

高校函授自学用书

煤矿通风与安全

矿井通风安全教研室

淮南矿业学院

煤矿通风与安全

矿井通风安全教研室



淮南矿业学院

· 1984 ·

前 言

随着开采深度的增加和采掘机械化程度的提高，做好矿井通风安全工作，对于矿井建设和生产有着越来越重要的意义。为适应广大煤矿技术人员自学和函授教学的需要，我们编写了这本自学及函授用大学教材。本书根据矿井建设和矿井开采专业的通风安全课程教学大纲及现场实际工作的需要编写，供两个专业合用。考虑到专业特点及教学时数的不同，对于其中某一专业选用、参考的章节，标有相应的标记，以便读者选学。供矿井开采专业用的章节对矿井建设专业来说，也可作为参考性内容查阅。

根据生产技术和我们的教学经验，本书对伯努利方程及其应用，用电子计算机解算通风网路，掘进通风，建井时期的通风，矿井瓦斯、矿井气候等内容均有所加强。

本书分为矿井通风与煤矿安全技术上下两篇，上篇由吴中立同志主编，下篇由蔡善明同志主编。

各章编写人如下：

第一章、第三章 吴中立

第二章、第十三章 马逸吟

第四章 吴中立 张世荣

第五章 张国枢

第六章 李西才 马逸吟

第七章、第九章 王惠宾

第八章 马逸吟 李西才

第十章、第十一章 蔡善明

第十二章、第十四章 方裕璋

本书应本院函授部的要求编印，在编写过程中，受到采矿系领导和函授部主任董权威等同志的大力支持，通风教研室的余跃进、邵辉、刘泽功、赵时海等同志也做了工作，在此表示深切的谢意。

限于编者水平，书中难免有不少缺点和错误，恳请广大读者提出宝贵意见，以便改进。

编者 1984年4月

目 录

第一章 绪论	(1)
--------	-----

上篇 矿井通风

第二章 矿井大气

§ 2—1 空气的物理性质	(4)
§ 2—2 矿井空气的污染	(13)
§ 2—3 矿井气候	(17)
§ 2—4 采掘工作面及峒室所需风量	(26)

第三章 矿井空气动力学基础

§ 3—1 空气的压能和重力位能	(29)
§ 3—2 风流的流动状态与雷诺数	(30)
§ 3—3 井巷断面上的风速分布与风速测量	(32)
§ 3—4 空气流动时的压力及其测量	(35)
§ 3—5 空气流动过程中的能量变化与能量方程	(42)
§ 3—6 能量方程在矿井通风中的应用	(48)
§ 3—7 气体射流的基本概念	(56)
*** § 3—8 流体流动的相似原理	(58)

第四章 井巷通风阻力

§ 4—1 摩擦阻力(沿程阻力)	(63)
§ 4—2 摩擦阻力系数和摩擦风阻	(66)
§ 4—3 局部阻力	(71)
§ 4—4 降低井巷通风阻力的方法	(78)
§ 4—5 矿井总风阻与矿井等积孔	(79)
§ 4—6 井巷风阻特性曲线	(82)

第五章 矿井通风动力

§ 5—1 自然风压	(84)
§ 5—2 矿用扇风机的类型和构造	(89)
§ 5—3 主扇的附属装置及其设计施工要求	(91)
*** § 5—4 扇风机的理论特性	(94)
§ 5—5 扇风机的实际特性曲线	(96)
§ 5—6 扇风机的工况点及其合理范围	(106)
§ 5—7 扇风机的联合运转	(108)
§ 5—8 矿井通风设备的选型	(113)

§ 5—9	扇风机的性能鉴定	(120)
-------	----------	-------

第六章 通风网路中风量的分配与调节

§ 6—1	通风网路的总风阻及其风量分配规律	(126)
§ 6—2	矿井风量调节	(131)
**§ 6—3	复杂通风网路解算	(136)
**§ 6—4	应用电子计算机解算复杂网路	(142)
§ 6—5	用图解法解算通风网路	(145)

第七章 掘进通风基础

§ 7—1	掘进通风方法	(152)
§ 7—2	独头巷道爆破后通风	(156)
§ 7—3	瓦斯涌出巷道的掘进通风	(163)
§ 7—4	掘进巷道防尘通风	(165)
§ 7—5	风筒	(167)
§ 7—6	局扇的选型与应用	(174)

第八章 矿井通风系统与通风设计

§ 8—1	矿井通风系统	(186)
§ 8—2	通风构筑物与漏风	(192)
§ 8—3	矿井所需风量	(197)
§ 8—4	矿井通风系统总阻力	(199)
§ 8—5	选择矿井通风设备	(201)
§ 8—6	概算矿井通风费用	(202)
§ 8—7	矿井通风设计概述	(203)

