

Theory and Engineering
Design of Mine Cooling

矿井降温理论 与工程设计

卫修君 胡春胜 主编

煤炭工业出版社

矿井降温理论与工程设计

Theory and Engineering Design of Mine Cooling

主 编 卫修君 胡春胜
副主编 张建国 周秀隆 王德银 李广民
参 编 (以姓氏笔画为序)
万 昌 刘兴晖 刘桂平 陈启永
张革伟 欧阳广斌 郭建伟

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

前 言

随着矿井开采深度的不断增加，井下工作地点环境温度越来越高，高温环境导致工作效率低、工人健康受损、机电设备使用寿命降低和严重的安全隐患。中国是世界上高温热害矿井最多的国家。据不完全统计，我国已有 130 多对矿井的采掘工作面风流温度超过 30°C ，同时已探明的煤炭储量中，1 000 ~ 2 000m 深处的煤炭储量占总储量的 53.2%。如此多的热害矿井，如果不研究出成熟的降温技术和装备，煤炭资源的开采和利用就会很困难，结果是影响整个国民经济的可持续发展。因此矿井高温热害已经成为一个不容忽视且急需解决的问题。

20 世纪 20 年代，机械制冷首次应用于巴西的 Morro Velho 矿；1936 年同样的技术应用于印度的 Ooregum 矿；1940—1960 年南非的 Witwatersrand Deep Level Gold 矿采用了机械制冷降温；集中制冷站于 1976 年第一次建于德国。在过去的二三十年里，美国和澳大利亚的一些矿建成了一大批小规模制冷站。目前，南非最深的矿井已达 3 000m 以上，工作地点温度高达 $40 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

中国在矿井降温领域的研究还得追溯到 20 世纪 60 年代，目前已有平煤集团四矿、五矿、六矿及新汶孙村矿等几座矿井装备制冷设备，就降温效果、可靠性、高效性而言，平煤集团四矿降温系统应该排在第一位。作为国内最早遇到矿井高温并成立专门研究机构的单位之一，平煤集团在治理矿井热害方面积累了一些经验，并取得了一批成果。同时国际上矿井降温技术突飞猛进，为把这些经验和先进技术推向全国，我们组织了国内高校、设计院和生产单位的矿井降温专家、学者、教授编写了《矿井降温理论与工程设计》一书。全书共分为 9 章，前 8 章为湿空气的性质、矿井热流计算理论和方法、矿井通风与降温规划设计、矿井降温的理论与设备技术、

矿井降温实践、冷冻水管网、矿井水质管理、矿井降温系统监测监控技术及仪表等理论与一般性知识。第9章给出了国内具有代表性的平煤集团五矿和六矿、新汶孙村矿的矿井降温工程实例。

全书的整体构思、统稿和审定由卫修君、胡春胜负责。其他参加编著的人员有周秀隆、万昌、张建国、王德银、欧阳广斌、刘兴晖、陈启永、张革伟、刘桂平。各章编写分工为：第1章，卫修君、胡春胜、万昌；第2章，胡春胜、周秀隆；第3章，卫修君、张建国、欧阳广斌；第4章，胡春胜、刘兴晖；第5章，卫修君、胡春胜、王德银、张革伟、陈启永；第6章，胡春胜、刘桂平、欧阳广斌；第7章，胡春胜、欧阳广斌；第8章，万昌、张革伟、刘桂平、李广民；第9章及附录由胡春胜、张革伟、李广民、郭建伟等完成。此外，中煤国际工程集团武汉设计研究院的其他人员也参加了部分章节的编写。

