

文章编号:0253-9985(2011)04-0499-07

碳酸盐岩溶蚀窗的形成及地质意义

范明¹,何治亮²,李志明¹,俞凌杰¹,张文涛¹,刘伟新¹,蒋小琼¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所,江苏 无锡 214151;

2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:设计了温度压力同时变化的溶蚀模拟实验,得到了一组近似箱状曲线的溶蚀率变化曲线。溶蚀作用在开始阶段随温度、压力的上升,溶蚀率上升,在60~120℃(13~31MPa)形成一个高峰箱顶。该曲线表明,在一定深度(溶蚀窗)范围内,CO₂对碳酸盐岩的溶蚀能力保持在较高的水平。而当深度进一步增加时,溶蚀能力急剧下降,当埋深相当于4 000 m左右时,溶蚀能力达到最低,此时的溶蚀能力仅比常温下略高一些。该溶蚀试验结果对于深埋溶蚀作用的理解及有利储层的预测有着重要的意义。

关键词:溶蚀作用;模拟实验;碳酸盐岩;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Dissolution window of carbonate rocks and its geological significance

Fan Ming¹, He Zhiliang², Li Zhiming¹, Yu Lingjie¹, Zhang Wentao¹, Liu Weixin¹ and Jiang Xiaoqiong¹

(1. Wuxi Research Branch of Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China;

2. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: Box-shaped variation curves of dissolution rates of carbonate rocks in CO₂ aqueous solution were obtained from simulated dissolution experiments designed with simultaneously changing temperature and pressure. It shows that the dissolution of carbonate samples increases with rising temperature from the very beginning and then forms a box-like plateau when the temperature reaches 60-120℃ and pressure reaches 13-31 MPa. The curves indicate that the dissolution rate of carbonate rocks in CO₂ aqueous solution remains high within a certain burial depth range (the so-called dissolution window) of the carbonate rocks. When the depth is beyond the upper bound of the range, the dissolution rate declines rapidly and reaches the lowest point (only a little bit higher than that at room temperature) at the depth of about 4 000 meters (150℃, 41 MPa). The experiment and its results bear great significances for a better understanding of carbonate reservoirs and a more accurate prediction of favorable exploration targets.

Key words: dissolution, simulating experiment, carbonate rock, Sichuan Basin

碳酸盐岩的溶蚀孔隙及大型的洞穴是重要的油气储集空间,在含CO₂流体的作用下,随着地层温度、压力的变化,其溶解平衡会不断被打破和重建,矿物会在一个地方发生溶解,而在另一个地方发生结晶。为了进一步了解碳酸盐岩溶蚀与重结晶的条件、过程及其控制因素,从20世纪70年代以来,国外不少学者相继开展了有关碳酸盐岩的溶蚀模拟实验,Sjoberg等(1984)在1~62℃和

pH值2.7~8.4的水溶液条件下进行了方解石的溶解动力学实验,结论认为方解石的溶解与温度有着较好的相关性,方解石的表面化学反应速率常数随着温度的降低而增加^[1];Amrhein等(1985)提出方解石的溶解能力主要受CO₂分压的影响,CO₂分压的增加会导致方解石溶解度的增加^[2];Pokrovsky等(2005)系统研究碳酸盐矿物(包括方解石、白云石和菱镁矿)在25℃和CO₂分

收稿日期:2011-05-02。

第一作者简介:范明(1964—),男,博士、高级工程师,石油地质勘探。

基金项目:国家自然科学基金项目(40739904,40739902,40172099);国家科技重大专项(2008ZX05005)。

压为 0 ~ 50 MPa 的条件下的溶解动力学,表明碳酸盐矿物的溶解与 H_2CO_3 水合物的浓度并不成比例,同时也只是较弱地依赖于 CO_2 分压^[3]。针对温度与压力及 CO_2 分压的这些实验均存在一定的局限,如 Sjöberg 的实验,实验温度最高只到 62℃,而笔者前期的实验从常温到 200℃,其实验结果及结论也与之截然不同, CO_2 分压在地质过程中的意义并不重要,因为在深埋条件下并不存在气液两相,决定溶解能力因素不是 CO_2 分压,而是地层流体的温度及压力。

