

通南巴地区膏盐层分布及其流变学特征

李辛子¹, 刘彬¹, 武晓玲¹, 刘国萍¹, 冯琼¹, 付孝悦²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化勘探南方分公司, 四川 成都 610041)

摘要:通南巴地区膏盐层层位稳定, 形态分布一般平稳连续; 当上、下能干层(白云岩层)受到褶皱及断层影响发生形变时, 膏盐层呈丘状、楔状、纺锤状等异常膏盐体形态。膏盐层具有多层分布(57~110层)、累计厚度大(273~415 m)的特征, 其空间展布与上、下能干层的形态和构造特征关系密切: ①白云岩岩层的初始主波长大于膏盐层厚度, 能干层间及其所夹膏盐层互相影响, 膏盐层变形受接触应变带影响较大, 易于形成不协调褶皱; ②受应力、温度、流体等因素影响, 膏盐岩容易发生蠕变断裂, 并在上、下能干层断裂的触发下, 发生蠕变流动, 形成异常膏盐体。多层分布的膏盐层其封闭能力较单一、巨厚膏盐层的封闭能力弱; 异常膏盐体的厚度显著增大, 其周围可能是油气勘探的有利场所。

关键词:蠕变断裂; 接触应变带; 流变学; 膏盐层; 通南巴地区

中图分类号: P542

文献标识码: A

Distribution and rheological characteristics of evaporates in Tongnanba area

Li Xinzi¹, Liu Bin¹, Wu Xiaoling¹, Liu Guoping¹, Feng Qiong¹, Fu Xiaoyue²

(1. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Exploration Southern Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The vertical distribution and geometry of evaporates in Tongnanba area are generally steady and continuous. However, when the overlying and underlying competent dolomite are deformed by folds and faults, they occur in special shapes like moundy, wedge and spindle set. The evaporates are characterized by multilayers (57-110), a large gross thickness (273-415m), and close relationship with the shapes and structures of competent beds. The initial dominant wavelengths of the dolomite layers are larger than the thickness of evaporates, the evaporates and the surrounding multiple competent beds interact with each other, and the contact strain zones have relatively large influences on the evaporates, therefore, the evaporates are apt to form disharmonious folds. The evaporates are easy to form creep fractures due to the influences of stress, temperature, fluid and other factors, and abnormally-shaped evaporate bodies are developed due to faulting of the competent beds. It was proved that sealing capability of multilayer evaporates was weaker than that of single evaporates with large thickness. The thickness of evaporate body enlarges significantly when they get abnormally-shaped, thus the surrounding areas are favorable targets for hydrocarbon exploration.

Key words: creep fracture; contact strain zone; rheology; evaporate; Tongnanba area

通南巴(原称涪阳坝-南阳场)构造带, 位于四川盆地东北部的米苍山和大巴山前缘, 是印支-燕山期形成的一个大型北东向背斜。通南巴地区晚三叠世之前为海相碳酸盐岩、蒸发岩及碎屑岩沉积; 印支期, 结束了海相沉积, 开始了本区巨厚的陆相碎屑沉积历史。

通南巴地区受中、下三叠统膏盐层的控制, 形成一套完整的构造形变层, 构成相对独立的成藏系统。目前, 该区完成多口钻井中发现下三叠统嘉陵江组(T_{1j})气藏两个。其中, 川涪82井T_{1j}完井测试日产气5.22 ×

10⁴ m³, 河坝1井T_{1j}完井测试获日产8.66 × 10⁴ m³工业气流。本文根据地表露头、钻井和地震解释资料, 研究了膏盐层的分布样式, 并对多层膏盐层分布的力学机制和流变学特征进行了讨论, 以期阐明其对油气富集成藏的影响。

