

隧道围岩挤压变形问题探究

王成虎¹, 沙 鹏¹, 胡元芳², 李苍松², 郭啟良¹

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 中铁西南科学研究院有限公司, 成都 610031)

摘 要: 隧道围岩大变形是目前公路、铁路隧道建设中遇到的重要科学问题。工程实践中, 隧道围岩大变形主要是由于围岩遭受剪切破坏而产生了流变而导致的, 部分隧道的围岩大变形是由于围岩成分中的亲水矿物遇水发生水化学反应而发生体积膨胀产生的, 故隧道围岩大变形可以分为应力型、材料性和结构型 3 类。通过全面分析前人的研究成果, 可以将隧道围岩相对变形 3% 作为划分隧道内是否发生大变形的定量评价指标。而对于应力型围岩大变形, Hoek 提出的隧道围岩径向变形和掌子面变形预测公式较好地预测了施工现场的围岩变形量, 其现实意义较为明显, 但需要针对不同的工程条件调整原地应力的估算公式或者考虑围岩二次应力场的赋存状态。对于材料型和结构型围岩大变形的变形量预测, 目前仍然是一块研究的空白区, 需要进一步开展相关工作。

关 键 词: 围岩; 大变形; 挤压变形; 强度应力比; 膨胀性围岩

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of squeezing deformation problems during tunneling

WANG Cheng-hu¹, SHA Peng¹, HU Yuan-fang², LI Cang-song², GUO Qi-liang¹

(1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China;

2. Southwest Research Institute of China Railway Group Limited, Chengdu 610031, China)

Abstract: The squeezing problem is one of the most tuff problems that appear during the construction of highway and railway tunnels. In the engineering practice, the squeezing problem is mainly caused by the creep of rock mass due to the shearing failure. Some squeezing problem is created by the swelling due to the reaction between the clay minerals of rock and the water present in the rock mass. Therefore, the squeezing problem can be classified into three categories: stress induced, swelling induced and structure induced. According to the research findings made by others, the tunnel strain of 3% can be adopted as a qualitative classification criterion to judge whether there is a severe squeezing problem. For the stress induced squeezing problem, the deformation prediction equation put forward by Hoek can estimate the deformation magnitude of a tunnel fairly well; so these equations are of practical significance. However, for different engineering conditions, the estimate method for in-situ stresses or the secondary stresses has to be adjusted for special purpose. The deformation prediction of swelling and structure induced squeezing problem, there still are lots of work to do in the future.

Key words: surrounding rock mass; large deformation; squeezing deformation; strength-stress ratio; swelling rock mass

1 前 言

高地应力作用是岩体地下工程需要重点考虑的影响因素之一, 笔者对高地应力的研究现状及具体判定标准进行了详尽地讨论^[1]。然而, 清楚了高地应力的概念后工程设计人员更加关注高地应力作用下隧道围岩的变形破坏是什么样的? 在高地应力作用下隧道围岩的变形破坏可以分为两类: 一类是严重的

脆性破坏或者岩爆, 另一类是地下开挖空间围岩大变形^[2]。对于公路隧道和铁路隧道, 人们主要关注高地应力作用下的大变形问题, 因为交通隧道出现大变形后支护困难^[3], 不仅影响初期的隧道施工贯通, 更严重的会影响后期的隧道运营, 所以该问题越来越受到隧道工程界的重视。

近些年来我国的隧道工程建设蓬勃发展, 遇到的隧道围岩大变形问题越来越多^[3], 如青藏线关角

隧道、宝中线大寨岭隧道、堡子梁隧道、南昆线家竹箐隧道、川藏线二郎山公路隧道、渝长线华蓥山公路隧道、宜万线堡镇隧道、兰渝线木寨岭隧道、兰新线乌鞘岭隧道等，遇到了诸多大变形问题。但是，工程技术人员和科研人员对于隧道围岩大变形的定义，如何利用定量指标区分一般隧道围岩变形和大变形^[4]以及知道隧道围岩的基本工程地质资料后如何预测施工过程中的变形量等问题都有很多争议，因此对于这些存在争议的科学问题进行深入研究具有十分明显的工程实践意义和科学价值。

