



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)

安全科学与工程



移动扫码阅读

程方明,南 凡,罗振敏,等.瓦斯抑爆材料及机理研究进展与发展趋势[J].煤炭科学技术,2021,49(8):114-124. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.08.015

CHENG Fangming, NAN Fan, LUO Zhenmin, *et al.* Research progress and development trend of gas explosion suppression materials and mechanism [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (8): 114 - 124. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.08.015

瓦斯抑爆材料及机理研究进展与发展趋势

程方明,南 凡,罗振敏,康晓锋

(西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:为了有效控制和降低瓦斯爆炸事故带来的破坏效应,不断完善抑爆理论体系,在调研国内外抑制瓦斯爆炸相关文献的基础上,按抑爆材料种类的不同,分别从气体、水雾、粉体以及多相复合抑爆 4 个方面总结和分析了近年来瓦斯抑爆材料和抑爆机理的研究进展,并提出未来的创新发展趋势。大部分研究通过试验研究对比分析各类材料抑爆效果的差异性,结合最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、爆炸极限、爆炸威力指数、火焰传播、火焰温度等特征参数的变化规律,基于理论分析和数值模拟解释其爆炸抑制机理,主要基于物理惰化可燃气体及氧气浓度、冷却或吸收爆炸区域热量、隔绝热传递、消除甲烷爆炸支链反应产生的 H、O、OH 等关键自由基等进行瓦斯抑爆机理分析,发现能有效探明抑爆材料影响瓦斯爆炸反应微观作用机理的试验检测手段明显不足。多相态材料复合抑爆是近年来研究的热点,发现了多种抑爆材料联合使用时会出现协同增效现象,其抑爆效果明显比单一材料使用时抑爆效果好,但其协同抑爆机理尚未揭示清楚,有待深入研究。多种材料的组合抑爆规律、多种材料协同抑爆机理的精准揭示、使用先进的试验设备检测反应微观过程、高效环保的新材料抑爆剂研发等将是未来瓦斯抑爆研究的重点。

关键词:瓦斯爆炸;抑爆材料;抑爆机理;多相复合;自由基

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)08-0114-11

Research progress and development trend of gas explosion suppression materials and mechanism

CHENG Fangming, NAN Fan, LUO Zhenmin, KANG Xiaofeng

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to effectively control and reduce the destructiveness caused by gas explosion accidents, continuously improve the explosion suppression theoretical system, based on the investigation of domestic and foreign related literatures on gas explosion suppression, and different types of explosion suppressing materials and explosion suppression mechanism, they can be divided into gas, water mist and powder. It summarized and analyzed the research progress of gas explosion suppression materials and explosion suppression mechanism in the four aspects of gas, water mist, powder and multi-phase composite explosion suppression, and proposed future innovation development trends. Most studies have compared and analyzed the differences of the explosion suppression effects of various materials through experimental research, combined with the changing rules of maximum explosion pressure, maximum explosion pressure rise rate, explosive limit, explosive power index, flame propagation, flame temperature and other characteristic parameters, and explained the explosion suppression mechanism based on theoretical analysis and numerical simulation. The mechanism of gas explosion suppression was analyzed mainly based on physical inerting combustible gas and oxygen concentration, cooling or absorbing heat in the explosion area, isolating heat transfer, eliminating key free radicals such as H, O, OH and other key free radicals produced by the explosive branch chain reaction of methane. It is

收稿日期:2020-10-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304155)

作者简介:程方明(1982—),男,辽宁本溪人,副教授。E-mail:15792688@qq.com

found that the experimental detection methods that can effectively detect the microscopic mechanism of gas explosion reaction affected by explosion suppression materials are obviously insufficient. The composite explosion suppression of multi-phase materials has been a research hotspot in recent years. It has been found that when multiple explosion suppression materials are used in combination, there will be a synergistic effect. The explosion suppression effect is obviously better than that when a single material is used, but the mechanism of synergistic explosion suppression has not yet been revealed and should be further researched. The combination of explosion suppression laws of multiple materials, the precise disclosure of the collaborative explosion suppression mechanism, the use of advanced test equipment to detect the microscopic reaction process of the experiment, and the development of efficient and environmental-friendly new material explosion suppression agents will be the focus of future gas explosion suppression research.

