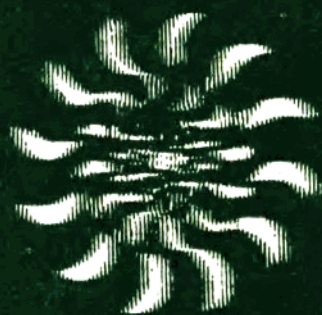


高等学校教学用书

# 矿井通风与空气调节

MINE VENTILATION AND AIR CONDITIONING

赵以蕙 主编



中国矿业大学出版社

Mine Ventilation and Air Conditioning

## 前 言

矿山通风与安全专业是1983年经高教部审定批准创办的新专业。《矿井通风与空气调节》课是本专业主要专业课之一。本书就是应教学之需，并按教学大纲规定内容编写的。

按照教学计划要求，本课程的先修课程是《流体力学与流体机械》，《工程热力学》，《传热学》等技术基础课，本书是在这个理论上编写的。

本书力图系统地阐述风流在矿井巷道中的流动规律及其参数测量；矿井通风动力和阻力的特点及其应用；风量在矿井巷道中的分配原则及其调节；采区和全矿井的通风系统设计；矿井空气调节及井筒防冻技术等方面的基本内容。测试计算技术是对矿井通风系统进行检验、鉴定、改进研究的重要手段，而且对于培养学生灵活运用理论知识、分析解决问题的能力也是重要环节，为此，本书着重介绍了常用的测试仪表和相应的测试方法。通过本书的学习，将为以后学习其他专业课程和从事通风安全方面的科学研究、工程设计、技术管理等工作奠定基础。

本书曾于1985年以试用教材形式在中国矿业大学印刷，1988年经煤炭工科高等学校教材编审委员会审定煤炭院校矿山通风与安全专业的适用教材。

本书第二、三、四、五、六、八、九章由赵以蕙编写；第一、七章由赵以蕙与朱美丽合编；第十、十一章由朱美丽与王德明合编，最后由赵以蕙对全书定稿。

本书的编写工作，自始至终都得到中国矿业大学通风安全教研室许多同志和有关文献作者的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编写水平有限，疏漏与谬误之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编 者

一九八九年七月

# 目 录

结 论	( 1 )
第一章 矿内空气	( 2 )
第一节 矿内空气成分	( 2 )
第二节 矿内空气的物理性质及状态参数	( 8 )
第三节 湿空气的焓湿图	( 13 )
第四节 湿球温度和露点温度	( 16 )
第五节 空气与水之间的热湿交换	( 18 )
第二章 矿内风流的能量及其变化	( 22 )
第一节 矿内风流运动的特征	( 22 )
第二节 粘性流体运动方程	( 23 )
第三节 风流任一断面上的能量	( 29 )
第四节 能量方程的应用	( 31 )
第三章 矿井通风阻力	( 34 )
第一节 风流流态	( 34 )
第二节 摩擦阻力	( 34 )
第三节 局部阻力	( 38 )
第四节 矿井通风阻力特性	( 43 )
第五节 通风阻力测量	( 45 )
第四章 矿井通风动力	( 62 )
第一节 自然通风	( 62 )
第二节 矿用扇风机的构造和附属装置	( 68 )
第三节 扇风机理论参数及特性	( 73 )
第四节 扇风机的实际参数	( 74 )
第五节 扇风机的实际特性	( 76 )
第六节 扇风机个体特性曲线的测绘	( 79 )
第七节 扇风机的联合工作	( 92 )
第五章 通风网络中风流基本规律和风量自然分配	( 97 )
第一节 风网的形式和绘制	( 97 )
第二节 风网中风流的基本定律	( 99 )
第三节 简单风网中风流参数的关系式	( 101 )
第四节 复杂风网中自然分配风量的计算	( 103 )
第六章 采区通风	( 115 )
第一节 采区通风系统	( 115 )
第二节 长壁工作面的通风方式	( 131 )
第三节 采区所需风量的计算	( 136 )
第四节 采区通风构筑物	( 141 )
第五节 减少漏风保证采区供风措施	( 147 )

<b>第七章 掘进通风</b> .....	(150)
第一节 掘进通风方法.....	(150)
第二节 掘进工作面所需风量的计算.....	(154)
第三节 掘进通风设备的选择.....	(155)
第四节 掘进通风技术管理和安全措施.....	(161)
<b>第八章 矿井风量调节</b> .....	(167)
第一节 局部风量调节.....	(167)
第二节 矿井总风量调节.....	(174)
第三节 多台主扇联合运转的相互调节.....	(175)
<b>第九章 矿井通风设计</b> .....	(178)
第一节 拟定矿井通风系统.....	(178)
第二节 矿井总风量的计算和分配.....	(182)
第三节 井巷通风总阻力的计算.....	(185)
第四节 矿井通风设备的选择.....	(187)
第五节 矿井通风费用的概算.....	(188)
第六节 生产矿井的通风系统技术改造.....	(189)
<b>第十章 矿内热环境</b> .....	(193)
第一节 矿内热源.....	(193)
第二节 矿内空气温度的计算.....	(199)
第三节 人与矿内热环境的关系.....	(208)
第四节 表征矿内热环境的指标.....	(212)
<b>第十一章 矿中空气调节</b> .....	(216)
第一节 矿井空调的特点.....	(216)
第二节 无制冷设备的矿井降温措施.....	(217)
第三节 机械制冷设备的工作原理.....	(219)
第四节 制冷剂和载冷剂.....	(223)
第五节 矿井空调制冷系统.....	(225)
第六节 井下空调降温技术.....	(231)
第七节 地面集中制冷空调技术.....	(235)
第八节 矿井空气的预热技术.....	(238)
<b>附 录</b> .....	(242)
附录 1 气象参数的测定.....	(242)
附录 2 常用压差计构造原理及使用方法.....	(263)
附录 3 巷道风速的测定方法.....	(267)
附录 4 井巷摩擦阻力系数 $\alpha$ 值.....	(268)
附录 5 井巷局部阻力系数值.....	(272)
附录 6 国产扇风机简介.....	(273)
附录 7 闪影测转数法.....	(296)
附录 8 风量计算经验统计表.....	(298)
附录 9 岩石热物理参数表.....	(307)

