

埋藏过程中膏岩封闭有效性演化特征

——以塔里木盆地寒武系深层膏岩盖层为例

林 潼¹,王铜山¹,潘文庆²,袁文芳²,李秋芬¹,马 卫¹

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆 库尔勒 841000)

摘要:膏岩作为优质的油气盖层已经得到了普遍认同,但并非所有的膏岩层都具有封闭油气的能力,膏岩作为油气的封盖层需要一定的地质条件。以塔里木盆地膏岩盖层为研究对象,对采自井下岩心和露头的膏岩样品开展了显微观察、物性分析、突破压力测试以及三轴应力试验。研究结果认为:①初始形成的膏岩和盐岩都具有非常强的物性封闭能力,但是在埋藏演化过程中石膏发生脱水作用后逐渐向硬石膏转化,转化过程中形成的孔隙空间使得物性封闭能力减弱;②塔里木盆地台盆区内石膏向硬石膏转化的最大深度在2 000 m附近,脱水后的硬石膏抗剪切能力与未脱水的石膏相比存在显著差异;③膏岩在埋藏演化过程中受地层温度和围压的影响封闭性发生动态变化,最终能否成为优质盖层取决于埋藏条件下膏岩的封闭能力与抗剪切能力。

关键词:脱水作用;突破压力;封闭性能;三轴应力试验;石膏;硬石膏;膏岩盖层;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evaluation of sealing effectiveness of gypsolyte during burial:

A case study of the gypsolyte caprock in deep Cambrian, Tarim Basin

Lin Tong¹, Wang Tongshan¹, Pan Wenqing², Yuan Wenfang², Li Qiufen¹, Ma Wei¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development of Tarim Oilfield Branch Company Ltd., PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Gypsolyte has been widely accepted as a superior caprock for oil and gas reservoirs. However, not all gypsolytes are of effective sealing capacity, to which certain geological conditions are in need. The core and outcrop gypsolyte samples taken from the Tarim Basin are applied to carry out scanning electron microscopy (SEM), physical property analysis, breakthrough pressure test and triaxial stress test. The results suggest that (1) both gypsolyte and saline rock initially formed are of strong sealing capacity, which tends to grow weaker as the gypsum under dehydration transforms into anhydrite during evolution under burial, and the spaces formed thereby undermine its sealing performance; (2) The maximum burial depth at which gypsum-to-anhydrite transformation occurs is about 2000 m in the Tarim Basin, and the anhydrite developed under dehydration is significantly different from the initial gypsum in terms of shear resistance; (3) During the evolution process under burial, the sealing properties of gypsolyte are constantly changing under different formation temperatures and confining pressures, and it all depends on the sealing capacity and shear resistance of the gypsolyte under burial whether the gypsolyte can be eventually developed into effective caprock.

Key words: dehydration, breakthrough pressure, sealing capacity, triaxial stress test, gypsum, anhydrite, gypsolyte caprock, Tarim Basin

全球许多巨型油气田的发现都与膏盐岩有着密切关系^[1-3]。例如,巴西东海岸坎普斯盆地和桑托斯盆地深水领域^[4]、美国的墨西哥湾盆地^[5],以及西非被动大

陆边缘盆地^[6]等都勘探发现了与膏盐岩有关的大型油气田。中国塔里木盆地库车坳陷古近系—新近系中发育巨厚的膏盐岩层,在膏盐岩层下勘探发现了大北和

收稿日期:2020-08-17;修订日期:2021-10-06。

第一作者简介:林潼(1980—),男,博士、高级工程师,油气地质研究与实验。E-mail:lintong1980@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05008006-001);中国石油天然气集团有限公司科技项目(2021DJ0604)。

克深等大型气田;台盆区寒武系盐下近年来也取得了突破,W-zhs1井在盐下白云岩中获得了工业性油气流^[7],W-kt1井在盐下吾松格尔组获得 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流。四川盆地的普光气田和元坝气田勘探证实三叠系的膏岩对其保存具有关键作用^[8];而威远气田在古老的震旦系灯影组和寒武系储层中能够聚集油气并保存至今,更是与上覆的中寒武统含膏泥岩有着直接关系。金之钧等^[1,8]统计认为四川盆地9个大型气田中有7个气田的盖层均与膏岩有关,具有膏岩盖层的大气田探明储量占大气田总探明储量的86.8%。

膏岩和盐岩在不同条件下封闭性能存在着显著差异,但是许多学者在研究膏岩和盐岩盖层过程中并没有将它们区分开来,而是笼统地称为膏盐岩^[8-11]。通过对全球与膏盐岩层(体)发育有关的大型油气田统计分析发现,膏盐岩作为盖层或侧向遮挡体时主要以盐岩为主,纯膏岩作为盖层的很少,并且当膏岩作为封盖层时多以膏泥岩为主。北美墨西哥湾盆地以盐丘型为主的油气圈闭^[5],盐构造形成的侧向遮挡是油气保存的关键^[11-12]。南美桑托斯盆地发现的巨型油气田——图皮气田(探明石油可采储量约 $8.9 \times 10^8 \text{ t}$)盖层为阿普特期阿利(Ariri)组盐岩,厚度为100~200 m,横向连续分布,膏岩含量很少;紧邻桑托斯盆地北部的坎普斯盆地油气藏分布同样也明显受盐岩分布和盐构

造影响,盐岩的塑性流动所形成的大量盐构造圈闭是油气聚集区。虽然膏岩和盐岩都可以形成于蒸发环境,但两者不论在成因与分布^[13-14]还是在物理化学性质上都存在着显著差异^[15-16],区别评价两者的封盖能力对油气保存条件的判别具有重要的意义。

膏岩和盐岩的晶体结构决定了它们都具有非常好的封闭性和塑性,但单独就膏岩而言并不是所有膏岩层下都能稳定保存油气。如四川盆地川东南地区古生界海相地层具有良好的油气勘探前景,生-储-盖组合优越,中寒武统膏岩埋深2 700 m,累计厚度16 m,钻探过程中膏岩层下油气显示活跃,但由于膏岩层被齐岳山断裂错开,失去了封闭性,因而未能有效保存油气^[9]。塔里木盆地台盆区W-zhs1井取得重大发现以后,围绕膏岩和盐岩盖层之下的勘探相继失利,如W-st1井膏岩埋深1 680 m,累计厚度57 m,封闭能力差是导致该井失利的主要原因。通过对国内外现有的油气田盖层分析可以发现,相比盐岩、泥质膏岩和膏盐岩,纯膏岩作为油气盖层很少存在。同样具有封闭性与塑性的膏岩在地层条件下封闭性却比盐岩差很多,这种现象在深部勘探时必须重视。