Key words: gas explosion; explosion suppression material; explosion suppression mechanism; multi-phase composite; free radical

0 引言

据统计,2000—2017年特别重大瓦斯爆炸事故共发生49起,死亡2 884人,受伤849人,直接经济损失80 373.52万元^[1],可见瓦斯爆炸事故对煤矿安全开采和持续发展造成了严重阻碍。由于我国富煤、贫油、少气的能源结构特点,以煤为主的能源结构在今后20年不可能有太大变化,因此瓦斯爆炸灾害事故防治工作一直被煤矿安全研究者所关注。目前,抑爆、隔爆、泄爆等是常用的瓦斯爆炸防控技术,而抑制爆炸相对于泄爆、隔爆措施是一种相对积极有效的防爆方法,它可通过主动或被动的方式减少爆炸损失和二次爆炸事故的发生^[2]。

1910年,美国矿务局最先开始了矿井瓦斯爆炸事故的试验研究,1952年,COWARD等^[3]确定了甲烷在 N_2 、 CO_2 、 H_2O 、Ar等惰性气体中的可燃极限,1955年和1957年,文献^[4-5]提出细水雾主要通过冷却降温和水蒸气稀释可燃气体浓度2种机理,1959年,LAFFITTE等^[6]考察了粒子对爆轰的抑制作用,学者们的研究为进一步研究瓦斯抑爆奠定了基础。随后,国内外学者对瓦斯抑爆工作开展了大量研究,其中文献^[7-8]对瓦斯抑爆材料及抑爆装备进行了研究和分析,但对抑爆机理的分析不够深入,尤其是在近几年研究比较热门的多相复合抑爆方面总结分析较少,笔者在总结前人研究的基础上分别从气体、水雾、粉体以及多相复合抑爆等4个方面出发,对瓦斯抑爆材料和抑爆机理研究现状进行了详细分析,总结不足之处,探索未来创新发展方向,为研究瓦斯爆炸事故防控技术、开发新型高效环保抑爆材料提供引导。

1 气体抑爆

目前,国内外学者研究及应用的气体抑爆材料主要涉及 N_2 、Ar、He等常见惰性气体以及 CO_2 、水蒸气和卤代烃化合物等活性气体,其具有成本低廉、清洁、高效、环保、安全等特性,抑制瓦斯爆炸极限、

瓦斯爆炸剧烈程度以及降低甲烷-空气混合气体燃烧性有显著作用。

1.1 气体抑爆研究现状

国外的文献^[9]研究了He、 CO_2 、 CF_4 、 CHF_3 、 C_3HF_7 、 CF_3Br 、 CF_3I 、NaOH等抑制剂在 CH_4 燃烧反应中的抑制作用原理;文献^[10]通过试验研究了在分别添加 CF_3Br 、 $C_2F_4Br_2$ 和 CF_3I 时, CO_2 、 N_2 对甲烷-空气混合物爆炸的抑制情况,研究发现, CO_2 和 N_2 的最低惰化浓度随着卤代烃添加出现先降低后上升趋势。文献^[11-13]分别研究了 C_2HF_5 、 CHF_3 、 C_4F_{10} 和AKM抑制剂对 $H_2-O_2-N_2$ 混合物和 $CH_4-O_2-N_2$ 混合物燃烧极限、最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、层流火焰燃烧速度等特征参数的影响。文献^[14]采用高速相机拍摄了 CO_2 、 CCl_4 、Ar等气体抑制甲烷与空气混合物点火后球形火焰传播的图像,分析了抑爆剂对燃烧感应期和火焰传播速度的影响。文献^[15-17]通过试验研究了添加氟化物(CF_3Br 、 $C_6F_{12}O$ 、 $C_3H_2F_3Br$ 、 C_2HF_5 、 $C_6F_{12}O$ 、 $C_3H_2F_3Br$ 、 C_2HF_5 、 CF_3I 、 CF_3Br 、 C_3HF_7 和 C_2HF_5)对甲烷-空气混合物的抑制作用,发现不同的氟化物对甲烷-空气混合物的点火延迟时间影响效果不同,但燃烧速度均有所下降。文献^[18]研究了在甲烷-空气混合气体中由几种惰性气体(He、Ar、 N_2 或 CO_2)稀释后层流爆燃传播特性指标,结果表明:在所研究的惰性添加剂中,二氧化碳的抑制效果是最有效的,其次是氮气、氩气和氦气。文献^[19]研究了二氧化碳/真空室对爆炸强度和抑爆效果的影响。结果表明:在真空室的作用下,真空度越高,抑制效果越显著;在真空室/ CO_2 的作用下,抑制效果优于高真空度下无 CO_2 的真空室。

