

钻井工艺

井眼变形局部化剪切带数值模拟研究

王学滨¹, 潘一山¹, 杨 梅²

(1 辽宁工程技术大学力学系 2 辽宁工程技术大学机械学院)

摘 要: 井眼剪切破坏是井眼岩石基本破坏形式之一。国际上, 在非线性的固体力学的研究中, 局部化和剪切带等问题已成为研究的热点问题之一。文中采用 FLAC^{3D} 对在类似于平面应变条件下的井眼进行了数值模拟研究, 由模拟结果可见明显的变形局部化现象。采用变形局部化的数值模拟研究可对井眼失效的机理分析、预测和控制提供新的思路。

关键词: 井眼; 岩石; 变形; 剪切带; 数值模拟; 扩容效应

中图分类号: TE 21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-768X(2002)02-0017-03

局部化现象

局部化现象可以看作延性和脆性破坏的前兆, 随后便出现裂纹的扩展。具有强烈剪切变形的窄带称之为剪切带。剪切带或应变局部化现象可以在黑色金属、有色金属、聚合物、韧性单晶体、韧性多晶体、结构钢、粘土、岩石、混凝土、陶瓷等材料中观测到; 此外, 通常在天然土体、人造堤坝、基础、拦水墙、巷道、井眼及其它地质构造物中也可以观测到剪切带或应变局部化现象。应变局部化现象不仅存在于单相固体之中, 而且还广泛存在于多相流体饱和的多孔介质材料之中。自然界中广泛存在多种局部化现象, 如应变局部化、损伤局部化、绝热局部化、孔隙压力局部化、流量局部化和孔隙率局部化等等。

井眼问题的研究方法

通常将井眼简化为厚壁筒问题, 基于传统弹、塑性力学的解析法将其视为平面应力或应变的轴对称问题, 假定厚壁筒沿其圆周均匀破坏。在传统弹、塑性理论的框架内国内学者作了大量有意义的工作^[1~5]。然而在现场和实验中, 观测到的井眼剪切带和岩石剥落现象却并非沿井眼圆周均匀分布。

采用滑移线法可以将井眼问题视为轴对称平面应变或应力的刚塑性极限平衡问题, 可以确定滑移线倾角和极限压力等参数。采用分叉分析方法有助于对剪切带的形成等分叉现象的理解, 通常假定剪切带平直且具有相同的宽度, 而某些实验结果却表明剪切带并非平直, 宽度可变且呈现波纹状, 在剪切

带边界上材料颗粒方向变化急剧, 剪切带内部具有非常大的孔隙率等。基于传统弹、塑性力学的有限元法存在的主要缺陷是: 负刚度问题; 网格依赖性; 不能准确预测出剪切带的厚度、间距和不能较好模拟局部化启动后的行为等。

国外学者对传统弹、塑性理论进行了修正和完善, 典型的方法有应变梯度方法和连续介质微极塑性理论方法。文[6]对厚壁圆筒进行数值分析, 由模拟结果可见清晰的共轭曲线剪切带。采用微极塑性理论, 文[7]在静水压力和稍偏离静水压力条件下对平面应变的井眼进行数值分析, 在后一种情况下模拟结果与实验室及现场观测结果较一致。

拉格朗日元法简介

拉格朗日元法采用了混合离散方法、动态松弛方法和显式差分方法^{[8]~[9]}。该法不形成刚度矩阵, 不必求解大型方程组, 也不必通过迭代以满足本构关系。适合于模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏和塑性流动的力学行为; 适合于模拟地质材料的大变形、失稳、动力、流变、支护及加固、建造及开挖等问题; 同时, 还可以模拟渗流场和温度对岩土工程的影响。该法广泛应用于水电^[9]、矿山、石油等工程领域和地震研究领域, 取得了较好的应用效果。目前, 国内采用该方法开展应变局部化的研究工作还较少^{[10]~[12]}, 在国内石油领域作者迄今仍未见到有关报道。拉格朗日元法的基本思想为^{[8]~[9]}: 在每个时步内均进行下列计算, 即 (a) 由初始节点速度求出新的应变率、应变增量和旋

收稿日期: 2001-07-06; 修回日期: 2002-01-14

作者简介: 王学滨, 硕士, 1998 年毕业于辽宁工程技术大学, 现从事岩石力学理论及岩土工程的数值计算工作。地址: (123000) 辽宁阜新中华路 47 号。

