

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

曹中宏^{1,2}, 刘国勇², 张红臣², 曲希玉³, 张满利³, 师政³

(1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 中国石油冀东油田公司, 河北唐山 063004;
3. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580)

摘要:通过模拟埋藏条件下碳酸盐岩与乙酸的溶解环境对南堡凹陷及周边 7 个古生界碳酸盐岩典型样品进行研究。结果表明:在相同流速不同温压下,碳酸盐岩的溶解速率随温压的升高而增大;在温压较低的环境中,白云石的溶解速率低于方解石,随温压的升高白云岩逐渐变得比灰岩更易溶解,而对于含有白云石的灰岩来说,其白云石含量(白云岩化程度)越高则其溶解速率越大;在相同压力不同温度和流速下,马家沟组灰岩的溶解速率随温度升高而“先增后减”,在 200~250 ℃ 时达到最大;白云岩及灰质白云岩等富含白云石的碳酸盐岩更有利于溶蚀空间及潜山内幕优质储层的形成。

关键词:碳酸盐岩; 溶解试验; 埋藏条件; 南堡凹陷; 优质储层

中图分类号:TE 122.21 **文献标志码:**A

Experimental research of carbonate rocks dissolution characteristics in Paleozoic group of Nanpu sag and surrounding bulge areas

CAO Zhong-hong^{1,2}, LIU Guo-yong², ZHANG Hong-chen², QU Xi-yu³, ZHANG Man-li³, SHI Zheng³

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063004, China;
3. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: To study the dissolution characteristics of samples in the burial conditions, a series of experiments were conducted to analyze seven Paleozoic carbonate rock samples collected from Nanpu sag and its surrounding areas, and their associated acetic acid conditions. The results show that the carbonate dissolution rate increases with the temperature and pressure increasing under the same flow rate. In the cases of lower temperature and pressure, the dissolution rate of dolomite is less than that of calcite. With temperature and pressure increasing, dolomite becomes easier to dissolve than limestone. For dolomite bearing limestone, the more dolomite content (or the dolomitization degree), the higher dissolution rate. Under the condition of the same pressure but different temperature and flow rate, the dissolution rate of limestone in the Majiagou formation increases with temperature from 200–250 ℃, reaches its maximum at about 250 ℃, and then decreases with temperature increasing when it is higher than 250 ℃. Combining with the analysis of buried hill reservoir in outcrop observation and physical property data, we conclude that compared with limestone, dolomite, dolomitic carbonate and lime dolomite are more conducive to form dissolution space and high-quality reservoir inner buried hill.

Key words: carbonate rock; dissolution experiment; buried condition; Nanpu sag; high-quality reservoir

自第一个中上元古界海相碳酸盐岩古潜山高产大油田(任丘潜山油田)发现以后,中国便掀起了寻找古潜山油气藏的热潮,古潜山油气藏探明储量所

占的比例也越来越大。古潜山油气藏的储层岩性主要为灰岩和白云岩;储集空间主要为次生孔隙和裂缝的双介质系统^[1],其中埋藏成岩环境的溶蚀作用

对碳酸盐岩储层孔隙的形成和增大具有重要意义,可形成高孔渗油气储层^[2],埋藏溶蚀作用的类型包括有机酸溶蚀作用、热液溶蚀作用^[3]和 CO₂、H₂S 溶蚀作用^[4]。目前,对于碳酸盐岩组分的溶解行为的差异性认识尚不清楚,其差异性对于优质储层的形成,特别是潜山内幕优质储层的形成具有至关重要的作用。因此,笔者依据碳酸盐岩与乙酸的溶解动力学原理,模拟埋藏条件下的温压条件,对南堡凹陷

