

综掘工作面风幕集尘风机除尘系统设计及试验研究

贾宝山^{1,2}, 汪 伟^{1,2}, 祁 云^{1,2}, 刘雅俊^{1,2}, 李守国^{1,3}

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室(辽宁工程技术大学), 辽宁 葫芦岛 125000; 3. 煤科集团沈阳研究院有限公司 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 沈阳 113112)

摘 要:为了解决煤矿综掘工作面掘进过程中粉尘浓度过高,影响矿井安全生产的问题,设计了一种利用风幕集尘风机形成合理的控尘流场,防止综掘工作面高浓度含尘风流外溢的新型高效的风幕集尘风机除尘系统。基于流体力学理论和势流叠加原理,建立了受限空间内风机流场的数学模型,为了验证数学模型的合理性,进而在地面搭建了宽 2.8 m、高 2.3 m、长 12 m 的模拟巷道进行了风幕射流速度衰减试验。结果表明:风幕射流出口速度初期衰减较快,后期衰减变缓,数学模型所计算理论风速与实测风速基本一致,数学模型正确可靠;整体径向射流风幕需要封住的空间断面内,实测风速都在 2 m/s 以上,能够有效抑制粉尘颗粒向外逸散,可以在煤矿井下实际安装应用。

关键词:综掘工作面;风幕集尘风机;通风除尘;环形射流;平行平面流

中图分类号:TD714

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)04-0141-05

Experiment study and design on dust removal system in air curtain dust collector of mine roadway heading face

JIA Baoshan^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, QI Yun^{1,2}, LIU Yajun^{1,2}, LI Shouguo^{1,3}

(1. School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. MOE Key Lab of Mine Thermodynamic Disasters and Prevention and Control, Liaoning Technical University, Huludao 125000, China; 3. State Key Lab of Coal Mine Safety Technology, CCTEG Shenyang Research Institute, Shenyang 113112, China)

Abstract: In order to solve the dust concentration too high occurred in the heading process of the fully-mechanized heading face in the coal mine and the dust affected to the safety production of the mine, a dust flow control field rationally set up with an air curtain dust collector was designed and was a dust removal system of a new high efficient air curtain dust collector to prevent the high concentrated dust air flow from the fully-mechanized heading face. Based on the fluid mechanics theory and the potential flow superposition principle, a mathematical model of the fan flow field within the limit space was established. In order to prove the rationality of the mathematical model, a mine simulated roadway with a width of 2.8 m, a height of 2.3 m and a length of 12 m was set up on the surface ground for the attenuation experiment of the air curtain jet velocity. The results showed that the outlet velocity of the air curtain jet was fast at the initial attenuation period and the late attenuation was slow down. The theoretical air velocity of the mathematical model was the same to the site measured air velocity and the mathematical model was correct and reliable. The overall radial jet air curtain would be required to be sealed within the space of the cross section, the site measured air velocity was over 2 m/s, could effectively control the outward emission of the dust particles and could be assembled and applied in the underground mine.

Key words: fully-mechanized heading face; air curtain dust collector; ventilation dust removal; annular jet; parallel plane flow

0 引 言

由于煤矿井下掘进作业的机械化水平不断提

高,岩石的破碎程度大增,致使掘进工作面工作环境可呼吸性粉尘浓度偏高,粉尘的分散度偏大。积聚在综掘工作面的粉尘不仅会导致工人患尘肺病,当

收稿日期:2017-11-20;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.04.024

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174109);国家科技重大专项资助项目(2011ZX05041-003)

作者简介:贾宝山(1972—),男,河北阜平人,教授,博士生导师,博士。E-mail:jbs1972@126.com

引用格式:贾宝山,汪 伟,祁 云,等.综掘工作面风幕集尘风机除尘系统设计及试验研究[J].煤炭科学技术,2018,46(4):141-145,152.

JIA Baoshan, WANG Wei, QI Yun, et al. Experiment study and design on dust removal system in air curtain dust collector of mine roadway heading face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 141-145, 152.

