

中国矿业大学新世纪教材建设工程资助教材

矿井通风与空气调节

Kuangjing Tongfeng Yu Kongqi Tiaojie

周福宝 王德明 陈开岩 主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学新世纪教材建设工程资助教材

矿井通风与空气调节

周福宝 王德明 陈开岩 主编

中国矿业大学出版社

内容提要

本书是根据中国矿业大学安全工程专业的“矿井通风与空气调节”的教学大纲(2008版)编写而成的,全书自成体系,共分为十二章,内容包括传热学、工程热力学和流体力学等与矿井通风和空气调节密切相关的专业基础知识,也包括矿井通风和空气调节的基本理论,特别增加了对旋式高效轴流式通风机、采区专用回风系统、国内外矿井降温新技术与新装备等相关内容。

本书是安全工程专业的教学用书,也可供从事矿业工程、地下通风工程设计、施工及管理的相关人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井通风与空气调节/周福宝,王德明,陈开岩主编.
徐州:中国矿业大学出版社,2009.8
ISBN 978 - 7 - 5646 - 0404 - 2

I. 矿… II. ①周…②王…③陈… III. 矿山通风—高等学校—教材 IV. TD72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 126887 号

书 名 矿井通风与空气调节
主 编 周福宝 王德明 陈开岩
责任编辑 仓小金 潘俊成
责任校对 李 敬
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 449 千字
版次印次 2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

我国 90% 以上的煤矿采用了井工开采和地下作业的方式,而地下作业首先面临的就通风问题。在矿井建设与生产过程中,必须将新鲜空气源源不断地输送到井下各个用风地点,供工作人员呼吸并用来稀释、排出井下各种有毒有害气体及矿尘,创造一个良好的井下作业环境,保障井下作业人员的身体健康和劳动安全。另外,随着开采的深入和浅部煤炭资源的日渐枯竭,煤矿开采向纵深发展是一个必然的趋势。现在全国采深在 1 000 m 以上的矿井已有 10 多处,采深大于 600 m 的矿井产量占总采量的 30% 以上。这些深热矿井的空气调节(特别是通风降温等)问题变得日益突出。在此形势下,原来相关的教材已不能满足新世纪人才培养的要求。为此,我们编写了此书,以满足教学之需。

矿井通风与空气调节是安全工程专业的核心课程之一,由两大部分组成:一是矿井通风,二是空气调节。本书自成体系,包括传热学、工程热力学和流体力学等与矿井通风与空气调节密切相关的内容,在此基础上系统地阐述了风流在矿井巷道内的流动规律、矿井通风动力和阻力、风量分配与调节、采区通风系统及矿井通风系统设计等基础内容,重点介绍了矿井通风与空气调节领域发展起来的对旋式高效轴流式通风机、采区专用回风系统、国内外矿井降温新技术与新装备等相关内容,并结合煤矿开采深度和强度加大而造成的对矿井空气调节(尤其对降温)的迫切需求,增加了该方面的工程实例。各章后还附有复习思考题和习题,以便学生自学与复习巩固。

本书共分十二章,由周福宝教授担任主编。第一、三、七、九、十、十一、十二章由周福宝教授编写,第二、五、六、八章由王德明教授编写,第四章由陈开岩教授编写,全书由周福宝教授统稿。本书在资料整理、图表绘制、计算机录入与排版、校对等方面得到了研究生刘玉胜、李金海、丁盛、张云峰、刘应科等的大力帮助,同时,本书的出版得到了中国矿业大学新世纪教材建设工程资助,对此表示衷心感谢!

由于编者水平所限,加之时间较紧,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评、指正。

编 者

2008 年 12 月

目 录

第一章 矿井空气热力学基础	1
第一节 矿井空气.....	1
第二节 矿井空气的主要物理参数.....	6
第三节 矿井气候	10
第四节 焓湿图	19
第五节 湿球温度和露点温度	22
第六节 空气与水的湿交换	24
复习思考题与习题	28
第二章 矿井空气动力学基础	29
第一节 风流的流动状态	29
第二节 黏性流体运动方程	30
第三节 矿井风流能量与能量方程	32
第四节 风流压力及压力坡度	36
复习思考题与习题	43
第三章 井巷通风阻力	44
第一节 巷道摩擦阻力	44
第二节 巷道局部阻力	53
第三节 通风阻力定律和特性	56
第四节 通风阻力测量	59
复习思考题与习题	67
第四章 通风动力	69
第一节 自然风压	69
第二节 矿用通风机类型及构造	72
第三节 主要通风机个体特性曲线	78
第四节 通风机比例定律与类型特性曲线	83
第五节 矿井主要通风机附属装置	87
第六节 矿井主要通风机联合运转	91
第七节 矿井主要通风机性能测定	97
复习思考题与习题.....	103

