

国家自然科学基金项目 (U1361213, 51504009, 51474010, 51874008) 资助

江苏省杰出青年基金项目 (BK20140005) 资助

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助

防治煤自燃的 凝胶泡沫及特性研究

张雷林 秦波涛 著

Fangzhi Mei Ziran De

Ningjiao Paomo Ji Texing Yanjiu



中国矿业大学出版社

项目(U1361213,51504009,51474010,51874008)资助

江苏省杰出青年基金项目(BK20140005)资助

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助

防治煤自燃的凝胶泡沫 及特性研究

张雷林 秦波涛 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

防治煤自燃的凝胶泡沫及特性研究/张雷林,秦波涛著. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3844 - 3

I. ①防… II. ①张…②秦… III. ①煤炭自燃—泡沫灭火—灭火剂—研究 IV. ①TU998.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 323916 号

书 名 防治煤自燃的凝胶泡沫及特性研究

著 者 张雷林 秦波涛

责任编辑 姜 华

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> **E-mail:** cumtpvip@cumtp.com

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787×1092 1/16 **印张** 9.25 **字数** 160 千字

版次印次 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 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

矿井火灾是煤矿生产中的主要自然灾害之一。矿井火灾不仅会烧毁大量的煤炭资源和设备,产生大量的高温烟流和有毒有害气体,严重危及井下人员的生命安全,而且还可能诱发瓦斯爆炸、煤尘爆炸、顶板冒落以及井巷垮塌等二次灾害,进一步扩大其灾害性。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和损失。近年来,随着综采放顶煤技术的推广和应用,煤矿生产效率大幅度提高,但是这种采煤方法冒落高度大、采空区遗留残煤多、漏风严重,使得井下煤炭自然发火更加频繁。同时,随着矿井向深部区域采掘,煤层瓦斯含量逐渐增大,低瓦斯矿井转变为高瓦斯或突出矿井。为防治瓦斯事故,我国常采用瓦斯抽采作为治理瓦斯的根本措施,但是在瓦斯抽采过程中,由于增加了抽采区域的漏风,因而引起的煤炭自燃问题变得十分突出。即在提高瓦斯安全性的同时也必将使自然发火安全性降低,反之,降低自然发火危险性的同时又不能满足安全排放瓦斯的要求,容易导致两种安全隐患的顾此失彼。

为了进一步提高我国煤炭自燃防治科技水平,在现有注浆、注泡沫和注凝胶防灭火技术的基础上,创新性地提出了凝胶泡沫防灭火新技术。所谓凝胶泡沫,是将聚合物分散在水中,加入发泡剂,并在氮气的作用下发泡形成的复杂混合体系。经过一段时间后,在泡沫液膜内,聚合物间相互交联形成三维网状结构,构成凝胶泡沫的刚性骨架。防灭火凝胶泡沫的性质很特别,既具有凝胶的性质,又具有泡沫的性质,兼有注三相泡沫、注凝胶、注复合胶体的优点,同时又克服了其各自的不足。

为深入研究凝胶泡沫技术及相关理论,并能够在煤矿推广应用,作者将“防治煤自燃的凝胶泡沫及特性研究”作为自己攻读博士学位的研究课题。该课题在导师秦波涛教授的指导下,取得了一些有价值的研究成果,并在部分矿井得到了成功应用,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、采空区隐蔽火源点煤炭自燃的防治提供了有效的技术方法。

本书采用理论分析、试验研究、数值模拟和现场应用相结合的研究方法,提出了凝胶泡沫形成的化学动力学过程和胶凝机理,分析了凝胶泡沫的稳定性、胶凝机制及其影响因素;研制出适合制备凝胶泡沫的稠化剂和交联剂,同时,依据稠化剂和交联剂对表面活性剂的作用特点,复配出一种发泡倍数高的凝胶泡沫发泡剂;通过试验研究了聚合物浓度、发泡倍数、温度、pH 值等对凝胶泡沫黏度的影响,建立了剪切应力-剪切速率的数学模型;在此基础上,研究了凝胶泡沫在多孔介质中的渗透特性和采空区空间堆积的数值模型;研究了凝胶泡沫的成膜特性,包括成膜微观形貌、水蒸气透过性、吸水性、热辐射阻隔性和堵漏性等;试验研究了凝胶泡沫的抗温性、抗烧性、凝结堵漏性和阻化性;最后,采用凝胶泡沫治理了煤矿现场采空区、高冒区等隐蔽位置火源。

