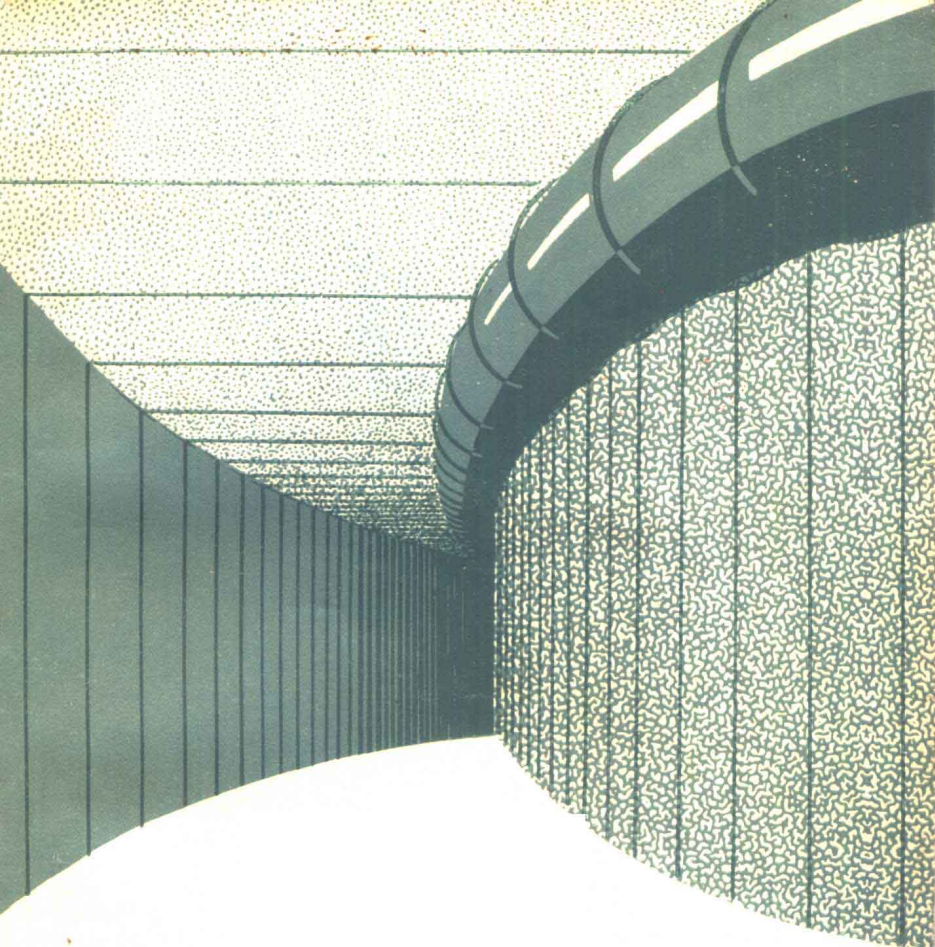




地下工程通风与空调

冶金工业出版社

地下工程通风与空调

隋鹏程 编著

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书针对地下建筑物如厂房、发电厂、医院、旅馆、商店、仓库和隧道等的通风防潮问题，以及人防地下工程的通风问题，介绍了：地下工程通风的基本理论，人员呼吸与生理、气象的关系；地下工程通风系统的设计和通风阻力等的计算方法；地下工程有毒物质、隔绝供氧和滤毒除尘等的原理以及排毒通风的风量计算，机械通风的设计和自然通风的应用；地下通风系统中的空气调节、消声和防止洞内潮湿的理论计算和具体措施。

