



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

张春,闻天翔,栾铮,等.回采工作面U+L型通风系统高效应用方案研究[J].煤炭科学技术,2021,49(8):147-153. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.08.019
 ZHANG Chun, WEN Tianxiang, LUAN Zheng, et al. Study on high-efficiency application scheme of U+L type ventilation system in coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (8) : 147 - 153. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.08.019

回采工作面U+L型通风系统高效应用方案研究

张春^{1,2},闻天翔^{1,2},栾铮^{1,2},王文熠^{1,2},王博涵^{1,2}

(1.辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 阜新 123000;2.辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁 阜新 123000)

摘要:为了使工作面U+L型通风系统能够高效应用,采用理论分析方法,从回风巷瓦斯浓度、采空区煤炭自燃、通风系统管理及经济合理性4个方面对工作面U+L型通风系统高效应用的判定方法进行了分析;构建了U+L型通风系统模拟模型,应用数值模拟方法对工作面供风量分别为1 000、2 000、3 000、4 000 m³/min条件下的联络巷至工作面距离与工作面上隅角瓦斯浓度的关系进行了分析,对联络巷处于不同位置时工作面供风量与氧化带宽度的关系进行了研究。研究结果表明:联络巷至工作面距离与工作面上隅角瓦斯浓度近似满足指数函数关系,且风量越低这种关系越明显;以1%作为上隅角瓦斯体积分数超限标准,当工作面供风量为1 000、2 000、3 000 m³/min时,联络巷间距分别不能大于11、34、50 m;当工作面供风量为4 000 m³/min时,无论联络巷处于何处上隅角瓦斯体积分数均不超限。工作面供风量与上隅角瓦斯体积分数近似满足负指数函数关系,且联络巷至工作面距离越大这种关系越明显;当联络巷间距为10、20、30、40、50 m时,工作面的供风量分别不得低于1 000、1 500、1 800、2 400、3 000 m³/min。工作面供风量与采空区氧化带宽度近似满足指数函数关系,且联络巷至工作面距离越大,这种关系越明显;以50 m作为采空区允许的最高氧化带宽度,当联络巷间距设定为40、30、20、10 m时,工作面供风量不应大于1 200、1 900、2 200、2 000 m³/min。最后,以采空区氧化带最大宽度为50 m、工作面上隅角最高允许瓦斯体积分数为1%为标准,提出了2套联络巷高效排放瓦斯的技术方案:①当工作面供风量为1 000、2 000 m³/min时,联络巷的间距不能大于11、34 m;当工作面供风量为3 000、4 000 m³/min时,联络巷易引起采空区遗煤自燃。②当联络巷间距设定为10、20、30 m时,工作面供风量应1 000~2 000、1 500~2 200、1 800~1 900 m³/min。

关键词:U+L型通风系统;联络巷;上隅角瓦斯浓度;高效排放瓦斯

中图分类号:TD724 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)08-0147-07

Study on high-efficiency application scheme of U+L type ventilation system in coal mining face

ZHANG Chun^{1,2}, WEN Tianxiang^{1,2}, LUAN Zheng^{1,2}, WANG Wenyi^{1,2}, WANG Bohan^{1,2}

(1. Safety Science and Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Key Laboratory of Mine Thermo-motive Disaster and Prevention, Ministry of Education, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to make the U+L type ventilation system of the working face be applied efficiently, theoretical analysis methods were adopted to analyze the U+L type ventilation system of the working face from four aspects: the gas concentration of the return airway, the coal spontaneous combustion in the goaf, the ventilation system management and the economic rationality. The U+L type ventilation system simulation model was constructed, and the numerical simulation method was used to supply air volume of 1 000, 2 000, 3 000, 4 000 m³ to the working face, respectively. The relationship between the distance between the connecting lane and the working face and the gas concentration in the upper corner of the working surface was analyzed, and the relationship between the air supply of the working face and the width of the oxidation zone when the connecting lane was in different positions was studied. The results show that the distance between the

收稿日期:2021-02-20;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074086, 51174109, 51774170);辽宁省教育厅资助项目(17-1166);辽宁省科技厅资助项目(2019-ZD-0043)

