

## 综掘工作面风筒出风口风流智能调控装置研究

龚晓燕<sup>1</sup>, 侯翼杰<sup>1</sup>, 赵 宽<sup>1</sup>, 崔 坚<sup>1</sup>, 陈 彪<sup>1</sup>, 惠双琳<sup>2</sup>, 常波峰<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西煤业化工集团有限责任公司 神木柠条塔矿业有限公司, 陕西 神木 719300)



扫码移动阅读

**摘要:**针对目前煤矿综掘工作面局部通风风筒的出风口口径、方向角度和前后距离不能实时动态变化所造成的瓦斯、粉尘爆炸和环境污染风险提升问题,研发安装于风筒出风口的风流智能调控装置。分析综掘工作面实际通风风流运移分布规律及风流调控需求,建立了智能调控装置的整体结构方案,进行了机械结构详细设计及安全性优化分析,并对控制系统软硬件进行了分析设计。研制了机械式调控装置,进行了井下的风速及粉尘浓度的风流场调控测试研究,其测试结果表明:出风口距端头 7 m 时,调控后回风侧沿程风速由 4.01 m/s 下降至 1.19 m/s,司机位置处的风速由 0.1 m/s 提高到了 0.5 m/s,达到了《煤矿安全规程》要求规定范围;出风口距端头 5 m 和 10 m 时,风流场调控后司机位置处粉尘浓度较原始粉尘场最高降低了 34%,说明调控装置的调风和降尘效果明显,具有一定的实际应用价值。

**关键词:**综掘工作面;风筒出风口;智能调控装置;风流场;风速;粉尘浓度

中图分类号:TD421;TP23

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)12-0008-07

## Study on intelligent control device for airflow of air duct outlet in fully-mechanized heading face

GONG Xiaoyan<sup>1</sup>, HOU Yijie<sup>1</sup>, ZHAO Kuan<sup>1</sup>, CUI Jian<sup>1</sup>, CHEN Biao<sup>1</sup>, HUI Shuanglin<sup>2</sup>, CHANG Bofeng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shenmu Ningtiaota Mining

Company Limited, Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Shenmu 719300, China)

**Abstract:** According to the problems of gas and dust explosion and the rising risk of environmental pollution caused by the lack of dynamic changes of the duct outlet caliber, the angle of deflection and the distance from heading face, the intelligent control device of air flow installed in the outlet of ventilation duct was developed. Based on the analysis of actual movement and distribution laws of air flow, the overall structure scheme of intelligent control device was established, the detailed design of mechanical structure and the optimization analysis of safety were carried out, besides, the software and hardware of the control system were analyzed and designed. The test results show that the wind speed along the return air side decreases from 4.01 m/s to 1.19 m/s and the wind speed at driver's position increases from 0.1 m/s to 0.5 m/s when the air outlet is 7 m away from the end. When the air outlet is 5 m and 10 m away from the end, the dust concentration of driver's breathing belt height is 34% lower than that of original dust field, which indicates that the air regulation and dust reduction effect of the control device is obvious and has good practical value.

**Key words:** fully-mechanized heading face; air duct outlet; intelligent control device; flow field; wind speed; dust concentration

## 0 引 言

目前综掘工作面粗放式“通风总量”控制管理模式<sup>[1]</sup>通风效率低,同时风筒出风口风流不能随时

变化,导致风量不足或风流分布不合理,不仅会引起掘进工作面局部瓦斯和煤尘超标,而且会给掘进工作面带来瓦斯和煤尘爆炸的隐患<sup>[2]</sup>。国内学者李雨成等<sup>[3]</sup>、王凯等<sup>[4]</sup>、叶洪金等<sup>[5]</sup>分别研究了局部

收稿日期:2018-07-02;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.12.002

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874235);陕西省重点研发计划资助项目(2017GY-170)

作者简介:龚晓燕(1966—),女,甘肃临洮人,教授,博士。E-mail:gongxymail@163.com

引用格式:龚晓燕,侯翼杰,赵 宽,等.综掘工作面风筒出风口智能调控装置研究[J].煤炭科学技术,2018,46(12):8-14.

GONG Xiaoyan, HOU Yijie, ZHAO Kuan, et al. Study on intelligent control device of air duct outlet in fully-mechanized heading face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 8-14.

