

梁 栋 著

通风过程瓦斯运移规律 和数值模拟



煤 炭 工 业 出 版 社

通风过程瓦斯运移规律 和数值模拟

梁 栋 著

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书在总结作者10余年研究成果的基础上,系统地介绍了矿井采掘过程瓦斯运移理论和计算机模拟方法。其主要内容包括,巷道风流流动和瓦斯的运移理论和计算、求解矿内瓦斯运动的数值计算方法和矿井瓦斯运动的数值模拟。

本书可供矿山通风安全、采矿工程等专业的科研、工程技术人员,矿业院校教师、研究生和高年级大学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

通风过程瓦斯运移规律和数值模拟/梁栋著. —北京:煤炭工业出版社, 1998

ISBN 7-5020-1594-9

I. 煤… II. 梁… III. ①瓦斯渗透-理论②瓦斯渗透-数值计算 IV. TD712

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第10657号

通风过程瓦斯运移规律和数值模拟

梁 栋 著

责任编辑:王铁根

*

煤炭工业出版社 出版

(北京朝阳区霞光里8号 100016)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 850×1168mm^{1/32} 印张 3

字数 57千字 印数 1—375

1999年5月第1版 1999年5月第1次印刷

书号 4363 定价 12.00元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

目 录

第一章 绪论	1
第二章 矿内风流中瓦斯紊流扩散的微分方程	6
第一节 矿内空气中瓦斯运移的基本形式分析	6
第二节 井巷风流流动和瓦斯扩散方程的一般形式	9
第三节 瓦斯浓度引起空气密度的变化和体积膨胀系数	11
第四节 矿井风流中瓦斯紊流扩散的微分方程	13
第五节 紊流扩散系数的确定	21
第六节 定解条件及其处理	22
第七节 瓦斯扩散问题的分类和求解方法	25
第三章 矿内风流中瓦斯紊流扩散方程组的数值 求解方法	28
第一节 概述	28
第二节 空度因子的引入和离散化方程的建立	29
第三节 SIMPLE 算法的采用与微分方程组的求解	35
第四章 矿内空气中的瓦斯自然上浮运动	42
第一节 瓦斯自然上浮运动现象和实验观察	42
第二节 瓦斯自然上浮运动机理	44
第三节 描述瓦斯自然上浮运动的一般微分方程	45
第四节 煤壁附近瓦斯自然上浮的边界层方程及简化方程	46
第五节 巷道风流中瓦斯的上浮特性	50
第五章 巷道中瓦斯与风流相互作用的实验研究	53
第一节 实验的相似原理	53
第二节 巷道中瓦斯与风流相互作用的实验装置	57
第三节 下行风流中瓦斯逆流及浓度分布的实验研究	60

第四节	巷道顶板瓦斯积聚与风流相互作用	67
第六章	井巷风流中瓦斯紊流运移的数值模拟	72
第一节	计算机计算与实验的比较和验证	72
第二节	采煤机割煤时的风流结构与瓦斯浓度分布的 数值模拟	75
第三节	巷道局部风流结构与瓦斯运移关系	81
第四节	巷道高顶瓦斯积聚与排除时瓦斯浓度分布的 数值模拟	84
主要参考文献		88

第一章 绪 论

瓦斯爆炸事故是煤矿特有的灾害，经常造成大量的人员伤亡，严重破坏井下设施，其危害性居各种重大、恶性和突发性事故之首。在所发生的瓦斯爆炸事故中，几乎绝大多数爆炸事故发生在回采掘进区域。由于采掘区域巷道瓦斯涌出量大，风流流动和瓦斯运动过程十分复杂，容易发生瓦斯积聚，导致瓦斯爆炸。因此，治理煤矿瓦斯是矿井安全生产的重要工作之一。

目前，矿井安全技术和管理人员对采掘巷道和风流中瓦斯分布的认识和处理以经验为主，不能用定量化的方法掌握和预测瓦斯涌出、积聚状况，以便采取更为有效的技术措施预防瓦斯爆炸事故的发生。近年来，随着煤炭开采深度和范围不断扩大，矿井瓦斯问题越来越严重。同时，回采工作面机械化程度的提高加大了瓦斯涌出强度，不但限制了综采设备能力的提高，而且增大了瓦斯爆炸事故发生的可能性。因此仅仅依靠经验是不够的，必须运用科学的理论和方法，深刻认识和掌握瓦斯流动、瓦斯涌出和瓦斯积聚等现象的内在规律，采用科学的、定量化的预测方法和有效技术措施来预防瓦斯灾害事故的发生。