作者简介:张春(1979—),男,辽宁沈阳人,副教授,硕士生导师,博士。

connecting lane and the working surface and the gas concentration in the upper corner of the working surface approximately satisfy the exponential function relationship, and the lower the air volume, the more obvious the relationship. Taking 1% as the upper corner gas concentration overrun standard, when the air supply volume of the working face is 1 000, 2 000 and 3 000 m^3/min , the spacing between the connecting roadways shall not be greater than 11, 34, 50 m respectively; when the air supply volume of working face is 4 000 m^3/min , the gas concentration at the upper corner does not exceed the limit. The relationship between the air supply and the gas concentration in the upper corner of the working face approximately satisfies the negative exponential function, and the greater the distance between the connecting roadway and the working face, the more obvious the relationship is. With 1% as the upper corner gas concentration overrun standard, when the distance between connecting roadways is 10, 20, 30, 40, 50 m, the air supply volume of the working face shall not be less than 1 000, 1 500, 1 800, 2 400, 3 000 m^3/min respectively. The air supply of the working face and the width of the oxidation zone in the goaf approximately satisfy an exponential function relationship, and the larger the distance between the connecting roadway and the working face, the more obvious the relationship is. Taking 50 m as the maximum allowable width of the oxidation zone in the goaf, when the spacing between the connecting roadways is set as 40, 30, 20, 10 m, the air supply volume of the working face shall not be greater than 1 200, 1 900, 2 200, 2 000 m^3/min . Finally, based on the standard that the maximum width of the oxidation zone in the goaf is 50 m and the maximum allowable gas volume fraction of the upper corner of the working surface is 1%, two sets of technical solutions for efficient gas emission in the connecting lane are proposed: ① When the air supply volume of the working face is 1 000, 2 000 m^3/min , the spacing between the connecting roadways should not be greater than 11 m and 34 m; When the air supply rate of working face is 3 000 m^3/min or 4 000 m^3/min , the connecting lanes are likely to cause spontaneous combustion of residual coal in the goaf. ② When the distance between connecting roadways is set as 10, 20, 30 m, the air supply of working face should be 1 000~2 000, 1 500~2 200, 1 800~1 900 m^3/min .

Key words: U+L type ventilation system; connecting roadway; gas concentration in upper corner; efficient gas discharge

0 引言

瓦斯灾害是煤矿的主要灾害之一,在我国重点煤矿中 80% 以上的矿井均存在发生瓦斯灾害的危险^[1]。瓦斯灾害主要包括瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出等,其中瓦斯爆炸事故发生比例较大,也是瓦斯灾害防治的主要内容。瓦斯灾害的发生通常还伴随着矿井火灾的发生,这使得瓦斯灾害的危害性进一步增强^[2-3]。根据瓦斯爆炸发生的条件,防止瓦斯爆炸的一个主要手段就是避免瓦斯超限。U+L 型通风系统是高瓦斯矿井防治瓦斯积聚与超限的常用方法,并且也取得了较好的防治效果。针对 U+L 型通风系统的特性,我国学者也开展了较深入的研究,如文献[4]对 U+L 型通风工作面采空区自然危险区域变化规律进行了分析,得到相同风量条件下 U+L 型通风系统采空区氧化带宽度及位置与 U 型通风系统的差别;文献[5-6]对 U+L 型通风综采工作面采空区漏风特性及合理挡风帘长度进行了研究,得到 U+L 型通风系统漏风沿工作面布置方向基本呈线性规律,及不同挡风帘长度条件下采空区浓度场的变化规律;文献[7]对 U+L 型通风采空区瓦斯运移规律进行了数值模拟与试验研究,得到工作面风量变化条件下采空区浓度场的变化规律等。在以往的研究中多注重 U+L 型通风系统所造成的采空区漏风规律的研究,而笔者则主要是从 U+L 型通风系统的设计、高效应用方面进行研究。

由于 U+L 型通风系统对工作面及采空区瓦斯

的排放效果受多方面因素的影响,如工作面的供风量、采空区的瓦斯涌出量、联络巷间距、采空区漏风特性等,使得进行 U+L 型通风系统结构设计时比较困难。在实际生产中,通常是根据经验首先对 U+L 型通风系统进行初步设计,然后根据实际排放瓦斯情况再进行修正。这样不仅影响生产,而且还容易导致瓦斯灾害事故的发生。因此,分析各因素对 U+L 型通风系统排放瓦斯效果的影响规律,给出 U+L 通风系统高效应力的理论依据,已经成为亟需解决的问题,笔者基于此,采用数值模拟的方法分析了各因素对 U+L 型通风系统的影响规律,为合理确定 U+L 型通风系统各参数奠定了理论基础。