针对这些隧道围岩大变形问题，本文的研究工作主要考虑以下几个方面的问题：①隧道围岩大变形的定义及分类；②隧道围岩大变形的评价指标；③隧道围岩大变形量预测。针对这些问题提出笔者观点，与同行们一同探讨。

2 隧道围岩大变形的定义

最早对隧道围岩大变形进行描述和定义的是太沙基(Karl Terzaghi)^[5]，他指出：“挤压变形岩石是指含有相当数量黏土矿物的岩石”，变形行为会以“不容易察觉的体积增加缓慢地侵入隧道净空。挤压变形的先决条件是岩石中高含量的具有膨胀性细微或亚微云母矿物和黏土矿物”。国际岩石力学学会于1995 年成立了专业委员会研究岩石挤压变形问题^[6]，并给出了挤压变形的定义“挤压变形是一种与时间相关的变形行为，通常发生在地下空间开挖面周边，一般由于极限剪切应力失稳而导致的蠕变所造成。这种变形可能会在开挖期间停止，也有可能持续非常长的时间”。

仔细分析这两种经典定义会发现，太沙基实际上讨论了一个地质软岩的概念^[7]，定义里强调了岩石成分的特殊性，而对力学机制没有涉及。而国际岩石力学学会的定义则强调了大变形是与时间有关的变形行为，产生原因是由于极限剪切应力失稳。实际上，两个定义强调了一个现象的两方面，各自都有一些缺陷。陈宗基教授认为，围岩收敛变形机制应包括塑性楔体、流动变形、围岩膨胀、扩容、挠曲五方面，与前面的两个定义有重叠之处^[4]。何满潮等^[7]对软岩进行了分类定义，本质上来讲他是基于地下空间大变形现象来对岩体进行分类命名，如表 1 所列。

从本质上看，表 1 较好地概括了前面提及的定义 1 和定义 2，但它是针对软岩的分类。姜云^[4]指出，大变形是隧道及地下工程围岩的一种具有累进性和明显时间效应的塑性变形破坏，它既区别于岩

爆运动脆性破坏，又区别于围岩松动圈中受限于一定结构面控制的坍塌、滑动等破坏。与此同时，姜云按照不同的受控条件对大变形进行类型划分：受围岩岩性控制的大变形，受围岩结构构造控制的大变形和受人工采掘扰动影响的大变形 3 种类型。

表 1 基于地下空间大变形现象的软岩分类^[7]
Table 1 Soft rock mass classification according to the squeezing problem of underground space

名称	泥质软岩含量/%	σ_c /MPa	塑性变形特点
膨胀性软岩 (低强度软岩)	>25	<25	在工程力作用下，沿片架状硅酸盐黏土矿物产生滑移，遇水显著膨胀等
高应力软岩	≤ 25	≥ 25	遇水发生少许膨胀，在高应力状态下，沿片架状矿物发生滑移
节理化软岩	低~中等	少含	沿节理等结构面产生滑移、扩容等塑性变形
复合型软岩	低~高	含	具有上述某种组合的复合型机制

综合前人的研究成果可以发现，隧道围岩大变形具备两个基本的特点：①隧道围岩向地下空间内侵入明显；②变形过程与时间相关。结合前人的研究成果，这里重新给出隧道围岩大变形的定义，“隧道围岩大变形或者地下空间大变形是发生在地下空间开挖面周边的一种与时间相关的变形行为，隧道围岩向地下空间净空侵入显著，产生原因可为 3 类：由于高应力作用下的岩体剪切破坏、开挖而引起的岩体结构面失稳和特殊岩类中开挖后发生的水化学反应造成的体积膨胀，这种变形可能会在开挖期间停止，也有可能持续非常长的时间”。根据这些研究成果可将大变形分为 3 类：应力型、材料型和结构型大变形，如表 2 所列。

表 2 隧道围岩大变形类型及成因机制
Table 2 Classification of squeezing problems during tunneling and their origins