通风风筒布置和不同直径下风筒对风流、粉尘运移分布的影响,得出有利于通风降尘的风筒悬挂高度及直径。陈祖云等<sup>[6]</sup>对局部通风的通风效果与风筒直径的选择进行分析,获得了工作面所需风量与经济风筒直径的关系。王志宝等<sup>[7]</sup>研究了基于综掘工作面旋流通风系统分析压、抽风筒位置对降尘效果的影响。王晓珍<sup>[8]</sup>研究了风筒直径、风筒出风口到掘进工作面距离以及风筒的悬挂高度对粉尘浓度变化的影响,得到了有利于降尘通风的风筒相关参数。但对风筒出风口角度偏转对风流场、瓦斯场及粉尘场运移分布的影响研究很少,如何实现方向角度、前后距离和口径变化的综合参数调控下的出风口风流实时动态变化,达到风流场、粉尘场及瓦斯场最佳运移分布还有待研究。课题组通过大量数值模拟分析及井下实测分析,得出风筒出风口方向角度、口径及前后距离对风流场、瓦斯场及粉尘场运移分布有很大影响,通过风筒出风口距掘进端头距离、口径及方向角度综合参数优化调控,使得风流、瓦斯及粉尘达到最佳运移分布,有效稀释瓦斯,提高降尘效率<sup>[9-14]</sup>。针对风筒出风口的实时动态变化,笔者设计了一种风筒出风口智能调控装置,来实现掘进不同阶段下出风口风流实时变化,从而达到风流场、粉尘场及瓦斯场最佳运移分布,达到安全、高效、绿色通风的目的。

## 1 风流场分布规律及调控需求分析

### 1.1 风流场分布规律

对于目前煤矿通风来说,一般都采用压入式通

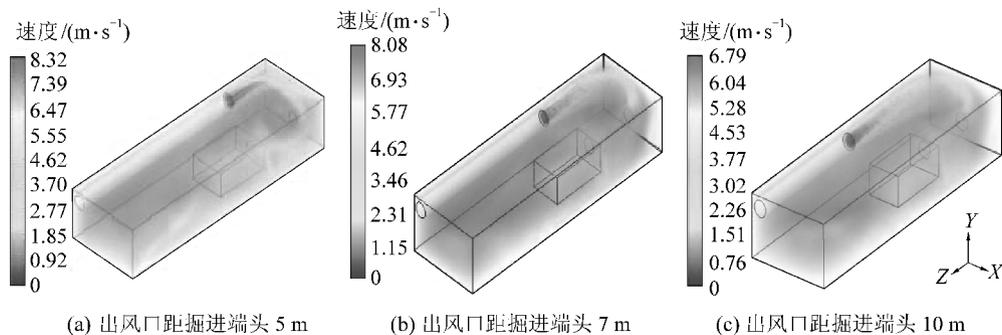


图2 出风口距掘进端头不同距离下的风流场分布

Fig.2 Distribution of airflow field at different distance from outlet to heading end

由出风口距端头不同距离  $L$  下的综掘工作面整体风流场分布图可以看到,风流从出风口射出后经过贴附射流区到达巷道壁面发生冲击,折返运动形成回流区;回风侧人行处最大风速可达到  $4.625 \text{ m/s}$ ,超

风,压入式通风方式风筒一般布置于综掘巷道壁一侧,靠近煤壁,并且风筒顶端距离巷道顶板较近,因此对于压入式通风来说,出口风流流动属于贴附射流。依据附壁射流特性,将掘进通风流场分为贴附射流区、冲击射流区、回流区和涡流区4个特征区域研究其分布规律<sup>[15]</sup>,详细风流特征区域如图1所示。

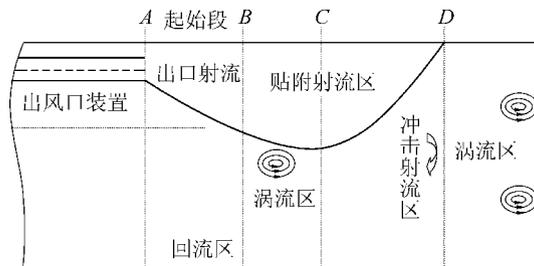


图1 综掘工作面压入式通风风流分布特征

Fig.1 Airflow distribution characteristics of pressed ventilation in fully mechanized heading face

