



浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究

张贵彬 王荣强 马俊鹏 吕文茂 张文泉 王海龙

引用本文:

张贵彬, 王荣强, 马俊鹏, 等. 浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 165–175.

ZHANG Guibin, WANG Rongqiang, MA Junpeng. Study on solid–fluid coupling similarity simulation test of water–sand inrush during mining of shallow buried thin bedrock roof[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 165–175.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1227>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅埋薄基岩工作面溃水溃砂模拟试验及影响因素分析

Simulation test of water and sand burst in shallow and thin bedrock face and analysis of influencing factors

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 1–8 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3d4a5ad9-712f-43b0-a6cb-479470096b31>

薄基岩顶板工作面突水溃砂及切顶灾害试验研究

Experimental study on disaster of water–sand inrush and roof cutting in working face with thin bedrock roof

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 125–133 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3eafd602-e303-4895-bdb6-f54b99dfef02>

基岩风化带性质对顶板突水溃砂的影响研究

Research on the influence of the nature of the weathered bedrock zone on the roof water bursting and sand bursting: taking Zhaogu No. 1 Mine as an example

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 64–71 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1268>

厚表土薄基岩凿井突水溃砂井筒破坏治理技术研究

Study on shaft damage control technology of water inrush and sand burst in drilling process with thick topsoil and thin bedrock

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 176–185 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.021>

厚覆基岩下煤层开采突水溃砂机理研究

Study on mechanism of water inrush and sand inrush in mining of coal seam with thick overlying bedrock

煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/44856419-6ef9-4309-818e-5a9b8a6907c7>

薄基岩区覆岩采动破坏特征与控水控砂性能评价

Characteristics of overlying rock mining failure and evaluation of water – sand controlling performance in thin bedrock areas

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 200–209 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0985>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张贵彬, 王荣强, 马俊鹏, 等. 浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 165–175.

ZHANG Guibin, WANG Rongqiang, MA Junpeng, *et al.* Study on solid-fluid coupling similarity simulation test of water-sand inrush during mining of shallow buried thin bedrock roof[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 165–175.

浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验研究

张贵彬^{1,2,3}, 王荣强¹, 马俊鹏², 吕文茂², 张文泉³, 王海龙¹

(1. 临沂大学 土木工程与建筑学院, 山东 临沂 276000; 2. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 邹城 273500; 3. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 突水溃砂作为一种新型的矿井地质灾害, 具有隐蔽、突发、难监测、破坏强等特点, 因此, 探究覆岩采动劣化特征及突水溃砂致灾机理对松散层水害防控具有指导意义。首先, 通过相似材料配比与测试试验, 研究了不同材料配比对材料强度、渗透特性的影响机制, 并研制出一种适宜于模拟松软岩层的新型固流耦合相似材料; 然后, 借助采动煤层顶板涌水溃砂灾害模拟系统, 进行了浅埋薄基岩、中厚基岩的单一含水结构盖层以及薄基岩含隔双层结构盖层条件下开采的相似模拟试验, 分析了不同地层结构的采动裂缝空间劣化—贯通及水砂起动、运移、涌溃灾变特征, 揭示了浅埋薄基岩采动突水溃砂致灾机理。试验结果表明: 新型固流耦合相似材料兼具耐水、抗崩解、抗软化、低渗透、低强度、低塑性的特性, 且渗透系数随碳酸钙含量的增加呈负指数衰减, 单轴抗压强度呈现二次多项式增长的特点; 初次来压和第一次周期来压阶段是浅埋薄基岩采动覆岩劣化诱发突水溃砂的高发期, 采动裂缝平面呈“OX”分布, 随基岩与松散层底部黏土层的厚度增加, 覆岩由拉剪破坏逐渐转变为拉张破坏, 裂缝形态由“垂向直通形”转变为“倒楔形多层交错叠加组合”, 裂缝开度减小, 通畅度变差, 可降低诱发突水溃砂风险几率与危害程度; 通道开度(宽度)与砂体粒径的相对关系(简称“裂粒比”)以及通道通畅度是决定突水溃砂发生与否及致灾程度的关键。

关键词: 薄基岩; 采动裂缝; 地层结构; 突水溃砂; 相似材料; 模拟试验

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)06-0165-11

Study on solid-fluid coupling similarity simulation test of water-sand inrush during mining of shallow buried thin bedrock roof

ZHANG Guibin^{1,2,3}, WANG Rongqiang¹, MA Junpeng², LYU Wenmao², ZHANG Wenquan³, WANG Hailong¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Linyi University, Linyi 276000, China; 2. Yan Kuang Energy Group Company Limited, Zoucheng 273500, China; 3. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: As a new type of mine geological disaster, water-sand inrush has the characteristics of concealment, sudden onset, difficulty in monitoring, and strong destruction. Therefore, exploring the characteristics of overlying rock mining degradation and the disaster mechanism of water-sand inrush has guiding significance for the prevention and control of loose layer water hazard. Firstly, the influence mechanism of different material proportioning on the strength and permeability characteristics of similar materials is studied through similar material proportioning and testing experiments, and a new solid-fluid coupling similar material suitable for simulating soft rock layers is developed. Then, by using the test system for water-sand inrush, similar simulation tests are conducted for mining under the condition of a single water-bearing structure capping thin and medium thick bedrock, and a double layered structure capping thin bedrock. The characteristics of mining crack and the disaster mechanism of water-sand inrush under the above strata structure conditions are analyzed. The test results show that the new solid-fluid coupling similar material has the characteristics of water resistance, anti disintegration, anti softening, low permeability, low strength, and low plasticity, and the permeability coefficient decreases exponentially with the increase of calcium

收稿日期: 2023-08-29

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1227

基金项目: 山东省自然科学基金青年资助项目(ZR2021QD091); 山东省高等学校“青创团队计划”团队资助项目(2022KJ112)

作者简介: 张贵彬(1988—), 男, 山东临沂人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: zg_y1989@126.com

carbonate content, while the uniaxial compressive strength exhibits a quadratic polynomial growth characteristic. The first weighting stage and the first periodic weighting stage of mining shallow and thin bedrock are easy to induce water-sand inrush. The mining cracks present an “OX” distribution on the plane, and as the thickness of bedrock and the clay layer at the bottom of the loose layer increases, the bedrock gradually transforms from tensile shear failure to tensile failure, and the morphology of the cracks also changes. At the same time, the opening and smoothness of cracks are reduced, which can reduce the inducing risk and harm degree of water-sand inrush. The ratio of crack opening to sand particle size, as well as the smoothness of crack, are the key factors determining the occurrence and severity of water-sand inrush.

