

独头巷道受限贴附射流流场特征模拟实验研究

王海桥, 刘荣华, 陈世强

(湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 独头巷道压入式通风是有限空间的受限贴附射流。基于流体动力学和射流理论, 建立了独头巷道压入式受限贴附射流通风的紊流 $k-\epsilon$ 数学模型, 分析了计算边界条件, 并应用 PHOENICS3.4 计算流体动力学 (CFD) 软件模拟了独头巷道射流通风三维流场, 得出了独头巷道有限空间受限贴附射流通风流场分区、射流起始段、射流贴附过程及射流流速变化规律等流场特征。模拟计算结果表明, 独头巷道压入式通风流场可分为贴附射流区、冲击射流贴附区、回流区和涡流区, 受限贴附射流起始段小于贴附自由射流起始段。射流完全贴附后, 射流壁面轴心速度大于出风口轴心速度。数值模拟与实验结果相符, 为研究独头巷道风流传质过程、瓦斯运移规律及通风排污效率等提供了理论基础。

[关键词] 独头巷道; 受限贴附射流; $k-\epsilon$ 模型; 数值计算

[中图分类号] TD724.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)08-0045-05

1 前言

空气从圆形风筒出口射入同一介质的空间所形成的气流, 称为空气射流。空气射流是由风机的作用而形成的, 因此, 该空气射流又称受迫射流。根据空间界面对射流扩展的影响不同, 可分为自由射流、受限射流和半受限射流。空气射流在流动过程中不受壁面限制的称为自由射流, 受到限制的称为受限射流。出风口一侧为壁面, 其余空间自由的射流称受限贴附自由射流^[1]。独头巷道的压入式通风筒一般布置在独头巷道的一侧, 沿巷道侧壁形成贴附射流; 到达独头巷道迎头后, 形成迎头冲击贴附射流。但由于受独头巷道局限空间的制约和风流连续性, 同时便出现了与射流方向相反的流动。因此, 独头巷道压入式通风实际上是有限空间的受限贴附射流^[2,3]。由于井巷空间受限, 其贴附射流结构及特征与一般半受限贴附射流不同。揭示独头巷道压入式有限空间受限贴附射流流场结构及特征对研究独头巷道风流传质过程、瓦斯运移规律、有

害物浓度分布、新风置换效率及空气品质有重大的现实意义。

2 研究对象及数理模型

2.1 物理模型及坐标系

独头巷道压入式通风的风筒一般布置在独头巷道的侧壁, 风筒出口的位置在巷道侧壁的中部, 与迎头保持有一定的安全距离。因此, 根据独头巷道通风实际情况, 同时为了便于分析, 将压入式独头巷道简化为 X, Y, Z 的三维巷道空间, 取宽 \times 高为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$, 风筒出口距独头巷道迎头的距离为 10 m , 风筒出风口直径 $\Phi = 600\text{ mm}$ 的三维物理模型, 模型计算域为风筒出口到独头巷道迎头, 如图 1。

2.2 数理模型及边界条件

2.2.1 假设条件 1) 通风气流可视为不可压缩流体, 可忽略由流体粘性力做功所引起的耗散热, 同时假定壁面绝热, 等温通风; 2) 流体的紊流粘性具有各向同性, 紊流粘性系数 ν_t 可作为标量处理; 3) 流动为稳态紊流, 满足 Boussinesq 假设。

[收稿日期] 2003-11-14; **修回日期** 2003-12-15

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (59974022)

[作者简介] 王海桥 (1962-), 男, 湖北武汉市人, 湖南科技大学能源与安全工程学院教授

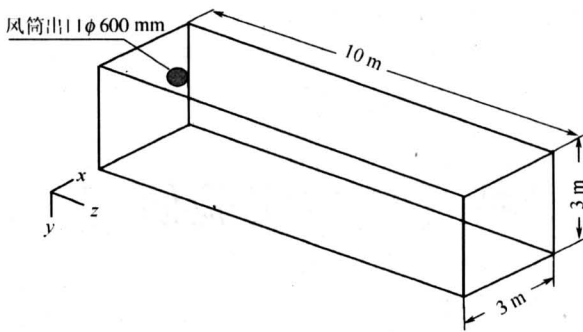


图 1 独头巷道贴附射流通风物理模型

Fig.1 Physical model of heading face wall-attached jet ventilation

2.2.2 数理模型 根据以上假设,独头巷道压入式受限贴附射流通风三维 $k-\epsilon$ 双方程紊流流动的基本微分时均方程组可用统一模型描述^[4]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(U_i \phi - \frac{\Gamma_\phi}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi \quad (1)$$

