

# 采矿与岩层控制工程学报

JOURNAL OF MINING AND STRATA CONTROL ENGINEERING



## 基于3D打印的裂隙围岩巷道变形破坏特征物理模拟研究

王宗可 蒋力帅 刘玉磊 何鑫 赵武胜 黄屹峰

### Deformation and failure behavior of fractured rock roadway: physical simulation with 3D printing

WANG Zongke, JIANG Lishuai, LIU Yulei, HE Xin, ZHAO Wusheng, HUANG Yifeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1293>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于3D打印和数字散斑技术的节理岩体锚固效应分析

Research on anchoring effect of jointed rock mass based on 3D printing and digital speckle technology

采矿与岩层控制工程学报. 2021, 3(2): 023013-023013 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20201020.001>

#### 深部碎裂岩体巷道变形破坏机制与支护效应连续非连续分析

Continuous-discontinuous analysis of deformation failure mechanism and supporting effect of roadway in deep fractured rock mass

采矿与岩层控制工程学报. 2025, 7(1): 013020-1-013020-12 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.yszt-1030>

#### 高偏应力煤巷围岩拉剪破裂特征及分区控制方法研究

Research on the characteristics of tensile-shear fracturing and zone control method for surrounding rock of coal roadway under high deviatoric stress

采矿与岩层控制工程学报. 2024, 6(4): 043551-043551 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024.04.004>

#### 基于不同锚固角度的倾斜节理岩体剪切破坏特征研究

Study on shear failure characteristics of inclined jointed rock mass based on different anchorage angles

采矿与岩层控制工程学报. 2023, 5(4): 043025-043025 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20230607.002>

#### 含断层围岩采动应力场连续演化透明解析方法初探

Preliminary study on transparent analysis of continuous evolution of mining-induced stress fields in surrounding rocks of faulted roadway

采矿与岩层控制工程学报. 2025, 7(2): 023044-1-023044-14 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2025-1124>

#### 采动影响下巷道围岩变形破坏规律

Deformation and failure of surrounding rock of a roadway subjected to mining-induced stresses

采矿与岩层控制工程学报. 2021, 3(2): 023038-023038 <https://doi.org/10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.20200727.001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王宗可, 蒋力帅, 刘玉磊, 等. 基于3D打印的裂隙围岩巷道变形破坏特征物理模拟研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(3): 033512.

WANG Zongke, JIANG Lishuai, LIU Yulei, et al. Deformation and failure behavior of fractured rock roadway: physical simulation with 3D printing[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(3): 033512.

## 基于3D打印的裂隙围岩巷道变形破坏特征物理模拟研究

王宗可<sup>1</sup>, 蒋力帅<sup>1</sup>, 刘玉磊<sup>2</sup>, 何鑫<sup>1</sup>, 赵武胜<sup>3</sup>, 黄屹峰<sup>4</sup>

(1. 山东科技大学能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 国家能源神东煤炭集团寸草塔煤矿, 内蒙古鄂尔多斯 071000; 3. 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; 4. 泰安市新达信息技术有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 煤矿巷道围岩普遍存在结构复杂、裂隙发育等特点, 极大影响巷道的稳定性, 因此研究裂隙围岩巷道变形破坏特征具有重要的理论意义和工程价值。以西部某煤矿12上302辅运巷为工程背景, 采用砂型3D打印技术分层制备完整围岩巷道与裂隙围岩巷道物理模型, 通过双轴加载试验与数字散斑技术(DIC)相结合的方式, 探究围岩裂隙对巷道变形破坏规律的影响以及裂隙围岩巷道破坏分区特征。研究表明: 采用粒径为0.070~0.140 mm和0.100~0.200 mm的硅砂, 并改变基质配比, 能够实现不同煤岩强度的分层打印, 满足各煤岩强度比例关系; 双轴加载后完整围岩巷道模型呈现巷道肩角处首先出现裂纹, 两帮破碎且顶板下沉, 以剪切破坏为主。裂隙围岩巷道模型的破坏主要沿预制裂隙演化, 两帮破坏更加明显且出现块状破碎, 一定程度上再现了实际工程巷道变形破坏特征; 通过现场实测裂隙参数, 并借助砂型3D打印技术可将测得裂隙参数导入巷道物理模型, 能有效模拟实际工程中的巷道围岩变形破坏情况。研究成果能够为裂隙围岩巷道变形破坏特征的进一步研究提供借鉴, 为砂型3D打印技术在巷道物理模型的应用提供试验基础。

**关键词:** 裂隙围岩; 砂型3D打印; 巷道物理模拟; DIC; 破坏特征

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2025)03-3512-13

### Deformation and failure behavior of fractured rock roadway: physical simulation with 3D printing

WANG Zongke<sup>1</sup>, JIANG Lishuai<sup>1</sup>, LIU Yulei<sup>2</sup>, HE Xin<sup>1</sup>, ZHAO Wusheng<sup>3</sup>, HUANG Yifeng<sup>4</sup>

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Cuncota Coal Mine, National Energy Shendong Coal Group, Ordos 071000, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Tai'an Xinda Information Technology Co., Ltd., Taian 271000, China)

**Abstract:** Complex structure and fracture development in surrounding rock of coal mine greatly affect the roadway stability. It is of great theoretical and engineering significance to study the deformation and failure characteristics of roadway in fractured surrounding rock. Based on the engineering background of 12 upper 302

收稿日期: 2024-08-19

修回日期: 2024-11-07

责任编辑: 山世昌

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2024-1293

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074166); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021YQ38)

作者简介: 王宗可(1999—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: 18366207836@163.com

通信作者: 蒋力帅(1989—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士, 主要从事巷道围岩控制、裂隙岩体力学、矿山动力灾害防治等方面的研究工作。E-mail: lsjiang@sdust.edu.cn

auxiliary haulage roadway in a coal mine, western China, well-integrated and fractured surrounding rock roadway physical models were prepared with sand 3D printing technology. Through the combination of biaxial loading tests and digital speckle technology (DIC), the influence of surrounding rock fractures on the deformation and failure law of roadway and the failure zoning characteristics of fractured surrounding rock were explored. The results show that the layered printing of different coal rock strength can be realized by using silica sand with particle size of 0.070~0.140 mm and 0.100~0.200 mm and changing different matrix ratios, which meets the strength ratio relationship of each coal rock. For the well-integrated surrounding rock roadway model, cracks first appear at the shoulder angle of the roadway, and then the two sides breaks and the roof sinks, mainly shear failure. In comparison, the failure of fractured surrounding rock roadway mainly evolves along the prefabricated cracks, and the damage of the two sides is more obvious with broken blocks. This reproduces the deformation and failure characteristics of the actual engineering roadway to a certain extent. Through the field measurement of fracture parameters, the fracture parameters can be implemented into the physical model of the roadway through the sand-mold 3D printing technology.

**Key words:** fractured surrounding rock; sand-powder 3D printing; physical simulation of roadway; DIC; failure characteristic

煤矿巷道是煤炭开采中的命脉工程,且通常处于地质条件复杂、岩石抗压强度较低的沉积岩层中,从而导致巷道围岩具有岩体结构复杂、裂隙发育等特点,而且含有复杂裂隙的围岩体在开挖过程中又会受到工程力的作用,进一步破坏岩体的完整性,形成较大的松动区,使得开挖后的巷道处于不稳定状态,极大增加顶板垮冒事故的风险<sup>[1-2]</sup>。因此,研究巷道围岩变形破坏特征,分析围岩裂隙对巷道变形的影响是保证巷道安全高效掘进的基础。

近年来,国内外学者针对裂隙围岩巷道变形特征开展了大量研究。何满潮<sup>[3]</sup>通过理论分析提出层状碎裂结构是导致深井巷道围岩强度降低、产生不均匀变形及破坏的主要原因;余伟健等<sup>[4]</sup>通过室内和现场试验等多种试验方法研讨了裂隙围岩巷道变形的主要影响因素,并提出“锚杆、锚索和两步注浆壳体”联合支护技术。由于室内物理试验可以比较全面、真实地模拟巷道围岩由弹性到塑性直至破坏的全过程,能够直观、准确地观察到岩体在开挖、加载等扰动下的受力特性和变形特征<sup>[5]</sup>,因而被众多学者应用到巷道围岩变形破坏特征研究中。王炯等<sup>[6]</sup>采用细河沙、石膏粉等材料制作单元板铺设几何相似比为15的巷道物理模型,对恒阻大变形锚索支护巷道的围岩变形机制进行了研究,证明了模型试验的可行性;YAN等<sup>[7]</sup>采用煤层上方砂质

