

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.02.007

# 汇聚型空气幕集尘除尘系统的实验研究

康良麒, 王汉青, 石发恩, 万进

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为了解决稀土电解炉含氟烟尘浓度严重超标的问题, 提出了一种汇聚型空气幕集尘除尘系统治理方案。通过实验测试的方法, 研究了汇聚型空气幕装置的安装角与汇聚度及风机风量与空气幕汇聚度之间的关系, 得到汇聚型空气幕装置的最佳工艺参数, 为汇聚型空气幕的设计与制作提供了参考依据。通过对汇聚型空气幕集尘除尘系统风流流场的分析及实验条件的模拟, 直观地获得了此系统风流流场的特征, 同时进一步验证了汇聚型空气幕对污染气体隔离控制的可行性。

**关键词:** 除氟系统; 汇聚型空气幕; 安装角; 汇聚度

中图分类号: TU834.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)02-0029-05

## The Experimental Study of Dust Collecting and Removal System with Convergent Air Curtain

Kang Liangqi, Wang Hanqing, Shi Faen, Wan Jin

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** To solve the problem of excessive fluorine dust concentration of the rare earth electrolytic furnace, proposes a management scheme of convergent air curtain dust removal system. Through experiments, studies the relationship between the installing angle of convergent air curtain device and the convergence degree and the relationship of the fan air volume and the air curtain convergence degree, gets optimum technological parameters for convergent air curtain device, and provides the basis for production design. By means of analysis and experimental condition simulation on the airflow field of the convergent air curtain dust removal system, obtains the airflow characteristics of the system, thus further verifies the feasibility of the isolation control of polluted airs for the convergent air curtain.

**Keywords:** fluoride removal system; convergent air curtain; installation angle; convergence degree

## 0 引言

在工业生产和生活中, 许多通风系统、污染物控制系统存在着污染物流场调控方面的难题, 特别是在高温熔盐电解炉、球磨机、冶炼炉门、采矿机车等污染源中, 由于其操作频繁、运输、工艺需要等原因, 采用传统的密闭罩或者局部罩污染物控制

技术难以达到控制要求, 污染物的收集率往往较低, 能量消耗较大。污染物无组织排放, 不仅会严重污染环境, 同时, 会导致工人的作业环境恶劣, 直接威胁工人的身体健康和生产安全。随着世界各国对环境问题的日益重视及人们对健康问题的越发关注, 治理这些污染问题显得刻不容缓。如利用氟化物熔盐电解法生产稀土时, 高温电解炉的工作面烟尘

收稿日期: 2011-09-01

作者简介: 康良麒(1987-)男, 江西赣州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为CFD在建筑环境与设备仿真中的应用,

E-mail: kangliangqi0814@163.com

(含氟)污染严重,为保障厂房生产安全,保护冶炼工人远离烟尘的危害,必需收集并处理生产过程中释放的含氟烟尘。

汇聚型空气幕就是通过汇聚喷射气流将污染源散发出来的粉尘、热、有害气体等污染物与周围空气隔离<sup>[1]</sup>,并汇聚在某一个小范围内,然后利用处理设备将控制在一定范围内的污染物进行净化处理。汇聚型空气幕在污染物与操作者之间形成一道“无形、透明、隔热的密闭罩”<sup>[2]</sup>,其控污作用相当于在操作者与污染物之间增加了一个密闭罩,以阻止污染物向外扩散和隔断热量向外传递,于环境保护等较大的应用价值。

虽然研究者们对此已经取得系列的理论成果并成功研制了隔断型空气幕,但至今仍没有对具三维空间、多场耦合特征的汇聚型空气幕进行研究的报导。因此,本文针对这一问题,提出一种新的烟尘(含氟)治理技术方案——汇聚型空气幕集尘除尘系统治理方案。为使该方案在实际生产中推广应用,在防治烟尘工作中取得良好的效果,通过对其风流流场的分析及实验条件的模拟,进一步验证了汇聚型空气幕对污染气体隔离控制的可行性。

## 1 汇聚型空气幕控尘(含氟)方案

高温熔盐电解炉隔热除氟系统,就其现状而言,整个系统的技术条件较成熟,关键的难题在于对含氟烟尘的收集问题。而汇聚型空气幕利用喷射气流的射流原理,使污染源散发出来的污染物与周围空气隔离,并利用除尘设备将控制在一定范围内的粉尘进行净化处理,再将净化后的风流排入大气,从而最大限度地保护环境,风幕除尘原理见图1。

