

顶板突水溃砂渗透破坏研究现状综述

宁明诚, 鲁海峰

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2022年5月24日; 录用日期: 2022年6月27日; 发布日期: 2022年7月5日

摘要

突水溃砂是指井下开采矿产资源时, 裂隙或小断层导通富水, 且因风化等原因失去抗剪性的砂体的原有平衡被打破, 在重力作用下, 水砂流加速流入井下, 直至淹井, 水砂重新达到平衡稳定状态的一种地质灾害。对于顶板突水溃砂, 科学工作者已经做了比较多的研究, 有关其发生机理, 人们也通过数值模拟, 物理模拟, 理论研究等方法提出了诸多符合实际的理论假说; 煤矿顶板突水溃砂事故会对生产安全构成极大的威胁, 我国煤矿事故中有相当大一部分都是突水溃砂引起的。因此, 加深对于顶板突水溃砂的发生机理的理解对于灾害防治有重要意义。本文简要总结了顶板突水溃砂的相关基本情况。

关键词

突水溃砂, 平衡, 发生机理, 防治

Review on Research Status of Seepage Damage of Roof Water Inrush and Sand Break

Mingcheng Ning, Haifeng Lu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 24th, 2022; accepted: Jun. 27th, 2022; published: Jul. 5th, 2022

Abstract

Water inrush sand collapse refers to the underground exploitation of mineral resources, the fissure or small fault to lead to water-rich, and due to weathering and other reasons to lose the original balance of the sand body to lose shear, resistance is broken, under the action of gravity, the water sand flow accelerates into the well, until the well is flooded, the water sand again reaches a

stable state of balance and stability. For roof water inrush sand burst, scientists have done a lot of research, about its mechanism, people also through numerical simulation, physical simulation, theoretical research and other methods put forward a lot of theoretical hypotheses in line with reality. Coal mine water inrush and sand collapse will pose a great threat to production safety. A considerable part of China's coal mine accidents are caused by water inrush and sand collapse. Therefore, thoroughly understanding the occurrence mechanism of water inrush sand on the roof plate is of great significance for disaster prevention and control. In this paper, we briefly summarize the related situation of roof water inrush and sand burst.

Keywords

Water Inrush and Sand, Balance, Mechanism of Occurrence, Prevention and Cure

Copyright © 2022 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

2021年,我国全年煤炭消费总量约占能源消费总量的56.0%,在我国能源消费比重中持续下降,但是仍然超过半数。所以,煤矿的安全生产对于国家能源结构稳定起到极其关键的作用。在众多煤矿安全事故类型中,水害事故发生次数位居第二,仅少于瓦斯事故。水害事故自身具有突发性强,隐蔽性高等特点,极难预防,且其发生机理复杂多样,受到多种因素影响。新中国成立以来,我国煤炭行业发生了多次损失惨重的水害事故。水害事故中顶板突水溃砂渗透破坏事故占有相当大的比重,突水事故的分布广,发生频次高;突水水源、通道形式、突水部位和方式多样化,造成的后果危害严重。所以,对于顶板突水溃砂渗透破坏应加大关注力度。针对此问题,我国已经有诸多学者进行了理论和试验研究。下面简要介绍关于顶板突水溃砂渗透破坏的理论发展、研究现状和防治办法。

2. 我国顶板突水破坏理论发展

2.1. 顶板抽冒理论[1]

“抽冒”理论指在回采过程中,由于断层影响,煤层局部倾角变大成为急倾斜煤层,在压力作用下采动区上边界上方的煤柱破坏、片帮落入采空区,冒落带和裂隙带超过了采掘上边界而发展到煤柱以内,并且持续朝上发展,如果上部已经回采,上部原采空区就会重新扰动,形成上部抽冒[2]。

抽冒一般特征是先掉细末碎渣,随后抽冒逐渐发展,规模也由小到大,直到形成冒落拱。当有较宽、倾角较大的断层破碎带切割顶板时,由于煤层开采的扰动,使断层活化,沿断层破碎带也会发生抽冒,若断层破碎带与矿体走向垂直,并且直接顶板较薄,则断层破碎带抽冒会导致顶板折断抽冒,此外,当抽冒高度发展到一定程度,含水层的水将和断层破碎带混合在一起,形成泥状流体溃入矿井,最终可能导致淹井和伤亡事故的发生(图1)。

