

文章编号: 1673-3363-(2012)04-0497-08

# 高垂直应力状态下巷道围岩分区破坏特征试验研究

洛锋<sup>1,2</sup>, 杨本生<sup>2,3</sup>, 孙利辉<sup>2,3</sup>, 杨万斌<sup>4</sup>, 崔景昆<sup>2,3</sup>, 张利<sup>2</sup>

(1. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 河北工程大学资源学院, 河北 邯郸 056038; 3. 河北省煤炭矿井建设工程技术研究中心, 河北 邯郸 056038; 4. 河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要** 通过自行研制的 CM60/10 平面应变试验台配合三轴伺服试验机, 发挥伺服稳压性能, 采用相似材料模拟配合数值模拟验证的手段, 分析了高地应力  $\lambda < 1$  状态下无支护巷道围岩破坏过程及特征。试验结果表明: 1) 破坏首先发育在巷道两帮中线, 局部破坏产生后, 逐渐形成一对“楔形”破坏区域。在应力卸压区内, 围岩呈分区破裂形式。深部滑移线由“楔形”破坏区域尖端点处开始延伸, 基本符合对数螺旋线形式; 2) 巷道破坏过程中, 依次出现“楔形破裂带”, “二次破裂带”“贯通失稳带”3 个过程分区。研究指出此类地应力下不同变形时期内, 除控制顶底板初始变形外, 围岩裂隙控制的重点应依次在巷道两帮、肩部和底角、顶板; 3) 通过对  $\lambda < 1$  状态下围岩破坏的数值模拟发现: 两帮围岩垂直应力呈“波浪状”分布, 塑性破坏区呈“分区演化”, 垂直位移呈“锯齿状”分布, 与物理试验基本吻合。

**关键词** 高应力;  $\lambda < 1$  状态; 分区破坏特征; 试验研究

中图分类号 TU 45

文献标识码 A

## Experimental Research on the Failure Characteristics of Surrounding Rock Under High Vertical Ground Stress

LUO Feng<sup>1,2</sup>, YANG Ben-sheng<sup>2,3</sup>, SUN Li-hui<sup>2,3</sup>,  
YANG Wan-bin<sup>4</sup>, CUI Jing-kun<sup>2,3</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. College of Resource, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;  
3. Hebei Technology Research Center of Coal Mine Construction Engineering, Handan, Hebei 056038, China;  
4. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract** By using independent researched and developed CM60/10 plane strain test-bed, combining with the triaxial servo test machine which playing the servo regulator performance, utilizing similar material simulation and numerical simulation, the characteristics of deformation and failure process of roadways with no support under high stress of  $\lambda < 1$  state was analyzed. The results show that: 1) The destruction develops first from the center line of both sidewalls of roadway, after the local failure, there gradually formed a pair of “wedge” failure zone. In the stress relief area, surrounding rocks are destroyed in the form of zonal disintegration. Deep slip-line takes place from the tip point of the “wedge” destruction zone, which conforms to the logarithmic spiral line roughly; 2) In the process of roadway

收稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51174070); 河北省自然科学基金项目 (E2011402046)

作者简介: 洛锋 (1985-), 男, 河北省唐山市人, 博士, 从事矿山压力及控制方面的研究。

E-mail: fluo527@163.com

Tel: 15086702217

destruction, it is followed successively by three partitions of “wedge-shaped destruction zone,” “second destruction zone,” “transfixion instability zone”. The related studys show that during the different deformation period in this kind of ground stress, the failure control should focus on the sidewalls, the skewback and the roof except the control of the initial deformation of roof and floor; 3) Through the numerical simulation of the rock mass failure in  $\lambda < 1$  state, the following results can be found: the vertical stress of the sidewalls is the “wave-like” distribution; the plastic damage zone is “partition evolution”; the vertical displacement is “jaggies-like” distribution. All of these are consistent with the physical experiments.