1 U+L 型通风系统及高效应用分析

1.1 U+L 型通风系统

工作面 U+L 型通风系统是在传统的“U”型通风系统的基础上,在工作面回风平巷侧增加一条专门用于排放瓦斯的巷道,一般称为“尾巷”,形成“一进两回”的工作面通风形式,其结构如图 1 所示。

由图 1 可看出,随着工作面的前移,进入采空区的联络巷密闭被打开,形成一个漏风通道,工作面部分风流会经采空区从联络巷进入“尾巷”,将采空区内瓦斯从“尾巷”排出,从而可降低采空区内瓦斯浓度及向工作面(尤其是上隅角)的瓦斯涌出量,可有效解决工作面回风巷及上隅角瓦斯浓度超限的问题。但是通过上述分析可知,联络巷漏风会增加采空区的漏风量,从而会增加采空区遗煤自燃的危险,这也是

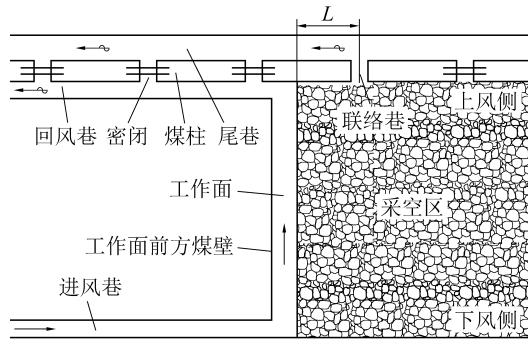


图 1 U+L 型通风系统结构

Fig.1 Structure of U+L ventilation system

U+L型通风系统应用时,特别需要注意的问题。

1.2 U+L型通风系统高效应用影响因素分析

在给定条件下应用 U+L 型通风系统进行瓦斯治理时,治理效果会受到联络巷间距、联络巷的负压及联络巷同时开启数量的影响。

1) 联络巷的间距主要会影响联络巷进入采空区后的开启与封闭时机。如果联络巷间距过大,会增加联络巷的开放时间,增强采空区深部漏风,联络巷对浅部瓦斯“拦截”不利,从而可能会增加采空区遗煤自燃及工作面上隅角瓦斯超限的危险;如果联络巷间距过小,会增加联络巷的掘进量及技术成本,使采空区深部瓦斯不易排放,为后期邻近工作面或煤层开采埋下隐患。因此,科学确定联络巷间距是高效应用 U+L 型通风系统的关键。

2)联络巷的负压一定要与采空区的瓦斯涌出量、工作面的供风量及遗煤的自然发火期相适应。联络巷负压过大,造成采空区漏风量增加,使工作面的有效风量可能不足,采空区排瓦斯的无效漏风增多,采空区遗煤氧化区域变大,增加遗煤自燃危险性。

3) U+L型通风系统进行应用时,通常联络巷只开启一个。多联络巷的同时开启会改变采空区内的渗流场,辅以对不同联络巷进行漏风量控制,既可以提高采空区内瓦斯的有效排放,又可以对采空区遗煤自燃进行控制。多联络巷的科学开启与风量合理控制,是U+L型通风系统高效应用的创新技术。

1.3 U+L型通风系统高效应用的判定

通过前面的分析可以得知,对于不同的开采条件, U+L 型通风系统的一些参数也会不同。因此,对于某一特定的开采条件,存在 U+L 型通风系统是否高效的问题。通过对 U+L 型通风系统的作用和结构进行分析,笔者认为判定 U+L 型通风系统是否高效应用,应从 4 个方面进行分析,如图 2 所示。

1)回风巷瓦斯浓度。U+L型通风系统设立的

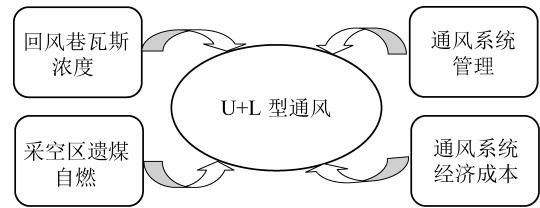


图 2 U+L 型通风系统高效应用分析

Fig.2 U+L type ventilation efficient application analysis

目的就是有效排放采空区瓦斯,降低回风巷及工作面上隅角瓦斯浓度。所以回风巷瓦斯浓度是否满足要求,是判定U+L型通风系统应用是否高效的最低条件。同时尾巷的瓦斯浓度也要满足要求。

