

富水砂层水砂溃涌灾变与溃涌灾害防治现状

范中鑫, 张 敏, 马 丛, 蔡文豪

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月9日; 发布日期: 2024年11月20日

摘 要

随着我国基础建设的不断增加和人类空间活动的扩大, 潜在工程问题不断凸显, 面临的各种地质灾害愈发复杂, 富水砂层水砂溃涌灾害就是其中最为严重灾害之一。在能源开采以及地下工程建设中, 往往会导致水砂混合体涌入工作面, 造成溃水溃砂事故。此类事故的发生, 严重影响工作生产的正常进行, 同时严重威胁工作人员和生产设备的安全。目前水砂溃涌的灾变机理和预报机制虽有研究, 但尚不能准确定量地预测灾害的类型和规模。水砂溃涌的预防和治理, 对于保护工人生命安全和生产安全具有重要的意义。本文讨论了目前水砂溃涌的一些理论和机制, 并给出一些可行的灾害预测、解决方案和对未来研究方向的展望, 以减轻水砂溃涌对社会和环境造成的不利影响。

关键词

水砂溃涌, 灾变机理, 预报机制, 研究方向

The Status of Water-Sand Inrush Disasters in Water-Rich Sand Layers and the Current Prevention and Control of Inrush Disasters

Zhongxin Fan, Min Zhang, Cong Ma, Wenhao Cai

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Oct. 15th, 2024; accepted: Nov. 9th, 2024; published: Nov. 20th, 2024

Abstract

With the continuous increase in infrastructure construction and the expansion of human spatial activities in China, potential engineering problems are increasingly prominent, and the geological disasters faced are becoming more and more complex. Water and sand inrush in water-bearing sandstone formations is one of the most serious disasters. In energy exploitation and underground

文章引用: 范中鑫, 张敏, 马丛, 蔡文豪. 富水砂层水砂溃涌灾变与溃涌灾害防治现状[J]. 土木工程, 2024, 13(11): 2047-2053. DOI: 10.12677/hjce.2024.1311222

engineering construction, it often leads to the inrush of water-sand mixtures into the working face, causing water and sand inrush accidents. The occurrence of such accidents seriously affects the normal production process and severely threatens the safety of workers and production equipment. Although the disaster mechanism and prediction mechanism of water and sand inrush have been studied, the type and scale of the disaster cannot be accurately and quantitatively predicted at present. The prevention and control of water and sand inrush is of great significance for protecting the lives and production safety of workers. This article discusses some theories and mechanisms of water and sand inrush, and provides some feasible disaster prediction, solutions, and prospects for future research directions, in order to mitigate the adverse impact of water and sand inrush on society and the environment.

Keywords

Water-Sand Inrush, Disaster Mechanism, Prediction Mechanism, Research Directions

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

1.1.1. 工程挑战与富水砂层特性

地下工程环境复杂、地层岩性复杂多变,各种地质灾害频繁发生,工程建设常因其延误甚至停工。如何安全高效开发地下空间是当今交通、资源、环境等领域无法规避的一大难题[1]。富水砂层作为一类特殊的双相介质,其特性对工程安全与稳定性具有决定性影响,其砂粒含量一般达 30%以上,具有孔隙比大[2]、含水量大、承载力小、胶结能力差和自稳性差等特点[3]-[5]。

1) 物质组成与结构特性

富水砂层的颗粒组成多样,包括不同粒径、形状以及磨圆度的砂粒,这些因素共同决定了其孔隙结构复杂性,使其具有较高的孔隙率和渗透性的特点。富水砂层因受地质构造、地理环境等因素的影响,不均匀的分布于全球各大板块[1]。

2) 水文地质特性

富水砂层的饱和度及渗透系数是衡量其储水和输水能力的关键指标。富水砂层地区地下水循环中,砂层由于其良好的透水性和储水能力,对地表水与地下水之间的交换起着调节作用并扮演重要角色,直接影响水体交换、补给及排泄。

3) 力学特性

富水砂层是由不同大小的粒径组成的,其结构可近似为单粒结构,相较于地层而言砂层的颗粒尺寸十分微小,其颗粒形状、尺寸及分布的离散性对地层整体性产生影响,所以富水砂层一般呈现出各向同性的力学特征。砂层中胶结力主要取决于黏性土,但是砂层的主要颗粒组成是 0.075 mm~2 mm 的砂粒,所以砂层整体结构松散胶结力较差,力学性质表现为粘聚力低,自稳性差。

