

文章编号: 1673-3363-(2015)04-0585-07

# 基于透明岩体的深埋软岩巷道变形破裂规律研究

林志斌, 李元海, 高文艺, 张顺金, 杨帆

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要** 针对深部岩体物理模型试验中存在的内部变形量测难题, 采用透明岩体相似模拟试验新方法, 利用自行研制的数字散斑相关变形量测技术, 通过进一步对模型内部制斑方法展开实验研究, 得到了非构造应力作用下深埋圆形软岩巷道围岩的内部变形与破裂规律。研究表明: 1) 提出的透明岩体人工填充式制斑方法能够有效保障数字照相变形量测的实施与精度; 2) 不同埋深下, 围岩的径向位移与其距巷道表面的距离大体呈指数衰减关系; 3) 围岩的宏观裂纹数目、总长、破裂区域宽度与其埋深呈指数增长关系, 而破裂分形维数则与埋深呈线性增长关系; 4) 巷道两帮及对角线处的浅部岩体为重点锚喷支护与注浆加固区, 同时, 应采用桁架、格栅等构件形成封闭支护结构和有效承载环, 防止巷道发生滑动失稳破坏。

**关键词** 透明岩体; 数字照相量测; 人工制斑; 变形破裂

**中图分类号** TU 45

**文献标志码** A

**DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.04.010

## Study on deformation and cracking laws around deep soft roadway based on the transparent rock

LIN Zhibin, LI Yuanhai, GAO Wenyi, ZHANG Shunjin, YANG Fang

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract** In the physical model test of deep rock, the measurement on the internal deformation and rupture is a challenge. In order to solve the problem, based on the transparent rock simulation experiment, the digital speckle correlation deformation measurement method has been adopted and the spot methods have been further studied. On the basis, spatio-temporal evolution law of the internal deformation and rupture in deep circular tunnels without tectonic stress has been obtained. The conclusions are as follows: 1) the artificial filling spot method of transparent rock presented in this article could guarantee the implementation and accuracy of digital photographic deformation measurement; 2) under different buried depths, the radial rock displacement at the roof, bottom and two sides is in an exponential attenuation relationship with the distance from the roadway surface; 3) the number and overall length of macroscopic crack as well as the width of failure zone are in an exponential growth relationship with the depth, and the rupture fractal dimension satisfies linear growth condition with the depth; 4) under the tectonic stress, the shallow rock in the two diagonals should be key supporting parts around deep circular roadway. In addition to spraying anchor supporting of roadway, grouting reinforcement is necessary

收稿日期: 2014-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174197); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB046905); 江苏省高校“青蓝工程”中青年学术带头人培养项目(2012); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(2012)

作者简介: 林志斌(1988—), 男, 福建省宁德市人, 博士研究生, 从事隧道及地下工程方面的研究。

通信作者: 李元海

E-mail: Lyh@cumt.edu.cn

Tel: 13914884145

to the shallow rock in two sides and diagonal. The supporting structure around the tunnel should be linked into a unified whole unit by truss and grilling, forming an effective bearing ring to prevent sliding instability failure of roadway.

**Key words** transparent rock; digital photogrammetry; artificial spotting; deformation and fracture

物理相似模拟实验是研究岩土工程问题的重要手段, 岩土模型内外变形的细致量测是全面分析岩土变形规律与机理的重要依据; 然而模型内部全场变形的有效观测难题一直未能得到解决, 直到一种基于透明材料的透明土实验方法出现<sup>[1-2]</sup>。但这种方法目前主要适用于土体相关实验研究<sup>[3-4]</sup>, 而岩体模型实验新方法的探索与研究刚刚起步<sup>[5-6]</sup>, 但有望为岩土透明相似材料开拓一个新的研究与应用方向。

目前, 岩体物理相似实验多采用由不同骨料(如河砂、铁矿粉、重晶石粉等)和胶结料(如松香酒精、石膏、水泥、石蜡、机油等)构成的各种岩体相似材料<sup>[7-10]</sup>。这些材料具有较多优点, 但存在一个共同问题, 即材料不透明致使模型内部的变形无法直接观测。一般采取钻孔摄像和 CT 扫描 2 种技术, 前者可对模型内部局部区域进行直接照相观测, 但操作复杂且会对模型造成损伤, 另外, 所获得的数据量有限, 对于分析岩体内部的“全域”变形特征来说远远不够; 而后者虽能对模型内部的全域变形进行无损观测, 但价格昂贵且只能用于小尺寸模型。因而, 岩体内部全面细致的变形破裂及其复杂力学行为规律的实验研究仍然受到很大局限。

