

水下收缩裂隙开裂规律地质建模分析^{*}

马晓鸣¹, 戴俊生¹, 赵振宇^{1 2}, 周瑶琪^{1 2}, 艾合买提江¹
(1 中国石油大学 (华东) 地球资源与信息学院, 山东 东营 257062
2 中国石油大学 (华东) 地球化学与岩石圈动力学开放实验室, 山东 东营 257061)

摘 要: 通过青岛市唐岛湾沿岸 7 个实验工区的考察测试, 对现代泥质沉积物水下收缩裂隙的开裂规律进行了详细研究, 并且建立了相应的地质演化模型。研究认为: 水下收缩裂隙开裂方式主要有 3 种: 分别为单边开裂式、双边汇合开裂式和底界中心开裂式; 裂隙发育过程中的分叉角度最多为 90°, 其次为 120°; 沙泥质地层中的“异常高压作用”(形成机理与大地构造中的异常高压相似)对裂隙开裂具有积极作用。
关键词: 水下收缩裂隙; 开裂规律; 分叉角度; 异常高压; 地质建模
中图分类号: P512.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 05-0117-04

水下收缩裂隙是泥质层在水下脱水收缩或者含盐度增大而形成的沉积变形构造, 长期以来, 有关水下收缩裂隙开裂规律的定量化研究尚属空白^[1-4]。本文以青岛市唐岛湾沿岸 7 个水塘为实验工区, 对现代泥质沉积物水下收缩裂隙的开裂规律等进行了详细研究, 并且建立了相应的地质演化模型, 这些对于定量描述裂隙形态、变化规律, 预测区域性裂隙规模、判别区域沉积环境等具有重要意义。

1 研究区地质概况

唐岛湾位于青岛市黄岛经济技术开发区南部, 沿岸以障壁海岸相沉积为主。注入实验工区内的水为黄海海水, 泥为潮坪沉积或泻湖沉积的淤泥, 具体参数见表 1。各区内粘土矿物成分近同, 蒙脱石、伊利石、高岭石的相对含量依次为 40% ± 5%、35% ± 5%和 25% ± 5%。

表 1 裂隙研究区域参数调查表

Tab. 1 The parameters of mud cracks in work studying areas

项目	1	2	3	4	5	6	7
水盐度 /%	3.57	3.57	3.54	3.54	3.75	3.64	3.62
塘央水深 /cm	70 ± 5	60 ± 5	60 ± 5	90 ± 10	70 ± 5	60 ± 5	80 ± 10
塘堤水深 /cm	20 ± 5	25 ± 5	20 ± 5	40 ± 5	10 ± 5	15 ± 5	20 ± 5
浪高 /cm	10 ± 2	10 ± 2	10 ± 2	15 ± 2	10 ± 2	10 ± 2	15 ± 2
注泥水比例 /%	25	25	30	20	30	20	25
砂粒级	粉砂	粉砂	粗粉砂	细砂	粉砂	细砂	细砂
含砂量 /%	10	15	12.5	20	20	25	15
裂缝发育度	差	中	中	好	好	好	差
裂缝分维值 D	1.235	1.413	1.334	1.507	1.498	1.475	1.227
生物干扰	中	强	弱	中	中	中	强

2 实验过程观测

水下收缩裂隙的形成大致经历了 4 个阶段^[3-6]:
(1) 泥水混合物进入低洼地带的初始混浊阶段;
(2) 沉积压实稳定阶段;
(3) 水位线下降, 盐度增大, 裂隙形成阶段。
此阶段沉积物粒间水分先后两个时期渗出, 且渗流渠道各不相同^[7-8]: 首先, 爆发式混相涌流: 随着沉积物的逐步压实, 上部泥质隔水层阻碍了粒间水的有效渗出, 致使透水速率不断减小, 破坏了其与蒸发速率之间的平衡, 因此在隔水层以下空间便形成了异常高压带 (异常高压承载了上覆的静水压力和泥质地层压力)。与此同时, 粘土本身的脱水收缩力也在逐渐增加。可以说, 初始裂缝的形成, 是两者合力的共同结果, 但后者是主导。裂缝产生瞬间, 隔水层内及其下伏粒间水在异常高压作用下爆发式涌出, 其物理过程如图 1。其次, 隙壁渗流: 异常高压作用不但迫使粒间水爆发式涌出, 同时也促使裂缝基块内形成多个主要渗流通道。这些渗流通道上端多分布在裂缝壁两侧, 下端多向下延伸到基块内部。随着裂缝基块内次级裂缝的形成, 这种渗流通道也随之被破坏、遗弃。与此同时, 洞穴生物活动后留下的通道以充填粉细砂为主, 且虫孔上端多位于泥质沉积物表面, 这为粒间水的有效排出提供了良好的辅助作用^[7-8]。

