

基于Fluent的多尘源掘进 粉尘扩散规律数值模拟

沈奇琦

安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年8月30日; 录用日期: 2024年9月29日; 发布日期: 2024年10月14日

摘要

在粉尘颗粒气固两相流运动理论研究的基础之上, 基于ANSYS Fluent软件, 从多尘源角度出发, 针对长压短抽混合式通风的岩巷掘进工作面, 以掘进机截割破碎产尘为主要产尘源、落岩扬尘、装载扬尘为叠加尘源, 进行了多尘源粉尘颗粒叠加扩散规律数值模拟。结果表明, 掘进机截割过程中, 截割主尘源在通风风流的影响下, 绝大部分截割粉尘颗粒随抽风侧风流回流, 并先后与落岩扬尘与抽风侧装载扬尘叠加后扩散并趋于稳定, 少量截割粉尘颗粒在回风风流的影响下先后与落岩扬尘以及进风侧装载扬尘产生叠加扩散, 在扩散趋于稳定后部分粉尘颗粒受回风风流影响, 沿掘进机体向后方扩散, 部分则滞留积聚在进风风筒下侧, 缓慢沿壁面向巷道后方扩散。

关键词

粉尘扩散规律, CFD数值模拟, 多尘源, 气固两相流

Numerical Simulation of Dust Diffusion Law of Multi-Dust Source Excavation Based on Fluent

Qixun Shen

School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Aug. 30th, 2024; accepted: Sep. 29th, 2024; published: Oct. 14th, 2024

Abstract

On the basis of the theoretical study of gas-solid two-phase flow of dust particles, based on ANSYS

Fluent software, from the perspective of multiple dust sources, numerical simulation of the superposition and diffusion law of dust particles from multiple dust sources was carried out for the rock tunnel excavation working face with long pressure and short suction mixed ventilation, using the main dust sources of cutting and crushing by the excavator, rock falling dust, and loading dust as the superimposed dust sources. The results showed that during the cutting process of the tunneling machine, the main dust source was affected by the ventilation airflow, and the vast majority of the cutting dust particles flowed back with the exhaust side airflow, and then diffused and stabilized with the falling rock dust and the loading dust on the exhaust side. A small number of cutting dust particles were affected by the return airflow and diffused successively with the falling rock dust and the loading dust on the inlet side. After the diffusion stabilized, some dust particles were affected by the return airflow and diffused backward along the tunneling body, while others were trapped and accumulated on the lower side of the inlet air duct, slowly diffusing along the wall towards the rear of the roadway.

Keywords

Dust Diffusion Law, CFD Numerical Simulation, Multi-Dust Source, Gas-Solid Two-Phase Flow

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今高度机械化的煤矿生产工作环境下，粉尘在工作面的充斥成为了必然，其所导致的恶劣工作环境严重威胁到了工人的身体健康，甚至导致爆炸事故的发生。袁亮院士[1]指出，掌握煤矿粉尘产生机理是实现粉尘源头治理的基础和前提。煤矿掘进工作面是重度产尘区，因此，从多尘源角度出发，深入研究掘进工作面源头粉尘产生扩散机理，把握多产尘源粉尘叠加扩散规律，是后续降尘方案设计规划不可或缺的理论依据。

众多学者基于多尘源角度，在粉尘叠加扩散问题上展开研究。王素云[2]等围绕多尘源耦合扩散规律的主要研究成果展开讨论，介绍了多尘源相关理论在粉尘扩散分布规律研究方面的重要成果，对粉尘多尘源耦合扩散理论及其研究方法进行了总结；徐青云[3]等以山西大同煤矿综采工作面的实际工程现场为背景建立三维模型，采用数值模拟的研究方法，对截割及移架工况产尘的耦合叠加扩散规律进行了研究，通过与现场实测数据对比，验证了其数值模拟结果的高度相似性。蒋仲安[4]等针对煤矿综采面建立呼吸性粉尘扩散的数学模型，通过紊流系数求解的方法进行理论计算得出数值，并进行相似模拟实验，以理论值与实验值进行了比较，验证了其有效性与可靠性。本文将基于学者们的研究，进一步针对岩巷掘进工作面工况，以截割破碎点为主要尘源，落石扬尘，装载扬尘为叠加尘源，基于 Fluent 软件的数值模拟为主要研究手段，进一步完善综掘工作面粉尘主要尘源叠加扩散的相关规律理论。

