

高等学校教学用书

矿井通风与安全

吴中立 主编

中国矿业大学出版社



内 容 提 要

本书是根据煤矿高等院校采矿工程和矿井建设两专业的《矿井通风与安全》教学大纲编写的。全书分为矿井通风和煤矿安全技术上下两篇，共十六章。

书中系统地阐述了矿井通风的基础理论、通风设计原理以及有关的通风技术；分析讨论了煤矿各类事故及职业病发生的原因及其防治措施。教材中注意反映国内外矿井通风与安全技术方面的最新科技成果及其发展动向。

本书的特点是理论联系实际，阐述问题注意深入浅出，要点用黑体字编排，有较多的例题，各章附有相当数量的复习思考题和习题，计算题附有参考答案，便于读者学习思考与复习解题。

本书可作为煤炭成人高校（包括函授、职大等）和全日制高校采矿学科各专业的《矿井通风与安全》课的教材或教学参考书，亦可供从事矿业生产、建设、科研和设计部门的工程技术和管理人员阅读参考。

责任编辑 周立吾 马跃龙

高等学校教学用书

矿井通风与安全

吴中立 主编

中国矿业大学出版社 出版

(江苏省徐州市中国矿业大学内)

江苏省新华书店 经销 中国矿业大学印刷厂 印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 31 字数 750 千字

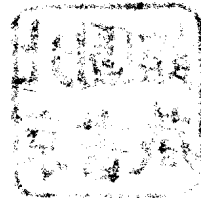
1989年6月第一版 1989年6月第一次印刷

印数：1-10000 册

ISBN 7-81021-065-3

TD·28 定价：6.05 元

技术设计：杜锦芝 责任校对：关湘雯



前 言

随着煤矿开采深度增加和采掘机械化程度的提高,煤矿通风与安全技术对于矿井建设和生产有着越来越重要的意义。为适应煤炭工业成人高等教育(函授和职工大学)和全日制高校教学的需要,我们编写了这本高等学校教学用书。

本书是根据煤矿采矿工程和矿井建设两专业的通风安全课程的教学大纲编写的,同时也考虑到现场广大工程技术和管理人员的实际工作需要。为了照顾采矿和矿建两个专业特点,满足其不同教学学时数的要求,将本书内容分为三类:(1)必读内容,对两个专业都是必读的;(2)选学内容,是特定专业选用的,在章、节号前标注有*号者为矿建专业必读,而注有**号者为采矿专业必读;(3)参考性内容,是扩大知识面的,读者可根据自己的需要选学,在章、节号前标注***号。

本书是在淮南矿业学院1984年的同名内部教材的基础上,经修改后编写的。四年来,原教材曾为多所高等煤矿院校和职工大学采用。这次修改时我们收集了各方面的意见,并给予充分地考虑。

根据生产技术的发展情况,本书对伯努利方程及其应用,矿井通风动力,掘进通风,复杂通风网路解算,矿井瓦斯等内容均有所加强。此外,在改编时还增加了采区通风、矿井空调技术概论、安全法规及事故统计与分析等三章。

本书由吴中立主编。全书分矿井通风与煤矿安全技术上、下两篇,上篇由马逸吟任分主编,下篇由蔡善明任分主编。各章的编写人员是:绪论、第二和第三章—吴中立;第一、六、十章—马逸吟;第四章—张国枢;第五章—李西才、马逸吟;第七、九章—王惠宾;第八章—马逸吟、李西才;第十一、十二章—蔡善明;第十三章、十五章—方裕璋;第十四章—马逸吟、余跃进;第十六章—张世荣。

本书在编写过程中得到淮南矿业学院函授部主任董权威同志的大力支持,通风安全教研室的邵辉、刘泽功、汪发胜、李湖生也做了工作,兄弟院校的教师提出了许多宝贵意见,谨向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平,教材中有错误之处,恳请读者不吝指正。

