

文章编号: 1001-6112(2009)04-0362-04

渤海湾盆地济阳坳陷 冶里—亮甲山组层状储层成因及其影响因素

徐春华^{1,2}, 王亚琳³, 杨贵丽³

(1. 北京大学 地球科学与空间学院, 北京 100871; 2. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 勘探项目管理部, 山东 东营 257000; 3. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要:渤海湾盆地济阳坳陷下古生界奥陶系冶里—亮甲山组主要为一套厚层白云岩, 其中发育大量的溶蚀孔洞, 在裂缝沟通的情况下能够成为良好的油气储集层。利用渗透—回流模式, 探讨了冶里—亮甲山组白云岩的成因机制, 认为在白云岩化作用的基础上, 早奥陶世末期的怀远运动导致研究区发生区域性隆升, 形成风化壳型溶蚀孔洞, 但这些孔洞是无效的储集空间; 经过后期断裂作用的改造, 地层中产生大量的裂缝将其沟通, 才能使白云岩成为有效储层; 断层的发育又沟通了大气降水和湖水, 对储层进行二次溶蚀改造。因此, 该区断裂作用决定了储层的形成和发育规模。

关键词:层状储层; 储层成因; 控制因素; 冶里—亮甲山组; 奥陶系; 济阳坳陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

THE GENESIS AND INFLUENTIAL FACTORS OF LAYERED RESERVOIR OF YELI—LIANGJIASHAN FORMATION IN THE JIYANG DEPRESSION OF THE BOHAI BAY BASIN

Xu Chunhua^{1,2}, Wang Yalin³, Yang Guili³

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. The Exploration Project Administration Office of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 3. Institute of Geological Sciences of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: It was discovered that abundant isolated vug occurred in the Yeli—Liangjiashan Formation of Ordovician in the Jiyang Depression of the Bohai Bay Basin, which would turn into effective reservoir once connected by fractures. The article applied the seepage reflux mechanism developed by K. S. Defeyes in 1965 to interpret the genesis of the dolomite of the Yeli—Liangjiashan Formation, and raised that regional weathering crust was formed by Huanyuan tectonic movement, which resulted in regional uplifting in the end of Early Ordovician, and that a great quantity of weathering crust vugs were developed on the basis of dolomitisation. After these isolated vugs in the formation connected by the large mounts of fractures, which were generated by later fracturing reformation, the effective dolomite reservoir was formed. At the same time, the later faults linked up the atmospheric water and the lake water and reconstructed the reservoir by secondary corrosion. So the conclusion was that the development and its scale of this kind reservoir were controlled by later fracturing.

Key words: layered reservoir, genesis interpretation, controlling factors, Yeli—Liangjiashan Formation, Ordovician; Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

渤海湾盆地济阳坳陷下古生界奥陶系自下而上依次发育下奥陶统冶里组和亮甲山组, 中奥陶统下马家沟组、上马家沟组和八陡组, 其中冶里组和亮甲山组通常合称为冶里—亮甲山组, 发育一套厚度在 180~240 m 的白云岩, 其间发育大量的、孤立的溶蚀

孔洞, 在有裂缝沟通的情况下, 可以成为油气的有效储层^[1]。近年来, 在桩海、车古 20 和渤深 6 等下古生界潜山发现了冶里—亮甲山组内幕含油层系^[2], 特别是 1999 年在车古 20 潜山(图 1)钻探的车古 201 井在该套储层中获得 222.7 t/d 的高产工业油流, 证实

收稿日期: 2008-04-02; 修订日期: 2009-06-09。

作者简介: 徐春华(1967—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气勘探综合研究及管理工作。E-mail: xch0524@sohu.com。

