

DOI: 10.11779/CJGE2016S2031

# 脆性岩体开挖损伤区范围与影响因素研究

李建贺<sup>1, 2</sup>, 盛 谦<sup>1</sup>, 朱泽奇<sup>1</sup>, 刘世伟<sup>1, 2</sup>, 程红战<sup>1, 2</sup>, 周兴涛<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 在脆性岩体地下工程开挖损伤区中, 由应力导致的围岩损伤破裂占据主要地位。基于地下洞室开挖破坏数据库, 修正了 Kaiser 等人提出的预测硬岩损伤区深度的经验公式, 通过考虑原位应力比的影响, 修正后的经验公式在拟合优度和预测准确性方面均有了一定程度的改善。为进一步研究开挖损伤区的范围及影响因素, 提出了起裂判据 CIC 作为损伤区的力学表征指标, 经对比验证, 采用 CIC 判别的损伤区深度与经验公式预测值及现场实测值较为吻合, 表明 CIC 作为损伤区表征指标具有较好的可行性; 在 CIC 基础上, 分析了洞室形状、方位对围岩诱发应力和损伤区范围的影响, 研究表明, 在高地应力场条件下, “谐洞”并不是最合理的洞形, 而通过在小主应力方向上设置小曲率半径, 可将高压应力限制在局部范围内, 从而避免洞室围岩大范围的损伤破裂。相关认识和结论具有一定理论和工程意义。  
**关键词:** 地下洞室; 开挖损伤区 (EDZ); 经验公式; 起裂判据 (CIC); 洞室形状; 曲率半径

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0190-08

**作者简介:** 李建贺(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事地下工程开挖扰动和数值模拟方面的基础性研究工作。E-mail: jianhe\_001@126.com。

## Excavation damage zone depth and influence factors of brittle rock

LI Jian-he<sup>1, 2</sup>, SHENG Qian<sup>1</sup>, ZHU Ze-qi<sup>1</sup>, LIU Shi-wei<sup>1, 2</sup>, CHENG Hong-zhan<sup>1, 2</sup>, ZHOU Xin-tao<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The stress-induced excavation damage occupies the main position in brittle rock mass of underground engineering. Based on the excavation damage database of underground opening, the empirical formula for damage depth of hard rock put forward by Kaiser is revised. By considering the effect of the initial stress ratio, the revised empirical formula is improved with a certain extent in the goodness of fitting and prediction accuracy. For further studies on excavation damage zone and its influencing factors, the crack initial criterion (CIC) is put forward as the mechanical index for damage zone. It is found that the damage depth assessed by CIC is coincident with the predicted values by the empirical formula and filed measured values, indicating that CIC as the index for damage zone has good feasibility. On the basis of CIC, the induced stress and damage range of the surrounding rock are analyzed under different opening shapes and orientations. It is shown that the "Harmonious hole" is not the most reasonable shape under high stress field. By setting a small radius of curvature in the minor principal stress direction, the high compression stress can be limited within a local scope, and thus a wide range of surrounding rock damage of underground engineering can be avoided. The related understanding and conclusions are of certain theoretical and engineering significance.

**Key words:** underground opening; excavation damage zone; empirical formula; crack initial criterion; opening shape; radius of curvature

## 0 引 言

地下洞室在开挖过程中, 围岩内部应力场重新分布, 临空面附近岩体的力学性质发生显著变化, 即存在一个力学性质变差的开挖损伤区 (EDZ)<sup>[1-2]</sup>, 损伤区内岩体裂纹大量萌生、扩展和贯通, 致使围岩强度和刚度劣化, 渗透系数增大。合理确定洞室围岩的损伤区范围是地下工程稳定性评判和支护设计的重要依

据。

前人在围岩开挖损伤区 (EDZ) 方面做了大量的研究, 取得了丰硕的成果。研究热点主要集中在: 围

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973”) 项目 (2015CB057905);  
NSFC-云南联合基金重点支持项目 (U1402231); 国家自然科学基金面上项目 (51279202)

收稿日期: 2016-05-19

岩开挖损伤区的形成和长期演化 (如李邵军等<sup>[2]</sup>、Blümling 等<sup>[3]</sup>); 开挖损伤区深度与现场原位测试 (如李占海<sup>[4]</sup>、Kaiser 等<sup>[5]</sup>); 围岩损伤区内渗透性质的改变 (如 Read<sup>[1]</sup>、Jakubick 等<sup>[6]</sup>)。在开挖损伤区深度预测方面, 目前采用的手段主要有经验公式<sup>[5, 7]</sup>、现场原位测试<sup>[2, 4]</sup>和数值模拟<sup>[7-8]</sup>, 但总的来说, 理论研究仍然远落后于目前工程实践的需要。

在深埋脆性岩体中, 诱发应力和岩体强度成为了主要矛盾, 围岩由诱发应力导致的损伤破裂十分普遍, 正确判别开挖损伤区的范围及相关因素的影响是地下工程中亟待解决的关键技术问题。本文首先对围岩开挖损伤区的相关术语概念进行了阐述和辨析, 其次建立了地下洞室开挖破坏数据库, 结合损伤区实测数据修正了 Kaiser 等<sup>[5, 7]</sup>的经验公式; 最后提出了起裂判据 CIC (crack initial criterion) 作为开挖损伤区初步判别的力学表征指标, 在此基础上对应力导致的地下工程围岩损伤区范围及其影响因素进行了探索。