Key words: thin bedrock; mining induced cracks; strata structure; water-sand inrush; similar materials; simulation test

0 引言

随着我国对煤炭资源的持续开发,薄基岩矿区面临采掘诱发突水溃砂灾害的风险日趋加剧^[1-2]。据统计,自2000年以来,西部矿区发生突水溃砂事故多达83次,2021年7月至8月,陕西省榆林郝家梁煤矿、青海省西海煤炭公司柴达尔煤矿相继发生矿井突水溃砂灾害,共造成25人遇难,为此国家矿山安全监察局专门下发《关于开展煤矿井下防溃水溃砂专项检查的通知》(矿安[2021]113号),并开展全国煤矿井下防溃水溃砂的专项检查。由此可见,突水溃砂已俨然成为严重威胁我国矿井安全生产、破坏生态环境及区域水系的一种新型矿井地质灾害^[3-5]。

由于我国西部矿区煤层埋深浅、厚度大、基岩薄、顶板岩层松软,在高强度采动下顶板运动强烈,采动裂缝发育充分甚至直通地表,极易诱发突水溃砂灾害。为避免灾害发生,前人在采动突水溃砂致灾机理和防治技术研究取得了丰硕成果:董书宁等^[5]指出,导水沙裂隙带是薄基岩溃水溃砂的主控因素,并构建了基于导水沙裂隙带与基岩厚度对应关系的溃水溃砂危险性评价体系,研发了含水松散沙体高效注浆技术;隋旺华等^[6]研究了水砂混合物经出口、裂隙和垮落带的运动特征,建立了溃水溃砂定性和定量的评价方法,提出了溃水溃砂防控技术与方法;文献[7-9]等利用多种离散元方法(DEM、PFC3D、LBM-DEM),构建了不同的突水溃砂数值模型,研究了水砂在裂缝通道中运移或突涌特征;伍永平等^[10]建立了溃砂伪结构物理力学模型,给出了溃砂发生条件的理论表达式。文献[11-13]构建了基于水动力学基本原理的突水溃砂力学模型,探究了突水溃砂发生的临界条件、临界判据。

由于煤矿采掘工程隐蔽性强且松散地层具有无序沉积与砂体离散性,利用现场监测、理论分析和数值模拟手段有一定的局限性,为此,众多学者借助室内模拟手段探究了突水溃砂致灾机理。梁燕等^[14]、张敏江等^[15]、许延春等^[16-17]从沙粒的胶结性能角度

初步探究了突水溃砂灾害的水沙流动特征;杨伟峰等^[18]总结出直泻式突出型、跳跃式突出型和缓坡式突出型3种溃砂模式;隋旺华等^[19]分析了松散含水层孔隙水压变化与突水溃砂的关系,给出了临界水力坡度的判别方法。王海龙等^[20]、张士川等^[21]探索了水砂在圆孔裂隙中运移与突涌特征,定量化分析了突涌阶段流量、孔隙水压等物理参量关联性变化特征;YAN等^[22]分析了浅埋矿区采动地表裂隙的分布特征,构建了溃砂灾害模型;杨鑫等^[23]通过水沙两相高速渗流试验,获得了不同粒径沙粒起动速度与溃砂临界速度。然而,由于目前缺少适宜模拟浅埋松软岩层的相似材料亦或受试验条件所限,尚且缺乏对于考虑真实采动影响下覆岩裂缝时空演化与突水溃砂致灾全过程的固流耦合三维相似模拟试验研究,且在地层结构对覆岩采动劣化及突水溃砂特征的影响分析方面也鲜有探讨。

针对上述问题,利用相似材料配比与测试试验,研究了不同材料对比对相似材料强度、渗透特性的影响机制,并研制出一种适宜于模拟低强岩体且兼具“低强、抗渗、低塑”特点的新型固流耦合相似材料;同时,借助采动煤层顶板涌水溃砂灾害模拟系统,以西北浅埋薄基岩矿区为工程背景,进行了浅埋薄基岩、中厚基岩的单一含水结构盖层以及薄基岩含隔双层结构盖层条件下开采的相似模拟试验,分析了不同地层结构的采动裂缝空间劣化—贯通及水砂起动、运移、涌溃灾变特征,揭示了浅埋薄基岩采动突水溃砂致灾机理,为浅埋薄基岩采动突水溃砂灾害防控提供参考。

1 工程地质结构特征分析

我国西北浅埋薄基岩开采矿区主要分布于陕北榆神矿区最东北部以及乌兰木伦河中游东岸的神东矿区,该地区地貌介于陕北黄土高原和毛乌素沙漠边缘的接壤地带。地表至主采煤层自上而下主要地层有第四系松散层、中~下侏罗系地层,其特征如下:

1)松散层地层结构特征。①松散含水层结构特

征。松散地层以第四系的全新统风积沙和上更新统萨拉乌苏组砂层为主,统一构成了区域松散含水层,平均厚度 15~50 m;其中,风积沙地层(Q_4^{col})由棕黄色、灰黄色粉细砂为主,一般厚度 3~5 m;萨拉乌苏组厚度一般 10~30 m,分布广泛,河湖相沉积,以粉细砂、中砂为主,局部地区底部为砂砾石层;为孔隙潜水含水层,水位埋深浅,一般 0~5 m,砂质松散、孔隙率大,一般中等~强富水,受地表水和大气降水直接补给,是开采诱发突水溃砂的直接水砂补给源。

② 松散隔水层结构特征。松散隔水层主要由第四系的离石黄土(Q_2^1)和新近系上新统三趾马红土(N_2)组成,局部区域赋存。离石黄土为浅棕黄、褐色亚黏土及亚砂土;三趾马红土为棕红色黏土、亚黏土,结构致密,中硬状。

2) 岩层结构特征。基岩为中~下侏罗系地层,中侏罗统直罗组以灰绿色泥质胶结砂岩为主,风化裂隙较发育,局部区域残存不全;下侏罗统延安组为含煤地层,1-2 和 2-2 煤层平均厚度分别为 2.81 m 和 4.10 m,顶板基岩较薄,基岩风氧化厚度一般为 10~20 m,顶部 5~8 m 为强风化带;风化岩裂隙发育,多为泥质充填。原岩的单轴抗压强度为 43.22~66.61 MPa,属于中硬强度类型,风化岩力学强度明显降低,单轴抗压强度为 26.15~37.2 MPa。

根据上述地层结构特征分析,构建出单一含水结构盖层和含-隔双层结构盖层的薄基岩工程地质概化模型:①单一含水结构盖层薄基岩工程地质概化模型是由松散层、基岩和煤层组成,特点在于基岩之上松散层以连续砂层为主,其间基本无隔水层,可概化成单一沉积结构的砂质含水层,其厚度相对较大,为孔隙潜水含水层,属于典型的浅埋—砂基接触,具体特征见图 1;②含-隔双层结构盖层薄基岩工程地质概化模型相较于单一含水结构概化模型,主要区别在于松散层底部分布着黏土质隔水层,使松散层可概化为“上含下隔”的双层结构,其概化模型如图 2 所示。