泥岩与下方碳质泥岩作为巷道材料制备2.5 m×0.2 m×1.5 m的物理模型,研究了采动应力特征对围岩破坏机理的影响及高应力消除方法;李光等<sup>[8]</sup>提出了一种浇-砌混合模型搭建方法,并依托实际工况证明了此方法的实用性;CAO等<sup>[9]</sup>通过物理模型试验对超级锚固方案和其他2种方案进行对比分析,证明了采用超预应力锚杆解决极难深部巷道支护问题是可行的。然而由于自然岩体的复杂性,仅通过上述传统的浇筑、堆砌等手段难以制造出一批具有完全相同结构和性质的物理模型,且试验往往具有破坏性,破坏后难以开展重复性试验,这些问题极大地限制了物理模型试验在反映实际工程巷道时的科学性。

近年来快速发展的3D打印技术因其便捷性、可控性及可重复性等优势被众多学者应用到物理模型试验研究领域。江权等<sup>[10]</sup>以石膏粉末为原料,通过3D打印技术制作了含锚杆衬砌支护工程的隧道物理模型,通过侧限条件下单轴试验验证了3D打印技术用于物理模型试验的可行性;SONG等<sup>[11]</sup>以石膏粉末和PLA材料制备更复杂的隧道物理模型,进一步论证了3D打印技术可在复杂岩体物理模型中应用。上述材料用来制备物理模型虽有较好的可视性,但在模型内部细微观结构上与天然岩石仍有较大差距,而砂型材料其晶体颗粒特征能更大程度模拟天然岩石<sup>[12-13]</sup>,此外当前学者大多聚焦

砂型 3D 打印技术制备标准试样来开展研究, 而对于物理模型尤其含裂隙的巷道物理模型开展的相关研究较少<sup>[14-17]</sup>。

针对巷道顶底板岩层结构、围岩变形破坏特征, 以现场实测获取的巷道围岩裂隙参数为依据, 采用 C4D 建模软件建立数字模型, 并通过砂型 3D 打印技术分层制备含所测裂隙的巷道物理模型, 通过双轴加载试验还原现场围岩破坏形式, 分析破坏规律。研究结果揭示了砂型 3D 打印巷道物理模型破坏特征, 并验证了其模拟实际巷道及应用于室内物理试验的可行性, 为煤矿围岩变形破坏特征研究

及砂型 3D 打印技术在巷道物理模型的应用提供了借鉴和参考。

## 1 裂隙围岩巷道工程地质特征

以西部某煤矿 12 上 302 辅运巷为工程背景(图 1 和图 2), 根据钻孔柱状图(图 3)显示, 煤层厚度 2~7 m, 煤层顶板上方 40 m 范围内岩性主要为砂质泥岩、中粒砂岩, 其中工作面上方直接顶以砂质泥岩为主, 局部为粉砂岩、泥岩, 顶板易冒落或发生离层, 两帮呈现块状破碎形式的片帮, 钢带及锚杆受岩体破碎挤压产生较大变形, 底臃现象较为明显。

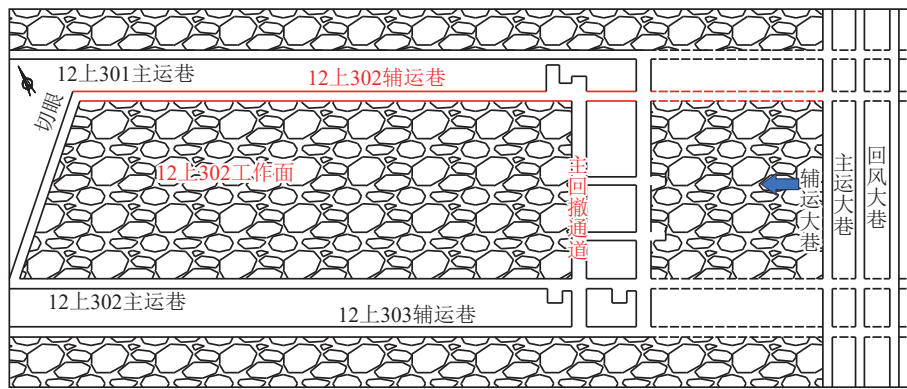


图 1 12 上煤三盘区采掘工程平面图

Fig. 1 Mining layout plan of panel III in 12 upper coal seam



图 2 12 上 302 辅运巷围岩变形特征

Fig. 2 Deformation characteristics of surrounding rock in 12 upper 302 auxiliary haulage roadway

12 上 302 辅运巷为矩形, 巷道尺寸为 5 400 mm×3 800 mm(宽×高), 巷道沿煤层底板掘进, 巷道支护断面图如图 4 所示, 支护平面图如图 5 所示。顶板采用左旋无纵筋螺纹钢锚杆, 规格  $\phi 22$  mm×2 200 mm, 间排距 950 mm×1 000 mm, 顶板锚索规格为  $\phi 22$  mm×8 000 mm, 间排距 2 100 mm×2 000 mm; 正帮采用玻璃钢锚杆, 副帮采用右旋螺纹钢锚杆, 锚杆规格分别为  $\phi 32$  mm×2 100 mm 和  $\phi 18$  mm×2 100 mm, 两帮锚杆间排距 750 mm×1 000 mm。

## 2 砂型 3D 打印技术分层制备巷道物理模型

### 2.1 砂型 3D 打印流程

3D 打印是一种以三维数字模型为基础的增材制造技术, 砂型 3D 打印工艺采用三维粉末粘结技术 (BJT), 选用颗粒粒径适宜的砂粉为原料, 由电脑系统和电信号控制的喷头在指定区域微滴喷洒粘结剂, 将目标模型粘合堆叠成型, 具体过程大致可分为如下几个步骤:

累深/m	层厚/m	柱状	岩石名称及岩性描述
323	(31~67)/52		砂质泥岩: 灰绿色, 泥质为主, 次为砂质, 局部见砂质较多, 泥质结构, 参差状断口, 块状构造, 夹有薄层粉砂岩
344	(8~34)/21		中粒砂岩: 灰白色, 中粒砂状, 泥质胶结, 交错层理, 以石英、长石为主, 见云母煤线岩屑
348	(2~12)/4		砂质泥岩: 灰色, 半坚硬, 含植物化石碎片, 泥质为主, 夹薄层粉砂岩层, 参差断口
353	(2~7)/5		12上煤: 黑褐色, 弱沥青光泽, 丝化光泽, 条带状结构, 煤的亮煤, 暗煤, 丝煤互层分布, 半亮型煤, 含黄铁矿结核, 夹泥岩研1~3层
370	(3~40)/17		细粒砂岩: 灰白色, 半坚硬, 成分为长石、石英及少量矿物岩屑, 分选中等, 次圆状钙质胶结, 参差状断口, 块状构造

图3 12上302辅运巷煤层顶底板柱状图

Fig. 3 Histogram of coal seam roof and floor in 12 upper 302 auxiliary haulage roadway