**Key words** high stress;  $\lambda < 1$  state; characteristics of deformation and failure; experimental research

目前, 深部开采已成为保证能源产出的必由之路。预计未来 20 a 我国很多煤矿将进入到 1 000~1 500 m 的深度<sup>[1]</sup>。高地应力作用下, 岩体破坏特征明显区别于浅部, 其已成为限制开采深度的瓶颈。软岩蠕变性质和塑性流动以及坚硬岩体岩爆等剧烈岩体动力行为。这些不利影响将会给人员通行和正常生产带来极大不便和安全隐患<sup>[2]</sup>。研究巷道围岩破坏过程及特征对有效地进行巷道及硐室稳定性控制有着重要指导意义。

张强勇、李术才等<sup>[3]</sup>研制出一种尺寸可调、能进行同步非均匀加载的新型岩土地质力学模型试验系统。陈陆望、白世伟<sup>[4]</sup>通过自制模型并配合大型真三轴物理模型试验机进行平面应变物理模型试验, 研究了圆形硐室岩爆破坏的应力转移过程及破坏特征。朱维申、李勇等<sup>[5]</sup>研制了高地应力条件下洞群稳定性的地质力学模型试验台, 研究了埋深在 1 000 m 乃至 2 200 m 时洞群变形破坏规律及相关现象。宋义敏、潘一山<sup>[6]</sup>和顾金才等<sup>[7]</sup>、张强勇、陈旭光等<sup>[8]</sup>分别研究了深部开挖硐室围岩分层破裂机制及影响因素。勾攀峰等<sup>[9]</sup>研究了不同水平应力作用下锚杆支护以及无支护条件下的巷道破坏特征。陈坤福<sup>[10]</sup>通过采用大尺度三维模拟实验台研究了深部高应力巷道围岩破坏演变规律, 详尽阐述了围岩变形破坏特征及主应力轴轮换规律。

上述研究均取得了良好的试验成果, 但对巷道围岩破坏过程分区及特征研究相对较少, 本文采用自行研制的 CM60/10 平面应变试验台, 利用相似材料模拟试验配合数值模拟验证的手段, 分析了高地应力  $\lambda$  (侧压系数)  $< 1$  状态下无支护巷道围岩分区破坏过程及特征, 并对围岩破坏过程进行了分区, 指出了巷道不同时期支护的重点, 为此类地应力条件下巷道围岩控制提供一定的参考依据。

## 1 模拟原型及相似比讨论

模拟原型为河北邢台显德汪矿-200 m 水泵房, 埋深 450 m, 其位于 7#煤层底板岩层中, 岩性以粉砂岩为主, 灰黑色, 薄-中厚层状, 性脆, 易碎, 夹薄层细砂岩, 局部发育粉砂岩质泥岩, 含少量黄铁矿微粒。通过测试, 围岩物理力学性质见表 1。

表 1 岩石试验成果表  
Table 1 Mechanical properties of rock

名称	密度/ (g cm <sup>-3</sup> )	抗压强 度/MPa	软化 系数	弹性模 量/MPa	泊松 比	普氏 系数
泥质粉 砂岩	2.62	46.8	0.41	17600	0.11	4.8

根据相似材料模拟理论, 建立模拟相似比如下:

$$C_L = \frac{L_H}{L_M} = 50 \quad (1)$$

式中:  $C_L$  为几何相似比;  $L_H$  为实际尺寸, m;  $L_M$  为模型尺寸, m。

$$C_\sigma = C_\gamma C_L = \frac{2.72 \times 50}{1.5 \sim 1.95} = 91 \sim 69 \quad (2)$$

式中:  $C_\sigma$  为应力相似比;  $C_\gamma$  为容重相似比。

$$C_\sigma = C_\epsilon C_E = 1 \times C_E = C_E = 91 \sim 69 \quad (3)$$

式中:  $C_\epsilon$  为应变相似比;  $C_E$  为弹模相似比。

$$\sigma_z = \gamma H = 25000 \times 450 = 11.25 \text{ MPa} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_z$  为垂直地应力, MPa;  $\gamma$  为岩石容重;  $H$  为埋深 m。

$$\sigma_m = \sigma_h / C_\sigma = 0.13 \sim 0.163 \text{ MPa} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_m$  为模型应力, MPa;  $\sigma_h$  为实际地应力, MPa。

$$E_m = E_h / C_\sigma = 193 \sim 255 \text{ MPa} \quad (6)$$

式中:  $E_m$  为模型弹模, MPa;  $E_h$  为岩石弹模, MPa。

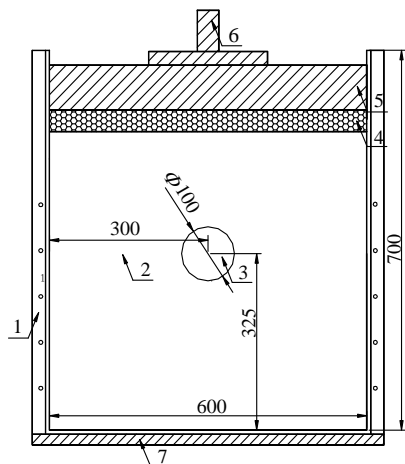
$$C_m = C_h / C_\sigma = 0.53 \sim 0.67 \text{ MPa} \quad (7)$$

