

内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY148) 资助

HUOZAI SHIJI

KUANGJING TONGFENG XITONG ZAI BIAN GUI LU

JIQI KANGZAI NENG LI YANJIU

火灾时期

矿井通风系统灾变规律 及其抗灾能力研究

■ 刘业娇 田志超 著



煤炭工业出版社

内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY148)资助

火灾时期矿井通风系统灾变规律 及其抗灾能力研究

刘业娇 田志超 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

火灾时期矿井通风系统灾变规律及其抗灾能力研究/刘业娇, 田志超著. --北京: 煤炭工业出版社, 2015

ISBN 978-7-5020-4794-8

I. ①火… II. ①刘… ②田… III. ①矿井通风系统—火灾—抗性—研究 IV. ①TD724

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 040278 号

火灾时期矿井通风系统灾变规律及其抗灾能力研究

著 者 刘业娇 田志超
责任编辑 尹忠昌 赵 冰
责任校对 李新荣
封面设计 安德馨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京市郑庄宏伟印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 880mm × 1230mm^{1/32} 印张 8 插页 3 字数 214 千字
版 次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
社内编号 7649 定价 26.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

内 容 提 要

本书基于国内外矿井巷道火灾事故频发的严峻现实,综合采用理论研究、实验测试和数值模拟的方法对矿井巷道火灾燃烧特性、火源热释放速率和放热量,火灾烟气流动和温度、速度、密度和静压的分布规律,风流紊乱规律、巷道火灾引起的浮力效应(火风压)、节流效应(火区阻力)以及火风压和火区阻力对通风网络的影响等内容进行研究,对矿井通风系统抗灾能力进行分析和评价,力求掌握矿井巷道火灾的灾变规律及对通风系统的影响规律,为预防矿井火灾和开展相关救援行动提供理论依据和技术支持。

本书可为从事安全工程科学研究、工程设计和生产管理等工作的科技人员提供知识参考,也可作为高等学校安全工程、采矿工程等专业的教学参考用书。

前 言

矿井火灾是煤矿生产中的主要自然灾害之一,它不仅会造成人员伤亡、物资器材损失、煤炭资源大量被烧毁或冻结,而且产生大量的高温烟流和有害气体,危及井下工作人员的生命安全,有时还诱发瓦斯、煤尘爆炸等恶性事故,特别是在火灾高温烟气的热力作用下,矿井通风系统的大小及方向常会发生改变,以致全系统发生紊乱,事故及其危害进一步扩大,给救灾工作增大难度。

矿井火灾从研究方法上,有理论研究、实验研究和计算机模拟研究;在实验规模上,有小尺寸实验研究和全尺寸实验研究;在模拟模型上,从原来的一维稳态发展到二维非稳态,对燃烧区采用三维的场模型,实现了场网耦合;在对火风压的认识上,已从原来网孔局部火风压的概念发展到根据烟流温度分布计算火风压。国内外对矿井巷道火灾引发风流逆转的成因、灾变环境气体检测分析及危险性判定、火灾时期风流紊乱规律等已进行了大量理论研究,取得了很多成果,如过量烟气学说和局部火风压理论等。实验研究通过巷道实验建立了井下风流参数与火灾燃烧速度、烟气浓度及组分等之间的关系,为理论研究提供了更多的实验数据。计算机模拟研究主要运用动量、能量和质量守恒方程对井下火灾场景进行模拟,模拟通过调整各个参数的关系,来研究火灾烟气温度、压力和浓度与风流速度之间的关系。计算机模拟相对实验模拟省时省力,但计算机模拟必须以理论研究为基础,模拟结果须通过实验研究加以验证。

本书针对煤矿巷道火灾,以内蒙古某煤矿为例,通过设计和制作矿井巷道火灾实验系统,研究火灾引起灾变事故的空间范围和规律,包括火灾时期火区及下风侧巷道中烟流的温度、速度、密度和静压分布情况以及风流紊乱规律等,对火区产生的“浮