在本书出版之际，尤其要感谢平煤集团天安四矿、平煤集团技术中心和武汉星田热环境控制技术有限公司的技术人员，他们为本书的编写和出版提供了巨大的帮助。

作为一本实用新型参考书，书中难免存在缺点、错误，敬请读者发邮件至 cs-hu@sohu.com，以帮助作者改正，使之更臻完善。

卫修君 胡春胜

2007年9月

内 容 提 要

本书总结了国内外矿井降温领域最近 20 年来的科技发展成果,以理论研究、工程设计、设备研发及工程实践为主线,分为 9 章。第 1 章、第 2 章分别对矿井湿空气的性质和矿井热流计算理论和方法进行了论述;第 3 章概述了矿井通风与降温设计要点;第 4 章阐明了矿井降温的理论与技术设备;第 5 章为矿井降温实践,结合国内外典型矿井降温工程提出了矿井降温的新途径和方法;第 6 章、第 7 章分别介绍了矿井降温系统相关的技术学科,即冷冻水管网和矿井水质管理;第 8 章介绍了矿井降温系统监测监控技术及仪表;第 9 章为国内具有代表性的平煤集团五矿和六矿、新汶孙村矿的矿井降温工程实例。本书可供从事矿井降温工作的技术人员和管理人员使用,也可供矿井降温领域的科研、设计人员和高等院校师生参考。



作者简介

卫修君 (1952—)，男，河南省唐河县人。华中科技大学在读博士，教授级高级工程师，享受国务院政府特殊津贴，2007年孙越崎能源大奖获得者，河南省优秀专家。1978年8月毕业于焦作矿业学院，1997年6月在中国矿业大学获硕士学位。大学毕业后即到平顶山矿务局工作，先后任平煤集团六矿技术员、副总工程师、总工程师等职，1998年任平煤集团八矿矿长，2000年4月任平煤集团副总工程师兼总工程师办公室主任，2004年4月任平煤集团总工程师。

主持和参加了40多项科技攻关与课题研究。其中，“矿井瓦斯综合治理示范工程配套技术研究”获河南省科技进步一等奖；“平顶山矿区构造演化和瓦斯地质规律研究”获煤炭工业十大科技成果奖；“KJ45安全生产综合信息系统”获国家煤炭工业局科技进步二等奖；“长距离三软煤层锚网支护的研究与应用”、“平顶山八矿构造物理环境及瓦斯灾害预测预防”获河南省科技进步二等奖；“大倾角、大断面三软煤层复合顶板巷道支护技术的研究与应用”获煤炭工业科技进步二等奖；“高地应力破碎带松软岩层大断面巷道锚网支护技术的研究与应用”获河南省科技进步三等奖。主编《煤矿安全技术基础管理规定》一书，发表《复杂困难条件下的巷道支护》、《高效集约化矿井建设的研究与应用》等学术论文。

近年来，主持开发的矿用制冷降温系列设备在国内外得到推广和应用，在煤矿企业的安全生产中起了重要作用；申报国家实用新型专利5项。



作者简介

胡春胜 (1962—), 男, 湖北省鄂州市人。科技部“863”项目评审专家、河南省矿山工程技术专家。曾获国家科技进步奖、省级优秀设计奖、武汉市优秀科技青年创业奖、武汉市新长征突击手、煤炭工业部专业技术拔尖人才等荣誉及称号。

1988年研究生毕业于武汉理工大学资源与环境工程学院, 并获工学硕士学位; 1988—2003年在中煤国际武汉设计研究院从事矿井降温、矿井热害研究与设计、矿业工程总承包工作; 目前, 受聘为武汉理工大学土木工程与建筑学院教授、硕士生导师, 主要从事建筑节能与环境控制技术、地下工程热湿环境控制技术、冰降温空调工艺三个领域的研究。

在国内外发表科技论文18篇, 获省部级科技成果特等奖一项、二等奖一项(排名第一)、三等奖4项(排名第二至第六); 主持或参与了国家有关矿井热害治理的规程、规范和设计手册的编写; 完成了国内外40多项建筑中央空调工程及矿井降温工程的设计与研究项目; 主持开发的矿用高压组合式空冷器、矿用制冷设备在国内外得到推广和应用, 在煤矿企业的安全生产中起了重要作用; 申报国家实用新型专利5项。

