

石膏含量对盐膏层蠕变速率影响的研究

马 跃¹, 陈 勉¹, 杨春和², 杨 沛¹, 卢运虎¹, 贾斯博³, 金 衍¹

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 塔里木油田分公司勘探事业部, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 针对深部盐膏岩地层岩芯获取难度大的难题, 依据现场岩屑的矿物组分, 人工压制盐膏岩试验试样, 蠕变试验表明, 相同组分的天然岩芯和人造岩芯具有相似的蠕变规律。据此, 通过对人造岩芯进行不同围压和相同温度下的蠕变试验, 得到各种矿物组分含量对其蠕变的影响。结果表明: 在相同应力和温度条件下, 盐含量多的复合盐岩的稳态蠕变速率较高, 膏含量多的复合盐岩的稳态蠕变速率较低。同时, 对滨里海盆地的天然岩芯进行理化性能分析, 同样验证了以上的结论。试验结果在塔里木克深区块的超深井得到验证, 并指导钻井液密度的合理确定。

关键词: 岩石力学; 盐膏岩; 石膏; 蠕变; 超深井

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)增 2-3238-07

STUDY OF EFFECTS OF GYPSUM CONTENT ON SALT-GYPSUM STRATUM CREEP RATE

MA Yue¹, CHEN Mian¹, YANG Chunhe², YANG Pei¹, LU Yunhu¹, JIA Sibo³, JIN Yan¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;
3. Department of Exploration, Tarim Oilfield Company, Kuerle, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Because of the coring difficulty in deep-layer salt formation, artificial cores were made according to its field mineral composition. Creep tests were conducted which shows that the natural core and the artificial core with the same mineral composition had the same creep law. In light of this finding, further creep tests of the artificial core were carried under different confining pressures and same temperature, and the effects of contents of different mineral compositions on the creep were obtained. The test results showed that under the same stress and temperature condition, the steady-state creep rate of high-salt salt-gypsum formation was higher, while the high-gypsum salt-gypsum formation was lower. At the same time, the physico-chemical property analysis were conducted for natural core in Caspian Basin, which also verified the above conclusion. The test result was tested in two ultra-deep wells in Keshen block in Tarim oil field and was applied to determination of drill fluid density.

Key words: rock mechanics; salt-gypsum rocks; gypsum; creep; ultra-deep wells

1 引 言

盐岩的非常重要特性之一就是具有良好的流变

特性, 在一定的载荷作用下, 其蠕变应变能达到 30% ~ 40%。国际上盐岩的蠕变特性的应用主要在能源地下储备(SPR)和核废料处理(WIPP)等领域, 主要集中在瞬态和稳态的蠕变特性研究。在这 2 个阶

收稿日期: 2012-06-08; **修回日期:** 2012-10-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226701)

作者简介: 马 跃(1984-), 男, 2007 年毕业于大连海事大学计算机与科学技术专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学、井壁稳定方向的数值模拟方面的研究工作。E-mail: mayue0327@163.com。通讯作者: 金 衍(1972-), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: jinyan_cup@163.com

段，蠕变试验研究主要集中在宏观和微观试验。在宏观试验方面^[1-2]，通过改变应力状态和温度，对盐岩蠕变特性试验进行研究，如单轴和三轴蠕变试验。杨春和等^[3]通过对单轴、三轴盐岩变应力路径的应力松弛与蠕变试验，研究了应力状态及加载路径对盐岩时间相关性特征的影响。刘绘新等^[4-5]对四川地区和塔里木的盐岩进行了蠕变规律试验研究，得到围压、温度和轴向压力对盐岩蠕变的影响规律。U. Hunsche 等^[6-8]采用内变量理论来描述盐岩蠕变的本构关系。K. S. Passaris 等^[9-11]建立了半经验、半理论的流变本构模型，应用黏弹塑性模型来描述盐岩的蠕变特性。在微观试验方面，蠕变机制分析主要集中在稳态蠕变阶段，大量的研究表明，此阶段的变形机制为：高温、低应力状态下的位错攀升变形机制；低温、高应力状态下的位错滑移变形机制；低温和低应力作用下的转换变形机制等。U. Hunsche^[6]对盐岩蠕变特性参数进行试验研究，结果表明，针对盐岩的不同蠕变机制，其本构方程是有差异的。