力效应”及火风压、“节流效应”及火区阻力进行研究和计算。运用 FLUENT 数值模拟软件对火灾时期巷道烟气流动的温度场、速度场、密度场和静压场进行模拟和分析。分析灾变时期矿井通风系统合理性与其抗灾能力的关系；运用事故树和安全检查表分析法对“矿井通风系统不可靠”事件进行详细分析，对火灾时期矿井通风系统抗灾能力进行综合评价，以提高火灾条件下矿井通风系统的应变能力，有效控制有毒有害气体的蔓延范围，为进一步加强矿井防灭火工作提供技术支持。

本书共 6 章，由内蒙古科技大学的刘业娇博士和田志超讲师共同完成，其中前言、目录、第 1~2 章、第 3 章（3.3~3.6 节）和第 5~6 章由刘业娇执笔，第 3 章（3.1~3.2 节）和第 4 章由田志超执笔，全书由刘业娇负责统稿。本书主要是以第一作者的硕士和博士学位论文为基础，结合对火灾时期矿井通风系统灾变规律和抗灾能力的深入研究，以及多年来在煤矿安全领域的研究成果积累而成。本书的出版得到了内蒙古自治区高等学校科学研究项目（NJZY148）的资助；课题研究和本书的编写得到了第一作者博士阶段的导师——山东科技大学曹庆贵教授的悉心指导；内蒙古科技大学张金山教授、郝长胜教授、王文才教授、张飞教授、段军教授和孟海东教授给予了多方面的支持和帮助；作者的同事任玉辉、陈世江、杨夺、李绪萍、侯先芹等和校友张睿、姚玉静等为本书的编写提了不少意见；内蒙古科技大学矿业工程专业研究生侯涛、姜宇鸿、张博等在资料收集和实验研究方面做了大量工作；同时，书中还引用了其他作者的有关资料和成果。在本书出版之际，作者向上述老师、同事、朋友和学生表示衷心的感谢和由衷的敬意！

由于时间紧迫，加之作者学识水平所限，书中疏漏和错误在所难免，敬请各位读者批评指正。

刘业娇

2014 年 9 月 25 日

目 次

1 绪论	1
1.1 课题的提出及研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究内容、研究方法与技术路线	21
1.4 本章小结	23
2 火灾时期矿井通风系统灾变规律理论研究	24
2.1 矿井巷道火灾燃烧特性分析	24
2.2 矿井火源燃烧热释放特性研究	30
2.3 火灾时期火区及下风侧巷道中烟流的温度、 静压、密度和流动速度分布方程	35
2.4 火灾时期风流紊乱规律	41
2.5 矿井巷道火灾时期的浮力效应及火风压	49
2.6 矿井巷道火灾时期的节流效应及火区阻力	51
2.7 火灾时期火风压和火区阻力对通风网络风向和 风量的影响	64
2.8 本章小结	69
3 火灾时期矿井通风系统灾变规律实验研究	71
3.1 矿井巷道火灾模拟实验系统的研制	71
3.2 煤类火灾材料热释放速率及其放热量的实验 验证	90
3.3 火灾时期下风侧巷道中烟流温度场方程的 实验验证	94
3.4 火灾时期下风侧巷道中烟流速度、密度和 静压的实验验证	99
3.5 火灾时期火区阻力及其对火区风量影响的	

实验验证	106
3.6 本章小结	110
4 火灾时期烟气流动的数值模拟	112
4.1 火灾烟气流动的 CFD 模拟方法	112
4.2 火灾巷道模型的建立与初始边界条件的处理	121
4.3 火灾时期烟气流动稳态模拟结果分析	125
4.4 本章小结	158
5 火灾时期矿井通风系统抗灾能力研究	160
5.1 灾变时期通风系统合理性与抗灾能力的关系 分析	160
5.2 “矿井通风系统不可靠”定性评价	165
5.3 火灾时期矿井通风系统抗灾能力评价	202
5.4 火灾时期风流控制方法和技术措施	222
5.5 本章小结	232
6 结论与展望	234
6.1 结论	234
6.2 特色及创新点	238
6.3 展望	239
参考文献	240

