

基于 FLUENT 的大倾角综放面通风降尘系统

姚锡文¹, 鹿广利², 许开立¹, 王延瞳¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 针对大倾角综放工作面倾角大、风流运动多变导致通风系统复杂、最优排尘风速难确定等问题, 基于气固两相流动理论, 建立大倾角综放工作面仿真模型. 通过 FLUENT 软件进行数值模拟, 研究了不同通风方式下综放工作面风流运动规律和粉尘分布、上行通风与下行通风的降尘机理及大倾角综放工作面的最优排尘风速. 结果表明: 上行通风时, 人行道空间的沿程粉尘质量浓度为 $1\ 200 \sim 1\ 600\ \text{mg}/\text{m}^3$; 下行通风时, 人行道空间的沿程粉尘质量浓度为 $460 \sim 600\ \text{mg}/\text{m}^3$. 下行通风方式更加适用于大倾角综放工作面. 最优排尘风速为 $2.5 \sim 2.8\ \text{m}/\text{s}$, 入口风速不宜超过 $3.0\ \text{m}/\text{s}$. 对比工作面现场实测粉尘质量浓度与数值模拟分析可知, 二者结果较为一致, 验证了数值模拟结果的可靠性与准确性. 研究结果可为大倾角综放工作面采取有针对性的防尘措施提供理论指导.

关 键 词: 大倾角综放工作面; 上行通风; 下行通风; 粉尘质量浓度; 最优排尘风速

中图分类号: TD 714

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)10-1497-05

Ventilation Dust Removal System in High Inclination-Angle Fully Mechanized Caving Face Based on FLUENT

YAO Xi-wen¹, LU Guang-li², XU Kai-li¹, WANG Yan-tong¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Resource and Environment Engineering Department, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China. Corresponding author: YAO Xi-wen, E-mail: yxw_20061005@126.com)

Abstract: The ventilation system of high inclination-angle fully mechanized caving face is complicated, and it is difficult to determine the optimal dust exhausting wind speed because of high inclination-angle and variable wind. In view of this fact, based on gas-solid flow theory, a numerical simulation mode for high inclination-angle fully mechanized caving face was established. Via applying FLUENT software, the wind flow regularities and dust distribution, together with the reducing dust mechanism and the optimal dust exhausting wind speed, were investigated under different ventilation modes. The results showed that the dust mass concentration of ascensional ventilation in footway space ranges from $1\ 200$ to $1\ 600\ \text{mg}/\text{m}^3$, the dust mass concentration of descensional ventilation ranges from 460 to $600\ \text{mg}/\text{m}^3$. The descensional ventilation is more applicable to the high inclination-angle fully mechanized caving face. The optimal dust exhausting wind speed is $2.5 \sim 2.8\ \text{m}/\text{s}$, and the wind speed should be controlled below $3.0\ \text{m}/\text{s}$. Experiment was performed in the working face, and the experimental results agree with the simulation results, thus verifying the reliability and accuracy of the numerical results. The research results can be used as theoretical guide for developing specifical prevention measures in high inclination-angle fully mechanized caving face.

Key words: high inclination-angle fully mechanized caving face; ascensional ventilation; descensional ventilation; dust mass concentration; optimal dust exhausting wind speed

近年来,大倾角($>30^{\circ}$)综放工作面布置逐渐推广.由于大倾角综放工作面倾角大、产尘点多、产尘量大、尘流运动复杂等特点,目前对大倾角综放工作面的通风降尘系统还缺乏深入掌握,而合理的通风是矿井安全生产的重要保证,不适当地通风,将对安全生产造成威胁.因此,研究不同通风方式下的大倾角综放工作面三维空间内的尘流规律,确定合理的通风方式和最优排尘风速对保证综放工作面安全、正常的回采具有重要意义.

以大倾角综放工作面中采煤机割煤产生的粉尘运动为研究对象,运用气固两相流理论建立粉尘颗粒的离散相数学模型,用 GAMBIT 建立大倾角综放工作面仿真模型,通过 FLUENT 流体软件对大倾角综放工作面的尘流规律进行模拟解算,对比研究了上行通风与下行通风方式下的风流运动规律和粉尘质量浓度分布.分析了不同通风方式的降尘机理,确定了大倾角综放工作面的最优排尘风速.与上行通风相比,下行通风更加适用于大倾角综放工作面.