## 1 开挖损伤区术语概念

随着对岩体损伤特征和演化规律研究的不断深入, 开挖损伤区 (EDZ) 的术语概念也处于不断发展之中。早期以董方庭基于现场声波测试提出的围岩松动圈理论<sup>[9]</sup>, 其实质是开挖后围岩应力超过围岩强度而产生的损伤破裂带。Harrison 等<sup>[10]</sup>把洞室的围岩损伤分为由开挖效应引起的不可避免损伤和开挖方法造成的额外损伤两部分。在 Harrison 的基础上, Eberhardt 等<sup>[11]</sup>指出应当把由开挖造成的损伤与应力诱发的损伤分别进行定义, 即 CDZ (construction damage zone) 仅包含由于开挖方法 (钻爆法或 TBM 掘进) 造成围岩损伤; EDZ<sub>SI</sub> (stress-induced excavation damage zone) 是诱发应力造成的围岩损伤。Siren 等<sup>[12]</sup>针对不同开挖方式将围岩开挖损伤区进行了更为细致的区分, 分为 HDZ (highly damaged zone)、EDZ<sub>CI</sub> (construction induced excavation damage zone)、EDZ<sub>SI</sub> (stress-induced excavation damage zone) 和 EdZ (excavation disturbed zone)。需要说明的是, 上述围岩分区中出现了开挖损伤区 (EDZ) 和开挖扰动区 (EdZ), 这两个概念容易混用, 例如 Malmgren 等<sup>[13]</sup>就采用 EDZ 表述开挖扰动区 (excavation disturbed zone), 因此需格外注意 EDZ 在相关文献中的内涵。一般而言, 围岩损伤区的诱发应力超过了岩体的起裂应力阈值 (通常为  $0.3-0.5\sigma_c$ ), 使岩体产生了不可逆的裂纹应变, 而开挖扰动区是损伤区之外向围岩深部延伸的一段区域, 该区内无不可逆损伤变形, 仅在应力或应变上存在相当程度的扰动。为避免与 EDZ 混

淆, 本文把 Siren 定义的开挖扰动区 EdZ 修正为 EIZ (excavation influence zone)<sup>[11]</sup>。

基于以上学者的研究, 笔者将开挖后的洞室围岩划分为建造损伤区 CDZ (construction damage zone)、应力损伤区 SIDZ (stress-induced damage zone) 和开挖扰动区 EIZ (excavation influence zone)。其中 CDZ 和 SIDZ 构成了开挖损伤区 (EDZ) 的全部范围, 在 EDZ 中, 如果开挖过程导致围岩宏观尺度上破裂或者诱发应力导致围岩片帮、剥落等脆性破坏, 与 Siren 等<sup>[12]</sup>文中 HDZ 对应, 这一部分破裂区域定义为开挖破裂区 EFZ (excavation fracture zone)。以上相关区域划分示意图如图 1 所示。

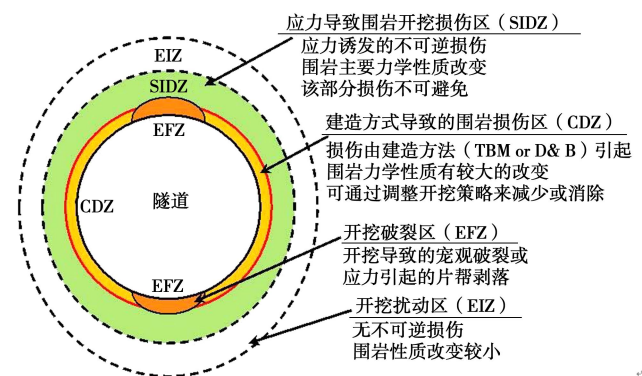


图 1 损伤区划分示意图

Fig. 1 Overview of different damage zones

一般而言, 建造损伤区 (CDZ) 取决于开挖方法, 其损伤范围和程度可通过调整开挖策略来减少或者消除, 而应力损伤区 (SIDZ) 与开挖方法无关, 取决于岩体强度、洞室形状与诱发应力, 该部分损伤不可避免。开挖损伤区 EDZ (含 CDZ 和 SIDZ) 的范围和时空演化规律对岩石工程稳定性评价及支护设计至关重要, 各类受关注的岩体变形过程和破坏现象均发生在开挖损伤区内, 如时效变形、片帮剥落、岩爆和垮塌等, 这些宏观破裂的区域即为文中定义的 EFZ。对于开挖扰动区 (EIZ), 一般认为是应力张量中至少一个分量的扰动超过初始应力 5% 的区域<sup>[10]</sup>, 在处理多重洞室的间距问题时需考虑开挖扰动区间应力的交互作用。

## 2 洞室开挖破坏数据库及统计分析

### 2.1 洞室开挖破坏数据库

地下洞室开挖破坏的调查资料是科研人员深入研究洞室开挖扰动、稳定性评判及支护设计的基础。本文搜集了地下洞室开挖破坏的相关资料, 建立了数据翔实的地下工程开挖破坏数据库系统, 其中包含水工隧洞、水电厂房、交通隧道、采矿巷道和能源储存库

五类工程, 录入的开挖破坏记录统计如表 1 所示。

表 1 数据库破坏记录统计

Table 1 Statistics of database records

工程类别	记录总量 /个	应力控制 /个	应力+结构 面控制/个	结构面控 制/个
水工隧洞	55	24	14	17
水电厂房	37	16	7	14
交通隧道	24	11	13	—
采矿巷道	12	8	4	—
能源储存库	3	3	—	—