第五章 局部通风	105
第一节 局部通风方法.....	105
第二节 局部通风装备.....	110
第三节 局部通风系统设计.....	119
第四节 局部通风技术管理及其安全措施.....	120
复习思考题与习题.....	125
第六章 通风网络风量分配与调节	126
第一节 矿井通风系统图.....	126
第二节 风量分配基本规律.....	130
第三节 风网的基本形式及通风参数的计算.....	133
第四节 计算机解算矿井通风网络.....	140
第五节 矿井风量调节.....	147
第六节 多台通风机联合运转的相互调节.....	157
复习思考题与习题.....	161
第七章 采区通风	163
第一节 采区通风系统.....	163
第二节 长壁工作面的通风方式.....	166
第三节 采区风量计算.....	172
第四节 采区通风构筑物.....	176
第五节 采区专用回风巷.....	179
第六节 减少漏风的措施.....	182
复习思考题与习题.....	184
第八章 矿井通风系统的设计	185
第一节 矿井通风系统的拟定.....	185
第二节 矿井风量的计算和分配.....	189
第三节 矿井通风阻力计算.....	198
第四节 矿井通风设备选型.....	199
第五节 生产矿井的通风系统改造.....	202
第六节 矿井通风系统安全性评价.....	205
复习思考题与习题.....	206
第九章 矿井热源与热环境	207
第一节 矿井热源.....	207
第二节 矿井热环境.....	213
复习思考题与习题.....	220

第十章 矿井降温的一般措施	222
第一节 通风降温方法.....	222
第二节 井下热水治理与利用.....	225
第三节 其他技术措施.....	227
第四节 矿工个体保护.....	229
复习思考题与习题.....	231
第十一章 矿井制冷空调系统	232
第一节 矿井制冷空调系统.....	232
第二节 制冷站和制冷设备.....	238
第三节 冷量分布与用冷.....	246
第四节 冷却塔和喷淋硐室.....	251
第五节 矿井降温工程实例.....	259
复习思考题与习题.....	272
第十二章 矿井空气的预热技术	273
第一节 矿井空气的预热方法.....	273
第二节 矿井空气预热量的计算.....	275
复习思考题与习题.....	276
参考文献	277

第一章 矿井空气热力学基础

第一节 矿井空气

矿井通风的目的是为井下各工作地点提供足够的新鲜空气,使其中有毒有害气体、粉尘不超过规定值,使工作地点有适宜的气候条件。矿井通风系统通常被称为矿井的心脏与动脉。矿井通风是保障矿井安全的最主要技术手段之一。

本节重点阐述矿井内空气成分及其性质和矿井内空气中常见的有害气体。

一、矿井内空气的主要成分

井下空气的主要来源是地面空气。地面空气是由多种气体组成的干空气和水蒸气组合而成的混合气体。通常状况下,干空气各组分所占比例基本不变(见表 1-1-1)。在混合气体中,水蒸气的浓度随地区和季节而变化,其平均浓度约为 1%;此外还含有尘埃和烟雾等杂质。

表 1-1-1 干空气主要成分

气体成分	按体积计/%	按质量计/%
氮气(N ₂)	78.13	75.55
氧气(O ₂)	20.90	23.10
二氧化碳(CO ₂)	0.03	0.05
氩气(Ar)	0.93	1.27
其他(水蒸气、惰性稀有气体和微量的灰尘与微生物等)	0.01	0.01

地面空气进入矿井以后,由于受到污染,其成分和性质要发生一系列的变化,如氧浓度降低,二氧化碳浓度增加。一般来说,将井巷中经过用风地点以前、受污染程度较轻的进风巷道内的空气称为新鲜空气(新风);经过用风地点以后、受污染程度较重的回风巷道内的空气称为污浊空气(乏风)。矿井内空气主要成分除氧气(O₂)、氮气(N₂)、二氧化碳(CO₂)、水蒸气(H₂O)以外,还混入大量的有害气体,如瓦斯(CH₄)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H₂S)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、氨气(NH₃)、氢气(H₂)和矿尘等。

1. 氧气(O₂)

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 1.11。它的化学性质很活泼,几乎可与所有气体相化合。氧能助燃和供人与动物呼吸。

