

文章编号: 1001- 6112(2002) 05- 0441- 05

# 库车坳陷断层控制下的盐岩塑性 流动及对上覆地层构造影响的沙箱模拟

王子煜

(石油大学 油气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249)

**摘要:** 以塔里木盆地库车坳陷北秋背斜为模拟的实际构造样式, 采集新生界岩石样品和盐岩样品, 并测定样品的岩石力学参数(弹性模量、泊松比、抗压强度等)。通过理论计算和实验, 根据相似性原理, 选择凡士林和松散的细沙为实验材料。采用双侧挤压模型, 对断层控制下的盐岩塑性流动及其对上覆地层构造的影响进行沙箱模拟。实验结果表明: a) 库车坳陷北秋背斜型的构造样式是由于下伏盐岩在断层控制下塑性流动而形成的, 盐岩的塑性流动和上覆盖层构造的形成与构造作用的时间和速率关系密切, 快速、短时间作用下表现为脆性, 缓慢、长时间作用下表现为塑性; b) 断层边界产状是控制盐岩流动方向的主要因素之一; c) 盐岩厚度变化受塑性流动和构造作用共同影响, 盐岩内部存在复杂的构造变形; d) 盐- 岩相互作用并不完全协调, 边界有“脱空”现象; e) 下伏岩层的岩石力学性质影响和控制着上覆岩层构造的发育, 尽管上覆地层的岩石力学性质可能是一致的。

**关键词:** 盐岩; 塑性流动; 岩石力学性质; 构造作用; 沙箱模拟; 库车坳陷; 塔里木盆地

**中图分类号:** TE121. 3

**文献标识码:** A

目前世界上 45% 的天然气和 11% 的石油与盐丘有关。墨西哥湾、北海、波斯湾、欧洲西北部、前苏联的费尔干纳、乌拉尔等地区都有盐丘。我国东部的济阳坳陷、黄骅坳陷、东濮坳陷以及江汉盆地、莺- 琼盆地也先后发现了盐构造。库车坳陷第三系下部吉迪克组、苏维依组、库姆格列木组的厚层岩盐、膏泥岩分布较广泛, 为重要的构造滑脱面<sup>[1- 3]</sup>。盐岩成为影响和制约库车坳陷中生代构造的重要因素, 深入开展盐构造的物理模拟对寻找含油气圈闭和深化与盐岩有关的构造样式的认识具有重要意义。为模拟和研究盐构造, 国内外建立了一系列物理模型<sup>[4- 12]</sup>。中国石油天然气集团公司在我校建立的构造物理模拟实验室在渤海湾盆地开展了伸展构造、挤压构造和反转构造的实验研究, 并取得了重要的实践经验。本次研究利用沙箱模拟实验装置, 模拟挤压条件下盐岩的塑性流动对盖层构造的影响, 具有重要意义。

## 1 地质背景

滑脱面的发育是库车冲断构造的基本因素和重

要特征。库车坳陷中生代构造以薄皮构造变形为主, 滑脱面发育在沉积盖层的软弱地层中。本区大套陆相地层中, 煤系地层、膏岩层、盐岩层为相对软弱的层, 其原始分布范围、厚度及受挤压的程度决定了滑脱面发育的区域、深度、位移及变形样式。中生界盖层的主干滑脱面有第三系下部的库姆格列木组( $E_{1-2k}$ )、苏维依组( $E_{3s}$ )和吉迪克组( $N_{1j}$ )的厚层盐岩、膏泥岩、软泥层, 分布较广泛。中生界下部(侏罗系、三叠系)发育的大套煤层和泥页岩, 除区域性的主干滑脱面外, 不同地区、不同层位还发育不同程度的次级滑脱面。主干滑脱面和次级滑脱面上下叠置、左右联结, 使卷入的地层发生复杂的位移和变形。主干滑脱面控制了垂向构造层次: 浅层次有断展褶皱、断滑褶皱、突起构造、三角带、反冲相关褶皱等; 中层次有断弯褶皱、普通双重构造和被动顶板双重构造; 深层次在山前抬升卷入变形, 前陆地区未卷入变形。由于多个滑脱面发育、冲断层产状变化及深、浅不同构造层次叠加等因素的影响, 导致垂向构造样式变异, 即上、下构造形式不符。

盐构造的广泛发育是库车坳陷构造样式的重要特点。第三纪的盐湖使下第三系沉积了巨厚的膏盐

收稿日期: 2001- 04- 13; 修订日期: 2002- 09- 01.