式中： $C_m$  为模型强度，MPa； $C_h$  为实际岩石强度，MPa。

2 物理试验系统组建

2.1 CM60/10 平面应变试验台的研制

试验研制了能够配合三轴伺服试验机使用的 CM60/10 平面应变试验台。试验台采用 1: 50 的几何模拟比例。试验模拟实际巷道尺寸为 5 000 mm ×5 000 mm 半圆拱巷道，模拟巷道尺寸简化为 100 mm×100 mm 圆形巷道。出于边界条件的考虑，X，Y 方向留出 5 倍巷道尺寸的合理空间，预留 50×5=250 mm。试验台合理横向长度为 2×(50+250)=600 mm。设计平面应变试验台规格为 600 mm×100 mm×700 mm（长×厚×高），如图 1 所示。



1-模型框架；2-相似材料；3-开挖巷道；4.-均压粗砂；  
5-均压槽钢；6-压力机上压盘；7-压力机下压盘；

图 1 CM60/10 平面应变试验台设计（mm）  
Fig.1 Design of CM60/10 plane strain test-bed

试验台采用槽钢进行 U 型钢架制作及均压控制。采用粗砂进行均压槽钢和相似材料体间的应力缓冲。为了保证平面应变状态，U 型钢架前后采用钢板进行约束。采用厚度为 30 mm 的有机玻璃板进行前挡板方向透视观察。

试验台能够充分发挥伺服机的伺服功能，克服了千斤顶加载后变形卸荷以及大型试验台不易成模及风干慢的缺点，具有成模快，风干快，可以水平制模等优点，利于倾斜岩层布置及开挖多种形状巷道，能够较为真实地模拟巷道围岩在  $\lambda < 1$  状态下的变形破坏特征。

2.2 相似材料选择及其力学性质

试验进行了 25 种不同配比材料或配比号的相似材料力学性质测试。根据相似比，采用以砂骨料，

石膏及腻子粉为胶结物的配比号为 855 的相似材料进行试验。

采用 SAS-2000 三轴伺服试验机获得了各种配比材料的应力-应变全过程曲线，配比号 855 试件岩石力学参数如表 2 所示，应力-应变全过程曲线如图 2 所示。

表 2 T1 (855)试件岩石力学参数  
Table 2 Rock test results of material T1 (855)

配比号	密度/(Kg m <sup>-3</sup> )	最大试验力/kN	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
855	1500	2.01	1.02	207.1	0.41

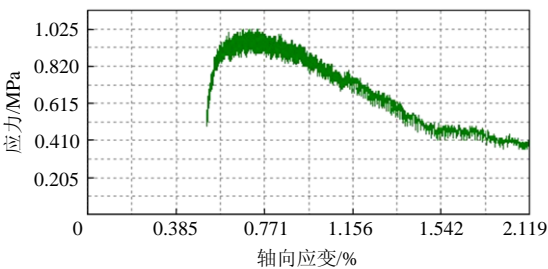


图 2 T1 (855) 试件应力-应变全过程曲线  
Fig.2 Stress-strain curve of T1

此配比条件下，试件的力学性质比较稳定，这种力学参数最为接近相似比要求，较适合针对本原型巷道围岩进行模拟试验研究。

2.3 模型制作

1) 模型装载。

平放试验台后通过圆形套筒模板，分多次将混合材料加入模型框架，并布设应变砖后凿实。

2) 布置应变砖。

首先在圆形模具夹层中铺设一定厚度的相似材料，夯实。放入预先引线的应变砖，保证应变片黏贴位置下厚度 2/3 位置布置在模板高度中央，将数据线通过预制好的送线槽，输出到模型外部。然后继续添加相似材料，直至设计高度，如图 3 所示。