表 1 试验样品及其矿物成分

Table 1 Experimental samples and their mineral composition

样品编号	地层	岩性	各化学成分质量分数 <i>w</i> /%							
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Mn
L1	马家沟组	粒泥灰岩	2.88	0.43	0.28	0.41	52.02	<0.05	0.26	0.012 0
L2	马家沟组	生屑灰岩*	2.70	0.74	0.09	3.70	46.64	<0.05	0.24	0.005 6
L3	冶里组	竹叶状灰岩	4.63	1.34	0.56	0.99	50.69	<0.05	0.55	0.022 2
L4	张夏组	砂屑灰岩*	11.35	1.73	3.01	1.28	43.92	0.05	1.04	0.090 9
L5	张夏组	鲕粒灰岩	3.13	1.03	1.34	1.79	48.90	<0.05	0.18	0.050 2
D1	凤山组	细晶白云岩	0.97	0.59	0.14	22.27	30.02	0.06	0.02	0.016 4
D2	府君山组	白云岩	0.59	0.56	0.16	22.42	30.08	0.07	0.04	0.015 0

注:带*的为岩心样品,L2 样品取自 N6 井 2.109 km,L4 样品取自 T20×1 井 1.789 7 km。

试验前,把样品制成不同粒径的粉末样和柱体样。用铁研钵将试验所需样品粉碎成粉末样(250~420 μm);柱体样长、宽、高分别为 1.5、0.6 和 0.6 cm,观测面用石英砂抛光。以上样品超声清洗约 30 min 后放入烘箱,于 90 ℃下烘烤 24 h,封好备用。

1.1.2 流体介质

乙酸是埋藏过程油田水中最常见的有机酸,试验选用乙酸作为流体介质模拟埋藏条件下有机酸对碳酸盐岩的溶蚀作用。乙酸的初始物质的量浓度为 1.78×10⁻⁴ mol/L,25 ℃时的 pH 值为 4.40^[5]。

1.2 试验方法及流程

研究中采用流动式(静态 pH 法)方法进行试验,该方法于反应开始前,按照一定的固液比将溶液和固体样品置于反应器内;而后随着反应的进行,不断改变溶液体积或者化学组分维持溶液体系 H⁺ 物质的量浓度稳定,以保持反应体系状态稳定。由于实现 pH 值稳定的常用方法是借助压力泵,以一定的速率将初始溶液泵入反应釜内,故又称流动式试验。试验中共设计了 2 个系列的流动式试验。

第一个试验是在相同流速(*v*=4 mL/min),不同温度和压力条件下进行,主要模拟埋藏条件下不同碳酸盐岩的溶解动力学特征。温压条件依据南堡凹陷的地温梯度 3.5 ℃/100 m^[6-7]和静水压力梯度 10 MPa/km 设定,试验的具体温、压参数见表 2。试验样品为南堡凹陷的 7 个岩心样品,样品编号分别为

下古生界碳酸盐岩样品进行研究。

1 溶解试验

1.1 试验材料

1.1.1 试验样品

研究过程中,选择南堡凹陷及其邻区古生界五个地层的 7 个典型碳酸盐岩样品进行溶解试验,样品的编号、层位、岩性和化学成分见表 1。

L1~L5、D1 和 D2。

试验过程中,称取 2.0 g 粉末样品置于反应釜中,用物质的量浓度为 1.78×10⁻⁴ mol/L 的乙酸作为流体介质,调节温度和压力,待反应体系稳定后,监测输出溶液电导的变化,当输出溶液电导恒定时,连续采集 3 个输出溶液样品各 5 mL,加酸稀释后送原子吸收(PE Aanalyst 100)分析溶液中 Ca 和 Mg 元素含量,误差小于 5%。

表 2 相同流速下流动式试验温压参数

Table 2 Parameters of temperature and pressure in dynamic experiment under same velocity

温度 <i>T</i> /℃	压力 <i>p</i> /MPa	对应深度 <i>H</i> /km
75	21	2.1
105	30	3.0
125	36	3.6
140	40	4.0
175	50	5.0

第二个试验是在相同压力(*p*=30 MPa)、不同温度和流速条件下进行的,在第一个试验的基础上进一步研究随着埋藏深度的增大,环境温度的升高对碳酸盐岩溶解速率的影响。试验中,设定的温度和流速见表 3,样品为南堡凹陷奥陶系马家沟组灰岩,样品编号为 L1。

试验过程中,取 3 个处理好的 L1 柱体样(长宽高约为 1.5 cm×0.6 cm×0.6 cm,表面积为 14.675 cm²)放入反应釜中,于 75 ℃下在乙酸介质中预处

