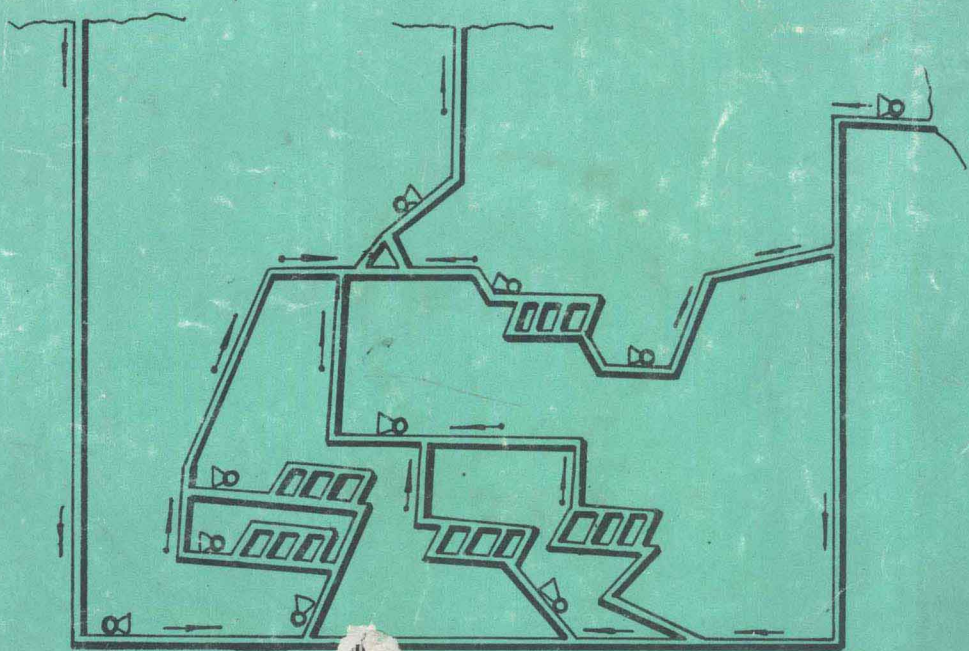


矿井通风计算 及程序设计

赵梓成 编著



二 1 技 出 版 社

矿井通风计算及程序设计

赵梓成 编著

云南科技出版社

1992年12月

(滇) 新登字 04 号

责任编辑: 林德琼

封面设计: 刘祖一

矿井通风计算及程序设计

赵梓成 编著

云南科技出版社出版发行 (昆明市书林街 100 号)

昆明工学院印刷厂印装

开本: $787 \times 10921 / 16$ 印张: 14.75 字数: 340000

1992 年 12 月第 1 版 1992 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1-3000 册

· ISBN 7-5416-0409-7 / TD · 4 定价 8.30 元

序

《矿井通风计算及程序设计》一书的出版是一件值得庆贺的事。它是赵梓成教授三十多年教学和科研工作的总结；同时也对高山矿井通风、非铀矿山排氮通风和多风机多级机站等方面研究成果作了介绍；还在大型的、符合矿山实际的复杂通风网路计算优化，复杂通风系统的设计、测定和管理等计算机优化，以及多台通风机的计算机自动检测等方面，也有专题论述。因此，赵梓成教授所撰写的这本书，对我国矿井通风学术界来说是一大贡献，对高等学校师生和采矿工程技术人员也是很有价值的参考书。

北京科技大学采矿系

童光照

1991.5.9

前 言

矿井通风的目的是经常不断地向井下各工作面送入足够的新鲜空气,以供给井下工作人员的呼吸,并稀释井下各种有害物,创造良好的劳动条件,保证井下工作人员的身体健
康和生命安全,不断提高劳动生产率。

矿井通风是研究空气在矿井巷道中的流动状态和运动规律,以及所需采取的通风设施及技术的学科。这是采矿工程不可缺少的组成部分,是一门重要的学科。随着现代技术的发展,特别是计算机的应用,推动了这门古老的学科——矿井通风理论、设计和计算方法的更新,推出了一批新产品、新技术及新程序,使矿井通风进入一个新水平。

