

JINGHANG WANGLUO HUOZAI TEXING JI JISUANJI MONI

井巷网络火灾特性 及 计算机模拟

周福宝 王德明 著

Jinghang Wangluo Huozai Texing Ji Jisuanji Moni

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目资助(50604014)

井巷网络火灾特性及 计算机模拟

周福宝 王德明 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

采用理论分析、实验测试和计算机仿真等手段对井巷网络火灾特性进行了系统性的研究。研究了井巷网络火灾综合模拟实验系统及烟气运动理论模型,依据实验结果,提出了火区阻力的概念与计算模型,对节流效应提出了更为科学的新解释;采用因次分析法,推导出火灾烟流滚退距离的通用无因次表达式,得出水平或近水平巷道烟流滚退距离的计算公式,并用计算流体力学(CFD)技术加以模拟验证;结合静态和动态分析方法对旁侧支路的风流逆转进行了实验模拟;通过实验模拟和火灾过程曲线分析,揭示了井巷网络火灾过程中的回燃现象,并与建筑室内火灾的回燃现象进行了对比分析;应用突变理论分析了下行风流逆转的突变特征,提出了逆转过程具有非连续性观点,突破了传统的认识;依据理论研究成果,开发出基于 Windows 的井巷网络火灾模拟软件,并对现场大型通风网络火灾进行了模拟仿真。最后,结合消防工程学的原理和方法,初步探讨了井巷网络火灾防治的性能化设计。

图书在版编目(CIP)数据

井巷网络火灾特性及计算机模拟 / 周福宝,王德明著.

徐州:中国矿业大学出版社,2007.10

ISBN 978 - 7 - 81107 - 769 - 8

I. 井… II. ①周…②王… III. 计算机仿真—井下火灾—研究 IV. TD75-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 164868 号

书 名 井巷网络火灾特性及计算机模拟

著 者 周福宝 王德明

责任编辑 马跃龙 黄运涛

责任校对 徐 玮

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 850×1168 1/32 印张 7.125 字数 185 千字

版次印次 2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

井巷网络火灾是指发生于矿井巷道、山体隧道、地下建筑通道等受限网络空间中的、威胁人们生命和财产安全的非控制性燃烧。井巷网络火灾作为一种燃烧现象与地面火灾是相同的,不同的是它的发生、发展与救护却有别于地面火灾:火灾发生于由巷道或隧道交织组成的受限空间中;可燃物的分布呈固定点或连续线状分布;火烟的热力作用会产生热动力;过量的高温烟流在狭窄井巷中的流动会产生热阻塞,等等。井巷网络火灾的这些特性会改变通风网络内的压力分布,导致通风系统发生紊乱,使得火灾产生的高温、有毒、有害气体侵袭到各个作业区域,从而对作业人员的生命安全造成重大威胁和伤害。据国内外不完全统计,在矿井火灾事故中有95%以上的遇难人员是受毒性气体侵袭而死亡。

井巷网络火灾的复杂性和灾难性,还给救灾决策工作带来很大困难,决策指挥不当往往会造成更加严重的后果。据不完全统计,我国自建国到1993年,在矿井灾变事故的处理中,因救灾指挥不当造成救护人员死亡人数占救护队救灾自身牺牲人员总数的26.13%,造成决策失误的主要原因之一就是井巷网络火灾特性的不甚了解。至今,人们对风流紊乱的各种现象还没有取得一致的认识。由于该项研究对指导救灾决策、制定火灾防治的技术措施、规范和标准有着非常重要的意义,因此,井巷网络火灾特性及相关计算机模拟的研究一直是国内外的研究热点。

作者在国家自然科学基金项目和中国矿业大学“211工程”项目的资助下,研制出具有国际水平的井巷网络火灾综合模拟实验

系统,开展了数十次不同类型的火灾模拟实验,系统、全面地考察了井巷网络火灾的特性,并应用计算机模拟的手段对井巷网络火灾的发生、发展及烟气蔓延的规律进行了模拟,取得了多项有价值的成果。本书就是在这些研究成果的基础上精心编写而成。