*第九章 建井时期通风技术

§ 9—1	井筒掘进通风	(205)
§ 9—2	井底车场施工时的通风	(211)
§ 9—3	大巷及上山掘进时的通风	(213)
§ 9—4	进回风井贯通后的通风	(216)
§ 9—5	建井通风施工组织设计与通风技术管理	(218)

下篇 煤矿安全技术

第十章 矿井瓦斯

§ 10—1	概述	(223)
§ 10—2	煤层瓦斯含量和瓦斯压力	(223)

§ 10—3	矿井瓦斯的涌出	(228)
§ 10—4	沼气爆炸及其防治	(239)
**§ 10—5	瓦斯抽放	(250)
§ 10—6	瓦斯喷出	(265)
§ 10—7	煤与瓦斯突出	(266)
§ 10—8	瓦斯浓度测定	(282)

第十一章 矿尘

§ 11—1	概述	(291)
§ 11—2	煤矿尘肺	(292)
§ 11—3	煤尘的爆炸性	(294)
§ 11—4	防尘措施	(299)
**§ 11—5	防止煤尘爆炸的措施	(307)
§ 11—6	矿尘浓度的测定	(312)

第十二章 矿井防灭火

§ 12—1	概述	(316)
§ 12—2	煤矿外源火灾	(317)
§ 12—3	煤炭自燃	(318)
§ 12—4	煤炭自燃的预防	(326)
§ 12—5	矿内灭火	(336)
§ 12—6	火区的管理与启封	(349)

第十三章 矿井水灾防治

§ 13—1	概述	(352)
§ 13—2	地面防治水	(353)
§ 13—3	井下防治水	(354)
§ 13—4	透水事故的处理	(367)

第十四章 矿山救护

§ 14—1	矿山救护队	(370)
§ 14—2	矿工自救	(374)
§ 14—3	矿井灾害预防和处理计划	(377)

附录

附录一	国际单位制	(380)
-----	-------	-------

附录二	矿井空气中各种气体的特性参数	(383)
-----	----------------	-------

附录三	饱和空气表	(384)
附录四	由风扇湿度计读值查相对湿度	(385)
附录五	焓—湿 (i—d) 图	(386)
附录六	井巷摩擦阻力系数 α_0 值	(388)
附录七	扇风机性能曲线	(390)
附录八	希腊字母表	(394)
参考书目		(395)
(395)	空气调节工程 第二十二卷	
(396)	通风与空调工程 第二十三卷	
(397)	暖通空调工程 第二十四卷	
(398)	暖通空调工程 第二十五卷	
(399)	暖通空调工程 第二十六卷	
(400)	暖通空调工程 第二十七卷	
(401)	暖通空调工程 第二十八卷	
(402)	暖通空调工程 第二十九卷	
(403)	暖通空调工程 第三十卷	
(404)	暖通空调工程 第三十一卷	
(405)	暖通空调工程 第三十二卷	
(406)	暖通空调工程 第三十三卷	
(407)	暖通空调工程 第三十四卷	
(408)	暖通空调工程 第三十五卷	
(409)	暖通空调工程 第三十六卷	
(410)	暖通空调工程 第三十七卷	
(411)	暖通空调工程 第三十八卷	
(412)	暖通空调工程 第三十九卷	
(413)	暖通空调工程 第四十卷	
(414)	暖通空调工程 第四十一卷	
(415)	暖通空调工程 第四十二卷	
(416)	暖通空调工程 第四十三卷	
(417)	暖通空调工程 第四十四卷	
(418)	暖通空调工程 第四十五卷	
(419)	暖通空调工程 第四十六卷	
(420)	暖通空调工程 第四十七卷	
(421)	暖通空调工程 第四十八卷	
(422)	暖通空调工程 第四十九卷	
(423)	暖通空调工程 第五十卷	
(424)	暖通空调工程 第五十一卷	
(425)	暖通空调工程 第五十二卷	
(426)	暖通空调工程 第五十三卷	
(427)	暖通空调工程 第五十四卷	
(428)	暖通空调工程 第五十五卷	
(429)	暖通空调工程 第五十六卷	
(430)	暖通空调工程 第五十七卷	
(431)	暖通空调工程 第五十八卷	
(432)	暖通空调工程 第五十九卷	
(433)	暖通空调工程 第六十卷	

第一章 緒 论

社会主义社会生产的目的是为了**满足**广大人民日益增长的物质和文化需要。社会主义劳动者是国家的主人，是物质和精神财富的创造者，他们是一切财富中最宝贵的财富。保护劳动者在生产中的安全与健康，不断改善劳动条件，坚持安全生产方针，是党的国家的基本政策，是社会主义社会区别于资本主义社会的根本标志之一。

