

翟国栋,程家春,李耀宗,等. 液压支架放煤口负压除尘器的结构设计及内部流场模拟研究[J]. 矿业科学学报,2017,2(3):289-293.

Zhai Guodong, Cheng Jiachun, Li Yaorong, et al. Structure design and simulation study on the internal flow field of the negative-pressure remover [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(3): 289-293.

液压支架放煤口负压除尘器的结构设计 及内部流场模拟研究

翟国栋,程家春,李耀宗,孟俐利,吴飞,徐晨

中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083

摘要:针对液压支架放煤时煤尘浓度高的问题,设计了一种安装于低位放顶煤液压支架尾梁的负压除尘器;结合液压支架的参数,确定了负压除尘器的安装位置,得到了负压除尘器的空间极限尺寸;结合实验室试验条件,选取不同的负压除尘器引射筒尺寸参数,分别建立了三维模型并进行网格划分;选取不同的射流速度参数,运用 Fluent 分析软件进行数值模拟,求得除尘效果最佳时射流速度与引射筒直径的最佳组合参数,为负压除尘器的进一步优化奠定了基础。

关键词:负压除尘器;结构设计;流场;引射筒直径;射流速度

中图分类号:TP 391.9

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2017)06-289-5

Structure design and simulation study on the internal flow field of the negative-pressure remover

Zhai Guodong, Cheng Jiachun, Li Yaorong, Meng Lili, Wu Fei, Xu Chen

School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: To solve the problem of the high concentration of coal dust when the coal is drawn from the hydraulic support, we designed a negative-pressure remover which was installed on the hydraulic support tail beam; determined the installation position combining with the parameters of the hydraulic support and got the biggest size of the negative-pressure remover; we chose different diameters of the ejecting cone with the laboratory test conditions and built up and mesh the 3D models of the negative-pressure remover; we used the Fluent-analysis software to simulate the models with different jet flowing velocities and got the best combining parameters of the jet flowing velocity and ejecting cone diameter, which provides some basis for the next optimization for the negative-pressure remover.

Key words: negative-pressure remover; structure design; flow field; jet flowing velocity; ejecting cone diameters

粉尘作为煤矿主要自然灾害之一,不仅恶化了井下工作环境,还存在煤尘爆炸的危险,对安全生产有着巨大的威胁。液压支架放煤是采煤工作面粉尘的主要来源之一,目前国内针对液压支架放煤

的主要防尘措施是喷雾降尘,存在喷嘴易堵塞、流量较低、除尘效果不佳的问题。为了降低采煤工作面煤尘浓度,设计了一款应用于低位放顶煤液压支架放煤口的负压除尘器,运用 Fluent 软件对采用不

收稿日期:2016-10-24

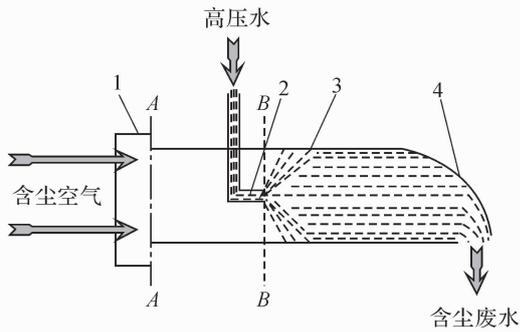
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2014YJ02)

作者简介:翟国栋(1973—),男,河北高碑店人,高级工程师,博士,主要从事机械专业的教学科研工作。Tel:010-62339034, 13691002308, E-mail:zgd@cumtb.edu.cn

同引射筒直径和射流速度的负压除尘器进行数值模拟,得到最佳组合参数,为负压除尘器的进一步优化奠定了基础。

1 负压除尘器的工作原理

负压除尘器由集气罩、喷水装置、引射筒和折流板四部分组成^[1],如图1所示。高压水从喷水装置射出,将压力能转化为速度能,水流呈伞雾状布满整个引射筒并高速前进,产生活塞效应,在喷水装置后部形成负压。含尘空气在负压的作用下从集气罩处被吸入,在引射筒内粉尘与水雾混合,向前高速推进,在折流板作用下含尘废水从折流板的下部排出。