编者

1988年2月

目 录

绪论	(1)
----------	-------

上篇 矿 井 通 风

第一章 矿井空气	(4)
第一节 空气的物理性质	(4)
第二节 矿井空气的污染	(13)
第三节 矿井气候	(17)
第四节 矿井需风量概述	(20)
第二章 矿井空气动力学基础	(23)
第一节 空气的压能和重力位能	(23)
第二节 风流的流动状态与雷诺数	(24)
第三节 井巷断面上的风速分布与风速测量	(26)
第四节 空气流动时的压力及其测量	(29)
第五节 空气流动过程中的能量变化与能量方程	(36)
第六节 能量方程在矿井通风中的应用	(43)
第七节 气体射流的基本概念	(54)
* * * 第八节 流体流动的相似原理	(56)
第三章 井巷通风阻力	(60)
第一节 摩擦阻力 (沿程阻力)	(60)
第二节 摩擦阻力系数和摩擦风阻	(64)
第三节 局部阻力	(69)
第四节 降低井巷通风阻力的方法	(76)
第五节 矿井总风阻与矿井等积孔	(77)
第六节 井巷风阻特性曲线	(79)
第四章 矿井通风动力	(82)
第一节 自然风压	(82)
第二节 矿用扇风机的类型和构造	(87)
第三节 主扇的附属装置及其设计施工要求	(90)
* * * 第四节 扇风机的理论特性	(93)
第五节 扇风机的实际特性曲线	(95)
第六节 扇风机的工况点及其合理范围	(105)
第七节 扇风机的联合运转	(108)
第八节 矿井通风设备的选型	(113)
* * 第九节 扇风机的性能鉴定	(121)

第十节 噪音控制概述·····	(125)
第五章 通风网路中风量的分配与调节 ·····	(130)
第一节 通风网路的总风阻及其风量分配规律·····	(130)
第二节 用图解法解算简单通风网路·····	(136)
第三节 矿井风量调节·····	(138)
* * 第四节 复杂通风网路解算原理·····	(143)
* * 第五节 应用电子计算机解算复杂网路·····	(150)
* * 第六章 采区通风 ·····	(162)
第一节 对采区通风的要求·····	(162)
第二节 采区通风系统·····	(163)
第三节 采区风量·····	(174)
第四节 通风构筑物·····	(177)
第五节 漏风及其控制·····	(180)
第七章 掘进通风基础 ·····	(184)
第一节 掘进通风方法·····	(184)
第二节 独头巷道爆破后通风·····	(189)
第三节 瓦斯涌出巷道的掘进通风·····	(196)
第四节 掘进巷道防尘通风·····	(199)
第五节 风筒·····	(203)
第六节 局扇的选型与应用·····	(212)
第八章 矿井通风系统与通风设计 ·····	(222)
第一节 矿井通风系统·····	(222)
第二节 矿井通风设计原则与步骤·····	(226)
第三节 拟订矿井通风系统及绘制通风系统图·····	(226)
第四节 矿井需风量计算·····	(233)
第五节 矿井通风系统总阻力计算·····	(236)
第六节 选择主扇设备及其工况调节方法·····	(238)
第七节 概算矿井通风费用·····	(240)
* 第九章 建井时期的通风技术 ·····	(242)
第一节 井筒掘进通风·····	(242)
第二节 井底车场施工时的通风·····	(248)
第三节 大巷及上山掘进时的通风·····	(250)
第四节 进回风井贯通后的通风·····	(254)
第五节 建井通风施工组织设计与通风技术管理·····	(256)
* * * 第十章 矿井空调技术概论 ·····	(259)
第一节 环境气候与人体的热平衡·····	(259)
第二节 影响矿井气温的因素·····	(259)
第三节 矿井降温措施·····	(266)
第四节 矿井制冷空调·····	(267)

下篇 矿井安全技术

第十一章 矿井瓦斯	(273)
第一节 概述	(273)
第二节 煤层瓦斯含量和瓦斯压力	(274)
第三节 矿井瓦斯涌出	(280)
第四节 沼气爆炸及其防治	(292)
* * 第五节 瓦斯抽放	(305)
第六节 瓦斯喷出	(319)
第七节 煤与瓦斯突出	(321)
第八节 瓦斯浓度测定	(335)
第十二章 矿尘	(346)
第一节 概述	(346)
第二节 煤矿尘肺	(348)
第三节 煤尘的爆炸性	(350)
第四节 防尘措施	(355)
* * 第五节 防止煤尘爆炸的措施	(363)
第六节 矿尘测定	(369)
第十三章 矿井防灭火	(373)
第一节 概述	(373)
第二节 煤矿外源火灾	(374)
第三节 煤炭自燃	(376)
* * 第四节 煤炭自燃的预防	(384)
第五节 矿内灭火	(395)
* * 第六节 火区的管理与启封	(408)
第十四章 矿井水灾防治	(411)
第一节 概述	(411)
第二节 地面防治水	(412)
第三节 井下防治水	(413)
第四节 透水事故的处理	(429)
第十五章 矿山救护	(434)
第一节 矿山救护队	(434)
第二节 矿工自救	(439)
第三节 现场急救	(444)
第四节 矿井灾害预防和处理计划	(447)
第十六章 煤矿安全法规与工伤事故统计分析	(451)
第一节 煤矿安全法规	(451)
第二节 煤矿安全组织机构	(452)