## 绪 论

我国的煤矿开采大多为地下作业。向地层深部进军，其困难之大、问题之多，远非人们所能预想。人类长期生活在地表大气条件下，大气具有比较稳定的化学成分、温度、湿度和压力，人体已习惯于这种相对稳定的气候条件。当深入地下后，由于各种气象参数的剧烈变化，人们往往难以适应，从而工作能力减弱，劳动效率降低，甚至发生病变或死亡。为此，在井下创造一种适应人们劳动与工作的气象条件，是地下作业必不可少的条件。矿井通风与空调技术就是解决这个问题的技术手段。

在矿井内，一般由地面主扇将新鲜空气经通风巷道送入井下，以供劳动者呼吸，同时能冲淡、排除随开采而出现的各种有毒、有害、爆炸性气体及粉尘，建立起一个舒适安全的劳动环境。

在井下，过高的气温会造成热害，人们难以高效率地劳动，并且长期工作在这种环境下对人身有损害。而在寒冷地区，冷空气进入井下，又会冻坏设备、冻伤身体，无法维持正常生产，因此，空气的降温与预热技术是提供舒适劳动环境的必要手段。

随着煤炭的开采，井下各处会发生不同程度的沼气（甲烷）涌出和积聚，且在一定条件下会发生爆炸。另外，有些矿井还出现煤与沼气突然喷出的现象。粉尘是生产过程中的产物，人们长期吸入过量的粉尘可以罹患尘肺病。煤尘在空气中达到一定的浓度时，遇火源可能导致爆炸。破碎的煤炭在适当的供氧条件下会发生自燃。除此之外，各类电气、机械设备的运转状况不良、电网发生短路以及明火等，可能引燃运输皮带、电缆以及木支架，造成井下外因火灾。这些事故最终导致人员的伤亡与经济的损失。我们社会主义国家把保护劳动者的安全和健康作为基本国策，改变煤矿安全面貌是实现煤炭工业现代化的战略目标，而矿井通风技术是预防和治理各种灾害，实现煤矿安全生产的基本手段。当灾害一旦发生，井下正常的通风系统遭到破坏，井下风流流动失去正常的平衡，通风技术又是控制、缩小、扑灭灾害必不可少的手段。

随着科学的发展，为了更客观地反映井下气象状态，矿井通风学科理论逐渐从研究稳定流动，向以空气动力学、热力学为基础，研究非稳定流动理论的方向发展，这将对指导矿井通风及空调技术向自动化过渡是十分重要的。

本书仅介绍了本学科的最基本的入门知识，此作为深入、广泛学习各种灾害理论与技术的基础。希望同学们在学习中，正确、全面的理解我国提出的“安全第一”的方针，以理论与实际相结合的原则，深刻体会与总结有关理论知识与实践经验，培养自己分析问题和解决问题的能力，为煤炭工业的安全事业作出贡献。

# 第一章 矿内空气

空气是矿井通风与空气调节的基本介质。保证井下有一定数量和质量的空气，创造一个既能保证矿井安全生产，又不危害人体的矿内空气环境，则是矿井通风与空调技术的任务。所以作为矿山通风与安全技术人员必须熟悉并掌握空气的物理性质、状态参数以及各参数之间的关系。

## 第一节 矿内空气成分

围绕地球表面的空气层称为大气，它是由多种气体组成的干空气和水蒸汽组合而成的混合气体。大气圈中位置较低的纯净而干燥的均质层空气的化学组成成分的比例是稳定的，其中氧气和氮气的含量变化在0.004%以内；其它成分随时间、地点和海拔高度不同，虽有一定的变化，但并不明显。故可把空气视为一种单纯的气体。干空气标准成分的质量比例列于表1-1-1，体积比如图1-1-1所示。

表 1-1-1 干空气质量组分

成分名称	分子量(M)	质量比(g)
氧气(O <sub>2</sub> )	32.000	0.2314
氮气(N <sub>2</sub> )	28.016	0.7553
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	44.010	0.0005
氩气(Ar)	39.944	0.0128

