

天然气

文集

NATURAL GAS

2018 年上卷

《天然气文集》编委会

石油工业出版社

天然气文集

2018 年上卷

《天然气文集》编委会

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

天然气文集. 2018年. 上卷 / 《天然气文集》编委会编. — 北京: 石油工业出版社, 2018.6

ISBN 978-7-5183-2617-4

I. ①天… II. ①天… III. ①采气-文集 IV.

①TE37-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 096420 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523589

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

889×1194 毫米 开本: 1/16 印张: 12.25

字数: 350 千字

定价: 80.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《天然气文集》编委会

名誉主任委员：王 涛

主任委员：邱中建

副主任委员：贾承造 胡文瑞

常务委员：(以姓氏笔画为序)

史兴全 史训知 沈平平 苏义脑 罗英俊

胡见义 郭尚平 韩大匡 翟光明 戴金星

委员：(以姓氏笔画为序)

卢林生 李文阳 李景明 李道品 李鹭光

刘希俭 刘振武 刘玉章 刘 磊 苏士峰

何盛宝 单文文 陈永武 赵文智 赵政璋

高瑞祺 袁士义 黄维和 雷 群 甄 鹏

理事：杨 华 马新华 付锁堂 陈新发 陈建军

李 剑 陆家亮 曾庆才 卢拥军 刘先贵

郑得文 崔明月 孙粉锦 王红岩 黄伟和

主 编：邹才能

副 主 编：魏国齐 丁云宏 宁 宁 欧阳永林 李熙喆

天然气地质与勘探

- 膏岩盖层有效性与形成条件分析 林 潼, 冉启贵, 潘文庆, 袁文芳, 张光武, 李世朝, 张 璐 1
- 高精度航片在复杂平原区可控震源路线规划设计中的应用 陈敬国, 刘宏飞 11
- 地质导向钻井技术在高陡构造区的应用 董振国, 周正武, 吴德山 16
- 马达加斯加南部盆地油气勘探潜力分析 陈凤来, 漆万珍, 孙 萍, 袁思辉 25
- 低温液氮吸附表征高煤级煤孔隙特征中的误差分析 孙 勇, 赵迪斐, 郭英海, 卢晨刚 34
- 柴达木盆地冷湖五号—冷湖七号地区天然气成藏条件及潜力分析 周 飞 39
- 温度对煤层渗透率和解吸压力影响规律的实验研究
刘立砖, 李 春, 冯 雷, 邓 拓, 冷 炎, 李 兵 50
- 裂缝对致密砂岩气成藏富集与高产的控制作用——以库车前陆盆地东部侏罗系迪北气藏为例 芦 慧 54
- 页岩解析气研究现状及发展方向 赵卫军, 黄卫东, 王宗成, 刘 斌, 余 平, 李金玉, 卜凡妮 64
- 基于原油指纹和物源模拟扇三角洲储层研究——以渤海湾金县油田东块 E-3D 井区为例
杨志成, 李红英, 朱志强, 陈善斌, 程 奇 68
- 新北油田垦东 34 块油气储层相控随机建模技术及应用 时丕同, 王俊杰, 蒋晓澜, 刘文芳, 伍小雄 74
- 川西地区须家河组致密砂岩中绿泥石对储层孔隙的影响 仙永凯, 刘正元, 曹晶晶, 刘 道 80
- 鄂尔多斯盆地东南部宜川—富县地区马家沟组风化壳油气成藏特征
何身焱, 宋达林, 梁 强, 过 敏, 刘冬冬, 王晓飞, 谢 伟 86
- 徐家围子断陷营一段火山岩储层影响因素分析 吴语康 93

天然气开发与开采

- 柳林地区煤层气排采速率研究 王有智 97
- 水平井多因素耦合分段压裂优化设计方法 贺甲元, 李凤霞, 刘长印 101
- 致密气藏合理井网密度计算新方法 刘海龙 107
- 应用“斜向驱”改变“水流线”矿场应用研究质量 顾永强 115
- 扶余油田水平井补能挖潜技术试验与应用 何增军, 苗川霞, 胡晓月, 宋成立, 景伟 119
- 聚合物质量浓度变化对注聚开发采收率的影响研究 吴海燕, 付新霞, 赵华 123
- 靖边油田红石湾井区污水回注工艺技术研究 张涛, 雷华伟, 乔力 129
- 基于 AHP 法及 GRA 法的致密油增产地质工程一体化分析——以川中侏罗系大安寨段为例
杨远, 何靖怡, 刘彬, 杨华, 郑春红 134
- 气密封检测技术在华 1-5 井的应用 雷齐松, 史香格, 张萌, 肖佟, 赵义荣 144
- CO₂ 吞吐技术在低渗透油田的应用——以葡南油田为例 吕春慧 148
- 苏 11-1x 井钻井施工难点分析与技术措施 崔露, 罗文丽, 李嗣洋, 胡涛, 孙鑫 153
- 二开次井高 59-81 井溢流险情处置 王高杰, 平哲, 李贤旭 157
- 徐深气田高含 CO₂ 气井腐蚀监测与防护技术 卢庆瑜 161
- 徐深气田地层压力确定方法研究 孟航 166

