衍射分析图谱(图 4)及黏土矿物的类型及含量(表 4)。可知: 砾石组成中黏土矿物及含量为伊利石(72.5%)、伊蒙混层(4.2%)、绿泥石(23.3%)。胶结基质组成中黏土矿物及含量为伊利石(31.9%)、伊蒙混层(28.5%)、绿泥石(39.6%)。对比砾石和基质中黏土矿物类型和含量可以发现, 组成砾石和基质的黏土矿物类型相同, 都为伊利石、绿泥石和伊蒙混层。不同点在于基质中 3 种黏土矿物含量相差不大, 而砾石中黏土矿物则主要以伊利石为主, 其含量高达 72.5%。

通过以上测试分析明确了致密砂砾岩全岩矿物组成成分, 主要分为造岩矿物石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石和黏土矿物伊利石、伊/蒙混层、绿泥石。

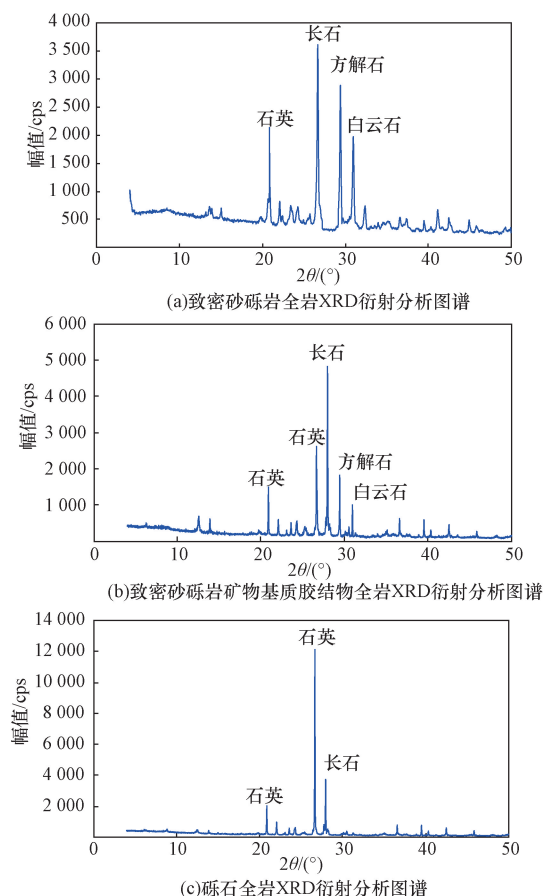


图3 不同矿物全岩 XRD 衍射分析图谱

Fig.3 Rock XRD diffraction analysis spectra of different minerals

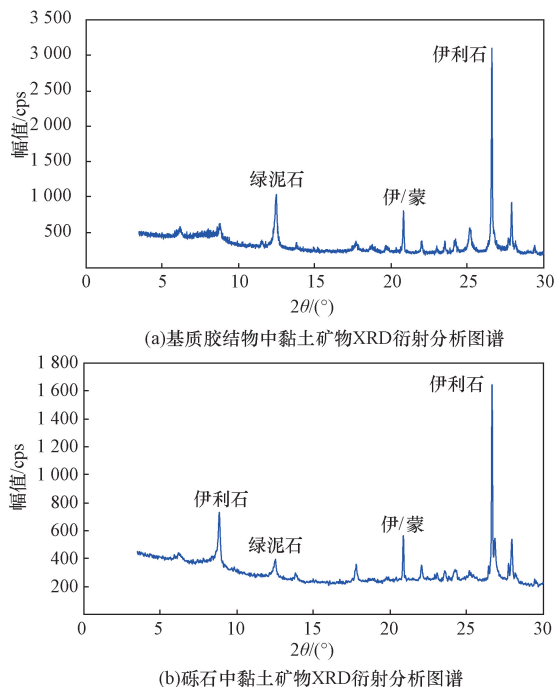


图4 基质胶结物和砾石黏土矿物 XRD 衍射分析图谱

Fig.4 XRD diffraction analysis spectrum of matrix cement and gravel clay minerals

表3 致密砂砾岩 XRD 全岩矿物含量分析值

Table 3 XRD whole rock mineral content analysis values of dense sandstone

类型	矿物含量/%					
	黏土总量	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石
岩心	12.51	36.48	9.81	19.63	16.32	5.25
胶结物	15.80	25.41	11.01	23.14	18.23	6.41
砾石	10.61	59.52	9.47	20.40	0	0

表4 致密砂砾岩中砾石和基质胶结物黏土矿物类型及含量

Table 4 Types and content of clay minerals in gravel and matrix cement in dense sandstone

类型	矿物含量/%				
	伊利石	蒙脱石	伊蒙混层	高岭石	绿泥石
胶结物	31.90	0	28.50	0	39.60
砾石	72.50	0	4.20	0	23.30

2.1.2 微观形貌特征分析(扫描电镜)

参照 SYT 5162—1997《岩石样品扫描电子显微镜分析方法》和张慧等《非常规油气储层的扫描电镜研究》确定不同矿物的名称及微观形貌^[12-15],基本找到 XRD 衍射分析中组成矿物,但新发现少量黄铁矿,分析原因主要是因为其含量极低,在 XRD 全岩衍射分析中并未能测出。具体矿物类型及其微观形貌特征如图 5 所示。