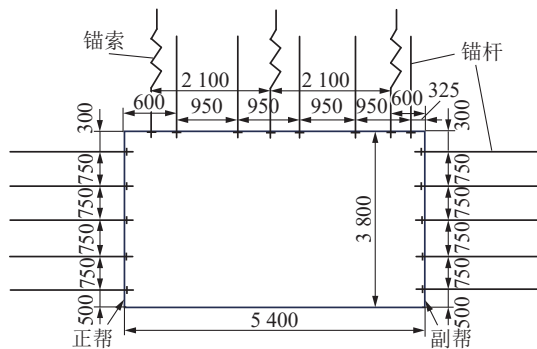


图4 12上302辅运巷支护断面

Fig. 4 Support design profile of 12 upper 302 auxiliary haulage roadway

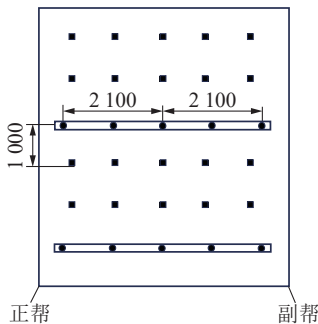


图5 12上302辅运巷支护平面

Fig. 5 General support layout plan of 12 upper 302 auxiliary haulage roadway

(1) 3D模型的建立。首先用计算机辅助设计软件 (SolidWorks、C4D等) 设计出符合要求的模型,

或利用相关数字成像技术 (CT成像技术、3D扫描技术等) 直接获取研究对象的数字信息并借助逆向软件建立3D数字模型。本试验模型通过C4D建模软件建立3D打印模型, 并导出可被打印机识别的stl文件。

(2) 打印参数设置及后处理。建立3D模型以后需要设置打印参数, 如填充率、分层厚度等。试验使用的3D打印设备为Easy3DP-S450打印机, 由武汉Easy3DP科技有限公司生产, 该型号打印机可直接将stl文件识别并进行打印, 打印参数通过计算机控制系统进行设置, 根据上述所确定的打印参数选择GS19硅砂粉作为打印基质, 以呋喃树脂作为胶结材料, 结合“垂直成型”打印工艺制备含预制孔隙的模型。

(3) 物理模型成型。将3D模型导入打印机中, 3D打印机通过逐层打印的方式进行模型的制作 (图6)。打印成型的各层模型由于砂粒之间的呋喃树脂未完全固化并且与酸性固化剂未完全反应, 导致模型的强度较低并容易造成表面砂粉脱落, 因此需在正常室温下放置7d进行养护<sup>[18]</sup>, 养护后模型内呋喃树脂与酸性固化剂基本完全反应且各项力学性能趋于稳定, 砂型3D打印巷道模型如图7所示。

## 2.2 模型相似参数与分层参数确定

为满足室内试验要求, 且考虑到试验机试验空间有限, 选择3D打印物理模型几何相似比为1:50, 即巷道宽×高为108 mm×76 mm。为减小模型边界效应, 模型宽度为巷道尺寸的3倍, 高度为巷道尺寸的5倍, 同时考虑到模型锚杆安装便捷性, 厚度满足2排锚杆安装距离, 即模型宽×高×厚为314 mm×380 mm×60 mm。根据国内外前期相关研究, 通过对不同型号的铜丝、铁丝、铝丝、锡丝、熔断丝、树脂板、铝合金、薄铁板以及各种型号的压簧等材料进行的力学试验研究和比选, 最终确定了各支护构件的相似模拟材料, 即顶锚杆采用直径2 mm, 长44 mm的铁丝, 帮锚杆采用直径1.5 mm, 长42 mm的铁丝, 锚索采用直径1.5 mm, 长160 mm的铝丝<sup>[21]</sup>。为精确控制锚杆(索)在钻孔内的锚固长度, 采用注射器对每个钻孔逐一注射锚固剂, 依据注射器的刻度变化来控制锚固剂用量, 实现不同锚固强度的施加。为防止锚固剂在注射过程中流出, 采用固化时间较短的云石胶进行锚固。

根据上述地质情况及所设定的相似参数, 为了

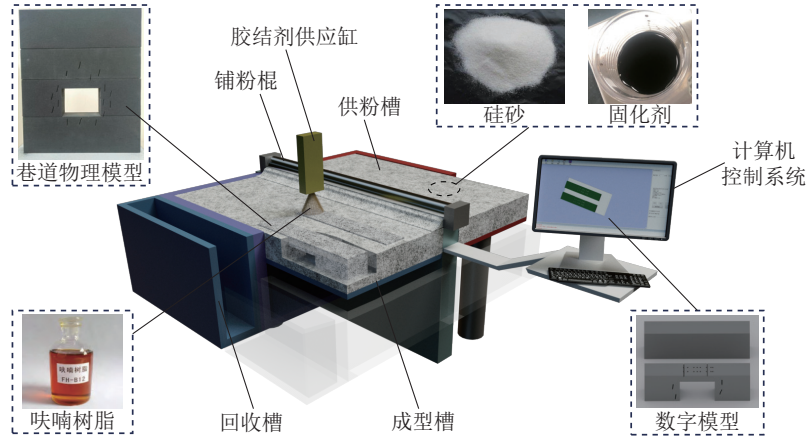


图 6 BJT 工艺打印原理图 [19-20]  
Fig. 6 BJT process printing schematic [19-20]

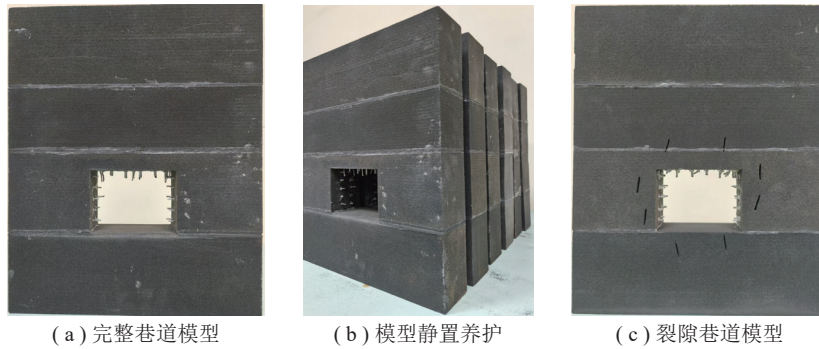


图 7 砂型 3D 打印巷道模型  
Fig. 7 Sand-powder 3D printing roadway model

更好地满足实际工况中的巷道条件以及模拟煤巷顶底板与煤层之间的岩性差异, 设计模型分 4 层打印和建立, 以便分别模拟中粒砂岩、砂质泥岩、12 上煤以及细粒砂岩。采用现场取样并进行单轴压缩试验测得各煤岩层物理力学参数见表 1。

表 1 12 上 302 辅运巷 19 号联巷各岩层物理力学参数  
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock strata in 12 upper 302 auxiliary haulage roadway crossheading 19 roadway

围岩类型	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa
中粒砂岩	28.75	1.60	2 400	5.64
砂质泥岩	21.19	1.72	2 070	3.07
12 上煤	24.75	1.17	1 274	1.99
细粒砂岩	29.66	1.52	2 450	4.72

由表 1 可知, 中粒砂岩 : 砂质泥岩 : 12 上煤 : 细粒砂岩的抗压强度比例关系约为 9 : 7 : 8 : 10。为实现满足该比例关系的相似材料制作, 通过改变砂粉粒径以及粘结剂浓度来打印不同强度的标准

试件 ( $\phi 50 \times 100$  mm) 并进行单轴压缩试验测定强度, 每组试件打印 3 块, 测定后取平均单轴抗压强度试验结果, 如图 8 所示。

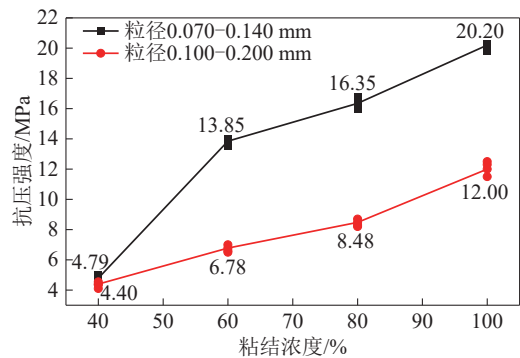


图 8 不同打印参数下的标准试件单轴抗压强度  
Fig. 8 Uniaxial compressive strength of standard specimens under varying printing parameters

由图 8 可知, 不同粒径硅砂粉打印模型的强度都随粘结剂浓度的增大而增大, 当粒径为 0.070~0.140 mm 时, 粘结剂浓度分别为 60%、80% 和 100% 时, 对应单轴抗压强度分别为 13.85