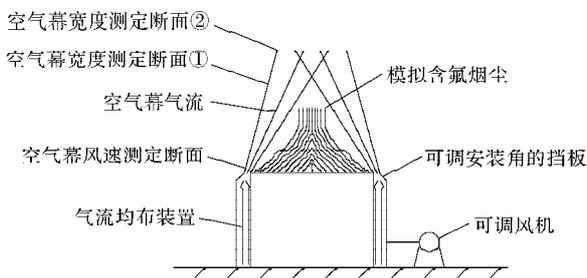


图1 汇聚型空气幕除尘原理示意图

Fig. 1 The principle diagram of dust removal system with convergent air curtain

本研究中提出的汇聚型空气幕控尘(含氟)方案为:将稀土冶炼工作面空气幕安装在电解炉四周,从而迫使电解炉工作时的烟气粉尘(含氟)有序地排放,从而保证整个车间的空气品质<sup>[3-6]</sup>。即通过一层

无形的空气幕墙“夹逼”引导,使粉尘和污染气体进入集气罩等装置,便于集中收集与处理。

虽然现阶段专家学者们对汇聚型空气幕的研究较少,在各种工业生产和工程应用上也很少。可随着科学技术的发展,及人们对汇聚型空气幕研究的深入,本课题研究者相信汇聚型空气幕将在许多领域发挥其重要作用:

1)在大型工业厂房中,单纯的抽气式排风系统对粉尘及毒害气体的收集排放效率非常有限。如果在原来的抽气式排风系统中加入汇聚型空气幕,那么原系统收集排放效率低的难题将迎刃而解;

2)火灾时,可利用汇聚型空气幕对高层建筑进行隔热隔烟,以保证建筑的各个房间相对隔离,为消防队员抢救被困人员赢得时间;

3)在生活方面,汇聚型空气幕也可以得到广泛的应用。比如可在灶台的四周装上汇聚型空气幕,这样比原来单纯的吸油烟机吸油烟的效果更好。

## 2 实验设备与测试

### 2.1 除尘系统与设备

本实验设计的汇聚型空气幕集尘除尘系统是在应用原有压入和抽出系统不变的基础上,加入空气幕射流装置组成,其系统示意图见图2。压入系统由目前普遍采用的压入式通风装置和风幕射流装置组成。空气幕射流装置由大功率风机、压风管路、射流箱及射流腔组成。压风管路选用直径合适的风筒,主体为长方体,射流腔贴附其四周,射流出口为倒“U”形窄缝出口,且射流箱上设有挡风板,可调射流出口角度,调节此处,可通过实验测出空气幕的最佳出口角度。抽出系统由集气罩、风机、风管和后面连接的除尘除氟装置组成。

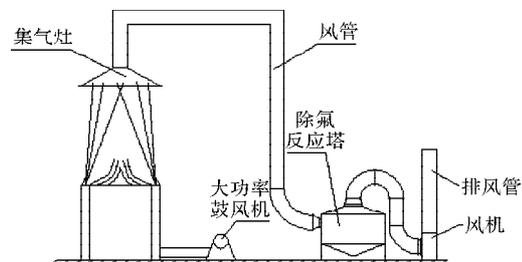


图2 汇聚型空气幕集尘除尘系统示意图

Fig. 2 The schematic diagram of dust collecting removal system with convergent air curtain

