

川南下二叠统致密碳酸盐岩 储集层裂缝系统孔隙(广义)类型

陈琴芳 胡志水

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

提 要 川南下二叠统碳酸盐岩天然气储集空间——裂缝系统包括多种孔隙类型。作者通过野外剖面、钻井岩芯及岩芯薄片观察分析和实验室鉴定, 全面系统地讨论了下二叠统碳酸盐岩中的各种孔洞缝类型、成因及其对储集层的贡献。提出了下二叠统裂缝储层孔隙类型划分方案。

关键词 碳酸盐岩 裂缝 孔隙类型

第一作者简介 陈琴芳 女 28 岁 助理研究员 石油地质

1 概 述

川南地理上位于四川东南部, 西起隆昌、宜宾一带, 东至重庆、江津, 南至长宁, 为一三角形地带。区域构造上位于川东南拗褶带以西的低褶次级构造带上, 是华蓥山断褶带向西南延伸呈帚状撒开的低背斜群。川南地区一般缺失中三叠统雷口坡组、石炭系和泥盆系, 其它层系发育良好。其中二、三叠系为主要产气层。本区属扬子型褶皱基底, 进入晚震旦世, 地台在准平原基础上沉积了上震旦统一(下)中三叠统的海相地层。晚三叠世开始内陆盆地发展阶段, 喜山运动使沉积盖层全面褶皱, 形成现今格局。

下二叠统为一套海相生物灰岩, 一般厚度 350—400 m, 较稳定。受加里东运动影响, 川南地区经过长期风化、剥蚀夷平, 到早二叠世整个上扬子海盆下沉接受海侵。下二叠统自下而上经历了两次大而完整的沉积旋回。第一旋回为栖霞早期—栖霞晚期—茅口早期, 第二旋回为茅口早中期—茅口中期—茅口晚期。每次海侵初期由短暂局限海台地相很快过渡为开阔海台地相, 局部出现滩沉积; 海侵中期出现台地浅滩沉积; 海退期为延续时间较长的局限海台地相间或有短暂的开阔海台地相交互出现。下二叠统主体产层茅口组沉积时, 水体安静, 能量较低, 生物繁盛, 有机质丰富, 颗粒间多为灰泥杂基充填, 原生储集性能差, 因而成岩后生作用对储集性能的改善至关重要。

对下二叠统孔隙类型的研究, 主要建立在对下二叠统露头剖面(古宋、兴文和红桥剖面)和来 4 井、寺 18 井、阳 52 井的岩芯及薄片分析上。旨在全面研究下二叠统碳酸盐岩在沉积、成岩后生变化以及构造运动改造过程中, 各种孔洞缝的发生、发展和消亡的全过程, 以进一步认识裂缝系统的组成, 为勘探提供理论依据。

2 下二叠统孔隙

川南下二叠统碳酸盐岩沉积环境总体能量低、分选差，颗粒间多为杂基添隙，原生孔隙度较低，原生孔隙主要包括：生物体腔孔、粒内孔，生物骨架遮蔽孔，杂基间孔，生物钻孔，微晶或泥晶晶间孔隙等。这些孔隙在成岩后生变化过程中因胶结、压实和充填，大多逐渐失去意义。但是随着碳酸盐岩的成岩后生变化，下二叠统形成一系列次生孔隙。研究表明，川南下二叠统从沉积到构造变形期，大致经历了 6 种成岩环境，各成岩环境主要成岩类型及意义见表 1。

表 1 下二叠统成岩环境及其孔隙(广义)发育特征
Table 1 Diagenesis environment and developing characteristics in Lower Permian

