

ZHUDUO DUI FENGBI HUOQU QITI
YUNYI GUILÜ DE YINGXIANG YANJIU

注惰对封闭火区气体 运移规律的影响研究

张九零 王月红 著



煤炭工业出版社

注惰对封闭火区气

影响研究

张九零 王月红 著

煤炭工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

注惰对封闭火区气体运移规律的影响研究 / 张九零, 王月红著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2014

ISBN 978-7-5020-4397-1

I. ①注… II. ①张… ②王… III. ①煤矿—矿山
灭火—惰性气体灭火 IV. ①TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 305556 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京市郑庄宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 850mm × 1168mm^{1/32} 印张 5^{1/8}

字数 127 千字

2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

社内编号 7229 定价 20.00 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

内 容 提 要

本书在对矿井火灾防治技术和防爆机理进行分析的基础上,针对矿井采取封闭火区注惰时,火区易发生瓦斯爆炸的实际情况,开展在注惰情况下的封闭火区气体运移规律研究,为控制封闭火区气体发生爆炸的概率提供理论依据。具体内容包括:封闭火区内气体运移规律和注惰对封闭火区气体运移规律的影响、注惰实践验证等内容。

本书可供从事矿井通风、防灭火、矿山救护工作的工程技术人员阅读,也可作为煤炭院校矿井安全专业师生的教学参考书。

前 言

煤矿井下发生火灾后，在直接灭火无效的情况下，往往采取封闭火区、注入惰气等救灾手段。

封闭火区可以切断火区内氧气供应，形成窒息环境。但是，封闭火区过程中，供风量急剧减少，造成火区中瓦斯浓度增加，由于烟气、瓦斯气体与火区环境气体存在较大的密度差，易成层运移，并在运移过程中积聚可燃性气体，使封闭火区存在很大的爆炸危险性。向火区充注惰性气体则可快速稀释火区氧气浓度和可燃性气体浓度，使之处于爆炸限外，从而起到相应的抑爆效果，减小爆炸的危险性。但是，由于在实际火区封闭注惰灭火抑爆过程中，注入的惰气可能引起火区内气流流向变化，如同“活塞”一样推动可燃气体层至火源，引发爆炸。

为避免注惰封闭火区救灾过程中出现的继发性爆炸，开展注惰封闭火区气体运移规律研究意义重大。

作者采用理论分析、数值模拟等研究手段，重点研究了封闭火区注入惰气过程中的灭火原理。首次提出注惰对于封闭火区气体的影响是前端活塞推动、后端混合稀释；根据质量守恒推导了封闭火区注入惰气后气体浓度的变化公式，并在此基础上得出矿井理论注惰需求量计算公式；分析了封闭火区瓦斯层、烟气层层运移规律，不同漏风速度下封闭火区的爆炸危险性；通过实例，对理论研究进行了验证。以上研究内容为矿井火灾救灾决策的制定提供了理论依据。

本书的出版得到矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室基金资助课题（JSK200211，JSK200210）、河北省科技计划项目（12214511）、唐山市科技计划项目（12130271b）资助。

在编写本书的过程中，中国矿业大学（北京）周心权教授给予悉心指导；同时，河北联合大学对本书的出版也给予关心、支持，在此一并表示衷心感谢！

限于作者水平，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请广大读者不吝批评指正！

作 者

2013年12月

目 次	
1 绪论	1
1.1 矿井火灾防治的意义	1
1.2 矿井火灾防治技术概况	2
1.3 注惰防灭火发展概况与防爆机理研究	6
1.4 火区气体运移研究现状	12
1.5 数值模拟技术在防治矿井火灾中的应用	16
2 封闭火区内气体运移规律的研究	18
2.1 封闭火区内气体组分	18
2.2 矿井火灾燃烧特性	20
2.3 封闭区内气体运移规律	26
2.4 封闭火区内气体运移规律的影响	47
2.5 本章小结	55
3 注惰对封闭火区气体运移规律的影响研究	57
3.1 注惰灭火概述	57
3.2 注惰的抑爆作用	61
3.3 封闭火区注惰的理论计算	72
3.4 封闭火区注惰的物理模型及计算方程	82
3.5 本章小结	92
4 不同条件下,注惰对封闭火区气体运移规律影响的 实验研究	94
4.1 火灾条件下的注惰实验	94
4.2 瓦斯涌出条件下的注惰实验	128
4.3 本章小结	131
5 注惰实践验证	133

