

国家自然科学基金资助项目(51704283)

江苏省自然科学基金资助项目(BK20170277)

中国博士后科学基金资助项目(2016M601918)

地下空间液氮防灭火 理论与工程实践

史波波 著

Dixia Kongjian Yedan Fangmiehuo
Lilun Yu Gongcheng Shijian

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

资助项目(51704283)

江苏省自然科学基金资助项目(BK20170277)

中国博士后科学基金资助项目(2016M601918)

地下空间液氮防灭火理论与工程实践

史波波 著



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

中国的煤矿开采过程普遍面临矿井火灾的严重威胁。传统的防灭火技术装备水平与现代煤矿高效、安全、清洁生产发展不相匹配。液氮是一种高效、易得而且清洁的低温灭火剂。但是其在矿井防灭火方面的基础研究基本处于空白,相关工艺技术研究也处于起步阶段。本书以地下空间火灾的高效、安全治理及瓦斯抑爆为切入点,围绕液氮高效注入、跨尺度裂隙场空间内的高效运移、高效灭火等科学问题,采用理论分析、实验测试和计算机模拟等,对液氮沸腾流动压降与相变传热传质、大空间液氮重气云扩散、多孔介质内液氮气液两相流传热传质、液氮高效率灭火特性进行了研究。最后,结合消防工程学的原理和方法,集成创新了配套的高效率防灭火技术及装备。

图书在版编目(CIP)数据

地下空间液氮防灭火理论与工程实践/史波波著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2018. 3

ISBN 978 -7 - 5646 - 3811 - 5

I. ①地… II. ①史… III. ①地下建筑物—防火—研究 IV. ①TU96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 313263 号

书 名 地下空间液氮防灭火理论与工程实践

著 者 史波波

责任编辑 王美柱

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 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 212 千字

版次/印次 2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

中国的煤矿开采过程普遍面临矿井火灾的严重威胁。由于火源的位置难判断,传统未改进的灌浆、泡沫防灭火技术覆盖范围小,应对大范围火灾区域效果有限。常态氮气比热小、降温效果有限,常需配合其他灭火措施,灭火周期长。传统的矿井防灭火技术装备水平与煤矿高效生产发展不相匹配,不足以完全适应现场实际对于防灭火时间方面的需求。为此,需要一种高效、快速覆盖、全淹没式的防灭火技术手段,对大范围采空区火灾、矿井隐蔽火源等进行高效防治。

液氮是一种高效、易得而且清洁的低温灭火剂。但是其在矿井防灭火方面的基础研究基本处于空白,相关工艺技术研究也处于起步阶段。本书在国家自然科学基金项目等资助下,以煤矿火灾的快速、高效、安全治理及瓦斯抑爆为切入点,围绕液氮高效注入、跨尺度裂隙场空间内的高效运移、高效灭火等科学问题,对液氮沸腾流动压降与相变传热传质、大空间液氮重气云扩散、多孔介质内液氮气液两相流传热传质、液氮高效率灭火特性进行了研究,集成创新了配套的高效率防灭火技术及装备,取得了多项有价值的成果。本书就是在这些研究成果的基础上精心撰写而成的。

全书共分为7章。第1章介绍了国内外煤矿液氮防灭火技术研究进展,并提出了本书的主要研究内容。第2章介绍了钻孔尺度下液氮沸腾流动压降与相变传热传质。试验研究了不同注氮管径、流量和管路保温层条件下,液氮流动与换热特性的时空演化规律。得出管流压降 Δp 随时间 t 的非线性变化规律,其与管径 D 呈反比,与流量 Q 呈正比;综合压降与换热特性,实验存在最优管径和最佳流量。管壁外无保温套情况下,第一压降值约为稳定压降时的3倍,在有保温套的情况下约为稳定时的10倍,且在管壁外增加保温套可以降低液氮稳定流动期间的压降。揭示了低温流体输送过程中的特殊热力学非稳态现象:低温管道的振动、热侵导致的气塞与间歇泉、管路的“三冷”等。并提出了相应的工程技术管理措施(保证管路足够的冷缩量、提前预冷、气液相分离、设置汽化缓冲腔等),确保整个液氮系统的高效、安全运行,并形成了相应的知识产权。第3章介绍了大空间液氮重气云扩散研究。构建了大空间液氮重气云扩散与灭火实验系统,揭示液氮注入空间环境的温-湿-氧浓度变化规律,提出了液氮兼具“重气沉降,膨胀驱氧,延时保氮,蒸汽雾化”等扩散规律与防灭火作用机制。液氮汽化后的低温氮气在纵向的扩散率约为径向的1.5倍,横向的2.0倍,因此工程中可采取横向加密钻孔的方法,注氮钻孔宜采用高位钻孔的方式,进行全淹没覆盖防灭火,且增加矿井堵漏封闭

可增强注氮效果。第4章介绍了多孔介质内液氮气液两相流与传热传质。构建了液氮在破碎松散煤体内的传热传质实验系统,建立了基于热-流-固耦合的多孔介质内传热传质数学模型,揭示了液氮蒸汽(LNV)在松散堆积体内部运移具有“重气沉降效应”,扩散呈现“不规则的椭圆状”沉降规律,得出了注氮压力对LNV流动及温度效应影响甚微,LNV出口温度、流量、钻孔尺寸、原始渗透率对其在多孔介质内传热传质影响显著的结论。第5章进行了液氮高效率灭火特性的实验研究。通过自主构建的液氮管路输送系统,来进行开放式油火的灭火实验。分析了不同液氮出口位置、液氮流量、不同管径以及不同灭火距离对灭火效果的影响,得出的结果对于开展高效灭火工作可提供重要参考。第6章介绍了煤矿液氮高效率防灭火技术与工程应用。提出了液氮直注式和汽化式两种防灭火的新方法,研制了煤矿井下运输型自增压液氮缓冲罐,构建了大流量、快速、定向防控火灾技术及工艺,具有操作简单、单位时间注氮量大($>3\,000\text{ Nm}^3/\text{h}$)、降温效果显著等优势。构建了地面固定式常态化液氮汽化防灭火系统,能实现高流量($>5\,000\text{ m}^3/\text{h}$)、高纯度($>99.99\%$)、高强度(一次性可提供 $>58\text{ 万 m}^3$ 的氮气)地将汽化后液氮注入井下防灭火区域。集成创新了液氮高效率防灭火与降温协同式一体化技术,以上技术及装备均取得了成功的工程经验和良好的降温惰化效果,具有良好的应用前景和推广价值。第7章是对全书研究成果的总结及相关研究工作的展望。

