

文章编号: 1673-3363-(2013)01-0149-05

矿井空气幕隔断巷道风流影响因素分析及实验

蒋仲安, 罗晔, 牛伟

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要 针对目前矿用空气幕隔断巷道风流的特点和结构设计的要求, 通过对单机循环型空气幕流动模型理论分析得到空气幕控制风流的主要影响因素。进一步运用相似原理, 建立空气幕隔断巷道风流实验的模型, 通过实验得出该巷道空气幕的最优角度为 30° 和最佳供风器出口宽度为 8 cm。最后, 利用 FLUENT 进行数值模拟计算, 来验证实验结果的正确性。本研究结果对矿用空气幕隔断巷道风流的结构设计具有重要的理论指导作用。

关键词 空气幕; 隔断风流; 相似实验; 数值模拟

中图分类号 TD 726

文献标志码 A

Influencing factors of air curtain in cutting off roadway airflow

JIANG Zhong-an, LUO Ye, NIU Wei

(Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract In this paper, in view of the characteristics of mine air curtain in cutting off roadway airflow and the requirement of structural design, the main influencing factors of air curtain in controlling airflow were obtained by theoretical analysis on the flow model of single-machine recycling-type air curtain. Furthermore, the experimental model of air curtain to cut off roadway airflow was established by using similar principles. The experiment results show that the optimum angle of air curtain and optimum width of air supply outlet in the roadway are 30° and 8 cm, respectively. Finally, numerical simulation by FLUENT was conducted to verify the correctness of experiment results. The results can provide reliable theoretical guide to the structural design of mine air curtain in cutting off roadway airflow.

Key words air curtain; cut off airflow; similar experiment; numerical simulation

矿井中通常用来调节和控制风流的通风构筑物有风墙、风门和矿用空气幕等^[1]。风墙作为永久隔断风流的通风构筑物, 一般设置在无行人和车辆通行的巷道中; 普通风门则是设置在行人或通车不多的地方, 且存在受较大压力时难开启、易变形和易损坏等缺陷^[2]; 矿用空气幕可安装在巷道两旁的硐室内, 通过供风器以较高的风速按一定方向喷射出的一股扁平射流, 起到隔断风流效果, 不仅不影

响正常的行人和行车。在某些需要的时候, 还可以当作风窗来调节风量, 或者当作引射器、辅扇等来增加巷道内部的风量^[3]。

我国对矿用空气幕研究相比国外较晚, 20 世纪 60 年代东北大学王英敏等提出“有效压力”理论研究了无风墙辅扇的通风过程, 并指出空气幕和辅扇通风的原理基本相似。1984 年, 东北大学徐竹云等在此理论上得出矿山空气幕隔断风流的能

收稿日期: 2012-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274024)

作者简介: 蒋仲安(1963-), 男, 浙江省诸暨市人, 教授, 博士生导师, 从事矿山通风和粉尘治理等方面的研究。

E-mail: jza1963@263.net

Tel: 13661058581

力即为空气幕的有效压力的结论,并据此研制出了宽口大风量矿用空气幕^[4]。1998 年江西理工大学采用数值分析手段对空气幕理论公式进行模拟分析,建立了矿用空气幕在巷道中隔断风流、引射风流及增阻减少风流的理论模型,但未从实践上深入分析。本文通过对单机循环型空气幕理论分析,得到影响空气幕工作效率的诸多因素,并通过模拟实验得到供风机风流入射角度和供风机出口宽度对空气幕效率的影响规律。

1 单机循环型空气幕隔断风流的流动模型

矿用循环空气幕原理是风流从空气幕出口喷射后,由于实际运动中存在紊动和扩散,不久就会扩散到巷道整个断面上^[5-6]。这时空气幕安装在同一巷道无岔口的地方,且在下游取风,空气幕吸风口可以吸入其出口喷出的风流,形成风流循环。