5.1 矿井概况	133
5.2 救灾经过	133
5.3 密闭后注惰的有关数据	134
5.4 数据分析	137
5.5 实测数据结果与理论分析对比	143
5.6 本章小结	145
参考文献	146

1 绪 论

1.1 矿井火灾防治的意义

我国现有煤矿多数为井工开采，井工煤矿产量占煤炭总产量的95%以上。在井工煤矿的生产过程中，存在许多不安全因素，其中矿井火灾是煤矿安全生产的五大灾害（水、火、瓦斯、顶板和煤尘）之一。随着煤矿开采水平的不断延深，综放开采等高产高效采煤技术的推广，我国矿井瓦斯涌出量逐年增加，深部矿井煤层的自燃倾向性逐年增大，这无疑加大了瓦斯治理和火灾防治的难度。我国是矿井火灾比较严重的国家之一，据2000年全国425对国有煤矿的不完全资料统计，共发生火灾168次，其中内因火灾154次，外因火灾14次，封闭采区或工作面59个，影响煤量3080 Mt，冻结煤量9217 Mt，发火率为0.318次/Mt。

据统计，我国有56%的煤矿存在自然发火问题，而我国国有重点煤矿中具有自然发火危险的矿井约占47%。火灾常造成工作面封闭、冻结大量的煤炭资源和昂贵的生产设备，造成工作面、采区风流紊乱，影响矿井正常的生产接续。新疆、宁夏、内蒙古等地矿区还存在大面积的煤田火灾，每年烧损煤量 $(1000 \sim 1360) \times 10^4$ t。矿井一旦发生火灾，火势发展迅速，变化复杂，影响范围广，往往造成人员伤亡和财产、资源损失，甚至引发瓦斯煤尘爆炸，使灾害的程度和影响范围进一步扩大。煤矿火灾与煤尘、瓦斯爆炸的发生常常互为因果关系，相互扩大灾害范围与灾害程度，是酿成煤矿重大恶性事故的原因之一。例如：2003年11月14日，江西某矿采煤工作面由于煤炭自燃引发特大瓦斯爆炸，死亡51人；2004年12月2日，陕西陈家山煤矿由明火引

起的瓦斯爆炸事故造成 166 人死亡；2008 年 9 月，黑龙江省鹤岗市兴山区富华煤矿发生火灾，造成 31 人死亡。可见，火灾已成为制约矿井安全生产与进一步发展的主要因素之一。

1.2 矿井火灾防治技术概况

矿井火灾的防灭火方法手段很多，有直接灭火法、灌浆灭火法、阻化剂防灭火法、均压防灭火法、火区封闭法、惰气防灭火法、喷涂堵漏技术等，随着煤矿生产发展和现代科学技术水平的提高，防灭火技术水平也有了较大的提高，主要矿区根据自身实际需求制定了相应的防灭火技术措施，保证了矿井的安全生产。

1. 直接灭火

直接灭火是在火灾发生初期，明火燃烧火势不再扩大的情况下，灭火救灾人员能够进入火源地点，用水或其他灭火器材将火直接扑灭，然后清除未尽的余火、焦炭，防止死灰复燃。这是一种最有效、最彻底、最经济的方法。但是，在矿井火灾中能直接进行灭火的机会并不多，多数情况下，当发现火情并采取直接灭火措施时，火势已蔓延，灭火救灾人员无法进入火源地点。煤炭自燃火灾实施直接灭火困难更多，火源难以寻找，即使找到了火源，进入火源地点直接灭火难度也很大，不仅要通过采空塌陷区，而且面临有害气体的威胁，灭火救灾人员的人身安全难以保证。