从研究课题的试验、理论分析、现场应用直到本书的写作等多个环节都凝聚着导师秦波涛教授的心血和汗水。他在学术上给予作者很多启发和帮助,其渊博的知识、严谨求实的治学态度、务实创新的科研作风、锲而不舍的拼搏精神和无私奉献的高尚品德使作者终身受益,在此谨向导师致以最衷心的感谢和崇高的敬意!感谢所有关心、支持、帮助过作者的各级领导、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!

本书是在作者博士论文的基础上整编而成的,并得到了安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室资助,同时还得到了国家自然科学基金项目(U1361213,51504009,51474010,51874008)、安徽省自然科学基金项目(1608085QE114)、中国博士后科学基金项目(2016T90558,2015M571914)、安徽省博士后科学基金项目(2017B151)、江苏省杰出青年基金项目(BK20140005)和安徽理工大学中青年学术骨干项目资助,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。

张雷林

2017年12月



目 录

1 绪论	1
1.1 研究课题的提出	1
1.2 国内外研究现状	4
1.3 研究目标与主要研究内容	12
1.4 研究技术路线和试验手段	13
2 凝胶泡沫形成机理及制备方法	15
2.1 凝胶泡沫基本特性	15
2.2 关键组分选择	16
2.3 凝胶泡沫形成过程及胶凝机制	22
2.4 凝胶泡沫试验制备	39
2.5 本章小结	55
3 凝胶泡沫在采空区流动特性研究	56
3.1 流变模型	56
3.2 凝胶泡沫流变特征	59
3.3 剪切稀化特性的试验研究	69
3.4 附壁性能和渗透性试验研究	72
3.5 凝胶泡沫在采空区堆积与扩散特性研究	75
3.6 本章小结	82
4 凝胶泡沫成膜特性研究	84
4.1 试验材料	84
4.2 试验方法	85



4.3	试验结果与讨论	89
4.4	本章小结	97
5	凝胶泡沫防灭火性能研究	99
5.1	抗温性能试验研究	99
5.2	抗烧性能试验研究	101
5.3	凝结封堵性能试验研究	103
5.4	阻化煤炭性能试验研究	105
5.5	凝胶泡沫扑灭煤堆火的试验研究	109
5.6	本章小结	116
6	凝胶泡沫防治新集二矿煤自燃的应用研究	117
6.1	防治 111300 工作面采空区煤自燃	117
6.2	131309 工作面巷道高冒区应用	123
6.3	210813 工作面封堵漏风应用	126
6.4	本章小结	128
7	总结与展望	130
7.1	主要结论	130
7.2	主要创新点	132
7.3	今后研究工作的展望	132
	参考文献	134



1 绪 论

1.1 研究课题的提出

煤炭是我国的主要能源,在一次能源生产和消费结构中占 70% 左右^[1-4]。全国煤炭总产量从 20 世纪 80 年代中期不足 7 亿 t 到 2016 年的 34.1 亿 t,总量增加了近 4 倍,而且社会对能源的需求仍在不断增加。据预测,“十三五”期间,煤炭消费弹性系数在 0.2~0.3 之间,年均增速为 2% 左右,2020 年全国煤炭消费量将达 43 亿 t^[5,6]。我国石油储量严重不足而煤炭资源较为丰富的现状,决定了煤炭在相当长的时期内仍将是我国的主要能源^[7,8]。为此,在煤炭产量快速增长的同时,必须加大安全投入,确保煤炭工业持续、稳定、健康地发展。

