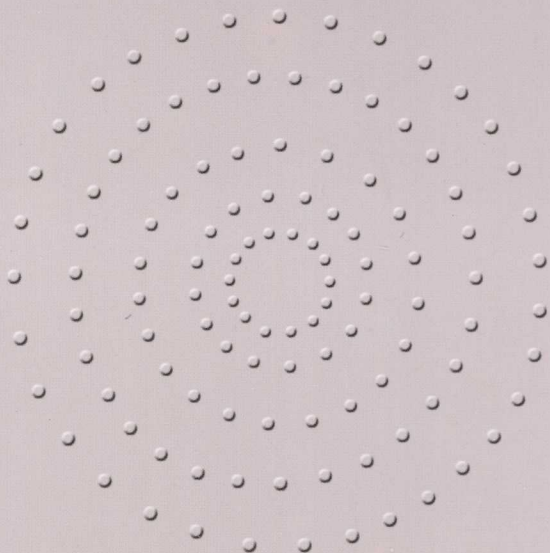


■ 胡汉华 编著

“十一五”国家重点图书出版规划项目

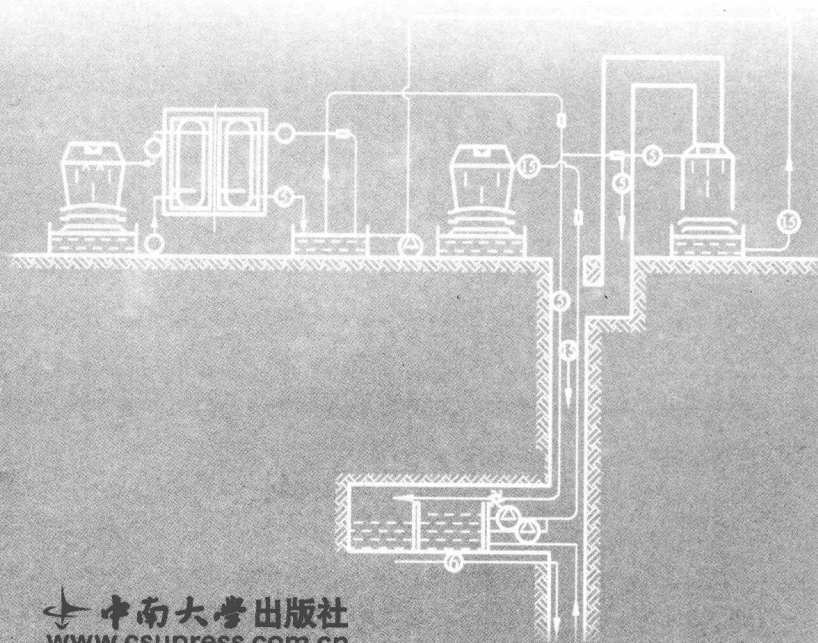
深热 矿井环境控制



◎ 胡汉华 编著

“十一五”国家重点图书出版规划项目

深热矿井 环境控制



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

深热矿井环境控制/胡汉华编著. —长沙:中南大学出版社,2009
ISBN 978-7-81105-954-0

I. 深... II. 胡... III. 矿井—热环境—环境控制 IV. TD727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 138916 号

深热矿井环境控制

胡汉华 编著

-
- ☐ 责任编辑 邓立荣 李昌佳
☐ 责任印制 文桂武
☐ 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-88876770 传真:0731-88710482
☐ 印 装 湖南大学印刷厂
-

- ☐ 开 本 880 × 1230 1/32 ☐ 印张 10.25 ☐ 字数 250 千字
☐ 版 次 2009 年 8 月第 1 版 ☐ 2009 年 8 月第 1 次印刷
☐ 书 号 ISBN 978-7-81105-954-0
☐ 定 价 38.00 元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

本书是作者在参与国家“九五”、“十五”科技攻关过程中所取得的研究成果的总结。

为了控制深井开采中出现的高温环境,首先需要计算矿井的热负荷,评价矿井热害程度,为矿井降温选择经济合理的治理方案。为此,需要研究矿井内空气与围岩的热湿交换规律。本书第2章介绍矿井空气物理学,第3章介绍矿井内热源,第5章介绍高温矿井中的风流运动能量方程即是这个目的。

矿井内的高温环境目前主要危害对象是人。人是一个十分复杂的系统。要想客观地评价人对热环境的感受非常困难,开展高温环境下的人机工程学研究很有必要。本书第4章介绍高温环境下的人机工程学。

