

矿井通风及其 系统可靠性

王从陆 吴超 著



化学工业出版社

矿井通风及其系统可靠性

王从陆 吴 超 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是第一部比较系统地阐述矿井通风系统稳定性和可靠性的专著。全书从矿井通风系统出发,深入地介绍了矿井通风的基本理论、通风网络分析技术,特别是非灾变时期影响通风系统稳定的因素及其影响程度,以及通风系统稳定控制理论与技术。

本书数据翔实、图文并茂,既有理论分析,又有实测数据和数值计算实例,具有很强的可读性和资料价值,可供从事矿业、安全科学与工程领域的教学、科研、管理及工程技术人员阅读,也可供大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井通风及其系统可靠性/王从陆,吴超著. —北京:
化学工业出版社, 2007. 8
ISBN 978-7-122-00928-9

I. 矿… II. ①王…②吴… III. 矿山通风-系统可靠性
IV. TD72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 116823 号

责任编辑: 丁尚林 王晓云
责任校对: 陈 静

装帧设计: 高 峰

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京市彩桥印刷有限责任公司
850mm×1168mm 1/32 印张 13¼ 字数 358 千字
2007 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

金属矿藏地下开采是生产工业原材料的基础工业，它在整个国民经济发展中占有重要地位。矿井通风与安全工作是保证矿工安全、健康，促进金属矿藏地下开采高效生产的一个重要方面，也是实施金属矿藏地下可持续发展的需要。

矿井通风是矿井安全生产的基本保障。矿井通风指借助于机械或自然风压，向井下各用风点连续输送适量的新鲜空气，供给人员呼吸，稀释并排出各种有害气体和浮尘，以降低环境温度，创造良好的气候条件。在正常生产时期，矿井通风系统并不是一个孤立的系统，而是受到内、外部因素影响的开放系统。系统内外部参数的变化，必然会对矿井通风系统带来影响，从而导致矿井通风系统部分、甚至全部不能达到矿井通风的目的，失去矿井通风系统原有的机能。在井下发生灾变时，可以根据撤人和救灾的需要调节和控制风流流动路线，从而防止灾难情况恶化或争取更多的时间确保井下人、财、物的安全。

20 世纪 80 年代以来，随着金属矿藏地下开采机械化水平的提高，采矿方法、巷道布置及支护的改革，通讯和计算机技术的发展，我国矿井通风技术有了长足的进步，通风管理日益规范化、系列化、制度化，通风新技术和新装备愈来愈多地投入应用。以低耗、高效、安全为准则的通风系统优化改造在许多矿山得以实施，使其能够更好地为高产、高效、安全的集约化生产提供安全保障。同时，随着地表金属矿藏资源的日渐枯竭，金属矿藏资源开采向纵深发展是必然的趋势。据统计，在未来的 10~15 年，我国将有近三分之一的有色矿山即将进入深井开采，很多煤矿已经进入了深部开采。目前，我国地下矿山的最大开采深度已到 1070m；南非金矿开采深度达 3800m。据预测，南非在 2010 年，深度达 3000m 的矿

并将占 30%。因此，南非工程技术人员已开始了 3500~5000m 深度区段的极深地下采矿工程的研究。在如此深的地层深部进行采开挖工程，人类尚无这方面的知识和经验。较浅部开采相比，矿井通风系统扮演的角色将更加重要。矿井通风系统的内、外部条件将变得更加复杂，各影响因素对矿井通风系统稳定性的影响形式和程度将发生变化。因此，对金属矿藏地下开采过程中的矿井通风系统稳定性问题的研究是矿业和安全科学研究的重要领域，具有重要的理论价值和现实意义。

本书从传统金属矿地下开采八大系统之一的通风系统出发，主要介绍了金属矿矿井通风的基本理论，通风网络分析技术，特别是非灾变时期影响通风系统稳定的因素及其影响程度，以及通风系统稳定控制理论与技术。

在本书有关内容的研究过程中，作者得到了国家“十五”科技攻关专题的资助（编号：2001BA609A-09-03）、国家科技支撑计划课题的资助（编号：2006BAK04B03-03）和湖南省教育厅科研项目的资助（编号：06C312）。

