

川东南碳酸盐岩裂缝系统微型差异聚集

姜子昂 熊 鹰 董荣祥 贺雪萌 刘旭宁

(四川石油管理局川南矿区, 四川泸州 646001)

川东南碳酸盐岩裂缝系统存在微型差异聚集。微型差异聚集的形成、分布和转化受控于水平扭剪应力场,能够维持至今则与较大的残余构造应力有关。微型差异聚集系统由运移驱动系统、聚集系统和通道系统构成,靠局部主张裂缝闭合性应变缩容产生驱动;由局部主张裂缝张应变扩容实现聚集气水的功能;通道由一种或多种组成。川南微型差异聚集的地质模式有高点转移型、断层平移型两类,能较好地解释气、水分布规律,并为进一步排水找(采)气、勘探隐伏裂隙系统提供了理论基础。

关键词 川东南 裂缝系统 水平剪应力 差异聚集 模式

第一作者简介 姜子昂 男 36 岁 博士研究生 煤田、油气地质与勘探

我国目前已发现的气田,92%以上集中在四川盆地,除个别气田或产气层是砂岩外,其余均属低孔渗碳酸盐岩储集层^[1],即多为裂缝-孔洞性储集层。四川近 40 年的勘探开发历程,已反映出许多异常地质现象:(1)构造高部位产水,低部位产气;(2)裂缝系统内无统一气水界面;(3)排水找(采)气方法可获得隐伏天然气储量。对这些现象的认识,一般多以裂缝性储集层“极不均质性”、封闭体系下气水共存和天然气弹性能远大于水体弹性能等概念来解释,未把构造应力-裂缝系统-气水运聚作为一个系统来研究。作者等对川东南二叠系、三叠系裂缝系统研究结果表明,原始产水量大于 50 m³ 和高部位水井,均分布在水平扭剪应力场作用较强的断褶带,其气水关系与大区域差异聚集模式有较大的相似性。

1 微型差异聚集概念

四川盆地碳酸盐岩裂缝性储集层中不存在差异聚集,这已成为定论^[2];然而,在一个裂缝系统内是否也不存在呢?

勘探开发实践表明,裂缝系统具有油气藏意义,有统一的压力系统,但无统一的气水界面^[3];而油气藏指油气在单一圈闭中的聚集,其单一性就在于单一储集层的同一面积内,具有统一的压力系数、统一的气水边界^[4]。所以,裂缝系统应定义为若干个微型圈闭,其储集空间和渗滤通道主要靠裂缝和溶孔或溶洞构成,按一种或多种方式连通构成的气水储渗系统。换言之,裂缝系统就好比采用不同串接方式,连通若干个气水界面的高度和容积不同的分离器(裂缝圈闭)。在系统处于封闭条件下,必须具统一的压力系统,但一般情况下无统一的气水界面。一旦改变部分分离器的压力或容积,各分离器内的气水比和气水界面将发生变化,以适应新的压力平衡体系。显然,在某种条件下是可能造成类似差异聚集的现象。

因此,在构造应力作用下,造成若干个相互连通的微小圈闭部分缩容驱动气水运移,部分扩容聚集气水,最终形成裂缝系统较高或最高部位相对气水比降低或产水,较低部位相对气水比较大或产纯气的现象。由于其运移距离短、圈闭微小和差异聚集完善度一般较低,故被称作微型差异聚集。

2 微型差异聚集形成与转化

2.1 微型圈闭呈等距性分布

四川盆地是NE向及NW向交叉深断裂活动形成的菱形构造沉积盆地,印支期具雏形,后经喜马拉雅期强烈的扭性断褶活动,形成现代盆地的构造面貌^[3]。盆地内较大储量的裂缝系统所对应的力学机制也是水平力偶作用的产物,如宋家场、阳高寺和中坝等气田^[2]。水平压扭应力派生的构造引张应力和扭张应力多为水平张应力,产生的张裂缝主要为垂缝^[5],纵向分布高低不一。

据岩体结构力学原理,小至劈理、节理,大至地壳断裂都具有等距性分布规律,如同级序节理与所切穿的岩层厚度比多为1:1^[6]。因而,平面上同级序主张裂缝带多呈有一定间隔的带状延伸,延伸长度有限,并且一般缺乏有效的横向张裂缝带,所以,从圈闭概念上把能产生统一气水界面和统一压力系统的同级序相连通的张裂缝带及孔洞群,可作为一个微型裂缝圈闭划分单元。显而易见,这种微型圈闭也应呈等距性分布。

