

深部地质钻探钻遇弱面地层井孔围岩稳定分析

丁立钦^{1,2}, 王志乔^{1,2}, 凌雪^{1,2}, 刘宝林^{1,2}

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.自然资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083)

摘要:深部地层地质条件复杂,随钻探向纵深发展,钻遇弱面地层导致井孔围岩失稳将严重影响工程进度。本文总结分析具有弱面地层岩石物理力学特性,探讨强度各向异性孔壁围岩稳定模型的适用性;考虑流体向弱面渗透存在渗透各向异性 and 传热各向异性,发展了具有弱面地层井孔围岩稳定理论。研究发现,某些强度各向异性模型在特定情况下可能失去其适用性;在深部高温环境下忽略弱面地层渗透和传热的各向异性特征可能会导致井孔围岩压力、破坏区域以及坍塌压力产生较大误差。

关键词:深部地质钻探;弱面地层;各向异性;热应力;孔壁围岩稳定

中图分类号:P634.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0122-07

Deep geodrilling borehole stability analysis in anisotropic formations

DING Liqin^{1,2}, WANG Zhiqiao^{1,2}, LING Xue^{1,2}, LIU Baolin^{1,2}

(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The geological conditions in deep formations are very complex, especially in bedding strata. Nowadays, with increase in drilling depth, the instability of the borehole caused by the failure of weak planes will seriously affect the drilling progress. In this paper, the physical and mechanical properties of rocks with weak planes are summarized and analyzed, and the applicability of strength anisotropy models are discussed. Considering the permeability anisotropy and heat transfer anisotropy of the rocks with weak planes, the specific borehole stability theory is further developed for the surrounding rock with weak planes. It is found that some strength anisotropic models may lose their applicability under certain circumstances; furthermore, neglect of the anisotropic characteristics of the permeability and heat transfer of the weak-plane rocks in the deep strata in the high temperature environment may lead to big errors in the calculation of stresses, failure area and collapse pressure of the borehole.

Key words: deep geodrilling; weak-plane formation; anisotropy; thermal stress; borehole stability

0 引言

随着地质钻探钻孔深度的增加,钻遇地层复杂多变。由地质构造运动作用而产生的断层、节理等结构面(弱面),在较小冲洗液压力下先于孔壁本体围岩破坏,引起孔壁坍塌;即使在高密度冲洗液条件下也不能维持孔壁稳定,严重影响钻探进程^[1]。

弱面强度显著区别于本体岩石强度,其结构特征

(弱面走向和倾角)将导致井孔围岩强度的各向异性。Jaeger^[2]和Chenever等^[3]较早开展含弱面岩石的强度特征分析。自从Aadnoy^[4]在Jaeger工作基础上考虑单弱面强度各向异性发展含弱面的孔壁稳定模型以来,弱面地层孔壁稳定取得一些研究成果,如考虑不同弱面产状、开展实验三轴井孔稳定模型实验等。但缺乏对原场地应力水平的一般性考虑并忽略了中

收稿日期:2020-02-21 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.018

基金项目:国家重点研发计划项目“5000米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题一“大深度地质钻探技术装备集成及示范”(编号:2018YFC0603401)

作者简介:丁立钦,男,汉族,1990年生,博士研究生,地质工程专业,主要研究方向为与井壁稳定有关的岩石力学问题,北京市海淀区学院路29号,dlq891@163.com。

通信作者:王志乔,男,汉族,1978年生,副教授,博士,长期从事水力压裂及井壁稳定方面的研究工作,北京市海淀区学院路29号,zqwang@cugb.edu.cn。

引用格式:丁立钦,王志乔,凌雪,等.深部地质钻探钻遇弱面地层井孔围岩稳定分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):122-128.

DING Liqin, WANG Zhiqiao, LING Xue, et al. Deep geo drilling borehole stability analysis in anisotropic formations[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):122-128.

间主应力对围岩本体强度的影响。本课题组基于上述考虑,发展了基于 Mogi - Coulomb 强度准则的弱面地层井壁稳定模型;综合评估了合理的冲洗液密度窗口并有效优化了弱面地层的钻进方向^[1,5]。

在深部地质钻探中,钻遇弱面地层孔壁稳定不仅与岩石强度各向异性有关,而且与深部复杂的多场耦合机制有关^[6-9]。如弱面存在,流体向弱面和围岩本体渗透存在各向异性;此外传热量传输也存在各向异性。为了合理描述深部含弱面地层井孔稳定的热-流-固耦合的多物理过程,课题组也进行了有益的探索,发展了考虑流体渗透和传热各向异性的弱面地层井孔围岩安全模型^[6-8]。