大变形类型	成因及机制	变形特征
应力型	岩体强度过低，在高应力作用下发生剪切破坏，进而失稳发生整体大变形	变形具备明显的优势部位和方向
材料型	黏土矿物，如高岭石、蒙脱石、云母等矿物遇水发生化学反应，产生体积膨胀，进而产生大变形	变形无明显的优势部位和方向
结构型	由于岩体结构面强度较弱，在地下空间开挖后，岩体沿结构面如层理、节理等发生滑移、松动产生的大变形	大变形沿岩体结构面发生，一般具备突发性

3 隧道围岩大变形的评价指标

得到隧道围岩大变形的定义和分类后，需要对隧道围岩大变形进行定量分析，因为地下岩体开挖

后围岩变形是确定无疑的一种现象，但是，什么程度的变形才能称得上是大变形？这需要科研和工程技术人员提出确切的定量评价指标。

《铁路隧道施工规范》^[8]提出了挤压性围岩和膨胀岩的施工方法，针对膨胀岩，二次衬砌的施作时间应在围岩变形基本稳定、变形速度小于0.5 mm/d后进行；针对挤压性变形，衬砌施作时间应在围岩变形基本稳定（变形速度小于0.5 mm/d）后进行，并对二次衬砌采取一系列加强措施。而《公路隧道施工技术规范》则指出“二次衬砌的施作应在满足下列要求时进行：①各测试项目的位移速率明显收敛，围岩基本稳定；②已产生的各项位移预计总位移量的80%~90%；③周边位移速率小于0.1~0.2 mm/d，或拱顶下沉速率小于0.07~0.15 mm/d。”这两个规范提出了两个定量指标，即围岩变形速率0.5 mm/d或者是0.1~0.2 mm/d。

《铁路隧道设计规范》^[9]和《公路隧道施工技术规范》^[10]根据不同的隧道围岩分级和埋深给出了初期支护极限相对位移和隧道周边允许相对位移，如表3~5所列。

表3 公路隧道周边允许相对位移值^[10]
Table 3 Allowable strain around a highway tunnel

围岩类别	不同覆盖层厚度(m) 允许相对位移变形值/%		
	<50	50~300	>300
II	0.10~0.30	0.20~0.50	0.40~1.20
III	0.15~0.50	0.40~1.20	0.80~2.00
IV	0.20~0.80	0.60~1.60	1.00~3.00

注：①相对位移是指实测位移值与两测点间距离之比。或拱顶位移实测值与隧道宽度之比；②脆性围岩取表中较小值，塑性围岩取表中较大值；③II、III、IV类围岩可按工程类比初步选定允许值范围。

表4 铁路单线隧道初期支护相对位移^[9]
Table 4 Limit strain of one-way tunnel after the preliminary supports

围岩级别	不同埋深 h (m)处隧道相对位移/%		
	$h \leq 50$	$50 < h \leq 300$	$300 < h \leq 500$
II			0.20~0.60
III	拱脚水平相对	0.10~0.50	0.40~0.70
IV	净空变化值	0.20~0.70	0.50~2.60
V		0.30~1.00	0.80~3.50
II		0.01~0.05	0.04~0.08
III	拱顶相对下沉	0.01~0.04	0.03~0.11
IV		0.03~0.07	0.06~0.15
V		0.06~0.12	0.10~0.60

注：①硬岩取表中较小值，软岩取较大值；②拱脚水平相对净空变化指两点间净空水平变化值与其距离之比；拱顶相对下沉指拱顶下沉值减去隧道下沉值后与原拱顶至隧底高度之比；③墙腰水平相对净空变化极限值可按拱脚水平相对净空变化极限乘以1.2~1.3后采用。

由表3~5可以看出，规范针对不同埋深、不同

围岩分级和不同跨度的隧道都设置了不同的极限相对位移或者允许相对位移。按照规范规定，当围岩变形超过极限相对位移或者允许相对位移就可以认为该围岩变形超出了常规变形，应采用特殊的措施来处理。

