

碳酸盐岩成岩作用及其对储层控制的定量评价

——以和田河气田石炭系生物屑灰岩段为例

杨 威

P61 A

(石油勘探开发研究院廊坊分院天然气地质所,河北廊坊,065007)

王清华 赵仁德 王 媛 刘效曾

(塔里木石油勘探开发指挥部研究院,新疆库尔勒,841003)

摘 要 成岩作用对碳酸盐岩储层的影响很大。石炭系生物屑灰岩段是和田河气田的主要产层,控制其储层物性的成岩作用主要有胶结作用、压实-压溶作用、白云石化作用、溶蚀(岩溶)作用和破裂作用。胶结作用和压实作用是主要的孔隙破坏者,它们破坏了几乎所有的原生孔隙和部分次生溶孔;压溶作用产生的缝合线大部分已成为油气的运移通道和储集空间;白云石化作用发生于准同生期,符合渗透回流白云石化机理,产生的大量晶间孔占储层总孔隙度的30%左右,且白云石含量与孔隙度呈正相关关系;埋藏岩溶作用主要是由硫酸溶蚀作用形成,产生的溶蚀孔隙是该储层的主要储集空间,占储层总孔隙度的37.5%以上;破裂作用产生的构造裂缝是储层渗透率的主要贡献者,它为储层提供99.6%以上的渗透率和2%~6%的总孔隙度、破裂作用是致密碳酸盐岩能够成为油气储层的必要条件。岩溶作用和白云石化作用都发育的区域应是碳酸盐岩的主要勘探目标。

关键词 储层物性 碳酸盐岩 和田河气田 塔里木盆地 定量评价

Carbonate Diagenesis and Quantitative Evaluation of Its Control over the Reservoir

——Exemplified by Carboniferous Bioclastic Limestone Member in
Hetian River Gas Field, Tarim Basin

YANG Wei

(Gas Department, Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, LangFang, Hebei, 065007)

WANG Qinhua ZHAO Rende WANG Yuan LIU Xiaozeng

(Tarim Petroleum Exploration and Development Headquarters, Karta, Xinjiang, 841003)

Abstract The influence of diagenesis on the carbonate rock reservoir is obvious and serious. The Carboniferous bioclastic limestone member is an important gas-producing formation in Hetian River gasfield in Tarim basin. Principal diageneses are cementation, compaction, pressure-solution, dolomitization, solution and fracturing, which control the reservoir properties of the bioclastic limestone member. The cementation and compaction are main pore destroyers, which destroy almost all primary pores and part of secondary solution pores. Sutures can be formed by pressure-solution and serve as reservoir space and channels for hydrocarbon migration. Dolomitization occurs in penecontemporaneous stage that coincides with the seawater seepage-reflux model. 30 percent of total porosities are provided by intercrystal porosities. The porosity has good correlation with dolomite content. The buried solution is formed by sulphuric acid and can form solution pores, which provide more than 37.5 percent of total porosities. The structural fractures make up the principal permeability contributor of the reservoir.

Key words diagenesis reservoir properties carbonate rock Hetian river gas field Tarim basin quantitative evaluation

收回日期:2001-3-10;责任编辑:宫月莹。

第一作者:杨威,男,1971年生,工程师(硕士),从事碳酸盐岩沉积储层研究,电话:(010)69213551。

和田河气田是塔里木盆地最近探明的大型碳酸盐岩气田,位于巴楚凸起玛扎塔格断裂构造带(图1)。石炭系在该区分布稳定,一般厚度为 850~1 100 m,横向上有很好的对比性;根据岩性和电性特征,由下至上可分为 8 个岩性段:砂砾岩段、下泥

岩段、标准灰岩段、中泥岩段、生物屑灰岩段、上泥岩段、砂泥岩段和小海子灰岩段,其中生物屑灰岩段约储集了该气田 70% 以上的天然气。所钻遇的生物屑灰岩段顶部埋深 1 393~2 181 m,钻揭厚度 35~61.5 m。