式中, ϕ 为模型通用因变量,可代表速度、紊流动

能、紊流动能耗散率等; Γ_ϕ 为与 ϕ 对应的扩散系数; S_ϕ 为与 ϕ 对应的源项。其具体含义见表 1。

表 1 中: $i, j = 1, 2, 3$; 例如 $(x_1, x_2, x_3) = (X, Y, Z)$; U_i —速度分量, m/s, $(U_1, U_2, U_3) = (U, V, W)$; ρ —空气密度, kg/m³; k —紊流动能, m²/s²; ϵ —紊流动能耗散率, m²/s³; P —时均压力, Pa; $\delta_{i,j}$ —Kronecker 系数 ($i \neq j, \delta_{i,j} = 0; i = j, \delta_{i,j} = 1$); ν —层流动力粘性系数, Pa·s; ν_t —紊流动力粘性系数, Pa·s。

2.2.3 边界条件 根据模拟的实体条件,以压入式送风风筒出口为模型的入口边界;以送风风筒出口处风筒以外的巷道断面为出口边界,巷道壁面及迎头为固定边界。设风筒出口风速为 12 m/s,入口风速均匀,则模型的边界条件可描述为:

入口边界: $U_1 = U_2 = 0, U_3 = 12$ m/s, 紊流动能 $k_{in} = C\% \times U_3^2/2$, 紊流动能耗散率 $\epsilon_{in} = C_\mu \rho k^2/\mu_t$, 根据文献 [5], $C\%$ 通常取 0.005 ~ 0.015;

表 1 控制方程中因变量的含义

Table 1 Meanings relevant to dependent variables in the control function

方程	ϕ	Γ	S
连续性方程	1	0	0
动量方程	U_i	$\nu + \nu_t$	$-\frac{\partial P}{\partial x_i} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{2}{3} \delta_{i,j} k \right)$
紊流动能	k	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}$	$\frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(G - \frac{2}{3} \delta_{i,j} k - \epsilon \right)$
紊流动能耗散率	ϵ	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} \left(C_{\epsilon 1} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(G - \frac{2}{3} \delta_{i,j} k \right) - C_{\epsilon 2} \epsilon \right)$
其中:		$\nu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}$	$G = \nu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right) \cdot \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$
模型经验常数 ^[4] : $\sigma_k = 1.0$ $\sigma_\epsilon = 1.3$ $C_{\epsilon 1} = 1.44$ $C_{\epsilon 2} = 1.92$ $C_\mu = 0.09$			

出口边界: $\partial U_i/\partial x_i = 0, P = P_{out}$, 取相对压力 $P = 0, k, \epsilon$ 自由滑动;

壁面边界: 所有壁面上施加无滑动边界条件, 即 $U_i = 0$; 壁面以绝热对待; 垂直于壁面的压力梯度为 0。

3 网格划分与数值计算

针对上述模型,在笛卡儿坐标系下划分计算网格, X、Y 方向分格数均为 30, Z 方向分格数为 50, 整个计算域共分割成 $30 \times 30 \times 50 = 45\ 000$ 计算单元。其计算步骤为^[6]:

- 1) 用 SIMPLEC 算法求解流速和压力耦合;
- 2) 用交错网格解决一阶导数项离散化降阶问题;
- 3) 用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型封闭时均方程;
- 4) 用混合格式离散对流扩散项;
- 5) 接口粘度系数与密度取相邻节点的算术平均值;
- 6) 压力场全域求解, 速度场逐行 TDMA。

4 计算结果与流场特征

根据图 1 所示的计算模型和边界条件,用

PHOENICS3.4 计算流体动力学软件对独头巷道压入式受限贴附射流通风三维流场进行数值计算，共进行了 800 次迭代计算，得到了理想的收敛结果；用 PHOENICS3.4 的 VR Viewer 和 Photon 后处理模块得到独头巷道受限贴附射流典型截面的流场及速度分布结果（见图 2~图 5）。因为 Z 方向的速度 W_1 为贴附射流的特征流速。因此，图 2~图 5 的流场及速度分布均取 W_1 的计算数值。