国内外矿井通风工作者十分关注的科研课题是矿井风量计算及矿井通风网路解算。这是近 10 年来研究较多的问题,从这两方面问题的研究,开始了我的矿井通风研究生涯。我对这两方面问题的研究成果逐一进行了推敲,特别是对矿井通风网路计算方法进行了研究,还提出了一些新的计算方法。同时也对前人提出的计算方法作了改进。最后向读者提供的是改进后的斯考德-恒斯雷近似计算方法。对传统设计方法——最大线路法也进行了修正。本人认为应将通风系统分为进风段、需风段、回风段作分段计算,最后求总风压,使通风设计更为科学。这些成果,作为心得体会,已于 1962 年写成“金属矿山风量计算”、1963 年完成“矿井通风网路解算”两本共约 353 页的小册子。

我国是一个多山国家,海拔 1000 米以上的区域约占全国面积的三分之二,研究这些地区矿山通风是十分有意义的。为此,我较长时期从事这一工作,写出了一些论文,使得高山通风的一些疑难问题变得明确。

70 年代初期,云南锡业公司出现了矿工肺癌,严重地威胁工人的身体健康,敬爱的周总理指示“一定要解决云锡矿工肺癌”。为此作者与亲密的合作者们(赵鹏、刘祖一、周洵远、张哲等)开始了非铀矿山排氢通风的研究,与工人密切合作,经过 15 年的艰苦研究,得出了一整套完善的排氢通风理论和措施,并在各地区的推广应用,取得了良好通风效果,多次得到奖励。在此期间发表了一系列文章,所撰写的《非铀矿山排氢通风》一书于 1984 年由冶金工业出版社出版发行。

随着计算机的应用、推广,我与刘祖一高级工程师等几位同志进行了研究,一道编制了“扇风机性能曲线、矿井通风阻力测定、风机优选、风量计算、通风网路计算及优化”等程序,并应用于云锡各矿山、金川公司二矿区、中条山有色金属公司蓖子沟铜矿、胡家峪铜矿、泗项铅锌矿、攀矿公司蓝尖矿、攀钢公司二滩粘土矿、大厂矿务局长坡锡矿、铜坑锡矿、铜陵有色公司狮子山铜矿、铜山铜矿、湖南黄沙坪铅锌矿、宝山铅锌矿、柿竹园多金属矿、云南大红山铜矿、大红山铁矿等矿山,取得显著节能效益和良好通风效果。在应用过程当中,还推广应用了 FS 以及 K 系列节能风机。同时随着计算机硬件技术的发展,我们在实验室开始了多风机多级机站微机控制的研究,经过近 3 年的研究,已取得突破性进展,即将应用于矿山实际当中去。

为适应生产发展，作者特将这些成果的有益内容和一些肤浅认识编入本书，献给读者，以期为促进通风事业的发展尽一点微薄的力量。

在写作过程中，云南锡业公司刘祖一高级工程师、昆明工学院矿山安全与节能研究所杨立忠副教授和研究生张黔生、谢贤平、严春风、张仕龙等为提供和整理资料做了不少工作，《有色金属》杂志主编丁朝模高级工程师、北京科技大学李怀宇副教授给予极大的帮助，提出了许多宝贵意见，在此对他们的工作表示衷心谢意。

童光煦教授为本书作了序，特此，表示衷心谢意。

由于作者本人水平有限，错误在所难免，敬请读者给予批评指正。

作者 1992年2月于昆明工学院

目 录

序

前言

第一章 矿井通风参数	(1~5)
1. 空气压力	(1)
2. 空气重率和密度	(3)
3. 空气粘滞性	(4)
第二章 风流在井巷中流动的基本规律	(6~16)
1. 风流在井巷中流动状态	(6)
2. 井巷中风流的结构	(6)
3. 井巷中风流流动方程	(7)
4. 伯努利方程	(11)
第三章 硐室型巷道中空气流动的基本规律	(17~25)
1. 自由风流	(17)
2. 自由风流速度场及基本参数	(18)
3. 硐室型巷道中二次自由风流流动的规律	(19)
4. 初次自由风流的有效作用长度	(23)
第四章 金属矿山风量计算	(26~49)
1. 爆破后的井巷道中的炮烟的污染体积	(26)
2. 浅眼爆破时回采工作面的风量计算	(29)
3. 大爆破时风量计算	(36)
4. 独头工作面风量计算	(37)
5. 矿山防尘风量计算	(42)
6. 使用柴油机设备时的风量计算	(46)
7. 全矿总风量计算	(49)
第五章 矿井通风机	(50~69)
1. 概述	(50)
2. 叶型、叶栅空气动力特性	(51)
3. 叶栅的升力	(54)
4. 通风机理论压头与流量	(55)
5. 通风机特性曲线	(58)
6. 通风机相似原理	(61)
7. 国产矿用通风机型号及类型	(63)
8. 通风机的选择	(64)