2) 采空区遗煤自燃。U+L型通风系统在有效排放采空区瓦斯的同时,易诱发遗煤自燃。遗煤自燃对矿井的安全生产非常不利,因此能否诱发采空区遗煤自燃是判定U+L型通风系统应用是否高效的极限条件。

3) 通风系统管理。一方面 U+L 型通风系统的联络巷同时开启数量不能过多,否则会引起工作面及采空区风流紊乱,联络巷现场管理也变得复杂,不利于安全生产。另一方面,随着联络巷在采空区内位置的变化,工作面向采空区的漏风量、漏风分布及漏风管理(如设立风障等)应缓慢变化或有规律可循。

4) 经济合理。一方面要少开掘联络巷, 增加联络巷间距, 降低巷道掘进成本; 另一方面要降低采空区漏风, 提高采空区漏风排瓦斯的有效性, 降低通风成本。

2 U+L型通风系统数值模拟研究

2.1 U+L型通风系统模拟模型建立

笔者采用三维数值模拟模型对工作面 U+L 型通风系统进行模拟研究,模拟模型的建立过程如下所述。应用此模型可以对 U+L 型通风系统的采空区漏风规律、遗煤的氧化升温过程、采空区“三带”的分布特性、气体浓度场、温度场及速度场等进行模拟分析。但限于篇幅原因,笔者仅对与瓦斯排放效果相关的内容进行研究。

2.1.1 工作面 U+L 型通风系统数学模型的建立

1) 模拟基本方程的确定。工作面 U+L 型通风系统数学模型的建立依据参考文献[8]中所提到的方法,主要包括带有源项的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程及初始条件、边界条件等,限于篇幅,不再赘述。

2) U+L型工作面通风系统模拟相关参数的确定。①采空区渗透率的确定。此处采空区渗透率的确定依据文献[9]中所提供的方法,主要考虑碎胀系数与顶板压力的影响。进行模拟时,假设工作

面埋藏深度为400 m,工作面长度为200 m,采空区深度取200 m。经计算后,采空区渗透率的分布如图3所示。②采空区遗煤厚度分布。采空区遗煤厚度的分布主要依据文献[10]中所提供的方法进行确定。③采空区瓦斯涌出速度确定。采空区不同位置的瓦斯涌出速度随进入采空区深度的增加,按照负指数函数进行衰减^[11-14],如式(1)所示,其中最大涌出速度为 10×10^{-6} m/min,衰减系数为-0.08 d⁻¹;假设瓦斯涌出速度衰减到最大涌出量的10%及以下后,瓦斯涌出量为0;工作面推进速度为3 m/d,尾巷与回风巷静压差为20 Pa。

$$q = q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

式中: q 为瓦斯涌出速度,m/min; q_0 为最大瓦斯涌出速度,m/min; α 为瓦斯涌出衰减系数,d⁻¹; t 为瓦斯涌出衰减时间,d。

2.1.2 U+L型工作面通风系统几何模型的建立

几何模型建立时,假设工作面采用综放开采,开采高度为3 m,放煤高度为6 m,工作面及进回风巷宽度均为5 m,高为3 m。采空区仅对垮落带范围进行模拟,不考虑断裂带,垮落带高度按式(2)进行确定。

$$H_m = \frac{100 \sum M}{4.7 \sum M + 19} \pm 2.2 \quad (2)$$

式中: H_m 为垮落带高度,m; M 为工作面采高,m。

经计算,开采煤层为9 m时,垮落带高度为 14.71 ± 2.2 m,建立几何模型时垮落带高度取17 m。采用Fluent模拟软件进行模拟。模拟边界条件为:进风口、入风口及工作面的断面积均设定为 15 m^2 ,进风口采用速度入口,出风口采用自由出口,巷道及采空区内的通风阻力系数采用UDF方式加载。速度入口的风速根据模拟时的风量进行计算。依据前面所提供数据,建立的U+L型工作面通风系统几何模型如图4所示。