全书共分10章。第1章介绍了井巷网络火灾的国内外形势及相关研究成果,并提出本书的主要研究内容。第2章介绍了自行研制的井巷网络火灾综合模拟实验系统。第3章介绍了井巷网络火灾烟气运动的理论模型。第4章介绍了井巷中火灾热力作用形成的火区阻力及其节流作用。第5章采用理论分析、数值模拟、实验考察等手段系统地研究了烟流滚退的距离。第6章介绍了井巷网络中旁侧支路风(烟)流逆转的规律及实验结果。第7章模拟了井巷网络火灾下行通风主干风路的逆转的全过程,并揭示了逆转过程中的回燃现象。第8章应用突变理论揭示出下行通风巷道的逆转过程具有突变特征。第9章应用开发出的井巷网络火灾计算机仿真软件,对大型通风网络进行了仿真模拟和救灾决策分析,并阐述了井巷网络火灾性能设计的基本概念和方法。第10章是对全书研究成果的总结及相关研究工作的展望。

本书是作者近年来在井巷网络火灾相关研究成果的基础上总结而成的。成书过程中广泛参阅了前人的研究成果和国内外有关著述,在此谨致谢意。感谢中国矿业大学周延教授在实验研究中所给予的大量帮助,感谢王省身教授、俞启香教授、丁广骥教授、林柏泉教授、程远平教授、李增华教授、左树勋高工,同时衷心感谢中国矿业大学出版社编辑同志为本书出版所付出的辛勤工作。

本书中提出的许多新思想和新观点还有待于今后进行更深入细致的研究。由于作者水平所限,书中疏漏不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

著者

2007年10月

目 录

1	绪论	1
1.1	国内外近期井巷火灾形势	2
1.2	井巷火灾的基本术语	4
1.3	井巷网络火灾分类	5
1.4	风流紊乱的基本形式	9
1.5	国内外研究成果综述	12
1.6	本书的研究内容	16
2	井巷网络火灾综合模拟实验系统	17
2.1	国内外实验系统现状	17
2.2	实验系统的建造	22
2.3	本章小结	31
3	井巷网络火灾烟气运动理论模型及其应用	33
3.1	烟气运动模型	33
3.2	网络模型	36
3.3	模型的应用	37
3.4	本章小结	42
4	火区阻力及其节流效应	43
4.1	火区阻力的概念	44
4.2	火区的热阻力	45
4.3	火焰产生的局部障碍阻力	49

4.4	火区阻力的数学模型	51
4.5	火区阻力的实验测定	52
4.6	实体规模巷道火灾实验数据的验证	56
4.7	本章小结	58
5	巷道火灾烟流滚退距离的研究	59
5.1	无因次烟流滚退距离的定义	60
5.2	无因次关系式的推导与分析	61
5.3	烟流滚退的模拟实验	76
5.4	烟流滚退距离的数值模拟	81
5.5	本章小结	101
6	旁侧支路风流逆转的实验	102
6.1	实验网络	103
6.2	逆转条件分析	104
6.3	实验结果及分析	110
6.4	防止旁侧支路风流逆转的措施	114
6.5	本章小结	115
7	下行通风风流逆转过程的研究	117
7.1	下行风流逆转的模拟实验	118
7.2	风流逆转过程的回燃现象	126
7.3	矿井火灾中回燃现象的特殊性	134
7.4	矿井火灾回燃现象举例	136
7.5	本章小结	140
8	下行风流逆转的突变理论分析	142
8.1	下行风流逆转的突变	142

8.2	逆转的突变理论分析	145
8.3	本章小结	159
9	井巷网络火灾的计算机模拟	160
9.1	火灾下风侧温度计算模型	160
9.2	烟流换热系数的计算	164
9.3	风流紊乱参数的计算	166
9.4	井巷网络火灾的模拟	167
9.5	最佳避灾与救灾路线的计算机选择	171
9.6	火灾时期风流紊乱现象处理的专家系统	179
9.7	软件的应用	181
9.8	井巷网络火灾的性能化设计	190
9.9	本章小结	197
10	全书总结及展望	198
10.1	全书总结	198
10.2	研究展望	200
	参考文献	202

