

CFD 技术 在通风工程中的运用

吴强 梁栋 著

中国矿业大学出版社

115

79-11-2
2003

CFD 技术在 通风工程中的运用

吴 强 梁 栋 著

中国矿业大学出版社

责任编辑 马跃龙

责任校对 崔永春

图书在版编目(CIP)数据

CFD 技术在通风工程中的运用/吴强,梁栋著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2001. 11

ISBN 7-81070-364-1

I. C… II. ① 吴… ② 梁… III. 计算流体力学-应用-矿山通风-通风系统 IV. TD724

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 050865 号

中国矿业大学出版社出版发行

(江苏徐州 邮政编码 221008)

出版人 解京选

中国矿业大学印刷厂印刷 新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 5.75 字数 142 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷

印数 1~1000 册 定价 20.00 元

前 言

本书系统阐述了针对通风工程中的风流流动和瓦斯流动、扩散问题,运用流体力学、渗流力学和扩散动力学等理论和方法,建立了具有异重流特性的巷道风流中瓦斯紊流运移、采场风流中瓦斯运移和采动空间煤层双重介质瓦斯流动理论和研究方法,基于计算流体力学(CFD)原理开展的计算机模拟方法的研究。并分别介绍了回采工作面、巷道、采场空间风流流动结构、瓦斯运移及浓度分布的计算机数值模拟结果,以及邻近煤层瓦斯向开采层采空区流动、回采和掘进过程煤层瓦斯流动等流场的瓦斯流动和压力分布的计算结果。书中还介绍了作者在巷道风流中巷道顶板瓦斯逆流、煤壁和巷道风流中瓦斯上浮特性等方面的理论和实验研究成果。

本书第一、四和八章由吴强撰写,第二、三、五、六、七和九章由梁栋撰写。本书可供高等学校通风安全、地下工程等专业方向的本科和研究生教学参考,也可供科研和工程技术人员参考。因作者水平有限和时间仓促,难免有错误和不足之处,请读者批评见谅。

著 者

2001 年 6 月

目 录

前言.....	]
第一章 基础知识.....	1
1.1 巷道内空气的物理性质和基本参数	1
1.2 静止空气中瓦斯的分子扩散.....	12
1.3 巷道空气层流流动状态下瓦斯的扩散.....	15
第二章 通风风流中瓦斯紊流扩散的微分方程	21
2.1 巷道内空气紊流脉动与瓦斯紊流扩散.....	21
2.2 巷道风流流动和瓦斯扩散方程的一般形式.....	22
2.3 瓦斯浓度引起空气密度的变化和体积膨胀系数.....	23
2.4 巷道风流中瓦斯紊流扩散的微分方程.....	25
2.5 紊流扩散系数的确定.....	31
2.6 定解条件及其处理.....	32
2.7 瓦斯扩散问题的分类和求解方法.....	34
第三章 瓦斯紊流扩散方程组的数值求解方法	37
3.1 概述.....	37
3.2 空度因子的引入和离散化方程的建立.....	38
3.3 SIMPLE 算法的采用与微分方程组的求解.....	43
第四章 计算程序 PHOENICS 开发	49
4.1 概述.....	49

4.2	PHOENICS 程序的功能	51
4.3	PHOENICS 程序的运行方式	54
4.4	PHOENICS 程序的数据输入	62
第五章	巷道和工作面风流中瓦斯紊流运移的数值模拟	84
5.1	计算机计算与实验的比较和验证.....	84
5.2	采煤机割煤时的风流结构与瓦斯浓度分布的 数值模拟	86
5.3	巷道局部风流结构与瓦斯运移关系.....	92
5.4	巷道高顶瓦斯积聚与排除时瓦斯浓度分布的 数值模拟	95
第六章	巷道空气中的瓦斯自然浮升运动	99
6.1	瓦斯自然浮升运动现象和实验观察.....	99
6.2	瓦斯自然浮升运动机理	101
6.3	描述瓦斯自然浮升运动的一般微分方程	102
6.4	煤壁附近瓦斯自然浮升的边界层方程及 简化方程	102
6.5	巷道风流中瓦斯的浮升特性	106
第七章	巷道中瓦斯与风流相互作用的实验研究.....	109
7.1	实验的相似原理	109
7.2	巷道中瓦斯与风流相互作用的实验装置	112
7.3	下行风流中瓦斯逆流及浓度分布的实验研究	114
7.4	巷道顶板瓦斯积聚与风流相互作用	120
第八章	采场瓦斯运移规律和数值模拟.....	125
8.1	采场及瓦斯运移的特征	125

