

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 10. 026

# 岩芯饼化机制及应力分析

马天辉<sup>1,2</sup>,王 龙<sup>1,2</sup>,徐 涛<sup>3</sup>,于 群<sup>1,2</sup>

( 1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116023 ;2. 大连理工大学 岩石破裂与失稳研究所,辽宁 大连 116024 ;3. 东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819 )

**摘 要 :**采用数值模拟方法从不同地应力组合方式入手探究了地应力对岩芯饼化的影响.研究表明 :当地应力超过一定值时 ,出现岩芯饼化现象 ,即高地应力才会引起岩芯饼化 ,当径向应力达到 35 MPa 时 ,岩芯开始出现饼化现象 ,径向应力是影响岩芯饼化的主要因素 ,而轴向应力仅使岩芯表面产生局部破坏 ,径向应力一定的情况下 ,随着轴向应力的增大 ,岩芯饼化逐渐减弱 ,岩芯饼化的形成过程以剪切破坏为主 ,并伴有少量的拉破坏 ,岩芯饼化现象的发生是一个复杂的力学过程.

**关 键 词 :**岩芯饼化 ;径向应力 ;轴向应力 ;剪切破坏 ;拉破坏

中图分类号 :TV 223.3      文献标志码 :A      文章编号 :1005 - 3026( 2016 )10 - 1491 - 05

## Mechanism and Stress Analysis of Rock Core Discing

MA Tian-hui<sup>1,2</sup>,WANG Long<sup>1,2</sup>,XU Tao<sup>3</sup>,YU Qun<sup>1,2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering ,Dalian University of Technology ,Dalian 116023 ,China ;2. Institute of Rock Instability and Seismicity Research ,Dalian University of Technology ,Dalian 116024 ,China ;3. School of Resources & Civil Engineering ,Northeastern University ,Shenyang 110819 ,China. Corresponding author :MA Tian-hui ,E-mail :Tianhuima@dlut.edu.cn )

**Abstract :** Numerical simulation method was used to explore the influence of in-situ stress on rock core discing under different stress combinations. The results showed that when the in-situ stress exceeds a certain value ,rock core discing occurs. When the radial stress reaches 35 MPa ,rock core discing occurs ,and the radial stress is the main factor that affects rock core discing ,while the axial stress only leads to the partial failure on core surface. At the same radial stress ,the core discing weakens with the increase of axial stress. The formation process of core discing is mainly dominated by shear failure ,accompanied with a little tension failure. Rock core discing is a complex mechanical process.

**Key words :** rock core discing ;radial stress ;axial stress ;shear failure ;tension failure

岩芯饼化是深部及高地应力状态下岩石钻芯所发生的现象.我国的拉西瓦水电站、二滩电站、锦屏 II 级水电站等都存在岩芯饼化现象.实践观察和理论分析表明 ,地应力大小与钻芯是否会出现饼化及岩芯饼化的厚度有着内在的联系<sup>[1]</sup>.

自 20 世纪 50 年代末期 ,国内外就开始了岩芯饼化现象的研究并将其确定为推测高地应力的方法之一. Jaeger 等<sup>[2]</sup>发现 ,岩体所受水平应力越高 ,岩芯越易饼化 ,且认为饼化是张拉破坏的结果. Obert 等<sup>[3]</sup>通过试验发现岩芯饼化始于岩芯

外表面 ,并认为饼化是由剪应力引起的. 侯发亮<sup>[4]</sup>推导出了岩芯饼化的临界地应力公式及地应力与岩饼厚度的关系式 ,并应用该公式推测出二滩地应力.

近些年来 ,国际学者开始更加重视地应力值与岩芯饼化的关系 ,并借助物理实验和数值模拟对其加以研究<sup>[5-8]</sup>. Lim 等<sup>[7]</sup>对 Lac du Bonnet 花岗岩进行现场试验 ,分析了地应力值与岩芯饼化的关系. Corthésy 等<sup>[8]</sup>通过 FLAC 软件建立了二维应变软化模型 ,并模拟了岩芯饼化产生的机制.