和 20.20 MPa; 当粒径为 0.100~0.200 mm 时, 粘结剂浓度为 100% 时, 对应单轴抗压强度为 12.00 MPa, 以上 4 种配比条件下试样强度基本满足上述比例关系, 可作为打印 4 层模型的材料配比参数。

### 2.3 模型加锚及分层制备

通过分析 12 上 302 辅运巷工程地质条件可知,

该巷道呈现两帮块状破裂, 顶板下沉, 但整体较为完整, 底板出现底臃的破坏特征。为了能再现实际工况中的围岩破碎特征, 经现场实测得出裂隙产状并以完整围岩巷道模型的打印配比为基准, 在巷道周边添加水平倾角为  $80^{\circ}\sim 90^{\circ}$  的 8 条近垂直裂隙, 以此打印成型 (图 9)。

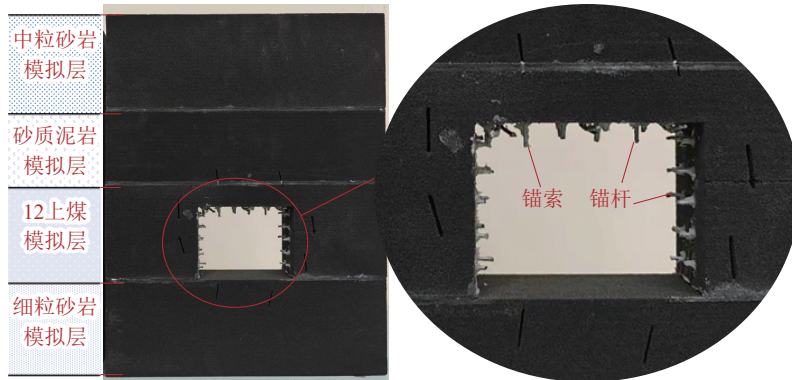


图 9 锚固条件下裂隙围岩巷道物理模型

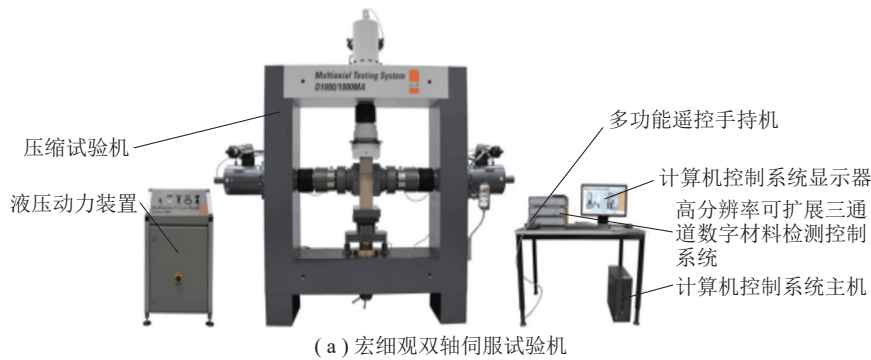
Fig. 9 Physical model of bolted and grouted roadway in fractured surrounding rock

通过测试环氧树脂 AB 胶、云石胶以及呋喃树脂等粘结材料, 对比发现强力云石胶在粘结效果上具有速干性和坚固性, 且在试验过程中对模型变形破坏影响最小, 因此采用强力云石胶将打印的 4 层模型粘结成型。

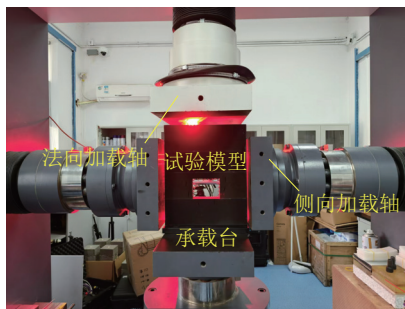
## 3 双轴加载下巷道模型变形破坏特征

### 3.1 双轴加载试验方案

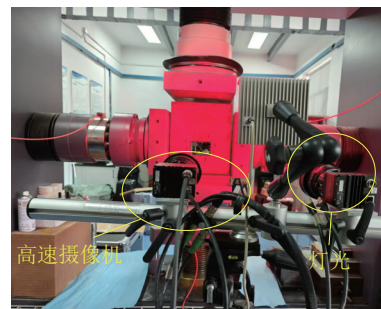
试验通过岩石双轴宏观细观测量系统进行, 系统主要由双轴加载系统和变形测量系统 2 个部分组成, 如图 10(a) 所示。



(a) 宏观细观双轴伺服试验机



(b) 加载正视图



(c) 加载后视图

图 10 双轴加载试验系统

Fig. 10 Biaxial testing system

双轴加载系统是一个主要由压缩试验机、液压油泵、计算机控制系统等部分构成的伺服试验机, 该系统可实现不同应力组合条件下的岩石材料力学特性测试。变形测量系统是一种基于数字图像相关技术 (Digital Image Correlation, DIC) 的位移、应变测量系统, 可以实现无接触的全场应变测量以及试件形貌变化观测等。该测量系统主要包括 CCD 工业相机、镜头、光源、散斑工具、标定套装、计算机及图像分析软件、数据采集器以及三脚架等。

模型试验加载 (图 10(b)) 方式采用初始阶段法向与侧向加载轴同时以 0.30 kN/s 的速率加载, 待侧

向加载轴加至设定值 2.50 MPa 停止加压, 法向轴继续以相同速率加载直至模型破坏, 具体加载方案见表 2。模型加载行程如图 11 所示,  $F_1$  为法向加载轴施加的力;  $F_2$  和  $F_3$  分别为左轴和右轴施加的力;  $\Delta_1$  为法向加载轴位移量;  $\Delta_2$  和  $\Delta_3$  分别为左轴和右轴的位移量, 即模型左帮和右帮向中心的位移量。

表 2 双轴加载方案  
Table 2 Biaxial loading scheme

模型类型	裂隙条数	加载速率/(kN·s <sup>-1</sup> )	侧压/MPa
完整围岩巷道	0	0.30	2.50
裂隙围岩巷道	8	0.30	2.50

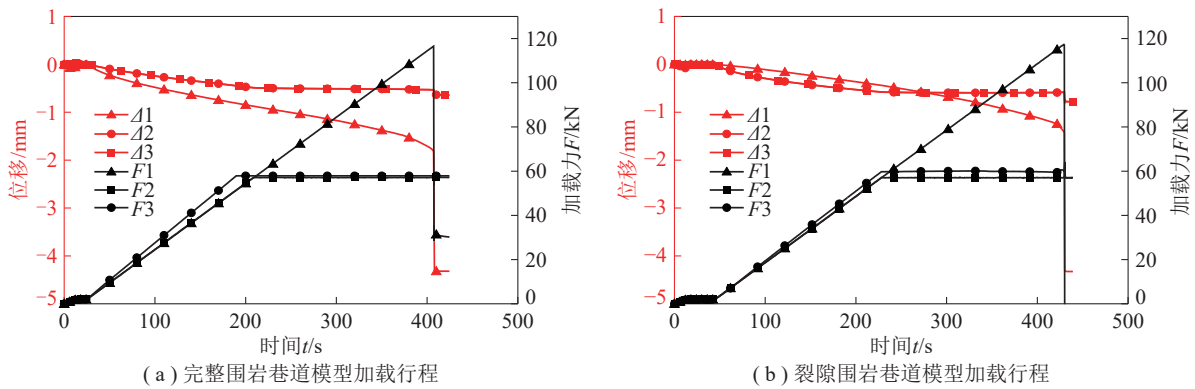


图 11 2 种巷道模型加载行程

Fig. 11 Loading stroke for two types of roadway models

### 3.2 双轴加载行程分析

对比 2 种巷道模型加载行程, 由图 11(a) 可知完整围岩巷道模型的加载过程随着时间的增长呈现的特征为,  $F_2$  和  $F_3$  匀速加载至设定值 57.00 kN 保持不变,  $F_1$  匀速加载至 116.56 kN 时产生突变, 表明此时模型发生破坏, 同时在  $F_2$  和  $F_3$  达到设定值之前  $\Delta_2$  和  $\Delta_3$  呈现较为匀速的位移变化, 达到设定值后趋于平缓, 最终变形量约为 0.51 mm, 而  $\Delta_1$  在整个加载过程中呈现较为匀速的位移变化, 产生突变时变形量达到 1.72 mm; 由图 11(b) 可知裂隙围岩巷道模型的加载过程随着时间的增长呈现的特征为,  $F_2$  和  $F_3$  匀速加载至设定值 57.00 kN 保持不变,  $F_1$  匀速加载至 113.32 kN 时产生突变, 表明模型此时发生破坏, 同时  $F_2$  和  $F_3$  达到设定值之前  $\Delta_2$  和  $\Delta_3$  产生位移变化, 达到设定值后趋于平缓, 最终变形量约为 0.62 mm,  $\Delta_1$  在整个加载过程中持续产生位移变化, 在达到设定值之后变化速度加快,

