

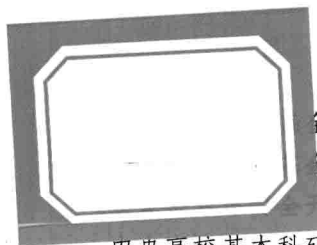
国家自然科学基金青年科学基金项目 (51104154, 50904066) 资助
国家自然科学基金仪器专项项目 (50927403) 资助
煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题 (SKLCRSM08x06) 资助
中央高校基本科研业务费专项资金 (2011QNA05) 资助
中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目资助

矿用防灭火三相泡沫 在采空区中的流动特性与应用

时国庆 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



金青年科学基金项目(51104154,50904066)资助
金仪器专项项目(50927403)资助
干采国家重点实验室自主课题(SKLCRSM08x06)资助
中央高校基本科研业务费专项资金(2011QNA05)资助
中国矿业大学“211 工程”三期创新人才培养项目资助

矿用防灭火三相泡沫在采空区中的 流动特性与应用

时国庆 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

煤炭自然是煤炭企业面临的主要灾害之一,做好防灭火工作对矿井的安全生产至关重要。三相泡沫能集灌浆、注氮、喷洒阻化剂的防灭火优势于一体,近年来在煤矿防灭火工作中逐步得到广泛应用。本书研究了矿用三相泡沫的流变性,分析了三相泡沫的基本渗流规律,建立了三相泡沫在采空区中流动的数学模型,提出了三相泡沫流动特性的数值模拟研究方法,研究了三相泡沫在采空区的渗流特性并指导了三相泡沫应用工艺的优化设计,本书成果对提高防灭火三相泡沫的效率具有一定的指导意义。

本书可供煤矿安全工程技术人员及相关科技工作者和大中专院校安全工程专业本科生及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿用防灭火三相泡沫在采空区中的流动特性与应用/
时国庆著. —徐州:中国矿业大学出版社,2012.9
ISBN 978 - 7 - 5646 - 1621 - 2
I. ①矿… II. ①时… III. ①采空区—矿山灭火—泡沫灭火 IV. ①TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 210460 号

书 名 矿用防灭火三相泡沫在采空区中的流动特性与应用
著 者 时国庆
责任编辑 黄本斌
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 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 9 字数 157 千字
版次印次 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤炭是我国的主要能源,煤炭的产量制约着国民经济的发展;煤炭自燃是我国煤炭企业面临的主要灾害之一,因此防治煤炭自燃对煤炭企业的安全生产至关重要。三相泡沫防灭火技术是近年来在国内兴起的一项重要防灭火手段。该技术集灌浆、注氮、喷洒阻化剂的防灭火优势于一体,在煤矿防灭火中得到广泛应用,但由于缺乏对其流动特性的研究,导致三相泡沫的应用工艺设计缺乏理论支持,对其在采空区中的防灭火作用也认识不足;为此,作者在导师王德明教授的支持与指导下,从研究三相泡沫基本流变特征入手,重点对三相泡沫在采空区的流动特性进行了较系统的研究。研究成果对于优化三相泡沫应用工艺设计,提高三相泡沫防灭火效率具有重要作用。

为得到三相泡沫的黏度特征,本书开展了三相泡沫的流变性研究。测试了三相泡沫的剪切应力与剪切速率关系,采用灰关联分析法优选了三相泡沫的流变模式,建立了三相泡沫的本构方程,指出三相泡沫是一类屈服假塑性流体;计算了三相泡沫在采空区的启动压力梯度,结合对工作面进回风侧间压差的理论分析,认为采空区漏风动力不足以驱动采空区内的三相泡沫,指出三相泡沫具有阻断采空区漏风,减少灾害气体涌出的功能。

为理论研究三相泡沫的渗流特性,作者制作了渗透装置,构建了实验测试系统,开展了三相泡沫渗流特性的实验研究。测取了三相泡沫渗流压降和流量之间的关系,分析了三相泡沫渗流的阻力特性,结果表明:低速渗流阶段三相泡沫具有较为明显的剪切稀化特征;浆液的浓度、多孔介质的渗透率是渗流阻力的主要影响因素,而发泡倍数对三相泡沫的渗流特性影响较小;采