本文将针对深部含弱面围岩的物理力学特性,探讨考虑弱面存在而引起的强度、渗流、热传导各向异性对钻孔壁围岩稳定的影响,以为深部复杂地层钻井施工提供参考依据。

1 强度各向异性模型

实验表明,将围岩视为各向同性介质的孔壁稳定模型在含弱面地层中的适用性大为降低,充分考虑强度各向异性特征的模型才具有较好的工程意义。以往研究中常见的强度各向异性模型一般有两种:一种(模型 1)是基于 Jaeger 的单弱面强度准则^[2],需要将围岩中的应力转换到弱面坐标系中,从而判断弱面是否发生剪切破坏,最终围岩破坏判定是弱面破坏和本体破坏的叠加效应;另一种(模型 2)是基于图 1 所示的三轴实验建立图 2 所示的破坏准则,根据临界角判断围岩是发生弱面破坏还是本体破坏。以上两种模型都是在弹性理论上根据层理性围岩强度各向异性分析孔壁稳定性的方法。图 1 中 β_w 为最大主应力与弱面法线方向的夹角,图 2 所示为临界角 β_1 和 β_2 的确定方法^[6],公式如下:

$$\begin{cases} \beta_1 = \frac{1}{2} \left[\varphi_w + \arcsin \frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \\ \beta_2 = \frac{1}{2} \left[\pi + \varphi_w - \arcsin \frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_w 、 φ_w ——分别为弱面的粘聚力和内摩擦角; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ——主应力。

选取 Boulder 地区的一个特定井况(如表 1 所示)^[11],应用模型 1 计算,图 3(a)所示为由弱面强度准则计算的井周坍塌区域,图 3(b)所示为由弱面、岩石本体两个强度准则共同控制下的井周破坏区域,

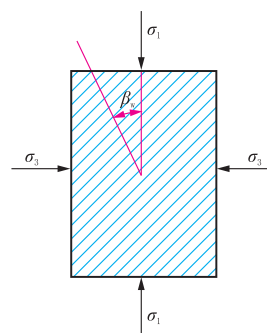


图 1 不同弱面角度下的岩样加载

Fig.1 Rock specimen with bedding planes subjected to triaxial loading

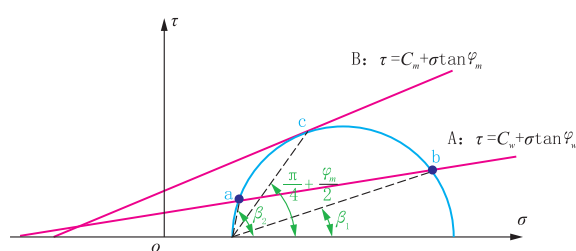


图 2 由莫尔圆和摩尔库伦准则确定破坏模式

Fig.2 Failure modes of rocks defined by Mohr circle and M - C strength lines

表 1 Boulder 地区井况参数^[6]

Table 1 Well parameters in the Boulder field

深度/ m	水平最 大主地 应力/ MPa	水平最 小主地 应力/ MPa	上覆 地层 压力/ MPa	孔隙压 力梯度/ (MPa · km ⁻¹)	弱面 倾向/ 倾角/ (°)	弱面 粘聚 力/ MPa	弱面 内摩 擦角/ (°)	围岩 泊松 比
2100	58.8	42	52.5	9.8	205/60	0.1	25	0.3

其中本体准则采用的是 Mogi - Columb 准则。可以发现,弱面控制下的井周破坏区域会垂直于弱面朝两个对称方向延伸扩展,计算的破坏区域是旋转对称的。应用模型 2 计算的坍塌破坏区域如图 4 所示,从图中可以看到,该模型计算的坍塌区域也是沿着垂直于弱面的方向扩展,但与模型 1 结果不同的是,坍塌区域仅朝着一个方向扩展。此外,还可以看到模型 2 的计算结果对层理弱面的强度参数十分敏感:当弱面粘聚力 c_w 为 0.1 MPa 时,坍塌区域在垂直弱面方向上扩展严重;当弱面粘聚力 c_w 增加到 3 MPa 时,坍塌区域迅速收敛。通过文献中(Labrousse 等^[9],Meier 等^[10])有关的实验调研发现(如图 3c,d 所示),模型 1 所计算的破坏区域才是实际中发生的破坏模式。