目 次

1 湿空气研究	1
1.1 概述	1
1.2 湿空气热力学参数	2
1.3 空气中水蒸气的测量	6
1.4 湿球温度计原理	7
1.5 湿空气的其他热力关系	8
1.6 焓湿图及应用	10
1.7 空气热力参数数字平台	16
2 地下工程热流计算	19
2.1 概述	19
2.2 岩热	19
2.3 矿井通风网络风流热力参数预测计算软件	31
2.4 计算实例	49
2.5 国内外相关法规介绍	50
3 通风与降温设计与规划	53
3.1 概述	53
3.2 系统分析法	53
3.3 深热矿井风量与制冷量规划	54
4 矿井降温理论	60
4.1 概述	60
4.2 制冷系统	60
4.3 压-焓图	61
4.4 制冷剂 and 载冷剂的性质	67
4.5 溶液热力学基础	116
4.6 制冷系统构成	119

4.7	仪器仪表	124
4.8	循环变化	125
4.9	冷却塔和喷淋硐室	127
4.10	冷却盘管	135
4.11	制冷站性能分析	141
5	矿井降温实践	143
5.1	概述	143
5.2	背景	143
5.3	冷量分布	143
5.4	制冷站位置	144
5.5	制冷设备开发及应用	148
5.6	冷凝器冷却塔的设计	156
5.7	用冷	158
5.8	管道保温	165
5.9	水处理	172
5.10	储能技术	172
5.11	新概念	172
5.12	结论	173
6	冷冻水管网	174
6.1	概述	174
6.2	管网内水的特性	174
6.3	管网系统	177
6.4	管道系统	179
6.5	服务用水冷却系统中流量和水池规格的计算	184
6.6	井筒降温装备	185
6.7	管道收缩	193
6.8	排气	194
6.9	泄漏探测及控制	194
6.10	控制系统	195
7	矿井水质管理	197
7.1	概述	197
7.2	水的特性	198

7.3	水系统控制	200
7.4	饮用水	201
7.5	矿井水	203
7.6	其他采矿作业用水	205
7.7	与水相关问题的管理	205
7.8	水系统管理	212
8	降温系统监测与监控	213
8.1	概述	213
8.2	监测系统的组成	214
8.3	监测技术在矿井的一些具体应用	218
8.4	发展状况	220
8.5	监测系统选择与运行的几个相关因素	222
9	国内典型的矿井降温工程简介	224
9.1	平煤五矿矿井综合降温工程	224
9.2	新汶孙村矿-800m 五采区降温工程	242
9.3	平煤六矿制冰降温工程	250
附录 A	基本概念	261
附录 B	矿井降温领域常用单位换算表	265
附录 C	矿井降温系统常用管材及密封件	267
参考文献		272

1 湿空气研究

1.1 概述

地球大气层中不受周围环境污染的空气，其组成是恒定的。空气成分分析是在采样的空气中除掉水蒸气进行的，无水分空气的构成见表1-1，其中单原子气体中氩的比重最大；分子质量实际指的是氩分子的质量。

表1-1 干空气成分

气 体	体积分数/%	质量分数/%	相对分子质量
氮	78.03	75.46	28.015
氧	20.99	23.19	32.000
二氧化碳	0.03	0.05	44.003
氢	0.01	0.000 7	2.016
单原子气体	0.94	1.30	39.943

在自由大气中，还存在其他气体，如水蒸气，其浓度随时间、地点的变化而变化。这是因为大气层中的水因压力、温度的变化而能以气态、液态或固态存在，分别对应云、雨及雪和冰。蒸发的水主要来自海洋，伴随着风的运动，水蒸气被输送至大气层。压力的增加、温度的下降，会导致水的凝结，从而形成云，当凝结产生的水滴足够大时将形成雨或雪。这种不同物质系统间的相互转变称为相变。