本书是笔者在近年来液氮防灭火相关研究成果的基础上总结而成的。成书过程中广泛参阅了前人的研究成果和国内外有关的著述,在此谨致谢意。感谢中国矿业大学周福宝教授,刘应科、夏同强、刘春、张国维老师,苏贺涛博士等所给予的大量帮助,感谢神华宁夏煤业集团李玉民、周光华、马灵军、王学兵、郑海滨等提供的工业试验条件和指导,同时衷心感谢中国矿业大学出版社编辑同志为本书出版所付出的辛勤工作。

本书中提出的很多新思想和新观点还有待于今后进行更深入细致的研究。由于涉及专业领域众多,加上笔者学识所限,书中难免存在不足甚至谬误,恳请读者批评指正。

著 者

2018年1月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景及意义	1
1.2	国内外研究现状	4
1.3	本书的研究内容	13
2	液氮沸腾流动压降与相变传热传质	14
2.1	水平直管内液氮流动的实验系统	14
2.2	管流液氮的压降及传热特性	19
2.3	低温流体输送过程中的热力学非稳态现象	27
2.4	液氮管流传输过程中的“三区域”模型	30
2.5	本章小结	33
3	大空间液氮重气云扩散研究	35
3.1	实验系统构建	35
3.2	开放自由空间液氮汽化扩散特性	38
3.3	巷道受限空间内液氮汽化的扩散规律	44
3.4	封闭空间液氮汽化逸散特性	49
3.5	本章小结	55
4	多孔介质内液氮气液两相流与传热传质	57
4.1	实验系统建立	57
4.2	多孔介质内液氮传热传质规律	59
4.3	基于热-流-固耦合的多孔介质内传热传质数学模型	62
4.4	数值模拟结果及分析	65
4.5	本章小结	75
5	液氮高效率灭火特性的实验研究	76
5.1	实验系统构建	76
5.2	液氮出口位置的分析对比	80
5.3	液氮高效率灭火的实验研究	84

5.4	液氮灭火的机理·····	92
5.5	本章小结·····	92
6	煤矿液氮高效率防灭火技术与工程应用·····	94
6.1	液氮来源·····	94
6.2	新型液氮高效率防灭火工艺及其适用性·····	95
6.3	直注式液氮防灭火技术在封闭工作面的应用·····	100
6.4	地面大型常态化液氮汽化防灭火技术应用·····	107
6.5	煤矿空冷式液氮防灭火、降温技术及工程应用·····	109
6.6	应用推广情况·····	115
6.7	本章小结·····	115
7	总结与展望·····	117
7.1	总结·····	117
7.2	研究展望·····	119
	参考文献·····	120

1 绪 论

地下空间是指属于地表以下的空间,它的范围很广,比如地下商城,地下停车场,地铁,穿海隧道,矿井等建筑空间。随着我国国民经济的高速发展,地下空间的开发和利用已迅速发展。同时,值得注意的是,地下空间的防灭火局势也不容乐观,由于其特殊性导致火灾危险性很大。此外,由于地下空间的使用性质存在很大的差异,本书的研究对象主要针对地下空间的矿井火灾防治。

1.1 研究背景及意义

虽然可再生能源在世界范围内得到了迅速发展,但在满足全球能源需求方面,煤炭仍将扮演着重要的角色,这一点在中国尤为突出。煤炭作为我国的主体能源,有力地支撑了国民经济和社会的长期、平稳、较快发展,煤炭在我国一次能源生产和消费结构中的比重一直占 76% 和 66.6%^[1]。然而,中国 90% 以上的煤矿都是井工开采,地下空间煤矿开采过程普遍面临矿井火灾的严重威胁^[2-4],25 个主要产煤省区的 130 余个大中型矿区均不同程度地受到煤层自然发火的威胁,70% 以上的大中型煤矿存在煤层自然发火危险^[5-9]。根据现场统计,最短自然发火期在 3 个月以内的矿井占 50% 以上^[10],一些主要煤炭基地如宁东、神东、乌达、兖州、淮南、淮北、徐州、大屯、枣庄、平顶山、阳泉、大同等矿区开采的煤层都属于自燃或容易自燃煤层。煤炭自燃火灾具有长期性、动态性以及影响范围大的特征^[11],不仅烧毁井下设备与煤炭资源,产生的高温、有毒有害气体还会严重影响煤矿安全生产,威胁人员生命安全。据统计,2001~2016 年 2 月,我国煤矿每次死亡超过 3 人以上的火灾事故 132 起,死亡 897 人^[12,13]。

尤其对于高瓦斯矿井,一方面由于煤炭的自燃易出现高温火区,另一方面在瓦斯与火灾两者的共同作用下易诱发瓦斯(或煤尘)燃烧、爆炸,进一步加重灾害的危险性与破坏性^[14-16],严重威胁人员生命及财产安全。而且随着采深的增加,深部资源的开采地质环境更加复杂,面临“三高一扰动”(高地温、高地压、高岩溶水压及采矿扰动)动力现象愈加明显,深部煤岩体的力学行为表征更趋复杂,煤岩破碎程度更高,破碎范围大,为自然发火提供了供氧、蓄热条件,煤炭自然发火更加频繁。此外,随开采深度增加,地温增高,煤层原始温度越高,自然发火期缩短。围岩层温度也越高,改善了自燃的蓄热条件,导致煤体与环境风流温差较大,增大了漏风供氧动力热风压,从而增加了煤体自身的耗氧速度和氧化放热强度,最终导致煤体自燃危险性增大。综上所述,随着开采深度的增加,矿井不易自燃煤层有可能转变成自燃甚至容易自燃煤层,防灭火压力陡增,煤炭自燃火区所引发的煤矿瓦斯燃烧或爆炸等次生灾害发生量将逐年增加。因此,开展矿井火灾的高效防治研究对于保障我国能源