第三节	安全教育与培训	(453)
第四节	工伤及其登记和报告	(453)
第五节	事故原因调查	(454)
第六节	工伤事故统计与分析	(456)
附录		(462)
附录一	国际单位制	(462)
附录二	矿井空气中各种气体的特性参数	(466)
附录三	饱和空气表	(467)
附录四	由风扇湿度计读值查相对湿度	(468)
附录五	焓—湿($i-d$)图	(469)
附录六	井巷摩擦阻力系数 α_0 值	(471)
附录七	扇风机性能曲线	(472)
计算题参考答案		(459)
参考文献		(483)

绪 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，是党和国家的基本政策，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》。条例明确提出了“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。

原煤炭工业部颁发的《煤矿安全规程》^①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。煤炭工业生产的各级领导对贯彻执行《规程》负全面责任。凡对《规程》未进行过认真学习、考核不及格者，干部不准担任职务，工人不准独立顶岗位操作。

原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《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，我国各高等院校的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

^①本书中以后所有《煤矿安全规程》均简称《规程》。

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，着重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。因此编写了这本两专业合用的教材。

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。

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分、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，采掘工作才能正常进行。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，并有适宜的气候条件，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技能。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。

第一章 矿 井 空 气

矿井空气是指从地面进入矿井井巷的，成分上可能产生不同程度变化的空气。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。

第一节 空气的物理性质

一、密度和比容

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

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

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 101325Pa (760mmHg)，气温为 0°C (即 273K) 时，干空气的密度 P_0 为 1.293kg/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。

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{M}, \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-1-2)$$

二、重率

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 G 为质量 M 与重力加速度 g 的乘积。

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

故

$$\gamma = M \cdot g / V = \rho \cdot g, \quad \text{N/m}^3 \quad (1-1-3)$$

过去我国惯用的工程单位，重量是公斤力 kgf (或用吨力 tf)。重率是公斤力/米³，kgf/m³，它们的换算关系如下：

$$1\text{kgf} = g \text{ (N)} = 9.81\text{N} \text{ ①}$$

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

质量是公斤力·秒²/米, (kgf·s²/m)。1kgf·s²/m = 9.81kg 或 1kg = 1/9.81kgf·s²/m。

注意: (1) 公斤(kg)是国际单位制的质量单位;公斤力(kgf)是工程上惯用的重量单位,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/m³) 与惯用单位表示的重率 γ (kgf/m³),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(tf/m³)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℃时的蒸馏水重率之比;而在惯用单位制中,4℃的蒸馏水的重率为1tf/m³(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/m³或12.68N/m³)之比,故干空气的比重为1。沼气(CH₄) 在760mmHg, 273K时的密度 ρ_{CH_4} 为0.716kg/m³, 相应的重率 γ_{CH_4} 为0.716kgf/m³ (或7.0168N/m³), 其比重 d_{CH_4} 则为

$$d_{\text{CH}_4} = \frac{0.716}{1.293} = \frac{7.0216}{12.68} \approx 0.554$$

三、粘性

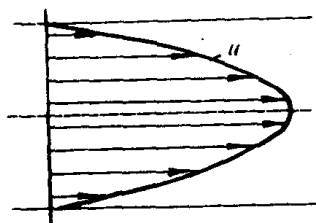


图 1-1-1 层流速度分布

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时,管壁附近流速较小,越近轴线流速越大(图 1-1-1),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

(m²) 及速度梯度 $\frac{du}{dy}$ (s⁻¹), 即

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{du}{dy}, \text{ N} \quad (1-1-4)$$

