

Mine Ventilation and Safety

# 矿井通风与安全

主编 王德明

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

MINE VENTILATION AND SAFETY

TD7  
W-254

# 矿井通风与安全

主 编 王德明

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书是根据煤炭高等院校采矿工程和安全工程专业的“矿井通风与安全”教学大纲编写的。系统阐述矿井通风与安全的基础理论和技术,分析讨论煤矿自然灾害发生的原因及其防治措施。内容精练、重视基础、深入浅出,适合作为相关专业学生教材,也可供从事矿井安全研究的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿井通风与安全/王德明主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2007.10

ISBN 978-7-81107-716-2

I. 矿… II. 王… III. ①矿山通风—高等学校—教材  
②矿山安全—高等学校—教材 IV. TD7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 164866 号

书 名 矿井通风与安全

主 编 王德明

责任编辑 马跃龙 王江涛

责任校对 徐 玮

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

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 28.5 字数 676 千字

版次印次 2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷

定 价 45.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

采矿工业是我国的基础工业,它在整个国民经济发展中占有极其重要的地位。煤炭是我国一次能源的主体。我国煤炭生产以井工开采为主,其产量占煤炭总产量的 97%。而地下作业首先面临的是通风问题,在矿井生产过程中,必须源源不断地将地面新鲜空气输送到井下各个作业地点,以供人员呼吸并稀释和排除井下各种有毒有害气体及矿尘,创造良好的矿内工作环境,保障井下作业人员的身体健康和劳动安全。煤矿的地下开采又面临最为严重的安全问题,瓦斯、火、矿尘、水、冒顶是煤矿普遍存在的五大自然灾害。另外,随着矿井开采深度的不断延伸,高温也成为煤矿又一严重的自然灾害。“矿井通风与安全”是人们在与矿井自然灾害作斗争的过程中,不断积累经验、吸取教训、总结规律、建立理论、完善措施而逐渐形成的一门学科,它是采矿工程和安全工程(矿业安全工程方向)等专业必不可少的一门专业课程。

矿井通风与安全经历过较长的发展过程。早在 1640 年,人们便开始利用自然通风进行矿井通风;为了加大通风压力,1650 年在回风路线上设火炉以利用热风压通风;1849 年,开始采用蒸汽离心式通风机;1898 年电力轴流式通风机开始投入使用。在煤炭自然发火的研究方面,在 1686 年就发表了有关煤自燃起因的论文。在瓦斯监测方面,1813 年开始采用安全油灯以检查氧气、瓦斯和二氧化碳的浓度。20 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,已能实现对井下风流环境中各参数(瓦斯、一氧化碳、风速、压力、温度等)进行监测;80 年代以后,煤矿通风与安全的科学技术得到了快速的发展。经过不断的探索与实践,矿井通风与安全方面的科学和技术已经形成了一个比较完整的体系。

本书是根据煤炭高等院校采矿工程和安全工程专业的“矿井通风与安全”教学大纲编写的。全书共分为 14 章。书中系统地阐述了矿井通风与安全的基础理论和技术,分析讨论了煤矿自然灾害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。本书的特点是内容精练,理论联系实际,重视基础,阐述问题注意深入浅出,有较多的例题,各章附有相当数量的复习思考题和习题。

本书由王德明教授担任主编。第一、二章由王德明教授与王凯教授合编,第四、五章由左树勋高工编写,第三、七章由周福宝副教授编写,第六章由王德明教授和周福宝副教授合编,第八章由杨胜强教授编写,第九章由秦波涛博士编写,第十三章由张壮路高工(煤炭科学研究总院西安分院)编写,第十四章由王立兵高工(大同矿业集团救护大队)与秦波涛博士合编,第十、十一、十二章由王德明教授编写,最后王德明教授对全书进行了总审定稿。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任万兴、陈建华、仲晓星、刘桂智、郭小云、奚志林、戚绪尧、张玉涛的大力帮助，他们为完成此书付出了大量艰辛的劳动。