突变时变形量达到 1.46 mm。

对比 2 种巷道模型加载行程可知, 裂隙围岩巷道模型比完整围岩巷道模型最终破坏所受法向加载力要小, 两帮变形量大, 顶板变形量小, 这表明添加近垂直的预制裂隙后使得物理模型巷道周边承压能力降低, 裂隙对巷道变形产生较大影响, 巷道帮部受裂隙影响产生更严重的破碎。

### 3.3 完整围岩巷道变形演化特征

DIC 全场应变分析方法能够直观量化模型的破裂过程, 获取的应变和位移云图可有效识别张拉或剪切破裂类型, 揭示裂隙起裂、扩展演化机制。试验过程中利用高速摄像机与 VIC-2D 软件对模型裂隙起裂、发育直至模型宏观破坏的全过程进行图像捕捉并处理, 得到了完整围岩巷道模型在加载下的水平位移与垂直位移演化云图如图 12 所示。

由图 12(a) 可以看出: ①30 s 时巷道右帮位移量较大, 左帮及其肩角位置位移变化量较为一致,

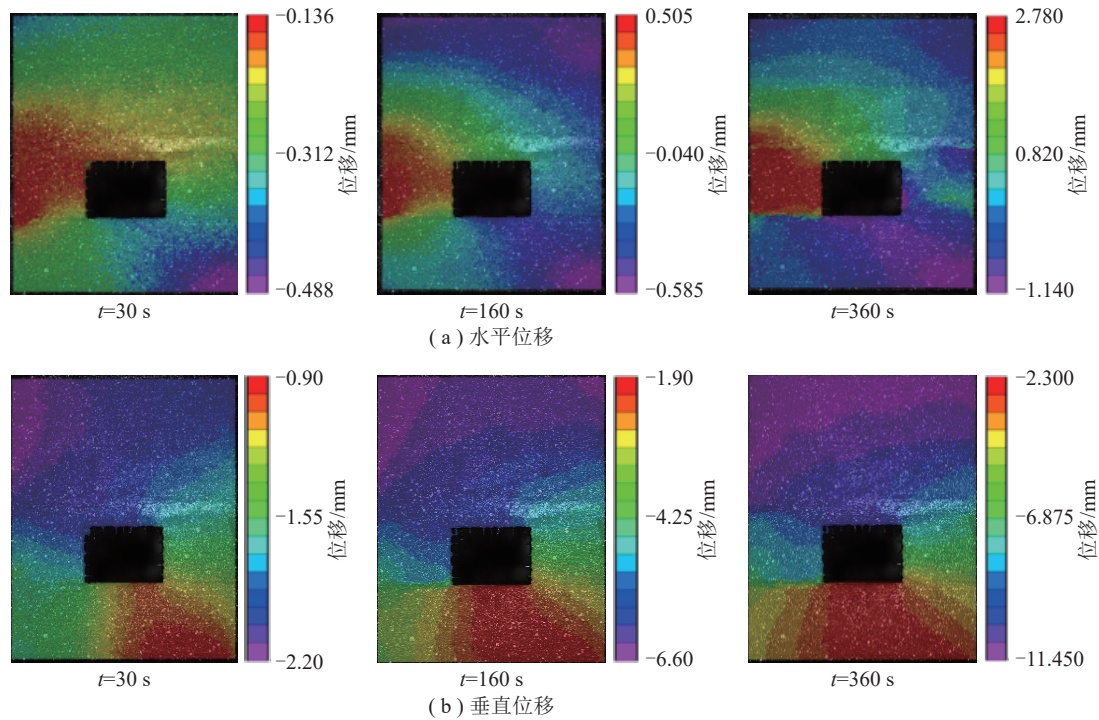


图 12 完整围岩巷道模型在加载下水平位移与垂直位移演化云图

Fig. 12 Evolutionary nephograms of horizontal and vertical displacements in intact surrounding rock roadway model under stepwise loading

均在 0.14 mm 左右; ②160 s 时左帮位移量变化相较于右帮多约 0.30 mm, 同时左帮位移量更集中于巷道正左侧部分; ③360 s 时左帮的位移量比右帮多 1.64 mm, 顶底板位移量变化分布较均匀。

由图 12(b) 可以看出: ①30 s 时巷道左帮肩角位置位移量最大, 达到 2.10 mm 左右, 在左帮上方位置出现明显位移分界线, 分界线上侧位移量明显大于下侧, 右帮肩角位置出现明显的位移变化分界线, 分界线左侧位移相对较大, 右侧位移则相对较小, 表明在该分界线区域附近发生有以剪切为主, 张拉为辅的非均匀破坏, 巷道整体左侧位移相较于右侧位移更大; ②160 s 时上述各部分区域位移变化量进一步增大, 底板出现位移增大现象 (增加 1 mm 左右), 尤其在底板左右角位置出现明显的位移分界线, 在分界线靠近帮部的一侧位移变化明显大于底板位置, 表明两帮的垂直变形愈发剧烈; ③360 s 时巷道左帮整体位移变形量超过了右帮约 1.26 mm, 在左右两帮的上下角位置出现的位移变化分界线更加明显, 表明不同区域之间有些已经出现了宏观裂隙, 在整体压力下各自变形。同时在此阶段, 巷道顶板位置的变形量最为剧烈且位移变化较为集中, 表明此时顶板已经出现明显下沉, 而巷道底板

位移变化相对较小, 并且分布较为均匀。

图 13 为完整围岩巷道模型加载结束后的整体破坏宏观实物图像。由图 13 可知, 巷道左右肩角位置为裂隙高度发育区和剪切破坏主导区, 该区域以明显的剪切破坏为主, 裂隙极度发育, 围岩极度破碎。从相似物理模型的整体性角度出发, 并结合图 12 所示的整体垂直位移分布云图, 能看出巷道的两帮对整个系统起到了关键的支撑性作用, 两帮的煤体在锚杆支护作用下将承受的巨大压力转为煤体内部的拉力, 因此两帮的破坏以拉伸破坏为引导。同时, 受到两帮的支撑作用和顶板的下沉效应, 巷道肩角煤岩体区域承受较大的竖向剪切效应, 进而在区域内部诱发裂隙高度发育扩展, 最终分别形成裂隙高度发育区和剪切破坏主导区。从图 12 中也可通过明显的区域化垂直位移差异来判断这种分区的合理性。巷道顶板上方为下沉区和位于下沉区上方的大片裂隙缓和区。由于顶板安设了锚杆和锚索, 且锚索的端头位置固定在强度较高、厚度较厚的中粒砂岩区域, 因此顶板虽然发生整体下沉, 但是完整性尚好。上述有关破坏分区的划分基本符合现有巷道变形及矿山压力理论, 这表明砂型 3D 打印的巷道模型可以用来模拟真实岩石的变形