1982年我国颁布了《**矿山安全条例**》及《**矿山安全监察条例**》。条例明确提出“**坚持安全第一**”的方针，并对矿山企业建立安全、卫生和救护机构，职工培训考试制度，编制矿井灾害预防和处理计划，预防各类事故，工业卫生标准和检测，职业病检查和防治，以及对违章者追究责任等都作了相应规定。

煤矿井工开采，作业环境特别复杂，在生产过程中往往受到瓦斯、矿尘、水、火等灾害的威胁。因此，对于煤矿企业，认真贯彻执行安全生产的方针**政策**，具有特殊重要的意义。

煤炭工业部颁发的《**煤矿安全规程**》是煤矿安全生产的法规，是保障煤矿职工安全健康，保护国家资源和财产不受损失、促进煤炭工业现代化建设必须遵循的准则。煤炭工业部部长、省煤炭局局长、矿务局局长、矿长对贯彻执行《**煤矿安全规程**》负全面责任。凡对《**煤矿安全规程**》未进行过认真学习、考核不及格者，干部不准担任原职务，工人不准独立顶岗位操作。

煤炭工业部还发布了《**煤矿安全监察试行条例**》。条例指出，安全监察部门是负责监督检查安全生产的专职机构，对煤矿企业贯彻执行党的安全生产方针和有关政策、法令、规程、条例等情况行使监督检查权。安全监察人员在自己负责的范围内，有权随时检查任何地点的安全情况，在现场检查中发现不安全问题时，有权要求有关部门采取措施，限期解决，如不解决，有权停止作业；当发现有立即发生事故的**危险**时，有权立即停止作业，撤出人员。安全监察人员对违章作业和工作失职，造成事故的责任者，有权追究责任，提出制裁处理意见。

对于从事矿井建设和采矿工程专业的技术人员来说，不仅要熟悉《**煤矿安全规程**》的有关条文，而且要透彻了解这些条文的含意及其科学依据，才能因地制宜地贯彻执行。对在生产中发现的各种不安全因素，要能够及时采取有效、合理的技术措施。随着生产规模的发展，生产技术的现代化，还要求我们对国内外煤矿安全新技术及其发展动向有一定程度的了解。为此目的，我国矿业学院矿井建设专业和采矿工程专业的教育计划中均设置了《**矿井通风与安全**》课程。为适应本科矿井建设和采矿工程两专业函授教学的需要，特编写本教材。

本教材分为两篇。上篇是矿井通风，围绕保证供给矿内足够数量的新鲜空气，讨论矿井通风的有关理论和技术问题。下篇是煤矿安全技术，针对生产中遇到的灾害性因素——瓦斯、矿尘、水、火等，重点讨论各类事故发生的原因及其预防措施。

矿井建设专业的《矿井通风安全》课程学时较少，本应另编教材，但考虑函授生和自学者多系现场技术人员，内容偏少的教材不适应现场工作应用的需要。因此编写了这两专业合用的教材。

为了便于在教学上适应不同专业的需要，将本书内容分为三类：（1）必读内容，对两专业都是必读的；（2）选学内容，是特定专业选学的，在章、节号前标注有*号者为矿建专业必读，而注**号者为采煤专业必读；（3）参考性内容，是扩大知识面的，学员学习有余力时可以选学，在章、节号前标注***号。

本书虽分为两篇，但前后内容有密切联系，有些地方还相互交叉，建议学员在自学时，两篇中相关内容可同时学习，以便互为补充，加深理解。第二章§2—3矿井气候中的热计算部分，对于无高温问题矿区的学员可以不学；有高温问题时，可以选学，但最好安排在学完第五章的内容（矿井通风动力）后学习，有利于学员理解和掌握。

考虑到函授自学的特点，以及贯彻“少而精”和“理论联系实际”的原则，本书对重点内容的叙述力求详尽，并结合生产实践，配置了必要的例题和习题，以便达到边学边练的目的。

关于计量单位问题，1984年2月27日国务院发布了统一实行法定计量单位的命令，决定在国际单位制的基础上统一我国的计量单位。要求教育部门在“七五”期间于所有新编教材中普遍使用国际单位制（简称SI）。国家标准（GB）还规定，只推荐使用国际符号，中文符号只供在中、小学教科书，普及书刊中使用。本书采用国际单位制和国际符号。由于过去专业书刊普遍使用工程单位制，现场人员比较熟悉，一旦完全改用SI，短期内不易适应。为此，本书以SI为基础，在有些地方兼用工程单位制，以便学员更快掌握SI与工程单位制的换算关系。在附录一中对SI进行专门介绍，并列出了矿井通风中常用的单位换算表，学员在学习绪论时必须学习并掌握其中所述内容。