在本书的编写过程中，中国煤炭工业协会给予了大力支持和帮助；在本书编写中，邀请了方裕璋教授等对编写大纲进行了审核；书稿完成后，又邀请了周心权教授对全书进行了审核。在本书完成之际，作者对煤炭工业协会有关领导，对方裕璋、周心权教授表示衷心的感谢！特别是周心权教授在百忙中抽出时间对全书进行了认真审核，提出了许多宝贵的意见，作者特向他表示诚挚的感谢！本书在出版过程中，还得到了中国矿业大学出版社的解京选社长、马跃龙编辑的热情支持和帮助，作者在此一并致谢。

编 者

2005年12月于徐州

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 前言                 | 1   |
| 第一章 矿内空气           | 1   |
| 第一节 矿内空气成分及其基本性质   | 1   |
| 第二节 矿内空气的主要物理参数    | 6   |
| 第三节 矿井气候           | 9   |
| 复习思考题与习题           | 19  |
| 第二章 矿内空气动力学基础      | 20  |
| 第一节 流体的概念          | 20  |
| 第二节 风流能量与能量方程      | 21  |
| 第三节 风流压力及压力坡度      | 26  |
| 复习思考题与习题           | 34  |
| 第三章 矿井通风阻力         | 35  |
| 第一节 风流的流动状态        | 35  |
| 第二节 摩擦阻力           | 36  |
| 第三节 局部阻力           | 45  |
| 第四节 通风阻力定律和特性      | 47  |
| 第五节 通风阻力测量         | 50  |
| 复习思考题与习题           | 59  |
| 第四章 通风动力           | 61  |
| 第一节 自然风压           | 61  |
| 第二节 矿用通风机类型及构造     | 64  |
| 第三节 通风机工作参数与个体特性曲线 | 68  |
| 第四节 通风机比例定律与类型特性曲线 | 74  |
| 第五节 矿井主要通风机附属装置    | 76  |
| 第六节 矿井主要通风机联合运转    | 82  |
| 第七节 矿井主要通风机性能测定    | 88  |
| 复习思考题与习题           | 95  |
| 第五章 局部通风           | 97  |
| 第一节 局部通风方法         | 97  |
| 第二节 局部通风装备         | 103 |
| 第三节 局部通风系统设计       | 111 |

|            |                    |     |
|------------|--------------------|-----|
| 第四节        | 局部通风技术管理及安全措施      | 112 |
|            | 复习思考题与习题           | 117 |
| <b>第六章</b> | <b>通风网络风量分配与调节</b> | 118 |
| 第一节        | 矿井通风系统图的绘制         | 118 |
| 第二节        | 风量分配基本规律           | 122 |
| 第三节        | 风网的基本形式及通风参数的计算    | 125 |
| 第四节        | 计算机解算矿井通风网络        | 132 |
| 第五节        | 矿井风量调节             | 139 |
| 第六节        | 多台通风机联合运转的相互调节     | 150 |
|            | 复习思考题与习题           | 154 |
| <b>第七章</b> | <b>采区通风</b>        | 156 |
| 第一节        | 采区通风系统             | 156 |
| 第二节        | 长壁工作面的通风方式         | 159 |
| 第三节        | 采区风量计算             | 165 |
| 第四节        | 采区通风构筑物            | 169 |
| 第五节        | 采区专用回风巷            | 172 |
| 第六节        | 减少漏风的措施            | 175 |
|            | 复习思考题              | 177 |
| <b>第八章</b> | <b>矿井热害</b>        | 178 |
| 第一节        | 概述                 | 178 |
| 第二节        | 矿井热源               | 178 |
| 第三节        | 矿山热环境              | 184 |
| 第四节        | 通风降温方法             | 191 |
| 第五节        | 矿井空调系统             | 193 |
|            | 复习思考题              | 198 |
| <b>第九章</b> | <b>矿井通风系统设计</b>    | 199 |
| 第一节        | 矿井通风系统的拟定          | 199 |
| 第二节        | 矿井风量的计算和分配         | 204 |
| 第三节        | 矿井通风阻力计算           | 212 |
| 第四节        | 矿井通风设备选型           | 213 |
| 第六节        | 生产矿井的通风系统改造        | 216 |
| 第七节        | 矿井通风系统安全性评价        | 218 |
|            | 复习思考题              | 220 |
| <b>第十章</b> | <b>矿井瓦斯</b>        | 221 |
| 第一节        | 概述                 | 221 |
| 第二节        | 瓦斯的赋存与含量           | 222 |
| 第三节        | 瓦斯在煤岩中的流动          | 235 |
| 第四节        | 矿井瓦斯涌出             | 244 |
| 第五节        | 矿井瓦斯爆炸及其预防         | 252 |