本文重点对膏岩盖层的封闭有效性进行研究,开展了膏岩样品的显微观察与三轴应力试验,同时结合区域埋藏演化史指出膏岩层必须在一定的地质条件下

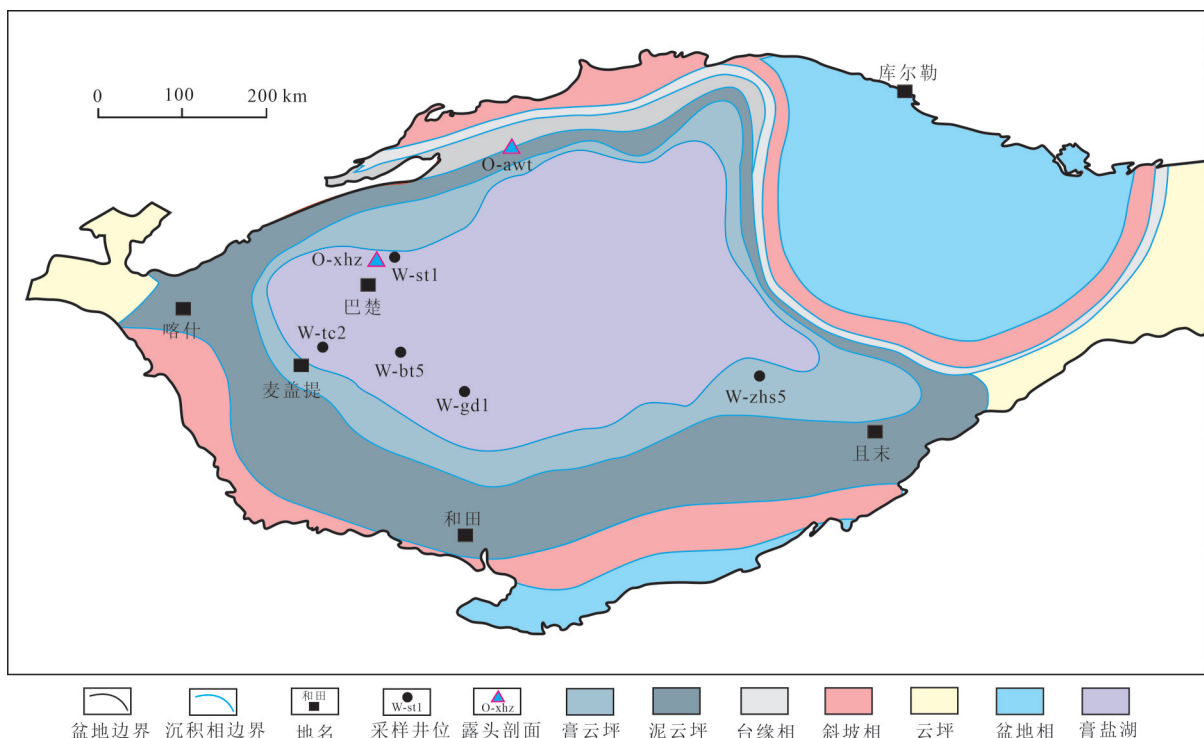


图1 塔里木盆地中寒武统沉积相与采样位置分布

Fig. 1 Map showing sedimentary facies distribution of the Middle Cambrian and sampling locations in the Tarim Basin

表1 塔里木盆地膏岩、盐岩样品的物性与突破压力值

Table 1 Statistics of the porosity-permeability and breakthrough pressure values for the gypsolyte and saline rock samples from the Tarim Basin

样品编号	岩性	地层	孔隙度/%	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	突破压力/MPa
W-st1-1	细晶硬石膏	E_1x	2.85	0.003 78	3.1
W-st1-2	粉晶硬石膏	E_1x	2.43	0.002 86	3.5
W-zhs5-1	硬石膏	E_2a	6.05	0.386 15	0.5
W-zhs5-2	粉晶硬石膏	E_2a	3.50	0.016 84	1.9
W-bt5-1	盐岩	E_2a	0.65	0.000 03	23.9 [*]
W-tc2-1	细晶硬石膏	E_1a	3.90	0.227 95	1.7
W-tc2-2	白云质细晶硬石膏	E_1a	2.40	0.196 10	4.1
W-tc2-3	中-细晶硬石膏	E_1a	5.85	1.195 68	0.5
W-tc2-4	细晶硬石膏	E_1a	4.95	0.261 98	0.9
W-tc2-5	细晶硬石膏	E_1a	2.90	0.438 37	3.1
W-tc2-6	细晶硬石膏	E_1a	2.00	0.019 29	5.1
W-gd1-2	细晶硬石膏	C	1.55	0.014 90	6.1
O-xhz	石膏	$\text{C}_{1+2}k$	6.80	0.058 20	1.5
O-awt	盐岩	E_{1+2}	0.70	0.000 02	23.9 [*]

注:样品直径2.56 cm,长4.20~4.50 cm。

*表示气体未突破样品;W表示井下;O表示露头剖面。

E_1x . 下寒武统肖尔布拉克组; E_2a . 中寒武统阿瓦塔格组; E_1a . 古新统阿瓦特组; C. 石炭系; $\text{C}_{1+2}k$. 下石炭统卡拉沙依组和上石炭统卡拉沙依组; E_{1+2} . 古新统和始新统。

才会对油气形成有效的封闭能力。

1 样品采集与处理

1.1 样品采集

采集了塔里木盆地井下岩心和露头剖面的膏岩样品,采样位置见图1,样品数据见表1。采集样品的层位包括中寒武统阿瓦塔格组、石炭系卡拉沙依组和古新统阿瓦特组。其中露头采集的膏岩样品岩性为石膏,井下采集的样品岩性为硬石膏。同时为了对比石膏岩和盐岩的封闭能力,本研究还采集了井下和露头的盐岩样品。

1.2 样品处理与测试

为了满足盖层试验分析要求,本研究所有获取的柱塞样品都是按照平行于岩心的轴面(野外样品垂直于岩层面),通过数控钢丝切割获取,既保证了试验的要求,又保留了样品真实的特性。将柱塞样两端打磨,使端面与轴线垂直,柱塞岩品制作全过程未接触水。柱塞样孔隙度和渗透率值在中国石油勘探开发研究院储层渗流试验室测定,仪器型号为PoroPerm—200,测定依据SYT5336—2006“岩心分析方法”。三轴应力加载破坏全过程气测渗透率试验在四川大学水利水电学院完成,采用MTS815 Flex GT岩石力学试验系统,结合低渗透性岩石渗透测试装备,将两部分高精度试验设备

耦合,开展气-固耦合下渗透力学行为研究。该试验系统基本参数如下:①轴向加载最大4 600 kN;②轴向、环向引伸计量程分别为 $\pm 5.0 \text{ mm}$ 和 $+8.0 \sim -2.5 \text{ mm}$;③围压 σ_3 最大140 MPa;④试验温度最高200 ℃;⑤压力加载系统振动频率5 Hz以上。其中渗透测试设备的压差传感器量程范围-700~700 kPa,最大渗透压可达到10 MPa,渗透率最小测量精度可以达到 $0.000\ 000\ 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。突破压力的测试利用中国石油勘探开发研究院天然气成藏与开发重点实验室自主研发设计的高温高压气体突破压力测定仪测定,可实施最大围压65 MPa,最高温度120 ℃,气体充注压力范围在0~40 MPa。

2 膏岩岩石学特征

野外露头 and 井下岩心标本观察显示,膏岩发育有块状、斜纹层状、揉皱状、砾状及纤维状构造。显微镜和扫描电镜观察显示,膏岩晶型以长条状为主,其次为粒状和放射状,粒度分布在0.1~0.2 mm,晶粒自形程度较好,呈半自形-他形,集合体呈长条状或板状分布。井下样品晶粒主要为硬石膏,平均含量大于85%,其次为少量石膏和白云石(或少量方解石)。石膏和硬石膏共生伴存常见,硬石膏发育假立方解理,干涉色可达三级(图2a),粒间溶蚀孔隙发育;石膏干涉色为一级灰白,呈板状或片状集合体。扫描电镜下可见硬石膏短条状晶体上密集发育的解理缝(图2b,c)。镜下可见在

石膏和硬石膏共存的部位发育沥青质条带(图2d—f)。

3 膏岩封闭能力测试

封闭能力是评价盖层有效性的关键。盖层的封闭性是油气能否成藏并保存的重要条件之一。盖层的封闭机理主要有物性封闭、超压封闭与烃溶度封闭,由于膏岩盖层不具有生烃能力,因而物性封闭是膏岩盖层封闭的主要方式。目前对物性封闭能力开展评价的参数很多,付广等^[17-18]指出与盖层封闭能力有关的参数有岩石的突破压力、孔隙度、渗透率、密度、比表面积以及喉道半径等。通过对比前人的大量工作可以发现,这些参数都与岩石的突破压力值有着明显的相关性。因此,利用盖层样品的突破压力参数可以很好地评价盖层的封闭能力与有效性。

