

全国煤炭高职高专（成人）“十一五”规划教材

矿山热灾害防治

袁东升 王德银 仝洪昌 刘一新 主编

Kuangshan Rezaihai Fangzhi



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

五 沈

主 编	袁东升	王德银	仝洪昌	刘一新
副主编	张宏敏	付惠琪	牛国庆	冉松河
	刘贵平			
参 编	彭辉士	孙方田	杨 明	肖知国
	李振华	刘彦伟		

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书全面阐述了矿山热灾害治理技术的热力学与传质学基础、矿山地热及其利用、人体与气候的相互关系、矿内热源、矿井空气热力状态参数的预测、改善矿内气候条件的技术措施、矿井人工制冷空调系统基本原理、矿井制冷空调系统设计方法、矿井空调制冷自动控制系统设计、矿井降温新技术及典型降温工程设计实例及分析等内容。

本书可作为煤炭高等院校成人教育矿山通风与安全专业、安全工程及相关专业的教材及教学参考书,也可供从事矿井降温和矿山安全方向的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山热灾害防治/袁东升等主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2008.5

全国煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 81107 - 979 - 1

I. 矿… II. 袁… III. ①矿山通风—高等学校:技术学校—教材②矿井—地热—治理—高等学校:技术学校—教材 IV. TD72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 064926 号

书 名 矿山热灾害防治

主 编 袁东升 王德银 全洪昌 刘一新

责任编辑 孙建波 耿东锋

责任校对 张建国 章 毅

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 18.75 字数 463 千字

版次印次 2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 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)

煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材

建设委员会成员名单

主 任:李增全

副 主 任:刘咸卫 胡卫民 刘发威 王作自连

委 员:(按姓氏笔画为序) 员 委

李增全	牛耀宏	王廷弼	王自学	王宪军
刘小波	王春阁	石 兴	刘卫国	刘景山
	张 军	张 浩	张贵金	李玉文
	李兴业	李式范	李学忠	李维安
	杜俊林	陈润叶	周智仁	荆双喜
	贺丰年	郝巨才	唐又驰	高丽玲
	彭志刚			

秘 书 长:王廷弼 李式范

副秘书长:耿东锋 孙建波

煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材 矿井通风与安全专业编审委员会成员名单

主任:仵自连

副主任:孙 主

副主任:景国勋 王国际 张天驹:孙 主 隔

委员:(按姓氏笔画为序)孙 委

王永才 王永祥 王德银 仝洪昌

刘一新 刘玉洲 余明高 郑小欢

袁东升 袁 袁 袁 袁

袁 袁 袁 袁 袁 袁

袁 袁 袁 袁 袁 袁

袁 袁 袁 袁 袁 袁

袁 袁

袁 袁 袁 袁 袁 袁

袁 袁 袁 袁 袁 袁

前 言

成人教育是我国教育体系的重要组成部分,是实施科教兴国战略、培养高素质人才的重要途径,目前我国成人高等教育的总体形势是好的,但也存在一些问题,比较突出的就是教材建设问题,因此,如何编写一套针对本科层次的,适合成人学习特点的,理论与实践相结合,知识和技能并重、深浅适宜、难易适中,寓科学性、知识性、实用性、先进性于一体的教材就成为成人教育工作者的一项义不容辞的重要任务,为此,中国职工教育协会煤炭分会组织全国具有成人高等教育层次的学校来承担这项具有历史意义的教材编写使命,在协会的精心组织下,成立了成人高等学校教材建设委员会和各专业教材编写委员会,经过反复讨论,六次会议,决定了首批的32种教材的编写计划。

《矿井热灾害防治》全国煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材首批规划教材之一,本书主要面向高等成人教育本科层次编写,编写的指导思想是以实际应用为主,坚持理论联系实际的原则,突出成人教育的特点和特色,在内容上力求深入浅出,循序渐进,既有成熟的理论基础知识和基本技能,又有最新研究成果和技术,在形式上力求新颖美观,图文并茂,层次清楚,条理分明,努力做到科学性、知识性、趣味性、先进性的有机统一。