地球空气中水蒸气的浓度是变化的。研究湿空气的热力学性质及利用这些性质来分析湿空气的状态和过程，形成了一门专门的学科，即空气热力学。

在封闭空间内，包括地下工程，相变是非常重要的。地下工程内风流中湿度的变化是由于水的蒸发或凝结所引起的。本章重点讨论液态水和水蒸气的相变。地下工程中的水主要来自岩层或除尘洒水过程。地下工程回风中的湿度大于入风空气湿度，即使在盐矿也如此。

空气热力学对从事地下环境控制的技术人员而言很重要，主要基于以下两点：首先，如果要完全理解地下工程通风过程中风流的热湿交换规律，则必须考虑空气热力学过程。例如，岩层散发的热量（简称岩热）可以加热空气，但不一定使空气的温度上升，而是使空气中的水分增加，即潜热增加。反过来说，如果地下工程巷道内没有水，那么岩热就会加热风流，使风流中的空气升

温,这就叫做显热增加。这些例子说明,如果要定量预测岩热、热水、机器发热或空冷器散热(冷)对地下工程气候的影响,必须考虑湿度的影响。其次,生产中需要研究热湿对人体的影响,这在以后的章节中将作为重点研究。

1.2 湿空气热力学参数

实际工作中,采用的大多数空气热力学方程是建立在空气是理想气体混合物,同时空气是理想气体的基础上,且在人体可接受的温度和压力范围内,实际采用这一假设所引起的误差可以接受。本章讨论的大部分内容符合理想气体定律。

1.2.1 测量基础

在实际工作中,采用单位质量而不采用单位体积作为测量基础,因为压力和温度的变化,会导致通过巷道的空气体积发生变化。而假设通过巷道的空气质量流量是恒定的,则这里会出现一个问题,水的蒸发使空气中的湿度增加,或水蒸气的凝结使空气中的水分减少,将会导致空气-水混合物的质量不再恒定。

在空气-水混合物内,水蒸气与空气中的其他成分占有相同体积。在空气中添加的其他气体无化学反应的情况下,水蒸气浓度变化的结果是蒸发或凝结,空气中其他成分的质量流量不变。

1.2.2 空气含湿量

大多数情况下,把空气的含湿量(或比湿度)定义为每千克干空气中所含水蒸气的质量,以 g/kg 或 kg/kg 为单位。有时候也使用每千克湿空气所含的水蒸气的质量来表示。本书中的“空气”指纯空气成分和水蒸气的混合物,“干空气”指不含水蒸气的空气。因此,含湿量(干空气)为 0.02g/kg ,指 1.02kg 空气中,含水蒸气 0.02g 、干空气 1kg 。

为了量化每公斤干空气中的水蒸气含量,考虑下述实验:

体积为 V 的容器,内装有 1kg 的纯干空气,压力为 p ,温度为 T 。如果把质量为 X 、温度为 T 的水蒸气注入该容器,则容器内压力

$$p = p_a + e$$

式中 p_a ——干空气压力, Pa ;

e ——水蒸气分压, Pa 。

如果只能测量 p_a 和 p , 求 X , 则根据理想气体状态方程求解如下。

对于质量为 X 的水蒸气

$$eV = XR_vT \quad (1-1)$$

式中 R_v ——水蒸气的气体常数, 取 $461.50\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于原始的 1kg 干空气

$$p_a V = 1 \times R_a T \quad (1-2)$$

式中 R_a ——干空气气体常数, 取 $287.04 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

式 (1-1) 除以式 (1-2) 得

$$\frac{e}{p_a} = \frac{R_v X}{R_a}$$

因此

$$X = \frac{R_a e}{R_v p_a} = \frac{R_a e}{R_v (p - e)} = \frac{287.04 e}{461.50 (p - e)} = 0.622 \frac{e}{p - e}$$

若令空气含湿量为 X_a , 则

$$X_a = \frac{X}{m_g} = \frac{0.622 \frac{e}{p - e}}{1 \text{ kg}} = 0.622 \frac{e}{p - e} \quad (1-3)$$