图 5(a)、(b)所示为分别由模型 1、2 计算的 Boulder 地区(井况参数如表 1 所示,各方向钻井的坍塌压力值,对比两图可以看到许多相似点:两者求

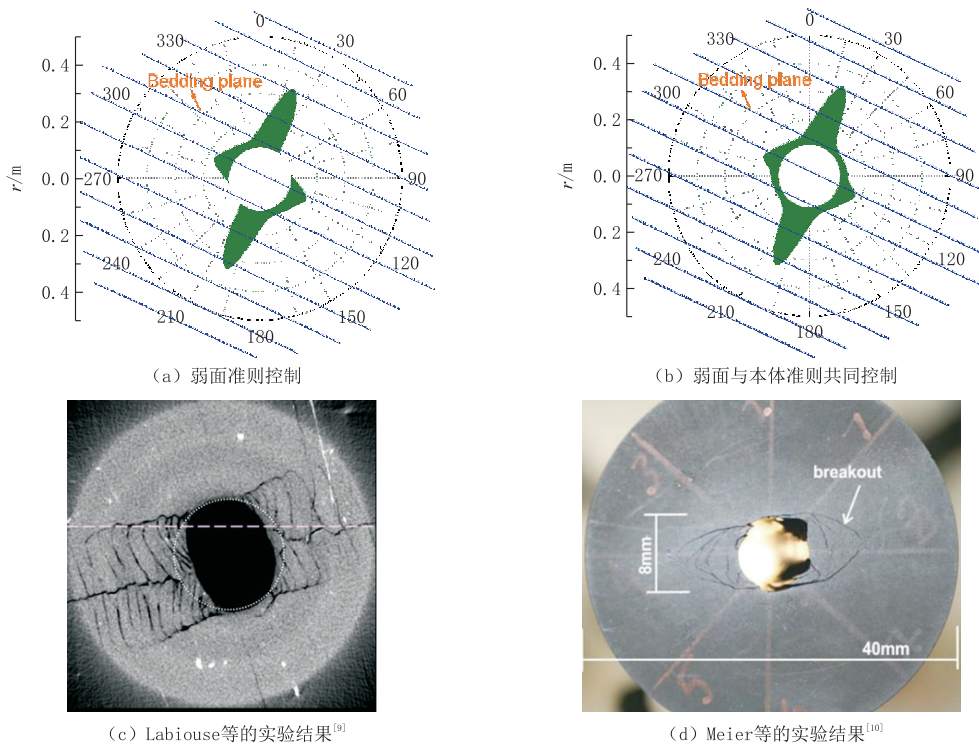


图3 模型1计算的破坏区域

Fig.3 Collapse area around the borehole calculated by Model 1

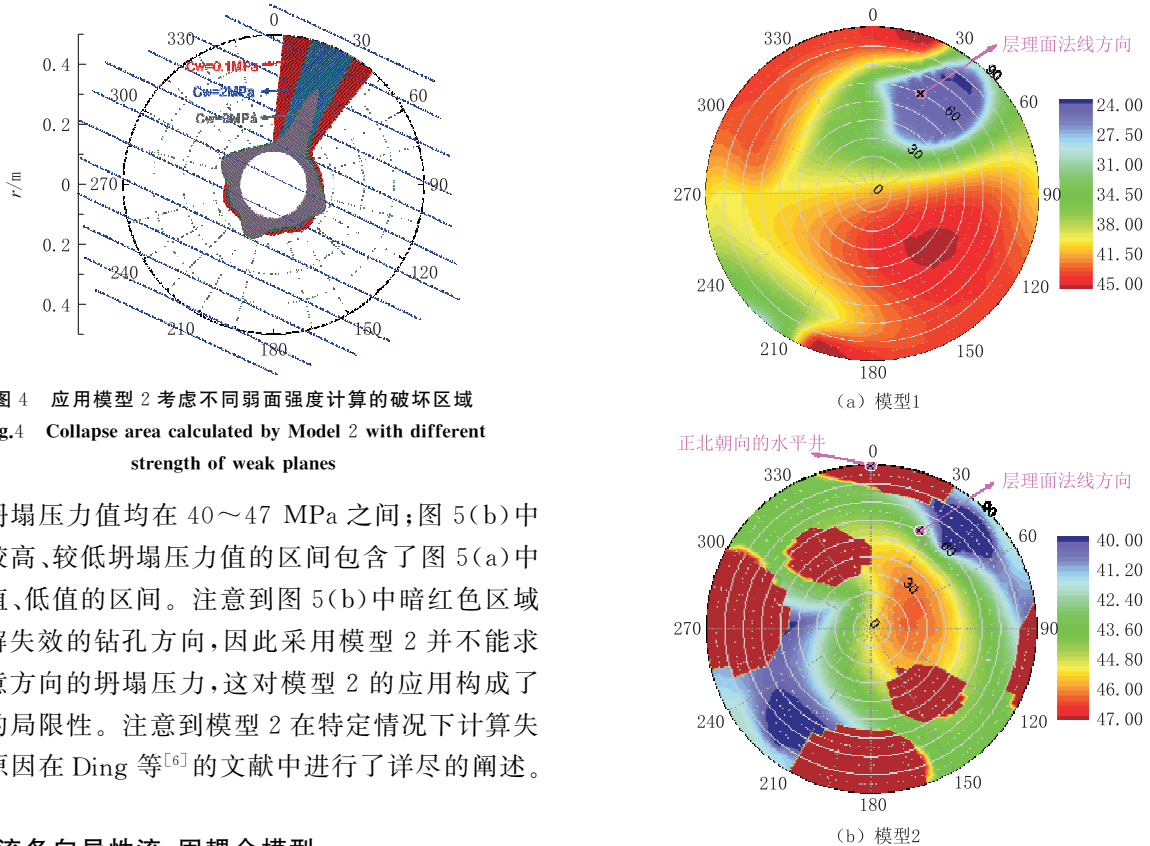


图4 应用模型2考虑不同弱面强度计算的破坏区域

Fig.4 Collapse area calculated by Model 2 with different strength of weak planes

得的坍塌压力值均在 40~47 MPa 之间;图 5(b)中取得较高、较低坍塌压力值的区间包含了图 5(a)中取高值、低值的区间。注意到图 5(b)中暗红色区域是求解失效的钻孔方向,因此采用模型 2 并不能求出任意方向的坍塌压力,这对模型 2 的应用构成了很大的局限性。注意到模型 2 在特定情况下计算失效的原因在 Ding 等^[6]的文献中进行了详尽的阐述。

2 渗流各向异性流-固耦合模型

孔隙介质中岩石骨架的变形会影响骨架内的流

图5 Boulder地区各方向井坍塌压力值云图
Fig.5 Collapse pressures for wellbores in various directions in Boulder field

体流动,而流体流动引起的孔隙压力变化又会反过来对骨架变形产生影响,这是孔隙体中的流-固耦合作用。Metwally 等^[12]的实验结果显示,平行弱面的渗透性与垂直弱面渗透性的比值(渗透各向异性比)在 3.2~5 倍之间,并且这个比值在有效围压达到 29.79 MPa 时也不会改变。根据 Burger 等^[13], Kwon 等^[14], Clavaud 等^[15], Mokhtari 等^[16]的实验结果,各类岩石的渗透各向异性比范围在 1.2~5 之间。因此考虑弱面地层岩石的渗透各向异性建立孔壁稳定模型是十分必要的,根据课题组研究模型^[7],层理性岩石的渗透系数可采用下式所示的当量渗透系数表达:

$$\kappa_f = \kappa_1 \cos^2 \beta_1 + \kappa_2 \cos^2 \beta_2 + \kappa_3 \cos^2 \beta_3 \quad (2)$$

式中: $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ ——渗透张量的主值(特征值),对层理性岩石应有 $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_r, \kappa_3 = \kappa_n$; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ——分别为孔压梯度与渗透张量各主值方向的夹角,该夹角可利用坐标系转换关系来求得。

图 6 所示为采用表 2 所示地层参数计算的考虑不同渗透情况(各向同性、各向异性渗透)下的特定时刻井周各应力分布情况,可以看到当考虑各向异性渗透时计算的各应力值与不考虑各向异性渗透的情况在许多情况下差别较大,在不同时刻和不同径向距离处这种差异均有体现。并且由各向异性渗透计算的孔隙压力值往往偏大,而计算的有效径向、环向、轴向应力值往往偏小,这些影响会进一步对井壁破坏和钻井冲洗液压力选择产生影响。

表 2 各向异性地层参数^[7]

Table 2 Anisotropic formation parameters

初始孔隙压力/MPa	上覆地层压力/MPa	水平最大主地应力/MPa	水平最小主地应力/MPa	排水/不排水泊松比	比奥系数	Skempton 孔隙压力系数	平行弱面的流体扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	垂直弱面的流体扩散系数/(m ² ·s ⁻¹)	围岩本体粘聚力/MPa	围岩本体摩擦角/(°)	弱面粘聚力/MPa	弱面内摩擦角/(°)
10	30	40	20	0.2/0.4	0.99	0.8	2.2×10^{-5}	4.4×10^{-6}	10	35	5	25

