

高等学校教学用书

矿井通风

黄元平 主编

中国矿业学院出版社

内 容 提 要

本书是根据煤炭高校采矿工程专业的培养目标编写的,比较系统地论述了矿井通风和空气调节的基本理论,及其技术管理、测试方法和设计等内容,是煤炭高校采矿工程专业的数学用书,也可供采矿工程技术人员参考。

高等学校教学用书

矿 井 通 风

黄 元 平 等 编

*

中国矿业学院出版社 出版
社 部:江苏省徐州市中国矿业学院内
编辑部:北京市学院路13号
中国矿业学院印刷厂 印刷

*

开本787×1092毫米 1/16 印张17
字数402千字 印数1-15000
1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷
统一书号15443·013 定价2.85元



目 录

绪论	(1)
第一章 井下空气的成分、性质和变化规律	(3)
第一节 井下空气的成分	(3)
第二节 井下空气的物理参量	(8)
第三节 井下空气的基本定律	(18)
第四节 湿空气密度、重率、含湿量、焓的测算	(21)
第五节 井下空气的热力变化过程	(25)
第二章 矿井风流的能量及其变化规律	(28)
第一节 矿井风流运动的特征	(28)
第二节 能量方程	(28)
第三节 矿井风流的能量方程	(32)
第四节 风流任一断面上的机械能量	(35)
第五节 能量方程的应用	(43)
第三章 矿井通风阻力	(47)
第一节 风流的流动状态	(47)
第二节 摩擦阻力	(48)
第三节 局部阻力	(57)
第四节 通风阻力定律和特性	(60)
第五节 通风阻力测量	(64)
第六节 流体的相似理论与应用	(73)
第四章 矿井通风动力	(79)
第一节 自然通风	(79)
第二节 矿井扇风机的构造和附属装置	(82)
第三节 扇风机的理论参数	(87)
第四节 扇风机的理论特性	(90)
第五节 扇风机的实际参数	(91)
第六节 扇风机的实际特性	(94)
第七节 影响扇风机实际特性的因素	(98)
第八节 扇风机的类型特性	(99)
第九节 国产扇风机的特征和特性简介	(102)
第十节 扇风机个体特性曲线	(127)
第十一节 扇风机的联合运转	(133)
第五章 风网中风流基本规律和风量自然分配	(137)
第一节 风网的基本术语和形式	(137)
第二节 风网中风流的普遍规律	(139)
第三节 简单风网中风流的特殊规律	(142)

第四节	复杂风网中风流的稳定性·····	(144)
第五节	复杂风网中自然分配风量的计算·····	(147)
第六章	采区通风·····	(169)
第一节	采区通风系统·····	(169)
第二节	采区所需的风量·····	(175)
第三节	采区的通风构筑物·····	(179)
第四节	减少漏风、保证采区供风·····	(185)
第七章	掘进通风·····	(189)
第一节	掘进通风方法·····	(189)
第二节	掘进工作面所需风量的计算·····	(194)
第三节	掘进通风设备的选择·····	(195)
第四节	掘进通风的技术管理和安全措施·····	(200)
第八章	矿井风量按需调节·····	(206)
第一节	局部风量调节·····	(206)
第二节	矿井总风量调节·····	(216)
第三节	多台主扇联合运转的相互调节·····	(218)
第九章	矿井通风设计·····	(223)
第一节	拟定矿井通风系统·····	(223)
第二节	矿井总风量的计算和分配·····	(229)
第三节	计算井巷通风总阻力·····	(234)
第四节	选择矿井通风设备·····	(236)
第五节	概算矿井通风费用·····	(238)
第六节	生产矿井的通风设计简述·····	(239)
第十章	矿井空气的降温与加热·····	(240)
第一节	人体热与环境热的关系·····	(240)
第二节	影响井下气温的因素·····	(244)
第三节	矿井降温措施·····	(252)
第四节	矿井空气调节系统·····	(253)
第五节	矿井空调设备的构造原理·····	(258)
第六节	矿井空气的加热·····	(262)

绪 论

依靠通风动力,将定量的新鲜空气,沿着既定的通风路线不断地输入井下,以满足回采工作面、掘进工作面、机电峒室、火药库、以及其它用风地点的需要;同时将用过的污浊空气不断地排出地面。这种对矿井不断输入新鲜空气和排出污浊空气的作业过程叫做矿井通风。它的基本任务是:供给矿井新鲜风量,以冲淡并排出井下的毒性、窒息性和爆炸性气体和粉尘,保证井下风流的质量(成分、温度和速度)和数量符合国家安全卫生标准,创造良好的工作环境,防止各种伤害和爆炸事故,保障井下人员身体健康和生命安全,保护国家资源和财产。矿井通风是矿井各生产环节中最基本的一环,它在矿井建设和生产期间始终占有非常重要的地位。

矿井通风经历过较长的发展过程。约在1640年,人们开始把进风和回风路线分开,以利用自然通风压力进行矿井通风。为了加大通风压力,1650年在回风路线上设置火筐,1787年又在回风路线上设置火炉,使回风风流加热。1807年风量约 $200\text{m}^3/\text{min}$ 的兽力活塞式空气泵、1849年转速约 $95\text{r}/\text{min}$ 风量约 $500\text{m}^3/\text{min}$ 的蒸气铁质离心式扇风机、1898年电力初型轴流式扇风机相继投入使用。本世纪40年代以来,矿井已使用功率约 1500kW 和 3000kW 的电力轴流式和离心式大型扇风机。

1672年人们只知道身穿潮湿衣帽,伏在底板上,手举一端装有燃着蜡烛的木棍,来点燃局部积存的沼气。由于危险,后来改用背上装有燃着的蜡烛的骡马去点燃沼气。1813年开始用安全油灯照明并检查沼气和二氧化碳的浓度。本世纪40年代以来各种气体的检测技术有了较大的发展。特别是60年代以来,风流中各参数(沼气和一氧化碳的浓度、风速、压力、温度等)已经实现了遥测和通讯。

1745年,俄国科学家M.B. ЛОМОХОБ发表了空气在矿井流动的理论;1764年法国采矿工程师JARS发表了关于矿井自然通风的理论,成为矿井通风学科史上奠基的两篇论文。本世纪以来,发表和出版了许多关于矿井通风的论文和专著。现在矿井通风已成为内容丰富的一门学科。