天然气储集与输送

- 中国 LNG 行业发展综述 邱正勇, 杨玄, 邓向军, 祝新兵, 青松 169

NATURAL GAS GEOLOGY AND EXPLORATION

- Effectiveness analysis and formation conditions of gypsum caprock
Lin Tong, Ran Qigui, Pan Wenqing, Yuan Wenfang, Zhang Guangwu, Li Shizhao, Zhang Lu 1
- Application of high-precision aerial photograph in vibrators route planning and design in complex plain area
Chen Jingguo, Liu Hongfei 11
- Application of geological steering technology in high steep structure area
Dong Zhenguo, Zhou Zhenwu, Wu Deshan 16
- Analysis on potential of hydrocarbon exploration in Southern Basin of Madagascar
Chen Fenglai, Qi Wanzhen, Sun Ping, Yuan Enhui 25
- Error analysis of nitrogen adsorption isotherm in characterization of pore characteristics
Sun Yong, Zhao Dife, Guo Yinghai, Lu Chengang 34
- Analysis of reservoir forming conditions of No. 5 Lenghu-No. 7 Lenghu structure in Qaidam Basin Zhou Fei 39
- Experimental research on effect rule of temperature on CBM permeability and desorption pressure
Liu Lizhuan, Li Chun, Feng Lei, Deng Tuo, Leng Yan, Li Bing 50
- The controlling effects of fractures on gas accumulation and production in tight sandstone: A case of jurassic Dibei gas reservoir in the east Kuqa foreland basin Lu Hui 54
- Research status and development direction of separated shale gas
Zhao Weijun, Huang Weidong, Wang Zongcheng, Liu Bin, Yu Ping, Li Jinyu, Bu Fanni 64
- Fan delta reservoir characterization based on crude oil fingerprint chromatographic analysis and source simulation: A case of study on E-3D well area in Eastern Block of Jinxian Oilfield in Bohai Bay
Yang Zhicheng, Li Hongying, Zhu Zhiqiang, Chen Shanbin, Cheng Qi 68
- Application of stochastic modeling technology about reservoirs constrain by facies in Kendong 34 block of Xinbei Oilfield Shi Pitong, Wang Youjie, Jiang Xiaolan, Liu Wenfang, Wu Xiaoxiong 74
- Influence of chlorite in tight sandstone on reservoir pore of Xujiage Formation in western Sichuan
Xian Yongkan, Liu Zhengyuan, Cao Jingjing, Liu Xiao 80
- Hydrocarbon accumulation characteristics of weathering crust of Majiagou Formation in Yichuan-Fuxian region of southeastern Ordos Basin
He Shenyan, Song Dalin, Liang Qiang, Guo Min, Liu Dongdong, Wang Xiaofei, Xie Wei 86
- Analysis of influencing factors of volcanic reservoir in Yingyi Formation of Xujiaweizi Fault Depression
Wu Yukang 93

NATURAL GAS DEVELOPMENT AND PRODUCTION

- Study on CBM extracting rate in Liulin area Wang Youzhi 97
- Multi-factor coupling staged fracturing optimum design for horizontal wells
He Jiayuan, Li Fengxia, Liu Changyin 101
- A new method for calculating rational well pattern density of tight gas reservoir Liu Hailong 107
- Field application and research on oblique flooding for changing water flow direction Gu Yongqiang 115
- Test and application of potential energy complementary technology in horizontal wells of Fuyu Oilfield
He Zengjun, Miao Chuanxia, Hu Xiaoyue, Song Chengli, Jing Wei 119
- Research on the influence of polymer concentration change on the recovery ratio while injecting the polymer
Wu Haiyan, Fu Xinxia, Zhao Hua 123
- Study on the technology of sewage reinjection in Hongshiwan well area of Jingbian oilfield
Zhang Tao, Lei Huawei, Qiao Li 129
- Dense oil production geological engineering integration analysis based on AHP and GRA Method: A case study of Upper Jurassic Taaen Siltstones Village
Yang Yuan, He Jingyi, Liu Bin, Yang Hua, Zheng Chunhong 134
- Application of gas seal detection technology to Well Hua1-5
Lei Qisong, Shi Xiangge, Zhang Meng, Xiao Tong, Zhao Yirong 144
- Application of CO₂ huff-and-puff in low-permeability reservoir: A case study of Punan Oilfield Lv Chunhui 148
- Difficulty analysis and technical measures of drilling construction in Well Su 11-1x
Cui Lu, Luo Wenli, Li Siyang, Hu Tao, Sun Xin 153
- Disposal of dangerous overflow conditions in second-section borehole of Well Gao 59-81
Wang Gaojie, Ping Zhe, Li Xianxu 157
- Corrosion monitoring and protection technology for CO₂ gas wells in Xushen gas field Lu Qingyu 161
- Research on method for determining formation pressure in Xushen gas field Meng Hang 166

NATURAL GAS STORAGE AND TRANSPORTATION

- Overview of LNG industry development in China
Qiu Zhengyong, Yang Xuan, Deng Xiangjun, Zhu Xinbing, Qing Song 169

膏岩盖层有效性与形成条件分析

林 潼¹, 冉启贵¹, 潘文庆², 袁文芳², 张光武¹, 李世朝³, 张 璐¹

1. 中国石油勘探开发研究院天然气地质研究所, 河北廊坊 065007;

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;

3. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

摘 要:以塔里木盆地膏岩盖层为对象,对井下岩心和露头膏岩样品开展显微镜与扫描电镜微观分析及物性、突破压力和三轴应力测试,重点分析石膏与硬石膏的盖层有效性。研究结果显示:盐岩和未发生脱水作用的石膏具有很强的物性封闭能力;塔里木盆地台盆区内石膏向硬石膏转化的最大深度为2055m,发生脱水作用后硬石膏形成的孔隙导致封闭性能降低,转化后的硬石膏在抗剪切能力方面与石膏也存在着明显的差异;膏岩层埋藏演化中受脱水和构造应力作用,盖层有效性不断发生改变,最终能否成为有效盖层取决于脆性—塑性转换的边界围压与埋藏深度的对应关系。