2. 尘源扩散机理分析

在掘进工作面，由于空间狭窄，进风风筒供风时，通风风流碰撞掘进工作面壁面后改变方向，形成回流风流，在作业产尘以后，粉尘颗粒散布在通风风流中，随着通风风流移动并碰撞掘进迎头壁面产生二次飞扬，并随回流风流沿工作面向巷道内部扩散。掘进机截齿切割时，接触面很小、截齿压力很大。岩石体受到的压力大于抗压强度发生破碎，随着截割齿的压力增大，破碎体压成粉状逐渐紧密。随着截

割截齿挤压周围煤体到一定压力值，形成压力区，压应力沿着岩壁裂隙方向产生裂纹，向岩壁内部逐步延展，裂隙结构使得岩体从母体上分离。碎块与粉尘向外喷出。随着掘进过程进行，岩壁裂隙增大，开始有较大块岩石坠落，这些落岩扬起了积聚在掘进机前端下方的粉尘颗粒，再次接触较高风速的通风风流运动并随其扩散。装载过程中，装载耙爪的运动及大量的小块岩石互相碰撞，使得装载台上方的部分粉尘颗粒扬起，扬起后随通风风流再次进行扩散。

3. 气固两相流模型

所研究对象同时存在两个或以上的物质状态时，如气体与固体、气体与液体，可称其为多相系统。在研究的过程中，由于多相系统分子间作用力的复杂性，一般从两相系统出发进行研究。在研究过程中，通常将流体作为连续介质，固体作为离散体系处理。建立数学模型时，为了方便描述引入拉格朗日坐标系和欧拉坐标系。由于流体力学中，只针对宏观层面上流体的运动，而不考虑微观层面上由于分子间间隙而产生的分子运动，所以将通风风流相视作连续相，使用欧拉法进行描述。而粉尘颗粒作为离散相，其遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒三大定律。

掘进机截割装载作业过程中粉尘的扩散可以将粉尘颗粒看作离散相在连续相中的运动，即通风风流中的运动。针对掘进机截割装载气固两相流扩散问题，利用欧拉法对风流连续相进行描述，拉格朗日法对粉尘颗粒离散相进行描述[5]，鉴于可实现 $k-\varepsilon$ 模型更加精准，使用可实现 $k-\varepsilon$ 模型对连续相进行求解输送方程，可实现 $k-\varepsilon$ 模型的输送方程表达式如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{V \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中： x_j 为 j 方向上的坐标点， m ； ρ 为气体的密度， kg/m^3 ； u_j 为 j 方向速度分量， m/s ； k 为湍动能， m^2/s^2 ； μ 为层流的黏性系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； μ_t 为湍流的黏性系数， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； G_k 、 G_b 为湍动能产生项， $\text{kg}/(\text{s}^3\cdot\text{m})$ ； ε 为湍流动能耗散率， m^2/s^3 ； u_j 为 j 方向速度分量， m/s ； Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响，在模拟过程中为方便运算，假设流体为不可压流体，故 Y_M 取值为 0； t 为时间， s ； S_k 、 S_ε 为用户定义的源项； $C_{1\varepsilon}$ 、 C_2 、 σ_ε 、 σ_k 为模型常数。湍流模型常数如表 1 所示：