2 新型固流耦合相似材料研制

对于固流耦合试验材料,保证材料能满足基本相似理论,且遇水不发生崩解、软化或塑性变形,同时要保证材料的非亲水性。通过对前人研制出的固流耦合相似材料的学习与尝试,了解掌握了不同原料成分对相似材料物理力学性质的影响作用,但不适宜用来模拟浅埋矿区的松软岩层,为此,有必要研制出一种兼具致密、低强度、低渗透性、低塑性、耐水、遇(浸)水抗崩解与抗软化性好等特点的新型

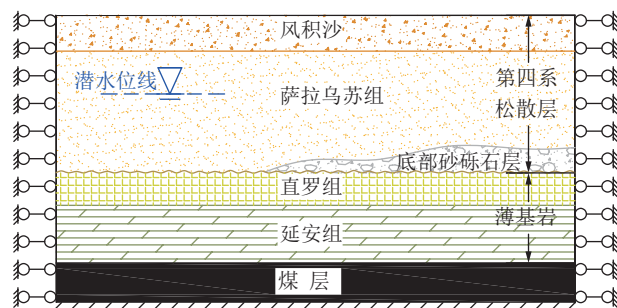


图 1 单一含水结构盖层薄基岩工程地质概化模型

Fig.1 Engineering geological generalization model of a single water-bearing structure capping thin bedrock

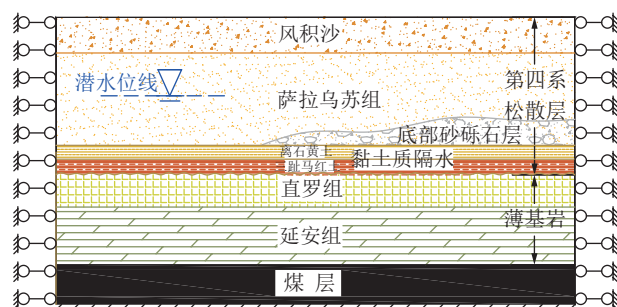


图 2 含-隔双层结构盖层薄基岩工程地质概化模型

Fig.2 Engineering geological generalization model of double layer of aquifer & aquifuge alluvium capping thin bedrock

固流耦合相似材料。

2.1 材料选择与试样制备

经过大量的配比及参数测定试验研究,最终选定主要材料有:干净河沙(粒径小于 0.5 mm)与碳酸钙为骨料,58 号工业石蜡与工业凡士林为胶结剂,46 号抗磨液压油为调和剂。

为了保证试样参数的准确性,设计每种配比制作 3 个试样,试样具体制备过程如下:①考虑到制备过程中材料的损耗,根据试样配比用量按 1:1.2 称取出各类材料;②先将称取的砂和碳酸钙放置容器中充分搅拌均匀,然后将骨料、凡士林和石蜡分开加热;凡士林和石蜡采用水浴加热至熔融状态,为了保证骨料受热均匀,将搅拌好的骨料直接放入热锅中进行炒拌,加热至 80°左右;③然后将加热好的骨料和胶结剂倒入容器内快速搅拌至均匀,装入模具($\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$)捣实,静置 20 min,待试样冷却后脱模,编号即可。试样模具及部分试样制备情况如图 3 所示。

2.2 试验测试方法与思路

① 测试方法:借助岛津 AG-X250 电子万能试验机进行试样的强度测试,利用渗透测试仪进行试样的渗透系数测试。



图3 试样制作模具与标准试样

Fig.3 Standard samples and their manufacturing molds

② 测试思路: 以相似理论换算得出的固流耦合相似材料强度与渗透性指标为依据 (单轴抗压强度为 50.13 ~ 125 kPa, 渗透系数数量级为 10^{-6} cm/s), 通过大量试验测试, 首先初步确定同量级强度范围的各类材料的配比区间; 然后, 再通过调整单一材料用量, 研究材料占比对相似材料的强度、渗透性变化的影响规律, 进而确定适宜本次相似模拟试验模型中各类岩层的相似材料的配比。

2.3 试验结果分析

测试结果发现: 石蜡对于材料强度影响更明显, 凡士林对材料抗渗透性、增塑性的影响明显; 但在骨料仅选用干净河沙 (粒径小于 0.5 mm) 时, 难以满足本次试验相似材料要求: 比如若材料渗透性符合要求, 强度却偏高亦或表现出较好的塑性; 原因分析:

由于干净河沙在冲洗过程中微小粒度成分流失使得相似材料孔隙度大、致密性差、渗透性强, 仅通过增加或调整胶结剂 (石蜡、凡士林) 的用量不足以达到固流相似材料的要求, 为此, 提出增加骨料的细粒成分的设想。并通过多次配比与测试试验, 最终优选碳酸钙作为细骨料, 且研制出兼具致密、低强度、低渗透性、低塑性、耐水、遇 (浸) 水抗崩解与抗软化性好的新型固流耦合相似材料。各材料配比参数测定情况见表 1。

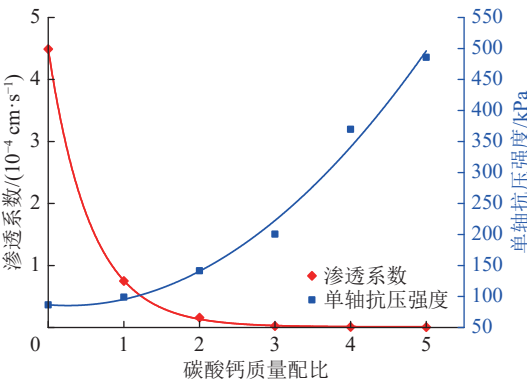
图 4 是结合表 1 中 A ~ F 组试样的单轴抗压强度、渗透系数的测试均值结果, 运用拟合回归获得的变化曲线。由图 4 分析可知, 在材料质量配比 (沙子 : 石蜡 : 凡士林 : 液压油 : 碳酸钙) 为 40 : 0.8 : 1 : 1 的基础上, 将碳酸钙的含量配比由 0 增加至 5, 渗透系数呈负指数衰减的特点 (式 (1)), 并且质量配比在 0 ~ 2 范围内渗透系数降幅明显; 质量配比超过 2 后, 渗透系数降幅平缓, 此时的渗透系数数值已降至很小, 其量级已由 10^{-4} cm/s 降至 10^{-6} cm/s; 而试样的单轴抗压强度随碳酸钙的质量配比呈二次多项式增长关系 (式 (2)), 并且质量配比在 0 ~ 3 范围内单轴抗压强度增幅相对缓慢; 质量配比超过 3 后, 单轴抗压强度显著提高,