1 绪 论

井巷网络火灾是指发生于矿井巷道、山体隧道、地下建筑通道等受限网络空间中的、威胁人们生命和财产安全的非控制性燃烧现象。井巷网络火灾作为一种燃烧现象与地面火灾是一样的,但是其发生、发展与救护却有别于一般地面火灾:可燃物呈固定点或连续线性分布;火烟的热力作用会产生热动力(火风压);过量的高温烟流在狭窄井巷中的流动会产生热阻塞(节流作用)等。井巷网络火灾的这些特性会改变井巷通风网络中的压力分布,导致通风系统紊乱,使得火灾产生的高温、有毒、有害气体可侵袭到各个工作区域,从而对作业人员生命造成重大威胁和伤害。据国内外不完全统计,在矿井火灾事故中有 95 % 以上的遇难人员是受毒性气体侵袭而死亡。

井巷网络火灾的复杂性和灾难性,给救灾决策工作带来很大困难,决策指挥不当往往会造成更为严重的后果。据不完全统计,自 1949 年到 1993 年,我国在矿井灾变事故的处理中,因救灾指挥不当造成救护人员死亡人数占救护队救灾自身牺牲人员总数的 26.13 %。造成决策失误的主要原因之一就是井巷网络火灾特性不甚了解。至今,人们对风流紊乱的各种现象还没有取得一致的认识。由于该项研究对指导救灾决策、制定火灾防治的技术措施、规范和标准有着非常重要的意义,因此,井巷网络火灾特性及相关计算机模拟的研究一直是国内外的研究热点。

1.1 国内外近期井巷火灾形势

随着采矿工业的持续发展和交通运输业的蓬勃兴起,各种类型的矿井巷道、山体隧道和地下铁道等不断涌现。截至1999年,我国铁路隧道已达6 876座,隧道总长为3 670 km,均为世界第一。随之而来,相应的火灾威胁日趋加重,火灾事故不断。人类在跨入21世纪的门槛后,所面临的井巷网络火灾形势十分严峻。2000~2003年间,国内外发生了十余起重大井巷网络火灾事故,列举如下:

(1) 2003年10月24日,宁夏白芨沟矿发生火灾,引起瓦斯爆炸,导致火区范围的扩大,形成30万 m^2 的特大型火区,造成全矿井被迫封闭,虽未造成人员伤亡,但是矿井封闭、停产带来了巨大的经济损失。

(2) 2003年2月18日,韩国第三大城市大邱市的地铁内发生重大火灾,由于没有做好初期救灾应急工作,造成大量人员伤亡。截至2003年2月27日,造成196人死亡,146人受伤,289人失踪。

(3) 2002年7月7日清晨,乌克兰东部顿涅茨克区地下的煤矿发生火灾,当时100多名矿工在井下作业,起火后74人及时逃出,33人被困丧命,另有2人受伤。

(4) 2002年5月24日,黑龙江省双鸭山市宝清县义合佳成煤矿井筒主井电气火花引起井口燃烧,井下21人只有4人生还。

(5) 2002年1月21日,松滋市刘家场镇谭家洞煤矿发生起火事故,井下13名被困矿工中,只有1名幸存者,其余12人全部遇难。

(6) 2001年11月1日凌晨4时30分,江西省丰城矿务局坪湖矿井下的胶带因摩擦引起大火,造成14人死亡,19人受伤。

(7) 2001 年 10 月 24 日 19 时 30 分,两辆卡车在瑞士葛克特隧道内相撞,随即引发大火。葛克特隧道全长 16.5 km,是世界上最长的公路隧道之一,也是穿越阿尔卑斯山连接欧洲南北的交通要道。据路透社报道,受浓烟和高温的阻隔,消防人员无法接近出事地点进行救援,出事地段隧道的顶部已塌陷,事故至少造成 10 人死亡。

(8) 2001 年 5 月 8 日凌晨零时 10 分,鹤岗矿务局集体多种经营总公司南山矿井发生火灾爆炸事故,井下作业矿工 54 人全部遇难。

(9) 2000 年 11 月 11 日上午 9 时 30 分,在奥地利萨尔茨堡州基茨施坦霍恩山一列正在隧道内行驶的列车发生火灾,9 名旅客安全逃生,其余 155 人死亡,18 人受伤。奥地利列车隧道内火灾是欧洲历史上最严重的高山列车隧道火灾。