由于本试验的主要目的是测试汇聚型空气幕集尘除尘系统中射流装置射流形成的空气幕效果及确定动力装置的合理性,确定是否能够形成有效控制

烟尘的空气幕,故在实验室实验时只设置了空气幕射流装置,未安装抽尘及除氟反应塔等装置。

汇聚型空气幕集尘除尘系统的空气幕射流装置主要包括:大功率风机、压风管路、射流箱及射流腔,见图3。

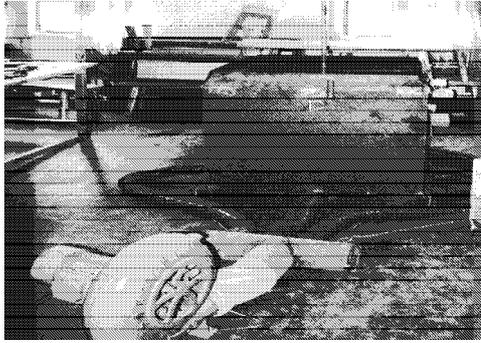


图3 空气幕射流装置

Fig. 3 The jet device of air curtain

图3所示射流装置尺寸为 $92\text{ cm} \times 92\text{ cm} \times 100\text{ cm}$ ,出口缝隙宽度为 $3/2\text{ cm}$ 。送风管总管的内径 $D_1=16.5\text{ cm}$ ,送风管支管的内径 $D_2=9\text{ cm}$ ,风机选用离心式交流鼓风机。

## 2.2 系统测试

### 2.2.1 测试方法

本实验重点测试汇聚型空气幕在自由状态下(即无其他干扰风流)射流的流速、流向、射流风速的衰减及最后空气幕的汇聚情况。测试风速选用热球风速仪风表,测试长度选用卷尺和三角板。由于该装置的做工较粗糙,特别是有一组对面出风较不均匀,为了减少误差,现选两出风较均匀的面(对面,下面标记为A面、C面)进行实验,并以此模拟4面同时使用时的情况。

### 2.2.2 实验器材的准备

1)从工具箱中依次取出实验需要的仪器和器材,并检查仪器是否正常。然后对需要校零的热球风速仪等仪器进行校零。

2)事先准备好3根小竹竿,其中2根约1.8 m,另外1根约3.0 m。取3.0 m长的竹竿,在离其底端为3.0,2.5 m处做上标记。然后用铁丝将另外2根竹竿分别垂直固定于这2处。最后在2根小竹竿固定点的左右两边5 cm处分别标记,其他的每隔10 cm标记1次,然后在每条划线上贴上小纸条(见图4)。这样,简易的风向标杆就制作完成了。此装置用于确定汇聚型空气幕离地面2.5,3.0 m处的宽度。将此装置的主杆(3.0 m长)垂直固定于射流箱体的中心,此时2根横向竹竿(1.8 m长)离地面的高度正好为2.5和3.0 m。开启风机时,风流由空气幕喷口射出,当空气射流

通过离地面2.5 m处的断面时,2.5 m处横向竹竿(下断面)上的小纸条就会随风飘起。可以数小纸条的数量来确定离地面2.5 m处汇聚型空气幕的宽度,从而确定该断面的面积。同理,可确定离地面3.0 m处汇聚型空气幕的宽度和面积。

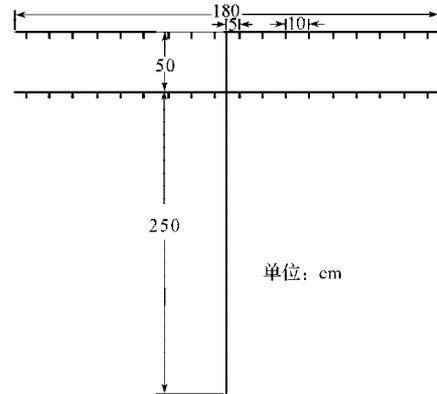


图4 风向标杆示意图

Fig. 4 The schematic diagram of wind vane

### 2.2.3 测试步骤

1)首先在实验装置的四周标号,分别记为A,B,C,D。然后在A,B,C,D各面的射流出口挡板上均匀地划5条线段,分别记为1,2,3,4,5点,作为后面测试风速的测试点。

2)将试验装置连接好后,启动风机,使用热球风速仪检查整个装置是否有漏风现象。将热球风速仪置于装置的各个连接处,若风速仪在哪处显示风速过大,则说明此处漏风,需重新调试装置,以保证从风机至空气幕射流出口处风流畅通且无严重漏风现象。

3)调节空气幕射流调风板以改变安装角 $\Phi$ (见图5),依次选取 $90^\circ$ , $76^\circ$ , $68^\circ$ 和 $62^\circ$ 安装角。然后使用风速仪分别测试A,C面1~5点处的风速,并测量距射流出口2.5和3.0 m处的风速,测点分布在射流主体段的轴心线上。最后通过风向标杆测试汇聚型空气幕在2.5和3.0 m处的断面面积,得到第一组数据。

