

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.06.009

# 考虑岩石应变软化特征的井筒稳定性分析

幸雪松<sup>1</sup>, 周长所<sup>1</sup>, 曹文科<sup>2</sup>

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:**弹性-应变软化-塑性变形是岩石压缩过程中典型的力学行为, 考虑岩石应变软化特征有助于正确评价井筒的稳定性。通过开展岩芯的三轴压缩实验获取岩样的全应力-应变曲线, 结合 Mohr-Coulumb 强度屈服准则对岩石的强度参数进行反演分析和数值验证, 获得岩样的强度参数随塑性变形的变化规律。运用 FLAC3D 有限差分软件建立井眼模型, 应用应变软化模型计算了井周塑性区分布, 通过与理想弹塑性模型对比, 表明考虑岩石应变软化情况下的井周塑性区范围更大, 井筒更易发生失稳。研究对于确定钻井液密度安全窗口和指导钻井施工具有指导意义。

**关键词:**应变软化; 参数反演; 剪切破坏; 井壁稳定

中图分类号: TE 24

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2021)06-0058-04

## Influence of Rock Strain-Softening Behavior on Wellbore Stability

XING Xuesong<sup>1</sup>, ZHOU Changsuo<sup>1</sup>, CAO Wenke<sup>2</sup>

(1. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China; 2. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Elastic-strain-softening-plastic deformation is a typical mechanical behavior in the process of rock compression. Considering the strain-softening characteristics of rock is helpful to correctly evaluate the wellbore stability. The full stress-strain curves of the rock sample are obtained by carrying out the triaxial compression experiments, furthermore, the strength parameters of the rock sample are analyzed based on the Mohr-Coulumb strength failure criterion and verified by numerical simulation, then the changing law of the strength parameters of the rock sample with the plastic deformation is obtained. The finite difference software FLAC3D is used to establish the borehole model, and the strain softening model is used to calculate the distribution of the plastic zone around the borehole. It is shown that the range of the plastic zone around the borehole is larger when considering the strain softening.

**收稿日期:** 2021-04-06。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51904037); 江苏省高等学校自然科学研究面上资助项目(19KJD440001)。

**作者简介:** 幸雪松(1978—), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师。通信联系人: 曹文科(1984—), E-mail: caowenke@cczu.edu.cn

**引用本文:** 幸雪松, 周长所, 曹文科. 考虑岩石应变软化特征的井筒稳定性分析[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 58-61.

tening behavior compared with the ideal elastic-plastic model, as a result, the wellbore is more prone to instability. The study has guiding significance for determining the safety window of drilling fluid density and guiding drilling operation.

**Key words:** strain-softening; parametric inversion; shear failure; wellbore stability

油气井钻井过程中,因钻开的孔眼打破了原有的地应力场平衡,不合理的钻井液密度会引发井筒失稳,失稳形式包括井壁剪切破坏造成的坍塌和拉伸破坏导致的漏失,从而引起钻井过程中的阻卡、漏失等复杂问题,给钻井作业及后续的固井、完井作业带来较大的风险<sup>[1-2]</sup>。针对井周围岩剪切破坏状态的分析,通常是根据弹性力学理论求解井周应力,然后运用强度准则依据井周应力状态进行判断,或者是使用理想弹塑性理论对井周失稳区域进行分析<sup>[3-5]</sup>。实际上岩石材料达到峰值强度后具有应变软化的特征<sup>[6-11]</sup>,岩石软化后强度由峰值强度降为残余强度,因而充分考虑岩石应变软化特征的井筒稳定性分析才更具合理性。目前,对于应变软化力学行为的表征通常有两种方法:一种是基于应变局部化理论<sup>[12-15]</sup>,认为岩石的软化过程实质是局部岩石发生屈服,最终形成的是局部化屈服带,该理论虽然严谨,但计算过程较为复杂;另一种认为材料变形为整体变形,岩石屈服后为整体的破坏<sup>[16-18]</sup>,该理论是基于经典弹塑性力学,本文即采用此理论进行井筒稳定性的分析。