表 1 材料配比及参数测试结果
Table 1 Material ratio and parameter test results

试样 编号	材料质量配比	高度/mm	质量/g	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	单轴抗压强度/kPa	渗透系数/($10^{-4}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
	沙子 : 石蜡 : 凡士林 : 液压油 : 碳酸钙					
A-1	40 : 0.8 : 1 : 1 : 0	101.5	319	1 600.6	85.35	4.52
A-2		102.1	321	1 601.2	89.24	4.45
A-3		105.0	330	1 600.6	85.02	4.50
平均	—	—	—	1 600.8	86.54	4.49
B-1	40 : 0.8 : 1 : 1 : 1	101.7	325	1 627.5	98.90	0.87
B-2		107.3	347	1 647.0	94.62	0.75
B-3		106.9	342	1 629.4	103.33	0.63
平均	—	—	—	1 634.6	98.95	0.75
C-1	40 : 0.8 : 1 : 1 : 2	106.2	350	1 678.5	136.74	0.13
C-2		104.2	338	1 652.0	144.92	0.10
C-3		108.7	353	1 653.9	142.80	0.25
平均	—	—	—	1 661.4	141.49	0.16
D-1	40 : 0.8 : 1 : 1 : 3	107.4	362	1 716.6	205.74	0.035
D-2		107.9	358	1 689.8	196.32	0.016
D-3		105.3	354	1 712.2	199.53	0.018
平均	—	—	—	1 706.2	200.53	0.023
E-1	40 : 0.8 : 1 : 1 : 4	109.4	376	1 750.4	357.23	0.007 4
E-2		106.2	364	1 745.6	381.26	0.009 7
E-3		110.6	380	1 749.8	370.67	0.007 5
平均	—	—	—	1 748.6	369.72	0.008 2
F-1	40 : 0.8 : 1 : 1 : 5	107.8	376	1 776.4	474.60	0.004 1
F-2		110.2	388	1 793.2	492.30	0.003 8
F-3		112.5	394	1 783.7	490.01	0.008 0

续表						
试样 编号	材料质量配比	高度/mm	质量/g	密度/(kg·m ⁻³)	单轴抗压强度/kPa	渗透系数/(10 ⁻⁴ cm·s ⁻¹)
	沙子：石蜡：凡士林：液压油：碳酸钙					
平均	—	—	—	1 784.4	485.64	0.005 3
G-1	40：0.4：1：1：3	104.6	346	1 684.7	56.12	0.078
G-2		103.1	340	1 679.5	64.77	0.054
G-3		107.8	358	1 691.4	51.49	0.060
平均	—	—	—	1 685.2	57.46	0.064
H-1	40：0.5：1：1：3	105.8	350	1 684.8	75.56	0.051
H-2		107.5	355	1 681.9	78.83	0.044
H-3		104.9	343	1 665.3	87.23	0.040
平均	—	—	—	1 677.3	80.54	0.045
I-1	40：0.6：1：1：3	112.4	369	1 671.9	117.11	0.027
I-2		108.3	359	1 688.2	107.17	0.043
I-3		107.2	351	1 667.5	112.35	0.035
平均	—	—	—	1 675.9	112.21	0.035
J-1	40：0.7：1：1：3	111.7	372	1 677.7	166.23	0.035
J-2		107.7	357	1 672.3	137.98	0.016
J-3		109.2	360	1 676.2	157.43	0.018
平均	—	—	—	1 675.4	153.88	0.027

部分试样破坏形态及全应力应变曲线如图 5 所示；由此表明，碳酸钙(细骨料)起到“降渗提强”的作用。



(沙子：石蜡：凡士林：液压油：碳酸钙 质量配比为 40：0.8：1：1：0~5)

图 4 碳酸钙含量对材料参数的影响

Fig.4 Effect of CaCO₃ content on material parameters

$$y = 4.479\,45e^{(-x/0.55859)} + 0.009\,94 \quad (1)$$

式中： x 为碳酸钙质量配比； y 为渗透系数。

$$b = 18.288a^2 - 9.532a + 86.665 \quad (2)$$

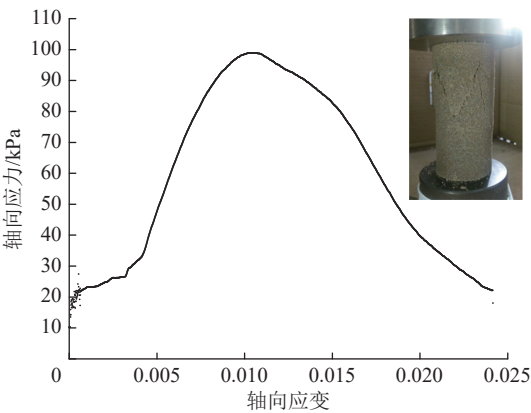
式中： a 为碳酸钙质量配比； b 为试样单轴抗压强度。

2.4 新型固流耦合相似材料配比的确定

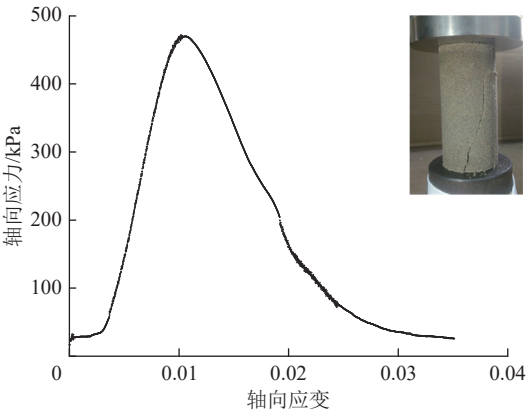
根据试样测试结果(表 1)可知，材料质量配比为 40：0.8：1：1：3(河沙：石蜡：凡士林：液压油：碳酸钙)，试样的渗透系数数量级为 10^{-6} cm/s，单轴抗压强度约 200 kPa，为了使单轴抗压强度降至 50.13~125 kPa，减少了石蜡的用量比例，并进行了参数测试，如表 1 中 G~J 组试样测试结果，并根据

测试均值结果绘制出各配比材料的参数变化曲线，如图 6 所示。

由图 6 分析可知，当碳酸钙质量配比为 3 时，石



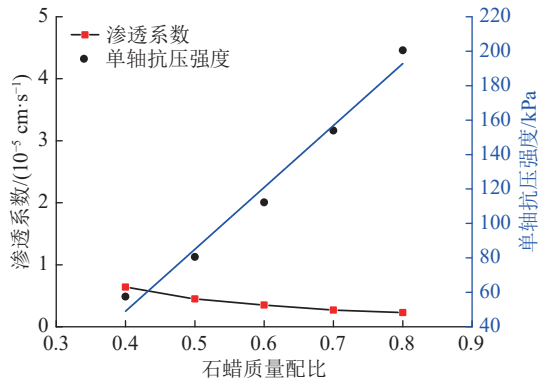
(a) 质量配比 40:0.8:1:1:1



(b) 质量配比 40:0.8:1:1:5

图 5 试样破坏及应力-应变曲线

Fig.5 Sample failure and stress-strain curve



(沙子:石蜡:凡士林:液压油:碳酸钙 质量配比为
40:0.4~0.8:1:1:3)