安全具有重要的战略和现实意义。

防治煤炭自燃的主要原理就是惰化煤表面的活性结构,或使得煤体与空气隔绝,同时吸热降温。因此,国内外一般采用灌浆(或水)^[17]、阻化剂^[18-21]、凝胶^[22-24]、泡沫^[25-27]等防灭火技术手段,对于保障矿井的安全生产起到了非常重要的作用^[28,29]。由于矿井火源位置隐蔽,判别火区难度大,传统未改进的灌注泥浆不能达到理想的防灭火效果,或是覆盖范围小,扩散范围有限^[30],不易到达火源位置,或是灌浆材料容易流入工作面造成火区环境污染;泡沫的流动性强,对采空区煤炭自燃防治效果较好,但是成本一般较高,一旦泡沫破灭,防火效果会受到一定影响^[31];常态氮气(或二氧化碳气体)比热很小,降温效果差,且由于采空区易与外界连通,难以形成封闭的空间,造成惰性气体易随漏风逸散,这些缺点使得灭火期间常态氮气需配合其他辅助灭火措施来共同作用灭火,故而灭火周期长。特别是随着大采高综放开采的日益常态化,传统的矿井防灭火技术装备水平与煤矿高效生产发展不相匹配,不足以完全适应现场实际对于防灭火时间方面的需求。为此,亟须一种高效、快速覆盖、全淹没式的防灭火技术手段,对大范围采空区火灾、矿井隐蔽火源等进行高效防治。

低温浆材,如液态氮或者液态二氧化碳等,以其各自的独特优势,均被列为可接受的全淹没灭火剂,受到国内外的广泛关注。但文献^[32,33]列出二氧化碳灭火的几点不足:① 液态二氧化碳汽化会产生固体干冰,导致系统管道内过流不畅、堵塞,甚至爆裂,易引发安全事故。因此,液态二氧化碳一般情况下不能以液态形式直接灌注。② 二氧化碳生成量不大,成本相对液氮较高。③ 对于高位或平巷巷顶的着火带,应用二氧化碳的效果不好。④ 二氧化碳与空气的不易混合的特性在一些情况下成为缺点。⑤ 在着火带,二氧化碳与炽热的碳反应生成 CO,导致新的隐患^[34]。⑥ 二氧化碳具有可溶性,特别是易溶于酸性水,在潮湿有积水的巷道减弱了二氧化碳的防灭火效果。⑦ 二氧化碳比甲烷更易被煤和燃烧生成的焦炭吸附,使得注入的二氧化碳在进入着火带前就已经减少。⑧ 目前化工厂还不能完全提纯二氧化碳或提纯成本高,液态二氧化碳中含有 1% 的 CO 杂质,注入矿井干扰火灾指标气体判断。在低温浆材的应用方面,美国矿物局(United States Bureau of Mines)曾针对俄亥俄州一座发生自燃的煤矸石矿山进行了灭火试验,利用液氮中混合二氧化碳颗粒组成的超低温浆体,通过专用注浆管路注入矸石山的高温火区,起到了一定的阻燃降温作用。但是浆体制造过程对设备的要求较高,且灭火降温过程需要较长时间(3~6 个月)来维持,因此并未广泛应用于煤矿。所以基于以上方面原因的综合考虑,本书选取液氮为研究对象。

液氮是惰性的,稳定性好,不与任何物质起化合反应,无色,无嗅,无腐蚀性,不可燃,是一种高效、易得而且清洁的低温制冷剂,其主要性质如表 1-1 所示。液氮现已应用于生物、医疗、畜牧、食品、冶金、电子、航空航天等低温工业领域^[35,36]。液氮亦可作为一种防灭火介质,具有灭火迅速、效果显著、相对安全可靠、操作简单等优点。以往的研究表明,液氮能快速、有效地扑灭钠火^[37,38],这是水和二氧化碳介质均达不到的灭火效果。液氮亦可以用作扑灭异丙醇^[39]、乙醇、丙醇和柴油^[40]等油池火,以及建筑火灾^[41],从而避免了消防用水造成的财产损失。

表 1-1

液氮的主要物理性质

物 性	属 性
沸点 T_b (1 atm 时)	-195.8 °C
临界温度 T_c	-147.05 °C
液体密度 ρ_l (-180 °C 时)	0.729 g/cm ³
气体密度 ρ_g (1 atm 和 21.1 °C 时)	1.160 kg/m ³
汽化热 H (沸点下)	202.76 kJ/kg
气体定压比热容 c_p (25 °C 时)	1.038 kJ/(kg · K)
气体定容比热容 c_v (25 °C 时)	0.741 kJ/(kg · K)
液体黏度 μ_l (-150 °C 时)	0.038 mPa · s
气体黏度 μ_g (25 °C 时)	175.44×10^{-7} Pa · s
液体热导率 k_l (-150 °C 时)	0.064 6 W/(m · K)
气体热导率 k_g (25 °C 时)	0.024 75 W/(m · K)

液氮防灭火机理可以用 Damkohler 准则 (Da) 进行定性的分析^[42,43]。

$$Da = (l/u)c_F c_0 A e^{-E/RT} \quad (1-1)$$

式中, c_F 为燃料浓度, g/cm³; c_0 为氧气的浓度, g/cm³; E 为反应的活化能, J/mol; R 为理想气体常数, J/(mol · K); l 为特征长度, m; u 为特征速度, m/s; A 为动力学参数; T 为温度, K。

(1) 隔氧作用

注入的液氮升温汽化膨胀后(常压下, -195.8 °C 的 1 m³ 液氮可膨胀至 696 m³ 21 °C 的纯气态氮), 氧气浓度相对减少, 氮气部分地代替氧气而进入到煤体裂隙的表面, 这样煤表面对氧气的吸附量降低, 在很大程度上抑制或者减缓了煤氧化进程及火区压力增加; 此外, 注入的氮气提高了静压, 高氧气体经由漏风通道排出, 减少了向火区的漏风, 使火区内氧含量大大降低, c_0 减小, Da 降低。