本文首先开展岩石力学三轴压缩实验,获得岩样的全应力-应变曲线,进而结合 Mohr-Coulumb 屈服准则获得岩样塑性变形过程的强度参数,并结合数值模拟软件进行参数验证,最后运用该强度参数进行了井筒稳定性分析,同时将应变软化模型与理想弹塑性模型进行对比,分析岩石应变软化特征对井筒稳定性的影响规律。

## 1 岩石应力-应变曲线特征

根据岩石应力-应变曲线的特征,HOEK等<sup>[19]</sup>将岩石的力学行为分为3类(图1),即理想弹塑性、弹性-应变软化-塑性和弹-脆-塑性,它们的区别在于岩石达到峰值强度后应力-应变曲线特征的差异。据研究,岩石应力-应变曲线与围压有重要关系,理想弹塑性和弹-脆-塑性的力学行为分别对应高围压和低围压或没有围压的情况。对于常规油气井来说,在井周围岩变形达到峰值强度后,井底钻井液液柱压力产生的围压可使岩石产生应变软化行为,即井底岩石的力学行为应符合弹性-应变软化-塑性的特征。

对渤海渤中19-6区块一口探井3 000 m处东营组泥岩进行取芯,将岩样制备成直径为25 mm、长度为50 mm的圆柱体标准岩芯,运用伺服岩石力学试验机开展强度实验,其中围压分别设定为0,10 MPa和20 MPa,位移加载速率为 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。图2为得到的泥岩不同围压情况下的三轴全应力-应变曲线。当围压为0 MPa时,岩石达到峰值强度后,强度迅速跌落为0,体现出岩

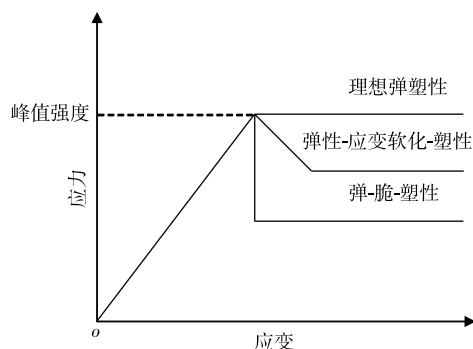


图1 3种典型岩石应力-应变曲线示意图

Fig.1 Stress-strain curves of three typical rocks

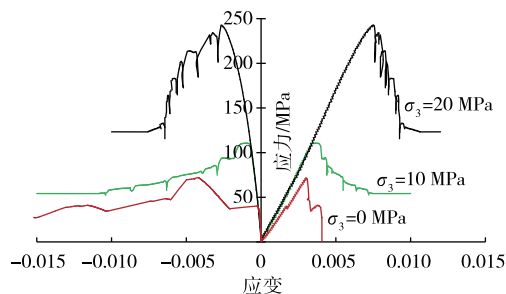


图2 泥岩不同围压下的全应力-应变曲线

Fig.2 Total stress-strain curves of mudstone under different confining pressures

石低围压情况下的脆性特征,当围压增大到 10 MPa 和 20 MPa 时,岩石达到峰值强度后,进入应变软化阶段,最后形成一定的残余强度,即岩石进入塑性阶段后仍有一定的井壁支撑能力,但强度已发生衰减。

## 2 应变软化参数的获取与验证

岩石的破坏通常使用 Mohr-Coulumb 屈服准则加以判断,用主应力形式可表示为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} + 2C \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

式中:  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为岩石的最大和最小主应力;  $C$  为岩石黏聚力;  $\phi$  为岩石内摩擦角。