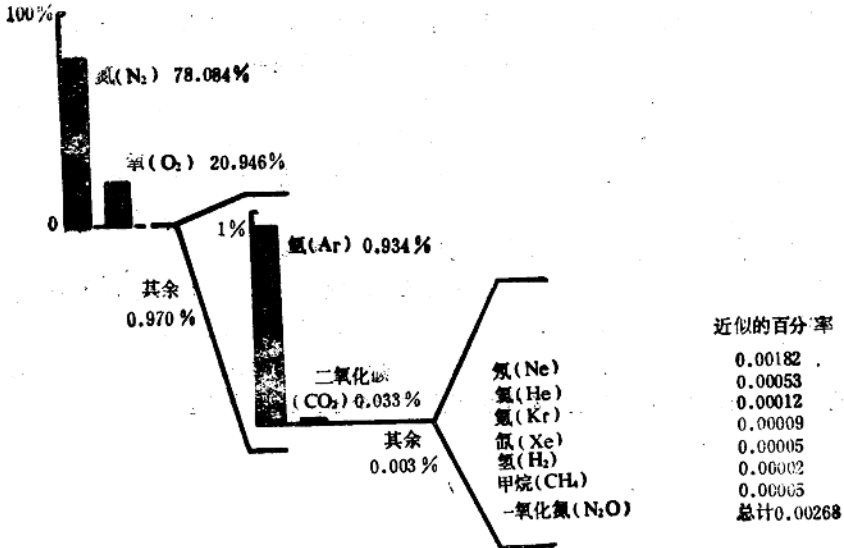


图1-1-1 干空气体积组分

## 一、矿内空气成分

大气进入矿井后，其组成成分变化不大，称为新鲜空气，简称新风。当经历了物理、化学变化后，空气成分种类增多，组分比例发生变化，其质量也发生较大变化，此时称其为污浊空气或乏风。矿内空气主要成分除氧气（O<sub>2</sub>）、氮气（N<sub>2</sub>）、二氧化碳（CO<sub>2</sub>）、水蒸气（H<sub>2</sub>O）以外，还混入各种有害气体，如沼气（CH<sub>4</sub>）、一氧化碳（CO）、硫化氢（H<sub>2</sub>S）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）、氨气（NH<sub>3</sub>）、氢气（H<sub>2</sub>）和矿尘等。

### 1. 氧气（O<sub>2</sub>）

氧气是无色、无臭、无味、无毒和无害的气体。对空气的相对密度为1.105。矿内氧气来源于进入矿井的地面大气所固有的含量。由于矿内各种有机物（木材、支架等）和无机物（矿物、岩石）的氧化，矿物自燃，矿井火灾，以及瓦斯、煤尘爆炸等，都要直接消耗氧气，此外，井巷内不断放出的各种有害气体，也相对地降低着氧气的浓度。

为了保证矿内空气中有足够数量的氧气，必须不断供给井下足够的风量。通风良好的巷道，氧气浓度的减少量是微小的，只有在通风不良或采空区的旧巷内，氧气浓度才可能显著降低。

氧气又是很活泼的元素，易使其他物质氧化，并能助燃产生CO<sub>2</sub>和CO。故须阻止空气进入采空区和火区，以防止煤炭被氧化而自燃。

氧气是人赖以生存的必需物质，人体只有摄取并消耗氧，营养物质才能在体内进行一系列生物氧化反应，产生能量，补充人体活动中所消耗的能量。当空气中的氧气体积浓度降到15%时，火焰就会熄灭，人呼吸急促，脉搏加快；当降到10%时，就可能使人因缺氧而休克。故《煤矿安全规程》（以后简称《规程》）第104条规定“在采掘工作面的进风流中，按体积计算，氧气不得低于20%，……”。一般人在静止状态下耗氧量是0.25 l/min，工作时为1~3 l/min。

人耗氧多少随劳动强度及体质强弱而异，劳动强度越大，需氧量越多。劳动强度可用呼吸系数表示，即单位时间内，机体（即人体）所耗去的氧气与所产生的CO<sub>2</sub>的体积比

$$\text{呼吸系数} = \frac{\text{所产生CO}_2\text{的体积}}{\text{所消耗O}_2\text{的体积}} \quad (1-1-1)$$

劳动强度大时，人体内所消耗的氧几乎全部变成二氧化碳吐出，所以呼吸系数变大，近似等于1。一般人的呼吸系数在0.8~1.0。矿井的呼吸系数为单位时间内，自矿井排出的二氧化碳量与矿井吸入氧气体积之比，其值随着井下化学和物理变化而异。从井下空气的化学变化而言，矿井的呼吸系数在0.3~0.8之间。物理变化大（指CO<sub>2</sub>从煤岩涌出量大）的矿井，呼吸系数可能大于1。

若采掘工作面劳动强度大的工人呼吸系数为1，则每人每分钟供风量为V按（1-1-2）式计算。

$$V = V_0 / (n_1 - n_2) \quad (1-1-2)$$

式中  $n_1$ ——大气中氧气的体积组分，20.9%；

$n_2$ ——《规程》中规定的氧气浓度的下限值，20%；

$V_0$ ——每人耗氧量，0.003m<sup>3</sup>/min；

将各参数代入(1-1-2)式,则每人每分钟需供风量为 $0.333\text{m}^3/\text{min}$ 。因人的耗氧量只占该地区全部物质总耗氧量的一小部分,为了满足该地区全部物质耗氧量的要求及必要的安全系数,故《规程》第108条规定,每人每分钟供给风量不得小于 $4\text{m}^3/\text{min}$ 。

## 2. 二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)

二氧化碳是无色略带酸臭味的气体,对空气的相对密度为1.52。常积聚于巷道的底部、井筒和下山的掘进迎头。CO<sub>2</sub>不助燃也不能供人呼吸,略有毒性,易溶于水。

二氧化碳的主要来源有:有机物的氧化;人员的呼吸;煤和岩石的缓慢氧化,以及矿井水与碳酸性岩石的分解作用;爆破工作,矿内火灾,煤炭自燃以及瓦斯、煤尘爆炸时,也能产生大量二氧化碳。此外,有的煤层或岩层能长期连续放出二氧化碳,甚至有的煤层在短时间内大量喷出或与大量煤粉同时喷出二氧化碳。发生这种现象时,往往会造成严重破坏性事故。例如吉林省营城煤矿五井,在1976年6月曾发生一次CO<sub>2</sub>和岩石突出,突出岩石1005 t, CO<sub>2</sub>11000 m<sup>3</sup>。法国也曾发生过CO<sub>2</sub>突出的事故。