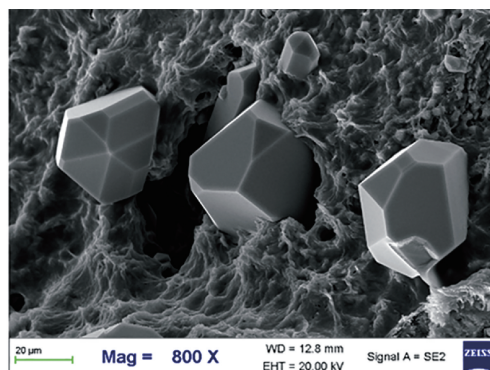
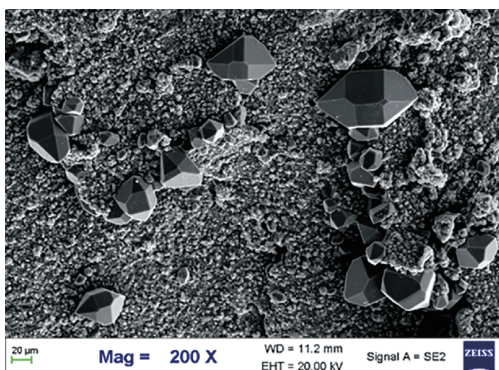
2.1.3 岩心薄片鉴定分析

采用偏光显微镜对薄片进行分析鉴定,观测分析如图 6 所示,结果表明致密砂砾岩砂质占比 15%,砾石占比 85%。主要成岩作用表现为:砾石堆积→压实→长石蚀变→方解石胶结交代→有机质成熟。

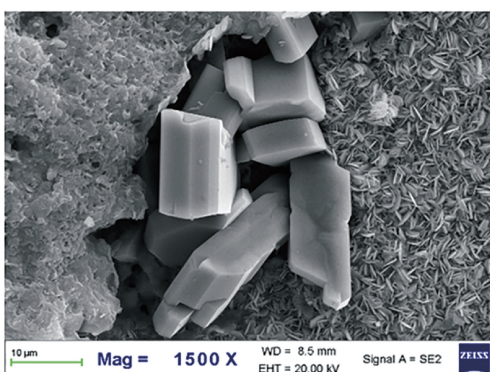
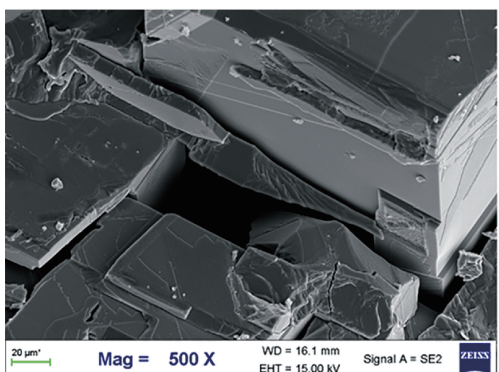
2.1.4 认识与总结

通过 XRD 衍射分析获得致密砂砾岩矿物组成成分及含量为石英(36.48%)、钾长石(9.81%)、斜长石(19.63%)、方解石(16.32%)、白云石(5.25%)和黏土矿物(12.51%),其中黏土矿物包括伊利石、伊/蒙混层、绿泥石。同时对致密砂砾岩砾石和砾石间胶结基质进行了矿物组成及含量分析,获得砾石组成成分及含量为石英(59.52%)、钾长石(9.47%)、斜长石(20.40%)、和黏土矿物(10.61%),黏土矿物为伊利石(72.5%)、伊蒙混层(4.2%)、绿泥石(23.3%)。胶结基质成分为石英(25.41%)、钾长石(11.01%)、斜长石(23.14%)、方解石(18.23%),白云石(6.41%)和黏土矿物(15.80%),黏土矿物为伊利石(31.9%)、伊蒙混层(28.5%)、绿泥石(39.6%)。

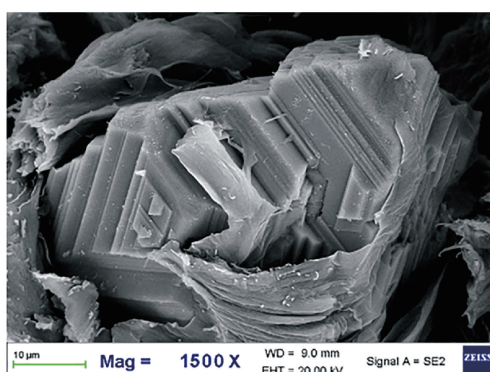
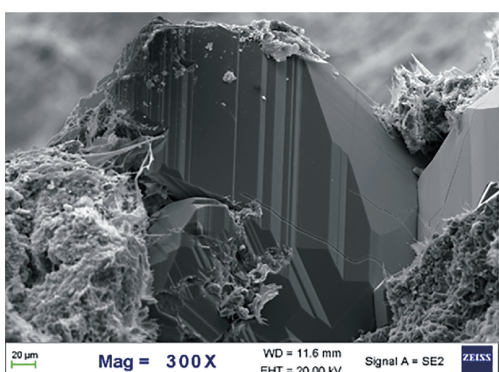
采用场发射电子显微镜找到组成矿物并在不同倍数下观测了其微观形貌特征,最后利用薄片鉴定分析法确定致密砂砾岩油藏成岩作用的过程:砾



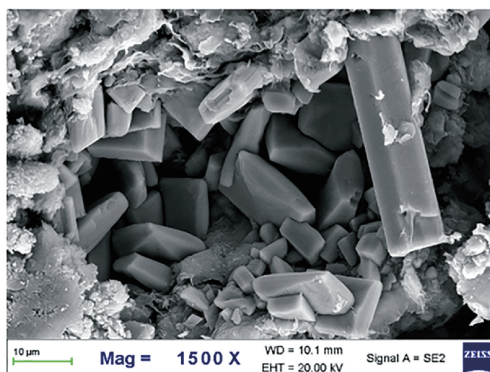
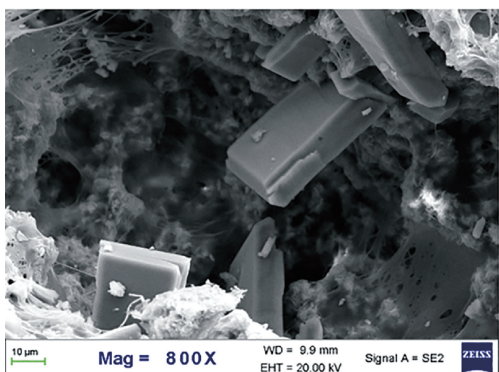
(a)石英(六方双锥形)