其浓度达到一定程度还会引发煤尘爆炸,给煤矿正常生产带来极大的安全隐患^[1-3]。目前国内大部分矿井综掘工作面的粉尘治理措施仍为通风排尘、煤层注水、喷雾降尘和个体防护等,这些技术虽然从一定程度上降低了综掘工作面的粉尘浓度,但受到井下作业条件的限制及技术自身的不足,无法从根本上控制粉尘扩散^[4]。

鉴于以往的粉尘治理方式不能达到预期的防尘效果,利用风幕技术防治综掘工作面粉尘污染越来越成为研究的重点^[5-6]。谢别列夫等^[7]最先将风幕技术应用到煤矿井下,分析了井下条件风幕隔断效果的影响因素。GUYONNAUD等^[8]给出了影响风幕装置几何和动力条件的变量函数,但没能推导出通用的风幕设计计算公式。刘雅俊等^[9]研制出一种风幕集尘风机,实现了对综掘工作面粉尘的有效控制,并提出短路流场理论。刘荣华等^[10-11]首先将旋转射流屏蔽通风新技术用于综掘工作面粉尘治理,通过分析旋转射流屏蔽通风作用效果,得出了旋转射流屏蔽通风的控尘机理。张大明等^[12]通过对综掘工作面风幕控尘除尘系统的防尘效果进行数值模拟研究,确定了风幕控尘除尘技术的最佳工况参数。

虽然上述研究使风幕技术在粉尘治理方面取得较大进展,但是目前关于风幕集尘装置流场数学模型的研究仍十分缺乏,从而给确定风幕集尘装置各项物理参数与粉尘捕集有效风速、有效范围之间的关系带来严重限制。因此,笔者结合前人研究成果,设计了一套风幕集尘风机除尘系统,并依据流体力学理论和势流叠加原理,建立受限空间内风幕集尘风机流场的数学模型,通过在模拟巷道进行试验,验证数学模型及利用射流风幕隔挡粉尘逸散的可行性,为提高综掘工作面粉尘污染治理效果提供理论指导。

1 综掘工作面粉尘产生的机理及危害

在煤矿井下,综掘工作面的产尘量仅次于综采工作面。综掘工作面的粉尘基本上来自综掘机的截割过程:截齿截割煤岩时,煤岩因受到截齿挤压,在接触点位置产生很高的接触应力,接触应力随着截割力的增加逐渐达到煤岩能够承受的应力极限值,煤岩率先在接触点发生破裂。随着截齿的前进,这部分破碎体会再次被挤压形成压固核。截齿的能量则通过压固核解除约束状态,其自身积聚的能量也

被释放出来,最终进入运动的气流中扩散,形成粉尘^[13-14]。

综掘机的连续工作不仅产生大量的煤尘,而且会产生大量的岩尘、土尘。这些粉尘严重影响煤矿井下的生产安全。综掘工作面在没有防尘措施的情况下,全尘质量浓度为 $1\ 200\sim 1\ 500\text{ mg/m}^3$,其中呼吸性粉尘质量浓度高达 $800\sim 900\text{ mg/m}^3$,远超过国家规定的标准。高浓度粉尘引发煤尘爆炸,造成大量财产损失和人员伤亡,粉尘附着在设备表面,还会加剧设备损坏。此外,粉尘对人体呼吸系统具有很大危害,特别是粒径小于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的可呼吸性粉尘,它可以避开呼吸系统的保护,直接进入支气管及肺泡,工人长期在这样的环境下工作,极容易引发尘肺病^[15]。