国内的文献^[20-29]研究了充注 CO_2 、 N_2 对可燃气体浓度和氧气浓度的影响以及对瓦斯爆炸极限的影响,结果表明: CO_2 、 N_2 能降低瓦斯和氧气浓度,能缩小瓦斯爆炸极限的范围,抑爆效果明显,且 CO_2 的抑爆效果优于 N_2 。罗振敏等^[30]从微观角度研究了氦气对甲烷燃烧的抑制作用,结果表明:氦的加入

降低了气体爆炸上限和下限,缩小了爆炸极限的范围。罗振敏等^[31-32]研究了水蒸气分别对瓦斯爆炸和甲烷燃烧爆炸的影响,研究结果表明水蒸气降低了燃烧温度和H、O和OH等关键自由基的浓度,抑爆效果明显,当水蒸气量达到某临界值时,甲烷混合气体将不能被点燃;文献^[33-35]利用化学动力学计算软件CHEMKIN对瓦斯爆炸过程中反应物的多种参数的变化趋势进行了详细分析,结果表明:H₂O、N₂、CO₂对瓦斯爆炸及爆炸后CO、NO、NO₂等有害气体的生成起抑制作用;文献^[36-39]研究了卤代氢(氟化酮、三氟甲烷、四氟乙烷、七氟丙烷等)对瓦斯爆炸的抑制效果,分析了其抑爆机理。结果表明:卤代氢不仅具有稀释、隔氧等优点,还能在受热后分解,吸收热量,达到降温、化学抑制的效果。

1.2 气体抑爆机理分析

1.2.1 惰性气体抑爆机理

根据论述发现,氮气、氩气、氦气等^[18]不参与可燃物的爆炸支链反应,主要是通过稀释可燃气体和氧气浓度,最终令可燃气体窒息;同时,这部分惰性气体还有冷却降温作用。

1.2.2 活性气体抑爆机理

水蒸气^[32]、二氧化碳等除过具有氩气、氮气所具有的物理抑爆机理外,还参与了瓦斯爆炸的支链反应。水蒸气和水雾的机理相同,这里不重复介绍。二氧化碳是甲烷氧化之后的主要产物之一,将导致甲烷燃烧支链反应更易向逆方向进行,消耗了H、O、OH等关键自由基,间接延长了反应进程,从而阻碍甲烷爆炸链反应的发展^[26-28]。

卤代氢抑爆剂常温下可液态储存,在注入爆炸区域时,能够吸收部分反应热量,起到物理降温作用;而且由于卤代氢分子量普遍较大,在受热后会分解,能吸收部分爆炸反应能量,起到化学冷却作用;另外,其分解产生的含氟自由基能与爆炸产生的H、O、OH等关键自由基发生反应,中断爆炸过程中支链反应,起到抑制瓦斯爆炸的作用^[36-39]。

2 水雾抑爆

由于水雾成本低、来源广泛、使用方便、比热容高等特点,近年来在消防灭火方面得到了广泛的应用,同时水雾是一种很好的抑爆材料。水雾抑爆主要可以概括为2种方式,一种是纯水雾抑爆,另一种是通过向水雾中添加添加剂或与荷电结合达到不同介质协同抑爆的目的。

