


全国优秀博士学位论文

中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

防治煤炭自燃的 三相泡沫 理论与技术研究

 秦波涛 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

防治煤炭自燃的三相泡沫 理论与技术研究

秦波涛 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对我国煤矿井下环境条件复杂及现有常规防灭火技术的不足,介绍了由粉煤灰或黄泥、氮气和水组成的三相泡沫来防治煤炭自燃。全书共九章,主要内容包括:三相泡沫组成成分及特性研究,三相泡沫形成机理及稳定性分析,三相泡沫制备的实验研究,三相泡沫发泡器设计原理及结构优化研究,三相泡沫流体特征及数学模型研究,三相泡沫防治煤炭自燃的机理及性能实验研究,三相泡沫现场应用研究。

本书可供从事煤炭行业的科研、工程技术人员参考,也可作为普通高等学校采矿工程、安全技术与工程及相关专业研究生、本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

防治煤炭自燃的三相泡沫理论与技术研究/秦波涛著.

徐州:中国矿业大学出版社,2009.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0501 - 8

I. 防… II. 秦… III. 矿山灭火:泡沫灭火—研究

IV. TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 179518 号

书 名 防治煤炭自燃的三相泡沫理论与技术研究

著 者 秦波涛

责任编辑 杨传良

责任校对 何晓惠 王美柱

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

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 5.75 字数 148 千字

版次印次 2009年10月第1版 2009年10月第1次印刷

定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

近十年来,煤炭自燃防治理论与技术在我国得到了较好的发展,特别是一些新技术、新工艺、新材料的应用,有效地防治了矿井的煤炭自燃,保障了矿井的安全开采。

然而,我国煤矿开采自然条件复杂,煤炭自燃防治还面临一些困难,特别是大范围采空区或巷道高冒火灾、采空区隐蔽火源及高位火源、综放及俯采工作面煤炭自燃防治还没有切实可行的技术和手段。因此,针对以上区域(地点)煤炭自燃防治的难题,为进一步提高我国煤炭自燃防治科技水平,在现有注浆、注氮气防灭火技术的基础上,创新性地提出了由粉煤灰(黄泥)、氮气和水组成的三相泡沫防灭火新技术。所谓三相泡沫,是指在粉煤灰或黄泥浆液中添加极少量的发泡剂、稳泡剂等添加剂并引入氮气,通过三相泡沫发泡器物理机械发泡,形成粉煤灰或黄泥颗粒均匀地附着在气泡壁上的多相体系。

为深入研究三相泡沫技术及相关理论,并能够在煤矿推广应用,作者将“防治煤炭自燃的三相泡沫理论与技术研究”作为自己攻读博士期间的研究课题。该课题在导师的指导下,取得了一些有价值的研究成果,并已在全国 80 多个矿井得到了成功的应用并推广到孟加拉国孟巴矿,取得了显著的经济效益和社会效益,为我国煤炭自燃,尤其是采空区大范围、巷道高冒区、采空区隐蔽地点煤炭自燃的防治提供了关键技术和装备。

本书采用理论分析、实验研究和现场应用相结合的方法,提出了三相泡沫的形成机理,分析了三相泡沫的稳定性、破灭机制及其影响因素;研制出了发泡倍数高、稳定时间长的发泡剂和高效的三

相泡沫发泡器；制备出了高性能的三相泡沫；通过实验研究了浆液浓度、发泡倍数、外界温度和气体介质对三相泡沫黏度的影响，建立了三相泡沫在管道流动和大空间堆积的数学模型；实验研究了三相泡沫防止煤炭自燃的阻化特性；提出了地面打钻、支架后方插管、沿顺槽向采空区埋管和与注砂、注凝胶等相互配合使用的多种注三相泡沫的工艺技术。

从本课题的实验、理论分析、现场应用直到本书的写作等每个环节都凝聚着导师王德明教授的心血。他在学术上给予了我许多启发和帮助，其渊博的知识、严谨求实的治学态度、务实创新的科研作风、孜孜不倦的拼搏精神和无私奉献的高尚品德使我终生受益，在此谨向导师致以最诚挚的感谢！感谢所有关心、支持、帮助过我的各级领导、老师、同事和朋友们！感谢广大煤矿现场领导和工程技术人员的支持和帮助！