2.2. “上三带”理论[4]

“上三带”理论为刘天泉院士就煤层开采后覆岩运动和破坏特征提出,是我国研究顶板突水机理的重要依据。

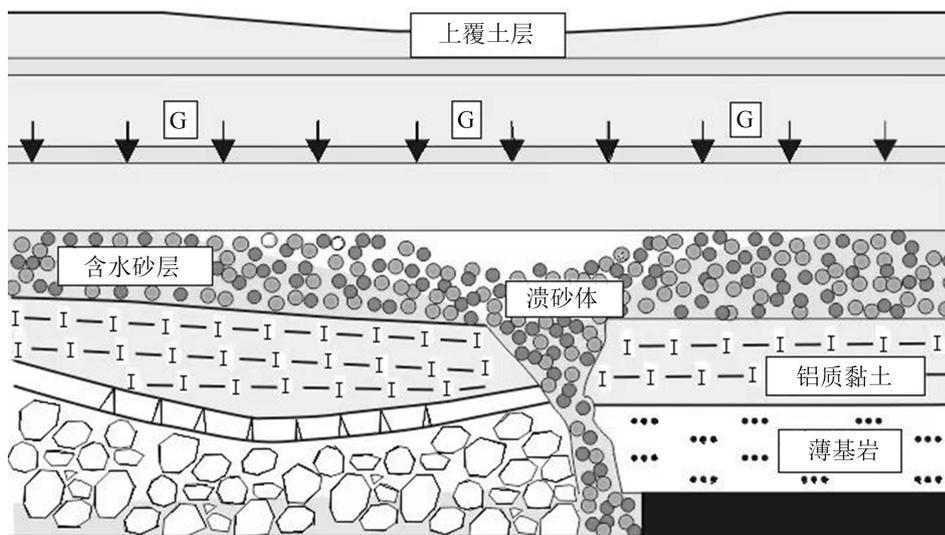


Figure 1. Schematic diagram of top plate extraction [3]
图 1. 顶板抽冒示意图[3]

在煤炭开挖过程中, 煤层会出现采空区, 由于缺少了下方岩石的支撑, 上覆岩层原始受力状态随即改变, 顶板岩层会发生移动、变形甚至破坏和垮落。顶板岩层变形会随开采面积的扩大而发展, 直至发展到地表, 最终上覆岩层内部产生破坏, 在地表形成下沉盆地和塌陷坑、裂隙等现象。如果顶板上覆岩体垮落后产生的裂隙, 直到顶板上方含水层甚至地表, 含水层水或地表水就可能通过裂隙进入井下。在采空区上方, 按覆岩采动破坏程度, 从开采煤层的顶板由下而上大致分为三个不同的破坏影响带: 冒落带、裂隙带和整体弯曲下沉带。

冒落带

冒落带指煤层顶板在采煤工作面放顶后逐层垮落, 直到垮落岩石接触上覆岩层的垮落范围。顶板垮落的特征与冒落带高度的大小取决于煤层采厚、回采方法、采空区面积、覆岩岩性及煤层倾角大小。

裂隙带

顶板岩石自由垮落后, 冒落带上方岩层继续下沉弯曲, 当其弯曲超过本身强度就会产生张裂隙, 以至断裂。断裂过程由下向上逐层发展, 直到上覆岩层整体下沉弯曲, 这部分称为裂隙带。

