

◀“863”计划专栏▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2010.04.005

加载速度对单齿压入破岩过程的影响

石祥超 孟英峰 李皋 李家学 赵向阳

(油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学),四川 成都 610500)

摘要:由于试验条件及途径对单齿压入试验结果有重要影响,因此,应用三维显示有限差分程序,模拟了单齿压入岩石的破碎过程,分析了不同加载速度对单齿压入破岩过程的影响。结果发现,随着加载速度的加快,破坏单元的累计总数减少,破坏单元的累计数曲线波动幅度加大;随着加载速度的加快,峰值强度及所对应的侵入深度增大,侵入载荷曲线的波动幅度增大;当加载速度较低时,侵入载荷曲线的波动幅度不大,并呈现出逐渐上扬的趋势;当加载速度较快时,侵入载荷曲线呈现出波动衰减趋势。

关键词:单齿压入;破岩机理;加载速度;数值模拟

中图分类号:TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)04-0019-03

The Effect of Loading Rate on Single-Tooth Feeding and Breaking Rock

Shi Xiangchao Meng Yingfeng Li Gao Li Jiaxue Zhao Xiangyang

(National Important Laboratory about Oil and Gas Reservoir's Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: Single-tooth feeding test is a primary means for investigating the mechanism of breaking rocks and evaluating the rock hardness. The testing condition and procedure have an important effect on testing results. This paper describes the simulating process of single-tooth feeding and breaking rock using FLAC3D, and analyzes the effect of loading rate on single tooth breaking rocks. It shows that loading rate has an important influence on the process of single-tooth feeding and breaking rock. As the loading velocity increases, the cumulative amount of breaking units decreased; the fluctuation amplitude of curve increased; the peak strength and corresponding invasion depth increased, and the fluctuation amplitude of loading curve increased. When the loading velocity is relatively low, the fluctuation amplitude of invasion load curve is small and gradually increases. When the loading velocity is relatively high, the fluctuation of invasion load curve attenuates.

Key words: single bit-tooth penetration; rock breaking mechanism; loading rate; numerical simulation

单齿压入试验一直被用于研究岩石的破碎机理及指导破岩工具的设计,同时,单齿压入岩石的力学性质也被用于评价岩样的坚硬程度^[1-4]。前人利用试验和数值模拟方法研究了单齿压入破岩石的力学行为^[2,5-11],形成了诸多成果。但由于工具破岩机理的复杂性,认识岩石在不同应力条件下的破碎机理将是一项长期的任务^[3]。拉格朗日法是一个显式的有限差分程序,能够有效模拟地质类材料的破碎过程和宏观力学条件^[12-13]。基于此,笔者应用三维显式有限差分程序(Flac3D)分析了单齿压入岩石的破碎过程,编写了Fish函数用于统计压入过程中岩石破坏单元数的程序,探讨了加载速度对单齿压入岩石破碎过程和应力-位移曲线的影响。

1 本构关系与计算模型

选用直径100 mm、高度50 mm的圆柱体岩样(见图1),压头采用直径3 mm、高度5 mm的平底

收稿日期:2010-01-21;改回日期:2010-05-31

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“气体制进技术与装备”(编号:2006AA06A103)及国家重大专项“低渗气藏特殊复杂地层高效钻井关键技术”(编号:2008ZX05022-005)部分研究内容

作者简介:石祥超(1981—),男,河北清河人,2005年毕业于河北农业大学机械设计制造及其自动化专业,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事提高机械钻速机理方面的研究。

联系方式:(028)83032459,sxcdream@163.com

柱齿,在小变形模式下进行计算。岩样的体积模量取 27 GPa,剪切模量取 17 GPa。岩样的破坏准则采用摩尔-库仑破坏和拉伸破坏复合模型,内摩擦角取 35°,内聚力取 27 MPa,拉伸强度取 0.4 MPa。柱

齿采用弹性模型,其弹性模量和剪切模量远大于岩样,近似为刚体。采用 3 种计算方案:方案 1 是 $v_0 = 5.0 \times 10^{-7}$ m/时步,方案 2 是 $v_0 = 10.0 \times 10^{-7}$ m/时步,方案 3 是 $v_0 = 20.0 \times 10^{-7}$ m/时步。

