

文章编号: 0253-9985(2004)05-0577-05

低效气藏地质特点和成因探讨

古莉¹, 于兴河¹, 李胜利¹, 徐安娜², 朱怡翔^{1,2}, 田昌炳²

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 低效天然气藏特指储量丰度低、气井产能低的一类气藏, 其储量约占全国天然气总储量的70%。在中国的这类气藏储层普遍为陆相河流相和三角洲相沉积, 而且埋藏深度较大。这类储层具有连续性差, 孔隙度和渗透率低及非均质性强等特点, 因此, 勘探和开发的难度较大。为了有效利用这类资源, 在对国内外低效气藏的地质特征进行系统对比的基础上, 分析了陆相碎屑岩储层低效气藏的特点, 认为沉积相类型和成岩作用是导致储层低效的两大地质因素。沉积相类型决定了储集层的物性和连续性; 成岩过程中的压实作用和胶结作用是破坏原生孔隙、造成砂岩致密的主要原因。

关键词: 低效气藏; 地质特征; 对比; 成因

中图分类号: TE112.33

文献标识码: A

A discussion on geologic features and genesis of low-efficiency gas reservoirs

Gu Li¹, Yu Xinghe¹, Li Shengli¹, Xu Anna², Zhu Yixiang^{1,2}, Tian Changbing²

(1. China University of Geosciences, Beijing; 2. Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing)

Abstract: Low-efficiency gas reservoirs refer in particular to those with low abundance of reserves and low well productivity. The reserves of such reservoirs in China account for about 70% of our total gas reserves. In China, reservoir rocks of such gas reservoirs are commonly of fluvial and delta facies with relatively large burial depth, which are characterized by poor continuity, low porosity and permeability, as well as strong heterogeneity. As a result, exploration and development of these reservoirs are quite difficult. For the sake of effectively utilizing these gas resources, the characteristics of low-efficiency gas reservoirs in continental clastic rocks have been analyzed, based on systematic correlating the geological features of low-efficiency gas reservoirs both in China and abroad. It is believed that the types of sedimentary facies and diagenesis are two major geologic factors leading to low efficiency of reservoirs. Sedimentary facies control the poroperm characteristics and continuity of reservoirs, while compaction and cementation are the main factors that destroy primary pores and lead to the formation of tight sandstones.

Key words: low-efficiency gas reservoir; geologic features; correlation; origin

低效天然气藏定义为低孔(孔隙度小于10%)、低渗(渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$)、低丰度(储量丰度小于 $3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)和低产能[产能小于 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km} \cdot \text{d})$]的天然气藏。在我国, 低效气藏分布广泛^[1], 66.6%的天然气探明储量属低效储量(约 $1.33 \times 10^{12} \text{ m}^3$), 66.7%的天然气藏属于低效气藏, 可见低效气藏是我国以后天然气勘探开发的主要对象*。在国外, 美国从20世纪70年代初开始低渗透砂岩气藏(致密砂岩气藏)的勘探和开发, 如今已成为美国天然气资源中的一种日

趋重要的组成部分^[2~4]。因此, 一方面要借鉴国外类似气藏的勘探和开发经验; 另一方面要针对我国陆相碎屑岩储层低效气藏的特点开展地质成因研究, 寻找导致储层“低效”的主控因素, 指导这类气藏的勘探开发。

1 国内外比较*

1.1 气藏类型

煤型气气藏是国内外低效气藏中的重要气藏类型。我国低效气藏包括煤型气、凝析气、生物气

基金项目: 国家“973”“高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究”(2001CB209106)

第一作者简介: 古莉, 女, 27岁, 博士生, 储层沉积学及地质建模

收稿日期: 2004-06-28

* 于兴河, 李胜利, 古莉, 等. 国外陆相低效气藏的形成机理及地质模式研究. 2004

和油型气4种气藏类型,在数量上以煤型气和凝析气为主,这两种类型的气藏数量所占百分比皆大于40%;99.45%的国外低效气藏的流体性质都为煤型气,占国外低效气藏储量的99.29%。这说明绝大多数低效气藏的源岩都属于煤系地层。