1 膏盐层区域分布特征

1.1 概述

四川盆地早、中三叠世蒸发岩极为发育, 有6个成

表 1 通南巴地区三叠纪地层简表

Table 1 Stratigraphic column of the Triassic in Tongnanba area

系	组	段	厚度/m	层位	岩性概述	岩相特征
三叠系	须家河组		310 ~ 380	T_3x	中、上部黑色页岩夹岩屑砂岩,下部灰白色岩屑砂岩夹黑色页岩	湖相与河流相
		四段	7 ~ 140	T_2l^4	深灰色云岩夹硬石膏及灰岩	潟湖
	雷口坡组	三段	240 ~ 260	T_2l^3	深灰色灰岩夹硬石膏、灰岩	浅滩、潮间
		二段	180 ~ 230	T_2l^2	深灰色云岩与硬石膏互层	潮间
		一段	60 ~ 80	T_2l^1	硬石膏夹云岩及砂屑灰岩,底为“绿豆岩”	潮间
		五段	110 ~ 120	T_1f^5	上部硬石膏,下部云岩夹鲕粒或砂屑云岩	咸化潟湖
	嘉陵江组	四段	100 ~ 180	T_1f^4	上部硬石膏及盐岩,下部云岩夹鲕粒、粒屑云岩	咸化潟湖
		三段	170 ~ 180	T_1f^3	灰岩夹石膏及砂屑灰岩	浅海台地
		二段	170 ~ 190	T_1f^2	硬石膏与云岩及砂屑云岩互层	浅滩
		一段	310 ~ 420	T_1f^1	深灰色灰岩夹灰色灰岩	浅海台地
	飞仙关组	四段	80 ~ 100	T_1f^4	灰紫色云岩与硬石膏	潮间
		三段—一段	400 ~ 550	$T_1f^3-T_1f^1$	灰色灰岩、紫灰色泥质灰岩,上部夹鲕灰岩,底为灰质泥岩	浅海台地夹鲕滩

盐期,18 个聚盐期,膏盐层与天然气成藏关系密切^[1]。据钻井揭示及邻区地表露头资料,通南巴构造带发育巨厚的膏盐层,分布于中三叠统雷口坡组(T_2l)一段、二段、三段和四段,下三叠统嘉陵江组二段、三段、四段和五段,以及下三叠统飞仙关组(T_1f)四段(表 1)。

河坝 1 井揭示的雷口坡组深度 3 550.0 ~ 4 066.0 m,厚度 516.0 m,主要为潮间 - 潮上膏云坪相沉积。嘉陵江组埋深 4 066.0 ~ 4 356.8 m,厚度 290.8 m,主要为潟湖 - 台地沉积,其中,嘉陵江组二段为主要含气层段。飞仙关组埋深 4 791.0 ~ 5 472.0 m,厚度 681.0 m,为潮间 - 台地沉积。

通南巴地区膏盐层以硬石膏为主,盐岩较少,并夹有白云石、方解石、泥质等矿物。膏岩有石膏岩和硬石膏岩两种,单矿物的硬石膏($CaSO_4$)、石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)主要为白色、灰色、浅黄色、棕红色等,呈层状、透镜状产出。石膏岩粒度较粗,而硬石膏岩较细。石膏岩和硬石膏岩常常与白云岩、泥岩形成互层,与泥岩、碳酸盐岩和盐岩等形成过渡型岩类(图 1,图 2)。盐岩主要矿物为石盐($NaCl$),呈无色、灰色、褐色、白色等,具立方晶体,吸潮、有咸味、易溶于水。盐岩呈层状、条带状、不规则透镜状以及各种形式的盐丘产出。层状的也可以见到纹层构造及石膏、硬石膏和泥质夹层。盐岩在蒸发岩系中常位于石膏岩和硬石膏岩的上部。

1.2 膏盐层空间展布特征

区域上膏盐层均有广泛出露,总体上厚度较为稳定,对比性、连续性好,成为区域地层对比研究的重要标志层。在研究区地震解释剖面上发现,膏盐层的空间展布与上、下岩层的形态和构造特征关系密切(图 3)。当上、下岩层稳定,构造简单时,膏盐层则平稳分布(图 3);当上、下岩层受到褶皱及断层影响发生



图 1 通南巴地区白色硬石膏岩与灰色白云岩互层沉积(川涪 82 井, T_1f^2)

Fig. 1 Interbedded white anhydrite and grey dolomite in Tongnanba area(T_1f^2 , Well CF82)



图 2 通南巴地区棕红色膏盐岩夹灰色粉晶云岩条带(川涪 82 井, T_1f^5)

Fig. 2 Brownish red evaporate with grey dolomite interbed in Tongnanba area(T_1f^5 , Well CF82)

形变的情况下,膏盐层则具有明显的丘状、楔状、纺锤状等异常变形形态(图 4)。

根据过河坝 1 井主测线和联络测线地震解释剖面资料分析(图 5),在近 23.8 km 宽度内,有 5 个较大规

模的异常变形膏盐体。膏盐体规模一般长 1 000 ~ 3 500 m,最长 5 000 m;宽 800 ~ 2 250 m,最宽 4 000 m;高 80 ~ 180 m,最高 300 m。最大异常膏盐体位于母家梁构造高点。