20 世纪 90 年代以来,国内也开展了这方面的工作,祝凤君(1990)系统讨论了碳酸盐岩裂隙溶蚀反应动力学的实验结果^[4];但实验是在玻璃仪器中进行的,无法模拟地质条件下的高温、高压。黄尚瑜等(1991)讨论了不同温度条件下碳酸盐结晶沉淀^[5],是从另一个侧面对溶蚀作用进行了一定的研究,但温度、压力条件相对较低;杨俊杰等(1995)、黄思静等(1996)开展了地层条件下白云岩的溶解及其石膏影响的实验模拟^[6],认为在高温高压条件下白云石比方解石更易溶蚀;王一刚等(2006)研究发现碳酸盐岩本身的结构特别是白云岩的粗晶结构对其侵蚀速率有巨大的影响^[7];陈彦华等(1998)对碳酸盐岩深溶作用动力学模拟实验进行了研究,认为热对流循环才是碳酸盐岩溶蚀的主要途径^[8];黄康俊等(2011)对碳

酸盐岩的溶解动力学进行了实验研究^[9],其最高温度仅为 100℃,所以对动力学参数仅在 100℃ 以下有效,而大于 100℃ 时侧要通过实验另行计算。

笔者对于温度和压力单因素的模拟实验得到的结论是:恒压条件下,在常温到 200℃ 之间, CO_2 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀会在 60 ~ 90℃ 之间达到溶蚀高峰;在恒温条件下, CO_2 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀会随压力的增加而增加,但是,当压力大于 34 MPa 后,压力对溶蚀作用的影响变得较弱^[10-11]。本次实验采用温度、压力同时变化的方式以逼近真实地质作用过程,对溶蚀作用进行了研究,探讨了溶蚀作用的对储层发育的影响。

1 实验装置

本次实验采用的仪器设备与以前的实验相同,为自主设计的 SYS-1 型碳酸盐岩溶蚀速率测定仪,(图 1),高压釜内设计 6 个样品管,样品管采用石英材质,管底采用 80 目石英砂心烧结,在样品管顶部加聚四氟乙烯盖子,中央留有小孔,可让流体流入,同时也可阻止样品管内的流体与釜内流体发生离子交换,出口端设计 6 个微调阀门用以控制出口流量,高压釜外采用管式炉加温,恒温温度可达 200℃,6 个样品管均处于同一压力系统内,且相对开放。