图6 石蜡含量对材料参数的影响曲线

Fig.6 Effect of paraffin content on material parameters

蜡对试样的单轴抗压强度影响较明显,并且单轴抗压强度随石蜡含量基本呈线性增长的趋势,变化关系式为 $Y=359.48x-94.76$;而渗透系数虽然随石蜡含量的增多,而逐渐减少,但减小幅度平缓,渗透系数的量级均在 10^{-6} cm/s ;综合分析认为,在当碳酸钙质量比例为3,石蜡质量比例为0.4~0.8范围内的材料质量配比(其他材料配比河砂:凡士林:液压油为40:1:1)可以满足此次试验材料的“耐水、抗崩解、抗软化、低渗透、低强度、低塑性”基本要求,同时具有凝固成型快、无需养护等优点。

3 浅埋薄基岩顶板采动突水溃砂固流耦合相似模拟试验

3.1 采动煤层顶板涌水溃砂灾害模拟试验台

试验系统模拟试验台主要包括承载与固定装置、加卸载与供排水装置、试验舱体以及煤层开采模拟装置,试验舱体内部尺寸为1200 mm×700 mm×400 mm(长×宽×高),为了便于材料铺设和试验现象观测,将舱体前挡板设计为可装卸的高强度有机透明玻璃板(图7)。

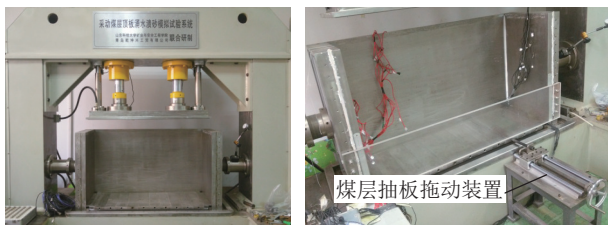


图7 相似模拟试验台

Fig.7 Similar simulation test system

3.2 试验方案

为探究浅埋矿区基岩厚度、松散层底黏对覆岩采动劣化特征的影响机制与突水溃砂机理,以西北

浅埋矿区为工程研究背景,共设计了3种地层结构条件下开采的相似模拟方案(图8),即单一含水结构盖层中厚基岩开采、单一含水结构盖层薄基岩开采和含-隔双层结构盖层薄基岩开采;方案一和方案二的松散含水层结构相同,均属于单一含水结构盖层,主要区别在于方案二的基岩厚度小;方案三相较于方案二,松散层底部赋存厚度20~60 mm均匀变化的黏土层,其他地层结构均相同。

各方案模型几何相似比 C_l 均为1:250,相似材料容重相似比 C_γ 为1:1.5,按照相似理论计算出模型强度相似比 $C_\sigma=C_\gamma C_l=1:375$ 。基于前述固流耦合相似材料研究成果,根据实际岩层的参数特性,确定了不同岩层对应的固流耦合相似材料的配比(表2);为了便于观察水砂混合物沿裂缝通道的运移与涌溃过程及特征,选用粒径为40~80目(粒径0.18~0.425 mm)的天然彩砂模拟松散层砂体。为尽量减小模型边界效应影响,在模型两边各留设一块抽板,在背侧边界处留设一定尺寸的钢板块,作为工作面的边界煤柱;在透明玻璃板与舱体固定立柱之间放入橡胶密封条并涂满玻璃胶后上紧固定螺栓,以保证良好密封性。按照各方案地层结构逐层铺设,铺撒云母粉作为岩层的天然水平层理;完成地层铺设后,向松散砂层注水至水面略高出砂层顶界面,静置30 min使砂体饱和后,即可进行模型模拟开采。各地层各方案的实际地层结构、岩层固流耦合相似材料配比及模型铺设情况见表2和图7。

3.3 试验结果与分析

通过开展浅埋矿区单一含水结构盖层中厚基岩开采、单一含水结构盖层薄基岩开采和含-隔双层结构盖层薄基岩开采3种地层结构条件的相似材料模拟试验,结合试验现象(表3),对比分析了各条件下采动裂缝动态劣化及突水溃砂特征,最终具体分析如下:

1)单一含水结构盖层中厚基岩采动劣化及突水溃砂特征。①工作面来压阶段是煤壁上方的采动裂缝迅速扩展、发育的关键时期,从纵向剖面来看,煤壁上方出现“倒楔形多层交错叠加组合裂缝”;在平面上基本呈“OX”分布特点,且随着岩层的周期破断沿工作面推进方向间隔性延展分布,裂缝主要发育在岩梁铰接断裂处和煤壁边缘位置,裂缝均以拉张裂缝为主(图9)。②由于基岩厚度大,下部垮落岩石对上部岩层起到有效的支撑作用,使断裂岩层之间形成稳定的铰接结构,随着岩层的周期弯曲破断,在上覆岩层重力和岩梁间的铰接挤压双重作用下,

表 2 模拟方案的地层结构及相似材料配比情况
Table 2 Stratum structure and the ratio of similar materials

方案	地层编号	岩性	地质模型				相似模型			
			厚度/m	抗压强度/MPa	天然密度/ (g·cm ⁻³)	厚度/cm	各岩层单层铺设 厚度/cm	铺设 次数	模型累计 铺设高度/cm	质量配比(河砂：石蜡： 凡士林：液压油：碳酸钙)
方案一	1	砂层	50	—	2.22	20	—	—	47	选用天然彩砂
	2	泥岩	10	18.8	2.46	4	2.00	2	27	40:0.4:1:1:3
	3	细砂岩	10	22.4	2.51	4	2.00	2	23	40:0.43:1:1:3
	4	中砂岩	7.5	32.2	2.46	3	3.00	1	19	40:0.5:1:1:3
	5	砂质泥岩	5	36.7	2.53	2	2.00	1	16	40:0.54:1:1:3
	6	细砂岩	7.5	46.9	2.52	3	1.50	2	14	40:0.62:1:1:3
	7	泥岩	5	30.1	2.54	2	2.00	1	11	40:0.5:1:1:3
	8	中砂岩	7.5	40.5	2.62	3	3.00	1	9	40:0.6:1:1:3
	9	粉细砂岩	10	35.7	2.60	4	2.00	2	6	40:0.53:1:1:3
	10	泥岩	5	26.5	2.51	2	2.00	1	2	40:0.46:1:1:3
	11	煤层	7.5	10.4	1.43	3	—	—	—	煤层模拟抽板
方案二	1	砂层	50	—	2.22	20	—	—	33	选用天然彩砂
	2	细砂岩	7.5	18.4	2.51	3	3.00	1	12	40:0.4:1:1:3
	3	中砂岩	2.5	36.7	2.53	1	1.00	1	9	40:0.54:1:1:3
	4	细砂岩	7.5	46.9	2.52	3	3.00	1	8	40:0.62:1:1:3
	5	泥岩	7.5	30.1	2.54	3	3.00	1	5	40:0.5:1:1:3
	6	粉细砂岩	2.5	35.7	2.60	1	1.00	1	2	40:0.53:1:1:3
	7	泥岩	2.5	26.5	2.51	1	1.00	1	1	40:0.46:1:1:3
	8	煤层	7.5	10.4	1.43	1	—	—	—	煤层模拟抽板
方案三	此方案与方案二相比唯一的区别在于方案三松散层底部赋存黏土层，模型底黏铺设厚度20~60 mm，模型结构见方案二									

