

文章编号:1000-0550(2017)02-0413-12

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.018

# 鄂尔多斯盆地奥陶系不同组构碳酸盐岩埋藏溶蚀实验

谭飞<sup>1</sup>,张云峰<sup>1</sup>,王振宇<sup>1</sup>,董兆雄<sup>1</sup>,黄正良<sup>2</sup>,王前平<sup>2</sup>,高君微<sup>3</sup>

1.西南石油大学地球科学与技术学院,成都 610500

2.中石油长庆油田分公司勘探开发研究院,西安 710018

3.中国石油长庆油田分公司第二采气厂,西安 710018

**摘要** 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储层受埋藏溶蚀作用控制明显,而地层深部复杂的水—岩反应造成埋藏溶蚀研究难度较大,并进而影响了储层的评价与预测。分别利用CO<sub>2</sub>溶液和乙酸溶液为流体介质进行溶蚀模拟实验,探讨埋藏条件下温度、压力、流体等因素对不同矿物及组构碳酸盐岩溶蚀作用的影响。结果表明:1)随着温度与压力升高,碳酸盐岩样品在乙酸溶液中的溶解速率均相应提高,在CO<sub>2</sub>溶液中的溶解速率则先增加后减小,且在110℃~130℃区间内溶蚀速率最大;深埋藏环境下,各岩类溶蚀速率差异减小,并趋于一致;2)岩石矿物成分和组构,原岩初始孔隙度的大小及其连通关系,以及晶体的产状对成岩后期的埋藏溶蚀作用也具有重要的影响。不溶组分含量低、颗粒/灰泥比高、矿物成分复杂的碳酸盐岩由于组构选择性溶蚀作用而更易被溶蚀;碳酸盐岩的溶蚀速率随方解石含量的增加而增加,但深埋藏环境下,矿物成分含量差异对溶蚀速率的影响作用减弱;硬石膏与白云岩相伴生时,可优先溶蚀形成膏模孔,并促进白云石的溶解,改善储层效果。不同岩性,总体上灰岩较白云岩及过渡岩类更易发生埋藏溶蚀作用。结合研究区实际地质条件分析,砂屑灰岩、膏质白云岩等埋藏溶蚀强度较大,通过对原岩早期组构选择性溶蚀形成孔隙的继承和调整,叠加埋藏期岩溶作用后,可形成规模优质储层。

**关键词** 碳酸盐岩;埋藏溶蚀;模拟实验;组构;奥陶系;鄂尔多斯盆地

**第一作者简介** 谭飞,男,1992年出生,硕士研究生,碳酸盐岩储层沉积学,E-mail: xnsytf201102@163.com

**通讯作者** 张云峰,男,讲师,E-mail: zhyf@swpu.edu.cn

**中图分类号** P618.13 **文献标识码** A

## 0 引言

鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩岩溶型储层中蕴藏着丰富的天然气资源,盆地内中奥陶统马家沟组是储集层发育的主要层段,其油气藏储量占总探明储量的80%以上<sup>[1]</sup>。马家沟组岩溶型储层储集类型主要为裂缝—溶孔型,优质储层岩石类型以含硬石膏柱状晶和含结核的粉晶白云岩为主,其次为含晶间孔隙的细—粗粉晶白云岩<sup>[2-3]</sup>。古岩溶发育主要经历了同沉积期的层间岩溶、风化剥蚀期的裸露风化壳岩溶以及埋藏期的压释水和热水岩溶3个阶段,3期岩溶相互叠加改造,形成了奥陶系有利的油气储集空间<sup>[4-5]</sup>。鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储层受埋藏溶蚀作用控制明显,与表生溶蚀作用不同,地层深部水—岩反应的条件复杂,温度、压力变化大,物质亦非常丰富,有机酸、CO<sub>2</sub>、热液、硫酸盐、微生物等会与碳酸盐岩发生复杂的化学反应,造成埋藏溶蚀研究难度

较大,并进而影响了储层的评价与预测<sup>[6]</sup>。

上世纪80年代以来,国内外学者先后从溶解动力学和热力学方面,开展了一些表生和埋藏成岩环境下的碳酸盐岩溶蚀模拟实验,但由于实验条件与方式的差异、控制因素选择的不同,获得的结果也不尽相同<sup>[7-22]</sup>。以往的模拟研究多单一地从碳酸盐岩的溶蚀速率入手,基于温度、压力、酸碱度等原始环境,通过溶液反应前后组分和浓度的变化特征,间接获取流体介质对碳酸盐岩的溶蚀改造信息。而从微观角度对不同矿物成分及组构碳酸盐岩的溶蚀性、及其微观孔隙发育特征、孔隙连通情况的研究较为薄弱。此外,碳酸盐岩埋藏成岩过程中,其溶蚀和沉淀作用是一个随流体性质、温度和压力改变而连续变化的过程,并非完全是封闭、恒定不变的体系,单因素控制变量分析(如恒压或恒温)与实际地质过程相悖。为探讨埋藏条件下温度、压力、流体等因素对不同矿物及组构碳酸盐岩溶蚀作用的影响,在温度和压力同时变

收稿日期:2016-03-10; 收修改稿日期:2016-06-20

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05004-006); 四川省重点学科建设项目(SZD0414) [Foundation: National Science and Technology Major Project, No.2011ZX05004-006; Key Discipline Construction Projects in Sichuan Province, No. SZD0414]

化(以逼近真实地质作用过程)的条件下,分别以 $\text{CO}_2$ 溶液、乙酸溶液为溶蚀介质进行溶蚀模拟实验,分析溶蚀过程中样品溶蚀量和溶蚀速率的变化规律,同时结合 SEM 扫描电镜观察溶蚀作用形成的次生孔、洞等微观形貌变化特征,以期更加深刻了解埋藏条件下碳酸盐岩溶蚀作用特征,为埋藏碳酸盐岩储层的发育机理和预测提供理论依据和指导。

## 1 实验方法及流程

### 1.1 样品选取及制备

以采自鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组和下奥陶统克里摩里组的6种碳酸盐岩为实验样品,经镜下薄片鉴定分别为含云砂屑灰岩、泥晶灰岩、云质灰岩、

粉晶白云岩和纹层状硬石膏质泥晶白云岩(图1),并通过X射线衍射仪,测定了样品的矿物成分及含量(表1)。样品包含灰岩、过渡岩类和白云岩3大类,主要成分为方解石和白云石,二者最高含量在95%以上,纹层状硬石膏质泥晶白云岩含有26.05%的硬石膏,泥晶灰岩中含少量石英。岩石类型基本兼顾了不同的岩性、矿物成分和含量、岩石组构。样品的外比表面积决定了样品的溶蚀速率,外比表面积越大,则溶蚀速率越大。因此,为了减少实验中因样品大小而引起的误差,样品为岩芯柱塞样,直径约2.5 cm、高约1.5 cm,外比表面积介于 $21.570\sim 23.803\text{ cm}^2$ ,这样使每份样品的外比表面积差异也相对较小。对所选样品作切割、抛光、超声清洗、烘烤等预处理后,用于