从以上统计结果来看, 对于水工隧洞和水电厂房等脆性岩石开挖而言, 由应力控制的围岩破裂占据主要地位。上述统计的应力型破裂对应的是 EFZ, 即围岩形成了宏观破裂, 如片帮、剥落等。而围岩损伤区 (EDZ) 不仅包含宏观破裂, 还包括肉眼不可见的细观损伤, 在隧洞周围的分布范围更广。为了消除洞室尺寸的影响, 结合 Martin 等<sup>[7]</sup>的研究, 把损伤区深度进行了无量纲化处理, 即  $D/a$ , 其中  $D$  是洞室损伤区深度,  $a$  是等效半径。对于圆形洞室,  $a$  为洞室半径; 对于其他洞室形状, 如城门洞型,  $a$  为其外接圆半径, 如图 2 所示。

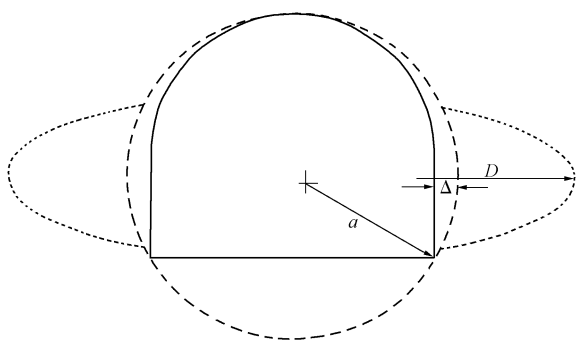


图 2 城门洞型洞室的等效半径和损伤区深度示意图

Fig. 2 Illustration of straight-wall arch tunnel with effective tunnel radius and failure depth

## 2.2 脆性岩体损伤深度的经验公式

为了安全、高效地进行脆性岩体开挖和支护设计, 需对洞室围岩的应力、强度以及地质结构等因素做出准确评价, 以合理预测脆性围岩的损伤区范围。在此方面, 国际上应用比较广泛的是 Kaiser 等<sup>[5]</sup>和 Martin 等<sup>[7]</sup>基于现场实测数据提出的经验公式。该类公式首先由 Kaiser 等<sup>[5]</sup>提出:

$$\frac{D}{a} = 1.34 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} - 0.57(\pm 0.05) \quad (1)$$

式中  $D$  为损伤区深度;  $a$  是隧洞等效半径;  $\sigma_{\max}$  为洞室边界上最大切向应力,  $\sigma_{\max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$ ;  $\sigma_c$  为室内岩样平均单轴抗压强度。在式 (1) 的基础上, Martin

等<sup>[7]</sup>补充了部分监测数据, 采用线性回归方法再次拟合了隧洞损伤深度与应力水平的经验关系:

$$\frac{D}{a} = 1.25 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} - 0.51(\pm 0.1) \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 表达式相似, 即围岩的损伤区深度是隧洞半径和边界上应力强度比的函数。经检验, 式 (1) 的相关系数  $R^2 = 0.844$ , 标准差  $\sigma = 0.0828$ ; 式 (2) 的相关系数  $R^2 = 0.837$ , 标准差  $\sigma = 0.0825$ ; 两者较为接近, 也有较高的拟合优度。但笔者认为围岩的损伤区深度不仅取决于边界上的应力强度比, 原位应力场的应力比对损伤区也存在一定程度的影响。随原位应力比的不同, 剪应力从洞室边界向围岩内部衰减的梯度不同, 如图 3 所示 (计算采用圆形洞室, 从边界上剪应力最大处向围岩内部延伸)。

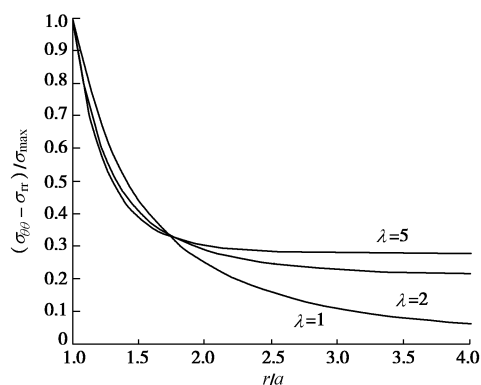


图 3 不同应力比下剪应力向围岩内部的衰减曲线

Fig. 3 Internal decay curves of shear stress under different stress ratios

在 Martin 拟合公式的基础上, 考虑应力比  $\lambda$  的影响, 采用线性回归分析进行一次拟合, 拟合公式为

$$\frac{D}{a} = 1.18 \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_c} + 0.05\lambda - 0.55(\pm 0.1) \quad (3)$$

由于考虑了应力强度比和原位应力比两个自变量, 拟合公式为一个平面 (一次拟合), 如图 4 所示。

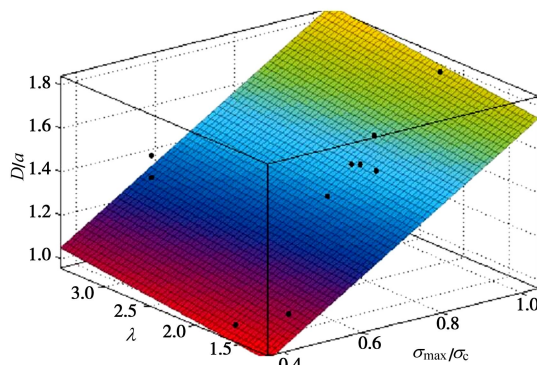


图 4 围岩损伤深度的经验拟合公式

Fig. 4 Fitting formula for damage depth of surrounding rock



经检验, 拟合公式 (3) 的相关系数  $R^2 = 0.891$ , 标准差  $\sigma = 0.074$ , 在拟合优度上有一定程度的改善。

2.3 经验公式验证

以上只是从力学和拟合优度上考虑, 加入原位应力比后经验公式会更加优化。但毕竟数据有限, 需要补充更多的实测数据才能得到更加符合实际的经验公式。为验证上述经验公式, 从洞室开挖破坏数据库中选取了两个数据统计全面的工程案例, 锦屏 II 级<sup>#3</sup> 试验洞 F 试验支洞<sup>[4]</sup>和<sup>#2</sup> 引水隧洞 15+700 断面<sup>[8]</sup>, 算例中的损伤破裂均由应力控制。计算结果见表 2。