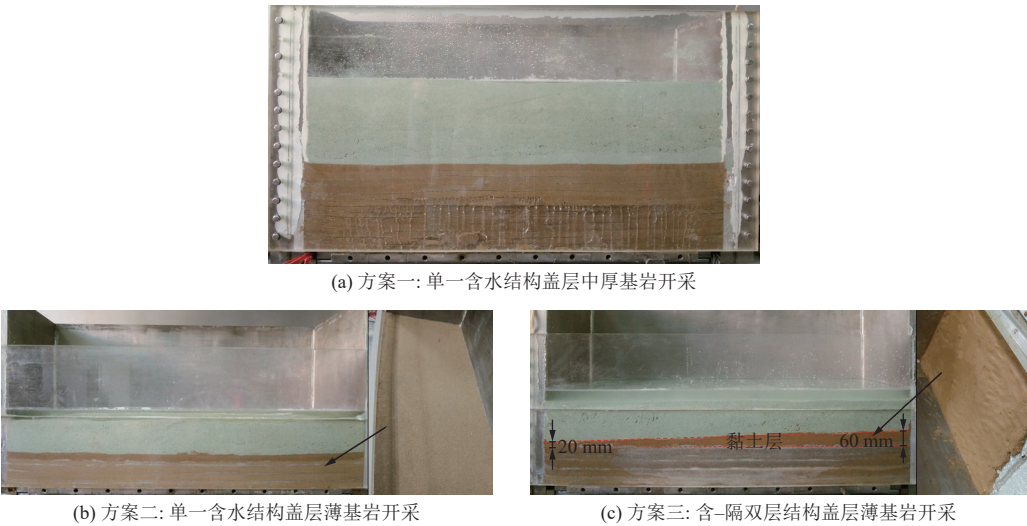


图 8 3 种相似模拟试验模型
Fig.8 Similarity model of No.1~3

原工作面煤壁上方的裂缝逐渐被压密闭合(图 9b)。

③ 虽然覆岩采动裂缝已沟通松散含水层底部,但由于裂缝开度小,且贯通路径曲折多变、裂缝宽窄不一的特点,导致通道整体通畅度差,砂体极易在通道狭窄或弯转处淤积、堵塞,井下出现淋水或涌水,但不会诱发突水溃砂灾害。

2)单一含水结构盖层薄基岩采动劣化及突水溃砂特征。① 采动裂缝在平面上呈“OX”分布,裂缝

表 3 模拟试验现象及结果
Table 3 Simulation test results

方案编号	采动覆岩劣化特征	是否发生突水溃砂	突水溃砂特征
方案一	采动断裂岩层之间可形成稳定的铰接结构,以拉张裂缝为主,在煤壁上方呈“倒楔形多层交错叠加组合裂缝”向上连通松散含水层,但随着推进裂缝出现闭合	否	淋水或涌水
方案二	岩层易沿断裂面发生剪切滑落失稳,不能形成稳定结构,以“拉剪垂向直通裂缝”沟通松散含水层,裂缝开度大,且通畅度好	是	突水溃砂量大,突涌速率快
方案三	底黏薄处岩层采动裂缝呈“垂直形拉剪裂缝”;底黏厚处采动裂缝呈“倒楔形多层交错叠加组合裂缝”	底黏薄处发生突水溃砂,底黏厚处未发生	底黏薄处出现突水溃砂,但溃砂逐渐停止;其他区域淋水或涌水,相对于方案二,突水溃砂速率小

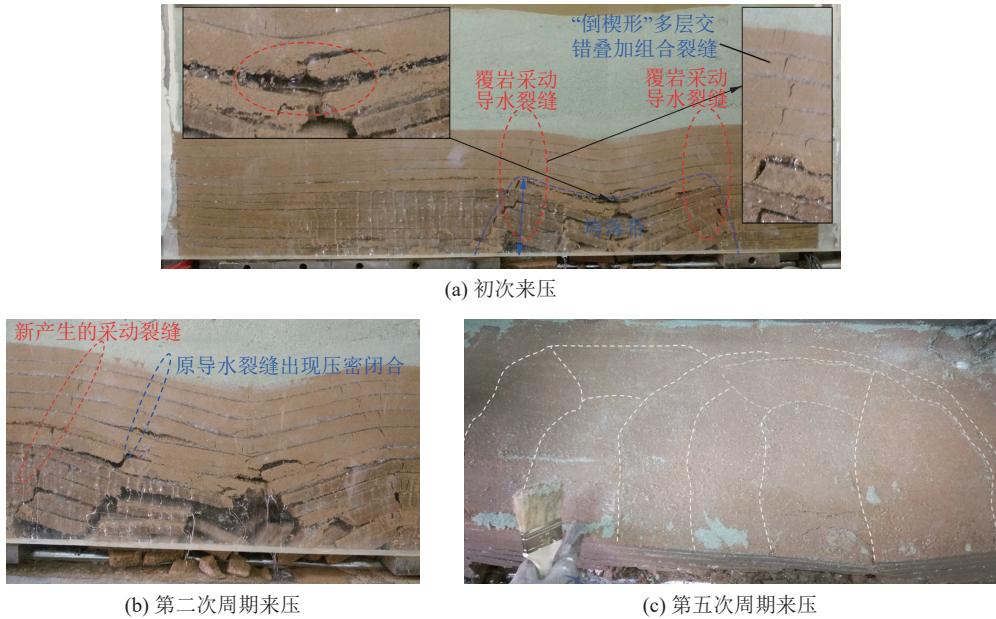


图 9 采动覆岩劣化特征(方案一)
Fig.9 Characteristics of overburden failure in Model 1

主要发育在岩层断裂挤压处和煤壁边缘位置(图 10)。由于基岩薄且受风化,岩体强度低、承载能力差,采动覆岩断裂后易沿煤壁上方断裂面发生剪切滑落失稳(不会形成稳定结构),“垂直拉剪直通形”裂缝沟通松散含水层后极易导致突水溃砂(图 11)。具体过程分析:在上覆地层重力、采动应力和渗透压力协同作用下岩层发生破断,煤壁上方断裂岩层沿断裂面发生挤压、剪切,在岩层发生剪切滑落失稳前,由于岩层挤压作用,形成上宽下窄的“倒三角形”裂缝,导致裂缝下端通畅度差,使得砂体堆积暂无法溃入井下(图 11a),此时采场顶板以涌水形式为主;但在上覆岩层重力、渗透压力及水流不断对岩体冲刷与软化作用下,挤压面处垂向荷载超过摩擦阻力时,岩层便沿挤压面发生滑动、切落(图 11b),此时裂缝转变为“垂向直通裂缝”,并与松散含水层沟通,由于裂缝开度明显增大,且通畅度变好,水砂极易沿通道溃入井下(图 11c)。② 通过试验现象可知,在此类地质条件