2. 灌浆技术

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，其中黄泥注浆自 20 世纪 50 年代即成为我国煤矿防灭火首要的技术手段，一直沿用至今。灌浆技术工艺至今已发展成几种工艺，有黄泥注浆、水砂注浆、页岩浆注浆和粉煤灰注浆等。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。黄泥注浆是用黄土与水按一定比例混合成黄土泥浆，通过火区上方的钻孔，将泥浆注入井下，将火

熄灭，这种方法虽然能够熄灭封闭区的火灾，但是缺点较多，工程大、费用高、工期长；对于大面积的自燃火灾，需要大量的黄土泥浆才能将火区覆盖；在受季节性制约的灌浆地区，自燃火灾多出现反复；灌浆期间和灌浆后水分没有疏干之前，灌浆区附近下部煤层不能开采，形成大量呆滞煤量。

3. 阻化剂防灭火技术

阻化剂防灭火技术自 1974 年开始研究使用。初始时，阻化物质主要是某些工厂的废渣，继之又选用某些卤族化合物，最终认定在经济上可行的理想材料为海盐生产中的副产物——卤水，即氯化镁。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。我国阻化剂防灭火技术在实验室取得成功的基础上，首先在平庄、沈阳、铜川等矿务局应用于防火。初期主要是向煤体内压注，继之用于向采空区喷洒。进入 20 世纪 90 年代，除上述两种工艺继续应用外，进一步开发了气雾喷洒工艺，扩大了阻化物质的渗透能力和范围，提高了防火效果。目前阻化剂防灭火已在我国上百个工作面单独使用或与其他防灭火措施配合使用。阻化剂防灭火技术在美国、波兰、苏联等国家得到了较好应用。

4. 均压防灭火技术

均压防灭火技术在我国应用也较早，20 世纪 60 年代淮南矿务局开始进行试验，之后在枣庄、六枝等矿务局推广应用，但未形成技术系统。20 世纪 80 年代初通过与波兰的科技合作，在大同矿务局开展了大规模的应用现代技术手段的试验，取得了极为丰富的经验。均压防灭火是应用通风原理，在不供给新鲜空气的情况下，采空区或火区不发生空气交换，使采空区或火区火灾因断氧而熄灭。但是在不供给新鲜空气的前提下，由于失去对火区可燃气体的稀释作用，容易形成爆炸性混合气体，并可能在火风压的作用下，发生烟流逆转、倒退和滚退现象。目前，我国已有 300 多个工作面实施了均压防灭火技术措施，取得了显著的经

济、技术效益。该项技术措施已成为我国矿井防灭火的常规技术措施之一。

5. 封闭火区法

火区封闭法，就是把发生火灾的区域及其他巷道或区域，用不透风的密闭隔绝起来。密闭的作用就在于使被隔绝空间内的氧气慢慢消耗于可燃物的燃烧，同时，火灾生成的 CO_2 和多余氮气也有一定的惰化功能，促使火的自行熄灭；另外，该方法也用于防止因火灾生成的有害有毒气体扩散到井下巷道及工作场所，危及工作人员的安全，防止新鲜空气侵入火区供氧而增大爆炸危险性。

6. 喷涂堵漏技术

喷涂堵漏技术措施主要用于控制火区漏风。众所周知，在引起煤矿井下煤炭自燃与瓦斯事故诸种因素中，漏风是重要的因素之一。目前井下漏风的封堵方法主要有水泥砂浆喷（抹）涂堵漏、水泥粉煤灰喷涂堵漏、石膏喷涂堵漏、聚氨酯泡沫喷涂堵漏等。其施工工艺有设备喷涂和压力容器喷涂两种。喷涂堵漏技术措施可用于快速密闭、巷道喷涂等方面。但目前所用的材料价格较高，用量大，有回弹现象，且阻燃抗静电效果差。