我国解放初期采矿院校就把矿井通风列为一门专业课程进行讲授。1952年组建了矿井通风与安全教研室。近年来,有的院校已成立矿井通风与安全专业。

我国是社会主义制度的国家,劳动人民是国家的主人和物质财富的创造者,保护劳动者在生产中的健康和安全,是社会主义的经济规律和我国的基本政策所决定的。根据我国宪法关于改善劳动条件、加强劳动保护的规定,国务院颁布了《矿山安全条例》,明确要求采掘工业必须安全生产,坚持安全第一的方针,要求各级领导干部在管理生产的同时,必须负责管理安全工作。早在五十年代,我国就颁布执行了《煤矿和油母页岩矿保安规程》,六十至七十年代又先后颁布执行了《煤矿保安暂行规程》和《煤矿安全生产试行规程》。在此基础上,八十年代煤炭工业部又颁布了《煤矿安全规程》。它是煤矿安全生产的法规,是保障煤矿职工健康和安全、保护国家的资源和财产、促进煤炭工业现代化建设必须遵循的准则。煤炭工业部和各国营煤矿企、事业单位及其主管部门,都必须严格执行这个规程。此外,我国还颁布了《矿山安全监察条例》,设置矿山安全监察机构,实行矿山安全监察制度。

矿井通风是矿业安全工程学科中的一个基本分支,也是地下开采专业的主要专业课程

之一,根据这个专业的要求,矿井通风课程的基本内容是:井下空气的成分、性质、变化规律和安全标准;井下空气的物理参量、变化规律和安全标准;矿井风流的能量变化规律与测算;矿井通风阻力的类型、变化规律与测算;矿井通风动力的类型、基本规律、测算与选择;矿井通风网络中风量分配的基本原则与计算方法;矿井风流控制设施的类型、要求与选择;采区、掘进区通风系统的类型与设计;全矿井通风系统的类型与设计;井下风流的降温、加热方式的选择等。

按照上述基本内容,本书共编写了十章,约需用50学时。各院校在教学工作中,可视具体情况加以增、删。

本书由黄元平(绪论、第一、九章)、赵以蕙(第三、四章)、张素芬(第二、六、七章)、张蕙忱(第五、八章)和王新泉(第十章)编写,并由黄元平审阅定稿。1984年初稿完稿后,曾在中国矿业学院试用。1985年元月煤炭部教育司教材编委会在京召开审稿会议,得到王家廉、余申翰、谢世宁、管传新、王冶、谷明春、唐海清、王隆平等专家学者及与会同志的许多宝贵的修改意见,在此谨表示衷心的感谢。

由于审阅定稿工作的能力所限,本教材内容中有不妥和错误之处,请随时给予指正。

第一章 井下空气的成分、性质和变化规律

本章主要讨论井下空气的物质变化和状态变化，以进一步明确矿井通风与井下气候调节的目的、意义和要求。同时结合井下空气的特点预习先修课程中有关的基本概念和内容，以利后面各章的学习。

第一节 井下空气的成分

井下空气的主要来源是地面空气，但地面空气进入井下以后，会发生物理和化学两种变化，因而井下空气的质量和数量都和地面空气有较大的区别。

一、地面空气成分的种类和数量

地面空气是干空气和水蒸气组成的混合气体。在正常情况下，干空气由表1—1所列的几种成分组成[1]，而且这些成分的数量基本不变。干空气成分的数量用体积浓度或质量浓度来表示，前者为某种气体的体积在干空气的总体积中所占的百分数；后者为某种气体的质量在干空气的总质量中所占的百分比。在混合气体中，水蒸气的浓度随地区和季节而变化，其平均的体积浓度约为1%；此外还含有尘埃和烟雾等杂质，有时能污染局部地区的地面空气。

表1-1

气 体 名 称	体 积 浓 度	质 量 浓 度
氮 (N_2)	78.13%	75.55%
氧 (O_2)	20.90%	23.10%
二 氧 化 碳 (CO_2)	0.03%	0.05%
氢 (A_r)	0.93%	1.27%
其 它 稀 有 气 体	0.01%	0.01%

新鲜空气无色、无味和无臭，是维持生命所必需的，并能助燃。

二、井下空气成分的种类与生成

上面提到，地面空气进入井下后，因发生物理和化学两种变化，使其成分种类增多，各种成分的浓度改变。

1. 物理变化

井下的物理变化有：

气体混入——沼气 (CH_4)、二氧化碳和硫化氢 (H_2S) 等气体从地层中涌出到井下空气中。多数矿井有沼气涌出。沼气涌出量的大小各矿不同，有些矿井，沼气涌出量高达 $40\sim 50\text{ m}^3/\text{min}$ ；有些矿井还伴随沼气涌出氮 (N_2)、二氧化硫 (SO_2) 和氢 (H_2) 等气体。

固体混入——井下各种作业所产生的微小的岩尘、煤尘和其他杂尘浮游在井下空气之中。

气象变化——主要是由于井下空气的温度、气压和湿度的变化引起井下空气的体积和浓度变化。

以上物理变化的结果, 不仅使井下空气的成分种类增多, 而且各种成分的浓度亦发生变化。

2. 化学变化

井下的化学变化有:

井下一切物质(煤、岩石、坑木、……等)的缓慢氧化、爆破工作、火区氧化(指采空区的煤炭被空气氧化而逐渐起火的自燃现象和人员的呼吸等都会产生二氧化碳(CO_2); 井下的爆破工作、火区氧化和机械润滑油高温分解等都能产生一氧化碳(CO); 井下火区氧化和含硫煤的水解都能产生硫化氢; 井下火区氧化和含硫煤的缓慢氧化都产生二氧化硫; 井下爆破工作能产生氧化氮(NO_2 及 N_2O_5); 井下充电硐室的电解能产生氢; 井下火区氧化能产生氨(NH_3)。