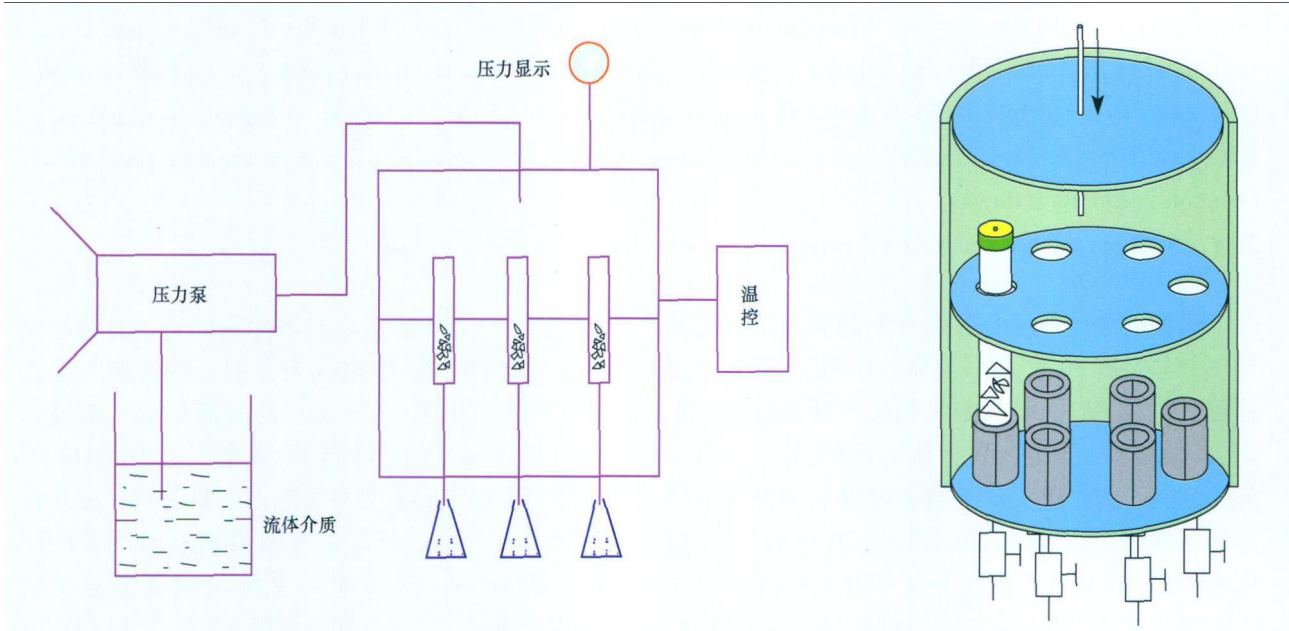


图 1 碳酸盐岩深埋溶蚀能力对比模拟实验装置流程示意图
Fig. 1 Flow chart for the simulating experiment of carbonate rock dissolution capacity with burial depth increasing

2 酸性溶液的配制

考虑到大多数碳酸盐岩的初始沉积环境为海相,本次溶蚀试验均采用青岛海水作为溶剂,并对海水中的 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 离子含量进行了分析,三者分别为 2 370.31,387.01,1 136.13 mg/L。

CO_2 水溶液的配制流程如图 2, CO_2 溶解度的影响因素较多,如气液体系的绝对压力和液体的温度, CO_2 气的纯度和液体中存在的溶质的性质,气体和液体的接触面积和时间。这些均可直接影响 CO_2 在水中的溶解度,考虑上述因素的影响,在向液体中加入 CO_2 时由容器下部通入,使其穿过流体并由顶部逸散,这实际上是增加了 CO_2 与流体的接触面,能使 CO_2 充分溶解于海水中,通气 10 min,将 CO_2 中间容器的顶部接口关闭,调节 CO_2 钢瓶的出口压力。保持压力在 0.1 MPa,并保证每批样品 CO_2 分压一致,因为 CO_2 的分压决定了 CO_2 在水中的溶解度。在容器顶部接精密压力表以观察中间容器通气后在液面之上 CO_2 的压力,根据亨利定律, CO_2 的溶解度与其分压成正比,由化学手册可查得 CO_2 在 0.1 MPa(常压),不同温度下的溶解度,从表 1 中参数可以计算出 25℃时的溶解度介于 1.28 与 1.75 g/L 之间,约为 1.5 g/L,也就是说重量百分

表 1 0.1 MPa 不同温度条件下 CO_2 的溶解度
Table 1 Dissolubility of CO_2 under pressure of 0.1 MPa and varying temperatures

温度/℃	0	10	20	30	40	50	60
CO_2 溶解度/ ($\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$)	1 713	1 194	878	665	530	436	359
CO_2 溶解度/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	3.67	2.47	1.75	1.28	0.99	0.79	0.63

浓度 0.15%,当外加 0.1 MPa,溶液的 CO_2 绝对分压为 0.2 MPa,所以其重量百分比浓度也就相当于 0.3%。

3 样品选择与前处理

在溶蚀试验过程中,样品的外比表面积是一个重要的影响因素,外比表面积越大,溶蚀速率就越高,要比较不同样品之间的溶蚀速率,首先要求样品的外比表面积相等,本次碎样采用两级筛网过筛,粒径范围为 2.8~4.0 mm,由于样品的粒径范围较小,每份样品的外表面积差异也就很小,从而减少实验中的因粒度差异而引起的误差,确保实验数据的可比性。本次实验所采用的样品分别为灰岩,白云岩及含泥质白云岩,其中粗颗粒纯灰