基金项目: 国家油气专项项目(XQ-2004-03-04)。

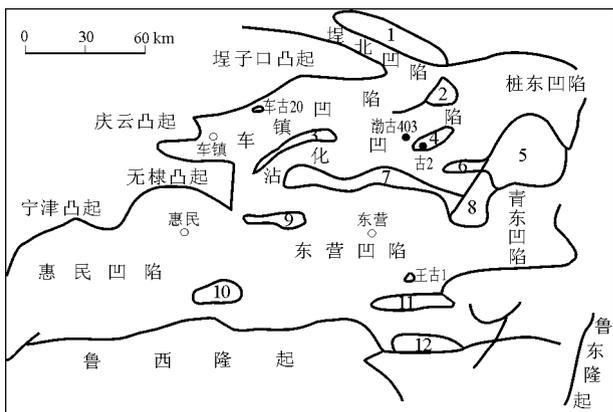


图1 渤海湾盆地济阳拗陷构造单元划分

1. 埋北低凸起; 2. 桩西潜山; 3. 义和庄凸起; 4. 孤岛凸起;
5. 垦东凸起; 6. 垦利潜山; 7. 陈家庄凸起; 8. 青坨子凸起;
9. 滨县凸起; 10. 青城凸起; 11. 广饶凸起; 12. 寿光凸起

Fig. 1 The division of tectonic units of the Jiyang Depression, the Bohai Bay Basin

了这套储层的存在,并认为是一套内幕型层状储层^[3,4]。在随后的下古生界潜山勘探过程中,都将其作为主要目的层之一进行钻探。但是钻探结果表明,该套储层在不同的潜山、同一潜山不同断块、甚至同一断块内的发育程度不尽相同,甚至不能成为油气的有效储层,说明这套储层有其独特的成因机制。

1 白云岩的岩石学特征

冶里—亮甲山组岩性为一套灰色、浅灰色结晶白云岩,下段含竹叶、上段含燧石结核。根据白云岩残余结构分析,下段含竹叶的白云岩其原岩可能为竹叶状灰岩或泥晶灰岩,说明当时沉积环境为高能潮间带与低能局限海环境;上段含燧石结核的白云岩,可能为潮间带下部或局限海环境。

根据岩石结构可以分为细晶白云岩和细—中晶白云岩2种类型。细晶白云岩由细晶结构的白云石组成,岩石结构清晰,晶体呈半自形—自形,晶体之间镶嵌状接触^[5];细—中晶白云岩由细—中晶结构以上的白云石组成,以半自形—自形晶为主,部分有不清楚的残余粒间结构。

近年的研究表明,微晶白云岩、微晶泥云岩为准同生白云岩^[6~8],而细晶及细—中晶白云岩则属于准同生后白云岩。因此,从晶体结构及残余粒屑结构分析,认为该套白云岩属于准同生后白云岩。

Tucker等^[9]将古代白云岩的成因概括为5种模式:蒸发白云岩化模式、渗透—回流白云岩化模式、混合白云岩化模式、埋藏白云岩化模式和海水白云岩化模式。渗透—回流白云岩化模式中,海水

被毛细管抽吸至潮上沉积的灰岩中,和涨潮带来的海水一起经过蒸发作用浓缩,产生具有高Mg/Ca比值的孔隙水,然后这些浓盐水通过地下沉积物向海倒流或下渗,造成钙质沉积物的白云岩化^[10]。根据对研究区冶里—亮甲山组白云岩O、C、Sr同位素的研究:其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr介于0.709 336~0.716 919之间,平均为0.713 154,与海水值十分接近; $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -0.38‰ ~ -1.91‰ 和 -6.21‰ ~ -16.45‰ 之间,也偏向于海水值^[5]。说明可以用渗透—回流模式解释该套白云岩的成因。其特点是自形程度高,晶体排列无序,成砂糖状,晶间和粒间孔隙发育,孔隙度较高,可以成为很好的孔隙型储层^[11]。

2 层状储层的成因分析

白云岩储层的储集空间有3类,包括晶间孔隙、溶蚀孔洞和裂缝。白云石晶间孔是灰岩在白云岩化作用过程中形成的,这一点已成为众多研究者的共识^[1,3,6,7]。而溶蚀孔洞和裂缝则属于不同的成因,前者形成于岩石的溶解作用,后者形成于构造作用;溶蚀孔洞的形成造就了白云岩的储集空间,而构造裂缝的发育则是使白云岩成为有效储层的主控因素。