1 离散相 – 连续相耦合计算模型

对于连续相,其流动控制方程组一般采用三维稳态不可压 Navier – Stokes 方程^[1],湍流流动采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[2],数学方程主要用来确定工作面气体的速度场和压力分布^[3-4];对于离散相,DPM 模型通过积分 Lagrangian 参考系下的离散相颗粒的运动方程计算其运动轨迹^[5-7],由颗粒的惯性与受力平衡,得到离散相颗粒运动方程.

当模拟两相耦合过程时,FLUENT 首先计算得到收敛或部分收敛的连续相流场,然后再创建喷射源引入离散相进行耦合计算,每一轮都计算颗粒/液滴轨迹并且更新每一个流体计算单元内的相间动量、热量及质量交换项,然后使用已经得到的颗粒计算结果中的相间动量、热量、质量交换项重新计算连续相流场和颗粒轨迹^[8-9].

2 数值计算物理模型的建立与求解

2.1 物理模型的简化与网格划分

根据大倾角综放工作面的现场实际,建立一个长 \times 宽 \times 高 $=140.0\text{ m}\times4.8\text{ m}\times3.6\text{ m}$,倾角为 40° 的长方体计算区域.利用 FLUENT 自带的前处理软件 GAMBIT 建立大倾角综放工作面的三

维模型并划分网格,三维模型如图 1 所示,网格模型如图 2 所示.

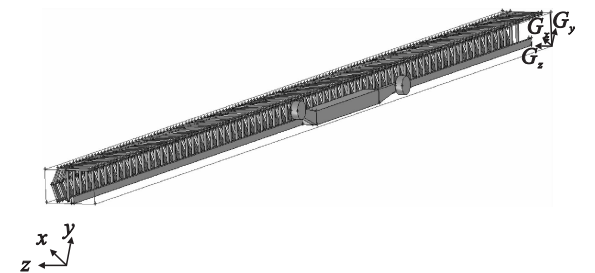


图 1 三维实体几何模型
Fig. 1 Three-dimensional solid geometric model

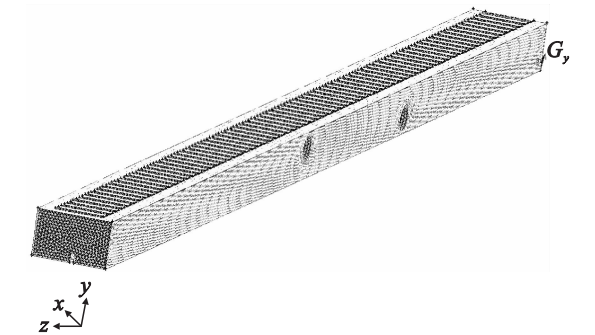


图 2 划分网格后的 GAMBIT 几何模型
Fig. 2 GAMBIT geometric model after grid discretization

2.2 边界条件及颗粒源参数的设定

边界条件及颗粒源参数的设定见表 1. 上行通风的速度入口位于几何模型的底部,自由出流位于顶部;而下行通风的速度入口与自由出流的设定正好与之相反.其他参数设置均相同.

表 1 边界条件及颗粒源主要参数设定
Table 1 Parameter setting of boundary condition and particle

主要参数	设定
入口边界类型	Velocity-inlet
入口速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.5
水力直径/m	3.6
湍流强度/%	3.2
湍流模型	$k-\varepsilon$
出口边界类型	Outflow
离散相模型	On
喷射源类型	Surface
湍流扩散模型	Stochastic tracking
粒径分布	Rosin-Rammler
最小粒径/m	1×10^{-6}
最大粒径/m	1×10^{-4}
中位径/m	3.5×10^{-5}
分布指数/m	1.73
初始速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0
质量流率/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.104

3 不同通风方式的降尘效果研究

计算时选择瞬时稳态求解器和标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型,采用基于同位网格的 SIMPLE 算法^[10]。