井巷风流速度较大，巷道窄小，壁面相对粗糙度大，风流一般都是紊流状态，井巷空间几何形状不规则，风

流流动和瓦斯扩散过程是一个场的问题，采用定量化方法研究矿内风流中瓦斯的紊流运移有很大困难。然而科学技术的发展和电子计算机的广泛应用，为解决复杂结构系统的工程技术问题提供了一条新的途径。在流体力学、计算数学、渗流力学、扩散动力学研究领域，一种新的实验方法——计算机实验（模拟），已成为研究和分析流体流动、传热传质和燃烧问题的有效方法，通过建立数学模型、确定参数的计算方法并利用现场测试和实验室试验结果优化参数，在此基础上能够通过数值计算实现对实际过程的模拟和预测，而矿内风流流动和瓦斯紊流扩散问题的数值模拟和预测研究尚未开展。

众所周知，井下发生瓦斯燃烧和瓦斯爆炸事故的条件，首先要有瓦斯积聚或较高浓度的瓦斯流存在。高浓度瓦斯的存在是引发瓦斯爆炸的根源。大量的现场观测表明，尽管在正常通风的条件下，巷道的紊流风速很大，瓦斯涌入后仍然要有较长的混合距离，才能使瓦斯在巷道内的浓度趋于均匀。在混合均匀前，靠近瓦斯涌出地点附近要出现局部范围的浓度增高、超限甚至达到燃烧、爆炸的程度。

正常通风情况下，矿井风流多为紊流，井巷中发生瓦斯积聚主要表现为：

(1) 对于井下瓦斯涌出的主要地点，如工作面采煤机割煤时，新暴露的煤壁和落煤上都会有较大浓度的瓦斯涌出。工作面煤壁的局部区域和采煤机组附近，风速变化大且存在局部旋涡，容易发生瓦斯积聚，也容易发生瓦斯燃烧和瓦斯爆炸事故。例如阳泉矿务局，各矿工

作面风量大且风速高，仍不能消除局部的瓦斯积聚区或积聚带，自 1981 年以来仅发生在采掘工作面的瓦斯燃烧事故就达几十起。

(2) 在巷道顶板、支架背板后，由于风流速度低，易于发生瓦斯积聚，形成瓦斯积聚带，若一旦遇到火源，可迅速发生较大范围的瓦斯燃烧或爆炸，因而这种瓦斯积聚带也是一种导爆带。这种现象在高瓦斯矿井的工作面更容易出现。诸如综采工作面的支架护板与顶板之间的瓦斯积聚带等，这种瓦斯积聚带亦称“瓦斯云”。

(3) 在机电设备附近或巷道拐角处，易于产生涡流，也是瓦斯容易积聚的地点。

(4) 统计资料表明，在许多情况下，瓦斯爆炸发生前，巷道回风流的瓦斯浓度并不超限。发生瓦斯爆炸的原因一方面是由于风速较低易于引起瓦斯积聚，另一方面，与低风速条件下的瓦斯运动形态、趋向有关。在低风速条件下，由于瓦斯积聚引起积聚区空气密度降低，而产生上浮力，其作用不可忽视。因而在低风速条件下，瓦斯运动可能会与正常通风条件下有许多不同的特征，而这些运动特征或规律容易被人们所忽视或尚未被人们所认识。

综上所述，高浓度瓦斯带或瓦斯积聚带的存在和运动，是矿井发生瓦斯爆炸、燃烧事故的重要因素。对于风流中瓦斯积聚、运移规律的研究，不仅包括瓦斯涌出量、涌出强度在内的矿内瓦斯涌出、运动的一般规律，还包括那些特殊的瓦斯运动规律，以便及早发现瓦斯爆炸隐患，防患于未然。