式中 X_a ——空气含湿量, kg/kg ;

m_g ——纯干空气的质量, 1 kg 。

1.2.3 饱和水蒸气分压

如果在 1.2.2 节的实验中继续注入水蒸气, 水蒸气分压及绝对压力将继续增加, 但只能增加到一个极限, p_a 将维持不变。如果在保持温度恒定的前提下, 继续注入更多的水蒸气, 将会发生凝结, 当容器无法接受水蒸气时, 则容器内的状态为饱和状态, 此时的水蒸气分压为饱和水蒸气分压, 用 e_s 表示, 该压力只与温度有关, 与是否有其他气体存在无关。饱和水蒸气分压与温度的关系已从实验上证实, Goff 等人对此提出了详细地理论分析与计算。最简单的是 Clausius 方程, 关系式如下:

$$\frac{(1/e_s) de_s}{dT} = \frac{L}{R_v T^2} \quad (1-4)$$

$$L = 2502.5 - 2.386t \quad (1-5)$$

式中 L ——蒸发潜热, 即蒸发 1 kg 水需要的热量, kJ/kg 。

t ——液态水的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

在 $0 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 式 (1-5) 的计算误差在 0.02% 以内。在任意区间对式 (1-4) 积分并进行相关转换得

$$e_s = 610.6 \exp[17.27t/(237.3 + t)] \quad (1-6)$$

在 $0 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 式 (1-6) 的计算误差为 0.06% 。

1.2.4 不饱和空气的气体常量和比热

对于含有 1 kg 干空气和质量为 X 水蒸气的空气而言, 其气体定律关系式为

$$eV = XR_v T$$

$$p_a V = 1 \times R_a T$$

上述两式相加并整理可得

$$pV = (R_a + XR_v) T \quad (1-7)$$

如果把质量为 $1+X$ 的空气和水蒸气混合气体看做理想气体, 则其对应一个当量气体常量 R_m , 那么式 (1-7) 可写为

$$pV = (1+X) R_m T \quad (1-8)$$

由式 (1-7)、式 (1-8) 得

$$R_m = \frac{R_a + XR_v}{1+X} \quad (1-9)$$

根据式 (1-3), 空气-水蒸气混合气体的气体常量可用压力表达为

$$R_m = \frac{287.04p}{p - 0.378e} \quad (1-10)$$

以此类推, 当量比热为

$$C_{pm} = \frac{C_{pa} + XC_{pv}}{1+X} \quad (1-11)$$

式中 C_{pa} ——干空气定压比热, $1005\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

C_{pv} ——水蒸气定压比热, $1884\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

同样, 湿空气的定容比热为

$$C_{vm} = \frac{C_{va} + XC_{vv}}{1+X} \quad (1-12)$$

式中 C_{va} ——干空气定容比热, $718\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

C_{vv} ——水蒸气定容比热, $1422\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

1.2.5 不饱和空气的比容和密度

潮湿不饱和空气的实际比容 V_m 可以用气体定律计算:

$$V_m = \frac{R_m T}{p}$$

将式 (1-9) 或式 (1-10) 中的 R_m 代入上式, 得

$$V_m = \frac{(R_a + XR_v) T}{(1+X)p} \quad (1-13)$$

$$V_m = \frac{287.04T}{p - 0.378e} \quad (1-14)$$

式 (1-13)、式 (1-14) 中, T 的单位为 K , p 的单位为 Pa 。

在本章 1.2.1 节中, 为方便起见, 通常采用 1kg 的干空气, 而不是采用 1kg 的湿空气。因此建立在 1kg 干空气基础上的视在比容为

$$V_{m(\text{视在})} = \frac{287.04T}{p - e} \quad (1-15)$$

湿空气的密度为

$$\rho_m = \frac{1}{V_m} \quad (1-16)$$

1.2.6 相对湿度

地面供热、通风工程中，相对湿度是一个反映人体舒适感的重要参数。在地下工程中，由于温度范围较宽，作为舒适指标时，其作用有限，有时可能引起误导。相对湿度是表达空间饱和程度的指标。它可以定义为当前水蒸气分压与饱和水蒸气压力之比，即

$$rh = \frac{e}{e_{sd}} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中 e_{sd} ——空气干球温度的饱和水蒸气压力，Pa。