用通过本构方程得到的表观黏度对渗流实验进行了数值计算,得到了与实验数据相一致的结果,证明了基于本构方程的表观黏度可用于三相泡沫的渗流计算,进而找到了理论计算三相泡沫渗流特性的途径。

在实验研究和理论分析的基础上,确立了三相泡沫在采空区的渗流方式,应用多相流、渗流理论建立了三相泡沫在采空区渗流的三维非稳态数学模型;为对数学模型进行验证,在露天矿原小煤窑大范围采空区火灾的治理中开展了三相泡沫流动特性的试验与数值模拟研究,现场考察了三相泡沫的堆积高度、扩散距离等流动特性,并通过模拟结果与现场观测的对比对数学模型进行了验证。

针对采空区空间隐蔽,现场观测三相泡沫流动特性难度大的特点,本书将CFD模拟技术引入到三相泡沫在采空区流动特性的研究中,提出了三相泡沫在采空区中流动特性的数值模拟方法。采用该方法研究了通过上平巷预埋管灌注时,三相泡沫在综放工作面采空区中的渗流特性,得到了三相泡沫在采空区中的堆积高度、扩散宽度以及主要影响因素。研究表明,三相泡沫的流动特性受工作面倾角和灌注流量的影响较为显著,随灌注流量的增加三相泡沫的堆积高度和扩散宽度都会增加;随工作面倾角的增大,三相泡沫的扩散宽度有大幅度减小,而堆积高度变化不明显;通过大量的数值模拟研究,在对模拟结果进行分析的基础上绘制了堆积高度、扩散宽度与流量和工作面倾角之间的关系曲线。

在实验和理论研究成果的指导下,对三相泡沫防治煤炭自燃的工艺进行了优化设计与应用,解决了大型综放工作面采空区防火、大范围地表采空区煤自燃火区治理、综放工作面近采空区隐蔽火源治理等技术难题,取得了较好的防灭火效果,三相泡沫的防灭火效率得到了充分发挥。

感谢国家自然科学基金青年科学基金项目(51104154,

50904066),国家自然科学基金仪器专项项目(50927403),煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题(SKLCRSM08x06),中央高校基本科研业务费专项资金(2011QNA05),中国矿业大学“211工程”三期创新人才培养项目等为本书研究与出版提供的资金支持。

感谢我的导师王德明教授在本书研究内容和研究方法上给予的帮助与指导,感谢周福宝教授、秦波涛教授、仲晓星副教授、任万兴副教授为我提出的良好建议和意见,感谢王雁鸣博士、戚绪尧博士、曹凯博士、胡朝仕博士、邵光强硕士、杨永斌博士、奚志林博士,以及在研究和实验中热心帮助过我的所有人。

作者

2012年6月



目 录	
1 绪论	1
1.1 研究的意义	1
1.2 国内外的研究现状	3
1.3 本书的研究内容与方法	7
2 防灭火三相泡沫技术的概况	9
2.1 三相泡沫的发泡机理及其发生装置	9
2.2 三相泡沫的制备工艺与流程	11
2.3 三相泡沫的技术特点	12
2.4 三相泡沫的基本物性参数	13
2.5 本章小结	16
3 防灭火三相泡沫的流变性	17
3.1 常见流体的流变类型	18
3.2 三相泡沫黏度的实验测定	21
3.3 三相泡沫的流变模式	28
3.4 三相泡沫流变性与防火性能的关系	33
3.5 本章小结	34
4 防灭火三相泡沫渗流特性的实验与数值分析	36
4.1 实验装备及原料	36
4.2 实验过程及结果分析	40
4.3 实验的数值模拟与分析	45
4.4 本章小结	51
5 三相泡沫在采空区的渗流数学模型	52
5.1 泡沫渗流数学模型的研究现状	52



