

# 深层碳酸盐岩原位模拟实验及勘探启示

## ——以川东北地区二叠系为例

王明筏, 陈超

(中国石化勘探分公司)

**摘要** 关于川东北深层海相碳酸盐岩溶蚀型孔隙的成因,主要有两种观点:早期的大气淡水溶蚀和浅埋藏白云石化以及晚期的深埋藏流体溶蚀。以二叠系石灰岩和白云岩为例,通过原位模拟实验分析得知:随着埋深、温度的增加,方解石和白云石均趋向于胶结而不是溶蚀,其中方解石胶结程度更高。因此判定深部碳酸盐岩储层总体上发生溶蚀作用而形成孔隙的可能性较小,早期的成岩作用才是形成次生溶蚀的关键。

**关键词** 四川盆地;二叠纪;碳酸盐岩储层;孔隙成因;溶蚀;胶结;原位模拟实验

**中图分类号**: TE122.2

**文献标识码**: A

## 0 引言

近年来国内外深层、超深层碳酸盐岩领域勘探成果显著<sup>[1-2]</sup>,我国相继在四川盆地发现了普光、元坝等大气田,在塔里木盆地发现了顺北油田,这些油气均集中在深部碳酸盐岩储层中,次生溶蚀孔洞是这些储层的主要储存空间。

为了认识碳酸盐岩溶蚀作用发生的控制因素,国内外学者陆续开展过模拟碳酸盐岩溶蚀的实验研究。早期实验主要模拟地表环境<sup>[3-4]</sup>,后期逐渐开展了埋藏环境下的模拟实验。崔振昂等<sup>[5]</sup>、黄康俊等<sup>[6]</sup>、范明等<sup>[7-8]</sup>探讨了溶蚀程度和温度的关系;杨俊杰等<sup>[9-10]</sup>对不同温压条件下碳酸盐岩的溶解过程进行了实验模拟;黄思静等<sup>[11]</sup>进行了去白云石化作用的实验模拟;张宝民等<sup>[12]</sup>认为早期的成岩作用控制了碳酸盐岩原生孔隙的形成;Ehrenberg等<sup>[13]</sup>认为埋藏溶蚀在大多数深埋储层中并非很重要;朱光有等<sup>[14]</sup>、马永生等<sup>[15]</sup>认为热硫酸盐还原反应(TSR)产物(CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S)对碳酸盐岩的溶蚀作用,是四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式。余敏等<sup>[16-18]</sup>讨论了溶蚀与岩石孔隙及物性演化之间的关系,认

为孔隙的结构与均质性对碳酸盐岩的溶蚀和孔隙演化具有控制作用。雷川等<sup>[19]</sup>总结了碳酸盐岩埋藏溶蚀的各种观点,并归纳了溶蚀形成的标志,认为溶蚀具有区域性。方旸等<sup>[20]</sup>模拟了H<sub>2</sub>S经氧化形成的稀硫酸,在浅埋藏或近地表低温、低压环境下,经长时间作用使碳酸盐岩发生溶蚀、沉淀的过程。

前人在讨论碳酸盐岩溶蚀过程时,一般以开放环境下动力学模拟的实验为主,且大多利用相同岩样、标样制成一组实验样品,设计多组不同温度、压力的平行实验,来代表由近地表-浅埋藏-深埋藏环境中的溶蚀作用序列。这不仅不能充分反映溶蚀孔隙连续演化的实际地质过程,还不可避免地增加了实验误差。同时,反应后溶液中离子浓度的检测一般是在常温常压下,而并不是在“原位”,即埋藏环境的温度、压力条件下进行的,因而这种检测方法进一步造成了实验结果的不准确性。

目前的研究认为深部地层与外界的物质、能量交换都十分有限,相对近地表可看成半封闭-封闭的体系;而且在漫长的地质历史中,碳酸盐岩与酸性流体的反应可近似看作达到了化学平衡,因此是一个近封闭体系中的近平衡的溶蚀反应过程。本次实

收稿日期: 2017-05-24; 改回日期: 2017-12-29

本文受国家科技重大专项“四川盆地碳酸盐岩沉积、成岩与深部优质储层发育研究”(编号:2011ZX05005)、“页岩气勘探地球物理技术研究”(编号:2017ZX05036005)以及中国石化项目“川东北碳酸盐岩沉积、成岩与深部优质储层分布研究”(编号:G0800-10-ZS-130)联合资助