2.2 运移通道类型多样

微型差异聚集的流体运聚动力主要来自构造应力,动力强度大,任何通道类型和微型圈闭间不同的连通部位都可能形成微型差异聚集。川东南碳酸盐岩裂缝-孔洞性储集层中,作为连通微型圈闭的通道主要有5种:(1)主张裂缝带;(2)自然流体压裂缝带;(3)层间溶孔缝带;(4)滑脱空间带;(5)断裂破碎带。

2.3 运聚动力系统强度大,受控于水平压应力场

2.3.1 运聚动力系统组成

大型差异聚集的动力系统由一系列连通和逐渐抬升的圈闭溢出点构成,使来自盆地中心的油气在浮力与水动力作用下向上翘方向的圈闭运聚^[4]。而处于封闭体系下的川东南碳酸盐岩裂缝系统,一是能自生自储油气,无外源气水补给;二是微型圈闭间高差小,浮力作用很微弱;三是岩性致密,孔隙度一般低于1.5%,渗透率一般小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,因此,只能在构造应力作用下改变体系内的压力平衡,以造成气水运聚。微型差异聚集系统由运移驱动系统(a)、聚集系统(b)和通道系统(c)三个子系统构成。驱动系统靠局部主张裂缝闭合性应变缩容产生驱动;聚集系统由局部主张裂缝张应变扩容实现其聚集气水的功能;通道系统由上述的一种或多种通道组成。

实际上,a和b系统也都是由多个具不同气水界面和体积的张裂缝带或微型圈闭构成。据岩体结构力学原理^[6],在有效应力作用下(图1),a和b系统的体积改变量分别为

$$\Delta V_a = \sum_{i=1}^n \Delta V_{ai} (1 - e^{-\Delta \sigma_a / E_a}) = V_a (1 - e^{-\Delta \sigma_a / E_a}) \quad (1)$$

$$\Delta V_b = \sum_{j=1}^m \Delta V_{bj} (1 - e^{-\Delta \sigma_b / E_b}) = V_b (1 - e^{-\Delta \sigma_b / E_b}) \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_a = \sigma_a - (P_a + \sigma_a) \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_b = \sigma_b - (P_b + q_b) \quad (4)$$

式中 ΔV_a 为 a 系统的体积变量/ m^3 ; ΔV_{ai} 为 a 系统中第 i 张裂缝体积变量/ m^3 ; $\Delta\sigma_a$, E_a 为 a 系统张裂缝上的有效应力和闭合弹性模量/MPa; V_a 为 a 系统可被压缩的原始体积/ m^3 ; ΔV_b 为 b 系统体积变量/ m^3 ; ΔV_{bj} 为 b 系统中第 j 张裂缝体积变量/ m^3 ; $\Delta\sigma_b$, E_b 为 b 系统张裂缝上的有效应力和闭合弹性模量/MPa; V_b 为 b 系统可被压缩的原始体积/ m^3 ; σ_a , σ_{ta} 为 a 系统张裂缝上的构造压应力和张应力/MPa; P_a 为 a 系统内流体压力/MPa; σ_b , q_b 为 b 系统张裂缝上的构造压应力和张应力/MPa; P_b 为 b 系统内流体压力/MPa。

2.3.2 a 系统动力来源和驱动强度

据(1)~(4)式,运聚系统内流体运移的条件是:(1) $P_a \geq P_b$; (2) $\Delta\sigma_a > 0$ 或 $\Delta V_a > 0$ 。导致 $\Delta V_a > 0$ 或 $\Delta\sigma_a > 0$ 的动力来源主要有两种方式:其一,若 σ_a , P_a 变化不大,主要因引张应力下降造成 σ_{ta} 减小,原引张裂缝发生闭合性应变;其二, P_a , σ_{ta} 变化小,由于水平扭剪应力派生的附加压应力使 σ_a 值增大,结构面递进变形和旋转应变,原张性结构面向压性结构面转化,张裂缝趋于闭合^[5]。为了表征 a 系统驱动能量大小,引入驱动强度系数 K_a