射流区的特点是风速比较大,射流区粉尘得到较好的稀释,粉尘浓度低于其他区域;回流区风速较小,粉尘不能被充分稀释,并且端头粉尘又在射流作用下向回流区运动,导致该区粉尘浓度较高;涡流区风速小,粉尘常积聚于此区域,导致粉尘浓度偏高。考虑综掘工作面风速分布不均匀,且不能有针对性地改变出风口参数速度及方向角度,进而改善3个区粉尘分布。

### 1.2 风流调控需求分析

以柠条塔煤矿 S1200-III 综掘工作面为对象,运用 Fluent 软件进行流体分析<sup>[16]</sup>,得到风流场的原始场数值模拟下的运移分布,如图2所示。

出《煤矿安全规程》规范的最大风速  $4 \text{ m/s}$ <sup>[17]</sup>,掘进司机处受涡流影响,最小风速范围为  $0 \sim 0.05 \text{ m/s}$ ,低于《煤矿安全规程》规定的最小风速  $0.25 \text{ m/s}$ 。风流分布不合理导致司机位置处及回风侧人行处粉尘

积聚如图3所示。

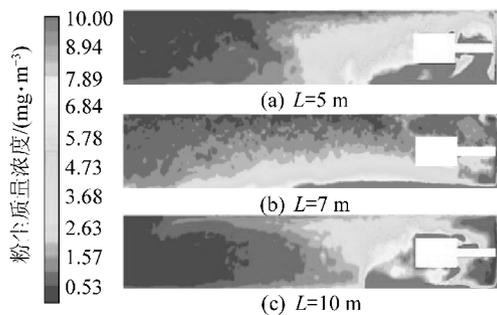


图3 出风口距掘进端头不同距离  $L$  下的粉尘浓度分布

Fig.3 Distribution of dust concentration at different distance  $L$  from outlet to heading end

掘进端头附近、掘进司机处及回风侧人行处粉尘浓度偏高,距掘进端头  $0\sim 3$  m 范围内质量浓度最高达到  $1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,远超出煤安规定的  $4\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,造成严重的粉尘污染和影响工作效率。

针对综掘工作面风流分布不合理,回风侧人行处及司机位置处粉尘浓度过高导致的污染问题,综合考虑综掘工作面通风设备组成及布局、风筒在巷道中空间位置,需要设计一种可以通过调节综掘工作面风筒出风口的方向角度、口径大小及前后位置来改变出风口风流状态的智能调控装置,从而达到调风降尘效果。调控装置在综掘工作面巷道三维空间如图4所示。

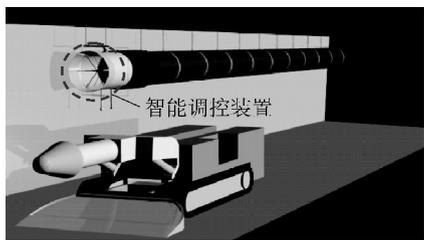


图4 巷道三维空间示意

Fig.4 Sketch of roadway 3D space

## 2 调控装置整体方案设计

确定装置总功能为调节出风口风流状态,进行功能分解,可得功能元有:控制信号传递、驱动、口径调节、旋转角度、前后移动。对分功能(功能元)原理解,通过寻求功能元的物理效应、工作原理及功能载体,来进行功能元求解。功能元控制信号传递需要功能载体如 PLC 或者单片机;驱动考虑到物理效应中的液压效应及电力效应,可选电动机或者液压马达驱动;其余功能元综合考虑各功能元工作原理

即机构传动原理的选择等进行求解。整体结构方案的形态学矩阵见表1,各功能元原理解利用形态学矩阵<sup>[18]</sup>和经验性评价法进行方案组合分析评价,确定智能调控装置整体结构的最佳方案。

表1 调控装置整体结构方案的形态学矩阵

Table 1 Morphological matrix of whole structure scheme for control device

功能元	原理解			解法数
	1	2	3	5
$F_1$ 控制信号传递	PLC	单片机	—	$n_1 = 2$
$F_2$ 驱动	电动机	液压马达	—	$n_2 = 2$
$F_3$ 口径调节	拉杆传动	绳传动	—	$n_3 = 2$
$F_4$ 旋转调节	齿轮传动	带传动	蜗轮蜗杆传动	$n_4 = 3$
$F_5$ 前后移动调节	滑移小车及导轨	齿轮齿条传动	—	$n_5 = 2$