综上所述,岩芯饼化现象的发生是一个复杂的力学过程,其中涉及很多的影响因素,而国内外对岩芯饼化影响因素的研究很少<sup>[1]</sup>.本文借助真实破裂过程分析软件(RFPA<sup>2[9]</sup>)建立了一系列的数值模型方案,通过数值模拟实现了裂纹扩展过程的可视化,从而观察到岩饼形成的各个阶段,为获取地应力与岩芯饼化的关系提供了新的研究思路.

### 1 数值模拟方案

由于岩芯饼化现象与地应力密切相关,因此,有必要分别对径向应力与轴向应力对岩芯饼化所起的作用进行研究.如图 1 所示,模型共设置三种加载方式并固定大小保持不变.模型大小为 500 mm×500 mm,划分 500×500=250 000 个单元,岩芯直径为 40 mm,岩芯总长 240 mm.依据

Obert 等<sup>[3]</sup>的试验结果,忽略了钻头压力及水压对岩芯饼化的影响.本次模拟所采用材料的力学参数如表 1 所示.

### 2 数值模拟结果

#### 2.1 只含径向应力时的岩芯饼化分析

由图 2 可知,径向应力在 5~30 MPa 之间时,没有出现饼化现象,但当径向应力达到 35 MPa 时,如图 2c 所示,微裂纹开始在岩芯底部出现,并形成长度不一的岩饼.当径向应力继续增大到 58 MPa 时,形成了等间距的上凹下凸的“灯盏状”的岩饼,如图 2d 所示,文献[10]对这种形状岩饼的形成机理进行了详细分析.由图 2 可知,径向应力是引起岩芯饼化的重要因素,而且随着径向应力的增大,岩饼的厚度越来越薄.

表 1 花岗岩细观力学参数  
Table 1 Mesoscopic mechanical parameters of granite

均质度	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)
5	215	65	0.2	55

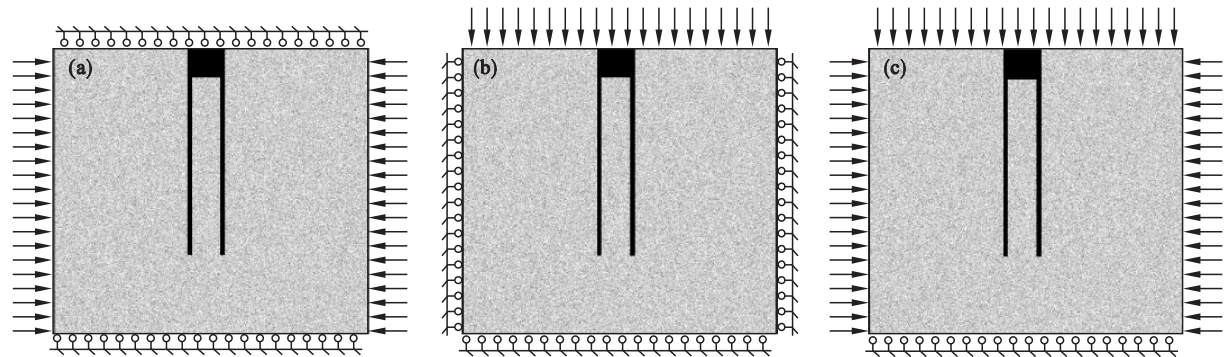


图 1 不同加载方式  
Fig. 1 Different loading method  
(a)—径向应力加载;(b)—轴向应力加载;(c)—双向应力加载.

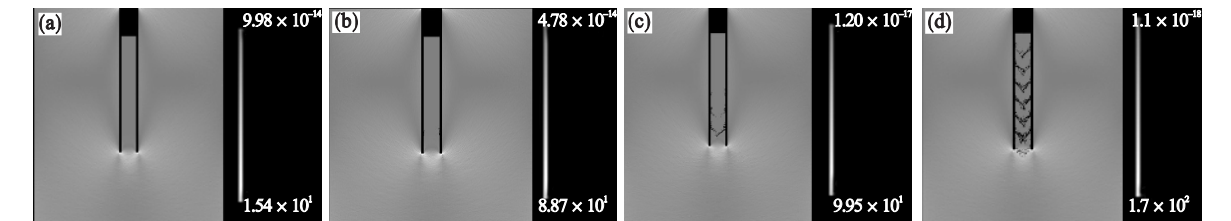


图 2 不同径向应力下的剪应力破坏  
Fig. 2 Shear failure under various radial stresses  
(a)—5 MPa;(b)—30 MPa;(c)—35 MPa;(d)—58 MPa.