近年透明土体技术的发展和应用, 为岩体内部“全域”变形破裂的直接观测提供了一个新思路。许国安<sup>[11]</sup>、秦先林<sup>[5]</sup>、张顺金<sup>[6]</sup>等采用硅胶粉、液状石蜡、正十三烷初步研制出了透明岩体相似材料, 并对其透明度、与工程岩体的力学相似性等关键问题进行了论证, 取得了一定成果, 但都未能提出透明岩体模型内部有效的变形观测方法。

为此, 本文在透明岩体相似材料的基础上, 对透明岩体模型内部的制斑方法展开进一步研究, 并依托具体软岩巷道工程, 研究非构造应力下深埋圆形巷道围岩的内部变形破裂规律。

1 工程背景

以平煤集团十二矿的一条埋深约 980 m 的软岩巷道为工程背景, 该巷道上方覆岩层平均重度为 24.5 kN/m<sup>3</sup>, 掘进断面形状为直径 3 m 的圆形, 巷道所处地层为单一泥岩, 其基本物理力学参数如表 1。

表 1 泥岩基本物理力学参数  
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of mudstone

岩层名称	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/ MPa
泥岩	21.5	1.28	2.68	0.23	41.8	1.8

2 透明岩体巷道模型试验设计

2.1 模型主要参数与试验系统

以抗压强度作为主要相似指标进行透明模型材料的配制。透明材料中硅粉、液状石蜡和正十三烷的质量配合比为 1.19 : 1 : 0.835, 根据既有研究<sup>[5]</sup>, 选择 1 MPa 的固结压力, 对模型进行为期 25 d 的固结压密, 获得的实际模型材料单轴抗压强度  $\sigma_{cm}$  为 0.284 MPa。根据相似理论计算, 模型的几何相似比  $C_L$  和容重相似比  $C_\gamma$  分别为 33.0 和 2.29。取实验模型的长宽高为 400 mm×350 mm×150 mm(相当于实际 13.2 m×11.6 m×5.0 m), 巷道开挖直径为 90 mm(相当于实际 3 m)。模型试验系统布置如图 1 所示。

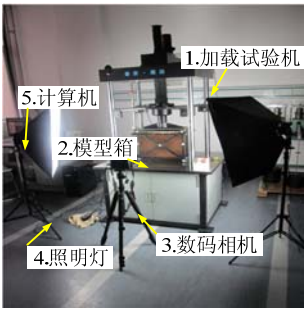


图 1 透明岩体巷道模型试验系统布置图  
Fig.1 Layout of tunnel model test system with transparent rock

模型内部变形观测采用基于数字散斑相关原理的数字照相量测方法。数码相机采用佳能 EOS-6D, 图像分辨率为 2 100 万像素。实验时, 图像由计算机软件按设定采集频率自动拍摄并存储到硬盘中, 图像变形分析则采用自行研制的岩土工程高精度数字照相量测软件系统 PhotoInfor<sup>[12-13]</sup>。

2.2 人工制斑与模型制作

1) 内部制斑方法

由于透明岩体模型采用的骨料颗粒细小, 固结

压密程度高, 纹理特征不明显, 而数字照相量测要求模型目标具有较为丰富的纹理特征, 因此, 如何采用人工制斑方法增强透明岩体内部观测面的图像纹理特征是一个关键问题。一种方法是借鉴透明土体激光制斑技术, 使用线状激光光源发出面状光束对透明岩体模型进行竖直激光切面, 为此, 先用 300 目和 30 目的混合硅粉制作一个透明岩体模型, 然后采用一对可调节功率为 75 mW 的红外线线状激光光源对其进行切面。研究发现, 激光切面只有在距模型表面 10 mm 范围内时, 才能清楚看到激光切面部分区域的透明岩体颗粒(图 2a); 当距模型表面大于 10 mm 时, 激光切面上的透明岩体颗粒难以分辨(图 2b)。其原因在于透明岩体硅胶粉颗粒在较大的固结压力下发生紧密堆积, 激光穿透能力减弱; 如增大激光功率, 激光的穿透能力得到增强, 但又会引起激光切面图像的过度饱和失真; 此外, 激光切面的图像散斑质量高低与模型大小直接相关, 一般模型越大, 激光穿透效果越差。