|                   |            |
|-------------------|------------|
| 第六节 矿井瓦斯抽放        | 262        |
| 第七节 瓦斯喷出与突出及其防治   | 282        |
| 第八节 瓦斯浓度检测        | 299        |
| 复习思考题             | 307        |
| <b>第十一章 矿井火灾</b>  | <b>308</b> |
| 第一节 概述            | 308        |
| 第二节 外因火灾          | 308        |
| 第三节 内因火灾          | 317        |
| 第四节 内因火灾的预防       | 329        |
| 第五节 矿内灭火          | 351        |
| 复习思考题             | 360        |
| <b>第十二章 矿尘</b>    | <b>362</b> |
| 第一节 概述            | 362        |
| 第二节 矿尘性质          | 364        |
| 第三节 矿山尘肺病         | 377        |
| 第四节 煤尘爆炸及其预防      | 382        |
| 第五节 矿山综合防尘        | 395        |
| 第六节 矿尘测量          | 402        |
| 复习思考题             | 406        |
| <b>第十三章 矿山救护</b>  | <b>408</b> |
| 第一节 概述            | 408        |
| 第二节 矿山救护技术装备      | 409        |
| 第三节 矿山救护工作        | 417        |
| 第三节 矿工自救          | 422        |
| 第四节 现场急救          | 424        |
| 复习思考题             | 426        |
| <b>第十四章 矿井防治水</b> | <b>427</b> |
| 第一节 概述            | 427        |
| 第二节 矿井涌水量预测       | 431        |
| 第三节 矿井水害防治        | 434        |
| 第四节 突水及其预测        | 438        |
| 复习思考题             | 443        |
| 参考文献              | 444        |



# 第一章 矿内空气

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,并有适宜的气候条件。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。

本章重点阐述矿内空气成分及其性质、主要物理参数以及矿内气候条件。

## 第一节 矿内空气成分及其基本性质

### 一、矿内空气的主要成分

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,干空气各组分数量基本不变(表 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 干空气主要成分

| 气体成分                      | 按体积计/% | 按质量计/% |
|---------------------------|--------|--------|
| 氮气(N <sub>2</sub> )       | 78.13  | 75.51  |
| 氧气(O <sub>2</sub> )       | 20.90  | 23.17  |
| 二氧化碳(CO <sub>2</sub> )    | 0.03   | 0.05   |
| 氩气(Ar)                    | 0.93   | 0.91   |
| 其他(水蒸气、惰性稀有气体和微量的灰尘与微生物等) | 0.01   | 0.16   |

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,有时还混入一些有害气体和物质,如瓦斯(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 1.11。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。

氧与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,而细胞的新陈代谢过程是靠人吃进食物和吸入空气中的氧,在体内进行氧化来维持的。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。一般来说,人在休息时平均需氧量为 0.25 L/min,进行工作和行走时为 1~3 L/min。

矿内氧气来源于进入矿井的地面大气所固有的氧含量。矿内各有机物(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,井巷内不断释放出的各种有害气体,也会相对地降低氧气的浓度。但是,只要是通风良好的巷道,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内,氧浓度才可能显著降低。人们在进入上述巷道之前,必须先进行气体检查,否则不能贸然进入。

空气中氧浓度对人的健康影响很大。最有利于呼吸的氧浓度为 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,严重时可能因缺氧而死亡。人体缺氧症状与空气中氧浓度的关系如表 1-2 所列。

表 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,如不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(N<sub>2</sub>)

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。在废弃的旧巷或隔离火区内,可积存大量的氮气,使氧浓度相对减少,使人因缺氧而窒息。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(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,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,使水溶液呈弱酸性,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,所以在急救受到有害气体伤害的患者时,常常首先让其吸入含有 5% 二氧化碳的氧气以增强呼吸。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 1-3 所列。

矿井内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,爆破工作,矿内火灾,煤炭自燃以及瓦斯(煤尘)爆炸。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月曾发生一次二氧化碳和岩石突出,突出岩石1 005 t、二氧化碳11 000 m<sup>3</sup>。法国也曾发生过二氧化碳突出的事故。