沿 x 轴正向每隔 5 m 取一个横断面,研究工作面倾向风速和粉尘质量浓度分布;取 $y=1.6$ m 的水平剖面,研究呼吸带风速和粉尘质量浓度分

布;取 $z=3.0$ m 处的纵切面,研究人行道空间风速和粉尘质量浓度分布。机道空间指采煤机外侧到电缆槽的空间;架前空间指电缆槽至液压支架支柱的空间;人行道空间指液压支架两个支柱之间的空间。

3.1 风流场分布规律的数值模拟结果与分析

经模拟解算得出上行通风和下行通风两种通风方式的风速分布,沿程风速对比如图 3 所示。

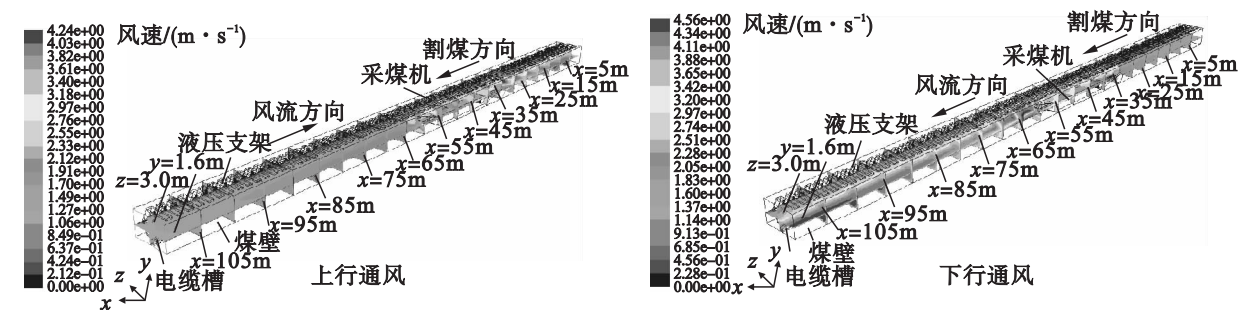


图 3 上行通风和下行通风时的风速沿程分布对比图
Fig. 3 Comparison of wind speed distribution between ascensional and descensional ventilations

由图 3 可知:上行通风时风速沿着 x 轴负方向(与割煤方向相反)逐渐增大,而下行通风时风速沿着 x 轴正方向(即割煤方向)逐渐增大;上行通风时,在未到达采煤机之前,风速逐渐增至 2.3 m/s 左右,增加较为缓慢,在经过采煤机以后,风速增加至约 4.2 m/s;下行通风时,在采煤机下风侧较长距离范围内,风速沿程较大,风速范围约为 3.5 ~ 4.5 m/s。

3.2 粉尘质量浓度分布规律的模拟结果与分析

割煤时上行通风和下行通风的粉尘质量浓度沿程分布如图 4 所示。分析图 4 可得出以下结论。

1) 上行通风时断面粉尘质量浓度的最大值出现在滚筒附近,造成采煤机司机处的粉尘质量

浓度极高,最大值达到 $6\,600\text{ mg/m}^3$,对工人的健康产生极大危害;而下行通风时断面粉尘质量浓度的最大值出现在采煤机下风侧 10 m 左右,最大粉尘质量浓度约 $3\,000\text{ mg/m}^3$ 。

2) 上行通风时,采煤机下风侧粉尘质量浓度沿程较高,稳定在 $1\,200\sim1\,600\text{ mg/m}^3$ 之间,大量呼吸性粉尘充满人行道空间,产生巨大危害。

3) 下行通风时,采煤机下风侧粉尘质量浓度逐渐下降,在采煤机下风侧 35 m 以后,粉尘质量浓度稳定在 $460\sim600\text{ mg/m}^3$ 之间,且人行道空间呼吸带高度处的粉尘质量浓度明显低于上行通风时的粉尘质量浓度。