成岩环境	建设性成岩作用	破坏性成岩作用	孔隙(狭义)	裂 缝
海 水 成岩环境	准同生白云化早期胶结 矿物转化	二、三代胶结硅 化自生矿物形成	晶间孔、粒内孔	晶间微缝
混 合 水 成岩环境	白云化溶蚀作用	压实作用胶结(充 填)作用	溶孔、溶洞铸模孔、 云化晶间孔	晶间裂缝
大气淡水 成岩环境	溶蚀作用、风化作用、卸 荷破裂	胶结(充填)硅化、 自生矿物形成	溶孔、溶洞、角砾间 孔、粒间粒内溶孔	卸荷裂缝、层理缝、角砾间缝
浅 埋 成岩环境	溶解作用、胶结作用、去 硅化	压实、充填、胶结、 黄铁矿化	溶孔、溶洞	缝合线缝、颗粒压裂纹缝
深 埋 成岩环境	埋藏云化、压溶、压裂、 去硅化、有机质成熟	压实、胶结、充填、 重结晶、硅化	云化晶间孔、溶孔	水力压裂、油气扯裂缝
构 造 浅 变质环境	破裂作用、溶蚀作用、云 化、去硅化作用	应变重结晶、胶结 充填、硅化	溶孔、溶洞、云化晶 间孔	构造裂缝、区域裂缝、层间脱 空、构造缝合线缝

镜下及岩芯中(阳 52 井，寺 18 井等)较常见的、对天然气具有储集意义的几种孔隙类型有：粒内和粒间溶孔、生物铸模孔、白云化晶间收缩孔(碳酸盐岩的白云岩化使得体积收缩，产生孔隙)、亮晶晶间孔或嵌晶晶间孔、崩塌角砾间孔(下二叠统顶部因岩溶洞穴垮塌，塌积或充填物间孔)以及不规则溶蚀孔隙等。就狭义的孔隙而言，下二叠统直到构造期前，所经受的各种成岩作用是一个使孔隙度逐渐减小的过程。基岩平均孔隙度小(一般小于 1%)，渗透率低(一般小于 0.01×10^{-11} cm)，为典型的致密碳酸盐岩。

3 下二叠统的裂缝

裂缝是下二叠统储层的重要组成部分，实际上没有裂缝就没有下二叠统的有效储层。

3.1 构造裂缝

3.1.1 区域(构造)裂缝

对川南长宁背斜下二叠统多处露头剖面进行裂缝调查时,发现两组分布广、产状稳定并基本上垂直层面的区域裂缝(产状分别是 $33.3^{\circ}\angle 76.3^{\circ}$ 和 $310.8^{\circ}\angle 86^{\circ}$),裂缝间距 1—5 m 甚至更大。其特点是:大面积范围内分布,方向变化小,一般垂直层面,有相对较大间距,可切割各种局部构造并常常以正交组合方式发育。川南兴文石林的地貌景观根本上取决于区域裂缝的存在,并经第四纪岩溶改造而成。

在构造期,扬子地台结晶基底与上覆盖层(两者间有力学性质差异)受构造挤压,盖层微量的弯曲和反弹使脆性岩层中产生区域构造裂缝(或断裂)。区域裂缝在局部构造范围内分布较为均一,不能指示其它类型裂缝发育规律,但其根本意义是将分布局限的其它构造裂缝串联起来以形成统一的裂缝系统。

3.1.2 与褶皱有关的裂缝

在岩层受力褶皱过程中,产生一系列裂缝及裂缝组合的规律已被广泛认同。它一般优势分布在岩层弯曲较大部位,但无疑,在川南区域范围内,不同构造形成的受力方式不同直接影响了裂缝性气藏的分布。

向斜中褶皱裂缝也为常见(来 4 井和云 1 井岩芯)。

3.1.3 与断层有关裂缝

断层在发展过程中,构造应力重新分配可以派生出一系列新的裂缝类型。江安县红桥剖面下二叠统两条主干断层(产状分别为 $40^{\circ}\angle 75^{\circ}$, $40^{\circ}\angle 83^{\circ}$),断层两侧裂缝发育带宽度达 50 m。断层常作为一个带,在其滑动带或破碎带中还有其它类型裂缝,如羽状裂缝和断层角砾岩缝,它们与断层引起的局部构造应力有关。断层面两侧岩层在错移前到极小位移,构造力克服岩层的弹性而在上下盘都可以产生裂缝,断距增大,由于断面的摩擦阻力,必然引起两盘出现潜在的岩层弯曲拖曳趋势,其结果或以次级褶皱形式或以裂缝形式表现出来。