2.1 怀远运动奠定了溶蚀孔洞的形成

早奥陶世沉积之后发生的怀远运动,导致区域性隆升,在安徽北部的怀远地区表现得最为明显,下奥陶统冶里—亮甲山组沉积物基本缺失^[12],凤阳地区钻探的凤深1井,在怀远期风化壳即寒武系顶部的土坝组白云岩中发生钻井液漏失,共漏失泥浆60 m³,说明表生风化作用较为强烈^[13]。伴随着怀远运动的区域隆升,在山东及其北部的济阳拗陷区也表现为海水的大规模退却^[14,15],导致该套白云岩出露地表,遭受表生岩溶作用,形成溶蚀孔洞。

理论计算表明,在白云岩化作用过程中,镁离子交代钙离子,可使晶体体积缩小13%,因而形成大量的晶间孔隙^[16],而晶间孔隙又增加了岩石的孔隙度和渗透率,提高了流体的渗流能力,有利于地表水的下渗和地下水的流动,提高了可溶岩石的溶解速度。一般白云岩的溶解速度小于灰岩,因而易形成小型溶蚀孔洞;同时由于潜水面的频繁变化,形成多层溶蚀孔洞,这就是怀远期风化壳中小型层状溶蚀孔洞发育,而大型溶蚀洞穴不发育的原因。

钻井岩心和野外观察发现,怀远期形成的溶蚀孔洞往往是孤立存在的,当有裂缝将它们沟通时,

可以成为一套优质的储层。这是车古 20 潜山、桩海潜山等乃至整个研究区怀远期风化壳型层状储层发育的主要原因。

2.2 构造运动控制有效储层的发育

岩心和野外露头观察表明,冶里—亮甲山组地层中存在大量的溶蚀孔洞,镜下鉴定也发现大量的晶间孔隙,这是该套地层能够成为储层的先决条件。但是如果没有裂隙将这些孔洞连通,也不可能形成有效储层。

以车古 20 潜山为例,该潜山共有 7 口井钻遇冶里—亮甲山组,有 6 口井发育储层,其中车古 201 井最发育,解释 I 类有效层厚度 14.8 m, II 类层有效厚度 37.7 m;而附近的车古 201-2 井不发育该套储层,说明同一潜山不同区块层状储层发育具有不均衡性。再如孤岛潜山孤古 2 井冶里—亮甲山组白云岩中溶蚀孔洞发育,但因远离断层而无裂缝沟通这些孔洞,致使该套白云岩成为非储层^[1]。孤北低潜山的渤古 403 井、王古 1 潜山上钻探的 3 口井(王古 1、王古 100 及王古 1-1)冶里—亮甲山组白云岩中,测井均未能解释出有效储层。说明不同潜山的储层发育也具有明显的不均衡性。究其原因,断裂作用产生的裂缝能否将白云岩中的孔隙和溶蚀孔洞等储集空间沟通,是该地层能否成为储层的必要条件。因此,断裂的发育是冶里—亮甲山组白云岩能否成为有效储层的主控因素。

断裂作用的结果之一是在地层中产生构造缝。根据车古 20 潜山下古生界岩心裂缝的统计,裂缝在纵向上不同层位发育程度存在差异。八陡组平均裂缝线密度为 31.5 条/m,最大为 64 条/m;上、下马家沟组灰岩裂缝也较发育,平均裂缝线密度为 25.5 条/m,但绝大部分被石膏充填;冶里—亮甲山组和凤山组白云岩裂缝非常发育,平均裂缝线密度为 55.4 条/m,且缝面平直,最大可达 100 条/m。可见,下部储集层裂缝比上部储集层的裂缝发育。扣除充填缝后,八陡组和上、下马家沟组灰岩中开启裂缝平均线密度都在 5 条/m 以下,而冶里—亮甲山组为 40 条/m 左右。

根据成像测井资料分析,裂缝发育也有类似的特征(表 1)。从表 1 可以看出,有效裂缝在纵向上发育不均一。其中,冶里—亮甲山组裂缝最为发育,其次是八陡组和凤山组,再次是上、下马家沟组。

对于大多数潜山而言,潜山顶部八陡组裂缝最为发育,向下逐渐变弱,直至不发育裂缝。如孤岛潜山孤古 2 井岩心中裂缝发育就具有这种特征,冶里—亮甲山组岩心中已经没有裂缝发育。而车古