(10) 2000 年 7 月 9 日 4 时 40 分,甘肃金川公司二矿区井下发生运矿卡车失火事故,死 17 人,重伤 2 人,直接经济损失 188 万元。

(11) 2000 年 5 月 29 日清晨 4 时 55 分,横穿奥地利整个国境的南北高速公路陶恩隧道因汽车追尾相撞发生了重大火灾,60 余辆汽车被卷入火海,5 人被大火吞噬,49 人受伤,大火直到当晚 10 时才被扑灭。

(12) 2000 年 3 月 24 日上午 11 时,一辆装载面粉和黄油比利时载重汽车在连接法国和意大利的勃郎峰隧道中突然起火,由此引发后续车辆着火,造成 36 辆各种汽车卷入火海,41 人丧生。

(13) 2000 年 2 月 28 日 23 时 45 分,辽宁省阜新市清河门区三道壕煤矿在生产准备过程中发生火灾。截至 2 月 29 日,井下 24 人中有 3 人死亡,2 人受伤,19 人下落不明。

在这短短两三年内,井巷火灾事故如此频繁地发生,表明此类火灾的威胁依然严重,并没有随着经济建设的发展和人类文明的

进步而得到有效的遏制。因此,对井巷火灾发生、发展规律以及救灾决策措施和策略的研究依然是一项十分重要和有意义的工作。

1.2 井巷火灾的基本术语

(1) 节点

井巷网络中风流的起点(入风井口)、终点(出风井口)、分风点和合风点统称为节点。

(2) 支路

支路指连接节点的通路。支路可以由一条分支组成,也可以由多条分支组成。

(3) 回路和网孔

由若干方向并不都相同的分支所构成的闭合线路,其中有分支者叫回路,无分支者叫网孔。

(4) 假分支

风阻为零的虚拟分支。一般是指通风机出口到进风井口虚拟的一段分支。

(5) 网络

一个有向的连通体系,是分支与节点的集合。

(6) 风流紊乱

井巷网络火灾时期,火灾及其产物的热力作用等影响使得井巷原有通风状态及其通风动力特性发生改变,进而引起通风网络中部分或全部分支的风(烟)流方向发生全部或部分改变的现象。

(7) 直接烟侵区

井下发生火灾后,烟流在排往地面的途中,通过所有的巷道时仍保持着火灾前的原有风向不变,这些烟流弥漫的区域称为直接烟侵区。

(8) 主干风路

主干风路是指发生火灾后,从入风井口经过火源位置到回风井的通路。

(9) 旁侧支路

风网中主干风路以外的其他风路。

(10) 上行风流

上行风流指沿倾斜或垂直井巷、采煤工作面自下而上流动的风流,即风流从标高的低点向高点流动。

(11) 下行风流

下行风流指沿倾斜或垂直井巷、采煤工作面自上而下流动的风流,即风流从标高的高点向低点流动。

1.3 井巷网络火灾分类

1.3.1 富氧燃烧类火灾

非受限燃烧具有与地面火灾相似的燃烧和蔓延机理:火源燃烧产生的挥发性气体在燃烧中已基本耗尽,无多余炽热挥发性气体与主风流汇合并预热下风侧更大范围内的可燃物;燃烧产生的火焰以热对流和热辐射的形式加热邻近可燃物至燃点,保持燃烧的持续和发展。其特点是火源范围小,火势强度小,蔓延速度较低,耗氧量少,致使相当数量的氧剩余。下风侧氧浓度一般保持在15%(体积分数)以上,故称为富氧燃烧类火灾。

富氧类火灾的火源分带如图 1-1 所示。此类火灾在冷却带和焦化带与富燃料类火灾相似,只是因火势较小,焦化带中氧浓度降低较少。在燃烧带,由于富氧燃烧时温度较低,分解的挥发性气体量较少,故全部在该带燃烧中耗尽,无显著的高温热解带,也不存在剩余燃料分带。在燃烧带中风流氧浓度的减少远小于富燃料类火灾,风流温度和炭化物浓度也低于富燃料类火灾。