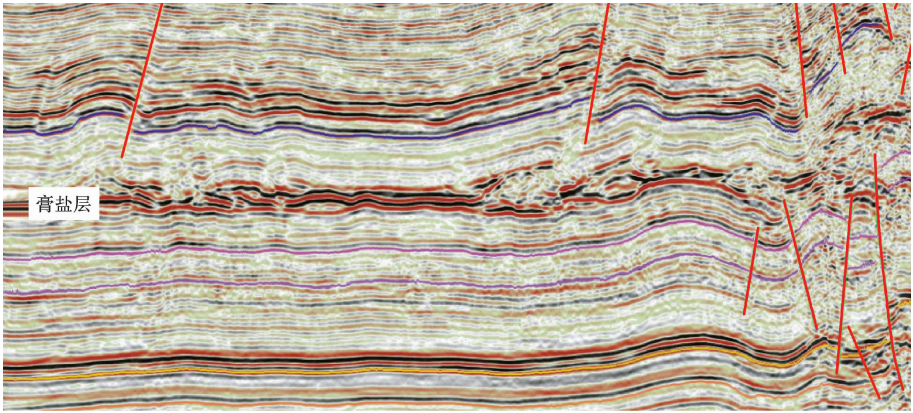


图3 通南巴地区 Crossline792 测线地震剖面上的膏盐层示意图
Fig. 3 Evaporate on crossline 792 section in Tongnanba area

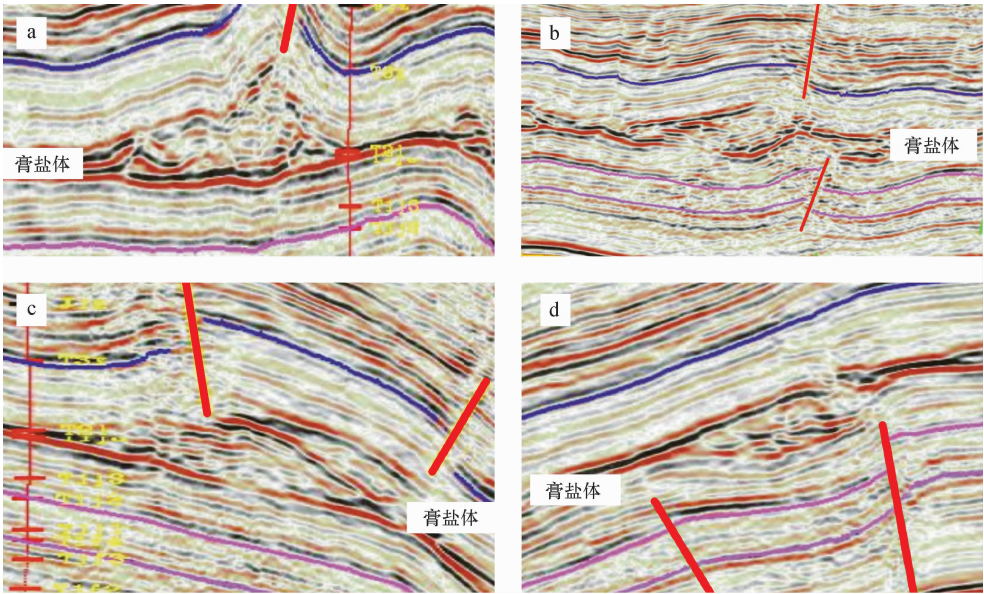


图4 通南巴地区膏盐层的形态受制于上、下能干层的构造变形特征
Fig. 4 Structural deformation of the evaporate under the control of the underlying and overlying competent beds in Tongnanba area