在油气资源钻探过程中，我国绝大部分区块钻遇了盐膏层。对于泥浆密度选取、套管强度设计等施工环节，了解盐膏层的蠕变特性、掌握其流变本构方程是十分重要的。由于盐膏层埋藏深度较深，受到现阶段机械发展水平的限制，现场取芯困难；另外，天然岩芯属于不可再生资源，某些层位已无法取得天然岩芯，这样就无法进行室内试验，导致不能准确掌握深部盐膏层的蠕变特性。针对以上深部盐膏层取芯难的问题，国内外尚未见到相关的报道。笔者从矿物组分的角度入手，通过设计室内蠕变试验方案，发现相同组分的人造岩芯与天然岩芯具有相似蠕变规律，证明通过相同组分的人造岩芯替代天然岩芯的方案是可行的，对解决盐膏层取芯难的问题具有一定的参考和指导意义。因此，通过制备不同组分含量的人造岩芯，并进行不同围压和温度下的蠕变试验，进一步揭示矿物组分对蠕变特性的影响规律；同时，对滨海盆地天然岩芯进行理化性能分析，同样证实了相同的结论，从理论到实际应用诸方面作了探讨，并得到有益的结果。

2 人造岩芯制备

根据现场岩屑 X-射线衍射分析结果，对人工压制的盐膏岩试样进行蠕变试验，进而分析天然岩芯和人造岩芯的蠕变规律。

2.1 人造岩芯制备方法

本试验以盐岩岩屑为基础，根据对现场盐膏岩屑的 X-射线衍射分析的结果，按相应的配比进行人造岩芯的制备。由于制备的人造岩样的条件会影响其蠕变试验的结果，所以本文在制备岩芯的过程中考虑到以下几点因素的影响：

(1) 颗粒度的大小。由于盐岩的颗粒度相对较大，为 2~6 mm，且多呈规则立方体，所以，将处理后的盐岩岩屑用滤网筛选出符合颗粒度规格要求的盐岩颗粒。

(2) 晶粒间胶结强度。盐岩晶粒间胶结强度相对较弱，加入粉化处理后的混合石膏和黏土，这样既可以达到胶结的目的，又能够避免加入的胶结剂胶死其中的黏土矿物。

(3) 孔隙度和渗透率。制备人造岩芯的目的是用其代替天然岩芯，以便进行钻井工程中遇到盐膏岩的蠕变试验，盐岩岩性本身属性决定着其较低的孔隙度和渗透率，国内外尚未见关于这两者对蠕变性质影响的报道。所以，在人造岩芯的制作方法上不考虑其孔隙度和渗透率。

(4) 盐膏岩的密度。由于盐膏岩的密度对于蠕变试验有着很大的影响，所以，对于盐膏岩密度的测定，本文采用李氏密度瓶法进行，岩样均进行测定 3 次，取其平均值。

总体要求所制备的人造岩芯与天然岩芯相比，岩性相同、物性参数比较接近，以满足试验的要求。

2.2 人造岩芯的加工工艺及步骤

(1) 预处理模具。压制岩芯需要较高的压强，模具表面和岩芯紧密结合，为了方便脱模，在模具表面涂抹润滑剂，之后在润滑剂和岩芯之间黏贴隔离层。

(2) 将按照比例配好并搅拌均匀的盐岩岩屑、石膏粉和黏土粉倒入模具并不断振动磨具，然后用冲模稍微用力压紧，加入岩粉，如此反复直至加满模具。

(3) 固定模具，缓慢加压直至 10 MPa，并稳压 5 min，将岩芯压实，直至达到天然岩芯密度的要求。

(4) 待岩芯压实后，缓慢卸压并取出岩芯。

(5) 在台式钻床上取出直径为 25 mm、长度为 55 mm 的岩样。在车床上平端面，使之满足国际岩石力学标准岩样的要求。

2.3 人造岩芯蠕变性能验证

塔里木盆地盐膏层分布较广，属盐岩、膏岩和“软泥岩”等组成的复合盐岩层。取塔里木盆地羊塔克 502 井和塔北隆起英买力区第三系的岩屑进行 X-射线衍射分析，结果如表 1 所示。据此，按照上述配比，取一定量的盐、石膏、黏土、石英、长石、方解石等，同时，取得以上 2 口井的天然岩芯，采用李氏密度瓶法对进行密度测定，测定结果如表 2 所示，并按照上述步骤制作符合规格的人造岩芯。图 1 为羊塔克 502 井盐岩岩芯和人造岩芯。对 2 组天然岩芯和人造岩芯进行蠕变试验，试验条件如表 3 所示，得到轴向应变 ϵ 随时间 t 的变化规律，如图 2 所示。由此可知，在相同的试验条件下，相同组分含量的天然岩芯和人造岩芯的蠕变特性基本相同，但也存在差异，这是因为：由于地质成因的复杂性，无法度量天然岩芯非均匀程度，并且制作的人造岩芯的工艺存在着不同程度的误差，无法模拟其真实的非均匀的性质，故造成天然岩芯和人造岩芯的试验结果的差异。但是，由图 2 可知，