特征, 为后续试验以及现场围岩变形再现提供了有力支撑。

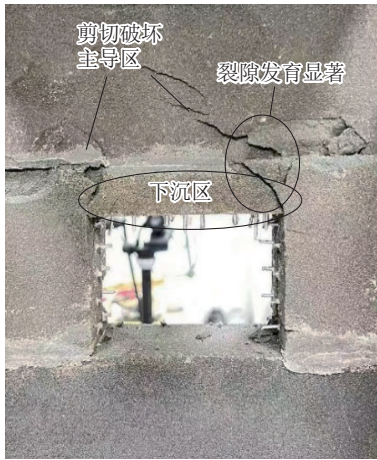


图 13 完整围岩巷道模型加载后破坏形貌

Fig. 13 Post-loading failure morphology of intact surrounding rock roadway model

### 3.4 裂隙围岩巷道变形演化特征

对加载得到的 DIC 图片利用 VIC-2D 软件进行处理, 在裂隙围岩巷道周边布置 10 个虚拟测点, 以便获取巷道围岩典型位置的位移变化, 其中左帮布置 3 个测点 e1、e2、e3, 右帮布置 3 个测点 e4、e5、e6, 顶板布置 2 个测点 e7、e8, 底板布置 2 个测点 e9、e10(图 14)。

得到所测位置的水平位移与垂直位移变化如图 15 所示, 其中两帮测点水平位移图中正值表示位移方向向右, 负值表示位移方向向左; 顶底板测点垂直位移图中正值表示向下, 负值表示向上。

由图 15(a)可知: ①在 0~180 s 时, 左右两帮测点位移都朝向巷道内部, 其中左帮位移增速大于右帮; ②在 180~380 s 时, 左帮测点位移量依旧向右增

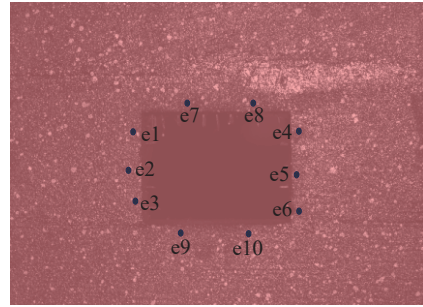


图 14 裂隙围岩巷道周边虚拟测点布置

Fig. 14 Layout of virtual monitoring points around fractured surrounding rock roadway

加, 但此阶段的增速相较于之前阶段降低, 右帮测点趋近于平缓; ③在 380 s 时左帮测点位移达到最大值 2.60 mm, 右帮位移达到最大值 0.60 mm, 其中测点 e3 在 350 s 左右时发生急剧变化, 表明此时该测点所在围岩发生块体破碎、脱落。

由图 15(b)可知: ①在 0~380 s 时, 顶板测点位移匀速向下沉降, 底板测点位移几乎没有变化; ②在 380 s 左右时顶板测点发生急剧下沉, 最终位移量达到 31 mm 左右, 表明此时模型发生破坏。

从裂隙围岩巷道模型垂直位移云图(图 16)可以看出: ①在 50~200 s 时, 左帮位移量从 0.16 mm 增加为 0.58 mm, 增加了 0.42 mm, 右帮中间位置有明显的垂直位移分界线, 分界线上垂直位移增量为 0.43 mm, 分界线下垂直位移增量为 0.09 mm, 这表明添加的近垂直裂隙使得巷道帮部发生了沿裂隙扩展的破坏形式, 同时分界线上下区域变形量相差较大, 表明这部分围岩呈现块状破碎形式, 顶板位移量从 0.20 mm 增为 1.03 mm, 增加了 0.83 mm, 顶板垂直位移变形较大区域逐渐集中于巷道顶部, 底板位移量从 -0.02 mm 变为 0.06 mm, 增

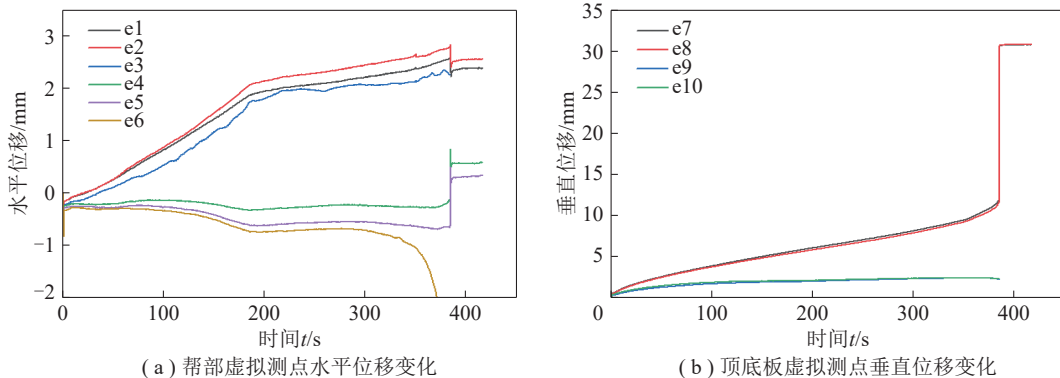


图 15 裂隙围岩巷道周边虚拟测点位移变化

Fig. 15 Displacement variations at virtual monitoring points in the perimeter of fractured surrounding rock roadway

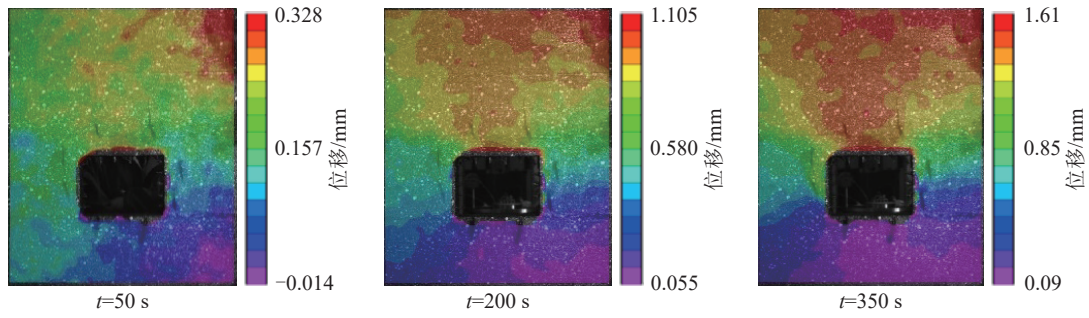


图 16 裂隙围岩巷道模型垂直位移云图

Fig. 16 Vertical displacement nephogram of fractured surrounding rock roadway model

加了 0.08 mm, 这表明底板变形量很小; ②在 200~350 s 时, 左右两帮位移量增加了 0.30 mm, 顶板位移量增加了 0.59 mm, 底板位移量增加了 0.04 mm。整个加载过程中巷道顶板变形越来越集中, 且变形量较均匀, 与顶板布置测点所得到的数据曲线结果一致, 左帮变形量较大, 右帮相对较小, 并且伴有块

状破碎现象。

### 3.5 裂隙对巷道变形特征影响分析

为了更好地分析添加近垂直裂隙对巷道围岩破坏情况的影响, 将通过 DIC 分析得到的完整围岩巷道模型与裂隙围岩巷道模型的应变云图 (图 17 和 19) 进行对比。