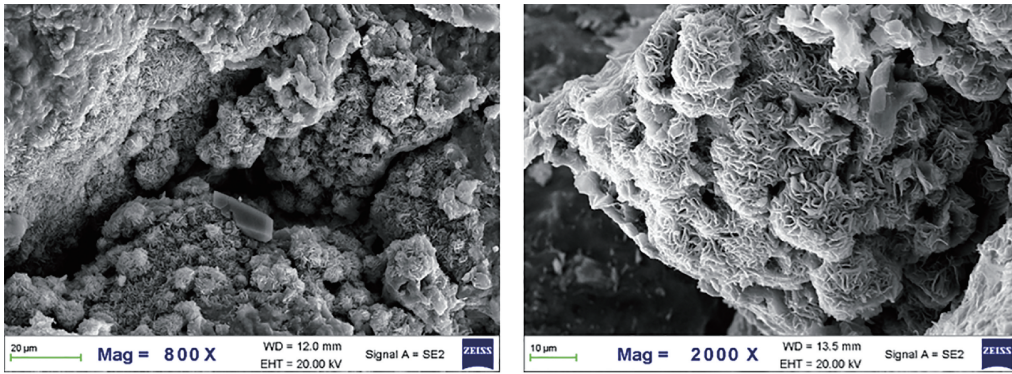
(b)长石(板状或柱状)



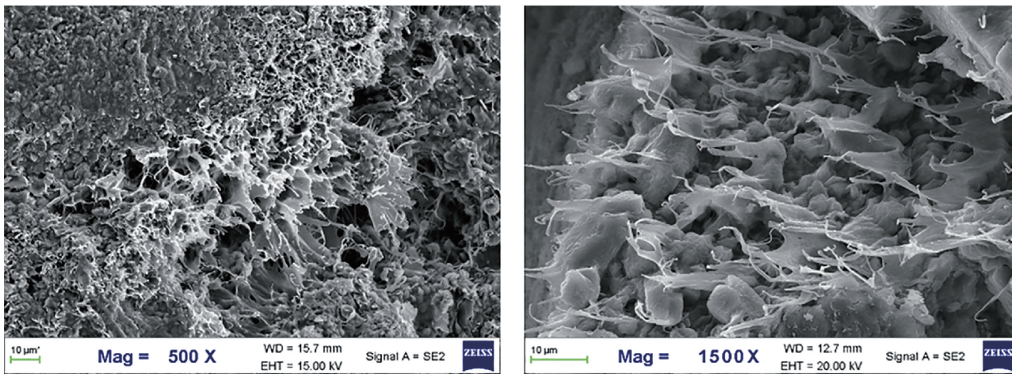
(c)方解石(菱形或柱状)



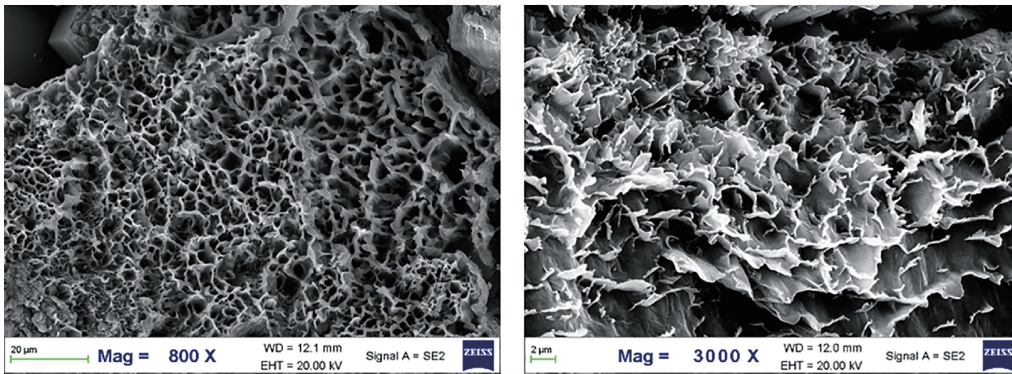
(d)白云石(立方体)



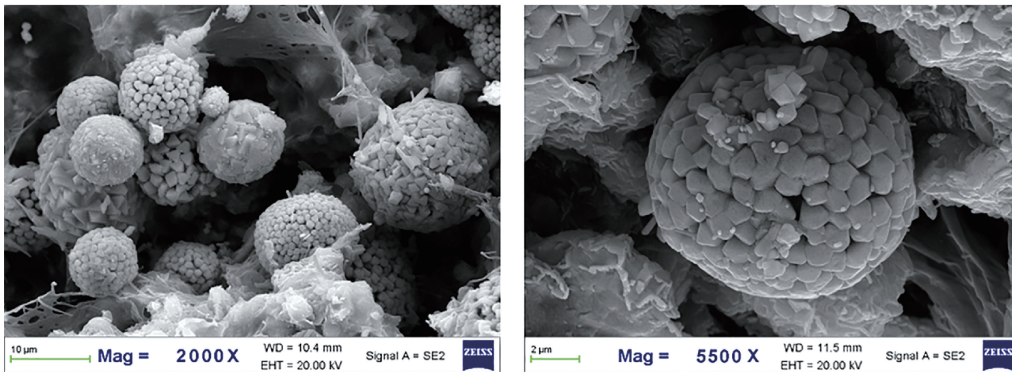
(e)绿泥石(针叶片状,集体呈球状,玫瑰花状)



(f)伊利石(丝缕状)