方案组合数  $N = n_1 n_2 n_3 n_4 n_5 = 48$  个,对方案中不相容的功能单元解进行删选剔除,得到原理方案如下:

1) 方案1:选取 PLC 为控制器传递控制信号,以电动机的驱动源,驱动拉杆机构实现口径调节,齿轮传动实现旋转调节,并通过滑移小车在导轨上运动实现前后位移调节。

2) 方案2:选取单片机为控制器传递控制信号,液压马达为动力源,用液压阀驱动液压马达带动拉杆机构实现口径调节,通过蜗轮蜗杆实现旋转调节,且前后位移也是通过滑移小车运动实现。

综合考虑质量成本及井下安装实际情况,选取方案1作为整体结构方案,智能调控装置整体结构三维模型如图5所示。

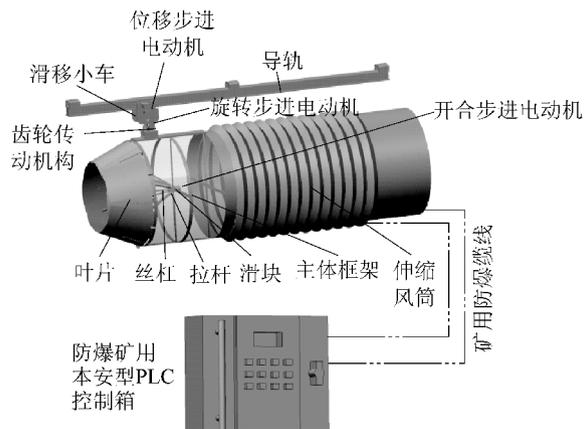
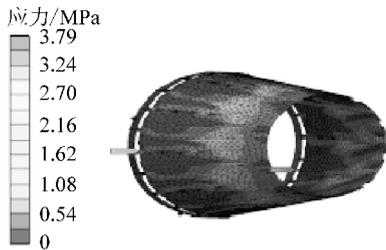


图5 智能调控装置结构三维模型

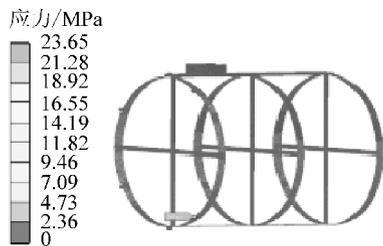
Fig.5 3D model of intelligent control device

### 3 调控装置机械结构安全性分析及优化

调控装置中叶片及主体框架是关键部件,其受风压及外力载荷影响,需要进行结构有限元安全性分析。叶片结构初始参数如下:20片叶片,长度400 mm,厚度1 mm,质量18.4 kg。主体框架结构初始参数如下:前圈厚度10 mm;框架直径1 000 mm;十字加强筋宽度5 mm。关键部件结构应力分析结果如图6所示。



(a) 叶片结构应力分析



(b) 主体框架结构应力分析

图6 关键部件结构应力分析

Fig.6 Structural stress analysis of key components

图6a所示,叶片的最大应力为3.79 MPa,叶片材质为304不锈钢,因此叶片的安全系数约为54.13。图6b所示其最大应力为23.65 MPa。框架材质为Q235钢,其安全性系数约为9.93。叶片结构其安全系数过大,造成加工成本的浪费,因此需要对叶片结构进行结构优化<sup>[19]</sup>,减轻自身质量。

通过ANSYS Workbench中的Design Exploration模块下的Response Surface进行结构优化。将叶片结构静力学分析结果导入模块,设定输入参数P1叶片厚度为0.4~0.6 mm,P3叶片所受风压范围250~290 Pa,设定输出参数为P2叶片最大应力值,选取默认的Design of Experiment类型。计算生成设计点其厚度、载荷及最大应力的3D曲线关系如图7所示。

由图7响应曲面直观地得到输入参数的响应,输入参数与输出参数呈现非线性关系,其所得优化结果见表2,综合考虑变形量及叶片质量,对比0.4

mm和0.6 mm下的输出参数及质量,当叶片厚度达到0.5 mm时,其叶片质量减轻,且叶片优化结构后的最大应力为9.81 MPa,其安全性数为20,其叶片结构质量由初始18.46 kg降低至12.09 kg,质量减少34.5%。