基金项目: 国家“973”重大科技攻关项目(G1999043305).

作者简介: 王子煜(1970-), 男(汉族), 山东莱芜人, 讲师、博士生, 主要从事油气构造定量解析与构造物理模拟和遥感与地理信息系统方面的研究.

岩层,喜山运动中晚期强烈的构造挤压形成了大量的盐构造。盐构造的主要类型有丘形、喇叭形和拱形等,广泛分布于库喀断褶带、拜城构造带、秋立塔克构造带及羊塔克构造带,形成于挤压构造背景下。实验选取库车坳陷北秋背斜构造为实际的模拟目标(图 1)。北秋不对称背斜的组成地层侏罗系—白垩系(K—J)岩性为碎屑岩夹煤线,库姆格列木组(E<sub>1-2k</sub>)为含盐建造,苏维依组(E<sub>3s</sub>)、吉迪克组—康村组(N<sub>1j</sub>—N<sub>1-2k</sub>)和库车组(N<sub>2k</sub>)岩性为泥岩和砂岩。

## 2 岩石力学性质

野外采集库车坳陷吉迪克组(N<sub>1j</sub>)砂岩、苏维依组(E<sub>3s</sub>)泥岩、库姆格列木组(E<sub>1-2k</sub>)盐岩、侏罗系(J)砂岩和白垩系(K)砂岩样品,并测定岩石力学参数(表 1)。岩石力学实验采用 YTD-200 型电子式压力试验机进行。记录设备采用德国产 30t 压力传感器和日本 7V07 程序控制记录仪。数据处理设备采用 PC9801 计算机。单轴抗压强度计算公式采用  $\sigma_c = P_{max}/A$ , 式中:  $\sigma_c$  为单轴抗压强度,单位 MPa;  $P_{max}$  为岩石试件最大破坏载荷,单位 N;  $A$  为试件受压面积,单位 mm<sup>2</sup>。弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$  计算公式采用  $E = \sigma_{c(50)}/\epsilon_{h(50)}$ ;  $\mu = \epsilon_{d(50)}/\epsilon_{h(50)}$ , 式中:  $E$  为试件弹性模量,单位 MPa;  $\sigma_{c(50)}$  为试件单轴抗压强度的 50%,单位 MPa;  $\epsilon_{h(50)}$ 、 $\epsilon_{d(50)}$  分别为  $\sigma_{c(50)}$  处对应的轴向压缩应变和径向拉伸应变;  $\mu$  为泊松比。

## 3 相似材料的选择

构造物理模拟一般要满足 5 项基本原则: a) 相似原则: 模型与原型必须符合相似原理这一基本原则; b) 选择原则: 力求主要因素相似而不苛求所有因

表 1 塔里木盆地库车坳陷岩石力学参数表

**Table 1 Mechanical parameters of rocks in the Kuche Depression of the Tarim Basin**

样品名称	单轴抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$
N <sub>1j</sub> 砂岩	32.58	6.18	0.233
E <sub>3s</sub> 泥岩	29.54	14.00	0.102
E <sub>1-2k</sub> 盐岩	29.75	4.72	0.330
K 砂岩	99.45	17.84	0.202
J 砂岩	85.19	53.16	0.396

素都相似; c) 分离原则: 单个实验将一个因素作为变量而固定其它因素; d) 逐步逼近原则: 随着认识发展和实验条件改善而逼近相似; e) 统计原则: 从统计的角度而不是单个实验的角度评价实验的可信度与准确度。