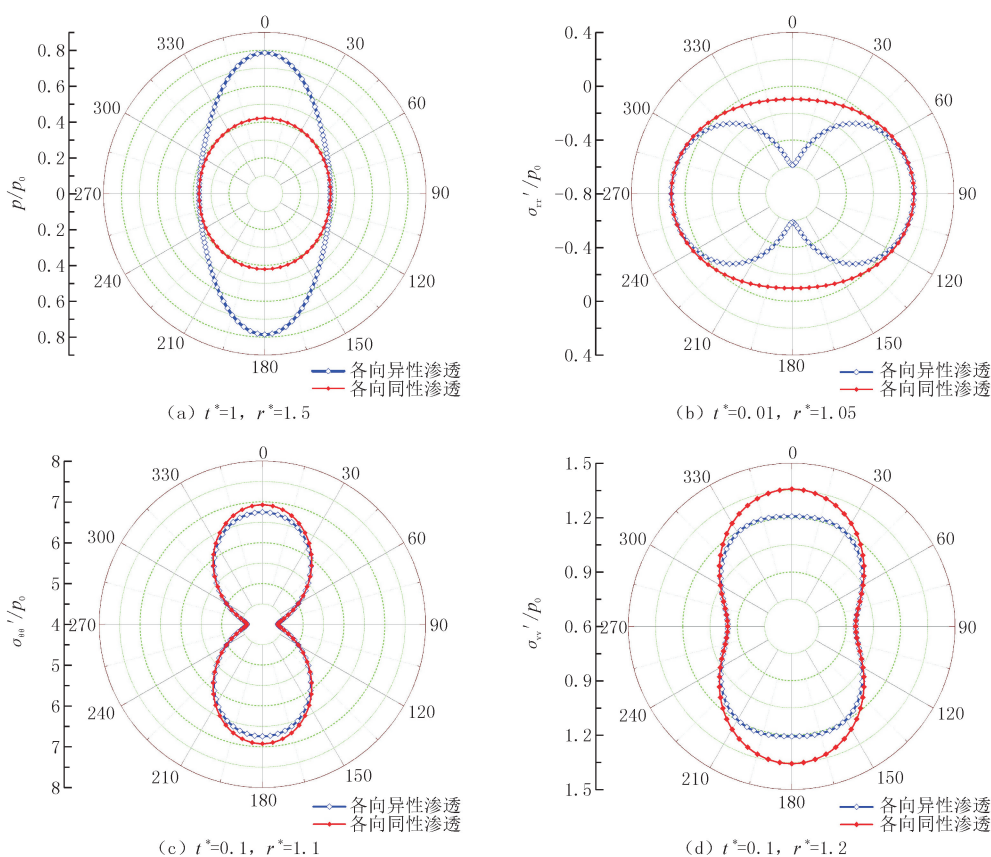


图 6 考虑各向同性、各向异性渗透计算的特定时刻 t^* 和径向距离 r^* 处各应力环向分布

Fig.6 Stress distributions in the hoop direction around the wellbore for specific t^* and r^* considering different permeability conditions

图7(a)所示为分别考虑各向异性、各向同性渗透条件计算的坍塌压力差值随时间、径向距离变化的情况,注意到各向同性渗透情况假设井周流体扩散系数与表2中平行弱面系数相同,而各向异性渗透情况下的流体扩散系数由式(2)确定。可以看到该差值存在正、负值集中的区间,即在某些时刻和位置处由各向异性渗透计算的坍塌压力值较大,而在另一些时刻和位置处由各向同性渗透计算的坍塌压力值较大。因此,研究各向异性渗透对坍塌压力的影响十分重要,这将直接关系到孔内冲洗液压力的选取。图7(b)所示为考虑不同渗透条件计算的破裂压力差值随时间、径向距离变化的情况,可以看到该差值在各个时刻位置处均为正值,也即由各向异性渗透计算的破裂压力值较大。由于选取安全泥浆压力窗口时选取的是最小的破裂压力值作为窗口上限,所以考虑各向异性渗透计算的破裂压力值对窗口的影响不大。