1 绪 论

1.1 课题的提出及研究目的和意义

矿井火灾是指发生在矿井井下或地面井口附近,威胁矿井安全生产,并形成灾害的一切非控制性燃烧。矿井火灾不仅包括发生在煤矿井下的火灾,还包括发生在地面但威胁到井下安全或发生在煤矿企业生产范围之内的火灾,如井口附近、绞车房内、主要通风机机房内的火灾。在此把发生在井下的火灾以及发生在井口附近而威胁到井下安全,影响生产的火灾统称为井下火灾。井下火灾可发生在井口楼、井筒、井底车场、机电硐室、爆炸材料库、进回风大巷、采区变电硐室、掘进工作面 and 回采工作面以及采空区、煤柱等地点。井下火灾燃烧产生的烟气流动受空间限制而不是自由流动,且其发生发展过程受到可燃物的性质和通风网络的结构影响。

矿井火灾是煤矿生产中的主要自然灾害之一。煤矿井下作为独特的工作环境,具有空间狭小、通风巷道错综复杂、供风量有限等特点,发生火灾时井下工作人员的逃生避灾会受到空间环境的影响。煤矿井下存在大量的易燃物质,火灾极易发展蔓延,高温火烟在巷道流经的路程上,掺入新鲜风流时,将会在掺风地点形成新的火源。矿井火灾事故一旦发生,轻则影响生产,重则不仅会造成人员伤亡、物资器材损失、煤炭资源大量被烧毁或冻结,而且产生大量的高温烟流和有害气体,危及井下工作人员的生命安全,有时还诱发瓦斯、煤尘爆炸等恶性事故,特别是在火灾高温烟气的热力作用下,矿井通风系统的大小及方向常会发生改变,以致全系统发生紊乱,事故及其危害进一步扩大,给救灾工作增大难度。我国每年都有多起矿井火灾恶性事故发生,给矿

井带来巨大的灾难。例如,1990年5月,黑龙江省鸡西市小恒山矿输送带起火,导致80人死亡,23人不同程度受到伤害。1995年12月,大屯煤电公司姚桥矿带式输送机大巷发生火灾,27人死亡。2002年,在国有重点煤矿事故严重度统计表中,按每起事故造成的死亡人数统计,矿井火灾事故位居榜首。2006年10月,河北省邯郸市峰峰矿区隆鑫煤矿2-9号煤层的进风巷道井下发生电缆着火事故,当时井下有63人作业,有51获救,12人死亡。2010年1月,湖南省湘潭市谭家山一座煤矿发生电缆起火事故,25人死亡;3月,河南省新密市东兴煤业有限公司主井西大巷第一绕巷发生电缆着火事故,25人死亡;7月,郑煤集团新岭煤矿西井巷道着火,造成井下多名矿工被困,8人死亡;7月,韩城市新鑫矿业公司小南沟煤矿副斜井井底动力电缆着火,现场作业的28名矿工死亡。2011年7月6日,山东省枣庄市薛城区防备煤矿井下运输下山底部车场空气压缩机着火,引燃钢棚背帮材料及煤体等可燃物,产生大量有毒有害气体,28人死亡。

巷道火灾是指纵向尺寸比横向尺寸大一个数量级以上的狭长空间发生的火灾。它的外延除了包括矿井明火火灾外,还包括隧道、地铁、地下电站、地下商场等地下建筑火灾。矿井外因火灾大多属于巷道火灾,是矿井五大灾害之一,占矿井灾害损失的15%以上。本书研究的火灾特指矿山井下巷道内由固体燃料如煤、坑木、输送带、风筒等的扩散燃烧而形成的巷道火灾。