单个实验的相似条件要满足:  $C_\eta = C_\rho C_l C_t$ ;  $C_p = C_\rho C_l$ ;  $C_E = C_p$ 。其中:  $C_\eta$  为粘度相似因子;  $C_\rho$  为密度相似因子;  $C_l$  为长度相似因子;  $C_t$  为时间相似因子;  $C_p$  为强度相似因子;  $C_E$  为杨氏弹性模量。相似因子一般满足下列条件:  $C_l \approx 10^{-4} \sim 10^{-5}$ ;  $C_t \approx 10^{-11} \sim 10^{-13}$ ;  $C_\eta \approx 10^{-15} \sim 10^{-19}$ ;  $C_p \approx 10^{-4} \sim 10^{-5}$ ;  $C_E \approx 10^{-4} \sim 10^{-5}$ [13, 14]。

实验用松散沙抗压强度  $60 \times 10^{-2} \sim 300 \times 10^2$  Pa, 砂泥岩密度实测 1.9~2.2g/cm<sup>3</sup>, 松散沙密度 1.4g/cm<sup>3</sup>, 根据测定的岩石力学参数, 松散沙模拟砂、泥岩符合相似条件。实验用凡士林抗压强度  $28.5 \times 10^2$  Pa, 盐岩密度实测 1.9~2.1g/cm<sup>3</sup>, 实验用凡士林密度 1.47g/cm<sup>3</sup>, 根据测定的盐岩力学参数, 凡士林模拟盐岩符合相似条件。

## 4 模拟实验

设计原始模型长度 70cm, 宽度 20cm, 高度 8cm (图 2)。采用 100% 凡士林模拟盐岩, 松散细沙 5 层模拟盐上地层, 硬泡沫模拟断层下盘地层。预先将 100% 凡士林加热融化, 灌注沙箱, 待其冷凝后铺设沙层。凡士林层原始状态为水平等厚, 长度 40cm, 宽度 20cm, 厚度 3cm。硬泡沫块选用不易变形的硬泡沫加工而成, 长度 30cm, 宽度 20cm, 厚度 3cm, 设计断层倾角 45°。沙层采用海滩细沙, 重新进行筛选, 粒度均匀, 单层厚度 1cm, 铺设 5 层, 原始状态水平等厚。模型底部铺设预先拉长了 10cm 的薄橡皮层, 以便凡士林层底部的应力传递。沙箱两侧为自由挤压端, 机械自动驱动, 实验中沙箱两侧同时匀速缓慢挤压, 挤压速度为 0.1mm/min。

剖面缩短率 10% 时, 缩短量为 7cm (图 3)。在

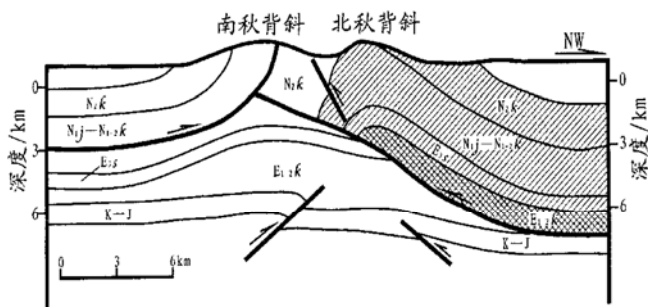


图 1 模拟实验目标区剖面构造样式

(据 BQ95-187 测线解释, 色块表示的北秋背斜为实验模拟的实际构造, E<sub>1-2k</sub> 为盐岩)

Fig. 1 Structural style of the prototype section

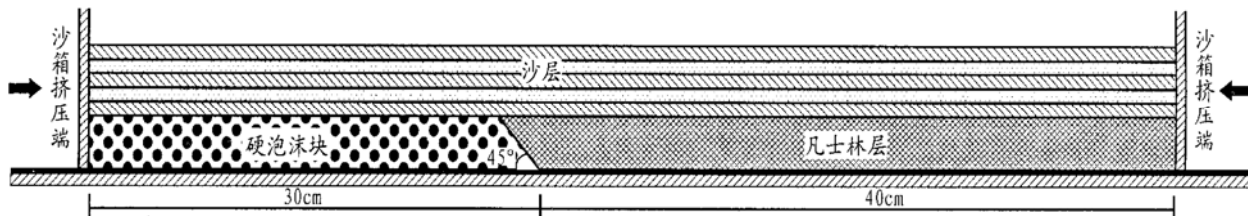


图 2 盐岩塑性流动对盖层构造的影响沙箱模拟实验原始模型

Fig. 2 Prototype of the sandbox simulation experiment in the influence of saltrock plastic flow on caprock structures