(g)伊蒙混层(蜂窝状)



(h)黄铁矿(八面体/五角十二面体集体呈球状)

图5 组成砂砾岩矿物不同倍数下微观形貌特征

Fig.5 Microscopic morphological characteristics of composed sandstone and conglomerate minerals at different times

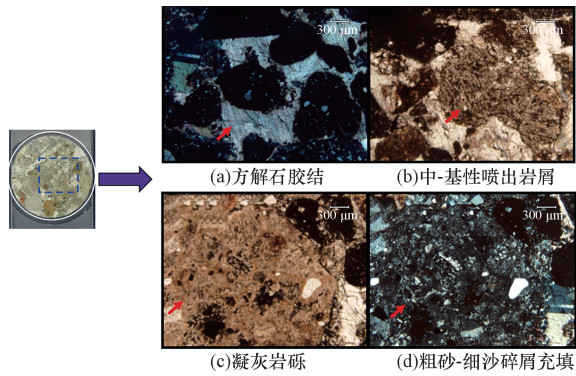


图6 致密砂砾岩薄片鉴定微观形貌分析

Fig. 6 Micro-morphologic analysis of dense conglomerate thin section identification

石填积→压实→长石蚀变→方解石胶结交代→有机质成熟,为后续探究 CO₂与砂砾岩矿物和水的相互作用关系提供基础数据和研究思路。

2.2 致密砂砾岩与 CO₂和水相互作用规律

2.2.1 致密砂砾岩与 CO₂和水作用效果分析

表5为致密砂砾岩岩心与 CO₂和地层水反应前后质量、渗透率和孔隙度值,对比反应前后结果可以得出 CO₂与致密砂砾岩和地层水反应后发生了明显的溶蚀现象,4块致密砂砾岩岩心质量均降低,孔隙度和渗透率均增大,其中质量损失最高为0.46 g,孔隙度和渗透率最大增幅为3.65%和87.36%(图7)。结果表明,在致密砂砾岩油藏中进行 CO₂吞吐提高原油采收率过程中,致密砂砾岩与 CO₂和地层水反应后能够增大储层孔隙度和渗透率,从而提高储层流体渗流能力,在助力油藏高效开发上具有积极作用。

使用高温高压三轴流变仪测定反应后致密砂砾岩岩心抗压强度(图8)。对比实验前后致密砂砾岩轴向应力,可知致密砂砾岩与 CO₂和地层水反应后抗压强度降低,降幅约为12.47%。岩石力学强度的降低对后续油藏压裂等增产改造更有利,但对 CO₂地质埋存在一定程度的潜在风险^[16-18]。

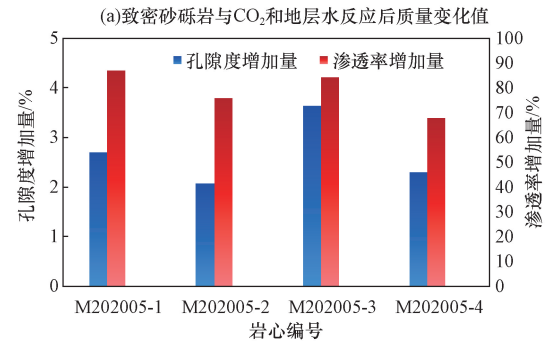
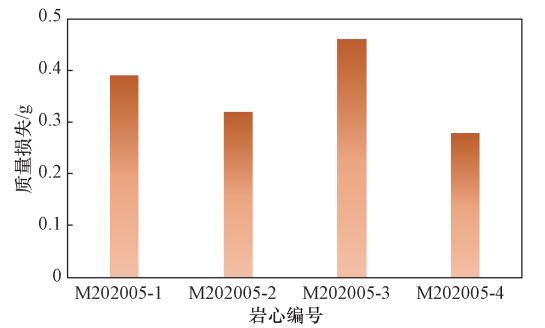
表5 致密砂砾岩岩心与 CO₂和水反应前后质量和孔隙度、渗透率

Table 5 Mass and porosity and permeability of dense gravel cores before and after reaction with CO₂ and water

岩心编号	质量/g		孔隙度/%		气测渗透率/mD	
	反应前	反应后	反应前	反应后	反应前	反应后
M202005-1	76.06	75.67	9.24	9.49	0.182	0.341
M202005-2	76.09	75.77	9.12	9.31	0.214	0.377
M202005-3	76.11	75.65	9.31	9.65	0.223	0.411
M202005-4	76.15	75.87	9.17	9.38	0.162	0.272

2.2.2 反应后致密砂砾岩微观形貌变化

图9为致密砂砾岩与 CO₂和地层水反应后不同倍数下表面微观形貌图,通过肉眼能够观察到岩石表



(a)致密砂砾岩与 CO₂和地层水反应后质量变化值

(b)CO₂与致密砂砾岩和地层水反应后孔隙度和渗透率增加量

图7 致密砂砾岩岩心与 CO₂和地层水反应后基本物性变化

Fig. 7 Changes in basic physical properties of dense gravel cores after reaction with CO₂ and formation water

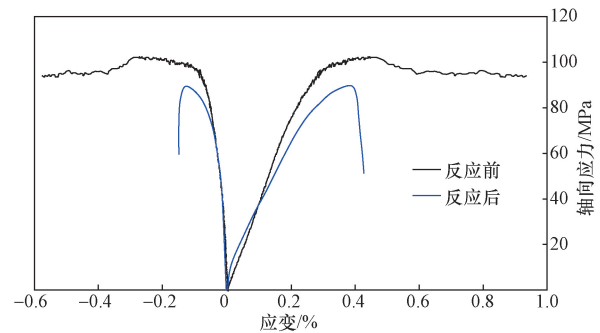


图8 致密砂砾岩岩心与 CO₂和地层水反应前后应力变化

Fig. 8 Stress changes in dense gravel cores before and after reaction with CO₂ and formation water

