

深部原位应力环境下岩心饼化响应特征及反馈机制初探

高明忠^{1,2,3,4,5}, 何坤宸⁴, 叶思琪⁶, 谢晶⁴, 杨本高⁴, 李飞⁴, 郝海春^{1,2,3}, 刘军军⁴, 杨尊东⁴

(1. 深圳大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 广东省深地科学与地热能开发利用重点实验室, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院, 广东 深圳 518060; 4. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 5. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 6. 中国电建集团 成都勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

摘要:地应力数据是一切深部工程的基础, 传统测量方法获取的深部地应力信息效率低且未形成统一的规程规范, 理论多是建立在诸多假设基础上, 准确性难以评估。深部高地应力区通常有比较明显的岩心饼化特征, 且不同应力环境产生的饼化形貌各异, 通过岩心饼化反演地应力有望作为一种科学经济、方便快捷的地应力推算方法。试图通过探究深部原位应力条件下岩心饼化行为的力学机制, 定义二维条件下的饼化烈度系数, 以期实现基于岩心饼化特征计算原位地应力。以松辽盆地松科二井不同深度饼化岩心为研究对象, 利用三维数据形貌采集系统获得了饼化岩心的宏观形貌, 采用X射线衍射和岩相薄片等测试手段, 分析得到了饼化岩心的矿物成分和微观结构; 同时, 基于离散元分析了不同应力条件下岩心的饼化行为力学机制。结果表明: 松科二井饼化岩心形貌特征可分为破碎状、薄饼状、厚饼状、不规则状、半饼化状5类, 端面断口形态包括错台状、平面状、灯盏状和花瓣状; 岩饼的形貌特征与其埋藏深度、硬质矿物含量和破坏模式有较强的关联性; 岩心饼化行为主要受到张拉应力控制, 其裂隙起裂一般起始于岩心根部, 由外向内向下呈凹陷状或平面状贯通岩心。水平主应力是影响岩心饼化行为的第一要素, 高水平主应力能够诱发剧凹状的岩心断口和较宽的带状拉裂纹, 垂直主应力是影响岩心饼化的次要因素, 一般会抑制饼化行为的发生; 钻进过程中岩心饼化行为的发生伴随着能量的规律性变化, 其中总应变能呈阶梯状下降, 耗散能呈对应的阶梯状上升, 且总应变能的瞬时释放是造成岩心饼化的主要原因。研究成果有望为岩心饼化反演地应力提供新思路 and 有益借鉴。

关键词:岩心饼化; 松科二井; 颗粒离散元; 宏细观特征; 破坏模式

中图分类号: TD313 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)04-1845-15

Preliminary study on response characteristics and feedback mechanism of core discing under deep in situ stress environment

GAO Mingzhong^{1,2,3,4,5}, HE Kunchen⁴, YE Siqi⁶, XIE Jing⁴, YANG Bengao⁴, LI Fei⁴, HAO Haichun^{1,2,3}, LIU Junjun⁴, YANG Zundong⁴

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Deep Earth Sciences and Geothermal Energy Exploitation and Utilization, Shenzhen Uni-

收稿日期: 2023-11-12 修回日期: 2024-03-25 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1488

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52225403); 深圳市优秀科技创新人才培养基金资助项目(RCJC20210706091948015); 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室开放基金资助项目(2021-CMCU-KFZD001)

作者简介: 高明忠(1980—), 男, 山西吕梁人, 教授, 博士。E-mail: gaomzh@szu.edu.cn

通讯作者: 何坤宸(1996—), 男, 四川南充人, 博士。E-mail: hkchen6240@163.com

引用格式: 高明忠, 何坤宸, 叶思琪, 等. 深部原位应力环境下岩心饼化响应特征及反馈机制初探[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1845-1859.

GAO Mingzhong, HE Kunchen, YE Siqi, et al. Preliminary study on response characteristics and feedback mechanism of core discing under deep in situ stress environment[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1845-1859.



移动阅读

versity, Shenzhen 518060, China; 3. Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 4. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 5. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 6. Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China, Chengdu 611130, China)

Abstract: In-situ stress data are fundamental for deep engineering purposes. Traditional methods of measuring in-situ stress are inefficient and lack standardization. The theoretical framework is predominantly built on numerous assumptions, making it challenging to assess its accuracy. High in-situ stress at significant depths often leads to the formation of various core discing shapes. A more scientific, cost-effective, convenient, and rapid method for calculating in-situ stress involves the inversion of stress through core discing characteristics. To achieve this, understanding the behavior of core discing under deep in-situ stress conditions is essential, as well as defining the intensity coefficient of core discing in two-dimensional settings. By focusing on discing cores from varying depths in the Songke-2 well, their macro-morphology is captured using a three-dimensional data acquisition system. Additionally, the mineral composition and microstructure of the cores are analyzed through the X-ray diffraction and lithofacies thin section tests. Concurrently, the mechanical mechanism governing core discing behavior under different stress conditions are studied using the discrete element method. The analysis reveals five distinct morphological types of discing cores in the Songke-2 well: broken, thin-disc, thick-disc, irregular, and semi-disc. The fracture patterns on the end face of the discs includes staggered step, plane, lamp, and petal formations. These morphological attributes are found to be closely linked to burial depth, mineral hardness, and failure mode. Core discing behavior is primarily controlled by tensile stress, with crack initiation typically occurring at the core's root and propagating outward in a concave or planar manner. The horizontal principal stress emerges as the primary factor influencing core discing behavior, leading to concave core fractures and wide-band tensile cracks, while the vertical principal stress serves as a secondary factor, generally inhibiting discing behavior. During drilling operations, the onset of discing coincides with a systematic energy shift, marked by a gradual decrease in total strain energy and a corresponding increase in dissipation energy. The instantaneous release of total strain energy is identified as the primary cause of core discing. These research findings are expected to offer some novel insights and valuable references for the inversion of in-situ stress based on core discing analysis.

Key words: core discing; Songke-2 well; particle discrete element; macro-meso characteristics; failure mode

随着全球经济的蓬勃发展,浅部资源有限性和社会日益增长的能源需求之间的矛盾越加突出,向深部进军的迫切性也日益剧增。“十四五”强调我国将瞄准深地前沿领域,进行重大技术攻关,提升地球深部资源的勘探和获取能力^[1]。因此向地球深部进军已成为我国乃至世界各国的研究热点^[2]。然而深部工程和浅部工程的地质环境差异巨大,深部的“高应力、高地温、高渗压”原位赋存环境导致岩石的基本力学性质及工程响应复杂多变^[3-4],严重制约了深部资源的安全高效开发。其中高地应力是深部工程区出现岩爆、巷道变形失稳的主要原因,探明深部岩体应力赋存环境是推动深部资源开采的重要前提。然而随着深度的增加,传统的地应力测试方法(水力压裂、ASR等)受到温度、压力和岩心尺寸方面的影响,深部地应力信息获取变得非常困难,同时随着地应力的增加岩石发生饼化的概率也在逐渐增大。岩心饼化是指在高地应力条件下钻探取心过程中特有的岩心裂化成饼状的岩石破坏现象^[5],其作为高地应力现象的典型表现之一,是深部高地应力区普遍存在的岩石破坏模

式,比如在 KTB 钻探项目先导孔、瑞典福斯玛克(Forsmark)核电站以及我国二滩、锦屏等水电工程均出现过不同程度的岩心饼化现象^[6-8],它的发生与否是高应力地区的主要判断依据。因此,对岩心饼化行为的诠释有望作为一种经济适用性强、便捷直接的地应力测量手段^[9]。

HAST^[10]在 1958 年最早指出岩心饼化和高地应力之间存在密切的联系。1965 年 OBERT 和 STEPHENSON^[11]首先利用自研的三轴围压系统初步模拟了钻进过程中岩心发生饼化时的应力条件,发现饼化现象与岩石样本的黏聚力有直接关系,提出岩心饼化是剪应力破坏的结果。随后 DURELLI A J 在 OBERT 等^[12]研究的基础上借助三维光弹试验研究了饼化岩心底部应力的分布模式,发现岩心底部剪应力最大,因此得出饼化起始于岩心底部。1984 年我国学者侯发亮和贾恩如^[13]依据剪切破坏理论,根据岩心饼化参数推导了一维和二维的地应力计算公式,得出岩心饼化厚度为直径的 35%~40%。但是以上依据剪切破坏理论得到的结果与众多深部工程中发生的饼化现象

有较大出入,例如实际工程中饼化断面有拉裂坎的存在,且饼化厚度最小可达到 1~2 mm。因此 SUGAWARA K^[14]、王明洋^[15]、阮小平^[16]等提出了自己的观点,认为岩心应力解除时在岩心根部产生垂直于卸载方向的拉应力,当此拉应力大于岩心抗拉强度时便会出现饼化现象。日本学者 KAGA N 等^[17]在拉应力是岩石发生饼化的先决条件下,提出了岩心饼化的判断准则。随后 MATSUKI 等^[18]在 KAGA N 等研究的基础上,提出了利用饼化岩心外围高度和形貌特征计算三维应力大小和方向的方法。近些年借助于数值仿真技术的快速进步,许多学者对岩心饼化的破坏机制又提出了新的认知。CORTHESEY 和 LEITE^[19]利用弹塑性黏聚软化摩擦硬化模型,模拟了在不同围压条件下岩心的破坏模式,提出岩心饼化可能由拉伸破坏、剪切破坏或者 2 者的混合破坏导致。张丰收等^[20]基于三维离散-连续混合方法,分析了不同应力条件下岩心的饼化特征,指出高水平应力是岩心饼化发生的主要因素。

综上可知,目前学术界对于岩心饼化的形成机制还没有统一的结论,关于影响岩心饼化的因素的研究也太过分散和单一。特别是针对饼化样本宏、细观特

征的研究较少,导致饼化机理缺乏室内试验数据支撑。笔者通过 X 射线衍射试验、岩相薄片试验和三维激光扫描技术等方法获取了饼化岩心宏、细观数据,并结合离散元颗粒流仿真技术和自主开发的深部地应力环境岩石保真取心测试系统对不同条件下岩心饼化行为机理和破坏特征进行了深入探讨,以为为饼化现象反演地应力提供理论支撑。