(2) 降温作用

液氮沸点低, 注入火区的液氮可冷却燃料, 冷凝环境中的水蒸气, 与采空区隐蔽热源产生的热风压发生热交换, 降低热源温度至着火点以下, 即通过降低 T , 达到减小 Da 的目的。

(3) 惰化抑爆作用

流向火区环境的大量惰性气体, 使火区气体的氧含量降到很低, 同时也稀释了可燃气体的浓度 c_F , 消除了燃烧及爆炸危险性。此外, 注入火区的液氮对火焰的吹熄作用增加了式 (1-1) 中的 u , 将会对 Da 产生较大的影响。

所以, 液氮是兼具降温和惰化抑爆的优良清洁灭火剂和制冷剂, 环境效益显著, 对臭氧层没有任何耗损, ODP 值为 0; 没有合成物, 来源于大气, 返回大气, ATL 不必考虑; 不含 CO₂, 没有温室效应, 其潜能值 GWP 为 0; 当矿井启封, 恢复通风, “通风排氮”后, 井下环境不会造成二次污染, 灭火后没有任何痕迹及残渣, 无腐蚀, 不破坏综采设备。本书的研究将以煤矿火灾的快速、高效、安全治理为切入点, 研究液氮通过管路高效注入巷道、采空区等基础科学问题, 揭示液氮的高效防灭火惰化机理及液氮在采空区多孔介质内的传热传质规律, 通过构建煤矿液氮高效率防灭火的成套技术及工艺, 为我国自然发火矿井尤其是瓦斯与煤

自燃灾害共存的矿井探索出一条综合治理的创新之路,研究对于保障煤矿的安全生产具有极其重要的意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 煤矿液氮防灭火技术研究进展

液氮技术是煤矿预防和处理井下大型火灾事故的一项重要技术手段^[44-50]。无论对于矿井的煤炭自燃还是外源火灾,采用液氮技术可“防”可“灭”,且灭火后易于恢复井下生产。液氮防灭火技术已经被证实可用于矿井的防灭火工作,并在部分矿井的采空区煤自燃火灾的防治方面取得了一定的效果^[51,52]。液氮防灭火技术首次在煤矿的应用,可以追溯到1949年在捷克共和国的 Doubrava 煤矿应用,它成功地抑制了井下火灾的蔓延。其后,在英国的 Fernhilly 煤矿、Fryston 煤矿,德国的 Osterfeld 煤矿、Schlagel 煤矿、Eisen 煤矿,法国的 Rozelay 煤矿,南非的 Springfield 煤矿等也进行了应用,取得了一定的效果。2004年7月乌克兰顿涅茨克州的红色黎曼煤矿,由于瓦斯爆炸然后引起矿井火灾,矿井通过3台液氮机向通风平巷压送液氮,仅用时2个昼夜就把火灾扑灭,而据乌克兰费多罗夫科研所所长论述,之前同类的煤矿深井大火要耗时2~3个月才能扑灭^[53]。国内外部分矿井典型的液氮防灭火试验案例如表1-2所列^[54-66]。

表 1-2 国内外液氮防灭火应用的典型案例

煤矿名称	试验日期	火灾情况	液氮装置	灌注方法	惰气使用量及惰化情况
捷 克 Doubrava 煤矿	1949 年 2 月	瓦斯、煤尘爆炸	低温氮气发生器,11 m ³ /min	矿井管路,100 mm,间歇式注入	14 个月,505.7 万 m ³ ,火势控制,矿井启封
英国番尔煤矿	1962 年 7 月	掘进工作面瓦斯燃烧	槽车内的液氮汽化,23.3 m ³ /min	密闭注氮	2.5 d 时间,6.97 万 m ³ ,氧气浓度由 15.4%下降至 7.4%
原苏联伏尔塔煤管局 29 号矿井	1968 年 7 月	瓦斯燃烧,采空区火灾	液氮汽化器,32 m ³ /min	3 套管路灌注液氮	9 d 时间,29.6 万 m ³ (火区体积 1.8 倍),6 个月启封火区
原苏联库塔煤矿	1968 年 9 月	自然发火(冒顶区、采区巷道)密闭	井上罐车热水汽化装置,40 m ³ /min	铺设管路,200~150 mm	7 d 时间,17 万 m ³ ,6 个月灭火工作结束
原西德 Dserfeld 煤矿	1974 年 12 月	自然发火(冒顶区)密闭	井上罐车锅炉汽化装置,100 m ³ /min	用井下压气管,100 mm	4 d 时间,15 万 m ³ ,6 d 灭火
原西德 Schlagel 煤矿	1975 年 4 月	自然发火(工作面局部)密闭	井上罐车加热汽化装置	井下水管,100~150 mm	30 d 时间,70 万 m ³ ,1 个月灭火
法国布朗济煤矿	1976 年 4 月	采空区煤炭自燃	37 m ³ 液氮储槽,地面汽化,8.33 m ³ /min,输气压力 0.1 MPa	运输巷安设 150 mm 注氮管路	有效控制了煤自热,防止了自燃

续表 1-2

煤矿名称	试验日期	火灾情况	液氮装置	灌注方法	惰气使用量及惰化情况
波兰扎布热矿	1976 年 12 月	井下巷道煤壁火灾	井下液氮喷注, $0.072 \text{ m}^3/\text{min}$	井下安设注氮管路, 喷射器安装在密闭里侧	4 h, 17 m^3 , 火区形成正压, 控制了漏风, 排除了爆炸危险性
法国 Nerlebach 煤矿	1979 年 2 月	明火燃烧	井上罐车汽化器车, $170 \text{ m}^3/\text{min}$	用井下压气管灌注	3 d 时间, 65 万 m^3 , 2 个月灭火
英国 Fyrston 煤矿	1981 年 3 月	自然发火工作面(终端)密闭	井上罐车加热汽化装置, $50 \text{ m}^3/\text{min}$	不锈钢管, 110 mm	60 d 时间, 55 万 m^3 , 6 个月灭火工作结束
印度 GDK-9 Incline 煤矿	1986 年 4 月	熊熊地下火	移动小型液氮罐车, $24.5 \text{ m}^3/\text{min}$	钻孔灌注	3 个月, 32.4 万 m^3 , 55 d 启封矿井, 125 d 恢复生产
中国天府矿务局救护大队演习巷道	1982~1983 年	多堆煤火注液氮试验	矿用液氮罐车直接注液氮, $5.6 \text{ m}^3/\text{min}$	注氮管, 50 mm	39 min, 注氮到火熄灭, 全封闭注氮只用了火区体积的 1.49 倍氮量
澳大利亚 Newstan 煤矿	2005 年 11 月	井下煤炭自燃火灾	2 套专用低温设备, 汽化灌注流量 20 t/h , 压力 $\leq 800 \text{ kPa}$	低温软管, 直径 150 mm	有效控制了煤自热氧化, 防止了煤炭自燃火灾