王明筏: 1982年生,2010年毕业于西南石油大学,硕士,工程师。通讯地址: 610400 四川省成都市高新区吉泰路688号中国石化西南科研办公基地; E-mail: wmfa1982@163.com

验采用北京大学研发的金刚石压腔实验技术,充分模拟深部地层的高温、高压、酸性封闭环境,并采用温-压联动的方式,针对相对封闭的、水-岩反应接近平衡的体系中的溶蚀情况开展讨论,同时配合显微镜“原位”连续观察不同温压条件下的溶蚀变化,从总体上体现矿物的演化程度,从而避免单因素控制碳酸盐岩的局限性;再利用拉曼(Raman)光谱“原位”(半)定量测量平衡条件下的溶蚀量,进而综合研究深部碳酸盐岩是否具有溶蚀的能力。详细的实验原理本文不再赘述,可参阅杨云坤等<sup>[21]</sup>、张单明等<sup>[22]</sup>发表的相关文章。

## 1 实验设计思路及原理

### 1.1 设计思路

针对温度单因素的控制作用,有报道称碳酸盐矿物的溶蚀程度随温度的升高而降低<sup>[23]</sup>,而压力偏高对溶蚀有利<sup>[8,23]</sup>。综合以上认识,本次溶蚀实验按照反应物差异设计了4组升温、升压实验体系(图1)。设计地温梯度25℃/km,温度为25~250℃,设计压力梯度20~40 MPa/km,压力为11~267 MPa,对应0~9 km深度(图1)。与川东北的实际地压梯度(10 MPa/km)<sup>[24]</sup>相比,本次实验的压力梯度明显偏高(图1),应更有利于储层溶蚀作用的发生。

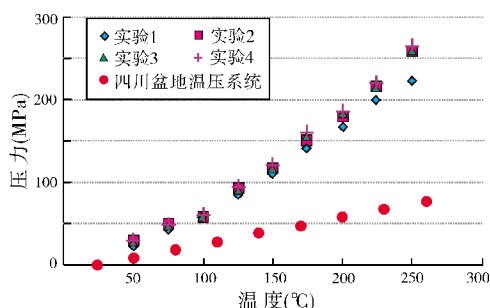


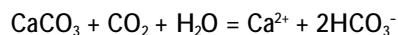
图1 本次实验温压系统和川东北温压系统对比  
实验1:  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  体系; 实验2:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  体系  
实验3:  $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{S-H}_2\text{O}$  体系; 实验4:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2\text{-H}_2\text{S-H}_2\text{O}$  体系

实验过程中每个实验点恒温半小时,至多次拉曼测量谱线不再变化,以保证样品与流体反应达到平衡。

### 1.2 原理

每组实验共计10个实验点,通过实时观察、记

录不同温压条件下碳酸盐岩的溶蚀变化,我们可以原位定量测量碳酸盐岩的溶蚀程度。以  $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  体系为例,所发生的化学反应用下式表达:



由该公式可以看到,如果我们能够准确地定量测量平衡条件下  $\text{HCO}_3^-$  的浓度变化情况,那么也就知道了平衡时  $\text{Ca}^{2+}$  的浓度变化情况,进而可以用来表征碳酸盐岩的溶蚀程度。而  $\text{HCO}_3^-$  本身具有拉曼活性<sup>[25]</sup>,通过拉曼光谱测量,采用单峰拟合的方法,我们可以对溶液中  $\text{HCO}_3^-$  离子浓度变化进行定量分析。

## 2 沉积背景及样品信息

川东北地区在晚二叠世长期属于上扬子碳酸盐岩台地的一部分,晚二叠世早期处于拉张应力环境,至长期早期断陷基本成型,并处于相对稳定状态,最终演化为开江—梁平陆棚。在开江—梁平陆棚两侧已陆续发现普光、元坝、龙岗等大气田,其主力产层的优质储层岩性以白云岩为主,石灰岩次之,孔隙类型均为次生孔。关于次生孔隙的成因存在早期成因和晚期成因两种观点<sup>[26-31]</sup>,分别对应地层浅部和深部:浅部溶蚀作用主要形成于同生-准同生期,包括大气淡水淋滤和白云石化作用;深部溶蚀作用形成于晚成岩阶段( $\text{K}_2\text{-E}$ ),即酸性流体对岩石的溶蚀作用。而争论的焦点主要集中在孔隙究竟是早期形成并保存下来的,还是晚期的酸性流体改造而成的。