本书可供城市建设及地下工程的设计、施工人员，地下建筑物的技术管理人员和大专院校建筑专业、采暖通风专业的师生参考。

地下工程通风与空调

隋 鹏 程 编著

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/32 印张 9 3/4 插页 1 字数 216 千字

1982年5月第一版 1982年5月第一次印刷

印数 00,001~5,000 册

统一书号：15062·3812 定价1.05元

前 言

工业城市人口集中，地面建筑鳞次栉比，而且环境污染日益严重，工厂和服务业的扩展往往受到场地的限制；有的国家地处高寒地带，立足于防寒和节约能源，各种工程也逐步向地下发展。所以，近年来，国外在大搞高层地面建筑物的同时，也积极向地下空间扩展，地下工程的进展日新月异。目前国外地下工程除一般的地下铁路、隧道、仓库外已发展到多层地下室、地下街道等建筑和构筑物。在地下修建了工厂、医院、商店、饭店，直至发电厂，这不仅节约了城市建设用地，充分利用地下空间，而且从战略上讲，也有着防止战争破坏的意义。

近年来，我国修建了不少地下工程，其中包括一些坑道和硐室。虽各有其专用目的，但不少与人防工程相结合。在平时，这些地下工程应当充分利用，为祖国“四化”服务。

地下工程的平时使用要改善人员居留条件，如不注意维护和进行通风防潮，不仅会恶化其环境，而且一旦战争发生也不能发挥其应有的作用，会因功亏一篑而前功尽弃。第二次世界大战期间，德、日、英、美、法和瑞典等国都曾搞过不少地下工程（作为防空掩体），地下仓库直至文物艺术品贮藏室。凡是合理设计并投入了通风空调工程的，都显示了很好的效果；反之，多数不敷应用，造成浪费。所以，通风与空调在地下工程中占有重要地位。

地下工程的通风，包括空调防潮、消声除尘，不仅是地下工程的重要组成部分，而且也是必不可少的劳动保护措施，又是改善地下环境的安全技术手段，对保护从事地下作

业的人员的健康与安全和发展地下建筑业都有着十分重要的现实意义。

地下工程通风介乎地面建筑通风与矿山通风之间，与后者虽有其共性，但由于工程目的不同，其特殊性也较为突出。作者大胆尝试，根据地下人防工程和地下发电厂通风设计的经验和多年从事地下矿山劳动保护的教学实践，结合工业建筑通风在碉室中应用的体会，按新的体系写成此书，但由于作者水平所限，书中难免有不妥之处，欢迎批评指正。

本书第五、第七两章编入了作者的几篇研究论文，其中有关“地下发电厂通风设计”的研究，由于得到了东北电业局基建处孙祖培工程师的协助才得以实施，为国家节约了投资；关于“风冷式半导体空调”的研究是作者与东北工学院张国权、李高棋及天津市致冷器厂的同志合作完成的，有关人防工程通风设计和理论运算是有关部门的支持下进行的，张炳才同志审校了这部分内容。在编写中，作者还参阅了许多有关文献，对所引用的文献因故未能在此一一列举。东北工学院关绍宗教授指导了本书初稿的修改，仅在此向他们一并表示感谢。

隋 鹏 程

1980年10月

目 录

前言

第一章 地下工程通风的基本理论.....	1
第一节 通风在地下工程中的任务	1
第二节 坑道中的风速和风量	2
第三节 空气的密度、重率、粘性及比热	6
第四节 空气的温度、湿度及舒适度	12
第五节 地下工程通风压力	22
第六节 地下工程风流的运动	35
第七节 人体呼吸生理和能量代谢	41
第八节 地下工程无通风设备时人员的呼吸	46
第二章 地下工程通风系统和通风阻力	56
第一节 地下重要工程通风系统的设计原则及其组成	56
第二节 地下坑道和硐室的通风管道布置型式	63
第三节 分支地下坑道的通风网路	69
第四节 风道的通风阻力	71
第五节 管道阻力简易计算方法	79
第六节 通风管道网路计算方法	85
第七节 串联、并联通风网路的基本性质	89
第八节 地下工程防护装置的通风阻力	92
第三章 地下工程中的有害物质和风量计算	100
第一节 地下工程中有害物质概述	100
第二节 有害物质对人体的影响	106
第三节 过滤有害物质的基本原理	113
第四节 按人员需氧计算风量	117
第五节 重要地下工程的风量计算	119
第六节 地下生产车间的风量计算	122
第七节 地下柴油发电机的风量计算	129

