

国家自然科学基金青年基金项目 (51604095)
中国博士后科学基金 (2018M630818) 资助

气液两相介质

抑制管道瓦斯爆炸协同规律及机理研究

裴蓓 陈立伟 李杰 韦双明 / 著

Qiye Liangxiang Jiezhi
Yizhi Guandao Wasi Baozha Xietong Guilu Ji Jili Yanjiu

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金青年基金项目(51604095)

中国博士后科学基金项目(2018M630818)资助

气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸 协同规律及机理研究

裴 蓓 陈立伟 李 杰 韦双明 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书基于搭建的惰性气体-超细水雾惰化抑制管道瓦斯爆炸实验系统,通过对比研究单一抑爆剂和气液两相介质抑制 9.5%甲烷/空气预混气爆炸超压、火焰形态与结构、火焰传播速度和最大火焰温度等爆炸动态参数的演变规律,发现了惰性气体种类、稀释体积分数和超细水雾通入量影响气液两相介质抑爆的协同规律,获得了抑爆关键控制参数;结合理论分析和数值模拟,分析了惰性气体和超细水雾抑制瓦斯爆炸的相间耦合作用机制,揭示了气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同机理,为惰化细水雾抑爆技术的应用提供了科学支撑。

本书可供从事安全工程及相关专业的科研及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸协同规律及机理研究/

裴蓓等著. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4025 - 5

I. ①气… II. ①裴… III. ①瓦斯爆炸—研究

IV. ①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 142516 号

书 名 气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸协同规律及机理研究

著 者 裴 蓓 陈立伟 李 杰 韦双明

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 8.25 字数 211 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

煤炭是我国主体能源,随着煤矿开采深度和瓦斯抽采量的增加,瓦斯抽采管路日趋增长和复杂化,煤矿井下各类场所(如瓦斯抽采管道、工作面上隅角、掘进头、巷道等)潜在的诱发灾变因素也越来越多。由于煤矿巷道、抽采管路具有大长径比特点,极易因燃烧波、压力波的相互激励导致火焰加速,甚至形成爆轰瞬间破坏通风构筑物 and 抽采管网,致使有害气体扩散而诱发更远区域人员伤亡,造成矿井重大恶性事故。为此,研究清洁高效抑爆减灾技术迫在眉睫。

惰性气体和细水雾等都是常用的清洁型抑爆剂,然而惰性气体抑爆使用浓度高达 28% 以上,纯细水雾抑爆效果受到爆炸强度和水雾密度、粒径等因素影响,在使用过程中存在抑爆效果不稳定、质量浓度和水压要求高、水雾分布不均等问题,存在抑爆失败风险,故迫切需提高抑爆的有效性和可靠性。针对清洁高效抑爆需求,本书采用了理论分析、实验测试和数值模拟等研究手段,搭建了惰性气体-超细水雾惰化抑制管道瓦斯爆炸实验系统,通过对比单一抑爆剂和气液两相介质抑制 9.5% 甲烷/空气预混气爆炸在超压、火焰形态与结构、火焰传播速度和最大火焰温度等爆炸动态参数的变化,分析了惰性气体种类、稀释体积分数和超细水雾通入量影响气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同作用规律,获得了抑爆关键控制参数;并结合理论分析和数值模拟,对惰性气体和超细水雾协同抑制瓦斯爆炸的相间耦合作用机制进行了探讨,揭示了气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同机理,为清洁、高效惰化细水雾抑爆技术的发展提供了科学支撑。

本书的研究得到了国家自然科学基金青年基金项目“气液两相介质抑制瓦斯爆炸协同机理研究(No. 51604095)”、中国博士后科学基金项目“气液两相介质对瓦斯爆炸球型火焰自加速机制影响研究(No. 2018M630818)”、河南省科技厅基础与前沿技术研究项目“气液两相介质对管道瓦斯爆炸衰减特性与惰化机理研究(No. 152300410100)”、河南省科技攻关研究项目“水力冲孔—注气驱替强化瓦斯抽采技术研究(No. 172102310570)”和河南省教育厅高等学校重点科研项目“惰性气体与细水雾抑制甲烷爆炸协同作用及机理研究(No. 14A620001)”等项目的资助,在此表示感谢!

本书是在笔者博士论文基础上形成的,成书过程离不开笔者导师余明高教授的悉心指导与帮助。从师五载,从余老师那里学到的不仅仅有知识,还有他勤奋朴实的工作作风、孜孜不倦的拼搏精神、严谨求实的治学态度都使我深受教诲。在此,再次向余老师表示最诚挚的谢意!

笔者在撰写本书过程中虽然尽了最大努力,但受水平所限,书中仍可能有不当之处,敬请读者批评指正!

著 者

2018 年 5 月于河南理工大学

目 录

1 绪论	1
1.1 研究的背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本研究提出的科学问题及科学意义	7
1.4 研究内容与技术路线	7
2 管道瓦斯抑爆实验系统	9
2.1 实验系统构成	9
2.2 实验工况	16
2.3 实验步骤	16
2.4 本章小结	17
3 单一抑制剂作用下管道瓦斯爆炸衰减特性实验研究	18
3.1 管道瓦斯爆炸特性分析	18
3.2 惰性气体抑制管道瓦斯爆炸衰减特性	22
3.3 超细水雾抑制管道瓦斯爆炸衰减特性实验研究	33
3.4 单一抑爆剂抑制效果比较	41
3.5 本章小结	43
4 气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸衰减特性实验研究	45
4.1 实验工况	45
4.2 气液两相介质对瓦斯爆炸火焰传播特性的影响	46
4.3 气液两相介质对瓦斯爆炸压力的影响	71
4.4 本章小结	85
5 气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸数值模拟研究	87
5.1 气液两相抑制瓦斯爆炸的数学模型	87
5.2 几何模型与网格划分	91
5.3 初始条件与边界条件	92
5.4 数值模拟结果与抑爆实验对比	92
5.5 本章小结	103