根据岩芯饼化时主裂纹出现的位置,沿着主裂纹方向截取了单元应力的数据信息(图 3~图 5).由图 3 可知,随着开挖的进行,单元所受的最大剪应力逐渐增大.这是由于开挖使得单元应力

得以释放,并在岩芯根部出现应力集中进而使底部岩芯单元承受了更大的剪应力.图 4 和图 5 的主应力曲线表明,单元受到了拉压应力的作用.侯发亮<sup>[4]</sup>认为饼状的形成可能是由于剪应力和主

拉应力所引起的破坏,而本文中数值模拟的结果正好验证了该作者的推测.

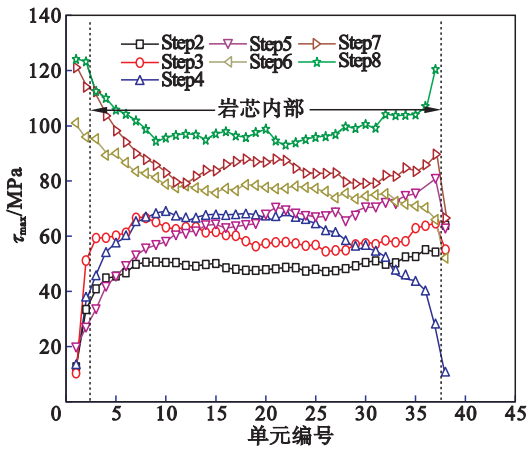


图 3 最大剪应力曲线

Fig. 3 Maximum shear stress curves

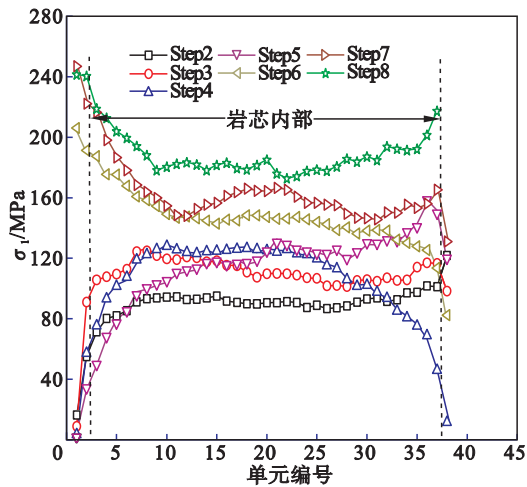


图 4 最大主应力曲线

Fig. 4 Maximum principal stress curves

结合破坏图和应力曲线图可知,在只有径向应力的条件下,随着径向应力的增大,岩芯逐渐出现饼化现象,而且岩饼越来越薄,其形状为“灯盏状”.岩芯饼化过程主要受剪切破坏,伴有少量的拉破坏.由此可见,径向应力是引起岩芯饼化现象的重要因素之一.

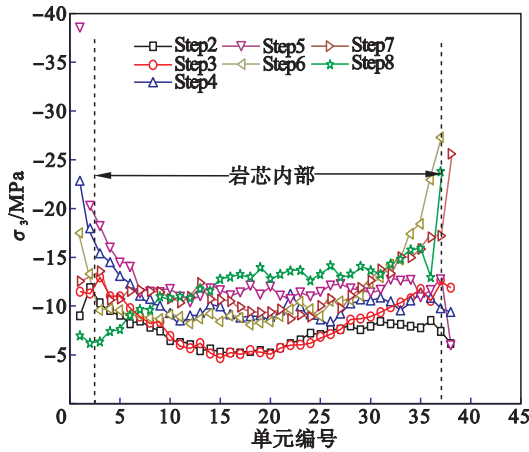


图 5 最小主应力曲线

Fig. 5 Minimum principal stress curves

## 2.2 只含轴向应力时的岩芯饼化分析

由图 6 可知,随着开挖的进行,由于卸载引起的轴向应力的调整只对岩芯表面产生了局部破坏,且破坏没有往岩芯内部发展.因此,轴向应力的增大仅使岩芯表面发生了严重破坏,而对岩芯内部几乎没有影响.比较图 2 和图 6 可知,轴向应力引起的岩芯饼化现象与径向应力引起的结果相差甚远.为了更容易说明轴向应力对岩芯饼化的影响,本文列举了轴向应力为 100 MPa 时破坏的