完成热环境评价之后,自然就需要选择治理方案,本书第6章介绍通常的一些高温矿井热害控制措施;第7章介绍高温矿井通风新技术;第8章介绍矿井空调。

最后,鉴于我国目前矿井开采深度类似于南非早期的深井开采,作为借鉴,第9章介绍南非早期的矿井降温技术。

由于我国在金属矿矿井降温研究方面起步较晚,这方面的科研成果几近空白,在本书的编撰过程中参考资料相当匮乏,因而其内容的系统性不可避免受到影响,但本书是作者多年研究矿井降温的科研成果的总结,书中的内容基本上反映了我国现阶段金属矿井降温技术现状。本书的出版对矿山安全开采、资源科学利用与环境保护等方面具有重要的指导意义。

目 录

第 1 章 概论	(1)
第 2 章 矿井空气物理学	(5)
2.1 空气的物理性质	(5)
2.1.1 密度	(5)
2.1.2 比容	(5)
2.1.3 比热	(5)
2.1.4 粘性	(6)
2.2 空气的状态	(6)
2.2.1 空气的压力	(6)
2.2.2 空气的温度	(14)
2.2.3 空气的湿度	(17)
2.2.4 气体状态方程	(19)
2.2.5 焓的概念	(20)
2.2.6 湿空气的焓湿图	(21)
2.3 矿井中的热湿交换	(28)
2.3.1 热传导	(29)
2.3.2 对流换热	(33)
2.3.3 复合传热	(35)
2.3.4 空气与水之间的热湿交换	(38)
第 3 章 矿井内热源	(43)
3.1 地表大气状态的变化	(43)

3.2	空气的自压缩温升	(46)
3.3	围岩传热	(49)
3.4	机电设备放热	(50)
3.4.1	采掘机械的放热	(51)
3.4.2	提升运输设备的放热	(52)
3.4.3	扇风机的放热	(53)
3.4.4	灯具的放热	(53)
3.4.5	水泵的放热	(53)
3.5	其他热源	(54)
3.5.1	氧化放热	(54)
3.5.2	热水放热	(54)
3.5.3	人员放热	(54)
3.5.4	风动工具	(55)
第4章	高温环境下的人机工程学	(56)
4.1	人体的热平衡	(56)
4.1.1	人体的产热	(56)
4.1.2	人体散热	(59)
4.1.3	人体热平衡方程	(61)
4.2	人体的热调节与热适应	(62)
4.2.1	体温调节的基本机理	(62)
4.2.2	出汗量	(62)
4.2.3	人体的热适应	(63)
4.3	矿井内热环境的危害	(67)
4.3.1	危害人体健康	(67)
4.3.2	降低生产效率	(69)
4.4	热环境的评价	(71)
4.4.1	评价热环境的指标	(71)
4.4.2	矿井内热环境指标的安全标准	(78)

第 5 章 高温矿井中的风流运动能量方程	(81)
5.1 风流运动的能量方程	(81)
5.1.1 不可压缩性实际流体能量方程式	(81)
5.1.2 有热湿交换时的风流能量方程	(83)
5.2 能量方程的应用	(89)
5.2.1 岩壁与风流间的对流换热系数	(90)
5.2.2 不稳定传热系数	(93)
5.3 井巷的通风阻力	(98)
5.3.1 摩擦阻力	(99)
5.3.2 局部阻力和正面阻力	(106)
第 6 章 高温矿井热害控制措施	(112)
6.1 非人工制冷降温技术	(112)
6.1.1 矿井开拓部署和采区巷道布置的影响	(112)
6.1.2 回采工作面通风方式对风流温度的影响	(115)
6.1.3 采煤方法及顶板管理方法对风流温度的影响	(116)
6.1.4 增加风量对风流温度的影响	(116)
6.1.5 循环通风	(118)
6.1.6 特殊方法降温	(119)
6.1.7 控制热源	(119)
6.1.8 通风系统优化	(120)
6.1.9 个体防护	(128)
6.2 人工制冷降温技术	(131)
6.2.1 人工制冷水降温技术	(131)
6.2.2 人工制冰降温技术	(132)
6.2.3 空气压缩式制冷技术	(134)
6.2.4 矿用空冷器的发展	(134)