(b) 人造岩芯

图 1 羊塔克 502 井的盐岩天然岩芯和人造岩芯

Fig.1 The natural core and artificial core of the 502 wells in Yangtake

表 3 羊塔克 502 井和英买力第三系两组人造岩芯和天然岩芯的试验条件详细描述

Table 3 Detailed description of the experimental conditions of two artificial core and natural core of 502 well in Yangtake and Yingmaili Eogene

岩芯类型	轴向压力/ 围压/		温度/	时间/
	MPa	MPa		
羊塔克 502 井天然岩芯和人造岩芯	50	30	100	1 600
英买力第三系天然岩芯和人造岩芯	40	30	120	500

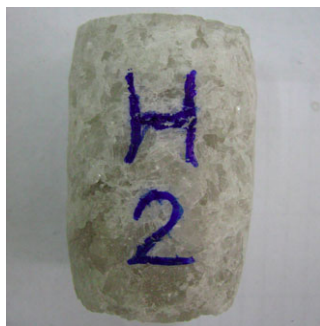
表 1 羊塔克 502 井和英买力第三系岩屑的 X-射线衍射分析结果

Table 1 The result of quantitative X-ray diffraction analyses of drill cuttings recovered from 502 well in Yangtake and Yingmaili Eogene

井号	井段/m	矿物种类和含量/%					含量 黏土/%
		石英	长石	方解石	石盐	硬石膏	
羊塔克 502 井	5 200	0.2	0.7	0.1	28.4	48.8	21.8
英买力第三系	5 064	0.8	0.9	0.7	53.6	28.6	15.4

表 2 羊塔克 502 井和英买力第三系天然岩芯密度测定结果
Table 2 The density of natural core of 502 well in Yangtake and Yingmaili Eogene

井号	井段/m	密度/(g · cm ⁻³)
羊塔克 502 井	5 200	2.174
英买力第三系	5 064	2.362

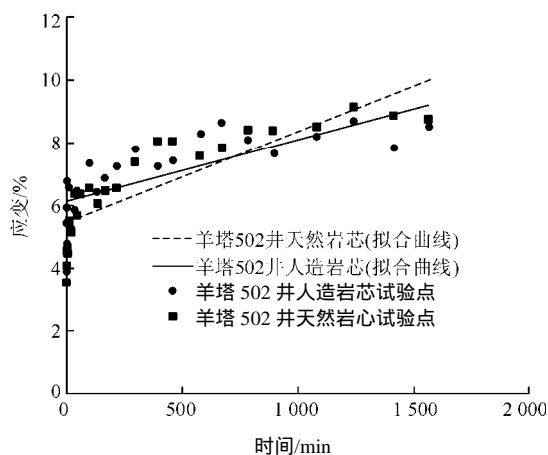


(a) 天然岩芯

两者试验数据量值比较接近，曲线趋势基本相同，说明上述由人造岩芯代替天然岩芯进行蠕变特性研究的方法是可行的。

3 膏含量对蠕变速率的影响试验

盐膏层除了含有盐岩和石膏，还包括各种不同的黏土矿物。其中石膏的主要成分为硬石膏。试验结果表明，硬石膏在非自然压实状态下，遇水膨胀。通过对人造岩芯进行蠕变试验，分析不同膏含量对其蠕变规律的影响。