1 岩心取样区地质背景简介

松辽盆地位于欧亚大陆东缘、中国东北部,是当今世界上发育时间最长、面积最大的典型陆相沉积盆地之一。松辽盆地长 750 km,宽 330~370 km,总面积约为 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$,最大沉积厚度可达万米^[21]。盆地形成和发展经历了地幔上涌、裂隙、陆后热沉降和构造反正 4 个构造阶段,在中心形成了约 10 km 厚的侏罗纪、白垩纪、古近系和新近系碎屑沉积层^[22]。松辽盆地由 6 个构造单元组成,具体分布位置、范围以及纵剖面如图 1 所示。盆地中生代-新生代陆相地层由火山岩、火山碎屑岩以及冲积扇、河流和湖泊的沉积物组成。盆地基底为古生代火成岩、变质岩和火山岩^[23]。

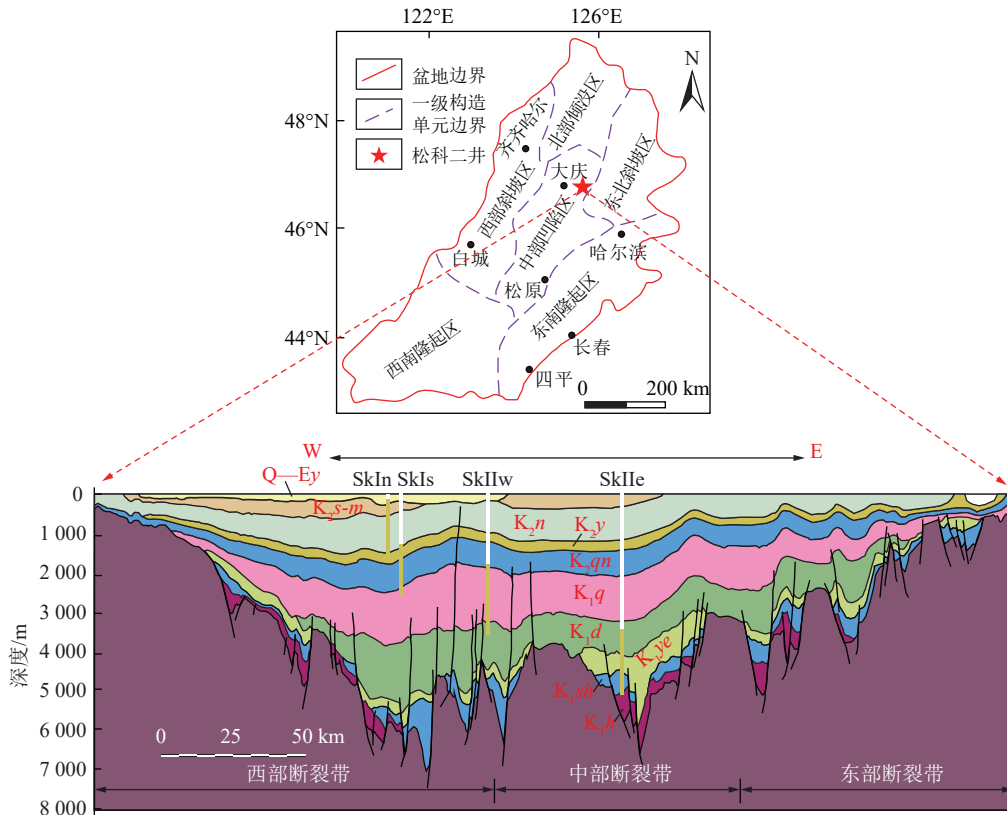


图 1 松辽盆地地质概况

Fig.1 Geological survey map of Songliao Basin

松科二井钻探项目位于松辽盆地东北部,是国际大陆科学钻探计划 (ICDP) 成立以来最深的科探钻井,

该井的完井深度为 7 018 m,取心总长度为 4 134.81 m,采收率为 96.61%,在钻孔深度、大口径连续取心尺寸

和往返进尺等方面创造了多项世界记录^[24],并实现了对白垩纪最完整、最连续陆相地层厘米级高分辨率的精细刻画。

2 松科二井饼化岩心特征分析

2.1 取 样

松科二井岩心饼化现象主要发生在深度 4 500~7 000 m 内 (图 2),岩心均存放于北京燕郊自然资源部实物资料中心,为满足实验测试需求,项目组多次开展松科二井 4 700~6 900 m 深度的岩心取样工作,所取岩样主要来源于下白垩统沙河子组和上侏罗统火石岭组,岩性包括砂岩、砾岩和灰岩。由于松科二井岩样十分珍贵,不能取完整岩心只能在已有岩心基础

上进行半圆形取样。

2.2 不同深度典型饼化岩心宏观特征分析

观察松科二井典型饼化岩心整体形貌,根据岩饼厚度将饼化岩心侧面形貌特征分为以下 5 类 (图 3): ① 破碎状。岩饼厚度薄,通常沿半径方向破碎为多块,破碎面粗糙且不规则具有典型的二次破坏特征。这可能是钻进取心过程中对岩心产生巨大扰动所导致的; ② 薄饼状。岩饼边缘较薄,厚度较为均匀,有连续饼化现象; ③ 厚饼状。岩饼边缘较厚,厚度均匀,有连续饼化现象; ④ 不规则状。厚度不均匀,薄饼和厚饼交替出现,在松科二井岩心饼化现象中较为常见; ⑤ 半饼化状。岩心侧面出现环向裂纹,但裂纹沿环向方向未贯通,使得岩心未断裂成为独立岩饼。在松科二井

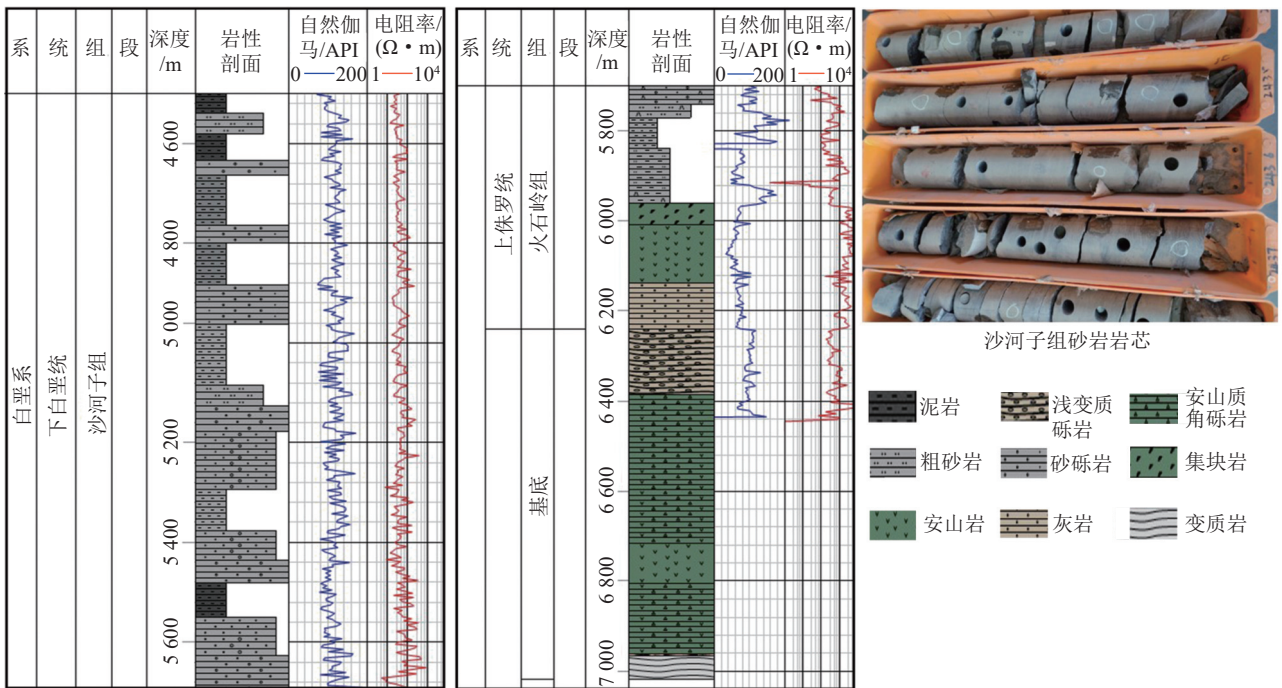


图 2 松科二井岩心综合柱状

Fig.2 Comprehensive histogram of core in Songke-2 well

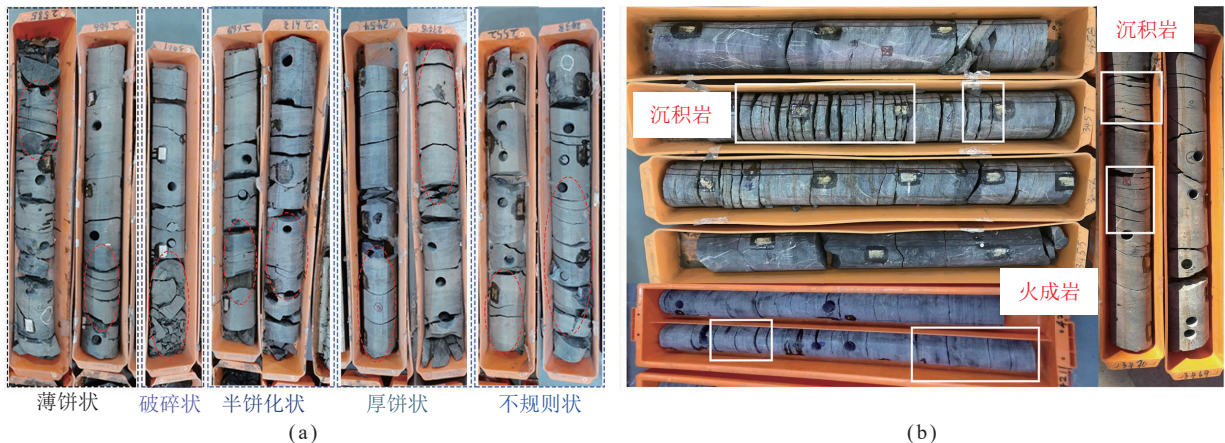


图 3 松科二井典型岩心饼化整体形貌

Fig.3 Overall morphology of typical core discing in Songke-2 well

部分岩心单一分形计算过程中,发现存在分段拟合导致分形维数结果不同的情况,这说明松科二井岩心断裂面存在结构层次,即岩体内部初始微裂缝的存在也会影响岩心的饼化行为。因此推断半饼化行为可能是岩心中的初始微裂缝在卸载过程中得到发育,并截断环向裂缝导致的饼化不完全现象。非饼化岩心破坏形态与饼化岩心破坏形态不同,表现为较为完整的长柱状岩心。