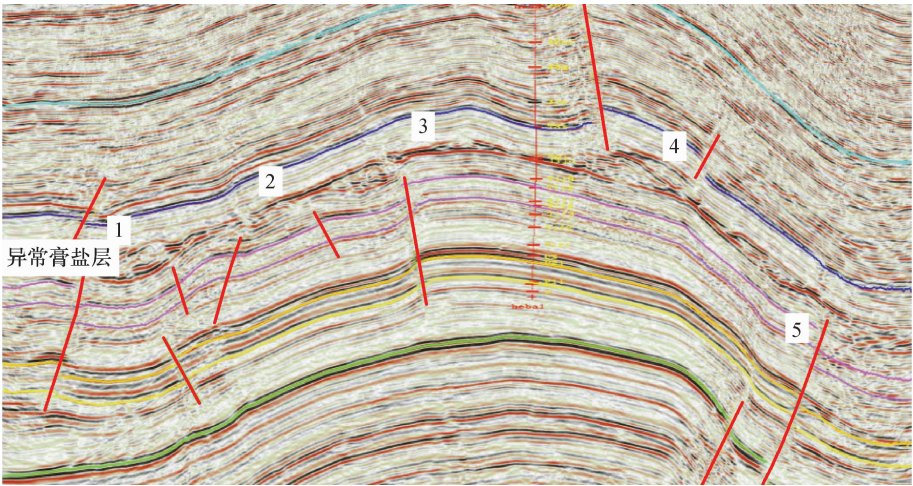


图5 通南巴地区过河坝1井主测线644地震剖面上的膏盐层示意图
Fig. 5 Evaporate on inline 644 section tied to Well Heba-1 in Tongnanba area
(1,2,3,4,5 均为异常膏盐体。)

表 2 通南巴地区膏盐层厚度分布
Table 2 Isopach of the evaporate in Tongnanba area

地层	组	雷口坡组 T ₂ l				嘉陵江组 T ₁ j			
	段	T ₂ l ⁴	T ₂ l ³	T ₂ l ²	T ₂ l ¹	T ₁ j ⁵	T ₁ j ⁴	T ₁ j ³	T ₁ j ²
	沉积相	潮间	浅滩潮间	潮间	潮间	潮上	潮上	浅海台地	潮间
河坝 1	地层厚度/m	20	284	149	63	38	75	176	169
	膏盐层数	0	7	16	9	4	9	3	9
	膏盐厚度/m		20(1~5)	47(1~8)	48(1~12)	21(2~10)	35(1~11)	8(1~4)	94(1~29)
川涪 82	地层厚度/m	7	262	186	62	121	182	185	188
	膏盐层数	0	1	23	15	23	21	4	23
	膏盐厚度/m		4(4~4)	35.5(1~4)	26.5(1~8)	62.5(2~13)	148(2~35)	9(0.5~4)	81(3~21)
川巴 88	地层厚度/m	137	270	282	113	83	85	171	176
	膏盐层数	10	11	12	9	17	8	1	13
	膏盐厚度/m	19(1~5)	46(2~10)	68(2~14)	47(5~17)	83(1~14)	56(1~18)	3(3~3)	93(7~35)

注:数据来源于各井完井报告。表中膏盐厚度数据为累计厚度(单层最小值-单层最大值)。

2 膏盐层多层分布特征

2.1 概述

通南巴地区膏盐层具有多层分布、累计厚度大的特征。其中,河坝 1 井膏盐层数为 57 层,累计厚度为 273 m;川涪 82 井为 110 层,累计厚度为 366.5 m;川巴 88 井为 81 层,累计厚度为 415 m(表 2)。

雷口坡组以白云岩、灰岩与硬石膏岩、岩盐频繁间互为特点,膏盐岩主要发育于雷一段至雷三段,雷四段由于印支运动中期的抬升,遭受剥蚀,在西南段的川巴 88 井雷四段仅厚 19.0 m。雷一段膏盐岩横向分布稳定、连续,对比性较好,其余各段的膏盐岩横向变化较大,连续性与对比性较差。膏盐层以川巴 88 井层数最多,达 42 层,累计厚度最大,达 180.5 m;河坝 1 井层数 32 层,厚为 115.0 m;川涪 82 井层数 39 层,厚为 66.0 m;膏盐层厚度分别占地层厚度的 22.5%, 22.2%及 12.8%。

嘉陵江组膏盐岩层位在区域上最为稳定。嘉五段在川巴 88 井膏盐层连续分布达 83.0 m(占地层厚度的 100%)。嘉四段是区域上最重要的膏盐岩发育层段;川涪 82 井膏盐层厚 148.0 m(占地层厚度的 81.3%);涪阳坝一带膏盐层连续厚度达 52.0~85.0 m。嘉二段由白云岩-硬石膏岩组成 3 个沉积旋回,在每一旋回上部都发育硬石膏岩层。膏盐层在川涪 82 井层数最多,达 71 层,累计厚度为 300.5 m;川巴 88 井 39 层,厚为 235.5 m;河坝 1 井 25 层,厚为 158.0 m。