5.2	三相泡沫在采空区渗流方式的分析	53
5.3	三相泡沫在采空区渗流数学模型的理论基础	57
5.4	三相泡沫在采空区渗流的数学模型	60
5.5	数学模型的适用性分析	67
5.6	本章小结	79
6	三相泡沫在综放工作面采空区渗流过程的数值模拟	81
6.1	综放工作面概况	81
6.2	模拟参数的确定	82
6.3	渗流过程的数值模拟	85
6.4	综放工作面采空区三相泡沫渗流特征的影响因素	92
6.5	本章小结	95
7	三相泡沫防灭火工艺参数的优化设计与应用	97
7.1	综放工作面防火工作中的应用	97
7.2	露天矿内大面积采空区火灾治理中的应用	101
7.3	综放工作面近采空区隐蔽火源治理中的应用	105
7.4	本章小结	109
8	基于大流量防灭火泡沫的自燃火源快速、定向防控技术	110
8.1	快速治理技术应具备的特点	110
8.2	大口径防灭火钻孔施工技术研究	112
8.3	防灭火泡沫大流量三维定向灌注的火区快速防控技术	114
8.4	基于防灭火三相泡沫的隐蔽火源快速防控技术	115
8.5	本章小结	119
9	结论与研究展望	121
9.1	主要结论	121
9.2	创新性	124
9.3	研究展望	124
	参考文献	126



1 绪 论

1.1 研究的意义

我国是世界上少数几个一次性能源以煤炭为主的国家,2009 年全国原煤产量达到了 30.5 亿 t,同比增长 8.8%^[1],但还是时常出现电煤紧缺的现象。在中国生产和消费的一次商品能源中煤炭占了 75%左右,在探明的化石类能源中煤炭占 94.3%。未来 50~60 年内,随着新能源和可再生能源、水电和核电的发展和推广,煤炭在一次性能源中的消费比重将会有所下降,但煤炭仍将是我国的主要能源^[2]。煤炭工业承载着经济发展、社会进步和民族振兴的重任。

矿井灾害是影响煤炭工业健康发展、制约煤炭产量的主要因素,而煤自燃又是我国煤矿开采过程中的主要灾害。在我国国有重点煤矿中,有 56%以上的矿井都存在自然发火的危险,由煤炭自燃而引起的火灾也占矿井火灾总数的 90%以上^[3]。尤其是 20 世纪 90 年代以来,我国广泛采用综采放顶煤开采技术,在生产效率大幅提高的同时,也造成采空区遗留残煤多、冒落高度大、漏风严重的状况,使得煤自燃火灾发生频繁;此外,为防止瓦斯超限事故以及提高瓦斯的抽采率,高瓦斯矿井普遍采用“高负压瓦斯抽放技术”对实体煤、煤柱及采空区进行治疗,在抽放过程中,抽放区域风流紊乱、漏风量增大,由此引发的煤自燃问题又变得更加突出;更为严重的是,煤自燃有时还会引发破坏强度更大的瓦斯爆炸事故。煤自燃火灾及其伴生事故给矿工生命安全带来威胁,同时也造成设备被损坏、煤炭资源被冻结,给国家带来了巨大的经济损失。因此,必须加强煤炭自燃防治及其应用技术的研究。

煤自燃是具有自燃倾向性的煤在有适宜的供氧量、有蓄热氧化的环境和时间的条件下发生物理化学变化的结果。防治煤炭自燃的主要原理就是使煤体与空气隔绝,同时吸热降温。为防治煤炭自燃,国内外一般采用常规的注浆、注氮气、注凝胶、喷洒阻化剂等防灭火技术和材料进行防治^[4-7],但



这些防灭火技术都存在一定程度的不足。采用注水、灌浆技术,水和浆液在采空区中只是沿着地势低的地方流动,不能对采空区进行均匀地覆盖,同时渗流范围小,扩散能力低,且不能向高处堆积,这就只对较明确的火源点的治理起作用,达不到防治隐蔽火源的要求;采用注惰性气体技术,氮气或其他惰性气体主要起到降低氧气浓度而窒息火源的作用,但惰气灭火降温的能力较弱。并且,由于采空区易与外界连通,难以形成封闭的空间,因此惰性气体容易随漏风逸散,使防灭火效果不佳,灭火的周期也较长。此外,随着大采高综放开采的方式日益成为常规开采手段,煤炭自燃的三维空间特性逐渐显现出来,矿井防灭火工作的思路已不能仅局限于二维空间,采空区高处浮煤自燃严重的问题必须受到重视,也就需要一种对高处浮煤能够有效覆盖、润湿的防治采空区自然发火的手段。