第八节	爆破后的排烟通风及其通风量的计算	133
第九节	地下工程中内燃发动机设备运行时的 通风量计算	142
第四章	地下工程通风的动力	152
第一节	概述	152
第二节	通风机的理论风压和风量	155
第三节	通风机的相似定律	160
第四节	通风机的选择	165
第五节	通风机的联合作业	172
第六节	自然风压的形成	176
第七节	自然通风的计算	179
第八节	坑内自然风压的测定	186
第五章	地下工程通风设计实例	188
第六章	地下工程的空调及除湿	209
第一节	概述	209
第二节	温湿图在空调和防湿中的应用	215
第三节	地下工程除湿方法	221
第四节	吸湿剂及其除湿方法	230
第五节	制冷除湿机	239
第七章	风冷式半导体空调	249
第一节	半导体致冷原理及风冷半导体 空调器的散热机理	249
第二节	风冷式半导体空调除尘器的结构	258
第三节	半导体元件规格、数目、功率及采暖计算	263
第四节	空调室冷负荷及送入风量的计算	269
第八章	地下工程通风系统中的消声和除尘	273
第一节	噪声的物理性质及地下厂房中的噪声特性	273
第二节	通风系统中的消声	288
第三节	地下工程通风系统中的除尘	296

第一章 地下工程通风的基本理论

第一节 通风在地下工程中的任务

大家知道，人离不开氧气。由于人员呼吸，设备耗氧，若地下工程与地面隔绝，则工作地点的空气含氧量会逐渐降低；或由于地下工程内有从地层中涌出的气体而造成缺氧的状态。为保证人员安全健康，必须用通风的办法向地下工程不断地输入新鲜空气。

地下工程在开挖和掘进过程中，一般都必须进行爆破作业。爆破后所产生的炮烟是多种有毒气体的混合物，人员呼出的二氧化碳气，人体新陈代谢所散发的汗味和臭气，内燃机排放的尾气，蓄电池充放电时产生的氢气以及地下岩层中涌出的有毒有害气体等等，都要用通风的方法加以稀释排除。同时通风也是治理地下工厂生产过程中所放出的有害物质和粉尘的基本措施。

空气的温度、湿度、风流速度三者综合起来称为气象条件，人员对地下工程的气象条件有一定的要求。因为地下工程中的人员和设备不断散发热量和湿量，或因为地热、矿岩氧化热使地下空气温度升高；或因为山洞阴凉，巷壁渗水，夏季地表的热空气进入洞内而凝结成露；或因无风而感到憋闷，或风速过大，使人体散热过快而打颤。这些因素促成地下工程中的空气温度、湿度和风流速度都在不断地发生变化。当气象条件发生显著变化时常使人有不舒适感觉，为了保证人员舒适，防止机械设备和物质腐蚀损坏，必须通过通风进行散热、除湿和进行必不可少的空气调节。

在战争条件下，大气有时被放射性气溶胶或毒气所污染。为防止这些污染物质渗入地下工程内部就必须用通风的办法加大工程结构内部的空气压力，也就是用足够风量进行压入式通风，使地下工程内的空气压力稍高于大气压力。这就是造成“超压”的实质。

人防工程通风比一般地下工程通风还要复杂一些，是因为人防工程存在一个消波滤毒的问题。即保证这类工程具有防原子、防化学、防细菌的“三防”能力，用以消除冲击波、放射性尘埃、化学毒剂、细菌等的危害，同时还需要把洁净无毒的空气送入工程内部。“三防”通风设施平时不必一律装备齐全，只预留处所，在应急之时即行安装。这些设施对设计地下工程通风的主要影响，是在通风系统中附加了一部分阻力，或者说增加了一部分通风动力的消耗。