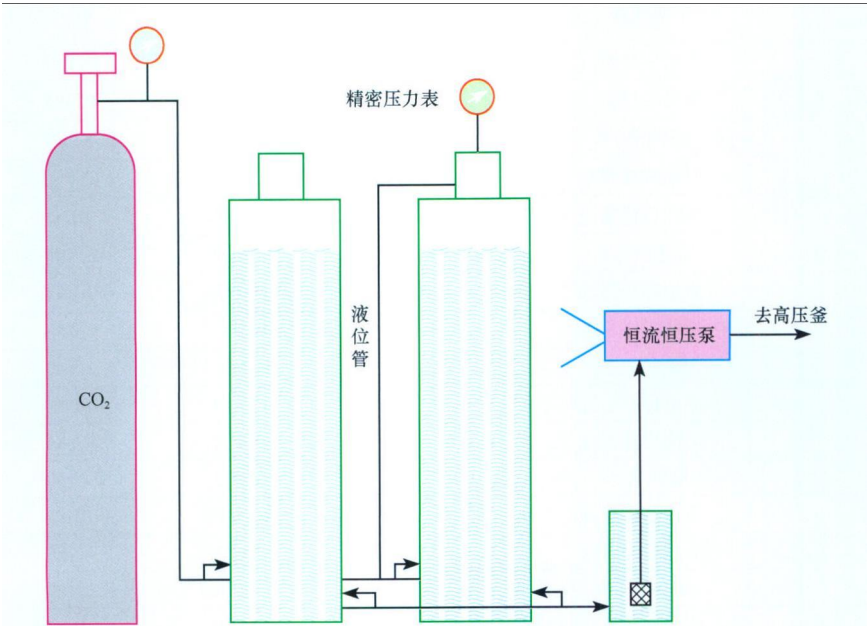


图 2 CO_2 水溶液配制流程图

Fig. 2 The flow chart for preparing CO_2 aqueous solution

岩与纯灰岩样为同一样品,但粒径为 4.0 ~ 6.0 mm,用以比较不同的粒径对溶蚀作用的影响。

4 实验结果及讨论

假定每百米地温梯度为 3℃,对于温度与压力同时变化的模拟实验,设计了如下温度压力点: 1)3 MPa,30℃;2)13 MPa,60℃;3)22 MPa,90℃; 4)31 MPa,120℃;5)41 MPa,150℃;6)48 MPa, 165℃。

将每个样品称取 10g 放入样品管,将样品管装入高压釜内的相应位置,以 8 mL/min 的速度向高压釜内注入流体。人工不断调节高压釜下方出口端阀门的流量,使每个样品出口端的流速基本保持在 2 mL/min,这样可以保持釜内压力不变,每个样品的总流量为 100 mL(表 2)。

实验表明:恒压条件下,在常温到 200℃之间, CO₂ 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀会在 60 ~ 90℃之间达到溶蚀高峰;在恒温条件下,CO₂ 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀会随压力的增加而增加,当压力大于 34 MPa 后,压力作用变得较弱。那么当温度与压

力同时模拟地层条件进行变化时,当温度达到 60℃后,由于温度的作用会使溶蚀能力下降,而压力的作用会使溶蚀能力上升,所以最终得到了一组近似箱状的曲线(图 3)。

该曲线表明,当碳酸盐岩沉积之后,随着埋溶的不断加大,地层温度不断升高,当温度达到 60℃、压力达到 13 MPa 左右时,CO₂ 对碳酸盐岩的溶蚀能力达到最大,而后溶蚀能力保持近似不变,直至温度达到 120℃,压力达到 41 MPa 左右时,溶蚀能力开始下降,当温度达到 150℃,压力达到 41 MPa 左右时,溶蚀能力变得最小,之后,随温度压力的变化溶蚀能力变得较弱。