关键词:膏盐岩盖层;石膏与硬石膏;封闭性能;三轴应力实验;脱水作用

膏盐岩作为优质的油气盖层已经得到了油气勘探者的普遍认同^[1-3]。世界上许多巨型油气田的发现都与膏盐岩有着密切关系,如近来发展迅猛的巴西东海岸深水盐下油气田,是世界油气储量和产量增长的重要领域^[4];美国墨西哥湾盆地^[5]、西非被动大陆边缘盆地都发现与膏盐岩有关的大型油气田^[6]。中国塔里木盆地库车坳陷古近系到新近系中发育巨厚的膏盐岩层,在膏盐岩层下发现了大北、克深等大型气田;台盆区寒武系盐下近年来也取得了突破,中深1井在盐下白云岩中获得了工业性油气流^[7]。四川盆地普光气田和元坝气田中,三叠系膏岩对保存具有关键作用^[8];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中寒武统含膏泥岩有着直接关系。金之钧等统计认为,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%^[1,8]。

虽然膏盐岩的晶体结构决定了其具有非常好的密封性和柔塑性,但并不是所有膏盐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2700m,累计厚度16m,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,未能有效保存油气^[9]。塔里木盆地台盆区中深1井取得突破后,围绕膏盐岩盖层之下的勘探相继失利,如舒探1井膏盐层埋深1650m,累计厚度57m,但封闭能力差是导致该井失利的主要原因。综上所述,膏盐岩作为有效封盖层也需要一定的条件。

此外,膏岩和盐岩在不同条件下封闭性能存在差异。然而,许多学者在研究膏盐岩过程中未将膏岩和盐岩区分开,笼统地称为膏盐岩^[8,10-11]。世界

基金项目:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05007-003)。

第一作者简介:林潼,1980年生,男,高级工程师,博士,主要从事油气地质研究与实验分析工作。

邮箱:lintong1980@163.com。

上与膏盐岩层(体)发育有关的大型油气藏统计分析发现,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,且当膏岩作为封盖层时以膏泥岩为主。如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边界保存的关键^[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为 $8.9 \times 10^8 \text{t}$),盖层为阿普特期 Ariri 组盐岩,厚度为 100~200m,横向连续分布,不存在盐窗,膏岩含量很少;紧邻桑托斯盆地北部的坎普斯盆地,油气藏分布同样也受盐岩和盐构造影响,岩盐塑性流动形成的大量盐构造圈闭是油气藏聚集区,而盐运动造成的“盐窗”可以形成油气运移的通道。虽然膏岩和盐岩都可以形成于蒸发环境,但物理化学性质差异很大,可能导致膏岩和盐岩作为盖层时封闭性能的差异。据文献^[13-14]显示,在 25℃ 条件下石膏的热导率是 $0.003 \text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$,盐岩热导率为 $0.0154 \text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$,砂岩热导率为 $0.0106 \text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$,硬石膏热导率为 $0.0122 \text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$,盐岩的热导率是石膏的 5 倍,石膏与硬石膏的热导率也相差 4 倍。同时,二者虽然同为蒸发岩类,但成因与分布上也有差异。

由于溶解度的差异(硫酸钙溶解度小于氯化钠),在理想蒸发岩沉积过程中石膏早于盐岩沉淀于湖(海)盆的周缘,而盐岩主要分布于盆地中心。因而,无论物理化学特征还是成因分布,石膏和盐岩都具有显著差异,虽然二者经常伴生共存,但通过详细的沉积旋回划分对比及地震、测井精细解释,可以在纵向上和平面上识别出各自的分布规律^[15-16]。

本文从油气保存的角度出发,针对膏岩开展了盖层参数实验分析,指出膏岩作为有效盖层时必须具备一定的地质条件。

1 样品采集与处理

1.1 样品采集

膏岩样品来自塔里木盆地取心井和野外露头剖面,采样位置见图 1,样品数据见表 1。

为系统评价膏岩盖层的封闭性能,本次除了采集中一下寒武统膏岩岩心外,还采集了盆地露头区的样品作为对比补充。露头采集的膏岩样品位于盆地西部的 O-xhz 剖面的石炭系卡拉沙依组,岩性为石膏。为了比较膏岩和盐岩的封闭能力,本次还采集了 O-awt 剖面古近系盐岩样品。