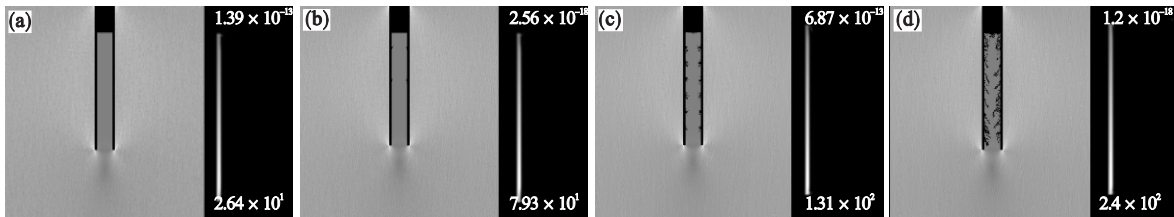


图 6 不同轴向应力下的剪应力破坏

Fig. 6 Shear failure under various axial stresses

(a)—20 MPa ; (b)—60 MPa ; (c)—100 MPa ; (d)—200 MPa.

应力图并对其加以分析,但在实际工程中的轴向地应力要低于此值.

由图 3 可知,岩芯内部发生剪切破坏时的最大剪应力基本都大于 40 MPa,而图 7 所示的岩芯内部单元在低于 20 MPa 时即可达到最大剪应力,只有岩芯表面的局部位置达到了 40 MPa.可知,轴向应力没有使岩芯内部单元达到自身的抗剪强度,从而岩芯内部没有发生破坏.图 8 所示的岩芯表面单元所受的最小主拉应力在 -20 MPa 以下,

超过了单元的抗拉强度,从而使得岩芯表面发生了破坏.由此可知,随着开挖的进行,轴向应力只在岩芯表面产生较大的剪应力和拉应力,并使单元发生破坏,而在岩芯内部只产生了低于抗剪强度的剪应力值,单元并没有发生破坏.因此,轴向应力只是引起岩芯表面产生局部破坏,且轴向应力不是引起岩芯饼化现象的主要原因,这一点 Obert 等<sup>[3]</sup>已经通过物理试验证实.