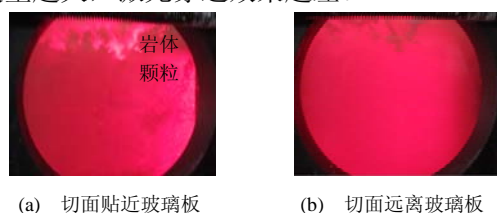


图2 透明岩体激光制斑效果

Fig.2 Laser spot effect of transparent rock

由于透明土激光制斑方法应用于透明岩体未能取得预期效果, 因此提出在浇筑模型时, 对内部特定变形观测面洒落与模型材料同质的染色颗粒形成填充式人工制斑。这种人工制斑方法的特点是: ① 不受模型横向尺寸和激光源的限制, 可直接使用白光照明; ② 制斑面的图像纹理特征丰富且各处亮度基本一致, 能够观测该面的全场变形; ③ 模型中只能有一个制斑面且该面距照相一侧玻璃板的距离小于 6 cm 为宜。

## 2) 模型制作过程

透明岩体模型制作过程如下: ① 将模型玻璃箱平放, 逐渐往箱内分层(每层厚 20~30 mm)倒入相似材料, 再进行抽真空浇筑; ② 当浇筑高度达到人工制斑面的预定位置时(距箱底约 40 mm), 在其上均匀撒 1 层彩色硅粉颗粒形成人工制斑面, 如图 3a; ③ 继续分层浇筑, 直至整个模型浇筑完成, 如图 3b; ④ 盖上玻璃箱正面板, 立正玻璃箱, 去除顶部玻璃板, 进行钢框架加固以防止高固结压力

下玻璃板发生鼓肚变形, 如图 3c; ⑤ 将透明岩体模型搬到自制的透明岩体加载实验系统上进行固结, 如图 3d。

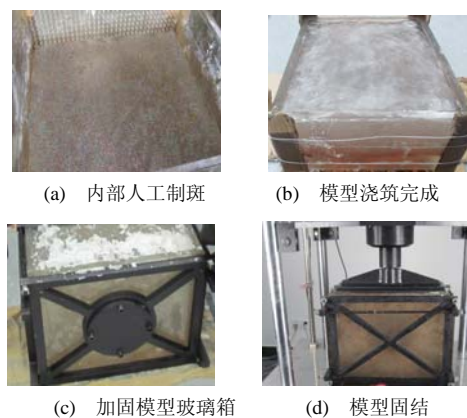


图3 透明岩体模型制作过程

Fig.3 Production process of transparent rock model

## 2.3 试验加载过程

对透明岩体模型采用逐步加载方式来观测巷道围岩的变形破裂规律。试验过程如下:

1) 试验准备: 对模型顶部施加初始应力 0.318 MPa(对应实际 24.0 MPa); 然后在模型观测面两侧各布设 1 台摄影灯具, 保证人工制斑面光照均匀; 同时, 在模型观测面正前方约 0.5 m 处布设 1 台数码相机, 调整相机参数确保照相清晰。

2) 巷道开挖加载: 采用自制开挖装置对巷道进行掘进开挖, 开挖完成后, 按加载速率 10 N/s 对模型顶部加载直至巷道周边岩体发生失稳破坏。加载过程中, 用计算机控制相机进行图像自动采集, 采集频率为 10 s 一张。

## 3 围岩变形与破裂演化规律分析

### 3.1 围岩变形

#### 1) 竖向位移

图 4 为不同顶部荷载作用下模型制斑平面处岩体的竖向位移云图。由图可知, 巷道顶部岩体竖向位移总是在拱顶附近最大, 并由该位置往围岩深处逐渐减小, 但减小幅度相对很小, 这表明顶部岩体随荷载增大, 其位移以整体性滑动为主, 由图 4e 可知, 顶部岩体沿巷道两侧拱腰斜向上  $33^{\circ}\sim 37^{\circ}$  的 2 条弧线向巷道内发生滑动。此外, 巷道两帮浅部岩体随着荷载增大, 其破裂程度和破裂范围逐渐增大, 而巷道两帮深部岩体竖向位移随荷载增大而向下缓慢增大, 进而挤压巷道底部岩体使其发生隆起。