(a) 羊塔克 502 井

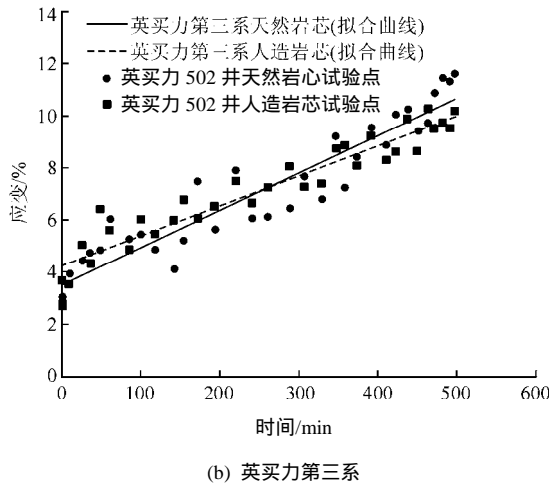


图 2 羊塔克 502 井和英买力第三系天然和人造岩芯蠕变试验应变-时间关系对比

Fig.2 Comparison of strain-time relationship of creep test result between natural and artificial cores of 502 well in Yangtake and in Yingmaili Eogene

3.1 试验方案

对 4 种矿物成分相同但含量不同的人造岩芯进行蠕变试验，人造岩芯矿物组分含量见表 4。

表 4 不同矿物成分的人造岩芯组分含量
Table 4 Contents of different mineral compositions of artificial cores

编号	组分百分含量/%		
	石盐	硬石膏	黏土
B1	20	55	25
B2	40	40	20
B3	60	25	15
B4	80	10	10

试验在 Terratek 岩石力学测试系统上进行，如图 3 所示。该系统可以连续对应变进行测定、记录并且根据预先设定的程序模式自动进行温度和压力控制。

在试验过程中，必须由低温、低应力的一级逐渐做高温、高应力的一级，同时为使岩样尽量恢复，两级试验之间必须卸压 3~4 h，以减小应力对后一级试验的影响。采用不同的轴向力、围压和温度组合的 4 种试验方案分别对 B1~B4 盐岩岩芯进行蠕变试验，试验方案如图 4 所示。

3.2 不同膏含量的蠕变速率

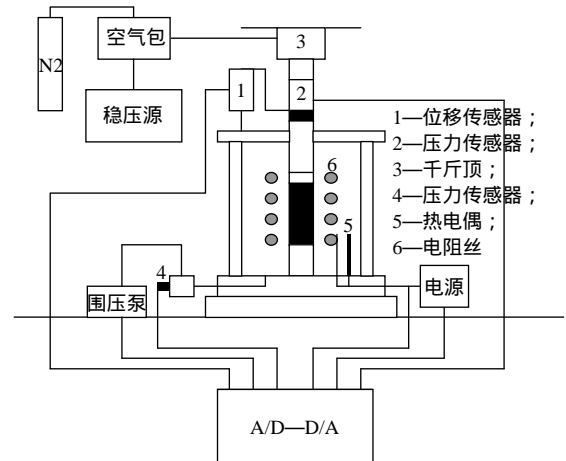
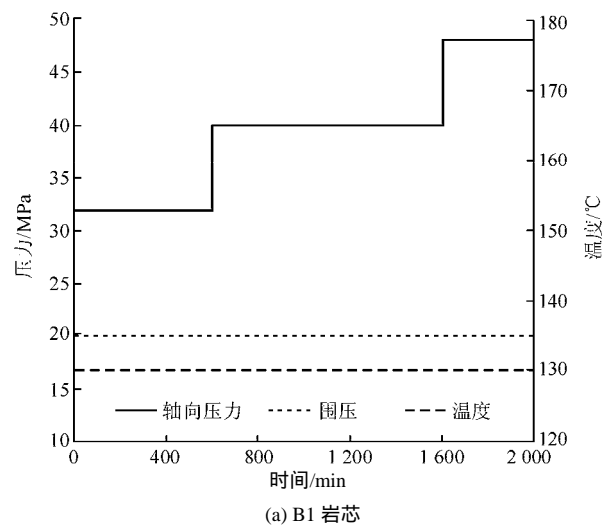