氧和人的生命有着密切关系。人之所以能生存,是因为人体内不断进行着细胞的新陈代谢,而新陈代谢过程是靠人吃进的食物和吸入空气中的氧在体内进行氧化过程来维持的。因此,凡是井下有人员工作或通行的地点,都必须要有充足的氧。人体维持正常生命过程所需的氧量,取决于人的体质、精神状态和劳动强度等。一般说来,人在休息时平均需氧量为

0.25 L/min, 在工作和行走时为 1~3 L/min。

矿井内氧气来源于进入矿井的地面大气。由于矿井内各有机物(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了氧气的浓度。但是, 通风良好的巷道, 氧浓度的减少量是微小的; 只有在通风不良或采空区的旧巷道内, 氧浓度才可能显著降低。人们在进入通风不良或旧巷道之前, 必须先进行检查, 否则不能贸然进入。

空气中氧的浓度对人的健康影响很大。最有利于呼吸的氧浓度(体积百分比)为 21% 左右; 当空气中的氧浓度降低时, 人体就可能产生不良的生理反应, 出现种种不舒适的症状, 严重时可能导致缺氧死亡。人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系如表 1-1-2 所示。

表 1-1-2 人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系

氧浓度(体积)/%	主要症状
17	静止时无影响, 工作时能引起喘息和呼吸困难
15	呼吸及心跳急促, 耳鸣目眩, 感觉和判断能力降低, 失去劳动能力
10~12	失去理智, 时间稍长有生命危险
6~9	失去知觉, 呼吸停止, 如没有及时抢救, 几分钟内可能导致死亡

《煤矿安全规程》(以下简称《规程》)规定, 采掘工作面的进风流中氧气浓度(按体积百分比计算)不得低于 20%。为此, 必须对矿井进行不间断的通风, 将适量的新鲜空气源源不断地送到井下。这是矿井通风最基本的任务之一。

2. 氮气(N₂)

氮气是无色、无味、无臭的惰性气体, 是新鲜空气中的主要成分, 对空气的相对密度为 0.97, 它本身无毒、不助燃, 也不供呼吸。在正常情况下, 氮气对人体无害, 但空气中若氮气浓度升高, 则势必造成氧浓度相对降低, 从而也可能导致人员的窒息性伤害。在废弃的旧巷道或隔离火区内, 可积存大量的氮气, 使氧浓度相对减少, 使人缺氧而窒息。正因为氮气为惰性气体, 因此又可将其用于井下防灭火和防止瓦斯爆炸。

矿井空气中氮气的主要来源是: 地面大气、井下爆破和生物的腐烂, 有些煤岩层中也有氮气涌出。

3. 二氧化碳(CO₂)

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, 是一种较重的气体, 很难与空气均匀混合, 常积聚于巷道的底部、井筒和下山的掘进迎头, 在静止的空气中有明显的分界。二氧化碳不助燃也不能供人呼吸, 易溶于水, 生成碳酸, 使水溶液成弱酸性, 对眼、鼻、喉黏膜有刺激作用。在新鲜空气中含有微量的二氧化碳对人体是无害的, 它对人的呼吸有刺激作用, 如果空气中完全不含有二氧化碳, 人体的正常呼吸功能就不能维持。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。但当空气中二氧化碳的浓度过高时, 也将使空气中的氧浓度相对降低, 轻则使人呼吸加快、呼吸量增加, 严重时也可能造成人员中毒或窒息。空气中二氧化碳对人体的危害程度与浓度的关系如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3

二氧化碳中毒症状与浓度的关系

二氧化碳浓度/%	主要症状
1	呼吸加深,但对工作效率无明显影响
3	呼吸急促,心跳加快,头痛,人体很快疲劳
5	呼吸困难,头痛,恶心,呕吐,耳鸣
6	严重喘息,极度虚弱无力
7~9	动作不协调,大约 10 min 可发生昏迷
9~11	数分钟内可导致死亡

井下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,矿井水与碳酸性岩石的分解作用,爆破工作,矿井内火灾,煤炭自燃以及瓦斯、煤尘爆炸等。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,1978年5月24日,甘肃省窑街三矿胶带斜井因误穿断层,诱导发生特别重大煤(岩)与CO₂突出事故,突出煤岩总量1030.2t,CO₂气体总量24万m³,逆风流动1700余米。法国也曾发生过类似CO₂突出的事故。

《规程》规定:采掘工作面的进风流中,二氧化碳不超过0.5%。采区回风巷和采掘工作面回风巷回风流中二氧化碳浓度达到1.5%时,必须停止工作,撤出人员,查明原因,制定措施,进行处理。总回风巷或一翼回风巷中,二氧化碳超过0.75%时,必须查明原因,进行处理。