1.1.2. 水砂溃涌灾害影响与研究价值

富含水的砂层在地下水的作用下往往具有很强的流动性,与黄土、粘土等土层相比,富水砂层中砂和水之间的相互影响更大,所产生的地质灾害危害更大[6]。例如 2003 上海地铁 4 号线越江隧道区内因水

沙涌入，引起隧道部分结构损坏及周边地区地面沉降，造成 3 栋建筑物严重倾斜，直接经济损失达 1.5 亿。2019 年，广州地铁 11 号线沙河站施工区域发生地面塌陷事故，塌陷最深处达 38m，该事故造成 3 人不幸遇难，直接经济损失约 2004.7 万元。2012 年隆德煤矿在进行钻探时遭遇了透水事故，透水导致流沙迅速涌入，导致煤矿大面积塌陷，此次事故导致井下设备被掩埋，直接经济损失高达十亿元(图 1)。



上海地铁四号线事故



广州地铁地面塌陷



隆德煤矿事故

Figure 1. Disaster scenes photos

图 1. 灾害现场照片

综上所述与普通自然灾害相比，富水砂层诱发的地质灾害通常具有破坏性和突然性的特点，在能源开采及地下空间工程中，容易诱发地表沉降、边坡失稳及地下水流失等严重的工程与环境问题，因此研究水砂溃涌灾害极具意义。

2. 水砂溃涌灾变机理与溃涌规律

2.1. 影响因素与临界条件

富水层水砂溃涌是一个受多种因素相互影响、复杂的非线性动态溃水溃砂的过程。已有研究表明富水砂层中含水层的初始水头、砂层的密实度及颗粒级配、覆岩天然地质结构、裂隙通道宽度、土层厚度、土颗粒黏聚力都是水砂溃涌的重要影响因素[7]-[9]。已有研究表明含水层的初始水头越大砂层的密实度越低，溃水溃砂发生的可能性与危害就越大。细颗粒的流失是溃砂的先决条件，当细颗粒流失到一定程度时，便为砂粒中较粗的颗粒创造了移动空间，随着砂粒的进一步流动，便造成了溃水溃砂灾害。砂层中所含细颗粒越多，其溃砂量越大这是一个从量变到质变的过程，在需要钻孔的地下工程中，对于同一粒径而言，钻孔直径越大其溃砂越严重，由此可见砂层的颗粒级配是溃砂发生的一个重要影响因素。富水砂层采掘诱发溃水溃砂从破坏机理方面可以分为 4 类，直接或间接揭露松散含水层溃水溃砂、导水裂隙带沟通松散含水层渗透破坏溃水溃砂、钻孔沟通松散含水层溃水溃砂、软弱覆岩遇水劣化并在水压和矿压联合作用下溃水溃砂[10]-[12]。室内模拟研究表明，在相同含水层承压水下，裂缝通道越窄时，孔隙水压增加得越快；在含水层承压力和通道尺寸不变时，裂缝通道愈光滑，相同时间内孔隙水压力提高愈快，水砂流移动速度越快，可能造成的溃水溃砂现象越强烈[13]。

2.2. 溃涌灾变机理及规律

水砂溃涌的发生一般需要同时具备以下四个条件，分别是：1) 物源，即存在水砂溃涌的水砂来源；2) 动力源，即含水层要有一定的水头压力；3) 通道，即能让水砂混合物涌入的通道；4) 空间，即存在能容纳水砂混合物的空间。水砂溃涌是指当地层形成涌水通道后，通道上方的砂体处于悬空状态[14]。当

砂体中水的快速流出时,在自身重力和水砂压力耦合作用下的砂土颗粒,会随着涌水首先喷出。当通道裂隙较小时,只会发生较小的水砂溃涌,在裂隙周围发生土拱现象。但是当通道宽度达到一定程度时,因没有稳定的土骨架支撑,水砂颗粒便会大量涌现喷出。伴随着时间推移,水流通道会慢慢变大,水砂流速也会逐渐加快,导致更多的砂土颗粒涌出,从而产生大规模的水砂溃涌灾害的发生。这一过程对周围环境会造成极大影响,严重威胁人们的生命安全和财产安全。砂是突水溃砂灾害发生的基础物质。研究发现,含水层的富水性越强、厚度越大、水力坡度越大,就越容易导致水沙突涌的发生。当通道宽度相同时,颗粒粒径越小,溃沙量越大。随着通道宽度增加,粒径与溃沙量呈正比关系。