本书是在我博士学位论文（2007年获全国优秀博士学位论文）的基础上整编而成的，并得到了校研究生院的“中国矿业大学优秀博士学位论文”出版资助，同时还得到了全国优秀博士学位论文专项基金（2007B53）、国家自然科学基金（50274068）、江苏省自然科学基金（BK2008123）、教育部博士点基金（20020290001）、中国矿业大学科技基金（2007B001）、江苏省研究生创新基金的项目资助，在此表示感谢！

本书的观点和论述难免有不尽完善之处，敬请读者和同行提出批评和指正。

秦波涛

2009年3月于中国矿业大学

摘 要

煤炭自燃是我国矿井的主要自然灾害之一。为了防治煤炭自燃,国内外广泛采用灌浆、喷洒阻化剂、注惰气等技术。近年来,又较广泛地采用注凝胶、胶体泥浆、阻化汽雾、泡沫树脂和惰气泡沫等技术。这些技术对保证矿井安全生产起到了重要作用,但还存在不足:采用灌浆技术,浆体注入采空区后,一般为由高向低的“线”流动(俗称“拉沟”),扩散范围小,浆液易流失;注惰性气体,气体易随漏风遗散,不易滞留在注入的区域内,且灭火降温能力差;注凝胶、泡沫树脂等,流动性差、流量小、成本较高;注惰气泡沫,泡沫易破灭,一旦水分挥发,防灭火的性能就消失。

为了既能有效利用目前的防灭火技术与手段,又能克服其不足,特别是针对大范围采空区或巷道高冒火灾、采空区隐蔽火源及高位火源、综放及俯采工作面煤炭自燃防治的难题,作者研究了由粉煤灰(黄泥)、氮气和水组成的三相泡沫防灭火新技术。在矿井灌浆系统中加入氮气,使泥浆发泡,体积增大,大流量的三相泡沫能在采空区中形成面与三维的流动方式,较之一般的水浆流动,其覆盖面广,并可向上部堆积,能将更多的水、固体不燃物(黄泥、粉煤灰)带入防灭火区域,防灭火效果显著。三相泡沫防灭火新技术有以下主要特点:

(1) 可以利用煤矿已有的注浆系统将三相泡沫注入采空区并形成覆盖面广、可向高冒区堆积的泡沫体,能较好地充填采空区或高冒区,有效防治火灾。

(2) 研制出了使浆液具有较高发泡倍数和较长稳定时间的三相泡沫发泡剂。该发泡剂具有以下特点:① 能改变粉煤灰或黄泥

颗粒的表面特性,使亲水的固体表面疏水而易悬浮;②能适应不同的水质要求,可克服液相水中多价阳离子以及其他众多杂质的影响;③能悬浮结构复杂、相对密度较大的不规则颗粒;④能将氮气包裹在泡沫内且稳泡时间长。同时,该发泡剂属于无毒、无刺激的安全环保材料。

(3)应用浮选动力学、表面化学、物理化学、热力学和流体机械等理论,较系统地提出了三相泡沫的形成机理:发泡剂使浆液表面的张力大大降低,通过物理吸附、离子交换吸附和氢键结合等形式使发泡剂在粉煤灰或黄泥表面上形成亲水基朝向粉煤灰或黄泥、疏水基朝向水的定向吸附,使颗粒表面疏水,使之易于黏附在气泡壁上;通过浆体与氮气提供的动力克服了固体颗粒和气泡之间水化层的能峰,形成了三相润湿界面;浆液经过发泡器时,由于泥浆和气体具有较高的动能,混合后在低压区造成的过剩能量对三相混合液做功,同时由于表面活性剂的存在,形成了大量具有三相介质的泡沫群体。