针对防治大面积采空区煤自然发火技术存在的不足,国内外学者相继提出并采用了泡沫防治采空区自然发火的技术^[8-11]。中国矿业大学矿井防灭火课题组也于2002年首次将三相泡沫防灭火技术应用于矿井防灭火实践。矿用防灭火三相泡沫(本文为了表述简练,以下表述为“三相泡沫”)兼有了一般注浆、注惰气泡沫、注氮气、注阻化剂等防灭火技术的优点,又充分克服了这些技术的不足^[11-14]。

(1) 三相泡沫中含有粉煤灰或黄泥等固态物质,这些固态物质是三相泡沫面膜的一部分,可较长时间保持泡沫的稳定性,最终泡沫即使破碎了,具有一定黏度的黄泥或粉煤灰颗粒仍然可较均匀地覆盖在浮煤上,可持久有效地阻隔煤对氧的吸附,防止煤的氧化,从而有效地防止煤炭自然发火。这是三相泡沫的防灭火性能比两相泡沫的优越之处。

(2) 泥浆通过引入氮气发泡后形成三相泡沫,体积量大幅度增加,在采空区中就可向高处堆积,能够避免“拉沟”现象,对低、高处的浮煤都能覆盖;注入在采空区的氮气被封装在泡沫之中,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。这是三相泡沫比一般注浆、单纯注氮气的优越之处。

(3) 三相泡沫发泡剂添加了阻化剂,因此其三相泡沫本身就是一种很好的阻化材料,能均匀地分散在煤体上,可有效地阻止煤氧结合官能团的产生和自由基的链式反应,对煤具有很好的阻化效果;另外发泡剂作为一种表面活性剂,可以改善煤体表面的润湿性能,从而能使煤吸收更多的水分,极大地增加煤体的湿度;同时,含有发泡剂的水能在煤体表面形成一层水膜,隔断煤与氧气的结合。这是三相泡沫比一般的注水、注阻化剂的优越之处。



近年来,随着三相泡沫防灭火技术的大量应用,三相泡沫防治煤炭自燃的优越性逐渐被认识到,应用该技术成功治理了许多起严重的煤炭自燃火灾事故;但也由于缺乏对三相泡沫在采空区内渗流特性的研究,导致不能对三相泡沫在采空区的流动扩散范围进行合理的确定,由此造成三相泡沫应用过程中存在较大的盲目性。为此,作者在导师的指导下开展了防灭火三相泡沫在采空区中的流动特性与应用研究,本书从研究三相泡沫基本流变特征入手,重点研究防灭火三相泡沫在采空区的扩散和堆积特性。研究的开展对于完善三相泡沫防治煤层自燃的理论基础,提升三相泡沫应用工艺的设计水平,更高效地发挥三相泡沫防灭火技术在煤炭自燃防治领域的优势有着重要的作用。

1.2 国内外的研究现状

1.2.1 矿井主要防灭火技术

目前国内外矿井防灭火技术主要采用预防性灌浆技术、惰性气体技术、阻化剂技术等,在某些条件下也采用堵漏技术、凝胶技术、泡沫防灭火技术等^[15,106,107]。

预防性灌浆是预防煤炭自然发火的传统措施,它主要是通过散热与隔绝氧气的作用来抑制煤炭自燃。灌浆防火的效果主要取决于浆材的选取、浆液的制备以及灌浆的方法与工艺等方面。在20世纪50年代,采空区灌浆技术成为我国煤矿防灭火的主要技术手段,并且一直沿用至今。所谓的预防性灌浆技术就是指将灌浆材料和水按照适当的比例进行混合,配制成一定浓度的浆液,通过铺设的输浆管路利用自然压差或机械动力送到可能发生煤炭自燃的区域,以防止自然发火的出现。在一些缺灌浆材料的矿区,通常也采用注水来代替灌浆,增加煤体的水分,也可取得较好的防火效果。同其他防灭火技术相比,灌浆成本低廉,在煤矿现场应用最为普遍,但由于灌浆会在采空区形成“拉沟”现象,尤其是对俯采、急倾斜工作面采空区内煤体的防灭火作用有限。