$$K_a = \frac{\Delta V_a}{\Delta\sigma_a} \quad (5)$$

K_a 表征增加单位压应力, a 系统内可排出的流体量, K_a 越大, a 系统驱动能力越强。

威远气田震旦系白云岩岩芯有效压力试验资料表明,当有效压力达 12.7 MPa 时,闭合应变可达 90%,其中裂缝和喉道比孔隙和溶洞的变化大^[7],由(1)式估算其 $E_a = 5.52$ MPa。一般情况下 $E_a \leq 12.00$ MPa^[6],现取 $E_a = 12.00$ MPa,据(1)式 $\Delta\sigma_a = 27.63$ MPa 就能使 a 系统有 90% 的体积变化量。下二叠统埋深以 4 000 m 计,褶皱层厚 $L_a = 175$ m,弹性模量 $E = 7 \times 10^4$ MPa,褶皱和断层形成时,取 $\sigma_a \approx 3\sigma_3$ (σ_3 为最小主应力), $P_a \approx \sigma_3$ 。若 σ_{ta} 仅由张应力产生,则其临界曲率 Z_a (当 $\Delta\sigma_a = 0$) 为

$$Z_a = \frac{\sigma_a - P_a}{EL_a} \quad (6)$$

据(3), (6)式, Z_a 由 0.17×10^{-4} 减小到 0.15×10^{-4} ,就能使 $\Delta\sigma_a$ 由 0 变到 27.3 MPa。由此可见微小的曲率变化就可打破 a 系统内的应力平衡,若 $\sigma_a = 0$ 时,仅由水平扭剪应力控制使 $\Delta\sigma_a > 0$,理论上

$$\sigma_n = \frac{\tau}{2}(1 + \cos 2\varphi) \quad (0 \leq \varphi \leq 90^\circ) \quad (7)$$

式中 σ_n 为水平扭剪应力产生的附加应力/MPa; τ 为水平扭剪应力/MPa; φ 为 τ 与张裂缝法线间夹角($^\circ$)。

在 τ 与 σ_a 作用下可以形成次级序褶皱和断裂,理论上 $\tau = 2\sigma_3 \sim 3\sigma_3$ ^[5]。现取 $\tau = 3\sigma_3$,

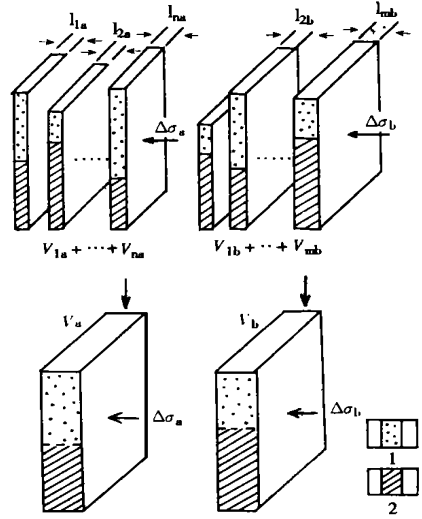


图1 气水运聚系统构成示意图

1—气相; 2—液相

$\Delta\sigma_a = \sigma_n = 27.3 \text{ MPa}$, 据(7)式, 其临界角 $\varphi = 73^\circ$ 。由此可见, 当 φ 由 90° 减小到 73° 时, V_a 的闭合应变量就达 90% ; 当 φ 进一步变小时, V_a 趋于零。

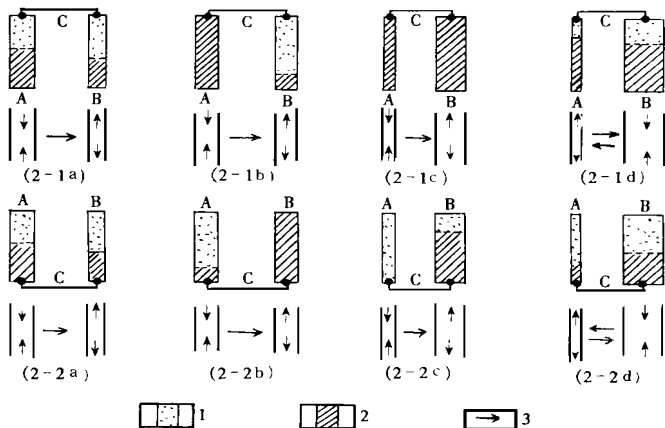


图2 微型差异聚集形成与转化原理图

1—气相; 2—液相; 3—运移方向

2.4 差异聚集形成与转化

川东南地区二叠系、三叠系碳酸盐岩属自生自储裂缝-孔洞性储集层^[2], 为致密岩石中孔洞被裂缝串通后形成的储渗空间, 并被流体所占据, 或者说气水共存^[2,8]。在裂缝系统形成过程中, 运聚系统也同时形成, 在一定条件下, 微型圈闭间的中下部和中部连通方式都可造成微型差异聚集(图2)。