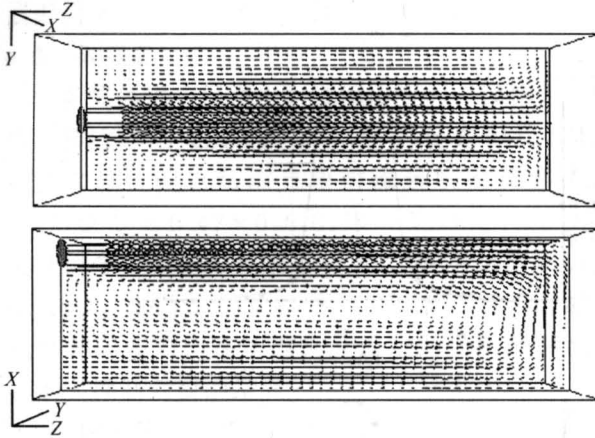


图 2 射流中心所在 Y-Z 平面及 X-Z 平面流场

Fig.2 Airflow field of jet center in Y-Z plane and X-Z plane

值线，充分表明了独头巷道贴附射流通风的分区结构。由于是独头巷道，贴附射流风流到达迎头后回转，整个流场可分为贴附射流区、冲击射流贴附区、回流区及涡流区；涡流区是由射流与回流的流向相反及射流的卷吸作用而形成的；从模拟结果可知，由于空间受限，射流不能得到充分发展，因而射流断面不能自由扩展，独头巷道射流体最大断面仅占巷道断面的 30% 左右，这与实验是相符的^[7,8]。