学习本课程的基本形式是自学和函授，在必要时，在有条件的地区按阶段对函授学员进行适当的面授辅导。

阅读教材是函授、自学中最基本的环节。阅读时应集中精力，分析研究教材中的主要问题，理论联系实际，弄清基本原理和概念，对难懂之处，经再三思考不得其解者，应及时向任课教师书面提问。在学习过程中应随时查阅章末的复习思考题与习题，掌握所学内容的重点，及时完成作业。在解答复习思考题时，最好能写出笔记。对所做作业的答案没有把握时，可及时向函授教师书面提问，请求答疑。通过解答复习思考题，可衡量自己对所学内容掌握的程度，发现不足，及时弥补。某些复习题，教师可选作面授时的课堂讨论题。

面授是总结性的讲课，讲述重要而又难懂的章节。每次面授后让学员提问，教师答疑。

根据教学计划，学校在自学周历表中安排考试或考查日期。考试采用笔试方式，函授学员要在完成规定的全部习题和测验作业后才能参加考试。考查可用笔试或由教师根据学员完成的习题、测验作业和实验报告，参考平时提问、质疑情况，评定成绩。

上篇 矿井通风

人类千万年来在地球表面的大气条件下生活，大气有比较稳定的化学成份、温度、气压和湿度。人体已习惯并适应于这样的大气条件。当这些条件发生剧烈改变时，人体就有不舒服的感觉，其工作能力减弱，甚至生病、死亡。因此，只有当人们能在矿井内建立与地表近似的大气条件时，采掘工作才能大规模地在深部进行。矿井通风就是为建立这种大气条件服务的。

矿井通风是采矿科学中的一个重要组成部分。为了使井下各工作地点有良好的通风，有足够的新鲜空气，使其中有毒、有害、有爆炸性的气体、粉尘不超过规定值，使气温适宜；为了能进行通风设计和科学管理，采矿工程师必须很好掌握矿井通风的理论和知识。矿井通风在矿业工程中占有重要地位。通风情况的好坏直接影响工人的安全健康，矿井劳动生产率和经济效益。保证井下有良好的大气条件是矿业工程师的首要任务。

第二章 矿 井 大 气

矿井大气是指从地面进入矿井、充满巷道的、成份上可能产生不同程度变化的大气。此外，空气的温度、压力、密度和相对湿度等在矿井内沿程也发生变化。

本章在介绍空气的物理性质的基础上，讨论矿井空气污染的原因、检测和防治技术，讨论矿井气候条件及其改善问题。

§ 2—1 空气的物理性质

一、密度

单位体积的空气所具有的质量叫做空气密度，用符号 ρ 表示

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ 或 } \rho = \frac{G}{g} \cdot \frac{1}{V}, \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.1.1)$$

式中 M —空气的质量， kg ； V —质量为 M [kg] 的空气所占有的体积， m^3 ； G —空气的重量， N ； $g = 9.81 \text{m/s}^2$ 。

空气密度是表示空气疏密程度的一个物理量，它与压力、温度和湿度等因素有关。例如在大气压力 P_0 为 760mmHg ，气温为 0°C （即 273k ）时，干空气的密度 ρ_0 为 $1.293 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

比容是单位质量空气所具有的体积，用符号 v 表示。比容和密度是互为倒数的。

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{M}, \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad (2.1.2)$$

二、重率 γ

单位体积空气的重量称为重率（或称重度），用符号 γ 表示，重量表示物体所受的重力，用符号 G 表示。质量为 M [kg] 的物体所受的重力（即重量） G 为质量 M 与重力加速度 g 的乘积。

$$G = M \cdot g, \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (\text{N});$$

$$\text{故 } \gamma = M \cdot g / V = \rho \cdot g, \text{ N} \cdot \text{m}^{-3} \quad (2.1.3)$$

我国重量的惯用单位是公斤力，用符号 kgf 表示（或用吨力为单位，吨力的符号是 tf ）。重率的惯用单位是公斤力/ m^3 ，用符号 kgf/m^3 表示。它们的换算关系如下：

$$1 \text{kgf} = g[\text{N}] = 9.81 \text{ N}$$

$$1 \text{kgf/m}^3 = 9.81 \text{ N/m}^3$$

质量的惯用单位是公斤力·秒²/ m^4 ，用符号 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 表示， $1 \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 = \frac{1}{9.81} \text{ kg}$

或 $1 \text{kg} = 9.81 \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 。

注意：(1) 公斤 (kg) 是国际制的质量单位；公斤力 (kgf) 是惯用的重量单位，不可混淆。对于同一物体，其质量 M 用国际制单位 kg 表示，而其重量 G 用惯用单位 (kgf) 表示时，二者的数值却是相同的；而且用国际制单位表示的密度 ρ (kg/m^3) 与惯用单位表示的重率 γ (kgf/m^3)，二者的数值也相等。