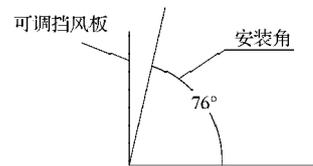


图5 安装角示意图

Fig. 5 Schematic diagram of installation angle

4)改变风机吸入口的大小,取原来入口大小的 $1/2$ ,射流出口风速和试验装置内各处压力及风量随之改变,用上述方法再次测量,得到第二组数据。

5)同理,当改变风机吸入口为原来的 $1/4$ 时,测得第三组数据。

6)记录并整理数据,最后将测试的各组数据进

行对比分析。

### 3 测试结果与分析

为确定汇聚型空气幕在 2.5, 3.0 m 处断面宽度  $W$  与安装角角度  $\Phi$  的关系, 设定汇聚型空气幕装置的  $A$  边下标杆确定的临界宽度为  $A_1$ , 上标杆为  $A_2$ ; 汇聚型空气幕装置的  $C$  边下标杆确定的临界宽度为  $C_1$ , 上标杆为  $C_2$ , 单位为 cm。其中:

$$W_1 = A_1 + C_1, W_2 = A_2 + C_2$$

1) 安装角度和汇聚型空气幕各断面宽度的关系  
风机吸入口全开状态下, 所得结果如下:

i)  $\Phi=90^\circ, A_1=A_2=35, C_1=C_2=65, W_1=W_2=100$ ;

ii)  $\Phi=76^\circ, A_1=25, A_2=35, C_1=65, C_2=75, W_1=90,$

$W_2=110$ ;

iii)  $\Phi=68^\circ, A_1=A_2=15, C_1=C_2=45, W_1=W_2=60$ ;

iv)  $\Phi=62^\circ, A_1=A_2=25, C_1=65, C_2=85, W_1=90,$

$W_2=110$ 。

风机吸入口半开状态下, 所得结果如下:

i)  $\Phi=90^\circ, A_1=A_2=35, C_1=C_2=65, W_1=W_2=100$ ;

ii)  $\Phi=76^\circ, A_1=25, A_2=35, C_1=C_2=45, W_1=70,$

$W_2=80$ ;

iii)  $\Phi=68^\circ, A_1=A_2=15, C_1=C_2=45, W_1=W_2=60$ ;

iv)  $\Phi=62^\circ, A_1=A_2=25, C_1=C_2=45, W_1=W_2=70$ 。

风机吸入口 1/4 开状态下, 所得结果如下:

i)  $\Phi=90^\circ, A_1=A_2=35, C_1=C_2=65, W_1=W_2=100$ ;

ii)  $\Phi=76^\circ, A_1=A_2=25, C_1=C_2=45, W_1=W_2=70$ ;

iii)  $\Phi=68^\circ, A_1=A_2=15, C_1=C_2=35, W_1=W_2=50$ ;

iv)  $\Phi=62^\circ, A_1=A_2=15, C_1=C_2=65, W_1=W_2=80$ 。

为便于对比分析, 将以上数据整理为表 1。

表 1 不同安装角与空气幕断面汇聚面积的关系

Table 1 The relationship of the different installation angle and air curtain section area

安装 角度 / (°)	空气幕宽 / cm					
	风量全开		风量半开		风量 1/4 开	
	下宽	上宽	下宽	上宽	下宽	上宽
90	100	100	100	100	100	100
76	90	110	70	80	70	70
68	60	60	60	60	50	50
62	90	110	70	70	80	80

由表 1 可得如下结论: 风机吸入口全开、半开、1/4 开时, 角度为  $68^\circ$  的安装角均使空气幕的各断面面积最小 (即空气幕汇聚度最好), 分别为  $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ,  $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$  和  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 。

综上所述, 可得出汇聚度和安装角度的关系为: 随着安装角度的增加, 汇聚度慢慢减小, 达到临界

角时最小, 继续增加安装角度, 汇聚度又慢慢增加, 并可推断出此实验的最佳安装角为  $68^\circ$ 。

2) 风机风量和汇聚型空气幕各断面的关系

角度一定 (以下面的空气幕作为对比) 时, 测定风机风量与汇聚型空气幕各断面的数据。

i) 安装角度为  $90^\circ$

$v_A=6.0 \text{ m/s}, W_A=35 \text{ cm}, v_C=6.2 \text{ m/s}, W_C=65 \text{ cm}$ ;