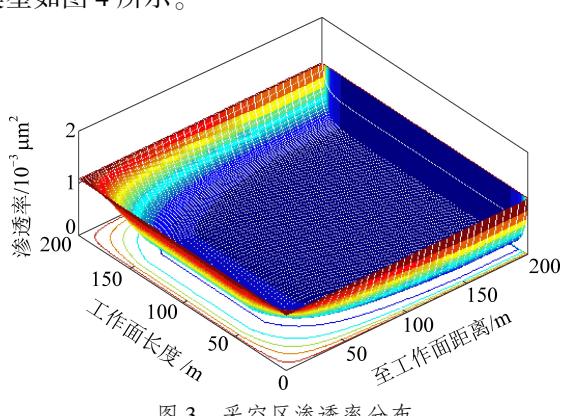


图3 采空区渗透率分布

Fig.3 Permeability distribution of goaf

随着工作面的推进,联络巷深入采空区的距离逐渐增加,即联络巷在采空区的位置不断变化。为

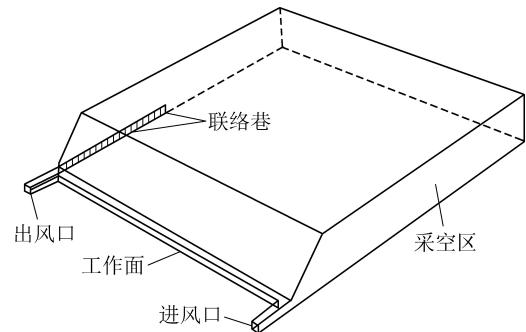


图4 U+L型通风系统模拟几何模型

Fig.4 U+L type ventilation simulation geometry model

了使模拟过程更加符合实际,在建立几何模型时取消了联络巷之间的煤柱。在模拟时,依次开启各联络巷,用于模拟联络巷不断深入采空区的过程。另外,间隔一定距离的联络巷同时开启时,可用于分析联络巷开启数量、间距对瓦斯排放的影响。在本次建立的几何模型中共建立了18个中心间距为5 m的联络巷。

2.2 U+L型通风系统的数值模拟及分析

模拟分析时,工作面供风量分别选取1 000、2 000、3 000、4 000 m³/min。依据随着工作面推进联络巷不断深入采空区的过程,联络巷由浅部到深部依次开启,同时开启数量为1个。

1)工作面供风量、联络巷距工作面距离与瓦斯浓度关系分析。应用U+L型通风系统的主要目的是治理工作面上隅角瓦斯超限问题,因此对工作面上隅角瓦斯浓度分析是衡量U+L型通风系统是否高效应用的关键。

联络巷处于采空区内不同位置时工作面不同供风量条件下的瓦斯浓度分布如图5所示,平面图的选取位置为距底板1 m处。

由图5可以看出,无论联络巷处于何处,随着工作面供风量的增加,采空区内的高瓦斯浓度区域变小,采空区内高浓度瓦斯得到有效排放。可见,工作面的供风量对采空区瓦斯的排放效果影响较大,工作面供风量越大,采空区瓦斯排放效果越好,这与现场实际情况也是相符的。但是,工作面供风量也不能过大,一方面工作面供风量过大造成无效供风,增加工作面的供风成本;另一方面工作面供风量的增加会使采空区漏风量加大,易引起采空区煤炭自燃。在实际生产中,一般要求工作面的供风量能够保证工作面上隅角瓦斯浓度不超限即可,笔者进行分析时也是依据此标准。