对比不同深度岩心侧面形貌特征发现,在小范围内饼化厚度与埋深和岩性的相关性不大,不同破坏形态/岩性的岩饼上下均有较完整的岩心(图3)。通过分析大量样本发现这可能与岩心内部初始微裂缝发展的不均匀性有关,由于岩石内部的可释放应变能总是沿着最小破坏能的方向释放^[25],微裂缝的发育大大降低了该方向破坏所需的能量,也是饼化现象的高发区域,相反其它完整区域发生饼化的概率则较低。在大深度范围岩心侧面形貌特征则与深度和岩性的关联性较强,具体表现为同种岩性下,深度越大饼化厚度越薄;深度相近时沉积岩饼化厚度较薄,火成岩饼

化厚度较厚。通过对松科二井饼化厚度统计发现,沉积岩序列平均厚度为40.52 mm;火成岩序列平均厚度为43 mm。如图3(b)所示,相近深度内连续典型沉积岩饼化岩心的平均厚度可达到26.14 mm,而连续典型火成岩饼化岩心的平均厚度为57.38 mm。

使用PRINCE 375手持式激光三维扫描仪及三维数据采集系统对松科二井不同深度典型饼化岩心进行三维数据重构,结果如图4所示。对比岩饼端面特征,可以将饼化岩心的断面形貌分为4类:①错台状。在岩饼断面分布有未贯穿饼面的层状台阶,一般分布在岩饼边缘向内部逐渐消失,断面曲率较小;②平面状。岩饼断面整体起伏较小近视为一个平面,部分断面存在不规则的锯齿状拉裂坎,推断为拉裂缝的可能性较大;③灯盏状。为最典型饼化特征,岩饼上表面整体呈现下凹状,断面较为规整但是曲率较大,在岩饼中心部位有少量不规则突起。④花瓣状。岩饼整体呈下凹状,断面四周分布有平行于半径方向的V字型沟壑,沟壑之间断面呈圆弧状突起。在岩饼中部分布有环状沟壑,并呈不规则突起。

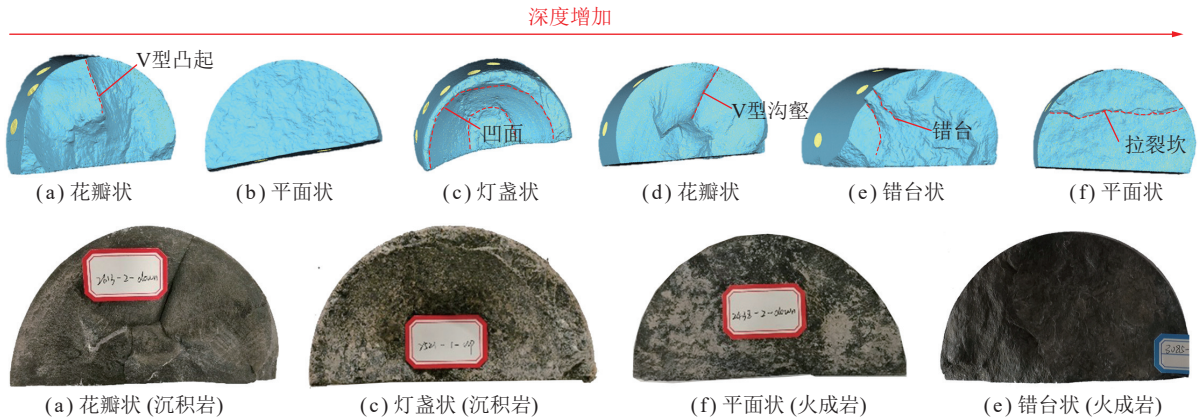


图4 松科二井典型饼化岩心形貌特征

Fig.4 Morphological characteristics of typical cake discing in Songke-2 well

如图3(b)所示,对比岩饼断面特征与岩性的相关性发现,在松科二井深度4 500~6 000 m内以砂岩为代表的沉积岩断面的曲率较大,而以安山质粗面岩为代表的火成岩断面平整且曲率小;对比岩饼端面特征与深度的相关性发现,随着深度的增加岩饼断面的平整度越好(图4)。谢和平等^[3]曾对松科二井深度4 800~5 600 m内岩心开展了考虑不同赋存深度岩石初始应力环境的深部岩石常规三轴实验,结果表明该深度范围内岩心的峰后脆性特性凸显,且随着深度的增加,岩心抗压强度、残余强度和脆性指数呈现非线性增大(图5)。松科二井岩心剖面显示火成岩较沉积岩一般埋深大(图2),从而强度和脆性指数也较高,破坏模式也以脆性破坏为主。因此一般深部火成岩饼化断

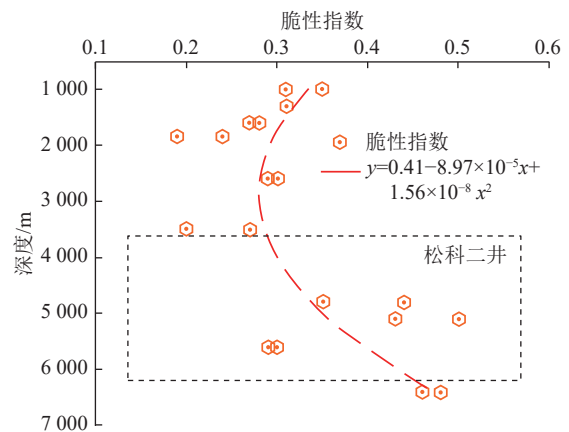


图5 松科二井岩心脆性指数测试结果^[25]

Fig.5 Test results of core brittleness index in Songke-2 well^[25]

面的曲率较小、粗糙度较大,而浅部岩心则相反。

综合松科二井饼化岩心的宏观形貌特征可以得出,当埋深大、硬度高时岩心饼化特征通常表现为薄饼状+平面状,当埋深浅、硬度低时岩心饼化特征通常表现为厚饼状+灯盏状,其余环境下则变现为中间过渡状。

2.3 不同深度典型饼化岩心微观特征分析

研究不同深度饼化岩心的矿物成分及相对质量分数、微观结构对岩心的宏观力学性质表达具有重要意义。笔者开展了深度分别为4 900、5 400、5 700、6 000、6 250 m的松科二井不同深度饼化岩心的X射线衍射实验以及岩相薄片实验,以期从微观层面研究岩心的饼化机理。

将松科二井不同深度岩饼样品分别磨粉,采用日本理学 Rigaku Ultima IV X射线衍射仪进行测试,实验过程中测试电压为40 kV,测试电流为40 mA,角度为 $5^{\circ}\sim 110^{\circ}$,扫描步长为 0.02° 。测试结果见表1,从表1可以看出松科二井4 800、4 900、5 100、5 400、5 600、5 700、6 000 m和6 250 m深度内饼化岩心的矿物组成主要以石英、长石、黏土、方解石为主,其平均相对质量分数分别为31.1%、37.9%、17.1%和13.4%。不同深度饼化岩心矿物成分的相对质量分数有较大差异,分析对比各种矿物随深度的变化趋势发现(图6),石英的质量分数总体上呈现出随深度增加而增加的趋势;长石质量分数总体上呈现随深度增加而波动变化的趋势;黏土质量分数离散性大,变化规律不明显;方解石和黄铁矿质量分数较小,呈现不规则的变化。根据莫氏硬度4和7为指标,将岩心矿物划分为硬质矿物、较硬质矿物和软质矿物3种(图6)。对比分析岩饼宏观破坏特征不难发现,硬质矿物质量分数的变化趋势与岩饼宏观破坏特征有一定的相关性,

表1 不同深度岩心矿物成分及相对质量分数

Table 1 Mineral composition and relative mass of cores at different depths

深度/m	相对质量分数/%				
	石英	长石	方解石	黄铁矿	黏土
4 800	20.00	45.16	22.8	2.37	9.58
4 900	21.54	47.24	4.85	0.11	24.29
5 100	19.00	47.21	25.68	0	8.10
5 400	44.18	28.57	5.96	0.27	20.55
5 600	32.51	45.91	18.82	0.06	2.70
5 700	31.41	20.35	28.87	0.05	16.49
6 000	34.83	30.08	0	0.33	33.93
6 250	45.02	33.21	0.48	0.27	21.03

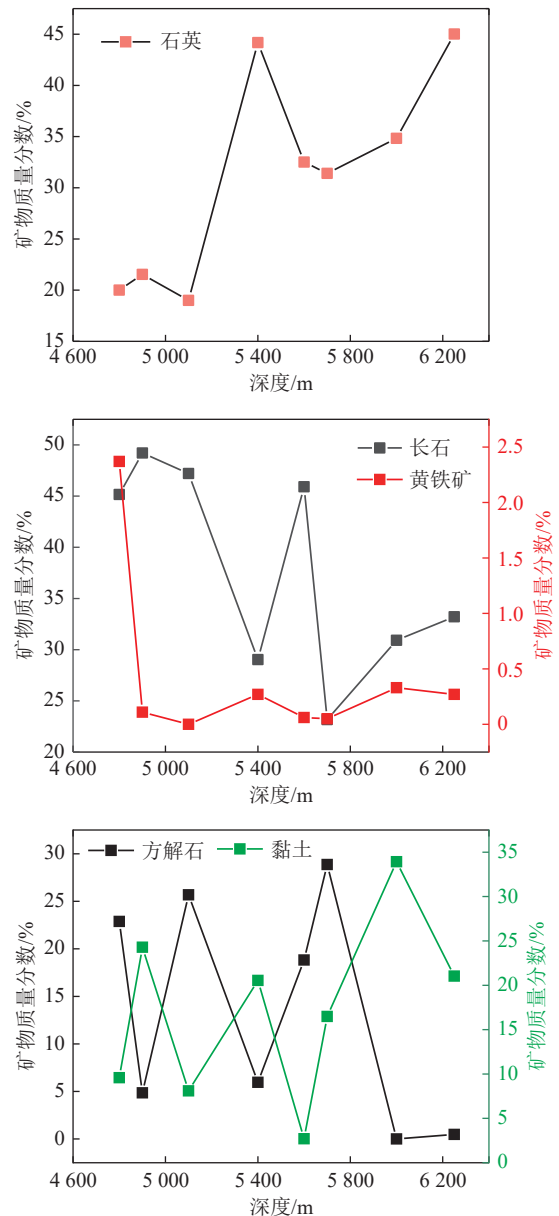


图6 各类主要矿物随深度变化规律

Fig.6 Variation law of various main minerals with depth

具体表现为随着硬质矿物质量分数增加、岩心强度增大、脆性指标增加,更易发生饼化且岩心饼化断面趋向于平面状。

对不同深度岩样磨片后进行薄片实验,实验结果如图7所示。从微观角度观测得到3 000 m样本岩性为黑云母石英正长斑岩,观测区域发育有两条较宽的成岩后破碎未充填裂隙及数条细小裂纹,裂纹最大宽度近0.1 mm。图7显示该裂纹切断石英、长石和云母等矿物为典型的穿晶裂纹,裂纹的形态较平直;4 900 m样本岩性为弱变质粉-细粒凝灰质岩屑长石砂岩,样本中裂隙为不规则断续性裂隙,宽度最大近0.15 mm,图7显示裂隙顶部是沿着长石晶体边缘发展,而裂隙底部为切穿长石晶体发展,为复合性裂隙;