模拟实验结果表明,碳酸盐岩在埋藏过程中,存在 4 种不同的溶蚀区间。第一个区间是常温到 60℃左右,在该区间内,随着埋深的加大,CO₂ 水溶液对碳酸盐岩溶蚀能力越来越强;第二个区间是 60 ~ 120℃左右,该区间内 CO₂ 水溶液对碳酸盐岩溶蚀能力基本保持不变,维持一个较强的溶蚀能力,形成一个强溶蚀窗;第三个区间是 120 ~ 150℃左右,该区间内随着埋深的加大,CO₂ 水溶液对碳酸盐岩溶蚀能力急剧下降;第四个区间是 150℃以上,该区间内 CO₂ 水溶液对碳酸盐岩溶蚀

表 2 温度、压力同时变化时 CO₂ 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀结果

Table 2 Dissolution of carbonate rocks in CO₂ aqueous solution with simultaneously changing temperature and pressure

实验条件	样重及 溶蚀率	纯灰岩	含泥灰质 白云岩	纯白云岩	粗颗粒 纯灰岩
3 MPa 30℃	原始称样量/g	10.006	10.002	10.008	10.006
	溶蚀后样重/g	9.610	9.806	9.884	9.753
	溶蚀率, %	3.958	1.960	1.239	2.528
13 MPa 60℃	原始称样量/g	10.006	10.000	10.003	10.000
	溶蚀后样重/g	9.220	9.529	9.682	9.413
	溶蚀率, %	7.855	4.710	3.209	5.870
22 MPa 90℃	原始称样量/g	10.003	10.009	10.000	9.996
	溶蚀后样重/g	9.251	9.533	9.686	9.388
	溶蚀率, %	7.518	4.756	3.140	6.082
31 MPa 120℃	原始称样量/g	10.006	10.001	10.000	10.007
	溶蚀后样重/g	9.280	9.458	9.586	9.359
	溶蚀率, %	7.256	5.429	4.140	6.475
41 MPa 150℃	原始称样量/g	10.008	10.005	10.000	10.000
	溶蚀后样重/g	9.639	9.693	9.787	9.655
	溶蚀率, %	3.687	3.118	2.130	3.450
48MPa 165℃	原始称样量/g	10.007	10.002	10.003	10.005
	溶蚀后样重/g	9.674	9.697	9.797	9.693
	溶蚀率, %	3.328	3.049	2.059	3.118

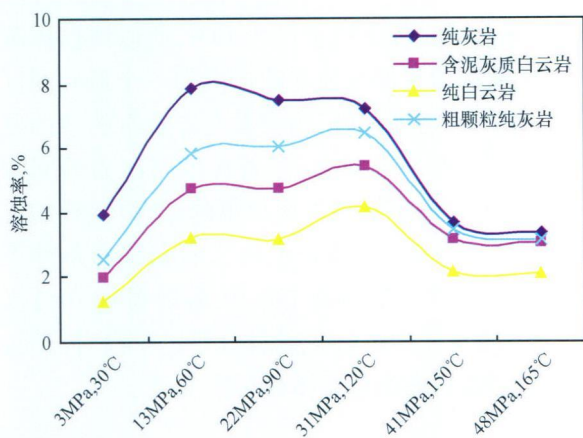


图3 温度、压力同时变化时CO₂水溶液
碳酸盐岩溶蚀作用曲线

Fig. 3 Dissolution curves of carbonate rocks in CO₂
aqueous solution with simultaneously changing
temperature and pressure

能力维持一个较低的水平。

在溶蚀窗内,白云石与方解石的溶蚀变化趋势有着明显的差异,随着温度与压力的同时升高,方解石的溶解能力逐渐下降,而白云石的溶蚀能力逐渐上升,也就是说,在地质条件下,随着埋藏深度的增加,方解石在60℃左右就达到了溶蚀峰后溶蚀能力有下降的趋势,而白云石则要到120℃左右才达到溶蚀高峰,然后突然下降,在达到120℃之前,深埋藏的白云石比浅埋藏的白云石容易被溶蚀。但溶蚀能力始终是方解石大于白云石。

根据蔡杰兴(1993)热化学计算的结果,当温度、压力和水中CO₂的浓度相同时,方解石、白云石和菱铁矿在水的溶解度大小顺序是方解石>白云石>菱铁矿^[12],这与本实验的结果完全吻合。