表 2 经验公式计算结果对比分析

Table 2 Comparison of calculated results by empirical formulae		
项目	<sup>#2</sup> 引水隧洞 15+700 断面/m	<sup>#3</sup> 试验洞 F 试验支洞/m
现场实测值	3.5±0.7 <sup>[8]</sup>	7.38 <sup>[4]</sup>
Kaiser	4.098±0.325	7.899±0.2439
Martin	3.964±0.65	7.550±0.488
本文 (考虑 λ)	3.695±0.65	7.223 ±0.488

从表 2 中可以发现, 考虑原位应力比后, 由经验公式推算的预测值更为接近现场损伤区深度实测值。在应力强度比较大条件下, Kaiser 和 Martin 的拟合公式可能会过大估计损伤区范围。Perras<sup>[14]</sup>通过数值模拟也得到过类似的结论, 他认为随着应力强度比的增长, 开挖损伤区深度会偏离 Martin 的线性经验公式。

3 开挖损伤区影响因素研究

洞室开挖损伤区范围的影响因素众多, 如地质条件、围岩性质、地应力场、开挖方式等, 但归根结底为两方面: 围岩的自身性质与外在力场。限于篇幅, 本文仅做洞室形状、方位对围岩开挖损伤区的影响, 其他影响因素将在后续研究中展开叙述。

3.1 损伤区力学表征指标

Martin 等<sup>[7]</sup>认为, 实验室岩样的起裂应力阈值  $\sigma_{ci}$  可以作为临空面附近完整岩体的现场强度, 对于绝大多数脆性岩石, 起裂应力阈值为  $0.3\text{--}0.5 \sigma_c$ 。根据 Martin 等人研究, 本文定义 CIC (crack initial criterion) 作为洞室围岩的起裂判据:

压缩应力区:  $CIC = (\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_{ci}$  , (4)

拉应力区:  $CIC = (-\sigma_3) / T_{ci}$  。 (5)

式中  $\sigma_{ci}$  为压缩应力状态下围岩起裂应力阈值;  $T_{ci}$  为受拉状态下起裂应力阈值。Perras 等<sup>[14]</sup>依据 Griffith 准则对拉伸状态下岩体的裂纹起始应力做出如下估计:

$T_{ci} = \sigma_{ci} / \beta$  , (6)

式中,  $\beta$  的取值, 依据 Griffith 等<sup>[15]</sup>准则,  $\beta = 8$  (拉

伸起裂应力保守平均值<sup>[14]</sup>); 根据 Murrell 的修正 Griffith 准则<sup>[15]</sup>,  $\beta = 12$  (拉伸起裂应力下限值<sup>[14]</sup>)。

根据起裂判据的物理意义, 若  $CIC > 1$ , 则表示岩体内部裂隙萌生扩展, 进而致使围岩损伤, 该判据可以对开挖损伤区 EDZ 的范围做出初步判断; 若  $CIC < 1$ , 则表示岩体处于损伤区之外。启裂判据的另一个实际意义在于, 必须在满足  $CIC > 1$  的情况下, 复杂应力路径才会对原位岩体的损伤和强度产生影响; 低于此判据, 应力主轴旋转不会造成围岩损伤的累积。

为验证起裂判据 CIC 作为开挖损伤区力学表征指标的可行性, 以表 2 中锦屏 II 级<sup>#3</sup> 试验洞 F 试验支洞为例, 采用有限元软件 PHASE2 计算, 起裂判据 CIC 的计算云图如图 5 所示。

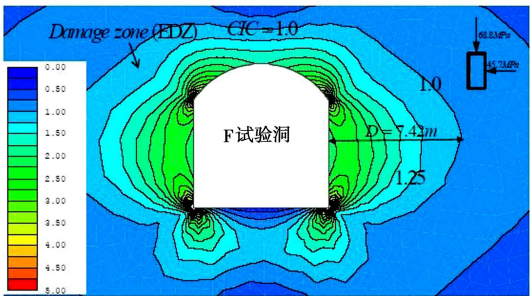


图 5 锦屏二级<sup>#3</sup> 试验洞 F 支洞损伤区云图

Fig. 5 Damage zone around test branch tunnel F of Jinping II Hydropower Station

在图 5 中, 根据起裂判据 CIC 的计算云图, F 支洞损伤区深度 ( $CIC > 1$ ) 约为 7.42 m, 前文中 (表 2) 分别给出了 F 支洞经验公式预测值及现场实测值, 分别为  $7.223 \pm 0.488$  m 和 7.38 m, 三者较为吻合, 表明 CIC 作为损伤区力学表征指标具有较好的可行性。

3.2 洞室形状、方位与围岩损伤区

洞室断面的几何形状对诱发应力及围岩损伤有着直接影响。一般而言, 椭圆形是各种形状围岩应力分布及其变化规律的代表性形状, Jaeger 等<sup>[15]</sup>给出了椭圆洞室应力分布的理论解, 根据理论解答, 当洞室断面的轴比与原位应力比相同时, 那么椭圆形洞室可期望得到一个最佳应力状态 (边界应力均匀分布)。根据这一认识, 中国学者于学馥<sup>[16]</sup>提出了“轴变论”这一概念, 认为轴比变化对围岩变形和破坏起重要控制作用, 当椭圆长轴与初始应力场最大主应力方向一致, 且满足等应力轴比条件时, 巷道周边均匀受压; 如果椭圆长轴不能与最大主应力方向完全一致, 可以退而求次一确定无拉力轴比, 轴变论适合对某一既定应力场调整开挖体的形状 (轴比)。国外学者 Richards 等<sup>[17]</sup>也曾讨论过该问题, 他们称围岩应力均匀分布的开挖体形状为“谐洞”。