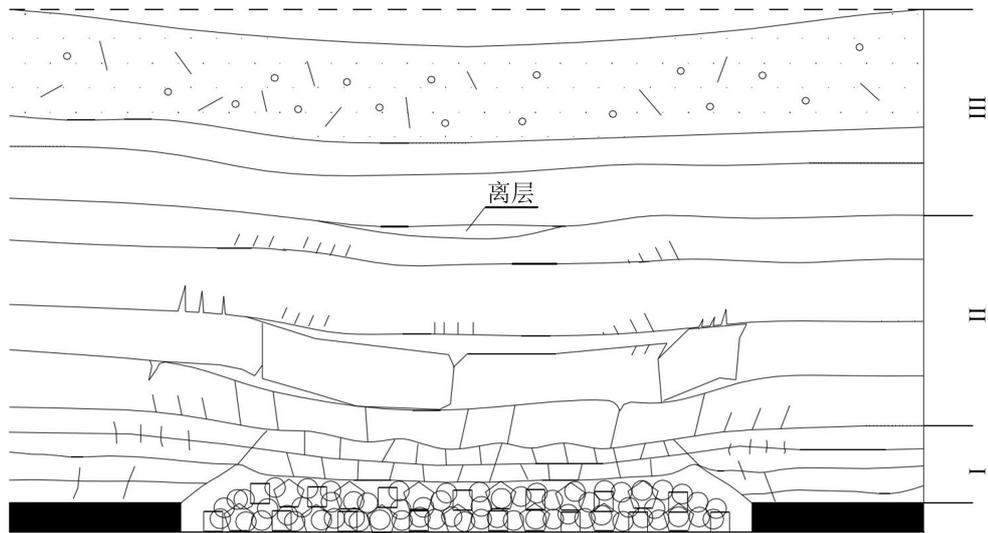
弯曲带

此带位于裂隙带上方直到地表的整个覆岩。岩层弯曲平缓, 断裂小, 有时产生离层, 拉伸部位可能有局部微小张裂隙, 但裂隙连通性很弱或不连通, 局部渗透性可能增大。冒落带和裂隙带通常合称为冒裂带, 防水煤岩柱尺寸主要由其发育规律和最大高度决定。煤层倾角不同时, “三带”(尤其是冒落带、裂隙带)形态有所不同。这是由于随着煤层倾角的增大, 在倾斜方向上产生冒落岩块的向下滚动加剧, 采空区下部易被充填, 从而限制了冒落带、裂隙带下边缘的向上发展(图 2)。

2.3. 岩移“四带”理论[6] [7] [8] [9]

高延法教授在“三带”理论基础上, 将上覆岩层划分为破裂带、离层带、弯曲带和松散冲积层带, 从而提出了岩移“四带”理论。最下部两侧为煤柱及顶板岩层, 中部为冒落矸石及断裂岩块。这些岩层丧失了结构连续性, 只对上部岩层起支撑作用, 称为破裂带。破裂带之上, 各岩层分层叠合, 层面间为滑动接触, 垂向各层间结构非连续, 各层结构连续, 独立弯曲变形, 称为离层带。离层带之上, 各岩层层面为原有弹性接触, 保持原有力学结构性质, 以整体形式弯曲下沉, 称为弯曲带。最上部是松散冲积

层, 其力学性质和结构特征独特, 称为松散冲积带。近年来通过实验研究发现, 覆岩在动态移动过程中的一定时期内, 存在着可用于注浆的离层带, 介于导水裂隙带和整体弯曲带间(图 3)。



I-冒落带; II-裂隙带; III-弯曲带。

Figure 2. Upper three-band model diagram [5]

图 2. 上三带模型图[5]