5 溶蚀窗与包裹体均一温度

在溶蚀窗中,理论上为最大溶蚀区间,但是当流体进入这一区间后也同样会很快饱和,如果溶蚀窗的箱顶不是一条水平直线,那么在埋藏或抬升过程中,这种饱和流体同样会发生碳酸盐岩的沉淀作用,而这种沉淀作用的过程则比较缓慢,容易形成较大的晶体,从而形成大量的碳酸盐岩包裹体;而在常温到60℃区间,主要是一个随埋深加大而产生溶蚀的区间,但当抬升进入该区间则可

形成低温包裹体,但总体上看,这种低温包裹体较少;而当温度大于150℃后,流体中的碳酸盐浓度已变得很低,即使发生沉淀作用,其量也比较少,所以在这个温度区间内包裹体数量也相对较少,这可以从多个盆地的碳酸盐岩包裹体频率图得到证实。如单秀琴等(2006年)对塔中奥陶系碳酸盐岩中流体包裹体进行了分析,其均一温度区间为60~100℃^[13];储同庆等(1991)在研究胜利油田义东礁丘相碳酸盐岩包裹体时,得到的均一温度值主要分布在100~130℃范围内,最大值小于160℃^[14]。秦建中等(2008年)在对川东北地区多口钻井岩心样品包裹体均一温度进行研究后划分出3期包裹体^[15]:第一期主要是充填在白云岩重结晶后晶间溶洞的亮晶方解石中的流体包裹体,盐水包裹体均一温度分布在96~130℃之间,主峰温度在106~116℃之间;第二期主要是产于方解石脉及溶蚀充填方解石中的包裹体,盐水包裹体均一温度分布在139~161℃之间,主峰温度在146~156℃之间;第三期主要是产于溶洞石英晶体及方解石脉中的包裹体,盐水包裹体均一温度分布在174~216℃之间,主峰温度在180~195℃之间,这与模拟实验的结果非常吻合,这3期包裹体分别对应着溶蚀曲线上的溶蚀窗阶段、埋藏沉淀阶段和高温沉淀阶段,其中高温沉淀阶段是碳酸盐岩包裹体就相对较少,而石英包裹体大量增加。

6 溶蚀窗的地质意义

碳酸盐岩在成岩过程中,如果没有抬升至地表接受大气淡水的淋滤作用而直接向下埋藏,那么处于浅埋藏阶段时,并不能发生大规模溶蚀,只有埋藏至1300m左右(相当于60℃,13MPa)时,才能开始形成大量溶蚀孔隙,当碳酸盐岩处于1300~3100m左右的埋深时,可产生大量的溶蚀孔隙,如果地层流体活动频繁,新鲜的流体不断补充,就有可能形成优质储层,那么对于埋藏史的研究就成为关键,如果碳酸盐岩在埋藏过程中,在深度3100~4100m区间内,随着埋温深的加大,溶蚀能力很快下降,当深度大于4100m左右后,溶蚀能力基本维持一个较低的水平,变化较小。

当地层埋深大于4100m左右、流体温度大于

150℃后,流体的溶蚀能力变得很低,表明这种流体中的碳酸盐浓度也很低,但是当地层的抬升或流体的循环作用又进入强溶蚀区,那么这种先期的低浓度流体在进入低温区后,会有较强的溶蚀能力,所以经过深埋或高温的含CO₂的流体,在抬升反转进入低温区后,可以产生较强的深埋溶蚀作用,为储层的发育提供良好的条件。

吕修祥(2005)对塔中地区下古生界的流体包裹体测温结果表明,在塔中I号断裂带周围的一些探井均存在一组高温数据,温度范围为122~288℃,明显受过热流体影响。这是由于该井处于断裂附近,深部热流体可以沿断裂上升,发生碳酸盐矿物的胶结、交代或重结晶,形成高温包裹体,这也证实了本这验的抬升沉淀过程是存在的^[16]。朱东亚等(2009)对塔里木盆地寒武系一下奥陶统白云岩进行了研究,发现中-粗晶白云岩中的流体包裹体均一温度主峰区间为160~200℃^[17],这也是在溶蚀窗上降温溶蚀阶段形成的包裹体。郑和荣等(2009)对塔河油田成岩演化史进行了研究^[18],将其与本研究的溶蚀窗进行对比发现,塔河油田奥陶系晚海西至燕山期末,一直处于溶蚀窗的强溶蚀箱顶,所以形成了优质储层。对于塔里木盆地奥陶系碳本以盐储层的研究,还有不少例证表明长期处于溶蚀窗的强溶蚀区间是储层形成的有利条件^[19-23]。