第7章 高温矿井通风新技术	(136)
7.1 矿井轻便空调室技术	(136)
7.1.1 矿井轻便空调室技术的基本原理	(136)
7.1.2 矿井轻便空调室关键参数的计算分析	(138)
7.1.3 轻便空调室专用空气冷却器的研制	(145)
7.1.4 矿井轻便空调室专用空气冷却器的试验研究 与改进方向	(153)
7.1.5 热帐的保温效果试验研究	(157)
7.1.6 矿井轻便空调室技术在冬瓜山铜矿的应用	(163)
7.1.7 矿井轻便空调室的经济可行性分析	(164)
7.1.8 小结	(166)
7.2 掘进巷道排热通风规律	(167)
7.2.1 概述	(167)
7.2.2 掘进工作面排热方案的优化	(168)
7.2.3 冬瓜山铜矿掘进工作面排热通风实验研究	(173)
7.3 高温矿井个体防护技术	(183)
7.3.1 个体防护技术	(183)
7.3.2 冰水冷却服的研制	(184)
7.3.3 小结	(190)
7.4 高温矿井的通风系统管理技术	(190)
7.4.1 深热矿井通风网络数字化	(191)
7.4.2 高温矿井热环境预测	(199)
7.4.3 深热矿井通风网络分析实例	(203)
7.4.4 小结	(215)
第8章 矿井空调技术	(216)
8.1 制冷原理	(216)
8.1.1 蒸汽压缩制冷循环	(216)

8.1.2	蒸汽喷射制冷循环	(220)
8.1.3	吸收式制冷循环	(221)
8.2	矿井空调的特点	(223)
8.3	矿井空调系统分类	(224)
8.3.1	制冷站设在地面的矿井空调系统	(224)
8.3.2	集中制冷站设在井下的矿井空调系统	(227)
8.3.3	井上、井下同时设制冷站的联合空调系统	(229)
8.4	矿用制冷机	(229)
8.4.1	活塞式压缩制冷机	(231)
8.4.2	回转式压缩制冷机	(233)
8.4.3	离心式压缩制冷机	(234)
8.4.4	吸收式制冷机	(237)
8.4.5	空气制冷机	(242)
8.4.6	国产矿用制冷机	(243)
8.5	空气冷却器	(244)
8.5.1	表面式空气冷却器	(245)
8.5.2	喷雾式空气冷却器	(246)
8.6	矿用制冷机的排热方法	(249)
8.6.1	利用矿井水排热	(249)
8.6.2	利用矿井回风排热	(251)
第9章	南非早期的深井降温技术	(255)
9.1	冰降温技术	(255)
9.1.1	采用冰降温的历史背景	(256)
9.1.2	经济可行性的研究	(257)
9.1.3	中试装置的研究	(261)
9.1.4	实验过程	(265)
9.1.5	结论	(267)
9.2	南非瓦尔里费斯金矿地面整体制冷站	(267)

9.2.1	系统组成	(267)
9.2.2	矿井生产的统计资料	(269)
9.2.3	制冷与网路系统概述	(269)
9.2.4	环境条件的改善及其对劳动生产率的影响	(272)
9.2.5	冷却用水	(273)
9.2.6	对类似系统改进的建议	(277)
9.2.7	结论	(278)
9.3	南非西部深水平金矿的通风降温	(278)
9.3.1	矿山概况	(278)
9.3.2	通风降温工作	(280)
参考文献		(286)
附 录		(302)
编后语		(312)

第1章 概论

随着对矿产资源的不断开发,我国的浅表矿床及开采技术条件相对简单的矿床储量不断消耗,迫使大多数矿山转入深部或复杂矿床的开采。目前,许多硬岩矿床已进入或接近深部开采的范畴,据统计,我国有三分之一的矿山即将进入深部开采。深部矿床开采的技术难点主要集中在三个方面,即深部地压(岩爆)预测与控制技术、井下热害控制技术以及强化开采技术集成。在深部矿床开采技术领域内,国内的研究工作起步较晚,没有成熟的技术和经验可借鉴。在“九五”期间,虽然开展了部分前期研究工作,但现有的采矿技术不能有效地解决深部矿床开采的问题。目前,急需研究开发适应于深部矿床开采的新工艺与新技术,同时对现有的技术进行集成与提升,以满足我国不断涌现的深部矿床开采的需要。

由此可以看出,深热矿井环境控制技术在我国深井开采技术中占有很重要的地位。

国外,南非是当今世界开采深度最大的国家。南非的威特沃特斯兰德盆地极深含金矿礁埋深达 $3\,500 \sim 5\,000\text{ m}^{[1]}$ 。在深井环境控制方面取得了大量经验,其主要经验是:在井下开拓时最大限度地优化通风系统;研制各种新型高效的粉尘、炮烟和废气净化装置,以供井下进行循环通风时利用;采取各种手段尽量隔绝井下热源向井下通风风流的热流流动,以求降低井下风温,在特别困难的情况下,采用制冷空调技术降低风温。

国内在新中国成立以后才开始深井地温研究^[2]。20世纪50年代初,煤炭科学研究院抚顺分院最先开始地温观测,1974年中科院地质所对平顶山矿区的地热问题进行过研究。“九五”期间,由长沙矿山研究院承担“九五”攻关课题“深井矿山环境控制研究”,为解