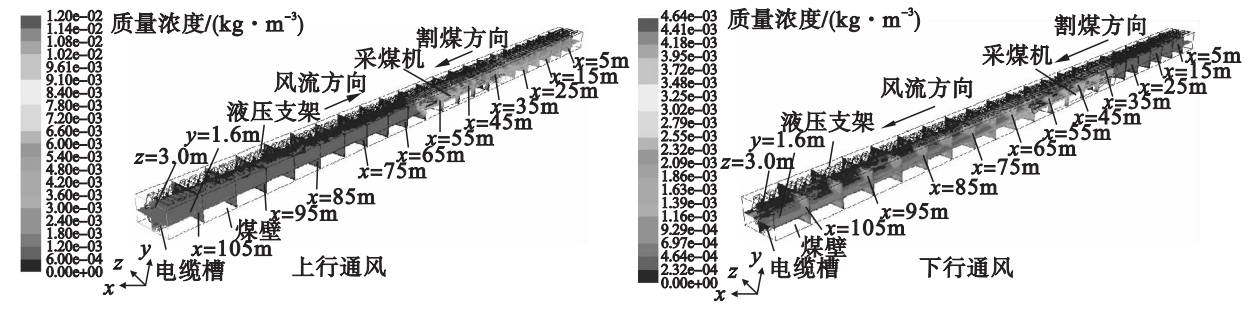


图 4 上行通风和下行通风时的粉尘质量浓度沿程分布对比图
Fig. 4 Comparison of dust mass concentration distribution between ascensional and descensional ventilations

3.3 上行通风与下行通风的降尘机理研究

综放工作面风流中粉尘的漂浮或沉降状态是由重力产生的垂直于斜面方向的分力和风流产生的浮力等共同作用决定的。显然,与水平工作面不同,在大倾角综放工作面中,粉尘所受的重力方向

与工作面中风流的方向不是垂直关系。

如图 5 所示, v 是风流速度, v' 是粉尘的沉降速度, v'' 是风速在垂直于斜面方向上的分速度。上行通风时 v'' 与 v' 方向相反,风流所产生的加速度分量垂直向上,与重力加速度方向恰好相反,致使粉尘

受到向上的惯性力作用,不利于粉尘沉降,粉尘易漂浮. 而下行通风正相反, v'' 与 v' 的方向相同,风流对工作面中的粉尘产生一个垂直向下的加速度分量,其方向与重力加速度方向相同,粉尘易沉降.

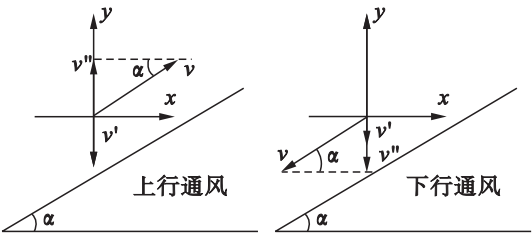


图 5 通风方式对粉尘运动的影响
Fig. 5 Effect of ventilation modes on dust movement

4 下行通风时最优排尘风速确定

受到现场生产条件限制,无法在现场工作面任意改变综放工作面的入口风速,故可以通过模拟解算来确定大倾角综放工作面的最优排尘风速.

利用 FLUENT 流体软件模拟大倾角综放工作面在不同风速下粉尘的分布规律,导出粉尘质量浓度数据,选用机道空间、架前空间和人行道空间呼吸带高度处的粉尘质量浓度,对采煤机司机处和采煤机下风侧 20 m 处的粉尘质量浓度进行分析,粉尘质量浓度与风速关系如图 6 所示.

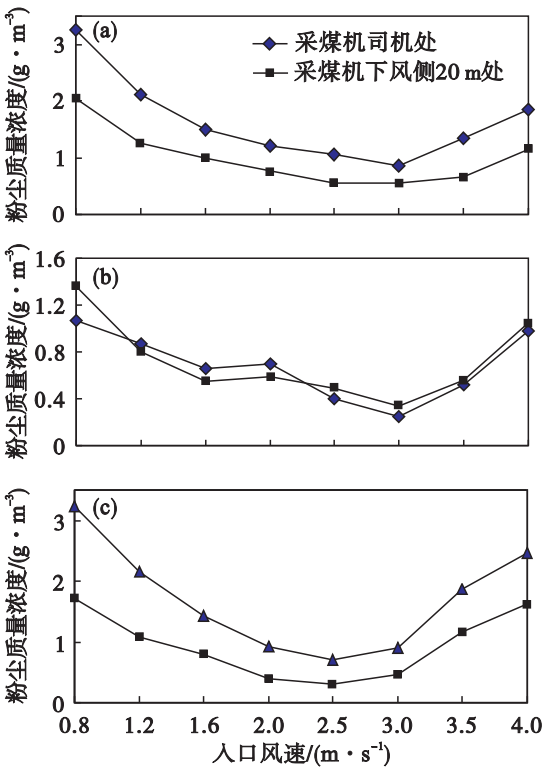


图 6 风速对粉尘质量浓度的影响
Fig. 6 Effect of wind speed on dust mass concentration
(a) —机道空间; (b) —架前空间; (c) —人行道空间.