3. 富水砂层水砂溃涌灾害防治技术与策略研究进展

3.1. 预防性措施与设计优化

预防水砂溃涌,地下水的处理是一个重要的问题。处理地下水时,我们首先需要控制地下水位的升降,降低地下水的动水压力,以减少砂涌的可能性。其次,在砂性土层上设置防渗层,阻止地下水的上渗,在砂性土层中设置排水管,加快地下水的排放,降低土体的含水率。最后,在砂性土层周围设置围堰,防止泥浆的外溢,减少对周边环境的影响。

在能源开采和工程建设中,预防钻孔时产生溃涌的主导思想是“采掘工程设计前,排查钻孔,并封堵”。物探探查结果如果不富水,则直接通过钻孔,不需再作处理,若富水,则采取井下注浆的防治方法,封堵富水区。针对坑底流砂或突涌的情况,预防对策是加快垫层浇筑使其压住流砂,并快速降低其降水井水位[15]-[17]。对于坑底涌水冒砂,局部涌水量小可采用注浆止水或浇筑混凝土配筋垫层进行反压,同时降低承压水头。此外,我们还可以通过植树造林、退耕还林、建立生态屏障等方法来预防水砂溃涌灾害。这些方法可以增加植被覆盖率,改善土壤结构,提高土壤的抗风蚀能力,从而有效地防止水砂溃涌灾害的发生。

3.2. 地层改良技术的应用

富水砂层常见的地层加固方法有冻结法、注浆法、降水法等。冻结法是利用人工制冷技术,使地层中的水结冰,把天然岩土变成冻土,增加其强度和稳定性,从而改善富水砂层地层性能。冻结法的适应性强,几乎不受地层条件的限制,但是它施工周期较长且成本大,在后期存在地层加固不稳定的问题。注浆法是一种地层加固方法,通过向地层注入具有胶结能力的浆液,使其凝固后提高地层的力学性能,起到抗渗加固的作用。这种方法具有施工成本低、效率高、扰动小等优点,因此被广泛应用[18]。然而,在富水砂层中使用注浆法时,会遇到加固效果参差不齐的问题。这是因为富水砂层中的浆液往往无法完成远距离扩散,导致部分浆液颗粒滞留在砂颗粒之间的孔隙中,这种现象被称为渗滤。随着注浆过程的推进,砂土孔隙被逐渐填充,注浆压力逐渐增大,加固效果逐渐降低。因此,需要研究出更高效、环保、节能、经济的富水砂层加固方法[19]。降水法是一种通过降低地下水位来改善地层性能的方法。尽管可以提升地层的力学性能,但其加固效果有限且自稳能力较差。此外,使用降水法容易引发地表开裂、道路塌陷等次生灾害。

3.3. 研究现状

水沙溃涌灾害严重威胁各项工程安全,因此水沙溃涌的监测预报及预警显得尤为重要。针对水沙溃涌灾害的预防,我们必须详细了解所在区域的最新水文地质及工程地质资料,及时对疑似溃水溃砂区域进行重点研究,进行临界水力坡度、孔隙水压等方面的计算,并及时采取预防措施。试验研究是水砂溃涌灾害研究的主要方法,隋旺华等得出在近松散含水层下采掘时,孔隙水压可作为突水溃砂的预警信

息；隋旺华、董青红等提出了初始水压值和溃砂口的开度是工作面溃砂量的主控因素，重点对孔隙水压在水砂混合流运移过程中的变化情况进行了研究，弄清了变化规律[20]。高炳伦和杨伟峰等人利用自制的实验设备，研究了在未施加砂层地应力的情况下，水压和通道倾角对突水涌砂启动条件的影响，以及在溃涌过程中裂缝通道中孔压的变化特征[21]。Leung 和 Meguid 通过室内模型实验，研究了衬砌管片出现空洞后的土压力分布情况。他们发现，在拱腰位置出现侵蚀空洞后，随着砂体的流失，空洞下方的衬砌土压力会增加，而空洞上方的土压力则会减小[22]。刘亚群采用颗粒流数值软件 PFC2D 进行了相关数值模拟研究，提出裂隙的倾角和粗糙度是水砂混合物流出速度和时间的影响因素[23]。张蓓等[24]依据突水口模型，建立了钻孔导致突水溃沙流量、孔径、流速和含水砂层厚度的关系，可较好预测突水溃沙流量。