3.2 层理缝

层理缝对厚层或块状岩层微不足道,但对于碳酸盐岩中岩性差异大的薄互层或夹层的作用不能忽视。严格地讲下二叠统顶面也属于层面,该层面与其它裂缝孔隙一起为古岩溶作用提供了流体通道。

在构造变形期,因侧向构造力作用,原先紧闭的层理面上下的岩层因物性差异而变形幅度不同,层理缝不再闭合(兴文剖面中亮晶灰岩与荷叶藻灰岩互层间层理张开可达 5 mm 以上),当岩层具备足够的弯曲度后,层理缝在褶皱顶部可转化成新月形脱空缝而意义增大。

3.3 压裂缝

据岩芯和薄片分析,将压裂缝从成因上可分为三种类型:

3.3.1 重力压裂缝: 因埋深增加上覆岩层厚度加大,导致沉积物内部性脆颗粒被压裂压碎(阳 52 井, 2152 m)。

3.3.2 油气膨胀压裂缝: 下二叠统深埋过程中,有机质过成熟,石油裂解成天然气,在相对封闭的环境中形成异常高压,高压流体对围岩产生动力作用,沿岩性薄弱带或微裂缝向外运移,从而“扯开”地层或扩大原有的微裂缝。薄片偶尔可见的产状不稳定的“枝

状”裂缝(有碳质沥青质浸染)可能属此类成因(阳 52 井, 2063 m)。

3.3.3 水力压裂缝 沉积物随某些闭塞的流体介质的形成同时被埋藏地下, 承受压力增大, 超高压流体保存在地层中, 另外水热增压和粘土矿物脱水(蒙脱石向伊利石转化)以及石膏脱水都使这种压力继续增加, 当流体压力达到或超过上覆沉积压力, 则该处岩石因缺乏沉积岩的内部阻力而变得极不稳定, 致使上部围岩产生裂隙(阳 52 井, 2084 m)。

3.4 收缩裂缝

因岩石体积减小产生内部拉张成张裂隙, 包括脱水收缩缝和相态转变缝。碳酸盐岩中的脱水收缩缝源于成岩过程中粘土矿物脱水或凝胶的脱水而体积收缩, 在沉积岩中形成有规则间隔的三维多面体裂缝网络^[1], 这种裂缝在川南下二叠统中较少见。相态转变缝, 主要指方解石转变成白云石使得克分子体积减小 13%, 造成白云石晶粒间松散排列, 形成孔隙或裂缝。白云化现象在下二叠统中普遍存在, 该类裂缝常见(阳 52 井, 2129 m)。

3.5 地表成因裂缝

下二叠统东吴运动的抬升, 压力降低, 岩体因卸荷产生体力张缝, 这种张缝与其它风化裂隙为大气淡水为下二叠统的侵蚀岩溶提供了流体通道, 加速了岩溶作用也增加了岩溶作用深度。下二叠统侵蚀期岩溶使下二叠统顶部广泛发育孔洞, 当上覆重新沉积时, 可使这些孔洞垮塌, 所形成的角砾岩块之间的缝隙在下二叠统钻井取芯中常见(阳 52 井、来 4 井和寺 18 井中均多见)。

3.6 下二叠统缝合线缝

在川南下二叠统无论露头还是岩芯薄片中都常见缝合线, 且类型丰富, 而且有些类型与岩溶孔洞或裂缝关系密切。

作者就阳 52 井下二叠薄片鉴定总结以下特点:

(1)近平行地层的简单波形缝合线, 变化平缓, 齿状跳动小, 缝合面上残留泥质等。这类缝合线多孤立分布、紧闭, 与岩溶孔洞裂缝无关, 属成岩期缝合线。

(2)平行或斜交地层的尖峰型或缝合型缝合线, 切穿早期充填构造缝, 并因溶蚀作用使得裂缝发生错移(阳 52 井, 2253 m)。这种缝合线形成于构造期无疑。

(3)产状不定的矩峰形缝合线, 矩形齿上下跳动剧烈, 缝合线内多为方解石晶体充填或半充填, 空隙中明显的沥青浸染(阳 52 井, 2260 m)。

(4)连通型网状、杂乱分布的缝合线, 这类缝合线属典型构造期产物, 它们密集交错, 缝合线周围原岩多被溶蚀并被方解石充填, 除少数溶蚀残余和沥青质痕迹尚可表征缝合线外, 其主要特征已被岩溶强烈改造而消失殆尽(阳 52 井, 2093 m)。