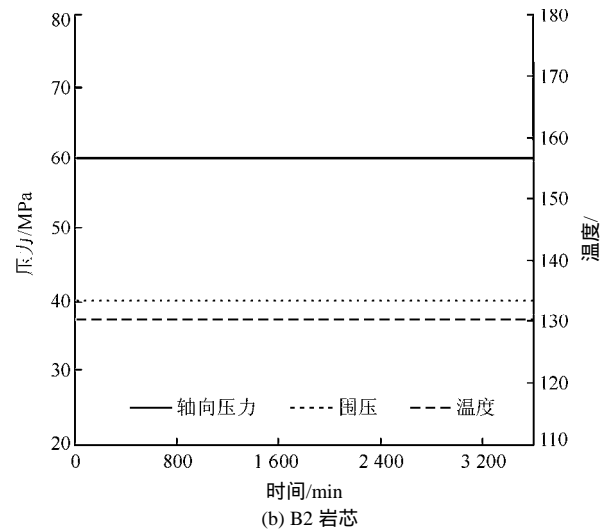
图 3 蠕变试验装置示意图

Fig.3 Sketch of creep experiment device

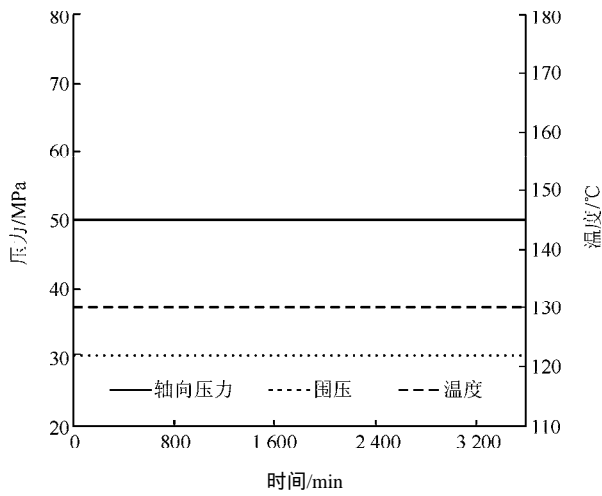
根据试验方案，通过 B1~B4 人造岩芯的蠕变试验，利用蠕变 Herad 模型方程进行非线性回归，得到盐岩蠕变模型的各个参数，从而可得到轴向应变 ϵ 随时间 t 的变化情况，如图 5 所示。再通过非线性数据拟合，得到 4 种人造岩芯的稳态蠕变速率和含膏量的数量关系，如图 6 所示。



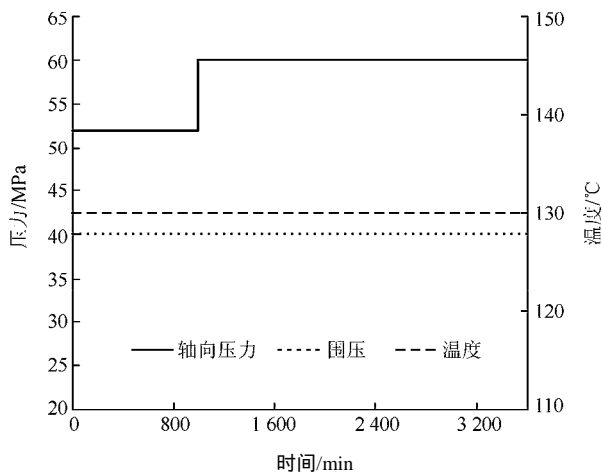
(a) B1 岩芯



(b) B2 岩芯



(c) B3 岩芯



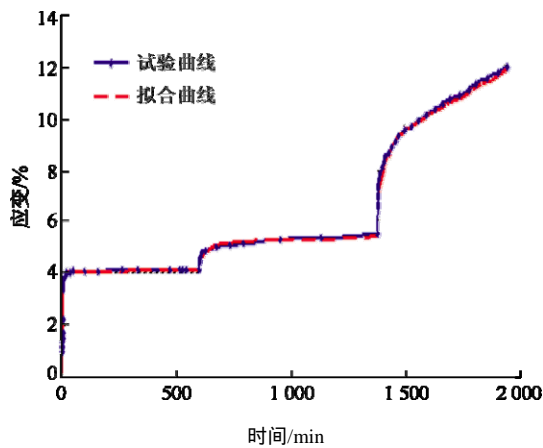
(d) B4 岩芯

图 4 4 种人造盐岩岩芯试验方案

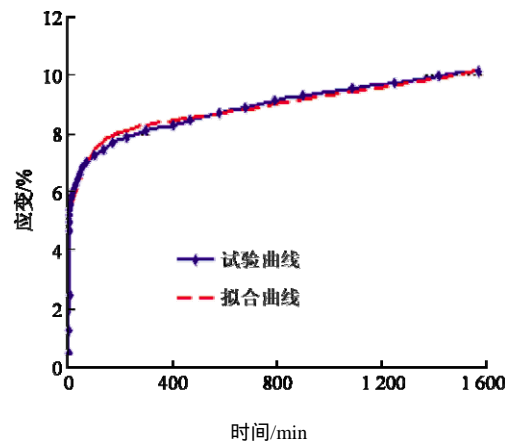
Fig.4 Test schemes of four artificial rock salt cores

