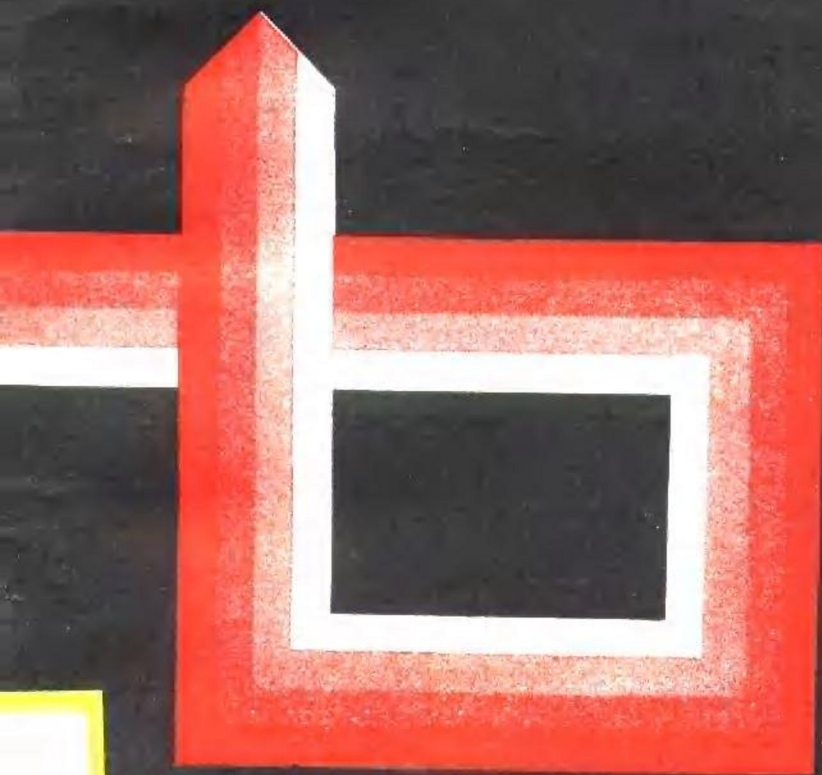


矿井气候

〔联邦德国〕约阿希姆·福斯 著

刘从孝 译



煤炭工业出版社

矿 井 气 候

基本原理、设计计算、风流冷却
矿山实际应用的工作图表及计算实例

〔联邦德国〕约阿希姆·福斯 著

刘从孝 译

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书在全面总结联邦德国矿井气候各方面情况的基础上,详细地阐述了矿井气候的基本理论、预计计算、风流计算、空调设计、矿山实际应用的工作图表和计算实例,及其最新的研究成果。本书内容丰富、理论联系实际、实用性强,可供从事煤矿及其他矿山科研、设计和生产现场的工程技术人员参考,也可作为矿业有关院校的教学参考书。

责任编辑:金连生 邓荷香

Joach VoB
GRUBENKLIMA
Verlag Glückauf GmbH Essem 1981

矿 井 气 候

〔联邦德国〕约阿希姆·福斯 著

刘 从 孝 译

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平里北街21号)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 8
字数 203千字 印数1—1,070
1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

ISBN 7-5020-0048-8/TD·46

书号 2961 定价 4.05元



译 者 的 话

《矿井气候》一书，系统地总结了联邦德国1957年以来在矿井气候方面的最新研究成果，以及在生产上的实际应用情况。本书内容丰富、文字简明、资料图表较为齐全，为了便于从事实际工作的矿井通风技术人员应用，还列举了大量的计算实例。

本书作者约阿希姆·福斯博士多年以来一直在联邦德国矿山研究中心的矿井通风及气候技术研究所从事矿井气候的研究工作，发表了数量众多的论文。本书集中了作者在这些论文中的主要观点，同时也是作者多年研究工作的总结。

《矿井气候》一书于1981年出版，近年来在联邦德国的煤矿矿井中又设计建造了不少大型的风流冷却设备，矿井气候技术有了新的发展，但基本上仍遵循本书所述的原理和方法，因而仍有较大的参考价值。

“矿井气候”是部门气候学的一个新的分支，在导论中作者对“矿井气候”作了狭义的和广义的定义，试图将气候环境、人和气候技术的相互影响进行综合研究。虽然这样的研究目前还存在一些困难，而且内容也不具体，但这个研究方向是十分有意义的。

联邦德国矿井气候技术研究工作的重点不只是停留在理论上，而是紧密结合生产实际，从其开采深度大、产量集中的具体情况出发，充分利用了联邦德国的通风技术和空调技术的成果，将研究工作的重点放在设备的研制和实用的测试技术上，有效地组织科研、设计、厂商和生产矿井联合攻关，不断地将科学技术转化为生产力。矿井气候的研究工作，几乎与开采机械化和矿井的现代化同步，保证和促进了矿井现代化的进程。