本实验是基于每百米地温梯度为3℃的假定,当地温梯度变小时,压力作用将更将明显,那么溶蚀窗的箱顶所对应的深度会变大,如果每百米地温梯度小于3℃则可能出现相反的情况。

通过笔者前期对碳酸盐岩温度、压力单因素的溶蚀模拟实验及本次模拟碳酸盐岩地层埋藏过程的温度、压力同时变化溶蚀模拟实验,对碳酸盐岩在成岩过程中的溶蚀与沉淀过程有了一个清楚的认识,碳酸盐岩溶蚀窗对于碳酸盐岩优质储层的形成有着重要的意义,特别是对于深埋溶蚀作用的认识有着重要的意义。

7 结论

碳酸盐岩在成岩作用过程中,随着埋深的加大,会形成一个溶蚀高峰窗,该窗体范围埋深约为1 300~3 100 m(每百米地温梯度若小于3℃,窗体深度范围将会适当增加),与有机质生油窗较为吻

合,由于生烃过程中也会产生CO₂,所以该窗体范围是碳酸盐岩深埋溶蚀孔隙形成的一个最有利区间。但是,在溶蚀窗内,白云石与方解石的溶蚀变化趋势有着明显的差异,随着温度与压力的同时升高,方解石的溶解能力逐渐下降,而白云石的溶蚀能力逐渐上升,也就是说白云岩在深埋条件下比浅埋藏条件更容易溶蚀。从溶蚀窗的高温段看,当温度大于200℃后,流体几乎已中没有溶质,所以碳酸盐岩高温包裹体相对较少。

参 考 文 献

- [1] Sjöberg E L, Rickard D T. Temperature dependence of calcite dissolution kinetics between 1 and 62℃ at pH 2.7 To 8.4 in aqueous solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 485-493.
- [2] Amrhein C, Jurinak J J, Moore W M. Kinetics of calcite dissolution as affected by carbon dioxide partial Pressure [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49: 1393-1398.
- [3] Pokrovsky O S, Golubev S V, Schott J. Dissolution kinetics of calcite, dolomite and magnesite at 25℃ and 0 To 50 atm pCO₂ [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217: 239-255.
- [4] 祝凤君. 碳酸盐岩裂隙溶蚀反应动力学实验的结果与讨论 [J]. *中国岩溶*, 1990, 9(1): 42-51.
Zhu Fengjun. Corrosion-reaction kinetics of carbonate rock fissures-results of experiment and discussion [J]. *Carsologica Sinica*, 1990, 9(1): 42-51.
- [5] 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 去白云化作用的实验模拟探讨 [J]. *成都地质学院学报*, 1993, 20(4): 81-86.
Huan Sijing, Yang Junjie, Zhang Wezheng, et al. Experimental approach to dedolomitization [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1993, 20(4): 81-86.
- [6] 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(3): 83-88.
Yang Junjie, Zhang Wezheng, Huan Sijing, et al. Experimental simulation for dolomite dissolution under the condition of burial temperature and proessure [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(3): 83-88.
- [7] 王一刚, 窦立荣, 文应初, 等. 四川盆地东北部三叠系飞仙关组高含硫气藏 H₂S 成因研究 [J]. *地球化学*, 2002, 31(6): 517-524.
Wang Yigang, Dou Lirong, Wen Yingchu, et al. Origin of H₂S in triassic feixianguan formation gas pools, northeastern sichuan basin, China [J]. *Geochimica*, 2002, 31(6): 517-524.
- [8] 陈彦华, 刘莺, 陈伟均. 碳酸盐岩深溶作用动力学模拟实验研究 [A] // 王庭斌. 天然气地质及勘探开发技术(7) [C]. 北京: 地质出版社, 1998. 118-128.
Cheng Yanhua, Liu Ying, Cheng Weijun. Deep dissolution kinetics' experimental simulation of carbonate rock [C] // Wang