而通风系统是矿井重要的生产系统,关系井下人员的生命安全,通风系统的好坏与火灾防治、瓦斯事故、粉尘治理、热害治理等都是密切相关的。许多严重事故都与通风系统不合理或不可靠有关。巷道火灾燃烧时形成火风压,容易引起局部风流状态紊乱,甚至造成整个通风系统风流状态的混乱。因此,提高灾变时期通风系统的可靠性和抗灾能力也尤为重要,能够使火灾发生后使其影响范围限定在损失最小的范围之内,并为人员的逃生避灾提供指导,对于降低人员的伤亡率有着重大的现实意义。

为了确保煤矿安全生产的正常进行,减少火灾事故带来的严重损失,加强对矿井巷道火灾发生机理、烟气流动规律以及火灾时期矿井通风系统抗灾能力的研究,基于国内矿井巷道火灾频发的严峻事实,特提出了本课题,通过综合采用理论研究、实验测试和数值模拟的方法对矿井巷道火灾燃烧特性、火源热释放速率和放热量、火灾烟气流动和温度、速度、密度和静压的分布规律,风流紊乱规律、巷道火灾引起的浮力效应(火风压)、节流效应(火区阻力)以及火风压和火区阻力对通风网络的影响等内容进行研究,对矿井通风系统抗灾能力进行分析和评价,力求掌握矿井巷道火灾的灾变规律及对通风系统的影响规律。本书的研究对于预防矿井火灾和开展救援行动具有重大的意义,有助于降低火灾事故发生概率,减少人员伤亡和财产损失,从根本上提高煤矿的安全性。

1.2 国内外研究现状

矿井火灾作为一种长期威胁矿山安全生产的主要自然灾害之一,历来受到人们的极大关注。自20世纪50年代波兰学者W. Budryk针对火灾时期风流紊乱规律进行了一系列开创性的研究工作以来,国内外均投入了大量的人力、物力从各个方面开展了广泛的研究工作并取得了一定的成果。但由于火灾过程的复杂性、多变性、随机性以及通风网络的动态性,使人们对于矿井火灾的发生、发展及其后果在很大程度上还仅限于定性的水平。

1.2.1 火灾理论的国内外研究现状

1.2.1.1 火灾理论及其相关学科的发展现状

火灾科学是基于燃烧学、计算机科学、传热学、应用数学、化学、流体力学、灾害学等学科基础上发展起来的一门综合性的交叉学科,火灾科学主要研究火灾发生机理、火灾蔓延过程、烟气运动规律、火灾产生的危害以及火灾防治、不同种类火灾中的特殊现象等内容。从20世纪60年代起,世界上很多国家都相继成立了具有一定规模的火灾科学研究机构。20世纪70年代末80

年代初,在国际上非常著名的火灾科学研究机构组织了几次大规模的联合研究项目,并于1985年在美国召开了第一届国际火灾安全科学学术会议,设立了国际火灾安全科学学会。在国际大环境的影响下,我国在火灾科学的研究方面取得了一定的进展,在“八五”期间成立了“中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室”,并创建了《火灾科学》杂志。

火灾理论以燃烧学的基本原理为基础,而燃烧学则主要是应用热力学化学、传热学、传质学以及流体力学等理论来阐述燃烧现象的本质。随着火灾学科的发展,又产生了一些新的科研分支,比如热流体力学、燃烧流体力学、计算流体力学、气体动力学、化学热力学、化学动力学、动态传热学、数值传热学等相关理论。

1.2.1.2 火灾研究方法的发展状况

火灾是一种灾害性的现象,其发生和发展规律具有随机性和确定性的双重特点。火灾的确定性规律则可采用工程科学的研究方法进行,主要有理论分析、实验研究和计算机模拟3种方法,如图1-1所示。

