

## 青年博士学术论坛



移动扫码阅读

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.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.07.035

PENG Tao, FENG Xihui, LONG Liangliang, et al. Study on mechanism of water inrush and sand inrush in mining of coal seam with thick overlying bedrock[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 260-264. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.07.035

## 厚覆基岩下煤层开采突水溃砂机理研究

彭涛<sup>1,2</sup>,冯西会<sup>3</sup>,龙良良<sup>1</sup>,王英<sup>1</sup>,牛超<sup>1,2</sup>,刘英锋<sup>4</sup>

(1.西安科技大学地质与环境学院,陕西西安 710054;2.西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院,陕西西安 710054;  
3.国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室,陕西西安 710021;4.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西西安 710077)

**摘要:**为了揭示较厚上覆基岩煤层开采顶板突水溃砂灾害的形成机理,以照金煤矿突水溃砂事故为例,结合最新补勘地质资料,从导水通道、充水水源、物源、储水空间、动力源和地质构造等多方面对该类型灾害机制进行综合分析。研究表明:在采动条件影响下,富水性弱~中等的洛河组含水层也可能发生破坏极大的水害事故;较厚上覆基岩煤层开采顶板突水溃砂的发生并非单一因素造成,而是由多个因素相互作用最终造成水砂混合流运移和突溃的现象;照金矿 202 工作面综放开采产生的导水裂隙带导通洛河组含水层,水进入宜君组与直罗组之间的离层空腔,随着积水量增加,渗入煤层含水层和古河床相松散体中形成似泥石流流体,并会沿工作面切落形成的集中通道瞬间溃入工作面,导致煤层顶板上覆较厚基岩发生突水溃砂。

**关键词:**突水溃砂;导水裂隙带;较厚基岩;形成机理

中图分类号:TD745 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2019)07-0260-05

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

PENG Tao<sup>1,2</sup>, FENG Xihui<sup>3</sup>, LONG Liangliang<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, NIU Chao<sup>1,2</sup>, LIU Yingfeng<sup>4</sup>

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710021, China; 4. Xi'an Research Institute China Coal Technology Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** To reveal the formation mechanism of water inrush and sand inrush disasters from the roof when mining coal seams with thick overlying bedrock, this paper takes the intrusion accident of water and sand in Zhaojin Coal Mine as an example. Combined with the latest supplementary geological data, a comprehensive analysis was conducted on the mechanism of this disaster from many aspects such as channel, water source, source, water storage space, power source and geological structure. The results show that under the influence of mining conditions, the Luohe Formation aquifers with weak and medium water-rich may also suffer from great water accidents. The intrusion of water and sand from the roof when mining the coal seam with thick overlying bedrock is not caused by a single factor. In fact, it is caused by the interaction of multiple factors, which ultimately leads to movement and collapse of the mixed water and sand flowing. The water flowing fractured zone generated during the fully mechanized caving mining of the No.202 longwall face causes the aquifer water of Luohe Formation to enter the separated cavity between Yijun Formation and Zhiluo Formation. As the amount of accumulated water increases, the water in the separated cavity penetrates into the coal measures aquifer and the ancient riverbed phase loose body to form a mud-like fluid. The mud-like fluid instantaneously breaks into the longwall surface along the concentrated channel generated by cutting the longwall face. This leads to the invasion of water and sand in the coal seam roof with a thick bedrock.

**Key words:** water inrush and sand inrush; fractured water-conducting zone; thick bedrock; formation mechanism

收稿日期:2019-04-22;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41807192);陕西省教育厅 2018 年度专项科学研究计划资助项目(18JK0518)