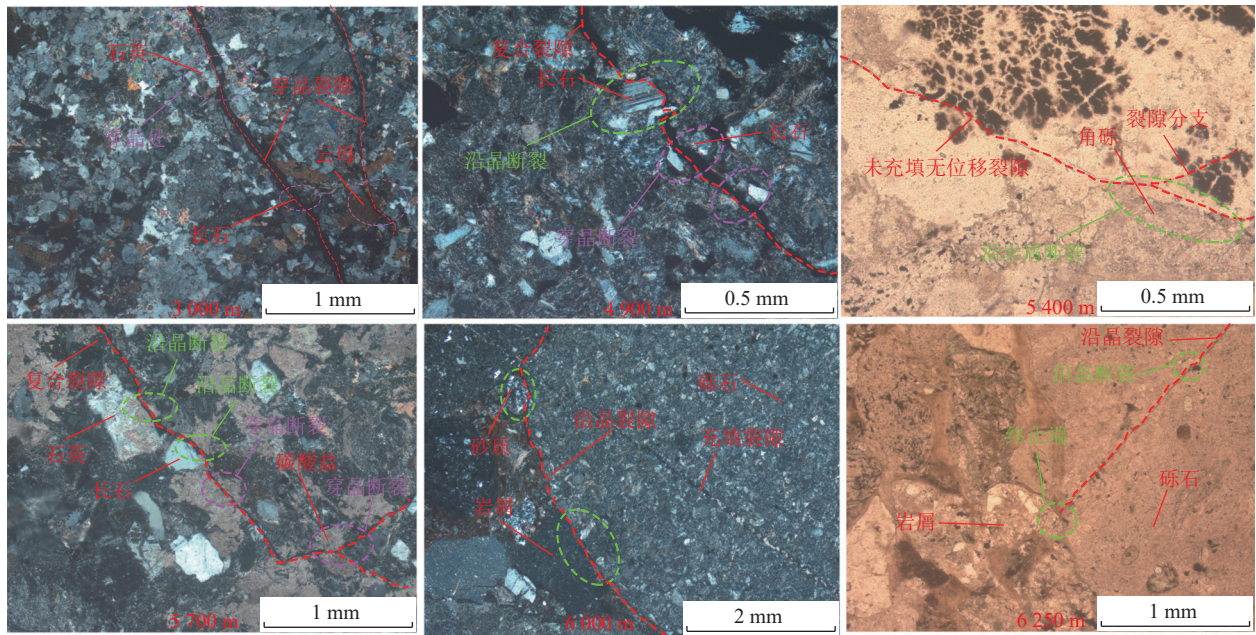


图7 松科二井不同深度岩心的微观结构分析

Fig.7 Microstructure analysis of cores with different depths in Songke-2 well

5 400 m 样本岩性为弱变质砂质凝灰质细砾岩, 样本的完整性较好, 裂隙通常为硅质或铁质胶结的显微裂隙, 只在局部发育有未贯穿状细小裂隙, 该裂隙两侧不存在明显位移、宽度较小, 在裂隙底部存在裂隙分支, 为沿晶断裂; 5 700 m 样本岩性为碳酸盐化沉凝灰岩, 样本中裂缝形状不规则且内部无充填物, 宽度最大近 0.05 mm。当该裂隙穿越石英、长石等硬质或较硬质矿物时为沿晶断裂, 而穿越碳酸盐等弱质矿物时为穿晶断裂, 在裂隙底部存在裂隙分支, 为复合裂隙; 6 000 m 和 6 250 m 样本岩性为弱变质凝灰质砂质中-细砾岩, 样本中裂隙多被硅质、铁质及绿泥石等充填。未被填充的裂隙近 3 条, 裂隙形状不规则, 一般沿着岩屑周界发展且未贯穿岩石, 为沿晶断裂。

分析对比松科二井不同深度岩饼内部裂隙发育情况可知, 在 4 000 m 以浅岩饼内部以发育穿晶裂隙为主晶体断面较为平直, 说明松科二井 4 000 m 以浅的饼化行为往往伴随着拉剪作用, 这可能也是造成浅部岩心饼化断面以曲面化、小粗糙度为主要特征的原因之一; 在 4 000~5 000 m 内岩饼内部发育的裂隙以复合断裂为主, 当晶体发育较大或较硬时可能发生沿晶断裂, 反之晶体发育较小或较软时可能发生穿晶断裂, 说明在该深度松科二井内的岩心可能发生拉张破坏或者拉剪复合破坏, 造成该深度岩心的饼化断面特征变化较大, 包含了平面状~花瓣状的各种形貌; 当深度大于 5 000 m 时岩饼内部裂隙的发育形式以沿晶断裂为主, 当部分矿物(碳酸盐、黏土矿物)的硬度小于颗粒胶结强度时也会发生穿晶断裂, 裂隙形态粗糙

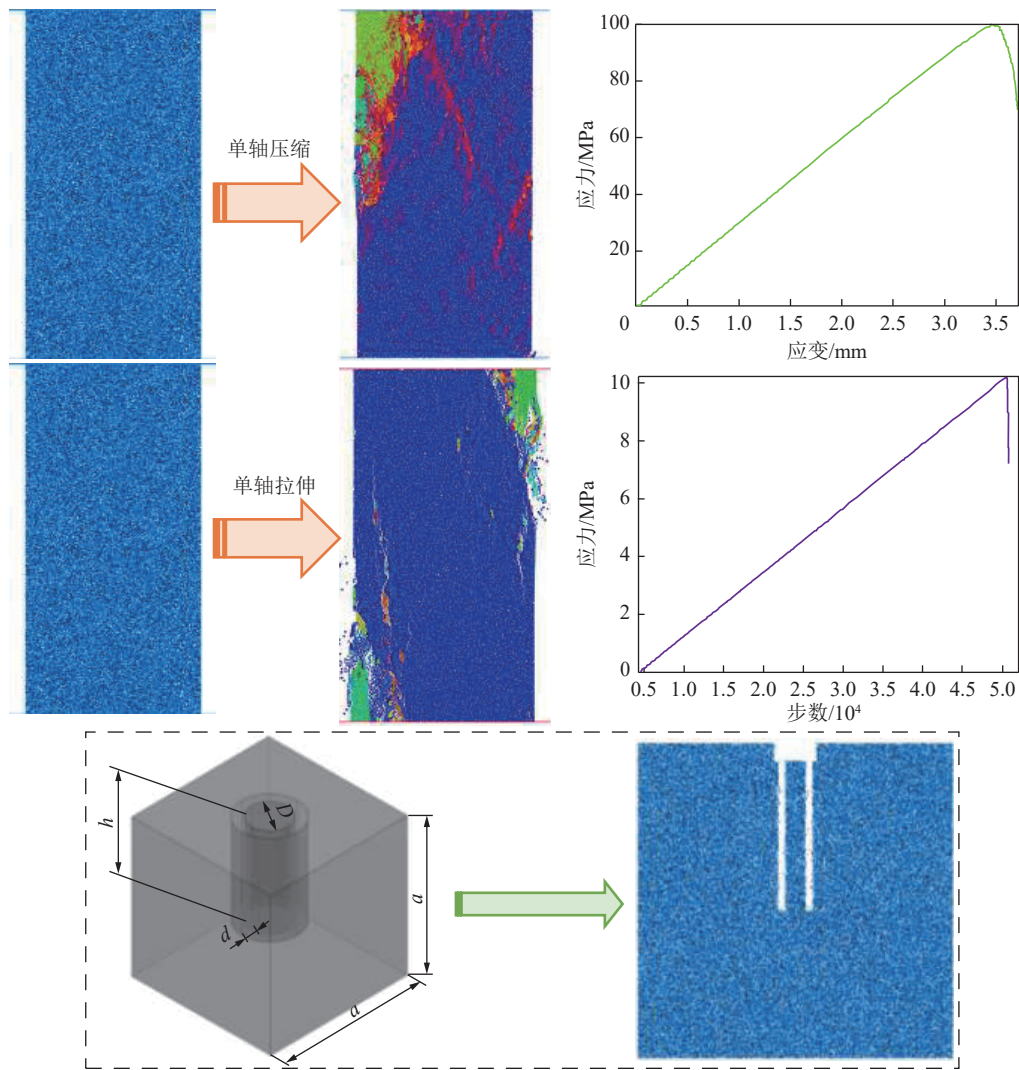
不规则且切向位移不明显。对比裂纹的发育模式可以得出, 裂纹随深度增加由穿晶向沿晶变化的原因可能包括以下 2 点: ① 随着深度增加, 硬质矿物质量分数增加; ② 地应力随深度的变化造成岩心的抗剪强度增幅超过抗拉强度增幅。因此在深度大于 5 000 m 以后松科二井岩心可能以拉伸破坏为主, 岩心饼化的断面形貌以起伏较小的平面状为主。