测量突破压力的试验方法很多,包括压汞法(间接法)^[19-20]、分步法^[21]、连续法^[22-23]、驱替法^[24]以及脉冲法^[25],这些方法都存在着各自的缺点和优点^[17,26-27]。本研究试验采用直接测试方法中的驱替法进行突破压力值的测试。试验过程首先将岩样在30 MPa条件下抽真空48 h后,进行饱和煤油处理;然后将样品放入夹持器中,在夹持器一端充注气体,间隔一定的时间不断

增加充注压力,每次加压后稳定一段时间,观察岩样的突破情况,直至观察到夹持器另一端有气泡冒出,此时气体的充注压力即为样品的突破压力。试验的方法和标准依据中华人民共和国石油天然气行业标准SYT5748—2013《岩石气体突破压力测定方法》。

表1是在实验室条件下依据标准测试方法对本研究采集的膏岩和盐岩开展突破压力测试获取的数值。试验结果显示膏岩的突破压力值远小于盐岩的相应值。盐岩样品(W-bt5-1, O-awt)在经过48 h的突破试验后,压力达到23.9 MPa气体仍未突破样品,显示出超致密性与强封闭能力。而膏岩的突破压力值均较低,平均值仅2.7 MPa。范明等^[28]在评价蒸发岩盖层过程中就已经发现了膏岩相对于泥岩具有较低的突破压力值现象,但认为这可能是选用压汞法试验造成的错误结论。

本研究还开展了变温度条件下硬石膏的突破压力试验。试验结果得出硬石膏样品在30, 50, 70, 90和110 ℃条件下的突破压力值分别为0.55, 0.55, 0.58, 0.55和0.56 MPa。依据公式:

$$p = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (1)$$

式中: p 为突破压力,MPa; σ 为水与气体之间的表面张

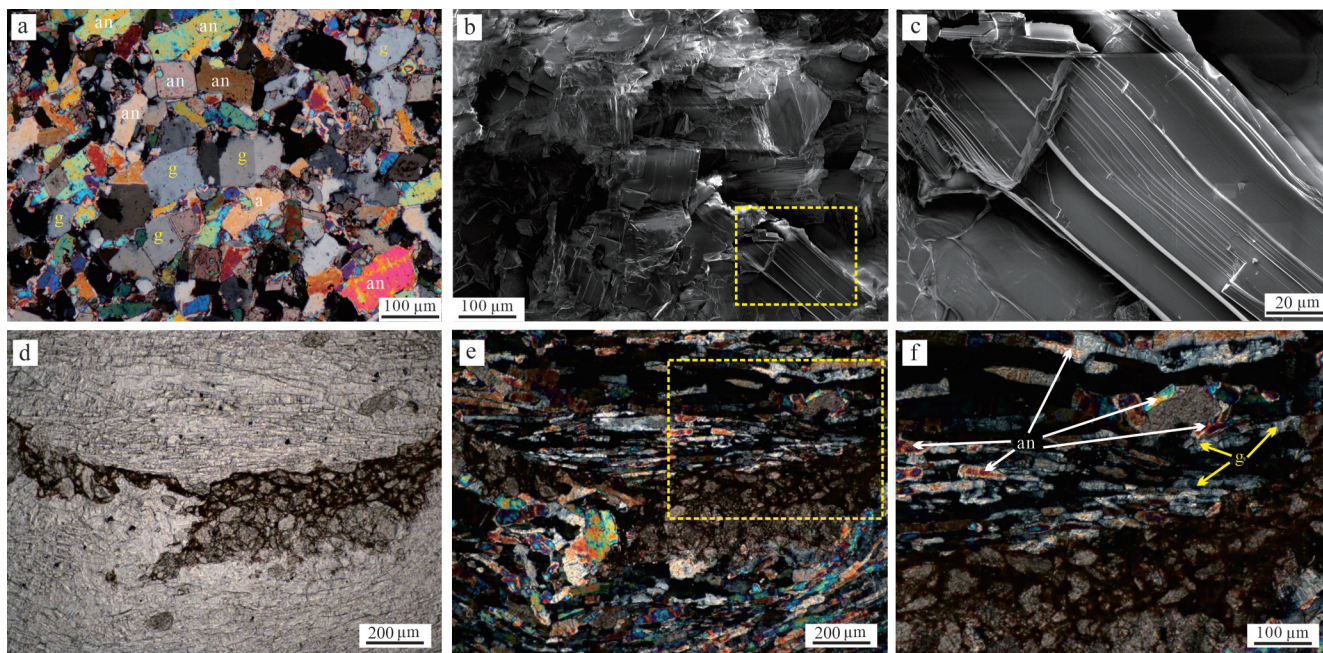


图2 塔里木盆地寒武系岩心石膏、硬石膏微观形态照片与结构特征

Fig. 2 Micromorphology and structural characteristics of gypsum and anhydrite of the Cambrian cores from the Tarim Basin

a. W-st1-1井,埋深1 675.10 m,正交偏光镜,石膏与硬石膏共生,细晶结构,晶体呈板状和粒状,硬石膏干涉色达三级,石膏干涉色一级灰;b. W-st1-1井,埋深675.10 m,扫描电镜,硬石膏晶体;c. b图的放大;d. W-zhs5-2井,埋深6 193.95 m,单偏光镜,细-粉晶结构,硬石膏和石膏呈长条状或板状分布,含沥青质条带;e. d图的正交偏光;f. e图的放大

an. 硬石膏;g. 石膏

力, N/m; r 为样品喉道半径, μm ; θ 为气-水-岩接触角, $(^\circ)$ 。

理论上, 当 r 和 θ 不变的情况下, σ 随温度的升高逐渐变小^[29], p 值应该减小, 而试验数据显示硬石膏的突破压力值基本不受温度影响, 其原因还有待研究。依据试验的结果, 可以用常温下试验室测试的硬石膏突破压力值代表深埋条件下硬石膏的突破压力。

4 石膏抗剪切能力测试

影响岩石盖层封闭性能的另一个重要因素是岩石的抗破裂能力。尽管盖层岩石的微观封闭能力很强, 但是当岩石产生裂缝后其遮挡油气的能力将丧失^[30]。因而测试岩石的抗剪切能力是评价盖层有效性的关键。利用岩石力学试验机对圆柱形岩石试件进行三轴压缩试验是研究岩石强度和变形特性的主要手段之

一^[31-32], 然而该方法应用在油气藏盖层评价中却很少^[33]。利用三轴应力压缩试验能够模拟不同地层条件下盖层岩石的脆-塑转变过程。大量的三轴应力压缩试验显示, 随着围压的增大, 岩石逐渐从脆性向塑性转变, 当岩石变为塑性时其残余抗压强度趋同于极限抗压强度。因此可以通过三轴应力试验中应变曲线的形态变化来判断岩石是否达到塑变状态。当应变曲线的峰值强度与残余强度近于一条水平线上时, 可以认为此时的围压即为盖层岩石脆性向塑性转化的边界围压。利用公式(2)求取该围压值对应的地层深度, 以此来判断该套盖层是否处于塑性变形阶段。

$$p_{\text{围}} = 0.010133H(\rho_{\text{岩}} - \rho_{\text{水}}) \quad (2)$$

式中: $p_{\text{围}}$ 为盖层的围压, MPa; H 为盖层的埋藏深度, m; $\rho_{\text{岩}}$ 为盖层上覆岩石的骨架密度, g/cm^3 ; $\rho_{\text{水}}$ 为上覆地层流体的密度, g/cm^3 。