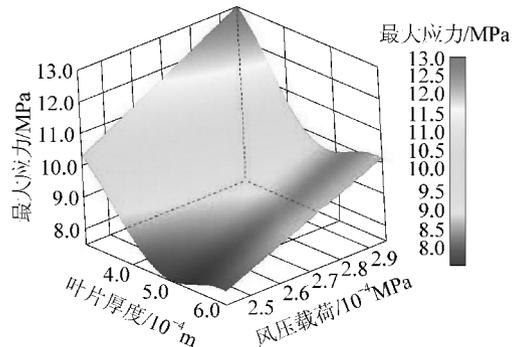


图7 厚度、载荷及最大应力的响应曲面

Fig.7 Response surface of thickness, load and the max stress

表2 叶片厚度优化结果

Table 2 Blade thickness optimization results

参数	方案1	方案2	方案3	原方案
叶片厚度/mm	0.4	0.5	0.6	1.0
最大应力/MPa	13.30	9.81	6.85	3.79
风压载荷/Pa	269	258	260	269
质量/kg	10.37	12.09	14.78	18.46

## 4 智能调控装置控制系统设计

### 4.1 智能调控结构方案设计

依据装置整体结构方案设计,为保证装置调节角度及位移距离精度,实现装置自动控制,选取PLC作为控制核心。通过激光测距传感器进行风筒出风口距掘进端头的距离测定,根据距离信号反馈,驱动步进电动机实现距离前后调节,使其保证在5~10 m范围内,且在5~10 m范围内时,PLC控制器执行设定程序,驱动齿轮转向机构和叶片开合机构的步进电动机工作,实现不同工况下其角度和口径的变化。利用增量式编码器进行角度偏转的反馈,确保最佳风场调控规则在智能调控装置上角度偏转的准确性。智能调控方案如图8所示。

### 4.2 硬件系统设计

1) PLC选型。依据所设计的智能调控方案,智能调控装置需要有测距传感器模拟量信号输入,通过PLC控制输出高速脉冲信号实现对3台步进电动机驱动控制。根据以上分析,可得PLC输入/输

出具体 I/O 口结算见表 3。

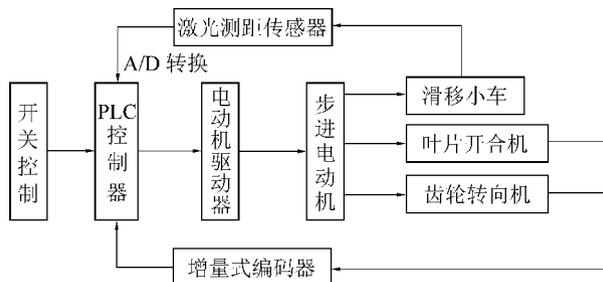


图8 智能调控装置调控方案

Fig.8 Control scheme of intelligent control device

表3 输入/输出端口点数估算

Table 3 Input/output port count

端口类型	端口说明	数量	输入信号类型
输入端口	增量式编码器反馈信号	2	数字量
	测距传感器反馈信号	1	模拟量
	电动机启闭开关	3	—
输出端口	驱动电动机脉冲信号	3	数字量
	电动机反转信号	3	数字量
	驱动电动机使能信号端口	3	数字量

在选型之前要进行一个 PLC 的 CPU 存储容量估算,根据估算出的结果再预留 30%容量,进而再选取 PLC 的型号<sup>[20]</sup>。估算公式如下:存储容量(字节)=(数字量 I/O 个数×10+模拟量 I/O 个数×100)×130%。

根据所需的 I/O 端子数,选取 S7-200 CPU224CN DC/DC/DC 可编程控制器。其 I/O 端子数满足要求,自带 2 个高速脉冲输出端口,因为本装置不需要同时控制 2 台以上的步进电动机,所以可以满足步进电动机驱动要求。

