

文章编号: 1673-3363-(2022)03-0624-10

切顶沿空留巷采空区自燃带分布特征及 喷涂堵漏防灭火技术

刘红威^{1,2}, 刘树锋³, 陈黎明⁴, 贾国平⁵, 王飞¹, 李治刚¹, 闫晶晶¹

(1. 太原理工大学安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 2. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, New South Wales 2500, Australia; 3. 北京市政建设集团有限责任公司, 北京 100037; 4. 山西省煤炭地质 114 勘查院, 山西 长治 046011; 5. 山西铁鑫基础工程有限公司, 山西 太原 030000)

摘要 切顶沿空留巷敞开式采空区自然发火严重,目前尚不明晰该条件下的自然发火特征,故难以采取有效的防治措施。为解决上述难题,构建切顶沿空留巷采空区三维流场 PFC-FLUENT 耦合计算模型,分析切顶沿空留巷工作面不同通风方式下采空区自燃带分布特征,在此基础上提出切顶沿空留巷阶段性喷涂堵漏技术。研究结果表明:切顶后形成的敞开式采空区与沿空留巷直接贯通,采空区内的气体成分与气体分布发生明显变化。“Y”型通风条件下,切顶沿空留巷采空区自燃带宽度和深度明显增大,且在沿空留巷侧出现条带状自燃带。“W”型通风有利于降低工作面向采空区的漏风,但在切顶沿空留巷尾段开切眼附近出现明显的自燃带,且该自燃带不会随着工作面的推进进入窒息带。对沿空留巷成巷稳定区进行喷涂堵漏能够显著降低采空区的漏风量,改变采空区内部的压力场,减小上隅角一侧采空区内部的自燃带深度和宽度,降低采空区自然发火的危险性。

关键词 切顶沿空留巷; 采空区; 自然发火; 自燃带; 喷涂堵漏防治技术

中图分类号 TD 728 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2021.0392

Distribution characteristics of spontaneous combustion zone and spray plugging fire prevention and extinguishing technology in goaf of roof cutting and gob-side entry retaining

LIU Hongwei^{1,2}, LIU Shufeng³, CHEN Liming⁴, JIA Guoping⁵,
WANG Fei¹, LI Zhigang¹, YAN Jingjing¹

(1. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, New South Wales 2500, Australia; 3. Beijing Municipal Construction Group Co Ltd, Beijing 100037, China; 4. Shanxi Coal Geology 114 Exploration Institute, Changzhi, Shanxi 046011, China; 5. Shanxi Tiexin Foundation Engineering Co Ltd, Taiyuan, Shanxi 030000, China)

Abstract The spontaneous combustion in the open goaf of roof cutting and gob-side entry retaining is severe, and the characteristics of spontaneous combustion under this condition are not clear, so it is diffi-

收稿日期: 2021-08-11

责任编辑: 王江涛

基金项目: 国家建设高水平大学公派研究生项目(201806930016); 山西省重点研发计划(社会发展)项目(201803D31053); 山西省焦煤集团公司重大技术攻关项目(201812xs06)

作者简介: 刘红威(1990—)男,河南省商丘市人,讲师,主要从事矿井通风与灾害防治方面的研究。

E-mail: 18734851429@163.com

Tel: 18734851429

cult to take effective control measures. In order to solve this problems, the PFC-FLUENT coupling calculation model of three-dimensional flow field in the goaf of roof cutting and gob-side entry retaining was constructed, the distribution characteristics of the goaf spontaneous combustion zone in the working face under different ventilation methods were analyzed, and then the phased spray plugging technology of roof cutting and gob-side entry retaining was proposed. The results have shown that the open goaf formed by cutting roof was directly connected with the gob-side entry, the gas composition and gas distribution in the goaf were significantly changed. Under the condition of "Y" type ventilation, width and depth of spontaneous combustion zone in goaf increased obviously, and belt spontaneous combustion zone appeared along the gob-side entry. "W" type ventilation was beneficial to reduce the air leakage into goaf, but there was an obvious spontaneous combustion zone that was near the open-off cut at the end of the gob-side entry and would not enter the suffocation zone with the advance of the working face. Plugging the stable area of gob-side entry could significantly reduce the air leakage in goaf, change the pressure field inside goaf, reduce the depth and width of spontaneous combustion zone inside goaf at the upper corner, and reduce the risk of spontaneous combustion in goaf.

Key words roof cutting and gob-side entry retaining; goaf; spontaneous combustion; spontaneous combustion zone; spray plugging fire prevention and extinguishing technology

切顶沿空留巷无煤柱开采技术被称为我国矿业技术变革的第三次探索^[1-2]。该技术对顶板进行预裂爆破,利用矿山压力切断部分顶板的应力传递,实现自动沿空留巷和无煤柱开采,回采一个工作面,只需掘进一条顺槽巷道^[3],具有巷道掘进量少、煤炭回收率高、应力集中危害小等显著优点,目前已在多个矿区进行试验和推广^[4]。

利用切顶沿空留巷无煤柱开采技术进行回采,面临的一项难题是敞开式采空区的管理。切顶沿空留巷开采是对传统沿空留巷无煤柱开采方式的一次全面升级,能有效解决传统沿空留巷开采中存在的应力集中、沿空充填墙体施工和维护困难的关键难题。然而,切顶卸压自动形成的沿空留巷与采空区冒落带直接贯通,使得采空区内部漏风通道上的沿程和局部阻力急剧降低,漏风范围和漏风量增大,从而使采空区自然发火隐患区域彻底改变,自然发火危险性显著提高^[5]。与此同时,采空区内的瓦斯等有害气体在负压作用下极易泄漏到沿空留巷内,增大了巷道内有害气体的管理难度^[6]。