1.2 气藏埋深

与国内低效气藏相比,国外低效气藏埋深偏浅。国外低效天然气藏埋藏深度为1000~3000m的气藏在数量和储量上都占55%以上,埋深小于1000m的气藏在储量上占19%,埋深大于3000m的气藏在储量上仅占23%。因此,国外低效天然气藏以中浅层为主。我国低效天然气藏在400~5600m内都有分布,探明储量以中深层(2000~3500m)为主(占63.16%),超深层(大于4500m)探明储量占22.19%,浅层(小于2000m)探明储量占6.35%,深层(3500~4500m)探明储量占8.30%。

1.3 圈闭

在圈闭类型上国内外低效气藏特征一致,都是以构造-岩性复合圈闭为主。54%的国外低效气藏属于构造-岩性圈闭;我国低效气藏探明储量的66.5%储存于构造-岩性复合圈闭中。由此可见,气藏“低效”很大程度上受到储层沉积或成岩作用控制。

1.4 层位

在层位分布上,国外低效气藏比国内低效气

藏偏年轻。由于中国地质条件复杂,气田具有多种生储盖组合和多含气层系的特点^[5],相应地,中国低效天然气藏在地质时代上的分布也较广。总的来看,目前我国古生界低效气藏探明储量最大(占60.06%),其次是中生界(占27.31%),储层地质年代较老。而国外低效气藏在储量上以新生界第三系(占39%)和古生界(占37%)为主,在数量上以新生界第三系为主(占77%)。

1.5 储层

从储层沉积环境和沉积相特征来看,国外低效气藏储层中海相储层占55%以上,其次为海陆过渡相,陆相储层最少,而陆相储层中,以河流/湖泊相储层最为重要;我国低效气藏普遍属于陆相沉积环境,其中以河流、河流-三角洲相为主。

2 成因探讨

形成低效气藏的因素是多方面的,可以归结为储层条件(储层沉积类型和成岩作用阶段)和成藏过程(构造作用、源岩质量与有效气源岩的生排烃规模、保存条件等)。从储层角度考虑,对于陆相砂岩储层低效气藏而言,沉积和成岩是导致气藏“低效”的两大地质因素。对国外陆相低效气藏储集砂岩类型和储量丰度关系的统计(图1)充分说明了两点。

(1) 储集砂岩的成熟度(特别是成分成熟度)与平均储量丰度存在一定的相关性,砂岩成熟度

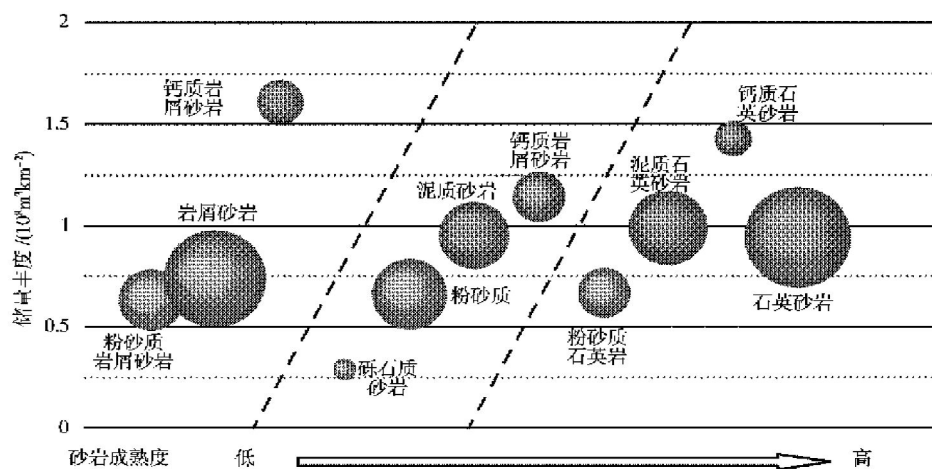


图1 国外陆相低效气藏储层岩性与储量丰度关系统计图

Fig. 1 Statistical diagram of lithology vs. abundance of reserves in terrestrial low-efficiency gas reservoirs abroad