3 岩心饼化行为分析

3.1 数值分析方法

采用离散元颗粒流仿真技术(PFC^{2D})对不同条件下岩心饼化的发展过程进行模拟, 探讨岩心饼化行为的内在机理。建模所需要的宏观参数来源于松科二井 4 900 m 深度岩心的力学实验, 测得的单轴抗压强度 USC 为 100.97 MPa, 弹性模量为 30.26 GPa, 抗拉强度参照经验取单轴抗压强度的 1/10。在 PFC^{2D} 中参照 $\phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ 的试验尺寸进行模型构建, 并设置相应的应力加载条件, 采用试错法对平行黏结模型岩石细观力学参数进行标定(图 8(a)、(b))。标定后模型的单轴抗压强度 USC 为 100.93 MPa, 与实验值相比误差仅为 0.04%, 弹性模量为 29.83 GPa, 误差为 1.42%, 抗拉强度为 10.19 MPa, 误差仅为 0.89%。具体细观力学参数值见表 2。采用标定后的细观力学参数建立 150 mm×150 mm 的二维数值模型(图 8(c)), 长宽均大于钻孔直径的 9 倍, 以减小模型边界效应对结果的影响^[26]

根据 CORTHÈSY^[19]的研究, 钻头压力等参数对



注: a 为边长; d 为钻具切缝宽度; D 为岩心直径; h 为钻孔直径。

图 8 PFC^{2D} 拉伸/压缩试验标定过程及几何模型示意

Fig. 8 Schematic diagram of the calibration process and geometric model of PFC^{2D} tensile/compressive test

表 2 PFC^{2D} 计算模型细观参数设定

Table 2 Meso-parameter setting of PFC^{2D} calculation model

细观力学参数	取值
最小颗粒半径/mm	0.25
最大颗粒半径/mm	0.375
有效模量 /GPa	15.6
法向切向刚度比(k_n/k_s)	2.5
摩擦因数	0.577
平行黏结有效模量/GPa	15.6
平行黏结法向切向刚度比(k_n^*/k_s^*)	2.5
平行黏结抗拉强度/MPa	28.95
平行黏结黏聚力/MPa	60
平行黏结摩擦角/(°)	30
颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2625.9

岩心饼化特征的影响较小,因此该模型忽略了一些诸如钻进速度等参数的影响。本实验共设计了3种应力工况(静水压力工况、水平最大主应力工况、轴向最大主应力工况),每种工况包括5~6种应力状态(表3)。在真实钻进过程中钻头通过连续渐进的切削行为形成柱状岩心,为了减少计算复杂程度,本模型采用阶段删除离散元颗粒以模拟钻进过程^[27],并沿着模型垂直方向取心。颗粒删除后,采用机械循环的方式模拟岩心应力的释放过程,在该过程中颗粒间的位移和应力变化将通过胡克定律和牛顿第二定律进行更新。钻进步骤设置如下:首先,在岩心顶部中心向下钻取直径为11 mm、高为5 mm的圆柱体(图8(c)),同时进行900步机械循环,以模拟实际工程钻孔中岩心上部初始阶段的轴向应力释放;然后分5个钻进阶段模拟钻孔取心,每个钻进阶段删除直径为10 mm,切缝为4 mm,高度为15 mm的离散元颗粒,每个阶段

表 3 不同原位应力组合工况

Table 3 Different in-situ stress combination conditions

工况	轴向应力 σ_V/MPa	水平应力 $\sigma_H=\sigma_H/\text{MPa}$	岩心直径 D/mm	钻孔深度 h/mm	钻具切缝 d/mm	σ_H/σ_V
J-1	40	40				1.00
J-2	45	45				1.00
J-3	50	50				1.00
J-4	55	55				1.00
J-5	60	60				1.00
J-6	65	65				1.00
H-1	40	65				1.63
H-2	45	65				1.44
H-3	50	65	10	80	4	1.30
H-4	55	65				1.18
H-5	60	65				1.08
V-1	65	40				0.62
V-2	65	45				0.69
V-3	65	50				0.77
V-4	65	55				0.85
V-5	65	60				0.92

均进行 900 步机械循环, 最终得到直径为 10 mm, 高为 75 mm 的岩心柱。

3.2 岩心饼化行为力学条件分析

3.2.1 静水压力工况

按照表 3 J-1~J-6 所示的 6 种工况对松科二井 4 900 m 砂岩进行钻孔取心模拟, 结果如图 9 所示。

图中显示当 $\sigma_V=\sigma_H=40$ MPa 时, 钻进后在岩心边缘开始出现少量拉伸裂纹, 裂纹的分布有较强的规律性, 主要集中在阶段性钻进取心完成后的岩心根部, 第 1 阶段钻进后产生的裂缝要略多于之后几个阶段。随着静水压力的不断增大, 每个钻孔阶段岩心根部的拉裂纹逐渐增多 (图 9), 当 $\sigma_V=\sigma_H=55$ MPa 时, 岩心上已形成多处贯穿裂纹, 此时静水压力约为岩石抗拉强度的 5.47 倍, 当压力达到 60 MPa 以后在第 1 阶段钻进的岩心根部已形成明显的饼化断面。分析静水工况下的钻进过程不难发现随着静水压力的不断增大, 裂纹会从岩心外表面向岩心内部呈水平发展, 最终在每阶段的岩心根部形成具有一定带宽的直线状的拉裂纹 (图 9)。继续钻进后既有的裂纹会持续发展, 裂纹的带宽和贯通度会进一步提高, 形成典型的平面状饼化岩心。同时也表明静水压力条件下的松科二井 4 900 m 深度的饼化行为是由多条近似水平方向的拉裂纹聚集贯通所导致的结果。

3.2.2 轴向最大主应力工况

根据表 3 V-1~V-5 所示的 5 种工况, 在保持轴向应力为 65 MPa 下, 逐渐增加水平应力, 进而开展钻孔取心过程模拟, 结果如图 10 所示。由图 10 可知当轴向应力为最大主应力时, 取心应力释放造成的拉裂纹主要集中在孔壁上, 岩心柱中发育的裂纹均较少, 模型总体裂纹数量维持在 3 100 条左右变化较小。只有当 $\sigma_V=65$ MPa、 $\sigma_H=60$ MPa 时, 仅在第 1 阶段钻孔取

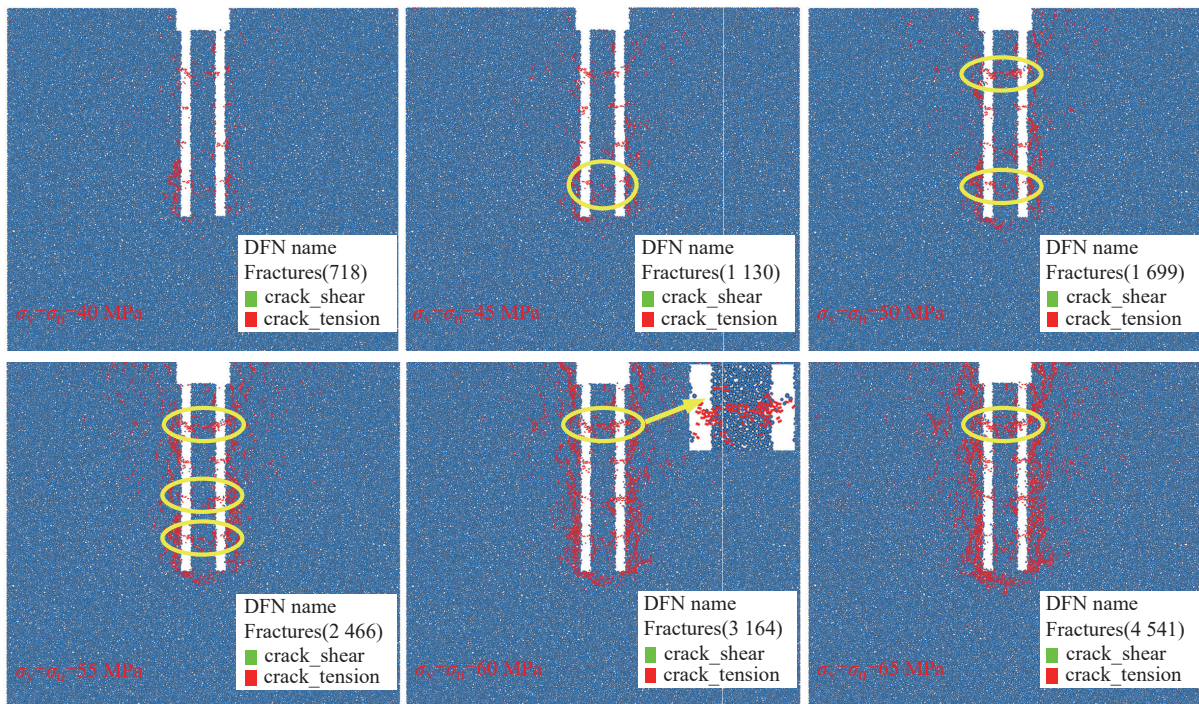


图 9 不同静水压力工况下岩心裂纹发育分布

Fig.9 Distribution diagram of core crack development under different hydrostatic pressure conditions

心后的岩心根部形成了贯穿带状拉裂纹。通过观察分析可知,随着水平应力的增大裂纹带由岩心外表面沿着岩心根部逐渐向岩心内部发展,裂纹带的形状近似直线型,当水平应力为 60 MPa 时裂纹带的形状有向下呈凹面发展的趋势,但是凹面较薄且未联通。与静水压力工况对比,当水平应力一致时垂直应力大的

工况断裂带厚度更薄、饼化现象更弱,同时孔壁上裂纹条数增加、岩心柱上裂纹条数减少。因此,不难看出轴向应力的增大在一定程度上会抑制岩心饼化的产生,当轴向应力为最大主应力时几乎只是引起岩心表面外边缘处产生局部破坏,而发生岩心饼化现象的概率较小。