单机循环型空气幕的实际流动模型如图 1 所示,图中 θ 是供风机出口与巷道壁的夹角, v 为供风机出口风速。

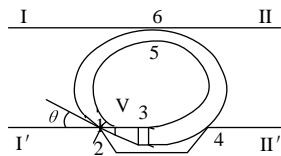


图 1 循环型单机空气幕实际流动模型

Fig.1 Circular single air curtain of actual flow model

对于循环型空气幕而言,在完全隔断风流的情况下,循环段内巷道风流流动即空气幕循环风流的流动^[7-8]。在循环段外,巷道无风流流动。把 I-I' 断面和 II-II' 断面都取在循环段外,可得到的边界条件如下: I-I' 断面上风速为零,即 $v_I=0$, 静压为 P_I ; II-II' 断面上风速为零,即 $v_{II}=0$, 静压为 P_{II} 。矿用空气幕出口断面 3-3 以及壁面 1-2 上的静压,对实际流体而言,并不相等^[9]。假设静压在这些断面上呈线性分布,并且 $P_I=P_1$, $P_{II}=P_3$, 那么

$$P_{12}-P_{23}=\frac{P_1+P_2}{2}-\frac{P_2+P_3}{2}=\frac{1}{2}(P_I-P_{II}) \quad (1)$$

列出断面 I-I' 和 II-II' 之间风流动量方程

$$(P_I-P_{II}-h_{I-II})S+\frac{1}{2}(P_I-P_{II})S_c \cos \theta = \rho(Q_c v_{II}-Q_c v_{cx}-Q_g v_I) \quad (2)$$

式中: Q_g 为空气幕安装后巷道过风风量, m^3/s ; h_{I-II} 为空气幕风流-的回流阻力, Pa。

因为供风机出口风量 $Q_0=v_c S_c$, $v_{cx}=-v_c \cos \theta$, $v_I=v_{II}=0$, $Q_g=0$, 那么循环型单机空气幕的实际有

效压力 ΔH ^[4] 为:

$$\Delta H = P_I - P_{II} = \frac{\rho v_c^2 \cos \theta}{\frac{S}{S_c} + \frac{1}{2} \cos \theta} + \frac{R_c Q_c^2 S}{S + \frac{1}{2} S_c \cos \theta} \quad (3)$$

因为 $h_{I-II}=R_c Q_c^2$, $v_c=Q_c/S_c$, R_c 是空气幕回流风阻 (N_s^2/m^8), 则上式可写成:

$$\Delta H = \frac{\rho Q_c^2 \cos \theta}{S_c \left(S + \frac{1}{2} S_c \cos \theta \right)} + \frac{R_c Q_c^2 S}{S + \frac{1}{2} S_c \cos \theta} \quad (4)$$

因为回流 I-II 区段不长 ($1 < 2\sqrt{S}$), h_{I-II} 的值很小, 并且 $\frac{S}{S + \frac{1}{2} S_c \cos \theta} < 1$, 所以式(4)右边最后一项

回流阻力可以忽略不计。则可得循环型单机空气幕的实际有效压力为:

$$\Delta H = \frac{\rho Q_c^2 \cos \theta}{S_c \left(S + \frac{1}{2} S_c \cos \theta \right)} = \frac{\rho v_c^2 \cos \theta}{\frac{S}{S_c} + \frac{1}{2} \cos \theta} = \frac{\rho v_c^2 \cos \theta}{K + \frac{1}{2} \cos \theta} \quad (5)$$

式中 $K = \frac{S}{S_c}$ 。

2 空气幕隔断巷道风流的实验研究

根据理论分析可得出,影响空气幕工作性能的主要因素包括:空气幕供风器的射流角度、空气幕供风器的出口断面积、巷道断面积等^[10]。由于在井下实际应用过程中,巷道断面积和风速为定值,因此本实验仅对空气幕的最优射流角度和供风出口宽度进行研究。选取阻风率和隔断压差(空气幕的有效压力)为衡量指标,通过对风速、风量和空气幕装置前后所产生的静压差的测量,定量的分析影响因素的变化规律,从而确定空气幕装置的各个参数。