以上化学变化的结果, 不仅使井下空气的成分种类和浓度发生变化, 而且各种化学变化都要消耗空气中的氧而产生二氧化碳, 使井下空气中的氧量减少, 二氧化碳量增加。

就煤矿而言, 井下空气的成分种类共有 O_2 、 CH_4 、 CO_2 、 CO 、 H_2S 、 SO_2 、 N_2 、 NO_2 (或 N_2O_5)、 H_2 、 NH_3 、水蒸气和浮尘十二种。井下空气也是湿空气。由于各矿的具体条件不同, 各矿的井下空气成分种类和浓度都不相同。

在上述成分中, 氧是井下人员呼吸所必需的, 必须保持足够的浓度, 其余九种(水蒸气除外)气体和浮尘, 超过一定浓度时, 对人体都是有害的, 必须把它们的浓度降低到没有危害的程度。在这九种气体中 CO 、 H_2S 、 SO_2 和 NO_2 (或 N_2O_5) 超过一定浓度时, 还能使人体中毒。故称这九种气体为有害有毒气体, 又称为广义的矿井瓦斯, 而狭义的矿井瓦斯则专指 CH_4 。 CH_4 是煤矿井下普遍存在的气体, 在一定浓度范围内, 具有爆炸性。所以, CH_4 是煤矿井下最危险的气体。煤矿井下经常出现且数量较多的气体是 CH_4 和 CO_2 , 它们是计算矿井所需风量的主要根据。

三、井下空气成分的基本性质

1. 氧

氧是无色、无臭、无味、无毒和无害的气体, 比重为1.105, 是人呼吸所必须的物质。故须供给井下足够的风量, 以保证井下空气中有足够的氧量。因为氧是很活跃的元素, 易使其它物质氧化, 并能助燃, 产生 CO_2 和 CO , 故应阻止空气进入采空区和火区, 以防止氧对煤炭氧化而自燃。

氧对人体的影响: 若空气中氧的体积浓度降低到15%, 就会使人呼吸急促、脉搏加快、灯焰熄灭; 降到10%, 就可能使人休克。人们吸入空气中的氧, 供体内食物氧化, 产生新细胞, 以维持生命, 并全部或部分变成 CO_2 而呼出。通常, 人在休息时的耗氧量, 至少为0.25 L/min; 在工作时为1~3 L/min。人的耗氧量大小随劳动强度及体质强弱而异。人的劳动强度可用呼吸系数表示, 即:

$$\text{呼吸系数} = \frac{\text{吐出的}\text{CO}_2\text{量}}{\text{消耗的}\text{O}_2\text{量}}$$

劳动强度大时, 人体内的耗氧量几乎全变成二氧化碳吐出, 这时的呼吸系数等于1。通常, 呼吸系数在0.8~1.0之间[2]。对于矿井, 该系数随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_2 从煤岩涌出量大)的矿井, 其呼吸系数可以大于1。

例如,采掘工作面劳动强度大的工人,每人的耗氧量可按 3 L/min 计算。此数相当于新鲜风量 A 为

20.9%——氧的体积浓度

$$\text{式中} \quad A = \frac{3}{20.9\%} = 14.35 \text{ L/min}$$

取呼吸系数为 1,即吸入体内的氧量几乎全部变成二氧化碳吐出。如果吸入空气中的氮量也全部吐出,则每人在耗氧 3 L/min 的情况下,吐出的废气($\text{CO}_2 + \text{N}_2$)量亦为 14.35 L/min 。若只供给该地区每人 14.35 L/min 的新鲜风量,则每人呼吸 1 分钟以后,该地区空气中氧浓度将等于零,这是不允许的。故还要按满足该地区氧浓度不小于 20% 的要求, [见我国《煤矿安全规程》(以下简称《规程》)有关规定] 进行计算,即应使该地区的风量变成混合气体,其中有未用完的新鲜风量,也有吐出的废气量,要求这个混合气体中氧浓度不小于 20%。设 B 是混合气体中废气量所占的百分数,则 $(1-B)$ 就等于在单位体积的混合气体中,新鲜空气所占的百分数,故有以下关系。

$$\frac{20.9}{100}(1-B) = 20\%$$

解上式得 $B \approx 4.31\%$ 。

当废气量为 14.35 L/min 时,对该地区每人每分钟所需供给的风量 C ,应为

$$C = 14.35 \times 100 / 4.31 = 333 \text{ L/min} = 0.333 \text{ m}^3/\text{min}$$

因人的耗氧量只占该地区全部物质的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,还须计算满足此要求的以人数为计算单位的风量 D (即为供给每人的风量)。设人耗氧量占该地区总耗氧量的 8.3%,则得

$$D = 100 \times 0.333 / 8.3 \approx 4 \text{ m}^3/\text{min}。$$

以上近似计算表明:以人数为计算单位的风量,是和人耗氧量占全部物质总耗氧量的百分数有关。但不是所有工作地点都是 8.3%,机械化程度越高,产量越大,人越少,这个百分数就越小, D 值就越大;反之, D 值就越小。

若该地区同时工作的最多为 50 人。则为了满足该地区总耗氧量、且空气中氧浓度不小于 20% 的要求,应供给该地区的风量为 $50 \times 4 = 200 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

2. 各种有毒有害气体

有毒有害气体的性质可分为以下几方面:

臭、味和色方面——有臭的气体有四种,即 NH_3 (剧臭), SO_2 (强烈硫磺臭), H_2S (坏鸡蛋臭,浓度为 0.0001% 时,便可嗅出来), CO_3 (微酸臭),有味的气体有三种,即 SO_2 (酸味) H_2S (微甜), CO_2 (微酸);有色气体只有一种,即 NO_2 (浅红褐色)。可根据这以上性质察觉这些气体的存在。

比重方面——空气的比重为 1,比空气重的气体有四种,即 SO_2 (比重为 2.264), NO_2 (为 1.57), CO_2 (为 1.529), H_2S (为 1.19);比空气轻的气体有五种,即 H_2 (为 0.069), CH_4 (为 0.555), NH_3 (为 0.596), CO (为 0.967), N_2 (为 0.967)。

观测气体浓度时须注意气体的比重，即须靠近底板观测比空气重的气体，靠近顶板观测比空气轻的气体。

溶性方面——能溶于水的气体有五种，按溶性大小依次为 SO_2 （最易溶于水，它的溶性相当 CO_2 溶性的46.5倍）， H_2S （也比 CO_2 溶性大）， CO_2 （体积浓度是20%、温度和压力分别是 15°C 和 101325Pa 时，1升水能溶解 203.5cm^3 的 CO_2 ）， NO_2 和 NH_3 （都比 CO_2 的溶性小）。根据这种性质，采用喷雾洒水的措施，可以降低这些气体的空气中的浓度。