煤炭自燃是煤矿生产中的主要自然灾害之一。近年来,随着综采放顶煤技术的推广和应用,煤矿生产效率大幅度提高,但是这种采煤方法冒落高度大、采空区遗留残煤多、漏风严重,使得井下煤炭自然发火更加频繁。据统计,全国重点煤矿中,每年由煤炭自燃形成的火灾约 360 次^[9],煤炭氧化自热形成的火灾隐患约 4 000 次^[10]。我国煤矿至今仍残存火区近 800 个,封闭和冻结煤量 2 亿多吨^[11]。煤炭自燃常使数千万元的机器设备被封闭在自燃火区中,大量的煤炭被冻结,合理的开拓部署和开采顺序被打乱,为矿井带来巨大的经济损失和重大的事故隐患。此外,煤炭自燃不仅给井工矿带来灾害,而且对露天矿或浅埋煤层的煤田同样不可忽视,会引发大面积的煤田火灾^[12]。以新疆为例,目前该地区共有煤田火灾 44 处,火区面积达 992 万 m²,年燃煤损失量达 552 万 t,火区威胁储量 477 亿 t,年排放 CO₂ 气体达 1 238 万 t,年直接经济损失约 2 亿元^[13]。内蒙古乌达、桌子山、鄂尔多斯、准格尔等几大煤田还存在 1 903 万 m² 的煤田火区^[14]。煤田火灾不仅直接烧毁不可再生



的煤炭资源,而且间接造成数十倍的呆滞资源不能开采,并直接威胁煤矿的安全生产,还造成土壤沙化、植被死亡、地面塌陷,严重危害当地的生态环境和地下水资源。据不完全统计,2005~2015年全国煤矿由煤炭自燃引起的矿井火灾事故如表 1-1 所示。

表 1-1 2005~2015 年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
2015 年 10 月 9 日	江西省永吉煤矿	违规启封火区煤炭自燃	10
2014 年 3 月 12 日	安徽省任楼煤矿	采空区漏风自燃	3
2008 年 8 月 18 日	云南省尚岗煤矿	自燃导致巷道坍塌	10
2008 年 5 月 17 日	湖南省短陂桥煤矿	采空区火区复燃	8
2008 年 3 月 5 日	吉林省金安煤矿	巷道自燃导致局部冒顶	17
2007 年 6 月 24 日	辽宁省隆兴煤矿	顶板煤炭自燃	4
2005 年 1 月 21 日	辽宁省大明煤矿	废弃巷道煤炭自燃	9

煤炭自燃火灾是指煤体因氧化产热而发生的火灾,严重影响煤矿安全生产。据统计,大部分厚煤层为易燃煤层,在条件适宜时,就会发生自燃,危害极大。同时,随着矿井向深部区域采掘,煤层瓦斯含量逐渐增大,低瓦斯矿井转变为高瓦斯或突出矿井。为防治瓦斯事故,我国常采用瓦斯抽采作为治理瓦斯的根本措施,但是在瓦斯抽采过程中,由于增加了抽采区域的漏风,因而引起的煤炭自燃问题变得十分突出。即在提高瓦斯安全性的同时也必将使自然发火安全性降低;反之,降低自然发火危险性的同时又不能满足安全排放瓦斯的要求,容易导致两种安全隐患的顾此失彼。在我国,煤炭自燃与瓦斯隐患共存的矿井占有相当比例,如果煤层自燃的防治不到位,很容易由煤层自然发火引起瓦斯爆炸,导致特别重大的人员伤亡和经济损失。在我国,近十年就多次发生由矿井煤炭自燃引发瓦斯爆炸的重特大事故,如 2014 年 6 月 3 日,重庆硃石台煤矿 4406S2 回采工作面下隅角采空区煤自燃,点燃采空区内积聚的瓦斯发生第一次爆炸,高温火焰和冲击波造成风流紊乱导致工作面上部采空区积聚的瓦斯再次发生爆炸,共造成 22 人死亡;2013 年 3 月 29 日至 4 月 1 日,吉林八宝煤矿—416 m 采区附近由于采空区漏风,造成煤炭自然发火引起采空区瓦斯连续爆炸,共造