由表 1-2 中矿井的应用情况看来,用液氮扑灭井下火灾的方法有两种,第一种是用地面汽化管路输送的方法输送到井下火区,此种方法注氮量大,对注氮管路损伤小,但是仅仅将液氮汽化为常态氮加以利用,难以真正发挥液氮降温的作用,极大地制约了液氮防灭火技术的规模化应用。第二种方法是利用喷嘴直接向密闭内注入液氮,液氮携带的冷量大,灭火效果突出,但液氮地面直注式防灭火技术尚遇到以下问题:① 材料方面:大量液氮来源相对匮乏,运输不便且价格昂贵,在经济成本上限制其大量灌注;② 技术方法层面:直接灌注液氮时常伴随存在“气塞”^[67](管道中的气囊或气泡阻止低温液体流动)等非稳态现象,造成注氮管路堵塞,以及管路受深冷易冻损等难题,影响液氮的灌注效率和实施效果(图 1-1);③ 对液氮的认识不足也限制了其广泛的应用。

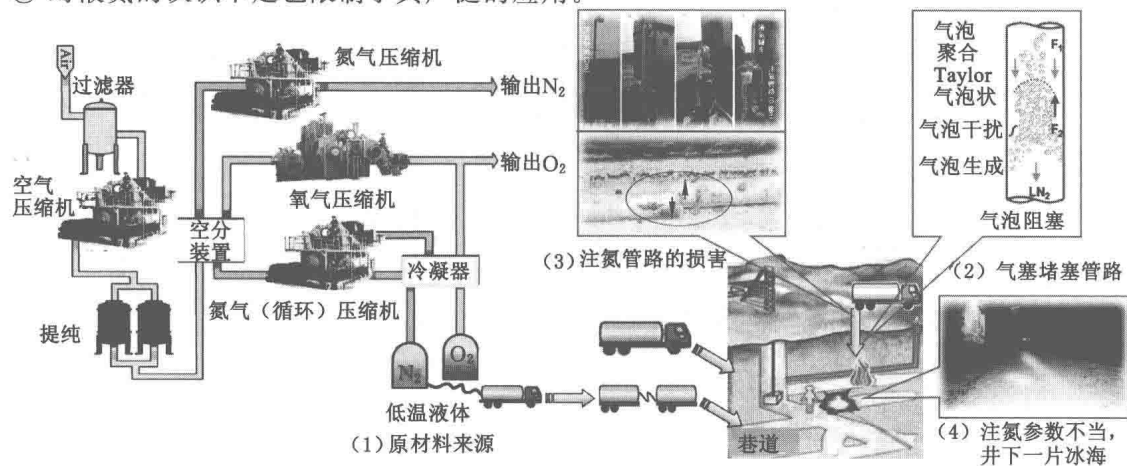


图 1-1 液氮防灭火技术问题

中国矿业大学通风防灭火团队与神华宁夏煤业集团针对以上难题,联合攻关,克服了技术瓶颈,开发了液氮防灭火技术成套技术及工艺(图 1-2)。按照灌注环境的不同,可以分为:① 开放式灌注液氮^[68],即在工作面后方一定距离向采空区注入液氮。采用开放式注液氮的方法,既要保证使采空区的 O_2 浓度控制在 10% 以下,有效阻止煤氧化进程,同时又要避免因回流氮气使得工作面的 O_2 浓度降低值超过 1%,因而存在一个最优液氮灌注参数的问题,开放式注氮是工作面正常回采期间防火的一项重要技术。② 封闭式灌注液氮,即在封闭式域内灌注液氮,防灭火效果较为显著。相关研究表明,全封闭注氮比开放式注氮注液量节约 50%,灭火时间节省 25%,降温速率快 53%^[56]。③ 目标式注液氮:仅通过降低火源点附近小范围的氧含量或温度来达到防灭火的目的。

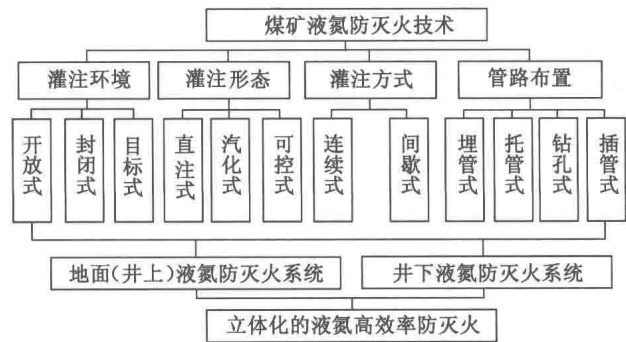


图 1-2 液氮防灭火技术体系

按照液氮灌注形态的不同可分为两种:① 直注式^[69,70],即将液氮直接灌注入火区。按照注氮的地点可分为:地面钻孔直注式和井下直注式两种。液氮以低温注入火区内,蒸发吸热,灭火效率较高。② 汽化式,液氮汽化式即将液氮在地面汽化成低温氮气,然后通过已有管路将氮气注入火区(图 1-3)。从表 1-2 可以看出,原西德和原苏联都曾将液氮汽化后,通过直径为 100~150 mm 的压气管路、注水管路将氮气注入火区。这种方法的缺点是,氮气