- Tingbin. Gas Geology and Technology of Exploration and Development(7). Beijing: Geological Publishing House, 1998: 118 - 128.
- [9] 黄康俊, 王伟, 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.
- Huan 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 - 300.
- [10] 范明, 蒋小琼, 刘伟新, 等. 不同温度条件下 CO₂ 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 Weixing, et al. Dissolution of carbonate rocks in CO₂ solution under the different temperatures [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 825 - 830.
- [11] 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.
- [12] 蔡杰兴. 方解石、白云石、菱铁矿分别与含 CO₂ 水溶液反应平衡时的温度和压力[J]. 矿物岩石 1993, 13(2): 37 - 41.
- Cai Jixin. Temperature and pressure in equilibrium state while calcite, dolomite and siderite reacting on liquid water containing CO₂ respectively [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1993, 13(2): 37 - 41.
- [13] 单秀琴, 钱玲, 胡国艺, 等. 塔中奥陶系碳酸盐岩中流体包裹体特征及其在油气成藏中的应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 37 - 41.
- Shan Xiuqin, Qian Ling, Hu Guoyi, et al. Characteristics and the function for oil/gas accumulation of fluid Inclusions in ordovician carbonate in the central Tarim Basin [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(1): 37 - 41.
- [14] 储同庆, 杜韞华. 胜利油田义东礁丘相碳酸盐岩矿物包裹体的研究[J]. 石油勘探与开发, 1991, 18(5): 22 - 30.
- Chu Tongqing, Du Yunhua. A study of the carbonate inclusion in the reef phases in yidong area, Shengli Oil Field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1991, 18(5): 22 - 30.
- [15] 秦建中, 腾格尔, 杨琦, 等. 川东地区海相高演化层系的成熟度指标研究[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 208 - 213.
- Qin Jianzhong, Tenger, Yang Qi, et al. Research on maturity indicators of high-maturity marine strata in the eastern sichuan basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(2): 208 - 213.
- [16] 吕修祥, 杨宁, 解启来, 等. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 284 - 289.
- Lu Xiuxiang, Yang Ning, Xie Qil, et al. Carbonate reservoirs transformed by deep fluid in Tazhong area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 284 - 289.
- [17] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 698 - 704.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in tazhong area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(5): 698 - 704.
- [18] 郑和荣, 刘春燕, 吴茂炳, 等. 塔里木盆地奥陶系颗粒石灰岩埋藏溶蚀作用[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 9 - 15.
- Zheng Herong, Liu Chunyan, Wu Maobing, et al. Burial dissolution of ordovician granule limestone in Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 9 - 15.
- [19] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743 - 752.
- He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling factors and genetic pattern of the ordovician reservoirs in the Tahe Area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 743 - 752.
- [20] 杨玉芳, 钟建华, 陈志鹏, 等. 塔中地区寒武-奥陶系白云岩成因类型及空间分布[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 455 - 462.
- Yang Yufang, Zhong Jianhua, Chen Zhipeng, et al. Genesis types and distribution pattern of the cambrian and Ordovician Dolomites in Tazhong Area, the Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 455 - 462.
- [21] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1 - 12.
- Qi Lixin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician Carbonate Karst in Tahe Oil-field [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(1): 1 - 12.
- [22] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 810 - 818.
- Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. Ree models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 810 - 818.
- [23] 蒯军, 周芳芳, 袁国芬. 塔河地区寒武系储层深埋藏白云石化特征[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 13 - 21, 27.
- Lin Jun, Zhou Fangfang, Yuan Guofen. Features of deep-burial dolomitization of the Cambrian reservoirs in Tahe Region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(1): 13 - 21, 27.

(编辑 高岩)