^{*} 收稿日期: 2006-12-01
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40772082), 中国石油大学 (华东) 博士生创新基金项目
作者简介: 马晓鸣 (1981 年生), 女, 博士; 通讯联系人: 赵振宇; E-mail: zhaozhenyu110@yahoo.com.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(4) 沉积裂隙充填阶段: 随着水位的逐渐下降, 裂隙的宽度和深度也随之增加。裂隙进入充填阶段后, 充填物有两种来源方式, 分别为外来物质和本身的斜坡物质^[6]。

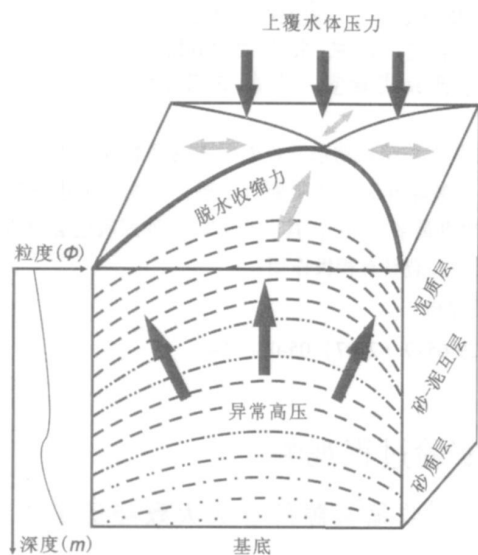


图 1 异常高压作用示意图

Fig. 1 The constructed profile under abnormal high pressure

3 水下收缩裂隙开裂规律建模分析

3.1 单边开裂式

单边开裂式指次级裂隙从基块一边向另一边单向垂直延伸的过程, 如图 2 (a)。它包含两种生长模式, 分别为线性生长模式和非线性生长模式, 其中前者主要发育于斜坡地区; 后者主要发育于相对平坦区域。

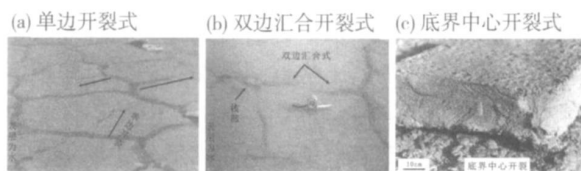


图 2 水下收缩裂隙开裂方式

Fig. 2 Growth patterns of subaqueous shrinkage mud cracks

3.1.1 线性生长模式。在实验工区斜坡地带, 线性生长模式普遍发育。如图 3 纵向裂隙生长模型, 随着水位的逐渐下降, 纵向裂缝将由岸边向水中心一直延伸, 且走向垂直于等水量线。纵向裂缝前端为最小张应力点, 但由于该点左右两侧含水量的不同和裂缝本身的存在, 致使左侧 σ_1 (最小张应力) 曲线的曲率明显大于右侧, 这充分说明泥质沉积物中含水量的变化对其内部张应力大小具有重要影

响。在某一时刻, σ_1 横向上表现出很好的韵律性, 即由裂缝前端的最小——中部的最大——横向裂缝附近的逐渐减小, 而最大张应力 σ_2 纵向上各点应力值相同, 但在新裂缝 B 出现之后, 这种应力模式便被打破, σ_1 、 σ_2 仍然重复上面各自固有的变化规律, 只不过后一阶段的张应力值会明显小于前者 (含水量降低所致)^[10]。