风流运动规律是空气由压力高的地方流向压力低的地方，地下工程通风就是利用工程内外空气压力之差，促进空气按所需的方向和数量流动的一种技术措施。

总之，地下工程通风的基本任务就是，向地下各工作地点供给足够数量的新鲜空气，稀释和排除各种有害物质（包括炮烟、有害气体和粉尘），调节工程内部的气象条件，创造舒适的劳动环境。人防工程还要造成“超压”，防止有毒气体渗漏到工程内部，保证工程具有“三防”的能力。

第二节 坑道中的风速和风量

1. 风速及其测定仪表

风速是指空气流动的速度，一般用米/秒来表示。坑道（或风管）横断面上风速的分布情况，大致如图1-1所示。

空气在坑道和管道中流动时，由于界壁的摩擦和空气的

粘性作用，同一横断面上的各点，其速度是各不相同的。最大风速 v_d 位于坑道的轴线上。靠近边界处有一很薄的边界层，此处的风速 v_x 最小。坑道（或管道）的平均风速为单位时间内通过的风量除以其断面积所得的商。即：

$$v_p = \frac{Q}{S}, \text{ 米/秒} \quad (1-1)$$

式中 Q ——坑道断面上单位时间内通过的风量， $\text{米}^3/\text{秒}$ ；

S ——坑道横断面的面积， 米^2 。

实际上，在地下工程的坑道里，坑道的曲直、断面、形状等都是变化的，因此，风速的分布并不完全对称。实测

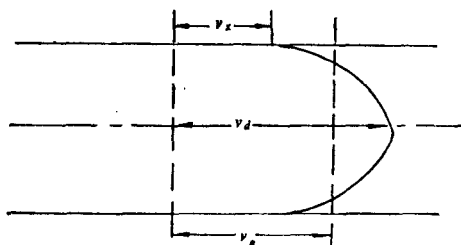


图 1-1 坑道中风速的分布

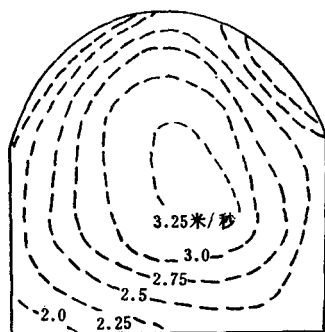


图 1-2 实测的坑道风速分布例子

坑道风速的分布见图1-2。

在壁面比较光滑的坑道中，对比其平均风速与最大风速，其比值约为0.75~0.8左右。

测定低风速时，可用气味法和烟雾法。在 L 米长的坑道内，于一端放出具有强烈气味的物质（如梨汁香精或四氯化锡等烟雾）在坑道此端的测定者在施放气味和烟雾的同时打开秒表，等到气味或烟雾随风流传送到位于坑道彼端的测定者时，后者立即发出信号，放味（烟）测定者停止秒表，记下时间 t （秒）。由此计算风速：

$$v = \frac{L}{t}, \text{米/秒} \quad (1-2)$$

式中 L ——两测定者之间的距离，米；

t ——气味（或烟雾）通过距离 L 所需的时间，秒。

这种方法适用于风速小于0.5米/秒的情况，或鉴别地下工程密封门有无漏风时采用。

精确确定风速时，常使用风表（测风仪）、电热式风速计等。

风表有两种类型：翼式风表和杯式风表。

翼式风表用来测定中等风速（0.5~10米/秒），其外形如图1-3所示。它是由一套特殊的钟表传动机构、指针和叶轮组成。叶轮为八张铝片。风表上有一个启动和停止指针转动的小杆，打开小杆，指针随叶轮转动。关闭小杆时，叶轮虽然转动，但指针不动。此外在表上还有回零装置，便于从零开始计量风速。杯式风表可测大于10米/秒的较高风速。

测定时，首先回零。待叶轮转动稳定后，再打开仪表的开关，则指针随着转动，同时记录时间，约经1~2分钟，关闭开关，记录指针的读数和时间的，即可算出表测的风速 N 。

一般来说，风表的转数不完全等于真正的风速，必须用图1-4所示的风表校正曲线，才能把风表测出的风速换算成真实的风速 v 。用风表测定巷道的平均风速时测风员使风表面对风流在整个坑道断面上按着图1-5所示的路线移动风表。