(4)根据三相泡沫的特点,发明了三相泡沫发泡器。三相泡沫发泡器利用文丘里管的流体力学特性,使浆液形成射流并引入气源,在集流器后部产生湍流,使气—液—固三相充分混合,从而产生较高倍数的泡沫,再配合利用浆体的能量冲击叶轮快速旋转,使泡沫细化,提高了三相泡沫的稳定性。整个发泡装置紧凑,依靠浆体的动力发泡,不需另附动力装置,使用简便,发泡高效、稳定、可靠。

(5)应用流体力学理论,建立了发泡器喉部至扩散段区域负压大小和浆液流量关系的方程式,并通过CFD流体力学软件模拟了三相泡沫发泡器内不同扩散角度下管内静压和浆液流速的分布规律,得出了扩散角为 60° 时的压力和流速是形成三相泡沫的最佳条件的结论。

(6)开展了三相泡沫发泡剂溶液阻化煤自燃的试验研究,试

验结果表明:三相泡沫发泡剂溶液对煤自燃的阻化效果显著,能有效地减缓煤的氧化放热速率,抑制煤温度的升高,同时也能有效地抑制 CO 的释放,是很好的防治煤炭自燃的阻化剂。三相泡沫的灭火性能试验表明,三相泡沫可在较致密的多孔介质中沿不同方向流动,渗透性强,流动范围广,可扑灭较大范围区域内的高位火源和隐蔽地点的火源。三相泡沫产生量大,较一般注水注浆灭火,其灭火速度快、效率高,防复燃效果好。

(7) 三相泡沫流变特性研究表明,含黄泥或粉煤灰颗粒的三相泡沫属于屈服假塑性非牛顿流体。试验考察了发泡倍数、浆液浓度、外界温度及气体介质对三相泡沫黏度的影响;建立了三相泡沫在水平管道中流动的数学模型,根据模型可以计算三相泡沫在管路中流动的各项参数;实验研究了三相泡沫在管路中流动阻力的大小,根据三相泡沫在注浆管路中的管压降确定了三相泡沫发泡器在井巷中合理的安装位置;建立了三相泡沫在大空间中堆积高度的数学模型,通过该模型可以估算出三相泡沫在采空区大空间内的堆积高度,并通过实验验证了该数学模型的可靠性。

(8) 建立了一套适合煤矿自燃火灾防治的注三相泡沫的工艺系统。该系统由注浆管路、发泡剂定量添加装置、过滤器、搅拌器、发泡器、注氮气系统和旁通管路组成。该系统安全可靠,操作方便,可连续大流量灌注。提出了沿采空区顺槽埋管、综采(综放)支架插管、地面打钻和与其他防灭火技术手段相互配合使用的多种注三相泡沫新工艺,并在现场得到了广泛应用,取得了非常显著的防灭火效果,大大提升了矿井的安全水平。

本书的研究成果目前已在宁夏白茆沟煤矿、辽宁大兴煤矿、河南耿村煤矿、江苏姚桥煤矿、山东柴里煤矿、新疆大黄山煤矿、贵州大湾矿、安徽国投新集二矿、陕西玉华煤矿等 80 多个矿井得到了成功的应用,取得了显著的经济效益与社会效益。尤其在治理宁夏白茆沟矿特大区域火灾、耿村矿 12190 综放面巷道特大高冒火

灾以及辽宁铁法大兴矿综放面采空区自然发火中,三相泡沫技术起到了关键的作用。应用三相泡沫技术能有效防治煤炭自燃,提高我国煤炭自然发火防治的技术水平,保障矿井的安全生产,推动煤炭行业的科技进步。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言.....	1
第二节 国内外研究现状综述.....	4
第三节 研究的目标与主要内容	11
第四节 研究的技术路线及实验方案	13
第二章 三相泡沫组成成分及特性研究	15
第一节 固相成分——粉煤灰或黄泥	15
第二节 液相成分——水	29
第三节 气相成分——氮气	31
第四节 本章小结	32
第三章 三相泡沫形成机理及稳定性分析	33
第一节 表面活性剂的分类及性质	33
第二节 泡沫的基本特征	36
第三节 发泡剂的吸附	39
第四节 三相泡沫的形成机理	41
第五节 三相泡沫的稳定性及影响因素	48
第六节 本章小结	61
第四章 三相泡沫制备的实验研究	63
第一节 发泡剂	63
第二节 三相泡沫实验参数研究	69