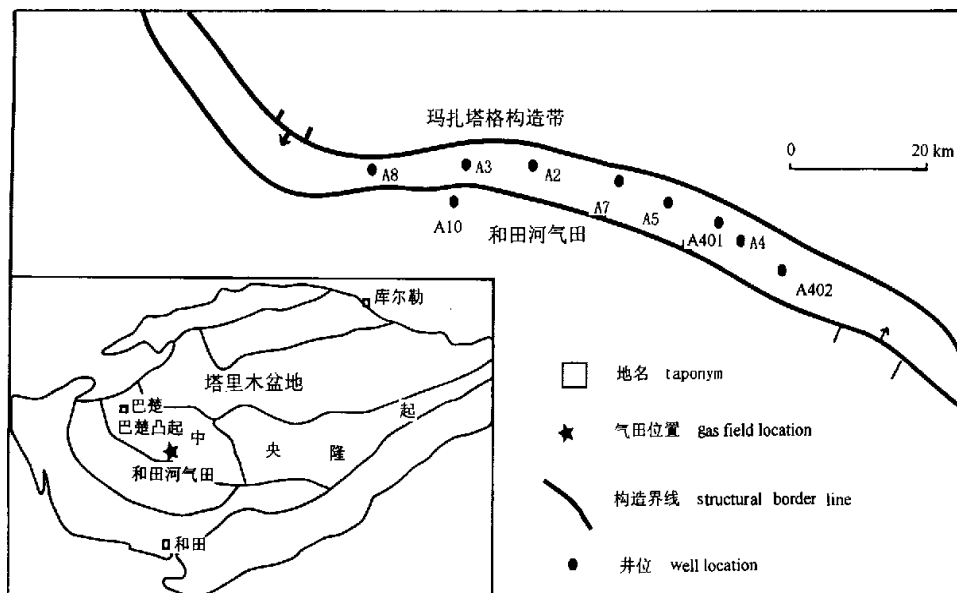


图 1 和田河气田构造位置和井位图

Fig. 1 Location of structures and wells in Hetian river gas field

区内生物屑灰岩段岩性主要为灰色-浅灰色亮晶生物屑灰岩、粉屑灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩和白云岩,灰岩中石膏斑块发育,为半闭塞台地内的台内滩沉积(顾家裕, 1994)。孔隙度分布于 0.01%~19.11% 之间,平均值为 3.55%;渗透率分布于 $0.005 \times 10^{-3} \sim 128 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $2.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔低渗性储层。主要储集空间为晶间孔、晶间溶孔、粒间溶孔、特大孔和裂缝。

生物屑灰岩段沉积后经历了长期复杂的成岩历史和一系列的成岩事件,研究表明,成岩作用对其改造强烈,控制其储集物性。主要的成岩作用有胶结、压实-压溶、白云石化、溶蚀(岩溶)、破裂等。

1 生物屑灰岩段主要成岩作用特征

1.1 胶结作用

海底胶结作用的产物有 3 种。①纤柱状方解石:垂直颗粒壁生长,形成等厚环边;②等轴粒状方解石:一般较清洁,在充填孔洞时,从孔隙边部向中

心颗粒变粗,形成晶簇状;③共轴生长方解石:常出现在棘皮碎屑颗粒周围,在阴极发光照射下,棘屑为橙黄(或桔红色),共轴生长部分变暗,呈暗红色。

埋藏胶结作用的产物有 2 种。①粒状方解石:在第一期等厚环边胶结物之外形成二世或更晚期镶嵌式胶结,充填于溶蚀孔洞中;②裂缝之中也常形成对生方解石胶结物,呈马牙状结构。晚期方解石充填物 C、O 同位素组成以偏负值为特征, $\delta^{13}\text{C} = -1.4\text{‰} \sim 0.48\text{‰}$, 平均值为 -0.67‰ ; $\delta^{18}\text{O} = -4.36\text{‰} \sim -6.5\text{‰}$, 平均值为 -5.54‰ ; 盐度指数 Z 值 [$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$] (刘宝珺等, 1994) 平均为 123.4;说明胶结作用发生在咸水环境。方解石中包裹体较多,均一温度平均为 85~90 °C,如该区现代地温梯度为 2.5 °C/100 m,推测其成岩深度约 1 500~2 500 m。