9. 通风机的优化选择及程序设计	(65)
第六章 矿井通风网路解算	(70~83)
1. 基本术语	(70)
2. 基本定律	(70)
3. 基本知识	(73)
4. 基本网路	(76)
5. 复杂通风网路的解算	(78)
第七章 风量调节	(84~94)
1. 增阻调节法	(84)
2. 降阻调节法	(86)
3. 辅扇调节法	(90)
4. 复杂通风网路的风量调节	(91)
5. 复杂网路风量的优化调节	(92)
第八章 矿井通风测定	(95~125)
1. 矿井风量测定	(95)
2. 矿井通风阻力测定	(102)
3. 通风机性能曲线的测定	(112)
第九章 矿井通风设计	(126~142)
1. 矿井通风设计	(126)
2. 矿井通风图的绘制	(134)
3. 矿井通风系统鉴定指标	(139)
4. 通风井巷经济断面的选择	(141)
第十章 多级风机多级机站通风系统	(143~151)
1. 通风方式及分风方式	(143)
2. 机站级数的确定及划分	(144)
3. 机站内风机台数及型号	(145)
4. 机站局部阻力	(147)
5. 多风机并联运转的稳定性	(149)
6. 多级机站通风系统的优缺点	(150)
第十一章 应用电子计算机通风网路	(152~167)
1. 数学模型	(152)
2. 矿井通风网路程序设计	(155)
3. 多风机多级机站程序设计	(156)
4. 矿井多风机多级机站通风网路优化	(159)
5. 例题	(165)
第十二章 矿井通风系统微机控制	(168~176)
1. 矿井通风系统控制的数学模型	(168)
2. 通风系统参数的检测	(169)
3. 通风系统的遥控	(172)

4. 过程控制计算机	(176)
第十三章 非铀矿山排氡通风	(177~206)
1. 放射性的基本知识	(177)
2. 矿井中氡及其来源	(182)
3. 采空区中的氡	(191)
4. 排氡通风	(195)
5. 防氡措施	(202)
6. 氡及氡子体的测量	(205)
第十四章 高山矿井通风	(207~224)
1. 空气温度	(207)
2. 大气压力及海拔高度对它的影响	(214)
3. 海拔高度对湿度的影响	(215)
4. 海拔高度对空气重率的影响	(216)
5. 高海拔地区的生理反应	(216)
6. 海拔高度对矿井通风的影响	(217)
7. 海拔高度对通风机特性的影响	(221)
主要参考文献	(225~226)

第一章 矿井通风参数

1.1 空气压力

地球外层有着很厚的大气层，空气因受地心引力作用而呈现有压力。其大小与空气柱的高度有关，这种由自然空气柱重量的作用而显示出的压力称为空气压力。

空气压力分为绝对压力与相对压力。

1.1.1 绝对压力

以真空状态起计的压力称绝对压力。地表的大气压力就是一种绝对压力。

大气压力的大小取决于相对于海平面的高度、地球纬度和温度。在北纬 45 度海平面上当温度为 0℃ 时的大气压力称为标准大气压力。这个作用在海平面位置上的压强与 760 毫米高的水银柱作用在底面上的压强相等。

大气压力基本上不受纬度和温度的影响，只由相对于海平面的标高所决定。

1.1.2 相对压力

某一空间或容器的空气压力与当地大气压力之差，即为相对压力。其值可能高于或低于地表大气压力。矿井通风压力属于相对压力。

相对压力包括静压，动压和全压。

1. 静压

静压是气体分子间的压力或气体对容器壁或管道壁所施加的压力。它是驱动空气流动的基本动力。作用于各个方向，且各个方向大小相等，并垂直于容器壁。矿井通风的静压就是相对静压，即矿井空气压力大于当地大气压力之值为正，反之为负。

