

张春,李集明,程诗禹,等. 基于遗煤自燃防治的综放工作面合理推进速度的确定[J]. 矿业安全与环保,2017,44(1):98-101.

文章编号:1008-4495(2017)01-0098-04

基于遗煤自燃防治的综放工作面合理推进速度的确定

张 春,李集明,程诗禹,高鑫浩,姚立洪

(辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘要:为了研究综放工作面推进速度对采空区遗煤自燃的影响规律,采用理论分析、数值模拟、相似模拟及回归分析等方法,对工作面推进速度与工作面采出率、采空区应力场、孔隙率分布规律、漏风量,以及氧化带宽度的关系进行了研究,得到工作面推进速度与各因素的函数关系,以及工作面推进速度的合理确定方法。分析结果表明:防止遗煤自燃的工作面推进速度存在下限值和上限值,当利用上限值和下限值估算的工作面合理推进速度范围存在并且具有较大变化空间时,再对采出率加以考虑,即可得到有效防止遗煤自燃的合理工作面推进速度;当此范围不存在或范围较小时,说明提高工作面推进速度不能防止遗煤自燃,这时工作面的合理推进速度应主要依据采出率进行确定。工作面推进速度越小,与氧化带宽度的关系曲线越平缓,提高推进速度越有利于防止遗煤自燃。

关键词:工作面推进速度;遗煤自燃;采出率;数值模拟;氧化带

中图分类号:TD75⁺2.2

文献标志码:B

网络出版时间:2017-02-07 18:13

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1062.TD.20170207.1813.032.html>

Determination of Reasonable Advancing Speed of Fully Mechanized Top-coal Caving Face Based on Prevention and Control of Residual Coal Spontaneous Combustion

ZHANG Chun, LI Jiming, CHENG Shiyu, GAO Xinhao, YAO Lihong

(School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study the effect laws of the advancing speed of the working face on the residual coal spontaneous combustion in the gob, study was carried out in this paper on the the relationships of the advancing speed of the working face with the recovery rate, the distribution rule of the stress field and the porosity in the gob, the air leakage and the width of oxidation zone by means of the theoretical analysis, numerical simulation, similar simulation and regression analysis, the functional relations of the advancing speed of the working face with each factor and the reasonable determination method for the advancing speed of the working face were obtained. The analysis results showed that the lower limit and upper limit of the advancing speed of the working face existed for the prevention of residual coal spontaneous combustion, when there was a range of the reasonable advancing speed of the working face which was estimated with the lower and upper values, it had a larger changing space and the recovery rate was taken into consideration, the reasonable advancing speed of the working face for the effective prevention of residual coal spontaneous combustion can be obtained; when this range did not exist or was small, it indicated that the increase of the advancing speed of the working face can't prevent the residual coal spontaneous combustion, then the reasonable advancing speed of the working face should be determined by the recovery rate. If the advancing speed was slower and the relation curve with the width of the oxidation was more gentle, the increase of the advancing speed of the working face was more beneficial to the prevention of residual coal spontaneous combustion.

Keywords: advancing speed of working face; residual coal spontaneous combustion; recovery rate; numerical simulation; oxidation zone

收稿日期:2016-05-04;2016-11-15 修订

基金项目:国家自然科学基金项目(51374121,51404131)

作者简介:张 春(1979—),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,主要从事矿井火灾防治方面的研究工作。E-mail:zhang_chun_110@163.com。

工作面推进速度对采空区遗煤自燃具有较大影响,合理提高工作面推进速度有利于对采空区遗煤自燃的防治,这一点已被实践所证明。国内已有一些矿井采用提高工作面推进速度的方法来防止遗煤自燃,并且取得了较好的效果,如神东矿区采用先进

可靠的大功率重型综采设备,实现了快速开采,大大降低了矿区自燃的危险^[1]。然而,在实际生产过程中,尤其是放顶煤开采,提高工作面的推进速度往往需要考虑诸多因素,需要反复实践才能确定出比较合理的工作面推进速度。因为提高工作面推进速度往往以牺牲煤炭的采出率、投入大量的人力和物力为代价,从经济学的角度考虑,工作面推进速度并非是越大越好。另外,顶板的移动与工作面推进速度相比,存在一定滞后性,这种滞后性一般对采空区遗煤自燃的防治是不利的,而这一点在以往的研究中却很少被考虑到;同时,在提高工作面推进速度的过程中,工作面的瓦斯绝对涌出量往往也会增加,一般需要提高工作面的供风量来降低瓦斯浓度,而工作面供风量的增加又会使采空区漏风量增加,这也不利于遗煤自燃的防治。因此,工作面推进速度的提高是否有利于煤炭自燃的防治,还需要进行科学分析。同时,制订一个科学的确定工作面合理推进速度的方法,可减少试验次数、提高工作面采出率,同时可保障经济效益、防止遗煤自燃等。