《规程》规定:采掘工作面的进风流中,二氧化碳浓度不超过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浓度超过0.75%时,必须查明原因,进行处理。

表 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           |

## 二、矿内空气中常见的有害气体

矿井内常见的有害气体有一氧化碳、硫化氢、二氧化氮、二氧化硫、氨气及瓦斯等。下面分别作具体介绍。

### 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、神经有害的毒物。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(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。

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接触的时间(见表1-4、图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,实验也证明一氧化碳还可引起慢性中毒。

矿内爆破作业、煤炭自燃以及发生火灾或煤尘、瓦斯爆炸时都能产生一氧化碳。

《规程》规定其最高容许浓度为0.002 4%。

### 2. 硫化氢(H<sub>2</sub>S)

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%时即可嗅到,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1体积的水可溶解2.5体积的硫化氢,所以它可能积存于旧巷的积水中。硫化氢能燃烧,空气中硫化氢浓度为4.3%~45.5%时有爆炸危险。

表 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 内发生体温和血压下降,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。半小时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                                       |

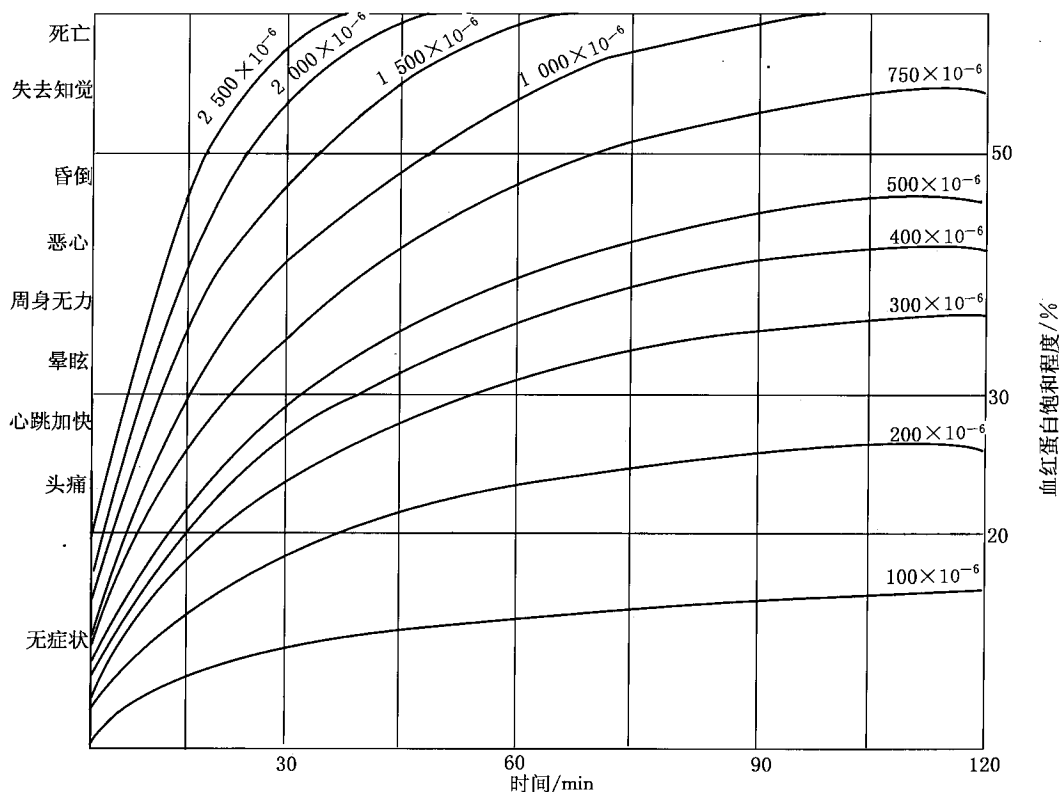


图 1-1 CO 对人体身体状况的影响

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 1-5 所列。

表 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    | 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释放出。另外,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( $\text{NO}_2$ )

二氧化氮是一种褐红色的气体,有强烈的刺激性气味,对空气的相对密度为 1.59,易溶于水生成  $\text{HNO}_3$ ,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 1-6 所列。

表 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:氮氧化物不得超过 0.000 25%。

### 4. 二氧化硫( $\text{SO}_2$ )

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 1.433 7,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二氧化硫,有时含硫矿层也会涌出二氧化硫。