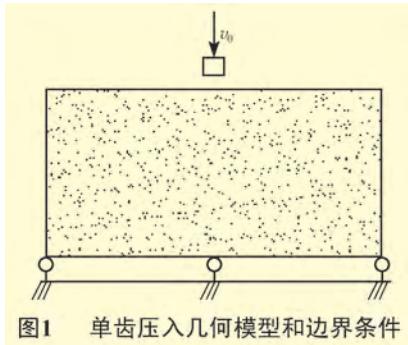


图1 单齿压入几何模型和边界条件

2 模拟结果分析

2.1 单齿压入岩样破坏过程

图 2~4 分别为方案 1、2、3 中单齿压入岩石破碎的过程,其中,红色单元为拉伸破坏单元,黄色单元为剪切破坏单元,绿色单元为拉伸和剪切联合破坏单元,蓝色单元为发生破坏的单元。

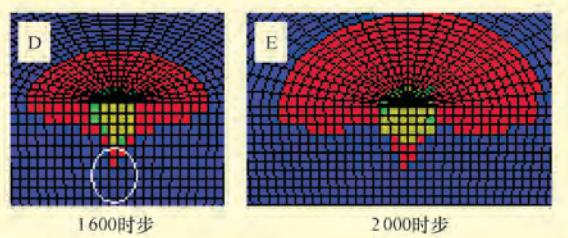


图2 方案1不同时步岩石的塑性区分布

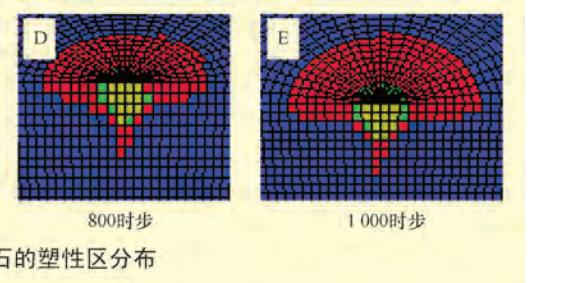


图3 方案2不同时步岩石的塑性区分布

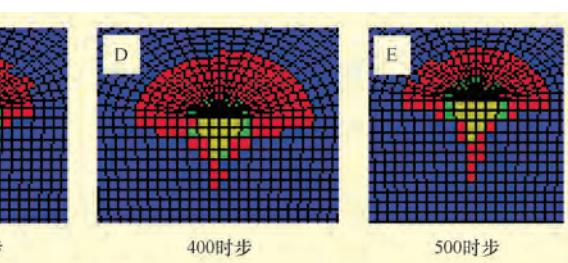


图4 方案3不同时步岩石的塑性区分布

从图 2 可以看出,随着侵入位移的增加,在柱齿下方出现了剪切压实区,而在柱齿周围逐渐产生了较大范围的拉伸破坏区,在剪切压实区的下面也出现了小范围的拉伸破坏区,这进一步印证了文献[8]的结论。在柱齿压入过程中,由于岩石受到挤压和膨胀的作用产生了较大的拉应力,这是驱使径向、侧向和中间裂纹扩展的主控因素。从图 2 还可以看出,在 1 200 时步(图 2(C))时出现了中间裂纹扩展单元,在 1 600 时步(图 2(D))时出现了弹性恢复。

2.2 加载速度对岩石破碎过程的影响

由图 2~4 可知,在方案 1、2 中,随着柱齿压头的下移,岩石破坏单元的体积不断增大,且拉伸破坏单元的体积大于剪切破坏单元的体积,随后剪切破坏单元的体积增速减小,拉伸破坏单元的体积增速增大,但是在方案 3 中,情况却大不相同。比较图 2(A)、图 3(A)、图 4(A)可以看出,在柱齿压头相同的位移下,方案 3 中的柱齿压头周围仅产生

了较小范围的拉伸破坏单元,同时剪切破坏单元数目同样较少。从图4可以看出,当加载速度较大时,单齿压入破岩过程极不稳定:当200时步时,出现了不连续的拉伸破坏单元;当300时步时,拉伸破坏单元又重新分布,有些破坏单元出现了弹性恢复。从图4(D)、图4(E)可以看出,400时步时的破坏区域大于500时步时的破坏体积,这可能是由于加载速度较大时,压头的侵入在压头周围形成的拉应力得不到有效传递,并且已经破坏的单元发生弹性恢复的程度较大,使岩样单元的破坏变得极其不稳定造成的。

图5为不同加载速度下的破坏单元累计数-侵深曲线。从图5可以看出,方案1的破坏单元累计数-侵深曲线波动幅度不大,随着加载速度的加快,曲线波动幅度加大,这可能是由于当加载速度较快时,试样内部的应力更加不均匀。从图5还可以看出,随着加载速度的加快,单齿压入破坏单元累计数减小,这可能是由于当加载速度较快时,试样内部的应力得不到充分传播和转移。