表 1 渤海湾盆地济阳拗陷车古 20 潜山不同层段裂缝发育统计

Table 1 The cartogram of fracture development in different formation of Chegu 20 Buried Hill in the Jiyang Depression of the Bohai Bay Basin

| 井号 | 奥陶系 | | | 寒武系 | |
|----------|-----|-------|-------|---------|---------|
| | 八陡组 | 上马家沟组 | 下马家沟组 | 冶里—亮甲山组 | 凤山组 张夏组 |
| 车古 201 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 车古 202 | | | | ✓ | ✓ |
| 车古 203 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 车古 201-1 | ✓ | | | ✓ | ✓ |

注:“✓”表示裂缝发育。

20 潜山局部地区冶里—亮甲山组裂缝最为发育,究其原因这是由于该套地层上部或下部断层较发育;钻遇冶里—亮甲山组—凤山组地层的钻井有 7 口,根据岩心观察及成像测井解释,其中的车古 201, 202, 203, 204, 208 等 5 口井在该套地层附近发育断层,因而这些井中冶里—亮甲山组储层均较发育;而车古 205, 207, 209 井冶里—亮甲山组—凤山组附近没有发育断层,因而储层不发育。对于潜山而言,断裂作用表现为两方面:一是控山断层,控制盆山的形成,断层上升盘成为“潜山”,下降盘积水后形成湖泊;二是“潜山”内部断层,控制“山头”的发育。这 2 种断层均可形成大量的构造裂缝,前者沟通湖水,后者沟通大气降水,而构造缝为水介质的流动提供了通道,加大了水介质和碳酸盐岩的接触面积,加速了水介质的溶解作用(图 2)。在存在泄水区的前提下,可以形成自供水区—渗流通道—泄水区的地下水的循环,在裂隙两壁形成溶蚀孔洞,导致构造缝溶蚀加宽、孔洞进一步溶解扩大,使原有的储集空间向有利的方向发展;而当泄水区泄水不畅,形成地下水滞留或者“潜山”接受沉积,成为真正的潜山后,当目的层埋藏深度大于 600 m、处于潜水面以下的高矿化带时,构造运动期所产生的裂缝会发生大规模的充填^[17],很多裂缝被半充

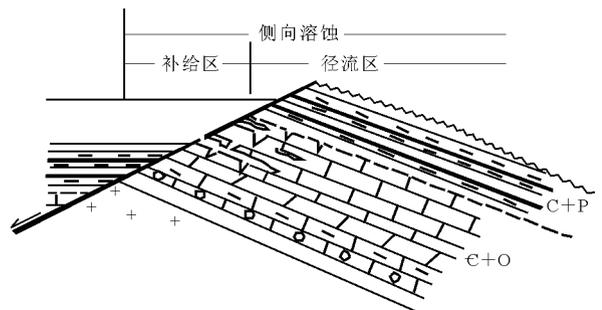


图 2 断裂活动对储集空间的改造作用示意

Fig. 2 The scheme of reservoir space reconstruction caused by fracturing

填或完全充填,使储集空间向不利的方向发展。

因此,构造作用对潜山的改造具有双重影响,早期对储层的发育有利,晚期对储层的发育不利。

断裂的规模对有效储层形成的控制作用表现在以下2个方面:

首先,断裂作用对储层的控制表现在断裂活动的影响范围上,即裂缝发育带的宽度。关于断裂对裂缝发育带宽度的影响,目前的认识差别较大。张秉政^[18]利用钻遇桩西潜山南界大断层的井资料研究了断层与裂缝发育带宽度的关系,提出在断层倾角为 45° 时,裂缝发育带的宽度略等于断层落差;宋国奇等^[1]研究义和庄潜山后认为:断层影响裂缝发育的宽度约等于断层落差,而有效储集空间发育宽度在 $1/2\sim 2/3$ 的范围内。事实上,裂缝发育带的宽度是十分复杂的,受破裂岩石的岩性、构造部位以及断层的性质、断面倾角等多种因素的控制。