作者简介:彭涛(1988—),男,河南固始人,讲师,博士。E-mail:512022882@qq.com

## 0 引言

突水溃砂(沙)常是我国西部矿区近松散层煤层或浅埋薄基岩含水层下煤层开采时较为常见和典型的水害事故,前人对该类型突水溃砂灾害机理和防治技术的研究都取得了颇为丰硕的成果:李东等<sup>[1]</sup>分析指出鄂尔多斯盆地最具典型的水害类型分别为离层水害、薄基岩突水溃沙灾害和巨厚砂砾岩含水层顶板水害;范立民等<sup>[2]</sup>从突水溃砂的机理、预测和防治等多方面对浅埋煤层矿井突水溃沙灾害进行了综合研究;文献[3-4]采用相关设备进行突水溃沙试验,得到了影响突水溃沙的临界速度条件和裂缝通道涌水量的变化规律;隋旺华等<sup>[5-6]</sup>分析了矿山水文地质结构及其采动响应,并指出上覆松散含水层的水头压力与溃砂通道宽度是建立描述突水溃砂机理的关键;文献[7-8]通过相似模拟实验开展了突水溃砂研究,揭示了突水溃砂导水通道分布特征和渗流作用下隔水土层的破坏失稳规律;李江华等<sup>[9]</sup>利用数值模拟得出了薄基岩工作面开采覆岩的载荷传递参数和覆岩破坏特征;文献[10-12]依据冒落带、导水裂缝带发育高度确定了工作面开采防砂安全煤岩柱高度;杜锋等<sup>[13]</sup>根据两相流相关理论,提出了破碎岩体水沙两相渗流主要渗透特性参量;文献[14-15]从注浆材料方面分析了井壁和工作面突水溃砂的防治技术。然而,同为覆岩采动的响应,对于较厚上覆基岩煤层开采顶板

突水溃砂的研究报道相对较少<sup>[16]</sup>,有待于进一步深入分析和探讨。

2016年4月25日,陕西省铜川市耀州区照金矿业有限公司(以下简称照金煤矿)发生造成人员死亡的重大突水溃砂事故。突水溃砂在照金煤矿所属的旬耀矿区极为罕见,一般认为,在松散含水砂层较厚、土层薄、基岩薄的区域易于形成天然溃砂通道<sup>[18]</sup>,但是该区主采的4<sup>-2</sup>号煤层上覆基岩平均厚度在300 m以上,因此该次事故发生的突发性、地质与水文地质条件的隐蔽性都很强,而厚覆基岩煤层开采顶板突水溃砂灾害的形成机理尚缺乏深入地研究。笔者以事故现场资料为基础,结合最新补勘地质资料,从突水溃砂的通道、水源、物源、储水空间、动力源和构造等多方面对灾害机制进行综合分析,研究成果可为该类型突水溃砂防治技术提供参考依据。

## 1 矿井概况

照金煤矿位于黄陇煤田旬耀矿区的南缘,井田面积为10.775 1 km<sup>2</sup>,生产规模为90万t/a,开采4<sup>-2</sup>号煤层。全井田划分为2个采区,东部的一采区已基本回采完毕,未来主要开采区段为西部的二采区。突水溃砂事故点为二采区202工作面回采至1145 m处,事故发生后井田矿权范围进行了变更,取消了原设计的203工作面;并对二采区开展了地质补充勘探工作,累计施工地面钻孔11个,其中地质孔4个、水文孔6个、“两带”探测孔1个(图1)。