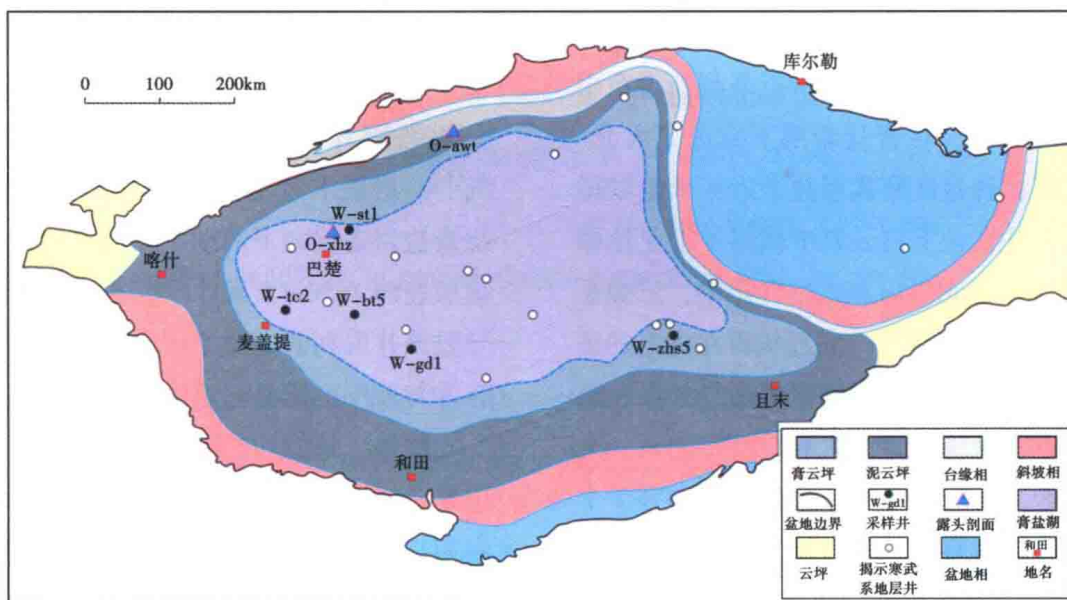


图 1 塔里木盆地中寒武统沉积相及样品采集位置图

1.2 样品处理与测试

为了满足盖层实验分析要求,本次所有柱塞样品都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,既保证了实验要求又保留了样品真实特性。将柱塞样两端打磨,使端面与轴线垂直,制作全过程未接触水。柱塞样品孔隙度和渗透率在中国石油勘探开发研究院储层渗流实验室测定,仪器型号为 PoroPerm-200,测定依据为 SY/T 5336—2006《岩心分析方法》。三轴应力测试在西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成,仪器型号为美国 GCTS 公司 RTR-1000 型静(动)三轴岩石力学测试系统。该系统最大轴向加载 1000kN、最大围压为 120MPa、最高加热温度为 120℃;测试变形范围轴向应变为 $\pm 2.5\text{mm}$ 、径向应变为 $\pm 2.5\text{mm}$ 。测试方法依据美国 ASTM D 2664—2004 标准及国际岩石力学学会 ISRM 推荐的岩石三轴试验要求。突破压力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。该设备可测试最大围压为 65MPa,最高温度为 120℃,气体充注压力范围为 0~40MPa。

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 0.1~0.2mm 之间,晶粒自形程度较好,呈半自形—它形,集合体呈长条状或板状分布。晶粒主要为硬石膏,平均含量大于 75%,其次为少量石膏、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)。在扫描电镜下可见在石膏和硬石膏共存的部位多发育沥青质条带(图 2d、e、f)。

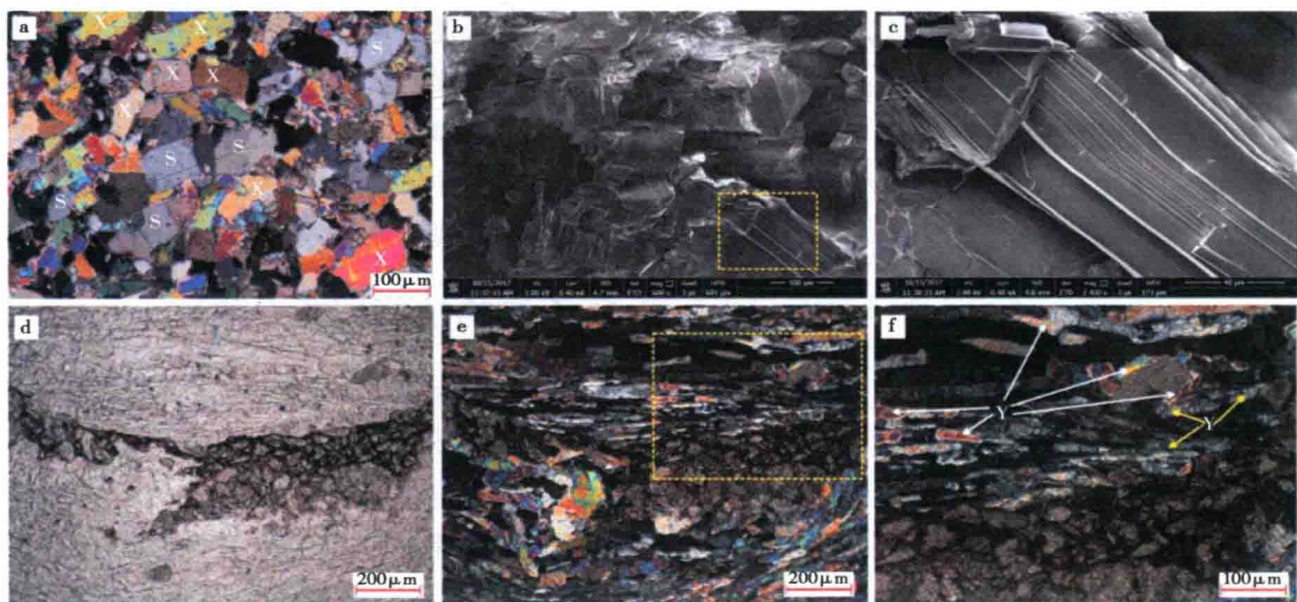


图 2 石膏、硬石膏微观形态与结构特征图

- a. W-st1-1, 正交偏光镜, 石膏与硬石膏共生, 细晶结构, 晶体呈板条状、粒状, 硬石膏干涉色达三级, 石膏干涉色一级灰;
b. W-st1-1, 扫描电镜, 硬石膏晶体; c. 图 b 虚框的放大; d. W-zhs5-2, 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. 图 d 的正交偏光; f. 图 e 虚框的放大

Y—硬石膏; S—石膏

3 膏岩封闭能力测试

测量突破压力的方法很多,包括压汞法(间接法)^[17-19]、分步法^[20]、连续法^[21-22]、驱替法^[23]及脉冲法^[24],这些方法各有优缺点^[17,25-26]。本次实验采用直接测试方法中的驱替法。首先将岩样在30MPa下抽真空48h后用饱和煤油处理;然后将样品放入加持器,在夹持器一端充注气体,间隔一定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。实验方法和标准依据中华人民共和国石油天然气行业标准SYT 5748—2013《岩石气体突破压力测定方法》。