7. 粉煤灰固化泡沫技术

粉煤灰固化泡沫是以粉煤灰和水泥为基材，添加一定的复合添加剂，通过物理机械的发泡方式，形成水、气、固三相泡沫状态的粉煤灰固态物质，发泡倍数 2~8 倍可调节，形成了具有抗压能力的轻质固态材料。注入采空区或高冒区的泡沫体在一定时间内具有流动性，可进入包括松动圈在内的所有空间和缝隙，在一定时间内产生凝固并逐渐固化，因此，可以有效充填整个漏风空间和松动圈缝隙；由于矿用固化泡沫固化前流动性较好，不需要很高压力就可实现有效扩散，使接顶时只需 0.2~0.5 MPa 充填压力就可以实现有效接顶和扩散。该技术目前已在铁法煤业集团、兖州矿业集团等矿区得到初步应用。

8. 惰性气体泡沫防灭火技术

惰性气体泡沫防灭火材料主要是氮气泡沫、二氧化碳泡沫等。在发生井下火灾时，可采用钻孔压注惰性气体泡沫的方法，将溶液注入自然发火区域进行灭火。该方法适于采空区或煤堆深部的煤炭自燃。但由于泡沫很容易破灭，加上只有液相水，一旦水分挥发，防灭火性能就消失。

9. 新型聚合物材料防灭火

当前应用较广的新型聚合物材料为罗克休，是由树脂材料和催化剂组成，将这两种材料通过高压风带动的多功能气泵，通过软胶管吸入泵中，经过加压后，二者按照 4 : 1 的体积比混合后，同时压入喷射头，两种液体被喷射头内的压缩空气自动激活，压入漏风的地点，在短时间内可发泡至原体积的 27 ~ 30 倍，在很短的时间内完成对漏风的采空区、巷道高冒上部空洞的填充和封闭。该技术发泡反应迅速，封堵速度快，操作简单，使用方便，可以起到迅速隔绝封闭火区的作用。

10. 凝胶技术

近年来，凝胶技术在我国得到较广泛的应用。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水分迅速汽化，快速降低煤表面温度，残余固体形成隔离层，阻碍煤氧接触而进一步氧化自燃；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，使煤氧化、放热反应终止；干涸的胶体可以降低原煤体的孔隙率，使通过的空气量大大减少，从而抑制复燃。凝胶技术有以下缺点：流量小、流动性差、较难大面积使用，注入时间较长时胶体会龟裂，胺盐凝胶会产生有毒有害气体，成本较高。

11. 惰气防灭火法

惰气防灭火法就是向井下注入惰性气体，使火区周围的空间惰化，然后将火灾控制在尽可能小的封闭空间范围内的方法，该

方法是一种省时、省费用、安全有效的治理方法,尤其针对火区周围充满爆炸界限内气体时更为适用。在这一过程中,惰气起到了置换和稀释爆炸性气体、阻止爆炸事故发生,并在井下形成一定的正压环境,减少漏风补氧,从而阻止火区进一步蔓延的作用。

矿井灭火方法虽多种多样,但面对井下复杂情况,在控制和消灭火区的过程中,一定要将理论与实际相结合考虑,分析火势的发生发展状况、位置及根据矿井的实际条件,选择合适的技术和手段进行综合灭火。只有这样,才能有效地控制和消灭火区,为煤矿的安全生产提供保障。

1.3 注惰防灭火发展概况与防爆机理研究

当前,注入惰气防灭火是一种应用较广、技术相对成熟的矿井防灭火方法。我国的《煤矿安全规程》对其中的氮气防灭火给出了具体规定。据统计,中国已有 21 个矿务局用注氮防灭火。近年来,矿井火灾救灾过程中也多次使用注惰技术,如 2008 年富华煤矿火灾就是采用注入液态 CO_2 扑灭的。