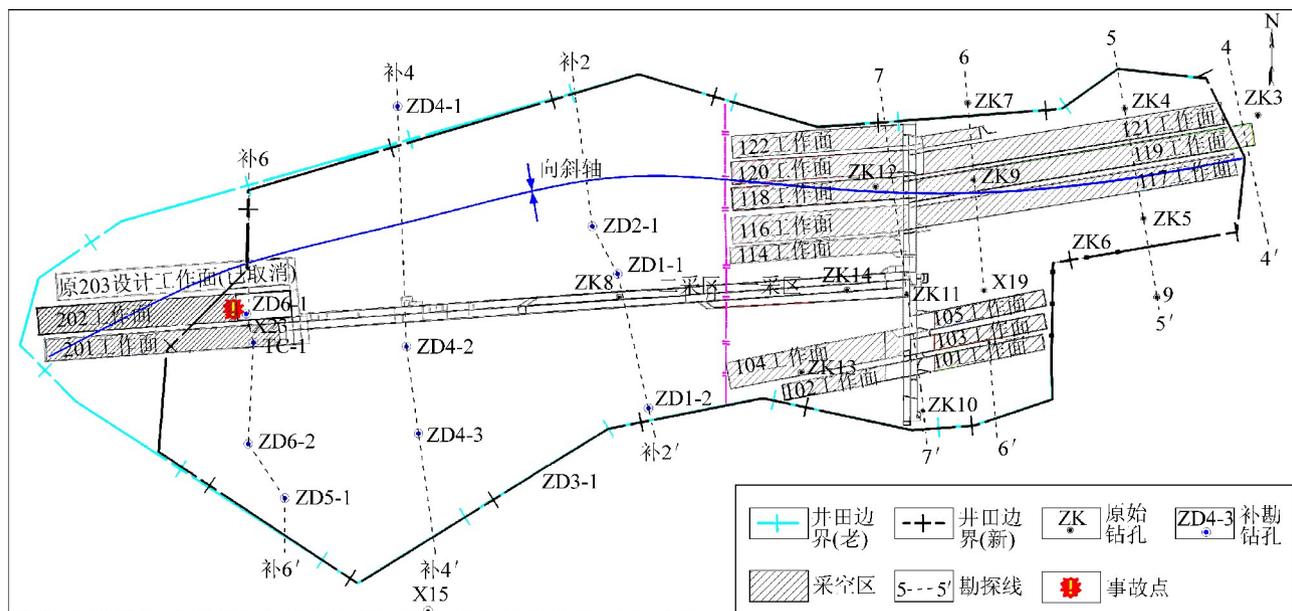


图1 照金煤矿采掘分布及补勘工程布置

Fig.1 Mining distribution and reconstruction project layout of Zhaojin Coal Mine

井田煤系地层内主要含水层包括:第四系(Q)

松散层孔隙裂隙含水层、下白垩统洛河组(K<sub>1</sub>)砂

岩裂隙含水层、中侏罗统直罗组( $J_2z$ )砂岩裂隙含水层、中侏罗统延安组( $J_2y$ )砂岩及 $4^{-2}$ 煤层裂隙含水层、上三叠统胡家村组( $T_3h$ )砂岩裂隙含水层。地面水文孔资料显示煤层顶板各主要充水含水层整体富水性均为简单,洛河组含水层局部为中等(图2)。

导水裂隙带最大高度230 m	第四系松散层空隙裂隙含水层(Q)	0.20~44.97 m (弱)
	白垩系下统洛河组砂岩裂隙含水层(K <sub>1</sub> l)	0~522 m / 277 m (弱~中等)
	白垩系下统宜君组砾岩相对隔水层(K <sub>1</sub> y)	0~38.24 m (隔)
	侏罗系中统直罗组砂岩裂隙含水层( $J_2z$ )	11~127.12 m (弱)
	侏罗系中统延安组砂岩及4-2煤层裂隙含水层( $J_2y$ )	1.70~82.27 m (弱)
	4-2煤	
	侏罗系下统富县组相对隔水层( $J_1r$ )	0~55.90 m (隔)
三叠系上统胡家村组砂岩裂隙含水层( $T_3h$ )	厚度不详 (中等)	

图2 井田含/隔水层空间组合关系

Fig.2 Aquifer & aquifuge space combination relationship of mine field

## 2 突水溃砂形成条件

### 2.1 通道

井下事故现场观察发现,202工作面煤壁与支架之间顶板为空洞,部分被泥沙充填,溃砂通道位于煤壁与支架之间。显然,本次事故是在矿压、水压、泥砂体重力的共同作用下,煤层顶板上覆岩层沿煤壁发生切落形成集中突水溃砂通道,而其最根本和最原始的通道就是煤层开采形成的覆岩采动裂隙。

### 2.2 水源

顶板水是本次突水溃砂的主要水源,事故总突水量达21 000 m<sup>3</sup>。为了具体确定水源含水层,笔者依据事故点附近的老钻孔(X23)和最新补勘钻孔(ZD6-1)煤厚数据,利用相关规程中的计算公式<sup>[17]</sup>得出导水裂隙带最大高度为143.9 m。而补勘工程在201工作面上方布设了TC-1“两带”探查钻孔,实测结果裂采比约为15.9,按照该比例进行计算得出导水裂隙带发育最大高度为230 m。显然,依据煤层顶板各含水层的厚度(图2),202工作面煤层开采时顶板破坏带应波及至洛河组含水层。导水裂隙带高度未沟通潜在含水层,因为事故发生后20 d,202工作面已基本无淋水,说明本次事故突水量有限;且在202工作面地面沟谷现场勘察,没有发现地表裂缝、塌陷等迹象,沟谷小溪中仍有小股流水。鉴于事故点附近无采空区积水,因此,突水水源只可能

来源于洛河组及以下含水层,且主要来源于直罗组和宜君组之间的离层水。

井下事故发生后,2016年4月26日进风口水样分析结果显示总矿化度为3 749.51 mg/L,水化学类型 $Cl^-Na^+$ ;回风口水样分析结果显示总矿化度为1 935.38 mg/L,水化学类型 $Cl^- \cdot SO_4^{2-}(HCO_3^-)Na^+$ ;4月29日突水水样分析结果显示总矿化度为10 307.40 mg/L,水化学类型 $Cl^-Na^+$ 。对比井田各含水层水质特征,从本次事故水质演变过程来看,水源更接近于洛河组、延安组和直罗组的混合水,而非单一水源(图3)。