2. 动压

在静压作用下流体流动而产生的压力称为动压。它对管道壁不施加压力，即不对与风流平行的壁面施加压力，仅对与风流成垂直或成一定角度的平面施加压力。人在风流中行走即能感觉到此种压力。动压永远为正。

$$P_v = \frac{\rho V^2}{2} \quad (1-1)$$

式中： P_v —— 动压，Pa；

V —— 风速，m/s

ρ —— 空气的密度，kg/m³

3. 全压

全压是静压和动压的代数和。当静压用绝对压力表示时，叠加后风流的压力为绝对全压 P_t ：

$$P_t = P_s + H_v \quad (1-2)$$

即风流中任一点的绝对静压与相应的动压 H_v 之和等于该点的绝对全压。此公式适用于在巷道中造成正压的压入式通风风流，也适用于在巷道中造成负压的抽出式通风风流。

如果静压用相对压力表示时，叠加后风流的压力就是相对的全压 H_s 。相对全压等于

相对静压与动压 H_v 的代数和。

在抽出式通风风流中，某点相对全压的绝对值 $|H_t|$ 为：

$$|H_t| = |H_s| - H_v \quad (1-3)$$

而压入式通风风流中，某点的相对全压 H_t 则为：

$$H_t = H_s + H_v \quad (1-4)$$

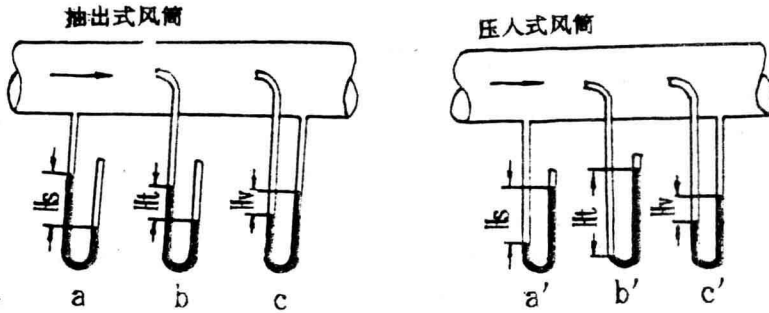


图 1-1 点压力关系实验布置

如果以 P_a 表示风筒外的大气压力，那么 a 管右侧与左侧水面分别承受 P_a 与风筒内指定点的绝对静压 P_s ，U 形管中水柱差即该点相对静压 H_s ；在 b 管中，两侧水面承受的绝对压力为 P_t 和 P_a ，水柱差为该点相对全压 H_t ； c 管中，两侧水面承受的绝对压力为 P_t 和 P_s ，水柱差即为该点动压 H_v 。比较所测数据，就可以证明。

同理， a' 、 b' 、 c' 管中读数也可证明上述的关系式。

1.1.3 空气压力单位

空气压力单位表示方法很多。空气压力可以用 kg/m^2 表示。因为 1 立方米标准状态水重 1000kg ($\gamma = 1000\text{kg}/\text{m}^3$)，故水柱高度 Z 等于 1mm 时对底部面产生压力 P 是 $1\text{kg}/\text{m}^2$ 。

$$\text{即} \quad P = Z \cdot \gamma = (1/1000) \times 1000 = 1\text{kg}/\text{m}^2$$

换句话说，1 千克重的水铺在 1 平方米面积上恰好形成 1 毫米高的水柱，则压力：

$$1\text{kg}/\text{m}^2 = 1\text{mmW} \cdot g.$$

矿井通风中各种压力经常以毫米水柱表示，这与测压仪表中的水柱高度一致，十分简明形象。当压力值比较大，譬如评价大气压时，常用较大的压力单位毫米水银柱（或称毫米汞柱）表示。因水银的比重为 13.6，故 $1\text{mmHg} = 13.6\text{mmW} \cdot g$

工程上还常用到标准大气压的概念：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 个标准大气压} &= 760\text{mmHg} \\ &= 10336\text{mmW} \cdot g = 10336\text{kg}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

国际单位制中空气压力（压强）的单位采用帕斯卡“Pascal”，代号为帕“Pa” (N/m^2)。

$$1 \text{ 标准大气压} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} = 101.3\text{kPa}$$