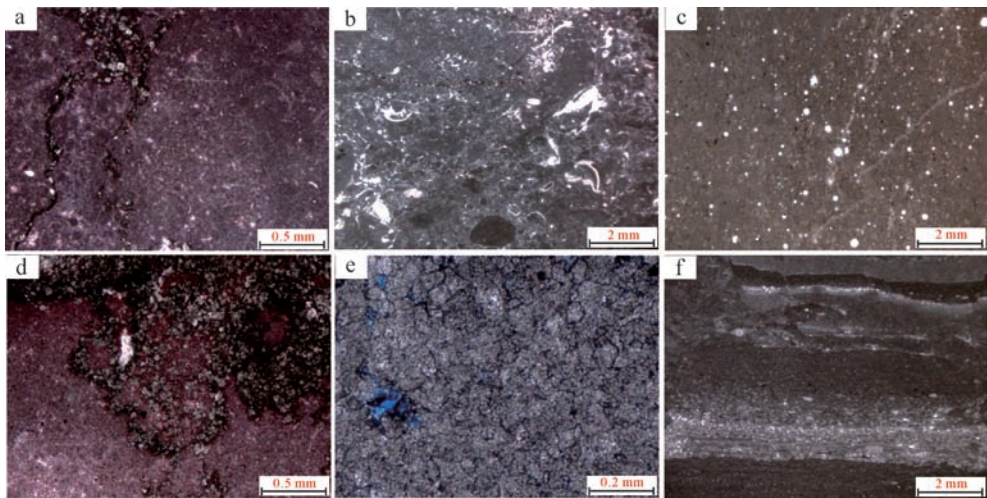


图1 蚀模拟实验样品岩石学特征

a. 含云砂屑灰岩,自形粉晶白云石沿泥质条带分布,余探1井,克里摩里组,4 054.9 m,单偏光,铸体片;b. 含生屑泥晶砂屑灰岩,召探1井,马四段,3 276.5 m,单偏光,铸体片;c. 泥晶灰岩,球粒被亮晶方解石充填,忠探1井,马五段,4 237.1 m,单偏光,铸体片;d. 云质灰岩,自形粉晶白云石沿泥质条带分布,忠探1井,马五段,4 353.21 m,单偏光,铸体片;e. 粉晶白云岩,晶体半自形,发育少量晶间孔,靳探1井,马五段,3 633.8 m,单偏光,铸体片;f. 纹层状硬石膏质泥晶白云岩,硬石膏呈条带状分布,少量自生石英淀出,定探1井,马三段,4 416.5 m,单偏光,铸体片。

Fig.1 Petrologic characteristic of samples for the dissolution simulation experiment

表1 样品岩性及矿物成分组成

Table 1 The lithology and mineralogical composition of the samples

井号	样品编号	井深/m	层位	岩性	矿物种类及含量/%							
					石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	硬石膏	菱铁矿	黏土矿物
余探1	A1	4 054.9	克里摩里组	含云砂屑灰岩	1.77	—	—	86.98	11.25	—	—	—
召探1	A2	3 276.5	马四段	含生屑泥晶砂屑灰岩	1.13	—	—	95.28	3.59	—	—	—
忠探1	A3	4 237.1	马五段	泥晶灰岩	6.82	—	—	92.14	1.04	—	—	—
忠探1	A4	4 353.21	马五段	云质灰岩	1.88	—	—	64.65	33.47	—	—	—
靳探1	A5	3 633.8	马五段	粉晶白云岩	—	—	—	3.2	96.8	—	—	—
定探1	A6	4 416.5	马三段	纹层状硬石膏质泥晶白云岩	2.00	—	—	—	71.95	26.05	—	—

注:—表示未检测出或低于仪器检测下限。

本次模拟实验。

## 1.2 实验装置、条件及流程

模拟实验设备为国内外较为成熟的高温高压储层动力学模拟装置(图2),属连续流柱塞反应器。该装置含流体泵、围压泵、预热器、岩芯夹持器、过滤器、截止阀、高温缓冲容器等主要部分;通过流体泵和背压阀驱动流体,并在高温高压下保持恒压、恒速连续流动,围压泵则实时监控岩芯夹持器内的流体压力<sup>[23]</sup>。与前人采用动态平衡压力法,对碳酸盐岩进行温度和压力的单因素模拟实验不同,为逼近真实地质作用过程,本次实验采用温度和压力同时变化的方式,在开放—连续流动体系内,让酸性流体介质不断的流过岩样,通过温度阀和压力泵控制相应的温压。根据鄂尔多斯盆地奥陶纪碳酸盐岩地层的地质埋藏过程<sup>[24-25]</sup>,同时为模拟从浅埋藏到深埋藏环境下不同地质流体对储层的溶蚀作用,选取了30℃/5 MPa、60℃/10 MPa、90℃/20 MPa、120℃/30 MPa、150℃/40 MPa、180℃/50 MPa六个温压点,进行本次岩溶模拟实验。

实验流体介质采用油田水中常见的乙酸溶液(浓度为2 mL/L、pH≈3.0)和CO<sub>2</sub>溶液(浓度为2 mL/L、pH≈5.0、分压为2 MPa),分别对不同埋藏条件下碳酸盐岩的溶蚀效应进行模拟,流体流速均控制在2 mL/min。实验过程中,在预设的温压点以一定的时间间隔进行取样,实验1小时,待达到动态平衡后取反应后样品,通过ICP-OES等离子体发射光谱仪分析残液的离子浓度(分析误差精度小于5%),进而得出样品的溶蚀量和溶蚀速率。为了更好的表征碳酸盐岩埋藏条件下的微观溶蚀特征,采用SEM扫描电镜对部分样品溶蚀后的表面微观形貌变化特征进行了分析。

碳酸盐岩表面溶蚀速率主要受到矿物成分及含

量、岩石组构、比表面积、温度、压力、流体性质及流速等因素控制<sup>[26-30]</sup>。实验所用酸性流体组成保持恒定,岩石外比表面积控制在较小变化范围内,可视为未发生变化,流速恒定保持为2 mL/min(精度误差正负0.01 mL/min)。因而,溶蚀系统内样品的溶蚀速率主要受岩石组构、温度、压力、矿物成分及含量等因素影响。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 微观溶蚀特征

聂继红<sup>[31]</sup>指出,表面反应控制下的选择性溶蚀是微观岩溶作用的本质特征。所谓选择性溶蚀是指侵蚀性的流体和碳酸盐岩接触时,矿物成分、岩石结构、渗流条件及岩石赋存环境的差异导致了微观溶蚀的分异作用,岩石成分和结构薄弱部位将是选择性溶蚀的优势点<sup>[32]</sup>。因此,碳酸盐岩溶蚀后其表面微观形貌会记载岩石—流体相互作用的信息及其结果,通过SEM扫描电镜研究岩石的表面微观形貌变化特征,可以直接反映不同组构碳酸盐岩的可溶性及其经历过的溶解过程,这对于碳酸盐岩储层的评价具有重要的意义<sup>[28]</sup>。本次试验对部分样品在乙酸溶液和CO<sub>2</sub>溶液中溶解后的表面微观形貌进行了扫描电镜分析,SEM微观形态特征如(图3,4)。

#### 2.1.1 乙酸溶蚀形貌特征

由含生屑泥晶砂屑灰岩(A2)被溶蚀后的扫描电镜照片分析可知,总体上砂屑、泥晶颗粒溶蚀效果最为显著,次为亮晶方解石,白云石可溶性最弱。亮晶方解石溶蚀后发育锯齿状的溶蚀边并突出表面,部分呈絮状堆积,白云石晶体的溶蚀特征则不显著(图3a,b)。泥晶、砂屑颗粒溶蚀强度远高于白云石晶体和亮晶方解石,表现为砂屑颗粒内泥晶溶蚀较快,形成溶蚀坑槽,且泥晶颗粒溶蚀后粒间溶孔发育,而颗