本次模拟实验旨在研究  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  水溶液对不同类型碳酸盐岩的溶蚀能力,进而探讨碳酸盐岩有利储层的形成机理。配置好的  $\text{CO}_2$  水溶液饱和浓度为  $0.034\text{ mol/L}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  的饱和浓度为  $0.088\text{ mol/L}$ 。采集的碳酸盐岩样品来自川东北二叠系海相地层露头,分别为微晶白云岩和石灰岩,无明显的裂缝发育。方解石和白云石样品的化学组成见表1。将样品粉碎至200目( $75\text{ }\mu\text{m}$ )待用。

表1 样品主要化学成分含量\*

样品	CaO	MgO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
方解石	92	0.4	0.02	0.01
白云石	54	42	0.01	0.02

\* 含量为 XRF(X 射线荧光技术)分析结果

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 实验体系原位观察

各实验体系的 10 个实验点中,笔者选择少量最能反映实验中矿物增生情况的照片以作展示。

实验 1 图2a为高温高压条件下,方解石在二氧

化碳水溶液中的镜下原位观察图。从图中圆圈及方框标记处可以清晰看到,方解石的右上部边缘位置随着温度、压力的升高伴有沉淀增生现象,与25℃、11 MPa的初始温压条件对比,在250℃、223.5 MPa的条件下,该处的沉淀特征最为明显(图2a3)。