面出现细小针孔状溶蚀孔道,采用显微镜在低倍下观察并测量出最大溶蚀孔的孔径约为400 μm,深度50 μm,而致密砂砾岩储层孔径主要为纳米孔隙,因此微米溶蚀孔隙的形成,能够大大改善储层渗流能力。最后使用场发射电子显微镜逐渐增加放大倍数,观测到组成致密砂砾岩矿物中方解石、长石、伊蒙混层等表面发生明显溶蚀现象且随着反应程度的加深形成溶蚀孔,同时还发现生成了少量新的矿物高岭石,根据调研不同矿物与 CO₂和水反应方程式分析得出高岭石的形成主要为长石与 CO₂和水反应后形成的产物。

图10为致密砂砾岩薄片与 CO₂和地层水反应前

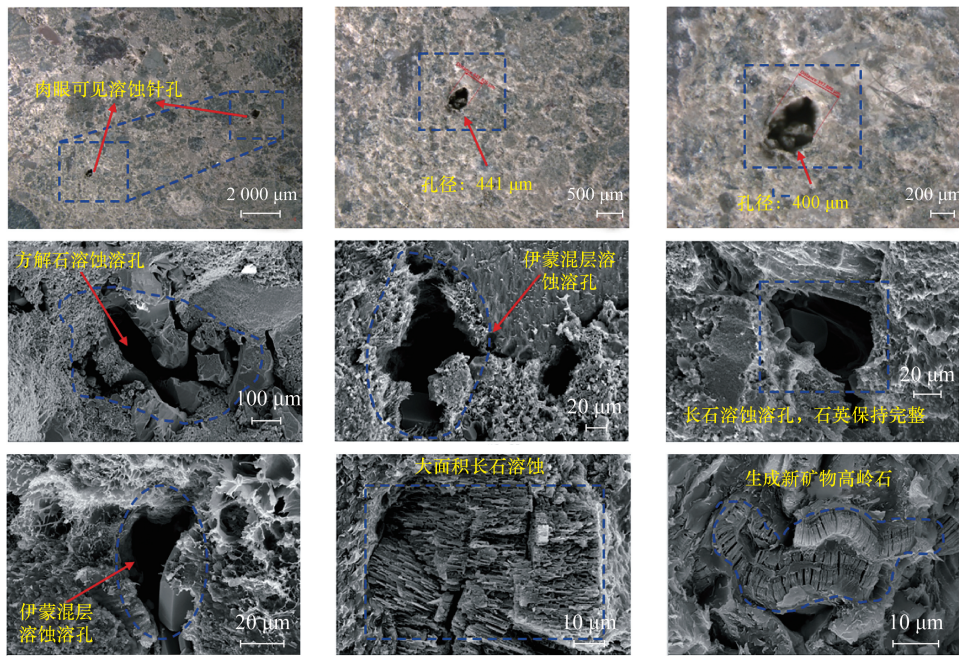


图9 不同倍数下致密砂砾岩与 CO₂ 和地层水反应后表面微观形貌图

Fig. 9 Surface micromorphology of dense sand conglomerate after reaction with CO₂ and formation water at different multiplicities

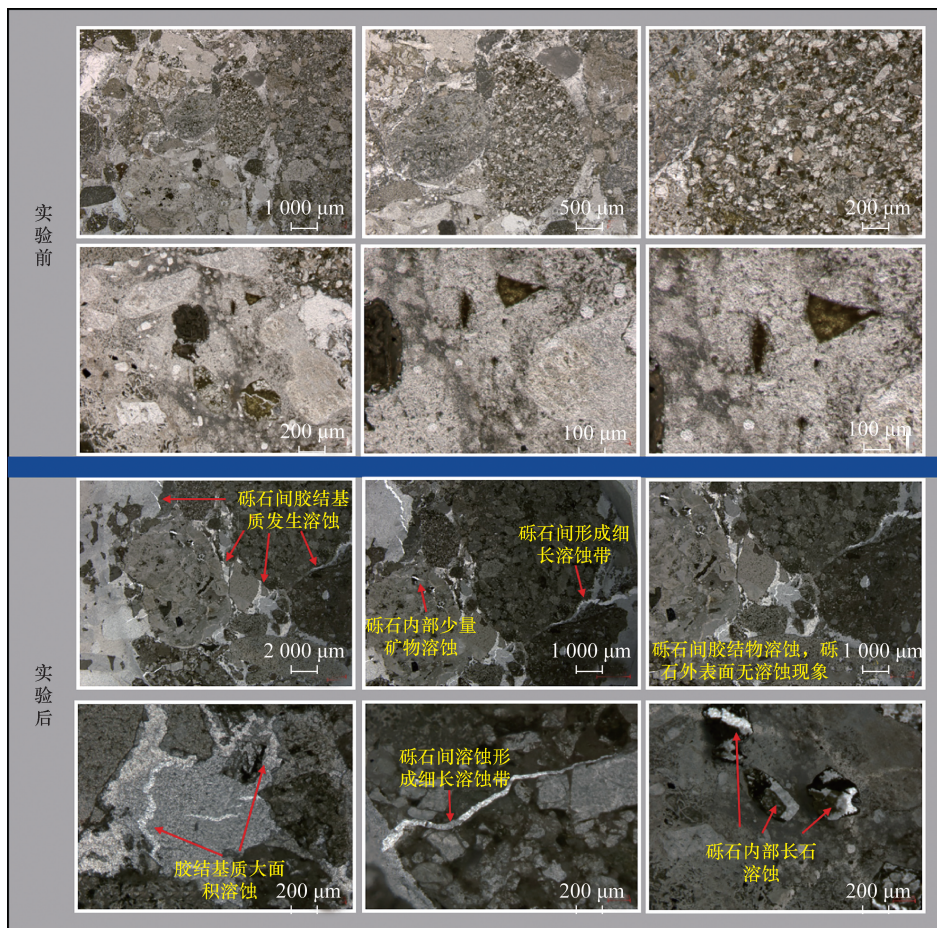


图10 致密砂砾岩薄片与 CO₂ 和地层水反应前后效果图

Fig. 10 Effect before and after reaction of dense gravel flake with CO₂ and formation water