1—集气罩;2—喷水装置;3—引射筒;4—折流板

图1 负压除尘器工作原理示意图

Fig.1 Functioning principle of the

negative-pressure remover

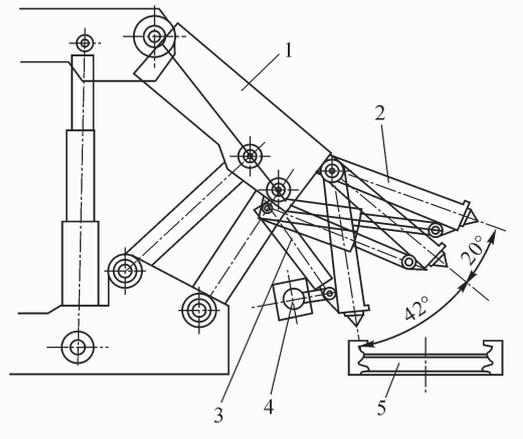
2 负压除尘器的结构设计

2.1 负压除尘器的安装位置

以ZF 13000/21/40型低位放顶煤液压支架为例,其高度为2 100~4 000 mm,宽度为1 660~1 860 mm,通过尾梁的摆动与插板的运动实现放煤,放煤位置低^[2],采出率高,有广泛的应用前景,故将负压除尘器应用于低位放顶煤支架具有典型的代表性。采煤工作面采用双输送机,其中后输送机位于尾梁下,能及时输送放落的顶煤,相比于其他位置,尾梁下方有足够的空间,管线少,无控制阀,且离放煤位置最近。基于以上原因,将负压除尘器安装于液压支架尾梁下方,其安装位置如图2所示。

2.2 负压除尘器尺寸设计

制约负压除尘器总体尺寸的因素有尾梁的宽度、尾梁千斤顶的摆动、尾梁与输送机的相对位置。由图2可知,尾梁工作时,向上摆动最大角为20°,向下摆动最大角为42°。尾梁处于最低位置时,其

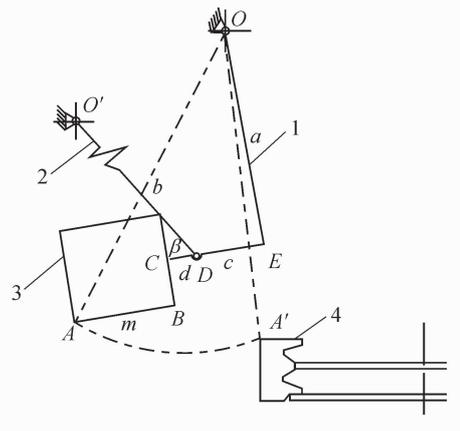


1—掩护梁;2—尾梁;3—尾梁千斤顶;
4—负压除尘器;5—刮板输送机

图2 负压除尘器安装位置示意图

Fig.2 The install location of the negative-pressure remover

与尾梁千斤顶夹角最大,对除尘器的尺寸和安装位置影响最大,故应在尾梁处于最低位时对除尘器进行尺寸设计。尾梁处于最低位时负压除尘器尺寸计算简图如图3所示。



1—尾梁;2—尾梁千斤顶;
3—负压除尘器;4—刮板输送机

图3 负压除尘器尺寸计算简图

Fig.3 The size calculation of the negative-pressure remover

负压除尘器安装时长度方向与输送机的运输方向平行。已知尾梁最小宽度为1 660 mm,预留一定的空间,取负压除尘器总体长度为1 450 mm。为方便计算,将除尘器的中心轴布置在通过铰接中心D且垂直于尾梁的平面上。负压除尘器的最大横截面积初步以集气罩的截面积为依据,设为边长m的正方形,尾梁旋转中心O与除尘器中心轴的垂直距离 $a = OE = 1\ 259.1\ \text{mm}$;尾梁与铰接中心D的距离 $c = ED = 192.1\ \text{mm}$;铰接中心D与除尘器

上表面距离 $d = DC$, 未知; 当边长 m 最大时, 为使除尘器顺利通过刮板输送机上方, 需保证尾梁旋转中心 O 与集气罩 A 点的距离 b 小于等于尾梁旋转中心 O 与刮板输送机 A' 点的距离, 故取 $b = OA' = 1\ 813.9\ \text{mm}$; 夹角 $\angle CDO' = \beta = 62^\circ$ 。

由图 3 可知, 除尘器的尺寸存在以下关系:

$$\tan \beta = \frac{m}{2d} \quad (1)$$

因为

$$b^2 = \left(a + \frac{m}{2}\right)^2 + (m + d + c)^2 \quad (2)$$

将以上两式联立, 代入数据得到

$$d = 156.4\ \text{mm}, m = 588.1\ \text{mm}$$

根据设计需要, m 最小为 120 mm, 则

$$m = \frac{120 + 588.1}{2} = 354\ \text{mm}$$

取 $m = 360\ \text{mm}$, 此时 $d = 96\ \text{mm}$, 故负压除尘器的空间极限尺寸为 $1\ 450\ \text{mm} \times 360\ \text{mm} \times 360\ \text{mm}$ 。