对露头石膏样品(O-xhz)开展室温、60℃和110℃

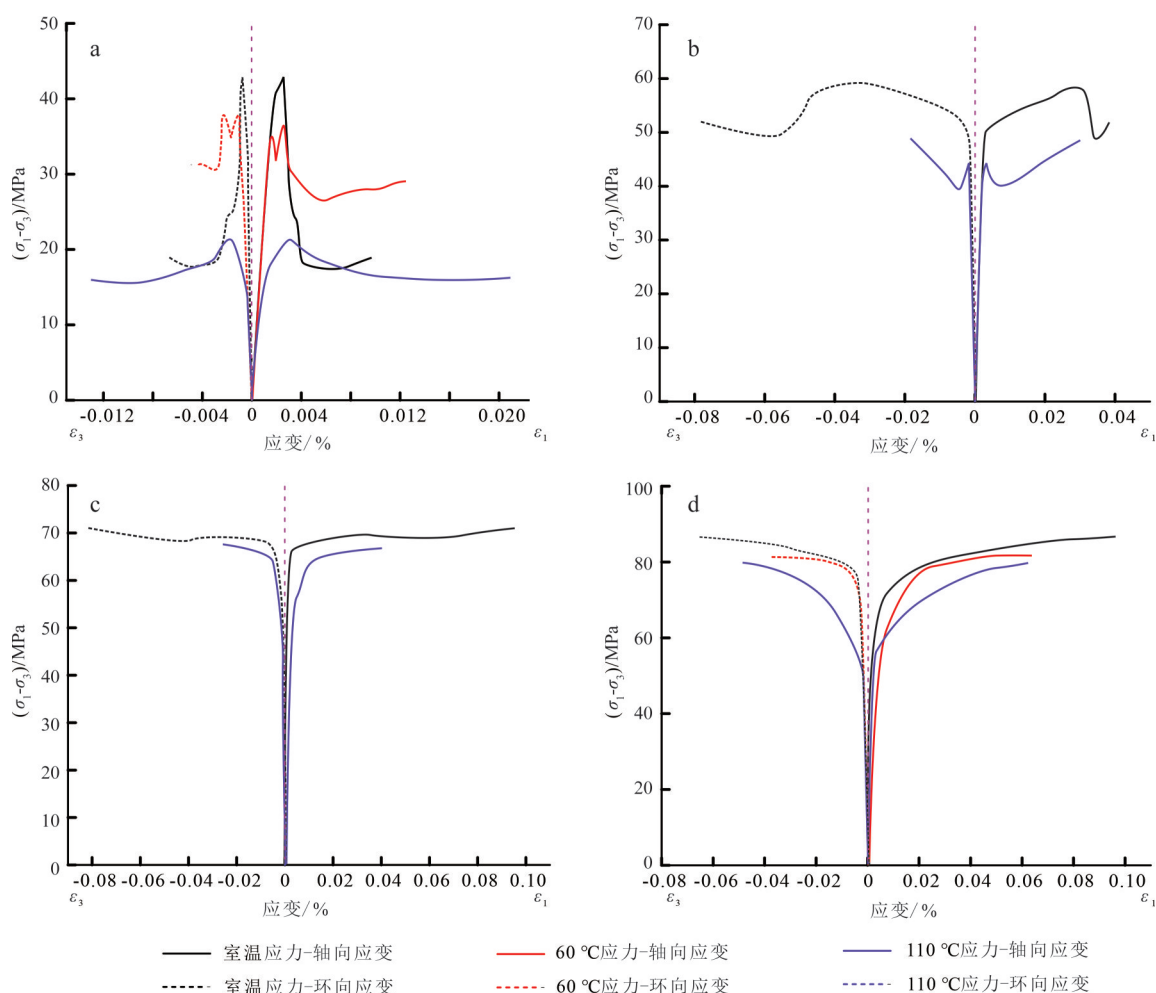


图3 塔里木盆地露头石膏样品在不同温度与围压条件下的三轴应力-应变曲线特征

Fig. 3 Characteristics of stress-strain curves of gypsum samples from the Tarim Basin outcrop under different temperatures and confining pressures

a. 围压 5 MPa; b. 围压 15 MPa; c. 围压 25 MPa; d. 围压 35 MPa

条件下不同围压的三轴应力加载试验,试验结果见图3。从试验结果的应力-应变曲线图上可以看出,随着围压的升高,石膏抗压的能力逐渐增大。且当围压值大于25 MPa以后,石膏的应变曲线上没有显示出差应力值下降的趋势,表明石膏已经形成了塑性的特征。因而,针对本研究采集的石膏样品可以认为25 MPa的围压是该石膏由脆性向塑性转化的边界围压值。利用公式(2)计算对应的脆-塑转换边界地层深度为1 650 m。同时,温度似乎对石膏的脆-塑转化临界围压没有太大的影响,但是对石膏的抗压强度却具有明显的影响,表现为温度升高,抗压强度降低。

5 三轴应力加载全过程气测渗透率试验

三轴应力加载全过程中气测渗透值的测定能够反映出样品在应力加载过程中气密性特征,对评价盖层动态演化过程中的封闭性,特别是当盖层达到塑性以后的封闭能力具有重要的判定作用。试验结果显示,石膏在受力后发生了轴向应变,伴随着轴向应变石膏的渗透率值在不断地增大(图4)。在110 °C和15 MPa围压时,石膏受应力的作用在初始的轴向应变阶段即表现出微裂缝形成和渗透率大幅增大的特征,而后在应变过程中渗透率值增长缓慢;而当围压值大于或者等于临界围压25 MPa时,在相同的温度条件下,石膏的渗透率值呈缓慢增长,并且随着应变的增大渗透率值逐渐增加。从本研究试验可以看出,在应力的作用下不论石膏是处于脆性还是塑性变形阶段,只要是轴向应变在增大,石膏的渗透率值就会不断地增加。这说明前人所提出的塑性变形阶段盖层具有较好封闭性的观点对石膏而言并非如此,石膏在应力形变过程中渗透率值是逐渐增大的。

6 讨论

6.1 石膏脱水过程中封闭能力的变化

石膏一般分布在近地表或者现代沉积的地层中,硬石膏则更常见于埋藏的地层中^[34]。前人研究认为石膏向硬石膏转化在1 067 m的深度就全部完成^[35],但是也有研究发现在低于这个深度仍然存在石膏^[13]。Faith^[35]的研究就专门分析了深层膏岩存在的证据与原因,指出埋藏温度、压力和地层水的矿化度决定着这些石膏是原生成因还是次生成因。本研究在塔里木盆

地中寒武统阿瓦塔格组(ϵ_2a ,埋藏深度6 543 m)中发现石膏和硬石膏共存的现象(图2a,f),说明在超深度仍然存在石膏。尽管石膏和硬石膏可以存在于不同深度的地层中,但是石膏向硬石膏以及硬石膏向石膏的相互转变却是一种普遍的现象,两者之间的转变主要受到埋藏成岩作用的影响。从盖层封堵油气能力的角