爆炸性——气体爆炸的体积浓度范围叫做气体的爆炸界限，能够燃烧且能爆炸的气体有四种，即 CH_4 （其爆炸界限为5%~16%，爆炸之前必先燃烧，需要积累一定的热量才能爆炸， CH_4 浓度小于5%时，因空气中的 CH_4 少而 O_2 多。虽能燃烧，但热量不够，不足以引起爆炸； CH_4 浓度大于16%时，因 CH_4 多而 O_2 少，氧化所生的热量既不足以引起爆炸，也不足以引起燃烧，但在高浓度的 CH_4 和新鲜空气的接触面上，点火便可燃烧； CH_4 的浓度约为9.5%时，因 CH_4 和 O_2 都不多不少，能起完全的化学反应，产生的热量最多，爆炸威力最猛。 CH_4 虽能燃烧，但不助燃，浓度 $< 3\%$ 时，燃烧呈浅兰色的火焰。观测这种浅兰色火焰的高低，是安全油灯粗略检查 CH_4 浓度的根据）， H_2S （爆炸界限约为4~46%）， CO （爆炸界限约为13~75%）， H_2 （爆炸界限约为4~74%）。

有毒有害空气对人体的影响：

对人体有毒的气体有五种。其中 NO_2 是最毒的气体，它能强烈地刺激眼睛和呼吸系统（鼻、喉、肺），能和呼吸道上的水分化合而成硝酸（ HNO_3 ），可使肺浮肿致命。且初期不易发觉，有时数小时后才有毒征兆。 SO_2 能较强地刺激眼睛和呼吸系统，使眼睛红肿，俗称害眼气体，此外，这种气体能和呼吸道上的水分化合而成硫酸。使肺浮肿致命。 H_2S 能刺激眼睛和呼吸系统，且能使人体血液中毒致命。 CO 能驱逐人体血液中的 O_2 ，使血液缺氧致命。这是因为 CO 比 O_2 对血色素的亲合力约大250~300倍。一般的煤气中毒就是 CO 中毒。 NH_3 能刺激眼睛、皮肤和呼吸系统。

CH_4 、 CO_2 、 H_2 和 N_2 等四种气体，虽然无毒性，但当它们的浓度较大，使氧的浓度降到12%以下时，便能使人窒息而死。

3. 浮尘

浮尘的危害性表现在空气中岩尘或煤尘的浓度超过一定的限量时，人们呼吸了这种含尘空气，经过一段时间，就会得尘肺病。此外，有些煤尘还有爆炸性，其爆炸界限约为30~200 g/m^3 （这种质量浓度是用单位容积空气中所含浮尘或某种气体的质量来表示）。

四、井下空气成分的安全标准

采取各种技术措施，把井下空气成分的浓度降低到对人体没有危害的程度，是矿井通风的任务之一，也是衡量矿井通风工作的一项标准。这种没有危害的浓度叫做允许浓度或名安全标准。

根据我国制定的《工业企业设计卫生标准》，煤矿《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 O_2 是最低允许浓度，其余都是最高允许浓度）和井下工作地点及人行道的风流中浮尘的安全标准。如表1-2所示[3]。

此外，在采掘工作面和采区的风流中， CH_4 和 CO_2 的体积浓度须 $\leq 1\%$ ；在矿井和一翼的总回风流中， CH_4 和 CO_2 的体积浓度须 $\leq 0.75\%$ 。表1-2中体积浓度和质量浓度的

表1-2

成分名称	安全标准		克分子质量 (g)
	体积浓度(%)	质量浓度 (mg/m ³)	
O ₂	≥20	≥285714.3	32.00
CH ₄	≤0.5	≤3578.4	16.03
CO ₂	≤0.5	≤9821.4	44.00
CO	≤0.0024	≤30	28.00
NO ₂	≤0.00025	≤5	46.00
SO ₂	≤0.0005	≤14.3	64.07
H ₂ S	≤0.00066	≤10	34.09
NH ₃	≤0.004	≤30.4	17.03
H ₂	≤0.5	≤448.66	2.01
浮 尘	含二氧化硅10%以上时 ≤ 2 mg/m ³		
	含二氧化硅10%以下时 ≤ 10 mg/m ³		

换算原则是：任何气体的克分子量就是该气体在标准状况下22.4L的质量。例如CO₂的克分子量是44g，1m³ = 1000L，1g = 1000mg，故相当于体积浓度0.5%的CO₂的质量浓度是

$$\frac{44 \times 1000}{22.4/1000} \times 0.5\% = 9821.4 \text{ mg/m}^3$$

矿井通风是保证井下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，还要采取其它专门的措施，例如煤体注入石灰水以减少H₂S和SO₂、抽放CH₄、煤体注水以减少煤尘等（详见煤矿安全教材）。

井下空气中各种成分的检测仪表和方法，亦在煤矿安全教材中论述。

五、井下空气主要成分对风量的要求

前已谈到，井下空气中CH₄和CO₂是两种主要成分，为了冲淡到安全浓度，这两种气体对风量的需要量最大。故这两种气体常常是确定矿井风量主要依据。为此，人们按照这两种气体的涌出量划分等级，以便分级计算风量和分级进行管理。

1. 划分等级的依据

绝对涌出量是在一定时间内CH₄或CO₂涌出的容积量（m³/d或m³/min）。事实上，CH₄或CO₂的涌出程度和煤炭产量有关，绝对涌出量没有反映出这种关系。例如，CH₄或CO₂绝对涌出量相同但产量不同的两个矿井，其中产量小的矿井，CH₄或CO₂绝对涌出量相同但产量不同的两个矿井，其中产量小的矿井，CH₄或CO₂的涌出程度就较为严重。但用绝对涌出量就不能判定哪个矿井的CH₄或CO₂涌出程度严重。故需引出相对涌出量的概念，指在生产正常的情况下，CH₄或CO₂的绝对涌出量和相应时间内的产量之比，度量单位是(m³/d)/(t/d) = m³/t。其物理意义是吨煤的CH₄或CO₂涌出量，CH₄或CO₂相对涌出量大的矿井，CH₄或CO₂的涌出程度必然严重。