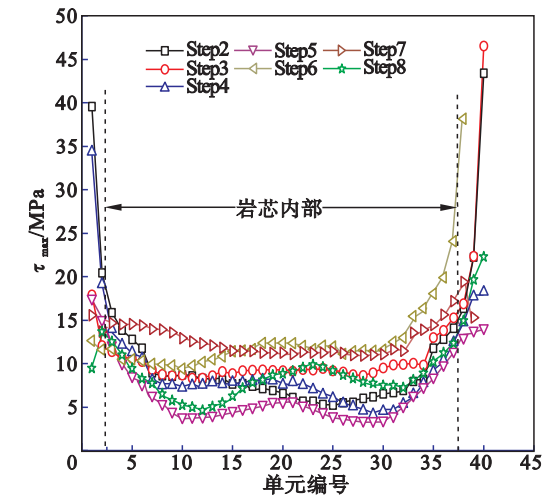


图 7 最大剪应力曲线图  
Fig. 7 Maximum shear stress curves

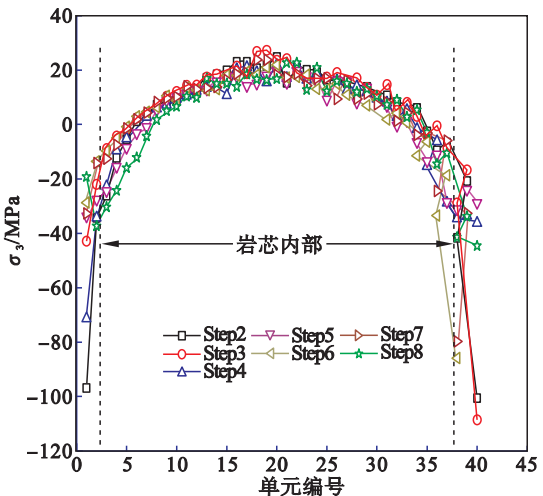


图 8 最小主应力曲线  
Fig. 8 Minimum principal stress curves

2.3 两应力同时存在时的岩芯饼化分析

由以上分析知,径向应力对岩芯饼化的产生起到了主要作用,而轴向应力只是在岩芯表面产生局部破坏.将径向应力固定为 50 MPa,逐渐变

化轴向应力,其径向应力与轴向应力的比值(以下简称应力比)分别为 2.5,1.25,1.0,0.5,计算结果如图 9 所示.

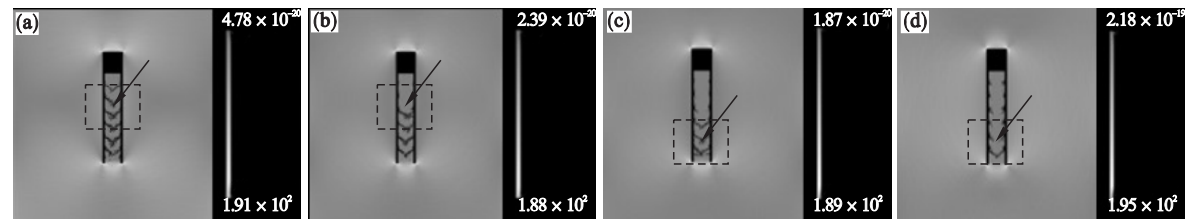


图 9 不同应力比下的剪应力破坏  
Fig. 9 Shear failure under various stress ratios

(a)—应力比为 2.5 ;(b)—应力比为 1.25 ;(c)—应力比为 1.0 ;(d)—应力比为 0.5 .

结合图 2 和图 6 的岩芯破坏情况,以及图 9 的计算结果可知,随着轴向应力的增大(应力比减小),岩芯饼化现象逐渐减弱,即图中箭头所指位置:从岩芯端点向下来看,上部饼化现象随着应力比的减小逐渐减弱.计算结果表明,应力比值小于 1.25 时可以阻止岩芯形成完整的岩饼,只是在表面形成局部的破坏.

为了进一步分析应力比所起到的阻止作用,现以应力比为 0.5 为例,结合三种不同加载情况下的应力图进行分析.就岩芯内部而言,图 5 所示的拉应力数值在 -5 ~ -15 MPa 之间,图 8 所示的拉应力数值在 -10 ~ 30 MPa 之间,而图 10 所示的拉应力数值在 -25 ~ 25 MPa 之间.这说明由于轴向应力引起的单元应力与由于径向应力引起的单元应力的方向在岩芯内部是相反的.轴向应力越大,其数值越接近径向应力引起的单元主应力的数值,由于符号相反,相互抵消了一部分数值,使得岩芯内部没有发生破坏.

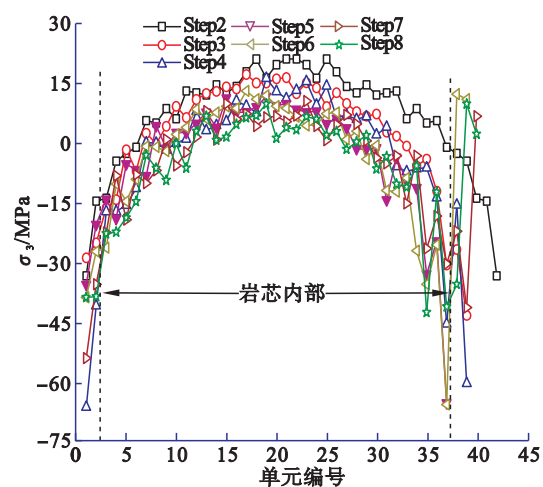


图 10 最小主应力曲线  
Fig. 10 Minimum principal stress curves

表 2 列举了我国一些工程中出现的岩芯饼化现象产生的岩体力学条件<sup>[6]</sup>.此次数值模拟恰好验证了饼化现象发生条件的合理性,并为实际工程提供了理论依据.