2 风幕集尘风机除尘系统工作原理

综掘工作面风幕集尘风机除尘系统,主要由压入式风筒、风幕集尘风机、综掘机、压入式风机、抽出式风筒、除尘风机组成,具体如图1所示。在综掘机前上方左右各装载一台风幕集尘风机,为使工艺更安全,风机采用液压马达驱动,由综掘机的液压系统提供动力,产生径向风幕射流面,使综掘产生尘面被牢牢封住,粉尘无法向司机处扩散,受附壁效应的影响,风流可继续向前运移,将尘源包围起来,并由抽出式风筒吸入口将高浓度粉尘抽出,再经湿式除尘风机净化后排入巷道。

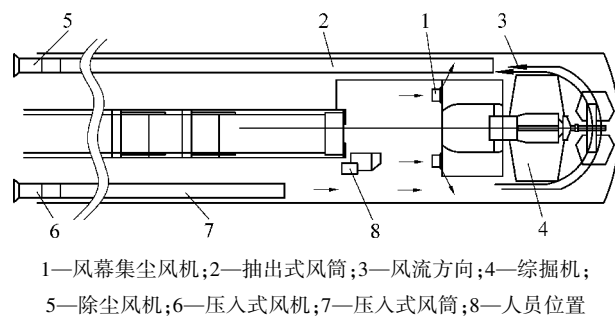


图1 风幕集尘风机除尘系统

Fig.1 Dust removal system of wind-curtain dust-catching ventilator

整体的掘进通风仍采用传统的压入式通风,利用风幕集尘风机造成合理的控尘流场,将粉尘与人员作业空间隔离开,保障工人免受粉尘危害。风幕集尘风机除尘系统的流场主要由4个动力源造成,一个压入式风机、一个除尘风机,2个风幕集尘风机形成综掘工作面的整体流场。其中压入式风机出风口风流在上部形成平面平行流后,风流分为3路:一

路进入2台风幕集尘风机的吸入口,另一路进入风幕射流卷吸风流及附壁风流,后一路被风幕阻截顺势返回,即巷道的回风流。抽出式风筒穿过风幕设在掘进巷道的端头,由于射流风幕能够完全封闭综掘工作面,无论综掘工作面风流粉尘浓度多高,都无法外溢,只能进入抽出式风筒,经过除尘风机净化后排入巷道。综掘工作面风幕集尘除尘系统的风流流程如图2所示。

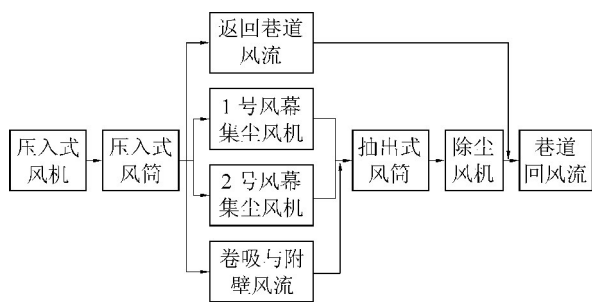


图2 风幕集尘风机除尘系统的风流流程

Fig.2 Air flow process of dust removal system of wind-curtain dust-catching ventilator

3 受限空间内风机流场数学模型

笔者以风幕集尘风机的样机为实例,从理论上对流场深入研究分析,根据流体力学理论和势流叠加原理,建立了风机流场的数学模型。处在井下受限空间内风机的控尘流场,可以看成是环形射流和平行平面流这两者的叠加,下面对其环形射流和平行平面流的数学模型进行阐述。

3.1 环形射流的数学模型

对于环形射流来说,附面层的流动与边界面到流场中心处的流动两者十分相似。从垂直方向上看,这2种流动情况的速度梯度 $\partial u/\partial y$ 都比较大,混扰区的宽度相对于射流的长度来说显得比较小。因此,理论上可以利用附面层运动方程研究环形射流的整体流动过程。依据普朗特附面层运动方程^[16]:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为横向速度, m/s ; v 为纵向速度, m/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; ν 为运动黏度, m^2/s ;

由于在此情况下,整个区域内环形射流的压强

基本上与周围的压强相等,又由于 $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$, 而且有

$$\nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \text{ 前述的式(1)可简化为}$$

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, τ 为紊流切应力, N/m^2 ; 它的计算式为

$$\tau = \rho c^2 x^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

式中, c 为试验常数, 无因次。

将式(3)代入式(2)中可得环形射流的微分方程式:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = 2c^2 x^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