轴变论或“谐洞”的理念对中低地应力场条件（边界应力强度比相对较低）的洞室断面设计有一定的指导作用。但在高地应力场条件下，“谐洞”是否是最佳洞室形状呢？Fairhurst 等<sup>[18]</sup>指出谐洞作为开挖体形状在高地应力下可能得不到最稳定的条件，虽然切向应力在洞室边界上保持为常数，但是切向应力向围岩内部的衰减速率沿大曲率半径方向比沿小曲率半径方向要小得多，从应变能累积角度考虑，为了达到最大的稳定性，应把椭圆断面旋转  $90^\circ$ 。高地应力场条件下，应力与岩体强度的矛盾成为主要矛盾，洞室围岩常会出现由应力控制的片帮、剥落等破坏现象，边界上相对均匀的应力分布不能作为洞室设计的合理基础。受 Fairhurst 等<sup>[18]</sup>启发，在此提出一个设想，如果在地应力场条件下，选择一个合适的洞室形状将超应力区局限在一定范围内，并接受周围岩体的约束，那么洞室损伤破裂的范围或许将会大大降低。

### 3.3 算例研究

在洞室形状和诱发应力方面，加拿大地下试验室（URL）进行了大量的研究<sup>[1]</sup>，即 ESS（excavation stability study）试验洞群。通过对 10 个不同几何断面和方位的洞室进行的应力分析，Read<sup>[1]</sup>认为椭圆长轴平行于第一主应力方向较平行于水平方向更为稳定（较小的压应力集中），且椭圆轴比越接近原位应力比（较小的压应力集中），而椭圆洞室受限于开挖，轴比最大取值约为 2.2 : 1）。ESS 试验洞群的洞室形状与边界应力如图 6 所示，除 M4 轴线近似平行于大主应力方向外，其余洞室均沿着中间主应力方向开挖。

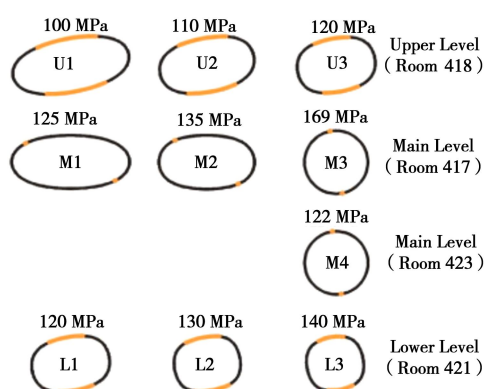


图 6 10 个不同洞室断面形状与边界最大压缩应力<sup>[1]</sup>

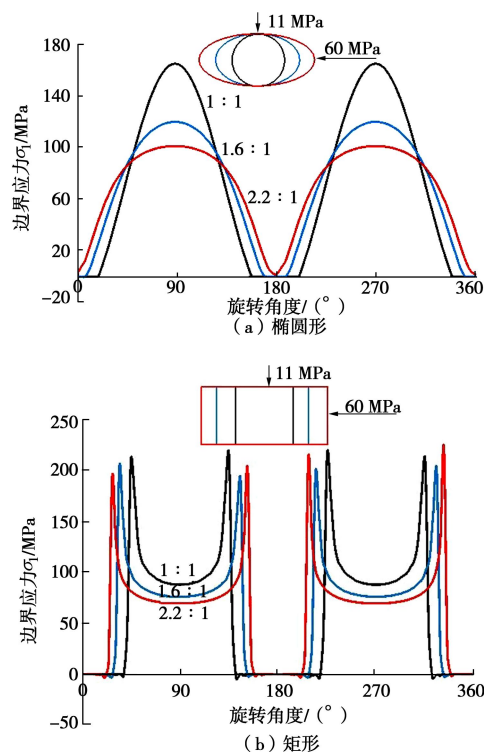
Fig. 6 Cross-sections of 10 tunnels showing magnitude and distribution of peak compressive boundary stress<sup>[1]</sup>

Read<sup>[1]</sup>对稳定性研究的出发点仍是尽可能的接近“谐洞”（如图 6 中的 U1 和 U2），以达到边界上的压应力集中值最小。因为试验洞围岩强度较大（Lac du Bonnet 花岗岩单轴抗压强度约为 220 MPa，反演的原

位岩体强度约为 120 MPa<sup>[1]</sup>），Read 的研究与实际基本吻合。但以上研究存在两方面的问题：①接近谐洞（如 U1、U2），虽然边界应力未超过岩体强度，但已非常接近（均超过了 100 MPa）。如果洞周存在其他扰动（如储存核废料的热效应或邻近开挖）导致围岩加载或强度降低，那么 U1 将会出现大范围的破裂；②根据 Martin 等<sup>[7]</sup>用声发射确定的 Bonnet 花岗岩的启裂应力（约 70 MPa）来看，U1 和 U2 试验洞围岩的损伤范围较大。