飞仙关组仅在飞四段发育一层膏盐层,故未予统计。

2.2 多层分布发育机制

川东北地区的主体构造为北西向大巴山弧形构造带及其前缘带和北东-北东向川东弧形褶皱带,其中褶皱均为纵弯褶皱^[2]。在地下较高温压条件下,岩石的粘度在变形中起着主要作用。粘度较大的能干层在褶皱发育中起着骨干作用,粘度小的软弱层易于屈服压力变形较大。一套能干层、软弱层相间组成的褶皱,其形态与各层的能干性有关,也与相邻能干层的互相影响程度有关。后者取决于能干层间的距离及褶皱层的接触应变带的宽度。根据兰姆赛的研究^[3],比较明显的接触应变带的宽度大约相当于能干层的一个初始主波长的大小。

统计河坝 1 井嘉四段膏盐层与白云岩层(能干层)互层的数据(表 3)发现,白云岩、灰质白云岩层的

表 3 河坝 1 井嘉四段膏盐层发育段地层厚度
Table 3 Thickness of the 4th member of the Jialingjiang Fm with well-developed evaporate in Well Heba-1 in Tongnanba area

深度/m	厚度/m	岩性
4 110~4 111	1	灰白色膏盐
4 111~4 113	2	灰白色石膏
4 113~4 114	1	灰白色膏盐
4 114~4 120	6	灰白色石膏
4 120~4 123	3	深灰色白云岩
4 123~4 134	11	灰白色石膏
4 134~4 158	24	深灰色灰质白云岩
4 158~4 161	3	灰白色云质石膏
4 161~4 162	1	深灰色白云岩
4 162~4 165	3	灰白色云质石膏
4 165~4 168	3	深灰色灰质白云岩
4 168~4 170	2	灰白色石膏
4 170~4 179	9	深灰色灰质白云岩

厚度为 1 ~ 9 m, 最大为 24 m; 膏盐层的厚度为 1 ~ 11 m。按照毕奥特推算公式:

$$W_i = 2\pi d \sqrt[3]{\mu_1/\mu_2} \tag{1}$$

式中: W_i ——初始主波长, m ; d ——能干层厚度, m ; μ_1 , μ_2 ——能干层、软弱层粘度^[4-5], $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

以盐岩粘度为 $10^{17} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 硬石膏、白云质石膏粘度为 $10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 白云岩、灰质白云岩粘度为 $10^{22} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 计算, 可得白云岩层的初始主波长一般为 16 ~ 144 m, 最大为 481 m。对比表 3 可知, 白云岩层的初始主波长度大于膏盐层厚度, 即两能干层相隔过近, 能干层间以及其所夹膏盐层在互相影响范围内。当白云岩层的初始主波长度较小, 膏盐层厚度较大时, 膏盐层变形所受接触应变带影响较小, 空间展布较平直稳定; 当白云岩层的初始主波长度较大, 膏盐层厚度较小时, 膏盐层变形所受接触应变带影响较大, 易于形成不协调褶皱。

据此可知, 当总厚度不变时, 膏盐层多层分布样式比单层巨厚层的分布样式更易于受到上、下能干层接触应变带的影响而发生变形。

3 膏盐层流变特征

3.1 膏盐层流变性质

在时间的纵深上理解大陆运动和变形的流变学理论模式在 2002 年美国学者推动下正成为构造地质学与大地构造学的新航程^[6]。岩石实际变形与破坏特性是应力、温度与时间的函数, 在岩石与岩体中, 晶粒结构与间断面的影响具有特殊意义, 所以说岩石流变学必然是构造流变学或非连续介质力学^[7]。但是, 在不同构造环境下, 地壳流变性质有很大区别, 这是因为地壳流变与地壳分层、地温梯度、物质组成及其流变参数

和变形机制相关。目前, 浅层地壳岩石的流变学尚未深入研究^[8]。

膏盐层由于其特定的岩石流变属性(表 4), 因此, 在地层温度较低条件下, 即在地壳较浅层次便进入流变变形的地质环境。通南巴地区古地温梯度为每百米 2.4 ~ 2.5 $^{\circ}\text{C}$ ^[10-11], 地表温度约 15 $^{\circ}\text{C}$, 按河坝 1 井膏盐层现今埋深 3 570 ~ 4 790 m 计算, 膏盐层地温可达 101 ~ 135 $^{\circ}\text{C}$ 。石膏通常在 80 ~ 90 $^{\circ}\text{C}$ 时开始失水, 转化成硬石膏, 在 100 $^{\circ}\text{C}$ 时形成亚稳定的 γ -硬石膏, 在 150 $^{\circ}\text{C}$ 时形成稳定的 β -硬石膏, 在 193 $^{\circ}\text{C}$ 时形成稳定的 α -硬石膏。故通南巴地区的石膏已转变成硬石膏。河坝 1 井 HB-011 膏岩样品的全岩 X-衍射结果显示, 几乎全部由硬石膏矿物组成, 硬石膏含量达到 99.6%^[12]。