3 流场的建模与网格划分

采用三维软件 Pro/E 对负压除尘器进行建模。在实际建模过程中, 为减少计算量, 方便网格划分, 需对模型简化。由于负压除尘器内部流场模拟的对象是引射筒内流体的分布, 故只需建立引射筒与简化喷嘴的模型^[3]。引射筒采用圆形筒, 负压除尘器的总长 1 450 mm, 为集气罩和折流板预留一定的空间, 引射筒的长度取 740 mm。由文丘里效应可知, 流体通过缩小的断面时, 流速增大, 流体附近产生低压, 从而产生吸附作用。负压除尘器的空间极限尺寸为 $1\ 450\ \text{mm} \times 360\ \text{mm} \times 360\ \text{mm}$, 为提高文丘里效应, 引射筒直径应小于集气罩边长 360 mm。实验室试验时引射筒直径分别为 80 mm、120 mm、160 mm, 故分别建立对应的三组模型。

将建好的三维模型导入 ICEM CFD, 采用非结构网格划分^[4], 具体步骤如下:

(1) 几何修补与拓扑构建。由于 Pro/E 与 ICEM 可能存在软件接口兼容性问题, 为避免模型特征丢失, 需对导入的模型进行修补^[5]。拓扑构建可以对导入的模型进行处理, 以确定间隙、孔洞等信息。

(2) 创建 Part。建立 4 个 Part, 分别是 Pressure-inlet、Velocity-inlet、Wall 与 Pressure-out。

(3) 创建 Interface。Interface 是模型中非常重要的一个 Part。由于计算模型中存在气体和液体两个流域, 为保证数据流通, 要在相互接触的边界

上创建 Interface。

(4) 创建 Body。模型需要建立 2 个 Body, 分别对应喷嘴后部的气体计算域和喷嘴前部的液体计算域。

(5) 网格生成。针对不同的 Part 指定不同的网格设置参数, 生成网格。对部分区域进行加密处理, 进行网格光顺, 使其质量达标。网格划分后的模型如图 4 所示。



图 4 负压除尘器引射筒非结构网格图

Fig. 4 The unstructured meshing of the ejecting cone of negative-pressure remover

4 Fluent 模拟分析

将划分好的网格导入 Fluent 进行模拟, 选择 3D 模型、单精度求解器、串行计算, 其他选项选择默认设置。

4.1 求解器和求解方法设置

由于课题研究的是多相流问题, 故选用压力基求解器^[6]。因为压力、速度达到稳定时不再随时间变化, 故时间类型选用稳态, 模型设置时在多相流模型中选用 VOF 模型^[7]。又因为是湍流流动, 所以需要在 Viscous 黏性方程中选择应用最广泛的标准 $k - \varepsilon$ 两方程模式^[8], 其湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned}$$

式中, μ_t 为湍流黏度; G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能; G_b 为由浮力影响引起的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的湍流耗散率的影响; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数项; σ_k 、 σ_ε 为湍流动能和湍流耗散率对应的普朗特数; S_k 、 S_ε 为用户定义的湍流动能和湍流耗散率。

压力基求解器的求解方法有四种, 对于稳态的问题, 选择 Simple 分离算法更合适^[9]。

4.2 边界条件的设置

气体入口与流体出口分别设置为压力入口与压力出口,相对压力值设为理想状态,都设置为0,即一个大气压,表示流体介质可以随意进出。水射流入口设置为速度入口,速度作为变量在模拟中根据试验的不同而改变。将气液交界面设置为 Interface,其余边界都设置为 Wall。

4.3 模拟结果分析

进入引射筒的含尘空气流量 Q 是除尘效果的主要指标:

$$Q = vS$$

表1 不同射流速度时断面A处含尘空气流速

Tab.1 The volume velocity of the air flow with dust at cross section A with different jet flowing velocities

射流速度 $v_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10	20	30	50	70	90
流速 $v_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	10.9	10.6	12.9	24.9	25.8	26.5
含尘空气流量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.123	0.120	0.146	0.281	0.292	0.300

从表1可知,当射流速度 v_2 为90 m/s时,含尘空气流量 Q 最大。但由于实际操作条件的限制,射流速度越大,对设备要求越高,而射流速度 v_2 为70 m/s和90 m/s时含尘空气流量 Q 变化不大,故选择射流速度为70 m/s。

取射流速度为70 m/s,引射筒直径分别取80 mm、120 mm、160 mm,模拟结果见表2。

表2 不同引射筒直径时断面A处含尘空气流速

Tab.2 The volume velocity of the air flow with dust at cross section A with different ejecting cone diameters