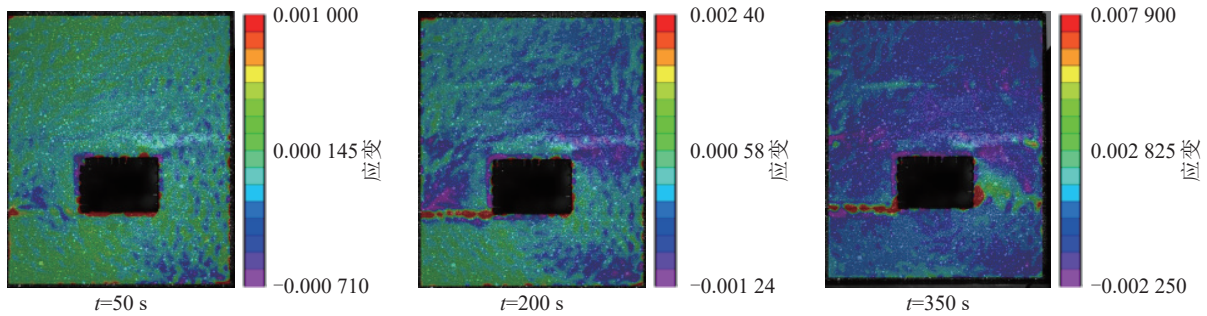


图 17 完整围岩巷道模型应变云图

Fig. 17 Strain nephogram of intact surrounding rock roadway model

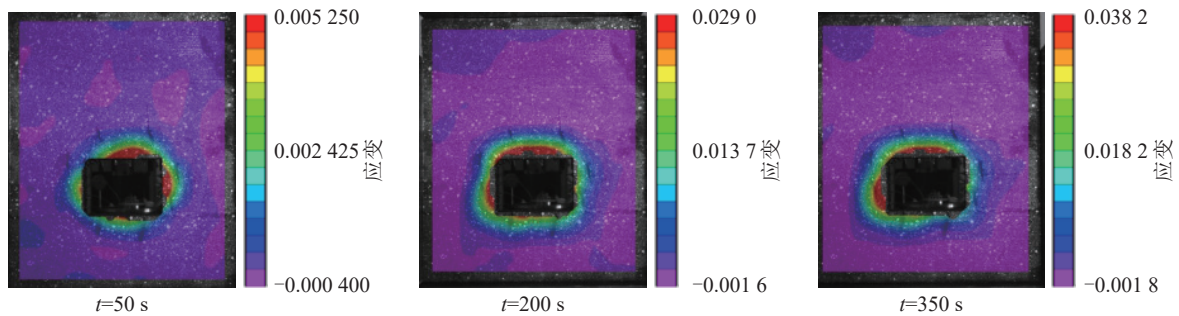


图 18 裂隙围岩巷道模型应变云图

Fig. 18 Strain nephogram of fractured surrounding rock roadway model

由图 17 可知, 完整巷道模型在初始阶段呈现巷道周边应变集中现象, 随着加载的进行, 巷道帮部应变集中更加明显, 两帮肩角位置以及靠近底角的位置出现较大变形。由图 18 可知, 在添加了近垂直裂隙后, 裂隙围岩巷道模型在加载过程中巷道

周边应变集中现象更加明显, 增加 0.04, 裂隙周边也产生应变集中且巷道左帮应变集中程度大于右帮 0.02, 这与前面所述的左帮变形较大的情况结论一致, 同时顶板和底板出现应变集中区, 分别为 0.04 和 0.02, 顶板相对应变更大, 而底板较小, 表明

顶板变形量较大, 发生垮落下沉, 底板有轻微的底臃现象。以上证明在巷道模型中添加了近垂直裂隙会使得巷道帮部围岩发生块状破碎, 顶板整体垮落但相对完整, 底板伴有轻微的底臃现象, 这与 12 上 302 辅运巷围岩变形情况较为一致。同时对比现场巷道变形测量数据 (表 3) 可知, 添加裂隙后两帮变形最为显著, 顶板下沉量次之, 底臃量相对前两者较小, 这与现场变形趋势基本吻合。

结合裂隙围岩巷道模型加载破坏实况 (图 19) 可以得出, 添加了近垂直裂隙的砂型 3D 打印模型经过模拟加载后, 两帮出现块状破碎的片帮现象, 顶板整体下沉但整体完整性相对较好, 这与现场巷道实测现象 (图 2) 较为一致, 说明该研究可为后续更好地模拟现场围岩变形现象和深部巷道围岩变

形控制优化以及 3D 打印巷道模型试验提供借鉴与支持。

表 3 现场测量变形量与模型变形量  
Table 3 On-site measurement of deformation and model deformation

类别	时间	左帮变形/mm	右帮变形/mm	顶板变形/mm	底板变形/mm
现场测量变形量	30 d	214	239	120	81
	60 d	432	456	236	163
完整围岩巷道模型	30 s	0.14	0.31	2.01	0.91
	160 s	0.51	0.04	6.21	1.92
	360 s	2.78	0.82	11.45	2.31
裂隙围岩巷道模型	30 s	0.69	0.83	0.16	0.02
	160 s	1.57	1.66	0.80	0.06
	360 s	4.32	4.68	0.85	0.09

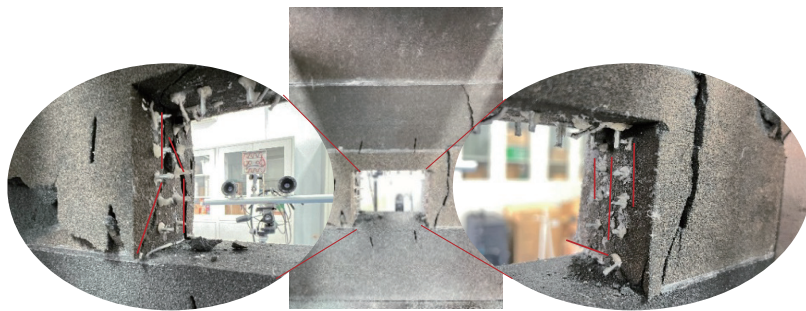


图 19 裂隙围岩巷道模型加载破坏实况

Fig. 19 Documentation of loading-induced destruction in fractured surrounding rock roadway model

## 4 讨论

采用砂型 3D 打印技术制作完整围岩巷道物理模型以及结合 SolidWorks、C4D 等辅助设计软件制作符合工程现场的裂隙围岩巷道物理模型, 同时考虑实际煤岩层不同性质, 通过改变打印基质与配比实现分层打印, 该方法具有可自由便捷设置模型尺寸与裂隙参数、按相似比例关系模拟各煤岩层强度, 且无需长时间养护等优点。同时该方法目前仍存在一定的局限性与应用潜力, 后续研究工作可从以下几个方面开展。

(1) 天然岩体由于受沉积作用和赋存条件的影响, 各项力学性能均存在差异性, 同时 3D 打印技术因其成型原理、打印基质与材料配比等因素的差异, 导致所制备的试件力学特性也不尽相同, 因此在进行分层制备巷道物理模型的过程中, 除了要考虑煤岩体单轴抗压强度之外, 其他力学特性 (如弹

性模量、密度等) 满足的比例关系也需进一步研究。

(2) 针对 3D 打印巷道物理模型模拟裂隙围岩现场工程问题, 可形成如图 20 所示的破坏分析流程。但真实巷道围岩裂隙产状复杂多样, 岩体的力学特性亦受裂隙倾角、迹长及组合关系等多种因素的共同影响, 并且单一测量方法难以明确裂隙所有参数条件, 导致在以巷道物理模型还原真实破坏形式试验中依旧存在偏差, 因此可采用多种测量方法, 包括直接测量、间接测量及无损测量等来获取更详细的现场裂隙参数并将其导入物理模型中, 从而还原更真实的巷道围岩条件。

(3) 在涉及锚杆支护的各类工程中, 无论是锚杆类型不同还是锚固方式不同, 绝大多数锚杆使用时都需要安装托盘<sup>[22]</sup>, 锚杆对围岩的支护作用主要通过预紧力来实现, 而笔者制作的物理模型以 1 : 50 的几何相似比对煤矿巷道包括锚杆进行缩尺打印, 呈比例缩尺后锚杆预紧力几乎可以忽略不计。针

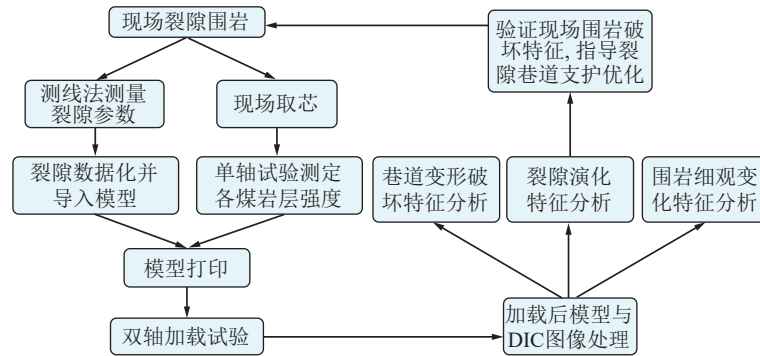


图 20 基于砂型 3D 打印的裂隙围岩巷道变形破坏分析流程

Fig. 20 Flow chart for analyzing deformation and destruction mechanisms of roadways in fractured surrounding rock via sand mold 3D printing