瓦斯积聚带的存在和运动不仅与瓦斯来源有关，而且受空间形状、紊流条件下的局部的风流结构、流向和参数、涡流的存在等的作用或影响。因此，采用简单的分析方法进行研究是做不到的，必须结合实验和实际观测，运用场分析的方法，通过研究井巷紊流条件下的风流流场和瓦斯浓度场，把瓦斯运移与井巷紊流风流流动、风流结构统一起来进行研究，把理论分析、物理实验和计算机数值模拟（或称场分析）结合起来，实现对紊流风流中瓦斯分布的定量化研究。

本书所涉及的矿内井巷风流中瓦斯紊流运移是研究矿内巷道风流流场和在相应流场条件下的瓦斯浓度场问题。目前，矿内井巷风流中瓦斯紊流运移及浓度场研究处于定性的理论分析和实验研究阶段，矿内井巷风流流动规律仍主要以一维伯努里方程为基础，瓦斯在井巷风流的运移定量研究局限于一维情况。迄今为止在国内科技文献中尚未见到矿内井巷风流流场和瓦斯紊流运移的二维或三维浓度场的数值模拟（场分析）方面的研究成果。国外在这方面的研究刚刚开始，尚未见到详细的数学模型和算法方面的论述。

80年代以来，国内矿山通风安全科研工作者运用紊流扩散理论对矿井不同条件下（如下行风流）的对风流与瓦斯的紊流交换进行了许多理论分析和现场观测，并对瓦斯在井下空间内存在状态和分布进行了分析和多次模拟实验研究。

80年代中期东北工学院的学者对井巷污染物紊流传质过程进行了研究。在忽略了分子扩散，将巷道风流

横断面上视为各向同性的情况下，通过理论分析和实验研究得出了横向紊流扩散系数和纵向弥散系数的理论表达式。

到目前为止，井巷污染物的紊流传质研究，主要立足于一维模型的数学讨论和实际应用。即使提出三维模型，大都基于各向同性紊流问题而言。对井巷风流中污染物紊流传质的研究，主要是针对一维的紊流弥散。

本书的内容是在已有的矿井瓦斯运动的研究的基础上，结合国家“八五”重点科研项目“巷道积聚瓦斯安全排放及控制技术”等研究成果和作者的博士论文，系统地介绍矿井瓦斯运动理论、实验和计算机数值模拟内容和方法，反映矿内风流中瓦斯紊流扩散过程和影响因素的数学力学方程、数值计算求解方法，以及矿内风流流场、瓦斯紊流扩散和浓度场的数值模拟结果，开辟矿内复杂风流结构中瓦斯紊流扩散过程定量化研究的新技术，通过对低风速下巷道风流中瓦斯运移规律的模型实验，研究低风速下瓦斯运动规律，掌握其存在的形态、范围、特征和运动规律，以便在实际工作中及早发现瓦斯爆炸隐患，采取有效的措施预防爆炸事故的发生。

第二章 矿内风流中瓦斯紊流 扩散的微分方程

第一节 矿内空气中瓦斯运移的 基本形式分析

来自煤（岩）层或其它地点的瓦斯涌入井巷与空气混合和运动过程中不断扩散运移，最终归于瓦斯—空气混合气体。瓦斯运移是指瓦斯在矿井风流中运动分布的过程。

瓦斯在井巷空气中的扩散是十分复杂的，它不仅决定于瓦斯和空气的物理力学性质，而且与巷道内空气流动状态、速度分布和井巷结构密切相关。瓦斯在井巷空气中的扩散运动主要有以下几种形式。

1. 瓦斯在空气中的分子扩散

在井巷内空气处于静止的条件下，瓦斯通过无规则分子热运动进入井巷空气中。

在矿井空气中瓦斯的分子扩散通量是指单位时间通过单位面积的瓦斯量。确定分子扩散通量时运用费克第一扩散定律，即瓦斯的分子扩散通量与其浓度梯度成正比比例：

$$\vec{J}_c = -D_d \cdot \nabla c \quad (2-1)$$

式中 $\vec{J}_c$ ——瓦斯的分子扩散通量，其分量的单位为

$$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s};$$

D_d ——瓦斯的分子扩散系数， m^2/s ;

c ——瓦斯的质量浓度， kg/m^3 。

其沿各个坐标轴的分量为：

$$J_{ci} = -D_d \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (2-2)$$

式中 $i=1, 2, 3$ ；其中 x_1 、 x_2 、 x_3 分别代表 x 、 y 、 z 方向坐标。

上式中负号表示分子扩散的方向与浓度梯度的方向相反，也就是说瓦斯分子扩散是向着瓦斯浓度降低的方向进行。

2. 空气流动对瓦斯的对流运移

巷道风流对瓦斯的对流运移通过“带走”来实现。当巷道空气处于流动状态时，风流中的空气微团对分布在其中的瓦斯微团产生作用力（即撞击压力），在该力的作用下瓦斯微团随风流运动。也可以解释为：风流中由于瓦斯微团与空气微团之间存在摩擦力，在摩擦力的作用下，瓦斯微团随风流一起运动。即瓦斯被风流“带走”。