假设泥岩岩芯在加载过程中,峰值破坏点和峰后阶段均满足 Mohr-Coulumb 屈服准则,岩样达到峰值强度后,因峰后阶段的强度随应变不断变化,屈服准则对应的强度参数  $C, \phi$  也应是变化的。假设岩样加载过程中的弹性参数维持不变,即弹性模量和泊松比数值为恒定值,则若岩石在峰后阶段进行卸载,加载应力将沿图 3 所示卸载路径返回至应力  $o$  点,卸载曲线的斜率为岩石的弹性模量,与横坐标的交点为岩石的轴向塑性应变  $\epsilon_p$ ,由此可得到该塑性应变对应的应力状态。因 Mohr-Coulumb 屈服准则中有黏聚力和内摩擦角两个强度参数,理论上来说利用两条应力-应变曲线中某一塑性应变  $\epsilon_p$  值对应的应力组合 ( $\sigma_1^1, \sigma_3^1$ ) 和 ( $\sigma_1^2, \sigma_3^2$ ) 即可求得对应的强度参数值。根据图 2 中不同围压下的岩样全应力-应变数据可反演得到强度参数随塑性应变的变化规律。经计算该组岩芯峰值强度对应的黏聚力为 9.67 MPa,内摩擦角为  $52.1^\circ$ ,残余强度对应的黏聚力为 0 MPa,内摩擦角为  $48^\circ$ 。

利用 FLAC3d 中应变软化模型,根据岩芯实际尺寸建立数值模型,运用反演出的强度参数数据进行计算,得到岩样的全应力-应变曲线,图 4 为岩样的实验结果和数值模拟计算结果的对比,两者吻合较好,表明本文所建立的应变软化模型可以较好的描述该岩样的力学行为。

## 3 井筒稳定性分析

利用岩芯实验数据获得的强度参数对井筒的稳定性开展数值分析。涉及的地层参数包括:地层深度为 3 000 m、水平最大和最小应力分别为 75 MPa 和 48 MPa、上覆岩层压力为 69 MPa、孔隙压力为 33 MPa、渗透率为  $10^{-18} \text{ m}^2$ 、弹性模量为 32 GPa、泊松比为 0.21。考虑应变软化情况下的井周塑性区分布如图 5(a)所示,而当岩石为理想弹塑性材料时,井周塑性区分布如图 5(b)所示。结果表明岩石材料为理想弹塑性情况下,围岩达到峰值强度后,岩石强度参数维持不变,强度一直维持在最高值,导致井周围岩塑性区较小,井壁破坏较为轻微。当考虑岩石应变软化特征之后,围岩峰后残余强度降低,岩石支

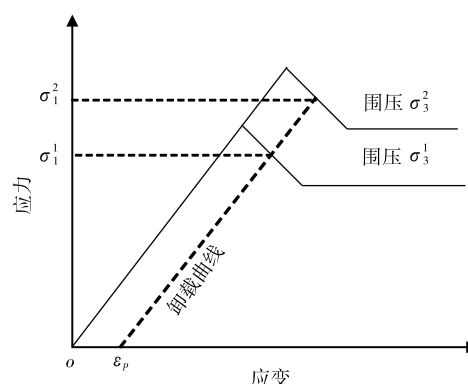


图 3 岩石应力-应变加载曲线与卸载曲线

Fig.3 Stress-strain loading curve and unloading curve of rock

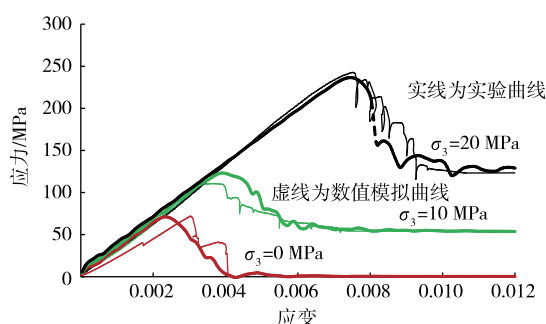


图 4 岩芯应力-应变曲线的实验结果与数值模拟计算结果对比

Fig.4 The experimental results of core stress-strain curves are compared with those of numerical simulation