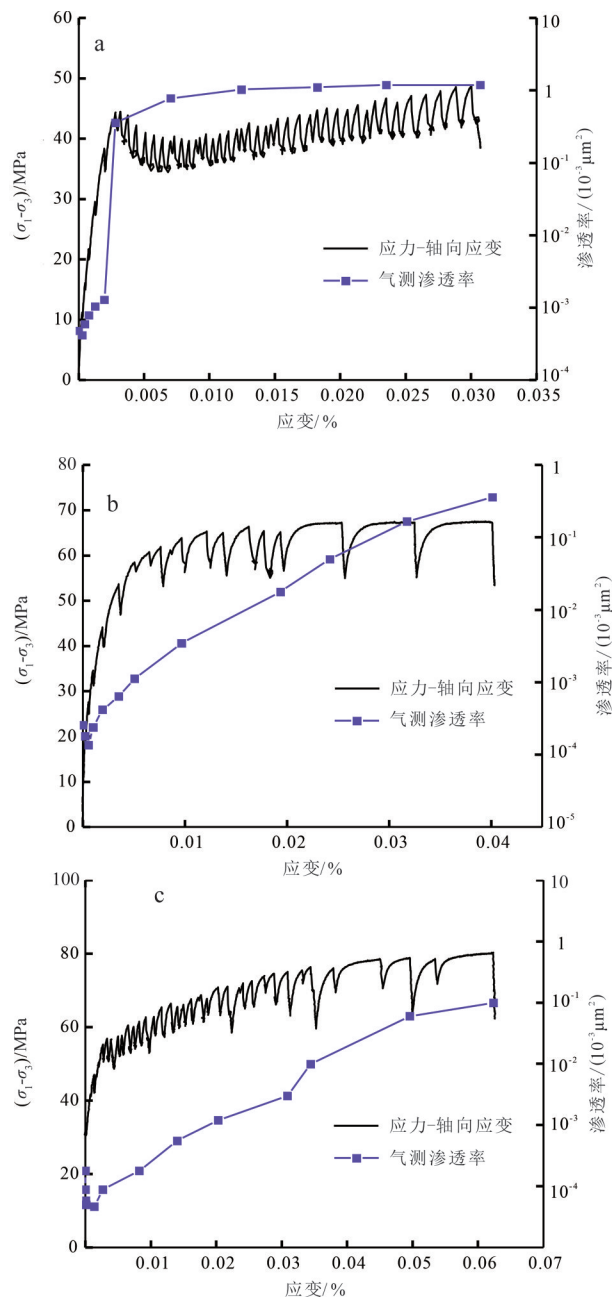


图4 塔里木盆地露头石膏样品在不同围压条件下三轴应力加载全过程中气测渗透率值变化

Fig. 4 Variation of air permeability test values throughout the triaxial stress loading under different confining pressures for gypsum samples from the Tarim Basin outcrop

a. 温度110 °C,围压15 MPa; b. 温度110 °C,围压25 MPa;
c. 温度110 °C,围压35 MPa

度考虑,本研究更关心石膏和硬石膏的封闭性,以及两者之间相互转化时封闭能力的变化。虽然目前还没有学者开展过石膏向硬石膏转变过程中孔隙度、渗透率和突破压力值变化的全过程研究,但是间接反映该过程物性变化的工作已经开展了很多^[36]。Zen^[37]认为当石膏向硬石膏转化时每生成1 mol的硬石膏,其固态摩尔体积减少28.37 cm³,相当于体积减少39%,同时生成2 mol的液体水。如果膏岩层是与较高渗透性的砂岩层相邻,则这些水可以顺利地排出,使得孔隙空间绝对值增加39%。俞凌杰等^[38]对不同温度条件下(25, 90, 120和150℃)的石膏开展扫描电镜形态分析,发现伴随着温度升高石膏发生脱水现象,石膏的晶形发生明显的变化。室温下二水石膏(CaSO₄·2H₂O)粒状晶形具有清晰的边界,当温度达到120℃和150℃时逐渐变化为半水石膏和无水石膏(硬石膏),晶形变成针状并且晶形边界模糊。在石膏脱水过程中由于热作用(大概在90℃附近),扫描电镜下可见大量的穿晶裂缝。Zen^[37]和俞凌杰^[38]的研究都揭示了石膏在转化成硬石膏的过程中产生了新的孔隙空间和裂缝,这将会降低石膏的封闭能力。Llana-Funez^[39]应用孔隙流体振荡检测技术测量了石膏排水过程中渗透率值的变化,试验结果显示石膏在脱水并伴随着压实过程中渗透率值增加了3个数量级。Harald^[40]的试验则更直观地显示了石膏在脱水过程中产生孔隙并且发生了岩石结构特征的改变,他利用意大利沃尔泰拉(Volterra)石膏开展脱水试验。沃尔泰拉(Volterra)石膏是目前公认的开展石膏脱水试验的标准石膏^[34,40],它的晶体集合体像雪花般呈放射状,因此也被称为雪花石膏(Alabaster),其孔隙度值在0.1%~0.5%^[41]。虽然没有测

量过沃尔泰拉石膏的突破压力值,但是通过表(1)中孔隙度与突破压力的拟合公式: $p_{\text{突}}=13.66 \Phi^{-1.57}$,可以推算出该石膏的突破压力值大于40 MPa,因此沃尔泰拉石膏是十分优质的封盖岩。沃尔泰拉石膏脱水后铸体薄片和扫描电镜清晰地揭示了矿物和晶体的变化。从图5可以看到未脱水的石膏为致密块状无孔隙,如图5a中间部位白色部分;边缘为脱水后石膏转化成硬石膏再充注蓝色环氧树脂时发生了染色,硬石膏在正交偏光镜下发三级红黄干涉色(图5b),扫描电镜下可见硬石膏内部发育较大的孔隙(图5c)。

本研究过程中同样也发现硬石膏中存在较多的孔隙空间。图6为硬石膏(样品W-zhs5-2)的CT扫描成像图,硬石膏局部发育密集的孔隙,表明硬石膏已经发生了部分的溶蚀改造作用。同时在本区地层中膏质白云岩内可见较多的膏模孔。这些现象都说明本区硬石膏的孔隙空间明显增多,对油气的遮挡封闭能力可能下降。薄片(W-zhs5-1)观察到硬石膏和石膏共生位置普遍存在有沥青质条带(图2d—f),说明石膏向硬石膏转换过程中形成的孔隙空间为同期或者后期的油气充注提供了聚集场所。这种现象说明硬石膏的封闭能力可能已经丧失,是否还能作为本区中、下寒武统油气藏的封盖层值得探讨。

6.2 膏岩的脆-塑转换条件

石膏和硬石膏的抗剪切能力具有显著的差异。李双建和黄英华^[9,32]对硬石膏开展三轴应力试验,结果显示硬石膏的脆-塑转化围压分别为50.0 MPa和68.5 MPa。卓勤功等^[42]通过对塔里木盆地库车凹陷阿克苏膏盐矿采集的石膏样品开展了变温和变压三轴

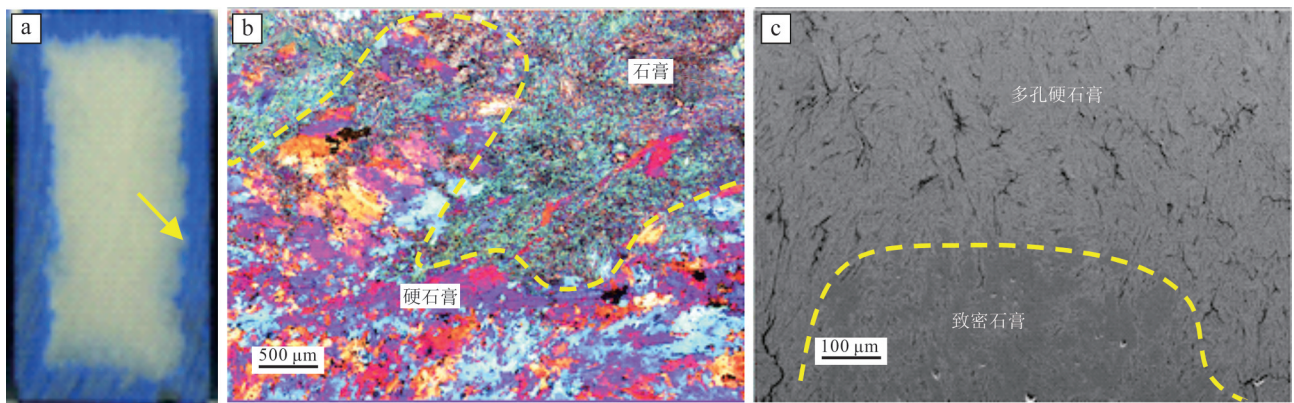


图5 石膏向硬石膏转化过程中岩石矿物的显微变化特征照片(据文献[39]修改)