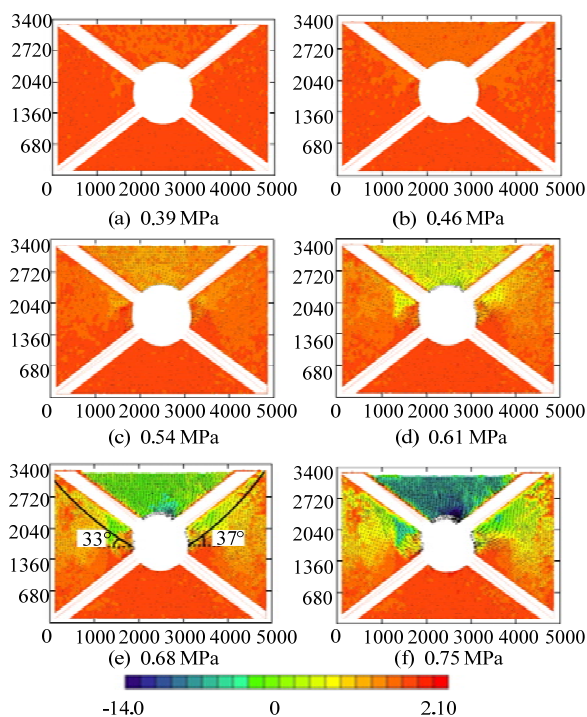


图 4 不同荷载下围岩的竖向位移云图 (mm)

Fig.4 Vertical displacement contours of surrounding rock under different load

## 2) 水平位移

不同顶部荷载作用下模型制斑平面处岩体的水平位移分布如图 5。

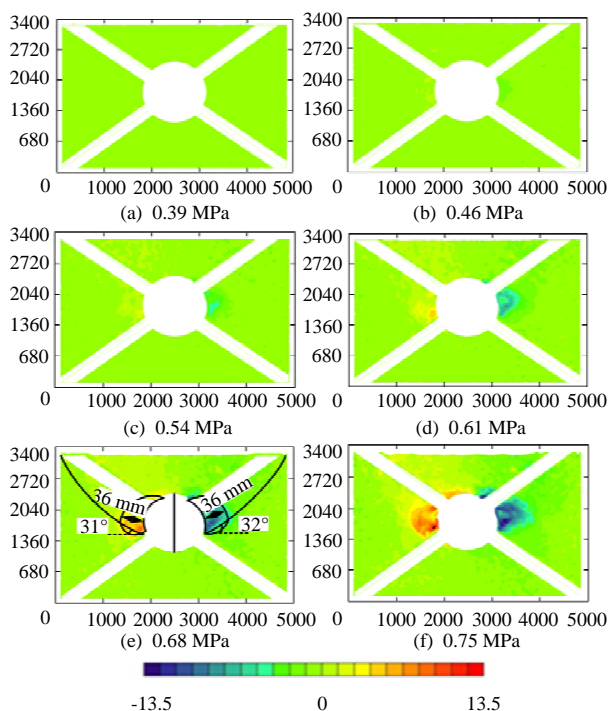


图 5 不同荷载下巷道围岩的水平位移云图 (mm)

Fig.5 Horizontal displacement contours of roadway under different load

由图 5 可知: 巷道开挖后, 围岩水平位移主要发生在两侧拱腰附近, 并随荷载的增大而逐渐增大且快速往拱顶方向扩展, 当荷载大于 0.61 MPa 时, 周边岩体水平位移则集中发生在巷道表面左上或右上约 36 mm(对应实际范围约 1.2 m)范围内的区域(图 5e)。这进一步表明, 随着荷载的增加, 顶板岩体沿巷道两侧拱腰斜向上 30° 左右的 2 条弧线向巷道内发生滑动, 导致巷道失稳破坏。究其原因, 随荷载的增加, 巷道两帮岩体破裂逐渐往深处及拱顶扩展, 其破裂程度和破裂范围逐渐增大, 该部分岩体承载能力逐渐降低, 导致巷道顶部岩体在拱腰处“立足不稳”, 于是在不断增大的荷载作用下发生滑动失稳。