后微观形貌图,对比反应前后薄片照片发现溶蚀地带主要集中在砾石与砾石间的胶结基质中,部分砾石内部极少量矿物的溶蚀现象,观测结果为长石发生溶解。薄片主要展示二维平面效果,但是在实际储层中砾石整体构造近似球体,根据薄片照片效果可以确定长石等矿物主要集中在砾石内部,由外圈矿物胶结包裹。因此在实际砂砾岩中,CO₂和地层水无法越过砾石外圈矿物,直接作用于内部可溶蚀的长石等矿物,所以在反应过程中致密砂砾岩中的砾石不会与CO₂和地层水发生化学变化,发生化学作用的主要为砾石与砾石间胶结的基质矿物方解石和长石等。

2.2.3 反应后地层水离子组成及岩石表明润湿性变化

对比反应前后各离子浓度(图 11),阳离子 Na⁺、K⁺、Ca²⁺ 增加较为明显且新出现了少量 Mg²⁺,阴离子 Cl⁻、HCO₃⁻ 增加较为明显,SO₄²⁻、CO₃²⁻ 无明显变化。结合不同矿物与 CO₂ 和水作用关系式及致密砂砾岩与 CO₂ 和地层水反应后矿物微观形貌变化结果分析认为:Na⁺、K⁺ 增加主要原因为致密砂砾岩中长石溶蚀,Ca²⁺ 增加为方解石溶蚀,新出现 Mg²⁺ 但含量较少是因为极少量黏土矿物伊利石和绿泥石发生反应生成,但在扫描电镜下未能观察到这两种矿物有明显溶蚀现象,证明伊利石和绿泥石在致密砂砾岩与 CO₂ 和地层水反应过程中几乎不参与反应。

测试反应前后岩石表面水相润湿接触角 CA 由 71.2°变为 63.8°(图 12),接触角变小,亲水性增强。主要原因为致密砂砾岩与 CO₂ 和水发生反应后岩石表面粗糙度增加,根据 Wenzel 公式可知,随着岩石表面粗糙度增加,流体润湿性增强,同时部分矿物溶解后会使亲水性较强的造岩矿物石英裸露在表面,且在这过程中还会生成新的亲水性较强的黏土矿物(高岭石)沉淀附着在岩石表面,两者共同导致岩石亲水性增强。主要变化机理如图 13 所示。Wenzel

公式为

$$\cos\theta_{\text{rough}} = \gamma \cos\theta_{\text{smooth}} \quad (1)$$

式(1)中:θ_{rough} 为实际接触角;θ_{smooth} 为理想表面接触角;γ 为粗糙度比(理想表面 γ = 1)。

2.2.4 认识与总结

为进一步描述致密砂砾岩与 CO₂ 和水相互作用过程及机理,以 CO₂ 与砂砾岩和地层水相互作用研究结果为基础,绘制出致密砂砾岩与 CO₂ 和水相互作用微观机理示意图(图 14)。总结 CO₂ 与砂砾岩和地层水主要作用过程为 CO₂ 首先进入砂砾岩孔隙内部与孔隙中地层水反应后生成碳酸,然后碳酸再与致密砂砾岩中砾石间胶结物长石、方解石发生较强的化学作用,使矿物发生溶解,在砾石与砾石间的孔隙形成“绕砾”现象,在这过程中长石溶解后伴

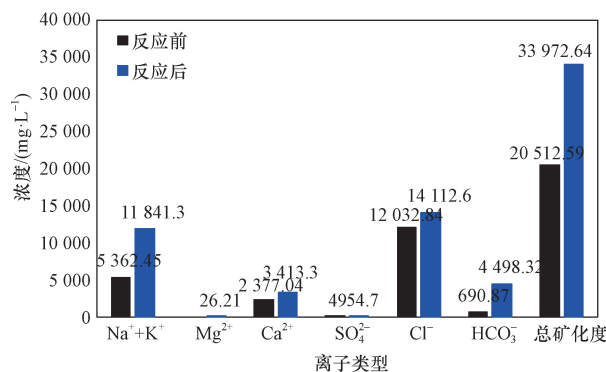


图 11 反应前后地层水离子浓度变化
Fig. 11 Changes in formation water ion concentration before and after reaction

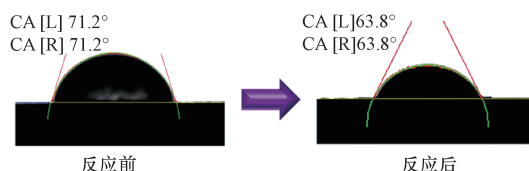


图 12 反应前后岩石表面水相润湿性变化
Fig. 12 Changes in water phase wettability of rock surface before and after reaction