2.1 水雾抑爆研究现状

清水雾抑爆效果良好,一直以来是国内外学者

重点研究的抑爆材料之一,例如早期国外的文献^[40-41]提出细水雾通过冷却吸热和水蒸气稀释2种机理熄灭火焰,文献^[42-44]研究认为水雾对爆炸的抑制作用源于燃烧区内对能量传递的隔离,抑爆效果与生成雾滴的尺寸,使雾滴分解所需的最小火焰速度,水槽的数量、尺寸、形状和到点火源的距离都有关。国内的陆守香等^[45]通过分析计算,说明水能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来抑制爆炸;刘暄亚等^[46-47]研究了不同条件下的细水雾对瓦斯爆炸火焰传播的抑制作用,结果表明水雾可通过降低温度和气体燃烧速度以及阻碍能量传递来达到抑制效果。目前,张鹏鹏等^[48-49]应用不同尺寸的密闭管道对超细水雾抑制瓦斯爆炸进行了试验研究,结果表明超细水雾对瓦斯爆炸有明显抑制作用;刘长春等^[50]应用CHK-MKIN17.0软件进行了定量分析。研究表明稀释和潜热冷是抑制CH₄层流火焰传播速度的主要因素。文献^[51]研究了不同条件下细水雾抑制甲烷燃烧的效果,结果表明细水雾对甲烷火焰有很好的抑制作用,用水雾吸热冷却法可以熄灭甲烷燃烧火焰。文献^[52]对瓦斯抑爆进行了定量研究,结果表明:细水雾的抑制作用主要体现在对爆炸火焰温度的抑制上。文献^[53]研究了细水雾对火焰形状、温度场、速度场、辐射强度和灭火效果的影响,然后进行了三维数值模拟。结果表明:增大水雾压力,火焰高度减小,倾角增大。

由于水是很好的溶剂,很多学者发现在水雾中添加添加剂,能有效提高水雾的抑爆效率。文献^[54]通过试验研究了水雾添加KOH、NaCl、NaOH抑制瓦斯/空气混合气体燃烧的效果,得出抑制能力的顺序为:KOH>NaCl>NaOH;林滢等^[55-58]研究了在超声波细水雾中添加添加剂的抑爆效果。结果表明,在超声波雾化基础上加入碱金属添加剂,能够明显提高超细水雾对甲烷-空气爆炸的抑制效果,且随添加剂浓度的提高,抑爆效果不断增强;李定启等^[59-60]利用半密闭爆炸管道进行了水雾抑爆试验,发现超细水雾可提高瓦斯爆炸下限,加入添加剂后能进一步提高瓦斯爆炸浓度的下限;刘江虹等^[61]利用Cup Burner装置开展含添加剂细水雾抑制小尺度甲烷火焰的试验研究,得出几种含添加剂细水雾抑制能力从小到大依次为: MgCl₂ < CaCl₂ < NaCl < KCl < MnCl₂ < FeCl₂, 并且随着浓度的增高抑制能力逐渐增加。表明含金属氯化物的细水雾抑制机理包括吸热冷却、化学抑制与阻碍热传递3种作用,并且3种作用同时存在,并互相竞争,最终达到平衡。文

献[62]以超声雾化为基础,通过对纯水细水雾最小灭火浓度的比较,发现添加剂的存在可以提高水雾的灭火效率,当添加剂的质量分数为2%时,化学灭火效果较好。张增志等^[63]研发了一种以水为载体,Span80为吸收剂的抑爆材料,该材料不仅能吸收甲烷,还能起到一定的抑制甲烷爆炸作用。文献[64]对6种钾盐的最小灭火浓度进行了测试,结果表明, K_2CO_3 对提高纯水灭火效率的作用最大,其他钾盐添加剂依次为: $K_2CO_3 > CH_3COOK > KNO_3 > KCl > KH_2PO_4$,其原因是不同的钾盐添加剂在火焰温度下分解出不同的活性物质。杨克等^[65]采用含草酸钾的超细水雾抑制甲烷爆炸,结果表明添加草酸钾的超细水雾对爆炸威力指数以及爆炸压力等参数有明显的抑制效果。

余明高等^[66-67]利用水的良好导电性,在细水雾中加入荷电的情况下进行了瓦斯抑爆试验研究,结果表明,荷电细水雾对爆炸压力峰值以及火焰传播速度有更好的抑制效果,且荷电电压越大抑制效果越好。

2.2 水雾抑爆机理分析

水雾不仅具有冷却吸热、物理惰化、阻隔辐射热等抑爆机理,还能作为第三体可阻碍瓦斯爆炸的支链反应,添加剂等的加入能够提高超细水雾的抑爆效果,不同碱金属添加剂的抑制效果不同,且随着添加剂离子活性和浓度的提高抑爆效果不断增强。以下分别从物理抑爆和化学抑爆2种方式对纯水雾和加入添加剂的水雾进行分析。