Fig. 5 Micrographs showing the characteristic changes of minerals in gypsum-to-anhydrite transformation under dehydration (modified after reference [39])

a. 沃尔泰拉石膏长方体,中心白色为未脱水的石膏,外部蓝色为脱水后充注蓝色环氧树脂的染色石膏;b. a图中箭头所指示部位在正交偏光镜下的特征,三级干涉色的为硬石膏,一级灰的为石膏;c. a图中箭头所指示部位扫描电镜下的特征

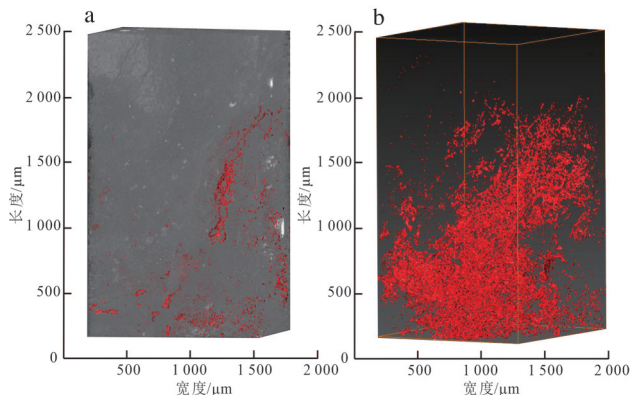


图6 塔里木盆地W-zhs5井寒武系岩心硬石膏CT扫描展示的内部孔隙空间

Fig. 6 Inner pore spaces as shown by CT scanning in the anhydrite samples from the Cambrian cores in Well zhs5, Tarim Basin
a. CT扫描透视图,红色代表孔隙,灰色代表矿物;b. 样品中孔隙立体展布,红色代表孔隙

应力测试,认为当围压达到20 MPa及温度100 ℃时,石膏出现由脆性向塑性转变的特征。俞凌杰等^[38]利用川东北三叠系石膏矿中取得的大块自然石膏岩样,在室温条件下选择2.5、5.0、10.0和20.0 MPa,4个围压点进行了三轴压缩试验,结果显示石膏均表现出明显的延性特征,石膏的脆-塑转化边界围压小于等于2.5 MPa。本试验得出的石膏边界围压值25 MPa与文献^[38]和文献^[41]膏岩试验脆-塑边界围压值略有差异,但远小于文献^[32]和文献^[9]的硬石膏试验值。因而,判断地层条件下膏岩是否位于塑性变形区间时需要区别对待不同的岩性,石膏的边界围压值低,硬石膏的边界围压值高。深埋条件下石膏由于发生脱水转变成硬石膏,盖层的塑性边界围压值也相应地发生改变。根据前人三轴应力试验的结果值推算,硬石膏的抗剪切埋藏深度至少大于3 300 m(60 MPa围压对应值),该值大于石膏的1 650 m。

6.3 有效膏岩盖层形成条件

膏岩能否成为有效的盖层,体现在两个方面:①物性封闭能力,即盖层岩石致密,突破压力值高,具有较小的孔隙度和渗透率值;②盖层抗剪切能力强,不易产生断层和微裂缝,同时在形变过程中封闭性能不发生明显的降低。多数情况下盖层有效性评价仅针对盖层岩石的物性与突破压力,很少考虑盖层的抗剪切能力,对形变过程中的封闭性评价几乎从未涉及。然而对构造作用强烈地区,盖层有效性评价必须考虑到断层对盖层的破坏作用。三轴应力试验显示,在不同的围压条件下,岩石受到挤压产生不同的形变特征,当围压足

够大时,岩石发生脆性向塑性的转变,此时无论加载多大的应力岩石都不会产生明显的剪切缝,可以认为在该条件下盖层具有较好的完整性。但是盖层是否依旧具有初期的封闭性需要通过应力加载全过程渗透率值变化特征来判断。依据本研究试验的结果,认为膏岩在形变过程中发生了渗透率值的明显增大,但是当围压大于脆性向塑性转变的临界围压时,渗透率增长缓慢,如果初始的渗透率值较低并且后期形变范围较小,以及增长的渗透率值仍能满足油气的封闭条件,那么理论上膏岩仍然为有效的盖层。

虽然石膏和硬石膏可以共存于深层或超深层,但许多学者^[34,43]的研究都证实石膏开始向硬石膏转化的温度大致为42~60 ℃。Hardie^[44]在试验室开展石膏转化成硬石膏时温度与水活性之间的关系研究,认为水活性强度与转化温度具有很好的正相关性,盐度越高,转化温度越低,在海水条件下(活性强度 $a=0.93$)石膏转化成硬石膏的温度为51.9 ℃。MacDonald^[45]指出压力越大,石膏向硬石膏转化的温度就越高,高压有利于石膏的保存。Serafeimidis^[43]考虑地层压力、孔隙流体压力对石膏和硬石膏平衡温度的影响,编制出不同深度条件下石膏与硬石膏的平衡温度。本研究利用Serafeimidis的成果,取塔里木盆地地温梯度22 ℃/km,计算当孔隙流体压力与固体岩石压力一致时,石膏向硬石膏转化的深度为1 345 m;当孔隙流体压力为岩石骨架压力的1/2.3时,转化深度为2 055 m。可以认为在没有发生地层超压时,2 055 m是塔里木盆地台盆区石膏向硬石膏转化的最大深度,在该深度下需要重新考虑硬石膏对油气藏保存的影响。虽然地层条件下石膏脱水后产生的孔隙在压实过程中大部分消失,但仍会保存部分孔隙,同时石膏从致密转变成多孔使得岩石的封闭能力下降,对油气保存起破坏作用。

利用盆地模拟软件重建研究区W-zhs5井的埋藏热演化史图,结合石膏脱水条件和三轴应力测试结果编制塔里木盆地中寒武统膏岩地层埋藏演化过程中的盖层有效性变化图。原生石膏沉淀后晶体颗粒较大,以沃尔泰拉石膏为例,晶体大小为45~123 μm,颗粒之间晶隙清晰,不发育孔隙。在没有构造作用的情况下能够作为稳定的密封层(图7,①区),但是这种浅埋的石膏抗剪切能力弱,当应力值超过石膏最大抗压强度时,岩石将产生剪切缝。当埋藏深度处的温度达到石膏向硬石膏转变的边界温度值时(52 ℃),石膏开始脱水并产生大量的孔隙,封闭能力下降(图7,②区)。即使石膏埋藏深度达到1 650 m,受岩层围压的作用石膏从脆性向塑性转化,形成柔塑性特征,也仍未能形成有

效的封闭能力。图7的③区位于温度52℃以上,以硬石膏为主,不仅物性封闭能力下降了,抗剪切能力也发生了改变,不再是原生石膏的封闭能力与应力性质。硬石膏在未到达塑性条件下受到构应力作用时易产生断层和裂缝,所以图7的③区处于应力破坏和孔隙度增加双重作用的盖层无效区间。后期持续深埋过程中(如图7的④区)当硬石膏埋藏深度达到脆-塑转化的边界压力值时(50 MPa,对应深度3 300 m),硬石膏重新具备了柔塑性,在压实作用下孔隙空间减少,晶体排列紧密,重新具备了一定的封闭能力,但能否形成有效的油气盖层需要进一步的研究。而后,受区域构造抬升的作用,硬石膏盖层被抬升到脆-塑边界深度以上,受构造应力作用再次产生裂缝或断层(图7,⑤区),之前封闭于硬石膏层之下的油气藏可能遭受破坏而泄露。岩心中硬石膏内发现的沥青条带可能是在该期抬升过程中产生的。假设硬石膏没有发生风化淋滤作用,随后的埋藏过程中硬石膏又将从脆性向柔塑性转化,之前形成的裂缝在应力作用下重新闭合,盖层重新恢复封闭性能;抬升过程中如果发生硬石膏的溶蚀,则后期硬石膏盖层封闭有效性将极大丧失。