Table 1. Turbulence model constants

表 1. 湍流模型常数

$C_{1\varepsilon}$	C_2	σ_ε	σ_k
1.44	1.9	1.2	1.0

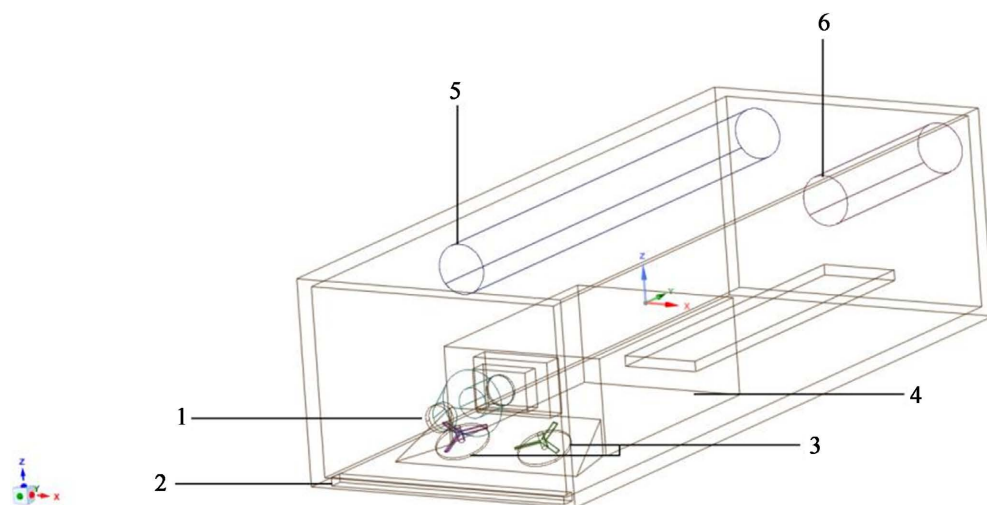
4. 多尘源粉尘扩散数值模拟

4.1. 几何模型的建立

以采用长压短抽混合式通风的岩巷掘进工作面为研究对象，使用 Rhino 三维建模软件建立几何模型后，导入 Spaceclaim 模型处理软件进行数值模拟前处理，三维模型如图 1 所示。为了更加细致地观察尘源处多尘源粉尘耦合及其扩散的规律，取巷道长度为 20 m 的掘进工作面作为参考，主要设备包括悬臂式掘进机，抽风风筒进风风筒等，为方便计算作出简化，模型各部分均由简单几何体构成，掘进机机体长

度为 9.8 m，进风管距掘进工作面为 5.6 m，抽风管与掘进工作面距离为 14.3 m。为保证粉尘充分稳定扩散，尘源射出面与巷道模型在设计上以短管状导流结构连接。