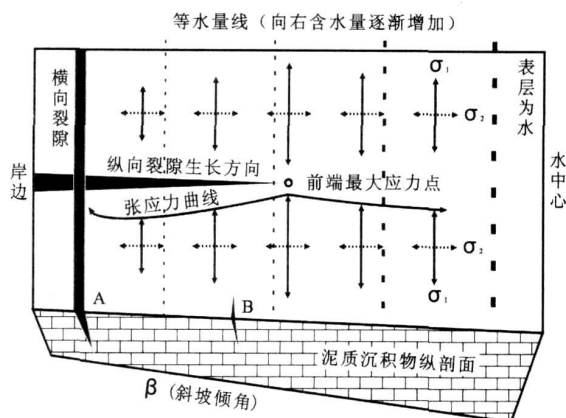


图 3 纵向裂隙生长地质建模分析

Fig. 3 The geologic model of longitudinal crack growth

3.1.2 非线性生长模式。裂隙以单边形式开裂延伸时, 如果前方粘土成分、颗粒大小不均匀, 地形特征以及外界影响因素不同时, 就会导致裂隙生长方向突然转变, 偏离预定的“轨道”。沉积物颗粒的均质程度及其排列方式是产生裂隙形状差异的主要原因。该区域中裂隙的生长, 类似于光在介质中传播, 遵循光的反射、折射定律, 显示出明显的波动性, 但是裂隙生长又被限制在一个小的波动宽度内^[7]。这种简化的地质模型, 可以应用于裂隙的参数计算和计算机模拟。同时也可以获得更多的重要信息, 包括泥质沉积物的物理化学性质, 沉积环境和裂隙的分布特征等^[9]。

分叉裂隙的产生, 与裂隙本身的物理生长过程有关^[11-12]。从统计数据得知, 分叉角度分布概率最大的区域是 90° , 多发育于沉积物粒度均匀地区, 主要形成在裂隙生长的初始阶段, 并保持稳定; 其次是 120° , 发育地区的沉积物粒度均质性相对略差, 主要形成在裂隙生长的晚期阶段, 且容易被后期新生裂隙切割, 因此平面上分叉裂隙多呈现出“Y”字型或者“T”字型结构。通过模型分析认为: 两种分叉角度格局的形成, 与能量的释放和颗粒排列方式有关。在裂隙分叉部位, 通常存在三个圆形集合体, 分别正交于裂隙的三条边, 此时的应力状态便易形成 90° 或 120° 。如果分叉裂隙前

端没有圆形集合体, 那么则与能量的释放有关^[6-8]。

3.2 双边汇合开裂式

双边汇合开裂式指裂隙从基块两条相互平行的长边同时开始生长, 并最终交于基块中心的一种生长模式, 如图 2 (b), 图 4 主要发育于实验工区内相对平坦地区。在裂隙生长初期, 两条裂隙 A 和 B 几乎位于同一条直线上。当两裂隙前 endpoint (生长前端) 相距一定距离 S_a 时, 两者会同时发生相对弯曲变形, 形成一个核部结构。这种结构的产生, 与泥质沉积物中集合体的应力状态分布有关, 即应力圆效应——在双边汇合进行到中后期时, 如果直线 AB 上或者附近某处沉积物成分略有差异, 那么该部位通常会形成应力圆式的应力分布, 并最终形成图 4 所示的核部结构。

核部结构具体参数可表示如下:

$$d = (S_a^2 + S_b^2) / 4S_b$$

$$\theta = \arcsin[2 S_a S_b / (S_a^2 + S_b^2)]$$

$$S_{ab} = 2 (\pi d^2 \theta / 180 - S_a (d - S_b / 2) / 2)$$

其中曲线的半径 d 和核部面积 S_{ab} 反映了沉积物中泥沙的相对含量, 核部两顶点的垂直距离 S_b 反映了沉积物的均质性和应力分布特征。在粘土成分较高地区, d 和 S_{ab} 相对较大, 而在含砂量较高地区, 两者则相对较小。在 7 个试验工区内, 以上各参数可以通过测量获得, 对于定性区分沉积物中泥、沙含量, 判别区域沉积环境以及预测裂隙分布及规模具有重要意义。

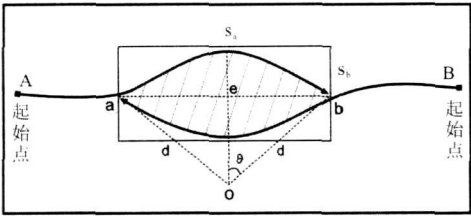


图 4 双边汇合开裂式地质模型

Fig 4 The geologic model of bilateral intersection cracking pattern

3.3 底界中心开裂式

底界中心开裂式指裂隙生长从基块底界某点出发, 并逐渐向四面延伸的过程, 如图 2 (c), 该模式的形成, 主要与基底粒子有关。在裂隙生长起始处, 基底粒子破坏了沉积物中的应力状态, 致使颗粒周围应力相对集中, 因此裂隙锋面首先以半圆或者半椭圆形从此处向上延伸。当羽状应力曲线到达沉积物表面时, 便以互相垂直的方向发生横向延