(2) 重率 γ 是有因次的，而比重是无因次的，重率与比重是两个不同的物理量。有些物理书中把物体 (指固体或液体) 单位体积的重量 (kgf/m^3) 叫做该物体的比重，这是因为固 (液) 体的比重是该物体重率与 $4^\circ C$ 时的蒸馏水重率之比；而在惯用单位制中， $4^\circ C$ 的蒸馏水的重率为 $1tf/m^3$ (吨力/米³)，所以物体的重率和比重的数值相等。在国际制中，固 (液) 体的重率与比重在数值上也是不等的。

各种气体的比重是指压力为 $760mmHg$ (即 $101.325kPa$)，温度为 $273k$ 时该气体的重率与干空气的重率 ($1.293kgf/m^3$ 或 $12.68N/m^3$) 之比，故干空气的比重为 1。沼气 (CH_4) 在 $760mmHg$ ， $273k$ 时的密度 ρ_{CH_4} 为 $0.716kg/m^3$ ，相应的重率 γ_{CH_4} 为 $0.716kgf/m^3$ (或 $=7.0216N/m^3$)，其比重 d_{CH_4} 则为

$$d_{CH_4} = \frac{0.716}{1.293} = \frac{7.0216}{12.68} \approx 0.554$$

三、粘 性

流体抵抗剪切力的性质称为流体的粘性。粘性是空气流动时产生阻力的内在因素。

例如，空气在管道内作层流流动 (关于层流的说明参见 §3—2) 时，管壁附近流速较小，越近轴线流速越大，(参见图 2.1.1)，速度快与速度慢的流层之间有内摩擦力 (粘滞力) F_v 。根据牛顿内摩擦定律，内摩擦力 F_v 正比于接触面积 $S(m^2)$

及速度梯度 $\frac{du}{dy}$ (S^{-1})，即

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{du}{dy}, \quad N \quad (2.1.4)$$

式中 μ ——比例系数，代表空气的粘性，称为动力粘度或绝对粘度 (或称粘滞系数或内摩擦系数)。它的国际制单位叫帕 (斯卡)·秒，写作 $Pa \cdot s$ 。其惯用单位还有泊 (写作 P) 和公斤力·秒/米² (写作 $kgf \cdot s/m^2$)。

$$1Pa \cdot s = 10P = \frac{1}{981} kgf \cdot s/m^2$$

动力粘度 μ 与密度 ρ 的比值称为运动粘度 (或称运动粘性系数)，用符号 ν 表示。其国际制单位是米²/秒，记作 m^2/s ；其惯用单位名称是斯托克斯，简称斯，记作 St ； $1St = 10^{-4}m^2/秒$ 。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad \left(\frac{Pa \cdot s}{kg/m^3} = \frac{kg/(m \cdot s)}{kg/m^3} = m^2/s \right) \quad (2.1.5)$$

$$1m^2/s = 10^4 St$$

$1St$ 的百分之一称为厘斯，记作 cSt 。机械油的号数就是表示这种油在 $50^\circ C$ 时的运动

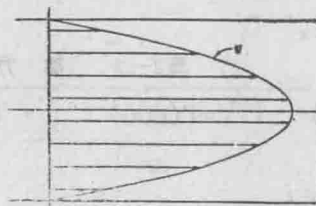


图2.1.1 层流速度分布

粘度 (cSt) 值, 例如20号机械油在50℃时, 其运动粘度的平均值为20cSt。

流体的粘度随温度而变化。气体的粘度随温度升高而增加; 因为气体的分子间距大, 其粘性主要起因于分子间的动量交换, 温度高时动量交换增加, 因而粘性增大。液体的粘性则随温度升高而减小; 因为液体的分子间距小, 其粘性主要起因于分子之间的引力, 温度升高时分子间引力减小, 因而粘性减小。表2-1所示为几种有关流体的粘度。图2.1.2所示为压力为760mmHg时, 不同温度下空气和水的运动粘度值。

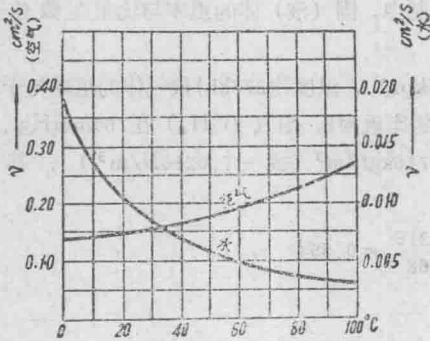


图2.1.2空气与水的运动粘度

表2-1 几种流体的粘度(760mmHg, t=20℃)

流体名称	动力粘度 μ P (泊)	运动粘度 ν cSt (厘斯)
空气	1.808×10^{-4}	15.01
氮气 (N ₂)	1.76×10^{-4}	14.1
氧气 (O ₂)	2.04×10^{-4}	14.3
沼气 (CH ₄)	1.08×10^{-4}	15.2
水	1.005×10^{-2}	1.007