8.2	采场瓦斯运移规律的模拟实验研究	133
8.3	采场瓦斯运移的数值模拟研究	142
第九章	采动空间瓦斯流动的数值模拟.....	148
9.1	采动空间瓦斯流动的数学模型	148
9.2	求解瓦斯流动方程的数值方法	159
9.3	采动空间瓦斯流场压力分布数值模拟 计算和分析	165

第一章 基础知识

1.1 巷道内空气的物理性质和基本参数

在巷道掘进和煤炭开采过程中,随着采掘作业的进行,不断揭露煤层。赋存在煤层中的吸附瓦斯解吸,在压力差作用下流动并涌入井巷空间。瓦斯等气体进入井巷空间后,与空气相混合,组成了包含干空气、水蒸气、瓦斯和其他有害气体的多成分混合气体。瓦斯等气体的混入,不同程度地改变了空气的性质,特别在瓦斯涌出量大、通风不良或风流停滞区域,易于发生瓦斯积聚。在积聚区域,瓦斯浓度较大,由空气和瓦斯组成的混合气体的物理性质将发生变化,主要参数如密度、动力粘性系数等将决定于各气体成分的参数和混合比例。以下阐述空气和瓦斯等气体组成的混合气体的性质。

1.1.1 巷道空气的成分和基本规律

1) 巷道空气的成分和数量

巷道内空气由来自地面的新鲜空气和煤岩层及生产作业产生的各种气体组成。来自地面的新鲜空气包括干空气和水蒸气,在正常情况下的干空气组成如表 1-1 所列。地面空气中的水蒸气浓度随地区和季节而变,其平均的体积浓度为 1%。

地面的新鲜空气通过入风巷进入井下,通常在到达各作业地点之前其成分变化不大,混入的瓦斯及其他有毒有害气体很少,可视为新鲜空气,新鲜空气流即新鲜风流,简称新风;新鲜空气流经掘进巷道、工作面等作业场所后,由于有瓦斯、有毒有害气体及粉

尘混入,变为污浊空气,其风流即污浊风流,简称乏风。表 1-2 为《煤矿安全规程》规定采掘工作面进风流中各种气体成分的安全标准;表 1-3 为矿山巷道内常见有害气体、危害性及防治措施;表 1-4 为采掘工作面、采区和总回风流中 CH₄ 和 CO₂ 的允许浓度。

表 1-1 干空气的组成和浓度

气体名称	体积浓度 C _v / %	质量比/ %
氮(N ₂)	78.13	75.55
氧(O ₂)	20.90	23.10
二氧化碳(CO ₂)	0.03	0.05
氩 (Ar)	0.93	1.27
其他稀有气体	0.01	0.01

表 1-2 采掘工作面进风流中各种气体成分的安全标准

成分名称	安 全 标 准		相对分子量
	体积浓度/ %	质量浓度/mg · m ⁻³	
O ₂	≥20	≥285 714.3	32.00
CH ₄	≤0.5	≤3578.4	16.03
CO ₂	≤0.5	≤9821.4	44.00
CO	≤0.0024	≤30	28.00
NO ₂	≤0.00025	≤5	46.00
SO ₂	≤0.0005	≤14.3	64.07
H ₂ S	≤0.00066	≤10	34.09
NH ₃	≤0.004	≤30.4	17.03
H ₂	≤0.5	≤448.66	2.01
浮尘	含二氧化硅 10% 以上时≤2 mg/m ³		
	含二氧化硅 10% 以下时≤10 mg/m ³		