伸, 应力曲线趋于平缓, 并最终与邻近的其它裂隙相交^[12]。

4 结 论

(1) 水下收缩裂隙开裂方式有 3 种, 分别为单边开裂式, 双边汇合开裂式和底界中心开裂式。单边开裂式包含线性生长模式和非线性生长模式: 前者主要发育于斜坡地区; 后者主要发育于相对平坦区域。

(2) 从统计数据得知, 分叉裂隙的角度分布概率最大区域为 90°, 其次是 120°。通过模型分析认为: 90°角多形成于裂隙生长的初始阶段, 并且保持相对稳定; 120°角多形成于裂隙生长的晚期阶段, 这主要与能量释放和颗粒排列方式有关。

(3) “异常高压作用”为沙泥质地层的裂隙发育提供了重要的动力支持, 其形成机理, 与大地构造中的异常高压相似。

参考文献:

[1] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学出版社, 1993

[2] 赵澄林. 沉积学原理[M]. 石油工业出版社, 2001

[3] SHUICH RO Y, KAZUHIDE A. Numerical analysis of crack generation in saturated deformable soil under row planted vegetation. Geoderma 2004 120: 63-74

[4] VOGEL H, HOFMANN J H, ROTH K. Studies of crack dynamics in clay soil I. Experimental methods results and morphological quantification[J]. Geoderma 2005 125: 203-211

[5] 周瑶琪, 赵振宇, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂隙沉积模式及定量化研究[J]. 沉积学报, 2006 24(5): 672-680

[6] 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂隙天然实验研究中获得的新认识[J]. 地质论评, 2007 53(3): 306-317

[7] CHERKOV V Y, RAVINA I. Morphology of horizontal cracks in swelling soils[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 1999 31: 19-29

[8] ADAM C M, JAMES B K, ALISON M A. Neoproterozoic sand wedges crack formation in frozen soils under diurnal forcing during a snowball Earth[J]. Earth and Planetary Science Letters 2002 204: 1-15

[9] 赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 等. 水下收缩裂隙形成过程及裂缝充填模式研究[J]. 2007 14(4): 215-221

[10] YAN X Q. A numerical analysis of stress intensity factors at bifurcated cracks[J]. Engineering Failure Analysis 2006 13: 629-637

[11] ROBERT T, MAREK K. Crack modeling of concrete rock and soil with inner softening bands[J]. Engineer

ing Geology 1998 49 271 – 276

model for the geometry of two dimensional crack growth

[12] HORGAN G W, YOUNG I M . An empirical stochastic

in soil[J] . Geoderma 2000 96 263 – 276

The Modeling Analysis on Cracking Pattern of Subaqueous Shrinkage Mud Cracks

MA Xiao-ming¹, DAI Jun-sheng¹, ZHAO Zhen-yu^{1, 2}, ZHOU Yao-qi^{1, 2}, AIHEMAITIJIAN¹

(1 Resources and Information Institute, China University of Petroleum, Dongying 257062, Shandong China;
2 Laboratory of Geochemistry & Lithosphere Dynamics, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract By the observation of seven work areas in the coastland of Tangdao Bay, Qingdao, the cracking rules of subaqueous shrinkage cracks in present muddy sediments are researched, and the geologic evolutional model is also established. The results show that (1) Three cracking patterns are as unilateral cracking pattern, bilateral intersectional pattern and central dispersed pattern, respectively. (2) The angle of crack growth is mostly 90° and next 120°. (3) The abnormal pressure action in sand-mud layer plays an important role in cracking, and the forming mechanism of abnormal pressure is similar to the one in the geotectonic framework.

Key words subaqueous shrinkage crack; cracking pattern; angle of bifurcation; abnormal pressure; geologic modeling

(上接第 112 页)

Analysis on Spatial and Temporal Processes of Beach Cusp Variations

LI Zhi-qiang^{1, 2}, CHEN Zhi-shan²

(1 Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275;
2 Department of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

Abstract A beach cusp existing for a long term under normal wave conditions was measured repeatedly. The beach cusp variations are analyzed with empirical orthogonal function (EOF) using the topography data. Taking the hydrodynamic factors and beach phenomena into account, the following results are deduced: (1) The horn of the beach cusp being sensitive to the morphodynamics may control beach cusp shape. The vertex of the beach cusp is the turning point of the horn profiles variations while the profiles of the embayment changes linearly. (2) Under normal wave conditions, sub-tidal bar movement may control the beach cusp topography variations. (3) Swash and wave variations induce beach cusp subsidiary changing models and redistribute the sand brought by the sub-tidal bar movement on the beachface.

Key words beach cusp; empirical orthogonal function (EOF); morphodynamics; beach processes