2)其他硬件选型。将控制面板和 PLC 集成到矿用本安型防爆壳中,本智能装置的激光测传感器选用 GJJ50 矿用本安型考虑井下工作环境模拟量信号传输会受干扰,选取 RS485 串行接口接测距传感器模拟量信号,抗干扰且传输距离较远;增量式编码器选取 BQH12 矿用本安型。选取步进电动机驱动执行机构进行功能调节。旋转步进电动机和开合步进电动机选取 42BYGH47 型永磁感应式两相步进电动机,位移步进电动机选用 57BYGH250B 型步进电动机,且都必须选用矿用防爆型。

### 4.3 控制电路设计

在对智能调控装置进行控制电路设计的过程中,依据智能调控装置的调控方案,对其 PLC 控制器进行 I/O 地址分配见表 4。

表4 PLC 的 I/O 地址分配

Table 4 I/O address assignment for PLC

序号	项目	地址	注释
1	1号电动机启动信号	I0.0	驱动前后位移开关
2	2号电动机启动信号	I0.1	驱动口径开合机构开关
3	3号电动机启动信号	I0.2	驱动齿轮转向机构开关
4	齿轮转向机构编码器反馈信号	I0.3	
5	口径开合机构编码器反馈信号	I0.4	
6	1号电动机复位信号	I0.5	
7	2号电动机复位信号	I0.6	
8	3号电动机复位信号	I1.0	
9	全线启动	I1.1	自动调控开关
10	全线停止	I1.2	
11	1号电动机启动	Q0.0	平移小车位移
12	2号电动机启动	Q0.1	叶片口径变化
13	3号电动机启动	Q0.2	齿轮传动角度偏转
14	1号电动机复位	Q0.3	电动机反转复位
15	2号电动机复位	Q0.4	
16	3号电动机复位	Q0.5	
17	激光测距传感器信号	AIW0	

## 5 智能调控装置井下测试及调控效果分析

### 5.1 调控装置安装与测试

考虑试验安全性,研制了机械式调控装置进行风速及粉尘浓度调控效果的井下测试分析。基于柠条塔煤矿运输巷 S1200-III 综掘工作面,其通风方式为压入式,巷道宽度为 6.25 m,巷道高度为 3.75 m。供风风筒出风口风速为 8.08 m/s,风筒直径为 1 m,风筒中心距底板 3.05 m,距安装侧壁 0.7 m,进行了井下安装和实测分析,如图 9 所示。



(a) 机械式调控装置物理样机 (b) 调控装置井下安装测试

图9 机械式调控装置物理样机及井下安装测试  
Fig.9 Physical prototype and underground mine installation test of mechanical control device

## 5.2 风速实测调控效果分析

选取出风口距掘进断面7 m下综合优化调控后实测风速和原始风场风速对比,见表5。

表5 距掘进端头7 m实测原始场风速与调控后测试风速对比

Table 5 Comparison of measured wind speed and regulated wind speed at distance from end heading face 7 m

风速测试点	原始风场速度/(m·s <sup>-1</sup> )	优化调控风场速度/(m·s <sup>-1</sup> )	调控效果	
1号测试断面	测点1	4.01	1.19	规范内
	测点2	0.89	1.92	—
2号测试断面	测点1	1.93	0.26	—
	测点2	0.10	0.50	规范内

由表5分析可得,调控后巷道1号断面测点1即距掘进端头7.5 m的断面上的回风侧,风速由4.01 m/s下降至1.19 m/s;测点2司机处风速由0.89 m/s提高为1.92 m/s,该处风速提高,可以减少粉尘在司机位置处积聚;2号断面测点1即距掘进端头10 m的断面上回风侧人行处风速由1.93 m/s下降至0.26 m/s,测点2司机位置处风速由0.10 m/s提高为0.50 m/s,风速调控都达到了煤安规定要求的0.25~4.00 m/s范围内。

## 5.3 粉尘浓度实测调控效果分析

选取风筒出风口距离掘进端面5 m和10 m两种工况,分别对回风侧人行处和司机位置处高度为1.5 m的测点进行综合优化调控。出风口距端头5 m工况下调节为口径1.1 m,水平偏转10°,垂直偏转4°;出风口距端头10 m工况调节为口径0.8 m,水平偏转9°,垂直偏转3°;所得调控前后粉尘浓度实测对比结果见表6。

表6 距掘进端头5、10 m实测粉尘原始场与调控后测试对比

Table 6 Comparison of the measured dust field and regulated at distance from end heading face 5 m and 10 m