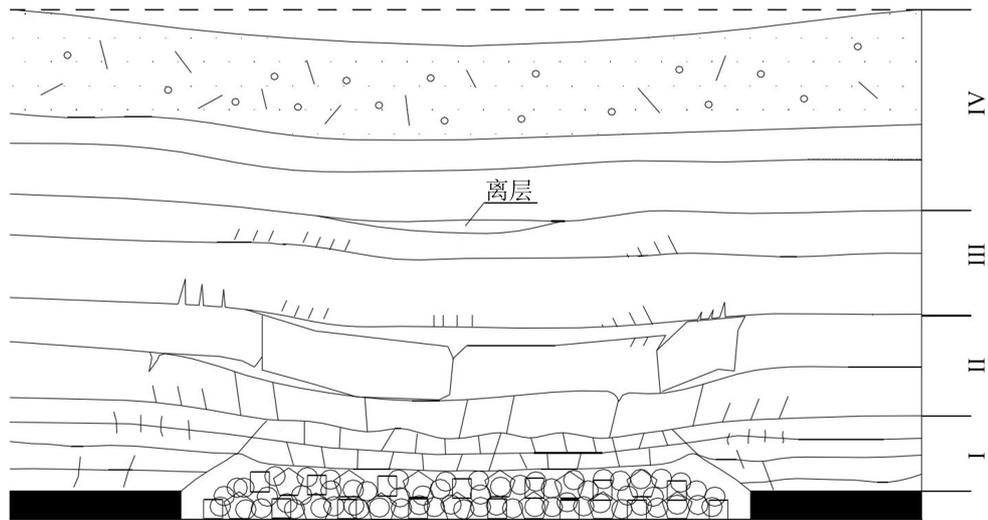


Figure 3. Model diagram of the four-zone rock movement [5]

图 3. 岩移四带模型图[5]

3. 顶板突水溃砂渗透破坏发生机理

顶板突水是指地下坑道内来自开采层顶板以上的含水层的突水, 溃砂是指近松散层开采时含砂量较高的水砂混合物溃入井下工作面, 造成人员伤亡, 财产损失的地质灾害。顶板突水溃砂的本质是顶板处砂石在水流作用下发生位移, 主要由薄基岩、浅埋深、富水性好的厚松散覆盖层决定。其发生机理受到采区工程地质条件、水文地质条件、水体赋存条件、顶板岩层结构、基岩上覆松散层含水状态、竖向贯通裂隙等方面的影响[10] [11] [12]。矿区进行开采作业时, 会影响到顶板隔水层的完整性和透水性, 主要

体现在上覆岩层的破坏和和地表土的破坏。关于顶板突水溃砂渗透破坏, 研究人员也结合实践做了大量具体的工作。一般顶板突水溃砂渗透破坏需要从含水层特性、顶板岩体特性和原岩与采动应力场等方面分析。

含水层特性:

含水层特性包括岩体导水性能、储水性能和压力水头。前两者直接影响压力水能否穿透上覆岩层进行补给。储水性和导水性越好, 越容易发生严重的突水溃砂事故, 反之则不易发生大规模的突水溃砂破坏。

顶板岩体特性:

顶板岩体特性包括岩体厚度、强度和渗透性等, 岩体强度反映了岩石抵抗变形能力的大小, 岩体强度过低, 即使水压很小, 也会发生开裂; 岩体厚度和渗透性对顶板突水溃砂起直接影响作用。当渗透性低时, 顶板岩层即为隔水层, 能够对顶板水起到很好的隔绝作用; 当渗透性较大时, 岩层的导水性好, 易发生突水溃砂事故。

原岩与采动应力场:

顶板突水溃砂受到岩体原始应力场和采动应力场的影响。煤层未开采时, 岩体孔隙处于闭合状态。当煤体被开采后, 顶板围岩由三向受力变为双向或单向受力, 可能会使岩石发生破坏, 进而提高其渗透性。