成 53 人死亡。表 1-2 为 2005 年以来我国煤矿煤炭自燃引发的部分瓦斯爆炸事故统计表。

表 1-2 2005 年以来由煤炭自燃引发的部分瓦斯爆炸事故统计表

时 间	煤 矿	事故的地点	死亡人数
2015 年 10 月 9 日	江西省永吉煤矿	采空区	10
2014 年 7 月 5 日	新疆大黄山豫新煤业有限公司	综采工作面	17
2014 年 3 月 12 日	安徽省任楼煤矿	采空区	3
2013 年 3 月 29 日	吉林省八宝煤矿	采空区	36
2010 年 6 月 25 日	云南省毕草凹煤矿	1520 采面	5
2008 年 5 月 17 日	湖南省短陂桥煤矿	采空区	8
2008 年 8 月 18 日	辽宁省柏家沟煤矿	采煤面	26
2007 年 4 月 30 日	山西省刘家村非法煤矿	采面	14
2007 年 1 月 8 日	广西龙燕村非法煤矿	盗采巷道	3
2006 年 12 月 28 日	吉林省双鑫煤矿	采空区	4
2006 年 6 月 28 日	辽宁省五龙煤矿	331 采区	32
2005 年 1 月 21 日	辽宁省大明煤矿	废弃巷道	9

矿井开采中煤自燃主要发生在存在漏风通道的采空区、开切眼、停采线、地质构造带、巷道顶部的高冒区等地点。目前治理这些地点的煤炭自燃主要有灌浆、注惰性气体、喷洒阻化剂、注凝胶、注泡沫以及注三相泡沫等^[15-19],这些技术对保障煤矿安全生产起到了重要作用,但都存在一些不足,例如:灌浆,浆液在采空区只沿着地势低的地方流动,不能均匀覆盖煤体,不能向高处堆积、易形成“拉沟”现象;注惰气,因难以形成封闭空间,惰气易随漏风逸散,导致其灭火降温能力较弱;喷洒阻化剂,腐蚀井下设备和危害工人身心健康,防灭火效果也不理想;注凝胶,流量小,成本高,扩散范围小;注泡沫甚至三相泡沫,虽然对远距离采空区中高位空间灭火起到了一定作用,但泡沫稳定性差,一般 8~12 h 即破灭,不能持久有效地防治煤炭自燃。因此,进一步开发矿井防灭火新技术措施防治煤炭自燃,减少煤炭资源的浪费,对保证矿井安全生产、改善井下作业环境具有巨大的经济价值和重要的社会意义。



1.2 国内外研究现状

近年来,随着煤矿开采程度的增大,高产高效新技术的不断发展,矿井的不断延深开拓,通风系统的相对复杂化,煤层自燃危险性有明显增大的趋势。而环境的复杂性、煤自燃危险区域的隐蔽性使现有的煤自燃防治技术难以满足集约化矿井安全生产的需要。为抑制、减少煤层自燃火灾事故的发生,世界各国的科研机构和生产部门对煤自燃火灾防治技术进行了大量的理论探讨、试验研究和现场应用等,试图完善煤炭自燃火灾防治技术。

1.2.1 煤炭自燃防治的国内外研究现状

对煤炭自燃的防治,直到 20 世纪 50 年代才真正引起国内外人们的广泛关注,但由于当时煤矿开采规模比较小,机械化程度低,在煤炭自然发火防治的初期,防治措施比较单一,主要的防治措施就是灌浆,这一手段对当时的煤炭自燃防治起到了积极的作用。此后,随着煤矿开采规模的扩大和机械化水平的提高,特别是 70 年代末期以后,随着无煤柱开采技术的推广和综采、综放技术的应用,井下煤炭自燃问题日益严重,人们对煤炭自燃防治的研究给予极大的关注,因而煤炭自燃防治技术也取得了阶段性的发展,出现了许多新技术,在实践中提出了综合运用多种技术共同防治煤炭自燃,试图全面破坏煤炭自燃的基本条件,以杜绝自然发火^[20]。目前,国内外常用的防灭火技术主要有注浆、阻化剂、均压、惰性气体、堵漏、凝胶、泡沫以及三相泡沫等。