本书中对很多重要的问题只是概略地叙述，并未充分展开，有的问题也有重复，显得繁琐，是其不足之处。此外，关于矿井

气候的技术术语在国内文献中的提法并不统一，在翻译中作了必要的考证，力求做到了准确无误。由于译者的水平所限，错误在所难免，敬请读者指正。

前 言

矿井通风及矿井气候技术研究所自1957年成立以来,一直将研究工作的重点放在应用气候技术来解决矿井实际问题的试验上。首先是研究热量在围岩中的传递过程及向矿井风流转换的规律,同时也把测定石炭纪岩石及运输过程中煤炭的热物理技术特征参数作为基础研究工作。在煤矿矿井中由于水蒸发而产生的热量交换占绝对优势,所以还必须查明发生在围岩表面与风流接触部分的蒸发过程,以及巷道围岩及运输物料的水分运动过程。通过这些试验,成功地提出了一种新的能将风流的温度及湿度进行综合计算的数学方法,代替了过去的仅能进行风流温度计算的方法,并为这种新的计算方法编制了电子计算机计算程序。由于开采集中化,回采工作面需要高效率生产,故矿井内的热源除了围岩散热外,运输过程中煤炭的散热,特别是机电设备运行中的散热也成为重要的热源。为了查明当量热量值及湿度值的大小在理论上及实际上的依赖关系,必须在回采工作面及掘进工作面进行精确的气候值测定。同样地,还必须对机电设备运行过程中的散热量进行长期的测定,根据这些测定成果才能使矿井气候预计计算的EDV-电算程序进一步完善,并提高计算精度。

应用这个计算程序,现已可能对回采工作面及掘进工作面的任何一段通风巷道进行热力学参数及运行参数,如干球温度、湿球温度、等效温度以及水蒸汽含量和风流的热焓等进行计算。而且这个计算程序还有可能对回采工作面产量进行估计,回采工作面产量又取决于岩石温度、煤层厚度以及各种不同的通风方式及巷道布置形式。应用这个计算方法还可以确定要保持一定的气候界限值时所必须的制冷能力,以及确定最合适的风流冷却设备的安装位置。

由于岩石温度较高对风流加热,煤炭在运输过程中散发的较大的热量,以及机电设备运行中的放热,故在许多采掘工作面,

单靠通风技术措施还不能将气候值保持在允许的界限以内，而只有靠安装风流冷却设备才能解决。

安装在回采工作面及掘进工作面的分散制冷设备，在很多情况下已不可能满足制冷需要量不断增长的要求，所以1976年联邦德国建成了第一套安装在地面的集中制冷设备。紧接着又建成了安装于井下的集中制冷设备，以及井上、下联合制冷的集中制冷设备。由于制冷技术的不断提高，已可满足煤矿总的制冷装机容量不断增长的需要，1970年总的装机容量为10MW，而目前已超过150MW。

在矿井中，研究隔热管道冷量运输的特殊技术，如同研究高效能的风流冷却器结构一样，是很必要的。风流冷却器必须能够转换足够的制冷量，以满足制冷能力不断增长的要求。安装在回采工作面及掘进工作面的风流冷却器，由于粉尘的污染，效率损失较大，使得热交换器存在的问题更为突出。通过试验台试验及矿井下的运行实践，对风流冷却器进行了改进，由过去完全使用筛状管的冷却器变成了现在使用新型结构的肋条管及薄管状冷却器。虽然这种新结构的冷却器具有有效的流体力学技术性能，但由于在回采工作面，粗糙的粉尘在冷却器上的负担量仍较大而产生较大的压力损失及冷量损失，所以继续不断地改进风流冷却器是完全必要的。为了进一步研制风流冷却器的主机及其附属设备，联邦德国矿山研究中心于1979年成立了气候技术及风流冷却技术研究室，并研究试制了数量众多的新型结构的风流冷却设备，不断改善了冷量的转换状况。

自从1965年及1977年的矿山规程中规定了有效温度的临界值以后，气候生理学方面的问题就显得很重要了。通过气候模拟室试验可以得知，在一定的有效温度条件下，要维持所给定的生理界限值需要消耗多少体力。新的试验还表明，使用个体冷却服也可能进行微气候调节。这些都表明要达到减轻生理负担的效果是可能的，但是还需要不断地改善井下的环境。本书内容丰富，系统地介绍了许多重要的知识和多方面试验的成果，并且为事实