对于环形射流流场,其内各点静压强是相等的,相对速度的分布还有着相似性的特点,因此依据动量守恒定理,在式(4)的基础上,再结合数值分析和高等数学中的相关知识,就可以得到环形射流的数学模型^[17]:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= n\sqrt{x}F(P) = 2.387u_0\sqrt{B} \times \\ &\sqrt{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta} \times \\ &\frac{1}{8.452\ 91} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{8.452\ 91(y-r-x\tan\beta)}{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta} \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$u_1 = \frac{2.387u_0\sqrt{B}}{\sqrt{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta}} \times \exp\left[-\frac{8.452\ 91(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta} \right] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{2.387u_0\sqrt{B}}{\sqrt{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta}} \times \\ &\left\{ \frac{(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta} \times \right. \\ &\exp\left[-\frac{8.452\ 91(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta} \right] - \\ &\left. \frac{1}{16.905\ 82} \left[1 - \exp\left(-\frac{8.452\ 91(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta + (y-r-x\tan\beta)\sin\beta} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: φ_1 为射流流函数; u_1 为射流横向速度, m/s ;

v_1 为射流纵向速度, m/s; u_0 为风幕集尘风机的射流初速度, m/s; B 为风幕集尘风机机射流口断面宽度, m; r 为射流口中心到风机轴线的距离, m; β 为风幕射流角度。

3.2 平行平面流的数学模型

平面坐标系下, 平行平面流的复势有如下形式:

$$W(Z) = (u_2x + v_2y) + i(u_2y - v_2x) \quad (8)$$

式中: u_2 为风幕集尘风机和巷道间横向风速, m^2/s ; v_2 为风幕集尘风机和巷道间纵向风速, m^2/s ; i 为虚单位。

$$\text{又由于 } u_2 = \frac{Q}{s}, v_2 = 0 \quad (9)$$

所以式(8)可以简化为:

$$W(Z) = \left(\frac{Q}{s}\right)x + i\left[\left(\frac{Q}{s}\right)y\right] \quad (10)$$

式中: Q 为风幕集尘风机和巷道间风量, m^3/s ; s 为风幕集尘风机和巷道间纵向面积, m^2 。

故可得到平行平面流的数学模型:

$$\varphi_2 = \left(\frac{Q}{s}\right)y \quad (11)$$

$u_2 = \frac{Q}{s}$, $v_2 = 0$, 其中 φ_2 为平行平面流的流函数; 基于势流叠加原理^[18], 则能够推出风幕集尘风机在受限空间内流场的流函数 φ :

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = & \left(\frac{Q}{s}\right)y + 2.387u_0\sqrt{B} \times \\ & \frac{1}{8.425\ 91} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{8.452\ 91(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta+(y-r-x\tan\beta)\sin\beta}\right] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

根据轴对称流场的特点, 由势流叠加原理得到井下受限空间内风幕集尘风机流场的横向速度 u 、纵向速度 v 及总速度 U 的表达式如下:

$$\begin{aligned} u = u_1 + u_2 = & \frac{Q}{s} + \\ & \frac{2.387u_0\sqrt{B}}{\sqrt{x/\cos\beta+(y-r-x\tan\beta)\sin\beta}} \times \\ & \exp\left[-\frac{8.452\ 91(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta+(y-r-x\tan\beta)\sin\beta}\right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} v = v_1 + v_2 = & \frac{2.387u_0\sqrt{B}}{\sqrt{x/\cos\beta+(y-r-x\tan\beta)\sin\beta}} \times \\ & \left\{ \frac{(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta+(y-r-x\tan\beta)\sin\beta} \right\} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \exp\left[-\frac{8.452\ 91(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta+(y-r-x\tan\beta)\sin\beta}\right] - \\ & \frac{1}{16.905\ 82} \left[1 - \exp\left(-8.452\ 91 \frac{(y-r-x\tan\beta)\cos\beta}{x/\cos\beta+(y-r-x\tan\beta)\sin\beta}\right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (15)$$