空气各种压力单位换算关系见表 1-1

表 1-1

有关压力单位互换算表

气压单位	at	mmW · g 或 kg / m ²	Pa 或 N / m ²	Pb / In ²	mba	mmhg
1at	1	103.3	101.3	2116	1030	760
1mmW · g 或 kg / m ²	9.675E-5	1	9.084	20.48E-2	0.098	7.356E-2
1Pa 或 N / m ²	9.869E-6	0.102	1	2.089E-2	1E-2	750.1E-5
1Pb / In ²	4.725E-4	4.882	47.88	1	0.47	0.3591
1mba	.9869E-3	10.20	100	2.089	1	0.7500
1mmhg	1.316E-3	13.60	133.3	2.784	1.333	1

1.2 空气重率和密度

空气重率和密度是一个重要的物理参数，在不同条件下，空气重率和密度是不同的，在矿井通风中，都是用近似计算法求得。

1.2.1 空气密度

单位体积空气所具有的质量称为空气的密度：

$$\rho = \frac{M}{V}, \text{ kg / m}^3 \quad (1-5)$$

式中： M —— 空气的质量，kg；

V —— 空气的体积，m³。

1.2.2 重率（亦称重度）

单位体积空气所具有的重量称为空气的重率：

$$\gamma = G / V, \text{ N / m}^3 \quad (1-6)$$

1.2.3 实际空气重率的计算

实际空气含有一定数量的水蒸气。则：

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_a + \gamma_w \\ &= \frac{(P - P_w) \cdot T}{R} + \frac{P_w \cdot T}{R_w} \\ \gamma &= 3.41 \frac{P}{T} (1 - 0.378 \frac{P_w}{P}) \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中： γ_a, γ_w —— 分别为空气，水蒸气的重率，N / m³；

P_a, P_w —— 分别为空气，水蒸气的压力；

R_a, R_w —— 分别为空气，水蒸气的气体常数。

由上式可看出空气重率随着压力、温度及湿度的变化而变化。当温度为 0℃，大气压力为 103.3kPa，相对湿度为 0% 时，空气重率为 12.8N / m³。根据此条件可求出任一条件下干空气的空气重率，此时可用下式计算：

$$\gamma = 3.41 \frac{P}{T} \quad (1-8)$$

在矿井中，由于空气潮湿，矿井的标准空气重率为大气压 103.3kPa，相对湿度为 75%，温度为 20℃，空气重率为 12.8N/m³。简化公式 (1-8) 为：

$$\gamma = 3.39 \frac{P}{T} \quad (1-9)$$

式中： P —— 空气的压力，kPa；
 T —— 空气的温度，K。

1.3 空气的粘滞性

粘滞性是流体固有的物理性质。各种流体均有粘性。我们在日常生活中是常见到的，如一杯水向外倒很容易就流出来了。当倒一杯油时，则流动十分缓慢。这就是由于油的粘性大的原故。空气也同样有粘性，只是它比液体的粘性要小些。

当空气在巷道中流动时，由于空气与巷道壁有附着作用，接触边界第一层的空气依附在巷道壁上，第一层不流动的空气通过空气的粘性作用而影响第二层的流动，第二层空气由于粘性而影响第三层，等等。这种影响逐层减少，一直达到巷道壁的影响消失。因此，紧靠巷道壁附着层流速最小，随着离巷道距离的增大风速逐层增加，如图 1-2。

这说明粘性作用是具有相对运动的。相邻两层风流之间的内摩擦作用，使速度快的风流层对速度慢的风流层施加一个与其速度方向一致的拖力，带动慢层风流运动，同时，慢层也对快层作用一个大小相等方向相反的阻力，阻挡快层的运动，这种阻力就是粘性力。因它发生在风流内部，又称内摩擦力。粘性力是阻滞风流运动的主要因素，当风流克服这种阻力而继续运动时，就要消耗其自身的能量，所以，粘性力是造成风流能量损失的根源。根据牛顿定律，流体内摩擦力为：