转率;(b)运用本构方程求得单元应力增量和新的单元应力,大变形模式时需进行旋转应力增量修正获得应力增量;(c)求得节点的质量、失衡力和阻尼力进而得到新的节点速度,建立节点的运动方程,在大变形模式需对节点坐标进行几何修正,如此循环,直到失衡力趋于零;若失衡力趋于某一常值,则系统发生了塑性流动;对于动力求解模式不收敛。

作为新型数值方法之一,拉格朗日元法已与离散元法、不连续变形分析、流形元法和半解析元法等一道已成为分析岩土力学问题的强有力的工具^[13]。

井眼岩石本构模型及参数取值

岩石本构模型取为莫尔库仑剪破坏与拉破坏复合的应变软化模型。在屈服面上剪切失效和拉伸失效力点的位置分别由非关联和关联流动准则决定。岩石体积模量取为 1.5×10^{10} Pa,剪切模量取为 1.1×10^{10} Pa,抗拉强度取为 2×10^5 Pa;粘结力、摩擦角与塑性应变的关系见图 1,初始粘结力取为 2.72×10^5 Pa,初始摩擦角取为 44° ,数值计算均采用小变形模式。由于本文各个计算模型厚度方向的尺寸和长、宽两个方向尺寸相比均较小,且在前、后两个平面施加了法向约束,故所模拟的条件类似与平面应变状态。

计算模型见图 2。厚壁圆筒外表面施加法向围压 1×10^6 Pa,内表面施加法向速度 1×10^{-7} m/s,岩石材料的扩容角取 20° 。内表面半径 10 cm,外表面半径 100 cm。

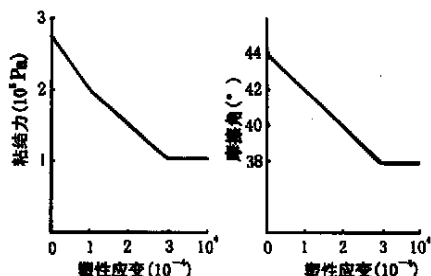


图 1 粘结力、摩擦角与塑性应变的关系

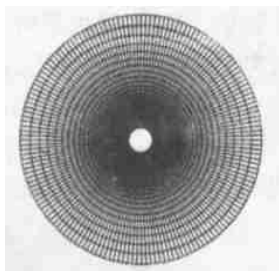


图 2 井眼计算模型

应变局部化模拟结果及分析

数值模拟结果见图 3。为了得到剪切带的不均匀分布规律,预制了一个微小的材料缺陷,其位置见图 3(a),其材料性质为:取体积模量等于剪切模量,即二者均为 1.1×10^{10} Pa,其它参数与各向同性均匀连续的井眼周围岩石相同。图 3(b)、(c)和(d)分别为迭代 2000、6000 和 8000 时间步长时的剪切应变率场。由于在厚壁圆筒内表面施加了常法向速度,即可变位移边界条件,故本文的数值模拟不属于静力问题。由图 3(b)、(c)和(d)可见清晰的共轭曲线剪切带的剪切带图案,这些剪切带在厚壁圆筒内壁首先形成并向远处传递。随着加载时间的增加剪切带长度增加,应变局部化现象增强。由于预制了材料缺陷,剪切带图案的分布规律不完全均匀,而具有了剪切带得以充分演化的优势方向。此外,共轭剪切带并非直线,而呈曲线形态如涡线一样分布于井眼周围。本文的这一结果与国外的模拟结果^[6~7]和大量的实验结果^[14~17](见图 4,图片由左至右依次取自文献[14]、[15]和[16])是比较吻合的。实验中的厚壁圆筒剪切失效模式通常呈反对称形态,对此有多种解释^[13]。

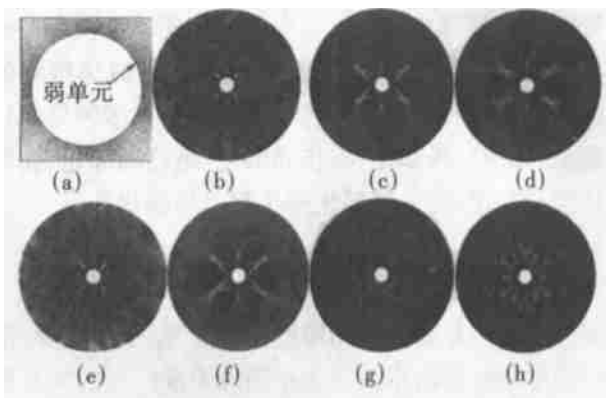


图 3 数值模拟结果



图 4 实验结果

剪切扩容是岩石类材料的基本特性之一,这一特性往往在岩土工程中扮演着重要的角色,甚至是关键的作用。本文在计算中考虑了这种扩容效应。图 3(e)和(f)分别为迭代 2000 和 6000 时间步长时的