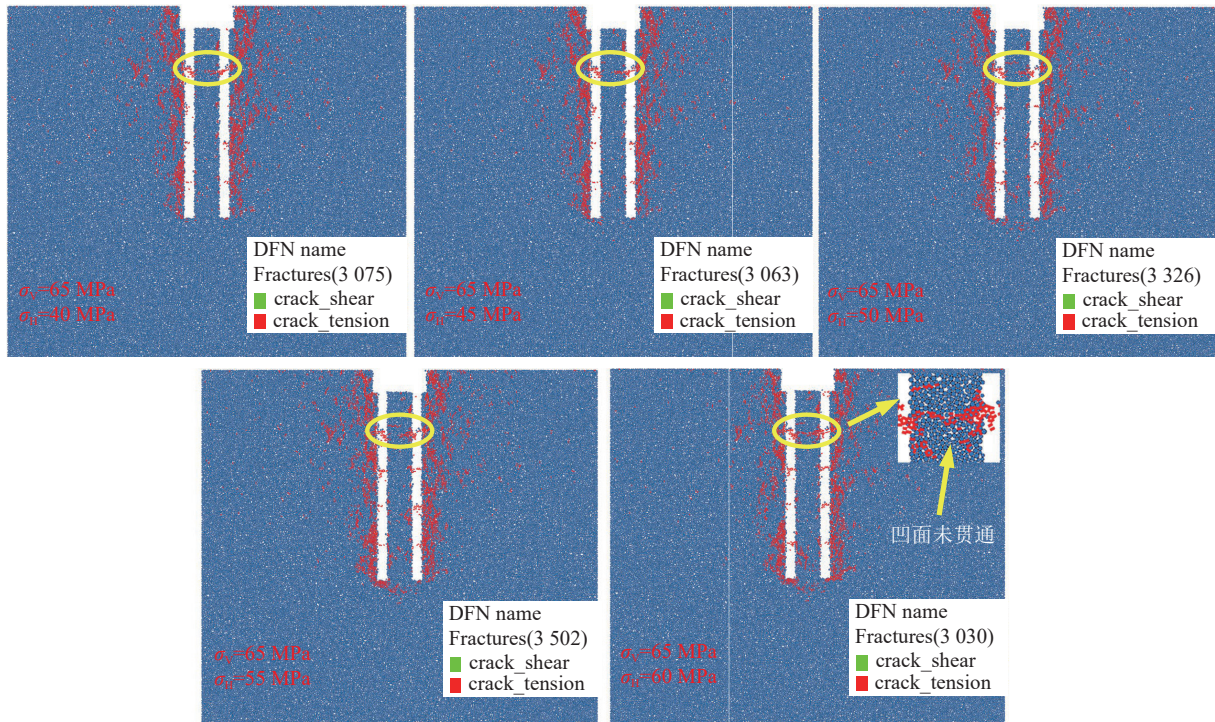


图 10 不同水平压力工况下岩心裂纹发育分布

Fig.10 Distribution of core crack development under different horizontal pressure conditions

3.2.3 水平最大主应力工况

图 11 为水平应力为最大主应力,轴向应力变化的工况下岩心及孔壁的裂纹发育扩展情况。在钻进过程中保持水平应力为最大主应力 65 MPa,逐渐增加轴向应力。分析图 11 可知,在水平应力为最大主应力的条件下裂缝主要集中在岩心柱和孔壁上,各个阶段钻进完成后在岩心根部均形成较宽厚度的裂缝带,随着轴向应力的增长岩心的饼化行为逐渐降低,如在 $\sigma_v=40$ MPa、 $\sigma_H=65$ MPa 时岩柱中存在 4 个明显的饼化断面,但当 σ_v 增加到 60 MPa 时仅第 1 阶段钻进后在岩心根部产生了明显的饼化断面,这再次说明轴向应力的增大不利于饼化的产生。对比图 11 中不同垂直应力下的饼化特征可知,裂纹从岩心外表面向岩心内部、下部发展,最终在每阶段的岩心根部呈现具有一定带宽的凹状拉裂纹,且随着垂直应力的增大裂纹的数量也同步增大。与静水压力和垂直主应力工况相比,水平主应力工况下张裂纹带的宽度和数量都具有明显的优势。综上可以得出,水平应力的增大在一

定程度上有利于岩心饼化的产生。

对比分析不同工况下的饼化行为可以发现,不同应力条件下岩心饼化的特征和烈度具有明显差别。为了更好的阐述饼化烈度与应力条件之间的关系,定义二维条件下的饼化烈度系数为

$$\varphi = \frac{\sigma_H - \sigma_V}{\sigma_V} \quad (1)$$

式中, φ 为烈度系数。

烈度系数 φ 越大饼化越剧烈,当 $\varphi < 0$ 时对应垂直最大主应力工况、 $\varphi = 0$ 时对应静水压力工况、 $\varphi > 0$ 时对应水平最大主应力工况,随着水平主应力的增大 φ 值变大岩心饼化的烈度也随之增强。经计算静水压力、轴向最大主应力和水平最大主应力工况的平均烈度系数分别为 0、-0.23 和 0.33,表明水平最大主应力工况最有利于岩心饼化的产生。综合饼化烈度系数和模拟结果不难得出,水平主应力是影响岩心饼化的第一要素,它的增大能够促进饼化的产生。对比不同工况下岩饼的断面形状可以发现,当水平应力不变时

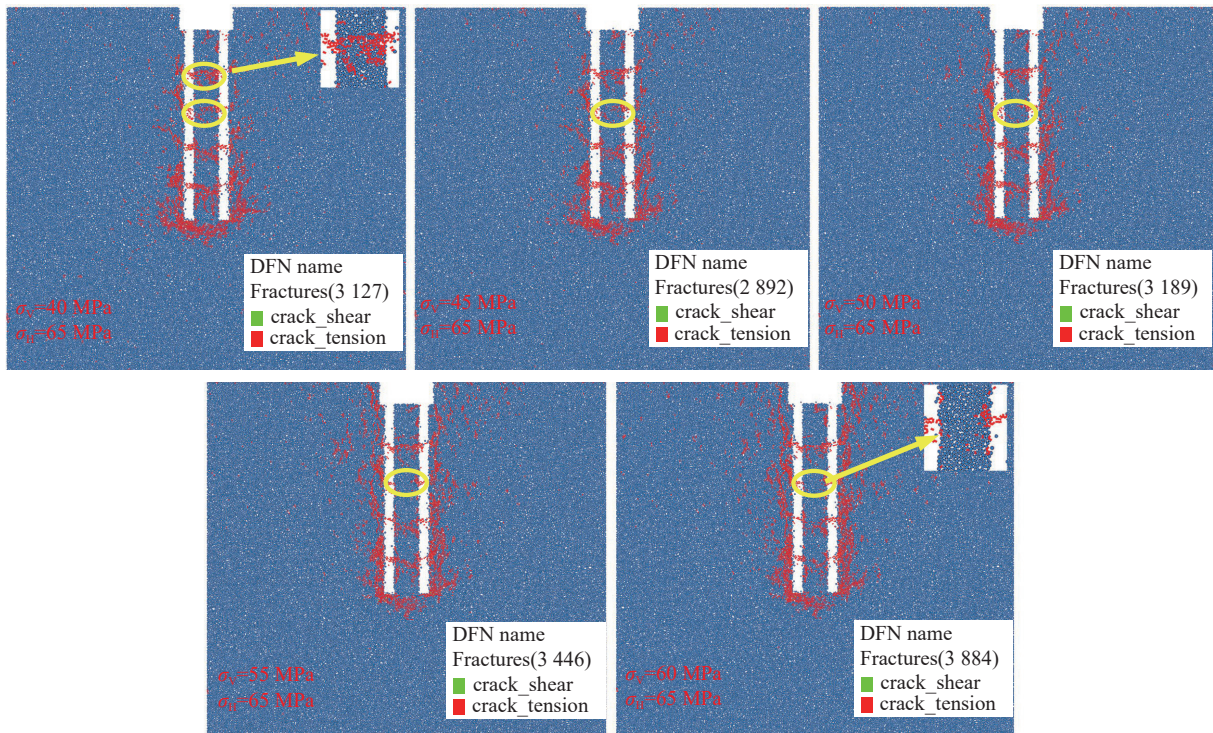


图 11 不同垂直压力工况下岩心裂纹发育分布

Fig.11 Distribution diagram of core crack development under different vertical pressure conditions

随着垂直应力的增大,岩饼断面逐渐由凹面状转变为平面状。根据鲁义强^[28]的研究松辽盆地地应力随深度的变化趋势如图 12 所示,可以看出盆地浅部以水平地应力为最大主应力、深部以垂直应力为最大主应力,对比松科二井深度越大岩饼断面形状越平直的变化规律可知(图 4),垂直应力的增大在一定程度上会抑制饼化的产生并减小端口剖面的凹陷和岩饼的厚度,这与模拟的结果具有一致性,因此可得出垂直应力是影响岩心饼化的第二要素,主要对饼化行为特征起抑制作用。

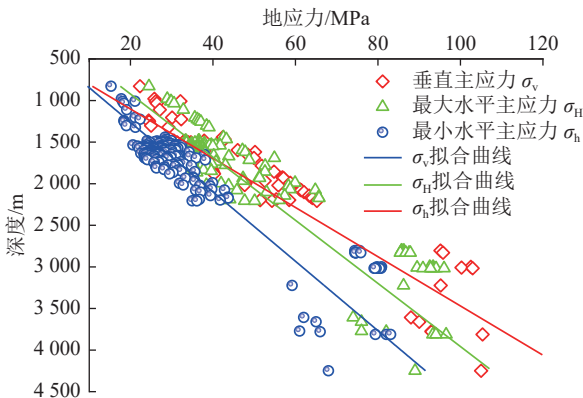


图 12 松辽盆地地应力变化趋势^[28]

Fig.12 Trend of geostress change in Songliao Basin^[28]

3.3 岩心饼化行为能量特征分析

能量转化是物理反映的本质,是物质发生破坏的

内在因素,岩石从受力开始直至破坏过程中,与外界均伴有能量交换过程^[29]。将饼化过程中的能量分为 3 种: 总能 (U)、耗散能 (U^d)、弹性能 (U^e), 3 者之间的计算关系如式 (2) 所示^[30]。对于采用平行黏结模型的 PFC^{2D} 模型, U^e 包括胶结应变能 (\bar{E}_k) 和颗粒应变能 (E_k), 计算公式如式 (3)、(4) 所示, U_d 可由 U 和 U^e 的差值计算。

$$U = U^d + U^e \quad (2)$$

$$\bar{E}_k = \frac{1}{2} \left[\frac{\bar{F}_n^2}{\bar{k}_n \bar{A}} + \frac{\|\bar{F}_s\|^2}{\bar{k}_s \bar{A}} + \frac{\bar{M}_t^2}{\bar{k}_s \bar{J}} + \frac{\|\bar{M}_b\|^2}{\bar{k}_n \bar{I}} \right] \quad (3)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \left[\frac{(F_n^1)^2}{k_n} + \frac{\|F_s^1\|^2}{k_s} \right] \quad (4)$$