理 30 min,然后调节温度和流速,待体系稳定后,监测输出溶液电导的变化。当输出溶液电导恒定时,连续采集 3 个输出溶液样品各 12 mL,其中 7 mL 溶液监测电导率变化,5 mL 加酸稀释后送原子吸收分析溶液中 Ca 元素含量,分析误差小于 5%。

表 3 相同压力下流动式试验温速参数

Table 3 Parameters of temperature and velocity in dynamic experiment under same pressure						
温度 $T/^{\circ}\text{C}$		流速 $v/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$				
50	4	3	2	1	0.5	0.2
100	4	3	2	1	0.5	0.2
150	4	3	2	1	0.5	0.2
200	4	3	2	1	0.5	0.2
250	4	3	2	1	0.5	0.2
300	4	3	2	1	0.5	0.2

2 结果与讨论

2.1 埋藏条件下不同岩性碳酸盐岩的溶解特征

2.1.1 不同岩性碳酸盐岩的溶解特征

通过相同流速不同温度和压力条件下各样品的溶解试验,对比不同岩性碳酸盐岩的溶蚀特征。结果表明,溶液中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度 $C_{\text{Ca+Mg}}$ 总体具有随温压的升高而变大的趋势(图 1)。在溶解试验开始时, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度之和的相对大小为:冶里组竹叶状灰岩(L3)>马家沟组生屑灰岩(L2)>府君山组白云岩(D2)>张夏组鲕粒灰岩(L5)、凤山组白云岩(D1)>张夏组砂屑灰岩(L4)>马家沟组泥粒灰岩(L1);随试验温度升高,冶里组竹叶状灰岩(L3)、马家沟组生屑灰岩(L2)、凤山组白云岩(D1)、张夏组砂屑灰岩(L4)和马家沟组泥粒灰岩(L1)的 $C_{\text{Ca+Mg}}$ 随温压升高变化趋势一致,而张夏组鲕粒灰岩(L5)和府君山组白云岩(D2) Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度之和不仅总体呈现升高的趋势,而且升高的速度明显大于其他样品,温压至 175 $^{\circ}\text{C}$ 、50 MPa 时,其大小次序已变为 $\text{L5}>\text{L3}>\text{L2}>\text{D1}>\text{L4}>\text{D2}>\text{L1}$ 。

试验结果显示,张夏组鲕粒灰岩(L5)溶蚀导致溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度随温压变化较为显著:75 $^{\circ}\text{C}$ 、21 MPa 时,溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度之和与凤山组白云岩(D1)相近,随温度升高,两者的差异性变得越来越明显,至温压为 175 $^{\circ}\text{C}$ 、50 MPa 时,其物质的量浓度为所有岩性样品的最高;府君山组白云岩(D2)溶蚀导致溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度在 75 $^{\circ}\text{C}$ 、21 MPa 至 125 $^{\circ}\text{C}$ 、36 MPa 时随温压变化较小,而当温压大于 140 $^{\circ}\text{C}$ 、40

MPa 时,其物质的量浓度迅速增大,至 175 $^{\circ}\text{C}$ 、50 MPa 时,其物质的量浓度超过马家沟组泥粒灰岩(L1)。

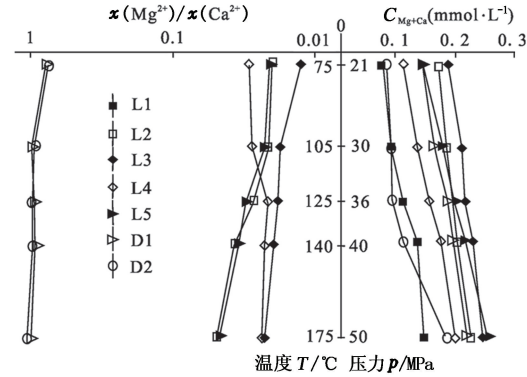


图 1 相同流速不同温压下反应液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 物质的量浓度变化

Fig. 1 Concentration change of Ca^{2+} and Mg^{2+} in reaction solution under same velocity and different temperature and pressure