决我国深井开采的环境问题提供了良好的理论基础。但由于我国深井开采问题尚在萌芽阶段，高温矿井的环境控制问题尚未获得很好的解决。

对于深热矿井，为了改善其热环境，依其热害严重程度，一般按图 1-1 所示的思路来考虑治理措施。

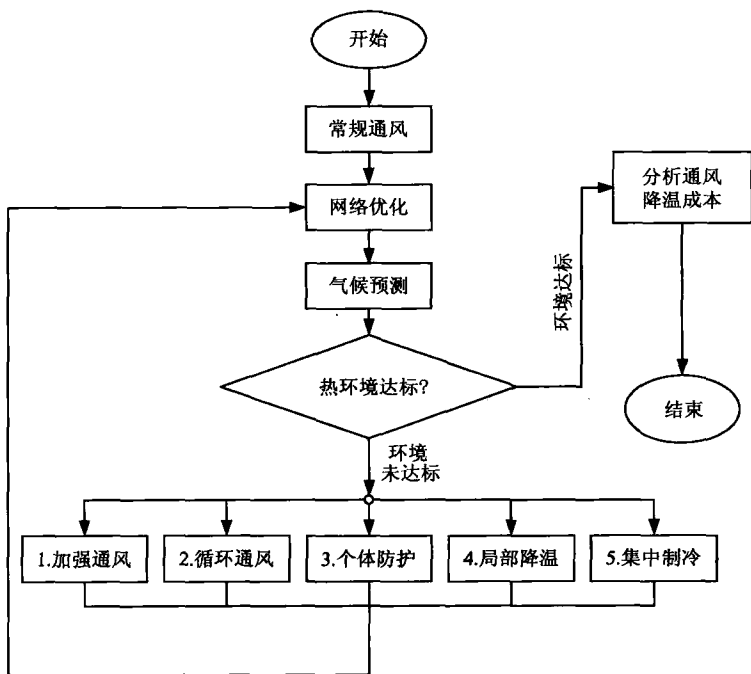


图 1-1 热害治理措施技术路线图

(1) 矿井通风 在热害不十分严重的情况下，通过加大风量通风，优化通风系统，利用调热风道等措施一般均能改善井下热环境。

(2) 隔绝热源 在热害比较严重的局部地段，例如掘进工作面，

可考虑采用隔绝热源的方法。

(3)个体防护 在热害较严重又无法采用制冷措施降温时,可用冷却服对部分接触热害时间较长的作业工人进行个体防护。

(4)局部制冷 在热害比较严重的局部地段,例如掘进工作面,也可以采用局部降温措施。

(5)集中制冷 在上述手段不能奏效的情况下,最有效的方法就是采用矿井集中制冷。

深热矿井的热环境问题是巨大的技术工程,需要几代人的刻苦努力才能获得成功。我国的深热矿井与国外相比存在如下几个特点:

1. 深度相对较小,热害尚不十分严重

我国目前深井的开采深度大多在 1 000 m 左右,井下岩温在 40 ~ 50℃ 之间。其热害尚不十分严重。

2. 通风系统复杂,管理困难

我国矿山由于机械化程度较低,因而矿场的生产能力低。为了确保生产规模,只得大量增加作业面。一些小型矿山为了各作业班组的作业计量方便,也要大量增加工作面,这使得矿井通风系统十分复杂。

3. 矿石品位低,价值不高

我国目前的深井矿山,矿石价值普遍不高,使得其经济承受能力较差,无法采用有效的集中制冷方法改善井下作业环境。

4. 我国矿井通风网络比国外复杂

由于我国矿山机械化程度较低,阻碍了矿山规模的扩大,而矿石品位不高,生产又要求有一定的规模才能保证矿山的经济效益,维持矿山的简单再生产,这就形成了我国矿山作业面多、作业面生产能力低、井下作业工人多的现状。所以,我国的矿井通风网络远比国外复杂。

由于通风网络特别复杂,没有一个矿能有一套完整的资料准确反映实际的矿井通风网络。通过通风系统调查、优化通风网络、建

立通风系统计算机管理系统等,相比国外更为重要。

5. 循环通风技术研究

由于深井开采中开凿井筒成本太高,矿山通风系统的回风井个数不会太多。风井数量少,断面小,必然导致各进回风井筒的风速超标。如欲在井下考虑采用加大风量通风的措施解决排热通风问题,势必加大这一矛盾。为解决这一矛盾,深井矿山井下必须采用循环通风技术。循环通风的关键技术在于空气的净化和循环风量的控制。