在 Read 研究的基础上，采用有限元软件 PHASE2 研究不同洞室形状对诱发应力场及围岩潜在损伤区（采用起裂判据评定）的影响，以期将扰动应力场中的超应力局限一定范围内，从而避免洞室围岩损伤区过大以及洞周大范围的片帮破裂。图 7 是不同几何断面下洞室边界的应力分布图，为表述方便，将初始应力场沿顺时针方向旋转了  $15^\circ$ 。

从图 7 中可以看出，相比于椭圆形洞室，矩形洞室在拐角处（小曲率半径）有较高的局部应力集中，由于应力在拐角处汇集，顶拱和边墙的压缩应力有了一定程度的降低。从图 7（a）中，可以发现随轴比逐步接近原位应力比（ $\sigma_1/\sigma_3 = 5.45$ ），边界压应力集中值逐渐降低，但是却导致边界高应力范围的逐渐加大。与此相反，图 7（c）将洞室方位旋转了  $90^\circ$ ，轴比远离应力比，可以发现洞室边界上的压应力集中值更大，但是压应力集中的范围却大幅度减少，尤其是凹槽形（预先挖除潜在损伤区），洞周超应力范围被局限在了顶部  $10^\circ$  之内。



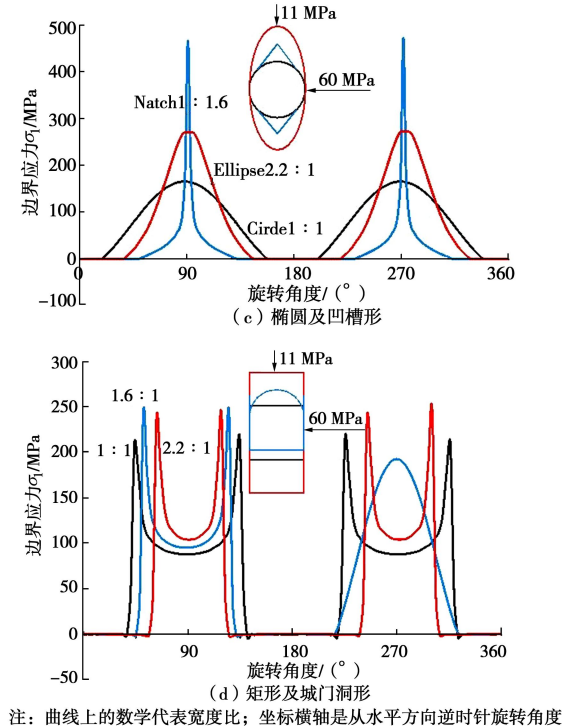


图 7 不同洞室断面边界切向应力对比

Fig. 7 Comparison of tangential boundary stresses around openings

图 8 是采用起裂判据 CIC 评判的不同洞室形状下的围岩损伤区云图, 其中图 8 (a) 和图 8 (b) 分别对应 ESS 试验洞群 (图 6) 中的 U1 和 M1。

根据图 8 中采用起裂判据 CIC 表征的损伤区云图, 可以看出随着椭圆旋转 (逐渐远离谐洞), 局部区域 CIC 值较大, 表征该区域内围岩高度损伤进而而破裂 (EFZ), 但洞室整体上的损伤区范围有了大幅度减少, 如图 8 (c) 和 (d), 损伤区域位于洞室顶部 (高压压缩应力导致裂纹扩展) 和边墙 (拉应力导致裂纹扩展) 的局部区域。综合以上分析, 可以得出这样一个结论: 通过对初始应力场分析, 可在小主应力方向上设置小曲率半径, 将高压压缩应力限制在局部范围之内。而这些局部的高应力梯度区似乎对开挖体的整体稳定性没有太大影响 (在一定范围内破裂, 最终会形成高围压抑制不稳定裂纹扩展)。需要补充说明的是, 图 8 (c) 和图 8 (d) 虽然把超应力集中限制在了洞室顶部一定范围内, 却增加了洞室边界上的拉应力范围, 这主要和 ESS 洞群原位高应力比 (5.45) 有关, 将在后文中详细讨论。

上述研究均基于弹性应力分析, 起裂判据 CIC 是对围岩损伤区进行的初步估计。任何岩石的破裂和扩展都会引起洞室周围应力的重新分布 (向围岩深部转移), 应力场的改变又会造成进一步破坏, 即这个问题是非线性的。故进一步研究更合适的岩石本构模型及岩体应力场演化规律是十分必要的, 这将在后续研究