二、矿井内空气中常见的有害气体

矿井常见的有害气体有一氧化碳、硫化氢、二氧化氮、二氧化硫、氨气、瓦斯等。下面分别介绍。

1. 一氧化碳(CO)

一氧化碳是一种无色、无味、无臭的气体,对空气的相对密度为0.97,微溶于水,但能溶于氨水,能与空气均匀地混合。与酸、碱不起反应,只能被活性炭少量吸附。

一氧化碳能燃烧,当空气中一氧化碳浓度在13%~75%时有爆炸的危险。

一氧化碳是一种对血液、神经有害的气体。一氧化碳随空气吸入人体内后,通过肺泡进入血液,并与血液中的血红蛋白结合。一氧化碳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(COHb),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。

一氧化碳对人的危害主要取决于空气中一氧化碳的浓度和与人的接触时间(见表1-1-4、图1-1-1)。一氧化碳还可导致心肌损伤,对中枢神经系统特别是锥体外系统也有损害,经实验证明一氧化碳还可引起慢性中毒。

矿井内爆破作业、煤炭自燃及发生火灾或煤尘、瓦斯爆炸时都能产生一氧化碳。

《规程》规定一氧化碳最高容许浓度为0.0024%。

表 1-1-4 一氧化碳中毒症状与浓度的关系

一氧化碳浓度/%	主要症状
0.02	2~3 h 内可能引起轻微头痛
0.08	40 min 内出现头痛、眩晕和恶心;2 h 内体温和血压下降,脉搏微弱,出冷汗,可能出现昏迷
0.32	5~10 min 内出现头痛,眩晕;0.5 h 内可能出现昏迷并有死亡危险
1.28	几分钟内出现昏迷和死亡

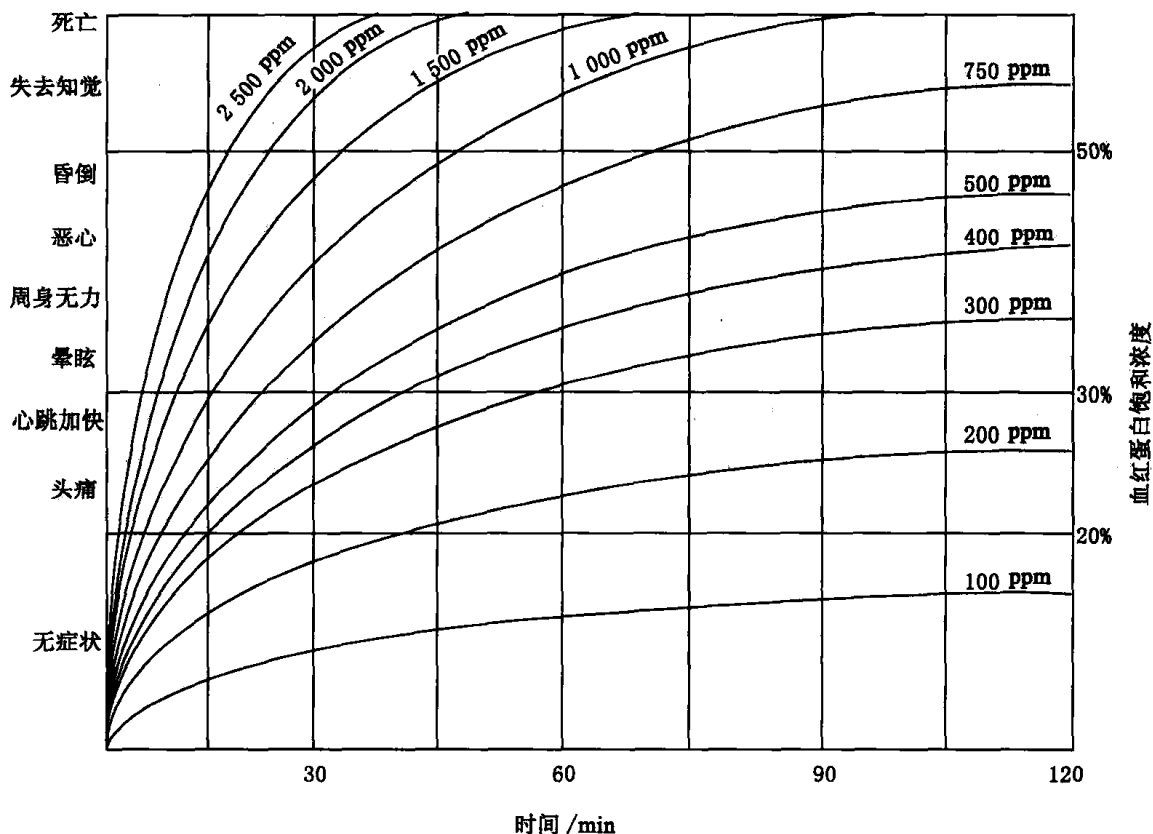


图 1-1-1 CO 对人体身体状况的影响

2. 硫化氢(H₂S)