依据图5绘制出不同供风量条件下工作面上隅角瓦斯浓度与联络巷至工作面距离的关系曲线,如图6所示。由图6可以看出,随着供风量Q的增加,

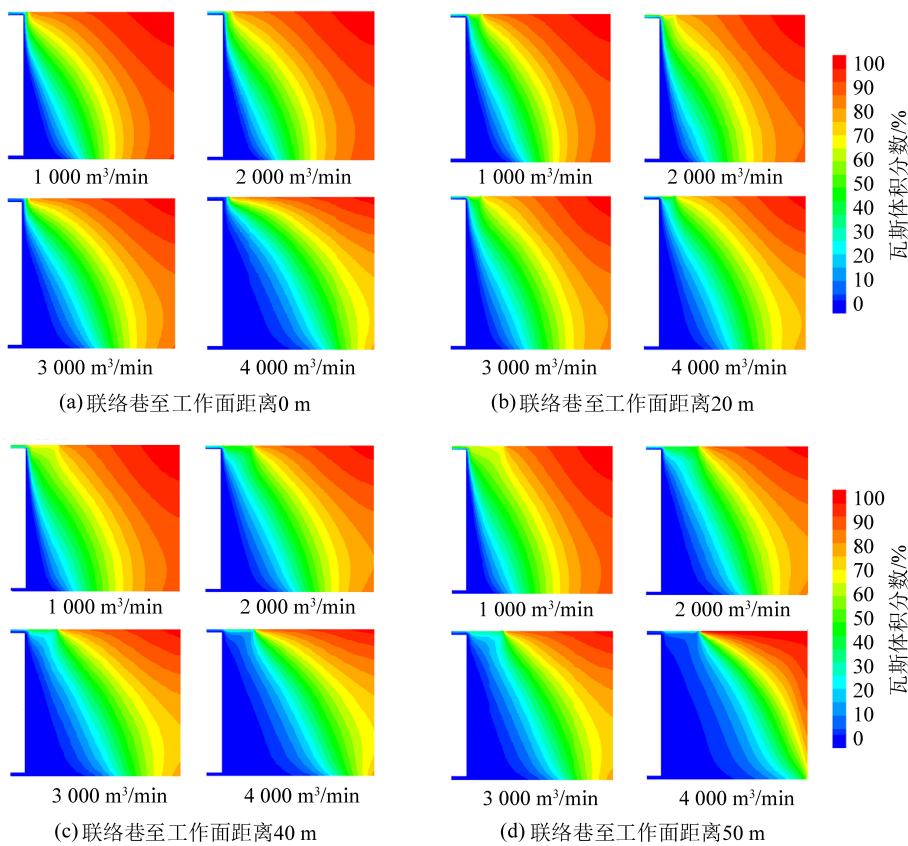


图 5 工作面不同供风量不同位置联络巷瓦斯浓度分布

Fig.5 Gas concentration distribution of connecting roadway in different positions of working face with different air supply

瓦斯浓度明显降低,且降低幅度逐渐减弱;曲线近似满足指数函数关系,且风量越低这种关系越明显;以1%作为上隅角瓦斯浓度超限标准(如图中虚线所示),当工作面供风量为1 000、2 000、3 000 m³/min时,联络巷间距分别不能大于11、34、50 m;当工作面供风量为4 000 m³/min时,无论联络巷处于何处上隅角瓦斯浓度均不超限。

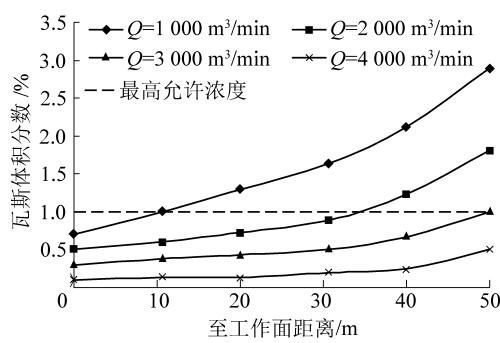


图 6 工作面上隅角瓦斯浓度与联络巷位置关系

Fig.6 Relationship between gas concentration in upper corner of working face and position of connecting roadway

联络巷处于不同位置时工作面供风量与上隅角瓦斯浓度关系曲线如图7所示。由图7可得,随着联络巷至工作面距离的增加,工作面上隅角瓦斯浓度增加,且增加幅度逐渐变大,即联络巷距离工作面越近,其对

上隅角瓦斯的治理效果越明显,这一点与现场实际情况也是相符的。曲线近似满足负指数函数关系,且联络巷至工作面距离越大这种关系越明显。以1%作为上隅角瓦斯体积分数超限标准(如图中虚线所示),当联络巷至工作面距离L为10、20、30、40、50 m时,为了使工作面上隅角瓦斯浓度不超限,工作面的供风量分别不得低于1 000、1 500、1 800、2 400、3 000 m³/min。

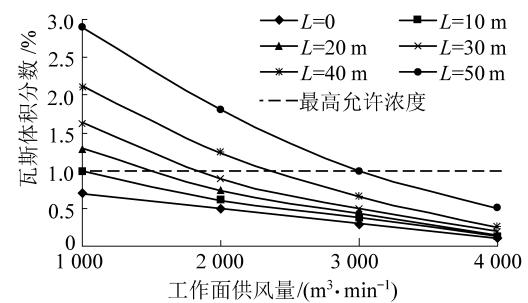


图 7 工作面上隅角瓦斯浓度与工作面供风量关系

Fig.7 Relationship between gas concentration in upper corner of working face and air supply of working face