1.2 压实-压溶作用

生物屑灰岩段压实作用主要表现为颗粒紧缩呈

镶嵌接触、变形、破碎和位移等。随着埋深加大、压实增强,与之相对应的是岩石总体积减小,致密程度增加,使大部分基质微孔隙被破坏,残余孔隙度进一步减小。

压溶作用是化学压实作用,发生于晚成岩期深埋阶段,是由于压强增大,碳酸盐岩发生局部溶解产生的。主要表现为碳酸盐岩颗粒或晶面形成弯曲并呈镶嵌状,其最重要的产物为缝合线。岩心观察发现缝合线与岩石层理平行或近于平行,峰柱垂直于层面,缝宽约 2~3 mm,多分枝,呈齿状镶嵌,峰柱起伏较大,可达 2 cm,多被灰绿色含有有机质丰富的泥质充填。

1.3 白云石化作用

生物屑灰岩段发育白云质灰岩、灰质白云岩和白云岩,白云石含量 15%~98% 不等。白云岩分布不均匀,以透镜状夹于亮晶生物屑灰岩段之中,单个透镜体厚约 5~10 m,以 A2 井最典型。白云石以粉-细晶为主,半自形—它形;有序度较低,约 0.5~0.58,说明结晶时间较短;C 同位素值相对同层位的生物屑灰岩较高(表 1), $\delta^{13}\text{C}=2.58\text{‰}\sim6.35\text{‰}$,平均值为 4.25‰; $\delta^{18}\text{O}=-2.87\text{‰}\sim-5.10\text{‰}$,平均值为 -3.62‰;由公式 $Z=[(2.048\times\delta^{13}\text{C})+(0.498\times\delta^{18}\text{O})]$ 计算出的盐度指数 Z 值平均为 134.2,比同层位的生物屑灰岩盐度高(生物屑灰岩段 Z 值平均为 132);平均成岩温度 $t=34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$t=(14.8\sim5.41)\times\delta^{18}\text{O}$](郭建华等,1992),取地面温度为 20℃,其成岩深度约 500~600 m;微量元素 K、Na 比同层位的生物屑灰岩段要高(表 1)。根据这些特征及同层位沉积物中含有大量的石膏和石盐假晶,说明该白云石是准同生期的产物,符合渗透回流白云石化机理。由于沉积环境的局限,海水蒸发作用已经达到石膏沉淀点,使超咸水盐度更高, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值增高。富含 Mg^{2+} 的重盐水沿台地底向低洼地方流动,同时向海方向流动,当流动到碳酸钙沉积物的渗透带时,这种重盐水向下渗透,丰富的 Mg^{2+} 可以置换碳酸钙中的 Ca^{2+} 使白云石化作用发生。

1.4 溶蚀作用

1.4.1 层间岩溶 层间岩溶发生于同生期。石炭系生物屑灰岩段都是台地内产物,由于海平面的变化,沉积不久的沉积物可能暴露于海平面之上,接受

大气淡水和混合水的改造。其结果是在滩体的上部形成小规模的溶沟、溶洞及颗粒铸模孔,粒间孔下部被渗流粉砂半充填。这些溶蚀作用产生的次生孔隙在后期埋藏过程中全被细粒碎屑物或亮晶方解石充填。也可能在埋藏岩溶作用下,亮晶方解石再被溶解。但其对现今储层的影响不大,这类岩溶的选择性较强,受古地形高的影响较大。