2.1 实验原理及模型设计

同一类的 2 个物理现象,在对应的时空点,各标量和向量物理量的大小成比例且方向相同,则称这 2 个物理现象是相似的。只要保证运动相似、几何相似以及 2 个流动的边界条件和起始条件相似,就可以保证两个流体相似^[11]。因此根据相似理论的 3 个机理,可以进行空气幕隔断风流的相似实验。

根据矿山井下实际巷道,建立长、宽和高分别为 4.2, 0.3, 0.3 m 的相似模型,实验装置如图 2。通过调整挡板 1 的位置来调节模拟巷道内的风速,调节挡板 2 的宽度模拟不同的巷道断面积, A, B

分别为巷道壁上的测量孔，用来测量风速和静压。实验中测量 A 点的风速和静压时 B 点要密封，以防止测量的数据有误差；同理，测量 B 点的风速和静压时 A 点要密封。

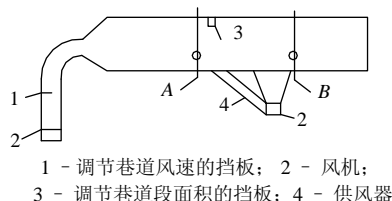


图 2 空气幕特性实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus of air curtain

2.2 实验结果及分析

2.2.1 射流角度对空气幕工作性能影响分析

选取 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 75° 射流角度，供风器出口宽度为 8、10 cm，分别进行空气幕隔断风流实验。

不同射流角度对阻风率的影响如图 3a 所示，对隔断压差的影响如图 3b 所示。

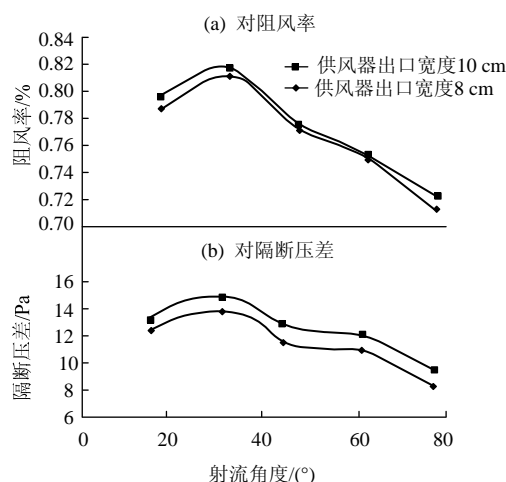


图 3 射流角度对阻风率及对隔断压差的影响

Fig.3 The angle of jet flow on effects of wind resistance rate and pressure differential

从图 3 可看出，在出口宽度为 8 cm 和 10 cm 条件下，射流角度在 $15^\circ \sim 30^\circ$ 间，随着射流角度的不断增大，空气幕的阻风率、隔断压差也不断增大。但是射流角度在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 间，随着射流角度的不断增大，空气幕的阻风率、隔断压差却是不断的减小。这是由于当射流角度较小时，空气幕气流易贴附在巷道壁上，造成能量损失，使得风机有效压力未完全用于隔断风流，随着入射角度不断增大，空气幕内部的局部阻力不断增大，且受巷道风流影响增

大，不能形成良好风流循环效果，射流角度为 30° 时，空气幕的阻风率、隔断压差同时为最大，其值为别为 81.5% 和 13.82 Pa。

2.2.2 出口宽度对空气幕工作性能影响分析

选取 2、4、6、8、10 cm 供风口宽度，入射角度选取 30° 和 45° ，分别进行空气幕隔断风流实验。

不同出口宽度对阻风率的影响如图 4a 所示，对隔断压差的影响如图 4b 所示。

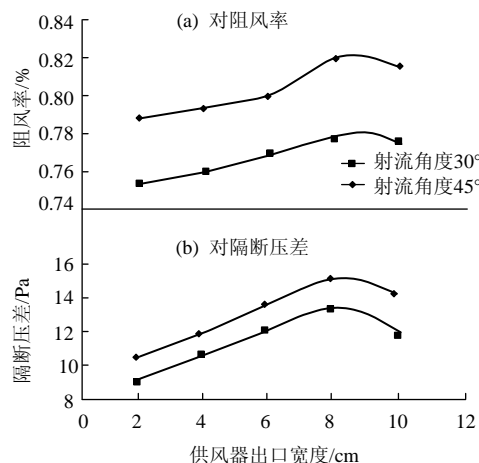


图 4 供风器出口宽度对阻风率及对隔断压差的影响

Fig.4 Air supply outlet width on the wind resistance rate influence and pressure differential