表 2 我国一些地区岩芯饼化产生的介质及力学条件

地点	岩性	弹性弹模/GPa	产生岩饼的应力量级范围/MPa
四川二滩	正长岩	45	30 ~ 60
甘肃金川矿	片麻岩	40	30 ~ 50
浙江天荒坪	花岗斑岩	42	28 ~ 35
青海拉西瓦	花岗岩	57	30 ~ 58

3 结 论

1) 径向应力在 5 ~ 30 MPa 时 ,没有发生饼化现象 ,但当径向应力达到 35 MPa 时 ,随着开挖的进行 ,岩芯开始出现饼化现象 ,径向应力是引起岩芯饼化的重要因素.

2) 轴向应力只是使得岩芯表面产生拉破坏 ,而岩芯内部没有裂纹产生 ,轴向应力不是引起岩芯饼化现象的主要因素.

3) 径向应力与轴向应力比低于 1. 25 时 ,仅在岩芯表面发生了一定程度的破坏 ,而岩芯内部完好无损.

参考文献：

[ 1 ] 姜谟男 ,曾正文 ,唐春安. 岩芯成饼单元安全度三维数值试验及地应力反馈分析[ J ]. 岩石力学与工程学报 ,2010 ,29 ( 8 ) :1610 - 1617.  
( Jiang An-nan ,Zeng Zheng-wen ,Tang Chun-an. Three-dimensional numerical test of element safety degree of rock core discing and feed-back analysis of geostresses[ J ]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2010 , 29( 8 ) :1610 - 1617. )

[ 2 ] Jaeger J C ,Cook N G M. Pinching off and discing of rock [ J ]. *Journal of Geophysical Research* ,1963 ,68 ( 6 ) : 1759 - 1765.

[ 3 ] Obert L ,Stephenson D E. Stress conditions under which core discing occurs[ J ]. *Society of Mining Engineer* ,1965 ,232 ( 3 ) 227 - 235.

[ 4 ] 侯发亮. 岩芯饼化的临界地应力及岩饼厚度与地应力的关系[ J ]. 武汉水利电力学院学报 ,1985( 1 ) 37 - 48.  
( Hou Fa-liang. Critical ground stress of core discing and the relation between thickness of rock core and ground stress[ J ]. *Engineering Journal of Wuhan University* ,1985( 1 ) :37 - 48. )

[ 5 ] Kanga S S ,Ishigurob Y ,Obarac Y. Evaluation of core discing rock stress and tensile strength via the compact conical-ended borehole overcoring technique [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2006 43( 8 ) :1226 - 1240.

[ 6 ] 王士天 ,黄润秋. 岩芯饼裂机制的数值模拟研究[ J ]. 地质灾害与环境保护 ,1990 2( 1 ) 4 - 14.  
( Wang Shi-tian ,Huang Run-qiu. Numerical simulation study on mechanism of core discing[ J ]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation* ,1990 ,2 ( 1 ) : 4 - 14. )

[ 7 ] Lim S S ,Martin C D. Core discing and its relationship with stress magnitude for Lac du Bonnet granite[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* ,2010 ,47 ( 2 ) 254 - 264.

[ 8 ] Corthésy R ,Leite M H. A strain-softening numerical model of core discing and damage[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2008 45( 3 ) 329 - 350.

[ 9 ] Tang C A. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity[ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* ,1997 34( 2 ) 249 - 261.

[ 10 ] 李树森 ,聂德新 ,任光明. 岩芯饼裂机制及其对工程地质特性影响的分析[ J ]. 地球科学进展 ,2004 ,19 ( sup1 ) , 376 - 379.  
( Li Shu-sen ,Nie De-xin ,Ren Guang-ming. The fracture mechanism of discal drill core and its influence on characteristic of engineering geology[ J ]. *Advance in Earth Sciences* 2004 ,19( sup1 ) 376 - 379. )