当石膏向硬石膏转变时, 随着水分的失去, 其体积将减少 30%, 晶粒结构随之发生改变。实验表明, 温度高于熔点的三分之一时 ($T > 0.3T_m$, T_m 是岩石的熔融温度), 扩散蠕变将逐渐成为晶体变形的主要机制之一, 此时晶粒蠕变起因于空位、间隙原子和杂质原子等点缺陷同晶格原子交换, 并在整个晶体中移动而发生变形^[13]。

进一步对方解石与硬石膏等的实验发现, 方解石-硬石膏混合体中的方解石与硬石膏矿物颗粒界面的扩散蠕变比方解石或硬石膏单矿物岩石中晶体界面的扩散蠕变作用要强, 多矿物混合体的流变强度降低了^[14]。通南巴地区膏盐层具有多矿物组合的特点表明其发生扩散蠕变作用的可能性增加了。

3.2 异常膏盐体发育机制

通南巴构造带形成与演化表明, 燕山运动早期形成的断滑褶皱, 当挤压应力不断增加, 超过了滑移面上

表 4 地壳膏盐岩的实验条件、流变参数与变形机制^[9]

Table 4 Experimental conditions, rhylogical parameters and deformation mechanism of the evaporate							
样品	温度/ $^{\circ}\text{C}$	围压/ MPa	传压介质	应力指数	激活能/ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	物质常数/ ($\text{MPa}^{-n} \cdot \text{s}^{-1}$)	变形特征
盐岩	100 ~ 200	3.5 ~ 21	液体	4.5 ± 0.6	66.5 ± 8.7	$10^{-11.1}$	亚颗粒, 位错
	22	50 ~ 250	气体	5.5	87	1.64	位错
Riburg 石膏	350 ~ 450	150	液体	2.0	152.3 ± 0.4	2.07×10^5	亚颗粒, 位错
Wandflue 石膏				1.5	114.0	6.03×10^3	散蠕变
热压石膏	400 ~ 800	150 ~ 300	气体	7.5 ± 2.0	205.0 ± 30.0	4.2×10^{-8}	位错, 双晶, 重结晶
				0.8 ± 0.1	96.0 ± 10.0	1.80	扩散与边界迁移
				4.4 ± 0.3	125.0 ± 10.0	2.1×10^{-6}	位错, 双晶, 重结晶
				1.7 ± 0.2	205.0 ± 40.0	190	扩散, 边界迁移
合成方解石	500 ~ 600	200	气体	4.2 ± 0.3	159.0 ± 40.0		位错, 双晶
				2.1 ± 0.5	129.0 ± 40.0		扩散, 边界迁移
				4.0 ± 1.0	160.0 ± 30.0		位错, 双晶
				1.6 ± 0.6	149.0 ± 30.0		扩散, 边界迁移

部刚性层系的承受能力,则形成产状较陡的逆冲断面,逆冲断面与滑脱面形成断展褶皱。断面上部地层隆起幅度进一步增大,在断坡部位形成断弯褶皱。这种地质作用过程揭示了图5所示的异常膏盐体的变形行为,不仅与文中述及的多层膏盐层分布的褶皱作用有关,还与上、下能干层的断裂发育密切相关。断裂影响异常膏盐体的发育有两方面的含义。

3.2.1 膏盐岩本身发生断裂是形成异常膏盐体的主要因素

造成膏盐岩发生流变断裂的变形原因较复杂,主要讨论应力、温度和流体等关键因素。第一,应力因素。一般来说,岩石在变形破坏过程中,屈服面上的剪应力和正应力可能都是变化的。因而研究应力路径对岩石变形及强度特性的影响非常重要。多层粘结构造试验中,维持较高的正应力剪切加载有助于结构产生较大的变形,并且通过屈服面间的摩擦作用吸收较多的塑性功。结构破坏后增加正应力只能增加摩擦力,对已发生的屈服破坏则几乎没有影响^[15]。随着埋深增加,温压增高,石膏发生脱水,由于流体不能承受剪切应力,故其存在将引起膏盐岩层局部应力集中,破坏沿晶粒间界面发展,或发生穿晶破坏,晶粒间发生松散膨胀,造成膏盐岩层发生整体性的强度破坏。第二,温度因素。如果温度达到或超过膏盐岩熔点时,由于原子受热激活而迁移率增大,膏盐岩新的破坏机制将起主要作用,如扩散机制所控制的微孔隙或微裂纹聚集成核并继续发展成长,将导致亚微裂纹的形成,并最终导致断裂^[13]。第三,流体因素。由于水等液体的存在,致使膏盐岩的蠕变率显著增高,但这并非简单的重结晶的作用,而可能为 Ca^{2+} , Na^{+} 及 SO_4^{2-} , Cl^{-} 移动所引起的。无疑,成为良好通道的上、下能干层的断裂附近通常富集这类水分和液体,从而促使膏盐岩蠕变增强和断裂发展。