全书内容分为十章,各章节编写分工如下:前言、绪论、目录部分由河南理工大学袁东升副教授编写;第一章“矿山热害治理技术的热力学与传质学基础”由河南理工大学牛国庆副教授编写;第二章“矿山地热及其利用”由平顶山工学院张宏敏副教授和河南理工大学李振华博士共同编写;第三章“人体与气候的相互关系”由河南理工大学牛国庆副教授编写;第四章“矿内热源”由河南理工大学袁东升副教授编写;第五章“矿井空气热力状态参数的预测”由河南理工大学肖知国博士编写;第六章“改善矿内气候条件的技术措施”由河南理工大学杨明讲师和平顶山天安煤业股份有限公司五矿王德银高工编写;第七章“矿井人工制冷空调系统”由河南理工大学袁东升副教授和孙方田博士、平顶山煤业集团公司副总工程师仝洪昌高工共同编写;第八章“矿井制冷空调系统设计”由河南理工大学李振华博士和刘彦伟博士编写;第九章“矿井制冷空调自动控制系统设计”由河南省焦作技师学院付惠琪讲师编写;第十章“矿井降温新技术及典型降温工程设计实例分析”由平顶山煤业集团公司副总工程师仝洪昌高工、平顶山煤业集团公司技术中心降温室主任刘贵平高工、平顶山天安煤业股份有限

在本书的编写和出版过程中,中国煤炭教育协会王廷弼秘书长和李式范教授等给予了全过程的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!书中直接或间接地利用或引用了一些学术前辈、同行的研究成果和技术资料,在此向他们致以崇高的敬意,并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,加上成书仓促,书中难免有不当或错误之处,敬请读者不吝指正!

2007 年 12 月

绪 论	1
第一章 热力学及传热、传质基础	6
第一节 热力学基本概念和定律	6
第二节 传热学基础	9
第三节 传质学基础	14
第二章 矿山地热及其利用	16
第一节 地热成因	16
第二节 地温梯度与恒温带	28
第三节 矿区地热类型和热害等级	30
第四节 矿区深部的地温预测	32
第五节 矿山地热利用	42
第六节 地温的测量	51
第七节 岩石的热物理性质及其测定	53
第三章 人体与气候环境的相互关系	72
第一节 人体产热量及热平衡	72
第二节 气候环境与人体生理功能的影响	85
第三节 矿内气候的卫生标准	90
第四章 矿内热源	96
第一节 地面大气状态变化的影响	96
第二节 风流自压缩增焓	96
第三节 围岩与风流的热交换	96
第四节 机电设备散热	97
第五节 热水放热	98
第六节 其他热源	99
第五章 矿井空气热力状态参数的预测	100
第一节 概述	100
第二节 矿井空气的状态参数	101
第三节 矿井风流热湿计算	105

第四节	矿井空气状态参数的预测	107
第五节	采煤工作面风温预测	115
第六节	掘进工作面风温预测	118
第七节	放热系数和不稳定换热系数	119
第八节	工作面冷负荷的确定	123
第六章	改善矿内气候条件的技术措施	126
第一节	改善矿井通风条件	126
第二节	改革采煤方法和顶板管理	132
第三节	井下热水治理与利用	135
第四节	其他技术措施	137
第五节	个体防护	139
第七章	矿井人工制冷系统	142
第一节	制冷系统原理	142
第二节	制冷剂及其发展	171
第三节	载冷剂与蓄冷剂	186
第四节	矿井空调制冷系统主要设备及应用	189
第八章	矿井制冷空调系统设计	204
第一节	矿井空调系统	204
第二节	制冷站负荷计算	210
第三节	制冷站和制冷设备的选择	216
第四节	矿井空调的供水系统设计	221
第五节	矿井空调的经济分析	228
第九章	矿井制冷空调自动控制系统设计	239
第一节	自动控制基础	239
第二节	制冷系统的自动控制	247
第十章	矿井降温新技术及典型矿井降温工程设计实例分析	260
第一节	河南许昌新龙矿业有限责任公司梁北煤矿降温工程设计实例	260
第二节	平顶山天安煤业股份有限公司六矿降温工程方案	274
第三节	平顶山天安煤业股份有限公司四矿降温工程方案简介	285
参考文献		287

绪 论

一、矿井热害的定义及危害

矿井热灾害通常是指矿井内部异常的高温、高湿作业环境,由于其对矿工的身体安全、健康和生产造成危害,同时又有别于矿井其他自然灾害(如瓦斯、火灾和水灾等),故称之为矿井热害。

矿井热害对人身安全和生产带来的影响和危害主要包括:

(1) 高温对人体的影响。在高温环境下作业,人们的出汗量可达常温作业的5~10倍,大量的氯化钠、水溶性维生素、矿物盐随之排出,人体的正常水盐代谢被破坏,从而出现热痉挛等病变。人在湿热的空气中较长时间劳动,会发生中暑、昏倒、呕吐和湿疹等疾病。由于湿热环境会引起人的某种机能障碍,如晕晕欲睡、性情烦躁等,导致事故率增加。

(2) 高温会使矿石氧化加剧,使得井下气温不断升高,空气中的氧含量减少,有害气体成分增加。

(3) 井下空气高温高湿,会加剧井下材料及设备的腐烂、锈蚀及电气线路绝缘程度下降,缩短其使用寿命。井下高温使机器设备,特别是内燃设备和电气设备的工作条件恶化,致使设备效率降低,使用寿命缩短。用于常温工作的电缆、电机、电气在高温环境甚至会破坏绝缘,防爆器材也会受热变质,威胁安全。

(4) 井下高温使劳动效率下降,采矿的经济效果受到直接影响。据前苏联和德国的调研资料介绍,矿内作业环境的气温超标 1°C ,劳动生产率则下降68%;当气温超过 28°C 时,事故发生率将增长20%。

矿井热害已经成为制约煤矿安全生产和企业经济效益的重大灾害之一,热害防治已经成为煤矿安全生产中急待解决的技术问题。

二、我国矿山矿井热害的现状和趋势

我国是世界第一产煤大国,也是高温热害矿井最多的国家。开采深度的增加和机械化程度的提高,使我国高温矿井的数目越来越多,热害程度日趋严重。据统计,我国煤矿平均开采深度正以每年10 m的速度增加,按我国平均地温梯度 $0.035^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 计算,矿井围岩温度每年将增加 0.5°C ,千米深井岩温将达到 35°C 以上。1975年,我国有24对矿井出现了不同程度的热害。1988年全国普查结果表明已有65对矿井出现了高温热害问题,1991年增至67对,其中采掘面气温超过 30°C 的有38对。据不完全统计,截止到2003年,我国已有130多对矿井采掘工作面风流温度超过 30°C 。在我国预测的煤炭总储量中,有73.2%的储量其采深超过了1 000 m,由此可见,随着矿井开采深度的不断增加,矿井高温热害问题会越来越严重,这主要表现在以下几个方面:

其一,在现生产水平还未出现高温热害的矿井,下水平开采就可能出现高温热害;其二,

现生产水平仅局部出现高温热害,下一水平就有可能出现更加严重的热害问题。例如,新汶矿务局孙村煤矿,现生产水平(深 760 m)平均岩温 34.9℃,部分采掘工作面风温为 30℃~32℃,到了下一水平(深 1 050 m),岩温高达 40℃~45℃,采掘工作面风温都在 32℃~34℃,矿井需冷量将从现水平的 2 200 kW 上升到下一水平的 7 500 kW。丰城矿务局建新矿、平顶山矿务局八矿、兖州矿务局东滩矿等都存在着类似的问题。另外,随着地下采矿工业的发展,矿产资源埋藏深度越来越大。新设计矿井第一水平深度较大,矿井在投产初期便会出现高温热害问题。“八五”(第八个五年计划)期间,我国新建矿井采深超过 1 000 m 的有 10 多对。根据地热资料和风温预测结果显示,这些矿井投产后,采掘工作面风温将达 28℃~34℃。

为了控制矿井高温对人体的伤害,各个国家都制定了相应的规程及评价标准,对温度气候指标及工作时间等做出要求和规定。原西德从 1965 年开始规定,感觉温度(E. T)32℃为正常工作气温上限。荷兰禁止在干球温度为 35℃以上的环境中劳动,在 30℃以上的环境中,规定劳动时间不超过 6 h。新西兰规定湿球温度在 74°F(23.3℃)时,劳动不超过 7 h,75°F 以上时由劳资双方协商劳动条件。比利时禁止在 31℃上的条件下劳动。捷克规定湿度大于 90%时气温不超过 28℃或湿度为 80%~90%时气温不超过 30℃作为正常工作环境标准。前苏联煤矿规定在湿度大于 90%的情况下,矿井允许最高气温为 25℃,湿度小于或等于 90%情况下,矿井允许最高气温为 26℃作为正常工作环境标。

我国《煤矿安全规程》2004 版第一百零八条中对煤矿井下的作业环境提出了明确的规定^[3]:

(1) 生产矿井采掘工作面空气温度不得超过 26℃;机电硐室的空气温度不得超过 30℃;