6	气液两相介质协同抑制瓦斯爆炸机理研究	104
6.1	瓦斯爆炸火焰传播加速机理与火焰不稳定性	104
6.2	惰性气体增强初始瓦斯爆炸火焰稳定性分析	108
6.3	气液两相介质协同抑制瓦斯爆炸机理	111
6.4	本章小结	114
7	结论	115
7.1	主要结论	115
7.2	创新点	116
7.3	存在问题和下一步展望	117
	参考文献	118

1 绪 论

1.1 研究的背景与意义

根据国家统计局《2015 年国民经济和社会发展统计公报》显示:2015 年我国煤炭消费量占能源消费总量的 64.0%,水电、风电、核电、天然气等清洁能源消费量占能源消费总量的 17.9%。尽管近年来煤炭在国家能源结构中的份额不断下降,然而我国能源资源的赋存条件决定了煤炭在今后很长时间内仍是我国主体能源之一^[1]。目前我国 95% 的煤炭生产依靠井工开采,且多数矿井已进入深部开采阶段,煤层赋存及开采条件十分复杂,面临瓦斯、火、尘、冒顶和水等煤矿五大自然灾害的严重威胁^[2]。经过多年的综合治理,我国煤矿事故致死人数呈逐年下降趋势,煤矿事故得到了有效控制。然而,通过对 2001~2016 年煤矿死亡人数进行统计发现,如图 1-1 所示,我国煤矿的瓦斯爆炸灾害仍然十分严重,瓦斯爆炸事故无论在起数,还是死亡人数上长期以来均占首位,是煤矿安全重点防范的对象。例如,2009 年 11 月 21 日 2 时 30 分左右,黑龙江龙煤集团鹤岗分公司新兴煤矿发生瓦斯爆炸,共造成 108 人遇难;2013 年 3 月 29 日 21 时 56 分,吉林省白山市八宝煤业公司发生瓦斯爆炸事故,造成 36 人遇难;2016 年 10 月 31 日,重庆市永川区金山沟煤业有限责任公司瓦斯爆炸事故造成 33 人遇难等。这些瓦斯爆炸事故造成了重大人员伤亡和经济损失,引发政府和社会的高度关注。

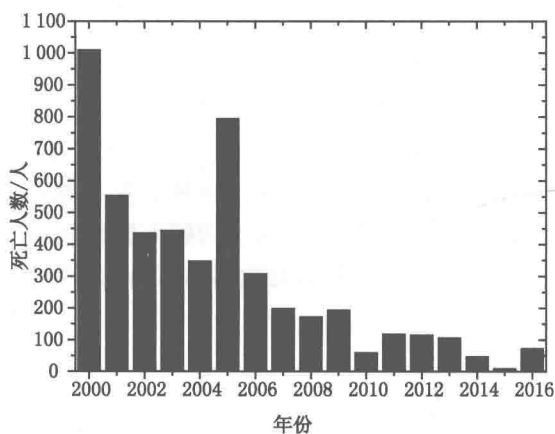


图 1-1 2000~2016 年我国重特大瓦斯爆炸事故死亡人数统计

(注:统计截至 2016 年 11 月底,数据来源于国家安全生产监督管理总局网站)

同时,瓦斯又是一种优质、清洁型能源,若未经处理或回收直接排放到大气中,其温室效

应约为二氧化碳的 21 倍,而合理利用瓦斯能有效避免严重的生态污染和资源浪费。据探测,我国煤层气资源量为 36.8 万亿 m^3 ,与陆上常规天然气资源量基本相当,居世界第三位,开发潜力巨大^[3]。随着终端能源需求逐步向优质高效清洁能源的转化,我国对燃气的需求量迅速增长。国家能源局、环境保护部、工业和信息化部下发[2014]571 号《关于促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见》,到 2020 年,我国煤层气产量 400 亿 m^3 ,其中:地面开发 200 亿 m^3 ,基本全部利用;井下抽采 200 亿 m^3 ,利用率 60% 以上。总之,开发利用煤层气,能有效弥补中国常规天然气供应量的不足,有利于煤矿安全生产、节能环保及优化能源结构,并可在一定程度上缓解中国能源安全的紧张形势^[4]。

《煤矿安全规程》第一百八十四条规定:利用瓦斯的浓度不能低于 30%。然而,在我国已有的矿井瓦斯抽采量中,70% 以上浓度低于 30%,平均 26%,相当部分低于 16%,属于低浓度瓦斯抽采范围^[5]。随瓦斯抽采量的增大,瓦斯抽采管路越来越长,管网越来越复杂,潜在的危险因素也越来越多,一旦诱发爆炸将导致抽采管网瓦斯泄漏扩散、火灾等二次灾害,引发重大安全事故。因此,开展可燃气体抑爆技术研究对瓦斯抽采和输送安全具有十分重要的现实意义。

目前常用的可燃气体爆炸抑制剂主要是单一抑爆剂,例如粉体抑爆、惰性气体抑爆和水系抑爆等,而且现有很多抑爆剂在实际应用中存在着一定弊端。例如有的抑爆粉体除了成本昂贵,还会带来对环境和工艺介质的污染;惰性气体抑爆、防灭火时需要相当高的浓度,有研究表明当 CO_2 的浓度达到 27% 时才能完全抑制 9% 瓦斯的爆炸^[6],《 CO_2 灭火系统设计规范》规定 CO_2 系统的设计浓度则需高达 34% 以上^[7],意味着应用时需要大量高压气瓶组、复杂管道,后续维护也很复杂;细水雾也是一种公认的清洁、高效的可燃气体爆炸抑制剂,而其抑爆效果受到水雾粒径、浓度、水雾区长度、初始爆炸强度等因素的影响^[8],能导致爆炸产生增强与抑制两种截然相反的效果^[9]。细水雾导致爆炸增强的主要原因是水雾加速了爆炸流场和火焰面扰动,火焰面积增大,促进了化学反应的进行和火焰传播的加速^[10];而当水雾量增大到一定值后抑制效果增长的幅度将逐渐变小,又会出现“平台效应”^[9]。因此,单一抑爆剂的应用存在一定瓶颈。