4 风幕射流速度衰减试验

为了验证风幕集尘风机流场数学模型的可靠性, 掌握风机在受限空间内风幕射流的衰变规律, 在透明有机玻璃制作的矩形模拟巷道内进行了风幕射流速度衰减试验, 模拟巷道宽为 2.8 m, 高为 2.3 m, 长为 12 m, 风幕射流出口距离模拟巷道顶端为 1 m, 距离模拟巷道两边为 0.95 m。本次试验主要设备有风幕集尘风机 2 台、CFJD25 电子式风速表 1 块、烟雾发生器 1 个, 采用烟雾模拟综掘工作面粉尘的流动。风幕集尘风机按流体相似原理, 参照原样机设计 1 号风机和 2 号风机(顺、逆时针转向各 1 台), 风机射流出口风速为 10 m/s, 风幕射流角度为 5° , 射流口中心到风机轴线的距离为 0.15 m, 风机风量为 $24\ \text{m}^3/\text{min}$, 功率为 0.55 kW, 射流口断面宽度为 15 mm。

该项测试采用矿用电子式风速表测量流场风速, 由风幕射流出口开始沿射流轴线方向顺势逐点测试风速, 记录各测点与射流出口的距离, 各测点多次测量取平均值。将有关参数代入式(13)—式(15), 通过 MATLAB 软件进行计算, 可以得到受限空间内流场各点的理论风速, 流场各点理论风速与实测风速的对比如图 3 所示, 由图 3 可知, 风机流场的数学模型所计算的理论风速曲线与试验所得实测风速曲线的变化趋势基本相同, 风幕射流出口速度初期衰减较快, 后期衰减变缓, 风速理论值与实测平均值的误差在 5% 以内, 表明流场数学模型合理可靠。

根据试验测量数据在直角坐标系绘制射流速度衰减试验曲线如图 4 所示, 采用 Origin 软件对实测数据进行拟合, 拟合度为 0.99, 得到风速与射流出口距离的数学关系式为

$$\begin{aligned} y = & 8.81x^6 - 49.94x^5 + 113.67x^4 - 129.92x^3 + \\ & 76.07x^2 - 25.67x + 9.98 \end{aligned} \quad (16)$$

由图 4 可以看出, 作用于流场末端的风速可达 0.5 m/s 以上, 对于可呼吸性粉尘颗粒的控制有了可靠保证。通过拟合式可以计算流场内任一点的风速

值,距射流出口 0.61 m 处的风速降为射流初始速度的 50%,说明风速衰减开始较快,之后变缓,而整体径向射流面都在 1.2 m 之内,实测风速在 2 m/s 以上,远超过排尘风速,使含尘风流无法外溢,阻尘效果理想。

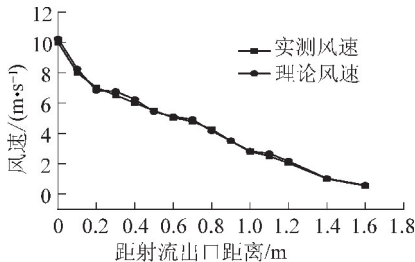


图3 流场的实测风速与理论风速

Fig.3 Measured wind speed and theoretical wind speed in flow field

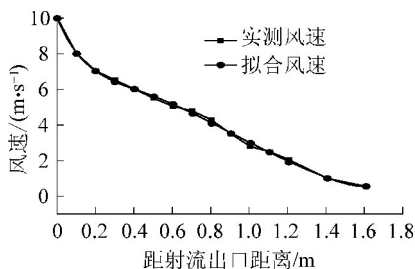


图4 射流速度衰减试验曲线

Fig.4 Attenuation experiment curves of jet velocity

5 结 论

1)设计了一种利用风幕集尘风机制造合理的控尘流场,防止综掘工作面高浓度含尘风流外溢的新型高效的风幕集尘风机除尘系统,并基于流体力学理论及势流叠加原理建立了风机流场的数学模型。