试验结果显示,反应液中的 $x(\text{Mg}^{2+})/x(\text{Ca}^{2+})$ 除个别样品外均随温压升高而增大(图 1),其中白云岩(D1,D2)的 $x(\text{Mg}^{2+})/x(\text{Ca}^{2+})$ 值为 0.7~1.0,灰岩(L1~L5)的 $x(\text{Mg}^{2+})/x(\text{Ca}^{2+})$ 值为 0.02~0.05,造成这个结果的主要原因有研究者称之为不一致溶解^[8],即在岩石表面形成了一个 MgCO_3 的相对富集层,随着温压的升高, MgCO_3 溶解加快,会使 $x(\text{Mg}^{2+})/x(\text{Ca}^{2+})$ 升高。本文研究认为,其原因是灰岩(具有一定的白云岩化)和白云岩中的白云石组分随温度升高溶解速度加快的结果。很明显,白云石的溶解速率高于石灰岩,由表 1 可知,样品 L2 和 L5 中 MgO 含量显著高于其他样品,且 L2 和 L5 相比,正是前者的 MgO 含量也高于后者,导致温度升高时 L2 的溶解速率增加的速度高于 L5。

2.1.2 碳酸盐岩溶解速率差异的原因

矿物的溶解速率可采用反应溶液中离子物质的量浓度的时间变化来表征^[9],在连续流动反应系统的条件下,溶解速率可以由下式计算^[10-11]:

$$R = \frac{V}{A} \frac{dc}{dt} = \frac{V}{A} \frac{dc}{d(V/v)} = \frac{1}{A} \frac{dC_{\text{Ca+Mg}}}{d(1/v)} \quad (1)$$

式中, R 为溶解速率, $\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为反应时间, s; A 为固相矿物表面积, cm^2 ; V 为反应液的体积, L; v 为流速, L/s; $C_{\text{Ca+Mg}}$ 为反应液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 物质的量浓度之和, mol/L 。

根据公式(1)计算相同流速不同温压条件下各样品的溶解速率,各碳酸盐岩样品的溶解速率随温压升高而增大,其趋势与不同温压下反应液中 Ca^{2+}

和 Mg^{2+} 物质的量浓度之和变化趋势(图 1) 完全一致,以下有关溶解速率的论述均参照该图。试验开始时溶解速率最快的样品为冶里组竹叶状灰岩(L3)和 马家沟组生屑灰岩(L2),其次为凤山组细晶白云岩(D1)、张夏组鲕粒灰岩(L5)和张夏组砂屑灰岩(L4),溶解速率最慢的为马家沟组粒泥灰岩(L1)。随温压的升高,张夏组鲕粒灰岩(L5)和府君山组白云岩(D2)溶解速率增加的速度总体比上述 5 个样品显著,特别是高于 140 ℃、40 MPa 时,其溶解速率快速增加。

引起碳酸盐岩溶解差异的因素主要有岩性、化学组成、温压、流体介质性质等。纯灰岩(方解石含量大于 98%)的溶解速率随温度升高而增大,但高于 200 ℃ 时,其溶解速率有降低趋势^[10,12]。在其他条件一定的情况下,碳酸盐岩的溶解速率还取决于样品的结构和溶液组分,结构复杂的生物成因碳酸盐岩溶解要快,且溶解速率与反应物颗粒半径的倒数成正比^[13-15]。在相对深埋藏的温压条件下,白云石的溶解速率大于方解石的^[11,16]。

本次试验表明,随温压的升高,白云岩具有比灰岩更易溶的趋势(图 1),说明岩性是影响碳酸盐岩溶解差异的最主要因素。除此之外,碳酸盐岩样品的成分、结构及构造也是影响溶解速率的重要因素^[17]。对于结构复杂的碳酸盐岩,特别是生物成因碳酸盐岩,复杂的微观结构是影响碳酸盐岩溶解的基本因素^[14],但并不是决定因素。本次试验选取的南堡凹陷地区典型碳酸盐岩样品即具有复杂的结构,如试验中最容易溶解的样品 L3、L2 和 L5 分别为冶里组竹叶状灰岩、马家沟组生屑灰岩和张夏组鲕粒灰岩,3 个样品结构都比较复杂。以张夏组鲕粒灰岩(L5)为例,不仅基质为容易溶解的亮晶胶结,而且岩石发育丰富的微裂隙、晶间孔和晶内孔,极大地增加了反应面积,但是其在较低的温压条件下溶解速率仍然低于 L3,因为后者的方解石组分含量高于前者,随着温度升高前者(L5)的溶解速率大于后者(L3),也是这个因素作用的结果。对于最不易溶解的府君山组白云岩,由于其晶体相对致密,在较低的温压下其溶解速率在本次研究的样品中最低,但在高于 140 ℃ 时,其溶解速率出现快速升高的趋势(图 1)。