二氧化碳对人的呼吸有刺激作用。当肺泡中二氧化碳增多时,能刺激人的呼吸神经中枢,引起呼吸频繁,呼吸量增加,所以在急救受有害气体伤害的患者时,常常首先让其吸入含有5%二氧化碳的氧气以加强呼吸。但空气中二氧化碳浓度过高时,又会相对地减少氧的浓度,并使人中毒或窒息。二氧化碳对人体的影响与其浓度有关。浓度为1%时,呼吸感到急促;浓度增加到5%时,呼吸感到困难,同时有耳鸣和血液流动很快的感觉;达10~20%时,呼吸将处于停顿状态和失去知觉;当浓度高达20~25%时,人将中毒死亡(见表1-1-2),为此,《规程》第104条规定:采掘工作面进风流中按体积计算CO<sub>2</sub>不得超过0.5%;总回风流中不得超过0.75%;工作面风流中CO<sub>2</sub>浓度达到1%时,须查明原因,采取措施处理。当采区或工作面回风道的风流中CO<sub>2</sub>或CH<sub>4</sub>浓度超过1%时,必须停止生产进行处理。

表 1-1-2 CO<sub>2</sub> 浓度对人体的影响

CO <sub>2</sub> 体积浓度 (%)	对人体影响
1~2	持续作用会破坏人体电解质平衡
2	作用数小时后,人会感到轻度头痛和呼吸困难
3	头痛,出汗,呼吸困难
5	精神沮丧
6	视力下降,动作颤抖
10	昏迷,失去知觉

## 3. 一氧化碳 (CO)

一氧化碳为无色、无味、无臭的气体,对空气的相对密度为0.967,微溶于水,但易溶于氨水,与酸、碱不起反应,只能被活性炭少量吸附。

矿内爆破作业、煤炭自燃及发生火灾或煤尘、瓦斯爆炸时都能产生CO。

CO是一种对血液、神经有害的毒物。CO随空气吸入体内后,通过肺泡进入血液,并与血液中的血红蛋白结合。CO与血红蛋白的结合力比氧与血红蛋白的结合力大200~300倍。一氧化碳与血红蛋白结合成碳氧血红蛋白(CO<sub>2</sub>Hb),不仅减少了血球携氧能力,而且抑制、减缓氧和血红蛋白的解析与氧的释放。CO对人的危害主要取决于空气



中CO的浓度和与人的接触时间（见表1-1-3）。

表 1-1-3 空气中 CO 浓度与人体反应的关系

空气中CO的浓度 (ppm)	接触时间 (min)	人 体 反 应
50	150	轻度头痛
100	120	中度头痛, 眩晕
250	120	严重头痛, 眩晕
500	90	恶心、呕吐、虚脱
1000	60	昏迷
10000	5	死亡

CO还可导致心肌损伤, 对中枢神经系统特别是锥体外系统也有损害; 经实验证明CO还可引起慢性中毒。故《规程》第104条规定其最高容许浓度为0.0024%。

#### 4. 硫化氢 (H<sub>2</sub>S)

硫化氢是一种无色、带有臭鸡蛋味的有毒气体, 易溶于水。

矿内的H<sub>2</sub>S主要是由硫化矿物水化和坑木等有机物腐烂所产生的。有些煤体也能释放H<sub>2</sub>S。

进入体内的H<sub>2</sub>S在肺泡内很快就被血液吸收, 氧化成无毒的硫酸, 但未被氧化的H<sub>2</sub>S则发生毒害作用。H<sub>2</sub>S也很容易溶于粘膜表面的水分中, 与钠离子结合成硫化钠, 对粘膜有强烈刺激作用, 可引起眼炎及呼吸道炎症, 甚至肺水肿。H<sub>2</sub>S对人体全身的致毒作用在于它和氧化型细胞色素酶的三价铁结合, 使酶失去活性, 影响细胞氧化, 造成人体组织缺氧。空气中H<sub>2</sub>S浓度过高(900mg/m<sup>3</sup>以上)可直接抑制呼吸中枢, 引起窒息而迅速死亡。急性中毒后遗症是头痛与智力下降, 慢性中毒症状是眼球酸痛, 有灼烧感, 肿胀畏光, 并引起气管炎和头痛。

《规程》规定矿内空气中H<sub>2</sub>S的最大容许浓度为0.00066%。

#### 5. 氮气 (N<sub>2</sub>)

氮气是无色、无味、无臭的惰性气体, 对空气的相对密度为0.97, 不助燃也不能供人呼吸。在正常情况下, 氮气对人体无害, 但有窒息性。在废弃的旧巷或隔离着的火区内, 可积存大量的氮, 使氧浓度相对地减少, 使人因缺氧而窒息。

#### 6. 二氧化氮 (NO<sub>2</sub>)

矿内空气成分中氮的氧化物主要是NO<sub>2</sub>, 对空气的相对密度为1.448, 在高温下呈红褐色, 有刺激性, 易溶于水生成HNO<sub>3</sub>。

矿内进行爆破作业在炸药爆破时产生一系列氮的氧化物, 如NO, NO<sub>2</sub>, NO在空气中又被氧化为NO<sub>2</sub>。

由于NO<sub>2</sub>易溶于水生成HNO<sub>3</sub>, 所以对眼、鼻腔、呼吸道有强烈刺激作用, 对肺组织起破坏作用, 含量0.006%时, 短时间内咳嗽, 胸部发痛; 含量0.01%时, 剧烈咳嗽、呕吐、神经系统麻木; 含量0.025%时, 短时间内即可死亡。

NO<sub>2</sub>能引起急性中毒, 中毒初期仅眼和喉有轻微刺激症状, 常不被注意, 经过4~6小时或更长的潜伏期后, 出现肺水肿, 轻者有支气管炎, 重者会导致死亡。