由图 4 显示，当射流角度为 30° 和 45° 时，空气幕的阻风率、隔断压差随着供风器出口宽度的变化而变化。当供风器出口宽度在 2~8 cm 间，随着供风器出口宽度的不断增大，空气幕的阻风率、隔断压差也不断增大。但是供风器出口宽度在 8~10 cm 间，随着供风器出口宽度的不断增大，空气幕的阻风率、隔断压差却是不断的减小。这是由于当供风机出口宽度较小时，随着出口宽度的不断增大，内部阻力逐渐减小，隔断风流效果加强，但是出风口宽度超过某一值后，受巷道内气流流速影响，使得其抗干扰能力大幅下降，超过了气流宽度增大使其提高的抗干扰能力，导致气流循环效果不佳，漏风量增大，空气幕的有效压力也随之降低。

3 空气幕隔断巷道风流的数值模拟研究

3.1 空气幕隔断风流的几何模型建立

根据实验模型巷道和工作面实际尺寸，计算中建立一个长 4.2 m，宽 0.3 m，高 0.3 m 的长方体计算区域，简化后使用 Gambit 2.0 建立三维几何模型，取空气幕供风器型号为 30 cm×10 cm，射流角度 30° 为例，其三视图和网格划分如图 5 所示。

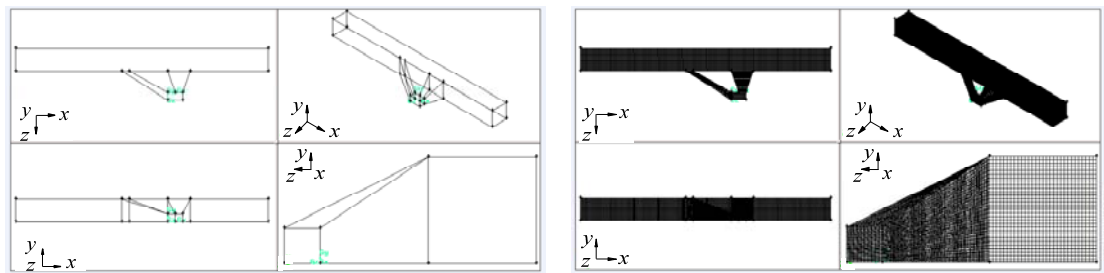


图 5 三维几何模型和网格划分图
Fig.5 The 3D geometric model and mesh

根据实验的具体情况及相关实测数据，结合数学模型和 **Fluent** 的模拟方法，确定数值模拟边界条件如表 1 所示。

表 1 边界条件设定表
Table 1 Table of Boundary conditions set

Boundary Conditions (边界条件)	Define (参数设定)
Inlet Boundary Type (入口边界类型)	Velocity-inlet (速度入口)
Inlet Velocity Magnitude (入口速度)	2.98 m/s
Interior (内部边界类型)	Fan (风扇边界条件)
Pressure-jump (压力跳跃)	120 Pa
Outlet Boundary Type (出口边界类型)	Outflow (出流)
Wall (墙壁) Shear Condition (剪切边界)	No Slip (无滑移)

3.2 模拟结果及分析

1) 当供风器的出口断面都是 30 cm×10 cm，巷道断面为 30 cm×30 cm 和风机所提供的压强差为 120 Pa 时，不同变射流角度空气幕阻风率如图 6，从图 6 中可看出，射流角度 30°时，阻风率最大，此时，空气幕隔断巷道风风速分布如图 7 所示。