2. 等级的划分与要求

根据实测出矿井CH₄或CO₂的绝对涌出量和相应时间内的煤产量,计算出CH₄或CO₂的相对涌出量,按《规程》的有关规定,划分成表1-3所示的矿井沼气等级和按等级供给矿井风量的标准,这个供风标准就是矿井日产一吨煤所需供给的风量,其度量单位是(m³/min)/(t/d)。煤与沼气突出和岩石与二氧化碳突出是两种特殊的动力现象,即在较短时间内大量煤炭或岩石伴随着沼气或二氧化碳突然喷出的自然现象。

表1-3

CH ₄ 或 CO ₂ 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
$\leq 10 \text{ m}^3/\text{t}$	低 沼 气 矿 井	$1 \sim 1.25 (\text{m}^3/\text{min})/(\text{t/d})$
$> 10 \text{ m}^3/\text{t}$	高 沼 气 矿 井	$\geq 1.5 (\text{m}^3/\text{min})/(\text{t/d})$, 同时按矿井总回风流中的CH ₄ 和CO ₂ 都 $\leq 0.75\%$ 计算。
	煤与沼气(或岩石与二氧化碳)突出矿井	同 上

3. 分级的作用

矿井按沼气分级,不仅为计算矿井所需风量,而且为了采取不同的安全生产措施(详见煤矿安全教材)。矿井按二氧化碳分级的作用,则只是为了计算矿井所需风量。若某矿的CO₂等级大于CH₄等级,则按CO₂等级的供风标准计算矿井所需风量,而按CH₄等级制定安全生产措施。例如某矿井的产煤量为3000t/d,CH₄和CO₂的相对涌出量分别为9和12 m³/t。按表1-3的规定,该矿属于低沼气矿井,按此等级制定安全生产的措施,而该矿所需风量则须按CO₂等级的供风标准计算,即

$$Q = 3000 \times 1.5 = 4500 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{或 } Q = 4500 \text{ m}^3/\text{min} \times 24 \text{ h/d} \times 60 \text{ min/h} = 6480000 \text{ m}^3/\text{d}$$

若每立方米空气的质量为1.2 kg/m³,则矿井所需风量的总质量为

$$6480000 \times 1.2 = 7776000 \text{ kg/d} = 7776 \text{ t/d}$$

这个数值约为日产煤量的2.6倍,这表明矿井每日所需风量的质量比日产煤量还要大,有时大好几倍。

第二节 井下空气的物理参量

气体的分子具有体积和相互吸引力,但在分析气体的一般问题时,这两个因素的影响很小。为了便于分析和计算,一般可把多种气体看成是没有这两个因素的理想气体,因此,井下空气也可视为理想气体。气体的分子作永不停息的不规则运动,这种运动产生热能,故气体分子运动是热运动。气体的物理参量较多,其中比容、压力、温度是三个基本参量。

一、空气的比容和密度

1. 空气的比容

质量为 M (kg) 的空气占有的空间 (或容积) 为 V (m^3) , 则空气的比容 (又名容积度) v 就是容积 V 和质量 M 之比。或者说是单位质量空气所占有的容积, 即

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

2. 空气的密度

空气的密度 ρ 是指单位容积空气的质量, 即

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

也就是空气比容的倒数。故空气的比容和密度是两个相互依存的参量。

3. 空气的重率

质量为 1 kg 的空气受 1 m/s^2 加速度的作用而产生的重力 G 叫做 1 N (牛顿) 。即

$$G = Mg, \text{ N}, \quad 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ N} \quad (1-3)$$

空气的重率 (又名容重或重度) γ 是指单位容积空气的重力, 即

$$\gamma = G/V, \text{ N/m}^3 \quad (1-4)$$

将式 (1-2) 和 (1-3) 代入上式, 得

$$\gamma = \rho g, \text{ N/m}^3 \quad (1-5)$$

上式就是空气重率和空气密度的关系式。

在公制单位中, 重力 G 的计量单位是 kgf (公斤力) 。1 kgf 是指质量为 1 kg 的空气受 9.80665 m/s^2 重力加速度的作用而产生的重力, 即,

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \times 9.80665 \text{ m/s}^2 = 9.80665 \text{ N} \text{ (在我国境内, 可用 } 1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N)}$$

因而, 用公制单位值时, 空气的质量, 密度和重率分别用 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 、 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 和 kgf/m^3 来度量。

按我国法定单位计算: 若已知 1 m^3 空气的重力 $G = 11.76 \text{ N}$, 则相应的空气质量

$$M = G/g = 11.76/9.8 = 1.2 \text{ kg};$$

空气密度 $\rho = M/V = 1.2/1 = 1.2 \text{ kg/m}^3$;

空气重率 $\gamma = \rho g = 1.2 \times 9.8 = 11.76 \text{ N/m}^3$;

$$\text{或 } \gamma = G/V = 11.76/1 = 11.76 \text{ N/m}^3。$$

按公制单位计算: 若已知 1 m^3 空气的重力 $G = 1.2 \text{ kgf}$, , 则相当的

$$M = 1.2/9.8 \approx 0.122 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m};$$

$$\rho = 0.122/1 \approx 0.122 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4;$$

$$\gamma = 0.122 \times 9.8 = 1.2 \text{ kgf}/\text{m}^3。$$

二、空气的压力

1. 空气压力的意义和特点

空气分子永不停息、无规则的热运动对容器壁面产生的压强, 习惯叫做空气的绝对静压, 是气体状态的基本参量之一。如图 1-1 所示, 一个正方形的容器, 容积为 $V(\text{m}^3)$, 边长为 $L(\text{m})$, 具有三对相对的壁面, 每个壁面的面积为 $A(\text{m}^2)$ 这个容器内的空气有 N 个分子数, 每个分子的质量为 $M(\text{kg})$ 。在每对壁面 (例如在 X 方向的左右两壁面) 之间, 每个分子在 t 秒钟以 $v_x(\text{m/s})$ 的速度离开右壁, 沿直线运动, 碰撞左壁。然后又以 $-v_x(\text{m/s})$ 的速度沿直线弹回, 碰撞右壁。即在 t 秒内每个分子只碰撞右壁面和左壁面各一次, 在 t 秒内每个分子来回一次的动量变化是 $Mv_x - (-Mv_x) = 2Mv_x, (\text{N} \cdot \text{s})$ 。在 X 、