1. 注浆技术

注浆是最早出现的防灭火方法,这一方法对扑灭井下内因火灾是比较有效的,并一直沿用至今。所谓的注浆防灭火,就是将不燃性注浆原料细粒化后与水按一定配比制成悬浮液,利用静压或动压,经由钻孔或输浆管路水力输送至矿井防灭火区,以阻止煤炭氧化或扑灭已自燃的煤体^[21]。注浆技术是一项传统、简单易行、比较可靠的防灭火技术。然而随着土壤来源的稀缺和对耕地的破坏,各个国家积极开展泥浆替代材料的研究,取得了较好的效果。在这方面英国和德国较为典型,相继研制出种类繁多的灌浆材料。我国于 20 世纪 50 年代开始采用该技术防灭火,进入 70 年代后,为了解决黄土泥浆的土源问题,兖州矿务局、重庆矿务局发展了页岩制浆技术,同时开滦、平顶山等矿务局利用粉煤灰作为注浆材料进行防灭火^[22]。注浆的主要作用就是隔



氧与降温,即浆液对煤体起包裹作用,阻止煤氧接触,胶结浮煤,降低采空区孔隙率,增加漏风阻力。注浆作为一种有成效、稳定可靠的防灭火技术措施,具有一定的优势,但同时不可避免地存在一些缺点,如容易堵管、跑浆、溃浆等,同时浆液大量脱水会影响工作面生产、影响煤质等;另外,浆液只流向地势低的部位,不能向高处堆积,对中、高位及顶板煤体自燃防治效果差。

2. 阻化剂技术

近年来,阻化剂技术得到了推广和应用。阻化剂是阻止煤炭氧化自燃的化学药剂,又称阻氧剂。阻化剂防火技术是利用某些能够抑制煤炭氧化的无机盐类化合物,如 $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ 等喷洒于采空区或压注入煤体之内以抑制或延缓煤炭的氧化,达到防止煤炭自燃的目的^[23]。目前,可供使用的阻化剂主要是一些吸水性很强的有机盐类,当它们附着在煤体表面时,吸收空气中的水分,在煤的表面形成含水液膜,从而阻止了煤与氧的接触,起到了隔氧阻化作用。从微观角度来说,吸水盐类对煤样的阻化作用,主要是由于阻化剂与煤分子发生取代作用和络合作用而生成稳定的链环,提高了煤与氧化合的活化能,增加了煤分子的稳定性,抑制了煤分子的氧化断裂,从而阻止或减缓煤自燃过程。此外,这些吸水性很强的盐类能使煤体长期处于含水潮湿状态,水在蒸发时的吸热降温作用使煤体在低温氧化过程中温度不能升高,也起到了抑制煤炭自燃的作用。阻化剂防火技术工艺简单,使用设备少,阻化剂来源广,特别是对于缺土的矿区尤为适用;但是由于液膜容易干涸破裂,阻化剂有可能变成催化剂,甚至有可能起反作用,因此阻化剂对于扑灭大面积煤层火灾效果不佳^[24,25]。

3. 均压技术

均压技术就是采用风窗、风机、连通管、调压气室等调压手段,改变通风系统内的压力分布,降低漏风通道两端的压差,减少漏风,从而达到抑制和熄灭火区的目的。均压技术始于 20 世纪 50 年代,由波兰 H. Bystron 教授首先提出使用,开始主要用于加速封闭火区的熄灭,在扑灭了几个长久不灭的大火区之后,该技术得到重视;到 60 年代,一些采煤技术发达的国家竞相采用,并多次获得成功。同期,我国也在淮南、辽源、开滦等矿区试用这一防灭火新技术;后来,在徐州、阜新、抚顺、大同等矿区逐渐推广^[26]。这些矿区在推广应用均压防灭火技术中都有所创新,用于封闭区的均压可防止遗煤自然发火和加速火灾熄灭,用于开区的均压可以抑制工作面后部采空区遗煤自燃的发

展,并可消除火灾气体的威胁。根据使用条件不同、作用原理不一,均压防灭火技术可以分为开区均压和闭区均压。均压防灭火技术能降低大量的漏风,缩小采空区氧化带范围;但工作面两端压差不可能完全降低为零,因此,对工作面平巷顶煤自燃、上分层采空区自燃、煤柱自燃预防作用不大。