表1是实验室条件下依据标准测试方法对本次采集的膏岩和岩盐开展突破压力测试获取的数值。数据显示膏岩的渗透率值和突破压力值都远小于盐岩。岩盐样品(W-bt5-1、O-awt)经过48h的突破实验后,压力达到23.86MPa,气体仍未突破

表1 膏岩和盐岩样品的物性与突破压力值表

样品编号	岩性	层系	物性		突破压力 (MPa)
			孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	
W-st1-1	细晶硬石膏	ε _{1x}	2.85	0.00378	3.1
W-st1-2	粉晶硬石膏	ε _{1x}	2.43	0.00286	3.5
W-zhs5-1	石膏	ε _{2a}	6.05	0.38615	0.5
W-zhs5-2	粉晶硬石膏	ε _{2a}	3.50	0.01684	1.9
W-bt5-1	盐岩	ε _{2a}	0.65	0.00003	23.86*
W-tc2-1	细晶硬石膏	E _{1a}	3.90	0.22795	1.7
W-tc2-2	白云质细晶硬石膏	E _{1a}	2.40	0.19610	4.1
W-tc2-3	中—细晶硬石膏	E _{1a}	5.85	1.19568	0.5
W-tc2-4	细晶硬石膏	E _{1a}	4.95	0.26198	0.9
W-tc2-5	细晶硬石膏	E _{1a}	2.90	0.43837	3.1
W-tc2-6	细晶硬石膏	E _{1a}	2.00	0.01929	5.1
W-gd1-2	细晶硬石膏	C	1.55	0.01490	6.1
O-xhz	石膏	C _{1+2k}	6.80	0.05820	1.45
O-awt	盐岩	E ₁₊₂	0.70	0.00002	23.86*

注:①样品直径为2.56cm,长度为4.2~4.5cm;

②*气体未突破样品;

③W—井下;O—露头剖面。

样品,这显示出盐岩的超致密性与强封闭能力。石膏和硬石膏的突破压力值均较低,平均为2.7MPa,虽然部分样品可能受地表风化淋滤导致封闭能力下降,但井下样品在外观上并无溶蚀特征的样品同样也表现出较差的封闭性能,说明膏岩自身的封闭能力并不是很强。范明等在评价蒸发岩盖层中发现膏岩相对于泥岩具有较低的突破压力^[26-27],但最终认为可能是压汞法实验造成的错误结论。

本研究还开展了变温度条件下硬石膏的突破压力实验。实验结果得出硬石膏(O-xhz)样品在30℃、50℃、70℃、90℃、110℃条件下的突破压力分别为0.55MPa、0.55MPa、0.58MPa、0.55MPa、0.56MPa。依据突破压力计算公式:

$$p_{\text{突}} = \frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (1)$$

式中 $p_{\text{突}}$ ——突破压力;

σ ——水与气体之间的表面张力;

r ——喉道半径;

θ ——气—水—岩接触角。

当喉道半径 r 不变,气—水—岩接触角 θ 不变时, σ 随温度的升高逐渐变小^[28],突破压力 $p_{\text{突}}$ 应该减小;而实验数据显示,硬石膏的突破压力基本不受温度影响,其原因还有待研究。依据实验结果,可用常温下实验室测试的硬石膏突破压力代表深埋条件下硬石膏的突破压力。

4 石膏的抗剪切能力测试

影响盖层封闭性能的另一个重要因素是岩石抗破裂能力。尽管盖层微观封闭能力强,但当岩石产生裂缝后其遮挡油气的能力将散失^[29]。因而测试岩石抗剪切能力是评价盖层有效性的关键。利用岩石力学实验机对圆柱形岩石试件进行三轴压缩实验是研究岩石强度和变形特性的主要手段之一^[30-31],但在以往油气藏盖层评价中很少应用^[32-33]。利用三轴应力压缩实验能够模拟不同地层条件下盖层岩石的脆性—塑性转变过程。大量三轴应力压缩实验显示,随着围压增大,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。因此可通过三轴应力实验中应变曲线的形态变化来判断岩石是否达到塑变状态。当应变曲线峰值强度与残余强度近似位于一条水平线上时，可以认为此时的围压即为盖层岩石由脆性向塑性转化的边界围压。利用公式：

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

式中 $p_{\text{围}}$ ——边界围压，MPa；

$\rho_{\text{岩}}$ ——盖层上覆岩石的骨架密度， g/cm^3 ；

$\rho_{\text{水}}$ ——上覆地层流体的密度， g/cm^3 ；

H ——盖层的埋藏深度，m。

求取该围压对应的地层深度，以判断该套盖层是否处于塑性变形阶段。

对露头石膏样品（O-xhz）开展 40°C 条件下不同围压的三轴应力加载实验结果如图 3 所示。由图 3 可以看出，随着围压的升高，石膏抗压的能力逐渐增大。在 5MPa 围压下的峰值强度为 45MPa，在 10MPa 围压下，峰值强度为 55MPa。且当围压值大于 10MPa 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，针对本次采集的石膏样品，可以认为 10MPa 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）计算对应的脆性—塑性转换