在国外，Aydan^[11]，Singh和Geol^[12]，Hoek^[13]结合各种工程实例和理论解析提出了隧道围岩变形的分级标准，也是基于围岩相对位移来进行分类，如表6所列。

表5 铁路双线隧道初期支护极限相对位移^[9]
Table 5 Limit strain of double-way tunnel after the preliminary supports

围岩级别	不同埋深 h (m)隧道相对位移/%		
	$h \leq 50$	$50 < h \leq 300$	$300 < h \leq 500$
II		0.01~0.03	0.01~0.08
III	拱脚水平相对	0.03~0.10	0.08~0.40
IV	净空变化值	0.10~0.30	0.20~0.80
V		0.20~0.50	0.40~2.00
II		0.03~0.06	0.05~0.12
III	拱顶相对下沉	0.03~0.06	0.04~0.15
IV		0.06~0.10	0.08~0.40
V		0.08~0.16	0.14~1.10

表6 关于挤压变形行为的分类对比表^[11-12]
Table 6 Classification of squeezing behavior according to Singh (1999 a), Hoek (2000 a), Aydan et al (1993 a)

分类序号	Singh & Goel		Aydan 等		Hoek	
	变形程度	隧道相对位移 ϵt /%	变形程度	隧道相对位移 ϵt /%	变形程度	隧道相对位移 ϵt /%
1			无挤压变形	≤ 1	几乎无支护问题	≤ 1
2	轻微挤压变形	1~3.0	轻微挤压变形	1~2.0	轻微挤压变形	1~2.5
3	中等挤压变形	3.0~5.0	中等挤压变形	2.0~3.0	中等挤压变形	2.5~5.0
4	严重挤压变形	>5.0	严重挤压变形	3.0~5.0	严重挤压变形	5.0~10.0
5			极严重挤压变形	>5.0	极严重挤压变形	>10.0

Hoek 在提出挤压变形分级标准的同时，还给出了其与隧道围岩强度和围岩中赋存的应力状态的关系，如图1所示。实际上，Hoek 提出隧道围岩强度与原地应力的比值为0.2是一个阈值，当围岩强度应力比小于0.2时，极容易出现严重的挤压变形，而根据图1可知，围岩强度应力比0.2对应的隧道相对位移值为3%。再结合表3~6的规定，3%是一个得到广泛认可的隧道相对变形的临界值，也就是说，当隧道相对变形值大于3%时可以认为隧道围岩发生了大变形。

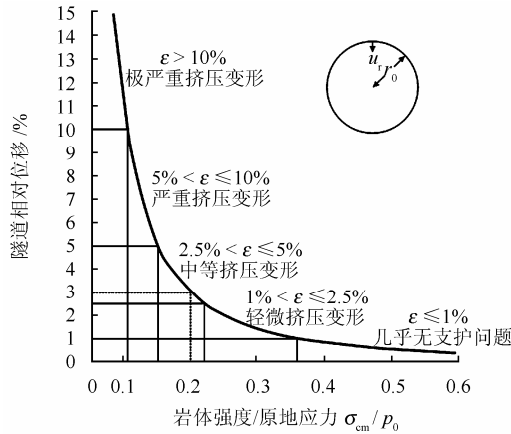
图1 关于隧道围岩挤压变形行为的分类准则^[13]

Fig.1 Classification of squeezing behavior (Hoek, 2000 a)

4 隧道围岩大变形预测

知道了隧道围岩大变形的定义分类及大变形定量判定标准, 工程技术人员就会更加关注如何预测隧道围岩的是否会发生大变形? 如果发生了大变形, 变形量会有多大? 针对这一问题, 国际上有很多解答。

Singh 等^[14]对 39 个工程实例进行分析总结, 结合 Barton 提出的 Q 法岩体分级指标, 提出如下公式:

当隧道埋深,

$$H > 350Q^{1/3} \quad (1)$$

隧道围岩会出现挤压变形现象; 而当隧道埋深

$$H < 350Q^{1/3} \quad (2)$$

隧道围岩不会出现挤压变形现象, 其中 Q 为 Barton 的 Q 岩体质量分级参数。

Goel 等也同样提出类似的公式^[15], 但他的公式考虑了隧道直径 (或者隧道跨度):

当隧道埋深,

$$H > (275N^{0.33})B^{-1} \quad (3)$$

隧道围岩会出现挤压变形现象; 而当隧道埋深

$$H < (275N^{0.33})B^{-1} \quad (4)$$

隧道围岩不会出现挤压变形现象。

式中: N 为不考虑原地应力因素 Barton 的 Q 岩体质量分级参数; B 为隧道跨度或者直径 (m)。

Jethwa 提出了围岩挤压程度指数 N_c ^[16], 由下式定义:

$$N_c = \frac{\sigma_{cm}}{p_0} = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \quad (5)$$

式中: σ_{cm} 为岩体单轴抗压强度; p_0 为原地应力; γ

为岩体重度; H 为隧道埋深,

$$\sigma_{cm} = \frac{2c_p \cos \phi_p}{1 - \sin \phi_p} \quad (6)$$

式中: c_p 为岩体峰值黏聚力; ϕ_p 为岩体峰值内摩擦角。

Jethwa 还给出了在不同岩体强度应力比条件下的围岩挤压变形程度分类, 见表 7^[16]。对比图 1 和表 7 可以发现, 他给出的 $\sigma_{cm} / p_0 = 0.4$ 是一个是否出现挤压变形的界限值, 而不是是否出现隧道围岩大变形的临界值, 因此表 7 的分类有些相对保守。

表7 不同围岩挤压变形程度分级表 (据 Jethwa 等)

Table 7 Classification of squeezing behavior according to Jethwa, et al.

σ_{cm} / p_0	变形类型
<0.4	严重挤压变形
0.4~0.8	中等挤压变形
0.8~2.0	轻微挤压变形
>2.0	没有挤压变形

Hoek^[17]利用轴对称有限元分析法对大量岩体进行了分析, 得到在有支护压力、原地应力作用下隧道围岩的相对变形和掌子面变形预测公式:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r(\%) &= 0.15(1 - p_i / p_0) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-\left(3p_i / p_0 + 1\right) / \left(3.8p_i / p_0 + 0.54\right)} \\ \varepsilon_f(\%) &= 0.1(1 - p_i / p_0) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-\left(3p_i / p_0 + 1\right) / \left(3.8p_i / p_0 + 0.54\right)} \\ \sigma_{cm} &= (0.0034m_i^{0.8})\sigma_{ci} \left[1.029 + 0.025e^{(-0.1m_i)} \right]^{GSI} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: ε_r 为隧道径向相对位移; ε_f 为隧道掌子面相对位移, 是掌子面挤压变形量和隧道半径或者跨度之比; p_i 为隧道支护压力; p_0 为隧道围岩中的原地应力; m_i 为 Hoek-Brown 常数, 反映了岩石材料摩擦特性; σ_{ci} 为岩石单轴抗压强度; GSI 为地质强度指标, 反映了岩体质量分级特点。

综上所述可知, 目前所有的围岩大变形预测都是基于岩体强度应力比来展开, 如 Singh 的公式考虑了重力因素和岩体质量分级; Goel 等则考虑的重力、岩体质量分级和隧道断面尺寸; Jethwa 的方法则考虑的岩体单轴抗压强度和重力因素 (或者原地应力因素); Hoek 的公式则考虑支护应力、原地应力、岩体强度、岩体质量分级等因素, 相对较为全面, 更为重要的是 Hoek 把强度应力比法预测的变形值与围岩挤压变形程度联系到一起, 更能方便后

续工程技术人员设计和使用。对于前面所提到的几种大变形预测方法中,都采用了重力或者原地应力,均没有考虑地下空间开挖后形成的二次应力场。而 Malan D. F. 和 Basson F. R. P^[18]指出,在考虑可能的最大应力型挤压大变形时 p_0 取 $3\sigma_1 - \sigma_3$ 可能更为合适,因为如前面“大变形”定义指出,挤压大变形主要是由于剪切破坏导致的流变而产生的,故采用最大剪应力估算可能更为合适。