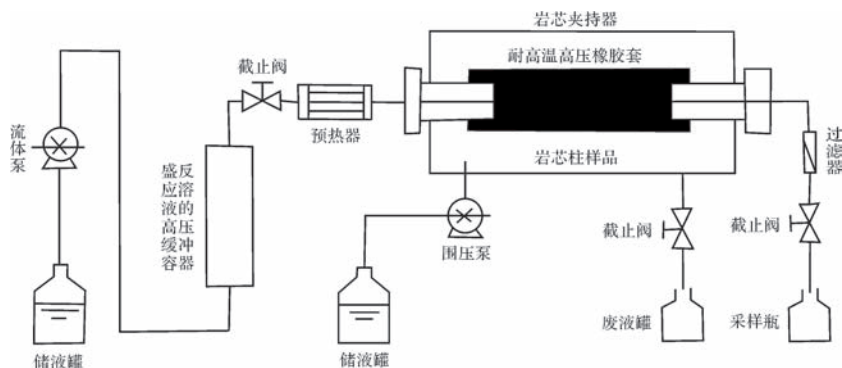


图2 碳酸盐岩埋藏溶蚀模拟实验装置(据余敏等,2014改绘)

Fig.2 Schematic diagram of simulation device of burial dissolution for carbonate rocks(modified after She *et al.*, 2014)

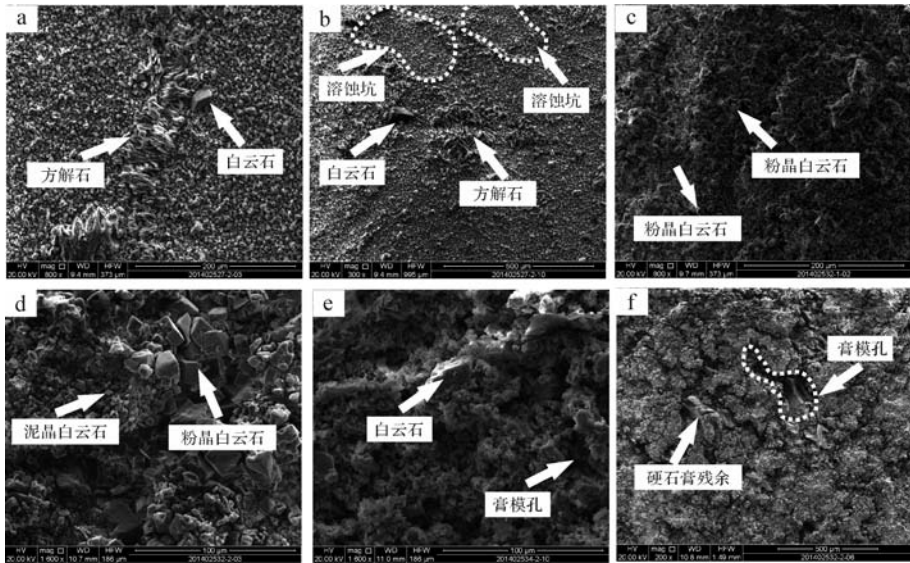


图3 扫描电镜下乙酸溶液溶蚀后的矿物特征

a,b.含生屑泥晶粉晶—砂屑灰岩,样品编号A2,召探1井,马四段,3 276.5 m;c,d.粉晶白云岩,样品编号A5,靳探1井,马五段,3 633.8 m;e,f.纹层状硬石膏质泥晶白云岩,样品编号A6,定探1井,马三段,4 416.5 m。

Fig.3 Mineral characteristic of carbonate rock samples showed by SEM photomicrographs after the dissolution of acetic acid

粒边缘的亮晶方解石溶蚀则相对较弱(图3b)。

粉晶白云岩(A5)质较纯,几乎全由白云石晶体组成,由于没有更易溶蚀的方解石存在,其溶蚀特征相对于灰岩并不显著。溶蚀后常形成晶间溶孔,泥晶白云石晶体边缘溶蚀更显著,粉晶白云石则相对不溶,也未见晶内溶孔(图3c,d),这可能是因为晶体边缘结晶常不完全,因而产生晶格空位或晶格畸变,使得矿物晶体的边缘处往往为选择性溶解的优势点<sup>[32]</sup>。

硬石膏质泥晶白云岩(A6)被酸性流体溶蚀后,晶间溶孔比较发育,硬石膏溶蚀作用明显,其溶蚀速率快于白云石,导致白云石晶体面突出高于硬石膏,形成大量膏模孔,粒间可见硬石膏溶蚀残留(图3e,f)。

### 2.1.2 CO<sub>2</sub> 溶液溶蚀形貌特征

由样品微观溶蚀特征可知,碳酸盐岩在CO<sub>2</sub>溶液中具与乙酸溶液类似的溶蚀规律。即灰岩中碎屑颗粒、泥晶颗粒的溶蚀速率高于灰泥和亮晶方解石的溶蚀速率,常形成溶蚀洼坑,且泥晶内粒间微孔发育,增孔效果明显(图4a~d)。白云岩溶蚀速率一定程度上受晶体大小影响,表现为泥晶白云石相对于粉晶白云石,溶蚀反应接触面积更大,溶蚀效果更明显,常形成晶间溶孔,而粉晶白云石则相对不溶(图4e,f)。过渡岩类常形成白云石晶体突出于表面等特征。含膏云岩埋藏溶蚀作用强烈,硬石膏溶解带入CaSO<sub>4</sub>,

总体上利于白云岩的溶解,溶解离子被带走后,常发育膏模孔,部分区域另可见硬石膏残留(图4h,i,j)。

## 2.2 不同温、压条件下的溶蚀规律

### 2.2.1 乙酸溶液条件下的溶蚀结果

以乙酸(2 mL/L)为溶解介质,当反应达到动态平衡后,测得各样品输出液Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度变化及溶蚀速率如表2、图5a所示。随温、压增加,各类岩石样品在乙酸溶液中的溶解速率均逐渐增加,但当温度大于120℃、压力大于30 MPa后增速减缓,溶蚀速率介于 $3.01 \times 10^{-9} \sim 1.09 \times 10^{-8}$  mol/(cm<sup>2</sup>·s)。就不同岩性的溶蚀速率而言,同一温、压条件下,粉晶白云岩<硬石膏质泥晶白云岩<云质灰岩<含云砂屑灰岩<泥晶灰岩<含生屑泥晶砂屑灰岩。总体表现为灰岩的溶解速率大于白云岩,在30℃、5 MPa至120℃、30 MPa温压区间内,灰岩明显比白云岩溶蚀速率更大,当温度大于120℃、压力大于30 MPa时,两者溶蚀速率差异减小,并随温压进一步增加,逐渐趋于一致。样品释放的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度同样呈逐渐增加的趋势,(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)浓度最低为 $2.26 \times 10^{-3}$  mol/L,最高达 $9.76 \times 10^{-3}$  mol/L。在180℃、50 MPa的高温高压条件下,(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)浓度平均为30℃、5 MPa条件下的2.5~3倍,说明深层碳酸盐岩在开放连续流动体系、酸性不饱和流体环境下,依然具较高的溶蚀能力。因此,不管是灰岩还是白云岩,只要保持饱和离子不断