2.2 温度对溶解速率的影响

本次研究还选择马家沟组粒泥灰岩(L1)柱状样,在相同压力($p = 30\text{ MPa}$)不同温度和流速条件下进行了溶解试验。结果显示,不同流速下反应液

中 Ca^{2+} 物质的量浓度均随温度升高而先增后减;且流速越小, Ca^{2+} 物质的量浓度越高(图 2)。当温度在 50 ~ 150 ℃ 时, Ca^{2+} 物质的量浓度逐渐增大,当温度为 150 ~ 250 ℃ 时, Ca^{2+} 物质的量浓度达到最大,之后 Ca^{2+} 物质的量浓度开始减小。

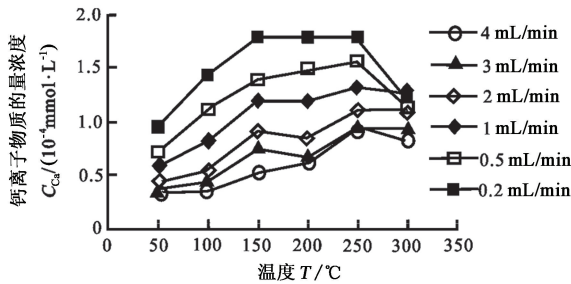


图 2 相同压力不同流速下 Ca^{2+} 物质的量浓度随温度变化

Fig.2 Ca^{2+} concentration changes with temperature under different velocity and same pressure

根据公式(1)和相关参数,计算了马家沟组灰岩(L1)的溶解速率,结果显示,流速越大,溶解越快;随温度升高,溶解速率也是先逐渐增大后减小(图 3)。虽然各流速下溶解速率略有不同,但溶解速率最大的温度均在 200 ~ 250 ℃。如果给定某一流速,温度由 50 ℃ 升高到 250 ℃ 的过程中,溶解速率 R 也是逐渐增大的,温度为 250 ℃ 时,溶解速率达到最大,之后随温度升高而开始减小。

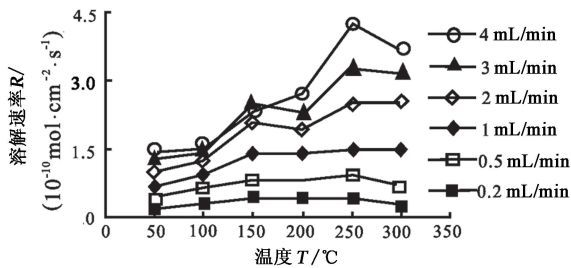


图 3 相同压力不同流速下溶解速率随温度变化

Fig.3 Dissolution rate changes with temperature under different velocity and same pressure

3 不同岩性对潜山内幕储层控制作用的探讨

通过对山东省新泰市古潜山碳酸盐岩野外露头的观察,发现碳酸盐岩的岩溶作用主要受岩性、断层和节理的控制:白云岩比灰岩更容易被溶蚀;断层和节理发育区的溶蚀作用强,且构造低部位更容易被溶蚀。如新泰市北部西西周村水库南山采石场的碳酸盐岩溶蚀现象,露头处可见深灰色石灰岩与灰白色白云岩互层,其接触界限清楚(图 4(a)),界限之