表 1 A2 井生物屑灰岩段储层参数表

Table 1 Reservoir parameters of bioclastic limestone member in A2 well

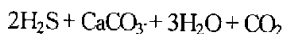
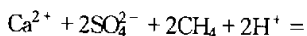
岩性	深度 m	白云石含量 %	孔隙度 %	C、O 同位素/‰		微量元素 $\times 10^{-6}$	
				$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	K	Na
白云质灰岩和灰质白云岩	1465.14	26	1.04	3.74	-3.75	1075	537
	1465.74	35	1.31	-	-	-	-
	1465.95	45	2.67	4.45	-3.29	1650	780
	1466.54	44	1.87	-	-	2290	841
	1466.86	35	0.44	3.45	-5.10	509	443
	1467.08	35	1.09	-	-	-	-
	1467.4	37	1.80	-	-	-	-
	1468.08	68	5.24	-	-	-	-
	1468.34	43	3.69	6.35	-3.11	2000	1060
	1468.54	40	2.12	-	-	-	-
生物屑灰岩	1470.4	48	4.65	-	-	-	-
	1470.75	95	7.66	4.64	-2.87	2800	1501
	平均值	46	2.8	4.53	-3.62	1720	860
	1471.25	-	0.63	-	-	-	-
	1471.39	-	2.45	2.54	-2.97	185	306
	1471.72	-	1.53	-	-	-	-
	1471.87	-	3.79	-	-	-	-
岩	1477.10	-	0.39	4.56	-3.89	850	663
	平均值	-	1.79	3.55	-3.43	517	485

样品由北京石油勘探开发研究院实验检测中心检测。

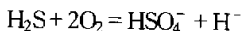
1.4.2 埋藏岩溶 埋藏岩溶发育于深埋藏期。主要特征有:①先期(包括早期和晚期)成岩产物被溶蚀,形成被溶蚀边缘或呈港湾状;②溶蚀孔、洞、缝未充填,溶蚀洞穴较大或被粗粒方解石晶簇充填;③沿岩石节理蚕食成海绵状缝洞系统;④裂缝的溶蚀扩大及与此伴生的与裂缝产状近一致分布的溶孔和溶

洞;⑤沿缝合线及其周围的溶解作用,形成的孔洞分布于缝合线附近或切穿缝合线;⑥通道不连续,与碳酸溶蚀型补水区-泄水区无关。

生物屑灰岩段残余溶蚀孔主要是埋藏溶蚀作用产生的。根据岩溶特征分析,认为其岩溶作用的产生与硫酸溶蚀作用有关。与奥陶系相比,石炭系的沉积环境发生了很大变化,生物屑灰岩段所测 $\delta^{13}\text{C}$ 平均为 $2.5\text{‰} \sim 3.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 平均为 $-4.51\text{‰} \sim -6.2\text{‰}$,盐度指数 Z 值平均为 132。生物屑灰岩段中常见到膏质沉积物或充填物,这些蒸发型矿物提供了硫酸根离子(顾家裕,1998),为硫酸岩溶水的形成提供了物质基础。其溶蚀机理如下:从蒸发岩中游离出来的硫酸根离子与天然气反应生成硫化氢



当硫化氢遇到富氧的地下水时就可以形成硫酸



硫酸溶液所接触的岩石,形成海绵状的孔洞系统。

1.5 破裂作用

破裂作用的主要产物为构造裂缝。研究区石炭系沉积以来,先后受到了 3 次大的构造运动的影响(张光亚,1998),产生了 3 期构造缝。不同期次的构造运动所产生的裂缝系统可以通过其切割关系、裂缝充填物的宏观、微观特征加以识别,并可推测构造缝与构造运动的对应关系。