由于我国对金属矿井非灾变时期矿井通风系统稳定性的专门研究不多，可供参考的教材和专著较少，加之编写时间仓促以及编者的水平所限，缺点和不足在所难免，敬请广大读者批评指正。

著 者

2007 年 8 月于中南大学

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 矿井通风系统稳定性研究综述	2
1.2.1 国外矿井通风系统可靠性研究	3
1.2.2 国内矿井通风系统可靠性研究	5
1.2.3 矿井通风系统稳定性研究综述	8
1.3 计算机在矿井通风系统稳定性研究中的应用	10
1.3.1 国外矿井通风软件研究综述	11
1.3.2 国内矿井通风软件研究综述	11
1.4 矿井通风系统可靠性研究存在的问题	16
1.5 矿井通风系统稳定性的研究内容与方法	18
2 矿井空气物理学	21
2.1 空气的物理性质	21
2.2 空气的状态	24
2.2.1 温度	24
2.2.2 湿度	26
2.2.3 气体状态方程	27
2.2.4 焓	28
2.2.5 湿空气的焓湿图	29
2.2.6 气候条件的舒适性	34
2.3 矿井通风中的热湿交换	37
2.3.1 热传导	38
2.3.2 对流换热	42
2.3.3 复合传热	43
2.3.4 空气与水之间的热湿交换	45
2.4 矿井通风中的有害物质	49
2.4.1 一氧化碳	50

2.4.2	氮氧化物	51
2.4.3	二氧化硫	52
2.4.4	硫化氢	52
2.4.5	甲醛	53
2.4.6	二氧化碳	53
2.4.7	矽尘	54
3	矿井通风中的风流运动	55
3.1	空气压力及测定	55
3.1.1	空气压力	55
3.1.2	空气压力的测定	61
3.2	风流的流速及测定	66
3.2.1	矿内风流的速度分布与平均风速	66
3.2.2	风速测定	67
3.2.3	风表校正	70
3.3	风流的运动状态	71
3.4	风流的运动形式	72
3.4.1	巷道型风流与紊流变形	73
3.4.2	硐室型风流与紊流扩散	74
3.5	风流运动的能量方程式	75
3.5.1	空气流动连续性方程	75
3.5.2	单位质量 (1kg) 流量能量方程	78
3.5.3	单位体积 (1m ³) 流量能量方程	81
3.5.4	断面不同的水平巷道能量方程	83
3.5.5	断面相同的垂直或倾斜巷道能量方程	84
3.5.6	有扇风机工作时的能量方程式	85
3.5.7	关于能量方程运用的几点说明	85
3.6	热湿交换的风流能量方程	86
3.6.1	流动体系的能量方程	86
3.6.2	风流温度变化的基本方程	89
3.7	风路的通风阻力	90
3.7.1	摩擦阻力	91
3.7.2	局部阻力	93

3.8 矿井通风动力	95
3.8.1 扇风机的构造与分类	95
3.8.2 扇风机的个体特性曲线	98
3.8.3 扇风机联合作业	107
3.8.4 通风设备选择	113
3.8.5 扇风机工况调节	114
4 矿井通风网络解算及污染分析理论	116
4.1 网络分析基本术语	116
4.2 通风网络中风流流动的基本定律	117
4.2.1 风量平衡定律	117
4.2.2 风路风压平衡定律	117
4.2.3 矿井空气流动定律	118
4.3 网络解算迭代技术	119
4.3.1 迭代技术	119
4.3.2 风路风量增量值计算公式推导	119
4.3.3 Hardy-Cross 迭代法解算过程	122
4.4 网孔选择	122
4.4.1 图论基本知识	122
4.4.2 独立网孔圈定	124
4.4.3 矿井复杂通风网络解算	125
4.5 矿井通风网络非线性优化技术	128
4.5.1 模型分析	128
4.5.2 基于巷道的选择	130
4.5.3 模型解算	130
4.6 矿井火灾实时模拟理论	131
4.6.1 污染物计算的数学模型	131
4.6.2 气流温度变化的数学描述	134
4.6.3 实时计算系统的描述	138
4.7 矿井通风网络中的烟尘分布与合理分风	139
4.7.1 爆破后的烟尘分布规律	139
4.7.2 正常作业时的粉尘分布规律	143
4.7.3 混流式通风网络的合理分风方案	148