切顶沿空留巷无煤柱开采技术条件下,工作面通风方式通常采用"Y"型和"W"型2种形式^[7-8]。"W"型通风易造成上隅角瓦斯积聚,"Y"型通风能使工作面上隅角的瓦斯有效排出,但采空区漏风量较大,采空区自然发火防治困难。截至2020年,对全国38座进行切顶沿空留巷无煤柱开采的矿井进行统计分析后发现,多数切顶沿空留巷开采矿井属于高瓦斯矿井^[4]。在高瓦斯矿井切顶沿空留巷无煤柱开采中,常采用"Y"型通风、增大风量和瓦斯抽

采3种方式控制采空区上隅角瓦斯的涌出,取得了较好的效果,但这3种措施均有利于采空区的自然发火^[9-10]。采空区严重的自然发火灾害已成为限制该技术大范围推广应用的瓶颈。切顶沿空留巷采空区漏风规律和气体分布特征与传统工作面采空区具有明显的差异,目前尚不明晰切顶沿空留巷采空区自燃带分布特征,因此难以采取有效的防治措施。为解决上述难题,本文对切顶沿空留巷采空区自燃带分布特征开展研究,并在此基础上提出相应的防治措施。

1 工程背景

山西焦煤集团有限责任公司杜儿坪煤矿位于西山煤田东北部,太原市以西15 km,矿区面积69.766 6 km²。杜儿坪煤矿年生产能力500万t,据统计,每年由于顺槽隔离煤柱损失煤量可达到10万t,这不仅造成严重的资源浪费,而且造成巨大的经济损失。另外,区段煤柱会成为矿山压力峰值区,矿压显现明显,对顺槽巷道的安全性也构成一定威胁。矿井自2017年以来在2[#]煤层62711工作面进行切顶沿空留巷无煤柱开采实验,切顶留巷位置为62711轨道巷,切顶高度为6 m。图1和图2分别为62711工作面柱状图和切顶沿空留巷现场布置图。

工作面沿2[#]煤顶板施工,煤层厚度稳定,煤厚1.00~2.40 m,平均1.90 m,结构简单。煤层倾角1°~7°,平均2°。工作面设计可采走向长1 564 m,采长216 m,采高1.90 m。基本顶为砂质泥岩,厚度2.09~3.40 m,平均厚度2.62 m,黏土质,底部受挤

压,呈角砾状。直接顶为细粒砂岩,厚度 4.20~5.54 m,平均厚度 5.12 m,夹深灰色粉砂岩。杜儿坪矿以往回采期间多次发生自然发火灾害。切顶沿空

留巷工作面推进至 314 m 时,沿空留巷段尾部持续检测到 CO 气体,存在自然发火的可能性,亟须采用有效的防治措施。



图 1 杜儿坪矿柱状图

Fig. 1 Geological column diagram of Duerping mine

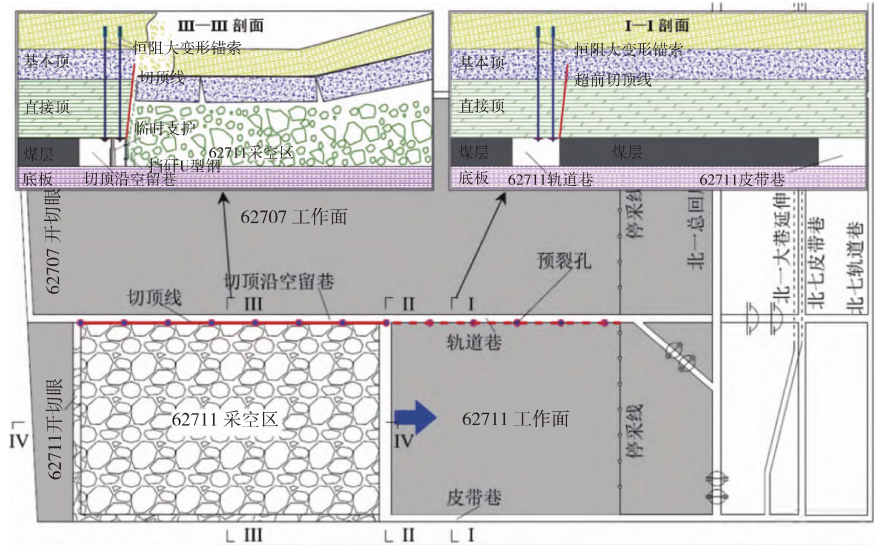


图 2 杜儿坪矿 62711 工作面切顶沿空留巷现场布置图

Fig. 2 Site layout of mining with gob-side entry formed by cutting roof at 62711 working face in Duerping mine

2 基于 PFC-FLUENT 耦合模型的切顶沿空留巷采空区流场研究

2.1 模型建立

目前,研究者普遍将采空区视为多孔介质。采空区流场受多个变量控制,包括采空区特征(如渗透率、孔隙率)^[11]、源项^[12]、通风方式及参数^[13-14]、瓦斯抽放方式及参数^[15-16]等。CFD 数值模拟技术是研究采空区流场动态特性的重要手段^[17-20]。在 CFD 模拟采空区流场的过程中,采空区多孔介质的孔隙率和渗透率是 2 个重要的关键参数,目前主要通过研究覆岩垮落和裂隙发育获得^[15, 21-22]。采空区覆岩垮落和裂隙发育的研究方法主要有理论分析^[23]、经验统计^[24]、数值模拟(包括以 ANSYS,FLAC,ADINA 为主的有限元分析,以及以 UDEC 和 PFC 为主的离散元分析法)^[25-26]、相似模拟^[27]和现场测量^[28]。PFC 离散元数值模拟能够直接得到不同开采条件下的采场应力、裂隙和孔隙率等参数,为采空区流场的研究提供直接的参数依据。本文采用 PFC-FLUENT 耦合模型进行切顶沿空留巷采空区流场数值模拟研究,研究流程如图 3 所示。