体积应变率场,体积应变率越大,剪胀越严重。由此可见,体积应变也局部化,且随着加载时间的增加体积应变局部化现象增强。体积的应变率场和剪切应变率场具有某种程度的相似性。这是因为剪切应变率越大,剪胀越严重,所以体积应变率越大。实际中,体积应变率越大则剪切带内的由剪胀引起的空隙率也越大,故剪切带位置将优先于其它位置破坏,这体现了井眼剪切破坏的不均匀性。图 3(g)和(h)分别为迭代 2000 和 6000 时间步长时的塑性区,可见在本文的计算条件下,塑性区并非为圆环状,这显著区别于厚壁筒问题的静力解。井眼附近的岩石多为剪切破坏,塑性区的形状和剪切带分布规律大体相同,所不同的是剪切带位于塑性区之内,并非所有的塑性区内之单元都具有较高的剪切应变率和体积应变率,显然研究应变率场较塑性区更能揭示材料的剪切破坏实质。

应当指出,本文的数值模拟条件和实际实验条件相比要简单得多,逼真的复现实验结果从而模拟出剪切带的反对称形态有待于进一步努力。

结 论

(1) 采用 FLAC^{3D}对在类似于平面应变条件下的井眼进行数值模拟研究,由模拟结果可见明显的变形局部现象。采用变形局部化的数值模拟研究可对井眼失效的机理分析、预测和控制提供新的思路。

(2) 模拟结果与国外有关结果和大量的实验结果较符合。不仅剪切应变局部化,在剪切带内的剪胀引起体积应变局部化现象,即孔隙度局部化。

(3) 共轭曲线剪切带如涡线一样分布于厚壁圆筒内壁周围,随着加载时间的增加局部化现象增强。

(4) 应变率场较塑性区更能揭示材料的剪切破坏实质。

致谢:数值计算工作得到了长江科学院岩基研究所盛谦教授和丁秀丽高级工程师的帮助,特在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 孙学增,赵黎安,张文,等.求解井眼围岩塑性区应力状态与变形的一种方法[J].大庆石油学院学报,1999,23(1):21~24.
- [2] 张文,孙学增,甘晓飞,等.倾斜地层井眼剪切滑移破

- 坏的计算[J].大庆石油学院学报,2000,24(1):25~27.
- [3] 马德新,方英.井壁岩石流动和软化特性的力学分析[J].钻采工艺,2000,23(1):17~20.
- [4] 刘平德,李瑞营,张梅.斜井中泥页岩井眼稳定性研究[J].石油钻采工艺,2000,22(2):35~37.
- [5] 丰全会,祖峰,邓金根.井壁稳定性研究及其在盐城地区的应用[J].钻采工艺,2000,23(4):22~26.
- [6] Papanastasiou PC,Vardoulakis I G.Numerical treatment of progressive localization in relation to borehole stability[J].International journal for analytical methods in geomechanics,1992,16:389~424.
- [7] Gu C,Anand L. Granular materials Constitutive equations and strain localization[J].Journal of the mechanics and physics of solids,2000,48:1701~1733.
- [8] 张有天,周维垣.岩石高边坡的变形与稳定[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [9] 寇晓东,周维垣,杨若琼.FLAC3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析.岩石力学与工程学报[J],2001,20(1):6~10.
- [10] 王学滨,潘一山,盛谦,等.岩体假三轴压缩及变形局部化剪切带数值模拟[J].岩土力学,2001,22(3):323~326.
- [11] 王学滨,潘一山,丁秀丽,等.孔隙流体对岩体变形局部化的影响及数值模拟研究[J].地质力学学报,2001,7(2):139~143.
- [12] 王学滨,潘一山,马瑾.FLAC^{3D}在岩石变形局部化数值模拟中的应用[J].辽宁工程技术大学学报,2001,20(8),2001,20(4):522~523.
- [13] 龚晓南.21 世纪岩土工程发展展望.岩土工程学报[J],2000,22(2):238~242.
- [14] Vardoulakis I G,Sulem J,Guénot A.Borehole instabilities as bifurcation phenomena[J].Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1988,25:159~170.
- [15] Kachanov L M. Foundations of the theory of plasticity[M]. London: North - Holland Publication Company - Amsterdam,1971.
- [16] Guénot A. Borehole breakout and stress fields[J], Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1989,26:185~195.
- [17] Papanastasiou P C,Vardoulakis I G.Numerical treatment of progressive localization in relation to borehole stability[J].International journal for analytical methods in geomechanics,1992,16:389~424.