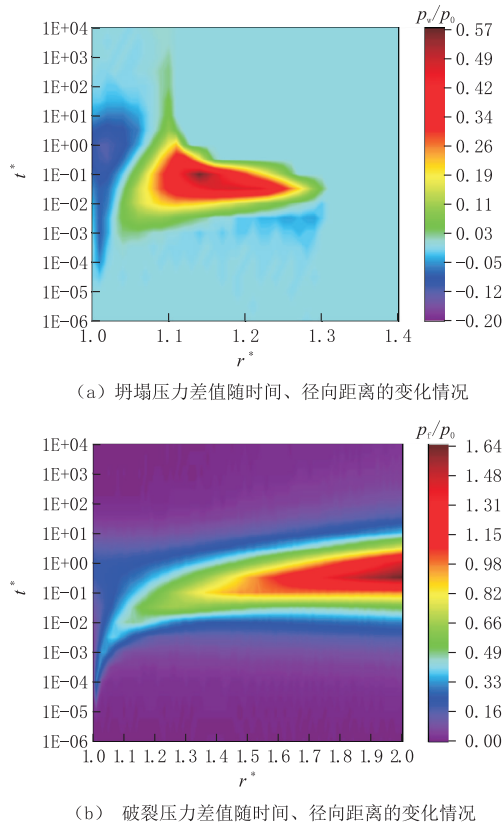


图7 坍塌压力差值及破裂压力差值随时间、径向距离变化的情况

Fig.7 Change of collapse pressure and fracture pressure vs t^* and r^*

3 导热各向异性热-流-固耦合模型

温度引起的载荷会进一步影响上述流-固耦合

作用,这是因为热膨胀、热收缩作用会使岩石骨架和内部流体产生附加变形。深部钻井工程中往往面临高温高压的复杂地层环境,冲洗液和地层之间一般存在较高的温度差,根据课题组研究模型^[8],当地层中弱面显著发育时,热传导方向与温度梯度方向将不再一致,此时的热传导系数应采用一个当量热传导系数来代替。针对含弱面岩石的热传导各向异性,文献中也有许多实验研究(Kappelmeyer等^[17], Deming等^[18], Davis等^[19], Chen等^[20], Dao等^[21], Labus等^[22]),这些实验结果均证明层理性岩石的热传导各向异性显著,其测定的岩石热传导各向异性比多在1.1~3.8之间。

图8所示为考虑各向异性热传导(ADC)和各向同性热传导(IDC)条件计算的不同时刻坍塌压力的径向分布图,可以看到不同时刻 IDC 计算结果为红色曲线、ADC 计算结果为蓝色曲线,红蓝曲线之间的条带则表示两种情况计算结果的差值。图8(a)所示为考虑围岩本体破坏的计算结果,可以看到不同时刻、不同径向距离处由 ADC 和 IDC 计算结果的相对大小关系不同:当时间较长时,由 IDC 计算的坍塌压力一般大于 ADC;当时间较短时,两种计算结果的相对大小关系与径向距离有关。考虑到应当取较大的坍塌压力值作为安全泥浆压力窗口的下限值,得出的结论是:当时间较短时尤其应当考虑各向异性热传导的作用。图8(b)所示为考虑弱面破坏的计算结果,对比于图8(a)可以看到条带普遍较窄,说明考虑弱面破坏计算坍塌压力时各向异性热传导的影响会减弱。在该图中也可发现与图8(a)类似的规律。

图9所示为正、负温度梯度对坍塌压力的影响,图(a)、(b)所示分别为在短时间($t^* = 0.1$)和长时间($t^* = 10$)后的计算结果。可以看出在较短时间内,若地层温度高于井内温度($\Delta T_0 = -60^\circ\text{C}$),在近井壁处由 IDC 计算的坍塌压力较大而在远离井壁处 ADC 计算值较大;若地层温度低于井内温度($\Delta T_0 = 60^\circ\text{C}$)其规律正好相反。图(b)中在较长时间之后,以上规律又发生显著变化,例如:当 $\Delta T_0 = -60^\circ\text{C}$,由 IDC 计算的坍塌压力普遍较大,而当 $\Delta T_0 = 60^\circ\text{C}$,由 ADC 计算的坍塌压力会普遍较大。这说明,考虑不同温度梯度和时间的影响,各向异性热传导的影响会存在差别,具体对施工中安全泥浆压力的选择还应当进行综合计算后确定。