与此同时,所有这些公式其实都是针对第一章节所提到的应力型围岩大变形所提出的预测研究理论,对与结构型大变形和材料性大变形如何预测未很好地论述,仍然需要进一步开展研究工作。

5 结 语

隧道围岩大变形是目前公路、铁路隧道建设中遇到的重要科学问题。工程实践中,隧道围岩大变形主要是由于围岩遭受剪切破坏而导致了流变而产生的,部分隧道的围岩大变形是由于围岩成分中的亲水矿物遇水发生水化学反应而发生体积膨胀产生的,所有的围岩大变形现象均与时间相关。通过全面分析前人的研究成果,可将隧道围岩相对变形 3% 作为划分隧道内是否发生大变形的定量评价指标。对于应力型围岩大变形,Hoek 提出的隧道围岩径向变形和掌子面变形预测公式,较好地预测了施工现场的围岩变形量,现实意义较为明显,但需要针对不同的工程条件调整原地应力的估算公式或者考虑围岩二次应力场的赋存状态。对于膨胀性围岩大变形和结构型围岩大变形的变形量预测,目前仍然是一块空白,需要进一步开展相关工作。

参 考 文 献

- [1] 王成虎, 郭啟良, 丁立丰, 等. 工程区高地应力判据研究及实例分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2359—2364.
WANG Cheng-hu, GUO Qi-liang, DING Li-feng, et al. High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2359—2364.
- [2] MARTIN C D, KAISER P K, MCCREATH D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(1): 136—151.
- [3] 张志强, 郑鸿泰. 高地应力条件下隧道大变形的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊 1): 957—960.
ZHANG Zhi-qiang, ZHENG Hong-tai. Analysis of large deformation numerical simulation on weak rockmass tunnel under high in-situ stresses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(Suppl.): 957—960.
- [4] 姜云, 李永林, 李天斌, 等. 隧道工程围岩大变形类型与机制研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2004, 15(4): 46—51.
JIANG Yun, LI Yong-lin, LI Tian-bin, et al. Study of the classified system of types and mechanism of great distortion in tunnel and underground engineering[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2004, 15(4): 46—51.
- [5] TERZAGHI K. Rock defects and loads in tunnel supports[M]//Rock Tunneling With Steel Supports. Youngstown, Ohio: The Commercial Shearing and Stamping Co., 2004: 17—99.
- [6] BARLA G. Squeezing rocks in tunnels[J]. *ISRM News Journal*, 1995, (3—4): 44—49.
- [7] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 2002, 科学出版社, 北京.
- [8] 中铁二局集团有限公司. TB10204—2002 铁路隧道施工规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [9] 中华人民共和国铁道部. TB10003—2001 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTJ042—94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [11] AYDAN Ö, AKAGI T, KAWAMOTO T. The squeezing potential of rock around tunnels: Theory and prediction[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1993, (2): 137—163.
- [12] SINGH B, GEOL R K. Rock mass classification: A practical approach in civil engineering[M]. U.K.: Elsevier Science Ltd., 1999.
- [13] HOEK E, MARINOS P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. *Tunnels and Tunneling International*, 2000, 5: 45—51.
- [14] SINGH B, JETHWA J L, DUBE A K. Correlation between observed support pressure and rock mass quality[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1992, 7: 59—74.
- [15] GEOL R K, JETHWA J L, ADN Paithakan A G. Tuunelling through the young Himalayas—A case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel[J]. *Engineering Geology*, 1995, 39: 31—44.
- [16] JETHWA J L, SINGH B, SINGH B. Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions—A new approach[C]//Design and Performance of Underground Excavations. [S.l.]: ISRM Symposium, 1984: 231—238.
- [17] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:9(726).
- [18] MALAN D F, BASSON F R P. Ultra-deep mining: The increased potential for squeezing conditions[J]. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1998, 98: 353—363.