中进行讨论。

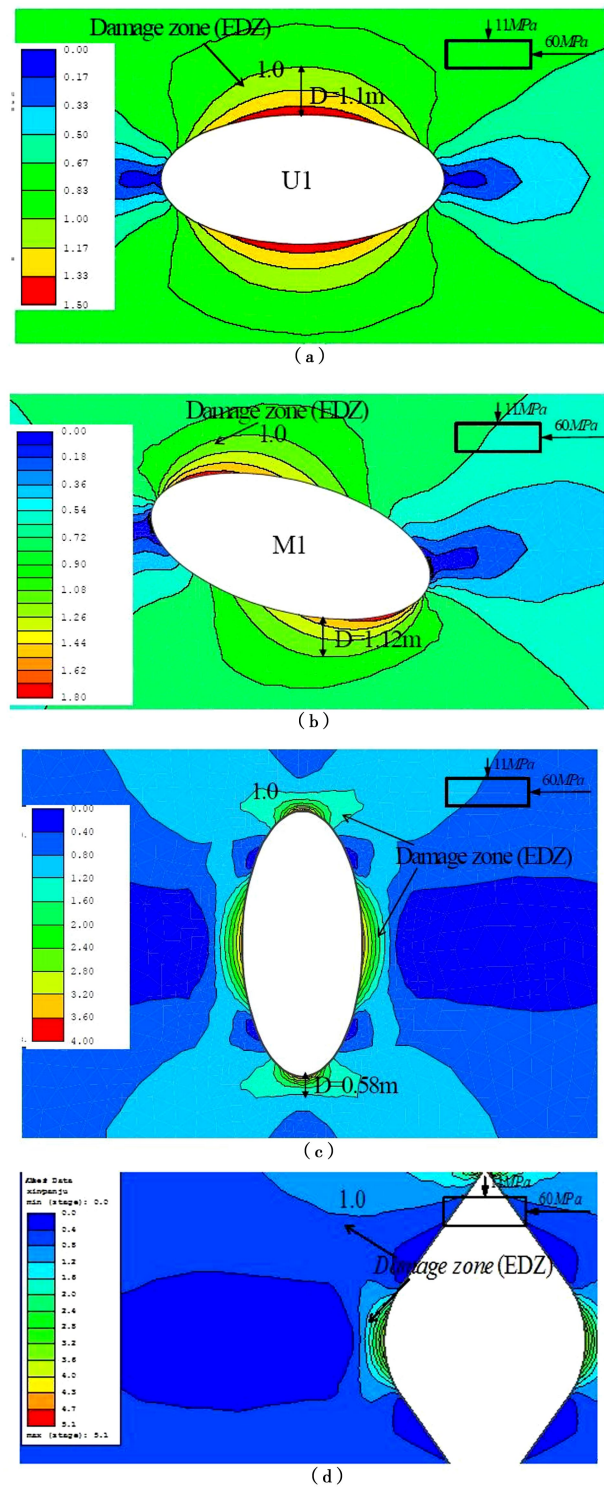


图 8 不同洞室断面损伤区云图对比

Fig. 8 Comparison of damage zones around openings

### 4 讨 论

在深埋脆性岩体中开挖隧洞, 围岩的破裂过程受开挖诱导应力控制, 这与浅部工程节理控制模式不同。当应力高到足够引起围岩大量破坏时, 边界相对均匀的应力分布 (谐洞) 不能作为洞室设计的合理基础。



按照 Fairhurst<sup>[18]</sup>的观点, 本文从洞室损伤区范围的角度考虑, 发现在小主应力方向上设置小曲率半径, 可将高压应力限制在局部范围之内, 从而避免洞周大范围的损伤破裂。需要说明的是, 图 8 中 (c) 和 (d) 虽然把超应力限制在了一定的范围之内, 却增加了洞室边界上的拉应力范围, 导致边墙部位一定程度的受拉破裂。引起拉应力的主要原因在于原位应力场的应力比过大, 根据 Kirsch 解答, 当原位应力比大于 3 时, 圆形洞室边界上将不可避免的出现拉应力, 而偏离“谐洞”的椭圆形洞室加剧了这种效应。ESS 试验洞处于高应力比 (5.45) 的地应力场中, 洞周必然会出现拉应力区, 但这并不意味着局限超应力范围观点的错误, 理由如下: ①一般而言, 地下工程的原位应力比很少能达到 ESS 试验洞如此之高 (5.45), 所以并不会出现太多的拉应力区 (硬岩洞室中大量出现的片帮、剥落等张拉破坏主要是由于切向压缩应力集中, 径向低围压 (卸荷) 导致); ②与图 8 (a) 相比, 图 8 (c) 和图 8 (d) 中由于拉应力增加的损伤范围 (边墙部位), 远小于顶拱处损伤区域 (压应力导致) 的减少程度, 从优化的角度考虑, 局部增加拉应力的代价是可以接受的。

为了印证以上观点, 笔者再次以锦屏二级引水隧洞#3 试验洞 F 支洞<sup>[4]</sup>为例, F 支洞损伤区云图 (采用起裂判据 CIC 表征) 如前文中图 5 所示。图 9 是对 F 支洞 (城门洞型) 优化后的椭圆形断面图 (在“谐洞”基础上旋转了 90°, 即小主应力方向设置了小曲率半径), 椭圆洞室与 F 支洞的宽度保持一致 (F 支洞宽 7.5 m, 高 8 m, 椭圆洞室宽 7.5 m, 高 5 m)。

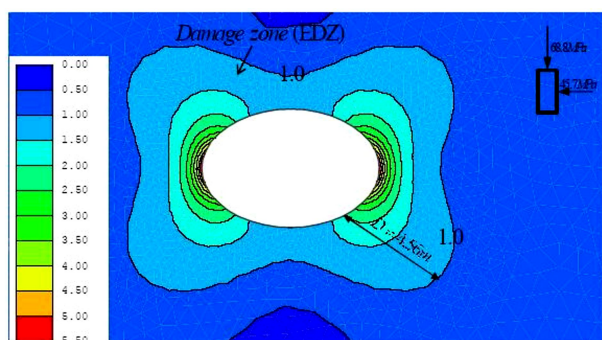


图 9 椭圆洞室损伤区云图 (对 F 支洞断面优化)

Fig. 9 Damage zone around elliptical opening (optimization of branch tunnel F)

对比图 5 与图 9, 可以发现 F 支洞 (城门洞型) 临空面附近大部分岩体处于高度损伤状态, 并且损伤区的范围较大, 最大损伤区深度约为 7.42 m; 而在图 9 中, 椭圆形洞室把高度损伤区域局限在了小曲率半径处, 并且洞室围岩的损伤范围也有了大幅度减少, 最大损伤区深度约为 4.56 m。由于原位应力场应力比

较小 (约 1.5), 椭圆洞室周围并未出现拉应力诱发的损伤区域。综上可见在小主应力方向上设置小曲率半径, 将高应力限制在局部范围内, 可显著减少洞室围岩的损伤破裂范围。