(2) 在超温的个别地点,经采取加大风量、局部降温等措施后,仍超过本条文所规定的空气温度时,报省(区)煤炭局批准,可以适当超过空气温度的规定,在超温地点的工作人员应缩短工作时间,并给予高温保健待遇;

(3) 采掘工作面的空气温度超过 30℃,机电硐室的空气温度超过 34℃,必须采取降温措施逐步解决;

(4) 新建、改扩建矿井井下温度超过 30℃时,必须有降温设计,配齐降温设施。

矿井空气温度超过“规程”规定即为高温矿井。因此可以认为:井下空气温度超过 30℃即为高温矿井。我国《煤炭资源地质勘探地温测量若干规定》中明确指出:原岩温度高于 31℃的地区为一级热害区,原岩温度高于 37℃的地区为二级热害区。

这些标准和规程的制定对于维护劳动者的合法权利、保护职工的身体健康具有重要的现实意义,同时也为矿山热灾害治理研究工作指明了方向。

三、国、内外矿井热灾害防治理论与技术研究历史、现状及存在问题

在矿井空调中,风速的调节是靠加大通风强度来实现的,降温降湿是采用制冷设备来完成的。矿井空调是对高温矿井而言的(对于寒冷地区的矿井进行风流预热即可),因此,人们常常把矿井空调称为矿井降温。由于矿内高温高湿的作业环境对矿工的身体健康、安全 and 生产造成危害,称之为矿井热害,所以,从安全角度出发,又把矿井空调称为矿山热害治理。据此,可以说矿井空调、矿井降温和矿山热害治理具有相同的含意。

1. 国内外热灾害防治理论研究历史及现状

国外研究矿井高温问题最早是 1740 年在法国 Belfort 附近的矿山进行的地温测定。18 世纪末,英国开始系统地进行井巷围岩的温度观测,从而得出地温随深度的增加而升高的基本规律。南非早在 1919 年就开始了矿井风流热力学规律的研究。所以真正的矿井降温理论研究是始于 20 世纪 20 年代。1923 年德国的 HeistD rekopt 在假设巷道壁面温度为稳定周期变化的条件下,解析了围岩内部稳定的周期变化,提出了调热圈的概念,尽管其假定不尽合理,但这是研究矿内热环境问题的最初理论。1939~1941 年间,南非的 Biccand, Jappe 发表了《深井风温预测》等四篇论文,提出了风温计算的基本思路。1951 年英国的 Van Heerden、日本的平松、天野等人结合平巷围岩与风流的热交换,在理想化条件下提出围岩调热圈温度场的理论解,与传热学领域中 1939 年英国的 Carslaw 等人用拉普拉斯变换得出的理论解是一致的。1953 年苏联学者提出了较精确的不稳定换热系数和调热圈温度场的计算方法,1955 年平松又提出围岩与风流组成体系的传热方程式,解析出了风流温度随时间变化的近似计算式。从 20 世纪 50 年代末到 70 年代初,这一时期由于计算机的应用,矿井降温理论有了较大的发展,如:1961 年西德的 Notort 等发表了用数值计算方法描述围岩调热圈温度场的学术论文。同时矿内围岩热物理参数的测试技术也得到了初步应用,如:1964 年德国的 Mucke 用圆板状试块测定稳态导热的岩石导热系数;1967 年 Shema 在现场中对一段巷道强制加热,实测围岩中的温度分布,从实测值与理论计算值的对比中求出一些热参数;同年南非的 Starfield 等人对巷道在潮湿条件下的热湿交换规律进行了初步探讨,矿井降温理论开始向着实用化的方向迈进。

从 20 世纪 70 年代中后期开始,矿井降温形成了学科理论体系。学科理论研究迅猛发展,一些系统专著相继问世,如舍尔巴尼等著的《矿井降温指南》、平松等著的《通风学》、福斯等著的《矿井气候》等都对矿井降温理论做了较系统的阐述。而且问题的研究也深入到了采掘工作面,1971 年德国 J. Voss 等相继提出一整套采掘工作面风温计算方法,1975 年美国的 J. Mcguaid 系统地提出了控制矿内热环境的各种对策,1977 年保加利亚的 Shcherban 等对掘进工作面的风温计算做了较详尽的论述。进入 80 年代,学科研究更加提高到一个新水平,发表论文数量猛增,而且研究成果更加符合实际情况,如,日本内野用差分法求得不同巷道情况、岩性情况下调热圈的温度场,并提出了考虑入风温度变化、有水影响条件下的风温计算式,南非的 Starfield 等也提出了更为精确的不稳定传热系数的计算式,日本天野提出了较为完整的矿井降温设计的程序数学模型。