利用 PFC 数值模拟得到切顶沿空留巷条件下采空区覆岩垮落和裂隙发育状况,确定杜儿坪矿

62711 工作面导气带的范围,利用 FLUENT 建立相应的采空区数值模拟物理模型。将 PFC 模拟得到的孔隙率拟合得到采空区孔隙率、黏性阻力系数和惯性阻力系数的空间分布规律,并利用 UDF 功能导入 FLUENT 计算中,建立切顶沿空留巷条件下采空区三维流场 PFC-FLUENT 耦合数值模拟模型。通过现场瓦斯监测和低温氧化实验分别得到采空区的瓦斯涌出量和氧气消耗量。根据建立的几何模型与确定的参数对切顶沿空留巷采空区内的气体运移规律进行研究,建立的采空区模型如图 4 所示。

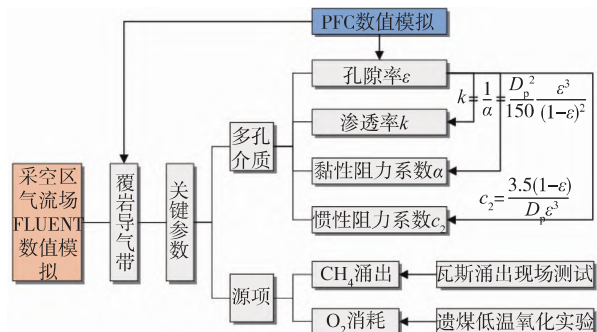


图 3 基于 PFC-FLUENT 耦合模型的切顶沿空留巷采空区流场数值模拟流程图

Fig. 3 Flow chart of numerical simulation of flow field in gob of mining with gob-side entry formed by cutting roof based on PFC-FLUENT coupling model

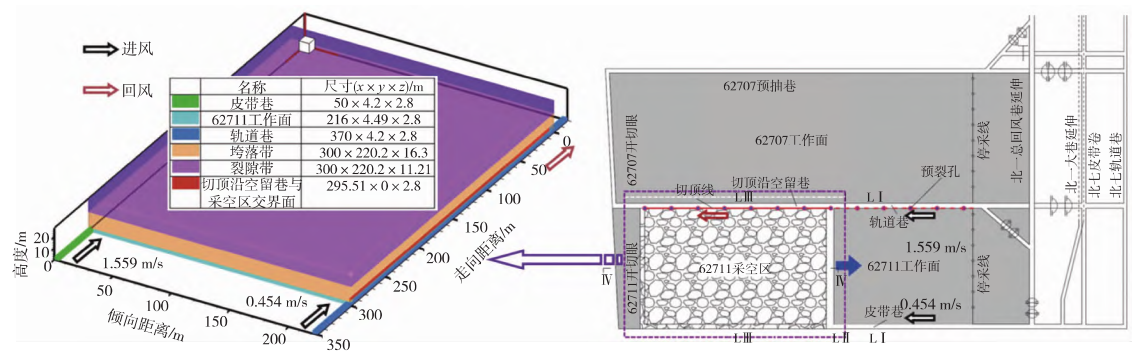


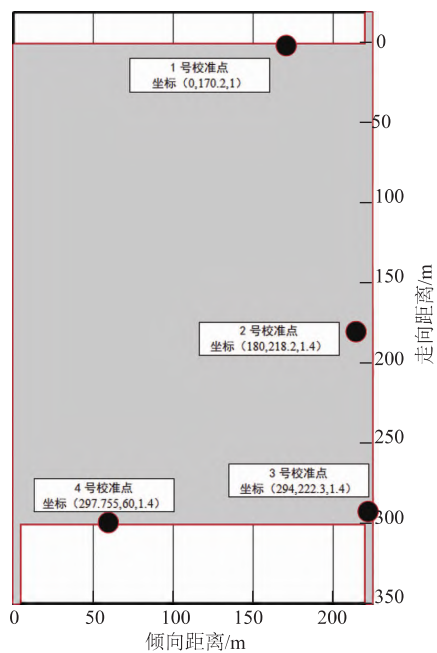
图 4 杜儿坪矿 62711 工作面采空区数值模拟物理模型

Fig. 4 Numerical simulation model of 62711 working face gob in Duerping coal mine

2.2 模型及参数准确性校验

利用上文建立的 PFC-FLUENT 模型进行数值模拟之前,应首先对模型及参数进行准确性校验。分别在工作面、沿空留巷和采空区内部不同位置选择校验点,通过对比分析校验点处现场实测和数值模拟得到的气体体积分数,确定 PFC-FLUENT 模型及参数的准确性。选择 62711 切顶沿空留巷工作面推进至 300 m 时进行校验。此时工作面采取“Y”型