4. 顶板突水溃砂渗透破坏研究进展

4.1. 顶板突水溃砂渗透破坏物理模拟研究

张后全[13]为了揭示顶板突水过程, 利用渗流与应力耦合分析系统, 对煤层顶板突水过程进行模拟, 得到了煤层顶板变形、破坏过程以及突水前后渗流场变化情况。杨彩[14]通过建立模型, 利用不同的含水层介质模拟矿井顶板突水, 可用于判定含水层的水量大小。陈红江[15]针对三山岛海下金矿, 通过建立相关力学模型, 较全面的掌握水下开采过程中采场顶板裂隙渗流诱发突水溃砂的机理。李锋[16]基于锦界煤矿 31406 综采工作面进行相似模拟试验, 揭示薄基岩、厚松散岩层在高强度开采条件下突水溃砂和顶板切落并发灾害机理, 并获取了顶板破断时能量的聚集与耗散特征以及裂隙的发育特征。隋旺华[17]通过建立模型得到抽冒或形成水砂突涌后, 含水层内孔隙水压力剧烈下降并形成瞬时负压, 突砂口附近呈现相应的水力坡降。伍永平[18]通过建立相应力学模型, 分析突水溃砂发生时泥沙颗粒受力情况; 并给出溃砂发生条件的表达式。刘洋[19] [20]根据浅埋煤层不同基岩厚度面临的突水溃砂灾害威胁程度不同, 通过相似模拟将浅埋煤层开采后的覆岩发育形态分为横“两区”、竖“两带”, 并提出了“导水沙拱”力学模型和导水沙裂缝带的概念; 许延春[21]基于赵固一矿对所取基岩岩样进行一系列试验, 通过分析岩样各项试验指标随深度的变化曲线, 确定了基岩性质及其对留设防砂煤柱的影响。杨伟峰[22]以山东太平煤矿为例, 总结了薄基岩厚松散层下开采水砂流涌出通道形成的三类工程地质模式; 制作了水砂混合流运移及突涌试验模型, 以模拟采矿覆岩体裂隙通道中水砂混合流在运移与突出过程中的启动、运移和稳定的全过程。刘玉[23]为得到水沙混合物裂隙渗流系统的失稳条件, 通过控制不同粒径、不同质量浓度的水沙混合物和径向裂隙岩样进行实验。蔡光桃[24]对松散层进行模拟, 得出采区上覆垮落带和裂缝带之上的松散层发生渗透破坏的类型和机理, 得出发生渗透时裂隙尺寸与临界水力坡度之间的关系。

4.2. 顶板突水溃砂渗透破坏数值模拟研究

浦海[25]建立了含断层与无断层的围岩变形破坏的力学模型, 通过模拟分析了带压开采中围岩及断层的应力、塑性区分布规律, 及孔隙水压分布特征。揭示了含断层构造顶板突水通道的形成机制。冯现大

[26]用 FLAC 软件对层理面进行数值模拟, 开展流-固耦合模拟研究, 模拟了矿井突水中顶板离层破坏和突水全过程, 解决了矿井突水模型试验中顶板离层破坏问题。吴雪峰[27]运用 PFC^{2D} 模拟了顶板突水微观机理。结果显示, 顶板裂隙逐步发展、扩大至含水层是引起煤层顶板突水事故发生的原因, 随着细小砂粒流失, 渗流力逐渐增大。从而引起大面积顶板突水溃砂渗透破坏。高俊[28]以顾桥矿南二采区 11-2 煤层为例, 利用 FLAC^{3D} 模拟顶板砂岩裂隙水渗流场规律。得出了煤层开采过程中, 若煤层顶板在煤矿开采初期没有发生突水现象, 则在随后的开采中, 开切眼一侧发生突水的可能性很小, 迎头位置危险性较大的结论。

4.3. 其他方面研究

张杰[12]根据浅埋煤层开采的工程、水文地质条件, 指出突水溃砂的必要条件为: 静水压力、富水砂层、薄基岩, 采动空间等。范立民[29]基于大柳塔煤矿实施了突水溃砂的防治工作[30], 并提出了“保水采煤”的观点[31] [32] [33]。张坤[34]以神东矿区为例, 对垮落带和断裂带高度经验公式进行修正, 解决了厚松散沙层下富水顶板采煤突水溃砂问题, 得出适用于本矿区的“两带”高度公式。并引入了导水沙裂缝带概念, 得出适合本区的导水沙裂缝带高度公式。任胜文[35]利用 ArcGIS 得出顶板含水层富水性评价和冒裂安全性分区结果, 获得了突水溃砂危险性分区。结论表明: 遇水易松散的粗粒砂岩受动水、静水压力共同作用, 形成砂粒。砂粒随水流大量运移而引发突水溃砂。水砂源、动力源、通道、流动空间等要素的相互作用是突水溃砂发生的内在机理。彭涛[36]以照金煤矿为例, 揭示了较厚上覆基岩煤层开采顶板突水溃砂灾的机理。得出了多种因素作用引起较厚上覆基岩煤层开采顶板突水溃砂, 最终造成水砂混合流运移和突溃的结论。吴璋[37]基于神府矿区分析浅埋煤层开采过程中涌水溃砂灾害的主要成因, 得出其主控因素为富水砂层中的水力坡度。张蓓[38]基于隆德煤矿突水溃砂事故, 根据颗粒流和液体流理论探讨了该事故的形成机理, 得出了含水层厚度以及钻孔直径能够显著顶板突水溃砂流量的结论。