(5)孤立闭合型缝合线, 它迭加在矩峰型缝合线之上, 缝合线包围结晶方解石或基岩, 其平面上形式孤立, 但在三维空间可能与其它缝合线相通(阳 52 井, 2260 m)。

碳酸盐岩在构造期产生裂缝的同时受压出现溶蚀, 压溶物质通过裂隙带出的同时也改造裂缝并与岩溶作用一起成为特定的孔洞缝空间, 缝合线与天然气的最终储渗系统密切相关, 它对碳酸盐岩裂缝气藏可具备建设性意义, 可成为一种补充的储渗空间。

4 下二叠统岩溶孔洞

据川南下二叠统 150 余口钻井统计, 放空率达 15.4%。一般放空 10—30 cm, 最大达

4.8 m(长 8 井), 充填的岩溶孔洞更为常见。现今研究的岩溶现象是下二叠统形成发展过程中的各种岩溶作用的综合结果。据剖面露头观察分析和理论研究, 将下二叠统岩溶划分为四种类型, 即沉积期、侵蚀期、埋藏期和构造期岩溶^①。

沉积期岩溶在剖面(兴文和古宋)上表现为方解石充填的孔洞层, 厚度 1—5 m, 孔洞直径(或长度)一般 5—40 cm。侵蚀期岩溶在剖面上表现为典型的古岩溶地貌痕迹。构造期岩溶表现在对构造裂缝的溶蚀扩大(剖面上溶蚀构造缝宽度可达 1.5 cm 以上); 另一方面改造裂缝网络成大小不等的岩溶洞穴。

我们认为, 岩溶孔洞的形成最终取决于裂缝组系, 所谓岩溶孔洞确切地说是岩溶裂缝或者是溶解而扩大(成孔洞)了的裂缝, 没有裂缝的存在根本就谈不上岩溶的形成, 因为裂缝决定了能够带出淋滤溶解物质的通道。在碳酸盐岩中孔洞发育带有两种形成途径, 第一是沉积间断带, 以下二叠统顶部的侵蚀期岩溶为典型。沉积期岩溶实际上也必须经历一个暴露期(即使很短暂)的沉积间断。第二是构造裂缝组系, 即指构造期岩溶。构造期岩溶是受控于裂缝、也反作用于裂缝体系的最重要的岩溶形式。现今含气裂缝系统的分散和不均一受构造断层派生裂缝本身和岩溶充填差异的联合控制。

总结川南地区下二叠统孔洞缝类型研究成果, 我们提出下二叠统孔隙类型成因分类(表 2)。

表 2 川南下二叠统裂缝孔隙(广义)类型

Table 2 The causal types of pores and fractures in Lower Permian in south Sichuan

形态特点	成因分类		形成时间	有效性	备 注
裂 缝	构造 缝	局部构造裂缝、断层派生缝	构造期为主	好	
		区域裂缝	侵蚀期与构造期		
	沉积 成岩 缝	层理	成岩早期	较差	构造期脱空
		压裂缝: 包括水力压裂、重力压裂、胀裂	晚期成岩	差	
		缝合线: 成岩期缝合线、构造期成岩	成岩期或构造期	较差	
		脱水收缩缝	成岩期	差	
		相态转变缝	成岩期、构造期	较差	
	地表 成因 缝	风化裂缝	古侵蚀期	较差	
		卸荷裂缝	古侵蚀期、构造期	较差	
		塌积角砾间缝	古侵蚀期	较差	
孔 洞	原生 孔隙	粒间孔、粒内孔、 杂基间孔、晶间孔、生物钻孔、遮蔽孔	沉积期 早期成岩期	差	
	次 生 孔 洞	沉积期岩溶孔洞	P ₁ 沉积时	差	
		侵蚀期岩溶孔洞	P ₁ 沉积后、P ₂ 沉积前	较差	
		埋藏期岩溶孔洞	成岩后生期	差	
		构造期岩溶孔洞	构造期	好	