边界地层深度为 658m。

5 讨论

5.1 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现代沉积中，硬石膏则更常见于埋藏的地层中^[34]。前人研究认为，石膏向硬石膏的转化在 3500in（1067m）的深度就能全部完成^[35]；但是也有研究发现，在低于这个深度仍然存在石膏^[36]。Faith 专门分析了深层石膏存在的证据与原因，指出埋藏温度、压力和地层水矿化度决定这些石膏是原生成因还是次生成因^[35]。本研究在塔里木盆地中寒武统阿瓦塔格组（ C_2a ，埋藏深度 6543m）中发现石膏和硬石膏共存的现象（图 1a、f），说明超深层仍然存在石膏。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、硬石膏向石膏的相互转变却是一种普遍现象，两者之间的转变主要受埋藏成岩作用影响。从盖层封堵油气能力的角度考虑，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更值得关注。虽然目前还没有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，但间接反映该过程物性变化的工作已经开展了很多^[37-39]。关于硬石膏有没有可能在蒸发时沉淀，前人通过实验很早就给出了明确的论述，认定蒸发沉积时先沉淀石膏，硬石膏是在后期埋藏过程中转化形成的。Zen 认为，石膏向硬石膏转化时每生成 1mol 的硬石膏其固态摩尔体积减少 28.37cm^3 ，相当于体积减少 39%，同时生成 2mol 的液体水^[40]。如果膏岩层与较高渗透性的岩层（如砂岩）相邻，则这些水可以顺利排出，使孔隙空间绝对值增加 39%。俞凌杰等^[41]对不同温度（ 25°C 、 90°C 、 120°C 、 150°C ）条件下的石膏开展扫描电镜形态分析，发现随着温度升高石膏发生脱水现象，石膏晶形发生了明显的变化。室温下二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）粒状晶形具有清晰的边界，当温度达到 120°C 和 150°C 时逐渐变化为半水石膏

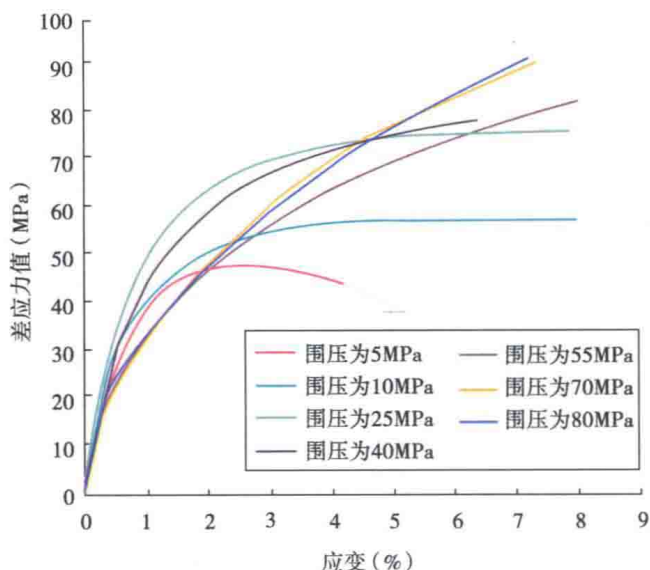


图 3 实验结果的应力—应变曲线图

和无水石膏，晶形变成针状且晶形边界模糊。石膏脱水过程中由于热作用（大约 90℃）扫描电镜下可见大量的穿晶裂缝。上述研究都表明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，将会降低石膏的封闭能力。Llana-Funez 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，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^[39]。Harald 的实验更直观地显示了石膏在脱水过程中产生孔隙且发生了岩石结构特征的改变^[43]。Harald 利用意大利沃尔泰拉（Volterra）石膏开展了脱水实验。沃尔泰拉石膏是目前公认的开展了石膏脱水实验的标准石膏^[34, 37-38, 43]，其晶体集合体像雪花般呈放射状，

因此也被称为雪花石膏（Alabaster）。 K_0 和 Stretton 测量沃尔泰拉石膏的孔隙度值分别是 0.5% 和 0.1%^[44-45]，虽然没有测量过该石膏的突破压力值，但是通过表 1 中孔隙度 ϕ 与突破压力 $p_{突}$ 的数值及其拟合公式 ($p_{突} = 13.66\phi^{-1.57}$)，可以推算该石膏的突破压力值大于 40MPa，因此沃尔泰拉石膏是十分优质的封盖岩石。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。未脱水的石膏为致密块状、无孔隙（图 4a、b 中间白色部分）；边缘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 4c），扫描电镜下可见硬石膏内部发育较大的孔隙（图 4d）。