若风流以平均速度 u 通过表面积 S 的截面，那么通过该表面积的气流流量 $Q=uS$ ，通量为 $J=u$ ；当其中瓦斯浓度为 c 时，由于发生对流运移而通过该表面的瓦斯流量——瓦斯对流通量为：

$$\vec{J} = c \vec{u} \quad (2-3)$$

式中 $\vec{J}$ ——瓦斯的对流扩散通量, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$;

$\vec{u}$ ——绝对速度, m/s 。

其沿各个坐标轴的分量为:

$$J_i = cu_i \quad (2-4)$$

式中 u_i ——绝对速度 u 在各个坐标轴上的分量, $i=1, 2, 3$ 。

在紊流状态下, 风流对瓦斯的对流运移过程以时均运动方式实现。

3. 井巷空气紊流脉动引起瓦斯的紊流扩散

大量实验观察发现, 紊流是一种随机的、非稳定的有旋流动, 紊流流动结构由各种尺寸的涡组成, 紊流的速度脉动相对分子间无规则碰撞的频率亦不很快, 且紊流的脉动为相对于时均值的随机运动。类似于分子运动那样, 矿内紊动风流中空气涡团的随机脉动将引起附加的瓦斯质量传递。Boussinesq 于 1877 年最早将紊动应力与粘性产生的粘性应力进行比拟, 根据质量传递与动量传递的类似性, 按照 Boussinesq 假说, 通常可以把紊流扩散流表示成分子扩散流的形式, 将矿内空气中瓦斯紊流扩散通量用下式表示:

$$\vec{J}_t = -D_t \cdot \nabla c \quad (2-5)$$

式中 $\vec{J}_t$ ——瓦斯的紊流扩散通量, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$;

D_t ——瓦斯紊流扩散系数, m^2/s 。

瓦斯的紊流扩散与分子扩散的区别在于, 紊流扩散系数 D_t 与方向有关, 是一个张量。这是因为在非均质和

各向异性的巷道紊流中，由于沿各个坐标轴方向的脉动速度不同。这样，在非均质和各向异性的巷道紊流中紊流扩散系数是二阶张量，瓦斯紊流扩散通量沿各个坐标方向的分量为：

$$J_{ii} = -D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \quad (2-6)$$

式中 D_{ij} ——紊流扩散系数的分量， m^2/s 。

在紊流状态下，瓦斯的紊流扩散是由风流的脉动速度引起的。而瓦斯以时均速度方式被“带走”过程为对流运移，二者合称对流—扩散运移。几乎所有的巷道空气中瓦斯运动问题都可归入对流—扩散问题。

4. 瓦斯在井巷风流中的弥散

在一维的前提下，瓦斯在巷道断面上由于断面上的风流速度分布不均匀引起的瓦斯弥散。在采空区，由于固体岩块的阻挡作用，引起采空区空隙介质漏风风流中瓦斯弥散。

第二节 井巷风流流动和瓦斯扩散 方程的一般形式

1. 紊流特征

大量的实验测定表明，平直的圆管中流动的流体，当 $Re \leq 2300$ 时，流态属于层流，当 $2300 \leq Re \leq 4000$ 时，流态不稳定，当 $Re > 4000$ 时，流态属紊流。在实际工程中，上临界雷诺数与管道的相对粗糙度有关，管道的相对粗糙度越大，上临界雷诺数越小，即越早进入紊流状态，而断面形状也会影响临界雷诺数。矿井的巷道断面通常是

非圆形的，会使下临界雷诺数减小，如方形或矩形断面管流的下雷诺数仅为 1000~1300。总之，目前工程上都是把 $Re=4000$ 作为标准，当 $Re>4000$ 时，流体流态进入紊流状态。在一般情况下，当 $Re>4000$ 时还存在层流底层，当达到充分紊流状态时，层流底层基本消失。