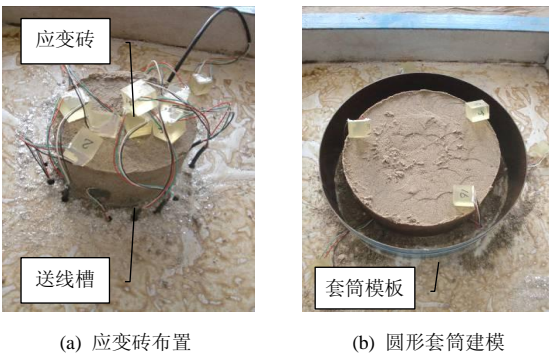


图 3 试验模型制作过程

Fig.3 The actual process of modeling

### 3) 位移测点布置。

成模后,按照设计尺寸进行位移收敛观测点黏贴布点。采用 10 mm×10 mm 的正方制片,进行黏贴布点,采用全站仪进行观测。

## 2.4 试验加载-测试系统的构建

试验加载系统采用长春科新生产的 SAS-2000 三轴伺服试验机。本试验机能够有效地控制加载速度,并能够进行蠕变试验,实现较长时间的恒定载荷稳压加载。表面位移采用全站仪观测配合人工测量。内部应力测量主要采用自制的聚氨酯应变砖<sup>[10]</sup>进行测量。应变片采用 BX120-5CA 三栅应变花。应力、应变测试系统采用江苏东华测试技术有限公司生产的 DH3815N 静态高速应变测试系统。试验加载-测试系统如图 4 所示。



图 4 CM60/10 试验台加载  
Fig.4 CM60/10 test-bed loading

## 2.5 载荷条件施加及巷道开挖

根据应力相似比,分别施加原岩应力  $\gamma H$  及高于原岩应力数倍的地应力模拟巷道的破坏过程。施加如下载荷步: 0.13, 0.23, 0.33, 0.43, 0.53, 0.63

MPa 等,分别模拟不同深度巷道破坏状态(此数值应考虑参照  $C_E$  及实际地应力选定)。

具体操作如下:

1) 施加预应力载荷。施加载荷为 4 KN。保证上、下压头和试验台充分接触,并无歪斜。

2) 初始地应力。按照 0.005 MPa/s 逐渐施加载荷,达到相似初始地应力后稳压。

3) 巷道开挖。采用钻机导洞开挖巷道,硐口直径 100 mm,开挖深度为模型全厚 100 mm。作业过程中保证最终巷道壁光洁并和开挖孔内径平齐。开挖后稳压 20 min,观测变形参数。

4) 后续加载。按照 0.005 MPa/s 逐级加载,每间隔 0.1 MPa 稳压后,观测变形数值,直至巷道充分破坏。

注:全程监测围岩应力。

## 3 物理试验结果分析

### 3.1 围岩裂隙发育及破坏过程细部特征

加载开挖后,逐级施加地应力,巷道顶底板出现宏观变形,巷道围岩裂隙发育及破坏过程如下:

#### 1) 浅层剥落期

巷道加载初期(如图 5a),当上部垂直载荷较小时,巷道壁表面首先宏观表现为片状鼓胀。在剥落过程中,内壁围岩依次出现粗糙、鼓胀、局部黏连、脱离 4 个宏观可见状态。这是由于巷道围岩破坏初期浅层岩体在高应力的作用下,受到压剪破坏,表面围岩卸压能量释放的结果。这部分能量一部分用于破裂面起裂、裂纹拓展时的消耗,另一部分用来产生松动区位移做功。