理论上,只有在温度小于52℃,埋深大于1 650 m的条件下,石膏才能形成有效的石膏盖层。而本区膏岩在埋藏过程中全部表现出无效盖层的演化特征,因此,基于塔里木盆地中、下寒武统膏岩的埋藏演化史,

可以得出膏岩盖层在塔里木盆地台盆区作为油气的封闭盖层是无效的。这也很好地解释了前面提到W-st1井勘探失利的原因。因此,可以依据不同地区地层埋藏演化特征来判别膏岩盖层的有效性。

7 结论

1) 膏岩和盐岩具有不同的岩石物理特征,两者的封闭能力有着显著差异。盐岩和未发生脱水作用的原生石膏盖层封闭能力较强,而发生脱水以后的硬石膏盖层封闭能力相对较弱。

2) 石膏和硬石膏具有完全不同的抗剪切能力。石膏的边界围压值较低,在25 MPa左右;硬石膏的边界围压值较高,大于50 MPa。

3) 埋藏演化过程中,膏岩盖层的封闭能力在不断地发生改变。1 650 m以浅时,石膏虽然具有很好的封闭能力,但是抗剪切能力弱,在构造应力发育区不适宜作为有效盖层;地层温度高于52℃,将发生石膏向硬石膏的脱水转换,封闭能力下降,盖层遭受破坏;3 300 m以深当硬石膏的物性封闭能力较强时,可以作为油气封闭的有效盖层;当后期抬升超过3 300 m时,硬石膏盖层可能重新产生裂缝而导致油气的泄露;再次的深埋,未溶蚀的硬石膏层又将从脆性向柔塑性转化,盖层封闭能力可能会重新形成。

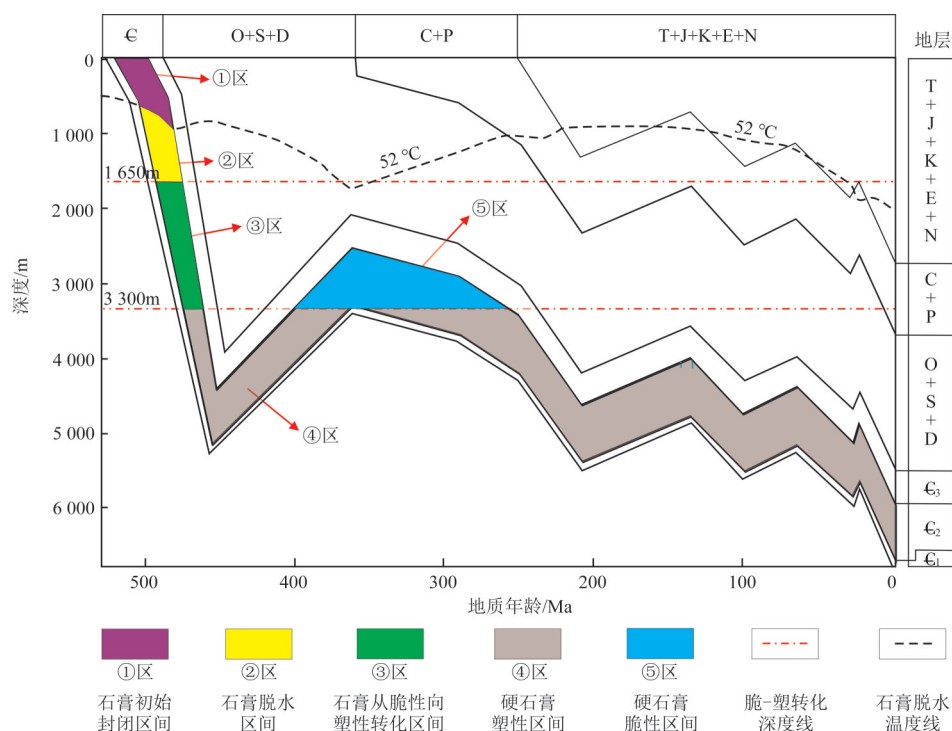


图7 塔里木盆地台盆区膏岩层埋藏演化过程中盖层有效性的变化

Fig. 7 Variation of caprock performance in sealing for the gypsum layer during evolution under burial in the platform-basin region, Tarim Basin

4) 塔里木盆地中、下寒武统中膏岩盖层不具有油气封闭的有效性,因此在针对寒武系盐下勘探过程中应该寻找其他类型的储盖组合,尽量避开以纯膏岩为盖层的成藏组合。

参 考 文 献

- [1] 金之钧,周雁,云金表,等. 我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 715-724.
Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, et al. Distribution of gypsum salt cap rock and near term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 715-724.
- [2] 徐士林,吕修祥,杨明慧,等. 库车坳陷膏盐岩对异常高压保存的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(4): 5-9.
Xu Shilin, Lv Xiuxiang, Yang Minghui, et al. Controlling effect of gypsum and salt rocks on abnormally high pressure in Kuche Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19(4): 5-9.
- [3] 王东旭,曾溅辉,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 and gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 329-333.
- [4] 何娟,何登发,李顺利,等. 南大西洋被动大陆边缘盆地大油田形成条件与分布规律——以巴西桑托斯盆地为例[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(3): 57-67.
He Juan, He Dengfa, Li Shunli, et al. Formation and distribution of giant oil and gas fields in passive continental margin of South Atlantic Ocean——A case study of Santos basin in Brazil[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(3): 57-67.
- [5] 韩彧,黄娟,赵雯. 墨西哥湾盆地深水油气分布特征及勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2015, 37(4): 473-478.
Han Yu, Huang Juan, Zhao Wen. Distribution features and exploration potential of oil and gas in a deepwater area of the Gulf of Mexico Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4): 473-478.
- [6] 刘祚冬,李江海. 西非被动大陆边缘盆地盐构造对油气的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 196-202.
Liu Zuodong, Li Jianghai. Control of salt structures on hydrocarbons in the passive continental margin of West Africa[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 196-202.
- [7] 王招明,谢会文,陈永权,等. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 1-13.
Wang Zhaoming, Xie Huiwen, Chen Yongquan, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 1-13.
- [8] 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): 571-583.
Jin Zhijun, Long Shengxiang, Zhou Yan, et al. A study on the distribution of saline-deposit in the southern China[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 571-583.
- [9] 李双建,周雁,孙冬胜. 评价盖层有效性的岩石力学实验研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(5): 574-578.
Li Shuangjian, Zhou Yan, Sun Dongsheng. Rock mechanic experiment study of evaluation on cap rock effectiveness[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(5): 574-578.
- [10] 吴海,赵孟军,卓勤功,等. 膏盐岩对地层温度及烃源岩热演化的影响定量分析——以塔里木库车前陆盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 550-558.
Wu Hai, Zhao Mengjun, Zhou Qingong, et al. Quantitative analysis of the effect of salt on geothermal temperature and source rock evolution: A case study of Kuqa foreland basin, Western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 550-558.
- [11] 梁杰,龚建明,成海燕. 墨西哥湾盐岩分布对油气成藏的控制作用[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(1): 25-30.
Liang Jie, Gong Jianming, Cheng Haiyan. Control of salt rock distribution on oil and gas pooling in the Gulf of Mexico[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(1): 25-30.
- [12] McBride B C, Rowan M G, Weimer P. The evolution of allochthonous salt systems, northern Green Canyon and Ewing Bank (offshore Louisiana), northern Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(5B): 1013-1036.
- [13] Jowett E C, Cathles III L M, Davis B W. Predicting depths of gypsum dehydration in evaporitic sedimentary basins[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(2): 402-413.
- [14] 卓勤功,赵孟军,李勇,等. 库车前陆盆地古近系盐岩对烃源岩生气高峰期的迟缓作用及其意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(12): 1903-1912.
Zhuo Qingong, Zhao Mengjun, Li Yong, et al. The delay of paleogene on the gas generation peak of source rocks and its significance in Kuqa foreland basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1903-1912.
- [15] 曹养同,刘成林,杨海军,等. 新疆库车盆地古近系-新近系蒸发岩沉积旋回识别及对对比[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 31-41.
Cao Yangtong, Liu Chenglin, Yang Haijun, et al. Identification and correlation of the Paleogene and Neogene evaporites sedimentary cycles in Kuqa Basin, Xinjiang[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(1): 31-41.
- [16] 刘忠宝,杨圣彬,焦存礼,等. 塔里木盆地巴楚隆起中、下寒武统高精度层序地层与沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 70-76.
Liu Zhongbao, Yang Shengbin, Jiao Cunli, et al. High resolution sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of the Middle-Lower Cambrian in Bachu Uplift, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 70-76.
- [17] 付广,陈章明,姜振学. 盖层物性封闭能力的研究方法[J]. 中国海上油气, 1995, 9(2): 83-88.
Fu Guang, Chen Zhangming, Jiang Zhenxue. Research method capillary sealing ability of cap rocks[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(2): 83-88.
- [18] 卓勤功,雷永良,边永国,等. 淮南前陆冲断带下组合泥岩盖层封盖能力[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 100-107.
Zhuo Qingong, Lei Yongliang, Bian Yongguo, et al. Mudstone cap-rock sealing capacity of the lower reservoir-forming combination in the foreland thrust belt of the southern margin, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(1): 100-107.