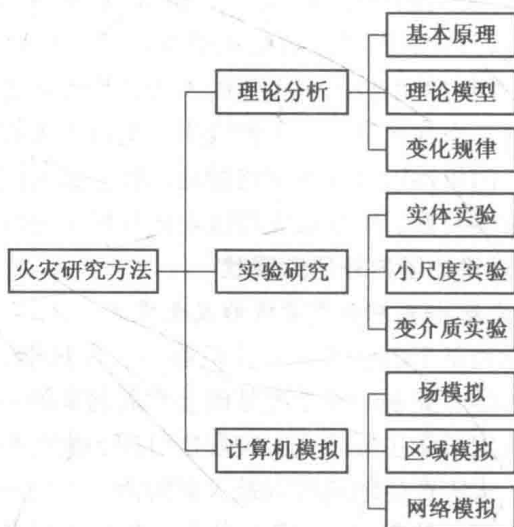


图 1-1 火灾研究方法分类

理论分析方法是根据自然科学基本原理对火灾现象进行分析,进而总结出某一火灾现象和过程的基本规律。理论分析方法是一种重要的基本研究方法,是实验研究和计算机模拟的基础。

实验研究是一种较为直接、可靠的途径。它一方面可以通过观察测量和数据分析来回归总结具体现象的定量关系和火灾过程的机理和规律;另一方面可为有关理论或计算模型提供可靠的依据并进行验证。实验研究包括实体实验、小尺度实验和变介质实验。实体实验是火灾科学研究最可靠的实验研究手段,其效果最为接近实际情况,但投资大、周期长,人力、物力消耗较多,有些实体实验实际上很难进行。小尺度实验投入相对较少,能较全面地研究火灾规律,这种方法已成为目前采用比较多的实验手段,并取得了理想的研究成果。但它建立的物理量模型与原型不易完全相似,即两系统描述同一物理现象的所有相似准则不可能全部相等,选择不同的相似准则会有不同的模拟结果,这些对模拟结果的准确性都会有一定影响。变介质实验如用盐水实验来研究建筑物内烟气的运动规律等,是另一种方便可行的实验方法,但它除带有小尺度模拟的弱点外,还存在介质物性不同带来的误差。

实验研究存在的不足迫使人们为火灾研究寻找新的出路,使计算机模拟方法应运而生。计算机模拟是根据物理、化学、流体力学及传热学的基本定律以及一些合理的简化和假设,构造描述火灾现象和过程的数学模型,然后借助于计算机定量计算出火灾发生及发展过程的参数及其变化情况。由于它用理论研究成果来分析处理火灾过程,有助于人们加深对火灾机理的认识,同时它能够在某些无法或难以进行实验的情况下发挥独到的作用,提供有参考价值和指导意义的结果。

计算机模拟方法依据对火灾物理模型研究区域中控制体的划分及数学模型的不同,可分为场模拟、区域模拟、网络模拟3种。场模拟是从最基本的物理、化学原理出发,直接描述火灾烟流速度场、浓度场及温度场等的变化,其数学模型是在数学上抽

象出的一组基本方程,包括连续性方程、动量方程、能量方程以及一些辅助方程等,主要以偏微分方程的形式出现,目前一般用计算流体动力学(CFD)的方法计算求解。区域模拟是根据火灾烟气分层现象,把一个受限空间分成为数不多的几个区域(或控制体),并且假设每个区域内部的各物理状态参数均匀一致,而质量、能量的交换只发生在区域与区域之间,区域与其边界之间以及它们与火源之间。从这一思想出发,根据质量、能量守恒原理对各个空间可以推导出—组描述火灾现象的常微分方程,而区域、边界及火源之间的质量、能量交换则通过方程中所出现的各个源项体现出来。网络模拟是从整个网络系统的角度出发,将灾变风流的流动看成是沿通风系统巷道的一维流动过程,根据质量守恒和能量守恒定律以及巷道阻力定律,考虑火灾的热力作用和灾变风流沿巷道的非稳态传热,利用计算机数值分析方法,解算出矿井通风网络各分支的风量、风温、风压、有害气体浓度、节点压力和通风机工况等参数在火灾影响下的动态变化及风流逆转的情况。