通风,皮带巷和轨道巷进风,沿空留巷回风,皮带巷风速为 1.559 m/s,轨道巷风速为 0.454 m/s。由不同校验点处气体体积分数现场实测值和数值模拟值的对比分析可知,数值模拟的结果与现场实测值接近,表明上文建立的 PFC-FLUENT 模型及参数能够较好地模拟 62711 切顶沿空留巷工作面气体运移规律,可以在此基础上进行下一步分析。



1号校准点	N ₂	O ₂	CH ₄
现场实测值	81.1%	9.18%	8.91%
数值模拟值	82.2%	8.51%	9.31%
2号校准点	N ₂	O ₂	CH ₄
现场实测值	80.9%	13.9%	3.25%
数值模拟值	82.6%	13.6%	3.81%
3号校准点	N ₂	O ₂	CH ₄
现场实测值	80.2%	19.8%	0.11%
数值模拟值	80.4%	19.5%	0.12%
4号校准点	N ₂	O ₂	CH ₄
现场实测值	79.1%	20.1%	0.68%
数值模拟值	78.8%	19.4%	0.72%

(a) 校验点位置

(b) 校验点气体体积分数

图 5 校验点位置及其对应参数

Fig. 5 Checkpoint position and corresponding parameters

3 切顶沿空留巷工作面不同通风方式下采空区自燃带分布特征

当沿空留巷段采空区一侧的壁面被设置为 wall 时,工作面回采方式为传统的沿空留巷技术(wall 相当于沿空留巷支护墙)。当沿空留巷段采空区一

侧的壁面被设置为 interior 时,工作面回采方式即为切顶沿空留巷无煤柱开采。沿空留巷无煤柱开采常采用的通风方式有“Y”型和“W”型。“Y”型通风时,皮带巷和轨道巷进风,沿空留巷回风,皮带巷风速为 1.559 m/s,轨道巷风速为 0.454 m/s。“W”型通风时,皮带巷和沿空留巷进风,沿轨道巷回风,皮带

巷风速为 1.559 m/s , 沿空留巷风速为 0.454 m/s 。在上文建立的 PFC-FLUENT 耦合模型的基础上, 根据确定的数值模拟运行参数进行不同回采与通风方式下采空区流场的数值模拟。

根据计算结果可以得出, 传统沿空留巷“Y”型通风、切顶沿空留巷“Y”型通风和切顶沿空留巷“W”型通风 3 种形式下采空区内的漏风流场分布如图 6 所示。由图可知, 切顶沿空留巷条件下采空区的漏风流场与传统的沿空留巷相比发生了本质的区别。传统沿空留巷条件下工作面风流自下隅角一侧漏入采空区, 之后重新流回工作面, 工作面漏风量较小。由于支护墙的存在, 沿空留巷段的风

量基本不变。切顶沿空留巷“Y”型通风条件下, 采空区内部的漏风流场被贯通, 自工作面下隅角到上隅角的整个范围内, 风流由工作面漏入采空区, 且漏入采空区的风流不再流回工作面, 整个工作面的漏风量较大。由于沿空留巷段与采空区的垮落带完全导通, 由工作面漏入采空区内部的风流不断流入沿空留巷。切顶沿空留巷“W”型通风条件下, 采空区的漏风规律与切顶沿空留巷“Y”型通风具有明显的差异, 工作面风流自下隅角漏入采空区之后同样会重新流回工作面。但是与传统的沿空留巷“Y”型通风相比, 切顶沿空留巷“W”型通风能够降低下隅角漏入采空区内的风量。

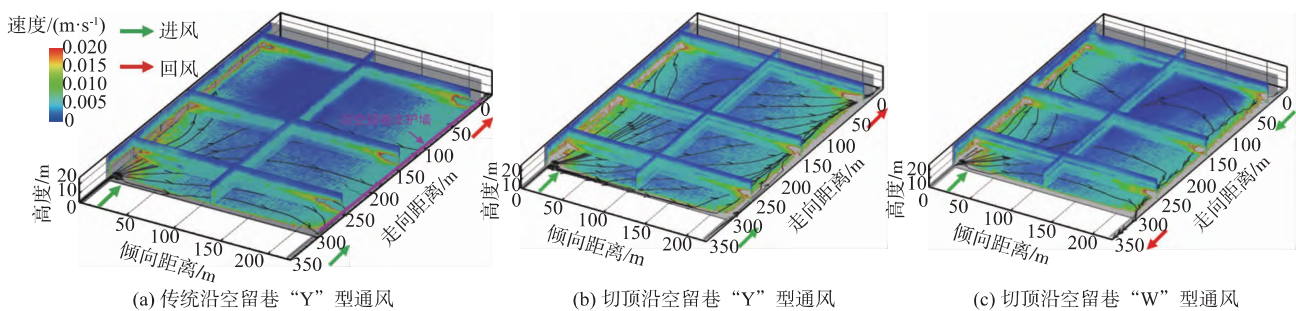


图 6 不同回采与通风方式下采空区漏风流场分布

Fig. 6 Distribution of air leakage flow field in gob under different mining and ventilation methods

采空区氧气体积分数的分布对于遗煤自然发火具有重要的影响, 可以根据采空区氧气体积分数将其划分为散热带 (氧气体积分数 $> 18\%$)、自燃带 ($10\% \leq \text{氧气体积分数} \leq 18\%$) 和窒息带 (氧气体积分数 $< 10\%$)^[9]。由图 7 中 $z = 1 \text{ m}$ 平面采空区自燃

带分布可知, 传统沿空留巷“Y”型通风条件下, 采空区在距离工作面一定范围形成自燃带。下隅角巷帮侧自燃带宽度最大, 该区域发生自然发火的危险性较高。与传统的沿空留巷相比, 切顶沿空留巷开采下, 采空区自燃带发生了明显的变化。