- [19] 黄文彪, 詹卓琛, 逯瑞敬, 等. 致密油微观充注动态过程及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1197-1204.
Huang Wenbiao, Zhan Zhuochen, Lu Ruijing, et al. Microscope dynamic process and controlling factors of oil charging in tight reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1197-1204.
- [20] 吕延防, 陈章明, 付广, 等. 盖岩排替压力研究[J]. 大庆石油学院学报, 1993, 17(4): 1-8.
Lu Yanfang, Chen Zhangming, Fu Guang, et al. Research on the displacement pressure of caprock[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1993, 17(4): 1-8.
- [21] Ito D, Akaku K, Okaba T, et al. Measurement of threshold capillary pressure for seal rocks using the step-by-step approach and the residual pressure approach[J]. Energy Procedia, 2011, 4(22): 5211-5218.
- [22] Horseman S T, Harrington J F, Sellin P. Gas migration in clay barriers[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1): 139-149.
- [23] Harrington J F, Horseman S T. Gas transport properties of clays and mudrocks[M]//Aplin A C, Fleet A J, Macquaker J H S. Muds and Mudstones: Physical and Fluid Properties. London: Geological Society, 1999, 158(1): 107-124.
- [24] 黄志龙, 郝石生. 盖层突破压力及排替压力的求取方法[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(2): 163-166.
Huang Zhilong, Hao Shisheng. A method of estimating breakthrough pressure and displacement pressure of caprock[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1994, 15(2): 163-166.
- [25] Hildenbrand A, Schlomer S, Krooss B M. Gas breakthrough experiments on fine-grained sedimentary rocks [J]. Geofluids, 2002, 2(1): 3-23.
- [26] Kawauraa K, Akaku K, Nakano N, et al. Examination of methods to measure capillary threshold pressures of politic rock samples [J]. Energy Procedia, 2013, 37, 5411-5418.
- [27] 高帅, 魏宁, 李小春. 盖岩 CO₂ 突破压测试方法综述[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2716-2727.
Gao Shuai, Wei Ning, Li Xiaochun. Review of CO₂ breakthrough pressure measurement methods on caprocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2716-2727.
- [28] 范明, 陈宏宇, 俞凌杰, 等. 比表面积与突破压力联合确定泥岩盖层评价标准[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 87-90.
Fan Ming, Chen Hongyu, Yu Lingjie, et al. Evaluation standard of mudstone cap rock combining specific surface area and breakthrough pressure[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 87-90.
- [29] 赵国英, 阎伟, 陈光进, 等. 甲烷+氮气/水体系高压界面张力的测定与计算[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(1): 75-78.
Zhao Guoying, Yan Wei, Chen Guangjin, et al. Measurement and calculation of high-pressure interfacial tension of methane+nitrogen/water system [J]. Journal of the University of Petroleum China (Edition of Natural Science), 2002, 26(1): 75-78.
- [30] 王益维, 汪友平, 孟祥龙, 等. 低成熟度页岩油加热改质热解动力学及地层渗透性[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 678-684.
Wang Yiwei, Wang Youping, Meng Xianglong, et al. Organic matter pyrolysis kinetics and formation permeability variation during upgrading process of low-maturity shale oil[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 678-684.
- [31] Olgaard D L, Ko S C, Wong T F. Deformation and pore pressure in dehydrating gypsum under transiently drained conditions [J]. Tectonophysics, 1995, 245(3-4): 237-248.
- [32] 黄英华, 潘懿, 唐绍辉. 硬石膏常规三轴压缩性能试验研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2008, 72(6): 34-36.
Huang Yinghua, Pan Yi, Tang Shaohui. A study on triaxial compression mechanical tests of anhydrite [J]. China Non-metal Mining Industry Guide, 2008, 72(6): 34-36.
- [33] Nygard R, Gutierrez M, Bratli R K, et al. Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(2): 201-212.
- [34] Murray R C. Origin and diagenesis of gypsum and anhydrite [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34(3): 512-523.
- [35] Amadi F O, Major R P, Baria L R. Origins of gypsum in deep carbonate reservoirs: Implications for hydrocarbon exploration and production [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2): 375-390.
- [36] Hangx S J T, Spiers C J, Peacha C J. The mechanical behavior of anhydrite and the effect of deformation on permeability development—implications for caprock integrity during geological storage of CO₂ [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 5358-5363.
- [37] Zen E A. Solubility measurements in the system CaSO₄-NaCl-H₂O at 35°, 50°, and 70° and one atmosphere pressure [J]. Journal of Petrology, 1965, 6(1): 24-164.
- [38] 俞凌杰, 张文涛, 范明, 等. 膏岩三轴压缩试验及高温相变特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3318-3330.
Yu Lingjie, Zhang Wentao, Fan Ming, et al. Study of gypsum rock triaxial compression experiment and characteristic of high temperature phase transition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3318-3330.
- [39] Llana-Funez S, Faulkner D R, Wheeler J. Fluid flow properties of Volterra Gypsum during experimental deformation at low strain rates monitored through simultaneous permeability measurement [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna: EGU, 2009: 1030.
- [40] Milsch H, Priegnitz M. Evolution of microstructure and elastic wave velocities in dehydrated gypsum samples [J]. Solid Earth, 2012, 39(24): 1-6.
- [41] Wong T F, Ko S C, Olgaard D L. Generation and maintenance of pore pressure excess in a dehydrating system 2. Theoretical analysis [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102(B1): 841-852.
- [42] 卓勤功, 赵孟军, 李勇, 等. 膏盐岩盖层封闭性动态演化特征与油气成藏——以库车前陆盆地冲断带为例[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 847-856.
Zhuo Qinggong, Zhao Mengjun, Li Yong, et al. Dynamic sealing evolution and hydrocarbon accumulation of evaporite cap rocks: An example from Kuqa foreland basin thrust belt [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 847-856.
- [43] Serafeimidis K, Anagnostou G. The solubilities and thermodynamic equilibrium of anhydrite and gypsum [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 15-31.
- [44] Hardie L A. The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure [J]. The American Mineralogist, 1967, 52, 171-200.
- [45] Macdonald G J F. Anhydrite-gypsum equilibrium relations [J]. American Journal of Science, 1953(235): 884-898.