(编辑:黄晓川)

and the casing window technology described in this paper, bilayer casing windows are cut safely within short time. This technology is also useful for the cutting window of single layer casing.

Key words : whipstock ,milling cutter ,BHA ,parameter ,casing window

THE NUMERICAL SIMULATION OF SHEAR ZONE ON STRAIN LOCALIZATION OF BOREHOLE

WANG Xuebin¹, YANG Mei² and PAN Yishan¹ (1. Dept. of Mechanics and Engineering Sciences, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Mechanical Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China) ,DPT 25(2) ,2002 :17 ~ 19

Abstract : Shear failure is a basic failure mode of borehole rock. In the international nonlinear solid mechanics field, the problems of localization and shear zone have drawn an extensive attention. In this paper, FLAC^{3D} is applied to simulate the borehole. Results obtained show clear strain localization phenomena. Numerical simulation research of strain localization phenomena can provide a new method for analysis of borehole failure, and for its forecast or control.

Key words : borehole , rock , deformation , shear zone ,numerical simulation ,dilatation effect

RESEARCH AND APPLICATION OF CALCULATION METHOD OF BOTTOMHOLE PRESSURE TESTING IN DRAINAGE GAS RECOVERY WELLS

—The Method of Calculation Bottomhole Pressure in Casing Annular and Its Field Application

WU Mang (Drilling & Production Technology Research Institute, SPA, Guanghan, Sichuan 618300, China), WEN Boqing and ZHOU Jian (Gas Production Research Institute, Southwest Oil & Gas Co., China), and LIN Qi (Southwest Petroleum Institute), DPT 25(2) , 2002 :20 ~ 23

Abstract : Flowing bottomhole pressure (FBHP) on drainage gas recovery wells is obtained by calculating bottomhole pressure of pumping wells at home and abroad. The paper presents the method which gets FBHP by using self-developed instrument and discusses the calculation accuracy of pressure caused by pseudo-gas column and mixed gas liquid column. Meanwhile, the paper compares the testing calculation pressure with actual measurement pressure.

Key words : drainage gas recovery ,bottomhole pressure ,testing ,calculation

THE EFFICIENT PRODUCTION TECHNOLOGY ON WATER-YIELDING GAS WELL

HUANG Yan, XIE Nanxing and TAN Jinfeng (Gas Production Research Institute, Southwest Oil & Gas Co. of China, Guanghan, Sichuan 618300, China) ,DPT 25(2) , 2002 :24 ~ 27

Abstract : Most reservoirs in Sichuan basin are water-yielding ones. Over past 30 years, in the development practice on water-yielding reservoirs, many production technique and management experience are summarized. This paper introduces the harm of the water yielding in Sichuan basin gas wells, summarizes the fruit and technique development of increasing gas production and recoverable reserves. The suggestions on the future technology development are also proposed.

Key words : water-yielding gas well , recovery method , drainage gas recovery , technique development , suggestion

RESEARCH OF ECONOMIC EVALUATION METHOD ON FRACTURING AND ACIDIZING

SANG Yu (Gas Production Research Institute, Southwest Oil & Gas Co. of China, Guanghan, Sichuan 618300, China) ,DPT 25(2) ,2002 :28 ~ 30

Abstract : Utilizing the industry technology economic evaluation theory, this paper presents the establishing method of economic evaluation index system in fracturing and acidizing operations, and deduces the counting formula. Different from the former index counting method, this method induces the concept of time value of the funds, so the obtained dynamic index is more scientific, reasonable, and practical. The method is simply available in computer, which has a strong operational capability and practicability and good prospects.

Key words : fracturing ,acidizing ,economic evaluation ,index system

APPLICATION OF EXPERT SYSTEM IN THE LAYOUT DESIGN OF OILFIELD FLOODING PIPELINE NETWORK MODIFICATION

GAO Sheng (and CHANG Yulian (Daqing Petroleum Institute, Anda, Heilongjiang 151400, China) , DPT 25(2) ,2002 :31 ~ 33