风速测试点	至掘进端头距离/m	粉尘原始场质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	粉尘优化调控场质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	降尘效率/%
司机位置	5	154.6	102.1	34.0
回风侧	5	139.8	99.8	28.6
司机位置	10	187.6	142.1	24.3
回风侧	10	168.9	120.5	28.7

实测粉尘浓度通过调控装置3个参数的综合调控,表6出风口距掘进端头5 m下,司机位置处的测点质量浓度从154.6 mg/m<sup>3</sup>下降至102.1 mg/m<sup>3</sup>,相比降

低了34%;而回风侧的粉尘质量浓度从139.8 mg/m<sup>3</sup>下降至99.8 mg/m<sup>3</sup>,相比降低了28.6%;出风口距掘进端头10 m下,在司机位置处的粉尘质量浓度也有明显降低,其测点质量浓度从187.6 mg/m<sup>3</sup>下降至142.1 mg/m<sup>3</sup>,相比降低了24.3%;回风侧的测点粉尘质量浓度从168.9 mg/m<sup>3</sup>下降至120.5 mg/m<sup>3</sup>,降低了28.7%。

## 6 结 论

1)对所设计的智能调控装置机械结构进行有限元静力学分析及结构优化。初始叶片厚度1 mm的时其质量为18.4 kg,安全系数为54.13,考虑到加工成本及质量增加,经结构优化后叶片厚度为0.5 mm,质量为12.09 kg,相比减轻34.54%,且安全系数为20。

2)智能调控装置通过选用S7-200 CPU224XP型PLC控制,选取矿用本安型两相步进电动机作为前后位移机构、角度偏转机构和口径开合机构的驱动源,结合矿用本安型激光测距传感器和编码器设计了控制电路,实现智能调控。

3)研制了机械式调控装置进行井下风场调控的风速及粉尘浓度测试分析,得出在距掘进端面7 m时,调控后回风侧人行处风速由4.01 m/s下降至1.19 m/s;司机位置处的风速由0.1 m/s提高到了0.5 m/s,达到煤安规范中的合理风速范围。在距掘进端头5 m的工况下,司机位置处粉尘质量浓度从154.6 mg/m<sup>3</sup>下降至102.1 mg/m<sup>3</sup>,降尘效率最高达到了34%;在距掘进端头10 m的工况下,司机位置处粉尘质量浓度187.6 mg/m<sup>3</sup>下降至142.1 mg/m<sup>3</sup>,相比降低了24.3%。验证了调控装置具有显著的调风降尘效果,实现了综掘工作面绿色、安全、高效的局部通风。

## 参考文献(References):

- [1] 牛超,施龙青,肖乐乐,等.2001-2013年煤矿生产事故分类研究[J].煤矿安全,2015,46(3):208-211.  
NIU Chao, SHI Longqing, XIAO Lele, et al. Study on accidents classification of coal mine from 2001 to 2013[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(3): 208-211.
- [2] 申广君.煤巷掘进工作面瓦斯治理技术现状及存在问题分析[J].煤矿安全,2012,43(5):127-129.  
SHEN Guangjun. Present situation and existing problems analysis of gas control technology in coal roadway heading face[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(5): 127-129.
- [3] 李雨成,李智,高伦.基于风流及粉尘分布规律的机掘工