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·s。其惯用单位还有泊(写作 P) 和千克力·秒/米² (写作 kgf·s/m²)。

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = \frac{1}{9.81} \text{ kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

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

①注:重力加速度 g 值与纬度和海拔高度有关。标准重力加速度 $g = 9.80665\text{m} / \text{s}^2$ 。本书中一般采用 $g = 9.81\text{m} / \text{s}^2$

国际制单位是二次方米每秒，记作 m^2/s ；其惯用单位名称是斯托克斯，简称斯，记作 St ； $1\text{St}=10^{-4}\text{m}^2/\text{s}=1\text{cm}^2/\text{s}$ 。

$$v = \frac{\mu}{\rho}, \left(\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{kg}/\text{m}^3} = \frac{\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})}{\text{kg}/\text{m}^3} = \text{m}^2/\text{s} \right) \tag{1-1-5}$$
$$1\text{m}^2/\text{s} = 10^4 \text{St}$$

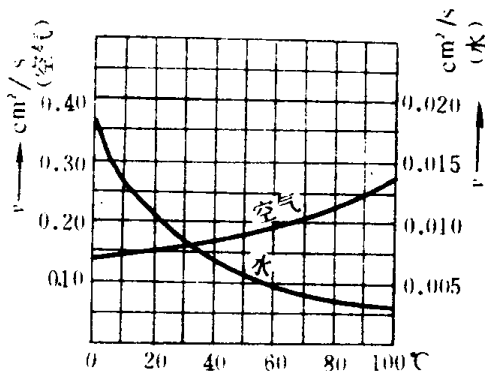


图 1-1-2 空气与水的运动粘度

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 1-1 所示为几种有关流体的粘度。图 1-1-2 所示为压力为 760mmHg 时，不同温度下空气和水的运动粘度值。

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℃ 时的运动粘度 (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

表 1-1 几种流体的粘度(0.1MPa, t=20℃)

流体名称	动力粘度 μ Pa·s(帕秒)	运动粘度 v m^2/s
空气	1.808×10^{-5}	1.501×10^{-5}
氮气(N ₂)	1.76×10^{-5}	1.41×10^{-5}
氧气(O ₂)	2.04×10^{-5}	1.43×10^{-5}
沼气(CH ₄)	1.08×10^{-5}	1.52×10^{-5}
水	1.005×10^{-3}	1.007×10^{-6}

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

表 1-2 动力粘度单位换算表

P(泊)	cP(厘泊)	kg/(m·s)	kgf·s/m ²	lb/(ft·s)	Pa·s
1	100	0.1	0.0102	0.0672	0.1
1×10^{-2}	1	0.001	1.02×10^{-4}	6.72×10^{-4}	1×10^{-3}
10	1000	1	0.102	0.672	1
98	9806	9.8	1	6.59	9.8

四、压力 (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，气体的静压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, $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$), 托 (即毫米汞柱, 写作 mmHg), 巴 (即 10^6 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, $1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 10\text{gkPa} = 98.0665\text{kPa}$), 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

$$P = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) \quad (1-1-6)$$

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, 气体的静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做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:

$$n = n_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (1-1-7)$$

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

$$\rho = \rho_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (1-1-8)$$

$$\gamma = \gamma_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (1-1-8a)$$

$$P = P_0 \exp \left(- \frac{\mu g Z}{R_0 T} \right) \quad (1-1-8b)$$

式中 n 、 ρ 、 γ 、 P ——分别是标高 (海拔) 为 Z 米处 (海平面以上 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, $^{\circ}\text{C}$);

g ——重力加速度, 等于 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

R_0 ——通用气体常数, 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

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

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

$$A = \frac{9.80}{R_0 / \mu} \cdot \frac{Z}{T} = \frac{9.80}{287} \cdot \frac{Z}{T} = \frac{1}{29.29} \cdot \frac{Z}{T} \tag{1-1-9}$$