4.7.4	分流与混流式网络的评价	150
5	矿井通风网络分析软件开发	153
5.1	矿井通风网络分析软件自主开发的必要性	153
5.2	矿井通风网络分析软件开发过程	154
5.2.1	软件概要设计	154
5.2.2	软件详细设计	156
5.2.3	软件编码实现及调试	160
6	矿井通风系统稳定性影响因素分析	164
6.1	复杂矿井通风系统的特点	164
6.2	矿井通风系统稳定性事故树分析	166
6.2.1	矿井通风系统不稳定事故树建造	166
6.2.2	事故树应用与分析	170
6.3	影响因素的影响范围及程度分析	172
6.3.1	通风系统固有影响因素	172
6.3.2	井下正常作业及灾变	176
7	矿井通风系统稳定性及敏感度理论	179
7.1	稳定性概念	179
7.2	Lyapunov 稳定性分析	181
7.2.1	概述	181
7.2.2	Lyapunov 意义下的稳定性问题	182
7.3	Lyapunov 稳定性理论	185
7.3.1	Lyapunov 第一法	185
7.3.2	Lyapunov 第二法	187
7.3.3	线性系统与非线性系统的稳定性比较	190
7.4	基于 Lyapunov 的矿井通风系统稳定性分析	190
7.4.1	通风网络的集合表示	190
7.4.2	通风系统状态方程	195
7.4.3	矿井通风系统动力学模型	196
7.4.4	矿井通风系统 Lyapunov 稳定性	196
7.5	基于数学模型的矿井通风系统稳定性分析	198
7.5.1	风量和风压敏感度的概念	199
7.5.2	风量敏感度的计算	199

7.5.3	风压敏感度的计算	201
7.5.4	分支风量对自然风压敏感度	201
7.5.5	敏感度分析的特点	203
7.6	矿井通风网络的风流稳定性	204
7.6.1	多中段通风网络的风流稳定性	204
7.6.2	多扇风机通风网络的风流稳定性	210
7.6.3	提高通风网络风流稳定性的途径	213
8	矿井通风网络解算影响因素及可靠性	215
8.1	网络解算收敛性影响因素分析	215
8.1.1	给定精度对算法收敛性的影响	216
8.1.2	初始风量对迭代次数的影响	218
8.1.3	网络复杂程度对迭代次数的影响	218
8.2	矿井通风系统网络解算结果可靠性影响分析	220
8.2.1	网络解算结果误差分析	220
8.2.2	风机工况与实际不符对模拟结果可靠性影响	221
8.2.3	网络结构与实际不符对模拟结果可靠性影响	222
8.2.4	电网波动对模拟结果可靠性影响	222
8.3	网络解算结果可靠性判定与验证	224
8.3.1	测定仪器及精度	225
8.3.2	主要测定内容	225
8.3.3	部分测定结果及结果分析	225
9	矿井通风网络参数的可调节性	228
9.1	某铅锌矿矿井通风系统简介	228
9.2	特征分支选择	230
9.2.1	特征分支选择原则	230
9.2.2	特征分支确定	231
9.3	分支风阻变化对通风系统影响	231
9.3.1	主进风井分支风阻变化对矿井通风系统的影响	232
9.3.2	主回风井分支风阻变化对系统的影响	235
9.3.3	中段进风段分支风阻变化对系统的影响	237
9.3.4	工作面分支风阻变化对系统的影响	240
9.4	特征分支风阻变化对风机等效风压的影响	242