$v_A=2.4 \text{ m/s}, W_A=35 \text{ cm}, v_C=0.8 \text{ m/s}, W_C=65 \text{ cm}$ ;

$v_A=1.8 \text{ m/s}, W_A=35 \text{ cm}, v_C=1.5 \text{ m/s}, W_C=65 \text{ cm}$ 。

ii) 安装角度为  $76^\circ$

$v_A=2.5 \text{ m/s}, W_A=25 \text{ cm}, v_C=1.4 \text{ m/s}, W_C=65 \text{ cm}$ ;

$v_A=2.5 \text{ m/s}, W_A=45 \text{ cm}, v_C=1.1 \text{ m/s}, W_C=25 \text{ cm}$ ;

$v_A=1.6 \text{ m/s}, W_A=25 \text{ cm}, v_C=0.8 \text{ m/s}, W_C=45 \text{ cm}$ 。

iii) 安装角度为  $68^\circ$

$v_A=2.4 \text{ m/s}, W_A=15 \text{ cm}, v_C=2.3 \text{ m/s}, W_C=45 \text{ cm}$ ;

$v_A=1.9 \text{ m/s}, W_A=15 \text{ cm}, v_C=1.3 \text{ m/s}, W_C=45 \text{ cm}$ ;

$v_A=1.6 \text{ m/s}, W_A=15 \text{ cm}, v_C=1.2 \text{ m/s}, W_C=35 \text{ cm}$ 。

iv) 安装角度为  $90^\circ$

$v_A=3.4 \text{ m/s}, W_A=25 \text{ cm}, v_C=1.5 \text{ m/s}, W_C=65 \text{ cm}$ ;

$v_A=2.0 \text{ m/s}, W_A=15 \text{ cm}, v_C=1.2 \text{ m/s}, W_C=35 \text{ cm}$ ;

$v_A=2.0 \text{ m/s}, W_A=15 \text{ cm}, v_C=1.5 \text{ m/s}, W_C=65 \text{ cm}$ 。

当  $\Phi=90^\circ$  时, 风机处于全开、1/2 开、1/4 开时, 空气幕的汇聚面积都为  $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ ; 当  $\Phi=76^\circ, 68^\circ, 62^\circ$  时, 风机处于全开、1/2 开、1/4 开时, 空气幕的汇聚面积均呈上下波浪形, 如图 6 所示。

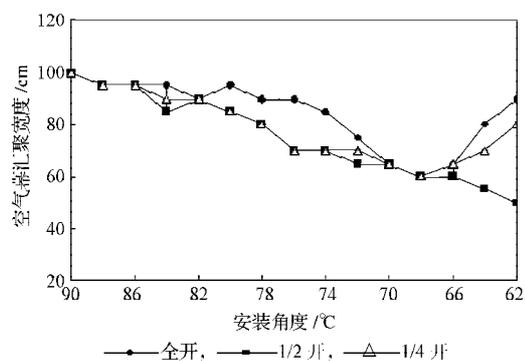


图 6 风机风量不同时空气幕汇聚度效果比较曲线

Fig. 6 The comparison curves of the air curtain convergence degree at different air volume of the fan

综上所述, 风量对空气幕的汇聚度影响不明显。当空气幕安装角确定时, 风机处于全开、1/2 开、1/4 开 3 种情况的空气幕汇聚面积差不多, 变化不大。

3) 定性分析空气幕效果

以上 1), 2) 点注重从定量上得出当安装角在  $68^\circ$  时空气幕的汇聚度最好, 离地面 3.0 m 处空气幕汇聚的面积最小, 为  $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 。现从定性方面对它进行研究。为模拟工业上使用电解炉生产稀土

工艺时产生的大量烟尘,在装置的电解炉腔内放入一小盆柴油,点火燃烧,使之产生大量烟尘。然后启动空气幕装置,可看到烟尘汇聚的效果比没有开启空气幕时烟尘汇聚的效果好得多,其对比效果图见图7。由此比较分析可定性得出结论:开启汇聚型空气幕时,烟气和粉尘能有序地排放;而未开启汇聚型空气幕时,烟气向四周扩散,呈杂乱地排放,不利于收集处理和净化。