协同抑爆是指利用不同抑爆剂的优势,使其互相弥补达到更好的抑爆效果。Holborn 等^[11]曾提出氮气-超细水雾抑制氢气爆炸能产生加性效应。余明高^[12]、朱新娜^[13]等对稀释气体 CO_2 和超细水雾抑制甲烷爆炸进行了实验研究,发现火焰传播速度、爆炸超压和平均压升速度均有显著降低。然而,现有文献中针对气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同规律与协同增效原因,以及协同抑爆效果的影响因素等关键问题未展开深入研究。因此,开展气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸协同规律与机理研究对煤矿瓦斯抽采和瓦斯输送安全具有重要的科学意义和应用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 惰性气体抑爆研究现状

惰性气体稀释剂是防止和降低密闭容器爆炸危害的最有效的方法之一。国内外学者研究了多种惰性稀释剂如 Ar 、 N_2 、 CO_2 、 H_2O (水蒸气) 和废气等对氢气、甲烷、丙烷、LPG (液化石油气)、乙烯等易燃气体的抑爆作用。目前对惰性气体抑制可燃气体爆炸研究主要围绕爆

炸/燃烧极限、火焰传播速度、爆炸超压、燃烧反应动力学等方面展开。

研究表明,惰性稀释剂可以明显影响爆炸/燃烧极限。例如,1952年 Coward 和 Jones 等^[14]在一个直径为 10 英寸的管道内,测试了用 N_2 、 CO_2 、 H_2O 、Ar 等惰性气体稀释 CH_4 的可燃极限。Kondo 等^[15]在 12 L 爆炸球内研究了 CO_2 对甲烷/空气预混气爆炸极限的影响,表明对于化学当量比下的甲烷/空气预混气, CO_2 体积分数达到 25% 才能起到惰化作用。Qiao^[16]等人通过实验和数值模拟研究了甲烷/空气、氢/空气火焰在不同稀释剂(N_2 、He、Ar、 CO_2)作用下对燃烧极限的影响。S. E. Ganta 等^[17]分别在 20 L 爆炸球和一个 8 m 长、部分直径为 1.04 m 的管道内研究了 CO_2 对碳氢化合物密闭爆炸和射流燃烧点火行为、惰化浓度和超压的影响。喻建良、陈鹏、赵涛等^[18,19]开展了惰性气体对爆燃火焰淬熄的研究。钱海林等^[20]、沈正祥等^[21]、王华、邓军等^[22]、王涛^[23]、刘玉泉等^[24]、邱雁等^[25]分别研究了 N_2/CO_2 混合气、 CO_2 和 N_2 对瓦斯浓度爆炸极限、超压和临界氧浓度的影响,发现 CO_2 比 N_2 有更好的抑制效果,惰性混合气中 CO_2 的体积分数越高,抑爆效果越好。

在影响火焰传播方面,Hermanns 等人^[26]采用热流量法测定了 N_2 作为稀释气对当量比范围为 0.7~3.1 的 H_2 /空气火焰层流燃烧速度的影响。Arpentinier 等人^[27]对化学计量甲烷/空气的燃烧速度与将 N_2 换成 CO_2 和 Ar 环境中化学计量甲烷的层流燃烧速度进行了比较。结果表明:层流燃烧速度与绝热火焰温度相关,使用 CO_2 比 Ar 或 N_2 温度要低。Halter^[28-30]、Tahtouh^[31,32]、Lachaux^[33] 等通过实验和数值模拟的方法,对圆柱形不锈钢管道内多种稀释气体(N_2 、 CO_2 、水蒸气、三种燃烧后的废气组合物、He、Ar)对化学当量比甲烷爆炸层流燃烧速度的影响进行了深入研究。结果表明热容量对层流燃烧速度的影响起主导作用,并提出了热容量与层流燃烧速度之间的关系式。

Hongmeng Li 等^[34]利用纹影系统研究了 $H_2/CO/CO_2$ /air 合成预混气球型火焰的层流燃烧特性,研究了 CO_2 含量对火焰传播、马赫斯坦长度和层流燃烧速度的影响。研究发现:随着 CO_2 体积分数的增加,层流燃烧速度值明显减小。牛芳等^[35]在 10 m³ 的爆炸罐中对 9.5% 的甲烷/空气进行了爆炸试验,计算得到了爆炸物的层流燃烧速度、爆炸特征值的变化规律。

在影响爆炸超压方面,A. Di Benedetto^[36]等在圆柱形封闭管道中进行 $CH_4/O_2/N_2/CO_2$ 和 $H_2/O_2/N_2/CO_2$ 的爆炸实验,结果表明:降低 CO_2 含量或者增加 O_2 含量会导致爆炸最大压力和最大压力上升速率上升;并通过 Chemkin-premix 模拟得出, CO_2 不仅影响火焰传播速率,而且会影响火焰的比热,当 CO_2 的含量使得火焰温度降低到 1 500 K 时,燃烧速率会下降,火焰会熄灭。胡栋、袁长迎等^[37]、胡耀元等^[38]研究了 N_2 、 CO_2 和水蒸气对汽油、石油液化气爆炸温度和压力特性的影响,结果表明: N_2 、 CO_2 与水蒸气对多元混合气体支链爆炸具有抑制作用。