硫化氢无色、微甜、有浓烈的臭鸡蛋味,当空气中浓度达到 0.000 1%即可嗅到,但当浓度较高时,因嗅觉神经中毒麻痹,反而嗅不到。硫化氢对空气的相对密度为 1.19,易溶于水,在常温、常压下一个体积的水可溶解 2.5 个体积的硫化氢,所以它可能积存于旧巷道的积水中。硫化氢能燃烧,在空气中的浓度为 4.3%~45.5%时有爆炸危险。

硫化氢有剧毒,有强烈的刺激作用,不但能引起鼻炎、气管炎和肺水肿,而且还能阻碍生物的氧化过程,使人体缺氧。当空气中硫化氢浓度较低时主要以腐蚀刺激作用为主;浓度较高时能引起人体迅速昏迷或死亡,腐蚀刺激作用往往不明显。硫化氢中毒症状与浓度的关系如表 1-1-5 所示。

表 1-1-5 硫化氢中毒症状与浓度的关系

硫化氢浓度/%	主要症状
0.002 5~0.003	有强烈臭味
0.005~0.01	1~2 h 内出现眼及呼吸道刺激症状,臭味“减弱”或“消失”
0.015~0.02	出现恶心、呕吐、头晕、四肢无力、反应迟钝、眼和呼吸道有强烈刺激症状
0.035~0.045	0.5~1 h 内出现严重中毒,可发生肺炎、支气管炎及肺水肿,有死亡危险
0.06~0.07	很快昏迷,短时间内死亡

井下空气中硫化氢的主要来源:有机物腐烂,含硫矿物的水解,矿物氧化和燃烧,从老空区和废旧巷道积水中放出,我国有些矿区煤层中也有硫化氢涌出。

《规程》规定:井下空气中硫化氢含量不得超过 0.000 66%。

3. 二氧化氮(NO_2)

二氧化氮是一种褐红色的气体,有强烈的刺激气味,对空气的相对密度为 1.59,易溶于水生成 HNO_3 ,对眼睛、呼吸道黏膜和肺部组织有强烈的刺激及腐蚀作用,严重时可引起肺水肿。二氧化氮中毒有潜伏期,有的在严重中毒时尚无明显感觉,还可坚持工作。但经过 6~24 h 后发作,中毒者指头出现黄色斑点,并出现严重的咳嗽、头痛、呕吐甚至死亡。二氧化氮中毒症状与浓度的关系如表 1-1-6 所示。

表 1-1-6 二氧化氮中毒症状与浓度的关系

二氧化氮浓度/%	主要症状
0.004	2~4 h 内可出现咳嗽症状
0.006	短时间内感到喉咙刺激,咳嗽,胸疼
0.01	短时间内出现严重中毒症状,神经麻痹,严重咳嗽,恶心,呕吐
0.025	短时间内可能出现死亡

矿井内空气中二氧化氮的主要来源是井下爆破工作。

《规程》规定:氮氧化物含量不得超过 0.000 25%。

4. 二氧化硫(SO_2)

二氧化硫为无色气体,具有强烈的硫黄气味及酸味,对空气的相对密度为 1.433 7,易积聚在巷道底部,易溶于水。

矿井内含硫矿物氧化、燃烧及在含硫矿物中爆破都会产生二氧化硫,有时含硫矿层也涌出二氧化硫。

二氧化硫能被眼结膜和上呼吸道黏膜的富水黏液吸收,刺激眼黏膜和鼻咽黏膜等;在潮湿的矿井内,能与空气中水分结合缓慢地形成硫酸(H_2SO_4),使其刺激作用更强。当空气中二氧化碳浓度为 0.3~1 ppm 时,健康人可由嗅觉感知,使呼吸道轻度收缩,呼气受阻;浓度为 4~6 ppm 时,则对鼻咽及呼吸道黏膜有强烈刺激作用。长时间在二氧化硫浓度为 5~10 ppm 或更高的环境中呼吸,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二氧化硫的破坏,可导致肺气肿和支气管哮喘。吸入含高浓度的二氧化硫空气,可引起急性支气管炎、声门水肿和呼吸道麻痹,浓度为