《规程》规定矿内空气中NO<sub>2</sub>最大容许浓度为0.00025%。

### 7. 二氧化硫 (SO<sub>2</sub>)

二氧化硫为无色气体，具有强烈的硫磺气味及酸味，对空气的相对密度为1.4337，易积聚在巷道底部。易溶于水。

矿内含硫矿物氧化、燃烧及在含硫矿物中爆破都会产生SO<sub>2</sub>。含硫矿层也涌出SO<sub>2</sub>。

SO<sub>2</sub>能被眼结膜和上呼吸道粘膜的富水粘液吸收，刺激眼粘膜和鼻咽等粘膜；在潮湿的矿内，能与空气中水分结合缓慢地形成硫酸H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，使其刺激作用更强。当空气中浓度为0.3~1ppm时，健康人可由嗅觉感知，使呼吸道轻度收缩，呼气中受阻，4~6ppm时，则对鼻咽及呼吸道粘膜有强烈刺激作用。长时间在SO<sub>2</sub>浓度为5~10ppm（或更低）的环境中呼吸，可引起慢性支气管炎，慢性鼻咽炎。呼吸道阻力增大、呼吸道炎症及肺泡本身受到SO<sub>2</sub>破坏的结果，可导致肺气肿和支气管哮喘。吸入含高浓度的SO<sub>2</sub>空气，可引起急性支气管炎，发生声门水肿和呼吸道麻痹，浓度为400~500ppm时可立即危及生命。

《规程》规定矿内空气中SO<sub>2</sub>最高容许浓度为0.0005%。

### 8. 氨气 (NH<sub>3</sub>)

氨气为无色和有剧毒的气体，对空气的相对密度为0.9，易溶于水，对人体有毒害作用，矿内最大容许浓度为0.004% (30mg/m<sup>3</sup>)，但当其浓度达到0.01%时就可嗅到其特殊臭味。氨气主要在矿内发生火灾或爆炸事故时产生。

### 9. 沼气 (CH<sub>4</sub>)

沼气是一种无色、无味、无臭的气体，对空气的相对密度为0.55，难溶于水，扩散性较空气高1.6倍。虽然无毒，但当浓度较高时，会引起窒息。不助燃，但在空气中具有一定浓度并遇到高温（650~750℃）时能引起爆炸。

### 10. 氢气 (H<sub>2</sub>)

氢气无色无味，具有爆炸性，在矿井火灾或爆炸事故中和井下充电室均会产生，其最高容许浓度为0.5%。

表 1-1-4 四种气体的爆炸极限与自燃温度

气体名称	在空气中的爆炸极限				自燃温度 (℃)
	体积浓度 (%)		质量浓度 (g/m <sup>3</sup> )		
	下限	上限	下限	上限	
甲烷CH <sub>4</sub>	5.0	15.0	33	100	595
一氧化碳CO	12.5	74.0	145	870	605
硫化氢H <sub>2</sub> S	4.3	45.5	80	650	270
氢气H <sub>2</sub>	4.0	75.6	33	64	560

### 11. 其它有害物质

矿内空气除了上述有害气体外，还含有其他一些有害物质，如在采掘生产过程中所产生的煤和岩石的细微颗粒（统称为矿尘）。矿尘对矿内空气的污染不容忽视。矿尘对矿井生产和人体都有严重危害。煤尘能引起爆炸，矿尘能引起矿工尘肺病。因此，《规

程》规定，粉尘中含游离二氧化硅在10%以上时，空气中的粉尘浓度要降低到 $2\text{ mg/m}^3$ 以下，井下空气中煤尘的浓度，不得超过 $10\text{ mg/m}^3$ 。

此外，井下小型空气压缩机产生的废气及使用柴油机的矿井柴油机排出的废气也都污染了矿内空气，这些废气的主要成分为氮的氧化物，一氧化碳，醛类和油烟等。

## 二、矿内空气成分的安全标准

采取各种技术，把矿内空气成分的浓度降到对人体没有危害的程度，是完全可以办到的，这种没有危害的浓度称容许浓度或称安全标准，它们既是矿井通风的任务之一，也是衡量矿井通风技术工作的标准之一。

根据我国制订的《工业企业设计卫生标准》，《规程》规定：在采掘工作面的进风流中，各种气体成分的安全标准（其中 $\text{O}_2$ 是最低容许浓度，其余都是最高容许浓度）和在井下工作地点及人行道的风流中浮尘的安全标准，如表1-1-5所示。

表1-1-5 各种气体安全标准

成分名称	安全标准		克分子量 (g)	附注
	体积浓度 (%)	质量浓度 ( $\text{mg/m}^3$ )		
$\text{O}_2$	$\geq 20$	$\geq 285714.3$	32	见《规程》第104条
$\text{CH}_4$	$\leq 0.5$	$\leq 3571.4$	16	见《规程》第116条
$\text{CO}_2$	$\leq 0.5$	$\leq 9821.4$	44	见《规程》第104条
CO	$\leq 0.0024$	$\leq 30$	28	同上
$\text{NO}_2$	$\leq 0.00025$	$\leq 5$	46	同上
$\text{SO}_2$	$\leq 0.0005$	$\leq 15$	64	同上
$\text{H}_2\text{S}$	$\leq 0.00066$	$\leq 10$	34	同上
$\text{NH}_3$	$\leq 0.004$	$\leq 30$	17	同上
$\text{H}_2$	$\leq 0.5$	$\leq 44.64$	2	见《规程》第135条
浮尘	含二氧化硅10%以上时 $\leq 2\text{ mg/m}^3$			见《规程》第450条
	含二氧化硅10%以下时 $\leq 10\text{ mg/m}^3$			同上

此外，在采掘工作面和采区的回风流中， $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 的体积浓度须 $\leq 1\%$ ；在矿井和一翼的总回风流中， $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 的体积浓度须 $\leq 0.75\%$ 。