## 3) 岩体位移随荷载的变化规律

不同荷载下制斑平面处巷道顶部岩体竖向位移分布曲线(图 6)表明, 随荷载增大, 巷道顶部岩体竖向位移逐渐增大且速率加快。不同荷载作用下, 顶部岩体竖向位移  $u$  与其距巷表距离  $d$  均大体呈指数衰减关系。当荷载为 0.82 MPa 时, 顶部岩体径向位移  $u_{td}$  与  $d$  的关系为  $u_{td} = -3.492e^{-d/19.414} - 9.75$ ,  $R^2 = 0.948$ 。

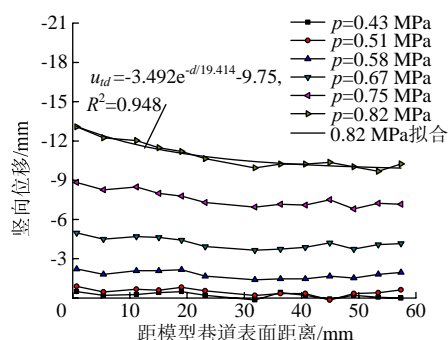


图 6 不同荷载下巷道顶部岩体的竖向位移曲线

Fig.6 Vertical displacement distribution curves of top rock in roadway under different load

图 7 为巷道右帮岩体水平位移随荷载的变化曲线。随着荷载增大, 右帮岩体水平位移逐渐增大, 如不考虑巷道右帮 20 mm 的岩体随荷载增加发生严重破裂和数字照相量测位移量测误差, 不同荷载作用下巷道右帮岩体水平位移  $u_{rd}$  与其距巷表距离  $d$  呈指数衰减关系。其中, 当顶部荷载为 0.75 MPa 时,  $u_{rd} = -25.279e^{-d/19.17} + 0.065$ ,  $R^2 = 0.988$ 。由图 8 可知, 拱顶底岩体径向位移  $u$  均与荷载  $p$  呈指数递增关系, 其中拱顶岩体径向位移  $u_{tp}$  与  $p$  的关系为  $u_{tp} = -20.163/(1 + e^{(p-0.698)/0.082}) + 20.131$ ,  $R^2 = 0.999$ 。

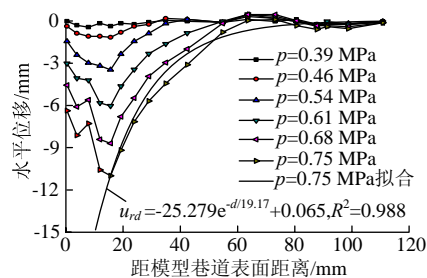


图7 不同荷载下巷道右帮岩体的水平位移曲线

Fig.7 Horizontal displacement distribution curves of rock at the right side in the roadway under different load

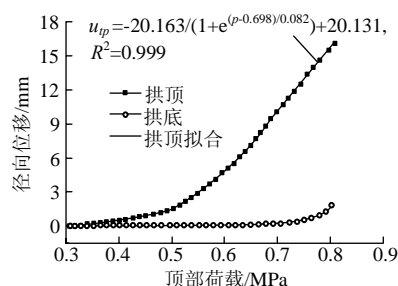


图8 巷道表面岩体径向位移随荷载的变化曲线

Fig.8 Curves of radial displacement changing with model load at the roadway surface

### 3.2 围岩破裂

图9为制斑平面处岩体在不同荷载作用下的破裂模式图。

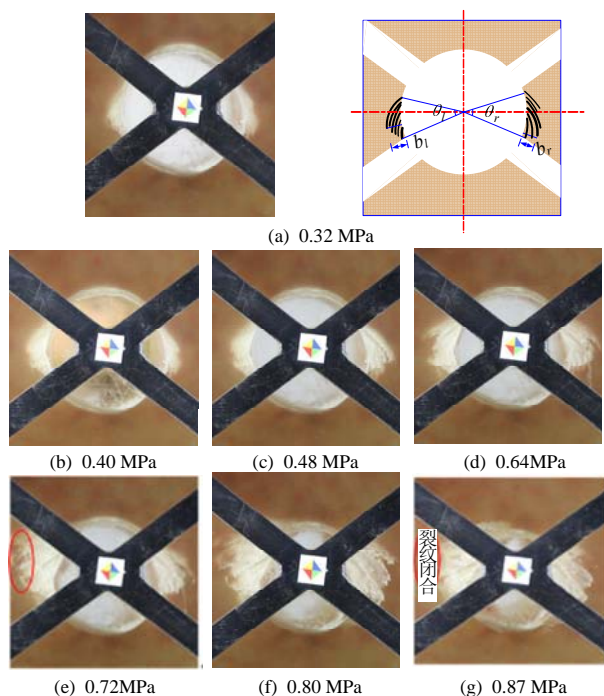


图9 巷道周边岩体破裂随荷载的变化发展过程

Fig.9 Fracture development process of rock around roadway changing with load

由图9可知:

1) 在荷载由 0.32 MPa 增至 0.40 MPa 的过程中, 岩体在巷道两侧拱腰处出现的裂纹虽稍有延伸, 但变化不大。

2) 当荷载增至 0.48 MPa 时, 岩体除了在右帮原破裂区上方 3 mm 处新增 1 条长约为 37 mm、斜向下 45°的正裂纹(裂纹延伸方向与加载方向相同), 右帮破裂区宽度由 11 mm 增至 22 mm 外, 在左帮中下位置也开始出现 1 条长度约为 18 mm、斜向上 30°的逆裂纹(裂纹延伸方向与加载方向相反)。

3) 当继续加载至 0.64 MPa 时, 围岩破裂区内的裂纹数和范围明显增大。主要表现为: ① 两帮已有裂纹继续增长、增宽且部分裂纹开始贯通; ② 在左帮原先破裂区的上方新增 1 条长度为 34 mm、斜向下 27°的正裂纹, 在右帮原先破裂区的上方新增 1 条长度为 38 mm、斜向下 42°的正裂纹; ③ 在左帮破裂区内于第 1 条逆向裂纹上方 5 mm 处平行出现第 2 条逆向裂纹。

4) 当荷载为 0.72 MPa 时, 巷道左上和右上位置的岩体均发生了较大的收敛变形, 导致两帮岩体裂纹发生偏转。相对右帮而言, 左帮岩体的裂纹条数和破裂范围明显增大: ① 已出现的裂纹的长度迅速增长; ② 在原先破裂区上方外侧出现了多条新裂纹, 这些裂纹的延伸方向约为斜向下 30°~42°。

5) 当荷载增至 0.80 MPa 时, 巷道左上和右上位置岩体的收敛变形更加明显, 两帮岩体的裂纹偏转加剧, 此时: ① 左帮岩体的裂纹扩展变化很小, 有些甚至发生了闭合; ② 右帮岩体已有裂纹延伸与贯通明显, 但极少裂纹也发生了闭合; ③ 岩体在右帮原先破裂区上方外侧新增了 2 条长度为 21 mm、斜向下 38°的平行正裂纹; ④ 顶板和底板围岩均开始出现水平裂纹。

6) 当荷载达到 0.87 MPa 时, 巷道左上和右上位置岩体发生严重变形, 两帮岩体裂纹发生大幅度的偏转并且闭合加剧, 而顶底板裂纹数量明显增加, 即, 巷道周边岩体破裂开始向顶底板发展转移。

为定量分析制斑平面处岩体随荷载的破裂发展规律, 对不同荷载下的围岩破裂图像进行裂纹素描(如图 9a)后, 统计其宏观裂纹数目  $n$  和总长  $l$ 、破裂区域宽度  $b$  和圆心角  $\theta$  以及破裂分形维数  $D$ 。其中,  $n$  指的是独立裂纹(起裂位置不与其他裂纹相接触)的总条数, 不包括支裂纹(起裂位置位于其他裂纹上);  $l$  为各条宏观裂纹的长度总和;  $b$  为破裂区最外围裂纹点至巷道表面的距离;  $\theta$  为破裂区域与

巷道中心连线的最大夹角;  $D$  为宏观裂纹在一定范围内(边长为 1.6 倍洞径, 中心为巷道中心的正方形区域)的几何分形值, 它是一种定量描述岩体裂纹复杂程度和不规则性的有效手段, 本文共采用了 FractalFox 中的 TPSA(基于三棱形表面积的分形维数法, Triangular prism surface area)和 BC(盒维数法, Box Counting)2 种分形维数法。

由图 10 围岩各破裂参数随荷载的变化曲线可以看出, 随着模型顶部荷载的逐渐加大:

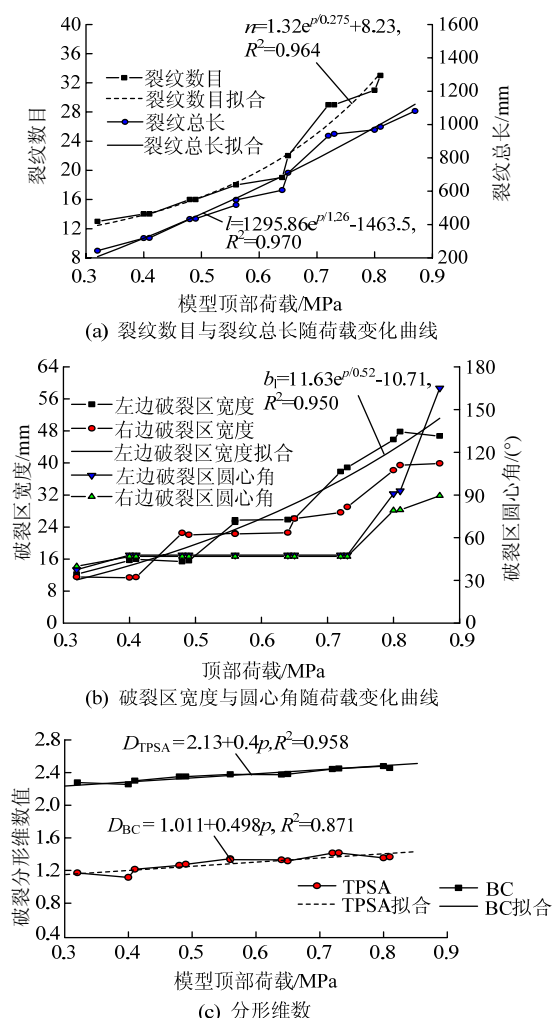


图 10 围岩破裂参数与荷载的关系曲线

Fig.10 Relation curves of rupture parameters and load

1) 制斑平面处岩体的裂纹数目和裂纹总长均逐渐增大且速率也随之变大, 即, 岩体的裂纹数目  $n$  和裂纹总长  $l$  与荷载  $p$  呈指数增长关系:

$$n = 1.32e^{p/0.275} + 8.23, R^2 = 0.964$$

$$l = 1295.86e^{p/1.26} - 1463.5, R^2 = 0.970$$

2) 制斑平面处岩体破裂区宽度  $b$  整体上也呈指数递增式增大, 其中, 巷道左帮岩体破裂宽度  $b_l$  与荷载  $p$  的关系式为

$$b_l = 11.63e^{p/0.52} - 10.71, R^2 = 0.950$$

3) 制斑平面处岩体破裂盒分形维数  $D_{BC}$  与三棱形表面积分形维数  $D_{TPSA}$  呈线性增大, 它们与荷载  $p$  的关系式分别为:

$$D_{TPSA} = 2.13 + 0.42p, R^2 = 0.958$$

$$D_{BC} = 1.011 + 0.498p, R^2 = 0.871$$

#### 4 深埋圆形巷道支护对策分析

由上述不同荷载作用下巷道的变形破裂演化规律可知, 巷道埋深越深, 围岩塑性特征越明显, 并由此表现出显著的变形。无构造应力下的深埋圆形软岩巷道围岩在 2 条对角线位置(图 11 中  $\theta = 30^\circ \sim 60^\circ$ )的应力集中系数最高, 其收敛变形破坏也最为严重, 这主要是由巷道两帮围岩的破裂在开挖影响下逐渐往顶底板方向快速扩展并在对角线处汇聚贯通导致; 同时因两帮拱腰处岩体破裂程度和范围的增大, 其承载能力逐渐降低, 导致巷道顶底部岩体在拱腰处的“立足不稳”, 于是顶底部岩体就会沿着巷道两侧拱腰斜向上或斜向下  $33^\circ \sim 37^\circ$  的 4 条弧线而向巷道内发生整体滑动, 最终导致巷道发生破坏。因此针对无构造应力下的深埋圆形软岩巷道, 其支护对策建议如图 11, 具体为:

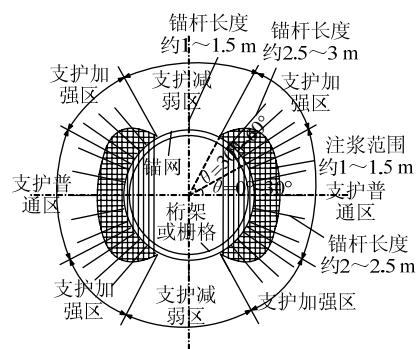


图 11 无构造应力下深埋圆形软岩巷道支护对策

Fig.11 Support countermeasures of deep circular tunnels under tectonic stress

1) 除对巷道两帮岩体进行喷锚支护外, 也需对破裂区范围内的岩体进行注浆加强支护, 保证两帮岩体的承载能力, 防止巷道滑动失稳。

2) 巷道 2 条对角线方向的浅层岩体应为深埋圆形巷道的重点支护部位, 应选择相对大的支护强度; 同时为防止巷道顶底部岩体沿 4 条弧线发生滑动, 须对该位置破裂区岩体进行注浆加固; 此外, 还应考虑采用锚网、桁架、格栅等将巷道周边岩体支护结构连成整体, 形成有效承载环。

3) 巷道顶底部岩体受开挖动压影响破裂范



围相对很小甚至不会发生破裂, 因此, 该处岩体喷锚支护强度可相对较小或仅在顶部进行喷射混凝土支护。

4) 由于该巷道周边岩体变形破裂扩展在 0.64~0.70 MPa 时(应力集中系数为 2~2.2)最为剧烈, 因此在巷道开挖过程中, 应对周边岩体的应力加强监测, 防止顶底部岩体发生失稳破坏。

## 5 结 论

1) 针对透明岩体内部变形观测难题, 提出了在透明岩体内部进行人工填充式制斑方法, 提高了透明岩体内部观测面的图像数字散斑相关性和数字照相变形量测的精度。

2) 不同埋深下, 巷道围岩的径向位移与其距巷道表面的距离大体呈指数衰减关系; 随着顶部荷载的增加, 顶板岩体沿巷道两侧拱腰斜向上 30° 左右的 2 条弧线向巷道内发生整体性剪切滑动, 导致巷道失稳破坏。

3) 巷道围岩破裂区内的宏观裂纹数目、总长、区域宽度与巷道埋深呈指数增长关系, 而破裂分形维数则与巷道埋深则呈线性增长关系。

4) 巷道两帮及对角线处的浅部岩体为重点锚喷支护与注浆加固区, 同时, 应采用桁架、格栅等构件形成封闭支护结构和有效承载环, 防止巷道发生滑动失稳破坏。

## 参考文献:

- [1] 隋旺华, 高岳, LIU Jinyuan. 透明土实验技术现状与展望[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 577-582.  
SUI Wanghua, GAO Yue, LIU Jinyuan. Status and prospect of transparent soil experimental technique[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 577-582.
- [2] 孙纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1140-1146.  
SUN Gangqiang, LIU Lu, LIU Hanlong, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1140-1146.
- [3] LIU J, ISKANDER M. Modelling capacity of transparent soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(4): 451-460.
- [4] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土材料的沉桩过程土体三维变形模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 395-400.  
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Model tests on 3-D soil deformation during pile penetration using transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 395-400.
- [5] 秦先林. 透明岩体相似材料研制及其物理力学特性初步研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [6] 张顺金. 透明岩体相似材料研制与实验应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [7] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842-1847.  
WANG Hanpeng, LI Shucui, ZHANG Qiangyong, et al. Development of a new geomechanical similar material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847.
- [8] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433-438.  
GU Jincai, GU Leiyu, CHEN Anmin, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 433-438.
- [9] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道相似模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1684-1690.  
LI Yuanhai, JING Hongwen, LIU Gang, et al. Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1684-1690.
- [10] 周宏伟, 张涛, 薛东杰, 等. 长壁工作面覆岩采动裂隙网络演化特征[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1957-1962.  
ZHOU Hongwei, ZHANG Tao, XUE Dongjie, et al. Evolution of mining-induced crack network in overburden strata of longwall face[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 1957-1962.
- [11] 许国安. 深部巷道围岩变形损伤机理及破裂演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [12] 李元海, 靖洪文, 曾庆有. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3859-3866.  
LI Yuanhai, JING Hongwen, ZENG Qingyou. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup 2): 3859-3866.
- [13] 李元海, 林志斌, 靖洪文, 等. 含动态裂隙岩体的高精度数字散斑相关量测方法[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1060-1068.  
LI Yuanhai, LIN Zhibin, JING Hongwen, et al. High-accuracy digital speckle correlation method for rock with dynamic fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1060-1068.