惰气防灭火技术,就是将惰性气体送入拟处理区,抑制煤层自燃的防灭火技术。惰气源主要以氮气为主,从20世纪80年代起,我国开始了氮气防灭火技术的研究与推广,伴随放顶煤综采的日益普遍,在90年代注氮防灭火技术在自然发火矿井中逐步得到了普遍应用。此外,也有矿井采用向采



空区灌注二氧化碳的防灭火技术。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,且灭火周期较长,火区易复燃,而且对现场的堵漏风工作也要求较高。另外,液氮、干冰等技术在少数矿区也被尝试应用于矿井防灭火。

阻化剂技术是利用一些阻氧剂物质的阻止或延缓煤氧化的作用来预防煤炭自燃的技术。早期阻化剂技术在美国、波兰、前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了推广应用。该技术主要是让水溶液附着在易被氧化的煤体表面,起到惰化煤体表面的活性结构,阻止煤与氧气的接触作用。

近十几年来,凝胶技术在我国得到较广泛应用。凝胶分为高分子凝胶和无机凝胶两大类。其防灭火机理是,通过钻孔或煤体裂隙凝胶进入高温区,其中一部分未成胶时在高温情况下水分迅速汽化,快速降低煤的表面温度,残余固体形成隔离层,阻碍煤氧接触而进一步氧化自燃;而流动的部分混合液随煤体温度的升高,在不远处及煤体孔隙里形成胶体,包裹煤体,隔绝氧气,使煤氧化、放热反应终止;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,从而抑制高温点复燃。

原苏联、法国、波兰、保加利亚等国家从 20 世纪 80 年代起开始研究惰气泡沫防治煤炭自燃的技术方法^[16-20],我国在“八五”科技攻关项目中也开展了压注惰气泡沫防治采空区自然发火的研究^[21-23]。惰气泡沫有惰气和水两相物质组成,通过在水中加入发泡剂和其他添加剂,引入氮气,通过物理发泡的方式制取。根据发泡倍数的大小,泡沫分高倍数、中倍数和低倍数泡沫。但上述泡沫技术均具有发泡倍数不足,稳定时间过短的缺点,因此并没能在煤矿形成广泛的应用。

为有效利用现有防灭火技术与手段,又能克服其不足。2002 年中国矿业大学通风防火课题组提出了防治煤层自燃的三相泡沫防灭火技术,该技术充分发挥了黄泥灌浆和采空区注氮的防灭火优势,以氮气为载体将黄泥或粉煤灰带至高处,提高了黄泥或粉煤灰浆体覆盖效率;三相泡沫的形成也提高了氮气在采空区的驻留时间;三相泡沫发泡剂添加了阻化剂,因此其发泡剂本身就是一种很好的阻化材料,其能均匀地分散在煤体上,能有效地阻止煤氧结合官能团的产生和自由基的链式反应,对煤的自燃有很好的阻化效果;至今,全国已经有近百座国有大中型矿井引进并使用了该项防灭火技术,随着三相泡沫防治煤层自燃的理论与技术研究的不断深入,其应用前景会更加广泛。