式中, \bar{F}_n 、 \bar{F}_s 分别为平行键的法向力、剪切力; \bar{k}_n 、 \bar{k}_s 分别为平行键的法向刚度、剪切刚度; F_n^1 、 F_s^1 分别为颗粒的法向接触力、剪切接触力; k_n 、 k_s 分别为颗粒接触法向刚度、剪切刚度; \bar{M}_t 、 \bar{M}_b 分别为平行黏结横截面的扭矩和弯矩; \bar{A} 、 \bar{J} 、 \bar{I} 分别为平行黏结横截面的面积、极惯性矩和惯性矩。

为了更好的研究岩心饼化行为的能量变化特征, 选取最有利工况 (水平最大主应力工况) 下的能量曲线进行分析, 结果如图 13 所示。从图 13 可以看出, 不同工况下模型中的能量变化趋势大致相似, 表现为随着时间步长的增加总能量成近线性的规律增长。

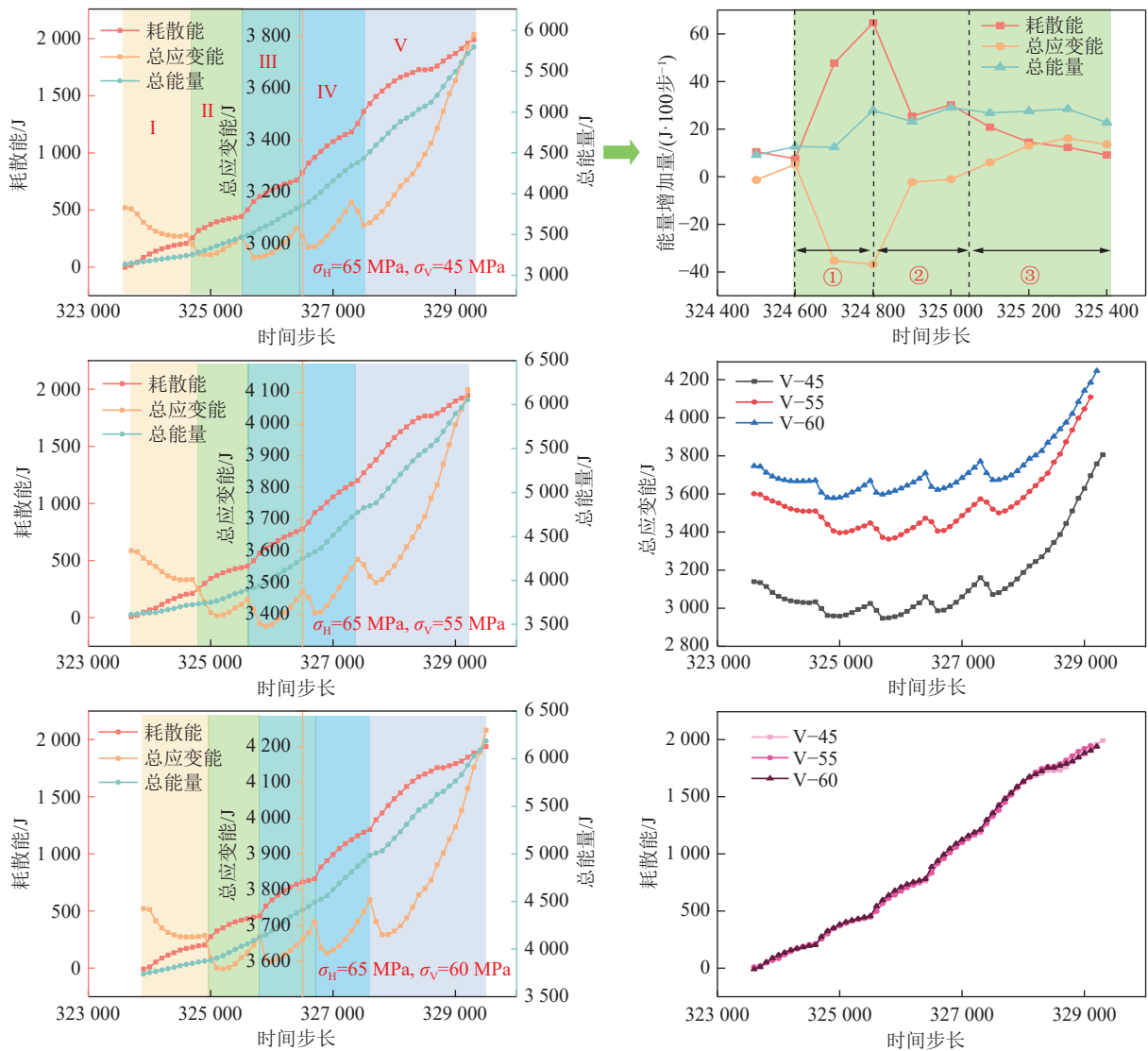


图 13 钻进过程中岩心能量变化过程

Fig.13 Energy change process of core during drilling

总应变能和耗散能对应每个钻进阶段呈周期性变化,两种能量的变化趋势刚好相反,并根据钻进规律将能量曲线分为了5个阶段(图13)。为了深入分析单个钻进阶段中的能量变化规律,对阶段2中每100计算步中3种能量的增量做了统计(图13),结果显示整个过程中总能量的增长趋势大致维持在22 J/100步左右,而总应变能和耗散能的变化规律可以分为3个时段(图13中的①、②、③)。在离散元颗粒删除后的初始时段,岩柱中弹性能快速释放、总应变能大幅下降,耗散能累积速率突增,导致岩柱中饼化位置快速形成大量裂隙;在第2个时段中(图13),总应变能下降速率和耗散能增长速率减小,岩柱内部形成的裂隙基本贯通,饼化断面基本形成;最后一个时段中总应变能开始重新积聚,耗散能也在该时段缓慢增长,最后2者的增长速率逐渐趋于一个稳定值。统计每个钻进阶段饼化后的能量分配规律发现,在总应变能和耗散能

稳定增长阶段,总能量主要转化为总应变能(占比为60%以上),少量转化为耗散能。

分析以上3个时段可知,钻进过程中岩心耗散能的来源有2部份,即总能量的直接转化和总应变能的释放,但第1时段中能量变化规律表明,总应变能的瞬时释放是造成岩心饼化的主要原因。图13还表明随着垂直压力的增加总应变能和耗散能也会增大,但是岩心饼化的烈度却在减小,这是因为垂直压力增大带来的耗散能增加量主要导致了孔壁裂纹的发展,对岩柱中裂纹发展影响较小,同样,这也造成了随着压力增大岩饼发育后的总应变能呈现下降趋势的现象。

4 室内试验验证

4.1 实验设备及测试方法

采用自主研发的深部原位应力环境岩石保真取

心测试系统来模拟深部岩石的钻孔取心过程 (图 14(a)), 该装备的最大轴向荷载为 3 500 kN, 最大围压为 70 MPa, 能够维持恒定轴压、围压加载蠕变时长 ≥ 40 d, 钻头外径 35 mm, 钻头内径 25 mm, 钻孔深度 ≥ 3 倍内径。通过该系统可以模拟不同应力条件下钻孔取心过程中的饼化现象。笔者采用砂岩作为测试岩样, 样

品被制成 $\phi 150 \text{ mm} \times H 200 \text{ mm}$ 的圆柱试样, 并分别编号为 Z-25-1、Z-30-1、Z-35-1。试样的质量为 9 450 ~ 9 600 g, 密度为 2.65 ~ 2.69 g/cm^3 。见表 4, 本实验共设置 3 种工况进行模拟钻进, 分别采用 500 N/s 和 50 kPa/s 的加载速率分级加载轴压和围压, 各个工况轴压和围压的加载路径如图 14(b) 所示。

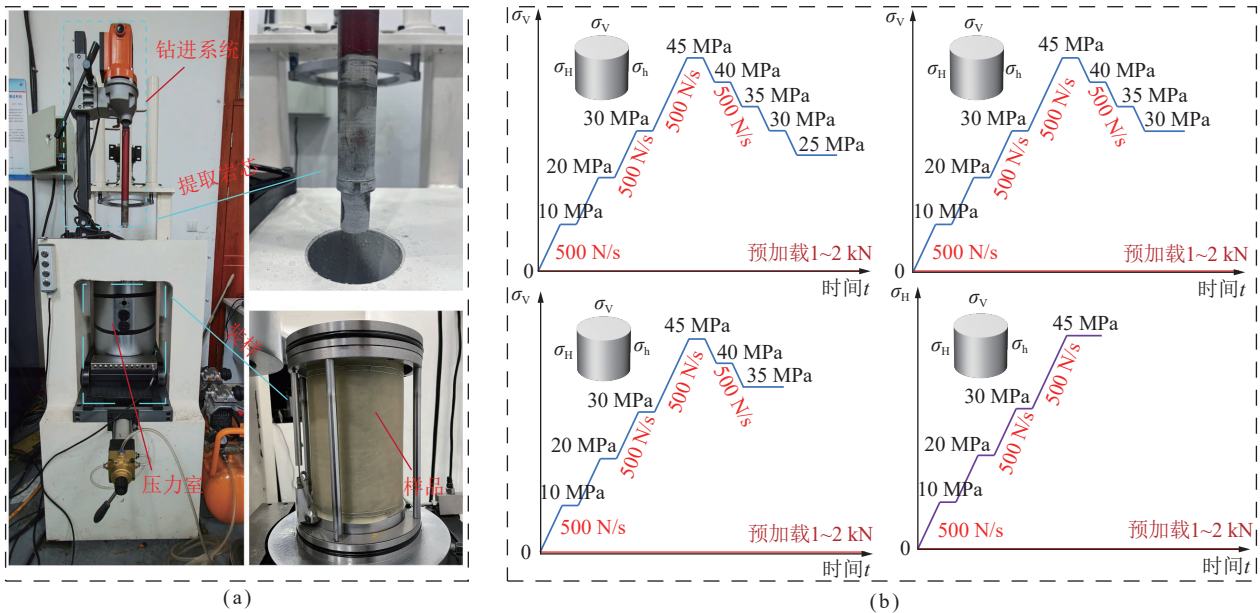


图 14 试验装备及加载路径示意

Fig.14 Schematic diagram of test equipment and loading path

表 4 模拟深部钻进取心试验工况

Table 4 Coring test conditions of simulated deep drilling

钻孔取心工况	试样编号	轴向应力 σ_v/MPa	水平应力 $\sigma_H=\sigma_h/\text{MPa}$	对应的数值模拟工况
ZK-1	Z-25-1	25	45	H-2
ZK-2	Z-30-1	30	45	H-3
ZK-3	Z-35-1	35	45	H-4