表 1-3

矿山巷道内常见有害气体、危害性及防治措施

气体名称	主要来源	相对密度	色和味	溶解性	危害性	中毒症状	安全浓度 /%	预防和处理措施	急救措施
一氧化碳 CO	爆破工作和煤尘、火灾、爆炸、煤炭自燃	0.97	无色、无味、无臭	微溶	极毒、一氧化碳与血色素的结合力比氧和血色素的结合力大 250 ~ 300 倍,阻碍氧和血色素的结合,使人体缺氧引起窒息和死亡。浓度达 13%~75% 有爆炸性	轻微中毒:耳鸣、头痛、心跳;严重中毒:四肢无力、呕吐、丧失行动能力;致命中毒:出现昏迷,并有死亡危险	< 0.0024	防止煤炭自燃火灾和煤尘爆炸事故的发生;放炮后喷雾,加强通风	立即移到新鲜风流中,进行人工呼吸
硫化氢 H ₂ S	有机物腐烂、硫化物水解、煤岩中放出	1.19	无色微甜、有臭鸡蛋味,浓度超过 0.0001% 可嗅到		有强烈毒性,能使人的血液中毒,对眼睛、粘膜及呼吸系统有强烈刺激作用,浓度达 4.3%~4.6% 有爆炸性	浓度为 0.01%~0.015% 时,流唾液和清水鼻涕、呼吸困难;浓度 0.02%,眼鼻喉粘膜受强烈刺激。头痛、呕吐、四肢无力;浓度 0.05%,半小时内人失去知觉、痉挛、死亡	< 0.00066	向煤体注入石灰水,加强通风	立即移到新鲜风流中,进行人工呼吸;用浸有氯水的棉花或者毛巾放在患者的口鼻旁,也可让患者喝稀氯水溶液解毒;用 10% 硼酸水或弱明矾水冲洗眼睛

续表 1-3

气体名称	主要来源	相对密度	色和味	溶性	危害性	中毒症状	安全浓度 /%	预防和处理措施	急救措施
二氧化氮 NO_2	爆破工作	1.57	棕红色、有刺激臭味	极易溶	有强烈毒性,能和水结合成硝酸对肺组织起破坏作用,造成肺浮肿;对眼睛、鼻腔及呼吸道有强烈刺激作用	浓度 0.006%,咳嗽、胸部发痛;浓度 0.01%,剧烈咳嗽、呕吐、神经系统麻木;浓度 0.025%,短时间内死亡	< 0.00025	加强通风,用水炮泥和喷雾洒水	立即移到新鲜风流中,用拉舌法或活动上肢法进行人工呼吸;用 1%浓度的硼酸水或弱明矾水冲洗眼睛
二氧化硫 SO_2	含硫矿物氧化及自燃;含硫矿层中进行爆破工作;硫化矿尘的爆炸	2.2	有刺激臭味及酸味	易溶	有强烈毒性,与眼、呼吸道的湿表面接触后能形成硫酸,对眼睛及呼吸道有强烈腐蚀作用,引起肺水肿	浓度 0.002%,引起眼红肿、流泪、咳嗽、头痛、喉痛;浓度 0.05%,引起急性支气管炎,肺水肿,并短时间内死亡	< 0.0005	预防火灾;加强通风	立即移到新鲜风流中,用拉舌法或活动上肢法进行人工呼吸;用 1%浓度的硼酸水或弱明矾水冲洗眼睛
氨 NH_3	爆破工作和灭火	0.6	无色、有浓烈臭味	易溶	刺激皮肤和粘膜,引起喉头水肿。浓度超过 30%时能爆炸		< 0.004	加强通风	

表 1-4 采掘工作面、采区和巷道回风流中
CH₄ 和 CO₂ 的允许浓度

气体成分	安 全 标 准	
	采掘工作面和采区的回风流中 体积浓度/%	矿井和一翼的总回风流中 体积浓度/%
CH ₄	≤1.0	≤0.75
CO ₂	≤1.5	≤0.75

2) 理想混合气体的基本规律

(1) 理想混合气体状态方程

巷道内空气是由上述多种成分组成的混合气体,在混合气体中,各种成分的气体分子相互混杂,作无规则、永不停息的热运动。对于每种气体而言,气体分子都具有体积和相互作用力,但在分析气体的一般问题时,气体分子相互作用力和体积因素的影响很小,因此为了便于分析和计算,一般都假想气体的分子不具有体积,分子之间也没有作用力,这样的假想气体为理想气体,由多种理想气体混合起来的气体为理想混合气体。巷道内的空气可视为理想混合气体,对于理想混合气体而言,其状态参数 p 、 V 和 T 的关系和单一理想气体一样,符合理想气体状态方程:

$$pV = \frac{m}{M}R_0T \quad (1-1)$$

式中 p ——绝对压力,Pa;

V ——体积,m³;

M ——混合气体的摩尔质量,kg/mol;

m ——混合气体质量,kg;