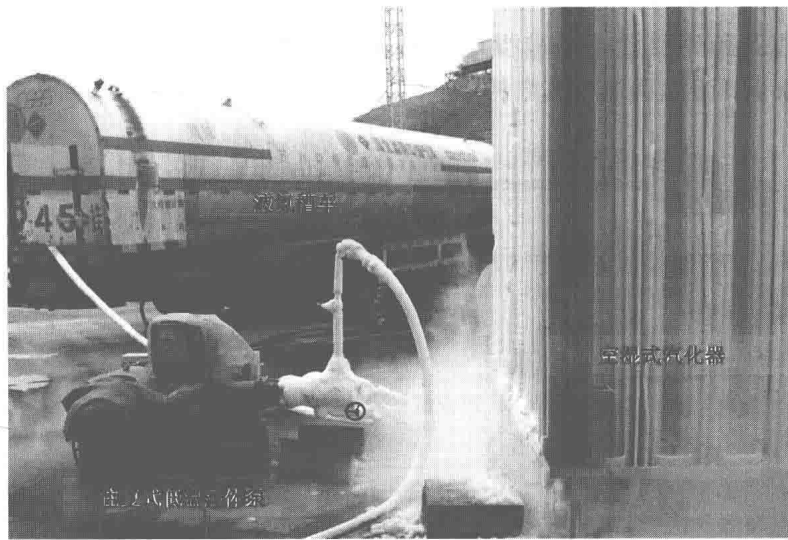


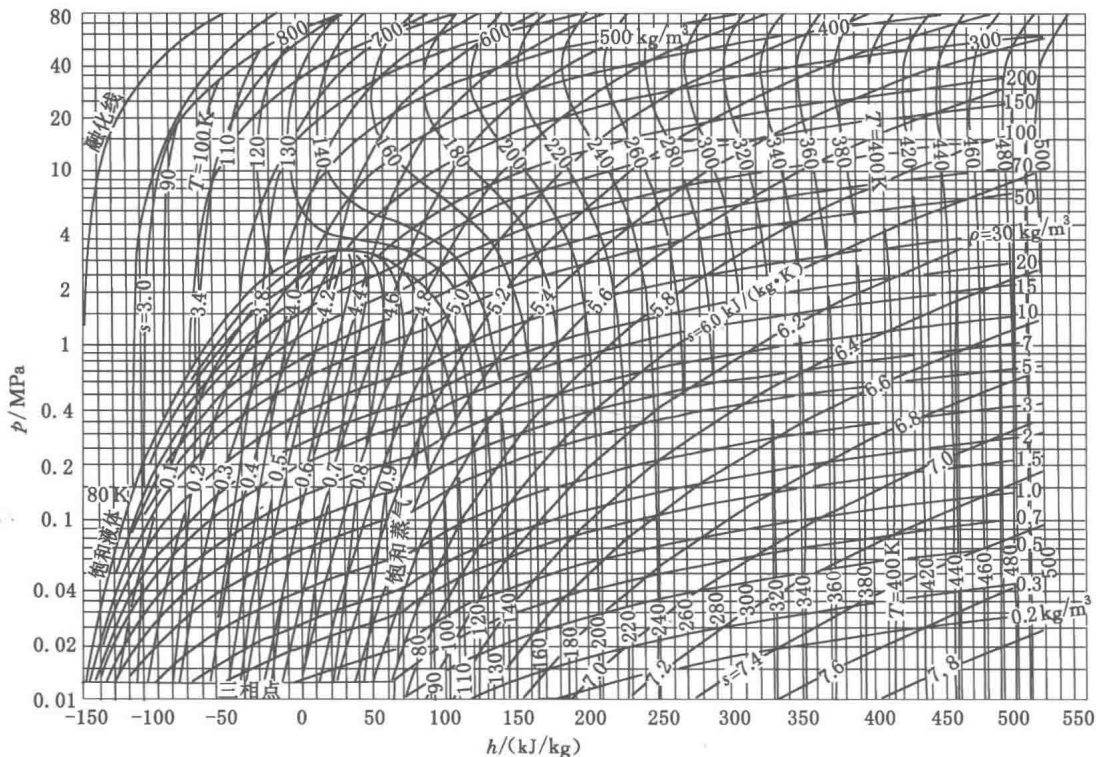
图 1-3 液氮汽化灌注技术工艺图

对火区的冷却作用小,类似于常态氮气防灭火工艺。而这种方式的主要优点是,沿管路输送液氮比往井下输送液氮方便,因而采取这种方式的较多;此外,由于矿井现有的防尘、灌浆、瓦斯抽采管路等大都通往工作面,可直接利用现有的管路灌注液氮,但由于连续灌注液氮到达火区对输送管路的要求高,普通管路极易发生冷脆、冷缩和冷裂等(图 1-1),工作面的支架也极易冻坏。温度太高等同于常态的氮气,失去了液氮的降温性能,防灭火周期长。因此实现煤矿防灭火输送液氮过程中温度的可控式调节^[71],对适应不同条件下矿井高效、安全防灭火具有非常重要的意义。

1.2.2 液氮高效灌注参数及优化

(1) 管流特性与压降 Δp

液氮一般采用 304 不锈钢无缝钢管(06Cr19Ni10,GB/T 14976—2012)输送,为了满足矿井注氮区域的需要,注氮管出口处须满足一定的出口压力。由于液氮具有饱和温度低、汽化潜热小等特点,在使用、储存及运输过程中极易发生汽化。故当液氮出口阀门打开后,液氮会在自身压力作用下流入壁面温度远高于其饱和温度的管路,管道输送液氮过程中液氮会受热汽化,流动沸腾的沿程干度变化很快。在输送系统中液氮常以液态、气态和液气混合态三种状态存在,此三种状态称为氮的过冷、过热和饱和状态(图 1-4)。液气密度比小,使得气泡所受浮力小,气泡的相对运动速度慢,该压降比单相流压降大很多,这样就会导致管道出口处压力不足。