在惰性气体影响燃烧反应动力学方面,S. O. B. Shrestha 等^[39]通过热力学分析指出,由于 CO_2 对氧化反应热的分享效应,三组分的反应速率、热释放速率、火焰温度以及火焰传播速率都会下降。C. Cohe 等^[40]观测研究了各种不同压强条件下 CH_4/CO_2 /air 三组分预混体系的层流和湍流火焰特征,数值模拟和实验的结果表明随着 CO_2 的增加,层流火焰传播速率降低,燃料的平均消耗速率随着 CO_2 的增加而减小。Yang Zhang 等^[41]利用 DPIV 系统进行了 N_2 和 CO_2 对 H_2/CO /air 合成气火焰的层流火焰传播速度和稀释效应实验研究。同时,还利用 Chemkin 评价了 N_2 和 CO_2 对合成气化学反应过程的影响,结果表明: CO_2 稀释对

火焰传播和熄灭比 N_2 稀释有更深远的影响;热效应对层流燃烧速度的降低占主导作用; CO_2 作为第三体增强了链终止反应 $H+O_2(+M)\rightarrow HO_2(+M)$,同时弱化了 CO 的氧化反应 $CO+OH\rightarrow CO_2+H$ 。

陈思维、杜杨等人^[42]建立了管道内可燃气体的单步化学反应湍流爆炸模型,对二维管道中惰性气体抑制可燃气体爆炸的过程及规律进行了数值模拟。王建等^[43]研究了惰性气体对 H_2/O_2 混合气体爆轰性能的影响机制,模拟结果表明: N_2 、 H_2O 、 CO_2 对 H_2/O_2 气体的阻尼能力依次增加;惰性气体的阻尼性能出现差异的原因是化学阻尼机制不同,不同的惰性气体与爆炸反应产物发生不同二次反应,猝灭活性基团的能力迥异,因此抑制爆炸反应进程的能力不同。贾宝山等^[44,45]利用 Chemkin 软件分析了 N_2 、 CO_2 含量对瓦斯爆炸过程及致灾性气体生成的影响。结果表明,在相同体积分数下, CO_2 在抑制瓦斯爆炸作用方面比 N_2 的效果更为明显。罗振敏等^[46]利用 Gaussian 09 软件分析了 CO_2 在甲烷爆炸过程中的作用以及抑制机理,结果表明: CO_2 以稳定的第三体存在,未参与原子交换反应,但 CO_2 促进了甲烷爆炸链引发甲基自由基的结合反应,降低了关键自由基甲基的浓度,中断了甲烷爆炸链,同时乙烷的氧化反应不会强化甲烷的爆炸反应。

综上所述,现有文献针对单一或多种惰性气体抑制可燃气体爆炸进行了深入研究,其抑爆效果主要受到稀释体积分数的影响,体积分数越高,惰化效果越好。

1.2.2 细水雾抑爆研究现状

近年来国内外学术界对细水雾、超细水雾抑制可燃气体爆炸方面的研究主要围绕爆炸超压、火焰温度、火焰传播速度、燃烧动力学等方面探讨细水雾抑爆效果的影响因素与机理。

Acton 等^[47]进行了水雾抑制爆炸的研究,认为使用水雾后爆炸所产生的超压显著降低,到达爆炸超压峰值的时间缩短。P. G. Holborn 等^[11,48-50]进行了小型圆管内细水雾抑制低浓度氢-氧混合气爆燃实验与 FLACS 模拟实验,认为高浓度的水雾能显著降低初始压升速率和最大超压值,并探讨了泄放口面积对超压速率与最大超压值的影响。Medvedev^[51]等人发现超细水雾能降低氢-氧爆炸极限,雾滴越小抑爆作用越明显。李润之、李永怀、谢波等^[52-54]研究了细水雾抑制管道内瓦斯爆炸效果,对主动水雾抑爆过程中的激波、火焰抑制作用进行了实验研究,探讨了实验管道中细水雾喷嘴的位置、最佳水流量。唐建军^[55]、陈晓坤^[56]、林滢^[57]、谷睿^[58]、秦文茜^[59]、毕明树^[60]、高旭亮^[61]等研究了超细水雾对不同体积分数瓦斯气体爆炸的抑制作用,发现超细水雾在降低甲烷爆炸温度、延长爆炸延迟时间、降低火焰传播速度和降低爆炸压力方面作用明显。安安^[62]、余明高^[63]、李振峰^[64]、许红利^[65,66]等开展了超细水雾抑制瓦斯火、细水雾抑制煤尘与瓦斯爆炸以及瓦斯与粉尘混合物的实验研究。Sapko^[67]和 Zalosh^[68]都指出细水雾能够通过两种方式抑制燃烧:细水雾能够惰化气体混合物,防止火焰从点火源向远处传播;使用足够稠密的细水雾可熄灭已经形成的火焰传播。

在细水雾抑爆机理方面,G. O. Thomas^[69]研究结果认为爆炸中气流的加速依靠局部的堵塞程度和限制程度,水雾抑爆主要的物理机理是液滴与加速气流之间的相对速度,直径 $50\ \mu m$ 以下的液滴在抑爆过程中起主要作用,水雾在实际爆炸中的有效性与初始爆炸强度有关。Teresa Parra^[70]等建立了一维甲烷/空气预混火焰与细水雾相互作用的数学模型,认为细水雾抑制作用表现为破碎、降温和水滴蒸发吸热作用,还探讨了爆燃与爆轰条件下细水雾抑制甲烷爆炸的熄灭判据。Adiga 等^[71,72]采用 CFD 和实验相结合的方法,分析了超细水

雾抑爆过程,指出在衰减冲击波方面,分解能的作用与蒸发潜热相比可以忽略,但指出在吸收冲击波能量的过程中,超细水雾的面积一体积比其他细水雾的蒸发具有时间尺度优势,可以使其更好地发挥作用。刘昶亚等^[73]指出水雾对气体爆炸火焰传播的抑制是由于水雾降低了反应区内火焰温度和气体燃烧速度,减缓了火焰阵面传热与传质,从而使传播火焰得以抑制。