际工作的通风工程师们提供了适用的计算公式。这里还不得不提到，如果没有欧洲共同体科研及技术发展部从1967年以来所给予的巨大的财政资助，以及1974年以来北莱茵-威斯特伐利亚州的财政资助，要取得这些成果是不可能的。

目 录

1. 导 论	1
1.1 什么是矿井气候	1
1.2 世界各地矿井气候状况	1
1.3 产生高气候值的原因	1
1.4 气候对人体的影响	3
1.5 改善气候的措施	3
1.6 矿工的热保护措施	4
1.7 矿山法及矿山规程	5
1.8 矿井气候对矿山的重要意义	6
2. 人体—气候—劳动的相互作用	8
2.1 人体生热及人体散热	8
2.2 气候综合标准	11
2.3 世界各国的矿井气候界限	17
2.4 热忍受的极限条件	23
3. 矿山的气候状况	25
4. 矿井风流加热的原因	32
4.1 大气状况变化的影响	32
4.2 风流的自动压缩	34
4.3 围岩散热	36
4.4 岩石崩落散热及运输物料散热	40
4.5 机器散热	43
4.6 其它热源	46
4.6.1 管道表面传热	46
4.6.2 氧化生热	46
4.6.3 高温泉水放热	47
4.6.4 井下自然发火	47

4.6.5 风流冷却器散热	47
5. 改善矿井气候的主要措施	48
5.1 加大风量	48
5.2 顶板管理	51
5.3 通风方式	52
5.4 其它措施	55
5.5 风流冷却	56
6. 矿井气候预计计算	58
6.1 气候参数	58
6.1.1 干球温度	58
6.1.2 空气湿度	58
6.1.3 空气压力	60
6.1.4 风速	60
6.1.5 辐射	61
6.1.6 焓	61
6.1.7 h_x -焓湿曲线的应用	61
6.2 传热原理及传质原理	64
6.2.1 热量	64
6.2.2 热传导	65
6.2.3 传热	66
6.2.3.1 对流	66
6.2.3.2 辐射	67
6.2.4 质量传递	70
6.2.5 风流吸热和吸湿	71
6.3 矿井井巷的气候预计计算	71
6.3.1 概述	71
6.3.2 不使用电子计算机的气候预计计算	72
6.3.3 使用电子计算机的气候预计计算 (EDV-电算程序)	79
6.3.4 巷道掘进通风的气候预计计算	82
6.3.4.1 概述	82
6.3.4.2 气候预计计算	83
6.3.4.3 一般钻爆法施工的掘进工作面计算	83

6.3.4.4 掘进机掘进的掘进工作面计算	86
6.3.4.5 一种新的气候预计计算程序	87
6.3.5 管道的传热	91
7. 矿井气候预计计算的参数和数据	95
7.1 围岩的原始温度	95
7.2 坚固围岩的热物理特性	96
7.3 当量导热率	97
7.4 传热系数、质扩散率、湿度特征参数	101
7.5 时间影响系数	103
7.6 机电设备同时使用系数和总热量 转换中的干燥加热部分	104
7.7 管道的传热系数	106
7.8 其它参数、数据和工作图表	106
8. 煤矿矿井的气候设计	108
8.1 概述	108
8.2 使用全断面掘进机及风流冷却装置冷却 风流的掘进工作面设计实例	109
8.3 回采工作面气候设计实例	111
9. 矿井中的风流冷却	114
9.1 风流冷却的发展	114
9.2 制冷方法	116
9.3 制冷设备的主要部件	118
9.3.1 制冷介质	118
9.3.2 制冷设备	118
9.3.3 风流冷却器	122
9.3.4 循环冷却水设备	132
9.3.5 管道、泵、高压热交换器及其附件	134
9.4 典型的风流冷却设备布置方式	134
9.4.1 掘进工作面的风流冷却	135
9.4.2 回采工作面的风流冷却	136
9.4.3 联邦德国矿井中的集中风流冷却设备	137
9.5 风流冷却效果	142
9.6 通风及空调的综合措施	145