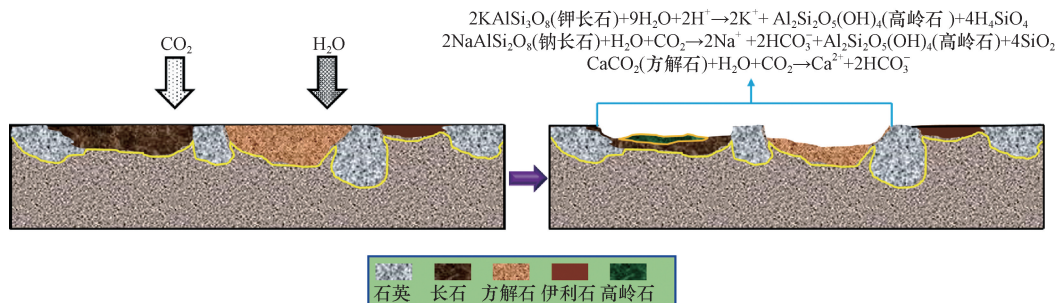
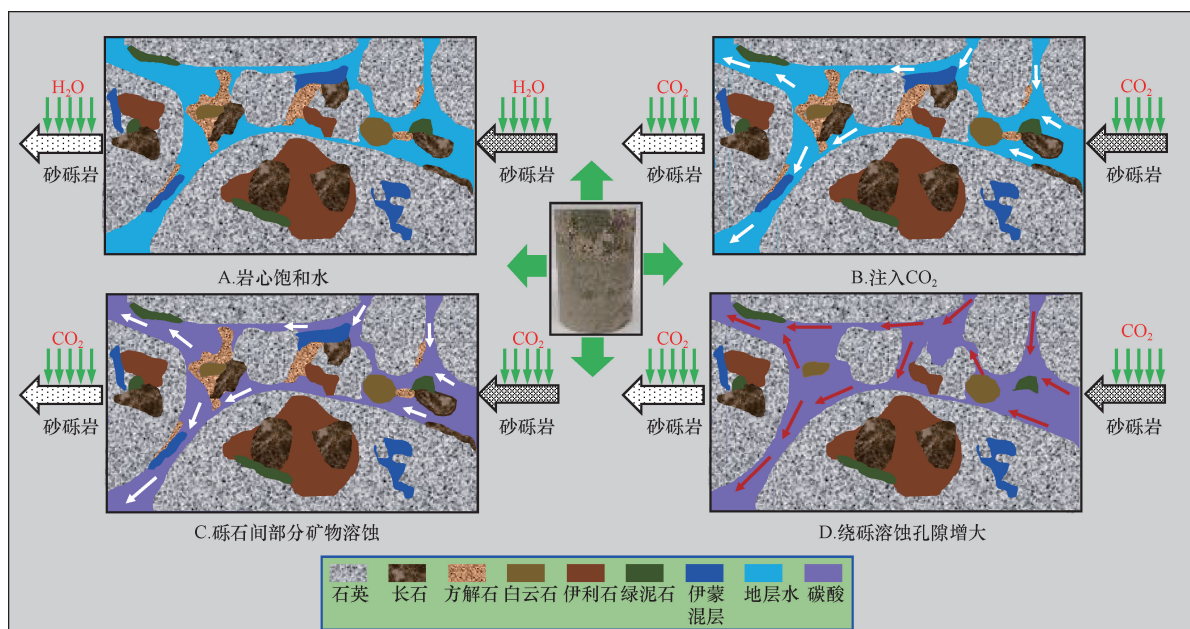


图 13 反应前后致密砂砾岩水相润湿接触角及变化过程机理示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the water-phase wetting contact angle and the mechanism of the change process in dense gravel rock before and after the reaction

图 14 致密砂砾岩与 CO₂ 和水相互作用微观机理示意图Fig. 14 Schematic diagram of the microscopic mechanism of dense gravel interaction with CO₂ and water

随着生成少量黏土矿物高岭石,但以溶蚀为主,沉淀为辅,最终使得岩石孔隙度和渗透率增加,流体的渗流能力变强。同时长石等矿物溶解后岩石表面粗糙度增加,且生成亲水性更强的高岭石,以及亲水矿物石英裸露在表面,共同导致岩石亲水性增大。

因此在致密砂砾岩油藏中,CO₂与矿物和地层水作用后对 CO₂吞吐提高原油采收率具有积极作用的主要机理包括以下两点:一是增大孔隙空间,提高流体渗流能力,二是改善岩石水相润湿性,提高油藏水相渗吸能力和原油流动能力,最终达到提高原油采收率的目的。

3 结论

通过开展致密砂砾岩与 CO₂ 和水相互作用实验,利用扫描电镜、离子色谱仪、接触角测试仪以及岩石高温高压三轴流变仪对反应前后岩石微观形貌、力学强度、润湿性以及地层水离子组成等进行了分析主要得到以下结论。

(1) 致密砂砾岩主要矿物组成为:石英(36.48%)、钾长石(9.81%)、斜长石(19.63%)、方解石(16.32%)、白云石(5.25%)和黏土矿物(12.51%)。其中砾石组成成分为石英(59.52%)、钾长石(9.47%)、斜长石(20.40%)和黏土矿物(10.61%),黏土矿物为伊利石(72.5%)、伊蒙混层(4.2%)、绿泥石(23.3%);胶结基质成分为石英(25.41%)、钾长石(11.01%)、斜长石(23.14%)和黏土矿物(15.80%),黏土矿物为伊利石(31.9%)、伊蒙

混层(28.5%)、绿泥石(39.6%)。

(2) 致密砂砾岩与 CO₂ 和地层水反应后,发生了明显的溶蚀现象,主要为砾石间胶结基质中长石和方解石剧烈溶蚀,形成孔径约为 400 μm,深度 50 μm 的溶蚀孔,使得岩心孔隙度和渗透率均增大,其中孔隙度和渗透率最大增量分别为 3.65% 和 87.36%。同时反应后岩石力学性质发生改变,轴向应力降低,降幅约为 12.47%,最终导致储层岩石抗压强度减弱,在 CO₂ 地质埋存中存在一定的潜在风险。