越低,平均储量丰度越小。这是因为受沉积控制的储集砂岩的成熟度是决定储层物性和孔隙结构

好坏的先天性因素,它一方面直接影响储层原始物性特征,另一方面决定成岩作用类型和强度。

一般而言,成熟度低的储集砂岩其长石、岩屑以及粘土矿物含量高,这些塑性物质在成岩过程中易破碎变形,使得储层孔隙结构复杂,物性变差,导致气藏低丰度,而粘土矿物造成的储层伤害进一步使气藏产能低。

(2) 对于同一类砂岩储集层来说,砂岩胶结类型也与低效气藏的储量丰度存在关系,钙质胶结砂岩储层低效气藏的平均储量丰度往往是同类砂岩中最高的,这是因为钙质胶结的储集砂岩易受淋滤作用的改造而改善其物性。

2.1 沉积类型

沉积相类型一方面是影响储集层物性的最基本因素^[6],另一方面控制了砂体的空间展布,进而决定了储层的空间连续性。

首先,储层沉积类型决定储层的成熟度和粒度,从而决定孔隙结构成熟度,控制孔隙毛管压力大小,影响流体渗流特征^[7]。国内外的陆相低效气藏的储层沉积类型以三角洲相和河流相为主,储集砂岩类型以长石砂岩和岩屑砂岩为主,而且泥质含量高,导致储层孔隙结构复杂^[8]、毛管压力大,造成孔隙中含水饱和度高而含气饱和度低,致使气藏低效。以国内的昌德气田为例,其主要储集层下白垩统登娄库组属于辫状河-三角洲相沉积,以细粒砂岩为主,分选较差;砂岩主要成分为岩屑、长石和石英,属混合型砂岩类型,成分成熟度较低;泥质含量4.8%,砂岩胶结类型以薄膜-再生式为主;孔隙类型一般为缩小的线状粒间孔,孔喉半径为0.10~0.75 μm ;孔隙度一般为5%~10%,渗透率一般为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于致密孔隙型砂岩储集层。

其次,沉积相类型决定了储层的空间连续性。三角洲和河流相储集层横向相变快、砂体规模小、连续性差、储层非均质性强^[9]是造成低丰度的重要原因。以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例,其主力气层下石盒子组八段砂体为三角洲平原分流河道沉积,从下石盒子组八段砂体沉积早期至晚期,河道由平原网状特征逐步演变为具有冲积平原曲流点坝沉积特色的辫状河道特征,网状分流河道侧向迁移、改道频繁,造成河流间相互切割,砂体纵向叠置较为普遍^[10];曲流河点坝沉积砂体纵向上透镜状叠置,平面上呈“土豆状”分布,沉积厚度薄,储层非均质性强。再如美国奥卓拉气田的主要产气层二叠系狼营统坎昂砂层属于三角洲相沉

积,砂岩呈透镜体状分布,连续性差,导致低效。

2.2 成岩作用

成岩作用对储层物性的改造,主要以压实作用、胶结作用、溶解作用及破裂作用对物性的影响最为明显^[11],其中压实作用和胶结作用是破坏原生孔隙、造成砂岩致密的重要原因。