3.3 试验结果分析

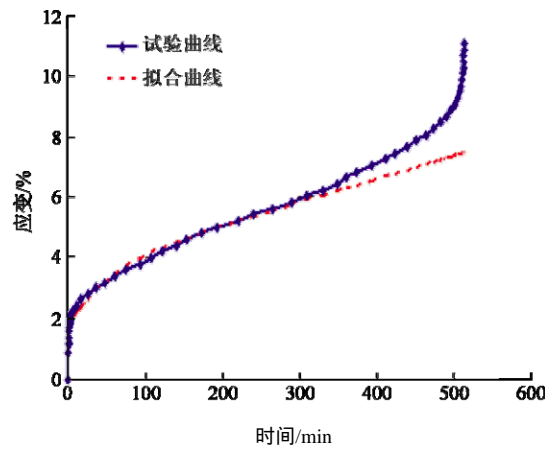
对于复合盐岩，由于地质构造和沉积环境的不同，形成复合盐岩种类繁多。根据盐、石膏、黏土不同的比例配制的人造盐岩试样的蠕变结果，证实了不同比例盐、石膏、泥岩等相互组成复合盐岩蠕



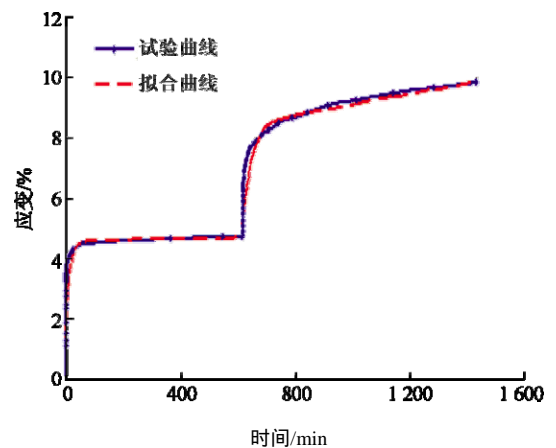
(a) B1 岩芯



(b) B2 岩芯



(c) B3 岩芯



(d) B4 岩芯

图 5 4 种人造盐岩岩芯试验结果

Fig.5 Test results of four artificial rock salt cores

变特性差异很大。由图 6 可知，在相同应力和温度条件下，对于不同组分配比的人造盐岩，其稳态蠕变速率是不一样的。盐含量较高的复合盐岩其蠕变稳态速率较高；石膏含量较多的复合盐岩，其蠕变的稳态速率较低。由此可知，复合盐岩的蠕变变形主要是由盐岩层贡献，石膏含量对复合盐岩的蠕变有一定的抑制作用。

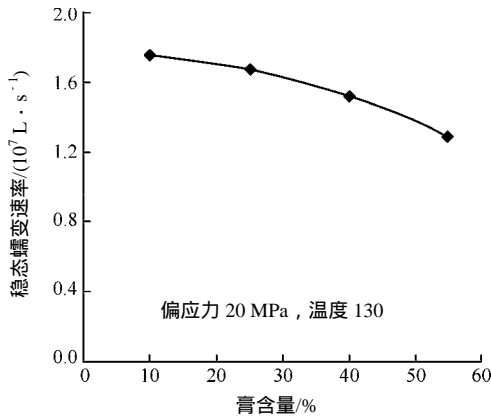


图 6 膏含量与稳态蠕变速率关系

Fig.6 Relationship between gypsum content and steady creep rate

4 盐膏层理化性能分析

滨里海盆地位于里海的北部，油气产量丰富，但由于与海洋的隔绝及全干旱气候，滨里海盆地形成了巨厚的盐岩沉积，钻井事故频发，其主要原因在于盐膏岩层的蠕变缩进所导致的卡钻。本文对该区块科尔占 - 尤阿里 SLK3 井 968 ~ 972 m 井深的岩屑进行了矿物组分、理化性能分析，包括 X - 射线衍射分析和电镜扫描分析。进而分析不同矿物成分对蠕变的影响规律，研究并诊断井壁失稳的力学作用机制。