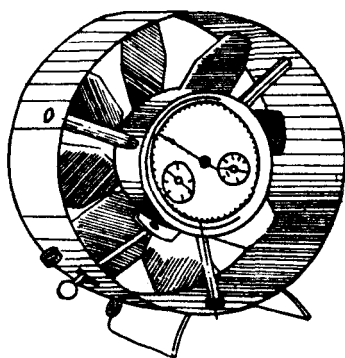


图 1-3 翼式风表

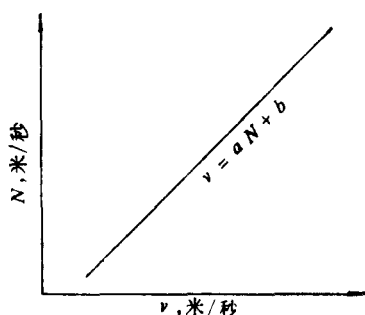


图 1-4 风表校正曲线

热电式风速计可分为热线式风速计和热球式风速计两种。它们的工作原理是利用风流对电热线（球）的冷却作用，通过热电偶产生的电动势的大小来反映风速的大小。风速

越高，所带走的热量越多，作用于热电偶的温差越小，故其产生的电势也就越小。因此，只要测定出其电势的变化值，就可求出相应的风速。

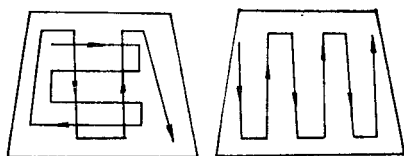


图 1-5 测定平均风速的路线

2. 风量及用动压测定风速

为了测定流经坑道的风量，除了测定坑道的平均风速外，还必须测出坑道的断面积。

风量是单位时间内通过坑道某一断面的空气的体积，以米³/秒或米³/小时表示。其计算公式如下：

$$Q = v_p \cdot S, \text{米}^3/\text{秒} \quad (1-3)$$

或者
$$Q = 3600 v_p \cdot S, \text{米}^3/\text{小时} \quad (1-4)$$

对较高风速的测定也可利用测定动压的方法。根据动压公式，测定的风速为：

$$v = \sqrt{\frac{2gh_d}{\gamma}}, \text{米/秒} \quad (1-5)$$

式中 g ——重力加速度，9.8米/秒²；

h_d ——测点处风流的动压，毫米水柱；

γ ——测点周围空气的重率，公斤/米³。

有关动压和空气重率的概念将在后面有关章节介绍。

第三节 空气的密度、重率、粘性 & 比热

1. 密度

单位体积空气所具有的质量称为空气的密度 (ρ)，其

表达式如下：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{g} \times \frac{1}{V}, \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \quad (1-6)$$

式中 m ——空气的质量，公斤·秒²/米³；

V ——空气的体积，米³；

G ——空气的重量，公斤；

g ——重力加速度，米/秒²。

2. 重率

单位体积的空气所具有的重量称为空气的重率（ γ ），用下式表示：

$$\gamma = \frac{G}{V}, \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-7)$$

由公式（1-6）与公式（1-7），可以得到重率和密度之间的关系：

$$\rho = \frac{\gamma}{g}, \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \quad (1-8)$$

3. 比容

单位重量空气所占有的体积称为空气的比容（ ν ）。

$$\nu = \frac{V}{G} = \frac{1}{\gamma}, \text{ 米}^3 / \text{公斤} \quad (1-9)$$

4. 粘性

粘性是空气抗拒剪切力的一种性质。流体层中相邻两层由于速度不同所产生的内摩擦阻力是产生粘性的原因。这种阻力就是粘性力。

根据牛顿定律，流体的内摩擦力为：

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

式中 μ ——粘性运动系数, 公斤·秒/米²;