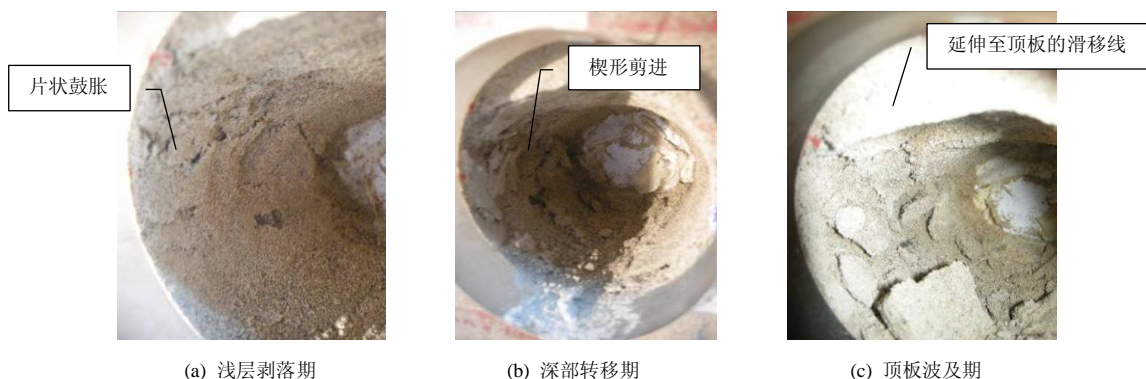


图 5 帮部剥落破坏演化

Fig.5 Exfoliation failure evolution of the sidewalls

#### 2) 深部转移期

当加压载荷逐渐加大(如图 5b),围岩应力逐渐深部转移,围岩破坏也逐渐加深。两帮冒落块体

逐渐加大,两帮中线浅层围岩已被充分剪碎,宏观破坏范围呈“楔形状”剪进发展,即巷道围岩的后续破坏是从浅层局部破坏的起裂点逐渐扩展至深



部围岩,从而使巷道跨度加大,引发围岩二次破坏及失稳。

### 3) 顶底波及期

当载荷增大至一定水平后(如图5c),两帮冒落体大块掉落,巷道逐渐形成纺锤状。受到巷道两帮衍生逐渐延伸至顶底板的滑移裂隙的影响,顶板首先从靠近巷道两帮的肩部位置出现冒落,这也是两帮向顶板发育滑移线的初始位置。由于两帮剪切滑移线的共同作用,两帮滑移线渐进交汇,顶板较易出现大块“月牙状”冒落,造成整个巷道失稳。

## 3.2 围岩破坏机制分析

由上述破坏阶段可知,处于垂直应力大于水平应力(即 $\lambda < 1$ )状态下的巷道:

1) 随着顶板和底板的变形,围岩破坏首先发育在两帮中心点。由于巷道开挖后围岩卸荷应力集中的影响,孔洞围岩环向应力 $\sigma_\theta$ 在开挖初期急剧增加,径向应力 $\sigma_r$ 降低。随着围岩蠕变或地应力增加,巷道环向应力进一步增强。当超过巷道围岩环向抗压强度时,发生压剪破坏,即在其浅层首先发生破坏,出现片状剥落,围岩应力集中深部转移。

2) 局部破坏产生后,巷道浅部围岩应力卸载,强度最弱。围岩应力深部转移,围岩破坏范围逐渐增大,破坏程度逐渐加深。但是,围岩愈深愈趋近于三轴应力状态,随着围压的增加,巷道围岩强度也随深度的增加而增加。在破坏范围逐渐增大的过程中,越向深部围岩破坏越小,所以巷道两帮逐渐形成了一对“楔形”区域,在一定程度上增大了巷道的跨度。

3) 跨度增大以后,巷道内部高应力继续向深部围岩发展,达到极限平衡时应力最大。但是,在应力卸压区内,由于围岩呈分区破裂形式,卸压区内应力呈“波浪状”曲线分布。以极限平衡位置为界,围岩深部逐渐形成塑性区。

由此可知,滑移线起始点应在“楔形”破坏区域的尖端点处继续延伸,从而形成符合对数螺线<sup>[11]</sup>形式的滑移趋势。另外,巷道处于 $\lambda < 1$ 应力状态,主要破坏在两帮,所以对数螺线滑移主要波及到巷道两帮,而很少出现在顶底板位置。当应力较高时,对数螺线可向顶底板延伸,使得顶底受到滑移剪切作用,从而顶板、底板出现大范围失稳。

## 3.3 巷道围岩分区破裂特征及其滑移趋势

### 1) $\lambda < 1$ 时围岩分区破裂特征及裂隙滑移趋势细部特征

巷道受到地应力作用后,充分变形,巷道出现明显分区破裂化。由巷道左帮(图6a)可以看出,左帮分区破裂较为明显,主要表现为向下弯曲的滑移螺线。这是由于在巷道变形破坏过程中,两帮拱基线以上岩体受到发散型双向滑移线作用,均会垂直冒落,向上裂隙带极难保存。不难看出,巷道帮部滑移线在空间上,形成滑移曲面,将岩体切割成多个环状片状结构。这些结构相互交汇,进而将围岩接个成破碎型块状结构,并且块体规模随深度增加逐渐加大,数量减小。在已保存的分区破裂区域中,能够明显划分出完整区和破裂区。本次试验加载情况下,巷道两帮每2条裂隙带间隔5.6~6.9 mm(原型折算:0.28~0.345 m),裂隙带宽在1.6 mm(0.08 m)左右。顶底板出现明显沉降和底鼓,并受到由两帮发育至顶板滑移线的剪切作用,拱基线位置已出现冒落,并引发顶板失稳,发生大块“月牙状”冒落。