400~500 ppm时可立即危及生命。

《规程》规定：矿井内空气中二氧化硫最高容许浓度为 0.000 5%。

5. 氨气(NH₃)

氨气为无色、有剧毒的气体，对空气的相对密度为 0.59，易溶于水，对人体有毒害作用，《规程》规定，矿井内最大容许浓度为 0.004% (3 mg/m³)。但当其浓度达到 0.01% 时就可嗅到其特殊臭味。氨气主要在矿井内发生火灾或爆炸事故时产生。

6. 瓦斯(CH₄)

瓦斯的主要成分是甲烷(CH₄)，甲烷是一种无色、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(5%~16%)并遇到高温(650℃~750℃)时能引起爆炸。

《规程》规定，工作面进风流中 CH₄ 的浓度不能大于 0.5%，采掘工作面和采区的回风流中 CH₄ 的浓度不能大于 1.0%，矿井和一翼的总回风流中 CH₄ 最高容许浓度为 0.75%。

7. 氢气(H₂)

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硐室均会产生，其最高容许浓度为 0.5%。

8. 其他有害物质

矿井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)。矿尘对矿井内空气的污染不容忽视，它对矿井生产和人体都有严重危害。煤尘能引起爆炸，粉尘特别是呼吸性粉尘能引起矿工尘肺病。因此《规程》对作业场所空气中粉尘(总粉尘、呼吸性粉尘)浓度作了如表 1-1-7 的规定。

表 1-1-7 作业场所空气中粉尘浓度标准

粉尘中游离 SiO ₂ 含量/%	最高允许浓度/(mg·m ⁻³)	
	总粉尘	呼吸性粉尘
<10	10	3.5
10~50	2	1
50~80	2	0.5
≥80	2	0.3

此外，井下小型空气压缩机产生的废气及使用柴油机时排出的废气也都污染了矿井内空气，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。

第二节 矿井空气的主要物理参数

一、密度

单位体积空气所具有的质量称为空气的密度，用符号 ρ 表示。空气可以看做是均质气体，故：

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-2-1}$$

式中 m ——空气的质量, kg;
 V ——空气的体积, m^3 ;
 ρ ——空气的密度, kg/m^3 。

一般地说, 当空气的温度和压力改变时, 其体积会发生变化。所以空气的密度是随温度、压力的变化而变化的, 从而可以得出空气的密度是空间点坐标和时间的函数。如在大气压 p_0 为 101 325 Pa、气温为 0°C (273.15 K) 时, 干空气的密度 ρ_0 为 $1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

湿空气的密度是 1 m^3 空气中所含干空气质量和水蒸气质量之和:

$$m = m_d + m_v \quad (1-2-2)$$

式中 m_d —— 1 m^3 空气中干空气的质量, kg;
 m_v —— 1 m^3 空气中水蒸气的质量, kg。

由气体状态方程和道尔顿分压定律可以得出湿空气的密度计算公式:

$$\rho = 0.003\ 484 \frac{p}{273+t} \left(1 - \frac{0.378\varphi p_s}{p} \right) \quad (1-2-3)$$

式中 p ——空气的压力, Pa;
 t ——空气的温度, $^\circ\text{C}$;
 p_s ——温度 t 时饱和水蒸气的分压, Pa;
 φ ——相对湿度, %。

二、比容

空气的比容是指单位质量空气所占有的体积, 用符号 $v(\text{m}^3/\text{kg})$ 表示, 比容和密度互为倒数, 它们是一个状态参数的两种表达方式。则:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-2-4)$$

在矿井通风中, 空气流经复杂的通风网络时, 其温度和压力将会发生一系列的变化, 这些变化都将引起空气密度的变化, 在不同的矿井, 这种变化的规律是不同的。在实际应用中, 应考虑什么情况下可以忽略密度的这种变化, 而在什么条件下又是不可忽略的。

三、黏度

当流体层间发生相对运动时, 在流体内部两个流体层的接触面上, 便产生黏性阻力(内摩擦力)以便阻止相对运动, 流体具有的这一性质称做流体的黏性。例如, 空气在管道内以速度 u 作层流流动时, 管壁附近的流速较小, 向管道轴线方向流速逐渐增大, 如同把管内的空气分成若干薄层, 如图 1-2-1 所示。

在垂直流动方向上, 设有厚度为 $dy(\text{m})$ 、速度为 $u(\text{m}/\text{s})$ 、速度增量为 $du(\text{m}/\text{s})$ 的分层, 在流动方向上的速度梯度为 $\frac{du}{dy}$,