R_0 ——普适气体常数, $R_0=8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T ——绝对温度,K。

对于具体的某一气体来说,常采用气体常数 R ,单位为 J/(kg

• K)

$$R = \frac{R_0}{M} \quad (1-2)$$

则式(1-1)变为:

$$pV = mRT \quad (1-3)$$

当巷道内空气的绝对温度保持不变,即在等温过程中, $T = \text{常数}$,混合气体的体积与绝对压力成反比变化:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1} \quad (1-4)$$

当巷道内空气的绝对压力基本保持不变,即在等压过程中, $P = \text{常数}$,混合气体的体积与绝对温度成正比变化:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-5)$$

当巷道内空气的体积(密度或比容)保持不变, $V = \text{常数}$,即在等容过程中,混合气体的绝对静压和绝对温度成正比变化:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-6)$$

(2) 分压定律

在正常条件下,组成巷道内空气的各种气体不发生化学变化,每种气体成分在无规则的热运动中都产生压力,组分气体产生的压力称为该气体的分压力。组分气体分压力与空气(混合气体)的关系遵循道尔顿分压定律。即:

$$p = p_1 + p_2 + \cdots + p_n \quad (1-7)$$

(3) 格莱亨姆定律

某种气体与空气互相混合的性质为该气体的扩散性。格莱亨姆发现,某一气体向空气中扩散的速率,与这种气体与空气的相对密度之比的平方根成反比,即:

$$\text{某一气体向空气扩散的速率} = \sqrt{\frac{\text{空气的相对密度}}{\text{某一气体的相对密度}}} \quad (1-8)$$

式中某一气体的相对密度为：

$$\text{某一气体的相对密度} = \frac{\text{某一气体的分子量}}{\text{标准气体的分子量}} \quad (1-9)$$

上式中标准气体可用氢或空气，并视其相对密度为 1。当以空气为标准气体时，空气的相对密度为 1，对于瓦斯(甲烷)而言，瓦斯的相对密度为 $16.03/28.96=0.554$ ，则由式(1-8)可以计算出瓦斯向空气中扩散的速率为 $\sqrt{1/0.554}=1.344$ 。气体向空气的扩散速率代表该气体向空气中扩散的容易程度，气体向空气中的扩散速率越大越容易扩散。表 1-5 为常见气体向空气中扩散速率值，其中氢的扩散速率最大，为 3.807；二氧化硫的扩散速率最小，为 0.672。格莱亨姆定律只是从总体上表达某种气体向空气中的扩散速率，而气体在流动空气中的扩散规律与该气体在空气中的分布状况、空气运动状态等许多因素有关，将在后面详细讨论。

表 1-5 常见气体向空气中扩散速率

气 体 名 称	分子量 /g	相对密度		向空气扩散 的速率
		和氢相比	和空气相比	
干空气	28.96	14.41	1.0	1.0
O ₂	32.00	15.92	1.105	0.951
CH ₄	16.03	7.98	0.544	1.344
CO ₂	44.00	21.89	1.519	0.811
CO	28.00	13.93	0.967	1.017
NO ₂	46.00	22.89	1.588	0.794
SO ₂	64.07	31.88	2.212	0.672
H ₂ S	34.09	16.96	1.177	0.922
NH ₃	17.03	8.47	0.588	1.304
N ₂	28.03	13.95	0.968	1.016
水蒸气	18.02	8.97	0.622	1.268
H ₂	2.01	1.0	0.069	3.807

1.1.2 巷道空气的物理性质

巷道内空气由新鲜空气和来自煤(岩)层的瓦斯、二氧化碳等气体组成,因此,巷道内空气的性质决定于各种气体成分的物理性质和它们各自所占的比例。

1) 巷道内空气的摩尔质量

混合气体的摩尔质量 M 等于各组分气体摩尔质量 M_i 的体积分数 C_i 加权平均值,各气体的体积分数 C_i 为该气体体积浓度的小数值,巷道空气的摩尔质量为:

$$M = \sum M_i C_i \quad (1-10)$$

例如,对于干空气,根据表 1-1 所示数据,干空气的摩尔质量

$$\begin{aligned} M &= (0.7813 \times 28 + 0.2090 \times 32 + 0.0003 \times 44 \\ &\quad + 0.0094 \times 40) \times 10^{-3} \\ &= 28.95 \times 10^{-3} (\text{kg/mol}) \end{aligned}$$