中上部连通方式(图2-1): 其通道主要由引张裂缝和扭张裂缝构成, a系统中的气首先经中上部通道(c)运聚于b系统, 然后是水, 故微型差异聚集出现较晚, 表明 ΔV_a

较大, 意味着主压应力对a系统作用很强。当a系统中运移出足够量的水, 将b系统中最高或较高部位的气向两侧或向较低微型圈闭中排挤, 并能维持至今, 才能产生显著的微型差异聚集(图2-1c)。

中下部连通方式(图2-2): 其通道主要由非主张裂缝组成, 与中上部连通方式相反, a系统中的水首先经中下部通道运移进入b系统, 然后是气, 微型差异聚集可出现得较早, 表征 ΔV_a 较小时, 就能出现微型差异聚集。当然, 只有当a系统中排出的水将b系统较高或最高部位的气排挤出, 并能维持至今, 才能表现出较完善的微型差异聚集(图2-2b)。

值得提出的是, 运聚系统形成过程中, 组成c系统的张裂缝局部闭合或被充填, 原运聚系统会被分隔成若干个次级系统, 导致天然气在同一构造上相对富集与分散。微型差异聚集形成后, 在构造应力作用下, 只要运聚动力系统平衡被打破, 微型差异聚集模式就会发生转化。

在b系统的高部位: (1) 因引张裂缝网络与扭张裂缝网络叠加, 形成方格形网络结构, 并随着残余构造应力降低和气层埋深变浅, 气层压力下降, 气柱高度增大, 高部位气水正常重力分异彻底(图2-1d), 使得常压地区构造高部位少见原始产水井, 但当气层压力仍为超高压, 气柱高度较小, 原始气水聚集关系得以保持(图2-1c), 如川南地区二叠系、三叠系产水井则85.4%分布在高压和超高压区; (2) 由于断层切割或封闭性变差, b系统压力平衡受到很大改造, 微型差异聚集被解体。

在a系统中: (1) 对中下部连通方式来说, 体积压缩量太大, 气体被运聚入b系统较高或最高部位, 微型差异聚集消失; (2) 压应力场降低, 或后期扩容, 无法支持b系统中水体占据高部位, 也将导致微型差异聚集不明显(图2-2d)。

另外, 上述微型差异聚集是以构造压应力较强为条件, 但随着构造运动结束, 残余构造应力降低, 若a和b系统储集层原始孔隙度和渗透率较高, 流体向四周缓慢微扩散、渗滤, 微型差异聚集平衡也会被打破。作者认为这是三叠系裂缝系统高部位少见原始产水井的重要因素。

3 地质模式及典型实例

3.1 高点转移型

当背斜两侧主压应力作用不平衡, 高点偏移形成 a 和 b 系统(图 3-1b), 因主张裂缝带多平行于构造轴线, 连通 a 和 b 间通道主要为非主张裂缝, 故微型圈闭为中下部连通方式。运聚动力强度主要决定于 a 和 b 系统中的引张应力差和 V_a , 因而在褶皱强度大的背斜构造, 如川东高背斜区带, K_a 值较大; 川南褶皱强度中-低的背斜, 一般情况下, K_a 值较小, 但上述 a 和 b 系统能反映其背斜纵向上气水运聚的基本规律。