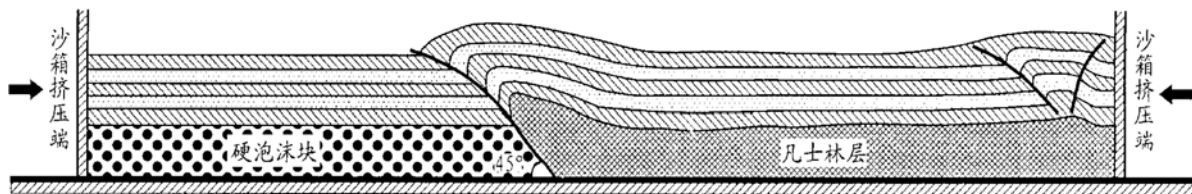


图 3 剖面缩短率 10% 时盐岩塑性流动对盖层构造的影响物理模拟实验结果

Fig. 3 Results of the physical simulation experiment in the influence of saltrock plastic flow on caprock structures with the section compressibility of 10%

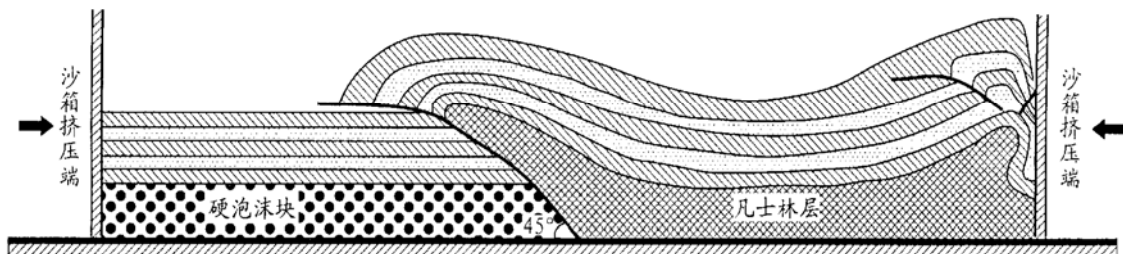


图 4 剖面缩短率 20% 时盐岩塑性流动对盖层构造的影响物理模拟实验结果

Fig. 4 Results of the physical simulation experiment in the influence of saltrock plastic flow on caprock structures with the section compressibility of 20%

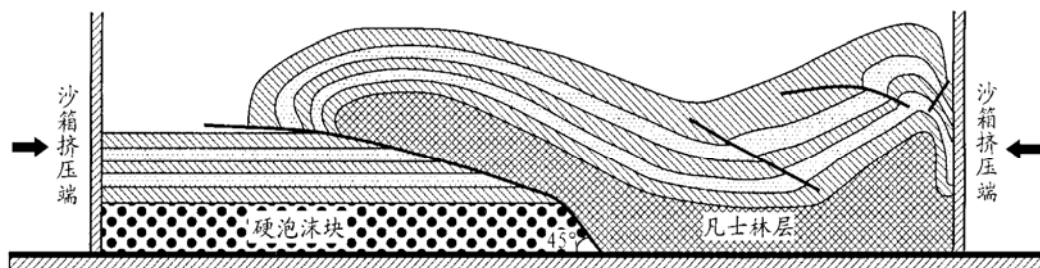


图 5 剖面缩短率 30% 时盐岩塑性流动对盖层构造的影响物理模拟实验结果

Fig. 5 Results of the physical simulation experiment in the influence of saltrock plastic flow on caprock structures with the section compressibility of 30%