二氧化硫能被眼结膜和上呼吸道黏膜的富水黏液吸收,刺激眼黏膜和鼻咽部等黏膜;在潮湿的矿内,能与空气中水分结合,缓慢地形成硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ),使其刺激作用更强。当空气中浓度为 $(0.3\sim 1)\times 10^{-6}$ 时,健康人可由嗅觉感知,使呼吸道轻度收缩,呼气受阻; $(4\sim 6)\times 10^{-6}$ 时,则对鼻咽部及呼吸道黏膜有强烈刺激作用。长时间在二氧化硫浓度为 $(5\sim 10)\times 10^{-6}$ (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,发生声门水肿和呼吸道麻痹,浓度为 $(400\sim 500)\times 10^{-6}$ 时会立即危及生命。

《规程》规定:矿内空气中二氧化硫最高容许浓度为 0.000 5%。

### 5. 氨气( $\text{NH}_3$ )

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:矿内空气中氨气最大容许浓度为 0.004%(3 mg/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。

### 6. 瓦斯( $\text{CH}_4$ )

瓦斯的主要成分是甲烷( $\text{CH}_4$ ),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 CH<sub>4</sub> 的浓度不能大于 0.5%,采掘工作面和采区的回风流中 CH<sub>4</sub> 的浓度不能大于 1.0%,矿井和一翼的总回风流中 CH<sub>4</sub> 的最高容许浓度为 0.75%。

7. 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硐室均会产生;其最高容许浓度为 0.5%。

8. 其他有害物质

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,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 1-7 的规定。

表 1-7 作业场所空气中粉尘浓度标准

| 粉尘中游离 SiO <sub>2</sub> 含量/% | 最高允许浓度/mg·m <sup>-3</sup> |       |
|-----------------------------|---------------------------|-------|
|                             | 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的矿井柴油机排出的废气都会污染矿内空气,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。

第二节 矿内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:

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

式中 m——空气的质量,kg;

V——空气的体积,m<sup>3</sup>;

ρ——空气的密度,kg/m<sup>3</sup>。

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<sub>0</sub> 为 101 325 Pa、气温为 0℃(273.15 K)时,干空气的密度 ρ<sub>0</sub> 为 1.293 kg/m<sup>3</sup>。

湿空气的密度是 1 m<sup>3</sup> 空气中所含干空气质量和水蒸气质量之和:

$$\rho = \rho_d + \rho_v \quad (1-2)$$

式中  $\rho_d$ ——1 m<sup>3</sup> 空气中干空气的质量, kg;

$\rho_v$ ——1 m<sup>3</sup> 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:

$$\rho = 0.003484 \frac{p}{273+t} \left( 1 - \frac{0.378\varphi p_s}{p} \right) \quad (1-3)$$

式中  $p$ ——空气的压力, Pa;

$t$ ——空气的温度, °C;

$p_s$ ——温度  $t$  时饱和水蒸气的分压, Pa;

$\varphi$ ——相对湿度, %。

### 二、比体积(注:过去叫比容,该名称现已废弃)

空气的比体积是指单位质量空气所占有的体积,用符号  $v$ (m<sup>3</sup>/kg)表示,比体积和密度互为倒数,它们是一个状态参数的两种表达方式,即:

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

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,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  $u$  做层流流动时,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 所示。

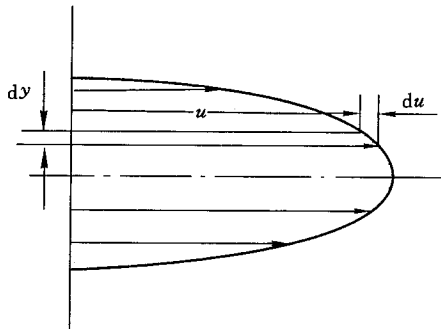


图 1-2 空气的黏性

在垂直流动方向上,设有厚度为  $dy$ (m),速度为  $u$ (m/s),速度增量为  $du$ (m/s)的分层,在流动方向上的速度梯度为  $du/dy$ ,由牛顿内摩擦定律:

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

式中  $f$ ——内摩擦力, N;

$S$ ——分层之间的接触面积, m<sup>2</sup>;