由图 6 可知:随着风速的逐渐增加,司机处和采煤机下风侧 20 m 处的粉尘质量浓度逐渐降低;风速增至约 2.8 m/s 时,各空间内粉尘质量浓度降至最低值,人行道空间的最低值为 300 mg/m³ 左右;大倾角综放面的最优排尘风速为 2.5 ~ 2.8 m/s,继续增大风速后,粉尘质量浓度又逐渐增加,这是因为风速过大容易将落尘扬起.

5 采场试验应用

5.1 粉尘质量浓度测定方法与采样点布置

淄博矿业集团葛亭煤矿 2317 综放面倾角大(煤层倾角 23 ~ 49°,平均为 35°),工作面现场放顶煤支架共布置 92 架,从胶带顺槽到轨道顺槽依次编号为 1# ~ 92# 支架,相邻的两液压支架的中心距为 1.5 m.

以该大倾角综放工作面现场为依托,在液压支架两立柱之间的人行道空间,对上行通风和下行通风以及不同风速条件下工人呼吸带高度处的粉尘质量浓度进行现场测试. 测尘点的选择与布置综合考虑到粉尘产生源在空间和时间上的扩散规律、现场的作业流程和工人操作方法等因素.

结合现场条件并全面测定沿程粉尘质量浓度分布,根据 GB5748《作业场所空气中粉尘测定方法》,沿程共布设 12 个测尘点,各测点分别布置在 5#, 10#, 15#, 20#, 25#, 30#, 35#, 40#, 50#, 60#, 70#, 80# 液压支架人行道空间处,当采煤机在 35# 液压支架附近时,应用滤膜增重法同时测定各测点的粉尘质量浓度.

5.2 测定结果对比分析

测定上行通风和下行通风人行道空间呼吸带高度处的粉尘质量浓度,将测试结果进行对比分析,测定粉尘质量浓度沿程变化曲线如图 7 所示.

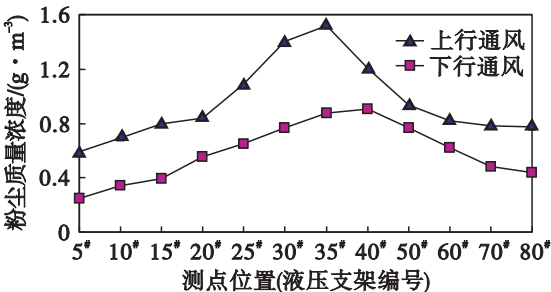


图 7 两种通风方式下沿程实测粉尘质量浓度对比图
Fig. 7 Comparison of dust mass concentration measured between two different kinds of ventilations

对比分析图 7 中两种通风方式下现场沿程实

测粉尘质量浓度可以看出,上行通风时粉尘质量浓度沿程明显高于下行通风方式.通过现场实测验证了下行通风方式更适用于大倾角综放面的降尘工作.

测定下行通风时不同风速下人行道空间呼吸带高度处的粉尘质量浓度沿程变化规律,研究其最优排尘风速.根据各测点所对应液压支架的编号,将各测点位置换算成与采煤机尘源距离(相邻两架液压之间中心距为 1.5 m),沿程综放工作面坐标建立以采煤机为 x 轴坐标原点,采煤机上风侧坐标取负值,下风侧取正值,分析结果见图 8.