9.7 风流冷却的其它可能性	148
9.8 风流冷却成本	150
10. 个体冷却, 工作地点冷却	154
10.1 冷却服	154
10.1.1 液体介质循环制冷	156
10.1.2 用冰冷却 (没有液体循环)	158
10.1.3 其它类型的冷却服	159
10.2 工作地点冷却	164
11. 矿井气候的测量仪表	166
11.1 风流温度和湿度的手工测量仪表	166
11.2 自动记录的温度、湿度测量仪表	167
11.3 气候综合测量仪	168
11.4 岩石温度的测定	169
11.5 热量测定	170
附 图	172
附图1 矿井风流的 hx -焓湿曲线: 4种主要的 矿井气候综合标准	172
附图2 有效温度曲线 (基准有效温度 = BET)	173
附图3 矿井风流的 hx -焓湿曲线: 不同矿区禁止 工作的气候界限值	174
附图4 不加隔热的冷水管道 (钢管) 的传热系数 k	174
附图5 传热系数 k 和塑料管道 (PVC-AS) 的 隔热效果与内径的函数关系	175
附图6 确定空气相对湿度的曲线	175
附图7 输水管道压力损失曲线	176
附图8 回采工作面平均通风时间	176
附图9 时间影响系数 $k(\alpha) = f(Fo, Bi)$ [第1页]	177
附图10 时间影响系数 $k(\alpha) = f(Fo, Bi)$ [第2页]	178
附图11 回采工作面气候预计计算数据输入卡	179
附图12 不使用风流冷却器的回采工作面气候预计计算 (EDV-电算结果打印表)	181
附图13 使用风流冷却器的回采工作面气候预计计算 (EDV-电算结果打印表)	183

附图14	临界温度 $t_l = 27^\circ\text{C}$ 时回采工作面气候预计计算 (EDV-电算结果打印表)	186
附图15	矿井风流的 hx -焓湿曲线: 回采工作面的风流变化状况	187
附图16	矿井风流的 hx -焓湿曲线 (1125mbar)	188
附 录		189
附录1	干燥巷道中风流温度变化的计算	189
附录2	回采工作面的气候参数预计计算	195
附录3	管道与风筒的传热 (稳定热流)	203
附录4	使用全断面掘进机的掘进工作面气候预计计算	209
附录5	围岩温度很高时回采工作面气候设计	218
附录6	煤矿矿井中风流冷却设备成本的计算原理	230
附录7	公式符号及单位	239
参考文献(略)		242

1. 导 论

1.1 什么是矿井气候

“矿井气候”德文的概念是指矿井内的气候。

矿井气候狭义的概念是指井下空气的温度、湿度、热辐射和风速，对于矿工工作舒适度和工作效率的影响作用。广义的概念还包含粉尘、噪音、照度、狭小的工作空间，以及其它心理因素对矿井气候的影响(9)*。然而，在目前要找出一种能够客观量度包括所有环境影响因素在内的综合办法并进行综合评价是不可能的。因而在矿井中，人们只能把气候的研究限制在狭义的范围内，同时也不考虑热辐射，因为热辐射对井下工作场所的影响是微不足道的。

“气候综合标准”是用来定量地评价矿井气候的标准，目前存在许多不同类型的标准，但其中只有少数的几种能做到不仅能较正确地反映人体的感觉，而且在实践中也有较大的实用范围。

1.2 世界各地矿井气候状况

世界各地矿井气候状况存在着极大的差别。在开采深度较浅的矿山，比如在山区，在加拿大、西伯利亚，特别是冬季，风流温度很低(气温)，部分地区温度还在冰点以下，而且几乎都必须采暖。

在较深的钾盐矿矿井中，空气的温度超过50℃，由于空气很干燥，在这样的气候条件下干活是十分费力的，但总的看来还是可以忍受的。

在很深的煤矿矿井及金属矿矿井中，干球温度变化较大(干

* 括号中的数字表示原书中参考文献的序号，属同。

球温度也即是使用干燥的可预防热辐射的温度计测得的温度),在相对湿度高达 90% 时,干球温度可达 30~35℃;在相对湿度中等为 40~70% 时,干球温度可达 35~40℃。总的气候值将由空气的干球温度、湿度及风速组合而定,直到人体能够忍受的界限值为止。

在许多开采深度较浅以及位于温带和亚热带气候的矿山,空气湿度受季节变化的影响较大,夏季时干球温度为 20~30℃,空气湿度很高,虽然这样的气候状况并不危险,但是很不舒服。

1.3 产生高气候值的原因

在矿井中造成不利的气候值的原因是由于热量及水蒸气进入风流中而引起的(在矿井中的空气流称为风流)。

在干燥矿井,比如在具有特殊性的盐矿矿井中,仅仅只有热量进入风流,而风流中的水蒸气含量是不变的。

热量主要来源有三种:第一来自岩石散热;第二来自机器散热;第三来自风流压缩热。岩石的散热随岩石温度的增加而增加(岩石温度随深度增加而增加);也可确切地说,围岩散热也随围岩与风流间的温度差的增加而增加。岩石散热还随着风量的加大而加大,通风空间的加大而加大,但随着矿井通风时间加长而减少。