第三节	三相泡沫实验室模拟实验	82
第四节	本章小结	84
第五章	三相泡沫发泡器设计原理及结构优化研究	86
第一节	射流原理	86
第二节	三相泡沫发泡器设计的流体动力学依据	91
第三节	产生三相泡沫的流体动力学	96
第四节	本章小结	98
第六章	三相泡沫流体特征及数学模型研究	99
第一节	三相泡沫的流变特性	99
第二节	三相泡沫在管道中的流动特性	112
第三节	三相泡沫在大空间动态堆积的数学模型	116
第四节	本章小结	124
第七章	三相泡沫防治煤炭自燃的机理及性能实验研究	125
第一节	采空区浮煤自燃过程的化学动力学分析	125
第二节	三相泡沫防治煤炭自燃的机理	127
第三节	三相泡沫防治煤炭自燃的性能实验	132
第四节	本章小结	138
第八章	三相泡沫现场应用研究	140
第一节	注三相泡沫的准备及技术指标	140
第二节	一般采空区注三相泡沫的应用	142
第三节	倾斜俯采综放工作面采空区 注三相泡沫的应用	146
第四节	大面积采空区火灾注三相泡沫的应用	151
第五节	本章小结	155

目 录

第九章 总结.....	157
第一节 主要结论.....	157
第二节 主要创新点.....	160
第三节 研究工作的展望.....	161
参考文献.....	162

第一章 绪 论

第一节 引 言

煤炭是我国的主要能源,在国民经济能源结构中占据很重要的位置,占我国一次能源消费的70%以上^[1]。随着国民经济的快速发展,煤炭的需求量越来越大。近几年,我国原煤产量快速增长,2004年全国原煤产量超过了19亿t。在原煤产量快速增长的同时,必须保证矿井的安全高效开采,而矿井火灾是煤矿的主要自然灾害之一。纵观有史以来各煤矿所发生的矿井火灾,轻则影响生产,重则严重烧毁煤炭资源和矿井设备,导致整个工作面甚至整个矿井的封闭,更为严重的是可能造成重大的人员伤亡等恶性事故。据不完全统计,2004年我国直接由矿井火灾引起的重大事故如表1-1所列。而煤炭自燃是矿井火灾的主要形式,如苏联存在煤炭自燃的矿井比例为70%~75%,波兰为75%~80%^[2,3];在我国国有重点煤矿中,有56%以上的矿井存在自然发火的危险,由煤炭自燃而引起的火灾占矿井火灾总数的90%以上^[4]。同时,部分重特大瓦斯爆炸事故也是由煤炭自燃引起的,如表1-2所列。据2002年统计资料,全国煤矿共发火201次,其中由煤层自燃引起的为182次,占矿井火灾总数的90.5%,64个采区由于煤层自燃而被封闭,冻结煤量3225万t。

近年来,我国广泛采用综采放顶煤开采技术,使生产效率大幅提高,但采用这种采煤方法采空区顶板垮落高度大、采空区遗留煤

表 1-1 2004 年煤矿矿井火灾重特大事故不完全统计表

发生事故的时间	发生事故的煤矿	火灾原因	死亡人数
2004 年 12 月 13 日	湖南湘潭市新立煤矿	井下电器起火	18
2004 年 10 月 10 日	湖南郴州战友和万宝煤矿	两矿井贯通处起火	14
2004 年 8 月 23 日	广东梅州市又一村煤矿	井下电缆着火	5
2004 年 7 月 14 日	湖南湘潭县双扶煤矿	井下电缆着火	10
2004 年 7 月 14 日	新疆乌鲁木齐鑫明煤矿	超层越界开采封闭矿井	9
2004 年 7 月 18 日	甘肃石门煤业公司石门沟煤矿	爆破作业	3
2004 年 7 月 3 日	云南曲靖市兴云煤矿	电缆燃烧	7
2004 年 6 月 10 日	吉林万宝煤矿	暗井绞车房起火	11
2004 年 5 月 18 日	山西朔州潘家窑煤矿	电气火灾	15
2004 年 4 月 14 日	福建龙岩市林坑煤矿	机械设备	5
2004 年 3 月 4 日	新疆泽普县卡拉吐孜煤矿	井下电缆着火	6
2004 年 1 月 6 日	山西大同上河沟煤矿	电缆着火	4