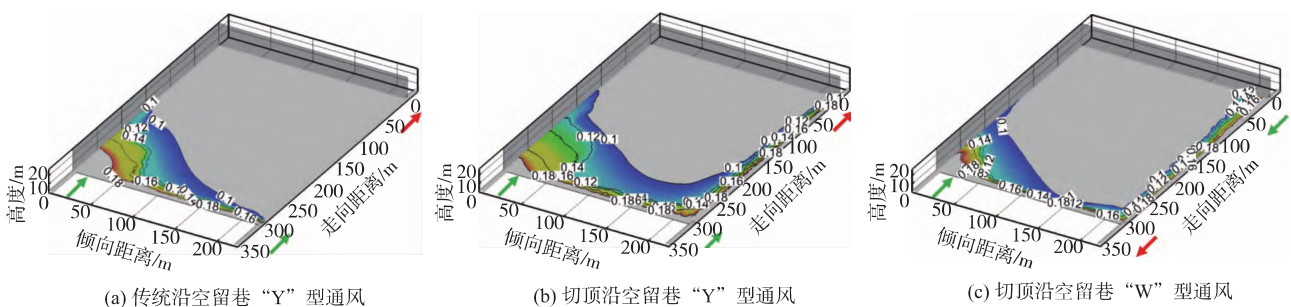


图 7 不同回采与通风方式下采空区自燃带分布

Fig. 7 Distribution of spontaneous combustion zone in gob under different mining and ventilation methods

采空区沿空留巷一侧出现了明显的长条状自燃带, 且该条带在上隅角附近宽度最大, 留巷段沿着风流方向该条带的宽度逐渐降低。整个采空区的自燃带的范围明显增大, 且深入采空区的距离也相应增大。切顶沿空留巷“Y”型通风条件下, 采空区遗煤自然发火的危险性明显升高。下隅角巷帮

侧和沿空留巷侧是自然发火较为严重的区域。并且, 沿空留巷侧条带状自燃带分布的范围较广, 随着工作面的推进, 该条带状自燃带并未完全进入窒息带, 即该区域在工作面的整个回采过程中均具有自然发火的可能性, 因此危险性更高。切顶沿空留巷“W”型通风与“Y”型通风条件下采空区的氧气

流场同样具有明显的差异。切顶沿空留巷“W”型通风条件下,沿空留巷侧同样出现了条带状自燃带,但开切眼处的自燃带宽度明显高于切顶沿空留巷“Y”型通风条件。与传统沿空留巷和切顶沿空留巷“Y”型通风相比,切顶沿空留巷“W”型通风条件下采空区内部的自燃带宽度明显降低,说明在沿空留巷尾段进风流高压作用下,工作面下隅角附近漏风量明显降低,高体积分数氧气向采空区内部扩散的距离同样显著降低。切顶沿空留巷“W”型通风有利于降低工作面向采空区的漏风,有利于自然发火的防治。但在切顶沿空留巷尾段开切眼处附近,出现了明显的自燃带,且该自燃带不会随着工作面的推进进入窒息带,会在整个回采过程中长期存在,该区域将是切顶沿空留巷“W”型通风条件下采空区自然发火的重点防治区域。

4 切顶沿空留巷工作面沿空留巷侧喷涂堵漏防火

4.1 切顶沿空留巷侧分区划分和阶段性喷涂堵漏防火技术

切顶沿空留巷工作面推进过程中,不同位置巷道受采动影响不同。工作面超前段会受到超前压力的影响。工作面开采后,顶板开采垮落,且从垮落到稳定需要一定的时间,因此距工作面较近的架后区域不仅需要进行顶板支护,还需进行挡矸支护。随着工作面继续推进,当巷道距工作面较远时,顶板运动基本会趋于稳定,此时可将架后临时支护的设备撤掉,只进行挡矸支护即可。根据以往现场监测数据,将工作面附近划分为3个区,即超前支护区、架后临时支护区和成巷稳定区,不同分区根据需求采取不同的支护措施。对杜儿坪矿62711工作面的现场观测得到沿空留巷侧的分区划分如图8所示,其中超前支护区为工作面前方30 m,架后临时支护区为架后0~200 m,成巷稳定区为架后200 m之后。超前支护区位于工作面超前采动影响区,需要超前加强支护。结合作业面现有设备条件,采用单体液压支柱配合Ⅱ型梁进行超前支护,单体液压支柱采用“一梁三柱”方式垂直于巷道布置。架后临时支护区位于工作面超后影响区,采空区顶板岩石垮落会对巷道顶板产生一定的摩擦作用,巷道受动压影响明显,顶板压力较大。因此,在架后0~200 m范围内,采用单体液压支柱配合29#U型钢进行挡矸支护。单体支柱排距500 mm,单体与U型钢间距为250 mm。临时支护区的侧视图如图9所示。成巷