当 $T = 273 + 15 = 288\text{K}$ 时, $A = \frac{Z}{29.29 \times 288} = \frac{Z}{8435.52}$

$$P = P_0 \exp(-Z / 8435.52) \tag{1-1-10a}$$

或 $\frac{P}{P_0} = \exp(-Z / 8435.52) \tag{1-1-10b}$

不同标高处的 $\frac{P}{P_0}$ 值见表 1-3。

表 1-3 不同标高处的空气压力比值

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

波兹曼公式是按等温过程导出的。考虑到空气温度随海拔的增加而降低, 接近于等熵过程。按等熵过程计算时, 大气压力 P 随高度 (海拔) 按下式变化:

$$P = P_0 \left[1 - \frac{Z g \rho_0}{P_0} \cdot \frac{K-1}{K} \right]^{\frac{K}{K-1}} \tag{1-1-11}$$

式中 K ——等熵过程指数, $K = 1.4$; 其余符号意义同上。

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 $0.27 \sim 0.40\text{kPa}$, 但有时可达 1.3kPa 以上, 一年中的气压变化可高达 $4 \sim 5.3\text{kPa}$ 。

五、温度

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, 超过这一限度, 多余的水蒸汽就会凝结出来。这种含有最大限度水蒸汽量的湿空气叫做饱和空气; 其所含水蒸汽量叫饱和湿度, 用 P_{sat} 表示, 此时的水蒸汽分压力叫做饱和水蒸汽压力, 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 $0.01536\text{kg}/\text{m}^3$, 它已是饱和空气, 或者说 18°C 时饱和湿度 ρ_{sat} 为 $0.01536\text{kg}/\text{m}^3$ 。但对于温度为 30°C 的空气, 在含有 $0.01536\text{kg}/\text{m}^3$ 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 $0.03037\text{kg}/\text{m}^3$ 。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

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{\text{sat}}} \quad (1-1-12)$$

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 1-1 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°C , 绝对湿度为 $0.01536\text{kg}/\text{m}^3$ 。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°C 时之饱和湿度为 $0.01536\text{kg}/\text{m}^3$, 故甲地点的相对湿度为

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

而 30°C 时之饱和湿度为 $0.03037\text{kg}/\text{m}^3$, 故乙地点的相对湿度为

$$\varphi = \frac{0.01536}{0.03037} = 0.51 \text{ 或 } 51\%$$

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, 此时的温度称为露点; 如再继续冷却, 就会有部分水蒸汽以雾或露的形式凝结成水。在例题 1-1 中, 如果乙地点的绝对湿度不变, 其气温从 30°C 下降为 18°C , 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°C 。

相对湿度的测量 相对湿度通常用手摇湿度计 (图 1-1-3) 和风扇湿度计 (阿斯曼湿度计, 图 1-1-4) 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' 。

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 $2\text{m}/\text{s}$ 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。

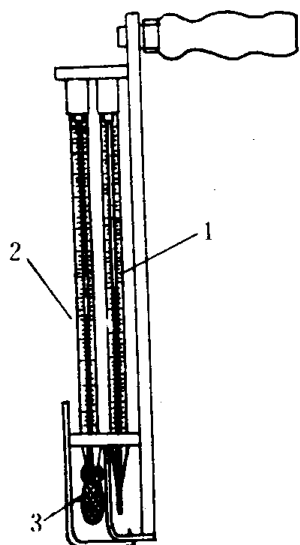


图 1-1-3 手摇湿度计

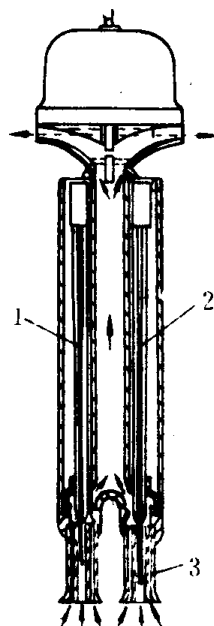


图 1-1-4 阿斯曼湿度计

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

$$\Delta t = \frac{755}{0.5P} (P'_{\text{sat}} - P_v) \quad (1-1-13)$$

式中 P ——气压；

P'_{sat} ——对应于湿球温度 t' 的饱和水蒸汽压。

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 1-2 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

湿空气 = 干空气 + 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

$$\rho = \rho_{d.a} + \rho_v \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-1-14)$$

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。所以由于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

$$Pv = RT \quad (1-1-15)$$

式中 P ——空气压力，Pa；

v ——空气比容，它是密度 ρ 的倒数， $v = \frac{1}{\rho}$ ， m^3/kg ；