在巷道条件下(取绝对压力 $p=101\,325\text{ Pa}$,绝对温度 $T=293.15\text{ K}$,相对湿度为 60%),水蒸气的体积分数为 0.0138,巷道空气(湿空气)的摩尔质量为:

$$\begin{aligned} M &= [28.95 - (28.95 - 18) \times 0.0138] \times 10^{-3} \\ &= 28.8 \times 10^{-3} (\text{kg/mol}) \end{aligned}$$

根据理想气体状态方程(1-1)中普适气体常数 R_0 和空气摩尔质量,利用式(1-2)可求出实际气体常数。对于干空气, $R = \frac{R_0}{M} = \frac{8.31}{28.95 \times 10^{-3}} = 287\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,同样,在巷道条件下,巷道空气(湿空气)的气体常数 $R = \frac{R_0}{M} = \frac{8.31}{28.8 \times 10^{-3}} = 287\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2) 巷道空气的密度

气体的密度是指单位体积内具有气体的质量,即:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-11)$$

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 。

气体的密度是气体的重要物理参数。它表示单位体积内所含气体质量的多少。气体的密度决定于气体的压力、温度和气体的种类。按照理想气体状态方程(1-1), 单一气体的密度由下式计算:

$$\rho_c = \frac{p}{RT} \quad (1-12)$$

在标准状态下, 即 $T=273.15 \text{ K}$, $P=101\,325 \text{ Pa}$, 气体的密度只与气体的种类有关, 即决定于气体的摩尔质量 M , 对瓦斯而言, $M_{\text{CH}_4}=16 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$, $R_{\text{CH}_4}=519 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\rho_{\text{CH}_4} = \frac{101325}{519 \times 293} = 0.715 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。混合气体的密度也可按照式(1-12)计算, 其中气体的摩尔质量 M 应为混合气体的摩尔质量。表 1-6 列出巷道内常见气体在标准状态下和在 $T=273.15 \text{ K}$, $p=101\,325 \text{ Pa}$ 条件下的密度。

表 1-6 巷道常见气体在标准状态的密度

气体名称	分子式	摩尔质量 $\times 10^{-3}$ / $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
			$T=273.15 \text{ K}$	$T=293.15 \text{ K}$
氮	N_2	28.00	1.251	1.166
氧	O_2	32.00	1.429	1.332
二氧化碳	CO_2	44.00	1.964	1.830
甲烷	CH_4	16.03	0.716	0.667
一氧化碳	CO	28.00	1.250	1.165
二氧化氮	NO_2	46.00	2.054	1.914
二氧化硫	SO_2	64.07	2.860	2.665
硫化氢	H_2S	34.09	1.522	1.418
氨	NH_3	17.03	0.759	0.707
氢	H_2	2.01	0.090	0.084
水蒸气	H_2O	18.00	0.804	0.749
干空气	—	28.90	1.293	1.205

1.1.3 瓦斯浓度及其对空气参数的影响

1) 瓦斯浓度

瓦斯浓度是标志巷道内空气中所含瓦斯量多少的一个重要参数。一般常用的瓦斯浓度有体积浓度和质量浓度两种表示方法。在安全检测和生产实际中通常采用体积浓度,而在科学研究和理论计算中较多采用质量浓度。

(1) 瓦斯的体积浓度

瓦斯的体积浓度 C_v 是指混合气体中瓦斯所占的体积与总体积的百分比,即:

$$C_v = \frac{V_c}{V} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中 V_c ——瓦斯所占的体积, m^3

V ——混合气体的总体积, m^3

按照 C_v 的定义,若设混合气体中空气所占的体积为 V_a ,空气的体积浓度为 C_a ,那么:

$$C_a = \frac{V_a}{V} \times 100\% \quad (1-14)$$

则

$$C_a + C_v = \frac{V_c + V_a}{V} \times 100\% = 100\% \quad (1-15)$$

上式表明空气与瓦斯混合气体中各自体积浓度之和为 100%。

(2) 瓦斯的质量浓度

瓦斯的质量浓度 C 是指单位体积的混合气体中所含瓦斯的质量,即:

$$C = \frac{m_c}{V} \quad (1-16)$$

式中 m_c ——瓦斯的质量, kg 。