第一期裂缝可能是晚海西运动的结果。以高角度缝为主,倾角大于 70° ,缝宽 $1 \sim 10 \text{ mm}$,最大可达 20 mm ,多为方解石充填或半充填,阴极发光呈紫色。晶体明亮,含大量的单相水溶液包裹体,一般为 $5 \sim 50 \mu\text{m}$,无色,不规则状,气液比为 $5\% \sim 10\%$,均一温度为 $85 \sim 95^\circ\text{C}$,平均为 90°C 。

第二期裂缝可能是印支运动的产物。宏观特征同第一期,充填的方解石阴极发光呈橙黄-桔黄色及深蓝-橙红色。晶体较明亮,多为粗晶,含黑色沥青和气态烃两相包裹体,一般为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$,浅灰褐色,不规则状,气液比为 $10\% \sim 25\%$,均一温度为 $95 \sim 105^\circ\text{C}$,平均为 100°C 。

第三期裂缝主要与喜马拉雅运动有关。其裂缝的产状不定,缝宽一般小于 1 mm ,未被充填,切割

前二期裂缝和缝合线,也曾发生过溶蚀扩大,具有明显的溶蚀边缘。

构造缝中都存在未充填的空间,这些空间可能是裂缝被溶蚀扩大未被充填(第三期),也可能是未全充填留下的空间或方解石充填物的晶间(第一、二期),空间基本上都有沥青或残余的油质,说明这些空间已发生过进油事件。

2 对储层控制作用的讨论

2.1 胶结作用是主要的孔隙破坏者

生物屑灰岩是台内滩的产物,颗粒含量高,原始孔隙度高达 $30\% \sim 40\%$,经过早期胶结作用,其原生孔隙几乎全部丧失,成岩过程中形成的溶蚀孔隙和裂缝部分被晚期胶结作用充填。胶结作用是碳酸盐岩最主要的孔隙破坏者。根据薄片中的负胶结物孔隙度可计算出海底胶结作用形成的粒状方解石使孔隙度降低约 10% 左右;据埋藏胶结物的含量计算可得,其使孔隙度降低至 3% 左右。

根据薄片中的颗粒接触关系和压实程度计算可得,经压实后基质孔隙度降至约 $1\% \sim 3\%$ 左右。

2.2 白云石化作用能提供约三分之一的孔隙

白云石化作用能产生大量的晶间孔,也为晶间溶孔的产生提供了条件。以 A2 井为例,白云质灰岩和灰质白云岩的平均孔隙度为 2.78% ^①,其周围的生物屑灰岩平均孔隙度为 1.89% (表 1),白云石化作用将储层孔隙度平均提高 0.89% ,占储层总孔隙度的 30% 左右,对低孔低渗性碳酸盐岩储层意义重大。研究中还发现,其孔隙度与白云石含量呈正相关关系,相关系数高达 0.865 (图 2),说明白云石化作用对生物屑灰岩段储层物性改造作用巨大。

2.3 溶蚀作用能提供约三分之一的孔隙

通过岩心、薄片观察发现研究区碳酸盐岩储集空间以溶蚀产生的次生孔隙为主,生物屑灰岩段硫酸溶蚀所产生的溶孔、溶洞都较大。通过铸体薄片观察可统计出储层中各种孔隙度所占的比例(表 2)。在实际制做铸体薄片时,所取的样品都位于岩心较致密部位,因此所测得的溶蚀孔隙度比实际要小一些,但溶蚀孔隙仍占总孔隙度的 37.5% 左右,说明岩溶作用对储层意义重大。