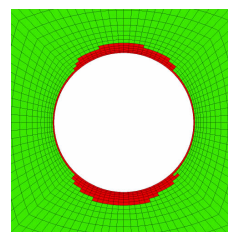
撑能力发生弱化,因而井周塑性区更大,井壁破坏更严重,分析结果与钻井实际情况更吻合。

## 4 结 论

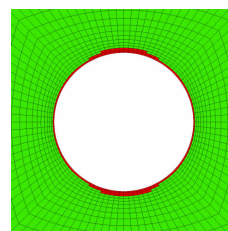
应变软化行为是岩石力学变形的重要特征,通过三轴压缩实验获取了岩样的全应力-应变曲线,根据Mohr-Coulumb强度屈服准则对岩石的强度参数进行了反演和数值验证,获得了岩样的峰值和峰后强度参数。分别运用应变软化和理想弹塑性模型对井筒的稳定性进行了数值分析,表明岩石进入应变软化阶段后,峰后岩石强度降低,导致井壁塑性区范围更大,井筒更易发生坍塌,分析结果与钻井实际更为接近,因而考虑岩石应变软化特征有助于更为准确的评价井筒的稳定性。

## 参考文献:

- [1]赵凯,樊勇杰,于波,等. 硬脆性泥页岩井壁稳定研究进展[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(3): 277-285.
- [2]王倩,周英操,唐玉林,等. 泥页岩井壁稳定影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 171-179.
- [3]袁俊亮,邓金根,蔚宝华,等. 页岩气藏水平井井壁稳定性研究[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 66-70.
- [4]闫传梁,邓金根,蔚宝华,等. 页岩气储层井壁坍塌压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1595-1602.
- [5]张立松,闫相祯,杨秀娟,等. 基于 Hoek-Brown 准则的深部煤层钻井坍塌压力弹塑性分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 85-90.
- [6]张春会,赵全胜,王来贵,等. 三轴压缩岩石应变软化及渗透率演化的试验和数值模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1774-1782.
- [7]王水林,郑宏,刘泉声,等. 应变软化岩体分析原理及其应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 609-622.
- [8]沈华章,王水林,刘泉声. 模拟应变软化岩石三轴试验过程曲线[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1647-1654.
- [9]孙闯,惠心敏楠,张强. 泥岩峰后应变软化行为及围岩-支护结构相互作用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 254-260.
- [10]SUN C, AO Y, WANG L. The research on strain-softening characteristics and local fracture law of deep granite roadway[J]. Complexity, 2020, 2020: 1-13.
- [11]CHEN S L, ABOUSLEIMAN Y N. Wellbore stability analysis using strain hardening and/or softening plasticity models[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 93: 260-268.
- [12]邵龙潭,刘港,郭晓霞. 三轴试样破坏后应变局部化影响的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 385-394.
- [13]黄茂松,李学丰,钱建固. 各向异性砂土的应变局部化分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1772-1780.
- [14]董益峰. 颗粒材料应变局部化的离散元-cosserat 连续体有限元两尺度数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [15]陶帅,王学滨,潘一山,等. 基于摩尔-库仑模型的非线性本构模型的开发及其在应变局部化中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(s1): 403-407.
- [16]陆银龙,王连国,杨峰,等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 640-648.
- [17]胡军,朱巨建. 应变软化模型在 FLAC3D 二次开发中的应用[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 120-123.
- [18]李文婷. 岩石峰后应变软化本构方程及数值模拟方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [19]HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1165-1186.



(a) 考虑岩石应变软化情况下的井周塑性区分布



(b) 理想弹塑性情况下的井周塑性区分布

图5 不同模型情况下的井周塑性区(红色)分布

Fig.5 The distribution of plastic zone (red color) around the well with different conditions