2.2.1 压实作用

压实作用是碎屑岩固化成岩的主要作用之一,其结果使颗粒的原生粒间孔隙大为缩小。压实作用的类型及其对储层物性的影响与碎屑岩储集层的矿物成分有关。一般而言,石英、长石和岩屑的相对含量与压实效果有很大的关系,石英颗粒的抗压能力最强,长石次之,岩屑的抗压强度最小。以苏里格庙地区二叠系砂岩储层为例,对于杂基含量高,杂性组分多的砂岩来说,在上覆地层压力下发生形变、挤入及穿插现象十分显著;而纯石英砂岩受压实作用则表现为一些刚性石英颗粒出现一些楔状缝,颗粒之间呈缝合线接触,两种类型的压实都导致储集层物性大大降低^[12]。此外,国内外陆相碎屑岩低效气藏砂岩储集层的成分成熟度普遍较低,机械压实作用普遍较强(特别是岩屑砂岩储层的低效气藏),受压实损失的孔隙较多,孔喉较细,因此物性差。如四川中坝和平落坝三叠系天然气储层均为岩屑砂岩,成岩过程中遭受了较强的压实作用,致使前者为低孔特低渗,后者为特低孔低渗^[13]。

2.2.2 胶结作用

低效气藏储层普遍受到胶结作用的改造,而导致储层物性差。比如美国二叠纪盆地的奥卓拉气田二叠系狼营统坎昂砂岩层为三角洲相沉积形成的灰白色中-细粒砂岩^[14],由于强烈的胶结作用,岩性致密^[15,16];英国北海南部的海德(Hyde)气田储层为二叠系赤底统下Leman组砂岩,其渗透性因被伊利石胶结而减弱^[17];美国丹佛(Denver)盆地J砂岩气藏为产气层段多泥、储层致密的气藏^[18~20],其成岩过程经历了从粘土矿物沿颗粒边缘生长→石英的快速加大→长石的普遍胶结(填补了没有被石英加大边占据的孔隙)的破坏性成岩过程,之后方解石的溶解→次生孔隙部分被自生的高岭石和绿泥石占据→晚期裂缝发育^[20]才得以形成岩性和地层圈闭;再如我国川西新场气田上沙溪庙组气藏,由于晚成岩早期方解石的大量胶结,使原生、次生孔隙急剧减少,岩石不断致

密,形成超低渗致密储层^[21]。

2.2.3 煤系地层

煤系地层的成岩特征也是造成气藏低效的重要原因。目前中国煤成气占天然气探明储量的54%^[22],世界上近20%的天然气探明储量属于煤成气^[23];而国内外低效气藏的流体类型普遍以煤型气为主。这说明煤系地层是低效气藏的重要气源岩,因而从成岩作用的角度分析低效气藏的地质成因,就必须考虑煤系地层特殊的成岩特征。煤系地层成岩早期就具有酸性水介质条件,导致缺少碳酸盐胶结物,机械压实作用强;晚期成岩过程中产生大量有机酸,利于石英的次生加大和高岭石的普遍发育,进而使储层物性变差^{*}。以长庆气田上古生界榆林气藏为例,榆林区山西组二段储集层砂岩在早成岩阶段,经历了强烈的压实、压溶作用,使石英颗粒线面接触,凹凸镶嵌,缝合线发育,同时伴随发生的压溶作用导致石英次生加大发育,其结果是强烈的硅质胶结,使砂岩孔隙度损失5%~13%;在晚成岩阶段A期高岭石等粘土矿物充填粒间孔隙,但产生了大量晶间孔隙,而与之同时发生的压溶作用导致层内物质重新分配,硅质进入残余粒间孔和晶间微孔,使储集层孔隙进一步减少;晚成岩阶段B期的碳酸盐岩(铁白云石、菱铁矿)胶结和交代作用造成山西组二段砂岩储集层孔隙进一步损失。因此,有较好产能的煤系优质储集层必须具有有利的沉积相类型、粒度粗、抗压能力强^[24]。

2.3 成藏阶段

低效气藏之所以储量丰度低,和其成藏过程有密切关系。由于天然气聚集成藏的过程同时也是天然气不断散失的过程,因此如果没有气源的继续供给和适当的保存条件,随着时间的推移,聚集起来的天然气都会因为扩散等散失作用而破坏殆尽。我国低效气藏储量主要分布在古生界,地质时代较老,具有早期生烃成藏的特点^[25],目前已处于聚集量小于散失量的气藏晚期发展阶段。比如鄂尔多斯盆地的长庆、苏里格等大型气田,虽然属于大型气田,但是气田已进入聚集量小于散失量的成藏晚期阶段^[25],聚集的天然气已受到了一定程度的散失,因此储量丰度低,气藏充满度低,并具有负压特征。