4.1 X - 射线衍射分析

对 SLK3 井进行 X - 射线衍射分析，试验表明，所取该井岩芯以非黏土矿物为主，如表 5 所示。从表 5 可以看出，岩芯以纯盐为主。

表 5 盐岩 X - 射线衍射分析结果

Table 5 Analysis results of X-ray diffraction for salt rock

井号	井深/m	矿物种类和含量/%					黏土矿物总量/ %
		石英	方解石	石盐	硬石膏	重晶石	
SLK3	968 ~ 972	0.5	-	97.0	1.2	0.3	1.0

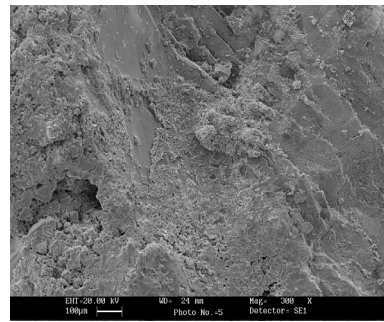
4.2 电镜扫描分析

对 SLK3 井进行电镜扫描分析，结果如表 6，图 7 所示。

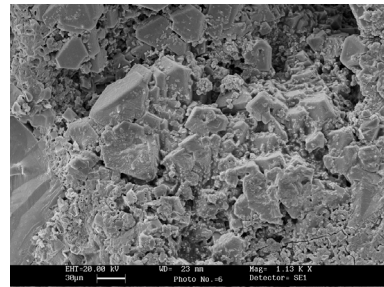
表 6 电镜扫描分析结果

Table 6 Analysis results of scan electron microscope(SEM)

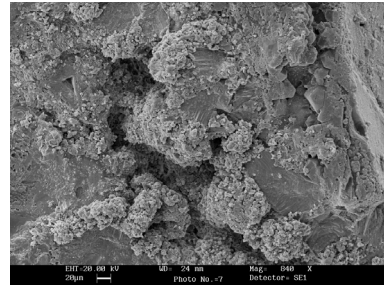
井号	井深/m	岩性	分析内容	放大倍数/倍
SLK3	968 - 972	盐膏岩	全貌，样品较致密，晶间孔隙	300
			氯化钠晶体与晶间孔隙 10 ~ 20 μm	1 130
			样品团状氯化钠晶体	840
			团状氯化钠晶体放大及溶孔	8 050



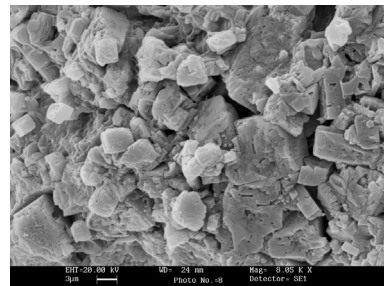
(a) 全貌(300×)



(b) 氯化钠晶体与晶间孔隙(1130×)



(c) 扫描氯化钠晶体(840×)



(d) 氯化钠晶体放大及溶孔(8 050×)

图 7 盐膏岩电镜扫描结果

Fig.7 Electron microscopy scanning results of salt-gypsum rock

4.3 试验结果分析

通过以上对 SLK3 井盐层矿物组分、电镜扫描分析试验可知，石盐含量占 97%，其余成分大部分是硬石膏。所以，石盐对蠕变变形起到促进作用，石膏含量则对蠕变变形起到抑制作用。

5 现场应用

根据上述试验方法，分析了塔里木盆地克深 2

和 5 井的石膏量对盐膏层蠕变特性的影响, 结合工程实例对本文的结论进行验证。

克拉苏构造带位于喜山期南天山前第二排, 盐膏层分布较广, 埋深一般为 1 526 ~ 7 850 m, 属盐岩、膏岩和“软泥岩”等组成的复合盐岩层。克深地区属于克拉苏构造带东段, 盐层最厚, 向北部克拉苏区带减薄。

通过井资料得到的克深 2 和 5 井岩性和实用钻井液密度对比数据如表 7 所示。由表 7 可知, 区域横向上克深 2 井 6 060 ~ 6 380 m 段岩性主要为盐岩, 实用钻井液密度为 2.36 ~ 2.37 g/cm³; 克深 5 井 6 200 ~ 6 410 m 段岩性主要为石膏, 实用钻井液密度为 2.30 g/cm³ 左右。对比分析以上 2 口井可知, 深度、温度和应力相同的情况下, 石膏的成分越多, 地层的蠕变速率越小, 体现在缩径率基本相同的情况下, 同一层位实用钻井液密度相对降低。