然而,Kees van Wingerden、G. O. Thomas 等^[74-76]通过研究细水雾对爆炸火焰的影响,认为水雾对爆炸的抑制作用来自燃烧区内增加的热量传递和质量传递,而喷雾也可能会促进燃料和空气的混合,引起火焰的湍流化,从而加剧爆炸反应。余明高、游浩等^[77,78]采用压力喷头雾化方式进行了半密闭钢化玻璃管道内的瓦斯/煤尘复合爆炸实验,指出水量充足时细水雾可有效降低火焰传播速度和火焰温度,瓦斯浓度过高或水雾量不足时,细水雾将通过助燃促进瓦斯爆炸。李铮^[78]、唐建军^[55]运用虹吸式雾化喷嘴进行了 4.35 L 密闭爆炸管道和 20 L 近球形不锈钢罐中的细水雾抑爆实验和模拟研究,结果提到初始湍流会促进瓦斯爆炸,但随着水雾量的增加,水雾的抑爆效果也逐渐明显。Zhang^[80,81]等通过超声波雾化方式和压力雾化产生超细水雾进行甲烷/空气爆炸抑制研究,指出超声波细水雾能有效降低爆炸强度,随水雾浓度的增加抑制效果增强;而采用压力雾化方式产生的超细水雾却增强了爆炸反应强度,且随粒径的增大爆炸增强显著。

Lentati^[82]、Akira Yoshida^[83]指出水雾主要通过吸热冷却效应削弱爆炸火焰,化学抑制作用小于 10%,但不能忽视。陆守香等^[84]分析了水参与瓦斯爆炸的化学反应动力学机理,认为水主要是作为第三体或惰性液滴破坏瓦斯爆炸链反应过程中的链载体。李成兵^[85,86]等运用伴热式的密闭爆炸激波管($\phi 100\text{ mm} \times 4\text{ m}$)对 CO_2 、 N_2 、水蒸气抑制甲烷燃烧和爆炸的效果进行了实验和模拟研究。结果表明:水蒸气的加入可以削弱爆炸强度,当超过某一临界值时可以彻底阻止甲烷气体被引燃;水蒸气能够有效抑制燃烧和爆炸源于物理抑制和化学阻化的综合作用。梁运涛等^[87,88]通过化学动力学计算软件 Chemkin,分析了巷道中空气含湿量对瓦斯爆炸的抑制机理,指出水蒸气对气体爆炸的抑制作用主要归功于加入水分后爆炸链反应中 H、O 和 OH 等自由基的显著减少,并找出了影响瓦斯爆炸以及爆炸后部分致灾性气体生成的关键反应步骤。

当前,围绕提高细水雾抑爆效率,国内外学者做了很多努力,例如添加剂和荷电细水雾等。添加剂主要有水溶性的金属盐、有机物或复合物等,通过物理降温和捕捉火焰中的活性自由基,达到终止爆炸反应的目的。余明高、安安^[62,89]等分别研究了含 MgCl_2 、 FeCl_2 和 NaHCO_3 添加剂细水雾和超细水雾抑制瓦斯爆炸有效性,表明细水雾含添加剂后,火焰传播速度,水雾区火焰长度大为减少,火焰温度明显降低, FeCl_2 抑制效果最好。李定启等人^[90]开展了含添加剂降低瓦斯爆炸下限的实验研究。曹兴岩等^[91]开展了在密闭容器中含 NaCl 超细水雾抑制甲烷/空气爆炸实验研究,发现 NaCl 明显提高了超细水雾的热冷却能力和散热阻挡效果,并分析了 NaCl 参与抑制甲烷爆炸反应过程,在高温高压下,含 NaCl 水溶液在爆炸反应中产生 Cl 和 Na , Cl 作为催化剂促进 H 转化为分子,具体反应过程如下:



另外,钠离子的化学抑制作用过程如下:



最终增强了甲烷爆炸链反应的主要活性物 H、O、OH 浓度降低概率,爆炸反应速度将明显放缓。然而,添加盐类添加剂同样也会有些负面影响,比如会降低液滴与火焰相互作用过程中的蒸发速率。例如 Ingram 等人^[92]开展的含碱金属添加剂的超细水雾抑制氢气爆炸实验研究,认为抑制效果主要是均匀气相机理和添加剂参与抑制自由基化学反应;只有全部水雾蒸发足够快,蒸发的添加剂才能发挥抑爆作用。再者,如果爆炸强度很高,大部分雾滴被冲击波吹散,化学作用在抑爆过程中将不能很好发挥^[93]。

梁栋林^[94]进行了荷电细水雾抑制瓦斯爆炸研究,利用带电雾滴的强扩散性、库仑力小、易破碎等特性,容易进入火焰内部,参与爆炸链式反应,销毁、中和以及吸附链式反应中间产物,阻断瓦斯爆炸反应。然而由于荷电过程中存在高电压,在实际应用中必须做好设备绝缘,避免因电极放电引发爆炸事故。

总之,细水雾抑爆效果受到爆炸强度和水雾密度、粒径等因素的影响。如细水雾不足则会产生爆炸增强效应,而当水雾量增大到一定程度后,抑爆效果提高幅度减小,出现“平台效应”。针对如何减缓、消除这种增强效应和平台效应,现有文献仅提出应增加细水雾通入量或密度,而在实际应用中难免因细水雾分布不均匀、沉降等导致部分区域水雾密度不均匀的现象,则无法实现预期的抑爆效果。含化学添加剂的细水雾抑爆也同样会受到添加剂的浓度、种类、初始爆炸强度等影响。因此,还需研究结合其他手段,提高细水雾的抑爆效率。