9.5 多风机通风系统稳定性影响分析	245
9.5.1 多风机通风系统	245
9.5.2 风机数量对通风子系统稳定性影响	246
9.5.3 矿井风流入口数对通风子系统稳定性影响	249
9.5.4 其他因素对矿井通风子系统稳定性影响	256
10 自然风压对矿井通风系统稳定性影响	259
10.1 自然风压的形成	259
10.2 自然风压影响因素分析	261
10.3 自然风压计算	262
10.4 自然风压测定	264
10.4.1 直接测定法	264
10.4.2 间接测定法	265
10.4.3 某铅锌矿自然风压测定结果	266
10.5 分支风量对自然风压敏感性分析	266
10.5.1 只有自然风压作用下单回路情形	267
10.5.2 机械通风和自然风压联合作用下单回路情形	268
10.6 自然风压对风流状态影响分析	270
10.7 自然风压变化对通风系统稳定性影响验算	272
11 矿井动压通风与冲击风流	275
11.1 无风墙辅扇通风	275
11.1.1 无风墙辅扇通风原理	275
11.1.2 无风墙扇风机在井巷中单独工作	279
11.1.3 无风墙扇风机通风应用中的几个问题	280
11.2 导风板引风	282
11.2.1 导风板引风原理	282
11.2.2 导风板引风时巷道的临界风阻	285
11.2.3 导风板引风对巷道风量分配影响分析	285
11.2.4 导风板设计	286
11.2.5 导风板应用举例	288
11.3 矿用空气幕	290
11.3.1 矿用空气幕作用原理	290
11.3.2 空气幕的有效功率和相对有效功率	293

11.3.3	空气幕逆向隔断风流的动力特性	293
11.3.4	阻力门增压机制	294
11.3.5	空气幕有效压力的影响因素	295
11.3.6	空气幕机组的有效压力	296
11.3.7	矿用空气幕的参数设计	297
11.4	溜井放矿时冲击气流	299
11.4.1	冲击气流的形成	299
11.4.2	冲击风速影响因素试验	301
11.4.3	冲击风速计算	302
11.4.4	连续卸矿时的冲击风流	305
11.4.5	控制冲击风流的措施	306
12	矿井活塞风及其影响	310
12.1	矿井活塞风	310
12.2	中段运输设备活塞风计算模型	311
12.2.1	基本假设	311
12.2.2	中段运输设备活塞风模型	313
12.2.3	模型参数确定	316
12.2.4	活塞风影响因素分析	317
12.3	提升系统活塞风计算模型	320
12.4	矿井活塞风对通风系统稳定性影响实例	325
12.4.1	矿山基本情况	325
12.4.2	矿井活塞风对通风系统稳定性影响分析和控制	326
13	矿井运输巷道内活塞风风流组织模拟	330
13.1	FLUENT 简介	330
13.2	使用 FLUENT 的流程	332
13.3	湍流模型	333
13.3.1	直接数值模拟方法 (DNS)	333
13.3.2	大涡模拟方法 (LES)	333
13.3.3	湍流模式理论 (RANS)	334
13.3.4	$k-\epsilon$ 两方程模式	336
13.4	主控方程选择	343
13.5	模型几何及网格划分	344

13.6	边界条件及计算方法	345
13.7	模拟结果及分析	345
13.7.1	平面速度场分布	347
13.7.2	平面压力场分布	354
13.7.3	典型子平面速度、静压分布	357
14	矿井通风系统稳定性与耗散结构	365
14.1	耗散结构理论	365
14.2	矿井通风系统耗散条件与稳定性	366
14.2.1	构建开放的矿井通风网络	366
14.2.2	控制系统参量间的非线性作用	367
14.2.3	利用涨落优化和完善矿井通风系统	369
14.3	矿井通风系统耗散行为与稳定性	372
14.4	矿井通风系统稳定性耗散控制	375
15	矿井灾变时期通风系统稳定性分析	380
15.1	矿井火灾	380
15.1.1	概述	380
15.1.2	外因火灾	381
15.1.3	内因火灾	383
15.2	矿井灾变对通风系统的影响	385
15.2.1	矿井灾害事故的特点	385
15.2.2	矿井灾害事故处理基本决策方法	386
15.2.3	矿井火灾引起节流和浮力效应	387
15.2.4	火灾时期风流紊乱规律	390
15.2.5	矿井火灾对矿井主要通风机的影响	392
15.2.6	灾变时期风流控制	397
15.2.7	突水对矿井通风系统稳定性的影响	399
参考文献		401