由牛顿内摩擦定律:

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

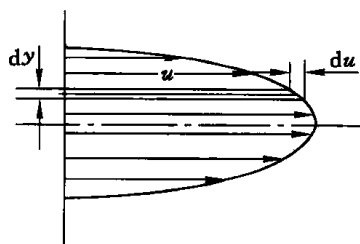


图 1-2-1 空气黏性黏膜

式中 f ——内摩擦力, N;

S ——流层之间的接触面积, m^2 ;

μ ——动力黏度(或称绝对黏度), $Pa \cdot s$, 它随着气温和气压的变化而变化。

另外, 在矿井通风中还常用运动黏度(符号为 ν , 单位为 m^2/s)表示气体的黏度, 这个系数和动力黏度 μ 有以下关系:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-2-6)$$

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 。

流体黏度随温度和压强的变化而变化, 由于分子结构及分子运动机理的不同, 液体和气体的变化规律是截然相反的。液体黏度大小取决于分子间的距离和分子引力: 当温度升高或压强降低时液体膨胀, 分子间距增加, 分子引力减小, 黏度降低; 反之, 温度降低, 压强升高时, 液体黏度增大。气体分子间距较大, 内聚力较小, 但分子运动较剧烈, 黏性主要源于流层之间分子的动量交换。当温度升高时, 分子运动加剧, 所以黏性增大; 而当压强升高时, 气体的动力黏度和运动黏度都减小。空气和水的黏度随温度的变化规律如图 1-2-2 所示。

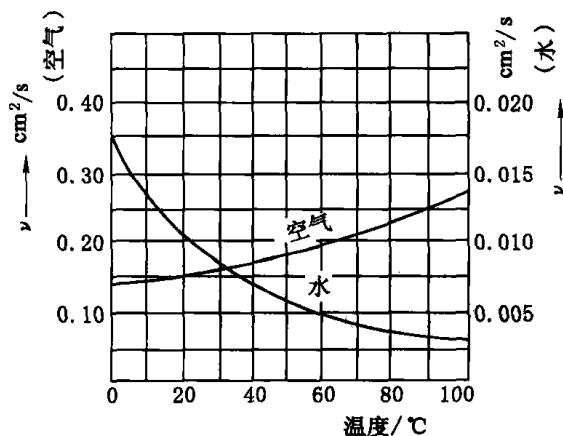


图 1-2-2 空气与水的黏性随温度的变化

在实际应用中, 压力对流体的黏性黏膜影响很小, 可以忽略。在考虑流体的可压缩性时常采用动力黏度 μ 而不用运动黏度 ν 。表 1-2-1 为几种有关流体的黏度。

表 1-2-1 几种流体的黏度 (0.1 MPa, $t=20\text{ }^\circ\text{C}$)

流体名称	动力黏度 $\mu/(Pa \cdot s)$	运动黏度 $\nu/(m^2 \cdot s^{-1})$
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}
甲烷(CH_4)	1.08×10^{-5}	1.52×10^{-5}
水	1.005×10^{-3}	1.007×10^{-6}

四、热容

为了计算热力过程的热交换量, 必须知道单位数量气体的热容量。单位物量的气体, 升

高或降低绝对温度 1 K 时所吸收或放出的热量称为热容。定义式为：

$$c = dQ/dT \quad (1-2-7)$$

热容的单位取决于热量单位和物量单位。表示物量的单位不同，热容的单位也不同。通常采用的物量单位有：质量(kg)、容积(m^3)和千摩尔(kmol)。因此，相应的就有质量热容、容积热容和摩尔热容之分。

质量热容的符号是 c ，表示 1 kg 空气升高或降低 1 K 时所吸收或放出的热量，单位是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

容积热容的符号是 c' ，表示 1 m^3 体积空气升高或降低 1 K 时所吸收或放出的热量，单位是 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

摩尔热容的符号是 C ，表示 1 kmol 空气升高或降低 1 K 时所吸收或放出的热量，单位是 $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

三种热容的换算关系是：

$$c = \frac{MC}{22.4} = c' \rho_0 \quad (1-2-8)$$

式中 M ——气体的相对分子质量；

ρ_0 ——气体在标准状态下的密度， g/m^3 。

热量不是气体状态参数，所以 c 也不是状态参数，而是气体热力变化过程的函数。影响其大小的主要因素是：物质的性质、热力过程、物质所处的状态等。

气体的热容与热力过程有关，工程中最为常见的是定容过程和定压过程。热容相应地分为定容热容(c_v)和定压热容(c_p)。 c_v 和 c_p 值分别表示为：

$$c_v = \left(\frac{\delta q}{dT} \right)_v \quad c_p = \left(\frac{\delta q}{dT} \right)_p \quad (1-2-9)$$