矿井通风是保证矿内空气各种成分达到安全标准的基本措施，但不是唯一的措施，还要采取若干专门的措施，例如煤体注入石灰水以减少 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{SO}_2$ 、抽放 $\text{CH}_4$ 、煤体注水以减少煤尘、……等。

为了稀释矿内各种有害气体，应向矿内连续供应新鲜空气，使之达到安全浓度。 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 是矿内有害气体中的主要成分。稀释它们所需要的风量最大，故它们常常是确定矿井风量的主要根据。为此，人们按照它们的涌出量划分等级，以便分级计算风量和进行分级管理。

绝对涌出量是在一定时间内CH<sub>4</sub>或CO<sub>2</sub>涌出的体积数值 (m<sup>3</sup>/d或m<sup>3</sup>/min)。为了反映它们的涌出程度与煤产量的关系,又引用相对涌出量的概念。即在生产正常的情况下,CH<sub>4</sub>或CO<sub>2</sub>的绝对涌出量和同时间内的产量之比 (m<sup>3</sup>/t),根据《规程》第137条的规定,用相对涌出量值,划分为表1-1-6所示的矿井沼气或二氧化碳等级和按等级供给矿井风量的标准,即矿井日产一吨煤所需供给的风量 (m<sup>3</sup>/min) / (t/d)。

表1-1-6 沼气等级分类

CH <sub>4</sub> 或CO <sub>2</sub> 的相对涌出量	矿井的沼气等级	按等级供给矿井风量的标准
≤10m <sup>3</sup> /t	低沼气矿井	1~1.25(m <sup>3</sup> /min)/(t/d)
>10m <sup>3</sup> /t	高沼气矿井	≥1.5(m <sup>3</sup> /min)/(t/d),同时按矿井总回风流中的CH <sub>4</sub> 和CO <sub>2</sub> 都≤0.75%计算
	煤与沼气突出矿井	同上

## 第二节 矿内空气的物理性质及状态参数

地面大气进入矿井后,不仅成分发生了变化,且表征其特性的物理参数也发生了变化。现分述如下。

### 一、密度(ρ)

单位体积空气所具有的质量称为密度。

$$\rho = m/v$$

式中 ρ——空气的密度, kg/m<sup>3</sup>;

m——空气的质量, kg;

v——质量为m的空气所占的体积, m<sup>3</sup>。

由于矿内空气为含有水蒸汽的湿空气,故其密度用单位体积湿空气中含干空气的质量和 水蒸汽的质量总和表示。即

$$\rho = \rho_s + \rho_v, \text{ kg/m}^3 \quad (1-2-1)$$

式中 ρ——湿空气的密度, kg/m<sup>3</sup>;

ρ<sub>s</sub>——干空气的密度, kg/m<sup>3</sup>;

ρ<sub>v</sub>——水蒸汽的密度, kg/m<sup>3</sup>。

由气体状态方程可得

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{1}{v} = \frac{P}{RT} \\ \rho_s &= \frac{P_s}{R_s T} \\ \rho_v &= \frac{P_v}{R_v T} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-2)$$

式中 P、P<sub>s</sub>、P<sub>v</sub>——分别为湿空气、干空气、水蒸汽的压力, Pa;

R、R<sub>s</sub>、R<sub>v</sub>——分别为湿空气、干空气、水蒸汽的气体常数, J/kg·K;

T——热力学温度, T = 273 + t, K。

将 (1-2-2) 式代入 (1-2-1) 式

$$\rho = \frac{P_s}{R_s \cdot T} + \frac{P_v}{R_v \cdot T}$$

因  $P_s = P - P_v$ ,  $P_v = \varphi \cdot P_s$ ,  $P_s = P - \varphi P_s$ ,

式中  $P_s$ ——饱和水蒸汽压力, Pa,

$\varphi$ ——相对湿度, %;

$$\rho = \frac{P}{R_s \cdot T} - \frac{\varphi P_s}{T} \left( \frac{1}{R_s} - \frac{1}{R_v} \right)$$

由表 (1-2-1) 知  $R_s$  为  $287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $R_v$  为  $461.5 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  将其代入上式  
则

$$\rho = 0.003484 \frac{P}{T} \left( 1 - \frac{0.378 \varphi P_s}{P} \right), \text{ kg/m}^3 \quad (1-2-3)$$

表 1-2-1 几种常见气体的气体常数

物质名称	化学式	分子量	气体常数(J/kg·K)
氢	H <sub>2</sub>	2.016	4124.0
氦	He	4.003	2077.0
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.043	518.3
氨	NH <sub>3</sub>	17.031	488.2
水蒸汽	H <sub>2</sub> O	18.015	461.5
一氧化碳	CO	28.011	296.8
氮	N <sub>2</sub>	28.013	296.8
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.010	188.9
氧	O <sub>2</sub>	32.0	259.8
干空气	—	28.97	287.0

从式中可以看出, 湿空气密度是一个与温度和湿度有关的物理量。在大气压力  $P$  和绝对温度  $T$  不变时, 湿空气的密度将永远小于干空气的密度, 即湿空气比干空气轻。同时, 湿空气的密度还将随着相对湿度的增大而减小。

## 二、比容 ( $v$ )

密度的倒数称为比容, 即单位质量湿空气所具有的体积。

$$v = \frac{1}{\rho}, \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-2-4)$$

## 三、粘性

流体运动时, 其内部质点沿接触面相对运动, 产生内摩擦力以抗阻流体变形的性质, 称为流体的粘性。根据实验可知, 流体的内摩擦切应力与切应变率成正比例。其比例系数即为表征流体特点的粘性系数, 也称动力粘性系数。即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-2-5)$$