实验 2 图 2b 为高温高压条件下,白云石在二氧化碳水溶液中的镜下原位观察图。从图中圆圈及

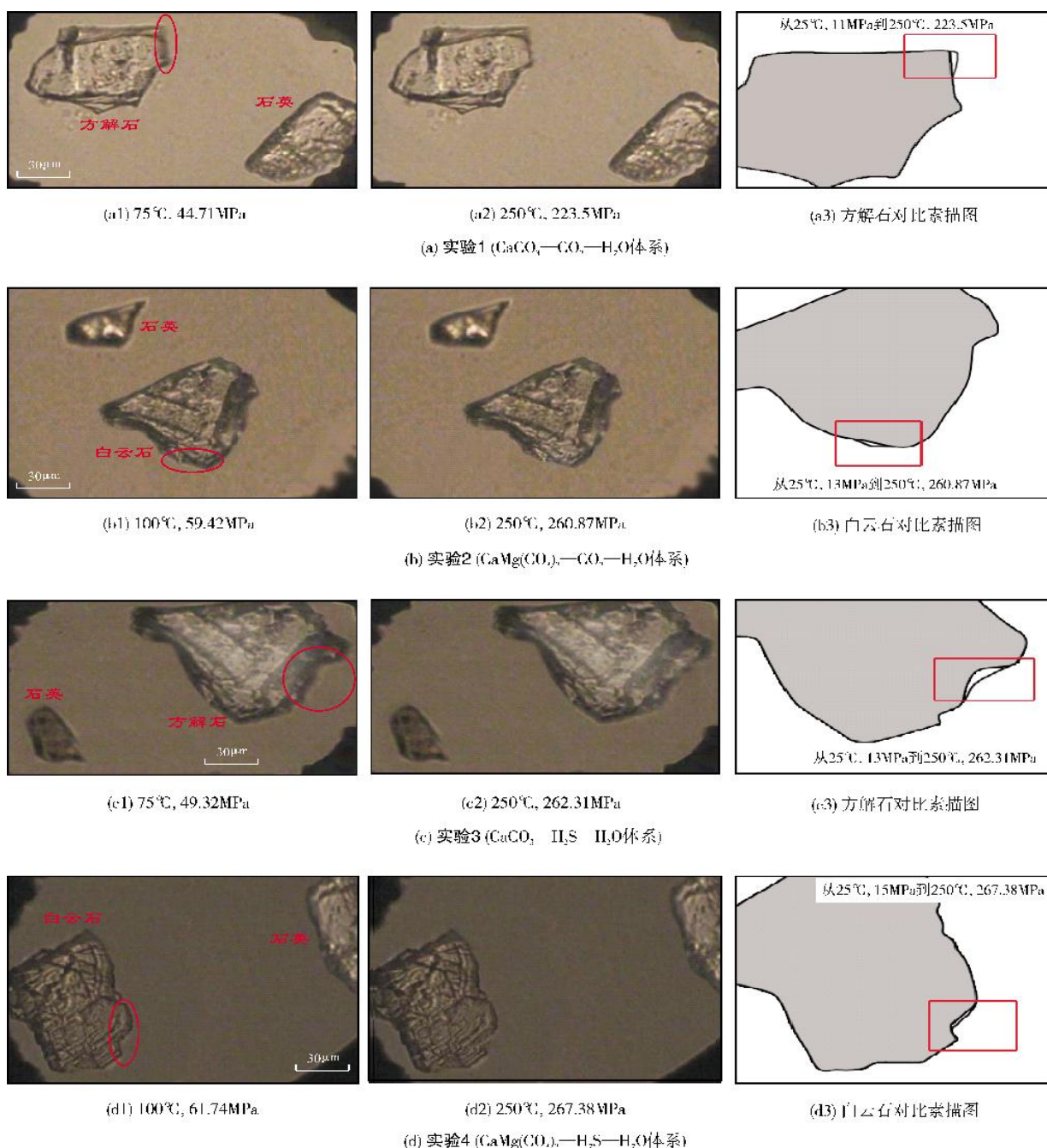


图 2 高温高压下实验原位观察图



方框标记处可以清晰看到,白云石的下部边缘位置随着温度、压力的升高伴有部分沉淀现象,具体特征在边缘位置由模糊变为清晰,且向外增生。但与相同温度条件下的方解石实验相比,增生现象并不明显(图2b3)。

**实验3** 图2c为高温高压条件下,方解石在硫化氢溶液中的镜下原位观察图。从图中圆圈及方框标记处可以清晰看到,方解石在该体系下表现出和实验1相似的变化趋势,在右下部边缘位置随着温度、压力的升高伴有部分沉淀现象,在250℃、262.31 MPa条件下,右下部凹陷部位已经变得平直(图2c3)。

**实验4** 图2d为高温高压条件下,白云石在硫化氢溶液中的镜下原位观察图。从图中圆圈及方框标记处也可以观察到白云石在该体系下表现出沉淀现象(图2d3)。

### 3.2 实验现象讨论

在对镜下原位照片半定量分析的基础上,同时利用拉曼光谱的定量分析来测定沉淀增生部位的具体面积大小,通过照片的对比分析,4组实验整体上表现出随着温度、压力的升高(埋深的增大),矿物横截面积逐渐增大(表2)并发生沉淀增生的现象。

表2 不同实验点矿物增生面积( $\Delta S$ )统计表

埋深 (km)	实验1	实验2	实验3	实验4
0	0	0	0	0
1	11	8	13	6
2	23	12	24	8
3	30	19	32	13
4	35	22	39	19
5	41	27	44	22
6	48	30	50	27
7	53	32	57	28
8	54	34	62	30
9	54	38	67	32

注:  $\Delta S$  为每个实验点矿物横截面积与初始面积的差

参见图2,上述4组实验过程中的结晶沉淀,主要表现出以下特征:一般在矿物边缘转折角度比较大的区域发生增生;增生一般只发生在矿物边缘的一处位置,面积累计增大;矿物增生过程中,

新生晶体逐渐从模糊变为清晰,且较原始矿物更为干净;而且,从实验过程来看,方解石的增生现象更为明显。

本实验是在静态环境下进行的,各种酸性溶液相对岩石样品过剩,温度、压力也超越地层的实际情况(如图1所示),因而符合地层深埋条件下封闭—半封闭的环境要求。根据实验原理,平衡反应条件下溶液中阴离子的含量与阳离子的含量相同,因此不同实验点阴离子的变化情况即可代表方解石和白云石在不同埋深的溶蚀或沉淀程度,据此通过测定溶液中阴离子的含量(图3),可以看出随着埋深的增加,4组实验都表现为阴离子含量的持续减少,因此可知碳酸盐矿物随着埋深的增加发生了沉淀(胶结)行为,这与实验原位观察的结果一致。