稳定区受采动影响很小,顶板下沉量及单体支柱的压力变化很小,可认为该区域已趋于稳定状态,可将临时支护单体撤掉,只保留U型钢可缩支架进行挡矸。

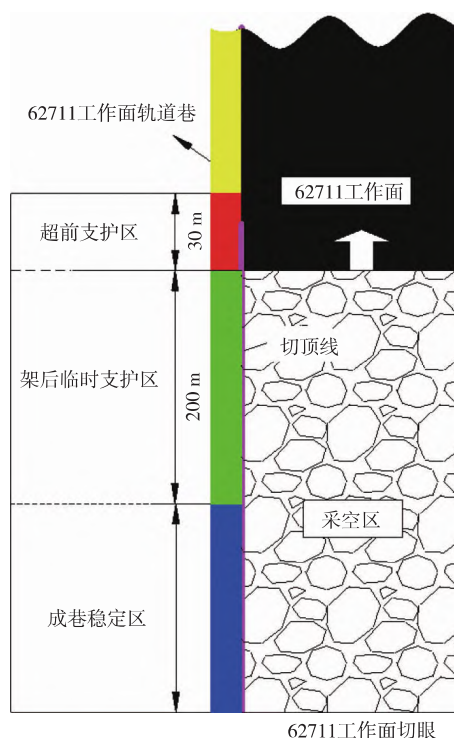


图8 62711工作面沿空留巷侧分区划分

Fig. 8 Division of the gob-side entry of 62711 working face

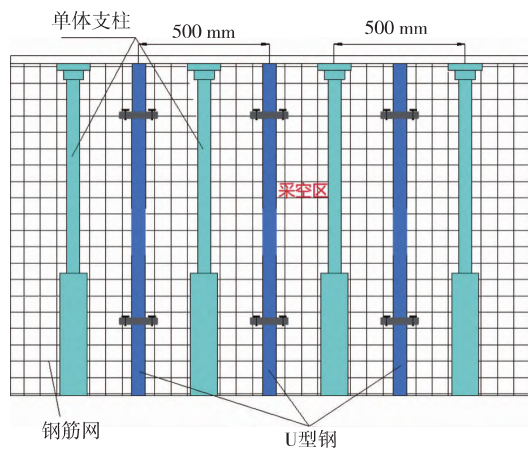


图9 62711工作面沿空留巷临时支护区侧视图

Fig. 9 Side view of temporary support area of the gob-side entry of 62711 working face

由上文切顶沿空留巷工作面不同通风方式下采空区自燃带分布特征可知,切顶沿空留巷“Y”型通风条件下,工作面向采空区内部的漏风量较大,同时采空区内部气体不断涌向沿空留巷内,采空区自燃带的宽度明显增大,且在沿空留巷侧形

巷侧喷涂堵漏能够改变采空区内部的自燃带分布。随着喷涂距离的不断增大,沿空留巷侧的条带状自燃带长度不断降低,已喷涂段的采空区内部自燃带消失。喷涂过程中,采空区上隅角一侧自燃带的深度和宽度均明显降低,但下隅角一侧自燃带的深度

和宽度变化并不明显,说明沿空留巷侧喷涂堵漏的作用主要体现在对采空区上隅角一侧自然发火的防治上。喷涂堵漏能有效缩短沿空留巷一侧的条带状自燃带。

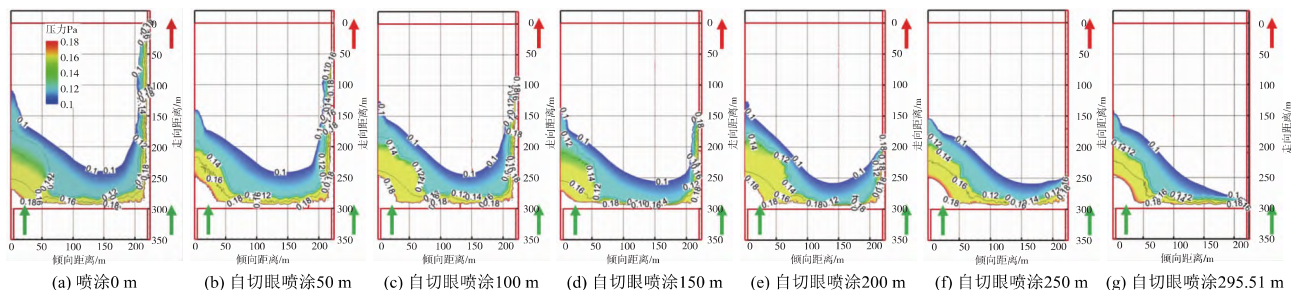


图 12 切顶沿空留巷侧阶段性喷涂过程采空区自燃带分布 ($z = 1$ m)

Fig. 12 Distribution of oxygen concentration in gob during the phased spraying process of the gob-side entry ($z = 1$ m)

4.3 切顶沿空留巷侧阶段性喷涂堵漏技术现场应用

切顶沿空留巷无煤柱开采技术工作面可以采用的通风方式主要有“Y”型和“W”型。由上文的研究可知,不同的通风方式对采空区气体流场的分布有显著的影响。为进一步确定不同通风方式下采空区自然发火灾害特征,自 2017 年 2 月 25 日对杜儿坪矿 62711 切顶沿空留巷工作面进行了 217 d 的连续观测。在此期间工作面共推进 639 m,图 13 为 62711 工作面 0~639 m 的推进过程中工作面通风方式及风量变化。0~408 m 的推进过程中,工作面采用“Y”型通风方式,即工作面采用 62711 轨道巷和 62711 皮带巷进风,62711 轨道巷后部回风。工作面推进至 314 m 时,沿空留巷段尾部持续检测到 CO 气体,说明采空区煤氧反应加剧,具有自然发火的可能性。随后,在推进至 408 m 时,将工作面通风方式改为了“W”型通风,即工作面采用 62711 皮带巷和 62711 轨道巷后部进风,62711 轨道巷回风。但此时上隅角处的瓦斯体积分数明显升高,接近 1%,且随着回采距离的增大而逐渐增大。为防止上隅角瓦斯超限,工作面推进至 530 m 时,重新将工作面通风系统改为“Y”型,即 530~639 m 的推进过程中,工作面恢复“Y”型通风。