工作面推进速度受许多因素的影响,如工作面长度、生产工艺、煤层厚度、采煤机的开机率、煤层埋藏条件,以及工人对各工序掌握的熟练程度等。在此,笔者对综放工作面推进速度进行分析,以U型综放工作面推进速度的合理确定为例,主要考虑工作面长度、煤层厚度两个因素。

1 工作面推进速度与采出率的关系分析

采出率除了会影响矿井的经济效益、资源利用率以外,还会影响遗煤的自燃。通常情况下,采空区遗煤越多即采出率越低,遗煤越容易发生自燃。通过理论分析可知,工作面长度及煤层厚度与工作面推进速度近似呈正比线性关系,为了便于比较分析,此处所用现场工作面推进速度数据均转化为工作面长度为200 m,煤层厚度为6 m条件下的工作面推进速度,转换公式如下:

$$v_z = v_y \cdot \frac{l_y}{200} \cdot \frac{m_y}{6} \quad (1)$$

式中 v_z ——转换后的工作面推进速度,m/d;
 v_y ——原工作面推进速度,m/d;
 l_y ——原工作面长度,m;
 m_y ——原工作面煤层厚度,m。

工作面采出率通常由两部分构成^[2],一部分为采煤机割煤高度范围内的采出率;另一部分为顶煤的放出率。通过理论分析,受第一部分煤体影响的工作面采出率与顶煤放出率及割煤高度内煤体的采

出率近似满足如下关系式:

$$p_z = \frac{(p_f + p_c \theta)}{1 + \theta} \quad (2)$$

式中 p_z ——工作面采出率,%;
 θ ——工作面的采放比;
 p_f ——工作面的顶煤放出率,%;
 p_c ——割煤高度内煤体的采出率,一般为95%左右。

对相似模拟数据进行整理,得到工作面推进速度与采出率近似满足二次抛物线函数关系式^[3]:

$$p_z = -0.566v^2 + 2.0304v + 87.473 \quad (3)$$

式中 v 为工作面推进速度,m/d。

由相似模拟数据还可以看出,当工作面推进速度较小时(小于3 m/d),工作面的采出率及顶煤的放出率随着工作面推进速度的增大而增大,但变化幅度较小;当工作面推进速度较大时(大于3 m/d),工作面的采出率及顶煤的放出率随着工作面推进速度的增大而减小,并且工作面推进速度越大,变化的幅度也越大;当工作面推进速度约为3 m/d时,工作面的采出率及顶煤的放出率达到最大值,即在此开采条件下,工作面以3 m/d的推进速度进行开采其经济效益最佳,对防止遗煤自燃最为有利。

2 工作面推进速度与采空区“自燃三带”关联性分析

2.1 工作面推进速度对采空区应力场、孔隙率的影响

依据工作面顶板应力分布规律可知^[4],在工作面两侧的进、回风巷及推进方向,采空区的应力场存在应力降低区。随着工作面的推进,进、回风巷两侧的应力降低区逐渐延长,而工作面推进方向的应力降低区会随着工作面前移,区域宽度基本保持不变,原来的应力降低区会逐渐恢复成原岩应力区,随着应力的增高,此区域的孔隙率也会减小。

图1为工作面推进方向的采空区应力降低区的应力分布示意图。假设此区域的宽度为 L ,两边界处的应力分别为0和 γH (原岩应力),则距边界 X 处的应力 P_x 为:

$$P_x = \frac{X}{L} \gamma H \quad (4)$$

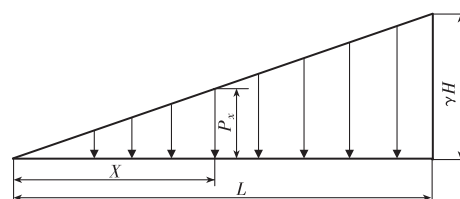


图1 采空区走向边界应力分布示意图

图2为采空区进、回风巷两侧应力降低区应力分布示意图。假设应力降低区的宽度为 Z ,两端边界处应力大小分别为0和 P_x ,则距煤柱边界 Y 处的应力 P_{xy} 为:

$$P_{xy} = \frac{Y}{Z} P_x \quad (5)$$

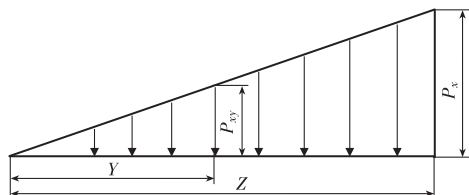


图2 采空区倾向边界应力分布示意图

由于顶板的移动滞后于工作面的推进,当工作面推进速度增大时,工作面推进方向的采空区应力降低区域会变宽,如图3所示,应力降低区域宽度将由 L 增至 $L(v)$ 。工作面推进速度增大得越多,一般应力降低区宽度的增大值也会越大,而应力的减小,又会使破碎煤岩孔隙率变大。