1 绪 论

1.1 概述

随着职业安全健康管理体系（OSHMS）的贯彻实施，我国对企业工作场所的劳动条件要求将会越来越严格。同时，人民生活水平不断提高，对生活质量、品位的要求也日趋高涨。通风技术的研究和应用，不仅仅限制在矿井通风的小范围内，还可以应用于各种地下建筑工程的通风和空调^[1~3]。从广义角度来说，有人活动的地方，就存在一个人与环境构成的系统。在此系统中，人与环境相互作用。甚至，在没有人员活动的地方，对环境也有一定的要求。如存储粮食的仓库，要求空气干燥，以防粮食糜烂。大气环境是我们日常所说的客观环境中必不可少的组成部分。因此，保证大气环境的安全、卫生是职业安全卫生体系对环境的最低要求，必须应用通风技术^[4,5]。

随着开采深度增加，开采强度加大，对金属矿矿井通风系统提出了越来越高的要求。金属矿矿井通风的目的是为井下各用风场所提供足够的新鲜风流，保证作业空间良好气候条件，冲淡或稀释有毒、有害气体和矿尘等。然而，随着矿井通风系统服务年限增长，通风设备逐渐出现老化，作业方式变化，矿井通风网络结构变动，促使通风系统参数发生变化，使系统变得不稳定，造成通风系统降低或失去预定功能。

矿井通风系统是由矿井通风网络、主通风机和通风构筑物等若干子系统及其单元组成的大型复杂关联系统。其复杂关联属性具体表现为系统的多环节性、非线性、时变性、可维修性以及系统影响因素之间的强耦合性。由此可见，影响矿井通风系统稳定性的因素

很多。

金属矿矿井通风系统是地下开采的传统八大系统之一，与地下开采的安全状况息息相关。目前，无论是矿山安全评价，还是矿山生产能力核定，矿井通风都是一个极为重要的评价指标。这说明矿井通风系统对于金属矿地下开采具有极为重要的作用。然而，矿井通风系统不是一个孤立的系统。矿井通风系统状态受到很多因素制约，而这些因素本身就是动态的，部分变化有规律可循，但更多因素的变化没有规律。在众多矿井通风系统稳定性影响因素中间，哪些因素影响大，哪些因素影响小，影响机理如何，如何减少这些因素对矿井通风系统稳定性的不利影响？解决好以上问题，就可以对金属矿矿井通风系统进行有效控制，确保矿井通风系统稳定，使矿井通风系统更好地为金属矿地下开采服务。对于以上问题，通过国内外相关文献检索，未见系统报道。

目前，我国大型金属矿山约有 10% 的开采深度在 700 ~ 1000m，20% 的开采深度在 500 ~ 700m。随着国民经济对矿产资源的需求量不断增加，未来金属矿山开采深度将不断增大。深部开采通风线路增长，通风阻力增大，确保矿井通风系统稳定性变得更加重要，同时也更加困难。因此，对金属矿矿井通风系统稳定性进行系统研究，可为将来深部开采矿井通风提供技术保障，有一定的研究意义和实用价值。

1.2 矿井通风系统稳定性研究综述

对于矿井通风系统来说，可靠性和稳定性并不是同一个概念。可靠性是从系统功能或各个元件工作状态来分析的，而稳定性是从系统稳健性、抗干扰性角度来分析的。只有可靠、稳定的矿井通风系统才能满足生产需要。由于两者之间有较为密切的关系，早期对矿井通风系统的研究中，矿井通风系统稳定性和可靠性没有明确界定。矿井通风系统稳定性和可靠性的研究相互渗透，对矿井通风系统可靠性的研究中包含了矿井通风系统稳定性

思想,对矿井通风系统稳定性的研究中采用了矿井通风可靠性的方法。为比较全面了解矿井通风系统稳定性的研究现状,把矿井通风系统可靠性研究也纳入综述范围,可以为矿井通风系统稳定性影响因素分析提供指南。