1. 注惰防灭火发展概况

根据相关文献的记录,最早使用惰性气体扑救煤矿火灾的记载是 1851 年苏格兰 Clackmannan 煤矿,利用焦炭炉燃烧除氧制取惰气,扑灭了井下大面积火灾。1869 年英国的 Earl Fitzwillian 煤矿利用焦炭和石灰炉气灭火,是有记载的第二次煤矿井下使用惰气救灾实例,当时由于注惰气后火区温度较高,灭火后火区复燃,惰气灭火没有成功。1874 年英国的 SandWell Park 煤矿首次采用 CO_2 气体扑灭井下火灾。1882 年英国的 Abram 煤矿使用硫酸和碳酸氢钠反应产生的气体灭火。英国起初使用移动式电力汽化器来汽化液氮,后来为了进一步降低成本,开始研究使用压力振动吸附 (PSA) 技术,以便从空气中直接制取氮气。在英国,通常采用 97% 纯度的氮气来惰化采空区,消除煤炭自然发火。

弗利斯顿煤矿通过从靠近火区上部的地面向火区打钻注氮的方法成功地控制采空区的自然发火。20 世纪前半叶，美国、苏联、德国、法国、波兰等一些国家都开始利用惰气来阻止火区内爆炸性气体环境的形成，惰气的种类也由原始的炉烟、现场化学反应生成 CO_2 气发展到液氮。利用惰气在煤矿井下灭火抑爆有了初步的发展。后来印度、捷克、南非等国家也逐步开始利用液氮来防止和处理煤矿井下自燃火灾。自 1974 年 12 月联邦德国煤矿首次应用氮气扑灭矿内火灾至 1985 年 8 月末，共动用氮气灭火 75 次，消耗氮量 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。75 次灭火实践中，成功扑灭了 56 次煤矿井下火灾。由于联邦德国煤矿大多采用前进式采煤法，因而各矿经常采用注氮方法来熄灭采空区自然发火。联邦德国在采空区发生自然发火时，采用注氮使采空区惰化方法灭火，这样可以继续进行回采作业而不必封闭工作面。法国近年来大量采用注入液氮和氮气来防止井下火灾和自然发火。在圣·封登纳煤矿利用氮气灭火时，火灾发生一周后就恢复了生产。法国洛林矿业公司的罗兹莱矿和达尔西矿在中厚煤层长壁后退式一次采全高综采工作面，采用流量为 $200 \sim 500 \text{ m}^3/\text{h}$ 的氮气进行采空区注氮防火取得了圆满成功。自 1980 年开始，苏联各矿开始使用惰性泡沫和惰性发泡黏土泥浆来防治内因火灾的发生，用氮气作为惰性气体。

苏联研制并批量生产了不同技术规格（容积和供气量）的低温设备。液氮的气化、惰性泡沫和惰泡泥浆采用 3 种主要的工艺系统。第一种系统适用于对采空区进行预防性处理的矿井，主要由地面固定式机组制备惰泡或惰泡泥浆，在不大于 2 MPa 的压力和以 $6 \sim 7 \text{ m}^3/\text{min}$ 的流量，沿集中钻孔和管道输往采空区的需要地点。第二种系统采用独立移动式设备制备惰泡和惰泡泥浆，适用于能从地面准确向火源地带及遗煤的采空区打钻孔的条件下。第三种系统是在井下巷道内制备惰性泡沫，采用了专用的井下气化装置，这种装置可在预防封闭和扑灭井下火灾时在井下保

存、运输和气化液氮。总的来说，采用上述惰性泡沫和惰泡泥浆防治内因火灾的工艺已得到越来越广泛的应用。仅库兹巴斯各矿每年就有 40 多个采区的采空区用惰性泡沫和惰泡泥浆进行预防性处理。在使用惰性泡沫和惰泡泥浆进行预防和隔绝的采区，火灾次数比用泥浆防灭火的常规方法减少了 2/3。就整个苏联煤炭系统来说，由于采用了上述方法，从 1983—1987 年，各发火危险性最大的煤田每年内因火灾的发生次数减少了 70%。