Y、Z三个方向上各有 $N/3$ 个分子在 t 秒内连续不断地碰撞壁面一次，其总动量变化应为 $\frac{N}{3} \times 2Mv_x$, ($N \cdot s$)，则 $N/3$ 个分子每秒钟连续不断碰撞壁面一次的动量变化就是对该壁面

所产生的冲力 F ，即

$$F = 2NMv_x/(3t), \text{ N} \quad (1-6)$$

因 $L = v_x \times t/2, \text{ m}$ ，即 $t = 2L/v_x, \text{ s}$, (1-7)

又因 $V = LA, \text{ m}^3$ ，即 $L = V/A, \text{ m}$ 。

将上式代入1-8式，得

$$t = 2V/(v_x \cdot A), \text{ s} \quad (1-8)$$

将式(1-8)代入(1-6)式，得

$$F = \frac{1}{3} \frac{N}{V} Mv_x^2 A, \text{ N}$$

$N/3$ 个分子的热运动对X方向上每一壁面所产生的压强（即绝对静压）为

$$\begin{aligned} P_{sx} &= F/A = \frac{1}{3} \frac{N}{V} Mv_x^2 \\ &= \frac{1}{3} n Mv_x^2 = \frac{2}{3} n \left(\frac{Mv_x^2}{2} \right), \text{ n/m}^3 = \text{Pa (帕斯卡)}. \end{aligned}$$

式中 n ——单位容积空气中的分子数，即

$$n = N/V, \text{ particles/m}^3.$$

同理可得 $N/3$ 个分子的热运动对Y和Z方向上每一壁面所产生的绝对静压分别为

$$P_{sy} = \frac{2}{3} n \left(\frac{Mv_y^2}{2} \right), \text{ Pa},$$

$$P_{sz} = \frac{2}{3} n \left(\frac{Mv_z^2}{2} \right), \text{ Pa}.$$

把以上三式写成一般式，即

$$P_s = \frac{2}{3} n \left(\frac{Mv^2}{2} \right), \text{ Pa} \quad (1-9)$$

上式表明：空气的绝对静压是单位容积中空气分子热运动的总动能的 $2/3$ 所产生的， n 和 $Mv^2/2$ 越大，则 P_s 就越大。

按照统计观点，大量空气分子作无规则的热运动时，在各个方向运动的机会是均等的，故空气的绝对静压具有在各个方向上强度相等的特点。

不论空气是静止还是流动，绝对静压都存在，地表大气中的绝对静压习惯叫大气压力，标高越低的地表，单位体积空气中的分子数越多，热运动的动能越大，大气压力越大。一个标准的大气压力是气温 0°C 时纬45度海平面上的绝对静压。1标准大气压 $P_0 = 101324.96 \text{ Pa}$ ，可近似认为：海平面以上1000m高度处的大气压 $P = 0.888 P_0, \text{ Pa}$ ，海平面以下1000m深度处的大气压 $P' = 1.126 P_0, \text{ Pa}$ 。

2. 空气压力的计量单位和换算

例如容积为 $V (\text{m}^3)$ 、底面积为 $S (\text{m}^2)$ 、密度为 $\rho (\text{kg/m}^3)$ 的空气对其底面积所产生的重力压强 P ，可用下式和法定单位值计算：

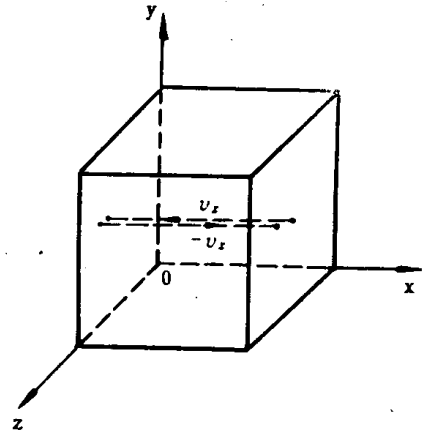


图1-1

$$P = \rho V g / s, \quad \left| \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^3 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right| / \text{m}^2 = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} / \text{m}^2 = \text{N} / \text{m}^2 = \text{Pa} \quad (1-10)$$

数值较大的压强可用kPa (千帕) 来计算,

$$1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa}$$

也可用mbar (毫巴) 来计量, $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$ 。

用公制单位时, 则上述重力压强为

$$P = \gamma V / S, \quad \left| \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^3 / \text{m}^2 \right| = \text{kgf} / \text{m}^2$$

另一个公制压强单位是 mmWG 或 mmH₂O (毫米水柱)。这是因为纯净水的重率 $\gamma_w = 1000 \text{ kgf} / \text{m}^3$, 当高度为 $1/1000 \text{ m}$ (即为 1 mm)、底面积 $S_w = 1 \text{ m}^2$ 、容积为 $V_w = 1/1000 \text{ m}^3$ 时所产生的重力压强为

$$\gamma_w \cdot V_w / S_w = 1000 \times 1/1000 / 1 = 1 \text{ kgf} / \text{m}^2$$

这表明: 1 mm 高度的纯净水柱 ($1 \text{ mmH}_2\text{O}$), 无论粗细, 都可用来计量 $1 \text{ kgf} / \text{m}^2$ 的压强, 即

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 1 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 9.80665 \text{ N} / \text{m}^2 = 9.80665 \text{ Pa}。$$