【例 1-1】已知风流温度为 20℃，大气压力为 100kPa，水蒸气分压为 1.5kPa，求空气含湿量、气体常量、定压比热、实际和视在比容、实际和视在密度，以及相对湿度。

解 (1) 空气含湿量采用式 (1-3) 计算，得

$$X_a = \frac{0.622e}{p-e} = \left(\frac{0.622 \times 1.5}{100 - 1.5} \right) \text{kg/kg(干空气)} = 0.009472 \text{kg/kg(干空气)}$$

(2) 气体常量采用式 (1-10) 计算，得

$$R_m = \frac{287.04p}{p - 0.378e} = \left(\frac{287.04 \times 100}{100 - 0.378 \times 1.5} \right) \text{J/(kg} \cdot \text{K)} = 288.68 \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$$

(3) 定压比热采用式 (1-11) 计算，得

$$C_{pm} = \frac{C_{pa} + XC_{pv}}{1+X} = \left(\frac{1.005 + 0.009472 \times 1.884}{1 + 0.009472} \right) \text{J/(kg} \cdot \text{K)} = 1.013 \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$$

(4) 实际和视在比容采用式 (1-14)、式 (1-15) 计算，得

$$V_m = \frac{R_m T}{p} = \left(\frac{287.04 \times (273.15 + 20)}{100 - 0.378 \times 1.5} \right) \text{m}^3/\text{kg(干空气)} = 846.25 \text{m}^3/\text{kg(湿空气)}$$

$$\begin{aligned} V_{m(\text{视在})} &= \frac{287.04T}{p-e} = \left(\frac{287.04 \times (273.15 + 20)}{100 - 1.5} \right) \text{m}^3/\text{kg(干空气)} \\ &= 854.27 \text{m}^3/\text{kg(湿空气)} \end{aligned}$$

(5) 实际和视在密度采用式 (1-16) 计算，得

$$\rho_m = \frac{1}{V_m} = 1.1816 \text{kg/m}^3 \text{(湿空气)}$$

$$\rho_{m(\text{视在})} = \frac{1}{V_{m(\text{视在})}} = 1.1705 \text{kg/m}^3 \text{(湿空气)}$$

(6) 相对湿度采用式 (1-6)、式 (1-17) 计算

$$e_{sd} = 610.6 \exp[17.27t/(237.3 + t)] = 610.6 \exp[17.27 \times 20/(237.3 + 20)]$$

$$= 2\,337.5\text{Pa}$$

$$rh = \frac{e}{e_{\text{sd}}} \times 100\% = \frac{1.5}{2.3375} \times 100\% = 64.17\%$$

1.3 空气中水蒸气的测量

测量空气中湿度的方法很多，测量仪器也有多种，总体上可归纳为 5 类。

1.3.1 化学方法

让一定量的湿空气通过装有氯化钙、硅胶或硫酸的容器，观测容器质量的增加。这种办法并不快捷，然而能直接测量空气中的水分。如果测量得当，测量结果准确度较高。

1.3.2 电子方法

在水蒸气存在的情况下，某些物质的电特性参数，如电阻、电介质常数的变化，可以用来快速显示湿度。这些仪器需要对环境温度产生的影响进行补偿。现在大都采用半导体或带电子处理器的测湿仪，其可靠性、稳定性非常好。但如果需要很精确地测量，就需要进行相关的校对工作。

1.3.3 毛发湿度计

很多有机物，如毛发、骨头或其他纤维材料，当遇到水蒸气时，其体积或伸缩性发生改变，人发对此尤为敏感。上海温度计厂生产的自计式干湿湿度计就是利用人发的这一特性而制作的。