印度、波兰、南非等国在利用液氮和氮气处理井下火灾和采空区自然发火方面，也取得了成功并积累了一定的实践经验。随着机械化程度的提高和放顶煤开采方法的推广应用，目前，世界各国煤矿处理大型火灾基本上是以注氮为主要措施。

我国 20 世纪五六十年代使用过炉烟灭火，是惰气在煤矿井下灭火救灾应用的开始，但未广泛应用，后中断；个别矿井还曾试用 CO_2 和干冰灭火，但都无果而终。20 世纪 80 年代初，天府和阜新矿务局曾试验应用液氮灭火，取得了一些经验，但仍未得到推广使用，主要原因是液氮源不足，且储存困难，经济上不合理。20 世纪七八十年代研制成功的燃油除氧惰气发生装置 DQ-150、DQ-500 及 DQ-1000 等，为我国矿山救护提供了扑灭初起火灾和抑制发火时避免瓦斯爆炸装置。20 世纪 80 年代中后期，气氮防火技术在我国兴起，至今气氮制备装置已经发展有空分装置、膜分离装置和变压吸附装置 3 种。目前，气氮防火技术已经成为我国矿井防灭火的重要技术措施之一。其主要作用是降低火区空气中氧气和可燃气体的相对浓度。液态惰气具有冷却炽热烟流和着火带的作用，可减小火势，防止瓦斯爆炸。注氮可以提高烟雾中作业的能见度，降低火区温度，便于直接灭火作业。在均压气室中注入惰气可提高火区封闭性；在火区适当位置注入惰气，有助于调节火区内风流流动方向，促使烟气流向回风巷，防止进风巷受烟流侵入，或因风量增加加剧着火带火势。

目前，我国煤矿惰气防灭火技术有了较大的发展，无论是惰

气产生装置还是注惰工艺均取得较多的研究成果和防灭火实践经验。注惰气体是指不参与燃烧反应的单一混合窒息性气体，其中可能含少量氧气。最常用的防灭火惰气是燃气、氮气和二氧化碳。二氧化碳在防灭火工作中被称为惰气是取其不可燃性，并非真正惰性气体。但是，惰气源主要以氮气为主，制备方式有深冷空气、碳分子筛变压吸附和中空纤维分离3种，我国都有相应的产品提供煤矿选用，它们各有特点。目前各矿考虑的主要是经济承受能力，除深冷空气固定资产投资较高外，其他两类由于分离氮的基础材料如碳分子筛、中空纤维等还难以与国外产品相竞争，初期投资较高，生产成本加大，使矿井在一定程度上失去经济优势。因此，要想广泛发展和应用这些新技术，还需要加大科研力度，解决基础材料国产化及成本过高问题。在应用技术方面则需改进和提高注氮工艺，加强与采煤工艺的配合，以便取得更好的效果。

对以上各种防灭火技术的分析可知，注惰防灭火具有不自燃，不助燃，性质稳定，既可惰化防灭火区域的气体，又能抑制瓦斯爆炸的特点，在治理煤矿井下火灾中起到了很大作用。但是，注惰防灭火具有易流失、难控制、降温效果不理想等缺点，一般来说，需要结合其他防灭火措施使用，不能达到综合防治火灾的目的。

2. 注惰灭火防爆机理的研究

注入惰气防火防爆机理：惰气注入火区，充满整个空间消灭隐蔽火点，利用惰气具有的正压、驱氧、冷却作用，在火区内形成一条惰气带，驱逐氧气，将采空区的氧含量降到自燃临界氧浓度以下。惰化防爆既是一种预防性技术措施，又是一种防护性技术措施。在可燃气体-空气混合物中加入惰化介质，不仅能有效防止爆炸事故的发生，提高生产过程或事故救灾的安全性，也能起到抑制爆炸发展和减轻事故灾害程度的作用。

用于惰化防爆的介质种类很多，按照惰化介质的化学性质和