压强的数值较大时, 公制计量单位为 mmHg (毫米汞柱)。因纯水银比纯水要重 13.595 倍, 故知

$$1 \text{ mmHg} = 13.595 \text{ mmH}_2\text{O}。$$

英、美等国有时还用英制计量单位。即

$$1 \text{ lbf} / \text{ft}^2 (\text{磅力} / \text{尺}^2) = 144 \text{ lbf} / \text{in}^2 (\text{磅力} / \text{寸}^2);$$

$$1 \text{ inH}_2\text{O} (\text{寸水柱}) = 5.20833 \text{ lbf} / \text{ft}^2 = 25.41667 \text{ mmH}_2\text{O};$$

$$1 \text{ inHg} (\text{吋汞柱}) = 13.595 \text{ inH}_2\text{O}。$$

以上三种计量单位的换算关系如表 1-4 所示。

表 1-4

毫米水柱 (mmH ₂ O)	公斤力/米 ² (kgf/m ²)	毫米汞柱 (mmHg)	毫 巴 (mbar)	吋 水 柱 (inH ₂ O)	磅力/呎 ² (lbf/ft ²)	帕 斯 卡 (Pa)	达因厘米 (dyne/cm ²)
1	1	0.07356	0.09807	0.03934	0.20492	9.80665	98.0665
13.595	13.595	1	1.33322	0.53489	2.78586	133.32224	1333.2224
10.19709	10.19709	0.75006	1	0.4012	2.08957	100	1000
25.41667	25.41667	1.86956	2.49254	1	5.20833	249.25405	2492.5405
4.88	4.88	0.35896	0.47857	0.192	1	47.85681	478.568
0.10197	0.10197	0.0075	0.01	0.00401	0.0209	1	10
0.0102	0.0102	0.00075	0.001	0.0004	0.00209	0.1	1
10332.2	10332.2	760	1013.2496	406.51278	2117.2541	101324.96	1013249.6

3. 空气绝对静压的测量

测量空气绝对静压的常用仪表有两种, 一是水银气压计, 另一是空盒气压计。

如图 1-2 所示, 水银气压计有一根内装纯净水银的玻璃管 3, 玻璃管的上端封口, 管内水银柱表面 1 和封口之间是真空, 玻璃管的下端开口, 安插在水银池 5 中, 水银池的

底部用柔性皮革制成，并和一螺钉 4 相接触，转动螺钉，可使水银池中的水银表面上下移动，水银池内有一根指针 2，其尖端和刻度尺的零点位置相齐，测量时，须把水银气压计垂直悬挂，平稳以后，转动螺钉 4 使水银池中的水银表面和指针的尖端刚好接触，表示池中的水银表面和刻度尺上的零点位置相齐；再转动测微游标旋钮 6，使游标上的零点和玻璃管内的水银表面 1 相齐，根据游标上的零点位置，从刻度尺上读出绝对静压的整数，再根据游标上和刻度尺上某一位置相齐的刻度，读出小数点后的数值。读数为 mmHg，比较准确，但携带不方便，主要固定在室内使用。