1.2.2 矿用防灭火介质在采空区的流动特性

矿用防灭火介质的流动特性,尤其是在采空区等松散介质内部的流动特性,是其现场应用工艺设计与优化的主要依据。

为提高防灭火效率,已有学者对于注氮防灭火时氮气在采空区的渗流特性展开了研究,进而优化了该技术的应用工艺及参数。王俊峰^[24]、陈全^[25]等通过现场观测注氮引起的采空区氧气浓度变化研究了注氮对采空区气体的影响,进而优化了采空区注氮口的设置位置,但由于煤矿现场的生产条件千差万别,现场观测法研究采空区防灭火介质的流动特性难以推广应用。文虎等^[26]提出了采空区氧化升温带范围的一维近似模型,提出了最佳注氮口位置的计算方法。李宗翔等^[27,28]采用有限元法求解了采空区渗流的二维数学模型,采用数值模拟的方法研究了氮气在采空区的扩散特征,但研究仅限于二维模型,对于目前采空区的防火工作逐渐立体化的现状来说,其意义并不显著。周西华^[29]采用数值模拟的手段对注氮参数进行了优化研究。得出了采空区氧化自燃危险带的宽度与工作面距离随注氮量呈负幂指数关系变化,优化了采空区注氮参数,指出了注氮是采空区防火防爆的有效措施。罗新荣、蒋曙光、李增华等^[30]采用数值模拟的方法研究了综放采空区注氮防火技术参数。这些研究对提高注氮防灭火的效率都起到了重要作用。

针对采空区灌浆的效果,也有部分学者和现场技术人员从技术经验的角度进行过初步的探讨。陈继云^[99]从现场灌浆经验角度探讨了预埋管灌浆的效果与有关问题,通过对现场灌浆的观察以及一些经验性的分析,提出了煤矿灌浆埋管密度等技术参数。邹声华^[100]讨论了提高灌浆防火效率的方法,他指出要想提高灌浆防火的效果必须考虑浆液在采空区的流动特性,但并没有开展具体的相关研究。

西安科技大学牛会永^[31]系统地研究了防灭火胶体的管流特性,其研究成果给防灭火胶体的管路运输工艺及参数提供了理论支持,但没有涉及胶体在采空区内流动特性的研究。

经过大量的文献调研,目前在采空区渗流场内的研究主要是针对气体介质展开,尚没有出现关于液相(含泡沫)防灭火介质在采空区内流动规律的系统研究的报道。作者认为存在这一现状的主要原因是,在泡沫技术被广泛应用在采空区防灭火之前,液相矿用防火介质主要是灌浆、注胶、注水等常规技术手段,相比泡沫防灭火技术,这些技术手段都具有流量小、密度



大的共同特点。在孔隙丰富的近采空区区域,浆液和水一般都是沿采空区底板运移,并且易形成“拉沟”现象,流动路径的单一性、随机性较强,导致缺乏可行的研究手段;同样,采空区注胶时也存在流量小、流动路径随机性大、难以大范围流动的问题。这种条件下,研究胶体或浆体等液体在采空区的流动特性的意义不大,并且也缺乏可行的研究手段。

而三相泡沫是一种新型的防灭火材料,其采用机械装置通过物理发泡的形式制备,具有流量大、密度小的特点。大量的现场应用以及地面模拟试验^[32]已经证明,三相泡沫在采空区松散多孔介质中能够向高处堆积,能够在短时间内将大的通道充填,从而可以避免灌浆易“拉沟”的缺点,形成对应用区域的均匀覆盖。这些特点就使得研究三相泡沫在采空区流动的特性具有价值,也具有可行性。

目前,国内外在防灭火泡沫的流动特性研究尤其是在采空区的渗流特性研究方面几乎还是空白。保加利亚索菲亚大学的 Michaylov M^[33,34]领导的课题组开展过泡沫泥浆防灭火的应用技术研究,他们采用粉煤灰、氮气和作为材料制作成泡沫泥浆,在实验室试验不外加气源搅拌条件下发泡倍数2~5倍,泡沫稳定时间低于2 500 s。他们将泡沫泥浆应用于 Babio 矿的煤层自燃防治,但并没有展开泡沫浆体的流动特性的后续研究。秦波涛等^[14]研究了三相泡沫的流变性和管流特征,但并未涉及三相泡沫在采空区渗流特性的相关研究。