下的白云岩溶蚀坑、洞发育,而界面之上的石灰岩未见明显溶蚀;另一处露头也可见白云岩溶洞,该溶洞沿节理面发育,向两侧溶蚀程度减弱(图4(b))。

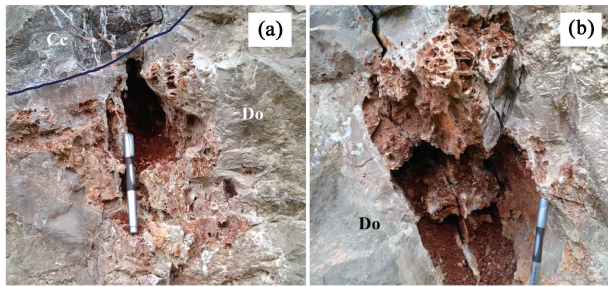


图4 新泰市北部西西周水库南山采石场白云岩溶洞

Fig.4 Dolomite caves of Nan Mountain at Xi xi-zhou reservoir in the north of Xintai city

对南堡凹陷古潜山不同层位物性数据的统计分析,发现白云岩和灰质白云岩的孔隙度、渗透率明显好于灰岩和白云质灰岩。灰岩和白云质灰岩的孔隙度主要集中小于2%,现有数据的81%在这个范围之内,且随着孔隙度的增加,其孔隙度所占比例迅速减少,孔隙度最大值仅为6.4%;而白云岩和灰质白云岩随孔隙度的增加,其所占比例逐渐增多,说明在埋藏条件下,白云岩与弱酸反应的溶解反应速度增加的幅度大于石灰岩^[18],白云岩和灰质白云岩的孔隙度主要分布在4%~10%,现有数据的53%在这个范围之内,孔隙度最大值达到24.5%(图5)。

综合试验研究、凹陷物性数据及周边凸起区的野外观察,发现岩性差异是控制潜山内幕优质储层的主要因素,在深埋条件下白云岩化程度越高,碳酸盐岩的溶蚀和溶解作用越容易进行,即白云岩及灰质白云岩等含白云石的碳酸盐岩更有利于溶蚀空间及潜山内幕优质储层的形成。

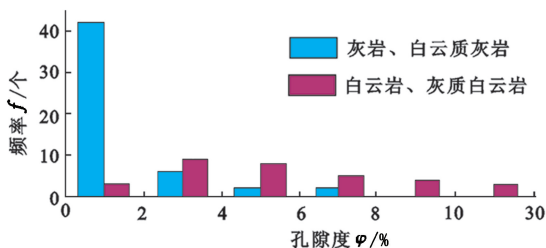


图5 南堡凹陷古潜山不同岩性储层物性分布

Fig.5 Physical property distribution of different lithology reservoir of buried hill in Nanpu sag

4 结 论

(1)在相同流速不同温压条件下,碳酸盐岩样品的溶解速率随温度和压力的升高而增大。温度较

低(小于90℃)时溶解速率较快的为冶里组竹叶状灰岩和马家沟组生屑灰岩,其次为凤山组细晶白云岩和张夏组砂屑灰岩,溶解速率最慢的为马家沟组粒泥灰岩。张夏组的鲕粒灰岩和府君山组的白云岩溶解速率随温压变化更为显著,特别是大于140℃、40 MPa时,其溶解速率快速增大。

(2)温压较低时白云石的溶解速率小于方解石的,随埋深的增加和温压的增大,白云石逐渐变得比方解石更易溶解而形成次生孔隙。对于石灰岩而言,白云岩化程度越高则其溶解速率越大。

(3)在相同压力不同温度和流速条件下,马家沟组灰岩反应液中 Ca^{2+} 物质的量浓度均随温度升高而先增后减,且流速越小, Ca^{2+} 物质的量浓度越高;灰岩的溶解速率同样是随温度升高而先增后减,在200~250℃时达到最大。

(4)岩性差异是控制潜山内幕优质储层的主要因素,白云岩及灰质白云岩等富含白云石的碳酸盐岩更有利于溶蚀空间及潜山内幕储层的形成。

参考文献:

- [1] 李军,刘丽峰,赵玉合,等.古潜山油气藏研究综述[J].地球物理学研究进展,2006,21(3):879-887.
LI Jun, LIU Li-feng, ZHAO Yu-he, et al. A review of study on ancient buried hill reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 879-887.
- [2] 蒋小琼,王恕一,范明,等.埋藏成岩环境碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J].石油实验地质,2008,30(6):643-646.
JIANG Xiao-qiong, WANG Shu-yi, FAN Ming, et al. Study of simulation experiment for carbonate rocks dissolution in burial diagenetic environment[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 643-646.
- [3] 胡明毅,蔡习尧,胡忠贵,等.塔中地区奥陶系碳酸盐岩深部埋藏溶蚀作用研究[J].石油天然气学报,2009,31(6):49-54.
HU Ming-yi, CAI Xi-yao, HU Zhong-gui, et al. Deep buried dissolution of ordovician carbonates in Tazhong area of Tarim Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(6): 49-54.
- [4] 马红强,王恕一,雍洪,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩埋藏溶蚀特征[J].石油实验地质,2010,32(5):434-441.
MA Hong-qiang, WANG Shu-yi, YONG Hong, et al. Burial karst characteristics of ordovician carbonate reservoirs in central Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(5): 434-441.

- [5] 张天付,鲍征宇,张旭,等. 南堡凹陷下古生界碳酸盐岩储层溶解动力学的试验模拟[J]. 石油天然气学报, 2010,32(6):208-212.
ZHANG Tian-fu, BAO Zheng-yu, ZHANG Xu, et al. Experimental stimulation of dissolution kinetics for carbonate reservoir of paleozoic in Nanpu sag[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010,32(6):208-212.
- [6] 肖卫勇,王良书,李华,等. 渤海盆地地温场研究[J]. 中国海上油气:地质,2001,15(2):105-110.
XIAO Wei-yong, WANG Liang-shu, LI Hua, et al. Geotemperature field in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001,15(2):105-110.
- [7] 林世辉,龚育龄. 冀中坳陷现今地温场分布特征[J]. 华东理工学院学报,2005,28(4):359-364.
LIN Shi-hui, GONG Yu-ling. Distribution characteristics of geotemperature field in Jizhong depression, North China [J]. Journal of East China Institute of Technology, 2005,28(4):359-364.
- [8] 於崇文,岑况,鲍征宇. 热液成矿作用动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1993.
- [9] EIHENLOHR L, METEVA K, GABROVSEK F, et al. The inhibiting action of intrinsic impurities in natural calcium carbonate minerals to their dissolution kinetics in aqueous H_2O-CO_2 solutions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999,63(7/8):989-1002.
- [10] GONG Q, DENG J, YANG L, et al. Limestone dissolution rates in 0.6M NaCl solution at 50 °C to 300 °C at 25 MPa [J]. Water-Rock Interaction-Bullen & Wang, 2007,1:325-329.
- [11] CUI Z, BAO Z, ZHANG T, et al. The kinetics of dissolution of various mineralogical composition of carbonate rock under burial condition [J]. Water-Rock Interaction-Bullen & Wang, 2007,1:293-296.
- [12] 张荣华,胡书敏,HELLMANN R,等. 矿物在热液内化学动力学和物质迁移[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [13] WALTER L M, MORSE J W. Reactive surface area of skeletal carbonates during dissolution: effect of grain size [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1984,54:1081-1090.
- [14] WALTER L M, MORSE J W. The dissolution kinetics of shallow marine carbonates in seawater: a laboratory study [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985,49:503-513.
- [15] CUBILLAS P, KOHLER S, PRIETO M, et al. Experimental determination of the dissolution rates of calcite, aragonite, and bivalves [J]. Chemical Geology, 2005,20(16):59-77.
- [16] 杨俊杰,黄思静,张文正,等. 表生和埋藏成岩作用的温压条件下不同组分碳酸盐岩溶蚀成岩过程的实验模拟[J]. 沉积学报,1995,13(4):49-54.
YANG Jun-jie, HUANG Si-jing, ZHANG Wen-zheng, et al, Experimental simulation of dissolution for carbonate with different composition under the conditions from epigenesis to burial diagenesis environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995,13(4):49-54.
- [17] 韩宝平. 任丘油田碳酸盐岩溶蚀实验研究[J]. 中国岩溶,1988,7(1):80-88.
HAN Bao-ping. Act study on the simulation of carbonate rock's corrosion in Renqiu Oilfield [J]. Carsologica Sinica, 1988,7(1):80-88.
- [18] 邱隆伟,姜在兴. 陆源碎屑岩的碱性成岩作用[M]. 北京:地质出版社,2006:14-21.

(编辑 徐会永)