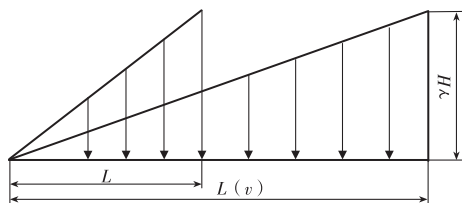


图3 工作面推进速度增大时采空区边界应力分布变化图

依据理论分析及相关观测数据,得到工作面推进速度与工作面推进方向采空区应力降低区宽度的关系曲线,如图4所示。

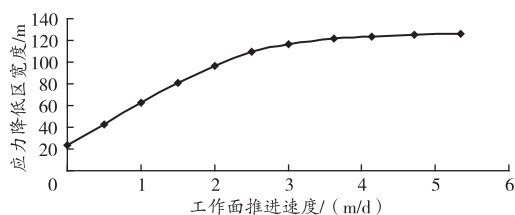


图4 工作面推进速度与应力降低区宽度的关系曲线

由图4可以看出,工作面推进速度与采空区应力降低区宽度近似满足负指数函数关系。随着工作面推进速度的增大,采空区应力降低区宽度也逐渐增大,但增大幅度逐渐减小,最后几乎无变化,这与实际生产情况相符。

依据图4的关系曲线,假设工作面推进速度与采空区应力降低区宽度的函数关系式为^[5-6]:

$$L = \alpha - \beta e^{-\eta v} \quad (6)$$

式中 α 、 β 、 η 为待定系数。

经回归分析得到图4中曲线的函数表达式近似为:

$$L = 128.66 - 105.36e^{-0.61v} \quad (7)$$

式(7)的相关系数为0.97。对于不同的开采条件,式(7)中的各系数会有一定变化,但总体上还是应满足关系式(6)。

通过理论分析及现场实测^[4,7],得到采空区某处的应力与其孔隙率近似满足如下关系:

$$n = 1 - \frac{1}{Ae^{-\sigma} + B} \quad (8)$$

式中 n ——破碎煤岩的孔隙率;

σ ——采空区某处应力,kPa;

A ——待定系数, $A = \frac{(K_1 - K_0)e^{\gamma H}}{1 - e^{\gamma H}}$;

B ——待定系数, $B = \frac{K_0 - K_1 e^{\gamma H}}{1 - e^{\gamma H}}$;

K_0 ——破碎煤岩的初始碎胀系数;

K_1 ——破碎煤岩的残余碎胀系数。

2.2 工作面推进速度与采空区漏风量的关系

在实际生产过程中,工作面推进速度的提高会伴随着工作面绝对瓦斯涌出量的增加,为了降低风流中的瓦斯浓度则需要加大工作面的供风量,而供风量的加大又会增加采空区的漏风量。

理论分析得知,工作面推进速度与其瓦斯涌出量近似满足如下关系:

$$Q = Q_0 + \frac{kv}{24 \times 60} \quad (9)$$

式中 Q ——工作面推进速度为 v 时的瓦斯涌出量, m^3/min ;

Q_0 ——工作面推进速度为0时的瓦斯涌出量, m^3/min ;

k ——基于工作面推进速度的瓦斯涌出梯度, m^3/m 。

采煤工作面供风量可按下式确定:

$$Q_1 = 100Qk_1 \quad (10)$$

式中 Q_1 ——工作面推进速度为 v 时的工作面供风量, m^3/min ;

k_1 ——备用系数,此处取1.1。

采用数值模拟和相似材料模拟两种方法来分析工作面推进速度与采空区漏风量之间的关系。模拟分析时,以改变工作面供风量的方式代替改变工作面推进速度。假设工作面长200 m,煤层厚度6 m,割煤高度3 m,放煤高度3 m,瓦斯含量 $7 m^3/t$, Q_0 为 $3 m^3/min$, k 为 $2880 m^3/m$ 。