ANSYS
R19.2



1. 截割头截割尘源; 2. 落岩扬尘尘源; 3. 装载扬尘尘源; 4. 掘进机机体; 5. 进风风管; 6. 抽风风管

Figure 1. The building of 3D model

图 1. 三维模型建立

4.2. 网格划分

完成对三维模型的建立与流体域划分的处理后，对三维模型进行网格划分，网格划分及其综合质量评价如图 2，图 3 所示。

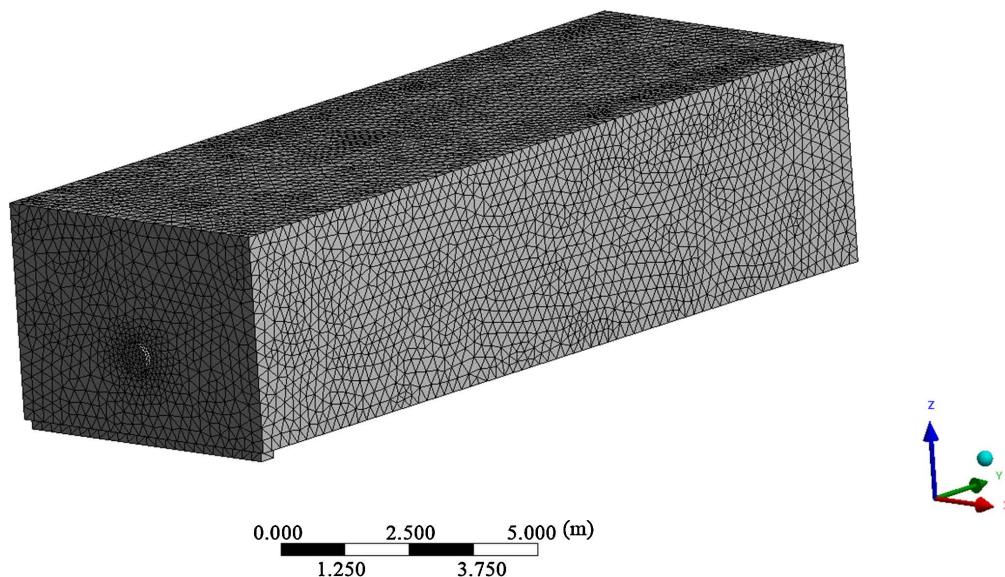


Figure 2. Schematic diagram of meshing

图 2. 网格划分示意图

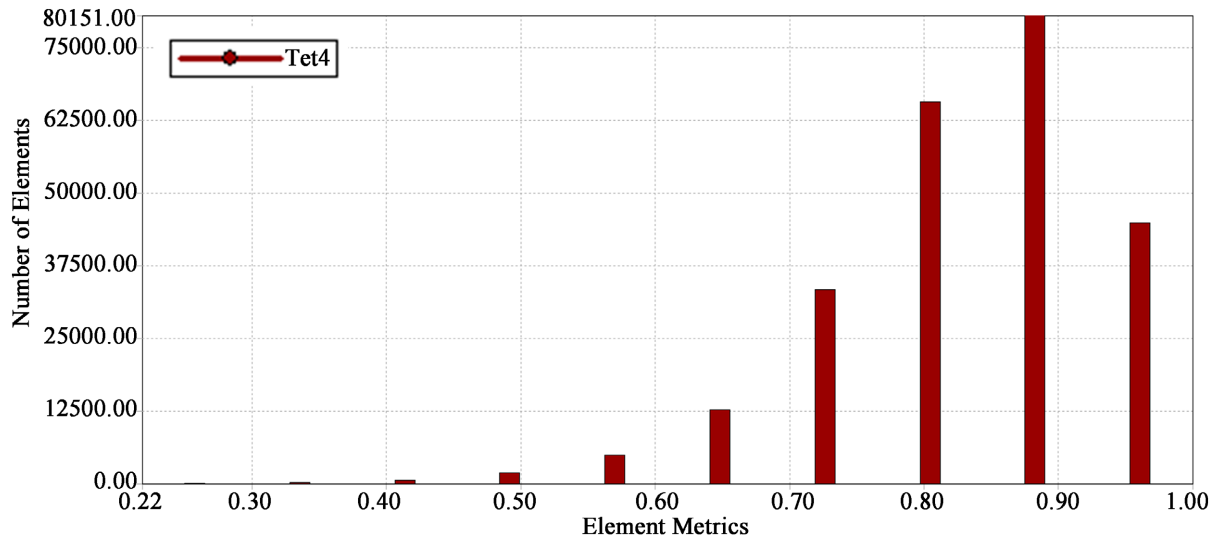


Figure 3. Meshing the histogram of comprehensive quality evaluation

图 3. 网格划分综合质量评价柱状图

通过对网格划分综合质量评价柱状图分析以及 ANSYS Meshing 软件统计可知, 网格的最小质量系数为 0.21812, 最大质量系数为 0.99984, 平均质量系数为 0.83213, 网格质量的评价标准以 0 为最差, 1 为最佳, 由此可见网格质量相对较好。

4.3. 主要求解参数的设置

将导入 ANSYS 的几何模型进行网格划分的处理后, 使用 ANSYS Fluent 进行瞬态迭代求解。岩巷主要岩石组分为中粒砂岩, 在通风风流稳定后射入粉尘。假设掘进机稳定产尘, 扬尘以低速稳定扬起进行求解。基于 Fluent 的多尘源耦合扩散规律研究的主要求解参数设置如表 2 所示:

Table 2. The main requirement solution parameter

表 2. 主要求解参数

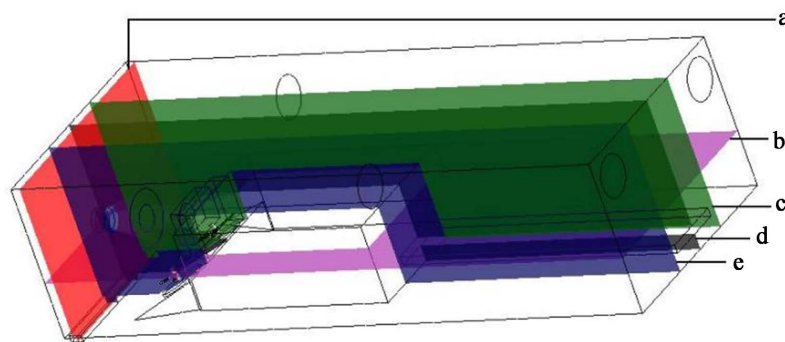
项目类别	参数设置
湍流模型	可实现 k-ε 模型
DPM 模型	On
进风口边界	Velocity—Inlet
出风口边界	Outflow
风流速度/(m·s ⁻¹)	7
能量方程	Off
求解器	压力速度耦合求解器
喷射源类型	Surface
离散相材料	ash-solid
粒径分布类型	Rosin-Rammler 分布
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2600
最小粒径/(m)	1e-06