由表2-1可见, 沼气与空气的动力粘度之比约为1:1.67。表2-2为各种动力粘度单位换算表。

表2-2 动力粘度单位换算表

P (泊)	cP (厘泊)	kg/(m·s)	kgf·s/m ²	lb/(ft·s)
1	100	0.1	0.0102	0.0672
1×10^{-2}	1	0.001	1.02×10^{-4}	6.72×10^{-4}
10	1000	1	0.102	0.672
98	9860	9.8	1	6.59

四、压力P (压强)

矿井通风学中, 习惯把压强称为压力, 用符号P表示。气体的压力是气体分子作用于器壁单位面积上的力, 是气体分子热运动对器壁碰撞的宏观表现。压力的单位有标准大气压 (写作atm), 帕斯卡 (简称帕, 写作Pa, $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$), 托 (即毫米汞柱, 写作mmHg), 巴 (即达因/厘米², 写作bar, $1\text{bar} = 10^5\text{Pa} = 100\text{kPa}$), 工程大气压 (写作at, $1\text{at} = 1\text{kgf/cm}^2 = 10\text{gkPa} = 98.0665\text{kPa}$), 公斤力/米² (即毫米水柱, 写作mmH₂O或mmWG) 等。它们的换算关系详见附录一表1-5。

根据物理学的分子运动理论, 气体作用于器壁的压力P正比于单位体积内的分子数n和分子的平均平动动能 $m\bar{v}^2/2$, 且

$$P = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m\bar{v}^2 \right) \quad (2.1.6)$$

上式是理想气体的压强公式, 是气体分子运动论的基本公式之一。由式可知, 气体的压力是单位体积内气体分子不规则热运动总动能的三分之二转化为能对外作功的机械能的宏观表现, 故压力的大小表示单位体积气体的压能的数量, 这是气体所具有的普遍

的物理性质。

在地球引力（重力）场中的大气层空气由于重力的影响，空气的密度与压力均随着离地表的高度增加而减小。大气层的存在和大气压力随高度而变化的规律是分子热运动和地球引力作用两者协调的结果。如果没有地球引力则空气分子将逸散到广阔的宇宙空间而不复存在大气层。

在物理学中，单位体积气体的分子数 n ，在重力场中随高度分布的规律用波兹曼公式表示：

$$n = n_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (2.1.7)$$

空气的密度 ρ (kg/m^3)，重率 γ (kgf/m^3) 和压力 P (kPa) 都是与分子数 n 成正比的，它们随高度的变化规律也与上式相似，即

$$\rho = \rho_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (2.1.8)$$

$$\gamma = \gamma_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (2.1.8a)$$

$$P = P_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (2.1.8b)$$

式中 n 、 ρ 、 γ 、 P —分别是标高（海拔）为 Z 米处（海平面上 Z 为正值，反之为负值）单位体积气体的分子数、密度、重率和大气压力；

n_0 、 ρ_0 、 γ_0 、 P_0 —分别为海平面（ $Z=0$ ）单位体积气体的分子数、密度、重率和大气压力；

μ —空气的摩尔质量，等于 $28.97\text{g}/\text{mol}$ ，或 $28.97\text{kg}/\text{kmol}$ ；

T —空气温度， $T = t + 273\text{K}$ （ t 为摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ ）；

R_0 —普适气体常数，或称摩尔气体恒量，其数值随所用单位而异： $R_0 = 8314\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K}) = 8.20 \times 10^{-5}\text{m}^3 \cdot \text{atm}/(\text{mol}\cdot\text{K}) = 1.98\text{cal}/(\text{mol}\cdot\text{K}) = 848\text{mmH}_2\text{O} \cdot \text{m}^3/(\text{kmol}\cdot\text{K}) = 62.4\text{mmHg}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。 R 为干空气的气体常数

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8314}{28.87} = 287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K}) ;$$

g —重力加速度，等于 $9.81\text{m}/\text{s}^2$ 。

将这些数值代入式中，并令 $A = \frac{\mu g Z}{R_0 T}$ ，则得

$$A = \frac{9.81}{R_0/\mu} \cdot \frac{Z}{T} = \frac{9.81}{287} \cdot \frac{Z}{T} = \frac{1}{29.27} \cdot \frac{Z}{T} \quad (2.1.9)$$

A 的因次为1

$$\text{当 } T = 273 + 15 = 288\text{K 时, } A = \frac{Z}{29.27 \times 288} = \frac{Z}{8429.76};$$

$$P = P_0 \exp(-Z/8429.76) \quad (2.1.10a)$$

$$\text{或 } \frac{P}{P_0} = \exp(-Z/8429.76) \quad (2.1.10b)$$

不同标高处的 $\frac{P}{P_0}$ ($\frac{P}{P_0} = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$) 值见表2—3。