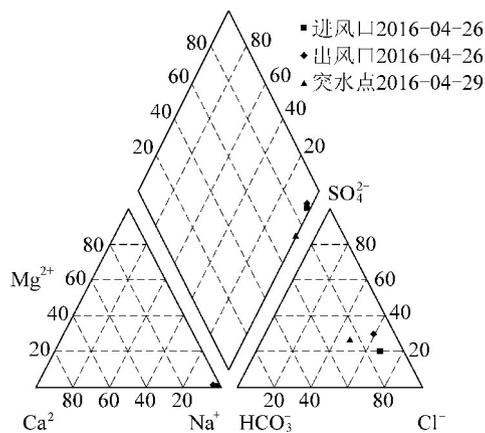


图3 两阶段水质Piper三线图

Fig.3 Piper three-line diagram of two-stage water quality

### 2.3 物源

井下观察显示,事故点淤积物中有混杂堆积的泥、沙及岩块、煤块,块体大小不一,颜色以灰白色、深褐色为主;块状物质主要为次棱角状,且含有大量磨圆度较好的球状、似球状砾石,成分以泥岩和砂质泥岩为主,胶结松散,分选差,轻碰易碎,其中泥沙含量约占溃出物50%~60%(图4)。



图4 井下溃出物

Fig.4 Underground intrusion matter

$4^{-2}$ 煤层直接顶为平均厚度7.7 m的花斑泥岩、泥质胶结的粉砂岩,在无水状态下质脆、较硬,而遇水后就会松软泥化。此外,补勘结果显示二采区延安组上部地层缺失,无煤层基本顶(俗称“小街砂岩”);特别是二采区直罗组下部普遍发育有1层破碎泥岩段,该段平均厚度17.13 m,岩石质量指标(RQD)为0,遇水后很快崩解,极不稳定。因此, $4^{-2}$

煤层直接顶和直罗组下部的破碎泥岩是本次突水溃砂的主要物源之一。

区域地质资料显示,本区直罗组与宜君组之间存在平行不整合界面,由于两者之间的沉积间断,直罗组顶部经历了长时间风化,形成厚度较大的风化带,风化带物质为砂岩、泥岩、粉砂岩、页岩等河湖相沙泥混合物,这也对应了事故点淤积物岩块的特征。根据以上分析结果,导水裂隙带高度发育至洛河组,因此直罗组顶部岩性松散、风化破碎、以砂岩和泥岩为主的、具有一定厚度的地质松散体也为本次事故提供了物源。本次事故溃出物绝大部分为煤层顶板侏罗系延安组和直罗组岩石遇水形成的似泥石流流体。

## 2.4 储水空间

事故点附近无采空区,因此不存在采空区积水空间。钻孔资料显示,宜君组砾岩层平均厚度为22.5 m,岩性为灰紫色,砾石成份由灰岩、石英岩、燧石和砂岩块等组成,基底式钙质胶结,致密、坚硬,该层段为区内相对隔水层;其下部为直罗组上部较软的砂岩、泥岩等互层,这种“上硬下软”的结构是形成离层储水空腔的基本条件;加之直罗组顶部存在古河床松散体,受采动裂隙的影响,该地段离层空腔增大,可形成良好的储水空间。

垮落带破碎岩体在一定程度上可以抑制上部水体、溃砂体的运移<sup>[18]</sup>,但是在综放条件下,照金煤矿开采4<sup>-2</sup>煤产生的垮落带已发育至直罗组底部,且直罗组底部为破碎泥岩,垮落带内部会发育优势溃砂通道,也为上覆水体和泥砂体提供了良好空间。

## 2.5 动力源

井田4<sup>-2</sup>煤层平均厚度7.2 m,采用放顶煤开采工艺。因此,在综放条件下开采4<sup>-2</sup>煤产生的导水裂隙带沟通了洛河组砂岩下段含水层地下水,由于洛河组含水层厚度大,水势能较高,携砂(泥)能力较强的流动水体进入宜君组与直罗组之间的离层空腔,与直罗组和延安组等承压含水层水共同为突水溃砂提供了水动力条件。现场资料还显示,202工作面因周期来压,推进迟缓,顶板压力增大,顶板沿工作面煤壁发生切落形成集中通道,水及似泥石流流体瞬间溃入工作面。因此,除了水压以外,矿山压力和泥石体自重应力也是造成突水溃砂的主要动力条件。