5. 顶板突水溃砂渗透破坏危害及防治措施

顶板突水溃砂在矿业生产过程中危害极大, 全国范围内因顶板突水溃砂而产生了一系列的重大事故, 如: 柴达尔煤矿“8·14”顶板溃砂溃泥重大事故, 致使 20 人死亡, 直接经济损失超 5000 万元; 陕西榆林“7·15”较大水害事故, 致使 5 人死亡, 直接经济损失超 1000 万元。引发社会广泛关注。陕西铜川照金煤矿“4·25”突水溃砂事故造成 11 人死亡。黑龙江振兴煤矿“3·11”重大水害事故导致 18 人死亡, 直接经济损失超 2000 万元。海孜煤矿“5·21”溃水事故造成 5 人死亡, 直接经济损失约 200 万元。从以上事故可以看出突水溃砂事故对煤矿安全产生的严重危害。2021 年度全国范围内煤矿重大安全事故均为水害事故, 共造成 48 人死亡, 死亡人数为各类型煤矿事故中最多。且事故救援难度大, 周期长, 一旦发生就会产生相当严重的后果, 有时甚至会直接造成矿区报废。

在突水溃砂的防治方面, 在工程实践中为防止突水溃砂渗透破坏事故发生已经形成了一系列的防治措施: 如疏干降压、帷幕截流、带压开采、注浆堵水、突水预测和探放水等, 坚持“防、堵、疏、排、截”综合治理。在工作面回采之前, 首先要收集工作面的地质资料, 了解岩体的岩性, 富水性和岩体内部裂隙发育程度[39], 利用 GIS 预测工作面正常突水量的大小, 而精准预报的前提是充分了解采场区的工程地质和水文地质条件; 其次可以采用注浆加固的方法提高岩体强度, 并且阻断水源渗流路径, 在具体的工程实践中要做到合理开采, 在众多此类事故中, 有相当一部分事故是由于违规开采造成的。如果能做到合理开采, 则会杜绝此类事故的一大源头; 在生产过程中对顶板进行必要的加固也是非常重要的。此外企业要避免安全管理上存在漏洞, 持续加大员工安全教育力度, 时刻牢记安全第一, 并通过培训提高员工处理应急情况的能力。

6. 结论

近年来, 人们对于顶板突水溃砂问题的关注度逐步提升, 相关问题的研究也取得了一些进展。突水溃砂的发生机理受到多种因素的影响而复杂多变, 传统的力学模型对于解决此类问题存在着自身的局限性, 因而突水溃砂的整个发生过程并不能被很好地模拟。在灾害防治方面, 首先要充分了解采场的基本地质情况, 掌握采场的顶板岩性, 富水性以及裂隙的贯通度, 分析顶板突水溃砂问题出现的可能性, 并提前做好防范工作。此外, 在生产过程中, 企业要严格落实安全生产条例, 尽力降低事故发生概率。本文概述了近年来我国煤矿顶板突水溃砂破坏的研究进展与方向, 为他人的相关研究提供了一定思路和便利。