(3) 厘清致密砂砾岩与 CO₂ 和水作用关系,主要作用过程为 CO₂ 进入砂砾岩孔隙内部与孔隙中地层水反应后生成碳酸,碳酸再与致密砂砾岩中砾石间胶结物长石、方解石发生较强的“绕砾”溶蚀现象,同时会伴随少量黏土矿物高岭石生成,但主要以溶蚀为主,沉淀为辅,最终使岩石孔隙度和渗透率增加,储层流体渗流能力变强。

(4) 长石等矿物溶解后岩石表面粗糙度增加,亲水矿物石英裸露在表面,岩石亲水性增强。对 CO₂ 吞吐提高原油采收率具有积极作用的机理主要包括以下两点:①增大孔隙空间提高流体渗流能力;②改善岩石水相润湿性,提高油藏水相渗吸能力和原油流动能力,从而提高原油采收率。

参 考 文 献

- [1] 费繁旭,高阳,李映艳,等. 吉木萨尔页岩油藏人工裂缝渗透率变化规律[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8329-8335.
Fei Fanxu, Gao Yang, Li Yingyan, et al. Variation law of artificial fracture permeability in jimusar shale reservoir [J]. Science Tech

- nology and Engineering, 2021, 21(20): 8329-8335.
- [2] Wei B, Zhang X, Liu J, et al. Adsorptive behaviors of supercritical CO₂ in tight porous media and triggered chemical reactions with rock minerals during CO₂-EOR and-sequestration [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 381: 122577.
- [3] 田海龙. CO₂-咸水-岩相互作用对盖层封闭性影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
Tian Hailong. Impacts of CO₂-brine-rock interaction on the caprock sealing efficiency[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [4] Wang H, Alvarado V, Bagdonas D A, et al. Effect of CO₂-brine-rock reactions on pore architecture and permeability in dolostone; Implications for CO₂ storage and EOR [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 107: 103283.
- [5] 张阳阳. 地质封存条件下 CO₂ (SO₂)-水-矿物相互作用实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Zhang Yangyang. Experimental studies on CO₂ (SO₂)-saline-minerals interaction under geological storage condition [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.
- [6] 刘宁. 陆相沉积盆地砂岩储层 CO₂ 地质封存流体运移和水岩相互作用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
Liu Ning. Study on fluids transportation and water-rock interactions of CO₂ geological storage in sandstone reservoirs in continental sedimentary basins[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [7] 于志超, 杨思玉, 刘立, 等. 饱和 CO₂ 地层水驱过程中的水-岩相互作用实验[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 1032-1042.
Yu Zhichao, Yang Siyu, Liu Li, et al. An experimental study on water-rock interaction during water flooding in formations saturated with CO₂ [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 1032-1042.
- [8] 汤瑞佳, 黄春霞, 余华贵, 等. 延长油田 CO₂-岩石-地层水相互作用规律[J]. 油田化学, 2015, 32(4): 515-519.
Tang Ruijia, Huang Chunxia, Yu Huagui, et al. An experimental study on water-rock interaction during water flooding in formations saturated with CO₂ [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 32(4): 515-519.
- [9] 曹冲, 张京伦, 朱鸿昊, 等. CO₂-岩石-地层水相互作用实验[J]. 成都工业学院学报, 2016, 19(4): 3-8.
Cao Chong, Zhang Jinglun, Zhu Honghai, et al. CO₂ rock formation water interaction experiment [J]. Journal of Chengdu Institute of Technology, 2016, 19(4): 3-8.
- [10] 肖娜, 李实, 林梅钦. CO₂-水-岩石相互作用对岩石孔渗参数及孔隙结构的影响——以延长油田 35-3 井储层为例[J]. 油田化学, 2018, 35(1): 85-90.
Xiao Na, Li Shi, Lin Meiqin. Effect of CO₂-water-rock interaction on porosity, permeability and pore structure characters of reservoir rock: a case study of 35-3 Well in Yanchang Oilfield [J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(1): 85-90.
- [11] Niu Q, Wang Q, Wang W, et al. Responses of multi-scale microstructures, physical mechanical and hydraulic characteristics of roof rocks caused by the supercritical CO₂-water-rock reaction [J]. Energy, 2022, 238: 121727.
- [12] 吕利刚, 张涛, 李杰, 等. 储层矿物类型对致密油藏 CO₂ 驱替效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(2): 1-10.
Lü Ligang, Zhang Tao, Li Jie, et al. Influence of reservoir mineral types on CO₂ displacement effect of tight reservoir [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(2): 1-10.
- [13] Famoori F, Azin R, Osfouri S, et al. Experimental investigation of the geochemical and mineralogical interaction between CO₂ and carbonate; evaluation of CO₂ sequestration in dolomite-calcite formations [J]. Energy and Climate Change, 2021, 2: 100029.
- [14] Lu J, Kharaka Y K, Thordsen J J, et al. CO₂-rock-brine interactions in Lower Tuscaloosa Formation at Cranfield CO₂ sequestration site, Mississippi, USA [J]. Chemical Geology, 2012, 291: 269-277.
- [15] Gray F, Anabaraonye B U, Crawshaw J P, et al. Pore-scale dissolution mechanisms in calcite-CO₂-brine systems; the impact of non-linear reaction kinetics and coupled ion transport [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 305: 323-338.
- [16] Wang K, Xu T, Wang F, et al. Experimental study of CO₂-brine-rock interaction during CO₂ sequestration in deep coal seams [J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 154: 265-274.
- [17] Saedi A, Delle P C, Esteban L, et al. Flood characteristic and fluid rock interactions of a supercritical CO₂, brine, rock system: South West Hub, Western Australia [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 54: 309-321.
- [18] 李爱芬, 陈明强, 宋浩鹏, 等. 焖井时间对 CO₂ 吞吐开发低渗油藏影响机理研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7): 173-176.
Li Aifen, Chen Mingqiang, Song Haopeng. Mechanism study on soak time for the efficiency of CO₂ huff and puff in developing low permeability reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(7): 173-176.