采空区内充满冒落的块状破碎岩石,并且这些破碎岩块体之间的裂隙遍布整个空间,这些特征符合对多孔介质的界定^[35-37],采空区应属多孔介质流场;而三相泡沫是由内充气体、泡沫浆液等形成的分散体系,其中的液体是连续相,气体是不连续相,属于多相流体,多数情况下泡沫的流变学状态方程不遵守牛顿流体黏性定律^[38,39],其渗流模式为非线性渗流,因此三相泡沫在采空区内的流动问题应属复杂多相流体渗流的研究范畴。由于采空区内破碎岩体结构的随机性、非均质性以及泡沫非牛顿流体流变模式的复杂性和泡沫在多孔介质中破灭和再生机理的影响,防灭火三相泡沫在采空区内流动特性十分复杂。目前,仅有的相关泡沫渗流特性方面的研究成果多出自石油行业,但石油行业对泡沫渗流的研究是将其放在油藏多孔介质(油层原岩孔隙多孔介质)这一背景中进行的,偏重于对泡沫封堵、驱动性能等方面的研究^[42-44],并且油藏多孔介质属低渗多孔介质,高压作用下泡沫在其中的流动势必以破灭和再生的形式通过。而采空区内流体的流动属三维非均质流场渗流问题,并且三相泡沫在采空区的渗流范围一般仅限近



采空区区域,这一区域内采空区破碎岩石承压较小,多处于自然堆积状态,渗流区域属高渗介质,三相泡沫在其中的渗流方式与泡沫流体在油藏原岩中的渗流方式显著不同。因此,石油行业对泡沫在油藏多孔介质内渗流规律的成果对防灭火三相泡沫在采空区内流动规律的研究借鉴意义不大。

1.3 本书的研究内容与方法

本书通过理论分析、实验研究、现场试验、数值模拟相结合的研究手段,寻找防灭火泡沫合理的流变模式,寻求防灭火泡沫流变模式中相关参数求解方法;研究防灭火泡沫的渗流特征,得出渗流的阻力特性及其影响因素;构建描述三相泡沫在采空区渗流过程的三维数学模型,实现对三相泡沫在采空区渗流过程的数值模拟;量化三相泡沫在采空区渗流时的扩散堆积特征,确定扩散堆积特征的主要影响因素;将研究结论应用于指导现场的应用工艺设计,提升防灭火泡沫现场应用工艺的设计水平。最终,为应用防灭火泡沫高效解决采空区煤自燃隐蔽火源的防治技术难题提供理论基础。

1.3.1 研究内容

(1) 研究防灭火三相泡沫在不同组分构成、不同温度条件下的流变学特性,即研究防灭火三相泡沫本构方程的形式及方程涉及参数的计算方法。研究并分析三相泡沫的流变特征对其防灭火性能的影响。

(2) 研究不同组分构成的三相泡沫在自制边界条件较为明确的多孔介质中渗流时压力降与流量的关系,绘制出压降—流量的关系曲线,研究三相泡沫渗流阻力的主要影响因素,进一步研究流变参数对三相泡沫渗流特征的影响。

(3) 研究三相泡沫在大范围内露天采空区的渗流特性,考察其扩散距离、堆积高度以及扩散趋势的特征及其影响因素。

(4) 分析现有泡沫渗流机理和渗流数学模型的研究现状,研究三相泡沫在采空区中渗流的方式,建立描述三相泡沫在采空区渗流的数学模型,分析确定实现对三相泡沫渗流过程数值模拟的途径,研究该数学模型的适用性。

(5) 研究综放工作面采空区渗透率的描述方法,确定综放工作面采空区渗透率的分布特征。

(6) 研究三相泡沫在综放工作面采空区的扩散堆积过程及特征,研究



三相泡沫沿采空区走向扩散宽度和沿垂直于采空区底板方向的堆积高度,并分析二者的主要影响因素,绘制影响因素与二者之间的关系曲线。

(7) 将研究结论应用于指导现场实践,提出三相泡沫在防灭火应用时工艺设计的优化方案,并进行现场应用。

1.3.2 研究的方法

(1) 采用同轴圆筒旋转法测定三相泡沫的黏度、剪切应力与剪切速率的关系,并绘制出流体剪切应力与剪切速率关系的流动特性曲线,采用灰关联度的方法,求解实测流变曲线与常见流变模式之间的关联度,按照关联度大小来确定三相泡沫的流变模型。依据优选出的流变模型,理论推导流变参数的计算方法,并计算三相泡沫有关的流变参数,得出三相泡沫的本构方程。