由上文的数值模拟结果可知,切顶沿空留巷无煤柱开采与传统沿空留巷的本质区别在于其留巷段与采空区完全导通,从而导致采空区漏风严重,瓦斯容易涌出。因此,杜儿坪矿切顶沿空留巷工作面推进过程中,自切眼处对采空区进行阶段性封堵,封堵方式为向切顶沿空留巷喷涂聚氨酯

材料。工作面推进至 342 m 时,进行初次喷涂,一次性喷涂至 60 m;工作面推进至 417 m 时,进行二次喷涂,一次性喷涂至 180 m;工作面推进至 445 m 时,进行第三次喷涂,一次性喷涂至 350 m;工作面推进至 616 m 时,进行第四次喷涂,一次性喷涂至 460 m。工作面回采距离与沿空巷喷涂距离的关系如图 14 所示,喷涂前后的效果如图 15 和图 16 所示。

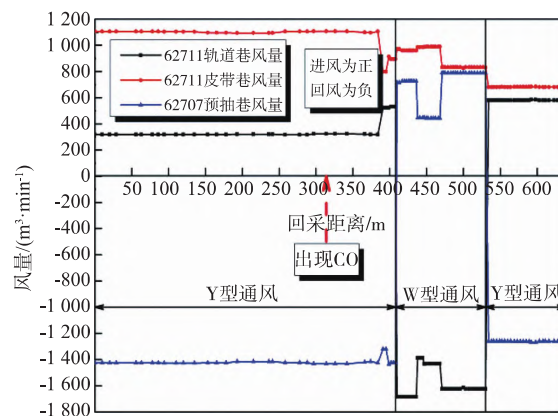


图 13 工作面 0~639 m 的推进过程中工作面通风方式及风量变化

Fig. 13 Ventilation method and air volume change when 62711 working face advanced from 0 to 639 m

喷涂堵漏之后,无论是在“Y”型还是在“W”型通风方式下,留巷内均未检测到 CO,说明采空区自然发火的危险性大大降低。传统沿空留巷一侧并没有形成新的自燃带,喷涂堵漏能够显著降低留巷侧漏风,使切顶沿空留巷自燃带分布与传统沿空留巷趋于一致。

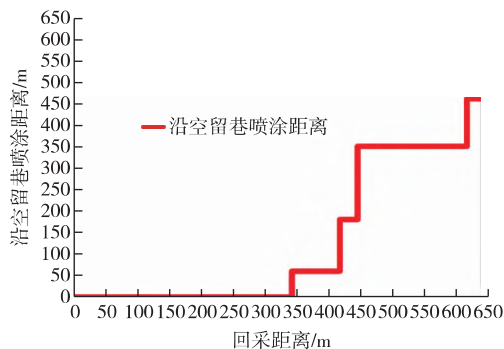


图 14 回采距离与沿空留巷喷涂距离的关系

Fig. 14 The relationship between mining distance and spraying distance in gob-side entry



图 15 沿空留巷临时支护区铺设风筒布堵漏风

Fig. 15 Laying air duct in temporary support area of gob-side entry formed by cutting roof to block air leakage



图 16 沿空留巷成巷稳定区喷涂聚氨酯堵漏风

Fig. 16 Spraying polyurethane in stable area of gob-side entry formed by cutting roof to block air leakage

5 结 论

1) 通过 PFC 离散元数值模拟得到了切顶沿空留巷条件下采场应力、裂隙和孔隙率等参数变化规律,在此基础上建立了切顶沿空留巷条件下采空区三维流场 PFC-FLUENT 耦合计算模型。

2) 与传统的沿空留巷相比,切顶后形成的敞开式采空区与沿空留巷直接导通,采空区漏风路径增

多、漏风阻力降低、漏风强度增大,采空区内气体成分与气体分布发生明显变化,自然发火隐患区域分布规律彻底改变,自然发火危险性显著提高。“Y”型通风条件下,切顶沿空留巷采空区自燃带宽度和深度明显增大,且在沿空留巷侧出现了条带状自燃带。“W”型通风有利于降低工作面向采空区的漏风,有利于自然发火的防治。但在切顶沿空留巷尾段开切眼附近,出现了明显的自燃带,且该自燃带不会随着工作面的推进进入窒息带,会在整个回采过程中长期存在。

3) 根据切顶沿空留巷采空区自燃带分布特征,提出对沿空留巷成巷稳定区进行阶段性喷涂堵漏。成巷稳定区喷涂堵漏能够显著降低采空区的漏风量,改变采空区内部的压力场,消除沿空留巷侧的条带状自燃带。喷涂堵漏对下隅角一侧采空区内部的自燃带深度和宽度的影响不大,但能够显著减小上隅角一侧采空区内部的自燃带深度和宽度。现场应用的长期监测结果表明,沿空留巷侧壁有效的喷涂堵漏能够降低采空区自然发火的危险性。

参考文献:

- [1] 何满潮,朱国龙. “十三五”矿业工程发展战略研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(1): 1-6.
HE Manchao, ZHU Guolong. Research on development strategy of mining engineering in the Thirteenth Five-Year Plan[J]. Coal Engineering, 2016, 48(1): 1-6.
- [2] 何满潮,宋振骥,王安,等. 长壁开采切顶短壁梁理论及其 110 工法: 第三次矿业科学技术变革[J]. 煤炭科技, 2017(1): 1-9, 13.
HE Manchao, SONG Zhenqi, WANG An, et al. Theory of longwall mining by using roof cutting shortwall team and 110 method: the third mining science and technology reform [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2017(1): 1-9, 13.
- [3] ZHANG X Y, HE M C, YANG J, et al. An innovative non-pillar coal-mining technology with automatically formed entry: a case study[J]. Engineering, 2020, 6: 1315-1329.
- [4] 张盛,王小良,吴自强,等. 切顶卸压沿空留巷爆破孔关键参数选择及留巷效果现状分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 1-8.
ZHANG Sheng, WANG Xiaoliang, WU Ziqiang, et al. Status analysis of the key parameters of blasting borehole and the retaining effect for gob-side entry retaining by the way of roof cutting and pressure releasing [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2019, 38(6): 1-8.
- [5] 朱红青,胡超,张永斌,等. 我国矿井内因火灾防治技术研究现状[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 88-92.

- ZHU Hongqing, HU Chao, ZHANG Yongbin, et al. Research status on prevention and control technology of coal spontaneous fire in China [J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(3): 88-92.
- [6] 陈向军, 何满潮, 周鹏, 等. 切顶卸压自成巷开采工作面通风安全可靠分析[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(11): 183-189.
- CHEN Xiangjun, HE Manchao, ZHOU Peng, et al. Analysis of ventilation safety and reliability of working face in automatically forming roadway by roof cutting and pressure relief[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(11): 183-189.
- [7] 王炯, 刘鹏, 姜健, 等. 切顶卸压沿空留巷回采工作面Y型通风漏风规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 625-633.
- WANG Jiong, LIU Peng, JIANG Jian, et al. Y-shaped ventilation air leakage law of working face of gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 625-633.
- [8] 杜云飞. 切顶卸压留巷Y型通风模式下采空区漏风特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
- [9] 杨胜强. 瓦斯与煤自燃复合致灾理论及防灭火技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017: 8-9.
- [10] 周福宝. 瓦斯与煤自燃共存研究(1): 致灾机理[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(5): 843-849.
- ZHOU Fubao. Study on the coexistence of gas and coal spontaneous combustion(1): disaster mechanism [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5): 843-849.
- [11] LI X W, WANG C J, CHEN Y J, et al. Design of gas drainage modes based on gas emission rate in a gob: a simulation study [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(16): 456.
- [12] SI G Y, BELLE B. Performance analysis of vertical goaf gas drainage holes using gas indicators in Australian coal mines [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 216: 103301.
- [13] TANGUTURI K, BALUSU R. Fundamental understanding of goaf gas displacement in longwall goaf [J]. *Journal of Mining and Environment*, 2015, 6(2): 191-203.
- [14] TANGUTURI K, BALUSU R. Computational fluid dynamics simulations for investigation of parameters affecting goaf gas distribution [J]. *Journal of Mining and Environment*, 2018, 9(3): 547-557.
- [15] QIN Z Y, YUAN L, GUO H, et al. Investigation of longwall goaf gas flows and borehole drainage performance by CFD simulation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 150: 51-63.
- [16] GUO H, TODHUNTER C, QU Q D, et al. Longwall horizontal gas drainage through goaf pressure control [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 150: 276-286.
- [17] REN T, BALUSU R. CFD modelling of goaf gas migration to improve the control of spontaneous combustion in longwalls [J]. *University of Wollongong Research Online*, 2005: 259-264.
- [18] REN T, BALUSU R, CLAASSEN C. Computational fluid dynamics modelling of gas flow dynamics in large longwall goaf areas [C]//35th APCOM Symposium—Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry, Proceedings, 2011: 603-613.
- [19] REN T, WANG Z W. Computational fluid dynamics modelling of respirable dust and gas behaviour on a longwall face [J]. *International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2013, 45(9): 1962-1973.
- [20] WANG Z W, REN T, CHENG Y P. Numerical investigations of methane flow characteristics on a longwall face Part II: parametric studies [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 43: 254-267.
- [21] MAJDI A, HASSANI F P, NASIRI M Y. Prediction of the height of distressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 98: 62-72.
- [22] KARACAN C Ö, GOODMAN G V. Probabilistic modeling using bivariate normal distributions for identification of flow and displacement intervals in longwall overburden [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 27-41.
- [23] REZAEI M. Development of an intelligent model to estimate the height of caving-fracturing zone over the longwall gobs [J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(7): 2145-2158.
- [24] REZAEI M, HOSSAINI M F, MAJDI A. A time-independent energy model to determine the height of distressed zone above the mined panel in longwall coal mining [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 47: 81-92.
- [25] WANG G, FAN C, XU H, et al. Determination of long horizontal borehole height in roofs and its application to gas drainage [J]. *Energies*, 2018, 11(10): 2647.
- [26] WHITTLES D N, LOWNDES I S, KINGMAN S W, et al. Influence of geotechnical factors on gas flow experienced in a UK longwall coal mine panel [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(3): 369-387.
- [27] CUI F, JIA C, LAI X P. Study on deformation and energy release characteristics of overlying strata under different mining sequence in close coal seam group based on similar material simulation [J]. *Energies*, 2019, 12(23): 4485.
- [28] WANG X L, QIN Q R, FAN C H. Failure characteristic and fracture evolution law of overburden of thick coal in fully mechanized sub-level caving mining [J]. *Sains Malaysiana*, 2017, 46(11): 2041-2048.