表2—3 不同标高处的空气压力比值

标高Z(米)	+1000	±0	-1000
比值 $\frac{P}{P_0}$	0.888	1.0	1.126

实际上各地点的大气压力还和地表气象因素有关。一年四季,甚至一昼夜内都有明显的波动变化。如安徽淮南地区一昼夜内气压变化一般为2~3mmHg,但有时

可达10mmHg以上,一年中的气压变化可高达30~40mmHg。

五、湿 度

空气的湿度表示空气中所含水蒸汽量或潮湿的程度,有绝对湿度与相对湿度之分。

1. 绝对湿度 每 1m^3 空气中所含水蒸汽的质量 ρ_v ,称为绝对湿度。其单位与密度的单位相同;其数值等于水蒸汽在其分压力与温度下的密度。在温度不变的条件下,单位体积空气所能容纳的水蒸汽分子数是有一定限度的。如果空气中含水蒸量恰好达到这个限度,叫做饱和空气;其所含水蒸汽量叫饱和湿度,用 ρ_{sat} 表示,其时的水蒸汽分压力叫做饱和水蒸汽压,用 P_{sat} 表示。不同温度时的饱和水蒸汽参数见附录三。

绝对湿度只能说明空气中实际含有的水蒸汽量 (kg/m^3),但并不说明其他饱和程度。例如对于温度为 18°C 的空气,如果含水蒸汽量为 $0.0153\text{kg}/\text{m}^3$,它已是饱和空气,或者说 18°C 时饱和湿度 ρ_{sat} 为 $0.0153\text{kg}/\text{m}^3$ 。但对于温度为 30°C 的空气,在含有 $0.0153\text{kg}/\text{m}^3$ 水蒸汽量时,它还有相当大的容纳水分的能力而被认为是比较干燥的空气,因 30°C 时的饱和湿度为 $0.0301\text{kg}/\text{m}^3$ 。所以在通风和空调中常用相对湿度表示空气的干、湿程度(即饱和程度)。

2. 相对湿度 是空气中水蒸汽的实际含量(绝对湿度 ρ_v)与同温度下的饱和湿度 ρ_{sat} 之比,其符号为 φ ,即

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{sat}} \quad (2.1.11)$$

相对湿度 φ 反映空气所含水蒸汽量接近饱和的程度,也叫做饱和度。 φ 值小则空气干燥,吸收水分的能力强; $\varphi = 0$ 时为干空气。 φ 值大则空气潮湿,吸收水分的能力弱; $\varphi = 1$ (即100%)时为饱和空气。这样,不论气温高低,由 φ 值的大小,可直接看出其干湿程度。水分向空气中蒸发的快慢直接和相对湿度有关。

例题2—1 已知大气压力为1000mbar(毫巴),甲地点气温为 18°C ,绝对湿度为 $0.0107\text{kg}/\text{m}^3$;乙

地点气温为30℃，绝对湿度为0.01536kg/m³。试求算两地点的相对湿度，并指出何者吸湿能力较强。

解 由附录三知18℃时之饱和湿度为0.01536kg/m³，故甲地点的相对湿度为

$$\varphi = \frac{0.0107}{0.01536} = 0.7 \text{ 或 } 70\%$$

而30℃时之饱和湿度为0.0301kg/m³，故乙地点的相对湿度为

$$\varphi = \frac{0.01536}{0.0301} = 0.51 \text{ 或 } 51\%$$

根据相对湿度值可知，乙地点的绝对湿度虽大于甲地点，但其相对湿度较小，故其吸湿能力比甲地点强。

将不饱和空气冷却时，随着温度下降，其相对湿度渐渐增大。冷却达到 $\varphi = 100\%$ 时，其时的温度称为露点；如再继续冷却，就会有部份水蒸汽以雾或露的形式凝结成水。在例题2—1中，如果乙地点的绝对湿度不变，其气温从30℃下降为18℃，则其相对湿度 φ 将由0.51上升到1而成为饱和空气，如果气温继续下降，将有水分析出，也就是说乙地点空气的露点是18℃。

相对湿度的测量 相对湿度通常用手摇湿度计(图2.1.3)和风扇湿度计(阿斯曼湿度计,图2.1.4)测量。它们都是由两支温度计组成,其中一支为干温度计1,另一支在液球上包着用净水润湿的纱布3,称为湿温度计2。干温度计显示的温度即气温 t 。湿温度计由于液球表面被水润湿而不断向周围蒸发水分,所以不断散失水汽化所需的潜热,其温度因而下降,低于气温;于是,四周空气又向湿液球传热,当这部分热量不足以补偿水分蒸发消耗的热量时,湿液球温度继续下降,直到两部分热量达到平衡为止。这时湿温度计的读值称为湿球温度 t' 。