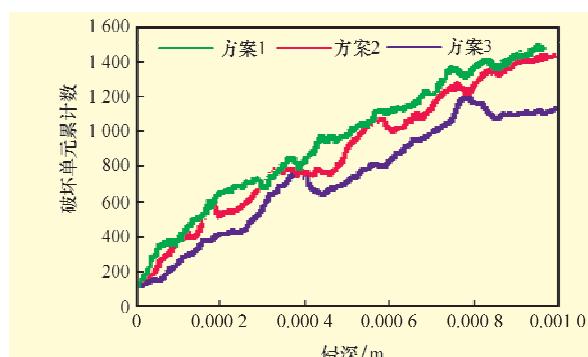


图5 不同加载速度下破坏单元累计数-侵深曲线

2.3 加载速度对载荷-侵深曲线的影响

随着加载速度的加快,峰值强度及所对应的侵入深度有较大提高,如图6所示。当加载速度较慢(方案1、2)时,侵入载荷曲线波动幅度不大,并呈现

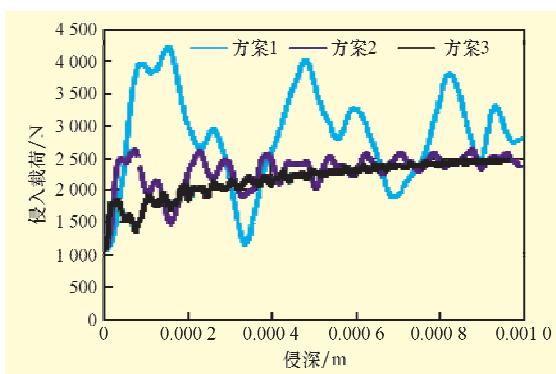


图6 不同加载速度侵入载荷-侵深曲线

出逐渐上扬的趋势;当加载速度较快(方案3)时,侵入载荷曲线呈现出波动衰减趋势,且随着加载速度的加快,曲线的波动幅度增大,其原因是加载速度较大造成了试样内部受力极其不均匀,短时间内产生较大的体积破坏,体积破坏又使载荷产生了较大的卸荷作用,这进一步验证了文献[7]的结论。

从以上分析可以看出,在进行一组岩石的硬度和塑性评价试验时,应该保持恒定的加载速度才能保证评价结果的客观性。

3 结 论

1) 随着加载速度的增加,破坏单元的累计总数减少,破坏单元累计数曲线波动幅度加大。

2) 随着加载速度的加快,峰值强度提高,所对应的侵入深度增加;当加载速度较慢时,侵入载荷曲线的波动幅度不大,并呈现出逐渐上扬的趋势;当加载速度较快,侵入载荷曲线呈现出波动衰减趋势。

3) 在进行破岩机具或岩石的坚硬程度评价时,应保持恒定的加载速度,这样才能保证评价的客观性。

参 考 文 献

- [1] 马德坤.牙轮钻头工作力学 [M].2 版.北京:石油工业出版社,2009:139-150.
- [2] 蒋宏伟,王克雄,翟应虎,等.围压下牙轮钻头单齿对不同岩石的破岩试验[J].天然气工业,2007,27(10):60-62.
- [3] 徐小荷,余静.岩石破碎学[M].北京:煤炭工业出版社,1984:59-97.
- [4] 王桂华,程远方,梁何生.岩屑显微硬度法确定地层力学参数[J].石油钻探技术,2003,31(3):7-9.
- [5] Maurer W C. Bit-tooth penetration under simulated borehole conditions[J]. JPT, 1965, 17(2):1433-1442.
- [6] Lundquist R G. Hemispherical indentation and the design of "Button Bits" for percussive drilling: Proceedings of the 22nd U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Cambridge, June 29—July 2, 1981[C].
- [7] 黄士芳,金海洞.静压作用下的岩样声发射[J].东北工学院学报,1981,27(2):91-100.
- [8] 赖海辉,汪占辛.岩样静压入破碎中形成裂缝的应力性质[J].中南冶金学院学报,1984,39(1):11-18.
- [9] Kou S Q, Liu H Y, Lindqvist A, et al. Rock fragmentation mechanisms induced by a drill bit[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(增刊1):527-532.
- [10] Liu H Y, Kou S Q, Lindqvist P A, et al. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4):491-505.
- [11] Liu H Y. Numerical modelling of rock fragmentation process by mechanical tools[D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2004.

[审稿 邹德永]