1.2.3 气液两相介质协同抑爆研究现状

气液两相介质抑爆是以惰性介质作为协同抑爆材料,发挥惰性气体良好的惰化窒息和细水雾吸热降温能力,提高抑爆效果。目前,国内外学者针对瓦斯爆炸抑爆的研究主要围绕单独抑爆剂,仅有少数学者进行了气液两相介质抑制可燃气体爆炸超压和火焰传播速度的实验研究。例如,L. Dupont 等^[95]使用 20 L 球形爆炸容器测试了由 CH₄ 和 CO₂ 组成的混合气体在饱和水蒸气环境下的燃爆特性(测试压力为常压,测试温度为 30~70 ℃),发现超过 70 ℃,随温度升高而增加的饱和水蒸气含量足以完全惰化由 CH₄ 和 CO₂ 组成的混合气体。实验中的混合气体在以压力上升速率作为评判标准的对比中,燃爆烈度比纯 CH₄ 小 3 倍。杨永斌^[96]等提出了矿用氮气-细水雾防灭火新技术,设计了相应的低压大雾量雾化装置,通过实验验证了氮气-细水雾在受限空间内良好的扩散特性和快速高效的灭火能力。

英国南岸大学学者在一个高度为 0.38 m 的小型装置内开展了氮气与超细水雾抑制氢气爆炸研究。例如,J. M. Ingram、P. N. Battersby^[97,98]等人利用超声振动雾化器产生了 SMD 为 6 μm 的超细水雾,研究其对氢-氧-氮爆炸抑制作用,发现其对燃烧速度和压升速率有显著抑制作用,并提高了氢-氧的爆炸下限,提出细水雾和氧气稀释(氮气)能产生加性效应,并探讨了超细水雾密度和氮气浓度对爆炸的影响。P. G. Holborn 等^[11]结合超细水雾抑制氢-氧-氮混合气爆炸的压力-时间数据,利用 Dahoe 方法^[50]建立了一个预测燃烧速度的数学模型,发现对于富氢-氧-氮混合气,高密度的细水雾和氮气更加有效地降低了氢气火焰的燃烧速度,但不能完全抑制贫氢混合气爆燃。

余明高、朱新娜、牛攀等^[12,13,99]研究了 CO_2 -超声波细水雾、双流体喷嘴产生 N_2 、 CO_2 和细水雾抑制管道瓦斯爆炸的衰减特性,结果表明: N_2 或 CO_2 超细水雾与 N_2 或 CO_2 共同抑制管道瓦斯爆炸时存在协同效应,对爆炸超压和火焰传播速度的抑制要明显优于单独抑爆剂作用的情况。

综上所述,虽有近期相关文献表明惰性气体与超细水雾抑爆存在协同效应,但是现有文献仅开展了 2 种惰性气体与超细水雾协同抑制瓦斯爆炸火焰传播速度和超压两个宏观参数的衰减变化,缺少火焰温度、火焰形态与结构的变化特征分析,气液两相介质抑制瓦斯爆炸衰减特性的基础测试数据不够完善;同时没有对气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同作用规律进行分析,也没有从理论上解释气液两相介质协同抑爆增效的机理。

1.3 本研究提出的科学问题及科学意义

针对参与气液两相介质抑制爆炸过程中的多种因素,并结合上述研究现状,凝练提出了以下三个科学问题:

科学问题 1:气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸衰减特性

由于温度变化是燃烧过程的重要热力参数,火焰结构的变化又会影响火焰加速形成,因此,需要进一步完善气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸动态参数基础数据和变化过程的研究,可为阐述其抑制管道瓦斯爆炸衰减特性,获得气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同规律以及揭示抑爆协同机理提供重要支撑。

科学问题 2:气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同规律和关键控制参数

前期研究表明,雾滴粒径、水雾通入量(水雾质量浓度)、惰性气体种类、稀释体积分数等这些因素对单一抑爆剂抑爆效果有重要影响,然而目前还缺少相关因素影响气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸协同规律的相关研究,以及相应的抑爆关键控制参数,为气液两相介质抑爆技术在抑爆工程中的推广提供技术支持。

科学问题 3:气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸的协同机理

目前缺乏结合稀释效应和吸热效应对瓦斯燃烧反应速率影响的理论分析,以及惰性气体与细水雾之间的相间耦合作用机制还不够清楚。因此,有必要结合流体力学、热力学、传热传质学等基本理论,为气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸协同增效的机理提供理论解释。

以上三个问题是气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸协同规律及机理研究的关键问题。本研究拟采用理论分析、数值模拟和实验相结合的研究方法,研究气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸衰减特性及协同作用规律,分析惰性气体与细水雾之间的相间耦合作用机制,揭示气液两相介质抑爆协同增效的机理,对完善和发展惰化细水雾抑爆技术具有重要的理论价值和实际应用前景。

1.4 研究内容与技术路线

1.4.1 研究内容

(1) 气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸衰减特性研究

比较与分析单一抑爆剂与气液两相介质作用下压力动态参数和火焰传播动态参数(火

焰传播速度、火焰位置、火焰温度、火焰形状与结构)的变化规律,分析气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸衰减特性。

(2) 气液两相介质抑制瓦斯爆炸的协同规律和关键控制参数研究

研究惰性气体种类、不同稀释体积分数和细水雾通入量(细水雾质量浓度)对管道瓦斯爆炸抑爆效果的协同影响规律,分析气液两相介质抑制管道瓦斯爆炸的关键控制参数。

(3) 气液两相介质抑爆协同增效的机理研究

结合 CFD 数值模拟和实验测试结果相互验证,分析惰性气体与细水雾抑制瓦斯爆炸的相间耦合作用机制。进行气液两相介质作用下瓦斯爆炸火焰锋面传质、传热分析,分析惰性气体与雾滴的稀释效应、吸热效应等因素对瓦斯燃烧反应速率的影响,揭示气液两相介质抑爆协同增效的机理。

1.4.2 技术路线

本书基于惰性气体-超细水雾惰化抑制管道瓦斯爆炸实验系统,采用实验测试、理论分析与数值模拟及相互验证相结合的方法,系统地展开气液两相介质抑制瓦斯爆炸协同规律及机理研究,总体研究技术路线见图 1-2。