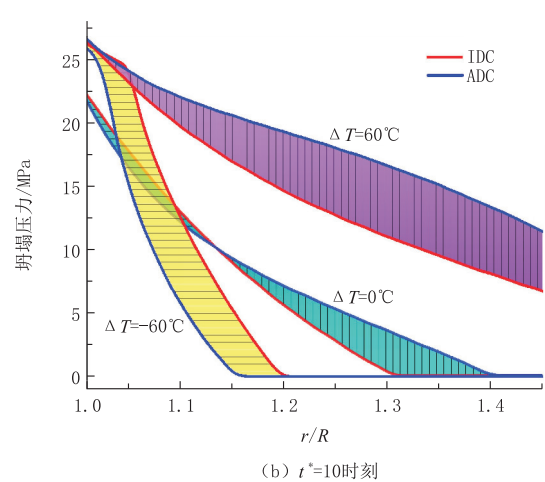
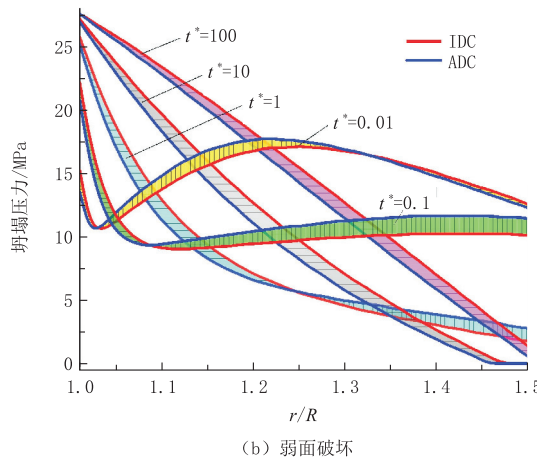
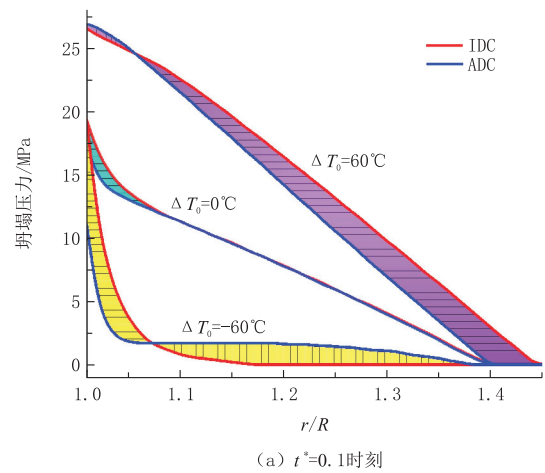
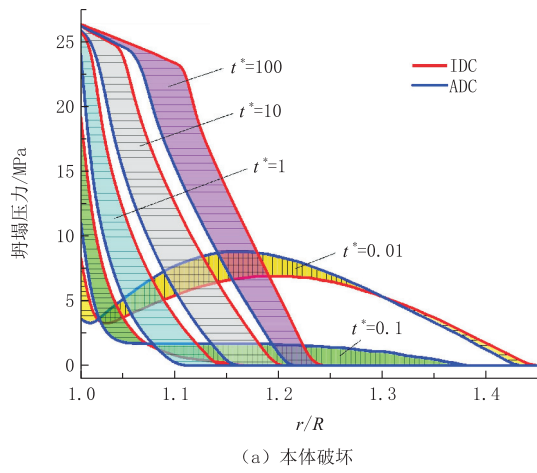


图 8 不同热传导条件计算的不同时刻坍塌压力的径向分布
Fig.8 Time-dependent collapse pressures in the radial direction at different heat conductivities

图 9 正、负温度梯度对坍塌压力的影响
Fig.9 Effects of positive and negative temperature gradients on collapse pressures in the radial direction

4 结论

为研究深部复杂地层环境下孔壁失稳机理,建立合理有效的理论模型,并进一步为安全施工提供指导建议,本文首先从各向异性强度理论模型出发,分析对比了 2 种主要模型的计算准确性和适用性,得出模型 2 在某些特定情况下计算的坍塌区域和坍塌压力与实际相差较大的结论。此外,以孔隙弹性热-流-固耦合理论为基础并考虑含弱面围岩的各向异性渗透、传热效应,引入有效渗透、传热系数建立起考虑深部实际复杂条件的孔壁稳定模型,经过模型计算与结果分析发现:考虑各向异性渗透条件计算的井周应力在不同时刻、位置处与各向同性情况会有较大差别;研究各向异性渗透对坍塌压力的影响对争取选取安全冲洗液压力窗口具有重要意义;在时间较短时计算坍塌压力尤其应当考虑各向异性传热的作用;考虑不同温度梯度和时间长短的影响,

各向异性传热对坍塌压力计算的影响会存在差别。

参考文献 (References):

- [1] 丁立钦,王志乔,吕建国,等.基于围岩本体 Mogi - Coulomb 强度准则的层理性岩层斜井井壁稳定模型[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):622-632.
DING Liqin, WANG Zhiqiao, LÜ Jianguo et al. A model for inclined borehole stability in bedding rocks based on Mogi - Coulomb criterion of rock matrix[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(3):622-632.
- [2] Jaeger J C. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geological Magazine, 1960,97(1):65-72.
- [3] Chenevert M E, Gatlin C. Mechanical anisotropies of laminated sedimentary rocks[J]. SPE, 1965:890.
- [4] Aadnoy B S. Modelling of the stability of highly inclined boreholes in anisotropic rock formations[J]. SPE, 1987:16526.
- [5] 丁立钦,王志乔,王瑜,等.层理性地层钻井稳定性分析模型[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):1-9.
DING Liqin, WANG Zhiqiao, WANG Yu, et al. Analysis model of borehole stability in bedding formations[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,