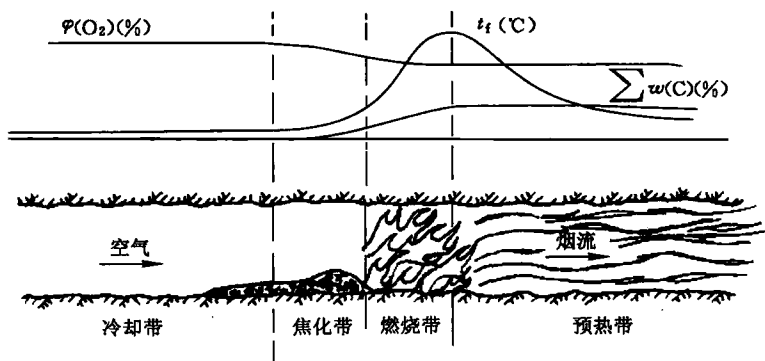


图 1-1 富氧类燃烧火灾的火源分带

1.3.2 富燃料燃烧类火灾

火源燃烧时,火势大、温度高,火源产生大量炽热挥发性气体,不仅供给燃烧带消耗,还能与被高温火源加热的主风流汇合形成炽热烟流,预热火源下风侧较大范围的可燃物,使其继续生成大量挥发性气体,另外,燃烧位置的火焰通过热对流和热辐射加热紧邻可燃物使其温度升至燃点。由于保持燃烧的两种因素的持续存在和发展,此类火灾使燃烧在更大范围内进行,并以更大速度蔓延致使主风流中氧气几乎耗尽,剩余氧浓度低于2%。所以,此类火灾蔓延受限于主风流供氧量。在地面火灾中,由于此类火灾仅发生在一些空间受限制或通道断面较小的情况下,故称为受限火灾。基于其下风侧烟气氧浓度接近零的特征,一般称之为富燃料类火灾或贫氧类火灾。这种燃烧的下风侧烟流常为高温预混可燃气体,与旁侧新鲜风流交汇后,易形成新的火源点,这种形成多个再生火源的现象称为火源发展的“跳蛙”现象。

井巷网络中富燃料类火灾的火源分带如图 1-2 所示,沿风流方向分为 4 个带。各带烟流的平均温度($t_f, ^\circ\text{C}$)、氧浓度 $[\varphi(\text{O}_2), \%]$ 和炭化物总组分 $[\sum w(\text{C}), \%]$ 对应显示在图的上半

部分。

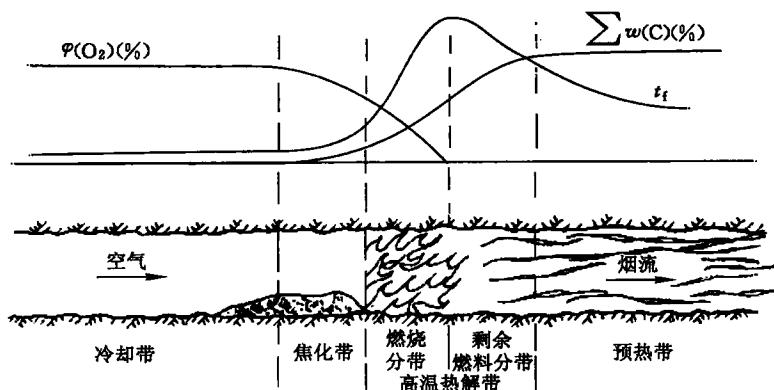


图 1-2 富燃料类燃烧火灾的火源分带

(1) 冷却带。火源燃烧已掠过该带,火焰已熄灭,仅存在受迫对流传热,无氧化反应发生,巷道壁温下降但仍高于风流温度,会使流经该带的风流温度缓慢上升。风流的氧浓度不变且不含炭化物。