下开采,初次来压阶段覆岩采动破坏最为严重,是整个工作面开采过程中诱发突水溃砂灾害和压架事故的高风险期,且危害程度最大;灾害伴有动载大、来压猛烈、水砂涌溃量及速度大等特点。

3)含隔双层结构盖层薄基岩采动劣化及突水溃砂特征(图 12)。

① 上覆地层采动裂缝平面仍基本呈“OX”型分布特点;但从裂缝破坏形式可以看出,在厚黏土盖层处采动裂缝多以张拉破坏为主,呈“倒楔形交错叠加组合形”,在薄黏土层处采动裂缝多以拉剪破坏为主,呈“垂向直通型”。原因分析:底黏可以有效降低煤壁前方应力集中程度,且随着厚度增加应力集中程度越低,即底黏对煤壁上方上覆荷载有分散或水平传递作用,且厚度越大作用效果越明显。当底黏厚度较大时,分散或水平传递垂向载荷的能力强,有效降低了煤壁上方覆岩所受的垂向荷载,使其未超过断裂岩层挤压面处的摩擦阻力,从而仅出现张拉断裂,反之则会出现岩层整体切落现象。



图 10 采动覆岩裂缝空间分布

Fig.10 Spatial characteristics of mining overburden failure

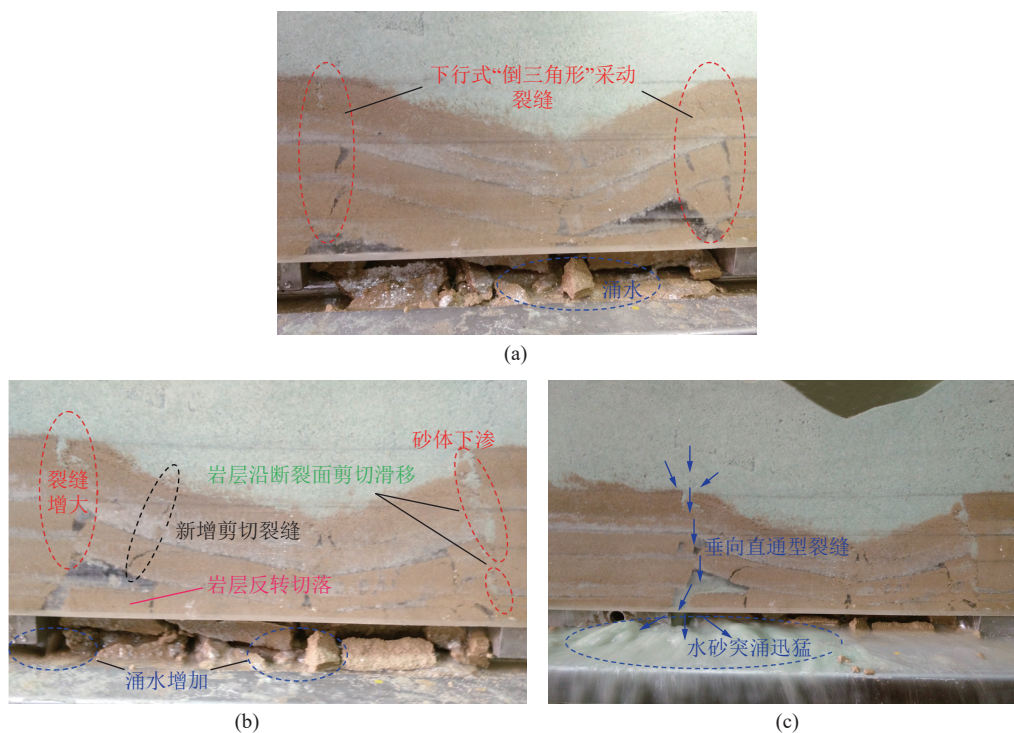


图 11 初次来压阶段突水溃砂通道形成及发生过程(方案二)

Fig.11 Formation of inrush channel and the occurrence of disaster during the first weighting in Model 2



图 12 覆岩采动劣化及突水溃砂特征(方案三)

Fig.12 Characteristics of mining overburden failure and water-sand inrush in Model 3

② 由试验结果发现,在黏土层最薄处虽发生了突水溃砂,但与方案二的区别在于,突水溃砂速率慢,并且随着砂体在排出口处不断堆积,溃砂逐渐终止,后期以渗水为主。原因分析:由于底黏的存在,使得裂缝开度要比方案二时要小,但仍可以导致突水溃砂,随着裂缝口处砂体堆积,砂体在裂缝内逐渐挤压堆积,裂缝度变差,导致水流速度降低、其携砂能力削

弱,直至裂缝通道底部被完全封堵,溃砂终止。

4 浅埋薄基岩采动突水溃砂致灾机理探讨

通过上述试验分析,不难发现,采动诱发突水溃砂除了须具备物源(水砂源)、通道、动力源和容纳空间四项必要条件之外,通道开度(宽度)与砂体粒径的相对关系(简称“裂粒比”)以及通道的通畅度是决

定突水溃砂发生与否以及致灾程度的关键。因此,笔者认为进一步量化探究通道开度(宽度)与砂体粒径的相对关系(简称“裂粒比”)以及通道通畅度对突水溃砂特征的影响机制,有利于深化采动突水溃砂机理研究,提升灾害防控能力。

5 结 论

1)通过对我国西北浅埋薄基岩开采矿区地层结构特征分析,构建出单一含水结构盖层和含-隔双层结构盖层的薄基岩工程地质概化模型。

2)研制了一种兼具耐水、抗崩解、抗软化、低渗透、低强度、低塑性特点的新型固流耦合相似材料,材料质量配比(干净河沙:石蜡:凡士林:液压油:碳酸钙)为40:(0.4~0.8):1:1:(1~3),其单轴抗压强度范围为50~200 kPa,渗透系数数量级为 10^{-6} cm/s,且渗透系数随碳酸钙含量的增加呈负指数衰减,单轴抗压强度呈现二次多项式增长的特点,为地下工程中低强度岩体的固流耦合相似材料提供了参考。

3)初次来压和第一次周期来压阶段是浅埋薄基岩采动覆岩劣化诱发突水溃砂的高发期,也是灾害重点防范阶段;在基岩薄、松散层无底黏情况下,采动诱发突水溃砂灾害风险高,且伴有动载大、来压猛烈、突水溃砂量及速度大等特点。

4)浅埋薄基岩采动裂缝平面上均呈“OX”分布,随基岩与松散层底部黏土层的厚度增加,覆岩由拉剪破坏逐渐转变为拉张破坏,煤壁上方采动裂缝形态也由“垂向直通形”转变为“倒楔形多层交错叠加组合”,裂缝开度减小,通畅度变差,可降低突水溃砂风险几率与危害程度。

参考文献(References):