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1-10)$$

式中： μ —— 粘性动力系数，N·S/m²；

S —— 相邻层接触面积，m²；

$\frac{dv}{dy}$ —— 垂直于流动方向的速度变化。

将 (1-10) 式两边同除以接触面积，则得单位面积上的粘性力，即作用于流体层面之间的切应力 τ

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-11)$$

空气的粘性动力系数 μ 的影响因素，可用 (1-12) 式表示：

$$\mu = C \cdot \rho \cdot L \cdot v \quad (1-12)$$

式中： C —— 常数（与压力无关，与温度有关）；

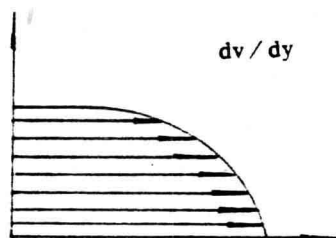


图 1-2 速度分布图

ρ —— 空气密度;

L —— 分子平均自由运动距离值;

v —— 分子的速度。

在工程计算上,一般不用粘性动力系数,而常用 μ/ρ 的比值 ν 。即空气运动粘力系数:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-13)$$

气体的粘滞性,随空气温度的变化而变化,与压力无关。

第二章 风流在井巷中流动的基本规律

2.1 风流在井巷中的流动状态

空气在井巷中的流动,可能为层流或紊流。空气在流动中无显著流速的脉动引起质点互相混合时的流动状态为层流,如空气在流动中各质点具有横向流动,且质点相互混合而不互相平行,则为紊流。

层流与紊流的转变关系,决定于流体的密度 ρ , 动力粘性系数 μ , 风流的平均速度 v , 巷道直径 d 等因素的综合作用,可用雷诺数 Re 表示:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (2-1)$$

式中: ν ——空气运动粘性系数, m^2/s ;
 V ——空气在巷道中的平均速度, m/s ;
 d ——巷道直径, m 。

1883年,学者雷诺指出:层流向紊流过渡是在一定条件下发生的。这个条件我们称为临界雷诺数。根据雷诺实验,临界雷诺数为: $Re = 2000$ 。

在空气动力学中,临界雷诺数被认为是一个常数,在光滑管中为: $Re = 2320$ 。

在矿山,巷道的直径可如下表示:

$$d = \frac{4S}{P} \quad (2-2)$$

$$Re_{kp} = \frac{4Sv_{kp}}{P\nu} \quad (2-3)$$

式中: S ——巷道的横断面积, m^2 ;
 P ——巷道的周长, m 。

$$P = 4f\sqrt{S}, \quad f = 0.9 \sim 1.1$$

$$V_{kp} = \frac{ReP\nu}{4S} \quad (2-4)$$

$$V_{kp} = \frac{0.035f}{\sqrt{S}} \quad (\text{可认为 } f=1)$$

由(2-4)式可作出下表

表 2-1

空气运动粘性系数

S	m^2	1	2	4	6	8	12	16
v_{kp}	m/s	0.035	0.024	0.018	0.014	0.012	0.01	0.009

从上表可以看出,临界速度是很低的,小于临界速度的情况在矿山中很少见到,只有在采空区崩落矿层面、密闭区、挡风墙等地点才有可能出现这种情况,通常在一般巷道中是不可能见着的。因此,矿山巷道中的风流属于紊流。

2.2 井巷中风流的结构

在矿井巷道中,空气的流动一般为固定边界所限制,其基本要素的组成,有附面层及

紊流核心两部份。如图 2—1 所示。

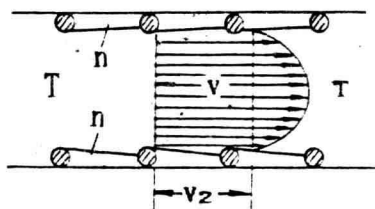


图 2-1 支护巷道风流结构

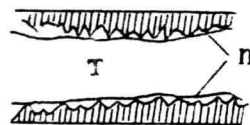


图 2-2 无支护巷道风流结构

附面层 n ：与巷道壁面直接接触的一层，流动状态主要决定于巷道周壁的粗糙程度，当巷道周壁光滑时，风流的流动通常为层流，该处流动制约于流体的分子粘性。如巷道周壁粗糙（如图 2—2），则在粗糙的凸出范围内风流的运动是复杂的，在一定的速度下可能是分子粘性运动；当速度增加时，可能过渡为紊流，但与巷道壁仍保持很薄的层流层，此时分子粘性可能还起很大作用。如速度再增加，则可能在粗糙的凸出范围内完全是紊流，此时分子粘性作用就小了。