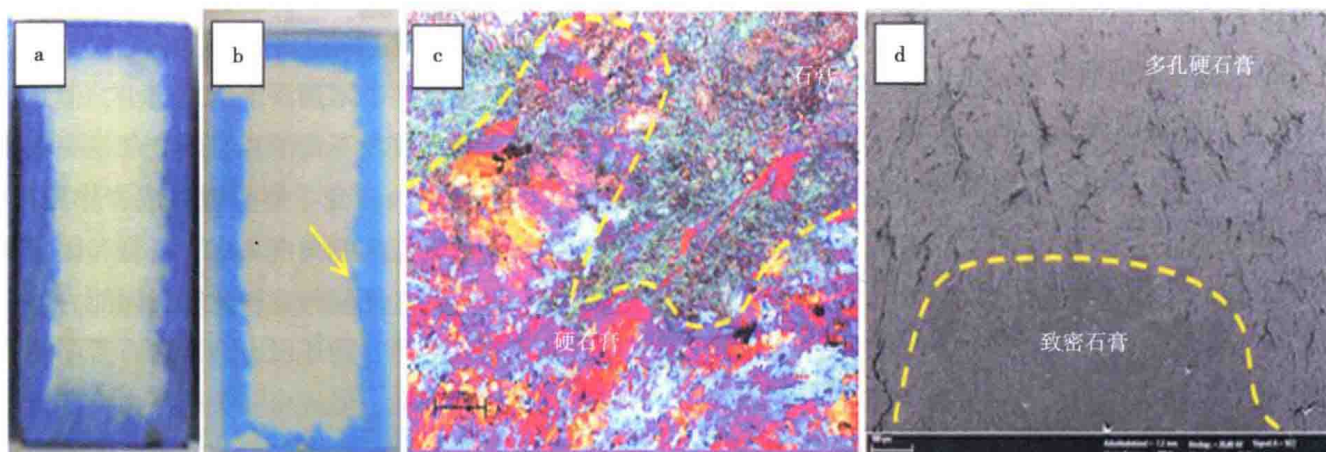


图 4 石膏向硬石膏转化过程中岩石矿物的显微变化特征图（据参考文献 [43] 修改）

- 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；b. 图 a 长方体的切片，磨制为铸体薄片；c. 图 b 中箭头所指部位正交偏光镜下的特征，三级干涉色的为硬石膏，一级灰色的为石膏；
- d. 图 b 箭头所指部位扫描电镜下的特征

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 1d、e、f），说明石膏向硬石膏转换过程中形成的孔隙为同期或后期油气充注提供了聚集场所。表明硬石膏的封闭作用可能已经散失，是否还能作为本区中、下寒武统油气藏的盖层值得探讨。

5.2 膏岩的脆性—塑性转换条件

石膏和硬石膏的抗剪切能力具有显著差异。黄英华、李双建等对硬石膏开展三轴应力实验，结果

显示硬石膏的脆性—塑性转化围压分别为 50MPa 和 68.5MPa^[30-31]。卓勤功等对塔里木盆地库车坳陷阿克苏膏盐矿采集的石膏样品开展了变温、变压三轴应力测试，认为当围压达到 20MPa、温度为 100℃时，石膏由脆性向塑性转变^[42]。俞凌杰等利用川东北三叠系石膏矿中取得的大块自然石膏岩样，在室温下选择 2.5MPa、5MPa、10MPa 和 20MPa 4 个围压点进行了三轴压缩实验，石膏均表现出明显的延性特征，石膏脆—塑转化边界围压不大于 2.5MPa^[41]。本文实验得出的石膏边界围压为

10MPa, 与文献 [41, 42] 相似, 远小于文献 [30, 31] 的实验值。因此, 判断地层条件下石膏是否位于塑性变形区间时需要不同岩性区别对待, 石膏边界围压值低, 硬石膏的边界围压值高。深埋条件下石膏脱水转变成硬石膏, 盖层的塑性边界围压值也相应发生改变。根据前人三轴应力实验结果值推算, 硬石膏的抗剪切埋藏深度至少大于 3300m (50MPa 围压对应值), 远大于石膏的 658m。

5.3 有效膏岩盖层形成的条件

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 (本研究认为突破压力大于 5MPa 具有封闭天然气能力); ②盖层抗剪切能力强, 不易产生断层和微裂缝。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。然而对构造作用强烈的地区, 盖层有效性评价必须考虑断层对盖层的破坏作用。三轴应力实验显示, 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剪切缝。依据实验成果可以认为在此围压值以上具有物性封闭能力的岩石才是有效的盖层。

虽然石膏和硬石膏可以共存于深层或超深层, 但许多学者的研究都证实石膏开始向硬石膏转化的温度发生在 42~60℃ 附近^[33, 46-48]。Hardie 在实验室开展了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 (活性强度为 0.93) 石膏转化成硬石膏的温度为 51.9℃^[49]。MacDonald 指出, 压力越大, 石膏向硬石膏转化的温度就越大, 高压有利于石膏的保存^[47]。Serafeimidis 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^[48]。本研究利用 Serafeimidis 的成果, 取塔里木盆地地温梯度为

2.2℃/100m, 计算得出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 1345m; 当孔隙流体压力为岩石骨架压力的 1/2.3 时, 转化深度为 2055m。可以认为在没有发生地层超压时, 2055m 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 Petromod 软件重建研究区中深 5 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中盖层有效性的变化。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 45~123μm, 颗粒之间晶体清晰紧密, 不发育孔隙, 在没有构造作用的情况下能够作为稳定的封闭层 (图 5 中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。随着石膏埋藏深度达到 685m 后, 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, 体积发生膨胀但不形成裂缝, 石膏的封闭性与抗剪切性最强, 是有效的盖层形成阶段。当埋藏深度达到一定程度时, 温度达到石膏向硬石膏转变的边界温度值 (52℃), 此时石膏开始脱水产生大量的孔隙, 封闭能力下降。因此, 仅在图 5 中②区形成优质的石膏封闭层。图 5 中③区位于温度 52℃ 以上, 以硬石膏为主, 抗剪切能力发生了改变, 不再是原生石膏应力性质, 所以图 5 中③区域是硬石膏盖层的破坏区间, 受到构造应力作用时易产生断层和裂缝。后期持续深埋过程中, 当硬石膏埋藏深度达到硬石膏脆性—塑性转化的边界压力值时 (50MPa), 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, 重新具备了封闭能力, 如图 5 中④区域。而后, 受区域构造抬升的影响, 硬石膏盖层被抬升到脆性—塑性边界深度以上, 受构造应力作用再次产生裂缝或断层

(图5中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。井下岩心硬石膏内发现的沥青条带可能是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, 使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散失。