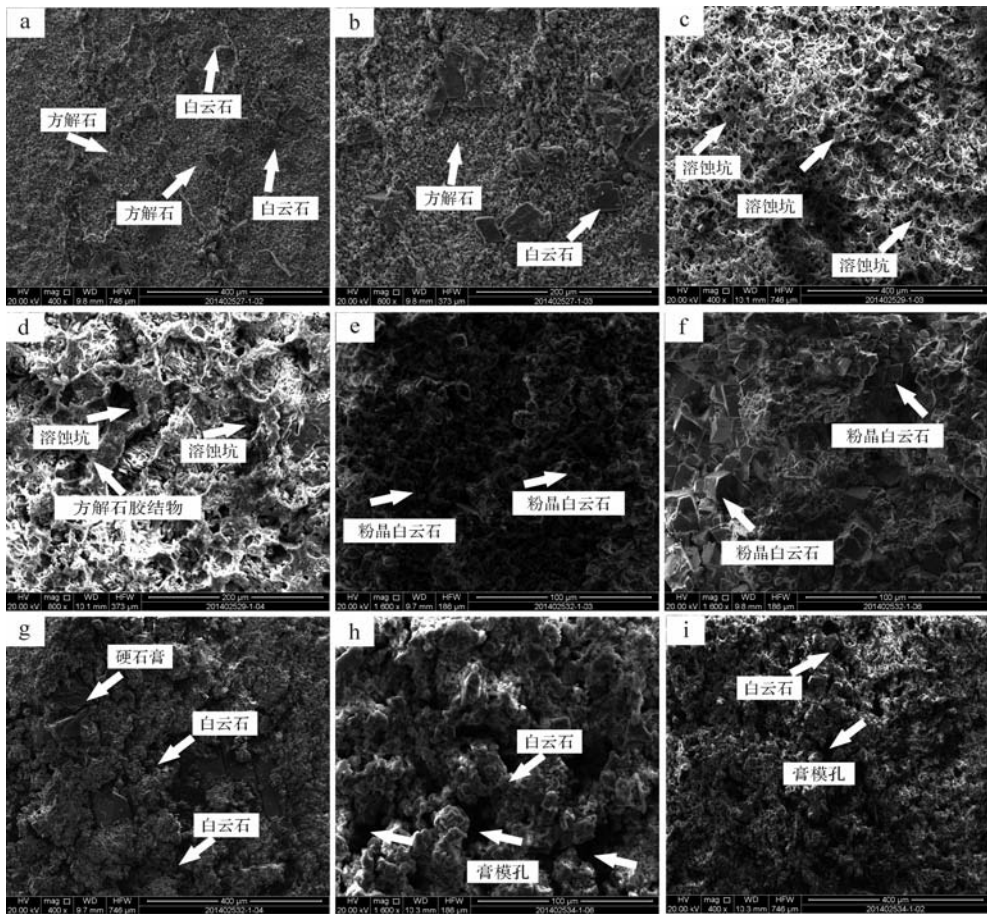


图4 扫描电镜下CO<sub>2</sub>溶液溶蚀后的矿物特征

a, b. 含生屑泥晶砂屑灰岩, 样品编号 A2, 召探 1 井, 马四段, 3 276.5 m; c, d. 泥晶灰岩, 样品编号 A3, 忠探 1, 马五段, 4 237.1 m; e, f. 粉晶白云岩, 样品编号 A5, 靳探 1 井, 马五段, 3 633.8 m; g, h, i. 纹层状硬石膏质泥晶白云岩, 样品编号 A6, 定探 1 井, 马三段, 4 416.5 m。

Fig.4 Mineral characteristic of carbonate rock samples showed by SEM photomicrographs after the dissolution of CO<sub>2</sub> solution

被带走和不饱和离子的持续补充,在漫长的地质历史中,就可形成规模溶蚀孔隙<sup>[33]</sup>。

对比分析泥晶灰岩(A3)、云质灰岩(A4)和粉晶白云岩(A5),三种样品的矿物组分不同(主要为方解石/白云石含量比值,A3最高为88,A5最低仅为0.03),碳酸盐岩的溶蚀速率存在差异。中、浅埋藏条件下(温度低于120℃、压力低于30 MPa),不同岩类溶蚀速率差异明显,A3最大,约为A5的1.2倍,随温度、压力升高,溶蚀速率差异减小。在深埋藏环境下(180℃、50 MPa),泥晶灰岩(A3)与云质灰岩(A4)溶蚀速率相当,均为 $1.08 \times 10^{-8} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,略高于粉晶云岩(A5),方解石、白云石含量差异对溶蚀速率的影响大大减弱。

前已叙述,岩石组构也是碳酸盐岩埋藏作用强度的重要影响因素之一,为研究其控制效果,选取泥晶

灰岩(A3)和含生屑泥晶粉晶砂屑灰岩(A2)两组样品,以乙酸(2 mL/L)为流体进行溶蚀实验,实验条件及流程同上。A3为灰泥支撑结构,泥晶占80%,另含少量自生石英颗粒及白云石,面孔率较低,仅发育少量为泥质部分充填的针孔;A2为颗粒支撑结构,颗粒/灰泥比较高,颗粒占60%以上,以砂屑、粉屑为主,并含少量介形虫、腕足类、棘皮类生屑,生物体腔孔及粒间孔为泥—亮晶方解石胶结,微裂缝呈半充填状态。实验结果如图6a,在30℃、5 MPa至120℃、30 MPa之间,同一温压条件下,A2溶蚀速率明显大于A3,此后速率差异逐渐减小,至180℃、50 MPa时,已基本保持一致。宏观溶蚀速率结果与样品溶蚀后微观形貌变化特征相一致,不溶组分含量低、颗粒/灰泥比高、矿物成分复杂的碳酸盐岩由于组构选择性溶蚀作用而更易被溶蚀。

表2 碳酸盐岩在乙酸溶液中的溶蚀实验结果

Table 2 Dissolution experiment results of carbonate rocks in acetic acid

流体	岩性	样品编号	温度 /°C	压力 /MPa	Ca <sup>2+</sup> /10 <sup>-3</sup> mol/L	Mg <sup>2+</sup> /10 <sup>-3</sup> mol/L	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> /10 <sup>-3</sup> mol/L	外比表面积 /cm <sup>2</sup>	溶解速率 /10 <sup>-9</sup> mol/(cm <sup>2</sup> ·s)
乙酸	含云砂屑灰岩	A1	30	5	3.65	0.032 5	3.68	23.873	4.10
			60	10	5.95	0.066 3	6.02	23.873	6.69
			90	20	7.28	0.089 6	7.36	23.873	8.19
			120	30	8.03	0.123	8.15	23.873	9.06
			150	40	8.93	0.150	9.07	23.873	10.10
			180	50	9.35	0.158	9.51	23.873	10.06
乙酸	含生屑泥晶砂屑灰岩	A2	30	5	3.85	0.037 1	3.89	23.127	4.32
			60	10	6.38	0.067 5	6.44	23.127	7.17
			90	20	7.53	0.092 5	7.62	23.127	8.47
			120	30	8.40	0.130	8.53	23.127	9.49
			150	40	9.18	0.157	9.33	23.127	10.40
			180	50	9.60	0.163	9.76	23.127	10.90
乙酸	泥晶灰岩	A3	30	5	3.75	0.033 8	3.78	22.472	4.21
			60	10	6.30	0.067 5	6.37	22.472	7.08
			90	20	7.55	0.091 7	7.64	22.472	8.50
			120	30	8.23	0.127	8.35	22.472	9.29
			150	40	9.13	0.157	9.28	22.472	10.30
			180	50	9.58	0.163	9.74	22.472	10.80
乙酸	云质灰岩	A4	30	5	2.15	0.713	2.87	21.972	3.70
			60	10	3.60	1.59	5.19	21.972	6.70
			90	20	4.20	2.26	6.46	21.972	8.35
			120	30	4.55	2.85	7.40	21.972	9.56
			150	40	4.65	3.54	8.19	21.972	10.60
			180	50	4.75	3.63	8.38	21.972	10.80
乙酸	粉晶白云岩	A5	30	5	1.39	0.867	2.26	21.803	3.01
			60	10	2.50	1.68	4.18	21.803	5.58
			90	20	3.28	2.44	5.72	21.803	7.62
			120	30	3.78	3.00	6.78	21.803	9.04
			150	40	4.05	3.55	7.60	21.803	10.1
			180	50	4.13	3.68	7.80	21.803	10.40
乙酸	纹层状硬石膏质泥晶白云岩	A6	30	5	2.07	0.713	2.78	22.770	3.59
			60	10	3.43	1.59	5.01	22.770	6.48
			90	20	3.93	2.26	6.19	22.770	7.99
			120	30	4.28	2.85	7.13	22.770	9.21
			150	40	4.55	3.54	8.05	22.770	10.40
			180	50	4.75	3.63	8.38	22.770	10.80