条件较为苛刻,对其研究不是很多。宏观上的研究包括:流型、压降、换热、流动的不稳定性等,微观层面上的包括:气泡分离、表面活化核心的影响、局部流动、空泡份额、温度分布等。Roberston 等^[72]对换热器内液氮的流动沸腾进行了一系列的实验研究。发现在低热流密度 [$<4 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] 和低表面过热度情况下,换热系数与热流密度无关,而决定于质量流量,主要流型为弹状流和塞状流;而在高干度和高流速情况下,主要流型为环状流。孙淑凤等^[73]对弦月型狭缝内液氮受迫流动沸腾进行了实验研究,发现换热系数是常规光滑管路池沸腾的 3~5 倍。任欣等^[74]对毛细管内液氮池沸腾进行了实验研究,发现了毛细管对核态沸腾传热有明显的强化作用,并存在一个最优管径为 1.2 mm。Pfotenbauer 等^[75]对狭缝中液氮的核态沸腾进行了可视化研究,指出利用汽泡脱离直径、脱离频率、汽泡分布和速度等信息可以发展临界热流密度 CHF 的预测模型。Rousset 等^[76]综述了低温条件下两相流研究的可视化方法,指出通过可视化 CCD 高速摄像等方法能够获取两相流的一些简单流型。Asao 和 Ozawa^[77]对液氮竖直向上流动的沸腾换热系数和流型进行了研究,发现传热主导机理为核态沸腾(图 1-5^[78]),流型可以分为泡状流、弹状流、环状流和反环状流,并绘出了流型图,表示流型转变可以使用 Mishima-Ishii 判据进行判断。Das 和 Pattanayaka^[79]利用微小电容测量了液氮气液两相混合物的空泡份额,发现电容数字脉冲信号的概率密度函数根据不同流型表现出不同的特点,可以用作判断流型的依据。Steiner 等^[80,81]和 Klimenko 等^[82]分别对 14 mm 水平管内和 10 mm 竖直管内两相氮的流动压降进行了实验研究,实验段由三个长度为 175 mm 的铜管组成,实验参数范围为:质量流量 $40 \sim 500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;热流密度 $300 \sim 40\,000 \text{ W}/\text{m}^2$;干度 $2\% \sim 100\%$;压力 $0.5 \sim 1.6 \text{ MPa}$,指出两相流动压降与两相流干度等因素有关。齐守良等^[83]对微通道内的两相氮的流动压降进行了分析,指出用均相模型预测两相流动压降较为准确。李祥东等^[84]则通过数值模拟的方法对两相氮流动压降进行研究。Qi 等研究了微通道(1.931 mm、1.042 mm、0.834 mm、0.531 mm)内液氮流动的压降和传热特性,得出随着液氮温度的增加,压降在减小的结论^[85-87]。

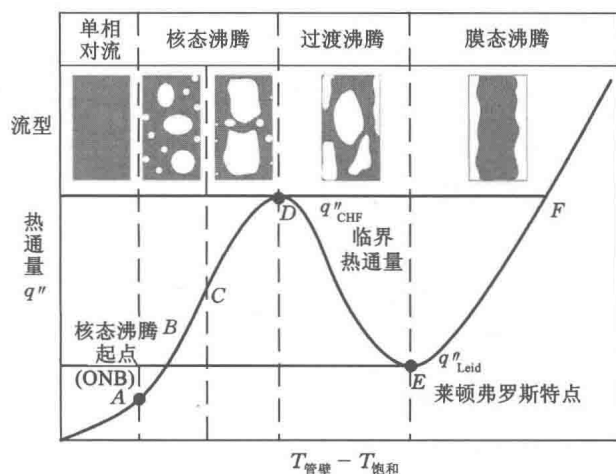


图 1-5 液氮典型的沸腾曲线^[78]

随着实验数据的不断积累和增加,不少学者根据自己研究的实验工况,建立了大量的经验或半经验关系式来描述饱和和液氮流动沸腾的传热特征,但到目前为止,各经验关系式的精度及其适用范围都还有待于进一步验证,还不能对液氮流动沸腾过程及所属相关设备的性

能进行准确预测和评估。并且上述研究均有自己的行业背景,并未结合具体的煤矿液氮防火工程实际情况,所针对的管道管径与管长均较小,且未考虑管壁粗糙度以及管壁外绝热材料对于流动压降的影响。本书将结合煤矿防灭火工程实际,研究在不同管径、不同流量、不同保温条件下的流动压降,并分析管流液氮的非稳定现象。这一工作将有助于人们深入了解低温下气液两相流动沸腾的传热机理,为工程选用合理的计算经验关系式,并为优化设计、提高系统性能及节约研发成本等提供重要的参考依据。

(2) 液氮灌注量 Q_{tot}

决定注氮量 Q_{tot} 大小的因素主要有封闭火区体积的大小、液氮出口温度、火区周围煤岩地质条件,特别是煤岩裂隙的大小、漏风情况以及火势范围的大小等。由于液氮传热传质的复杂性,目前尚没有准确的公式确定灌注量的大小,故只有借鉴表 1-3 中氮气灌注量的经验公式^[88]。此外,王海燕等得出了临界安全注惰速度,其为可燃气体层与惰气密度差、巷道形状、注惰管口尺寸和注惰流量的综合函数^[89]。由于传统计算中仅考虑惰化作用,并没有考虑液态氮大冷量降温的影响,所以由参考公式计算出的氮气的折算为液氮的需求量会偏大。工程上注氮量主要取决于封闭火区的体积。原苏联伏尔塔煤管局 29 号矿井使用氮气扑灭采空区火灾,注氮量为火区体积的 1.8 倍。天府矿务局救护队在试验巷道进行液氮扑灭小规模模拟火灾试验,注氮量为封闭火区体积的 0.88~1.49 倍^[56]。