对现场巷道锚杆支护安装托盘这一情况, 后续工作中可根据实际条件适当增大缩尺比例并按比例安装托盘, 以此实现更精确的支护系统缩尺。

(4) 通过分析完整围岩巷道和裂隙围岩巷道的变形破坏特征可知, 裂隙对围岩的完整性和整体位移量均会产生很大影响, 且围岩破坏所产生的裂纹更易沿预制裂隙演化。本试验仅考虑裂隙倾角范围的变化, 对裂隙迹长、开度及组合关系等多种影响因素未进行变量设计, 今后仍需进一步研究裂隙密度、迹长、分布位置、空间特征等参数对巷道围岩变形破坏特征的影响。

## 5 结论

(1) 不同基质对比对模型的强度和变形特征均有显著影响, 其中硅砂粒径为 0.070~0.140 mm, 粘结剂浓度分别为 60%、80% 和 100% 时, 对应单轴抗压强度分别为 13.85、16.35 和 20.20 MPa; 硅砂粒径为 0.100~0.200 mm, 粘结剂浓度为 100% 时, 对应单轴抗压强度为 12.00 MPa, 符合分层打印比例强度, 实现了满足工程地质条件下各煤岩层强度比例关系的巷道物理模型分层制备。

(2) 完整围岩巷道模型呈现巷道肩角处首先出现裂纹, 两帮破碎且顶板下沉, 以剪切破坏为主。裂隙围岩巷道模型的破坏主要沿预制裂隙演化, 两帮破坏更加明显且出现块状破碎, 一定程度上再现了实际工程巷道变形破坏特征, 可为后期室内物理模型试验研究提供基础。

(3) 结合 DIC 散斑测试结果可知, 添加裂隙后的围岩巷道模型比完整围岩巷道模型的巷道周边应变集中现象更加明显, 位移变形量更大且在帮部

出现小块的明显位移增大区域, 这与加载后模型呈现的破坏现象吻合, 科学地解释了裂隙围岩巷道变形破坏特征。

(4) 通过现场实测裂隙参数, 基于砂型 3D 打印技术可将测得裂隙参数导入巷道物理模型并有效模拟实际工程中的巷道围岩变形破坏情况, 使得室内巷道物理模型试验技术进一步贴合现场, 这为砂型 3D 打印技术在室内物理模型试验的进一步发展提供了借鉴与支持。

## 参考文献 (References):

- [1] 余伟健, 李可, 芦庆和, 等. 裂隙发育岩体巷道围岩工程特征与变形控制[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3408-3418. YU Weijian, LI Ke, LU Qinghe, et al. Engineering characteristics and deformation control of roadways in fractured rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3408-3418.
- [2] 蒋力帅, 马念杰, 白浪, 等. 巷道复合顶板变形破坏特征与冒顶隐患分级[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1205-1211. JIANG Lishuai, MA Nianjie, BAI Lang, et al. Deformation and failure characteristics and roof caving hidden danger classification of roadways compound roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1205-1211.
- [3] 何满潮. 深部软岩工程的研究进展与挑战[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1409-1417. HE Manchao. Progress and challenges of soft rock engineering in depth[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1409-1417.
- [4] 余伟健, 吴根水, 安百富, 等. 裂隙岩体巷道大变形特征与稳定性控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 103-111. YU Weijian, WU Genshui, AN Baifu, et al. Large deformation characteristics and stability control of roadway with fractured rock mass[J]. Journal of Mining & Safety

- Engineering, 2019, 36(1): 103–111.
- [5] LI Guang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Study on deformation failure mechanism and support technology of deep soft rock roadway[J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105262.
- [6] 王炯, 张正俊, 朱天赐, 等. 恒阻大变形锚索支护巷道变形机制模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(5): 927–937.
- WANG Jiong, ZHANG Zhengjun, ZHU Tianci, et al. Model test study on deformation mechanism of roadway supported by constant resistance and large deformation anchor cables[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(5): 927–937.
- [7] YAN Hong, LI Guichen, LI Yongqi, et al. Stress evolution characteristics of the intensively mining-induced surrounding roadways within an extra-thick coal seam: a case study from the Tashan coal mine, China[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(11): 3840–3854.
- [8] 李光, 马凤山, 郭捷, 等. 一种节理围岩巷道开挖物理模型试验方法及其应用[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1010–1016.
- LI Guang, MA Fengshan, GUO Jie, et al. A model test method on roadway excavation under jointed rock mass and its application[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1010–1016.
- [9] CAO Juncai, ZHANG Nong, WANG Shanyong, et al. Physical model test study on support of super pre-stressed anchor in the mining engineering[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 118: 104833.
- [10] 江权, 宋磊博. 3D 打印技术在岩体物理模型力学试验研究中的应用研究与展望[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 23–37.
- JIANG Quan, SONG Leibo. Application and prospect of 3D printing technology to physical modeling in rock mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 23–37.
- [11] SONG Leibo, JIANG Quan, SHI Yingen, et al. Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models: study of tunnels[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(8): 2617–2637.
- [12] 余宸, 田威, 王杰, 等. 砂型 3D 打印材料在岩体物理模型试验中的应用研究与展望[J]. *材料导报*, 2024, 38(12): 77–85.
- YU Chen, TIAN Wei, WANG Jie, et al. Application research and prospect of sand-type 3D printing material in rock physical model test[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(12): 77–85.
- [13] XU Qing, JIANG Lishuai, MA Changqing, et al. Effect of layer thickness on the physical and mechanical properties of sand powder 3D printing specimens[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 763202.
- [14] ZHAO Yang, JIANG Lishuai, LI Chun'ang, et al. Experimental investigation into the mechanical behavior of jointed soft rock using sand powder 3D printing[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(7): 5383–5404.
- [15] 王本鑫, 金爱兵, 孙浩, 等. 基于 DIC 的含不同角度 3D 打印粗糙交叉节理试样破裂机制研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(2): 439–450, 461.
- WANG Benxin, JIN Aibing, SUN Hao, et al. Study on fracture mechanism of specimens with 3D printed rough cross joints at different angles based on DIC[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 439–450, 461.
- [16] GOMEZ J S, CHALATURNYK R J, ZAMBRANO G. Experimental investigation of the mechanical behavior and permeability of 3D printed sandstone analogues under triaxial conditions[J]. *Transport in Porous Media*, 2019, 129(2): 541–557.
- [17] VOGLER D, WALSH S D, DOMBROVSKI E, et al. A comparison of tensile failure in 3D-printed and natural sandstone[J]. *Engineering Geology*, 2017, 226: 221–235.
- [18] ZHANG Zhe, JIANG Lishuai, LI Chun'ang, et al. Characteristics and mechanism of time on sand powder 3D printing rock analogue: a new method for fractured rock mechanics[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2023, 9(1): 166.
- [19] 王文海, 蒋力帅, 何鑫, 等. 基于砂型 3D 打印的复杂节理岩体变形破坏特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(3): 754–767.
- WANG Wenhai, JIANG Lishuai, HE Xin, et al. Experimental study on deformation and failure characteristic of complex jointed rock mass based on sand-powder 3D printing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(3): 754–767.
- [20] 蒋力帅, 李春益, 徐清, 等. 砂型 3D 打印成型方向对含裂隙软岩试样力学特性的影响研究[J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2023, 42(5): 22–29.
- JIANG Lishuai, LI Chun'ang, XU Qing, et al. Study on the influence of sand mold 3D printing direction on mechanical properties of soft rock specimens with crack[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 42(5): 22–29.
- [21] 李为腾, 李术才, 王琦, 等. 深部厚顶煤巷道围岩变形破坏机制模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 2847–2856.
- LI Weiteng, LI Shucui, WANG Qi, et al. Model test study of surrounding rock deformation and failure mechanism of deep roadway with thick top coal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 2847–2856.
- [22] GB/T 35056—2018, 煤矿巷道锚杆支护技术规范[S]. GB/T 35056—2018, Technical specifications for rock bolting in coal mine roadways [S].