双侧缓慢的挤压作用下,模型底部的橡皮层发生收缩。硬泡沫块及其上覆沙层未发生变形,凡士林层向左右两侧缓慢流动,内部存在水平剪切等复杂的构造变形。凡士林左侧沿断面流动上冲,上覆沙层形成牵引构造,沙层厚度发生变化,形成北秋背斜型构造的雏形。硬泡沫块的形状控制了凡士林流动的初始方向。同时,凡士林右侧靠近自由挤压端流动上拱,导致上覆沙层形成背冲构造。

剖面缩短率 20% 时,总缩短量为 14cm(图 4),变形集中在凡士林及其上覆沙层。硬泡沫块及其上

覆沙层未发生变形,保持原始水平状态。凡士林层向左右两侧缓慢流动,厚度变化加剧,内部构造变形明显(由于未在凡士林层内部加入标志层,图 4 中未标注)。凡士林左侧继续沿断面流动逆冲,上覆沙层形成类似北秋背斜的构造,左翼产状较陡,右翼产状较缓。同时,凡士林右侧靠近自由挤压端继续流动上拱,形成明显不对称的“盐丘”,靠近右侧挤压端部位较陡,上覆沙层形成的背冲构造产状变缓。凡士林层上覆沙层总体呈“一个向斜”、“两个不对称、不完整背斜”的构造样式。

剖面缩短率 30% 时,总缩短量为 21cm(图 5)。硬泡沫块及其上覆沙层仍未发生变形,保持原始水平状态。凡士林层上覆沙层向斜部位出现“倾向凡士林层一侧”的逆冲断层。凡士林左侧继续沿断面流动逆冲,产状继续变缓,上覆沙层形成北秋背斜型构造,左翼产状继续变陡,右翼产状继续变缓。同时,凡士林右侧靠近自由挤压端继续流动上拱,形成更加不对称的“盐丘”和背冲构造。

## 5 结论与讨论

a) 库车坳陷北秋背斜型的构造样式是由于下伏盐岩在断层控制下的塑性流动形成的。盐岩的塑性流动和上覆地层构造的形成与构造作用的时间和速率关系密切。快速、短时间作用下表现为脆性;缓慢、长时间作用下表现为塑性。实验中,曾用同样的物理模型,采取快速短时间的挤压作用进行同样的模拟实验,结果凡士林层和沙层一起表现为明显的脆性特征。

b) 断层边界产状是控制盐岩流动方向的主要因素之一。实验中,凡士林层的初始流动依赖于硬泡沫块断层的产状。随着挤压量的增大,凡士林“突破”硬泡沫块进入沙层,在沙层中形成的断层产状较缓,而且随着挤压的进行产状继续变缓。