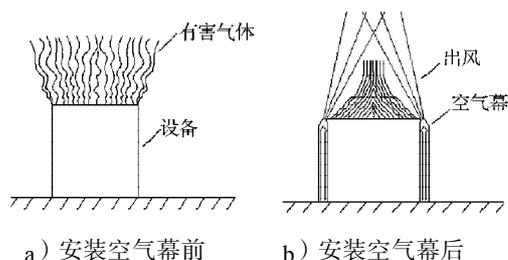


图7 安装空气幕前后汇聚效果比较图

Fig. 7 The comparison chart of convergence effects before and after installing air curtain

## 4 结论

本论文对汇聚型集尘除尘系统空气幕的形成和风流结构特点进行了初步研究,对稀土冶炼电解炉产生的污染和空气幕汇集集尘原理做了分析与探讨,通过实验室实验研究了所提方案中空气幕形成状况与集尘汇聚效果。可得出如下结论:

1) 汇聚型空气幕控尘原理以干式集尘为出发点,推动尘粒运动的基本动力主要是气体的流动,应用此原理可以达到集尘控尘的效果。

2) 汇聚度和安装角度的关系是:随安装角度的增加,汇聚度慢慢减小,达到临界角的时候为最小,继续增加安装角度,汇聚度又慢慢增加,此实验条件下的最佳安装角为 $68^{\circ}$ 。

3) 风量对空气幕的汇聚度影响不明显。当空气幕安装角确定时,风机处于全开、1/2开、1/4开情况下的空气幕汇聚面积差不多,变化不大。

4) 通过实验观察,定性分析出开启空气幕时对烟气的汇聚收集效果明显优于未开启空气幕时。

本论文只对汇聚型空气幕集尘除尘系统的单纯风流进行了实验研究,而由于现实应用中存在着诸多不确定性因素,所以实际情况比实验室实验要复杂得多,需要进行进一步的Fluent软件模拟和多场耦合实验研究。另外,空气幕集尘除尘系统的汇聚控尘效果也受其他因素影响,确定这些影响因素对

此系统今后的推广具有重要意义。汇聚型空气幕集尘除尘装置将在赣州晨光稀土新材料有限公司进行工业实验,实验结果将进一步检验此装置的合理性和实用性。

## 参考文献:

- [1] 王英敏. 矿井通风与防尘[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993, 160-171.  
Wang Yingmin. Mine Ventilation and Dust Prevention[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993, 160-171.
- [2] 陈彩云. 基于风幕技术的综掘面粉尘防治研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008.  
Chen Caiyun. Study of Dust Control Theory on Fully Mechanized Workface Based on Air Curtain Technology [D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2008.
- [3] 王海宁, 张红婴. 矿用空气幕特性试验与应用[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 615-617.  
Wang Haining, Zhang Hongying. Test and Application of Air Curtain in Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 615-617.
- [4] Wang Haining. Test of Air Curtain in Mine[C]// 2006 International Symposium on Safety Science and Technology. Changsha: Beijing Institute of Technology, 2006: 1507-1509.
- [5] 王海桥, 施式亮, 刘荣华, 等. 综采工作面司机处粉尘隔离技术的研究及实践[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 176-180.  
Wang Haiqiao, Shi Shiliang, Liu Ronghua, et al. Research and Application of Dust Isolation Technology at Drivers Position in Fully Mechanized Coal Face[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(2): 176-180.
- [6] 曹新民. 用均匀送风风幕代替局部排风的实践[J]. 通风防尘, 1996(1): 42-46.  
Cao Xinmin. The Practice of Uniform Distribution Air Curtain Instead of Local Exhaust[J]. Ventilation and Dust Removal, 1996(1): 42-46.
- [7] 施式亮, 王海桥, 吴中立. 综采工作面隔尘空气幕纵向安装角合理确定的研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 164-167.  
Shi Shiliang, Wang Haiqiao, Wu Zhongli. Study on Reasonable Determination of Installing Angle of Isolating-Dust Air Curtain in Fully-Mechanized Working Face[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 164-167.

(责任编辑: 廖友媛)