针对不良地质区工程中难以预测防治的水砂突涌灾害特征，我们可以考虑地质因素、水文气候因素、工程因素选取相关影响因子，选取合适的定量指标，建立相关模型，用数值分析模拟的方法预警溃水溃砂灾害。目前的预测方法主要针对矿井突水，武强院士等人提出了“脆弱性指数法”和“三图-双预测法”等方法[25]。靳德武等人开发了一种基于光纤光栅通信和传感技术的突水监测预警系统[26]，将 GIS 与多标准决策分析(MCDA)结合的定量突水溃砂评价决策，能够考虑多种因素以及灾害的随机性和突发性进行决策和预报。在煤矿开采活动中，我们可以通过并行电法、钻探验证、覆岩破坏高度实测等方法，实时监测煤层覆岩的破坏动态，并结合采动裂隙场与水文地质条件，实现富水砂层的实时监测预报[27]。

3.4. 水砂溃涌灾害治理措施

水砂溃涌灾害是地下工程中常见的一种灾害形式，一旦发生可能对工程造成严重影响。为了有效应对水砂溃涌灾害，需要采取应急处置技术并配备相应的材料与设备。应急处置技术主要包括疏散群众、快速堵漏、封堵管道、抢险排水和建立临时围堰等措施。疏散群众是指当发生水砂溃涌灾害时，我们要及时疏散人民群众，本着生命第一的原则，保证人民群众的生命安全。快速堵漏是指利用快凝水泥、聚氨酯泡沫等材料迅速堵住水砂涌入口，阻止灾害扩大。封堵管道则是利用管道封堵器、阀门等设备封堵受影响的管道，防止水砂继续涌入地下工程。此外，抢险排水是指利用抢险泵车、排水泵等设备将地下工程内的水迅速排除，减少水砂压力[27]。在应急处置过程中，还需要建立临时围堰，使用沙袋、土石等材料构筑临时围堰，控制水砂涌入范围，避免扩大灾害范围，减少群众的财产损失。

4. 水砂溃涌灾害防治前沿与未来发展

目前，对水砂溃涌灾害机理的研究虽然取得了一定进展，但尚不能准确定量地预测灾害的类型和规模，也不能提供快速有效的治理措施。同时，由地质钻孔引起的突水溃砂灾害及治理虽然已有相关报道，但其发生机理和防治措施的研究亦尚不到位。当下 MICP 技术和 AI 技术在水砂溃涌中具有较大潜力，同时这两项技术存在着许多难点与挑战。

微生物诱导碳酸化(MICP)技术是一种可持续发展的土体加固方法，在富水砂层治理中展现出巨大潜力。相对于传统的注浆法，MICP 技术具有诸多优势，如加固范围广泛、环保经济、施工扰动小[28]等。通过 MICP 技术不仅可以改善土体的物理性能，还能显著提高岩土体的强度、刚度、渗透性、抗液化性和耐久性[29]。然而，尽管 MICP 技术具有许多优点，但由于受限于当前的理论水平和研究手段，其高效固化仍然存在一定挑战，成为大规模现场应用的瓶颈。未来，MICP 技术的发展需要重点解决矿化均匀性、反应物经济性、微生物持久活性、菌体环境适应性问题，以实现更广泛、更有效的应用[30]。

AI 是当下很热门的话题，我们可以利用 AI 算法对大量的水文地质数据进行分析，从而更准确地预测水砂溃涌的可能性和发生规律。通过机器学习模型，可以建立水砂溃涌的预测模型，帮助提前预警和

采取相应的防范措施。AI 技术可以综合考虑多种因素,如沙层厚度、基采比、岩石风化指数等,构建溃水溃沙危险性评价指标体系,提高评价的准确性和可靠性。我们可以将 AI 技术与传感器和监测设备相结合,实现对水沙溃涌过程的实时监测和分析。基于 AI 技术的预测模型和监测数据,可以建立水沙溃涌的预警系统,提高预警的准确性和时效性,为防灾减灾提供有力支持。

5. 结论

迄今为止,关于不同地质情况下富水砂层中的水砂溃涌问题,已经进行了大量的研究。各种新理论和新技术被广泛采用,包括数值模拟计算、室内模拟试验、风险性分析等方法。当下溃砂启动条件和判据的建立大部分还是基于传统的临界水力坡度的概念。已有的研究成果包括溃砂伪结构物理力学模型、砂层单颗粒临界启动流速、临界水平变形指标、基于液化流动的溃砂的临界判据、水砂混合物裂隙流失稳及溃砂启动条件等[31]-[33]。