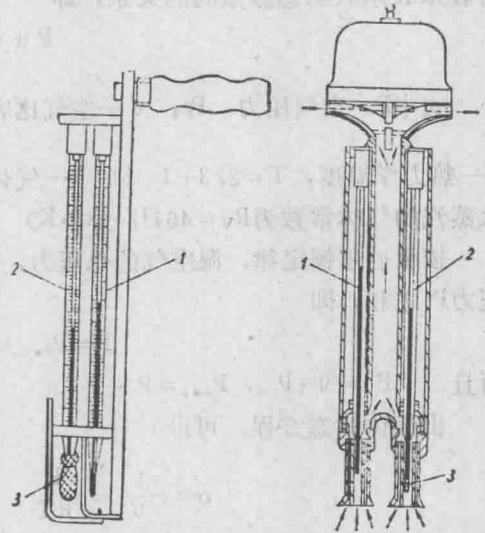


图2.1.3 手摇湿度计. 图2.1.4 阿斯曼湿度计

从湿球温度 t' 形成的过程可知,它与水分蒸发及向湿球表面的传热有关,因而与湿球周围的风速有关。为了减少测定误差及滞后现象,测定时宜使空气流动。风速以2m/s或略大一些为宜。手摇湿度计是用摇转的办法使空气对湿度计保持这样的速度,阿斯曼湿度计则用发条开动风扇来形成周围的气流。阿斯曼湿度计液球上的金属套则可起到隔离四周物体对液球的辐射热的作用。

根据干、湿球温度计的理论,空气中水蒸汽的分压力 P_v 与干、湿球温差 Δt 近似地成下列关系式,即

$$\Delta t = \frac{755}{0.5P} (P'_{sat} - P_v)$$

式中 P —气压; P'_{sat} —对应于湿球温度 t' 的饱和水蒸气压。

为简便计, 可根据湿温度计读值 t' 及两温度计差值 Δt 利用附录四查得相对湿度 φ 值。

例题2-2 某地点干温度计读值 $t=22^\circ\text{C}$, 湿温度计读值 $t'=20^\circ\text{C}$, 求该空气的相对湿度 φ 。

解 $\Delta t=t-t'=22-20=2^\circ\text{C}$ 。根据 t' 及 Δt , 由附录四查得相对湿度 $\varphi=0.83$

六、空气密度 ρ 的测算

矿井空气和地面空气都是干空气和水蒸汽的混合物, 工程中称为湿空气。在分析讨论湿空气时, 把由多种气体成份组成的干空气当作一个整体看待, 认为

$$\text{湿空气} = \text{干空气} + \text{水蒸汽}$$

湿空气的密度 ρ 是 1m^3 中所含干空气的质量和 水蒸汽的质量之和, 即

$$\rho = \rho_{d.a.} + \rho_v \quad \text{kg/m}^3 \quad (2.1.12)$$

式中 $\rho_{d.a.}$ 、 ρ_v 分别为干空气和水蒸汽的密度。

干空气可视为理想气体。存在于湿空气中的水蒸汽, 由于其分压力很低, 密度很小, 也可视为理想气体。所以由干空气和水蒸汽所组成的湿空气, 也可用理想气体状态方程来表示其状态参数间的关系, 即

$$Pv = RT \quad (2.1.13)$$

式中 P —空气压力, Pa; v —空气比容, 它是度密 ρ 的倒数, $v = \frac{1}{\rho} (\text{m}^3/\text{kg})$;

T —热力学温度, $T = 273 + t \text{ K}$; R —气体常数, 干空气的常数为 $R_{d.a.} = 287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 水蒸汽的气体常数为 $R_v = 461\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

按照道尔顿定律, 湿空气的总压力, 即大气压力 P 等于干空气分压力 $P_{d.a.}$ 和水蒸汽分压力 P_v 之和, 即

$$P = P_{d.a.} + P_v \quad \text{Pa} \quad (2.1.14)$$

而且 $P = \varphi \cdot P_{sat}$, $P_{d.a.} = P - \varphi P_{sat}$

由气体状态方程, 可得

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{P}{RT}$$

$$\rho_{d.a.} = \frac{P_{d.a.}}{R_{d.a.} \cdot T} = \frac{P - \varphi P_{sat}}{287T} \quad (2.1.15)$$

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T} = \frac{\varphi P_{sat}}{461T}$$

将上式代入式 (2.1.12), 得

$$\rho = \frac{P - \varphi P_{sat}}{287T} + \frac{\varphi P_{sat}}{461T} = \frac{P}{287T} - \frac{\varphi P_{sat}}{T} \left(\frac{1}{287} - \frac{1}{461} \right)$$

$$= \frac{P}{287T} \left(1 - \frac{0.378 \varphi P_{sat}}{P} \right) \quad \text{kg/m}^3 \quad (2.1.16)$$

$$\text{即 } \rho = 0.003484 \frac{P}{T} \left(1 - \frac{0.378 \varphi P_{sat}}{P} \right) \quad \text{kg/m}^3 \quad (2.1.17)$$