表 1-2 近年来由煤炭自燃引发的瓦斯爆炸重特大事故部分统计表

时 间	煤 矿	事故的地点	死亡人数
2005 年 1 月 21 日	辽宁铁法煤业集团大明煤矿重大瓦斯爆炸	废弃巷道	9
2004 年 11 月 28 日	陕西铜川陈家山煤矿特大瓦斯爆炸	采空区	166
2003 年 11 月 14 日	江西丰城新建煤矿特大瓦斯爆炸	采空区	51
2003 年 10 月 12 日	内蒙古包头市太来窑二号井特大瓦斯爆炸	采空区	10
2003 年 8 月 11 日	山西大同杏儿沟煤矿特大瓦斯爆炸	采空区	43
2003 年 1 月 11 日	黑龙江哈尔滨宝兴煤矿特大瓦斯爆炸	采空区	34
2000 年 10 月 27 日	辽宁抚顺煤炭回收加工厂(小井)特大瓦斯爆炸	采空区	20
1998 年 1 月 24 日	辽宁阜新王营煤矿特别重大瓦斯爆炸	综放工作面	78

多、漏风严重,使得采空区煤炭自燃危险性增大、自然发火频繁,已成为制约矿井安全生产与进一步发展的主要因素之一^[5]。同时,我国新疆、宁夏、内蒙古等地区还存在大面积的煤田火灾。每年烧损煤量 1 000 万~1 360 万 t,经济损失超过 200 亿元^[6,7]。煤炭自燃产生大量的 SO_2 , H_2S , CO 和 CO_2 气体,严重污染环境;煤田火灾还造成大面积的植被破坏,使土壤沙化。因此,煤炭自然发火的危害及其防治越来越受到煤矿安全工作者的关注。

国内外学者对煤炭自然发火研究的历史可追溯到 17 世纪。研究内容包括煤自然发火的预测预报、煤自然发火机理、煤自燃倾向性测定、煤自然发火标志性气体检测、防治煤炭自燃及灭火的技术和材料等^[8~18]。

为了防治煤炭自燃,国内外广泛采用注水、灌浆、喷洒阻化剂、注惰气等技术^[19~24]。近年来,又较广泛地采用了凝胶、胶体泥浆、阻化汽雾、泡沫树脂等防灭火技术^[25~35]。这些技术对保证矿井安全生产发挥了重要作用,但是都存在一定程度的不足,例如灌浆,浆体不能均匀覆盖煤体;注惰性气体,气体不易滞留在注入的区域内等。且这些防灭火技术和材料的共同缺点都是只采用气、液、固三相中的一相或两相作为防灭火介质,防灭火效果并不理想。

为了克服目前防灭火技术和材料的不足,需要不断地开发研制防灭火效果好、价格低廉、实用性强、安全环保、具有重大推广价值的新型防灭火材料。作者结合煤矿常规的防灭火手段和工艺,根据煤矿现场的实际情况,充分利用自然界固、液、气三相材料防灭火的特点,进行新型防灭火材料——三相泡沫的开发和研究。该课题的研究对于丰富矿井的防灭火手段、改善矿井的防灭火效果、促进煤矿自然火灾的预防和灭火具有重大的现实意义和经济效益。同时还可广泛用于其他各类火灾的防治、泡沫建筑材料的研制及地质勘探的泡沫钻进等领域,应用前景十分广阔。