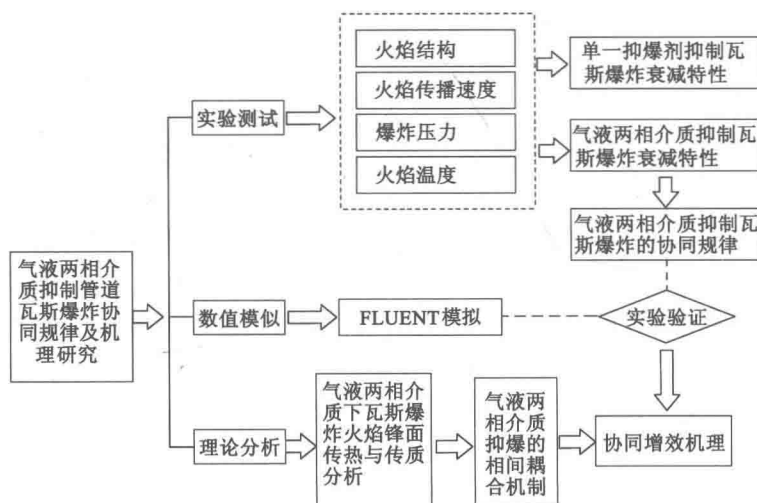


图 1-2 总体研究技术路线

2 管道瓦斯抑爆实验系统

2.1 实验系统构成

由于气液两相流涉及因素较多,气流速度、液滴粒径、细水雾沉降及气液两相参混程度等都会影响抑爆效果。为了尽量排除上述干扰因素的影响,笔者在相关研究的基础上研制了一套“惰性气体-超细水雾抑制瓦斯爆炸测试装置”。本研究所用实验装置如图 2-1 所示,实验系统主要由配气系统、超细水雾发生与输送系统、温度测试系统、压力测试系统、高压点火系统、高速摄像系统、数据采集仪及同步控制系统组成。通过该实验系统,可对管道瓦斯爆炸过程中的爆炸超压、火焰传播形态与速度以及火焰温度等动态特性参数进行测试。

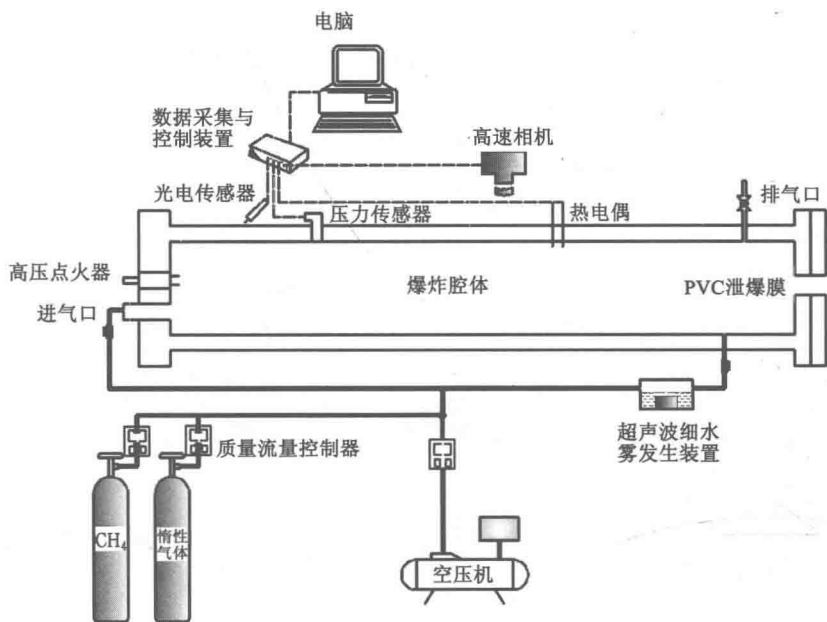


图 2-1 实验装置图

2.1.1 爆炸腔体

为了方便地对爆炸火焰传播过程进行捕捉,实验中采用了有机玻璃方管制作爆炸腔体,具体尺寸为 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 840\text{ mm}$,有效容积为 12.096 L ,即长径比为 7 的管道。腔体壁面厚度 20 mm ,耐压强度可达 2 MPa 。管道两端用一钢板封闭,通过法兰、加密封橡胶垫连接螺钉固定,保证实验管道的密封性。为了确保实验的安全性,在右侧钢板正中设置了一个直径为 40 mm 的圆形泄爆孔,由 2 mm 厚的 PVC 薄膜密封,爆炸时破裂达到泄压的作

用。管道上壁预留了压力传感器、热电偶和排气孔,如图 2-1 所示。

2.1.2 点火系统

本实验采用的是电容储能式电火花点火器。该点火器是由西安顺泰热工机电设备有限公司生产的 HEI19 型高频脉冲点火器,由点火控制器和高热能点火器组成,如图 2-2 所示,输出电压为 6 kV,点火能量为 2.5 J。点火电极设置在左端封闭钢板的中部,点火电极端部间距 5 mm。