续表

最大粒径/(m)	1e-04
中粒径/(m)	1.2e-05
掘进粉尘速度/(m·s ⁻¹)	0.6
扬尘粉尘速度/(m·s ⁻¹)	0.2
质量流率/(kg·s ⁻¹)	0.006
湍流扩散模型	随机游走模型

5. 多尘源粉尘耦合扩散规律分析

粉尘颗粒多尘源耦合扩散问题相对复杂, 本文采用关键位置建立多个采样面, 不同时间点多次采样的方法, 总结分析多尘源粉尘叠加作用下的扩散规律, 本文针对长压短抽通风方式的岩石巷道掘进工作面的悬臂式掘进机截割掘进过程, 进行了时长为 60 s 的基于 ANSYS Fluent 软件的仿真模拟, 粉尘颗粒浓度云图关键采样位置如图 4 所示。



a. 落岩扬尘尘源采样面; b. 截割尘源横向扩散采样面; c. 进风侧装载扬尘采样面; d. 截割尘源纵向扩散采样面; e. 抽风侧装载扬尘采样面。

Figure 4. Schematic diagram of the key sampling locations of the contour map
图 4. 云图关键采样位置示意图

岩巷掘进过程不同时段关键采样面粉尘颗粒浓度云图如图 5 所示, 每隔 6 s 进行了一次云图采样, 各个关键采样面共采集十次云图。

综合分析云图可知: 截割产尘源作为主产尘源, 在截割过程初期, 由于截割端头速度较慢产尘较少, 在通风环境下掘进作业产生少量粉尘后被抽风筒排出, 在巷道内的积累较少, 在 12 s 前后产尘量开始并不断增加与扩散, 绝大部分粉尘颗粒受通风风流在碰撞掘进迎头时产生的回流风流影响下, 随着回流风流向巷道截面右下方扩散, 小部分向进风侧巷道散逸。

进风侧落岩将掘进机下方漂浮粉尘扬起后与截割粉尘源叠加后, 随掘进迎头的回风风流扩散, 绝大部分在随着回风风流撞击掘进迎头壁面后再次飞扬, 在 12 s 左右开始与进风侧装载扬尘点产生叠加, 并相互作用后扩散, 并不断受装载机耙爪及通风风流影响随进风侧装载扬尘点一同扩散, 在进风侧落岩扬尘产尘后不断重复这一过程, 在逐渐趋于稳定后, 粉尘颗粒沿掘进机体向上方扩散, 部分滞留积聚在进风口下侧并开始沿巷道壁面向后方缓慢扩散。

抽风侧落岩扬尘源在 12 s 左右与巷道截面右下方在回流风流作用下汇入截割主产尘源, 产生叠加扩散, 并在回流风流与抽风风筒的影响下, 在 18 s 左右再次与抽风侧装载扬尘产生叠加扩散, 并在 30 s