### 2.2.2 CO<sub>2</sub> 溶液条件下的溶蚀结果

采用 CO<sub>2</sub> 溶液对部分样品进行了溶蚀模拟实验结果如表 3、图 5b 所示,随温度、压力变化,碳酸盐岩的溶蚀速率呈先增加后降低的趋势。温度小于 120°C、压力小于 30 MPa 时,4 种样品的溶蚀速率随温、压升高而升高,(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>) 浓度在 8.54×10<sup>-4</sup>~3.07×10<sup>-3</sup> mol/L 之间,总体溶蚀速率介于(1.32~3.95)×10<sup>-9</sup> mol/(cm<sup>2</sup>·s),最大溶蚀温度区间位于 110°C~130°C;就不同岩性的溶蚀速率而言,同一温、压条件下,粉晶白云岩(A5)<泥晶灰岩(A3)<纹层状硬石膏质泥晶云岩(A6)<含生屑泥晶砂屑灰岩

(A2),但溶蚀速率差异随着温、压升高而减小。当温度大于 120°C、压力大于 30 MPa 时,不同岩性样品的溶蚀速率随温、压升高而降低,(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>) 浓度在(3.07~1.89)×10<sup>-3</sup> mol/L 之间,总体溶蚀速率介于(3.95~2.91)×10<sup>-9</sup> mol/(cm<sup>2</sup>·s)。同一温、压条件下,溶蚀速率 A5<A3<A6<A2,但差异较前者小。当温压条件处于 180°C、50 MPa 时,各岩类的溶蚀速率逐渐接近,粉晶白云岩甚至略高于泥晶灰岩。

选取 A2 和 A3,进行了 CO<sub>2</sub> 酸性溶液条件下的不同组构碳酸盐岩溶蚀实验,实验条件及流程同上,实验结果如(图 6b),显示出与乙酸溶液具有相似的溶

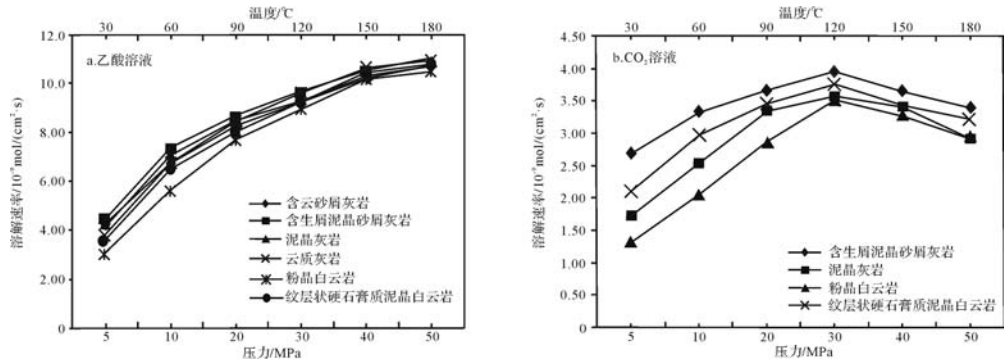


图5 温度、压力同时变化下酸性溶液对不同类碳酸盐岩的溶蚀速率曲线

a.流体介质为乙酸溶液,浓度2 mL/L,流速为2 mL/min;b.流体介质为CO<sub>2</sub>溶液,分压为2 MPa,pH≈3.0,流速为2 mL/min。

Fig.5 Dissolution rates curves of carbonate rocks in acidic solution with simultaneously changing temperature and pressure

表3 碳酸盐岩在CO<sub>2</sub>溶液中的溶蚀实验结果

Table 3 Dissolution experiment results of carbonate rocks in CO<sub>2</sub> solution

流体	岩性	样品编号	温度 / °C	压力 / MPa	Ca <sup>2+</sup> / 10 <sup>-3</sup> mol/L	Mg <sup>2+</sup> / 10 <sup>-3</sup> mol/L	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> / 10 <sup>-3</sup> mol/L	外比表面积 / cm <sup>2</sup>	溶解速率 / 10 <sup>-9</sup> mol/(cm <sup>2</sup> ·s)
CO <sub>2</sub> 溶液	含生屑泥晶—砂屑灰岩	A2	30	5	2.07	0.028 3	2.09	21.570	2.69
			60	10	2.55	0.032 5	2.58	21.570	3.32
			90	20	2.80	0.035 0	2.84	21.570	3.65
			120	30	3.05	0.022 5	3.07	21.570	3.95
			150	40	2.80	0.025 4	2.83	21.570	3.64
			180	50	2.60	0.034 2	2.63	21.570	3.39
CO <sub>2</sub> 溶液	泥晶灰岩	A3	30	5	0.98	0.140	1.12	21.129	1.72
			60	10	1.51	0.145	1.65	21.129	2.54
			90	20	2.01	0.169	2.17	21.129	3.34
			120	30	2.15	0.180	2.32	21.129	3.57
			150	40	2.05	0.162	2.21	21.129	3.39
			180	50	1.75	0.145	1.89	21.129	2.91
CO <sub>2</sub> 溶液	粉晶白云岩	A5	30	5	0.59	0.269	8.54	21.720	1.32
			60	10	0.90	0.425	1.33	21.720	2.05
			90	20	1.14	0.713	1.85	21.720	2.86
			120	30	1.48	0.792	2.27	21.720	3.51
			150	40	1.41	0.721	2.13	21.720	3.29
			180	50	1.29	0.633	1.92	21.720	2.97
CO <sub>2</sub> 溶液	纹层状硬石膏质泥晶白云岩	A6	30	5	1.11	0.169	1.27	22.907	2.11
			60	10	1.47	0.314	1.78	22.907	2.95
			90	20	1.57	0.513	2.08	22.907	3.45
			120	30	1.61	0.646	2.26	22.907	3.74
			150	40	1.52	0.540	2.06	22.907	3.42
			180	50	1.48	0.458	1.94	22.907	3.21

蚀规律,即颗粒支撑结构、矿物组成复杂、颗粒/灰泥比高的岩石组构特征更利于埋藏溶蚀作用的进行。与前者不同的是,当温度高于120°C、压力大于30 MPa时,溶蚀速率呈缓慢下降趋势,但依然保持着较高的溶蚀速率。

2.3 溶蚀结果差异分析

总体来看,对比两种流体介质,乙酸对碳酸盐岩的溶蚀强度要大于CO<sub>2</sub>溶液,同一温压下,其溶解速

率大约为CO<sub>2</sub>溶液的2~4倍。

乙酸条件下实验结果表明,近地表浅埋藏环境下,灰岩溶蚀速率明显大于云质灰岩和白云岩,随着埋藏增加,温压升高,灰岩溶蚀强度仍然大于白云岩,但差异逐渐减小,至深埋藏阶段,两者溶蚀速率趋于一致。这一结果与余敏等<sup>[28]</sup>得出的溶蚀规律相类似,但与蒋小琼<sup>[15]</sup>、范明<sup>[16-17]</sup>等略有不同,因为他们采用的是动态压力平衡法,将样品碎成小颗粒以后,