6. 井下环境调查与预测

通过井下环境调查掌握井下气候参数随时间和深度的变化规律,测定矿岩热物理参数,查明井下原岩温度的变化规律,运用计算机技术预测井下环境,确定矿山热害程度,为确定热害治理对策提供可靠依据。

7. 井下降温措施的研究与应用

通过对掘进巷道局部通风系统的改进,改善掘进作业面的作业环境,特别是开拓时期的排热通风问题。应用个体防护技术为井下高温作业人员提供有效的劳动保护;研究深部采场排热通风规律,确定其合理的排热风量;研究抑制井下热源,利用天然冷源的综合通风降温措施。

8. 我国金属矿山没有自主知识产权的个体防护服

通过文献研究发现,国外已对登月背心和冰水背心开展过研究,但我国目前在金属矿山使用冷却服解决个体防护问题上暂未见报道。

第2章 矿井空气物理学

2.1 空气的物理性质

2.1.1 密度

单位体积空气所具有的质量称为空气的密度(ρ):

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2-1)$$

式中: ρ ——空气的密度, kg/m^3 ;

M ——空气的质量, kg ;

V ——空气的体积, m^3 。

2.1.2 比容

单位质量空气所占有的体积称为空气的比容:

$$\nu = \frac{V}{M} \quad (2-2)$$

式中: ν ——空气的比容, m^3/kg ;

其他符号意义同前。

2.1.3 比热

使单位质量空气的温度升高 1°C 所需要的热量称为空气的比热(c), 它的计量单位是 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

空气在不同热力变化过程中的比热是不相同的。等容过程时, 单位质量空气温度升高 1°C 所需要的热量称为等容比热(或定容比

热) c_v ；等压过程时，空气的比热称为等压比热(或定压比热) c_p 。等容比热和等压比热均随温度变化，其变化规律见表 2-1。

表 2-1 空气比热表

温度/℃ 比热/[kJ/(kg·℃)]	-10	0	15	30	80
c_v	0.708	0.712	0.712	0.716	0.720
c_p	0.996	1.001	1.001	1.001	1.009

对于一定的气体，等压比热和等容比热的比值是个常数，即 $c_p/c_v = K$ ，空气的 $K = 1.41$ 。

2.1.4 粘性

空气抗拒剪切力的性质称为空气的粘性。流体层中相邻两层由于速度不同所产生的内摩擦阻力是产生粘性的原因。空气的粘性随温度升高而增大。

2.2 空气的状态

2.2.1 空气的压力

2.2.1.1 空气压力

1. 空气静压(静压强)

空气的静压是气体分子间的压力或气体分子对容器壁所施加的压力。空气的静压在各个方向上均相等。空间某一点空气静压的大小，与该点在大气中所处的位置和受扇风机所造成的人工压力有关。大气压力是地面静止空气的静压力，它等于单位面积上空气柱的重力。

地球被空气所包围，空气圈的厚度高达 1 000 km。靠近地球表面

空气密度大,距地球表面越远,空气密度越小,不同海拔标高处上部空气柱的重力是不一样的。因此,对不同地区来讲,由于它海拔标高、地理位置和空气温度不同,其大气压力(空气静压)也不相同。各地大气压力主要随海拔标高而变化,其变化规律如表2-2所示。

表2-2 不同海拔高度的大气压

海拔高度/m	0	100	200	300	500	1 000	1 500	2 000
大气压力/kPa	101.3	100.1	98.9	97.7	95.4	89.8	84.6	79.7

在矿井里,随着深度增加,空气静压相应增加。通常垂直深度每增加100 m就要增加1.2~1.3 kPa的压力。

2. 动压

流动空气具有一定的动能,因此风流中任一点除有静压外还有动压 H_v 。动压因空气运动而产生,它恒为正值并具有方向性。当风流速度为 $v(\text{m/s})$,单位体积空气的质量为 $\rho(\text{kg/m}^3)$,则某点风流的动压 $H_v(\text{Pa})$ 为

$$H_v = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2-3)$$

3. 全压

风流的全压即该点静压和动压的叠加。

4. 绝对压力和相对压力

根据量度空气压力大小所选择的基准不同,有绝对压力和相对压力之分。

绝对压力是以真空状态绝对零压为比较基准的压力,即以零压力为起点表示的压力,绝对压力恒为正值,标记为 p 。

相对压力是以当地某点的大气压力 p_0 为比较基准的压力,即绝对压力与大气压力 p_0 之差。如果容器或井巷中某点的绝对压力大于大气压力 p_0 则称正压,反之叫做负压。相对压力(用 H 表示)随