$\mu$ ——动力黏度(或称绝对黏度), Pa·s,它随着气温和气压而变化。

另外,在矿井通风中还常用运动黏性系数,用符号  $\nu$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )表示气体的黏度,这个系数和动力黏度  $\mu$  有以下关系:

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

式中  $\rho$ ——气体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

流体黏度随温度和压强而变化。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,黏性主要源于层间分子的能量交换。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 1-3 所示。

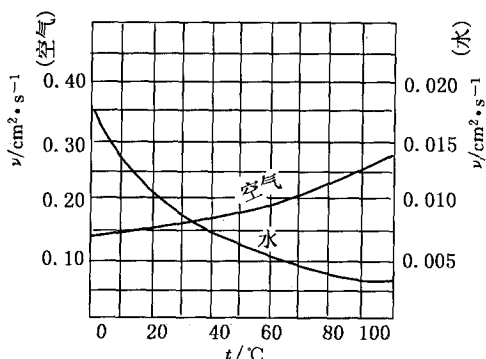


图 1-3 空气与水的黏性随温度的变化规律

在实际应用中,压力对流体的黏性影响很小,可以忽略。在考虑流体的可压缩性时常采用动力黏度  $\mu$  而不用运动黏度。表 1-8 为几种有关流体的黏度。

表 1-8 几种流体的黏度 (0.1 MPa, 20 °C)

| 流体名称                | 动力黏度 $\mu/\text{Pa} \cdot \text{s}$ | 运动黏度 $\nu/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
|---------------------|-------------------------------------|---|
| 空气                  | $1.808 \times 10^{-5}$              | $1.501 \times 10^{-5}$                    |
| 氮气( $\text{N}_2$ )  | $1.76 \times 10^{-5}$               | $1.41 \times 10^{-5}$                     |
| 氧气( $\text{O}_2$ )  | $2.04 \times 10^{-5}$               | $1.43 \times 10^{-5}$                     |
| 甲烷( $\text{CH}_4$ ) | $1.08 \times 10^{-5}$               | $1.52 \times 10^{-5}$                     |
| 水                   | $1.005 \times 10^{-3}$              | $1.007 \times 10^{-6}$                    |

#### 四、比热容

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或比热容。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比热容,定义式为:

$$c = dQ/dT, \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-7)$$

比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,比热容的单位也不



同。通常采用的物量单位有：质量(kg)、标准容积(Nm<sup>3</sup>)和千摩尔(kmol)。因此，相应的就有质量比热容、容积比热容和摩尔比热容之分。

质量比热容的符号是  $c$ ，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 J/(kg·K)。

容积比热容的符号是  $c'$ ，表示 1 Nm<sup>3</sup> 体积空气升高或降低 1 K 时所吸收或放出的热量，单位是 J/(Nm<sup>3</sup>·K)。

摩尔比热容的符号是  $C$  或  $MC$ ，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 J/(kmol·K)。

三种比热的换算关系是：

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

式中  $M$ ——气体的分子量；

$\rho_0$ ——气体在标准状态下的密度，g/m<sup>3</sup>。

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。

气体的比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。比热容相应地分为比定容热容( $c_v$ )和比定压热容( $c_p$ )。 $c_v$  和  $c_p$  值分别表示为：

$$c_v = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_v, \quad c_p = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_p \quad (1-9)$$

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，故比定压热容  $c_p$  总是大于比定容热容  $c_v$ 。理想气体的比热容也是温度的单值函数，比热容随温度的升高而增大。不同温度时，空气的  $c_v$  和  $c_p$  的数值如表 1-9 所列。

表 1-9 空气的比热容

| 比热容 \ 温度   | -10 °C  | 0 °C    | 15 °C   | 30 °C   | 80 °C   |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| 比定容热容<br>$c_v/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | 0.707 6 | 0.711 8 | 0.711 8 | 0.715 9 | 0.720 1 |
| 比定压热容<br>$c_p/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | 0.996 5 | 1.000 6 | 1.000 6 | 1.000 6 | 1.000 9 |

令  $c_p/c_v = \gamma$ ，这个比值称为气体的比热比，或称为绝热指数，每种气体各有一个几乎不变的  $\gamma$  值，对于空气， $\gamma \approx 1.41$ 。

### 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。