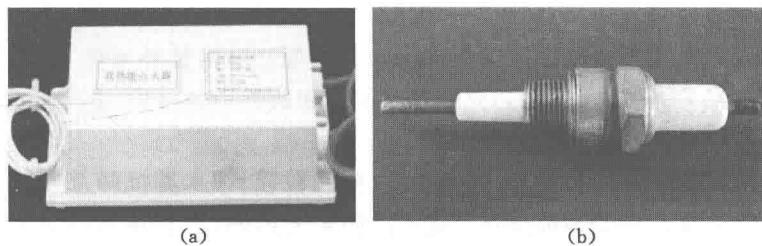


图 2-2 点火系统

2.1.3 配气及输气系统

配气系统主要由高压甲烷气瓶(纯度为 99.9%)、高压 CO_2 、 N_2 、Ar、He 气瓶(纯度为 99.9%)、空气压缩机和质量流量控制器组成(精度为 $\pm 0.5\%$)(图 2-3)。实验中采用的是直接配气,在管道右端靠近出口位置开一个排气阀,从管道左端通入 4 倍管道容器体积的预配气体^[100]。具体配气的方法是:首先,配置当量比为 9.5% 的甲烷/空气预混气,甲烷与空气气体流量分别控制在 0.77 L/min 与 7.3 L/min,充气过程控制在 6 min 左右,以保证排尽腔体内的空气。预配气结束后,关闭通气阀。然后,通入所需惰性气体,根据其在总体积内的比例计算得到惰性气体的通入量,其流量根据通入时间计算即可。没有将惰性气体与甲烷、空气预混的原因是考虑气液两相抑爆技术的实际应用,通过惰性气体将超细水雾带入腔体,这样也能得到今后适合抑爆工程应用的气液两相抑爆剂的控制参数。

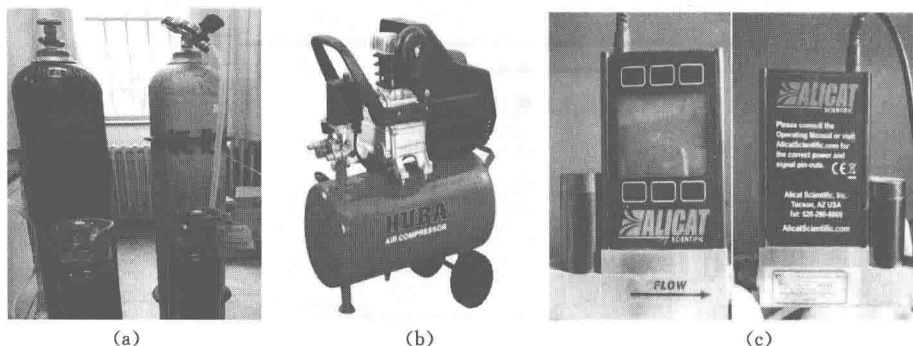


图 2-3 配气及输气系统

(a) 高压气瓶;(b) 空气压缩机;(c) 质量流量控制器

2.1.4 超细水雾发生、测量与输送系统

超细水雾发生与输送系统,主要由超声波雾化装置、方形储水盒、出入管道等组成,如图 2-1 所示。其中超声雾化装置采用的是三头全铜雾化器,雾化片工作频率 1 700 kHz,平均

雾化速率经精密电子天平测量约为 4.2 mL/min。雾化器的工作原理是通过超声波雾化片的高频谐振,将液态水分子结构打散而产生水雾颗粒。

本书实验中水雾粒径测量采用的是 Dantec Dynamics A/S 公司生产的相位多普勒激光测速仪(Phase Doppler Anemometer,简称 PDA)。该仪器的粒径测量范围:0.3~7 000 μm ,粒径测量精度可达 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。该系统测量的基本光学原理是 Lorenz-Mie 散射理论,利用双散射光相干测量方法,在测量空间相干光汇聚处会产生一组干涉条纹,如图 2-4 所示。依靠运动微粒的散射光与照射光之间的频差来获得速度信息,而通过分析穿越激光测量体的球形粒子反射或折射的散射光产生的相位移动,则可以确定粒径的大小、速度场分布等。

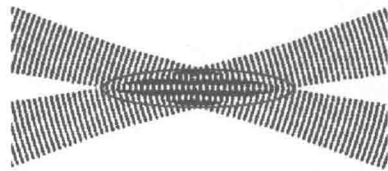


图 2-4 相干光交汇点的干涉条纹测量区域

该系统的主要组成部分有激光器、入射光学单元、接收光学单元、信号处理器、数据处理系统和三维坐标架位移系统。系统示意图如图 2-5 所示,图 2-6 为系统实物图。

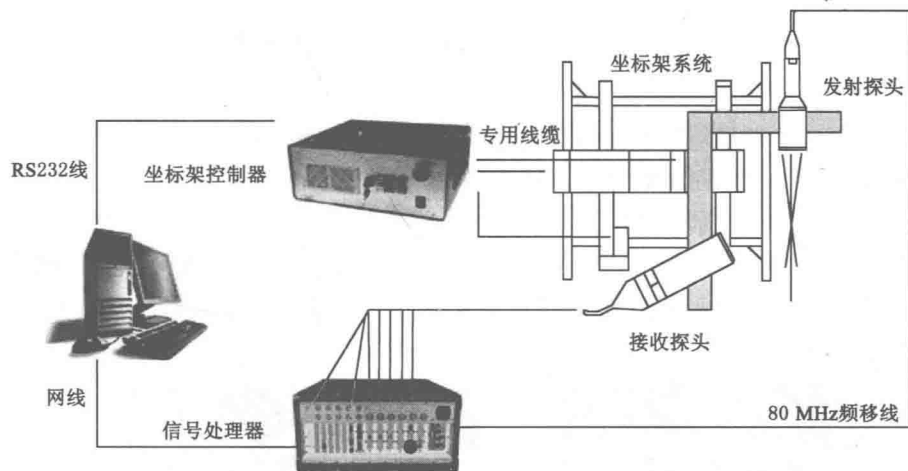


图 2-5 相位多普勒激光测速仪系统构成

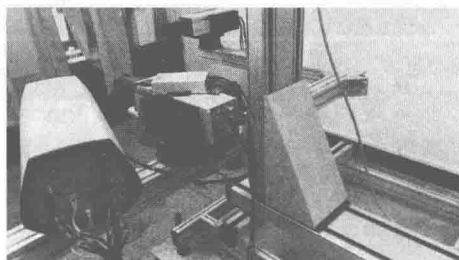


图 2-6 相位多普勒激光测速仪系统实物图