我国对矿井降温理论的研究起步于 20 世纪 50 年代,当时抚顺煤科分院在抚顺煤矿进行了地温考察和气象参数的观测,对矿内风流的热力状态进行了观测分析。到了 60 年代,随着我国高温矿井数量的增多,国内一些学者在认真学习国外经验的同时,开始结合我国实际,逐步开展了矿井降温理论的研究,但进展缓慢,有代表性的成果不多,直到 80 年代,我国矿井降温理论才有了实质性的发展,这一时期发表的有代表性的论文主要有黄翰文的《矿井风温预测的探讨》、《矿井风温预测的统计研究》,杨德元的《矿井风流的热交换》等,到了 80 年代后期,我国也形成了矿井降温的学科理论体系,相继出版了一些系统专著,如岑衍强等编著的《矿井热环境工程》,王隆平编著的《矿井降温与制冷》等,到了 90 年代,严荣林主编的《矿井空调技术》对矿井降温理论上升到空调的高度。介绍了矿井热环境的控制技术。20 世纪八九十年代期间,我国的矿山地热研究工作得到了进一步的发展。1981 年《矿山地热

概论》一书问世,有关高校的矿山通风与安全等相关专业加强了热环境工程的课程和研究内容,科研单位也以此作为研究课题。1991年余恒昌主编的《矿山地热与热害治理》较系统地对矿山内的热害来源及热害的预防及处理进行阐述。吴世跃、王英敏、秦跃平、秦风华等分别对干、湿壁巷道的传热及传质系数、不考虑水分情况下围岩与风流的不稳定换热系数进行研究。这些关键系数的研究为围岩与风流间的热量计算提供了理论上的依据和参考。1997年,武汉工业大学的侯祺棕等在考虑壁面潮湿的情况下研究了井巷围岩与风流热、湿交换的数学模型,并提出了相应的计算机模拟算法和计算框图。1991年东北工学院的刘玉顺提出受围岩散热、高度变化和含湿量变化影响的井下风流近似计算方法。2003年,贵州工业大学的袁枚、王作强、张壮新等用试算法开发出了矿井空气热力参数的计算机预测系统。90年代末至今,高建良、周西华、王继仁、梁栋等利用计算机模拟技术对掘进工作面及采煤工作面的风流流场及温度场进行了预测,其成果为进一步研究控制矿内风流热、湿环境提供了更为先进的方法。

2. 国、内外矿井降温技术研究的发展及现状

矿井高温热害的出现,严重地影响了采矿工业的发展,世界各高温矿井国家在90多年前便开始了矿井降温技术的研究。1915年在巴西的莫劳约里赫金矿建立了世界上第一个矿井空调系统,在地面建立了集中制冷站。英国是世界上最早在井下实施空调技术的国家,1923年英国的彭德尔顿煤矿第一个在采区安设制冷机,冷却采面风流。德国最早于1924年在拉德劳德(Radlode)煤矿的地面安设一台冷冻机,井下安装大型风流冷却设备最早是1953年在洛伯尔格矿。巴西莫罗维罗(Morro Velho)矿和南非的鲁滨逊矿于20世纪30年代采用集中冷却井筒入风流的方法降温,南非60年代便开始了大型矿井集中式空调。苏联、日本等国70年代开始应用制冷降温。现在,国外矿井空调制冷规模越来越大,发展迅猛。目前世界上矿井空调制冷能力最大的当属南非金矿,该国44对矿井都安装了降温用的冷冻机,1985年11月,南非金矿把冰送进井下,利用冰的溶解热(80 kcal/kg)吸热,以冷却空冷器冷却水,其制冷系统能力达到628 MW,1988年总制冷能力已超过500 MW,平均每个矿井超过11.4 MW。德国共有32对矿井,已有28对矿井采用空调降温,1986年总制冷能力达91.4 MW,1993年9月为256 MW。日本从1975~1985年总制冷能力达到4528 MW。

我国矿井降温技术的研究工作起步较晚,开始于20世纪50年代初期。1954年抚顺煤科分院与抚顺、北票、本溪、淮南等矿务局密切合作,开展了矿井测温及矿内风流热状况的测试和预测工作,这些研究作为煤矿开展降温工作奠定了基础。随后又开展了几次规模较大的矿井降温试验工作,具体如下:

- (1) 1964~1975年,在淮南九龙岗矿设计了我国第一个矿井局部制冷降温系统,为我国制冷降温技术的发展奠定了基础。同期在北票台吉矿、湖南711矿也进行了降温试点。
- (2) 1982~1987年,在山东新汶矿务局设计了我国第一个井下集中制冷降温系统(投资600万元),在制冷技术、供冷及保冷技术、传冷技术以及利用井下回风流排热技术等方面都达到了当时国内先进水平。
- (3) 1986~1991年,在平顶山八矿设计了我国第二个井下集中制冷降温系统(投资1000万元),达当时国内领先、国际先进水平。
- (4) 1992~1995年,在山东新汶矿务局设计了我国第一个矿井地面集中制冷降温系统

(投资 2 300 万元)。

(5) 2004 年,淮南矿业集团公司潘三矿降温工程。

(6) 2005 年,许昌梁北矿矿井降温工程。

(7) 2005 年,唐口煤矿千米深井降温工程。在地面建立制冰及制冷水中心,主井井筒中安装一条下冰水保温管道,主井附近设置融冰硐室;将地面生产的片冰和冷水送至融冰池,冰融化后,供冷泵将池中 -2°C 的冰水通过管道输送到采掘工作面,采用空冷器、喷淋与防尘水结合作为机组冷却用水进行散冷,降低工作面温度。

(8) 2006 年 4 月初,6 台 60 t 级制冰机运抵河南平煤集团,并被投用到矿井高温热害治理工程。这种制冰机单机产冰量 60 t/日,为目前国内单机产冰量最大的专用制冰机,是新雪矿井降温科技公司一项属国内首创的自主创新成果。这种制冰机目前被应用于矿井降温工程,在研发过程中,技术人员汇总分析了山东新汶矿业集团孙村煤矿 20 多年来在煤矿井下集中降温、局部制冷及地面水冷式集中降温工程中使用的不同机械降温的基础数据和应用技术参数,围绕改进制冰机制造工艺,提高制冰量和降温效果,一举攻破超大型制冰机运行控制技术难题。

3. 目前面临的问题

纵观国内外在矿井降温领域取得的研究成果,虽然取得了许多可喜的进展,但这些理论都存在一定的局限性,尤其是在矿井风流与围岩进行湿交换的问题上存在众多不确定因素,致使矿井热、湿计算的误差较大,就目前一般的预测方法而言,误差达到 1.5°C 。到目前为止,矿山安全技术的研究人员和管理人员对矿井开采过程中的高温问题的认识和处理还是以经验为主,不能用定量化的方法清楚地认识和预测开采范围内的地温及作业空间内的温度分布状况,从而导致不能采取有效的技术措施预防高温热害的发生。随着采矿工业的不断发展,高温热害问题将会越来越严重,因此很有必要运用科学的理论和方法,深刻认识和清楚地分析井下高温热源与风流间的热量交换情况,以便采取有效的技术措施来治理矿井高温热害。在管道输冷技术中,主要有两个问题:其一是降低管道的冷量损失;其二是减少管道的流体阻力损失。另外,如何均匀地将冷量传递给风流,也是矿井空调中要解决的一个技术难题。在制冷设备制造技术方面,国产设备故障多,维修量大,可靠性低,寿命短,空调终端设备较落后,无系列产品。在管理技术方面,存在自动化程度偏低、自动控制系统的可靠性低、管理技术水平不高等问题。除此之外,矿井空调的经济性问题,也是制约矿井热害防治技术发展的一个重要因素。

以上这些问题,将随着本学科的不断发 展逐步得以解决。

随着科学技术的不断发展,矿井降温技术也将不断进步,在治理矿井高温热害方面,将取得更加显著的成果。

参考文献

- [1] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [2] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [3] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [4] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [5] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [6] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [7] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [8] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [9] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [10] 王德林. 矿井降温技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.