巷道右帮除上述特征外,出现较为明显的“楔形”剪断区域(如图6b),这是由于初始几条剪切滑移线密集交汇所致。由于其垮落不及时,引发巷道内部滑移线得以良好保存并且破坏较轻,在楔形剪断区域依然可以看到较为明显的滑移线。



图6 裸巷两帮分区破裂化

Fig.6 Zonal disintegration of the saidwalls

## 2) $\lambda < 1$ 时巷道整体围岩破裂变形特征

由图 7 可以看出, 巷道围岩形成了明显的滑移线分区破裂形式。在分区破裂区内笔者认为其就是巷道围岩松动圈之所在。滑移线主要发育在巷道两帮, 呈发散状, 随深部增加间距增大。在此地应力状态下, 巷道出现明显变形, 出现明显顶沉和底鼓, 表现出明显的纺锤状特征。

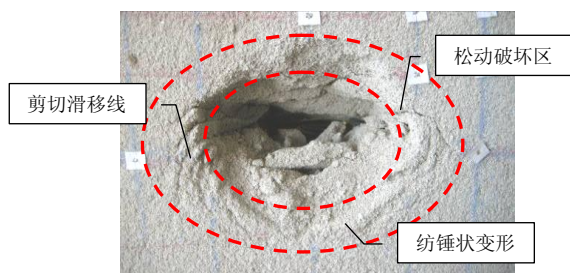


图 7 裸巷分区破裂特征

Fig.7 Zonal disintegration feature of roadway

## 4 $\lambda < 1$ 状态破坏形态数值模拟验证

采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行了数值模拟验证。试验模型尺寸设计为 20 m×40 m, 巷道开挖尺寸为  $\phi 6$  m。为了节省时间选取一半进行计算。边界条件按照平面应变设定。试验主要模拟高地应力  $\lambda < 1$  状态下裸巷无支护状态下的围岩变形和破坏情况, 验证物理试验模拟结果。岩石力学性质参见表 1, 并进

行一定程度折减<sup>[12]</sup>。考虑到围岩残余强度及峰后特性及防止网格畸变, 采用应变软化模型小变形进行计算。参考王红英、高富强等文献<sup>[13-14]</sup>, 将围岩细化模拟分区破裂化效应。计算 10 000 时步后应力及破坏如图 8 所示。

### 1) 垂直应力

巷道开挖伊始, 应力首先集中在巷道表面, 随着表面岩体进入峰后, 浅层岩体逐渐卸压, 应力集中向围岩深部转移。围岩破坏沿前期受剪裂隙继续发育, 这是由于微观裂隙破坏造成局部应力数值骤升造成的。巷道围岩卸压带应力呈间隔变化, 应力曲线呈“波浪状”, 并且浅层应力卸压区变化较密集, 充分破碎。卸压带在围岩深部间隔逐渐加大, 使间隔带内的岩石能够承压承载, 见图 8a 所示。

### 2) 垂直变形

巷道垂直变形主要发生在顶底板。由于围岩出现了分区断裂, 变形破坏初期产生了“楔形”破坏区域。所以, 顶底板垂直位移出现滑移线斜切, 其后进入分区破裂段, 楔形破坏区两个边缘出现最大位移。由于楔形区的失稳, 垂直应力剪切作用, 岩体深部出现分区破裂, 岩体垂直位移呈“锯齿状”, 即裂隙发育位置岩体垂直位移较大; 裂隙完整区岩体垂直位移较小。由此可知, 巷道变形破坏较为严重, 基本形成纺锤状形态, 见图 8b 所示。