3 讨论

目前为止,我国大批低效气藏基本上还没有正式投入开发,缺乏系统研究和配套技术,尤其是地质研究^[26]。为了实现低效气藏的有效开发,技术上要引进和发展国外类似气藏的高效开发技术,如气层保护技术、储层改造技术以及水平井技术等^[27];地质研究上,针对沉积和成岩这两个突出的地质因素,一方面综合应用地质、地震、测井等气藏描述技术,通过对沉积微相的精细解剖,进行有效储层的连续性和连通性的评价,另一方面通过对成岩序列和孔隙演化的研究,加强对低渗储层中相对高渗砂岩体的识别与预测^[28]。总之,做好地质综合研究,依靠科技进步,才能够实现低效气藏的有效利用。

参 考 文 献

- 田昌炳,于兴河,徐安娜,等.我国低效气藏的地质特征及其成因特点[J].石油实验地质,2003,25(3):235~238
- Charles W S. Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in Western United States[J]. AAPG Bull, 1989, 73(5): 613~629
- Williams K E, Lerche I, Maubeuge F. Unconventional gas traps: low permeability sands and gas accumulations[J]. Energy Exploration & Exploitation, 1998, 16(1): 1~87
- 刘民中.美国、加拿大深层致密砂岩气藏勘探:现状、地质特征及主要勘探技术[J].国外油气勘探,1990,2(4):10~15
- 宋岩.中国天然气资源分布特征与勘探方向[J].天然气工业,2003,23(1):1~4
- 刘宝琛,张锦泉.沉积成岩作用[M].北京:科学出版社,1992
- 史基安,王琪.影响碎屑岩天然气储层物性的主要控制因素[J].沉积学报,1995,13(2):128~129
- 李健鹰.低渗气层粘土矿物含量类型、产状特征和储层损害[J].天然气工业,1989,9(5):55~59
- 裘怿楠.中国陆相碎屑岩储岩沉积学的进展[J].沉积学报,1992,10(3):16~24
- 李良,袁志祥,惠宽洋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气聚集规律[J].石油与天然气地质,2000,21(3):268~271
- 郑浚茂,庞明.碎屑储集岩的成岩作用研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1989
- 李文厚,魏红红,马振芳,等.苏里格庙气田碎屑岩储集层特征与天然气富集规律[J].石油与天然气地质,2002,23(4):387~391
- 裘怿楠,薛叔浩,应凤祥.中国陆相油气储集层[M].北京:石油工业出版社,1997
- Comer J B. Stratigraphic analysis of the Upper Devonian Woodford Formation, Permian Basin, West Texas and Southeastern New Mexico