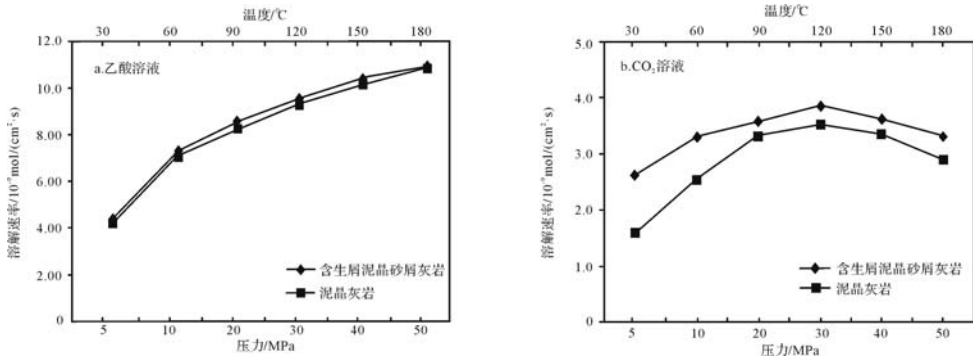


图6 不同组构碳酸盐岩溶蚀速率比较

a. 流体介质为乙酸溶液,浓度为 2 mL/L,流速 2 mL/min; b. 流体介质为  $\text{CO}_2$  溶液,分压为 2 MPa,  $\text{pH} \approx 3.0$ ,流速 2 mL/min

Fig.6 Comparison of dissolution rates between different structural fabric carbonate rocks

对温度和压力进行单因素控制分析。此外,本次实验也没有出现杨俊杰<sup>[11]</sup>和崔振昂<sup>[21]</sup>等得出的现象,即在温度高于  $100^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$  时,乙酸溶液中白云岩的溶蚀速率将大于灰岩。这可能与实验条件的差异有关,本次实验中温度和压力同时变化,更接近于实际地质演化过程,且样品为岩芯柱塞样,岩石结构特征与地层埋藏条件下的原始形态也更为接近。因而,实验结果可能更能反映碳酸盐岩埋藏溶蚀规律。

当岩样在  $\text{CO}_2$  水溶液中进行溶蚀实验时,随埋藏深度的增加,碳酸盐岩的溶蚀速率呈先增加后降低的趋势。范明等<sup>[18]</sup>指出  $\text{CO}_2$  溶液对碳酸盐岩的溶蚀在  $60^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$  之间达到溶蚀高峰,而本实验得出的最大溶蚀区间为  $110^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$ 。 $\text{CO}_2$  分压越高,溶解到水中的  $\text{CO}_2$  越多,解离出的  $\text{H}^+$  浓度越大,可加速碳酸盐岩的溶解,因而可在相对较低的温度内达到溶蚀高峰。范明等人将压力恒定设置为 50 MPa,而本实验的压力范围为 5~50 MPa,呈梯度变化,相同温度条件下,与其相比  $\text{CO}_2$  分压相对较低,因此可能导致最大溶蚀区间的延迟。当温度和压力达到一定范围后, $\text{CO}_2$  对碳酸盐岩的溶蚀作用逐渐减弱,可能是因为在高温高压条件下, $\text{CO}_2$  在溶液中的存在形式发生改变,转而向  $\text{CO}_2$  分子的热力学方向移动,而  $\text{CO}_2$  自身为中性气体,当其无法溶解于溶液中时,其溶蚀能力必然会降低。

不同组构碳酸盐岩溶蚀速率及微观形态特征表明,岩石矿物成分及结构在埋藏成岩过程中的选择性溶蚀,使其微观溶蚀特征存在明显的差异。当碳酸盐岩中含有硬石膏时,硬石膏因与水分子之间电位差最大,优先被选择性溶蚀<sup>[27]</sup>,溶解带入  $\text{CaSO}_4$ ,总体上利于白云岩的溶解<sup>[34]</sup>,在开放连续流动体系下,溶解

离子被带走后,可形成大量膏模孔。白云石和方解石含量对埋藏岩溶次生孔隙的发育也具有重要控制作用,在白云质灰岩和灰质白云岩中,方解石与白云石并存,前者溶蚀速率更大,因而优先被溶蚀,白云石则溶蚀相对较弱。浅埋藏环境下,碳酸盐岩的溶蚀速率随方解石含量的增加而增加,深埋藏环境下,矿物的溶解与沉淀趋于动态平衡,此时方解石和白云石的含量已不是埋藏溶蚀作用的主要影响因素。

泥晶、砂屑颗粒溶蚀速率远高于白云石晶体和亮晶方解石,表现为砂屑颗粒内泥晶溶蚀较快,形成溶蚀坑槽,且泥晶颗粒溶蚀后粒间溶孔发育,颗粒边缘亮晶方解石溶蚀则相对较弱。单从矿物角度考虑,亮晶方解石晶体粗大,解理发育,便于选择性溶蚀,但亮晶方解石排列紧密,而泥晶方解石内部晶间孔则相对较发育,水-岩反应接触面积大,因而也可能部分区域比亮晶方解石更易被溶蚀<sup>[29]</sup>。由此可见,晶体间初始孔隙度的大小、产状及其连通关系对成岩后期的溶蚀作用也具有一定的影响。实验中含生屑泥晶砂屑灰岩与泥晶灰岩相比,其矿物成分组成更为复杂、颗粒/灰泥比高、先存微裂缝发育,由于组构选择性溶蚀作用,整体溶蚀程度及速率均更高。浅埋藏环境下,物质交换更为快速和频繁,因而这种溶蚀特征在浅埋藏环境较深埋藏环境更为显著。

### 3 讨论

基于不同条件下不同组构碳酸盐岩的埋藏溶蚀模拟实验,取得了部分认识。埋藏环境下碳酸盐岩在  $\text{CO}_2$  和乙酸等酸性流体的溶蚀作用下,依然具较高的溶蚀能力,在开放连续流动体系内,伴随欠饱和和流体物质的不断交换和迁移,可形成规模性优质储层。不



溶组分(如黏土矿物和石英)含量低、颗粒粗大,颗粒/灰泥比高,矿物成分复杂,先存孔隙及微裂缝发育的碳酸盐岩由于组构选择性溶蚀作用而更易被溶蚀,这种溶蚀特征在浅埋藏环境较深埋藏更为显著。当硬石膏与白云岩伴生时,被选择性优先溶蚀,常形成大量的膏模孔。同时其强烈溶蚀形成富含 $\text{SO}_4^{2-}$ 的地下水,可进一步增强白云石的溶解作用,在先存孔隙的基础上形成扩大的晶间溶孔。这些认识深化了埋藏溶蚀碳酸盐岩储层形成机理,并为储层预测提供了依据和理论指导。

鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩自沉积以来,先后经历了沉积成岩→裸露风化→沉积埋藏→溶蚀改造等漫长的多期地质作用,受古岩溶地貌、古水文地质条件以及构造运动等多种因素的影响<sup>[35]</sup>。早期岩溶作用(包括层间岩溶和裸露风化壳岩溶)对岩石进行了强烈的溶蚀改造,在基岩中形成形式多样的微裂缝及溶孔,当叠加后期埋藏期压释水岩溶和热水岩溶作用后,通过对原岩残余孔隙的继承和调整,可形成规模埋藏岩溶储层。含硬石膏柱状晶和结核的粉晶白云岩、砂屑灰岩由于埋藏溶蚀强度相对较大,因此其发育层段是寻找优质埋藏岩溶储层的有利目标。实际勘探表明,盆地中央隆起缓坡带广泛发育的含膏云坪和西缘岩溶高地残丘上的礁、滩相的砂屑灰岩层段,为盆内埋藏岩溶作用发育区域<sup>[36-37]</sup>,进而从生产实践上印证了本此模拟实验的结果。