依据模拟数据得到采空区漏风量 $Q_{漏}$ 与工作面

推进速度之间近似满足抛物线关系:

$$Q_{\text{漏}} = 0.4275v^2 - 0.5594v + 3.6641 \quad (11)$$

2.3 工作面推进速度与采空区“自燃三带”宽度的关系

提高工作面推进速度能够防止遗煤自燃,主要原因是缩短了遗煤的氧化升温时间,即减少了遗煤在采空区氧化带内的停留时间。分析可知,工作面推进速度的提高可以扩大采空区大孔隙率区域及增加采空区漏风,这又会增大采空区“自燃三带”的宽度。因此,工作面推进速度的提高是否有利于遗煤自燃的防治还需要进行对比分析。

在遗煤自燃防治方面,工作面存在一个防止遗煤自燃的最低推进速度^[8]。假设工作面推进速度为 v_0 ,采空区氧化带宽度为 L_0 ,遗煤的自然发火期为 T_s ,则工作面防止遗煤自燃的最低推进速度为:

$$v_0 \geq \frac{L_0}{T_s} \quad (12)$$

在理论上,只要工作面推进速度满足式(12)即可保证遗煤不发生自燃。但在实际生产过程中,由于生产条件的变化及设备发生故障等原因会使生产停滞,降低工作面推进速度,若工作面以最低推进速度进行开采,则极易引起遗煤自燃。因此,工作面的实际推进速度要尽可能比最低推进速度大得多些,这样就可以有充分的时间处理设备故障等问题。

假设工作面推进速度由 v_0 提高到 v_1 ,同时采空区氧化带的宽度也由 L_0 提高到 L_1 ,两个时期遗煤氧化升温时间为 T_0 和 T_1 ,则可以得知 $T_0 = L_0/v_0$, $T_1 = L_1/v_1$ 。如果 $T_0 > T_1$,则工作面推进速度的提高有利于遗煤自燃的防治,反之则反。

通过前面的分析可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} \frac{L_0}{L_1} > \frac{v_0}{v_1} & (\text{有利}) \\ \frac{L_0}{L_1} \leq \frac{v_0}{v_1} & (\text{不利}) \end{cases} \quad (13)$$

采用数值模拟和相似材料模拟的方法来分析工作面推进速度与采空区“三带”(主要指氧化带)之间的关系^[9-10]。假设工作面长200 m,煤层厚6 m,割煤高度3 m,放煤高度3 m,埋深300~400 m,计算取采空区走向长度200 m,破碎煤岩碎胀系数为1.15~1.45, γ 取23 kN/m³,采空区漏风量按式(11)进行确定。以氧的体积分数8%作为遗煤氧化下限;以漏风流速度0.02 m/s作为遗煤升温边界。

依据模拟数据得到工作面推进速度与采空区氧化带宽度 L_{O_2} 近似满足抛物线关系:

$$L_{O_2} = 2.8794v^2 - 0.2291v + 25.756 \quad (14)$$

为了能够从理论上判断提高工作面推进速度是否合理,需要对式(13)进行变形分析。当工作面推进速度对防止遗煤自燃有利时,式(13)可以改写为:

$$\frac{L_1 - L_0}{v_1 - v_0} < \frac{L_0}{v_0} \quad (15)$$

结合图5对式(15)的含义进行分析,不等式左侧表示A、B两点连线的斜率,不等式的右侧表示直线OA的斜率;当直线AB的斜率小于直线OA的斜率时,工作面推进速度由 v_0 提高到 v_1 对防止遗煤自燃有利,相反则不利于遗煤自燃防治。从前面已分析的工作面推进速度与采空区氧化带宽度近似满足二次抛物线函数关系,结合图5可以看出,当工作面推进速度较小时,式(15)较易满足,即工作面推进速度的提高有利于遗煤自燃的防治;随着工作面推进速度的不断增大,其对遗煤自燃防治的作用逐渐减小,最终会转变成不利于遗煤自燃的防治;关系曲线越平缓,工作面推进速度的提升空间越大。

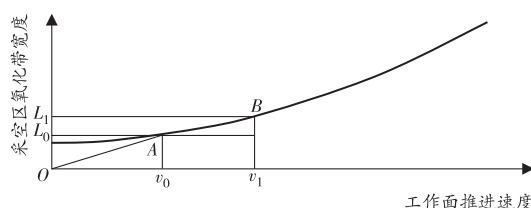


图5 工作面推进速度与采空区氧化带宽度的关系曲线

依据式(14),假设工作面推进速度与采空区氧化带宽度的关系式为 $L_{O_2} = av^2 + bv + c$,其中 a 、 b 、 c 为待定系数。根据式(15)可以得到关系式 $2av + b < av + b + c/v$ 。整理关系式,得到其解为:

$$v < \sqrt{\frac{c}{a}} \quad (16)$$

当工作面推进速度满足式(16)时,工作面推进速度的提高有利于遗煤自燃的防治,反之则反。根据式(16)可以得知式(14)中有利于遗煤自燃防治的最大推进速度约为3 m/d。