① 胡志水等, 川南下二叠统碳酸盐岩古岩溶作用与天然气藏的关系, 天然气地球科学, 1994, (3)。

下二叠统孔隙裂缝演化综述如下：下二叠统沉积时总体环境闭塞低能，碎屑颗粒间多为在灰泥填隙，原生孔隙包括少量杂基间孔、粒内孔(体腔孔)和遮蔽孔隙，海底初步胶结使孔隙度降低；下二叠统沉积期杂地壳差异升降，使下二叠统经历了 6—7 次短暂暴露期(沉积期岩溶)，大气淡水淋形成非选择性的溶蚀孔洞和选择性的溶孔及部分白云化收缩孔隙，但大多数很快充填；东吴运动下二叠统抬升遭风化剥蚀，并产生卸荷张缝及风化裂隙，岩溶作用(侵蚀期岩溶)发育；上二叠统沉积逐渐破坏下二叠统顶部缝洞网络，形成同时也充填垮塌角砾间孔缝；埋深增加，形成颗粒压裂及成岩期缝合线缝；继续埋深，温压增大，环境趋于封闭，形成少量水力压裂缝；侏罗纪时，有机质成熟，生油期释放酸性水，产生局部溶蚀作用；油-气转化体积膨胀形成少量扯裂缝；下二叠统油气转化进入高峰期以后，晚燕山和喜山构造运动本区上升褶皱断裂，产生大量区域构造裂缝、褶皱和断层缝、层间脱空缝及构造期缝合线缝，发育不均一；地下水、承压孔隙水等对裂缝网络及基岩发生广泛的岩溶，使孔洞缝网络更好地沟通扩大，并捕气成藏；或因微环境差异，溶蚀与充填在空间上相近并同时发生，可分割气藏成多个气藏裂缝系统，也可能以充填为主导使部分裂缝网络完全失去意义。

5 结 论

川南下二叠统因其特有的沉积环境和复杂的成岩后生变化过程，碳酸盐岩储集空间包括多种孔洞缝类型。较有意义的次生孔隙有粒间(内)溶孔、晶间孔、云化收缩孔、崩塌角砾间孔等。除构造裂缝外，卸荷裂缝、层理缝、压裂缝、构造期缝合线等裂缝类型对储渗也起一定作用。构造期岩溶叠加在裂缝网络上，对形成有效含气裂缝系统具有明显的影响。

收修改稿日期：1995 年 8 月 17 日

参 考 文 献

- [1] R. A. Nelson, 1985, *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoir*. Gulf Publisher, Co. Houston.

General Types of Pores in Lower Permian Carbonate Storage Fractures Sems in South Sichuan

Chen Qinfang and Hu Zhishui

(Guangzhou institute of Geochemistry Chinese Academy, Guangzhou 510640)

Abstract

The carbonate of Lower Permian in south Sichuan is typical fractures storage, and it includes many types pores and fractures. No doubt fractures caused by structure activities take

an important part in gas traps, but some other types of secondary pores and fractures are very significant too.

Based on the analysis of sediments and diagenesis of lower Permian series (slices and cores of Well Yang 52, Si 18 and Lai 4; sections of Gusong, Xinwen and Hongqiao in south Sichuan), the authors studied systematically all types of pores and fractures including structure fissures, secondary corrosion cavities, contract pores and crevices, unloaded fissures, regional-rifts, crush cracks (mechanical, hydraulic and oil—gas divulsional), separate fissures in layers, collapse breccias clinks and seaming lines, etc.. By researching their mechanism and significance to fractures system, the pores (general) causal classification of Lower Permian Series was presented.

Although so many types pores exist, the gas reservoir constructs in south Sichuan were formed in Xishan Activity Period, so the combination of fractures by structures and corrosion cavities by structural period karstification and other pores formed in the same period is most important.

Key words: Carbonate rock, Fractures, Pores type