第一章 热力学及传热、传质基础

第一节 热力学基本概念和定律

一、热力学第一定律及稳定流动能量方程

热力学是一门研究热能与其他形式能量之间相互转换的规律,以及热力系内、外部条件对能量转换的影响的一门学科。制冷与空调技术应用了热力学原理,服从热力学基本规律。

热力学第一定律是能量守恒和转换定律在具有热现象的能量转换中的应用。热力学第一定律指出:自然界一切物质都具有能量,它能够从一种形式转换为另一种形式,从一个物体传递给另一个物体,在转换与传递过程中能量的数量不变。

在制冷循环中,制冷剂要与外界发生热量交换和功热转换,在交换与转换过程中应遵循热力学第一定律。当制冷剂的流动情况不随时间而变时,这种系统为稳定流动系统。在稳定流动情况下,如果忽略工质进、出口速度的变化及位置高低的变化,亦即忽略工质进、出口动能及位能的变化,根据热力学第一定律,稳定流动能量方程可表示为:

$$Q+W=m(h_2-h_1) \quad (1-1)$$

式中, Q 为单位时间内加给系统的热量,kW; W 为单位时间内加给系统的轴功功率,kW; m 为流进或流出该系统工质的质量流量,kg; h_1 为工质流入系统时的比焓,kJ/kg; h_2 为工质流出系统时的比焓,kJ/kg。

焓是物质内能与流动功之和,也是热力状态参数之一,它是系统中流动物质向前传递的总能量中取决于热力状态的部分。在热工计算中,焓值只求其变量,不追究其绝对值大小。

式(1-1)表示的稳定流动能量方程可单独适用于制冷系统的每一个设备。如在制冷压缩机中,一般认为压缩过程为绝热压缩,压缩每公斤工质所消耗的外功均转变为工质比焓的增加,即 $q=0, m=1$ 时:

$$w=h_2-h_1 \quad (1-2)$$

在冷凝器和蒸发器中,工质流入、流出该设备时仅与外界进行热量交换,而无机机械功的转换,在冷凝器中工质向外界放热,在蒸发器中工质向外界吸热。从式(1-1)可知,与外界热量交换的结果也仅是引起工质焓值的变化,即:

$$q=h_2-h_1 \quad (1-3)$$

制冷剂的节流过程通常也被近似看做稳定流动过程。由于制冷剂通过小孔的时间极短,来不及与外界进行热量交换,即 $q=0$,而制冷剂节流时也未对外做轴功,即 $w=0$,因此由式(1-1)可知,制冷剂在节流过程中,节流前后制冷剂的焓值保持不变(注意:节流过程并非等焓过程),即:

$$h_2=h_1 \quad (1-4)$$

二、热力学第二定律

热力学第一定律仅指出能量转换在数量上的关系。然而遵循热力学第一定律的过程未必都能实现,还须同时遵循热力学第二定律。热力学第二定律揭示了热力过程的方向性。

热力学第二定律指出:机械功可以全部变为热,但热却不能无条件地全部转换成机械功。由此可知,利用一个热源(或冷源)无法完成循环过程。制冷剂在循环过程中除了从低温热源吸热(制冷)外,还必须向高温热源放热。第二定律又指出:不可能把热从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。这就是说,热量能自发地从高温物体传向低温物体,而不能自发地从低温物体传向高温物体。但并不是说热只能从低温物体传向高温物体,就像水一样,只要借助于外界的力量(消耗一定的机械功,引起了其他变化),也能使水从低处流向高处。这个外界的能量作用称为“补偿”过程。人工制冷过程中,由于消耗了外界一定的能量(机械能或热能)作为补偿,就能完成将热量从低温物体(被冷却介质)传向高温物体(环境介质)的过程,从而实现了制冷的目的。

三、逆向可逆循环

循环可分为正向循环与逆向循环两种。动力循环是正向循环,制冷循环都是按逆向循环工作的。在温熵图或压焓图上循环各个过程依次按逆时针方向变化,逆向循环是一种消耗功的循环。

制冷循环中,制冷剂在流动或状态变化过程中因摩擦、扰动及内部不平衡等因素而引起一定的能量损失(或不可逆损失);在蒸发器、冷凝器中因存在传热温差而引起传热能量损失(也是不可逆损失)。因而它是一个不可逆循环。