2.2.1 纯水雾抑爆机理

1)物理抑爆:纯水雾的物理抑爆机理主要有冷却吸热、物理惰化、隔绝热量。

2)化学抑爆:纯水雾的化学抑爆主要通过水分子来消除关键自由基实现。在瓦斯爆炸的高温作用下甲烷反应出现的主要活性基元有H、O和OH,水分子会与这些活性基元作用,例如 $H+H_2O \rightarrow H_2+OH$, $O+H_2O \rightarrow OH+OH$, $HO_2+H_2O \rightarrow H_2O_2+OH$,这些反应降低了甲烷燃烧支链中的H、O等关键自由基的浓度。另外,大量的水分子是一种很好的第三体,并且基元的碰撞频率比二体基元的碰撞频率高,由此可以将能量大幅转移到不参加反应的水分子上,降低支链反应活性。

2.2.2 加入添加剂的水雾抑爆机理

1)物理抑爆:加入添加剂后,水雾的饱和蒸汽压被降低,冷却能力得到了提高。水雾化汽化后会析出添加剂的晶体,例如氯化钠晶体,吸收大量热量,从而降低爆炸温度。根据阿伦尼乌斯公式可

知,当温度降低时,反应速率呈指数减小,反应速率减小进而影响火焰释放速率减小,从而抑制瓦斯爆炸。

2)化学抑爆:加入添加剂后水雾的化学抑爆机理主要通过高温下产生的阴阳离子来消除关键自由基实现。高温条件下,不同添加剂会析出晶体,析出的晶体会产生钠、钾、钙、镁等阳离子和氯、碳酸根、碳酸氢根阴离子。研究表明析出的钙、镁阳离子不具备抑制化学反应链的作用^[68];析出的钠、钾能与氢离子和氢氧根离子结合生产水及相应氧化物。析出的铁、锰离子具有多个价态,与自由基结合数目大幅增加,抑爆效果更好^[69];析出的氯离子不仅作为催化剂促使氢原子转化成氢分子,而且使氢离子和氢氧根离子反应生成水分子。这些反应使甲烷燃烧支链中的H、O等关键自由基的浓度降低,使爆炸过程中主要基元反应中断。

2.2.3 荷电细水雾的抑爆机理

1)物理抑爆:荷电能增强细水雾的弥散性,增加细水雾雾滴之间的库仑力,减小雾滴的粒径,增强细水雾的蒸发吸热能力。

2)化学抑爆:自由基本身是带有电荷的,在爆炸区域产生的自由基所带的正负电荷总量基本平衡,带荷电细水雾充入爆炸区域后打破了自由基正、负电荷的平衡,扰乱自由基的链式反应达到抑制瓦斯爆炸的效果。

3 粉体抑爆

3.1 粉体抑爆研究现状

在粉体抑爆方面,国内外学者也开展了大量研究。国外的文献[70]研究了粒子抑制爆轰形成的作用,结果表明粒径越小,抑制爆轰的效果越好,当量配比下需要的粒子量最大。文献[71]研究了惰性粒子对可燃粉尘爆轰的影响,发现当粒子粒径与浓度达到一定程度时可导致爆轰熄灭。国内学者范宝春等^[72-76]对 $CaCO_3$ 、 SiO_2 、ABC干粉、矾土等粉体抑制 CH_4-O_2 的效果进行了试验研究,发现增加抑爆材料的浓度、减小粒径能增加抑爆效果。郑立刚等^[77-79]对 $NaHCO_3$ 抑制瓦斯爆炸火焰传播以及爆炸压力进行研究,并分析了抑制机理。张宇明等^[80-84]研究了超细ABC干粉对瓦斯爆炸的抑制作用,结果表明随着干粉粒径的减小或含量的升高,干粉对超压和火焰的抑制效果越好,且其分解产物对爆炸有一定的弱化作用。罗振敏等^[85-87]研究了不同超细无机粉体材料的抑爆效能,得出不同材料的抑爆效能依次为 $NH_4H_2PO_4 > Al(OH)_3 > Mg(OH)_2$,当