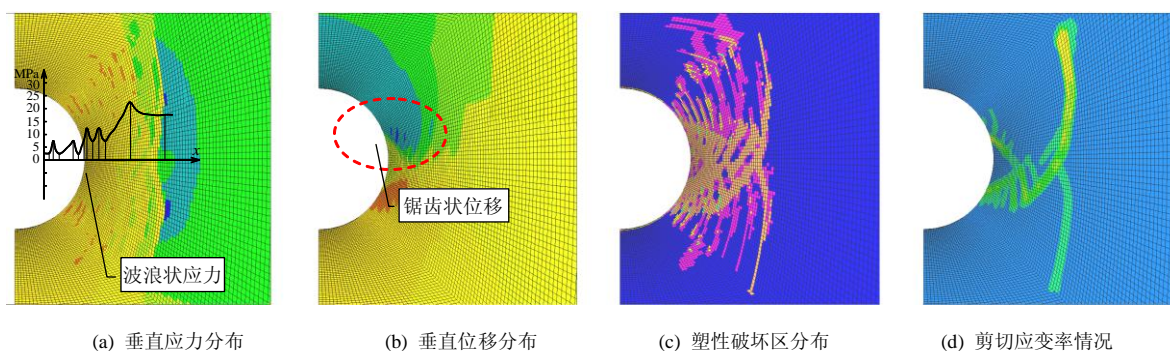


图 8 巷道围岩应力及变形破坏特征

Fig.8 Stress and failure characteristics of surrounding rock

### 3) 塑性破坏区

塑性破坏首先从两帮发育, 滑移螺线逐渐向两帮围岩深部及顶底扩散。浅部巷道围岩破坏范围较为充分, 围岩浅部“楔形”破坏区域内充分破坏, 塑性破坏轨迹纵横交错, 间距较近。逐渐向深部围岩扩散过程中, 间距不断增大。塑性破坏主要以剪切破坏为主, 2 条塑性破坏轨迹之间存在极短拉破坏。围岩塑性区继续向深部围岩内部扩展, 出现较

为明显的剪切线交汇的区域, 逐渐形成“楔形”破坏区域, 加剧了围岩浅部的破坏程度, 推动了应力集中的深部转移。深部滑移线逐渐波及到巷道顶底板, 形成前文提到的“月牙状区域”。这时, 肩部和底角处出现局部破坏损伤, 承载能力明显减弱, 顶底板可能出现滑移失稳, 见图 8c 所示。

### 4) 剪切应变率

巷道两帮主要体现为剪切破坏, 剪切应变率表

征巷道围岩内部应变与时间的关系,在一定程度上表征着岩体变形发育的快慢。

围岩内部出现明显的高应变率区域,分布状态基本满足螺线形式。高应变率区域出现明显的交错,从而分区破坏围岩。越趋向于围岩深部轨迹越稀疏,越趋近于浅部,交错越剧烈,破坏越充分。高速应变区域出现的轨迹线的起裂端点,说明围岩破坏沿轨迹线继续深部转移破坏,见图8d所示。

数值模拟结果和前人研究<sup>[13-14]</sup>及物理试验结果具有较好的一致性,验证了在 $\lambda < 1$ 状态下物理试验获得的围岩变形和破坏特征。

## 5 $\lambda < 1$ 状态下围岩破坏过程分区

上述物理及数值模拟研究可以看出, $\lambda < 1$ 状态下巷道围岩的变形破坏是按照一定规律和顺序逐渐演化的。巷道围岩破坏主要集中在巷道两帮,顶底主要是沉降和鼓胀,裂隙分配较少,在理论上出现符合螺线形态的裂隙分布。

对数螺线滑移面很少在顶、底出现,将出现如图9所示分布状态。通过对巷道破坏过程的监控及分析可知,随着初始顶底变形加大,巷道围岩依次出现3个过程破坏带。第I破裂带为巷道两帮楔形破坏区域,第II破裂带为巷道中线深部围岩、肩部及底角岩层,第III破裂带为顶底板剪断区域。

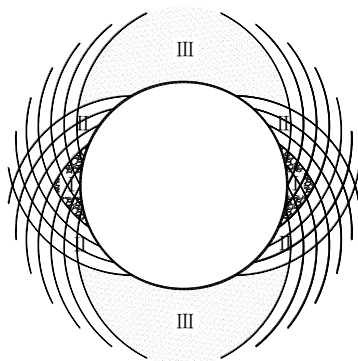


图9  $\lambda < 1$  状态理想滑移螺线示意图

Fig.9  $\lambda < 1$  ideal spiral chart

第I破裂带:在变形破坏过程首先出现裂隙、碎胀直至破坏,逐渐形成楔形三角形,增大巷道跨度。(楔形破裂带)

第II破裂带:当巷道两帮楔形破坏区充分剪断破坏后,巷道肩部及底角失去支撑体,逐步出现失稳。滑移线继续向围岩深部扩展。(二次破裂带)

第III破裂带:由于肩部的失稳以及滑移裂隙向顶板转移,使得顶板丧失支撑体,从而诱发断裂失

稳,从而形成顶底板的第III破裂带。(贯通失稳带)