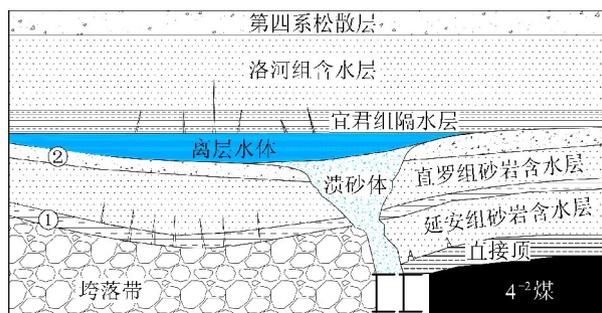
## 2.6 构造

照金煤矿总体为宽缓的轴向近东西的向斜构造,本次事故恰好就处于向斜构造带上(图1)。由于向斜转折端附近,应力作用导致节理裂隙发育,具

有更多的储水空间,煤层开采时引起的采动破坏效应可能会增加,生产中在201和202工作面均揭露了较多的节理或小规模断层。且处于向斜构造带上的201工作面和118工作面此前均发生过突水事故。因此,向斜构造也对突水溃砂事故起到了一定的影响作用。

## 3 突水溃砂机理分析

综合以上多种突水溃砂形成条件的分析,对事故机理进行了综合判定(图5)。



①—直罗组上部风化带; ②—直罗组下部破碎泥岩  
图5 事故直接原因剖面示意

Fig.5 Generalized section of accident direct cause

1) 在综放条件下,开采4<sup>-2</sup>煤产生的垮落带已发育至直罗组底部,而导水裂隙带也沟通至洛河组砂岩下段含水层,因此延安组、直罗组和洛河组含水层均是矿井的直接充水水源。且由于洛河组含水层富水性不均一,局部存在异常富水区段,当水量较大的洛河组含水层水在进入宜君组与直罗组之间的离层空腔后,与直罗组和延安组含水层水共同为突水溃砂提供了水动力条件。

2) 202工作面上方直罗组上部存在古河床相松散体,下部存在破碎泥岩,加之工作面位于向斜构造轴部,应力集中,顶板岩层破碎,这些松散、破碎物质受水侵蚀后,经过一段时间的软化和泥化作用,形成似泥石流流体。

3) 202工作面因周期来压,推进迟缓,顶板压力增大,顶板沿工作面煤壁发生切落形成集中通道,导致水及似泥石流流体瞬间溃入工作面。

## 4 结论

1) 在采动条件影响下,富水性弱~中等的洛河组含水层也可能发生破坏极大的水害事故。

2) 厚覆基岩煤层开采顶板突水溃砂的产生并非单一因素造成,而是受导水通道、充水水源、物源、储水空间、矿山动力和地质构造等多方面的相互影响,最终造成水、砂混合流运移和突溃的现象。

3) 照金矿 202 工作面综放开采产生的导水裂隙带导通洛河组含水层水进入宜君组与直罗组之间的离层空腔,随着积水量增加,渗入煤系含水层和古河床相松散体中形成似泥石流流体,沿工作面切落形成的集中通道瞬间溃入工作面,导致煤层顶板上覆较厚基岩发生突水溃砂。