S ——相邻层的接触面积, 米²;

$\frac{dv}{dy}$ ——垂直于流动方向的速度变化。

单位面积上的粘性力, 即作用于流体层面间的切应力 (τ):

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy}, \text{ 公斤/米}^2 \quad (1-11)$$

5. 空气的比热

单位重量的空气, 如一公斤的空气温度升高1°C所需要的热量, 称为空气的比热(C), 其计量单位是千卡/公斤·°C。

6. 空气的温度、压力和体积的变化

当温度不变时, 一定质量的气体压力与它的体积成反比。当压力不变时, 一定质量的气体的压力与其绝对温度成正比。

实际上, 气体的压力、体积和温度的变化往往同时发生。这时, 一定质量气体的压力与体积的乘积与其绝对温度之商是一个常数。

上述这些关系可用如下公式表示:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \text{ 或 } V_1 P_1 = V_2 P_2 \quad (1-12)$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{273 + t_1^\circ\text{C}}{273 + t_2^\circ\text{C}} \quad (1-13)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-14)$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1-15)$$

即

$$\frac{PV}{T} = R \text{ 或者 } PV = RT \quad (1-16)$$

公式 (1-16) 称为理想气体方程式。R 则通称为气体常数 (米/°K) 干燥空气的 $R=29.27$ 。各种不同的气体, 其 R 值各不相同。

根据道尔顿定律, 在没有化学反应的条件下, 混合气体的总压力等于混合气体中每种气体分压力之和。此时, 混合气体的常数 R 为:

$$R = \frac{G_1 R_1 + G_2 R_2 + \cdots + G_n R_n}{G}, \text{ 米/°K} \quad (1-17)$$

式中 $R_1, R_2, \cdots, R_n$ ——每种气体的气体常数, 米/°K;

$G_1, G_2, \cdots, G_n$ ——每种气体的重量, 公斤。

地下工程中的空气含有大量水蒸气, 所以, 地下空气的总压力等于干空气和水蒸气各自分压力之和。每一组成气体的体积等于混合气体的体积。混合气体的重量等于各组成气体重量之和。即:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1-18)$$

$$G = \sum_{i=1}^n G_i \quad (1-19)$$

$$V = V_i \quad (1-20)$$

根据公式 (1-7)、(1-9)、(1-18)、(1-19)、(1-20) 得出:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (1-21)$$

湿空气由于空气和水蒸气组成, 因而

$$\gamma = \gamma_g + \gamma_{sh} = \frac{P - P_{sh}}{R_g T} + \frac{P_{sh}}{R_{sh} T} = \frac{0.4645 P}{T} \times \left(1 - 0.378 \frac{P_{sh}}{P}\right) \quad (1-22)$$

式中 γ_g ——干空气的重率；

γ_{sh} ——水蒸气的重率；

P_{sh} ——水蒸气的分压力；

R_g ——干空气的气体常数；

R_{sh} ——水蒸气的气体常数；

T ——空气的绝对温度。

7. 标准状态下的空气重率和密度

当温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ，压力 $P_0 = 760$ 毫米水银柱时，空气的组成正常时，干空气的重率 γ_g 为：

$$\gamma_g = \frac{0.4645 P_0}{T_0} = 1.293 \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-23)$$

因而，干空气的密度 ρ_g 为：

$$\rho_g = \frac{\gamma_g}{g} = 0.132 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \quad (1-24)$$

对任意条件下，正常组成的干空气重率，可从理想气体方程式获得；即：

$$\gamma_g = 1.293 \frac{T_0 P}{P_0 T}, \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-25)$$

代入具体条件后得到：

$$\gamma_g = 0.465 \frac{P}{T}, \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-26)$$

若地下工程内气温 $t_0 = 15^\circ\text{C}$ ， $T_0 = 273 + 15^\circ\text{K}$ ， $P_0 = 760$ 毫米水银柱，重率 $\gamma_0 = 1.2$ 公斤/米³，则地下工程的空气重