(2) 焦化带。可燃物的高温焦化残余物——焦炭与风流中的氧发生氧化反应,继续燃烧,属于表面燃烧形式。流经该带的风温上升,炭化物浓度增大,氧浓度开始减小。

(3) 高温热解带。分为燃烧和剩余燃料两个分带。在燃烧分带,可燃物热解生成的挥发性可燃气体在风流中燃烧,烟流浓度达到最高值,炭化物浓度继续增高,烟流中氧浓度几乎降到零,因氧气缺乏,燃烧停止,部分炽热挥发性气体剩余,流向下风侧,该分带燃烧属于热解燃烧;在剩余燃料分带,高温挥发性气体与燃烧放出的热共同加热该分带可燃物,使其热解生成大量挥发性气体,并混合于烟流中顺风流动。在该分带,热解过程吸热,氧化放热反应停止,温度开始下降,氧浓度接近零。

(4) 预热带。含有挥发性气体的高温烟流向巷壁传热,湿度继续下降,同时烘干、预热下风侧巷道壁,为火源蔓延创造条件。该带的传热过程以受迫对流传热为主,在接近高温热解带的区域也存在热辐射现象。

为准确地定量描述矿井火灾的燃烧状况,A·罗伯特最早提出用燃料与空气的比率 n 作为评判标准,并逐渐为矿井火灾界专家所接受。

$$n = \frac{5v_f W \varphi}{v_a \rho_a S} \quad (1-1)$$

式中 5——含有固定碳 40%~50% 的单位质量燃料完全燃烧所消耗的空气质量,kg/kg;

v_f ——火焰沿巷道蔓延速率,m/s;

W ——单位长度上的巷道燃料量,kg/m;

φ ——燃料消耗部分所占的比例;

v_a ——风流速度,m/s;

ρ_a ——空气密度,kg/m³;

S ——巷道断面,m²。

另一类似公式以可燃物生成的挥发物作为燃料来计算。

$$n = \frac{5S_f L_f M_v}{v_a \rho_a S} \quad (1-2)$$

式中 S_f ——单位长度巷道的坑木等燃料的表面积,m²/m;

L_f ——着火带的长度,m;

M_v ——单位表面积单位时间生成的挥发物的质量流量,kg/(m²·s)。

根据计算的 n 值可以判定火灾类别,一般 $n < 0.3 \sim 0.4$ 时,火灾为富氧类完全燃烧; $n = 2 \sim 3$ 时为富燃料类完全燃烧;当 $n > 0.4$ 时,燃烧处于不稳定状态,能自行发展为富燃料燃烧状态。值得注意的是, $n = 0.3$ 表示 10 份空气供应量消耗 3 份,即空气中氧浓度

减少 6%，烟流中氧浓度降为 15%，这是坑木类富氧燃烧类火灾的最小助燃氧浓度实测值。

此外，富燃料燃烧还取决于巷道断面的大小和下风侧可燃物种类、数量和分布形式。巷道周长与断面面积之比越小，越容易发生富燃料类火灾。火源下风侧有充足、易燃的可燃物，易发展为富燃料类火灾。

1.4 风流紊乱的基本形式

井巷网络火灾的特性主要体现在它具有不同的风流紊乱形式，常见的风流紊乱形式包括火灾烟流滚退、旁侧支路的风流逆转、下行风流逆转、主干风路的烟流逆退等。

(1) 烟流滚退

如图 1-3 所示，巷道中可燃物燃烧产生的热烟气羽流撞击到巷道顶板后分成两股流向相反的烟流：一股随着风流方向继续向火源下风侧流动；另一股逆着风流方向向进风侧流动。逆风流动的烟流不断与温度低的进风流及巷道顶板、两侧上部壁面发生动量和能量的交换，结果使得逆流速度不断降低，并又被重新卷吸回火区。由于这种特殊火灾现象的外观上看来似乎是烟流在回旋、滚动，因此称之为烟流滚退。烟流滚退往往是下行风流逆转、旁侧风流逆转和主干风路逆退发生的前兆。

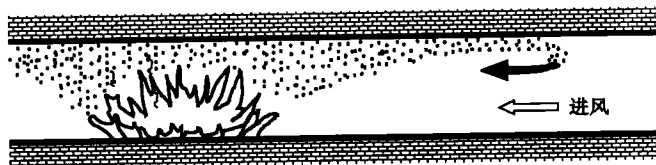


图 1-3 火灾烟流滚退示意图