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体的抑爆添加量达到一定质量分数时,可以使体积分数为 7% 的瓦斯失去爆炸性。余明高等利用自行研制的爆炸试验系统,分别进行了二茂铁^[88]和赤泥^[89]粉体对甲烷-空气预混气的抑爆试验,试验发现改性赤泥在高温下分解并吸收热量,达到降温效果,另外,其特殊的多孔隙结构使其具有较高的比表面积,能够有效吸附爆炸中产生的关键自由基;二茂铁能较好地抑制爆炸压力和火焰传播速度。文献[90]研究了二茂铁和氢氧化铝粉末灭火剂对管道内体积分数为 9.5% 的甲烷混合气体爆炸的抑制作用,结果表明与氢氧化铝相比,二茂铁具有较好的抑爆性能。文献[91]在 20 L 球形爆炸容器和 5 L 有机玻璃管道中,测试了 NaHCO_3/RM (赤泥) 复合材料对 9.5% CH_4 爆炸的抑制性能。结果表明, NaHCO_3/RM (赤泥) 复合粉体的抑制性能明显优于纯赤泥或 NaHCO_3 粉体。文献[92]将常规抑制剂(聚磷酸铵和氢氧化铝)与多孔高岭土混合,制备了一种新型多组分粉末抑制剂。结果表明:该粉末抑制剂具有良好的抑爆效果,且多组分抑制剂的抑制性能优于单组分抑制剂;罗振敏等^[93-94]研究了 SiO_2 纳米粉体和硅藻土粉体的抑爆效果,结果表明 SiO_2 粉体和硅藻土粉体能显著降低甲烷最大爆炸压力、压力上升平均速率、爆炸浓度极限范围,并且 SiO_2 纳米粉体抑爆效果好于 SiO_2 微米粉体。陈先锋等^[95]利用 20 L 近球形爆炸装置测试干水材料对瓦斯爆燃的抑制效果。试验结果表明:当添加的干水材料较少时,干水材料对瓦斯爆燃产生促进效果;当添加的干水材料不断增加时,对瓦斯最大爆燃压力上升速率有显著抑制效果。

大量研究证明不同粉体抑爆剂的抑爆效果各不相同,通过分析发现其根本原因是抑爆机理不同。分析不同材料的抑爆机理,以及对抑爆效果的影响如下。

3.2 粉体抑爆机理分析

一方面抑爆粉体的加入使爆炸气氛中氧浓度相对降低,一定程度上在可燃物与氧气之间产生隔离作用,当活化分子与粉体介质碰撞时,会使活化分子失去活化能而不能反应,且粉体粒径越小,比表面积越大,吸附自由基效果越好,例如具有天然纳米级微孔结构的 SiO_2 ^[93],且孔隙率较高,增加了比表面积,表面吸附性能增强,提高了抑爆效果;另一方面,在爆炸区域加入超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 KHCO_3 、 NaHCO_3 、ABC 干粉等粉体后,这类粉体受热会分解, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 吸热分解后产生水蒸气和氧化物起到稀释甲烷浓度的作用,使得爆炸波压力

下降, KHCO_3 、 NaHCO_3 粉体在高温作用下分解出相应的碳酸盐并释放出惰性气体 CO_2 和水蒸气,能有效阻碍甲烷燃烧链式反应,起到抑爆效果。ABC 干粉主要成分是 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$,分解会吸收瓦斯爆炸反应过程中产生的热量;另外,体系中的 N 和 P 自由基可以与甲烷爆炸支链反应过程中产生的 H、OH、O 自由基反应,使消耗了关键自由基,起到抑制爆炸作用。

4 多相复合抑爆

通过上述论述,发现不同抑爆材料,抑爆特点不同。为了提高抑爆效果,同时加入不同相态的抑爆剂,综合利用各种抑爆材料的有利性质,达到协同抑爆效果。下面就 3 种相态抑爆剂复配组合开展抑爆的研究情况进行总结,具体可分为气-液、气-固、气-液-固 3 种类型。

4.1 气-液复合抑爆研究现状

文献[95-100]采用双流体喷嘴抑制甲烷/空气爆炸,试验结果表明:当使用 N_2 、 CO_2 等惰性气体作为驱动力时,惰性气体双流体细水雾的抑爆效果显著,通过延长喷洒时间,峰值爆炸超压、压力上升速率和峰值速度以及温度均下降明显,均表现出明显的协同增效抑制作用。