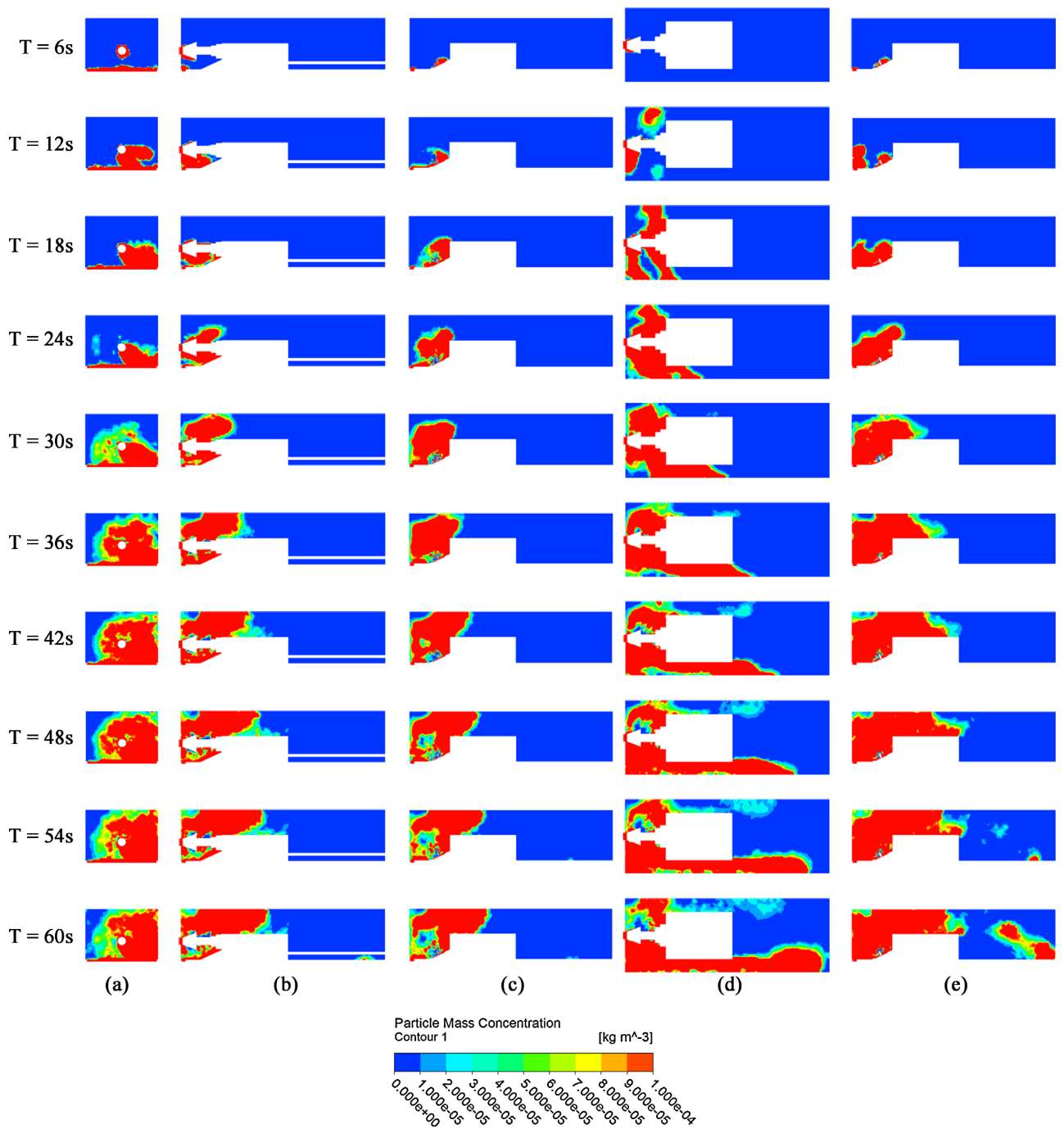


Figure 5. Contour map of dust particle concentration at each key sampling time point

图 5. 不同时间点各个关键采样面粉尘颗粒浓度云图

左右三者的叠加扩散作用趋于稳定，部分粉尘颗粒随通风风流被抽风筒抽出，其余部分沿抽风侧掘进机体与巷道壁面向后方扩散直至稳定。

6. 结论

(1) 通过对岩巷掘进产尘源的产尘机理的分析，明确了岩巷掘进工作面的产尘过程与叠加扩散过程，

介绍气固两相流理论，采用可实现 $k-\varepsilon$ 模型对作为数值模拟中连续相求解的输送方程。

(2) 基于长压短抽混合式通风条件下的岩巷掘进工作面，使用 **Rhino** 三维建模软件建立几何模型后采用 **SpaceClaim** 模型处理软件进行数值模拟的前处理，并在 **ANSYS Fluent** 中进行了主求解参数的设置。

(3) 针对数值模拟结果的粉尘颗粒浓度参数，进行多时间点多位置的多次云图采样，具体详尽地分析截割尘源粉尘颗粒与扬尘源粉尘颗粒叠加作用下的扩散规律，展示了岩巷掘进工作面粉尘颗粒叠加扩散规律的研究方法，为岩巷掘进粉尘治理提供了更加全面的粉尘颗粒扩散规律，同时也对岩巷掘进工作面的降尘方案设计提供了重要参考。

参考文献

- [1] 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.
- [2] 王素云, 夏润. 多尘源耦合扩散规律主要研究成果及存在的问题[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(3): 144-147.
- [3] 徐青云, 白志云, 李锦波. 大采高综采工作面多尘源风流——粉尘分布规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(5): 56-59.
- [4] 蒋仲安, 陈雅, 王佩. 双尘源耦合下呼吸性粉尘扩散的紊流系数求解[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(8): 129-134.
- [5] 尹文婧, 苏珊, 张旭春. 基于 CFD 综采面多尘源风流——粉尘分布规律分析[J]. 华北科技学院学报, 2023, 20(2): 16-21.