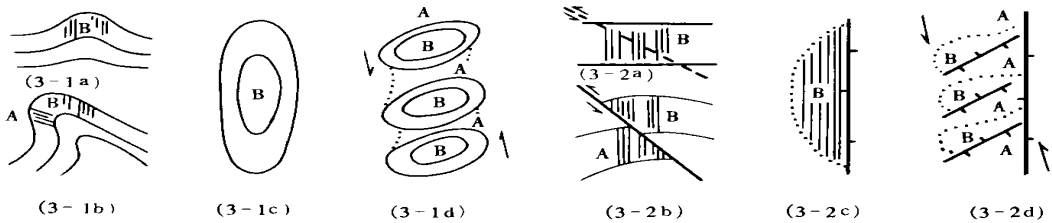


图 3 微型差异聚集地质模式

长带状背斜在水平扭剪应力作用下形成多高点过程中, 原轴部部分张裂缝力学性质向压性转化, a 系统形成, 而部分张裂缝带与次一级扭张裂缝和引张裂缝网络叠加扩容, 形成 b 系统, a 和 b 系统相间分布(图 3-1d)。据(7)式, 这种力学机制可造成较大的 $\Delta\sigma_a$, 组成运聚系统的通道主要是张裂缝和自然流体压裂缝, 并以中上部连通方式运移聚集气水。川南合江构造是这种聚集模式的典型(图 4), 也是川东南构造高部位产水的主要机制。

3.2 断层平移型

在高自然流体压力和具软弱界面的区带, 优先形成断层^[5]。上已述及, 微型圈闭主要由垂直张裂缝带和相连接的孔洞群组成, 并相间分布, 因此, 可认为断层是在若干微型圈闭基础上优先产生, 断层的形成造成 a 系统多由断下盘构成, b 系统主要由断上盘组成, 断层起着通道作用(图 3-2b)。这种方式能导致断层上翘方向原始水气比升高或产水。川东南地区大部分裂缝系统主要受中小断层控制, 该运聚模式是断层控制的裂缝系统最基本的气水关系。

在纵向断褶基础上, 由水平扭剪应力场的作用, 导致次级序断裂及褶皱形成, 相应地也形成多个运聚系统(图 3-2d)。典型的构造有南井(图 5)和二里场等构造, 典型井有二 12(图 6)、坛 17 和圣 2 等井。实际上, 该聚集模式是复合型气水聚集模式, 川东南地区绝大部分断带上产水井可以这种聚集模式来描述。

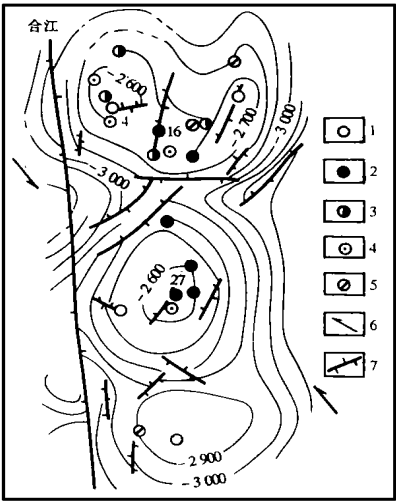


图 4 川南合江构造二、三叠系原始气水井分布图

1—气井; 2—水井; 3—气水同产井;
4—三叠系; 5—干井; 6—水平剪应力;
7—逆断层

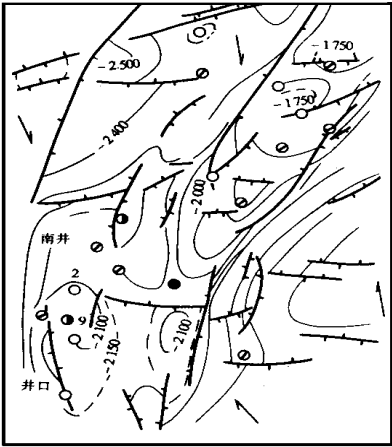


图 5 川南南井构造下二叠统原始气
水井分布图(图例同图 4)

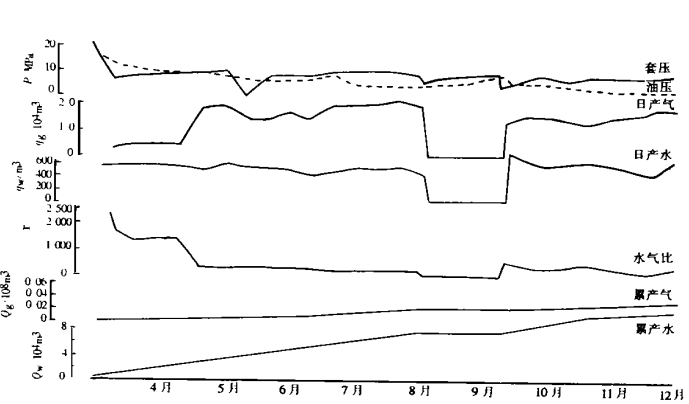


图 6 二 12 井 1995 年采气曲线

4 结论与建议

(1) 川东南地区碳酸盐岩裂缝-孔洞性储集层存在微型差异聚集, 现今主要分布在高压区。致密储层是产生运移驱动系统的地质基础, 水平扭剪应力场是其主要动力来源, 较大的残余构造应力是差异聚集得以维持至今的主要因素。