引射筒直径 D/mm	80	120	160
流速 $v_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	14.6	25.8	14.1
含尘空气流量 $Q / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.073	0.292	0.283

由表2可知,当引射筒直径为120 mm时,含尘空气流量 Q 最大。

综上所述,当射流速度 v_2 为70 m/s、射筒直径为120 mm时,含尘空气流量 Q 最大,为0.292 m^3/s 。而在实验室试验中得到,当引射筒直径为120 mm、进水速度为70 m/s时,X轴方向上平均速度在30 m/s左右,计算得到空气域流速为0.21 $\text{m}^3/\text{s}^{[7]}$ 。由于实验室试验时存在空气对流等环境因素的影响,故误差可以忽略,经过对比得出模拟结果基本符合实际状况,所建立的 Fluent 模型基本合理正确。

式中, v 为含尘空气流速, m/s ; S 为断面面积, m^2 。

如图1所示,设含尘空气通过断面A时,流速是 v_1 ,水射流在断面B处的速度为 v_2 。其中, v_2 为自变量, v_1 为因变量。为了分析不同的射流速度 v_2 、引射筒直径 D 对内部流场速度特性、流量特性的影响,采用单一变量法进行模拟试验。在已有的实验室 PDA 测试系统试验中,测得射流速度为3.2~79.8 $\text{m/s}^{[10]}$,故在模拟试验中射流速度 v_2 分别取10 m/s 、20 m/s 、30 m/s 、50 m/s 、70 m/s 、90 m/s ,模拟结果见表1。

5 结论

(1) 结合 ZF 13000/21/40 型低位放顶煤液压支架的结构,确定了负压除尘器的安装位置及空间极限尺寸(1450 mm × 360 mm × 360 mm)。以引射筒的含尘空气流量 Q 为除尘效果的指标,确定了水射流速度 v_2 与引射筒直径 D 作为优化参数。

(2) 应用 Fluent 软件建立相应模型,为寻求最优方案提供了较好的技术支持。得出除尘效果最佳时,水射流速度 v_2 与引射筒直径 D 的最佳参数组合为70 m/s 与120 mm。

(3) 采用实验室试验与计算机模拟相结合的方法,其结果与实验室试验结果基本吻合,所建立的 Fluent 模型基本正确,为进一步优化奠定了基础。

参考文献

- [1] 翟国栋,董志峰,严升明. 引射除尘技术在综放工作面的应用研究[J]. 能源环境保护,2007,21(1): 28-29.
Zhai Guodong, Dong Zhifeng, Yan Shengming. Research on application of ejected dust removal technology in fully mechanized top coal caving mining face[J]. Energy Environmental Protection, 2007, 21(1): 28-29.
- [2] 王洪林. 放顶煤液压支架的发展状况[J]. 煤炭技术,2007,26(1): 11-12.
Wang Honglin. Suigenderism of caving coal hydraulic

- stand[J]. *Coal Technology*, 2007, 26(1): 11 - 12.
- [3] 郗元, 成凯, 娄希同, 等. 反吹式吸嘴流场数值分析及吸尘效率研究[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(1): 105 - 112.
- Xi Yuan, Cheng Kai, Lou Xitong, et al. Research on numerical analysis and dust collection efficiency of reverse blowing pickup mouth[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(1): 105 - 112.
- [4] 胡坤, 李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 141 - 143.
- [5] 蒋恒恒, 李奇敏, 汤宝平. 基于数学形态学与拓扑规则的三角网格修补算法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(1): 148 - 155.
- Jiang Hengheng, Li Qimin, Tang Baoping. Triangular mesh repair algorithm based on mathematical morphology and topology rule[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(1): 148 - 155.
- [6] 余华兵, 康士廷, 胡仁喜, 等. FLUENT14.5 流场分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 53 - 54.
- [7] 周大庆, 刘跃飞. 基于 VOF 模型的轴流泵机组启动过程数值模拟[J]. *排灌机械工程学报*, 2016, 34(4): 307 - 312.
- Zhou Daqing, Liu Yuefei. Numerical simulation of axial pump unit startup process using VOF model[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(4): 307 - 312.
- [8] 曹国强, 梁冰, 包明宇. 基于 FLUENT 的叶轮机械三维紊流流场数值模拟[J]. *机械设计与制造*, 2005(8): 22 - 24.
- Cao Guoqiang, Liang Bing, Bao Mingyu. The numerical simulation of blade machine 3D turbulence flow field based on fluent[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005(8): 22 - 24.
- [9] 唐家鹏. FLUENT14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 64 - 65.
- [10] 翟国栋. 综采工作面人机环境系统安全研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011: 70 - 71.

(责任编辑: 李朝雯)