2)通过风幕射流速度衰减试验,将数学模型所计算的理论与实测风速进行对比分析,风速曲线的衰减趋势基本相同,风速理论值与实测平均值的误差在 5%以内,表明流场数学模型是可靠的,为实际工程应用提供了理论依据。

3)试验结果表明,风幕射流出口速度初期衰减较快,后期衰减变缓,受限空间内风幕射流速度衰变合理,整体径向射流风幕需要封住的空间断面在 1.2 m 之内,实测风速都在 2 m/s 以上,能够有效抑制粉尘颗粒向外逸散,达到了预期阻尘效果。

参考文献 (References):

- [1] 王德明. 矿尘学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 周福宝, 李建龙, 李世航, 等. 综掘工作面干式过滤除尘技术实验研究及实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 639-645.
ZHOU Fubao, LI Jianlong, LI Shihang, et al. Experimental investigation and application of dry-type filtering dust collection technology in fully mechanized excavation face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 639-645.
- [3] 肖峻峰, 许峰, 樊世星, 等. 大断面综掘巷道长压短抽条件下粉尘运移模拟[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(2): 127-132.
XIAO Junfeng, XU Feng, FAN Shixing, et al. Simulation of dust diffusion in fully mechanized excavation face having large cross-section under FPNA ventilation condition [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(2): 127-132.
- [4] 张义坤. 煤矿综掘工作面泡沫降尘技术研究与实施[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(2): 151-156.
ZHANG Yikun. Study on dust control technology with foam in fully-mechanized workface of Huoerxinha Coal Mine [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(2): 151-156.
- [5] 李雨成. 基于风幕技术的综掘工作面粉尘防治研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2010.
- [6] 李雨成, 刘宗桃, 刘蓉蒸, 等. 综掘工作面风幕控尘装置设计及试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 66-71.
LI Yucheng, LIU Zongtao, LIU Rongzheng, et al. Design and experiment study on air curtain dust control device of mine fully-mechanized heading face [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 66-71.
- [7] LI Yucheng, LIU Jian, LIU Bo. Study on dust collection and removal systems in heading face based on air curtain technology [C] // International Mining Forum, 2010, 299-305.
- [8] Guyonnaud L, SOLLIEC C. Mass transfer analysis of an air curtain system[C] // 2nd International Conference on Advances in Fluid Mechanics, Udine, Italy, 1998: 139-148.
- [9] 刘雅俊, 葛少成, 马云东. 半自由状态下的风幕集尘风机的短路流场及应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(5): 503-506.
LIU Yajun, GE Shaocheng, MA Yundong. Short-circuit flow-field of wind-curtain dust-catching under semi-free condition ventilator and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(5): 503-506.
- [10] 刘荣华, 王鹏飞, 宋佳, 等. 机掘工作面旋转射流屏蔽通风流场特性数值研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(6): 198-203.
LIU Ronghua, WANG Pengfei, SONG Jia, et al. Numerical study of the efflux features of the rotational efflux shield ventilation at tunneling workface [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(6): 198-203.
- [11] 刘荣华, 王鹏飞, 张登春, 等. 机掘工作面旋转射流屏蔽通风流吹吸流量比研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(9): 133-139.