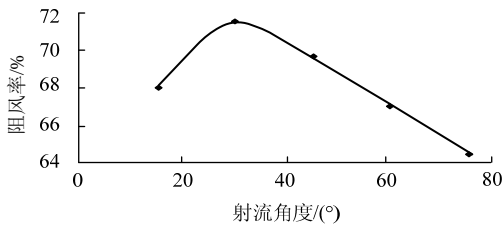


图 6 不同射流角度下的空气幕阻风率
Fig.6 Different jet angle on effects of wind resistance rate

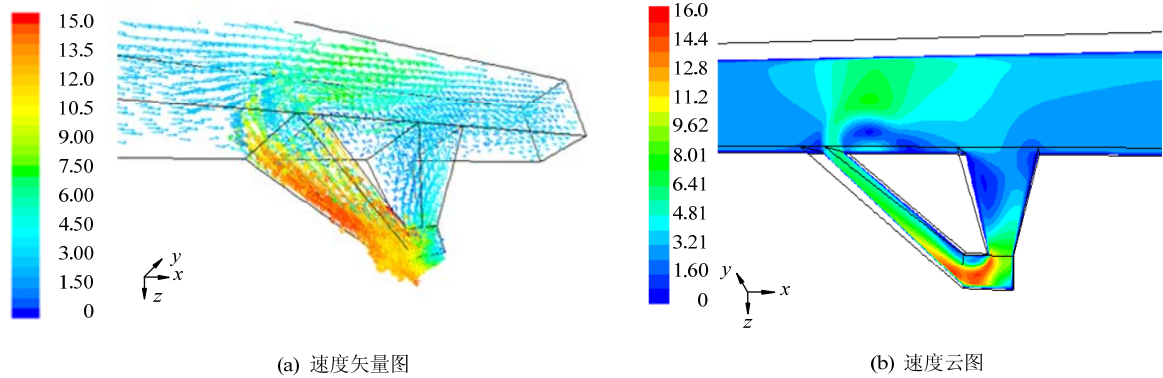


图 7 射流角度 30° 时风流流动效果图
Fig.7 Jet angle of 30 degree airflow effect chart

2) 当空气幕的射流角度都为 30°，巷道断面为 30 cm×30 cm 和风机所提供的压力强为 120 Pa 时，不同供风器出口宽度阻风率如图 8 所示。

从图 8 中可看出，阻风率随出口宽的增加而增加，达到出口宽度为 8 cm 时，基本保持不变，此时，空气幕隔断巷道风流的风速分布如图 9 所示。

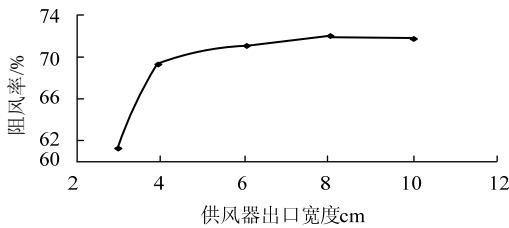


图 8 不同宽度下空气幕的阻风率
Fig.8 Different width on effects of wind resistance rate

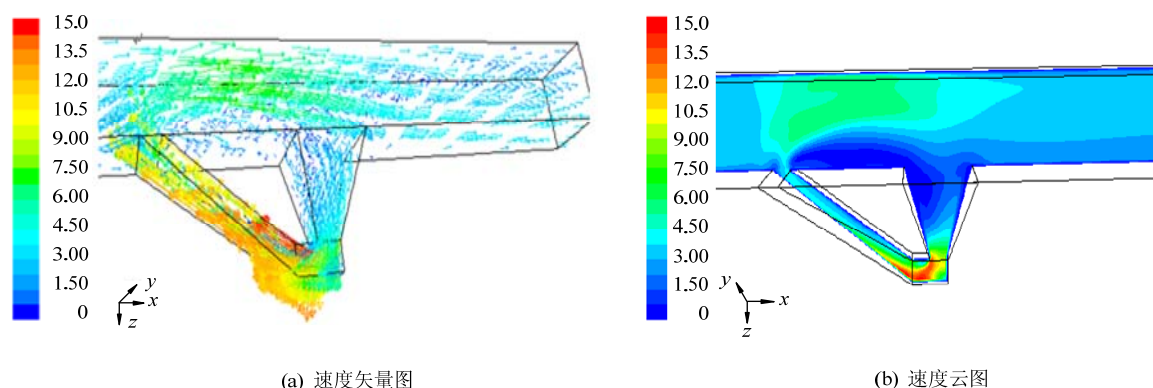


图9 供风器出口宽度8 cm时风流流动效果图

Fig.9 Air supply outlet width 8 cm airflow effect chart

4 结 论

1) 通过对单机循环空气幕隔断风流模型的理论分析, 得出了影响空气幕隔断风流的主要因素, 即空气幕安装角、空气幕出口断面积、安装空气幕巷道的断面积、空气幕射流风速。

2) 空气幕的工作性能随着射流角度的改变而改变, 当射流角度为 30° 时, 其工作性能达到最佳, 实验与数值模拟结果基本一致。

3) 空气幕的工作性能随着供风器出口宽度的改变而改变, 当供风器出口宽度为 8 cm 时, 其工作性能达到最佳, 实验与数值模拟结果基本一致。

参考文献:

- [1] 吴彦军, 孙健. 浅谈矿井井下风流控制技术[J]. 硅谷, 2008(18): 117-117.
WU Yan-jun, SUN Jian. Discussion on the application of control technology in mine air flow[J]. Silicon Valley, 2008(18): 117-117.
- [2] 石海林. 矿井通风优化调节研究综述[J]. 山东黄金, 1990(2): 77-79.
SHI Hai-lin. Study on mine ventilation optimization[J]. Shandong Gold, 1990(2): 77-79.
- [3] 赵千里, 高谦, 高创州. 矿用空气幕隔断风流理论模型及其应用研究[J]. 有色金属, 2007, 59(5): 39-42.
ZHAO Qian-li, GAO Qian, GAO Chuang-zhou. The mine-used air curtain for cutting off airflow theory model and its application[J]. Nonferrous Metal, 2007, 59(5): 39-42.
- [4] GUYONNAUD L, SOLLIEC C, DUFRESNE D M, REY C. Design of air curtains used for area containment in tunnels[J]. Experiments in Fluids, 2000(28): 377-384.