紊流核心 T ：位于附层面之内，为有固定边界气流的主要部份。空气在井巷中流动时，由于和井巷壁的摩擦以及空气分子间的摩擦，造成紊流核心中纵向速度分布的不均匀，中心速度较边界速度为大，其分布形状从纵断面看，近于椭圆形。

巷道中，紊流核心速度场的结构，分为两个部份：一为边界速度场 v_z ，一为紊流速度场 U_z ，二者共同组成全速度。如图 2—3 所示。

$$v = v_z + U_z \quad (2-5)$$

v_z ——边界速度场的速度；

U_z ——紊流速度场的速度；

v ——气流的全速度。

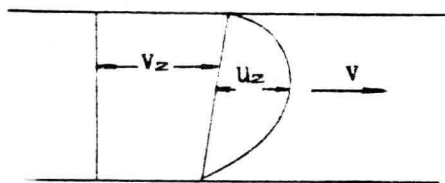


图 2-3 速度场结构图

2.3 井巷中气流流动方程

矿井巷道一般为非圆形巷道，现在为了简化问题，将矿内巷道形状作为圆形来讨论（由此引起的误差可以忽略不计）气流的流动方程。

1. 圆形巷道

周界具有均匀粗糙度的巷道，在回旋坐标中其微分方程式为：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left[\frac{1}{2} \rho f \frac{\partial U_z^2}{\partial r} + \mu \frac{\partial U_z}{\partial r} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} = 0 \quad (2-7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial p}{r \partial \Phi} = 0 \quad (2-8)$$

式中： ρ ——空气密度， kg/m^3 ；

f ——紊动度;

μ ——空气动力粘性系数, $\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$;

r ——巷道半径, m ;

U_z ——紊动速度场平均速度, m / s ;

v_z ——边界速度场平均速度, m / s ;

$\partial p / \partial z$ ——空气压力梯度。

解: 在圆形管道断面中, 空气压力为一常数, 对 (2-6) 式进行两次积分后, 得:

$$\frac{1}{2} p f U_z^2 + \mu U_z = \frac{1}{4} \frac{\partial p}{\partial z} r^2 + C_1 \ln r + C_2 \quad (2-9)$$

式中: C_1 、 C_2 ——积分常数。

此时, 边界条件若为 $r = r_1$ (r_1 ——紊流核心), 则紊流流动速度 $U_z = 0$; 若为 $r = 0$, 则 U_z 有限制。

由于管道轴上速度的有限性, 则:

$$C_1 = 0. \quad (2-10)$$

由条件 $r = r_1$, $U_z = 0$

$$C_2 = -\frac{1}{4} \frac{\partial p}{\partial z} r_1^2 \quad (2-11)$$

将 C_1 、 C_2 代入 (2-9) 式, 得:

$$\frac{1}{2} p f U_z^2 + \mu U_z + \frac{1}{4} \frac{\partial p}{\partial z} r_1^2 \left(1 - \frac{r^2}{r_1^2}\right) = 0 \quad (2-12)$$

$$U_z = -\frac{r}{f} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{f}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \cdot \frac{r_1^2}{p f} \left(1 - \frac{r^2}{r_1^2}\right)^2} \quad (2-13)$$

对圆形管道压力梯度为一常数。

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\partial p v_p^2}{r_0^2} \quad (2-14)$$

式中: f ——紊动度;

$$f = \alpha_1 R = \alpha_1 4 \frac{S}{p} = \alpha_1 \frac{4 \pi r_1^2}{2 \pi r_1} = 2 \alpha_1 r_1 \quad (2-15)$$

v_p ——动力速度;

r_0 ——包括附面层在内的巷道半径;

α_1 ——实验系数, $\alpha_1 = 0.0032 \sim 0.0038$;

p ——巷道周长;

R ——水力半径。

代入 (2-15) 式, 经整理得:

$$\frac{U_z}{v_p} = -\frac{r}{2 \alpha_1 r_1 v_p} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2 \alpha_1 r_1 v_p}\right)^2 + \frac{r_1^2}{2 \alpha_1 r_1 r_0} \left(1 - \frac{r^2}{r_1^2}\right)} \quad (2-16)$$