第二节 国内外研究现状综述

煤炭自燃是具有自燃倾向性的煤在有适宜的供氧量、有蓄热氧化环境和时间的条件下发生物理化学反应的结果。煤炭自燃火灾一般具有以下的特点：①一般只要当氧气浓度大于3%时，煤与氧就会发生物理化学反应并放出热量和有毒有害气体，并且放热反应会源源不断地进行；②当氧化所放出的热量大于向周围环境散发的热量时，热量就会缓慢积聚使火源附近的空间储存大量热能；③火源点隐蔽且常处于松散煤堆的中上部，在初期一般很难发现；④矿井属于半封闭空间，煤炭自燃使煤体产生大量有毒有害和可燃可爆气体，这些气体顺风流动蔓延整个回风系统，极大地危害井下人员的生命安全^[36]。影响煤炭自燃的因素很多，影响过程也极其复杂。煤炭自燃火灾的发生须具备以下几个条件，其相互关系如图1-1所示。

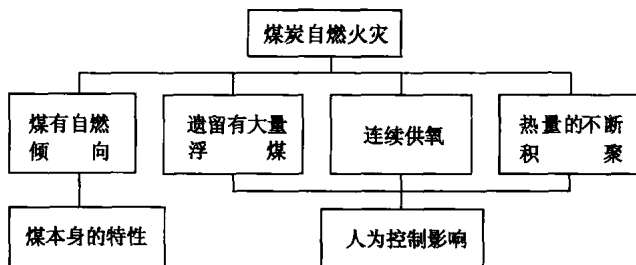


图 1-1 煤炭自燃火灾发生条件

从图1-1可以看出，在防治煤炭自燃的时候，任何防灭火技术和材料只要切断其中的任何一个乃至全部条件，就可以起到有效的防治效果。因此，所采用的防灭火技术与材料须满足：①覆盖煤体并封堵松散煤体的空隙，减少甚至杜绝漏风，隔绝煤体与氧气

的接触；② 充分惰化存在煤炭自燃倾向的采空区；③ 吸收煤体周围空间储存的热能，降低煤温；④ 破坏煤体表面的各种活性基团结构，阻化煤氧化反应。目前国内外在防治煤矿自然发火方面采用了多种防灭火技术和手段，取得了一定的成效。

一、当前主要采用的防灭火技术及评述

目前国内外防灭火技术主要采用预防性灌浆技术、阻化剂技术、注水技术、惰性气体技术等，在某些条件下也采用堵漏技术、凝胶技术等。

20 世纪 50 年代，灌浆技术成为我国煤矿防灭火技术的主要手段，并且一直沿用到今天。所谓的预防性灌浆技术是指将水和灌浆材料按适当的比例混合，配制成一定浓度的浆液，经过输浆管路利用自然压差或泥浆泵送到可能发生煤炭自燃的区域，以防止自燃火灾的发生。灌浆技术是一项传统的、简单易行的、比较可靠的防灭火技术。在一些缺少灌浆材料的矿区，通常采用注水来代替灌浆，增加煤体的水分，也取得了较好的效果。

阻化剂技术在美国、波兰、苏联等国家得到了较好的应用；近些年来，阻化剂技术在我国也得到推广应用。该技术主要是让水溶液附着在易被氧化的煤体表面，惰化煤体表面的活性结构，阻止煤与氧气的接触。

惰性气体技术从 20 世纪 70 年代开始在德国、法国、英国等发达国家煤矿中大量使用，从 80 年代起，我国开始了氮气防灭火技术的研究与推广。

近年来，凝胶技术在我国得到较广泛应用。凝胶分为无机凝胶和高分子凝胶两大类，其防灭火机理是凝胶通过钻孔或煤体裂隙进入高温区，其中一部分未成胶时在高温下迅速汽化，快速降低煤表面温度，残余固体形成隔离层，阻碍煤氧接触；而流动的部分混合液随着煤体温度的升高，在不远处及煤体孔隙里形成胶体，包裹煤体，隔绝氧气，使煤的氧化放热反应终止；干涸的胶体还可以降低原煤