3.2.2 上、下能干层的断裂发展促使异常膏盐体的形成

异常膏盐体发育的地方其上、下岩层中均有断裂发育,而这些断裂又往往消失于膏盐层中(图4,图5)。事实上,精细解剖研究发现,膏盐层中尚发育不少断裂,由于断层折射作用,能干层发育的高角度断裂进入软弱层时变得比较平缓而造成的假象所致。在断展褶皱发育过程中,由于膏盐岩的流变属性而使其能利用本身存在的断裂和与能干层联通的断裂贯入褶皱与断裂围囿的异常空间,形成了异常膏盐体。异常膏盐体发育的规模通常与上、下能干层的断裂发育规模相关。如果上、下能干层的断裂小,则异常膏盐体规模

小;如果上、下能干层的断裂规模大并且作用时间长,则易于形成大规模的异常膏盐体,如母家梁构造高点。

4 讨论及结论

4.1 讨论

世界上许多油气藏的形成都与膏盐岩层有关^[16]。膏盐岩层对油气成藏的影响可以表现在多个方面,初步认为,膏盐岩的形成环境(弱氧化-还原环境)有利于有机质的保存和烃类的生成;膏盐层有利于其下部岩层保持较高的孔隙度,并形成次生孔隙;膏盐层有利于形成异常压力;膏盐层具有很好的封盖能力,为非常优质的盖层;膏盐层可以形成油气运移通道和含油气圈闭,为油气运移和聚集创造了条件^[17]。通南巴地区膏盐层总厚度较大,层位稳定,连续性好,是区域上优良的盖层,为嘉二段气藏提供了重要的保存条件。

通南巴地区的膏盐层呈多层分布样式,在膏盐层总厚度不变的条件下,其多个分层岩层的稳定性较单一巨厚层差,易于受上、下白云岩、灰岩等能干层的褶皱作用影响而处于其接触应变带作用范围内,膏盐层的变形样式因此而复杂化,发生非均一性增厚或减薄现象。所以,在评价盖层的封闭性条件时,多层分布的膏盐层封闭能力较单一巨厚层膏盐层的封闭能力弱,可能相应地削弱了油气富集成藏的作用。但是,由于膏盐岩的流变作用而形成的异常膏盐体的厚度显著增大,膏盐体内发育的蠕变断裂在埋深 3 570 ~ 4 790 m 温压条件下持续发生矿物重结晶作用而趋于消失弥合,故异常膏盐体周围可能是油气富集成藏的有利场所,应是勘探的重点目标。如河坝1井即是在河坝场异常膏盐体西侧钻探成功。

4.2 结论

1) 通南巴地区膏盐层主要产出于中三叠统雷口坡组,下三叠统嘉陵江组,以及下三叠统飞仙关组四段。总体上层位稳定,一般形态呈平稳连续分布;当上、下能干层受到褶皱及断层影响发生形变的情况下,膏盐层则呈丘状、楔状、纺锤状等异常膏盐体形态。膏盐层的空间展布与上、下能干层的形态和构造特征关系密切。

2) 通南巴地区膏盐层具有多层分布(57 ~ 110 层)、累计厚度大(273 ~ 415 m)的特征。白云岩层(能干层)的初始主波长大于膏盐层厚度,能干层间以及其所夹膏盐层处于互相影响的范围内,膏盐层变形所受接触应变带影响较大,易于形成不协调褶皱。

3) 通南巴地区膏盐层由于其特定的岩石流变属性,易于在地壳较浅层次便进入流变变形的地质环境。由于应力、温度、流体等因素影响,膏盐岩容易发生蠕变断裂,并在上、下能干层断裂的触发下,发生蠕变流动,形成异常膏盐体。

4) 多层分布的膏盐层封闭能力较单一巨厚层膏盐层的封闭能力弱,相应地削弱了油气富集成藏的作用。异常膏盐体的厚度显著增大,其周围可能是油气富集成藏的有利场所,应是勘探的重点目标。

参 考 文 献

[1] 冯福凯,王庭斌,张士亚,等. 中国天然气地质[M]. 北京:地质出版社,1998:1-51.
Feng Fukai, Wang Tingbin, Zhang Shiya, et al. China gas geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-51.