- [1] 973计划(2013CB227900)“西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究”项目组.西部煤炭高强度开采下地质灾害防治理论与方法研究进展[J].煤炭学报,2017,42(2):267-275.
Research Group of National Key Basic Research Program of China CB(Basic Study on Geological Hazard Prevention and Environmental Protection in High Intensity Mining of Western Coal Area;China Universi). Theory and method research of geological disaster prevention on high-intensity coal exloitation in the west areas[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 267-275.
- [2] 隋旺华.基于结构水文地质学的采掘诱发高势能突水溃砂主动防控[J].工程地质学报,2022,30(1):101-109.
SUI Wanghua. Active prevention and control of water-sand mixture inrush with high potential energy due to mining based on structural hydrogeology[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1): 101-109.
- [3] 范立民,马雄德.浅埋煤层矿井突水溃沙灾害研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):8-12.
FAN Limin, MA Xiongde. Research progress of water inrush hazard in shallow buried coal seam mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 8-12.
- [4] 隋旺华,刘佳维,高炳伦,等.采掘诱发高势能溃砂灾变机理与防控研究与展望[J].煤炭学报,2019,44(8):2419-2426.
SUI Wanghua, LIU Jiawei, GAO Binglun, et al. A review on disaster mechanism of quicksand with a high potential energy due to mining and its prevention and control[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2419-2426.
- [5] 董书宁,姬亚东,王皓,等.鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J].煤炭学报,2020,45(7):2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [6] 隋旺华.矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控I:顶板溃水溃砂[J].地球科学与环境学报,2022,44(6):903-921.
SUI Wanghua. Catastrophic mechanism of seepage deformation and failure of mining rock mass and its prevention & control I: water-sand mixture inrush from seam roof[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 903-921.
- [7] 浦海,郭世儒,刘德俊,等.基于LBM-DEM耦合方法的突水溃砂运移规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(2):206-216.
PU Hai, GUO Shiru, LIU Dejun, et al. Study on laws of water inrush and sand burst migration based on LBM-DEM coupling method[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 206-216.
- [8] 梁艳坤,隋旺华,朱涛,等.哈拉沟煤矿垮落带破碎岩体溃砂的离散元数值模拟研究[J].煤炭学报,2017,42(2):470-476.
LIANG Yankun, SUI Wanghua, ZHU Tao, et al. Numerical simulation of quicksand through the broken rocks in caving zone due to coal mining based on DEM[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 470-476.
- [9] 钟江城,周宏伟,赵宇峰,等.浅埋煤层开采突水溃砂两相流的耦合数值研究[J].工程力学,2017,34(12):229-238.
ZHONG Jiangcheng, ZHOU Hongwei, ZHAO Yufeng, et al. The two-phase flow of water-sand inrush under shallow coal seam mining: a coupled numerical study[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 229-238.
- [10] 伍永平,卢明师.浅埋采场溃沙发生条件分析[J].矿山压力与顶板管理,2004,21(3):57-58,61-118.
WU Yongping, LU Mingshi. Analysis of sand inrush generation condition in coal mining of shallow coal seam[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(3): 57-58, 61-118.
- [11] 张玉军,康永华,刘秀娥.松软砂岩含水层下煤矿开采溃砂预测[J].煤炭学报,2006,31(4):429-432.
ZHANG Yujun, KANG Yonghua, LIU Xiue. Predicting on inrush of sand of mining under loosening sandstone aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 429-432.
- [12] 隋旺华.矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控III:防水闸墙围岩[J].煤炭科学技术,2023,51(7):36-43.
SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and

- control of seepage deformation and failure of mining rock mass III: a review of water retention bulkhead[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 36–43.
- [13] 李江华. 水压作用下防砂安全煤(岩)柱失稳突水溃砂机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- LI Jianghua. Study on the mechanism of water and sand burst caused by instability failure of sand prevention safety coal (rock) pillar under hydraulic pressure effect[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2017.
- [14] 梁燕, 谭周地, 李广杰. 弱胶结砂层突水、涌砂模拟试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1996, 16(1): 19–22.
- LIANG Yan, TAN Zhoudi, LI Guangjie. Simulation test research on water and soil outbursts of weak binding soil[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 1996, 16(1): 19–22.
- [15] 张敏江, 张丽萍, 姜秀萍, 等. 弱胶结砂层突涌机理及预测研究[J]. 金属矿山, 2002(10): 48–50.
- ZHANG Minjiang, ZHANG Liping, JIANG Xiuping, *et al.* Study on the intruding mechanism of weak cemented quicksand layer and its forecasting[J]. *Metal Mine*, 2002(10): 48–50.
- [16] 许延春, 马子民, 李小二, 等. 基岩风化带性质对顶板突水溃砂的影响研究—以赵固一矿为例[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 64–71.
- XU Yanchun, MA Zimin, LI Xiaor, *et al.* Research on the influence of the nature of the weathered bedrock zone on the roof water bursting and sand bursting: taking Zhaogu No. 1 Mine as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 64–71.
- [17] 许延春, 王伯生, 尤舜武. 近松散含水层溃砂机理及判据研究[J]. 西安科技大学学报, 2012, 32(1): 63–69.
- XU Yanchun, WANG Bosheng, YOU Shunwu. Mechanism and criteria of crushing sand near loosening sand stone aquifer[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2012, 32(1): 63–69.
- [18] 杨伟峰, 吉育兵, 赵国荣, 等. 厚松散层薄基岩采动诱发水砂流运移特征试验[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 686–692.
- YANG Weifeng, JI Yubing, ZHAO Guorong, *et al.* Experimental study on migration characteristics of mixed water and sand flows induced by mining under thin bedrock and thick unconsolidated formations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 686–692.
- [19] 隋旺华, 蔡光桃, 董青红. 近松散层采煤覆岩采动裂缝水砂突涌临界水力坡度试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2084–2091.
- SUI Wanhua, CAI Guangtao, DONG Qinghong. Experimental research on critical percolation gradient of quicksand across overburden fissures due to coal mining near unconsolidated soil layers[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(10): 2084–2091.
- [20] YAN W T, DAI H Y, CHEN J J. Surface crack and sand inrush disaster induced by high-strength mining: example from the Shendong coal field, China[J]. *Geosciences Journal*, 2018, 22(2): 347–357.
- [21] 王海龙, 陈绍杰, 郭惟嘉. 水砂突涌试验系统研制与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 72–79.
- WANG Hailong, CHEN Shaojie, GUO Weijia. Development and application of test system for water-sand inrush[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 72–79.
- [22] 张士川, 李杨杨, 李金平, 等. 采动裂隙突水溃砂过程物理参量变化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3548–3555.
- ZHANG Shichuan, LI Yangyang, LI Jinping, *et al.* Experimental studies on variation characteristics of physical parameters during water and sand burst through mining fractures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(10): 3548–3555.
- [23] 杨鑫, 徐曾和, 杨天鸿, 等. 西部典型矿区风积沙含水层突水溃砂的启动条件与运移特征[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 21–28, 35.
- YANG Xin, XU Zenghe, YANG Tianhong, *et al.* Incipience condition and migration characteristics of aeolian-sand aquifer in a typical western mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(1): 21–28, 35.