- 作面风筒布置[J].煤炭学报,2014,39(S1):130-135.
- LI Yucheng, LI Zhi, GAO Lun. Arrangement of air duct in tunneling working face based on the distribution laws of airflow and dust[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 130-135.
- [4] 王凯,郭红光,王飞,等.综掘工作面不同直径风筒下粉尘运移规律研究[J].煤矿开采,2015,20(5):80-83.
- WANG Kai, GUO Hongguang, WANG fei, *et al.* Dust movement rule in ventilators with different diameters in full-mechanized driving face[J]. Coal Mining Technology, 2015, 20(5): 80-83.
- [5] 叶洪金,李志刚.风筒布置方式对掘进工作面流场的影响分析[J].能源技术与管理,2012(2):55-57.
- YE Hongjin, LI Zhigang. Analysis of the influence of air duct arrangement on the flow field of heading face[J]. Energy Technology and Management, 2012(2): 55-57.
- [6] 陈祖云,金波,邬长福,等.局部通风风筒直径的选择[J].中国安全生产科学技术,2012,8(11):81-84.
- CHEN Zuyun, JIN Bo, WU Changfu, *et al.* Choice duct of diameter in local ventilation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(11): 81-84.
- [7] 王志宝,黄立宁,梁爱春.综掘工作面降尘效率影响因素试验研究[J].煤炭科学技术,2015,43(3):73-76,91.
- WANG Zhibao, HUANG Lining, LIANG Aichun. Experimental study on influence factors of dust fall efficiency in mine mechanized heading face [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 73-76, 91.
- [8] 王晓珍.煤巷掘进过程中粉尘浓度影响因素分析[J].中国安全生产科学技术,2011,7(4):75-79.
- WANG Xiaozhen. Analysis of dust concentration influence factor in coal roadway driving [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(4): 75-79.
- [9] 龚晓燕,莫金明,薛馨禹,等.分形特征对掘进通风粉尘分布和沉降规律影响分析[J].煤炭技术,2017,36(9):112-114.
- GONG Xiaoyan, MO Jinming, XUE Xinyu, *et al.* Analysis on influence of fractal characteristics on distribution and settlement of dust flow in heading face ventilation [J]. Coal Technology, 2017, 36(9): 112-114.
- [10] 龚晓燕,秦少妮,张永强,等.基于改变风筒出风口参数的综掘工作面出风口参数优化研究[J].煤矿安全,2017,48(12):168-171,175.
- GONG Xiaoyan, QIN Shaoni, ZHANG Yongqiang, *et al.* Study on optimization of air duct outlet parameters of wind flow field in fully mechanized excavation face of coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(12): 168-171, 175.
- [11] 龚晓燕,莫金明,惠双琳,等.煤矿掘进巷道风筒附壁距离对风流场的影响[J].煤矿安全,2017,48(4):203-206.
- GONG Xiaoyan, MO Jinming, HUI Shuanglin, *et al.* Influence of ventilation duct attachment distance on wind field in coal mine excavation roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(4): 203-206.
- [12] 龚晓燕,李根,焦婉莹,等.掘进巷道壁面粗糙度对受限贴附紊动射流的影响[J].矿业安全与环保,2017,44(1):28-31.
- GONG Xiaoyan, LI Gen, JIAO Wanying, *et al.* Influence of wall roughness on restricted wall-attached turbulent jet in excavation roadway[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2017, 44(1): 28-31.
- [13] GONG Xiaoyan, ZHANG Xinyi, WU Yue, *et al.* Study on gas field optimization distribution with parameters adjustment of the air duct outlet for mechanized heading face in coal mine [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017.
- [14] GONG Xiaoyan, XIA Zhixin, WU Yue, *et al.* Research of dust field optimization distribution based on parameters change of air duct outlet in fully mechanized excavation face of coal mine [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017.
- [15] 王海桥,施天亮,刘荣华,等.压入式受限贴附射流流场特征及参数计算[J].黑龙江科技大学学报,2001,11(4):4-7.
- WANG Haiqiao, SHI Shiliang, LIU Ronghua, *et al.* Features and parameters calculation of flowing field of forcing type restrained wall-attached jet [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science, 2001, 11(4): 4-7.
- [16] 周新明,汤民波.掘进工作面压入式通风流场的数值模拟[J].中国矿山工程,2014,43(5):58-61.
- ZHOU Xinmin, TANG Minbo. Numerical simulation of forced ventilation flow field in driving face [J]. China Mine Engineering, 2014, 43(5): 58-61.
- [17] 国家安全生产监督管理总局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2016:73.
- [18] 陈明,张国大,郭玲.形态分析法在设计中的应用[J].辽宁工学院学报,2003(2):39-40.
- CHEN Ming, ZHANG Guoda, GUO Ling. Application of morphological analysis in design [J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2003(2): 39-40.
- [19] 李曼丽,杨志兵.基于有限元分析的结构优化设计方法的研究[J].制造业自动化,2013,35(18):123-126.
- LI Manli, YANG Zhibing. The research of a structure optimization design method based on FEA [J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(18): 123-126.
- [20] 王兆义.可编程控制器的技术热点和选型建议[J].电世界,2015,56(5):1-3.
- WANG Zhaoyi. Technical hot pots and selection suggestions for PLC [J]. Electrical World, 2015, 56(5): 1-3.