4. 注惰性气体

惰性气体简称惰气。矿井防灭火所用的惰气主要指不能助燃的气体,常用的有氮气、二氧化碳和湿式惰气等,其中氮气应用最为广泛。1953年,英国罗斯林矿用罐装的液氮汽化形成的氮气扑灭了井底车场附近煤层的自然发火。1962年,英国威尔士的弗恩希尔矿将液氮汽化后注入密闭区扑灭火灾。20世纪70年代起,联邦德国在液氮防治煤自然发火技术方面发展较快,现场应用取得了良好的效果,在1974年至1979年间,41次将液氮应用到煤矿井下防灭火^[27]。而后,英国、法国、苏联、印度等也都采用了这一技术。20世纪80年代,我国开始了对氮气惰化防灭火技术的研究与试验。1982年,天府矿务局用罐装液氮进行了灭火试验;1989年,抚顺龙凤矿利用井上氧气厂生产的氮气,通过管路输送到综放工作面采空区防止遗煤自燃取得了成功;1992年,西山杜儿坪矿利用移动式变压吸附制氮装置产生的氮气,通过管路输送到井下,有效地防止了近距离煤层群煤的自燃;1995年,兖州兴隆庄矿利用安装在停采线附近的移动式膜分离制氮装置,有效地控制了无煤柱开采邻近工作面采空区煤的自燃。1996年,我国已有21个矿区、34个综放工作面采用注氮防灭火技术。进入21世纪,由于制氮装置与技术的不断发展,氮气防灭火技术已经在国有重点煤矿获得了广泛应用,已作为综放工作面防治煤自然发火的一项重要技术措施。采用惰气防灭火,惰气可充满整个空间,既能扑灭大的明火火灾,又能抑制并扑灭隐蔽火源;但惰性气体对大热容的煤体降温效果不好,灭火周期较长,火区易复燃,而且对现场的堵漏风工作也要求较高。

5. 堵漏防灭火技术

堵漏技术就是采取各种技术措施减少和杜绝向煤柱或采空区漏风,使煤缺氧而不能自燃。20世纪60年代,国外就应用水砂、粉煤灰、粉煤灰加水泥等充填隔离采空区,之后在英国出现半塑性胶泥堵漏风技术。70年代末,出现了喷涂塑料泡沫防止漏风的技术,在美国、法国、德国等出现了以聚醚或聚酯树脂和多次甲基多苯基多异氰酸酯为原料,常温快速凝固而成的聚氨酯泡



沫树脂。堵漏技术和材料近年来在我国发展也很迅速,相继研究和开发出适用于巷道高冒区堵漏的抗压水泥泡沫和凝胶堵漏材料,适用于巷帮堵漏的水泥浆、高水速凝材料和凝胶堵漏材料,以及适用于采空区堵漏的均压、惰泡、凝胶和尾矿泥等技术成果,如马利散、艾格劳尼、聚氨酯等;此外还研制出具有气密性好、伸长率大等性能的纳米改性弹性体材料。

6. 胶体防灭火技术

胶体防灭火技术是近年来发展起来的新型防灭火技术。目前常用的胶体灭火材料主要有稠化胶体、复合胶体和高分子胶体材料三类。不同类型的胶体材料在防灭火方面虽然性能各异,适用于不同的火灾环境,但是其灭火机理都在于:将含有胶体添加剂的混合浆液通过钻孔或煤体裂隙输送进入高温区,其中一部分混合浆液在未成胶时在高温下水分迅速气化,快速降低煤体表面温度,残余固体形成隔离层,阻碍煤氧接触而进一步氧化自燃;另一部分流动混合浆液随着煤体温度的升高,在煤体孔隙里形成胶体,包裹高温煤体,隔绝氧气,使煤氧复合放热反应终止^[28]。随着注胶过程的不断推进,成胶范围不断扩大,火势就会逐渐被扑灭。完全干涸的胶体还可以降低原煤体的孔隙率,使得通过的空气量大大减少,从而抑制复燃。但凝胶材料的基料及促凝剂用量大,在扑灭大范围火灾时,如果材料运输不便就会阻碍灭火进程。另外,某些凝胶材料在成胶过程中会产生刺激性气体而导致井下工作环境恶化。