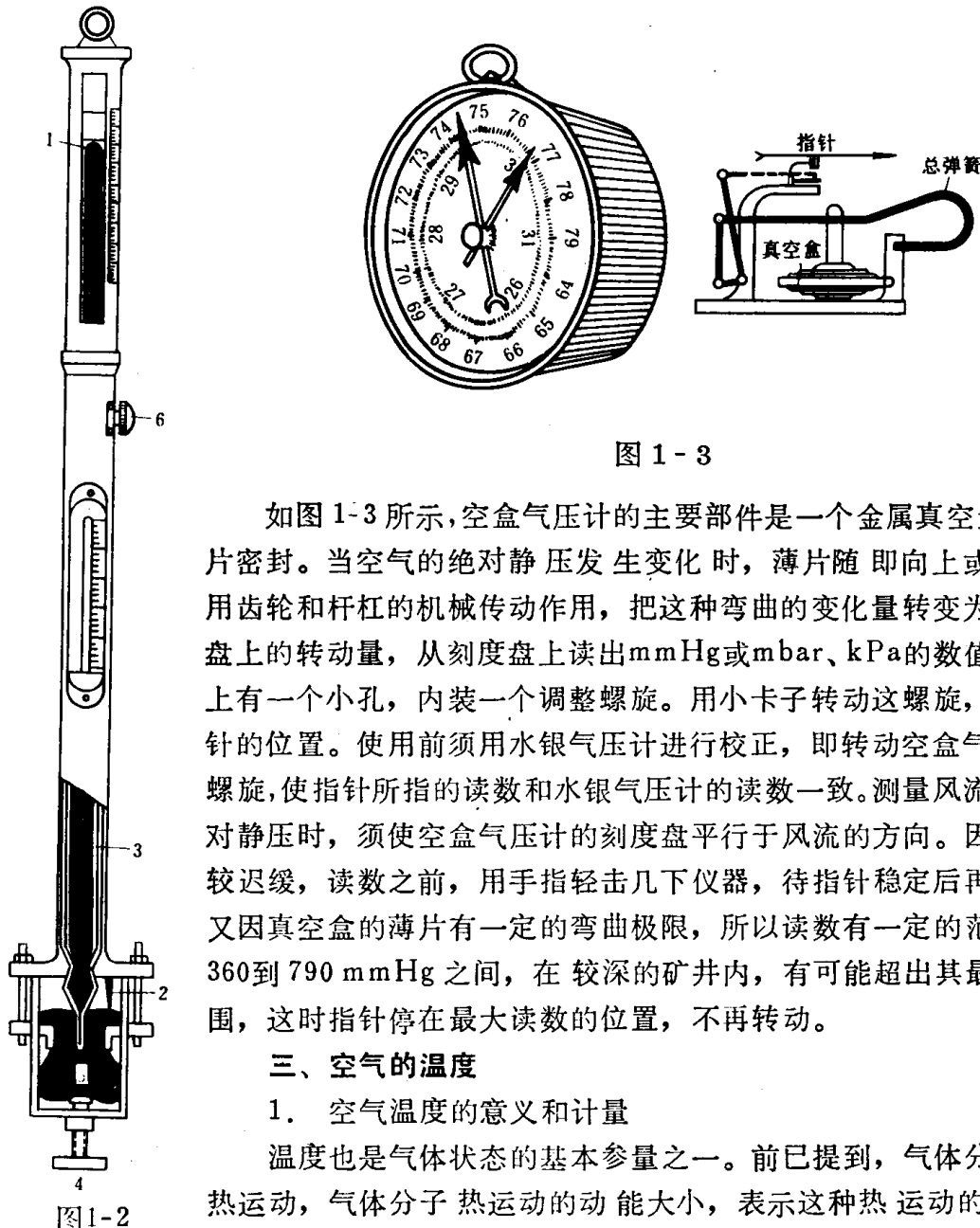


图 1-3

如图 1-3 所示，空盒气压计的主要部件是一个金属真空盒，用皱纹薄片密封。当空气的绝对静压发生变化时，薄片随即向上或向下弯曲，用齿轮和杆杠的机械传动作用，把这种弯曲的变化量转变为指针在刻度盘上的转动量，从刻度盘上读出 mmHg 或 mbar、kPa 的数值，背面外壳上有一个小孔，内装一个调整螺旋。用小卡子转动这螺旋，就能调整指针的位置。使用前须用水银气压计进行校正，即转动空盒气压计的调整螺旋，使指针所指的读数和水银气压计的读数一致。测量风流中某点的绝对静压时，须使空盒气压计的刻度盘平行于风流的方向。因指针转动比较迟缓，读数之前，用手指轻击几下仪器，待指针稳定后再读取读数，又因真空盒的薄片有一定的弯曲极限，所以读数有一定的范围，一般在 360 到 790 mmHg 之间，在较深的矿井内，有可能超出其最大的读数范围，这时指针停在最大读数的位置，不再转动。

三、空气的温度

1. 空气温度的意义和计量

温度也是气体状态的基本参量之一。前已提到，气体分子的运动是热运动，气体分子热运动的动能大小，表示这种热运动的强弱程度，体现出气体的冷热程度。表示这种冷热程度的参量 T 就是温度。故知

(1-9) 式中的动能 $MV^2/2$ 和 T 成正比，可写成[6]

$$MV^2/2 = BT \quad (1-11)$$

式中 B ——比例常数；

T ——绝对温度，它是反映分子热运动动能大小的理论温度，度量单位为开尔文

(Kelvin) 简写为开 (K)。绝对温度为零度时, 意味着分子热运动停止, 这是不可能的, 所以, 绝对温度零度是个理论值。

实际是用热平衡的方法来测量物体的冷热程度, 即当温度计与被测物体达到热平衡时。温度计指示的温度就等于被测物体的实测温度叫做摄氏 (Celsius) 温度, 用符号 t 表示, 度量单位是 $^{\circ}\text{C}$, 这种温度是取标准大气压下纯水的冰点为零度 (即 0°C), 沸点为 100°C , 0°C 以上为正值, 0°C 以下为负值, 前人发现当保持绝对静压不变时, 在摄氏 0°C 以上, 每升 1°C , 气体的容积便增加 $1/273.15$ 倍; 在 0°C 以下, 每降低 1°C , 气体的容积便减少 $1/273.15$ 倍, 故从理论上来说, 当 t 降到 -273.15°C 时, 气体的容积为零。这时的绝对温度就是理论值的绝对零度, 根据这种推论, 得出绝对温度与摄氏温度具有以下关系:

$$T = t + 273.15, \text{ 一般用 } T = t + 273, \text{ K} \quad (1-12)$$

上式表明: 摄氏温度 t 是 0°C 和 -273°C 时, 分别相当于绝对温度 T 是 273K 和 0K 。

国外还用另一种实测温度, 叫做华氏 (Fahrenheit) 温度 t' , 单位为 $^{\circ}\text{F}$, 可用下式和摄氏温度换算:

$$t = 5(t' - 32)/9, ^{\circ}\text{C} \quad (1-13)$$

2. 井下空气温度变化的规律

《规程》规定, 井下采掘工作面的气温须 $\leq 26^{\circ}\text{C}$, 机电硐室内的气温 $\leq 30^{\circ}\text{C}$, 冬季总进风的气温 $\geq 2^{\circ}\text{C}$, 即除机电硐室外在井下风流的气温允许在 $2 \sim 26^{\circ}\text{C}$ 的范围变化。井下气温小于 2°C 或大于 26°C 时, 就得采取加热或降温的措施 (详见第十章)。

在一般情况下, 井下气温在上述范围内变化, 大致有以下规律性[2]:

如图 1-4 所示, 在进风路线上 (指自矿井进风口到采掘工作面的一段路线), 冬季, 冷空气进入井下, 冷气温与地温进行热交换, 风流吸热, 地温散热, 因地温随深度增加且风流下行受压缩, 故沿线气温逐渐升高; 夏季, 与冬季的情况相反, 沿线气温逐渐降低。即在进风路线上, 气温随四季而变, 和地表气温相比, 有冬暖夏凉的现象, 对地表气温起调节作用, 进风路线好比调节器。在采掘工作面内, 由于物质的氧化程度大、机电设备多、人员多以及爆破工作等, 致使产生较大的热量, 对风流起着加热作用, 气温逐渐升高, 而且常年变化不大, 故采掘工作面好比是恒温加热器。在回风路线上, 因地温逐渐变小, 风流向上流动体积膨胀, 风流汇合, 风速增加, 使气温逐渐降低, 且常年变化不大。

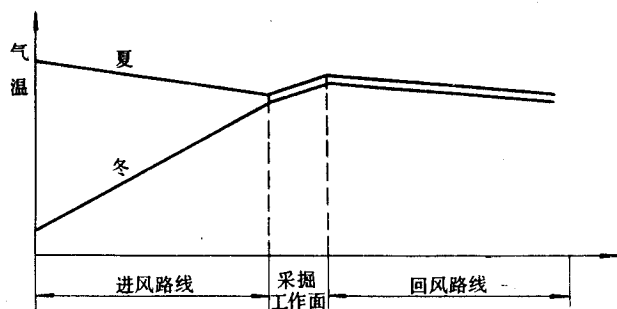


图 1-4

对于平硐进风, 井下风流路线不长的矿井, 由于热交换不充分, 致使整个风流路线上 (包括采掘工作面) 的气温都可能随四季地面气温而变。

四、空气的湿度

1. 空气湿度的意义

绝对湿度 f 。——单位容积或质量的湿空气中所含水蒸汽质量的绝对值 (g/m^3 或 g/kg)。含一定量水蒸汽的空气, 当其温度升高时, 则容积增大, f 值变小。

饱和绝对湿度 f_s 。——单位容积或质量湿空气所含饱和水蒸汽质量 (或水蒸汽最大质