- 44(3):1-9.
- [6] Ding L, Wang Z, Liu B, et al. Assessing borehole stability in bedding-parallel strata: validity of three models[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019,173(1):690-704.
- [7] Ding L, Wang Z, Liu B, et al. Borehole stability analysis: a new model considering the effects of anisotropic permeability in bedding formation based on poroelastic theory[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019,69(1):102932.
- [8] Ding L, Wang Z, Wang Y, et al. Thermo-poro-elastic analysis: the effects of anisotropic thermal and hydraulic conductivity on borehole stability in bedding formations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020,190(1):107051.
- [9] Labiouse V, Vietor T. Laboratory and in situ simulation tests of the excavation damaged zone around galleries in opalinus clay[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014,47(1):57-70.
- [10] Meier T, Rybacki E, Backers T, et al. Influence of bedding angle on borehole stability: a laboratory investigation of transverse isotropic oil shale[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015,48(4):1535-1546.
- [11] McLellan P J, Cormier K. Borehole instability in fissile, dipping shales, northeastern british columbia[J]. SPE, 1996:35634.
- [12] Metwally Y M, Sondergeld C H. Measuring low permeabilities of gas-sands and shales using a pressure transmission technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011,48(7):1135-1144.
- [13] Burger R L, Belitz K. Measurement of anisotropic hydraulic conductivity in unconsolidated sands: a case study from a shoreface deposit, Oyster, Virginia[J]. Water Resources Research, 1997,33(6):1515-1522.
- [14] Kwon O, Herbert B E, Kronenberg A K. Permeability of illite-bearing shale: 2. influence of fluid chemistry on flow and functionally connected pores[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004,109:B10206.
- [15] Clavaud J-B, Maeneult A, Zamora M, et al. Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure[J]. Journal of Geophysical Research, 2008,113: B01202.
- [16] Mokhtari M, Tutuncu A N. Characterization of anisotropy in the permeability of organic-rich shales[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015,133(1):496-506.
- [17] Kappelmeyer O, Haenel R. Geothermics with Special Reference to Application [M]. Berlin: Gebrueder Borntraeger (Geoexploration Monographs Series), 1974.
- [18] Deming D, Sass J H, Lachenbruch A H, et al. Heat flow and subsurface temperature as evidence for basin-scale groundwater flow, North Slope of Alaska[J]. Geological Society of America Bulletin, 1992,104(5):528-542.
- [19] Davis M G, Chapman D S, Van Wagoner T M, et al. Thermal conductivity anisotropy of metasedimentary and igneous rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 2007,112: B05216.
- [20] Chen G J, Sillen X, Verstricht J, et al. ATLAS III in situ heating test in boom clay: field data, observation and interpretation [J]. Computers and Geotechnics, 2011,38(5):683-696.
- [21] Dao L Q, Delage P, Tang A M, et al. Anisotropic thermal conductivity of natural boom clay[J]. Applied Clay Science, 2014,101:282-287.
- [22] Labus M, Labus K. Thermal conductivity and diffusivity of fine-grained sedimentary rocks[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018,132(3):1669-1676.

(编辑 周红军)

专题征稿

“海洋钻探技术与装备”专题

建设海洋强国,是建设中国特色社会主义的重要组成部分。我国“十三五”规划纲要提出了“深海、深地、深空、深蓝”四个领域的战略技术部署。其中“深海”方面,亟待在深海资源勘探等方面关键技术有所突破,是一项重要的任务目标。以“一核两深三系”为主体的自然资源重大科技创新战略,也把深海探测列为核心内容之一。

近年来,我国海洋地质调查和资源勘探方面取得了丰硕成果。我国两次的大海域天然气水合物试采成功,钻探工程技术在其中都发挥了不可或缺的重要作用。然而,我国海洋钻探技术和装备基础相对还比较薄弱,需要加大研究和攻关力度,不断总结提高,才能更好地为海洋强国、科技强国提供强有力的技术支持。

本刊“海洋钻探技术与装备”专题,征集以下内容稿件(但不限于):

- 海洋地质调查钻探取样技术
- 海上钻探及取样器具
- 海水钻井液、环保钻井液
- 海域天然气水合物勘探技术

- 钻探船及海上(水上)钻探平台
- 海上油气钻井技术
- 水域钻探技术等

稿件要求:参见《探矿工程(岩土钻掘工程)》投稿指南:
http://jour.tkgc.net/ch/first_menu.aspx?parent_id=20150106042322001

论文提交截止时间:2020年8月30日

投稿网址:www.tkgc.net

投稿流程:探矿工程在线(www.tkgc.net)→作者登录→注册→登录→按提示上传稿件(注:选择栏目时请选“海洋钻探专题”)。

欢迎广大科研人员和工程技术人员投稿!

联系人:韩丽丽(879017787@qq.com,13473688373,0316-2096324)

李艺(617140994@qq.com,18515466615,010-68320471)

《探矿工程(岩土钻掘工程)》编辑部

2020年4月