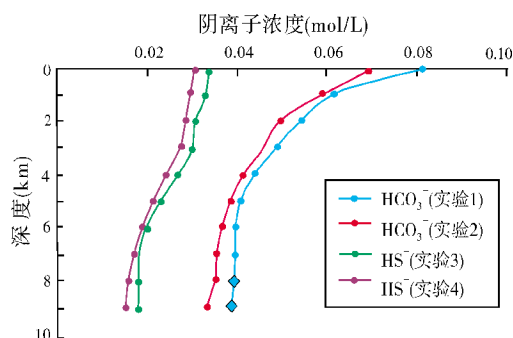


图3 溶液中阴离子浓度随温压升高(埋深加大)的变化

## 4 地质意义及勘探启示

实验结果表明,在没有外来流体的情况下,随着温度、压力的增大,碳酸盐总是趋向于沉淀,因此深部产生大规模溶蚀的几率极低,而且,在深埋封闭环境中,流体流速极低,也不具备形成大规模深埋溶蚀的条件。因此,孔隙作为川东北地区二叠系深层—超深层的主要储集空间,其成因应从多方面解释。

### 4.1 深部TSR作用的探讨

前人总结了TSR发生的三个条件:高温、充足的烃类、膏岩的存在。朱光有等<sup>[14-15]</sup>认为TSR作用是四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式。笔者认为目前有以下几点依据并不支持该观点:

(1) 由于 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{S}$ 只有溶于水后才具备溶蚀能力,且两者的溶解度在高温情况下均极小,靠这种程度的溶解酸来形成大规模孔隙的可能性不大<sup>[32-33]</sup>。

(2)从油气成藏动力学的角度来看,如果存在TSR中那样大量的流体和有机烃类所发生的反应,那么在反应之前,大量有机烃必然会被流体驱赶到别的地方(这在开发中已经是常见的提高采收率的手段(水驱油)),从而降低TSR发生的几率,尤其要注意的是,虽然储层是油气成藏的重要因素,但是油气未必是储层形成的关键因素,在这里切莫本末倒置。

(3)深部溶蚀产生大量孔隙的观点流行了30余年,这种观点认为深部溶蚀形成的孔隙度可达20%,但均未讨论这些被溶解的岩石迁移到了何处。Ehrenberg等<sup>[34]</sup>计算表明,100 m厚的石灰岩地层,1 m<sup>2</sup>的范围,如果通过深部溶蚀使得孔隙度增加1%,就需要27 000 m<sup>3</sup>的不饱和流体,在深部封闭—半封闭体系中,应难以提供如此大量的不饱和流体。由此看来,目前用来证明TSR发育的一些证据并不完全可靠,尤其是直接证据较少,因此,川东北地区深层海相储层的形成必然还有其他的作用机制。

## 4.2 成岩早期形成的优质孔隙可被保存下来

碳酸盐岩的早期成岩作用可能远比我们目前认识的更为复杂,许多学者发现古新世以来的优质碳酸盐储层是在露天、浅埋藏(大气淡水溶蚀、白云石化)环境中形成的,例如澳大利亚Marion高原白云岩储层、大巴哈马滩孔隙型白云岩。同时,不同学者也发现了大量原生孔隙在之后的埋藏过程中得到较好保存的实例<sup>[35]</sup>。这些实例给我们以良好启示,即碳酸盐岩的孔隙在早期成岩阶段发育,在后期的埋藏阶段完全有可能保留下来,并成为现今优质储层的主要贡献者。川东北元坝地区上二叠统储层孔隙度最大达25%,平均孔隙度6%,很有可能是属于大气淡水或者浅埋藏白云石化成因的。

## 4.3 对川东北油气勘探的启示

在有利的古地貌条件下,早期的成岩作用对碳酸盐岩的溶蚀将会持续很久<sup>[36-38]</sup>。由于这些溶蚀作用形成的储集空间通常较大,在后期的埋藏过程中仍有机会得到保存或继承。川东北海相地层早期的溶蚀主要存在以下几个证据:(1)流体的温度在37~55℃之间,按3℃/100m的地温梯度来计算,白云石化的深度约在300~400 m左右<sup>[39]</sup>;(2)经常可以观察