2)工作面供风量、联络巷距工作面距离与氧化带宽度关系分析。依据与图5相对应的采空区氧气浓度分布示意,可以得到联络巷距工作面不同位置处工作面供风量与采空区氧化带宽度的关系曲线图,如图8所示。

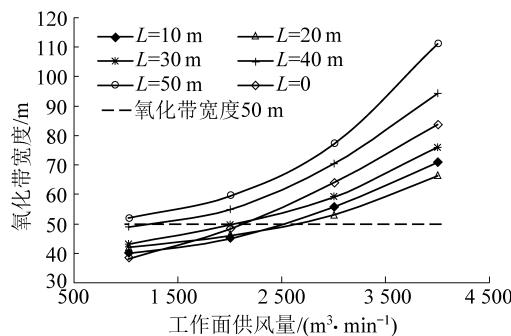


图8 联络巷处于不同位置时工作面供风量与氧化带宽度的关系

Fig.8 Relationship between air supply volume of working face and width of oxidation zone in different positions of connecting roadway

由图8可以看出,无论联络巷处于何处,工作面供风量的增加都会使采空区氧化带宽度的增加,且风量越大,氧化带宽度的增加幅度越大,曲线近似满足指数函数关系,且联络巷至工作面距离L越大,这种关系越明显;当L>30 m时,L越大,工作面供风量的变化对采空区氧化带宽度的影响越明显。当L<30 m时,随着工作面供风量的增加,氧化带宽度变化曲线出现交叉,风量增加对L=20 m时的氧化带宽度变化影响最弱。

假设采空区允许的最高氧化带宽度为50 m,如图8中虚线所示,依据虚线与各氧化带宽度变化曲线的焦点可以得知,当联络巷间距设定为40、30、20、10 m时,工作面供风量分别不应大于1 200、1 900、2 200、2 000 m^3/min 。

3)U+L型通风系统高效排放瓦斯方案确定。通过前面的研究得知,工作面供风量、上隅角瓦斯浓度对联络巷位置的合理确定均存在较大影响。在给定的模拟条件下,假设采空区氧化带最大允许宽度为50 m,以1%作为工作面上隅角瓦斯体积分数超限标准,通过综合分析,得到在不采取遗煤自燃防治措施情况下的联络巷高效排放瓦斯技术方案。当工作面供风量为1 000、2 000 m^3/min 时,联络巷的间距不能大于11、34 m;当工作面供风量为3 000、4 000 m^3/min 时,联络巷易引起采空区遗煤自燃。当联络巷间距设定为10、20、30 m时,工作面供风量见表1。当联络巷间距为40、50 m时,工作面供风量无法同时满足上隅角瓦斯浓度不超限及采空区氧

表1 联络巷至工作面距离与供风量关系

Table 1 Relationship between distance of connecting roadway to working face and air supply

联络巷至工作面距离/m	10	20	30
供风量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	1 000~2 000	1 500~2 200	1 800~1 900

化带宽度小于50 m的要求。

3)如果所需方案与上述两方案中的工作面供风量、巷道间距不同,可采用插值法进行确定。

3 结 论

1)针对工作面U+L型通风系统的特性,给出了U+L型通风系统高效应用的影响因素及判定方法。建立了综放工作面U+L型通风系统模拟模型,给出了各参数的确定方法。利用模型对工作面不同供风量、联络巷距工作面距离条件下的采空区瓦斯气体浓度场分布进行了模拟分析。

2)获得了不同供风量条件下工作面上隅角瓦斯浓度与联络巷距工作面距离的关系曲线,曲线近似满足指数函数关系,且风量越低这种关系越明显。以1%作为上隅角瓦斯体积分数超限标准,当工作面供风量为1 000、2 000、3 000 m^3/min 时,联络巷间距分别不能大于11、34、50 m;当工作面供风量为4 000 m^3/min 时,无论联络巷处于何处上隅角瓦斯浓度均不超限。