1.3.4 露点湿度计

如果湿空气在大气压恒定时冷却，那么实际水蒸气分压保持不变，见式 (1-3)。然而下降的温度将会使对应的饱和蒸汽压力下降。这就存在一个点，在该点饱和蒸汽压等于水蒸气分压。按照传统的理论，凝结将会开始。

达到饱和条件的温度叫做露点温度。式 (1-6) 两边取对数得

$$t_{\text{露点}} = \frac{237.3 \ln \frac{e_s}{610.6}}{17.27 - \ln \frac{e_s}{610.6}} \quad (1-18)$$

露点温度计即是按上式原理设计而成的。露点温度计内有一镜面，抽出的空气样品将会通过此镜面，镜面被绕流的液体冷却，连接到镜面的温度计给出该镜面的温度读数。

1.3.5 干湿球温度计法

根据实际测量的干、湿球温度，可通过计算或查表求得露点温度。同时需要说明的是，如果测得干、湿球温度，结合大气压测量数据，可以求得任何湿

空气参数, 包括露点温度。干湿温度计的原理将在下节重点讨论。

1.4 湿球温度计原理

图 1-1 所示为质量为 $1+X$ 潮湿不饱和空气在湿球表面流动情况。当湿空气离开湿球表面时, 质量为 $1+X$ 空气的水蒸气质量从 X 增加到 X_s , 且空气变成饱和空气, 这样空气通过湿球表面时, 水蒸气含量增加 $X_s - X$ 。当水分子离开湿球表面时, 需要吸收能量。这一潜热能量传递到离开湿球的空气。蒸发冷却效应引起温度的下降, 因此湿球温度读数小于干球读数。蒸发率越大, 湿球温度越低。

由于空气温度和湿球表面间存在温差, 因此二者间存在以对流方式进行的显热交换, 热力平衡建立在湿球表面蒸发冷却的热损失与对流获得的显热相等的条件下, 湿球表面的潜热损失等于湿球获得的显热。

湿球表面的潜热损失 $q = L(X_s - X)$, 湿球获得的显热 $q = (1+X)C_{pm}(t_d - t_w)$ 。因此

$$L(X_s - X) = (1+X)C_{pm}(t_d - t_w)$$

令 $\Delta t = t_d - t_w$, 称为湿球温度降, 则上式可简化为

$$L(X_s - X) = (1+X)C_{pm}\Delta t$$

把式 (1-11) 代入上式, 得

$$X = \frac{LX_s - C_{pa}\Delta t}{C_{pv}\Delta t + L} \quad (1-19)$$

式 (1-19) 中, 右边的参数是已知的, 或可通过 p, t_d, t_w 计算得出, 因此可以很容易计算得出 X 。

根据式 (1-3) 可以求得水蒸气分压 e , 即

$$e = pX_s / (0.622 + X_s) \quad (1-20)$$

【例 1-2】已知大气压为 100kPa, 干/湿球温度分别为 30/20℃, 求湿空气的含湿量和水蒸气分压。

解 在湿球温度下:

$$L = 2502.5 - 2.386t = (2502.5 - 2.386 \times 20) \text{ kJ/kg} = 2454.78 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$e_{sw} = 610.6 \exp\left(\frac{17.27t}{237.3 + t}\right) = 610.6 \exp\left[\frac{17.27 \times 20}{237.3 + 20}\right] \text{ kPa} = 2.3375 \text{ kPa}$$

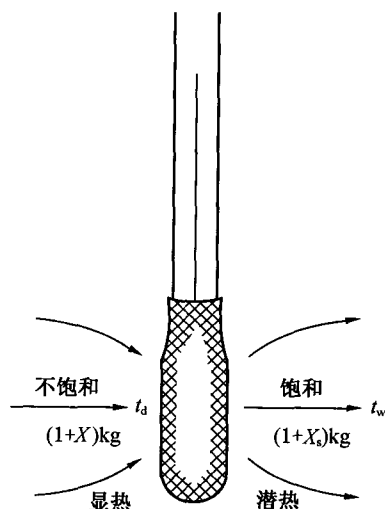


图 1-1 湿球热力平衡