到大气淡水溶蚀所形成的铸模孔,也发现在一些较大的孔洞周围,白云石晶体边缘平直、自形程度高,并未被溶蚀,说明这些孔洞的形成时间早于白云石化作用,是大气淡水成因的;(3)前人研究认为川东北元坝地区长兴组油气充注的时间在早三叠世,据此也可以间接推断,长兴组碳酸盐岩孔隙形成的时间较早<sup>[40]</sup>。以上的证据表明,川东北地区溶孔在封闭埋藏条件下可得到较好的保存。

目前关于溶孔的大气淡水成因或者混合水成因仍有争议,例如,黄思静等<sup>[41]</sup>认为四川盆地东部晚二叠世—早三叠世海相碳酸盐岩碳同位素组成对地质时期的海水代表性较好,郑荣才等<sup>[42]</sup>认为白云岩的结构特征和微量元素地球化学特征不支持大气淡水成因或混合水作用,但基本认可浅埋藏条件下白云石化造成孔隙度增大的观点。

如何理解川东北地区深层碳酸盐岩次生溶蚀孔隙型储层的成因,本次原位模拟实验结果证实,并非是封闭体系下深层流体大规模的溶蚀作用而形成,更可能是浅埋藏条件下白云石化形成的次生孔隙,如图4所示,在深埋条件下经过一系列成岩作用后保存下来的,当然在裂缝发育条件下的半开放体系中,深层热液流体也可造成先存的孔隙空间一定程度地扩大溶蚀。这给油气勘探带来一些启示,从而使得通过不同沉积相带的研究来预测储层发育规律变得可能与可靠。

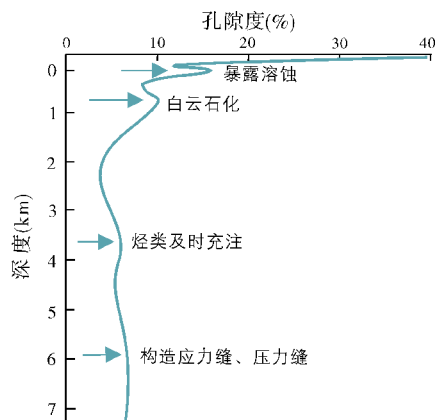


图4 川东北元坝地区孔隙度演化曲线

## 5 结 论

(1)对川东北二叠系石灰岩和白云岩样品开展原位实验模拟,初步证实在深埋条件下碳酸盐岩随

埋深增加而趋向于胶结。

(2) 通过不同实验点样品的形状对比和面积测定, 可知白云石比方解石更稳定, 矿物增生更弱, 而孔隙更容易保存, 这也可以定性解释白云岩储层更容易形成高产气藏。

(3) 深部碳酸盐岩溶蚀孔隙形成机理的解释, 不应该只着眼于深部酸性流体的溶蚀作用, 更应该从近地表或者浅埋藏条件方面着手, 早期的成岩作用才是形成次生溶蚀的关键, 而沉积相控制着储层的发育规模, 故应进一步探索沉积相的展布对孔隙的控制作用, 以及次生孔隙在深埋条件下的演化规律。