其次,在一般情况下,距离奥陶系潜山顶面600 m左右的冶里—亮甲山组白云岩,断层的倾角也是控制有效储层发育的主要因素。鉴于裂缝发育带宽度的复杂性,这里姑且假设断层倾角为 45° ,且下古生界地层呈水平状,按照裂缝发育宽度在 $1/2\sim 2/3$ 的原则,控山断层的垂直断距必须在1 000~1 500 m时才可能在冶里—亮甲山组白云岩中形成裂缝,使白云岩的孔隙和溶蚀孔洞成为有效储集空间,但此时形成的裂缝也是强弩之末。

当然,对于一个地区的冶里—亮甲山组白云岩中是否存在裂缝,还需要利用各种地质及物探资料进行定性—半定量的评价,来确定冶里—亮甲山组是否发育有效储层,进而明确是否将该层系作为勘探目的层系之一。

3 主要结论

1)奥陶系冶里—亮甲山组为一套灰色、浅灰色结晶白云岩;根据岩石结构可以分为细晶白云岩和细—中晶白云岩2种类型;根据晶体结构及残余裂隙结构分析,其属于准同生白云岩。

2)根据对白云岩O,C,Sr同位素的研究,各项指标均偏向于海水值,因而可以采用渗透—回流模式解释该套白云岩的成因。

3)根据岩心和野外观察,结合区域地质资料,提出了怀远运动是形成冶里—亮甲山组白云岩中大量孤立层状溶蚀孔洞的主要地质因素。

4)依据大量的钻井岩心和成像等测井资料,提出了冶里—亮甲山组白云岩必须在大量裂缝发育的前提下才能与孔隙、溶蚀孔洞结合形成有效储层的认识。

5)从控山断层和内幕断层2个方面,探讨了断裂的规模对有效储层形成的控制作用,指出进行多种裂缝预测是明确冶里—亮甲山组白云岩能否成为有效储层的重要手段。

参考文献:

- 1 宋国奇,徐春华,王世虎等. 胜利油区古生界地质特征及油气潜力[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2000
- 2 胡新铭,金平信,刘承红. 渤南洼陷渤深6碳酸盐岩潜山储层描述[J]. 油气地质与采收率,2006,13(4):31~33
- 3 李丕龙,张善文,王永诗等. 多样性潜山成因、成藏与勘探[M]. 北京:石油工业出版社,2003
- 4 马立驰,王永诗,姜在兴等. 断陷盆地碳酸盐岩潜山储层模式[J]. 石油实验地质,2006,28(1):21~24
- 5 林会喜. 济阳坳陷桩海地区下古生界白云岩储集空间形成机理[J]. 油气地质与采收率,2006,13(3):5~7
- 6 谢庆宾,韩德馨,陈方鸿等. 鄂尔多斯盆地古生界三山子白云岩体成因及储集性[J]. 石油大学学报(自然科学版),2001,25(6):6~12
- 7 韩征,辛文杰. 准同生白云岩形成机理及其储集性[J]. 地学前缘,1995,2(4):226~230
- 8 顾家裕. 塔里木盆地奥陶统白云岩特征及成因[J]. 新疆石油地质,2000,21(2):120~122
- 9 Tucker M E, Wright V P. Carbonate Sedimentology[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications,1990
- 10 金振奎,冯增昭. 华北地台东部下古生界白云岩的类型及储集性[J]. 沉积学报,1993,11(2):11~18
- 11 柏松章. 碳酸盐岩潜山油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1996
- 12 安徽地质矿产局. 安徽区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1987
- 13 苏浙皖闽油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷8):苏浙皖闽油气区[M]. 北京:石油工业出版社,1992
- 14 山东地质矿产局. 山东区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1987
- 15 王秉海,钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 东营:石油大学出版社,1991
- 16 余家仁,陶洪兴,樊哲仁. 华北潜山油藏碳酸盐岩储集层研究[J]. 北京:石油工业出版社,1993
- 17 杜韞华. 山东孤北潜山带前侏罗纪古溶洞及深层孔隙体系的研究[A]. 见:石油地质进展丛书(2):基岩油气藏[M]. 北京:石油工业出版社,1987
- 18 张秉政. 孤北古生界潜山高产区条件分析[A]. 见:石油地质进展丛书(2):基岩油气藏[M]. 北京:石油工业出版社,1987