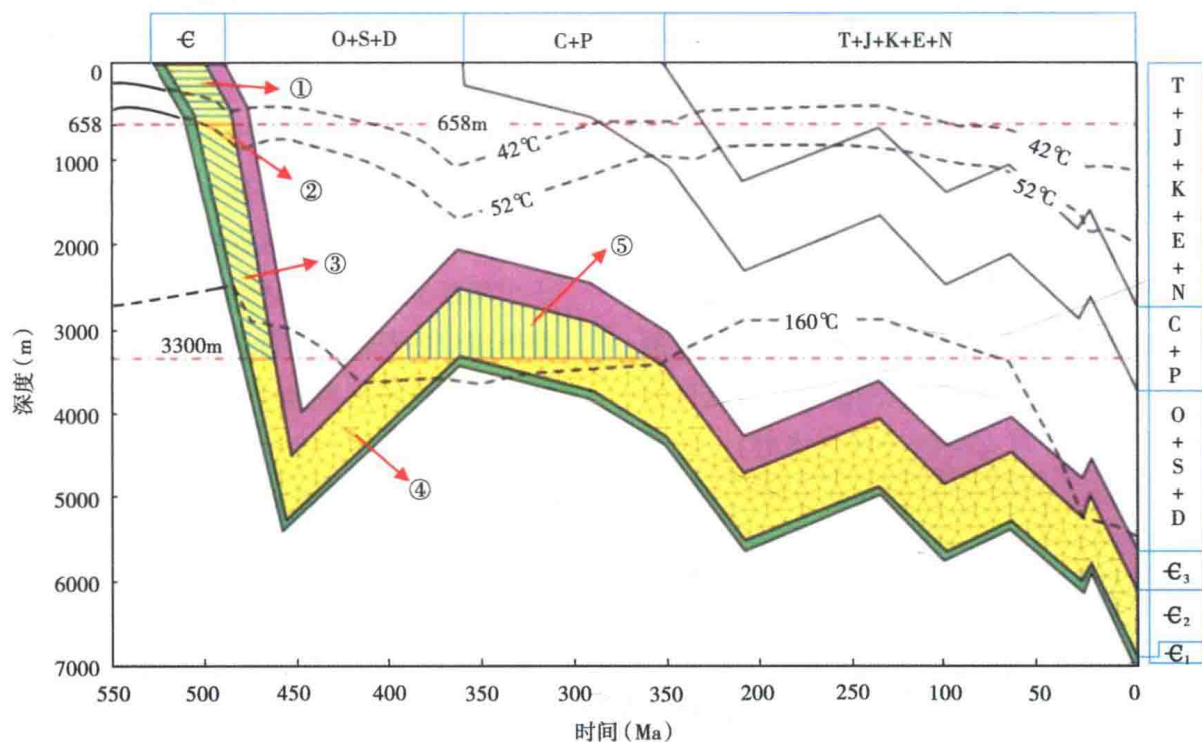


图5 塔里木盆地台盆区膏岩层埋藏演化过程中盖层有效性的变化图

6 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, 发生脱水后形成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 10MPa 左右; 硬石膏的边界围压值较高, 大于 50MPa。

(3) 埋藏演化过程中, 膏岩盖层的封闭能力不断发生改变。685m 以浅, 石膏虽然具有很好的封闭能力, 但抗剪切能力弱, 在构造发育区不合作为有效盖层; 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; 3300m 以深, 硬石膏的物性封闭能力与抗剪切能力都满足作为有效盖层的要求; 后期抬

升到 3300m 以浅时, 硬石膏盖层可能重新产生裂缝而发生油气的泄露; 再次深埋时, 未溶蚀的硬石膏又将从脆性向柔塑性转化, 盖层封闭能力重新形成。

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.
- [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, 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.
- [4] 何娟, 何登发, 李顺利. 南大西洋被动大陆边缘盆地大油气田形成条件与分布规律 [J]. 中国石油勘探,

- 2011, 16 (3): 57-67.
- [5] 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.
- [6] 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气藏的发现与勘探意义 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19 (2): 1-13.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] McBride B C, Rowan M G, Weimer P. The evolution of allochthonous salt systems, Western Green Canyon and Ewing Bank (offshore Louisiana), northern gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (5): 1013-1036.
- [12] Jowett E C, Cathles L M, Davis B W. Predicting depths of gypsum dehydration in evaporitic sedimentary basins [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77 (3): 402-413.
- [13] 卓勤功, 赵孟军, 李勇, 等. 库车前陆盆地古近系岩盐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.
- [14] 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比 [J]. 古地理学报, 2010, 12 (1): 31-41.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Purcell W R. Capillary pressures—Their measurement using mercury and the calculation of permeability there from [J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1949, 186 (2): 39-48.
- [18] 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.
- [19] Ito D, Akaku K, Okabe 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.
- [20] Horseman S T, Harrington J F, Sellin P. Gas migration in clay barriers [J]. Engineering Geology, 1999, 54 (1-2): 139-149.
- [21] Harrington J F, Horseman S T. Gas transport properties of clays and mudrocks [J]. Geological Society, 1999, 158 (1): 107-124.
- [22] 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.
- [23] Hildenbrand A, Schlomer S, Krooss B M. Gas breakthrough experiments on fine-grained sedimentary rocks [J]. Geofluids, 2002, 2 (1): 3-23.
- [24] Kei Kawauraa, Kohei Akaku, Masanori Nakano, *et al.* Examination of methods to measure capillary threshold pressures of politic rock samples [J]. Energy Procedia, 2013 (37): 5411-5418.
- [25] 高帅, 魏宁, 李小春. 盖岩 CO₂ 突破压力测试方法综述 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (9): 2716-2727.
- [26] 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.
- [27] 赵国英, 阎炜, 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.
- [28] Petley D N. Failure envelope of mudrocks at high confining pressures [C]// Aplin A C, Fleet A J, Macquaker J H S, *et al.* Muds and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties. London: Geological Society, 1999: 61-71.
- [29] Olgaard D, Ko S C, Wong T F. Deformation and pore pressure in dehydrating gypsum under transiently drained conditions [J]. Tectono Physics, 1995, 245 (3-4): 237-248.
- [30] 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 (6):