以上研究仅是从围岩应力分布机理以及起裂判据 CIC 表征的损伤区范围的角度出发, 以研究合理的洞室断面, 但实际中洞室断面的设计受制于多种工程因素, 如工程对开挖空间的需求, 施工的难易程度, 地质条件的复杂及多变性, 开挖及支护的工程成本等。所以需要结合具体工程, 考虑以上诸多因素, 寻求一个最优化的方案。

## 5 结 论

在深埋脆性岩体中, 围岩由诱发应力导致的损伤破裂十分普遍。本文对脆性岩体开挖损伤区及其影响因素进行了探讨, 形成如下结论。

(1) 本文对围岩开挖损伤区的相关术语概念进行了阐述, 将开挖后的洞室围岩详细划分为建造损伤区 (CDZ)、应力损伤区 (SIDZ) 和开挖扰动区 (EIZ)。其中 CDZ 和 SIDZ 构成了开挖损伤区 (EDZ) 的全部范围, 在 EDZ 中, 严重损伤的部位 (宏观尺度上破裂) 定义为开挖破裂区 (EFZ)。

(2) 建立了地下洞室开挖破坏数据库, 通过数据统计表明, 硬岩地下工程中由应力控制的围岩破裂占据主要地位。结合完整脆性岩体开挖损伤区实测数据, 并考虑围岩原位应力比的影响, 修正了 Kaiser 等人提出的预测硬岩损伤区深度的经验公式, 修正后的经验公式在力学和拟合优度上均有了一定程度的改善。

(3) 提出起裂判据 CIC (crack initial criterion) 作为初步判别开挖损伤区的力学表征指标, 在此基础上分析了洞室形状、方位对围岩诱发应力和损伤区范围的影响。研究表明, 在高地应力场条件下, “谐洞”并不是最合理的洞形, 而通过在小主应力方向上设置小曲率半径, 可将高压应力限制在局部范围内, 从而避免洞室围岩大范围的损伤破裂。相关认识是初步的, 需要进一步开展理论与工程实践研究。

## 参考文献:

- [1] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 8(41): 1251 - 1275.
- [2] 李邵军, 冯夏庭, 张春生, 等. 深埋隧洞 TBM 开挖损伤区形成与演化过程的数字钻孔摄像观测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1106 - 1112. (Li Shao-jun,



- FENG Xia-ting, ZHANG Chun-sheng, et al. Testing on formation and evolution of tbm excavation damaged zone in deep-buried tunnel based on digital panoramic borehole camera technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1106 – 1112. (in Chinese))
- [3] BLÜMLING P, BERNIER F, LEBON P, et al. The excavation damaged zone in clay formation time-dependent behaviour and influence on performance assessment[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 2007, **32**: 588 – 99.
- [4] 李占海. 深埋隧洞开挖损伤区的演化与形成机制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013. (LI Zhan-hai. The Formation and Evolution Mechanism of Excavation Damaged Zone under Deep Tunnel Excavation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese))
- [5] KAISER P K, MCCREATH D R, TANNANT D D. Canadian rockburst support handbook[M]. Sudbury: Camiro, 1996: 10.
- [6] JAKUBICK A T, FRANZ T. Vacuum testing of the permeability of the excavation damaged zone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, **26**(2): 165 – 82.
- [7] 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.
- [8] 彭俊, 荣冠, 周创兵, 等. 一种基于 GSI 弱化的应变软化模型[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(3): 499 – 507. (PENG Jun, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing, et al. A strain-softening model based on GSI softening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(3): 499 – 507. (in Chinese))
- [9] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. 煤炭学报, 1994, **19**(1): 21 – 32. (DONG Fang-ting, SONG Hong-wei, GUO Zhi-hong, et al. Roadway support theory based on broken rock zone[J]. Journal of China Coal Society, 1994, **19**(1): 21 – 32. (in Chinese))
- [10] HARRISON J P, HUDSON J A. Engineering rock mechanics: Part 2: Illustrative worked examples[M]. Elsevier: Pergamon, 2000.
- [11] EBERHARDT E, DIEDERICHS M. Review of engineering geology and rock engineering aspects of the construction of a KBS-3 repository at the Forsmark site—initial review phase[M]. Stockholm: Swedish Radiation Safety Authority, 2012.
- [12] SIREN T, KANTIA P, RINNE M. Considerations and observations of stress-induced and construction-induced excavation damage zone in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, **73**: 165 – 74.
- [13] MALMGREN L, SAIANG D, TÖYRÄ J, et al. The excavation disturbed zone (EDZ) at Kiirunavaara mine, Sweden—by seismic measurements[J]. J Appl Geophys 2007, **61**: 1 – 15.
- [14] PERRAS M A. Understanding and predicting excavation damage in sedimentary rocks: A continuum based approach[D]. Kingston: Queen's University, 2014.
- [15] JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1976.
- [16] 于学馥. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983. (YU Xue-fu. The stability analysis of surrounding rock of underground engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1983. (in Chinese))
- [17] RICHARDS R, BJORKMAN G S. Optimum shapes for unlined tunnels and cavities[J]. Engineering Geology, 1978, **12**(2): 171 – 179.
- [18] FAIRHURST C, CARRANZA-TORRES C. Some comments on design procedures for tunnel supports in rock. in proceedings[C]// University of Minnesota 50th Annual Geotechnical Conference. LABUZ J F, BENTLER J G, Eds. Minneapolis: University of Minnesota, 2002: 21 – 84.

(责任编辑 黄贤沙)