#### 参考文献 (References) :

- [1] 李东,刘生优,张光德,等.鄂尔多斯盆地北部典型顶板水害特征及其防治技术[J].煤炭学报,2017,42(12):3249-3254.  
LI Dong, LIU Shengyou, ZHANG Guangde, et al. Typical roof water disasters and its prevention & control technology in the north of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3249-3254.
- [2] 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,2017,44(1):8-12.  
FAN Limin, MA Xiongede. Research progress of water inrush hazard in shallow buried coal seam mine [J]. Coal Science and Technology, 2017, 44(1): 8-12.
- [3] 杨鑫,徐曾和,杨天鸿.西部典型矿区风积沙含水层突水溃沙的起动条件与运移特征[J].岩土力学,2017,39(1):21-28,35.  
YANG Xin, XU Zenghe, YANG Tianhong. Incipience condition and migration characteristics of aeolian-sandaquifer in a typical western mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 39(1): 21-28, 35.
- [4] 李江华,许延春,董检平,等.风化泥岩裂缝涌水及扩展规律模拟试验研究[J].煤炭学报,2016,41(4):984-991.  
LI Jianghua, XU Yanchun, DONG Jianping, et al. Experimental research on water burst and extension law of weathered mudstone crack [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(4): 984-991.
- [5] 隋旺华,王丹丹,孙亚军,等.矿山水文地质结构及其采动响应[J].工程地质学报,2019,27(1):21-28.  
SUI Wanghua, WANG Dandan, SUN Yajun, et al. Mine hydrogeological structure and its responses to mining [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 21-28.
- [6] 隋旺华,梁艳坤,张改玲,等.采掘中突水溃砂机理研究现状及展望[J].煤炭科学技术,2011,39(11):5-9.  
SUI Wanghua, LIANG Yankun, ZHANG Gailing, et al. study status and outlook of risk evaluation on water inrush and sand inrush mechanism of excavation and mining [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 5-9.
- [7] 赵启峰,张农,韩昌良,等.浅埋薄基岩含水层下煤层开采突水溃砂相似模拟实验研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(3):444-451.  
ZHAO Qifeng, ZHANG Nong, HAN Changliang, et al. Simulation experiment of water-sand inrush during the mining of the shallow coal seam under roof aquifer with thin bedrock [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(3): 444-451.
- [8] 张杰,杨涛,索永录,等.基于隔水土层失稳模型的顶板突水致灾预测研究[J].煤炭学报,2017,42(10):2718-2724.  
ZHANG Jie, YANG Tao, SUO Yonglu, et al. Roof water-inrush disaster forecast based on the model of aquiclude instability [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2718-2724.
- [9] 李江华,许延春,姜鹏,等.巨厚松散层薄基岩工作面覆岩载

荷传递特征研究[J].煤炭科学技术,2017,45(11):95-100.

- LI Jianghua, XU Yanchun, JIANG Peng, et al. Study on load transmission characteristics of overburden rock above coal mining face in thin bedrock of super thick unconsolidated stratum [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 95-100.
- [10] 许海涛,康庆涛.厚松散层薄基岩煤层开采突水溃砂风险评价[J].煤矿开采,2017,22(3):78-81.  
XU Haitao, KANG Qingtao. Risk assessment of water and sands burst of coal seam mining with thick loose layer and thin bedrock [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(3): 78-81.
- [11] 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.  
ZHANG Kun. Risk Zoning of water inrush and sand bursting under water abundance roof and thick loose sand layer [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(5): 191-193, 197.
- [12] 许延春,杜明泽,李江华,等.水压作用下防砂安全煤岩柱失稳机理及留设方法[J].煤炭学报,2017,42(2):328-334.  
XU Yanchun, DU Mingze, LI Jianghua, et al. Instability mechanism and design method of coal and rock pillar under water pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 328-334.
- [13] 杜锋,曹正正,李振华.破碎岩体水沙两相渗透特性研究进展[J].煤炭科学技术,2018,46(7):48-53.  
DU Feng, CAO Zhengzheng, LI Zhenhua. Research progress of two phase water-sand flow characteristics in crushed rock mass [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 48-53.
- [14] 王海,王晓东,曹祖宝,等.冻结井壁解冻过程中突水溃砂机理及防治技术[J].煤炭科学技术,2019,47(2):21-26.  
WANG Hai, WANG Xiaodong, CAO Zubao, et al. Mechanism and prevention technology of water inrush and sand in-rush occurred in thawing process of mine freezing shaft wall [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 21-26.
- [15] 周振方,曹海东,朱明诚,等.水泥-水玻璃双液浆在工作面顶板突水溃砂治理中的应用[J].煤田地质与勘探,2018,46(6):121-127.  
ZHOU Zhenfang, CAO Haidong, ZHU Mingcheng, et al. Application of cement-sodium silicate mixed grout in control of water and sand bursting from roof of the working face [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(6): 121-127.
- [16] 童世杰.任楼煤矿 No.7240(上)南工作面突水溃砂原因及防范对策[J].煤矿安全,2014,45(8):117-121.  
TONG Shijie. Reasons and prevention measures of water and sand inrush at 7240 (upper) southern working face in Renlou Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(8): 117-121.
- [17] 国家安全监管总局,国家煤矿安监局,国家能源局,等.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [18] 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 broken rocks in caving zone due to coal mining based on DEM [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 470-476.