- [5] 史自强, 史钟璋, 汤晓丽. 空气幕计算方法的实验研究[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2001, 22(3): 1-4.
SHI Zi-qiang, SHI Zhong-zhan, TANG Xiao-li. Study on the calculation method of air curtain[J]. Journal of Qingdao Institute of Architectural Engineering, 2001, 22(3): 1-4.
- [6] 王英敏. 矿用引射式射流风机[J]. 黄金, 1994, 15(9): 19-22.
WANG Ying-min. Ejector jet fan for mine[J]. Gold, 1994, 15(9): 19-22.
- [7] 陈喜山, 梁晓春, 李杨. 多级机站通风新模式和矿井通风技术的新进展[J]. 中国矿业, 2002, 11(5): 13-15.
CHEN Xi-shan, LING Xiao-chun, LI Yang. Multistage fan station ventilation new mode and new advances in the underground ventilation technology[J]. China Mining, 2002, 11(5): 13-15.
- [8] MOLL A T J. An approach to the optimization of multi-fan ventilation systems in uk coal mines[J]. Journal of the Mille Vantilation Society of South Africa, 1994, 47(1): 2-18.
- [9] 谢贤平. 矿井通风理论与技术进展评述[J]. 云南冶金, 2002, 31(3): 31-37.
XIE Xian-ping. Review on development of theory and technology of mine ventilation[J]. Yunnan Metallurgy, 2002, 31(3): 31-37.
- [10] 王海宁, 王华平. 矿用空气幕内空气流动的数值模拟与分析[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(6): 75-77.
WANG Hai-ning, WANG Hua-ping. Mine air curtain air flow simulation and analysis[J]. Mining Research and Development, 2007, 27(6): 75-77.
- [11] 王海宁, 张红婴. 矿用空气幕试验研究与应用[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 615-617.
WANG Hai-ning, ZHANG Hong-ying. Experimental research and application of mine air curtain[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 615-617.