传统的研究方法通常使用定性和半定量的确定性手段,以及概化和局部的工程模式来研究高势能溃砂灾变。然而,随着信息技术和大数据网络的发展,人们开始关注如何利用宏观和高度仿真的模型,结合工程诱发和灾变过程以及结果的不确定性,来拓展高势能溃砂灾变研究的深度、广度和多样性,形成一个综合的防灾减灾体系。这意味着未来的研究不再仅仅局限于简单的定性分析,而是更加关注如何全面地理解和应对溃砂灾变的复杂性,以建立更为全面和可靠的防灾减灾策略。今后我们可以利用先进的信息技术和大数据网络,通过构建更为宏观和高度仿真的模型,来揭示溃砂灾变的复杂过程。通过结合工程实践和科学研究,我们可以更好地理解溃砂灾变的机制和规律,从而为防灾减灾提供更为可靠和全面的科学依据。

参考文献

- [1] 谢鲍. 富水砂层水泥浆液渗透注浆扩散规律及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- [2] 余本辉. 含黏富水砂层水砂溃涌灾变规律试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2023.
- [3] 张连震. 地铁穿越砂层注浆扩散与加固机理及工程应用[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [4] Zhao, X. and Yang, X. (2019) Experimental Study on Water Inflow Characteristics of Tunnel in the Fault Fracture Zone. *Arabian Journal of Geosciences*, **12**, Article No. 399. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4561-3>
- [5] Li, L., Tu, W., Shi, S., Chen, J. and Zhang, Y. (2016) Mechanism of Water Inrush in Tunnel Construction in Karst Area. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **7**, 35-46. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1181342>
- [6] 刘洋. 浅埋开采工作面水沙溃涌灾害预测及防治对策[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(6): 775-781.
- [7] 钱自卫, 隋旺华, 官云章. 深部巷道顶板抽冒诱发典型高势能突水溃砂灾害机理及治理[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 915-924.
- [8] 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.
- [9] 杨斌, 杨天鸿, 徐曾和, 等. 中国西部矿区厚松散层的溃沙临界流速与水沙流动特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(11): 1648-1652, 1657.
- [10] 董书宁, 柳昭星, 王皓. 厚基岩采场弱胶结岩层动力溃砂机制研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 274-285.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 梁艳坤, 隋旺华. 地下松散层内疏放水钻孔溃砂量模拟试验[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 14-18.
- [14] 龚雨. 水力耦合下水砂溃涌特性及防治试验[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西京学院, 2021.
- [15] 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.

- [16] Yang, W., Jin, L. and Zhang, X. (2019) Simulation Test on Mixed Water and Sand Inrush Disaster Induced by Mining under the Thin Bedrock. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **57**, 1-6.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.11.007>
- [17] 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.
- [18] Mark, V. and Hester Patrick, T. (2013) An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research*, **10**, 56-66.
- [19] 杨磊, 宓祥云, 李召峰, 等. 适用于致密碎粉岩富水地层的高强丙烯酸盐注浆材料研发及渗透加固特性研究[J/OL]. 岩土工程学报: 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.tu.20240925.1110.010.html>, 2024-10-09.
- [20] 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.
- [21] 高炳伦. 采动裂隙水砂混合物运移规律模拟研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [22] Leung, C. and Meguid, M.A. (2011) An Experimental Study of the Effect of Local Contact Loss on the Earth Pressure Distribution on Existing Tunnel Linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **26**, 139-145.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.08.003>
- [23] 刘亚群, 周宏伟, 李翼虎, 等. 浅埋煤层开采突水溃砂的颗粒流模拟研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(5): 534-540.
- [24] 张蓓, 张桂民, 张凯, 等. 钻孔导致突水溃沙事故机理及防治对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 219-226.
- [25] 武强, 黄晓玲, 董东林, 等. 评价煤层顶板涌(突)水条件的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 60-65.
- [26] 靳德武, 刘英锋, 冯宏, 等. 煤层底板突水监测预警系统的开发及应用[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(11): 14-17.
- [27] 范立民, 冀瑞君. 西部高强度采煤矿井灾害新灾种-突水溃沙[J]. 地质评论, 2015(61): 13-15.
- [28] 王双娇, 李志清, 田怡帆, 等. 微生物岩土工程技术的过去、现在与未来[J]. 工程地质学报, 2024, 32(1): 236-264.
- [29] Wang, X.M., Cui, R. and Wang, C. (2020) Experimental Study on Mudstone Reinforcement by Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation Cementation. *Science Technology and Engineering*, **20**, 10372-10378.
- [30] Zamani, A. and Montoya, B.M. (2018) Undrained Monotonic Shear Response of MICP-Treated Silty Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **144**, Article ID: 04018029.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001861](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001861)
- [31] 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.
- [32] 郭惟嘉, 王海龙, 陈绍杰, 等. 采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1415-1422.
- [33] 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.