7. 泡沫防灭火

泡沫又分为空气泡沫和惰气泡沫。空气泡沫主要是降低火源表面温度,对于煤层自燃灭火效果较差;惰气泡沫在降温的同时还降低了氧浓度,对火源起窒息作用,效果比空气泡沫好。无论是空气泡沫还是惰气泡沫,其稳定性都较差,一般几小时即全部破灭。在此基础上,江苏意创公司新研发出了罗克休泡沫,它主要是由树脂和催化剂两种聚合材料制备而成,发泡倍数达25~30倍^[29]。罗克休泡沫虽然在稳定时间上有了提升,但其流动性较差,对顶煤自燃和上分层采空区浮煤自燃的防治效果不佳。

8. 三相泡沫防灭火技术

三相泡沫防灭火技术主要由王德明教授等提出。三相泡沫是将不溶性的固态不燃物(黄泥或粉煤灰)分散在液体(水)中,通入惰性气体(氮气)并添加极少量发泡剂,通过发泡器充分搅拌混合,形成固体颗粒均匀附着在气泡



壁上的大量富集的含有气-液-固三相体系^[30]。该技术充分利用黄泥或粉煤灰的覆盖性、氮气的窒息性和水的吸热降温性进行防灭火。现场应用表明,三相泡沫对扑灭和防治采空区大面积火灾、防治大倾角俯采综放采空区煤炭自燃、捕寻采空区高位和不明位置火源等效果相当显著。目前,三相泡沫技术已经成功应用于众多矿井,取得了显著的经济效益。但三相泡沫没有实现固化,保水能力不强,一般 8~12 h 即破灭;同时,三相泡沫破灭后,由于没有黏性,黄泥或粉煤灰并不能固结在一起,因此覆盖煤体和裂隙有时并不严实。

上述各主要防灭火材料的优缺点如表 1-3 所示。

表 1-3 不同防灭火材料的优缺点

不同技术	主要材料	优点	缺点
注浆技术	黄泥、粉煤灰、沙子等	(1) 包裹煤体,阻止煤氧接触; (2) 胶结浮煤,降低采空区孔隙率,增加漏风阻力; (3) 工艺简单,成本较低	(1) 浆液会大量脱水; (2) 浆液只流向地势低的部位,对中、高及顶煤起不到防治作用; (3) 易跑浆和溃浆,影响工作面环境,对煤质有一定污染
阻化剂技术	CaCl_2 、 MgCl_2 、有机物、表面活性剂等	(1) 在煤体表面形成一层水膜,阻止煤氧接触; (2) 惰化煤体表面活性结构,阻化煤氧复合作用; (3) 使煤体长期处于潮湿状态,抑制煤体温度升高	(1) 液膜容易干涸破裂; (2) 不容易均匀分散在煤体上; (3) 部分阻化剂会腐蚀井下设备
均压技术	—	(1) 降低工作面漏风,缩小采空区氧化带范围; (2) 工艺简单,成本低	对工作面平巷顶煤自燃、上分层采空区自燃、煤柱自燃预防作用不大
注惰性气体	N_2 和 CO_2 等	(1) 减少区域氧气浓度; (2) 对井下设备无腐蚀,不影响工人身体健康	(1) 降温效果不佳; (2) 灭火周期长; (3) 火区易复燃,且对现场密闭性要求高



续表 1-3

不同技术	主要材料	优点	缺点
堵漏技术	水泥浆、高水速凝材料、凝胶堵漏材料、聚氨酯泡沫材料等	(1) 水泥浆抗压性好; (2) 聚氨酯泡沫堵漏风效果较好,隔绝氧气与煤体接触	(1) 工作量大,回弹率高; (2) 成本高; (3) 高温时会分解并释放出有害气体
胶体技术	稠化胶体、复合胶体和高分子胶体等	(1) 包裹煤体,封堵裂隙,隔绝氧气; (2) 降低原煤体孔隙率; (3) 对局部火源效果明显	(1) 流量小,流动性差,较难大面积使用; (2) 时间长了胶体会龟裂; (3) 某些凝胶会产生有害气体; (4) 成本较高
泡沫技术	氮气(空气)、水、发泡剂	(1) 能够大范围扩散,对中、高位煤体均能覆盖; (2) 降低火区氧气浓度	(1) 稳定性差,泡沫容易破灭; (2) 一旦水分挥发,防灭火性能就消失
三相泡沫技术	粉煤灰(或黄泥)、氮气、水、发泡剂	(1) 适用于大面积中、高位火灾以及大倾角俯采工作面火灾等; (2) 即使泡沫破灭,固相成分仍能覆盖在煤体表面,隔绝氧气	保水能力不强、稳定性差