基于以上分析,说明高地应力 $\lambda < 1$ 状态下巷道破坏是分阶段的,并且破坏之间相互关联产生。所以支护过程中除增强支护强度外,应有针对性地加强局部支护,防止次生破坏的产生。不同变形时期内,除控制顶底板初始变形外,围岩裂隙发展控制的重点应依次在巷道两帮、肩部和底角、顶底板。

## 6 结 论

1) 自行研制的CM60/10平面应变试验台具有移动简便、装载方式多样、风干速度快,并能充分发挥伺服压力机逐级加载、持续稳压等性能的优点,便于模拟研究不同巷道形状在不同埋深及蠕变条件下巷道的围岩变形破坏形式及应力转移情况。

2) 分析并研究了裸巷无支护状态下巷道围岩破坏过程及特征。研究认为:巷道破坏过程可以分为第I破裂带-楔形破裂带,第II破裂带-二次破裂带,第III破裂带-贯通失稳带。高地应力 $\lambda < 1$ 状态下巷道破坏是分阶段的,并且破坏之间相互关联产生,所以支护过程中除增强支护强度外,应有针对性地加强局部支护,防止次生破坏的产生。不同变形时期内,除控制顶底板初始变形外,围岩裂隙发展控制的重点应依次在巷道两帮、肩部和底角、顶底板。

3) 通过数值模拟研究,分析了 $\lambda < 1$ 状态下巷道围岩分区破裂特征,两帮围岩垂直应力呈“波浪状”分布,塑性破坏区呈“分区演化”,垂直位移呈“锯齿状”分布,与物理试验吻合。

## 参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.  
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 王汉鹏.高地应力非均质软岩洞室群稳定性分析与控制研究[D].山东:山东科技大学资源与环境工程学院,2004.
- [3] 张强勇,李术才,尤春安.新型岩土地质力学模型试验系统的研制及应用[J].土木工程学报,2006,39(12):100-107.  
ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, YOU Chun-an. On geotechnical geomechanics model test system and its application[J]. China Civil Engineering Journal, 2006,



- 39(12): 100-107.
- [4] 陈陆望, 白世伟. 坚硬脆性岩体中圆形洞室岩爆破坏的平面应变模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2504-2509.
- CHEN Lu-wang, BAI Shi-wei. Research on plane strain model test of rockburst of circular cavern in hard brittle rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2504-2509.
- [5] 朱维申, 李勇, 张磊 等. 高地应力条件下洞群稳定性的地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1308-1314.
- ZHU Wei-shen, LI Yong, ZHANG Lei, et al. Geomechanical model test on stability of cavern group under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1308-1314.
- [6] 宋义敏, 潘一山, 章梦涛, 等. 深部高应力载荷作用下洞室变形破坏实验[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 489-491.
- SONG Yi-min, PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao, et al. Experimental study on deformation failure of deep rock mass under high stress load[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2008, 27(4): 489-491.
- [7] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 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 Jin-cai, GU Lei-yu, CHEN An-min, 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.
- [8] 张强勇, 陈旭光, 林波, 等. 深部巷道围岩分区破裂三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1757-1764.
- ZHANG Qiang-yong, CHEN Xu-guang, LIN Bo, et al. Study of 3d geomechanical model test of zonal disintegration of surrounding rock of deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1757-1764.
- [9] 勾攀峰, 张振普, 韦四江. 不同水平应力作用下巷道围岩破坏特征的物理模拟试验[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10): 1328-1332.
- GOU Pan-feng, ZHANG Zhen-pu, WEI Si-jiang. Physical simulation test of damage character of surrounding rock under different levels of the horizontal stress [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10): 1328-1332.
- [10] 陈坤福. 深部巷道围岩破裂演化过程及其控制机理与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学矿业工程学院, 2009.
- [11] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [12] 王永秀, 毛德兵, 齐庆新. 数值模拟中煤岩层物理力学参数确定的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 593-597.
- WANG Yong-xiu, MAO De-bing, QI Qing-xin. Study on determining of the mechanical parameters of rock mass used in numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 593-597.
- [13] 王红英, 张强, 张玉军, 等. 深部巷道围岩分区破裂化数值模拟[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 535-540.
- WANG Hong-ying, ZHANG Qiang, ZHANG Yu-jun, et al. Numerical simulation on disintegration of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 535-540.
- [14] 高富强, 康红普, 林健. 深部巷道围岩分区破裂化数值模拟[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 21-25.
- GAO Fu-qiang, KANG Hong-pu, LIN Jian. Numerical simulation of zonal distrigation of surrounding rock mass in deep mine roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 21-25.