[2] 黄继钧. 纵弯叠加褶皱地区应力场研究——以川东北地区为例[J]. 地质科学, 2000, 35(2): 140-150.
Huang Jijun. Research on the stress fields in superposed fold area-an example from northeastern Sichuan [J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(2): 140-150.

[3] 兰姆塞,胡伯. 现代构造地质学方法(第二卷):褶皱和断裂[M]. 徐树桐,译. 北京:地质出版社,1991:78-143.
Ramasy J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology (Volume 2): folds and fractures [M]. Xu Shutong, translated. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 78-143.

[4] 朱志澄,曾佐勋,樊光明. 构造地质学[M]. 北京:地质出版社, 2008:108-132.
Zhu Zhicheng, Zeng Zuoxun, Fan Guangming. Structural geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 108-132.

[5] 侯贵廷. 分形褶皱复杂性的流变因素研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 347-351.
Hou Guiting. Rock rheology and complexity of fractal folds [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 347-351.

[6] 张国伟,郭安林. 关于加强流变构造学研究的建议[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 10-15.
Zhang Guowei, Guo Anlin. Suggestions on enhancing rheological study in structural geology [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 10-15.

[7] 章根德,何鲜,朱维耀. 岩石介质流变学[M]. 北京:科学出版社, 1999:276-348.
Zhang Gende, He Xian, Zhu Weiyao. Rock rheology media [M]. Beijing: Science Press, 1999: 276-348.

[8] 姚大全. 岩石变形所反映的地震作用过程——第13届国际变形机理、流变学和构造学学术会议概述[J]. 国际地震动态, 2001, (7): 9-12.
Yao Daquan. The seismic action process reflected by rock deforma-

tion—brief description of the 13th international conference on deformation mechanism, rheology and tectonics [J]. Recent Developments in World Seismology, 2001, (7): 9-12.

[9] 周永胜,何昌荣. 地壳主要岩石流变参数及华北地壳流变性研究[J]. 地震地质, 2003, 25(1): 109-122.
Zhou Yongsheng, He Changrong. Rheological parameters of crustal rocks and crustal rheology of North China [J]. Seismology and Geology, 2003, 25(1): 109-122.

[10] 卢庆治,胡圣标,郭彤楼,等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1110-1116.
Lu Qingzhi, Hu Shengbiao, Guo Tonglou, et al. The background of the geothermal field for formation of abnormal high pressure in the northeastern Sichuan basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5): 1110-1116.

[11] 罗开平,陈振林,杨长清,等. 通南巴构造带油气勘探潜力分析[M]. 北京:中国地质大学出版社, 2003:1-94.
Luo Kaiping, Chen Zhenlin, Yang Changqing, et al. Study on exploration potential in Tongnanba [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2003: 1-94.

[12] 周雁,李双建,范明. 构造变形过程中盖层封闭性研究[J]. 地质科学, 2011, 46(1): 226-232.
Zhou Yan, Li Shuangjian, Fan Ming. Study on sealing capacity of cap rock in the process of tectonic deformation [J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(1): 226-232.

[13] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社, 1994:1-232.
Liu Xiong. Rheological studies [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-232.

[14] 江燕,臧绍先. 多矿物岩石流变规律的研究进展及存在问题[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3): 456-463.
Jiang Yan, Zang Shaoxian. The research progress and some existing problems of rheological law for multi-mineral rocks [J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(3): 456-463.

[15] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京:地质出版社, 2000:86-111.
You Mingqing. Rock specimen strength and deformation and failure process [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 86-111.

[16] 金之钧,龙胜祥,周雁,等. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 571-593.
Jin Zhijun, Long Shengxiang, Zhou Yan, et al. A study on the distribution of saline-deposit in southern China [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 571-593.

[17] 王东旭,曾澍辉,宫秀梅. 膏盐岩层对油气成藏的影响[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 329-333.
Wang Dongxu, Zeng Jianhui, Gong Xiumei. Impact of gypsolith on the formation of oil & gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 329-333.

(编辑 高 岩)