表 7 克深 2 和 5 井实用钻井液密度对比

Table 7 Comparison of drilling fluid density between Keshen 2 well and Keshen 5 well

井名	井深/m	主要组分	实用钻井液密度/ (g · cm ⁻³)	缩径率/ %
克深 2 井	6 060 ~ 6 380	盐岩	2.36 ~ 2.37	5.6 ~ 10.2
克深 5 井	6 200 ~ 6 410	石膏层	2.24	6.2 ~ 10.6

应用本文结论在塔里木油田多个区块进行了应用验证, 与现场实际符合良好, 对泥浆的选取有一定指导作用, 为安全钻进提供理论依据, 满足了工程的需要。

6 结 论

(1) 对于取芯较为困难的深部盐层, 依据岩屑的矿物组分, 制备人造盐膏岩芯, 进行蠕变试验, 结果表明, 相同组分的天然岩芯和人造岩芯蠕变规律基本相同, 产生差异的原因是人造岩芯无法模拟天然岩芯的非均匀性。

(2) 不同比例的盐、石膏、泥等组成的复合盐岩的蠕变特性差异很大, 在相同应力和温度条件下, 盐含量多的复合盐岩的稳态蠕变率较高, 膏含量多的复合盐岩的稳态蠕变率较低。由此得出, 蠕变变形主要是由盐膏岩中的盐岩贡献, 而膏岩对其蠕变有一定抑止作用。

(3) 取得钻井事故频发区块的天然岩芯, 进行 X-射线衍射和电镜扫描分析, 发现其盐岩含量占

97%, 其余成分大部分是硬石膏。所以, 再次验证盐岩对蠕变变形起促进作用, 石膏含量起抑制作用这一结论。

(4) 工程实例研究说明对复合盐层含盐量和膏含量的测定对钻井泥浆的选取有一定的指导。

参考文献(References):

- [1] CRISTESCU N D. A general constitutive equation for transient and stationary creep of rock salt[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1993, 30(2): 125 - 140.
- [2] HUNSCHE U. Result and interpretation of creep experiments on rock salt[C]// The First Conference on the Mechanical Behavior of Salt. [S.l.]: [s.n.], 1984: 159 - 167.
- [3] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 270 - 275.(YANG Chunhe, BAI Shiwei, WU Yimin. Stress level and loading path effect on time dependent properties of rock salt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 270 - 275.(in Chinese))
- [4] 刘绘新, 张 鹏, 盖 峰. 四川地区盐岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 290 - 1 294.(LIU Huixin, ZHANG Peng, GAI Feng. Study on creep rule of salt rock in sichuan region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 290 - 1 294.(in Chinese))
- [5] 刘绘新, 张 鹏, 陈 斌, 等. 塔里木软岩层蠕变规律实验研究[J]. 西部探矿工程, 2003, (12): 58 - 60.(LIU Huixin, ZHANG Peng, CHEN Bin et al. Experiment study on creep law of incompetent bed in Tarim[J]. West-China Exploration Engineering, 2003, 15(12): 58 - 60.(in Chinese))
- [6] HUNSCHE U. Uniaxial and triaxial creep and failure tests on rock. experiment technique and interpretation, visco plastic behavior of geomaterial[M]. Verlag: Springer, 1994: 105 - 106.
- [7] YANG C H, DAEMEN J J K, YIN J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(2): 233 - 242.
- [8] 杨春和, 曾义军, 吴 文, 等. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 678 - 1 682.(YANG Chunhe, ZENG Yijun, WU Wen, et al. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 678 - 1 682.(in Chinese))
- [9] PASSARIS E K S. The rheological behavior of rock salt as determined in an in situ pressurized test cavity[C]// Proceedings of the 4th Congress of International Society for Rock Mechanics. [S.l.]: [s.n.], 1979: 257 - 264.
- [10] MUSSO J, VOUILLE G. A comparative study of creep, relaxation, cycle loading tests to determine the rheological model of Marl-Ang salt[C]// Proceedings of the 13rd Congress of International Society for Rock Mechanics. [S.l.]: [s.n.], 1974: 348 - 353.
- [11] WINKEL B V. Analysis of the tome dependent deformation in openings in salt media[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1972, 9(2): 249 - 260.