3)获得了联络巷处于不同位置时工作面供风量与上隅角瓦斯浓度关系曲线,曲线近似满足负指数函数关系,且联络巷距工作面距离越大这种关系越明显。以1%作为上隅角瓦斯体积分数超限标准,当联络巷间距为10、20、30、40及50 m时,为了使工作面上隅角瓦斯浓度不超限,工作面的供风量分别不得低于1 000、1 500、1 800、2 400、3 000 m^3/min 。

4)获得了联络巷距工作面不同位置处工作面供风量与采空区氧化带宽度的关系曲线,并给出了2套联络巷高效排放瓦斯技术方案,并对下一步的研究进行了展望。

参考文献(References) :

- [1] 程卫民,张孝强,王刚.综放采空区瓦斯与遗煤自燃耦合灾害危险区域重建技术[J].煤炭学报,2016,41(3):662-671.
CHENG Weimin, ZHANG Xiaoqiang, WANG Gang. Reconstruction technology of gas and coal spontaneous combustion coupled hazard in fully mechanized caving goaf [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3):662-671.
- [2] 余陶.采空区瓦斯与煤自燃复合灾害防治机理与技术研究[D].合肥:中国科学技术大学,2014:78-93.
- [3] 翟小伟,来兴平.瓦斯矿井工作面火区封闭后爆炸危险性快速预测方法[J].煤炭学报,2016,41(9):2251-2255.
Zhai Xiaowei, LAI Xingping. Rapid prediction method for explosion hazard in gas mine after sealing fire working face [J]. Journal of China Coal society, 2016, 41(9):2251-2255.
- [4] 贺飞.U+L型通风工作面采空区自燃危险区域变化规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013:35-54.

[5] 张学博,靳晓敏.U+L型通风综采工作面采空区漏风特性研究[J].安全与环境学报,2015,15(4):59-63.
ZHANG Xuebo, JIN Xiaomin. Study on air-leakage characteristics of U + L type ventilation in goaf of fully mechanized face [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(4):59-63.

[6] 张学博,张帆.U+L型通风综采面合理挡风帘长度确定[J].中国安全生产科学技术,2016,12(1):153-168.
ZHANG Xuebo, ZHANG Fan. Determination on reasonable length of wind curtain for U + Ltype ventilation in fully mechanized face [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(1):153-168.

[7] 丁厚成.U+L型通风采空区瓦斯运移数值模拟与实验研究[J].自然灾害学报,2012,21(6):192-198.
DING Houcheng. Numerical simulation and experiment research on gas migration in goaf under U+L type ventilation [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(6):192-198.

[8] 张春,题正义,李宗翔.内含瓦斯抑制条件下极限平衡区顶煤自燃模拟[J].中国矿业大学学报,2013,42(1):57-61.
ZHANG Chun, TI Zhengyi, LI Zongxiang. Numerical simulations of top coal spontaneous combustion in limit equilibrium zone under conditions of gas infuence[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1):57-61.

[9] 张春,题正义,李宗翔.综放采空区遗煤自燃的三维数值模拟研究[J].中国安全科学学报,2013,23(5):15-21.
ZHANG Chun, TI Zhengyi, LI Zongxiang. Three - dimension nu-
merical simulation of residual coal spontaneous combustion in goaf in fully mechanized caving face[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(5):15-21.

[10] 张春,题正义,李宗翔.综放采空区遗煤厚度的分布规律及模拟研究[J].安全与环境学报,2012,12(6):203-207.
ZHANG Chun, TI Zhengyi, LI Zongxiang. Simulation study on the thickness of residual coal of goaf via the fully mechanized caving mining and the coal distribution regularity[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(6):203-207.

[11] 程远平.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,2017:22-28.

[12] 褚廷湘,余明高,姜德义.“U+I”型采煤工作面采空区瓦斯抽采量理论研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(6):1008-1016.
CHU Tingxiang, YU Minggao, JIANG Deyi. Theory of gas extraction amount in the gob of “U+I”type panel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44 (6): 1008-1016.

[13] 周伟,袁亮,张国亮.采空区瓦斯涌出来源量化判识方法[J].煤炭学报,2018,43(4):1016-1023.
ZHOU Wei, YUAN Liang, ZHANG Guoliang. A new method for determining the individual sources of gas emissions[J]. Journal of China Coal society, 2018, 43(4):1016-1023.

[14] 王德明.矿井火灾[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011:115-117.