1.2.1 国外矿井通风系统可靠性研究

前苏联在这方面研究较早,他们将矿井通风系统可靠性定义为:矿井通风系统在运转过程中保持其工作参数值的能力,以维持井下所必需清洁风量的供应;并将通风系统的失效按重要性分为三级:一级失效是指整个矿井失效,二级失效是指矿井的区域失效,三级失效是指矿井的个别采区失效。在这个矿井通风系统可靠性定义中,保持矿井通风系统工作参数值,其实质就是确保通风系统工作参数稳定,属于矿井通风系统稳定性的研究范畴。所采用的评定方法主要包括结构法、模拟模型法以及统计评价法等。

(1) 结构法 以确定巷道单位长度的相对可工作系数 $\bar{K}$ 为基础。可靠性指标 $\bar{K}$ 值与矿井通风系统可工作系数成正比

$$\bar{K} = (w - n + 1) / M \quad (1-1)$$

式中 w ——矿井通风网络中的巷道条数;

n ——矿井通风网络的节点数;

M ——综合巷道指标系数。

若对矿井通风系统不同方案按该公式计算出可靠性指标,并进行比较,即可选择最可靠的方案。可靠性评定和制定提高通风系统可靠性的措施都可采用这种比较方法。该方法相对简单,但必须具备矿井通风系统的拓扑结构、巷道长度、通风构筑物的数目和类型、主要巷道等相关可工作系数。

(2) 模拟法 按照系统通风参数的分布密度来模拟矿井通风系统的可能状态。确定通风系统工作过程的时间离散化,考虑系统各单元预防检修到突然破坏的时间间隔分布密度。通风系统状态模拟运算次数应根据其可靠性计算精确度来决定。每次模拟运算均需计算系统的风量分配和记录失效情况。根据各次运算状态的模拟结果,计算出全矿通风系统的可靠性总指标。该方法是以求解网络解

算为基础，可以自行校正，具有很大潜力，是一种有发展前途的方法。

(3) 统计评价法 统计评价法认为矿井通风系统应当按照设计风量分配运转，即通风系统各分支风量都应在容许范围内。如果这种状况受到破坏，就是矿井通风系统发生了故障。一般认为，导致矿井通风系统故障的主要因素是巷道和通风构筑物的状态随时间随机变化，而随机过程取决于矿山地质和采矿工艺条件。很明显，这些条件的统计指标对于在相同条件下运转的矿井通风系统是一样的。因此，为了评价矿井通风系统可靠性指标，必须按矿山地质和采矿工艺条件对矿井进行分类研究。

各国矿井通风专家、学者提出了许多理论上可行的方法。Fong^[6,7]引入了路径集中独立集的概念，使复杂、多路径矿井通风网络解算工作得以在计算机上实现。Lammel Gustav^[8]采用主通风单元的冗余方法提高矿井通风系统的可靠性以及提供安全的工作条件。基于库兹涅茨煤田和其他煤矿的故障统计数据，对垂直和水平通风单元的可靠性进行了分析。研究基础是风机或系统的机械元件、电子设备或电子元件的故障统计数据。Schroeder^[9]根据 WBK 矿井通风测试中心对 1983 年在役的 104 台主风机和 88 台备用风机的损害和故障情况进行分析，认为风机故障就是一个主风机或辅助风机不能正常工作的时间在 20min 以上。在调查阶段，有 36 台风机发生故障，这是工作 120000h 以后的风机故障率。风机故障原因有材料应力、电机、轴承受伤和异物进入卷吸系统等。Petrov^[10]指出矿山企业的稳定活动和井下操作的安全很大程度上依靠矿井主通风机的可靠性。为了定量评价矿井主通风机的可靠性，收集了大量的关于风机故障的统计资料。资料表明：75% 的风机故障与传动轴的损坏有关。并利用有关数学模型对传动轴的应力状态进行分析。分析结果表明：传动轴可以采用管材，从而达到减少传动轴的重量和负荷的目的。Vaneev B N^[11]认为电器机械的最佳设计是矿井通风系统优化的重要部分，指出电机优化设计过程中，可靠性计算方法没有考虑活动元件的尺寸效益。Mitchell D^[12]讨论了常规分