式中  $du/dy$ ——切应变率或速度梯度,  $\frac{m}{s}$ ,

$\tau$ ——流体内摩擦切应力, Pa,

$\mu$ ——动力粘性系数, Pa·s。

流体的动力粘性系数 $\mu$ 与其密度 $\rho$ 之比,称为流体的运动粘性系数 $\nu$ 即,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \text{ m}^2/\text{s} \quad (1-2-6)$$

在标准大气压力下,不同温度时,空气的动力粘性系数 $\mu$ 及运动粘性系数 $\nu$ 值如表(1-2-2)所示。

表 1-2-2 空气动力粘性及运动粘性系数

温度(°C)	-20	-10	0	10	20	40	60	80	100
$\mu(\text{Pa} \cdot \text{s}) \times 10^{-7}$	1.5592	1.6181	1.6856	1.7358	1.7946	1.9128	2.03	2.1477	2.2849
$\nu(\text{m}^2/\text{s}) \times 10^{-6}$	11.3	12.1	13.0	13.9	14.9	17.0	18.2	24.5	21.7

#### 四、压力(P)

##### 1. 大气压力

地球表面一层很厚的空气层对地面所形成的压力,称大气压力或空气压力。在地球引力(重力)场中的大气层空气由于重力影响,空气的密度与压力均随着离地表高度的增加而减小。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。空气的密度和压力都是与空气分子数成正比变化的,它们随高度的变化规律可用物理学中的波兹曼公式表示,即

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{\mu gz}{R_0 T}\right) \quad (1-2-7)$$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu gz}{R_0 T}\right) \quad (1-2-8)$$

式中  $\rho$ 、 $P$ ——分别为标高 $z$ (m)处,单位体积空气的密度、大气压力,

$\rho_0$ 、 $P_0$ ——分别为海平面( $z=0$ )处,单位体积空气的密度、大气压力,

$\mu$ ——空气的摩尔质量(即空气的分子量), 28.97 kg/kmol,

$T$ ——空气温度, K,

$R_0$ ——摩尔气体恒量(普氏气体常数), 8314 J/kmol·K,

$g$ ——重力加速度,取9.8 m/s<sup>2</sup>。

将各数值代入上式,

$$\text{则} \quad \rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{29.28T}\right) \quad (1-2-9)$$

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{z}{29.28T}\right) \quad (1-2-10)$$

##### 2. 湿空气压力

由于矿内空气为湿空气,按照道尔顿定律,湿空气压力 $P$ 应为干空气的分压力 $P_d$ 与水蒸汽分压力 $P_v$ 之和。即

$$P = P_d + P_v, \text{ Pa} \quad (1-2-11)$$

式中  $P$ ——湿空气压力，即大气压力，Pa，  
 $P_d$ ——干空气分压力，Pa，  
 $P_v$ ——水蒸汽分压力，Pa。

从气体分子运动观点分析，气体分子愈多，则撞击容器壁面的机会愈多，从而所呈现的压力也就愈大。因此，水蒸汽分压力的大小，反映了水蒸汽含量的多少。

## 五、湿度

### 1. 绝对湿度 ( $\rho_v$ )

单位体积湿空气中，所含水蒸汽的质量称为绝对湿度 ( $\rho_v$ )。

因为湿空气中水蒸汽可视为理想气体，故有

$$P_v V = \frac{m_v}{M_v} R_0 T$$

$$\frac{m_v}{V} = \frac{P_v}{\frac{R_0}{M_v} T}$$

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T} \quad (1-2-12)$$

式中  $P_v$ ——湿空气中的水蒸汽分压力，Pa，  
 $V$ ——湿空气中的水蒸汽体积， $\text{m}^3$ ，  
 $m_v$ ——湿空气中的水蒸汽质量，kg，  
 $M_v$ ——湿空气中的水蒸汽分子量，  
 $R_0$ ——普氏气体常数，  
 $T$ ——湿空气的温度，K，  
 $R_v$ ——水蒸汽的气体常数。

式 (1-2-12) 表明，绝对湿度随湿度变化而变化。

饱和湿空气的绝对湿度称为饱和绝对湿度 ( $\rho_s$ )。

### 2. 相对湿度 ( $\varphi$ )

空气中水蒸汽的实际含量和同温度下最大可能含水蒸汽量的比值即相对湿度。相对湿度用未饱和湿空气的绝对湿度 ( $\rho_v$ ) 与同温度下饱和湿空气的绝对湿度 ( $\rho_s$ ) 之比表达。即

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} \times 100\% \quad (1-2-13)$$

相对湿度反映了湿空气中水蒸汽含量接近饱和的程度，故也称饱和度。 $\varphi$  值越小，湿空气吸收水蒸汽的能力越强； $\varphi$  值越大，湿空气吸收水蒸汽的能力越弱。

上面已导出：

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T},$$

同理

$$\rho_s = \frac{P_s}{R_v T},$$

故

$$\varphi = \frac{P_v}{P_s} \times 100\% \quad (1-2-14)$$

式中湿空气中水蒸气的饱和分压力 $P_s$ ，可根据湿空气的温度，由低温下的饱和水蒸汽表（附录1中附表1-8）查到。水蒸汽的分压力 $P_v$ ，可根据湿度计或露点仪所测得的露点温度查得。

### 3. 含湿量( $d$ )

因为湿空气中干空气的质量不随空气的状态变化而变化，故采用1 kg质量的干空气作为计算基础。在含有1 kg干空气的湿空气中，其所挟带的水蒸汽质量，称为湿空气的含湿量( $d$ )。即

$$d = \frac{m_v}{m_a} \times 1000 \text{ g水蒸汽/kg干空气} \quad (1-2-15)$$

式中  $m_v$ ——水蒸汽质量，kg，

$m_a$ ——干空气质量，kg。

根据含湿量的定义以及工程热力学理论的推导\*，可以得出其与相对湿度( $\varphi$ )的关系为：

$$d = 0.622 \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s}, \text{ kg/kg干空气} \quad (1-2-16)$$