① 孔隙度为小岩心所测得的,比前述的用大岩心和全直径岩心标定的测井值要低一些,因为裂缝-孔洞性储层的小岩心一般取于岩心的较致密部位。

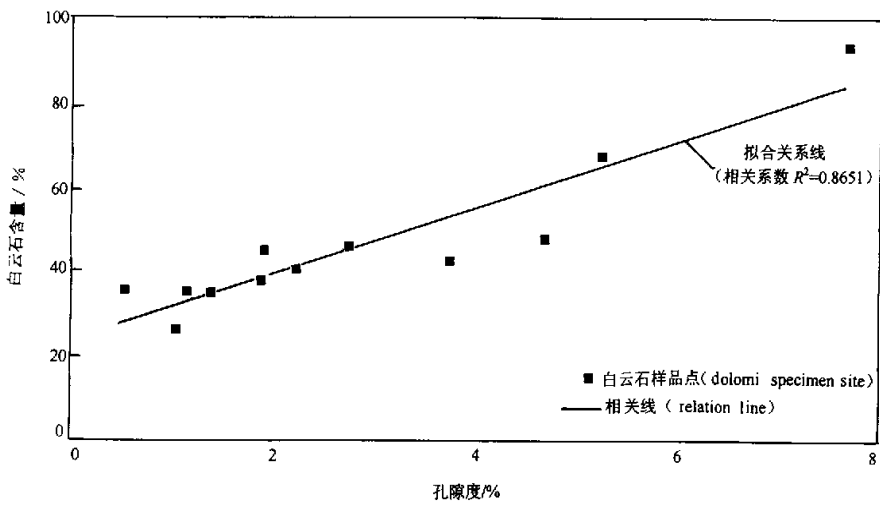


图 2 A2 井白云石含量与孔隙度关系图

Fig.2 Relationship map of dolomite content and porosity in A2 well

表 2 孔隙分类统计表

Table 2 Statistic table of different type of pore

井号	样品数 个	晶间/粒间孔 %	晶间溶孔 %	粒间/粒内溶孔 %	总孔隙度 %	溶蚀孔隙度 总孔隙度 / %
A2	10	1.38	0.25	0.67	2.3	40
A3	6	1.52	0.3	0.56	2.38	36
A4	3	1.9	0.5	0.78	3.18	40
A5	4	1.75	0.3	0.65	2.7	35
A401	5	1.02	0.1	0.4	1.52	33
总平均数		1.51	0.3	0.61	2.42	37.5

注:此表为平均面孔隙度(average face porosity)。

2.4 破裂作用提供几乎所有的渗透率

裂缝对储层的贡献主要表现在裂缝对储层总孔隙度和总渗透率的贡献方面。通过上报储量的井的孔隙度和渗透率的计算,发现裂缝提供了几乎全部的渗透率(由于小岩心样品取于岩心较致密部位,而且数量较少,代表性较差,因此,这里用大岩心和全直径岩心标定的测井值,裂缝渗透率的计算是一个探索性的难题,这里选用有裂缝的岩心及用人工造缝后测量其渗透率的方法进行实验,拟合求得裂缝宽度与裂缝渗透率的关系式,用这个关系式估算测井裂缝渗透率^⑨)(表 3)。

由表 3 可知,裂缝孔隙度占总孔隙度的 2% ~

6%,而裂缝渗透率占总渗透率的 99.8%左右,说明裂缝对储层的贡献主要表现在渗透率上,由于裂缝的存在,大大提高了储层的渗透性。基质的渗透率仅为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,如果没有裂缝,生物屑灰岩段不可能成为有效的储层,而且油气根本不能运移进这样致密的岩层。因此,对致密碳酸盐岩储层来说,裂缝是必不可少的。

另外,铸体薄片观察发现缝合线中的泥质多为半充填,存在许多缝洞,而且泥质充填物多为油质浸染(表 4),说明缝合线大部分已成为油气的储集空间和运移通道。

⑨ 吴继余等. 1998. 塔里木盆地和田河气田石炭系及奥陶系测井储层参数方法研究与储层参数计算(塔里木油田分公司内部资料)。

表 3 生物屑灰岩段储层物性参数平均值
Table 3 Averages of physical property of reservoir in bioclastic limestone member