在实际生产过程中,如果利用式(16)及式(12)估算的工作面合理推进速度范围存在,并且推进速度有较大的变化空间,再对工作面推进速度与采出率的关系加以考虑,即可得到能够有效防止遗煤自燃的合理工作面推进速度。如果工作面合理推进速度的范围不存在或范围较小,就说明提高工作面推进速度不能够防止遗煤的自燃,这时工作面的合理推进速度应主要依据其与采出率的关系进行确定,同时在工作面推进的过程中,还要附以灌浆、喷洒阻化剂等遗煤自燃的防治措施。

(下转第105页)

参考文献:

- [1] 李建铭. 煤与瓦斯突出防治技术手册[K]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [2] 张红日, 张文泉. 构造煤特征及其与瓦斯突出的关系[J]. 山东矿业学院学报, 1995, 14(4): 343-348.
- [3] 孙贤斌, 孙东玲. 突出预测指标 K_1 和 f 值确定临界值试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27(4): 23-25.
- [4] 富向, 王魁军, 杨天鸿. 构造煤的瓦斯放散特征[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 775-779.
- [5] 富向. 最小突出压力下瓦斯瞬时放散速度指标的实验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2005.
- [6] 杨其奎, 王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1986(3): 87-94.
- [7] 陈瑞端. 煤层瓦斯涌出规律及其深部开采预测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1996.
- [8] 何学秋. 交变电磁场对煤吸附瓦斯特性的影响[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 63-67.
- [9] 张力, 何学秋, 王思元, 等. 煤吸附特性的研究[J]. 太原

理工大学学报, 2001, 32(4): 449-451.

- [10] LANGMUIR I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids [J]. J. Amer. Chem. Soc., 1916, 38: 2221-2295.
- [11] LANGMUIR I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum [J]. J. Amer. Chem. Soc., 1918, 40: 1361-1403.
- [12] 周世宁. 瓦斯在煤层流动的机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 61-67.
- [13] 何龙庆, 林继成, 石冰. 菲克定律与扩散的热力学理论[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版), 2006, 12(4): 38-39.
- [14] 孙重旭. 煤样解吸瓦斯泄出的研究及突出煤层煤样瓦斯解吸的特点[Z]. 重庆: 煤炭科学研究院重庆研究所, 1981.
- [15] 曹焱林. 高压吸附下的瓦斯放散初速度研究[J]. 煤矿安全, 2004, 35(9): 4-6.

(责任编辑: 李 琴)

=====

(上接第 101 页)

3 结论

1) 依据理论分析及相似模拟方法, 得到综放工作面采出率的确定方法, 工作面推进速度与采出率近似满足二次抛物线函数关系。

2) 工作面推进速度与采空区应力降低区宽度近似满足负指数函数关系; 工作面推进速度与采空区漏风量近似满足抛物线函数关系。

3) 依据数值模拟、相似模拟及理论分析, 得到防止遗煤自燃的最低工作面推进速度及提高工作面推进速度是否有利于防止遗煤自燃的函数表达式。工作面推进速度与采空区氧化带宽度近似满足抛物线函数关系。

4) 依据理论分析得到了判定提高工作面推进速度是否有利于遗煤自燃防治的方法。工作面推进速度越小, 关系曲线越平缓, 工作面推进速度的提高越有利于遗煤自燃的防治。

参考文献:

- [1] 秦波涛, 王德明. 矿井防灭火技术现状及研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(12): 80-85.

- [2] 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.
- [3] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [4] 张春, 题正义, 李宗翔. 采空区加荷应力场及其多场耦合研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(3): 50-54.
- [5] 张春, 题正义, 李宗翔. 综放支承压力峰值位置的理论与回归分析[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 88-93.
- [6] 谢广祥, 常聚才, 华心祝. 开采速度对综放面围岩力学特征影响研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 963-967.
- [7] 高建良, 王海生. 采空区渗透率分布对场流的影响[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(3): 85-89.
- [8] 邓军, 孙战勇. 综放面自燃危险区域及最小推进速度确定[J]. 西安科技学院学报, 2002, 22(2): 119-122.
- [9] 李宗翔, 许端平, 刘立群. 采空区自然发火“三带”划分的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 55-79.
- [10] 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.

(责任编辑: 卫 蓉)