式中  $P_s$ ——饱和水蒸汽压力，Pa，其它符号同前。

从(1-2-16)式可以看出当大气压力 $P$ 为定值时，空气中水蒸汽的含量只取决于空气中水蒸汽的分压力 $P_v$ 的大小，即 $d = f(P_v)$ 。因此，含湿量是随水蒸汽分压力的大小而增减的，则含湿量( $d$ )与水蒸汽分压力( $P_v$ )在本质上是同一参量。

### 4. 矿内空气湿度的变化规律

冷天时，当含有一定量水蒸汽的冷空气进入井下，由于气温逐渐升高，容积逐渐增大，其饱和能力逐渐变大，沿途要吸收井巷中的水份，热天时，热空气进入井下，气温逐渐降低，容积逐渐减少，其饱和能力逐渐变小，使其中一部分水蒸汽量沿途掉下来。故矿井进风路线上有冬干夏湿的现象，在采掘工作面和回风路线上，因气温几乎常年不变，故其湿度也几乎常年不变，而且其相对湿度接近100%。

### 六、焓( $i$ )

一定状态下的湿空气的内能与流动功之和称焓。含1 kg干空气的湿空气的焓称为比焓。

在空调过程中，湿空气的状态经常发生改变，常需要确定此状态变化过程内热量的交换量。例如对空气进行加热或冷却时，常需要确定空气所吸收或放出的热量。从热工基础可知，在压力不变的情况下，焓差值等于热交换量，而在空调过程中，湿空气的状态变化过程可以看成是在定压下进行的，所以，可用湿空气状态变化前后的焓差值计算空气得到或失去的热量。

1 kg干空气的焓和 $d$ kg水蒸汽的焓两者的总和，称为 $(1+d)$ kg湿空气的焓。如果取 $0^\circ\text{C}$ 的干空气和 $0^\circ\text{C}$ 的水的焓值为零，则湿空气的焓表示如下：

$$i = i_a + d \cdot i_v \quad \text{kJ/kg干空气} \quad (1-2-17)$$

式中  $i$ ——对应于1 kg干空气的湿空气之焓，kJ/kg干空气，

\* 推导参见《工热力学》教科书。



$i_d, i_v$ ——分别为 1 kg 干空气和 1 kg 水蒸汽的焓, kJ/kg 干空气。

而

$$i_d = C_{p,d} \cdot t \quad (1-2-18)$$

$$i_v = 2501 + C_{p,v} \cdot t \quad (1-2-19)$$

式中  $C_{p,d}$ ——干空气的定压比热, 在常温下  $C_{p,d} = 1.01$ , kJ/kg·°C;

$C_{p,v}$ ——水蒸汽的定压比热, 在常温下  $C_{p,v} = 1.85$  kJ/kg·°C;

$t$ ——空气温度, °C;

2501——0 °C 时水的汽化潜热, kJ/kg。

将比热值代入, 得湿空气焓计算式:

$$i = 1.01t + d(2501 + 1.85t), \text{ kJ/kg 干空气} \quad (1-2-20)$$

或

$$i = (1.01 + 1.85d)t + 2501d, \text{ kJ/kg 干空气} \quad (1-2-21)$$

由式 (1-2-21) 可看出,  $[(1.01 + 1.85d)t]$  是随温度而变化的热量, 称之为“显热”。而  $(2501d)$  是 0 °C 时  $d$  kg 水的汽化热, 它仅随含湿量变化, 而与温度无关, 故称为“潜热”。由此可见, 湿空气的焓将随着温度和含湿量的升高而加大, 随其降低而减小。在使用焓这个参数时必须注意, 2501 较 1.85 和 1.01 大得多, 因此在空气温度升高的同时, 若含湿量有所下降, 结果湿空气的焓不一定会增加。

在湿空气的主要状态参数之间, 存在着一定的关系, 其中, 对应于一个温度  $t$  值, 就有一个饱和压力  $P_s$  值。当大气压力为一定值时,  $t$ 、 $d$ 、 $i$ 、 $\varphi$  四个参数中, 只要知任意两个参量, 即可计算出其余参数。

【例】已知大气压力  $B = 101325$  Pa, 相对湿度  $\varphi = 80\%$ , 温度  $t = 30$  °C, 求湿空气的  $d$ 、 $P_v$ 、 $\rho$  和  $i$ 。

解 根据  $t = 30$  °C, 查附表 1-8, 得  $P_s = 4241.7$  Pa, 于是  $P_v = \varphi P_s = 0.8 \times 4241.7 = 3393.36$  Pa

$$d = 0.622 \frac{P_v}{B - P_v} = 0.622 \times \frac{3393.36}{101325 - 3393.36} = 0.2155 \text{ kg/kg 干空气}$$

湿空气的绝对湿度为

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T} = \frac{3393.6}{461 \times (273 + 30)} = 0.0243 \text{ kg/m}^3$$

湿空气的密度为

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{0.0034843}{273 + 30} (101325 - 0.378 \times 0.8 \times 3393.36) \\ &= 1.153 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

湿空气的焓为

$$\begin{aligned} i &= 1.01t + d(2501 + 1.85t) \\ &= 1.01 \times 30 + 0.2155(2501 + 1.85 \times 30) \\ &= 581.23 \text{ kJ/kg 干空气} \end{aligned}$$

### 第三节 湿空气的焓湿图

上节中介绍了湿空气的各特性参数及有关的计算公式。若将这些参数间的关系制成