井号	深度 m	孔隙度 %	裂缝孔隙度 %	渗透率 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	裂缝渗透率 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	基层渗透率 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	裂缝孔隙度 总孔隙度/%	裂缝渗透率 总渗透率/%
A2	1461.25~1499.125	4.45	0.26	29.67	29.64	0.03	6	99.9
A3	13930~1467.625	5.05	0.26	49.9	49.85	0.04	5	99.9
A4	1861.5~1903.875	4.15	0.08	10.15	10.13	0.02	2	99.8
A401	1986.0~2047.0	5.63	0.18	30.4	30.31	0.09	3	99.7
A5	1964.1~1994.0	3.78	0.08	18.8	18.78	0.02	2	99.9
A7	2886.1~2193.75	3.06	0.07	4.64	4.62	0.02	2	99.6

注:此表为测井值(log values)。

表 4 部分铸体薄片缝合线统计
Table 4 Statistics of sutures in some casting slices

特 征	A2 井	A3 井	A4 井	A5 井
薄片数/个	10	6	3	4
缝合线数/条	5	6	5	6
油质浸染数/条	4	5	3	4

3 结论

(1) 控制研究区生物屑灰岩段储层物性的主要成岩作用有胶结作用、压实-压溶作用、白云石化作用、溶蚀(岩溶)作用和破裂作用。

(2) 胶结作用和压实作用是主要的孔隙破坏者,它们破坏了几乎所有的原生孔隙和部分次生溶孔;压溶作用产生的缝合线大部分已成为油气的运移通道和储集空间;白云石化作用发生于准同生期,符合渗透回流白云石化机理,产生大量的晶间孔占储层总孔隙度的 30%左右,且白云石含量与孔隙度呈正相关关系;埋藏岩溶作用主要是由硫酸作用形成的,产生的溶蚀孔隙是该储层的主要储集空间,占储层总孔隙度的 37.5%以上;破裂作用产生的构造裂缝是储层渗透率的主要贡献者,它为储层提供 99.6%以上的渗透率和 2%~6%的储集空间,破裂作用是致密碳酸盐岩能够成为油气储层的必要条件。

(3)在碳酸盐岩勘探中,寻找岩溶作用和白云石化作用都比较发育的区域,将对储层成岩相平面

展布特征的系统研究十分必要。

参 考 文 献

刘宝珩,张锦泉. 1994. 沉积成岩作用. 北京: 科学出版社, 237~253.
张光亚, 宋建国. 1998. 塔里木克拉通盆地改造对油气聚集和保存的控制. 地质论评, 44(5): 511~521.
郭建华, 覃汉生. 1992. 塔北轮南地区下奥陶统白云石化. 童晓光、梁狄刚主编. 塔里木盆地油气勘探论文集. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 411~423.
顾家裕著. 1994. 沉积相与油气. 北京: 石油工业出版社, 178~197.
顾家裕, 宁从前, 贾进华. 1998. 塔里木盆地碎屑岩优质储层特征及成因分析. 地质论评, 44(1): 83~89.

References

Gu Jiayu. 1994. Sedimentary facies and oil and gas. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 178~197(in Chinese).
Gu Jiayu, Ning Congqian, Jia Jinhua. 1998. High-quality reservoir features and genetic analysis of clastic rock in the Tarim basin. Geological Review, 44(1): 83~89(in Chinese).
Guo Jianhua, Tan Hanshen. 1992. Dolomite of lower Ordovician in Lennan area Tabei. In: Tong Xiaoguang, Liang Digang. ed. Exploration book of oil and gas in Tarim basin. Xinjiang Scientific and Technical Sanitation Publishing Houses, 411~423(in Chinese).
Liu Baojin, Zhang Jinquan. 1994. Sedimentary diagenesis. Beijing: Science Press, 237~255(in Chinese).
Zhang Guangya, Song Jianguo. 1998. Control of basin reworking on hydrocarbon accumulation and preservation in Tarim Cratonic basin, Northwest China. Geological Review, 44(5): 511~521(in Chinese).