c) 盐岩厚度变化受塑性流动和构造作用共同影响,盐岩内部存在复杂的构造变形。实验中,凡士林层的内部变形较为复杂,塑性流动和构造变形共同影响着凡士林层厚度的变化。

d) 盐-岩相互作用并不完全协调,边界有“脱空”现象。实验中,凡士林与细沙在岩石物性和力学性质上具有较大差异,两者边界部位的变形并非完全一致。

e) 下伏岩层的岩石力学性质影响和控制着上覆地层的构造发育。由于硬泡沫块和凡士林的力学性质存在差异,导致上覆地层构造样式明显不同,尽管

上覆地层的岩石力学性质可能是一致的。

f) 研究中重点讨论了凡士林左侧的流动变形与北秋背斜构造的相似,实验模型右侧出现的“盐丘”和上覆沙层的背冲构造与实际构造的相似性有待深入研究。

### 参考文献:

- [1] 汤良杰. 塔里木盆地多层次滑脱构造与含油气远景探讨[J]. 地质学报, 1992, 66(2).
- [2] 刘光祥. 库车中新生代前陆盆地沉降-沉积分析[J]. 石油实验地质, 2000, 22(4): 313.
- [3] 赵林. 库车坳陷天然气成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 1999, 21(4): 307.
- [4] 张文佑, 钟嘉猷, 单家增, 等. 构造物理模拟实验图册[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [5] 曾佐勋, 刘立林. 构造模拟[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [6] Belousov-V-V (Belousov). Tectonophysical investigations[J]. Geol Soc Am B 1960, 71(8): 1255-1269.
- [7] Neil E A, Houseman G A. Geodynamics of the Tarim basin and the Tian Shan in central Asia[J]. Tectonics, 1997, 16(4): 571-584.
- [8] Koyi H, Petersen K. Influence of basement faults on the development of salt structures in the Danish basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10: 82-94.
- [9] Koyi H. Model of internal deformation in sand wedges[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(2): 293-300.
- [10] Koyi H, Talbot C J, Torudbakken B O. Analogue models of salt diapirs and seismic interpretation in the Nordapp basin, Norway[J]. Petroleum Geoscience, 1995, 1: 185-192.
- [11] Koyi H. Salt flow by aggrading and prograding overburdens[J]. Salt Tectonics, 1996, 100: 243-258.
- [12] Ge H X, Jackson M P A, Vendeville B C. Kinematics and dynamics of salt tectonics driven by progradation[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(3): 398-423.
- [13] 周建勋, 漆家福, 童亨茂. 盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [14] 单家增. 构造模拟实验石油地质学中的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.

## SANDBOX SIMULATION OF SALT ROCK PLASTIC FLOW CONTROLLED BY FAULTS IN THE KUCHE DEPRESSION OF THE TARIM BASIN AND ITS INFLUENCE ON OVERLYING STRATIGRAPHIC STRUCTURES

WANG Zi-yu

**Abstract:** Taking the Beiqiu Anticline in the Kuche Depression of the Tarim Basin as the actual structural style of the simulation experiment, the Cenozoic rock and saltrock were sampled and analysed for lithomechanical parameters (i. e., elastic modulus, Poisson's ratio, compressive strength, etc.). By theoretical calculation and experiment, vaseline and loose fine sand were chosen as experimental material based on the similarity principle. Using the bilateral compressive model, the saltrock plastic flow controlled by faults and its influence on overlying stratigraphic structures were simulated in a sandbox. The results revealed that a) the structural style of the Beiqiu Anticline type in the Kuche Depression was formed by underlying saltrock plastic flow under the control of faults, and the plastic flow of saltrock and the formation of overlying caprock structures were closely related to the time and velocity of tectonic processes, displaying brittle in the rapid and short-time process or plastic in the slow and long-time process; b) the boundary occurrence of faults was one of the major factors controlling the direction of saltrock flow; c) the change of saltrock thickness was jointly affected by plastic flow and tectonic processes, and complex structure deformation existed within the inner of saltrock; d) the salt-rock interaction was not well coordinated, and the "disjunctive" appearance was shown in the boundary; and e) the lithomechanical properties of underlying rock layers affected and controlled the development of overlying rock structures, though the overlying strata may have the identical lithomechanical properties.

**Key words:** saltrock; plastic flow; lithomechanical property; tectonic process; sandbox simulation; the Kuche Depression; the Tarim Basin

(continued from page 440)

## FLUID INCLUSIONS AND PHASES OF PETROLEUM INFILLING AND MIGRATION IN KELA-2 GAS POOL, TARIM BASIN

TAO Shirzhen, QIN Sheng-fei

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the thin section observations and diagenetic study, the fluid inclusions from Kela-2 gas pool, the present largest gas reservoir of the country are analysed, resulted in the parameters of trapping temperature and salinity of abiogenic inclusions in salty fluid associated with organic inclusions, and physical parameters and compositional data of organic inclusions, thus the sequential order of fluid inclusion formation can be inferred, and the palaeogeotemperature gradients of different diagenetic phases in upper Cretaceous calculated by a linear regression. Finally the infilling phases, and characteristics of evolution and migration of oil/gas, and resources potential in Kela-2 gas pool are analysed.

**Key words:** petroleum infilling; migration phase; liquid inclusions; Kela-2 gas reservoir; Tarim Basin