(2) 微型差异聚集机理较好地解释了构造应力-裂缝系统-气水运聚三者的关系, 并从三维空间和动力机制上深化了裂缝系统和差异聚集概念。

(3) 微型差异聚集气水分布的地质模式, 从成藏机理上阐明了裂缝系统内排水采(找)气的必然性。同时, 为勘探开发隐伏裂缝系统提供了新型地质模型, 尤其对补打开发井、确定最佳井眼轨迹和提高有水裂缝系统天然气采收率, 均有较高的理论和应用价值。

(4) 建议加强水平扭剪应力与直压应力作用下形成的裂缝网络研究, 以定量评价微型差异聚集强度。

致谢: 本文撰写过程中, 得到彭大钧教授, 姜鸿和鲍德瑶高级工程师指导和帮助, 在此深表谢意。

参 考 文 献

1 傅家谟, 刘德汉编. 天然气运移、储集及封盖条件. 北京: 科学出版社, 1992. 124~ 135
2 包茨编. 天然气地质学. 北京: 科学出版社, 1988. 263~ 265
3 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集. 北京: 地质出版社, 1992
4 张万选, 张厚福编. 石油地质学. 北京: 石油工业出版社, 1981. 134, 153~ 160
5 徐开礼, 朱志澄编. 构造地质学. 北京: 地质出版社, 1989. 49~ 53, 102~ 108, 137~ 139
6 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988. 44, 96
7 戴金星, 裴锡古, 戚厚发编. 中国天然气地质学. 北京: 石油工业出版社, 1992. 170~ 173
8 何术坤, 黄承林, 杨雅和. 四川碳酸盐岩有水气藏水体特征的探讨. 天然气工业, 1983, (1): 2~ 7

AN APPROACH TO ESSENTIAL ISSUES OF COALBED GAS GEOLOGY

Sun Wanlu Yin Wenmin Wang Shuhua Fan Mingzhu

(*North China Bureau of Petroleum Geology, Zhengzhou, Henan*)

Abstract

Coalbed gas is a kind of unconventional and coal-formed gas that is mainly composed of methane. The gas is preserved in 3-D reservoir networks in the coalbeds. Its reserve is much greater than that of free gas and dissolved gas preserved in pores and fractures. It is this property that decides the gas migrating and dispersing weakly and preserving easily in large areas. In geological evolution, the existence of stable post structures, complete hydrodynamic system and well sealed coalbeds are necessary for the formation of coalbed gas reservoirs. China's five tectonic regions are situated respectively in stable regions (represented by continent blocks) and active regions (represented by continental margins). Among them, Tarim, North China and South China regions are stable ones, the coal-forming stages of the regions were favourable for the formation and preservation of coalbed basin.

(上接第 176 页)

MINIATURE DIFFERENTIAL ACCUMULATION IN CARBONATE FRACTURE SYSTEM IN SOUTHEAST SICHUAN

Jiang Ziang Xiong Ying Dong Rongxiang He Xuemeng Liu Xuning

(*South Sichuan Co., Sichuan Petroleum Administration, Luzhou, Sichuan*)

Abstract

Miniature differential accumulation exists in carbonate fracture system in Southeast Sichuan. The formation, distribution and transformation of the accumulation were controlled by horizontal torsion stress field; its existence is related to considerable tectonic stress field remained. The miniature differential accumulation is composed of migration drive system, accumulation drive system and passage system. The driving force is caused by the closure strain contractancy of regional major tensile fracture; water and gas accumulations result from the tensile strain dilatancy of the local tensile fracture. The geological model of this kind of accumulation in South Sichuan includes height transformation and fault displacement types, which could describe the distribution regularity of oil and water, and provide theoretical basis for discovering hidden fracture reservoirs.