#### 参考文献

- [1] 妥进才. 深层油气研究现状及进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 565-571.
- [2] 石昕, 戴金星, 赵文智. 深层油气藏勘探前景分析[J]. 中国石油勘探, 2005, 10(1): 1-10.
- [3] Weyl P K. The solution kinetics of calcite[J]. The Journal of Geology, 1958, 66(2): 163-176.
- [4] Akin G W, Lagerwerff J V. Calcium carbonate equilibria in solutions open to the air. II. Enhanced solubility of  $\text{CaCO}_3$  in the presence of  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1965, 29(4): 353-360.
- [5] 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.
- [6] 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): 289-300.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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[J]. 沉积学报, 1995, 13(4): 83-88.
- [10] 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.
- [11] 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 去白云化作用机理的实验模拟探讨[J]. 成都地质学院学报, 1993, 20(4): 81-86.
- [12] 张宝民, 刘静江, 边立曾, 等. 礁滩体与建设性成岩作用[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 270-289.
- [13] Ehrenberg S N, Nadeau P H. Sandstone vs carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(4): 435-445.
- [14] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造: 四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2182-2194.
- [15] 马永生, 郭彤楼, 朱光有, 等. 硫化氢对碳酸盐岩储层溶蚀改造作用的模拟实验证据——以川东飞仙关组为例[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊): 136-141.
- [16] 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.
- [17] 寿建峰, 余敏, 沈安江. 深层条件下碳酸盐岩溶蚀改造效应的模拟实验研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 860-868.
- [18] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 564-572.
- [19] 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.
- [20] 方畅, 谢淑云, 何治亮, 等. 基于岩石薄片的鲕粒碳酸盐岩地球化学溶蚀[J]. 地球科学, 2016, 41(5): 779-792.
- [21] 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.
- [22] 张单明, 秦善, 刘波, 等. 碳酸盐岩- $\text{H}_2\text{S}$ 平衡体系原位溶蚀模拟实验及其地质意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2015, 51(4): 745-753.
- [23] 韩宝平. 任丘油田热水喀斯特的实验模拟[J]. 石油实验地质, 1991, 13(3): 272-279.
- [24] 赵文智, 汪泽成, 王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理[J]. 地质评论, 2006, 52(5): 708-718.
- [25] 中本一雄. 无机和配位化合物的红外和拉曼光谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [26] 王明筏, 张汉荣, 厚东琳, 等. 元坝地区长兴组储层特征及主控因素研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(11): 41-45.
- [27] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式——以四川普光气田为例[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1087-1094.
- [28] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181-191.
- [29] 郭彤楼. 元坝气田长兴组储层特征与形成主控因素研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2381-2391.
- [30] 李国蓉, 武恒志, 叶斌, 等. 元坝地区长兴组储层溶蚀作用期次与机制研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 709-717.
- [31] 张建勇, 周进高, 潘立银, 等. 川东北地区孤台地飞仙关组优质储层形成主控因素——大气淡水淋滤及渗透回流白云石化[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 9-18.
- [32] 黄思静, Hairuo Qing, 胡作维, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组硫酸盐还原作用对碳酸盐成岩作用的影响[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 815-824.
- [33] Heydari E. Meteoric versus burial control on porosity evolution of the Smackover Formation[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87

- (11): 1779-1797.
- [34] Ehrenberg S N, Walderhaug O, Bjørlykke K. Carbonate porosity creation by mesogenetic dissolution: Reality or illusion?[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2): 217-233.
- [35] 张学丰, 石开波, 刘波. 保持性成岩作用与深部碳酸盐岩储层孔隙的保存[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 80-85.
- [36] 雷卞军, 强子同, 陈季高. 川东上二叠统生物礁成岩作用与孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(4): 364-375.
- [37] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 元坝气田长兴组—飞仙关组礁滩相储层特征和形成机理[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1001-1010.
- [38] 马永生, 牟传龙, 郭彤楼, 等. 四川盆地东北部长兴组层序地层与储层分布[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 179-185.
- [39] 田永净, 马永生, 刘波, 等. 川东北元坝气田长兴组白云岩成因研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2766-2776.
- [40] 张元春, 邹华耀, 李平平, 等. 川东北元坝地区长兴组流体包裹体特征及油气充注史[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(3): 250-251.
- [41] 黄思静, 黄可可, 吕杰, 等. 早三叠世海水的碳同位素组成与演化——来自四川盆地东部的研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(10): 1508-1522.
- [42] 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(4): 78-85.

编辑: 董庸

## In-situ Simulations and Experiments of Deep Carbonate Rocks and Its Implications for Exploration: Take Permian Samples in Northeast Sichuan as an Example

Wang Mingfa, Chen Chao

**Abstract:** There are two viewpoints about the genesis of dissolution pore in deep marine carbonate rocks in Northeast Sichuan as follows: (1) Early meteoric water and shallow burial dolomitization; (2) Late burial dissolution of fluid. Through in-situ simulations and experiments on Permian samples, it shows that with the increase of depth and temperature, calcite and dolomite are tend to be cement rather than dissolution, and the calcite cement is of greater extent. Therefore, the possibility of deep dissolution is few, while the early diagenesis is the key to the formation of secondary dissolution. The sedimentary facies of marine strata and the evolution law of secondary pores in deep burial stage should be further explored.

**Key words:** Carbonate reservoir; Pore genesis; Dissolution; Cementation; Deep burial condition; In-situ simulation; In-situ experiment; Permian; Sichuan Basin

**Wang Mingfa:** MSc, Geological Engineer. Add: Sinopec Southwest Scientific Research Base, 688 Jitai Rd., Chengdu, Sichuan 610400, China