(2) 在三相泡沫制备实验系统的基础上进行改造,使得液体和气体的压力与流量可调,同时配套完善压力、流量测试手段。设计碎石颗粒夹持容器,自制颗粒充填多孔介质,设计三相泡沫渗流实验,测定不同组分构成、不同发泡倍数的三相泡沫通过自制多孔介质时的压力降与三相泡沫流量之间的关系,分析三相泡沫渗流的阻力特性。

(3) 分析国内外泡沫渗流机理和泡沫渗流数学模型的研究现状,结合已做的理论分析与实验研究,建立三相泡沫在采空区渗流的数学模型,采用CFD软件对数学模型进行求解,实现对三相泡沫渗流过程的数值模拟。

(4) 在山西朔州安太堡露天矿原小煤窑大范围采空区火灾的治理中开展三相泡沫的流动特性试验,考察三相泡沫在采空区内的扩散和堆积特征,并分析产生堆积特性的原因。对现场灌注试验进行数值模拟,通过现场实测结论和数值模拟结果的对比来分析数值模拟的适用性。

(5) 应用CFD技术对三相泡沫在综放工作面采空区的渗流过程进行数值模拟。调整物理模型中相关特征参数,进一步研究三相泡沫在综放工作面采空区渗流时扩散宽度和堆积高度的影响因素,并绘制它们之间的关系曲线。

(6) 对三相泡沫在综放工作面采空区渗流特征的规律进行总结,并将其应用于指导三相泡沫在煤矿现场应用工艺的设计与优化。指导三相泡沫在综放工作面防火,露天矿大面积采空区火灾治理,综放工作面近采空区隐蔽火源治理时的应用工艺设计。



2 防灭火三相泡沫技术的概况

防灭火三相泡沫是由固态不燃物(粉煤灰或黄泥等)、惰性气体(N_2)和水三相防灭火介质组成。三相泡沫集固、液、气三相材料的防灭火性能于一体,利用粉煤灰或黄泥的覆盖性、氮气的窒息性和水的吸热降温性进行防灭火,大大提高了防灭火效率。由于三相泡沫发泡倍数较高,单位体积的泡沫材料成本大幅下降,该法具有较高的经济效益。与现有的防灭火技术及材料相比,三相泡沫兼有一般注浆方法和惰气泡沫防灭火的优点。泥浆通过注入氮气发泡后形成三相泡沫,体积大幅快速增加,并在采空区中可向高处堆积,对低、高处的浮煤都能覆盖,能够避免注入的浆体从底部流失;注入在采空区的氮气被封装在泡沫之中,能较长时间滞留在采空区内,充分发挥氮气的窒息防灭火功能。三相泡沫中含有粉煤灰或黄泥等固态物质,这些固态物质是三相泡沫面膜的一部分,可较长时间保持泡沫的稳定性,即使泡沫破碎了,具有一定黏度的粉煤灰或黄泥仍然可较均匀地覆盖在浮煤上,可持久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,这是三相泡沫防灭火性能的优越性。

2.1 三相泡沫的发泡机理及其发生装置

在粉煤灰(黄泥)浆液中加入发泡剂后,发泡剂一方面降低了浆液的表面张力,使之易形成大量泡沫;另一方面使粉煤灰(黄泥)颗粒由亲水性变成疏水性,使之黏附在气泡壁上。加入稳泡剂是为了防止泡沫间水层的流动和气泡的兼并,提高泡沫的稳定性^[14]。浆液通过发泡器后物理发泡,形成了防灭火三相泡沫。三相泡沫的形成示意图如图 2-1 所示。

三相泡沫所采用的发泡方式是物理机械发泡,因此要产生高倍数的三相泡沫,发泡器是关键。常用的两相泡沫发生器,如网式发泡器,不适用产生三相泡沫。目前未见有防灭火用三相泡沫发泡器的专门研究报道,但相关的研究报道有用于采煤工作面冒落空洞处理用的矿用泡沫水泥充填机及建筑行业的泡沫混凝土泡沫发生器。矿用泡沫水泥充填机利用螺杆泵的吸