当高温热源和低温热源的温度不变时,具有两个可逆的等温过程和两个等熵过程的逆向循环称为逆卡诺循环,逆卡诺循环中没有任何不可逆损失,因而它的功耗最小。

图 1-1 示出逆卡诺循环的温熵($T-S$)图。1→2 为等熵压缩过程,2→3 为等温放热过程;3→4 为等熵膨胀过程;4→1 为等温吸热过程。循环过程中,制冷剂从被冷却对象所吸取的热量(即制冷量)为 q_0 ,循环所消耗的功为 w_0 ,消耗单位压缩功所获得的制冷量称为制冷系数 ϵ_0 ,即:

$$\epsilon_0 = \frac{q_0}{w_0} = \frac{T_0}{T - T_0} \quad (1-5)$$

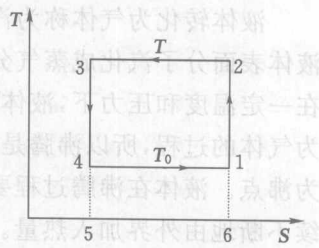


图 1-1 逆卡诺循环示意图

温熵($T-S$)图上各条线及坐标轴之间围成的面积表示热量的变化。如图 1-1 所示的逆卡诺循环中,制冷量 q_0 可表示为面积 61456,向冷凝器放热量可表示为面积 65326,循环所消耗的压缩功表示为面积 12341。故制冷系数 ϵ_0 也可通过面积 61456 与面积 12341 之比求出。

由式(1-5)可知,逆卡诺循环的制冷系数仅与高、低温热源的温度有关,而与制冷剂的热物理性质无关。一切实际循环的制冷系数 ϵ 总是小于同温热源时的逆卡诺循环的制冷系数 ϵ_0 ,两者之比值称为热力完善度,用 η 表示,即:

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1-6)$$

热力完善度恒小于1,它表示实际循环接近逆卡诺循环的完善程度。

四、物质的集态与集态变化

1. 物质的集态

物质以固态、液态和气态三种聚集状态存在于自然界中。

气态分子具有较大的动能,处于不规则的运动状态,可以均匀地充满任何形状的空间,分子间的引力和斥力都较小、因此是可被压缩的。

液态分子的动能较小,分子较密集,可近似地认为是不可压缩的。但液态的分子可以相互移位,因此液体的外形可以随容器而改变。分子间引力和斥力较大,分子运动受到一定限制。

固态物质的分子一般都呈有规律的排列,分子间不能做相对运动,只能围绕平衡位置做有限振动,因此,固体具有确定的形状和很大的密度。

2. 集态变化

物质的某一种集态依赖一定的外部条件(温度、压力等)而存在,也可在一定的外部条件下相互转化。如对冰加热,冰可融化为水,对水再加热,水可转化为蒸气。蒸气冷却时又可凝结成水,水冷却到一定程度又可凝固成冰。这种物质能量的变化引起集态的变化称为相变。物质在相变时吸收或放出的热量并不改变物质的温度,而只改变分子间的积聚状态。因此,相变过程是一个等温过程。相变中由于物质内分子要重新排列,因此需要吸收或放出热量,这种热量称为相变潜热。

固体变成液体称熔化,1 kg 物质熔化时所需吸收的热量称熔化热。当物质由液体变为固体时,也放出同样数量的热量。

物质被加热而直接由固态转变为气态时,这种现象称为升华。升华过程中所吸收的热量称为升华热。

液体转化为气体称为汽化,它有蒸发和沸腾两种不同的方式。蒸发是指在任何温度下液体表面分子汽化成蒸气分子的过程。蒸发在任何压力、任何温度下都可能发生。沸腾是在一定温度和压力下,液体内部形成许多蒸气小泡,并迅速上升,突破液体表面而破裂转化为气体的过程,所以沸腾是液体表面和内部同时进行剧烈汽化的现象,液体沸腾时的温度称为沸点。液体在沸腾过程要吸取热量,并保持其温度不变。要使沸腾过程连续进行,必须连续不断地由外界加入热量。单位质量的液体在一定温度和压力下,完全转化为蒸气所需要的热量称为汽化潜热,单位是 kJ/kg 或 kcal/kg。

制冷循环中,蒸发器内的汽化过程是沸腾过程,但往往习惯上称为蒸发过程。

液化是指蒸气受到冷却,放出热量,由气体变为液体的过程。气体变为液体由冷却和冷凝两个过程组成。由过热蒸气转变成饱和蒸气称为冷却,并不发生相变。而饱和蒸气转变为饱和液体的过程称为冷凝,冷凝时与蒸气压力所对应的饱和温度称为冷凝温度,对应的压力称冷凝压力。1 kg 蒸气冷凝成液体所需移走的热量称为冷凝热(即汽化潜热)。

3. 显热和潜热

显热是指物质被加热或冷却时,只有温度变化而无相变时所吸收或放出的热量。它可以直接从液体本身温度的变化显示出来。潜热是指物质发生相变而温度不变时吸收或放出的热量。它不能从液体本身去测量。