4.2 实验结果分析

由前述研究可知, 水平最大主应力工况的饼化烈度系数最大、最有利于饼化的产生。因此参考工况 H-2 ~ H-4, 综合考虑试验机加载系统的加载极值和试验安全, 将数值模拟工况中的地应力适当减小后作为钻孔取心试验工况 (表 4)。不同条件下的钻进结果如图 15 所示, 图中 Z-25-1 ~ Z-35-1 代表被钻试样, Y-25 ~ Y-35 代表所取出的岩心。取出的岩心显示工况 ZK-1 和 ZK-2 中发生了饼化现象, 而工况 ZK-3 并未发生饼化。张旭等^[31]的研究表明岩饼厚度是评价岩心饼化现象的有效参数之一, 为了对比不同工况下试样的饼化现象, 统计了不同应力条件下岩饼厚度的变化情况, 结果见表 5。工况 ZK-1 和 ZK-2 的饼

化平均厚度分别为 4.99 mm 和 6.38 mm, 且在试样 Z-25-1 的底部残留有一定高度的岩心, 而在试样 Z-25-2 的底部几乎未显示残留岩心, 这说明在工况 ZK-1 条件下的饼化深度比工况 ZK-2 的饼化深度浅, 因此可以得出饼化烈度 $ZK-1 > ZK-2 > ZK-3$ 。同样依据式(1)计算出 3 种应力工况下的饼化烈度系数分别为 0.80、0.50、0.29, 该结果与实验所得结果一致, 进



图 15 不同工况下钻孔取心实验的试样整体形貌

Fig.15 Overall morphology of samples in drilling experiments under different working conditions

表5 不同工况下岩饼厚度统计

Table 5 Statistics of rock discing thickness under different working conditions mm

岩心	厚度1	厚度2	厚度3	厚度4	厚度5	厚度6	平均厚度
Y-25	6.09	6.47	3.98	3.36	5.81	4.25	4.99
Y-30	15.43	16.56	17.46	17.21	15.98	16.01	16.44

一步证明了数值仿真模型的科学性和数值模拟所得结果的正确性。

5 结论与展望

(1) 根据岩饼的厚度和断面破坏特征, 可将松科二井深度 4 700~6 900 m 岩饼的形貌特征分别分为 5 种 4 类。在小深度范围内岩饼的厚度和位置由初始微裂隙控制。在大深度范围内, 随着深度增大、岩心硬度变高, 岩心硬质矿物质量分数增加、脆性指数增高、饼化厚度减薄、断面平整度变好。

(2) 镜下薄片显示, 岩饼裂纹形式包括 3 种, 随着深度增加或岩心脆性增强, 由穿晶裂纹过渡到复合裂纹最后到沿晶裂纹。这表明松科二井饼化行为主要由张拉破坏控制, 但在浅部或抗剪强度较小的岩体内可能由拉剪破坏控制。

(3) 松科二井 4 900 m 岩心的饼化行为受张拉破坏控制, 水平主应力为第一要素能够促进饼化的产生, 垂直应力为第二要素, 会抑制饼化的产生并减小端口剖面的凹陷度和岩饼的厚度。定义了饼化烈度系数, 系数越大饼化越剧烈, 室内钻进实验结果同样验证了这一理论。

(4) 岩心总能量 U 随着钻进时间的增大成近线性增长, 总应变能 U^e 和耗散能 U^d 对应每个钻进阶段呈周期性变化。在钻进初始时段 U^e 大量释放、 U^d 大量积累, 导致岩心中形成大量裂缝, 因此总应变能的瞬时释放是造成岩心饼化的主要原因。

本文所设定的应力状态为二维, 与实际的三维应力状态还有一定差距。此外本研究没有考虑应力方向的问题, 所有应力均为水平或者垂直, 导致模拟/实验所得的饼化断面形貌较为单调。因此考虑三维空间中不同应力方向下岩心饼化行为的内在机理也是值得探索的前沿方向。

参考文献(References):

[1] 高明忠, 叶思琪, 杨本高, 等. 深部原位岩石力学研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 895-903.
GAO Mingzhong, YE Siqi, YANG Bengao, et al. Progress in research on deep in situ rock mechanics[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 895-903.

[2] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1-8.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 1-8.

[3] 谢和平, 高明忠, 付成行, 等. 深部不同深度岩石脆延转化力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 701-715.
XIE Heping, GAO Mingzhong, FU Chenghang, et al. Mechanical behavior of brittle-ductile transition in rocks at different depths[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 701-715.

[4] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.

[5] 陆彤, 高明忠, 张茹, 等. 深部岩芯饼化现象的应力机制探索[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 47-54.
LU Tong, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al. Exploration on stress mechanism of deep disked core[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(5): 47-54.

[6] 张国锋, 朱伟, 赵培. 徐州矿区深部地应力测量及区域构造作用分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2318-2324.
ZHANG Guofeng, ZHU Wei, ZHAO Pei. In-situ stress measurements and analysis of action of geological structures of deep coal mines in Xuzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2318-2324.

[7] 李占海, 李邵军, 冯夏庭, 等. 深部岩体岩芯饼化特征分析与形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2254-2266.
LI Zhanhai, LI Shaojun, FENG Xiating, et al. Characteristics and formation mechanism of core discing in deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2254-2266.

[8] 张宏伟, 荣海, 韩军, 等. 基于应力及能量条件的岩芯饼化机理研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(4): 512-517, 3.
ZHANG Hongwei, RONG Hai, HAN Jun, et al. Study on rock core discing mechanism based on stress and energy principle[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(4): 512-517, 3.

[9] GAO Mingzhong, HAO Haichun, XUE Shouning, et al. Discing behavior and mechanism of cores extracted from Songke-2 well at depths below 4 500 m[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022, 149: 104976.

[10] HAS N. The state of stress in the upper part of the earth's crust[J]. Tectonophysics, 1969, 2(1): 5-17.

[11] OBERT L, STEPHENSON D E. Stress conditions under which core discing occurs[J]. Trans Soc Min Eng AIME, 1965, 238: 227-235.

[12] DURELLI AJ, OBERT L, PARKS V J. Stress required to initiate core discing[J]. Trans Soc Min Eng AIME, 1968, 241: 269-276.

[13] 侯发亮, 贾愚如. 岩芯饼化的应力分析[J]. 岩土工程学报, 1984, 6(5): 48-58.
HOU Faliang, JIA Yuru. Stress analysis on disked rock cores[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(5): 48-58.

[14] SUGAWARA K, KAMEOKA Y, SAITO T, et al. A study on core discing of rock[J]. Journal of the Mining and Metallurgical Institute

- of Japan, 1978, 94(1089): 797–803.
- [15] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 234–241.
WANG Mingyang, FAN Pengxian, LI Wenpei. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 234–241.
- [16] 阮小平, 李方全. 茅坪 800 m 钻孔饼状岩芯分析[J]. 地震学报, 1994(2): 190–194.
RUAN Xiaoping, LI Fangquan. Analysis of cake core in Maoping 800 m borehole[J]. Acta Seismologica Sinica, 1994(2): 190–194.
- [17] KAGA N, MATSUKI K, SAKAGUCHI K. The in situ stress associated with core discing estimated by analysis of principal tensile stress[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2003, 40: 653–665.
- [18] MATSUKI K, KAGA, YOKOYAMA T, et al. Determination of three dimensional in situ stress from core discing based on analysis of principal tensile stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(7): 1167–1190.
- [19] CORTHÉSY R, LEITE M H. A strain-softening numerical model of core discing and damage[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008, 45(3): 329–350.
- [20] 张丰收, 李猛利, 张重远, 等. 高地应力下深部岩芯饼化裂缝发展规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 533–542.
ZHANG Fengshou, LI Mengli, ZHANG Chongyuan, et al. Study on fracture propagation and formation mechanism of core discing at depth under high in-situ stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 533–542.
- [21] YANG M, HE Z, LI C, et al. Experimental study on physical characteristics of deep rocks at different depths in Songliao Basin[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 6070683.
- [22] FENG Z, JIA C, XIE X, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China[J]. *Basin Research*, 2010, 22(1): 79–95.
- [23] LU Y, LI C, HE Z, et al. Variations in the physical and mechanical properties of rocks from different depths in the Songliao Basin under uniaxial compression conditions[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2020, 6(3): 1–14.
- [24] GAO Y, WANG C, WANG P, et al. Progress on continental scientific drilling project of cretaceous Songliao Basin (SK-1 and SK-2)[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(2): 73–75.
- [25] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1729–1740.
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9): 1729–1740.
- [26] 谭林, 郭原. 开孔有限平板应力集中问题的有限元分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2015, 29(7): 35–39.
TAN Lin, GUO Yuan. Finite element analysis of finite plates for stress concentration of holes[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2015, 29(7): 35–39.
- [27] WU S, WU H, KEMENY J. Three-dimensional discrete element method simulation of core discing[J]. *Acta Geophysica*, 2018, 66(3): 267–282.
- [28] 鲁义强. 不同深度岩石物理力学行为差异性规律研究[D]. 成都: 四川大学, 2020: 10–20.
LU Yiqiang. Research on the variations of rock physical and mechanical behaviors at different depths[D]. Chengdu: Sichuan University, 2020: 10–20.
- [29] 赵忠虎, 鲁睿, 张国庆. 岩石失稳破裂的能量原理分析[J]. 金属矿山, 2006(10): 17–20, 37.
ZHAO Zhonghu, LU Rui, ZHANG Guoqing. Analysis of energy principles in rock destabilization and fracture[J]. *Metal Mine*, 2006(10): 17–20, 37.
- [30] LI Fei, GAO Mingzhong, YE Siqu, et al. Formation mechanism of core discing during drilling under deep in-situ stress environment: Numerical simulation and laboratory testing[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(10): 3303–3321.
- [31] 张旭, 郭奇峰. 深部岩体岩芯饼化特征分析与原岩应力计算研究[J]. 金属矿山, 2017(10): 163–170.
ZHANG Xu, GUO Qifeng. Characteristics of core discing and calculation of in-situ rock stress in deep rock mass[J]. *Metal Mine*, 2017(10): 163–170.