表 1-3 矿井防灭火氮气灌注量的计算方法

类别	计算方法	公 式	注 释
采空区防火耗氮量的计算	按采空区氧化带氧浓度	$q^* = \frac{60Q_0(C_1 - C_2)}{C_{N_2} + C_2 - 100}$ $Q_{\text{tot}} = q^* t$	Q_0 为采空区氧化带漏风量, m^3/h ; C_1 为采空区氧化带平均氧含量, %; C_2 为采空区氧化带惰化指标, %; C_{N_2} 为注入氮气的浓度, %; q^* 为注氮流量; t 为氧化带 O_2 浓度由 C_1 下降至 C_2 的灌注时间
	按采空区的空间体积	$Q_{\text{tot}} = k_1 W L H k_2$ $= k V$	k_1 为注氮系数; k_2 为松散度; W, L, H 为惰化带的宽度、长度和高度, m ; k 为 k_1, k_2 的综合系数; V 为惰化带的体积, m^3
	按产量计算	$q^* = \frac{A}{1\ 440\rho T\eta_1\eta_2} \left(\frac{C_1}{C_2} - 1 \right)$ $Q_{\text{tot}} = q^* t$	A 为年产量, t ; T 为年工作日, d ; ρ 为煤的视密度, t/m^3 ; η_1 为管路输氮效率; η_2 为采空区注氮效率; C_1 为空气中的氧气含量; C_2 为采空区防火惰化指标; 据国内外经验, 每吨煤需 $5\ \text{m}^3$ 的氮气的量
火区灭火耗氮量	扑灭巷道明火所需氮量	$Q_{\text{tot}} > 3V$	至少为巷道空间体积的 3 倍以上
	扑灭采空区火灾所需的氮量	$Q_{\text{tot}} = V \left(\frac{C_2 - C_1}{C_1} \right) + Q_1 \frac{C_1}{C_3} t$	Q_1 为火区的漏风量, m^3/h ; V 为火区的体积, m^3 ; t 为注氮时间, h ; C_1 为氮气的纯度; C_2 为氮气惰化指标; C_3 为火区氮气浓度

(3) 注液氮口的位置及间距

注液氮口的位置及间距要依据氧化升温带的位置及宽度、工作面的推进度、注氮量、注氮频率及液氮蒸气的扩散半径等确定,注氮口位置一般应设在进风侧,最好使得氮气能通过火源点。目的是注入的氮气尽可能覆盖整个采空区的氧化带,有效抑制综放工作面采空区

氧化带浮煤的氧化自燃。氮气释放口距采面的最大、最小距离为：

$$L_{\max} = L_s + L_y - L_k \quad (1-2)$$

$$L_{\min} = L_s + L_k \quad (1-3)$$

式中, L_s 为采空区散热带的宽度; L_y 为采空区氧化带的宽度; L_k 为氮气的扩散半径。氮气的扩散范围在不同的采空区是不同的, 主要与采高和顶板岩性有关, 采高小, 顶板冒落后无大块岩石, 易压实者扩散范围就小, 反之则大。在法国研究学者看来, 扩散范围一般为 50 m 或者更小些, 洛林矿区拉乌弗矿仅有 20~30 m^[90]。但是, 液氮汽化后氮气的扩散比常态氮气更为复杂, 低温氮蒸气气云团密度比空气大, 将会首先发生重力沉降。同时, 由于大气湍流, 空气被卷吸进入云团的内部, 低温的重气云团也会被加热, 向正浮性气体或者中性气体扩散转变, 所以定量确定液氮扩散范围, 确定采空区的惰化率、降温率等参数, 对于确定注氮口的位置及间距有着重要的意义。

1.2.3 液氮沸腾换热与空间扩散机理

液氮的流动沸腾特性不同于常规流体, 主要体现在以下两个方面: 液氮具有独特的热物性; 热表面的热物性对液氮沸腾换热有重要的影响。当将液氮注入相对自由的大空间(如巷道、高冒区或者煤仓等地点)时, 所产生的流动为在均相介质中伴有相变的扩散过程, 空气及巷壁温度开始快速下降, 所发生的沸腾属于池沸腾范畴。Bland 等^[91]研究了液氮在铜表面的沸腾和气泡行为, 阐述了迟滞现象的产生。Bewilogua 等^[92]对低温流体在金属表面的池沸腾进行了研究, 发现金属表面机械处理改变其粗糙度会对沸腾过程中的表面过热产生较大的影响。Yu 等^[93]对烧结金属多孔介质表面在液氮中的池沸腾进行了实验研究, 发现多孔表面的换热系数为光滑表面的 3~10 倍, 明显换热增强。Kozlov 等^[94]对高温超导陶瓷材料在液氮和液氢中的沸腾换热进行了研究, 得出在热流密度较大的情况下, 换热主要由骨架和热导率决定。Marto^[95]等对不同沸腾表面条件下液氮的池沸腾进行了研究。Shirai 开展了液氢池沸腾及 CHF 的实验, 并指出在过冷及饱和条件下, 临界热流密度之间的关系可用 Kutateladze 方程来预测^[96]。Jin^[97], 张世一^[98,99]等进行了液氮池沸腾的可视化实验, 观测到高热流区域合体气泡脱离周期为一个定值 13.5 Hz。Gong^[100]在不同压力下对乙烷、异丁烷及它们的混合物进行了池沸腾实验研究, 指出随热流密度的增加, 脱离直径相应增加。

另一方面, 研究液氮汽化后的扩散机理对于防灭火及泄漏防窒息、人员紧急疏散区域的划定等也有着重要的参考意义。低温液体释放在汽化过程中多会形成云团, 根据气云密度和空气密度的相对大小, 将气云分为轻气云、中性气云和重气云三类。轻气云和中性气云统称为非重气云。非重气云扩散过程中大气湍流占支配地位, 重气云的扩散过程应该考虑气云重力效应, 主要包括重力沉降、空气卷吸、云团加热和向非重气云团转变等阶段^[101,102]。

① 重力沉降: 由于云团与周围空气间的密度差, 导致重气沉降, 引起云团厚度的降低和径向尺寸的增大。此阶段对云团的外形尺寸、空气卷吸及浓度分布起支配作用的是由重力塌陷引起的湍流, 大气湍流起辅助作用。

② 空气卷吸: 分为顶部空气卷吸和侧面空气卷吸。空气卷吸的过程也就是云团稀释冲淡的过程。初始阶段, 云团的塌陷引起云团内部湍流, 进而在云团前端形成的涡旋场显得很重要。因此, 此阶段以侧面卷吸为主且认为卷吸速度同云团前端运移速度呈正比。随着涡旋的消失, 由大气湍流引起的顶部空气卷吸被认为是最重要的也是最主要的, 而整个空气卷吸则是两者之和。

③ 云团加热: 由于初始泄漏云团与周