矿内风流多属紊流。研究表明：紊流是一种随机的、非定常的三维有旋流动。紊流时，流动结构由各种尺寸的涡团组成。实验发现，紊流中涡团的尺度远超过分子平均自由程。热线测量还得到紊流脉动速度出现的几率远小于分子运动速度。因而多数人认为，连续介质假设仍能用于紊流流动。

2. 井巷风流流动和瓦斯扩散方程的一般形式

根据流体力学的原理，描述粘性流体的微分方程为纳维—斯托克斯方程：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2-8)$$

式中 μ ——空气的动力粘性系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

ρ ——空气和瓦斯混合气体的密度， kg/m^3 ；

p ——空气的绝对压力， Pa 。

和一般污染物在井巷大气中运移一样，任意瞬时瓦斯扩散的微分方程的一般形式为：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial u_j c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_d \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (2-9)$$

根据矿内空气的特点，必须结合矿内空气运动的实际情况，建立适合的矿内风流中瓦斯紊流扩散的数学模型。

矿内空气属多组分气体构成的粘性混合流体，在不同情况下可处于静止、层流和紊流运动状态。瓦斯与空气的混合气体，可视为由瓦斯和空气组成的“二元”体系。瓦斯的在不同程度地改变了井巷空气的物理力学性质，特别在瓦斯积聚区域，混合气体的密度、运动粘性系数和流速等参数均为各组分气体参数的加权平均值，而瓦斯在井巷空气中迁移的实质应是瓦斯组分在井巷空气中的质量传递过程。因此，必须给出瓦斯浓度与空气密度的关系，以便建立接近实际的矿内风流中瓦斯紊流扩散微分方程。

第三节 瓦斯浓度引起空气密度的变化和体积膨胀系数

1. 瓦斯浓度引起矿内空气密度的改变

由于瓦斯、二氧化碳及其它有毒有害气体的涌入，增加了矿内空气的成分，并对表征矿内空气性质的参数产生不同程度的影响。矿内空气在不同地点其气体成分组成可有如下几种情况。

(1) 一般正常通风的巷道，当风量充足且瓦斯等气体涌出量不大时，井巷空气中所含有的瓦斯、二氧化碳及其它气体量很少（通常其体积浓度小于1%~1.5%），组成矿内空气的主要成分是干空气和水蒸气，矿内空气可按湿空气对待。

(2) 矿内一些通风不良甚至停风的地点，如停风盲巷或有瓦斯大量积聚的地点，以及在发生瓦斯喷出、煤与瓦斯突出所波及的井巷内，瓦斯混入井巷空气，使巷道中原有空气各种成分的浓度成比例降低。

(3) 一些长期停风的盲巷内、采空区和老空区，瓦斯的涌入降低（冲淡）了原有气体的浓度，氧化作用及煤炭自燃进一步消耗大量的氧气，使混合气体中的氧气浓度降低。氧化反应同时也将产生一些新的气体，如一氧化碳、二氧化碳和重碳烃类气体等。

当矿内风流中存在一定浓度的瓦斯时，一定程度上改变了空气的密度。单纯由于瓦斯（ CH_4 ）涌入所引起矿内空气性质及参数改变时，根据理想混合气体的性质：

$$\rho = \rho_{\text{air}} c_{\text{Vair}} + \rho_{\text{CH}_4} c_{\text{VCH}_4} \quad (2-10)$$

式中 ρ_{air} ——空气的分密度， kg/m^3 ；

ρ_{CH_4} ——瓦斯的分密度， kg/m^3 ；

c_{Vair} ——空气的体积浓度，%；

c_{VCH_4} ——瓦斯的体积浓度，%。

由理想气体状态方程，得到：

$$\rho_{\text{air}} = \frac{p M_{\text{air}}}{R_0 T} \quad (2-11)$$

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{p M_{\text{CH}_4}}{R_0 T} \quad (2-12)$$

式中 R_0 ——普氏气体常数， $\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ ；

M_{air} ——空气的摩尔质量， kg/mol ；

M_{CH_4} ——瓦斯的摩尔质量， kg/mol ；