当然,计算机模拟与实验研究方法并不是截然分开的,采用计算机模型进行火灾研究,需要很多基本数据作为输入条件,有些数据则需要从火灾实验中获得,如燃料的燃烧速度、释烟率和毒性等;同时,计算机模拟得出的结论是否正确,与实际情况的误差多大,也需要用火灾实验数据来加以检验。另外,可以利用计算机模拟进行实验的预先设计,确定更科学、合理的实验方案,以达到提高实验效率、节省时间和资金等目的。

1.2.1.3 矿井火灾时期烟气流动及通风状态理论研究状况

1. 国外研究现状

国外很早就开始了对矿井火灾时期烟气流动及通风状态的理论研究,取得显著的研究成果。这些成果主要包括波兰学者W. Budryk创立的过量烟气学说和后来的局部火风压理论。W. Budryk的过量烟气学说认为,除火风压之外由于火灾而造成的气体膨胀等效于在火灾发生处加一外来的流源。该学说解释了

主干风路（特别是上行风路）烟气倒退的原因，并得出了相应的风流方向判别式。后来，由该学说发展而成了局部火风压理论，为分析旁侧支路风流的逆转和下行主干风路的倒退提供了理论依据。此后，学者们提供了很多判别式以判断各种不同风流（上、下行风流）流向的巷道发生火灾时风流的流向。这些理论已在火灾时的风流控制及救灾工作中广泛应用，但判别式中过量烟气、局部火风压等参数的计算，尚无一致公认的成果。目前，局部火风压的计算公式仍有 10 种之多，各种方法在不同的条件下均有一定的适用性。其中由流体静力学及热力学出发所推导出的计算公式，因其形式简单、计算方便，在现场实际局部火风压计算中应用最广泛。

20 世纪 50 年代，美国哈佛大学 H. W. Emmons 教授最早提出关于火灾模型的概念。他组织和领导的科研小组进行了大量的理论研究，并成功应用三大守恒定律即质量、能量和动量守恒的原理来描述火灾过程，这些理论为后来的火灾区域模拟奠定了理论基础。波兰克拉科夫矿冶学院井工开采与劳动安全研究所 J·华采瓦维克用圆柱坐标系下组分浓度的二维对流扩散方程描述了火灾气体浓度的变化；W·齐乌尔津斯基和 J·特拉兹等人假定燃料燃烧率是一给定的时间常数，在燃烧过程中只产生一种燃烧产物 CO_2 ，其他产物忽略不计，得出 O_2 和燃料的比例关系式。德国瓦尔特·保特根据燃烧物的发热值及每米巷道燃烧物的质量计算理论发热量，在计算烟流温度时，只取理论发热量的 75%，并给出了火灾烟流温度冷却曲线的指数关系式，提出火风压的大小可以通过烟流温度冷却曲线近似计算，同时，在网络解算中，火风压作为局部压力源考虑。利波矿业学院把烟流温度直接用于网络解算，火风压不再作为局部压力源考虑，而是根据烟流温度变化计算火风压、火灾的节流作用和风量变化。

2. 国内研究现状

根据火灾时期的风流（烟流）流动状态、烟流污染状态与火灾燃烧产物的关系，火灾时期矿井通风系统的分支可分为 4 个

区域,即非污染区域、火区、污染区域和可能污染区域。矿井发生火灾后,对于各区域的最高温度的研究,国内外专家学者采用能量守恒模型法推导出了火区烟流最高温度的计算公式,得出了在巷道污染范围内烟流温度分布的计算公式。国内学者研究指出,矿井发生火灾后的烟流蔓延过程中,随着热烟气的流动会出现一个热烟气层的下降速度。