* 郑浚茂,于兴河.煤系地层砂岩储层成岩作用及成岩模式(85-103-07-03-02).1994

- [A]. In: Bureau of Economic Geology. Report of Investigations No. 201[C]. Austin, Texas: Bureau of Economic Geology, 1991. 1~ 63
- 15 张子枢. 世界大气田概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990
 - 16 Laubach S E, Robert R M, Olson J E, et al. Fracture-surrogate analysis methods applied to Spraberry, Bone Spring, and "Canyon" cores: preliminary results[A]. In: The West Texas Geological Society. The Permian basin: microns to satellites, looking for oil and gas at all scales[C]. WTGS publication, 2001, 01~ 110: 75~ 79
 - 17 Sweet M I, Blowden C J, Ceter A M, et al. Modeling heterogeneity in a low-permeability gas reservoir using geostatistical techniques, Hyde field, southern North Sea[J]. AAPG Bull, 1996, 80(11): 1 719~ 1 735
 - 18 Curtis B F. Sedimentary rocks of the Denver Basin[A]. In: Sloss L L. Sedimentary cover-North American craton: geology of North America, volume D- 2[C]. Geological Society of America, 1988. 182~ 196
 - 19 Weimer R J, Sonnenberg S A, Young G B. Wattenberg Field, Denver Basin, Colorado: geology of tight gas reservoirs[J]. AAPG Studies in Geology, 1986, 24: 143~ 164
 - 20 Higley D K, Schmoker J W. Influence of depositional environment and diagenesis on regional porosity trends in the Lower Cretaceous "J" sandstone, Denver Basin, Colorado, in Coalson[A]. In: Viveiros, John J, Scott M. Petrogenesis and petrophysics of selected sandstone reservoirs in the Rocky Mountain region[C]. Rocky Mountain Association of Geologists, 1989. 183~ 196
 - 21 朱彤. 成岩作用对致密砂岩储层储集性的控制作用研究——以川西新场气田上沙溪庙组气藏为例[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(2): 157~ 160
 - 22 戴金星, 夏新宇, 卫延召. 中国天然气资源及前景分析——兼论“西气东输”的储量保证[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 1~ 8
 - 23 王庭斌. 中国天然气地质理论进展与勘探战略[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 1~ 7
 - 24 陈丽华, 赵澄林, 纪友亮, 等. 碎屑岩天然气储集层孔隙的三种成因机理[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(5): 77~ 79
 - 25 王庭斌. 中国气田的成藏特征分析[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 103~ 110
 - 26 田昌炳, 罗凯, 朱怡翔. 低效气藏资源特征及高效开发战略思考[J]. 天然气工业, 2004, 24(1): 4~ 6
 - 27 LI Shi-lun, SUN Lei, DU Jian-fen, et al. Difficulties and measures for development of low permeability tight gas reservoirs and condensate gas reservoirs[J]. 新疆石油地质, 2004, 25(2): 225~ 230
 - 28 Bloch S, Lander R H, Bonnell L M. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: origin and predictability[J]. AAPG Bull, 2002, 86(2): 301~ 328

(上接第543页)

4 结语

孤东油田七区西馆上段储层的非均质比较严重, 连通性较差。主要表现在: 平面上渗透率和砂层厚度变化明显, 层间、相带间渗透率差异大。孤东油田七区西馆上段储层的非均质性, 造成水驱效果的“非均质性”, 导致剩余油的不均衡分布。储层的韵律性、层内夹层、砂体相带的展布、层系间砂体的配置也影响着剩余油的分布。夹层的下部、正韵律层的顶部、层系中物性较差的砂体剩余油相对富集, 河道砂体边缘和废弃河道等分布局限的砂体也是剩余油富集区。因此, 今后对不同油层其挖潜的侧重点应有区别, 对非主力层应加强注采管理, 增强水驱控制, 提高液量, 增加波及体积, 对主力层应加强层内的深层次挖潜, 挖掘层内及水驱波及较差部位的剩余油。主力层挖潜仍将是今后主要的方向。

参 考 文 献

- 1 窦之林, 曾流芳, 贾俊山. 孤东油田开发研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003
- 2 裘怿楠, 陈子琪. 油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996
- 3 刘泽容, 信全麟. 油藏描述原理与方法技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 4 张一伟, 熊琦华, 王志章, 等. 陆相油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 5 党森, 赵虹, 周立发, 等. 辽河油田曙一区杜84块兴隆台油层储层非均质性[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 382~ 386
- 6 魏纪德, 杜庆龙, 林春明, 等. 大庆油田剩余油的影响因素及分布[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 57~ 59
- 7 蔡忠. 孤岛、孤东油田馆上段微相特征与剩余油分布[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 214~ 219
- 8 Khataniar S. The effect of reservoir heterogeneity on the performance of unstable displacements[J]. J Pet Sci Eng, 1992, 7(3, 4): 263~ 281
- 9 焦养泉, 李思田. 碎屑岩储层物性非均质性的层次结构[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(2): 89~ 92
- 10 夏保华, 周卓明, 孙雪霞, 等. 濮城油田沙二下油藏剩余油的影响因素及型式[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 385~ 387