机器散热随着煤炭开采产量增加及机械化程度的提高而加大。机器散热量当然也取决于机器本身的种类。机器功率相同时,压缩空气设备散热量极少,电动机的散热值与它的有效功率相等,而柴油机的散热量差不多是它的有效功率的三倍。

空气压缩热出现在倾斜及垂直巷道中,由于风流在下降过程中位能的变化(地球引力场作用下),通过摩擦而生热。热量的增加与深度成正比。深度每增加 100m 大约增加 1K(开尔文)。

在潮湿的矿井中,一部分热量用于使水汽化而增加湿度,因而风流干球温度相应地增长较小。虽然由于湿度的升高而使矿井气候恶化,但同时由于温度上升较小而使气候恶化程度减弱,两

者差不多能平衡。

1.4 气候对人体的影响

气候对人体的影响，特别是矿井中高气候值对劳动中的矿工（男性的、经过训练的而且大多数情况下是比较年青的）的影响是多方面的，要能定量地对这些重要问题给出答案则研究得较少。可以确认，不利的气候条件将会给矿工的体力及脑力方面的工作能力产生坏的影响。如在联邦德国的煤矿矿井中，当气候值达到上限（有效温度 $t_{eff} > 32^{\circ}\text{C}$ ）时，工人的劳动效率仅为50%~70%（4、21、136）。

在更高的气候值，更长的劳动时间以及更繁重的劳动条件下会产生热击危险，甚而会出现死亡的不幸情况。在南非金矿，大约300000工人在井下工作，因热击而死亡的人数1940年前后大约每年20人，到1970年降低到每年2~3人左右。在南非，人们一直在努力解决这个问题，最有效的措施是采用风流冷却装置，从而大大改善了气候状况。

人体对于气候负荷的承受能力不仅取决于气候状况，还取决于其它的影响因素，如工作的繁重程度及劳动时间、对气候的适应能力（对热环境工作的适应性）、服装以及人体的素质，如年龄、健康状况、热承受能力等。上述事实说明，为什么迄今为止的研究工作还不能够有效地对如此数量众多的影响因素的组合值进行评价。

1.5 改善气候的措施

由于在矿井中的气候状况、开采方法、通风巷道的尺寸大小及长度、围岩特征以及矿山开采技术是各式各样的，改善矿井气候的措施也是多种多样，所以要作出一般性的说明是不可能的。一般情况下，而不是所有情况下，加大风量和改善通风可以降低气候值。如果这些措施还不能解决问题时，则只有在工作地点安装风流冷却设备，才能降低风流的干球温度。

在较长的、窄小的矿井井巷中，如西欧煤矿的长壁回采工作面，特别是在工作面生产能力很高，采掘及运输全部实现综合机械化时，空调能力常常受到空间的限制，因为不可能在较小的空间将风流冷却。在目前条件下，最高岩石温度大约为 60°C ，从经济性的角度出发，为了使回采工作面的日产量能够达到3000t商品煤($3000\text{tv}\cdot\text{F}/\text{d}$)，而有效温度不超过 $t_{eff} = 32^{\circ}\text{C}$ ，必须同时采用所有有效的改善气候条件的措施。也就是说，必须缩短回采工作面的风路而采用第三条回采巷道(W型通风方式)，增加回采工作面风量（直到回采工作面风速达到 4.5m/s ），安装风流冷却装置，直到技术上及经济上达到合理的极大值。为了使气候状况继续得到改善，应将顶板管理方法从自然垮落法过渡到风力充填，然而由于技术上及经济上的原因，目前在高效率的回采工作面应用较少。

当然，改善矿井气候的措施还有其它许多方法，这些方法将在第五章介绍。但除上述有效措施外，还没有其它更为有效的办法。

1.6 矿工的热保护措施

除了前面所介绍的措施，当出现高气候值时应当想法降低外，还存在着这种可能性，即在矿工劳动时进行自身保护或者对他们的工作场所供冷。

对于人体的个体冷却可以由液态或气态的冷媒物质提供。如果条件允许，能使可调温的水或者压缩空气产生冷却作用。自冷式的冷却服具有特殊的价值，因为它不受工作场所的限制。还有一系列的冷却服，而其中并没有一种具有人们所期望的所有特性：足够的制冷能力和冷却持续时间，重量较轻、价格便宜、运行安全，并不受使用地点、能源种类的限制。

至少有一种冷却背心，具有上述所要求的6种特性中的5种，但没有足够的冷却持续时间（仅数小时）。人们仍讨论着这样的问题：在较大的范围内，在矿工进行日常工作的任何时候是不是都有必要穿戴冷却服进行保护。