在等容过程中，气体不能膨胀做功，所吸收的热量全部用来增加气体的内能，使内能增加，温度升高；在等压过程中，气体可以膨胀，所吸收的热量除用来增加气体分子的内能外，还应克服外力做功，因而对相同质量的气体升高同样的温度，在等压过程中所需的热量要比等容过程多，故等压热容 c_p 总是大于等容热容 c_v 。理想气体的热容也是温度的单值函数，热容随温度的升高而增大。不同温度时，空气的 c_p 和 c_v 的数值如表 1-2-2 所列。

表 1-2-2 空气的热容

温度/ $^{\circ}\text{C}$	-10	0	15	30	80
热容					
等容热容 $c_v/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.707 6	0.711 8	0.711 8	0.715 9	0.720 1
等压热容 $c_p/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.996 5	1.000 6	1.000 6	1.000 6	1.000 9

令 $c_p/c_v = k$ ，这个比值称为气体的热容比，或称做绝热指数，每种气体各有一个几乎不变的 k 值，对于空气， $k \approx 1.41$ 。

五、空气的比焓

比焓 i 是内能 u 和压力功 pV 的和，即有：

$$i = u + pV \quad (1-2-10)$$

比焓(kJ/kg)是空气中的一个状态参数,湿空气的比焓也是以 1 kg 干空气作为基础计算的。它是 1 kg 干空气的焓和 1 kg 水蒸气的焓的总和,用符号 i 表示,可用下式计算:

$$i = i_d + 0.001d \times i_v, \text{kJ}/(\text{kg 干空气}) \quad (1-2-11)$$

式中 i_d ——1 kg 干空气的焓,亦称为空气的显热(或感热),kJ/kg, $i_d = 1.004 5t$ [其中, t 是空气的温度,℃;系数 1.004 5 为干空气的定压质量热容,kJ/(kg·K)];

d ——湿空气含湿量;

i_v ——1 kg 水蒸气的焓, $i_v = 2 501 + 1.85 t$,kJ/kg,其中 2 501 是水蒸气的汽化潜热,kJ/kg;1.85 是常温下水蒸气的定压质量热容,kJ/kg。

将干空气和水蒸气的焓值代入式(1-2-11),可得湿空气的焓为:

$$i = 1.004 5t + 0.001d(2 501 + 1.85t), \text{kJ}/(\text{kg 干空气}) \quad [1-2-12(a)]$$

如果热量的单位用千卡(kcal)表示,则因 1 kJ=0.238 8 kcal,上式可表示为:

$$i = 0.24t + 0.001d(597 + 0.44t), \text{kcal}/(\text{kg 干空气}) \quad [1-2-12(b)]$$

为书写方便,以后 d 、 i 参数中出现的单位里“kg 干空气”均略写为“kg”。

在一些近似计算中,常简化为:

$$i = 1.005t + 2.5d, \text{kJ}/\text{kg} \quad (1-2-13)$$

或

$$i = 0.24t + 0.597d, \text{kcal}/\text{kg} \quad (1-2-14)$$

第三节 矿井气候

矿井气候是指矿井空气的温度、湿度和风速这三个参数的综合作用状态。这三个参数的不同组合,便构成了不同的矿井气候条件。矿井气候条件对井下作业人员的身体健康和劳动安全有重要的影响。

一、矿井内空气的温度

温度是气体状态的基本参数之一。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数就是温度,温度的高低用温标来衡量。目前国际上常用的有绝对温标(开氏温标),单位为 K;摄氏温标,单位为 ℃。

$$t = T - 273.15 \approx T - 273 \quad (1-3-1)$$

矿井内空气温度是影响矿井内气候条件的重要因素。气温过高或过低,对人体都有不良的影响,最适宜的矿井内空气温度是 15 ℃~20 ℃。

1. 影响矿井内空气温度的主要因素

(1) 岩石温度

矿井内空气的温度与岩石温度直接相关。地表温度是随地面气温的变化而变化的,随着深度的增加,地温随气温变化的幅度则逐渐减小,当达到一定深度时,地温不再变化。岩层温度分为三带:

变温带——随地面气温的变化而变化的地带。夏季岩层从空气中吸热而使地温升高,冬季则相反。