(下转第 152 页)

- 与工程技术研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(3):433-439.
- ZHOU Fubao, SUN Yuning, LI Haijian, *et al.* Study on theoretical model and engineering technology of borehole sealing in gas drainage in coal seam[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(3):433-439
- [12] 胡曙光,李悦,丁庆军.石灰石混合材改善高铝水泥后期强度的研究[J].建筑材料学报,1998(1):51-55.
- HU Shuguang, LI Yue, DING Qingjun. Study on late strength of high alumina cement improved by limestone mixture [J]. Journal of Building Materials, 1998(1):51-55.
- [13] 湖南大学,同济大学,天津大学,东南大学.土木工程材料[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [14] GARCIA-MATE M, TORRE A G D L, LEON-REINA L, *et al.* Effect of calcium sulfate source on the hydration of calcium sulfoaluminate eco-cement [J]. Cem Concr Compos, 2015, 55: 53-61.
- [15] HARGIS C W, KIRCHHEIM A P, MONTEIRO J M, *et al.* Early age hydration of calcium sulfoaluminate: synthetic ye'elimite, in the presence of gypsum and varying amounts of calcium hydroxide [J]. Cement and Concrete Research, 2013, 48: 105-115.
- [16] 彭家惠,楼宗汉.钙矾石形成机理的研究[J].硅酸盐学报, 2000(6):511-515.
- PENG Jiahui, LOU Zonghan. Studies on the formation mechanism of ettringite [J]. Chinese Journal of Silicomplex, 2000(6):511-515.
- [17] 刘光华,张进生.高铝水泥与硅酸盐水泥混合物的耐久性[C]//中国建筑业协会材料分会预拌砂浆推广委员会.2006第二届中国国际建筑干混砂浆生产应用技术研讨会论文集,2006.
- [18] 陈学习,常忠乾,毕瑞卿,等.新型双阶段膨胀封孔注浆材料研究[J].金属矿山,2014(3):44-47.
- CHEN Xuexi, CHANG Zhongqian, BI Ruiqing, *et al.* Study on a new two-stage expansion sealing grouting material [J]. Metal Mine, 2014(3):44-47.
- [19] KAALOUSK G L, BETON E J. Mechanism of seawater attack on cement pastes[J]. ACI Journal, 1970, 67(2):180.
- [20] YAMAZAKI Y, SAKAKIBARA Y. The mechanism of expansive pressure development with the hydration of CaO [C]. 8th ICC, 1986:395-400.
- [21] CHETTERJI S. Mechanism of expansion of concrete due to the presence of dead-burnt CaO and MgO [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(1):51-56.
- [22] DENG Min. Expansive mechanism of magnesia as additive of cements [J]. II Cemento, 1990, 88(3):161-176.
- (上接第145页)
- LIU Ronghua, WANG Pengfei, ZHANG Dengchun, *et al.* Study on flow ratio of blowing to drawing of rotational jet shield ventilation at tunneling working face [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(9):133-139.
- [12] 张大明,马云东.综掘工作面风幕控尘除尘系统数值模拟及试验研究[J].安全与环境学报,2015,15(4):33-37.
- ZHANG Daming, MA Yundong. Newly developed dust-control and removal system based on the numerical simulation and experimentation [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(4):33-37.
- [13] 陈贵,王德明,王和堂,等.大断面全岩巷综掘工作面泡沫降尘技术[J].煤炭学报,2012,37(11):1859-1864.
- CHEN Gui, WANG Deming, WANG Hetang, *et al.* The technology of controlling dust with foam for fully mechanized excavation face of large cross-section rock tunnel [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11):1859-1864.
- [14] 李晓豁.截割粉尘成因与控制方法研究[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010:25-188.
- [15] 聂百胜,李祥春,杨涛,等.工作面采煤期间PM2.5粉尘的分布规律[J].煤炭学报,2013,38(1):33-37.
- NIE Baisheng, LI Xiangchun, YANG Tao, *et al.* Distribution of PM2.5 dust during mining operation in coal workplace [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1):33-37.
- [16] 段文义,郭仁东,李亚峰.流体力学[M].沈阳:东北大学出版社,2001:151-194.
- [17] 沈连山.数值分析及其应用[M].沈阳:东北大学出版社,1996:50-53.
- [18] 王新月.气体动力学基础[M].西安:西北工业大学出版社,2006:121-139.