## 4 结论

(1) 在酸性流体的改造作用下,深埋藏环境下碳酸盐岩地层依然具较强的溶蚀能力。埋藏条件下灰岩始终比白云岩具更大的溶蚀速率和溶蚀程度,含生屑泥晶砂屑灰岩、硬石膏质白云岩具较高的溶蚀速率,粉晶白云岩溶蚀速率最低。随埋藏深度的增加,白云岩和灰岩在乙酸溶液中溶蚀速率均相应提高,当温度大于 $120^\circ\text{C}$ 、压力大于 $30\text{ MPa}$ 时溶蚀增速减慢;在 $\text{CO}_2$ 溶液中碳酸盐岩的溶蚀速率则呈先增加后降低的趋势,最大溶蚀区间位于 $110^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$ ,深埋藏环境下,各岩类溶蚀速率差异减小,并逐渐趋于一致。

(2) 埋藏溶蚀作用除受到温度、压力及溶蚀流体等因素影响以外,岩石的矿物组成及结构,晶体间初始孔隙度的大小及其连通关系,以及晶体的产状对成岩后期的溶蚀作用也具有一定的影响。不溶组分(如黏土矿物和石英)含量低、颗粒粗大,颗粒/灰泥比高,矿物成分复杂的碳酸盐岩由于组构选择性溶蚀

作用而更易被溶蚀,这种溶蚀特征在浅埋藏环境较深埋藏更为显著。白云石和方解石含量对埋藏岩溶次生孔隙的发育也具有重要控制作用,碳酸盐岩的溶蚀速率随方解石含量的增加而增加,深埋藏环境下,方解石与白云石矿物成分含量差异对溶蚀速率的影响作用减弱。硬石膏与白云岩相伴生时,可优先溶蚀形成膏模孔,并促进白云石的溶解,改善储层效果。

(3) 砂屑灰岩、膏质白云岩等埋藏溶蚀强度较大,通过对原岩早期组构选择性溶蚀形成孔隙的继承和调整,叠加埋藏期岩溶作用后,可形成规模优质储层。

## 参考文献(References)

- [1] 王起琮,赵淑萍,魏钦廉,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组海相碳酸盐岩储集层特征[J]. 古地理学报,2012,14(2):229-242. [Wang Qicong, Zhao Shuping, Wei Qinlian, et al. Marine carbonate reservoir characteristics of the Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(2): 229-242.]
- [2] 何江,方少仙,侯方浩,等. 鄂尔多斯盆地中部气田中奥陶统马家沟组岩溶型储层特征[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):350-356. [He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Characteristics of karst reservoirs in the Middle Ordovician Majiagou Formation of gas fields in the central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 350-356.]
- [3] 周进高,邓红婴,郑兴平. 鄂尔多斯盆地马家沟组储集层特征及其预测方法[J]. 石油勘探与开发,2003,30(6):72-74. [Zhou Jin'gao, Deng Hongying, Zheng Xingping. Reservoir types and prediction of Majiagou Formation in the Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 72-74.]
- [4] 拜文华,吕锡敏,李小军,等. 古岩溶盆地岩溶作用模式及古地貌精细刻画——以鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳为例[J]. 现代地质,2002,16(3):292-298. [Bai Wenhua, Lü Ximin, Li Xiaojun, et al. The mode of palaeokarstification and the fine reconstruction of the palaeogeomorphology in the karst basin: Taking Ordovician karst in eastern Ordos Basin for example[J]. Geoscience, 2002, 16(3): 292-298.]
- [5] 李振宏,郑聪斌. 古岩溶演化过程及对油气储集空间的影响——以鄂尔多斯盆地奥陶系为例[J]. 天然气地球科学,2004,15(3):247-252. [Li Zhenhong, Zheng Congbin. Evolution process of palaeokarst and influence to reservoir—a case for Ordovician of Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(3): 247-252.]
- [6] 雷川,陈红汉,苏奥,等. 碳酸盐岩埋藏溶蚀研究进展[J]. 断块油气田,2014,21(2):165-170. [Lei Chuan, Chen Honghan, Su Ao, et al. Study progress on buried dissolution in carbonate rock[J]. Fault-Block Oil & Gas Filed, 2014, 21(2): 165-170.]
- [7] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates[J]. AAPG Bulletin, 1970, 54

- (2): 207-250.
- [8] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [9] Arvidson R S, Ertan I E, Amonette J E, et al. Variation in the calcite dissolution rates: a fundamental problem? [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(9): 1623-1634.
- [10] 韩宝平. 任丘油田碳酸盐岩溶蚀实验研究[J]. 中国岩溶, 1988, 7(3): 80-88. [Han Baoping. Study on the simulation of carbonate rock's corrosion in Renqiu oilfield[J]. Carsologica Sinica, 1988, 7(3): 80-88.]
- [11] 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成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 Junjie, Huang Sijing, Zhang Wenzheng, 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.]
- [12] 杨俊杰, 张文正, 黄思静, 等. 埋藏成岩作用的温压条件下, 白云岩溶解过程的实验模拟研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(3): 83-88. [Yang Junjie, Zhang Wenzheng, Huang Sijing, et al. Experimental simulation for dolomite dissolution under the conditions of burial temperature and pressure[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(3): 83-88.]
- [13] 肖林萍. 埋藏条件下碳酸盐岩实验室溶蚀作用模拟的热力学模型与地质勘探方向——以陕甘宁盆地奥陶统马家沟组第五段为例[J]. 岩相古地理, 1997, 17(4): 57-70. [Xiao Linping. Thermodynamic model for experimental simulation of dissolution of the carbonate rocks in the burial environments: An example from the fifth member of the Lower Devonian Majiagou Formation in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1997, 17(4): 57-70.]
- [14] 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 Tianfu, Bao Zhengyu, 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.]
- [15] 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 Xiaoqiong, Wang Shuyi, 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.]
- [16] 范明, 蒋小琼, 刘伟新, 等. 不同温度条件下 CO<sub>2</sub> 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 825-830. [Fan Ming, Jiang Xiaoqiong, Liu Weixin, et al. Dissolution of carbonate rocks in CO<sub>2</sub> solution under the different temperatures[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 825-830.]
- [17] 范明, 徐良发, 刘伟新, 等. 碳酸盐岩白云岩化作用实验地质学研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(6): 635-640. [Fan Ming, Xu Liangfa, Liu Weixin, et al. Experiment geology research of carbonate dolomitization[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(6): 635-640.]
- [18] 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 Xiaoqiong, et al. Effect of acid fluid on carbonate reservoir reconstruction[J]. Geochimica, 2009, 38(1): 20-26.]
- [19] 余敏, 寿建峰, 贺训云, 等. 碳酸盐岩溶蚀机制的实验探讨: 表面溶蚀与内部溶蚀对比[J]. 海相油气地质, 2013, 18(3): 55-61. [She Min, Shou Jianfeng, He Xunyun, et al. Experiment of dissolution mechanism of carbonate rocks: surface dissolution and internal dissolution[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(3): 55-61.]
- [20] 杨云坤, 刘波, 秦善, 等. 基于模拟实验的原位观察对碳酸盐岩深部溶蚀的再认识[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2014, 50(2): 316-322. [Yang Yunkun, Liu Bo, Qin Shan, et al. Re-recognition of deep carbonate dissolution based on the observation of in-situ simulation experiment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(2): 316-322.]
- [21] 崔振昂, 鲍征宇, 张天付, 等. 埋藏条件下碳酸盐岩溶解动力学实验研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 204-207. [Cui Zhen'ang, Bao Zhengyu, Zhang Tianfu, et al. Dissolution kinetics experiment of carbonate rocks in burial temperature and pressure[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 204-207.]
- [22] 黄康俊, 王炜, 鲍征宇, 等. 埋藏有机酸性流体对四川盆地东北部飞仙关组储层的溶蚀改造作用: 溶解动力学实验研究[J]. 地球化学, 2011, 40(3): 289-330. [Huang Kangjun, Wang Wei, Bao Zhengyu, et al. Dissolution and alteration of Feixianguan Formation in the Sichuan Basin by organic acid fluids under burial condition: kinetic dissolution experiments[J]. Geochimica, 2011, 40(3): 289-330.]
- [23] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 埋藏有机酸性流体对白云岩储层溶蚀作用的模拟实验[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(3): 10-17. [She Min, Shou Jianfeng, Shen Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution and alteration of buried organic acid fluid on dolomite reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(3): 10-17.]
- [24] 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 17-24. [Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in the Ordos Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 1996, 17(1): 17-24.]
- [25] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-390. [He Zixin. The Evolution and Petroleum of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-390.]
- [26] 何宇彬, 金玉璋, 李康. 碳酸盐岩溶蚀机理研究[J]. 中国岩溶, 1984(2): 12-16. [He Yubin, Jin Yuzhang, Li Kang. An experimental study of carbonate rock corrosion mechanism[J]. Carsologica Sinica, 1984(2): 12-16.]
- [27] 韩宝平. 喀斯特微观溶蚀机理研究[J]. 中国岩溶, 1993, 12(2): 97-102. [Han Baoping. Study on micro-corrosion mechanism