中国矿业大学应用突变理论推导出了巷道发生火灾时下行通风主干风路风流逆转的突变势函数,详细描述了发生逆转过程所具有的突变特征;采用 CFD 场模拟技术再现了巷道火灾的烟流滚退现象,并且预测了在不同火源热释放速率和巷道通风速度条件下的烟流滚退距离。同时,该高校研究人员针对巷道火灾发生的特殊性,建立了矿井掘进巷道火灾数学模型,并在 1997 年完成的国家自然科学基金重点项目子课题“矿井火灾过程理论模型及其救灾决策系统的研究”中,首次将热阻力的概念引入矿井火灾节流现象的研究中。清华大学学者采用数值分析的方法研究了井下掘进巷道内火灾所导致的继发性灾害发生的条件。张国枢对可压无黏理想流体忽略火源燃烧特性和位置,在重力差公式的基础上,应用温度沿巷道的指数变化规律导出了火风压的计算公式,并把 5 个火风压公式进行了比较,但没说明哪个公式更准确。李传统得出了倾斜(或垂直)巷道及水平巷道内火灾燃烧区热阻力系数的表达式,但对温变系数及方程数值求解没有论述。谢旭阳利用矿井火灾模拟软件 MFIRE 对斜井胶带火灾进行了模拟,分析了胶带火灾的潜在危险,对确定的控风方案进行模拟和比较以选出最优控风方案,同时确定出相应的避灾路线,为制定胶带火灾的预防处理计划提供参考。

而在隧道火灾研究方面,国内学者运用场模拟的方法对隧道火灾烟气的浓度场、温度场等的分布情况进行了数值模拟的研究,对隧道发生火灾后的烟流蔓延规律进行了一定的研究。研究人员根据传热学等相关理论,先后建立了隧道火灾后温度场计算公式,对隧道火灾后温度场随时间和空间的变化规律进行了理论

与实验的研究,并分析了影响其分布的各种因素。也有学者采用了常规的插值函数,将三维流动问题转化为二维数值计算问题,并将计算结果与实验研究结果进行了比较分析,为了解隧道内外火灾温度场分布和传递规律奠定了一定的基础。隧道火灾与矿井火灾有相似之处,因此,可以将对隧道的研究成果加以修正借鉴到对矿井火灾的研究。

1.2.2 火灾时期矿井通风系统烟气流动实验研究现状

长期以来,实验研究一直是矿井火灾及其相关学科(如流体力学、传热学、燃烧学等)领域中的重要研究手段之一。针对火灾时期的矿井通风状态及烟流运动规律,国内外均展开了大量的实验研究,其中既有实际火灾场景的巷道实验,也有小规模模型实验。

1.2.2.1 国外研究现状

20世纪70年代初,波兰在巴尔巴拉实验矿井对火灾的早期预测、火源的探查、烟流的组分、风流的异常变化以及灾变通风等问题进行了实验研究。美国在模型实验和巷道实验的基础上于20世纪80年代初期在实验矿山中进行了燃煤的大规模实验,考察了烟流气体组分与通风参数变化间的关系。1985—1987年,德国在多特蒙德市的一个矿山中对斜井中的火灾进行了实验,考察了不同的风流速度、风流方向、燃烧规模等条件下,着火巷道中的温度分布,以及输送带燃烧时火焰沿输送带扩展的距离。另外,德国在一个盐矿的平巷中也进行了输送带实验。考察了不同风速条件下输送带的燃烧速度,以及烟流气体组分和温度在巷道中的分布。

日本在20世纪80年代进行了多次规模不同的巷道火灾实验。学者中川佑一等对不同巷道发生的火灾进行了实验研究,包括倾斜巷道火灾时期风流流动状态、烟流弥散以及掘进工作面火灾后风流流动状态,实验对火灾后烟流温度分布情况、风流速度变化及有害气体的传播蔓延状态进行了研究与分析,并且推导出了相关的计算公式。1988年井上雅弘等人在九州矿研究中心的