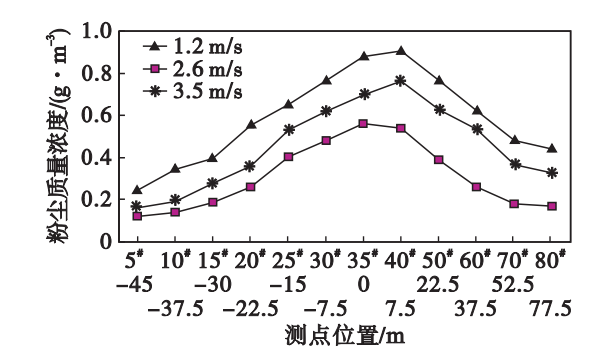


图 8 不同风速下粉尘质量浓度实测分布
Fig. 8 Dust mass concentration measured at different wind speeds

从图 8 中可以看出,综放工作面入口风速不同时,现场实测粉尘质量浓度沿程变化趋势基本保持一致.当风速由 1.2 m/s 增加至 2.6 m/s 时,工作面沿程粉尘质量浓度逐渐降低.在风速为 1.2、2.6、3.5 m/s 三者中,风速为 2.6 m/s 时沿程粉尘质量浓度最低,通风降尘效果最佳,即现场工作面的最优排尘风速约为 2.6 m/s.继续增大风速至 3.5 m/s 时,沿程粉尘质量浓度又开始升高,数值模拟结果与现场实测数据吻合较好.

考虑到现场条件复杂多变,以及数值模拟时采用计算模型的自身随机性的限制,现场实测与模拟结果之间存在小部分误差是可以接受的,可见数值模拟结果能够可靠地反映综放工作面粉尘的分布特征,研究结果可以为大倾角综放工作面现场防尘技术措施提供理论性指导.

6 结 论

1) 大倾角综放工作面上行通风时,人行道空间沿程粉尘质量浓度较高,为 $1\ 200 \sim 1\ 600\ \text{mg}/\text{m}^3$.下行通风时,人行道空间的沿程粉尘质量浓度为 $460 \sim 600\ \text{mg}/\text{m}^3$,明显低于上行通

风时的粉尘质量浓度.

2) FLUENT 数值模拟结果与上行风、下行风的降尘机理研究所得出的结论保持一致,即下行通风适用于大倾角综放工作面,现场实测结果也验证了这一点.

3) 大倾角综放工作面的最优排尘风速为 $2.5 \sim 2.8\ \text{m}/\text{s}$,适当增加风速有利于降尘,入口风速超过 $3\ \text{m}/\text{s}$,易产生扬尘,降尘效果变差.

4) 现场实测与数值模拟结果存在小部分误差是可以接受的,说明数值模拟可为研究综放面粉尘分布规律提供准确可靠的数据,从而有针对性地采取防尘措施.

参考文献:

[1] 谢耀社,姜学云.负压降尘技术及其应用[J].中国矿业大学学报,2003,32(5):567-570.
(Xie Yao-she, Jiang Xue-yun. Dust removal technology with negative pressure and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(5): 567-570.)

[2] 傅贵,张江石,潘结南,等.工作面粉尘污染状况研究[J].煤炭学报,2006,31(1):63-66.
(Fu Gui, Zhang Jiang-shi, Pan Jie-nan, et al. Study of long all top-coal caving face dust pulation status[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 63-66.)

[3] Crowe C T. One model for turbulence modulation in fluid-particle flows[J]. Multiphase Flow, 2000, 26(5): 719-727.

[4] Marshall J S, Beninati M L. Analysis of subgrid-scale torque for large-eddy simulation of turbulence[J]. AIAA Journal, 2003, 41(10): 1875-1881.

[5] Julian R E, Smolarkiewicz K. Eddy resolving simulations of turbulent solar convection[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2002, 39(9): 855-864.

[6] Ivan M, Pierre S. Large eddy simulation of flow around an airfoil near stall[J]. AIAA Journal, 2002, 40(6): 1139-1145.

[7] Wissink J G. DNS of separating low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 626-635.

[8] Enwald H. Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 22(1): 21-66.

[9] Zhou L X. Two-fluid models for simulating turbulent gas-particle flows and combustion[J]. Multiphase Science and Technology, 1999, 11(1): 37-57.

[10] Grigoriadis D G E, Bartzis J G, Goulas A. Efficient treatment of complex geometries for large eddy simulations of turbulent flows[J]. Computers and Fluids, 2004, 33(2): 201-222.