- of karst[J]. *Carsologica Sinica*, 1993, 12(2): 97-102.]
- [28] 余敏,寿建峰,沈安江,等. 从表生到深埋藏环境下有机酸对碳酸盐岩溶蚀的实验模拟[J]. *地球化学*, 2014, 43(3): 276-286. [She Min, Shou Jianfeng, Shen Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution for carbonate rocks in organic acid under the conditions from epigenesis to deep burial environments [J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 276-286.]
- [29] 余敏,朱吟,沈安江,等. 塔中北斜坡鹰山组碳酸盐岩溶蚀的模拟实验研究[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(3): 234-239. [She Min, Zhu Yin, Shen Anjiang, et al. Simulation experiment for the dissolution of carbonate rocks of the Yingshan Formation on the northern slope of Tazhong uplift [J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(3): 234-239.]
- [30] 刘再华, Dreybrodt W, 李华举. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较[J]. *地球科学*, 2006, 31(3): 411-416. [Liu Zaihua, Dreybrodt W, Li Huaaju. Comparison of dissolution rate-determining mechanisms between limestone and dolomite [J]. *Earth Science*, 2006, 31(3): 411-416.]
- [31] 聂继红,韩宝平,高澜. 碳酸盐矿物的微观喀斯特研究[J]. *分析测试技术与仪器*, 1995, 1(2): 33-37. [Nie jihong, Han Baoping, Gao Lan. Study on micro-mechanism karst of carbonate minerals [J]. *Analysis and Testing Technology and Instruments*, 1995, 1(2): 33-37.]
- [32] 朱文慧,曲希玉,邱隆伟,等. 盐酸及乙酸介质中的碳酸盐岩溶蚀表面特征及机理——以南堡凹陷为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(3): 619-625. [Zhu Wenhui, Qu Xiyu, Qiu Longwei, et al. Characteristics and erosion mechanism of carbonate in acetic acid and hydrochloride solutions, an example from the Nanpu depression [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(3): 619-625.]
- [33] 沈安江,余敏,胡安平,等. 海相碳酸盐岩埋藏溶孔规模与分布规律初探[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(10): 1823-1830. [Shen Anjiang, She Min, Hu Anping, et al. Scale and distribution of marine carbonate burial dissolutional pores [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(10): 1823-1830.]
- [34] 黄思静,成欣怡,赵杰,等. 近地表温压条件下白云岩溶解过程的实验研究[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(4): 349-359. [Huang Sijing, Cheng Xinyi, Zhao Jie, et al. Test on the dolomite dissolution under subaerial temperature and pressure [J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 349-359.]
- [35] 李振宏,胡健民. 鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(5): 641-647, 655. [Li Zhenhong, Hu Jianmin. Structural evolution and distribution of paleokarst reservoirs in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 641-647, 655.]
- [36] 陈学时,易万霞,卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 244-253. [Chen Xueshi, Yi Wanxia, Lu Wenzhong. The paleokarst reservoirs of oil/gas fields in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 244-253.]
- [37] 姚泾利,王兰萍,张庆,等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系古岩溶发育控制因素及展布[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(1): 56-65. [Yao Jingli, Wang Lanping, Zhang Qing, et al. Controlling factor and distribution of paleo-karst development in Ordovician of southern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(1): 56-65.]

## Simulation Experiment for the Burial Dissolution of Different Petrofabric Carbonate Rocks of Ordovician in the Ordos Basin

TAN Fei<sup>1</sup>, ZHANG YunFeng<sup>1</sup>, WANG ZhenYu<sup>1</sup>, DONG ZhaoXiong<sup>1</sup>, HUANG ZhengLiang<sup>2</sup>, WANG QianPing<sup>2</sup>, GAO JunWei<sup>3</sup>

1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company PetroChina, Xi'an 710018, China

3. The No. 2 Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company PetroChina, Xi'an 710018, China

**Abstract:** The development of Ordovician carbonate reservoir in Ordos Basin was obviously controlled by burial dissolution, while the condition and environment of fluid-rock interaction in the deep stratum were much more complicated than the epigenetic karstification, which increased the difficulty of burial dissolution study, reservoir evaluation and prediction. This contribution aimed to study the dissolution effects on carbonate rocks with different mineralogical compositions and petrofabric in acetic acid and CO<sub>2</sub> solution, under burial environment with simultaneously changing temperature (30°C ~ 180°C) and pressure (5 ~ 50 MPa) by equipment of water-rock interaction. For this simulation experiment, the typical six carbonates samples were collected from the Kelimoli and Majiagou Formation of Ordovician in Ordos Basin. The results showed that: 1) The dissolution rates of carbonate rocks all increased in acetic acid, while tended to increase firstly when the temperature reached from 30°C to 120°C and pressure reached from 5 MPa to 30

MPa, then decreased gradually in CO<sub>2</sub> solution with increasing temperature and pressure. The dissolution peak scope were between 110°C to 130°C under the condition where CO<sub>2</sub> solution acted as dissolution fluid. However, when exceeded the peak, the differentiation of corrosion rates gradually decreased and kept the same in the deep burial settings. 2) Burial dissolution was not only controlled by petrofabric and mineralogical composition, the size and connectivity of pre-existing pores also played an important role, except for the condition of temperature, pressure and fluids, the occurrence of crystal could also have significant impact on the dissolution of post diagenesis. As the selective solution of petrofabric, the rocks with lower content of insoluble mineral such as clay mineral and quartz, high grain micrite ratio and complex components were likely more easier to dissolve. With the increase of the calcite content, dissolution rates of carbonate rocks increased as well, but mineral composition content differences contributed little in the deep buried diagenetic environments. Anhydrite was prior to dissolution and further developed as gypsum mould pores, at the same time promoted dolomite to dissolve and improve reservoir, when it developed along with dolomite. In terms of different lithology, limestones were more likely to occur burial dissolution than dolomite and transitional rock types. The burial dissolution rates and intensity of calcarenite and gypsodolomite were superior compared with other rock, thus when they inherited the pre-existing pores conducted by the early selective corrosion pore and modulated, superposed with late burial karstification, they were able to become high quality reservoirs based on the analysis in combination with the actual geological conditions.

**Key words:** carbonate rocks; burial dissolution; simulation experiment; petrofabric; Ordovician; Ordos Basin