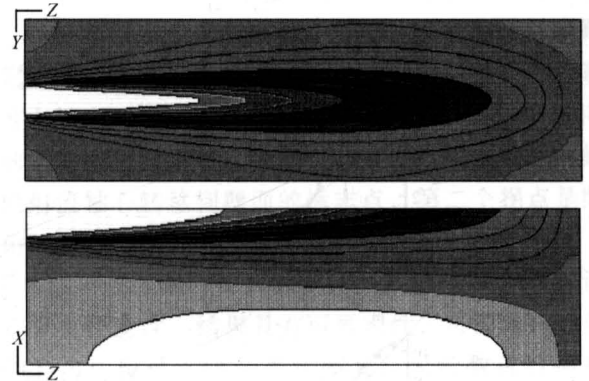


图 3 射流中心所在 Y-Z 平面及 X-Z 平面速度场等值线

Fig.3 Velocity equal value line of jet center in Y-Z plane and X-Z plane

4.1 流场分区

图 2~图 3 分别为射流轴心平面流场和速度等

4.2 射流贴附过程

图 4 所示的距射流出口不同距离的 X-Y 平

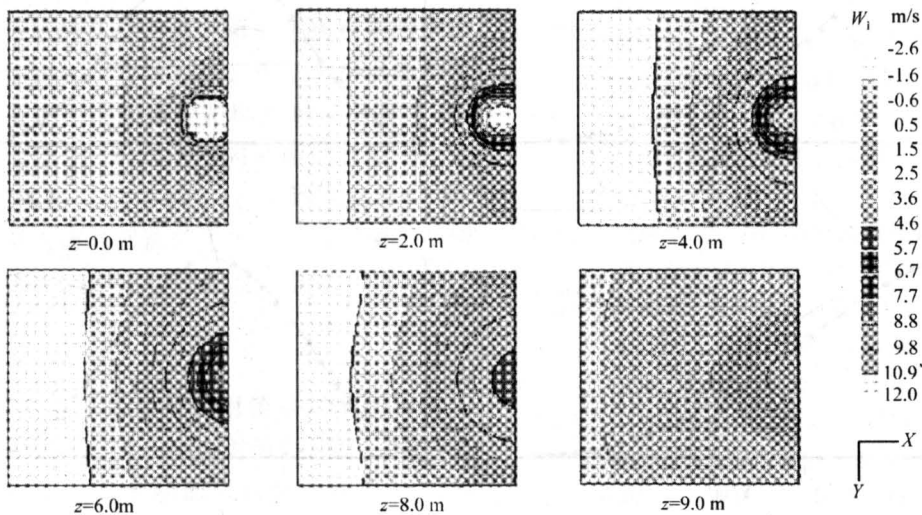


图 4 距射流出口不同距离的 X-Y 平面 W_1 等值线

Fig.4 W_1 equal value line of jet outlet different distance in X-Y plane

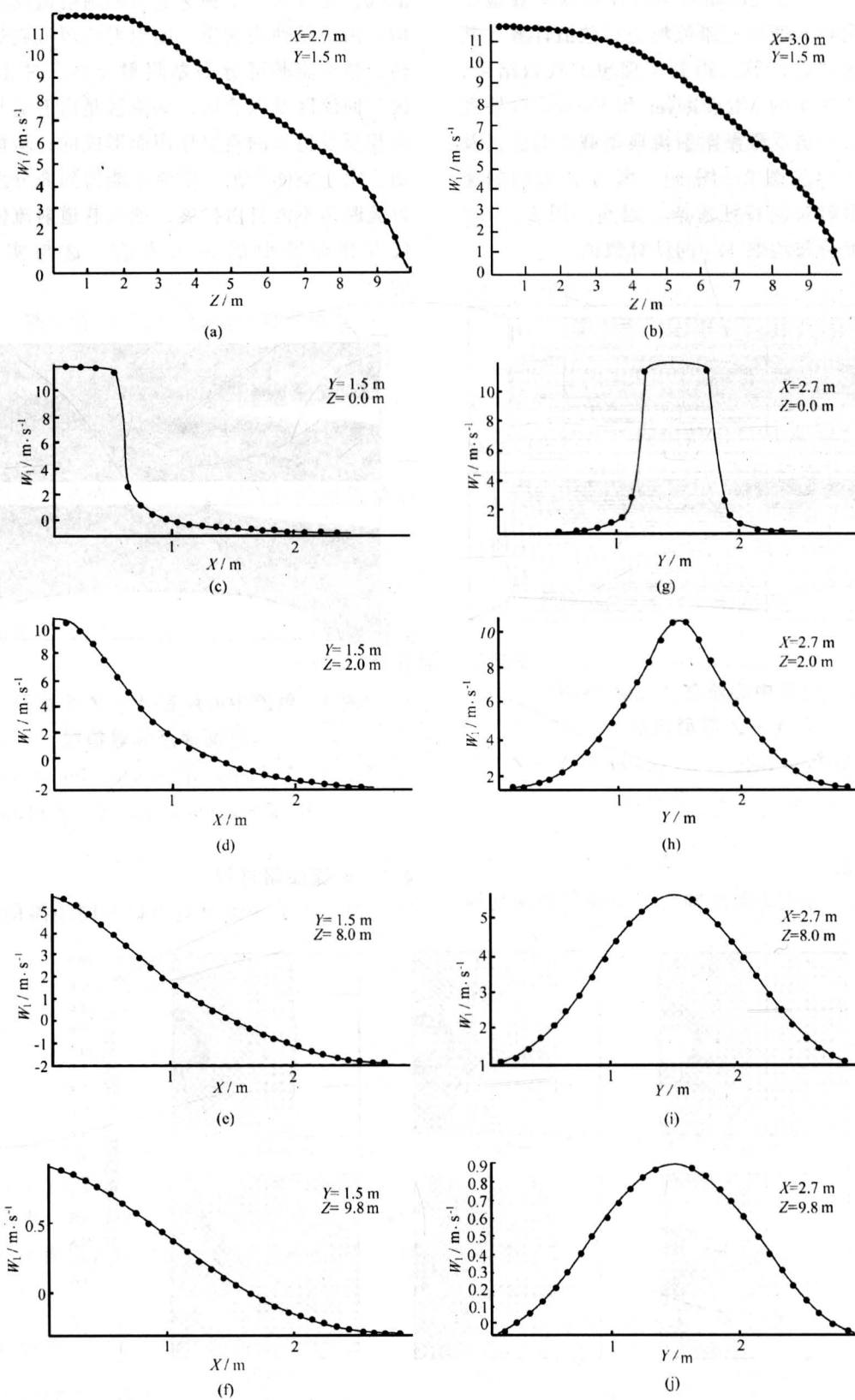


图5 受限贴附射流典型截面速度分布

Fig.5 Velocity distribution of typical section in restrained wall-attached jet

面 W_1 速度场等值线图表明了贴附射流的形成过程。射流并非一开始就形成了贴附,而是要经过一段距离(起始段)的发展,逐步形成射流体镜像;从起始段后($z=2\text{ m}$),射流体开始形成贴附,到 $z=6\text{ m}$ 时,完全形成圆形贴附射流,此时,贴附射流体呈半圆形;根据图2所示射流中心 $X-Z$ 平面流场, $z=6\text{ m}$ 以后射流体开始析出空气,射流体向前发展,冲击迎头,形成冲击贴附射流;之后射流体逐步消失,形成回流。