参考文献

- [1] 张雁. 防止煤层顶板水溃入矿井的预警系统研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
- [2] 刘子龙. 急倾斜特厚煤层伪斜斜切小段落小条带采煤方法研究[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2005, 4(1): 29-32.
- [3] 李笔文. 典型矿井薄基岩下开采抽冒溃砂特征与动态演化规律[D]. 中国矿业大学, 2021.
- [4] 刘天泉. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.
- [5] 夏小刚. 采动岩层与地表移动的“四带”模型研究[D]. 西安科技大学, 2012.
- [6] 高延法. 岩移“四带”模型与动态位移反分析[J]. 煤炭学报, 1996(1): 51-56.
- [7] 钱鸣高, 茅献彪, 缪协兴. 采场覆岩中关键层上载荷的变化规律[J]. 煤炭学报, 1998(2): 25-29.
- [8] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996(3): 2-7.
- [9] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.
- [10] 李建文. 薄基岩浅埋煤层开采突水溃砂致灾机理及防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [11] 刘志耀, 高运, 王田逢, 刘洋, 贾后省. 溃水溃砂发生机理及控制方法研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(6): 146-148.
- [12] 张杰, 侯忠杰. 浅埋煤层开采中的溃沙灾害研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(3): 15-18.
- [13] 张后全, 杨天鸿, 赵德深, 李连崇, 唐春安. 采场工作面顶板突水的渗流场分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 17-20.
- [14] 杨彩, 刘盛东, 胡泽安. 基于地电场响应的矿井顶板突水模拟实验[J]. 物探与化探, 2012, 36(2): 220-223.
- [15] 陈红江, 李夕兵, 刘爱华, 等. 水下开采顶板突水相似物理模型试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(6): 854-859.
- [16] 李锋, 杨胜利, 李政岱, 杨文强, 杨敬虎, 陈肖龙. 薄基岩顶板工作面突水溃砂及切顶灾害试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 125-133.
- [17] 隋旺华, 董青红. 近松散层开采孔隙水压力变化及其对水砂突涌的前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1908-1916.
- [18] 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.
- [19] 刘洋. 突水溃沙通道分区及发育高度研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(1): 72-77.
- [20] 刘洋. 浅埋煤层工作面顶板溃水机理及防控体系研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(4): 225-228.
- [21] 许延春, 马子民, 李小二, 苗葳, 张二蒙, 姜文浩, 卓运亮, 田雨果. 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/OL]. 煤炭科学技术. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1268>, 2022-06-29.
- [22] 杨伟峰. 薄基岩采动破断及其诱发水砂混合流运移特性研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [23] 刘玉, 李顺才, 马立强, 周楠. 水沙混合物非 Darcy 裂隙渗流试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2296-2303.
- [24] 蔡光桃, 隋旺华. 采煤冒裂带上覆松散土层渗透变形的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 66-69.
- [25] 浦海, 张柬. 断层影响下顶板突水特性的数值模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 421-424.
- [26] 冯现大, 李树忱, 李术才, 李利平. 矿井突水模型试验顶板离层破断数值模拟研究[J]. 湖南科技大学学报(自然

- 科学版), 2011, 26(2): 47-53.
- [27] 吴雪峰. 含砂层开采顶板突水溃砂机理的细观数值模拟研究[J]. 陕西煤炭, 2017, 36(1): 65-68.
- [28] 高俊, 宋马可. 煤层顶板砂岩裂隙水渗流场数值模拟研究[J]. 地下水, 2016, 38(4): 42-45.
- [29] 范立民. 神木矿区的主要环境地质问题[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(6): 37-40.
- [30] 范立民. 神府矿区矿井溃砂灾害防治技术研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(4): 35-38.
- [31] 范立民. 论保水采煤问题[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 50-53.
- [32] 王双明, 黄庆享, 范立民, 杨泽元, 申涛. 生态脆弱矿区含(隔)水层特征及保水开采分区研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 7-14.
- [33] 范立民, 马雄德, 冀瑞君. 西部生态脆弱矿区保水采煤研究与实践进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1711-1717.
- [34] 张坤. 厚松散沙层下富水顶板采煤突水溃砂危险性分区[J]. 煤矿安全, 2018, 49(5): 191-193+197.
- [35] 任胜文. 大采深煤层弱胶结厚层砾岩突水溃砂灾害研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 249-255.
- [36] 彭涛, 冯西会, 龙良良, 等. 厚覆基岩下煤层开采突水溃砂机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(7): 260-264.
- [37] 吴璋, 王晓东, 李建文, 李雄伟. 神府矿区浅埋薄基岩煤层顶板涌水溃砂防控技术[J]. 煤矿安全, 2016, 47(11): 150-154.
- [38] 张蓓, 张桂民, 张凯, 陈彦龙, 张光辉. 钻孔导致突水溃砂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.
- [39] 汪晓静, 解礼科, 张建. 浅埋煤层顶板突水溃砂防治工程及开采安全性研究[J]. 煤矿现代化, 2015(4): 74-76.