1.2.2 凝胶泡沫防灭火技术

随着人们对煤矿火灾越来越重视,各国都在致力于研究新一代防灭火材料,包括有机凝胶、高分子阻化剂、聚氨酯泡沫和高吸水树脂等。现代煤矿生产工艺的发展与科学技术的进步对抑制火灾的方法提出了更高的要求,即快速响应、灭火高效、对使用环境要求低、对环境和逃生人员安全、对扑灭和防护对象无破坏作用、能有效防止复燃现象发生,尤其是能有效扑灭大规模采空区或老空区火灾等,这些要求对灭火材料都提出了挑战。而作为三相泡沫的发展方向之一,高效、节水、稳定、对环境友好的防灭火凝胶泡沫在这些方面具有明显的优势,适用于各种类型的井下火灾,这使得它成为当今国际火灾安全技术前沿的研究热点之一。

1. 凝胶泡沫简介

凝胶泡沫是将聚合物分散在水中,加入发泡剂并在氮气的作用下发泡形



成的复杂混合体系。经过一段时间后,在泡沫液膜内,聚合物间相互交联形成三维网状结构,构成凝胶泡沫的刚性骨架。防灭火凝胶泡沫的性质很特别,既具有凝胶的性质,又具有泡沫的性质,兼有注三相泡沫、注凝胶、注复合胶体的优点,同时又克服了它们的不足,从而大大提高其防灭火效果^[31]。凝胶泡沫的具体优势主要表现在以下几个方面:

(1) 水通过注入氮气发泡后形成泡沫,体积量大幅度增大,在采空区中对低、高处的浮煤都能覆盖,且能够避免“拉沟”现象;注入采空区的氮气被封装在泡沫体内,能较长时间滞留在采空区中,充分发挥氮气的窒息防灭火功能。这是凝胶泡沫比一般注浆、单纯注氮气的优越之处^[32]。

(2) 凝胶泡沫具有很好的稳定性,因为凝胶泡沫的液膜具有类似冻胶的表层,大大降低了凝胶泡沫液膜的排液速度,同时在发泡剂的协同作用下,增加了马兰戈尼(Marangoni)效应,即增加了凝胶泡沫液膜的抗冲击能力,使其变得更加稳定。在试验条件下(室温、常压)经过 30 d 的观察,体系无液体析出。

(3) 凝胶泡沫体内含有氮气,注入采空区的氮气的能较长时间滞留在采空区内,可有效地稀释防治区域内氧气和可燃气体,达到降低氧气和可燃气体浓度的目的,使区域内达到缺氧的状态,阻止煤的进一步氧化。这是凝胶泡沫的防灭火性能比凝胶的优越之处。

(4) 凝胶泡沫中含有液相成分,即使泡沫破碎了,也能将液体凝结成胶体均匀覆盖在浮煤上,可持续有效地阻碍煤对氧的吸附,防止煤的氧化,从而有效地防治煤炭自然发火。

(5) 凝胶泡沫具有表面成膜的特性。经矿井注浆管道注入采空区后,凝胶泡沫大面积覆盖采空区浮煤和封堵煤岩体裂隙,并在泡沫表面延缓交联形成类似布匹的膜状覆盖物,该覆盖物能长时间隔绝煤体与氧气的接触,达到持久有效地抑制煤体自燃的目的。

2. 凝胶泡沫的技术特点

(1) 灭火速度快。由于凝胶泡沫独特的灭火特性,其灭火速度很快,通常巷道小范围的火灾仅需几小时即可扑灭,工作面后方大范围的火也只需几天即可扑灭。

(2) 堆积性好,扩散范围广。聚合物溶液通过发泡剂发泡后形成凝胶泡沫,体积量大幅度增加,在采空区中就可向高处堆积,对中、高位浮煤均能覆