4.3 射流起始段

射流体轴心保持出口速度不变的一段称为起始段,其后称为主体段^[1]。和贴附自由射流相比,根据文献[9],贴附自由射流起始段长度 $l=0.471\Phi/\alpha=0.47\times 0.6/0.08=3.53\text{ m}$, (α 为射流结构参数,圆形射流取0.08, Φ 为风筒出口直径(m),从图5(a)和图5(c)看,射流起始段只有2 m左右,这是因为射流空间受限及回流的影响,抑制射流的发展。

4.4 射流流速变化

图5(a),图5(b)分别是出风口轴线和壁面中心线在 Z 方向的速度 W_1 变化。从图5(a)可以看出,射流起始段长度在2 m左右。而图5(b)中,贴附面速度 W_1 变化与图5(a)有明显的区别,由于射流形成贴附前,射流体轴心在出风口中心;起始段后,射流体轴心开始转向壁面,形成贴附射流,因此,主体段以后,贴附射流壁面轴心速度大于出风口轴心速度。在图5(a)中速度 W_1 变化曲线有明显的2个拐点,第一个拐点是起始段射流轴心转移到壁面的标志点;第二个拐点是贴附射流逐渐消失并开始形成冲击贴附射流的标志点。图5(c)~(j)是 Z 方向不同截面的速度 W_1 分别沿 X 、 Y 轴的变化曲线,速度负值表示回流,速度0点即是射流与回流的边界,充分说明了受限贴附射流的速度 W_1 变化过程及分布。

5 结论

1) 独头巷道压入式贴附射流通风流场可分为4个区,即贴附射流区、冲击射流贴附区、回流区和涡流区。射流区最大断面只有整个断面的30%左右,且回流区大于射流区,模拟结果与理论分析

及实验结果基本一致。

2) 由于射流空间受限及回流的影响,抑制了射流的发展,独头巷道受限贴附射流起始段小于贴附自由射流起始段。

3) 独头巷道贴附射流经起始段后($z=2\text{ m}$),射流体开始形成贴附,到 $z=6\text{ m}$ 时,完全形成圆形贴附射流,并且射流体开始析出空气,射流体向前发展逐步形成冲击射流,并逐步消失,形成回流。

4) 射流形成贴附前,射流体轴心在出风口中心;起始段后,射流体轴心开始转向壁面,形成贴附射流。因此,主体段以后,贴附射流壁面轴心速度大于出风口中心平面速度。射流轴心沿 Z 方向的速度变化曲线有2个拐点,第一个拐点就是起始段射流轴心转移到壁面的标志点,第二个拐点是贴附射流逐渐消失并开始形成冲击贴附射流。

5) CFD是一种非常实用的模拟工具,参数设定具有任意性、结果具有可再现性,可简便地通过CFD方法设计不同巷道空间及通风参数进行模拟分析,为研究独头巷道风流传质过程、瓦斯运移规律及新风置换效率提供理论依据。

参考文献

- [1] 余常昭. 紊动射流[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. 118~125
- [2] 王海桥. 掘进工作面射流通风流场研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 498~501
- [3] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000. 111~112
- [4] 郭鸿志, 张欣欣, 刘向军. 传输过程数值模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 61~62
- [5] 赵彬, 李先庭, 彦启森. 入口紊流参数对室内空气分布的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2000, 19(1): 1~4
- [6] 刘顺隆, 郑群. 计算流体力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1997. 291~298
- [7] 王海桥, 施式亮, 刘荣华. 压入式受限贴附射流流场特征及参数计算[J]. 黑龙江科技学院学报, 2001, 11(4): 4~7
- [8] 王英敏. 矿内空气动力学与矿井通风系统[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. 44~60
- [9] 周谟仁. 流体力学泵与风机[M]. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 161~171

(下转第63页)