由于将固体添加剂加入水溶液中与惰气混合使用时是以气、液混合的形式喷出的,在抑制过程中,并不以固体形式参与,所以将带有添加剂的气、液复合抑爆剂归为气-液复合抑爆。郭成成等^[101]设计正交试验,研究了惰气、添加剂和细水雾在抑制瓦斯爆炸具有的协同抑制作用,对试验结果进行正交分析,同时利用方差分析表分析 CO_2 、 KCl 和细水雾三者对瓦斯抑爆的主次顺序以及最优配比;杨勇等^[102]研究了含添加剂的 N_2 -双流体细水雾对甲烷爆炸的影响,结果表明:含添加剂的 N_2 -双流体细水雾比 N_2 -双流体细水雾抑爆效果好。戴彪等^[103]将介质 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 溶于水,利用高压气体喷射形成气溶胶,通过不同组试验的对比,发现压力、浓度及出口直径,均是影响灭火的主要因素。

4.2 气-固复合抑爆研究现状

MCHALE^[104]利用卤代烷气体驱动粉体从灭火器中喷射出来,能同时发挥 2 种灭火剂的功效,灭火效能显著提高;文献[105-107]研究发现七氟丙烷与碳酸氢钠干粉同时使用时,具有明显的协同灭火效应,抑爆效果较单一抑爆剂使用时都有显著提高。文献[108-110]进行了惰性气体分别与不同粉体抑爆剂混合使用抑制瓦斯爆炸的试验。试验结果表

明,混合使用比单独使用时抑爆效果好,表明气固两相抑制剂可以获得协同效应,但比理论上叠加各自的抑爆效果弱。

4.3 气-液-固复合抑爆研究现状

气溶胶俗称烟或雾,其主要成分包括 CO_2 、 N_2 、水等惰性气体以及金属氧化物、碳酸盐和磷酸盐,是主要的气-液-固复合抑爆剂。屈丽娜等^[11]采用 20 L 近球形试验系统,研究了 K 型和 S 型 2 种热气溶胶的抑爆性能和相关参数,探讨了气溶胶的抑爆机理,结果表明:随着气溶胶浓度的增加,甲烷最大爆炸压力上升速率、最大爆炸压力逐渐减小,直至不再爆炸,且甲烷爆炸极限范围逐渐减小,甚至闭合。

4.4 多相复合抑爆机理分析

根据上述研究发现,对于气-液复配抑爆,一方面水雾会使火焰出现不同的湍流现象,稀释气体的加入能有效提高火焰的稳定性,增强了抑爆效果;另一方面惰性气体能减小瓦斯爆炸的火焰传播速度和反应速率,当火焰锋面以较低的速度遇到细水雾液滴群时,雾滴在火焰区停留时间增长,提高了细水雾对火焰阵面和已燃区的冷却作用。气-液两相抑爆介质相互促进,形成了正向的协同效应。

气-固复配和气-液-固复配抑爆的相关研究表明,其抑爆效果虽然较单一抑爆剂有明显提高,但比理论叠加抑爆效果要弱,说明不同相态抑爆剂可能在爆炸过程的不同阶段发挥了抑制作用,在一定程度上增加了抑爆效果,但很难同时形成正向协同效应,且部分气、固抑爆介质会同时参与燃烧反应,中间产物种类繁多,反应机理十分复杂,协同作用机制尚未完全揭示清楚。

5 讨论与展望

1) 不同抑爆材料的抑爆机理主要有物理惰化、冷却吸热、消除关键自由基等。常规惰性气体 (CO_2 、 N_2 等) 以及清水雾抑爆剂主要根据自身特点通过冷却吸热以及物理惰化机理来抑制瓦斯爆炸。卤代氢气体、粉体化合物以及金属化合物添加剂主要通过分解吸热以及分解后产生的阴阳离子来消除瓦斯爆炸过程产生的关键自由基来实现抑制作用。

2) 不同抑爆材料主要通过研究瓦斯爆炸过程中爆炸压力、压力上升速率、爆炸火焰温度、传播速度、点火延迟时间、爆炸极限范围以及氧浓度等参数的宏观变化情况来研究其抑爆效果。随着抑爆研究的进一步深入,目前可利用瞬态发射光谱测量等方法实现反应过程中间产物的检测,来实现对微观机理的研究和分析。

3) 抑制瓦斯爆炸的机理按性质不同可分为物理和化学抑制机理,大多数抑爆剂或抑爆材料都包含上述 2 种机制,但不同抑爆剂或抑爆材料特点不同,且存在上限,如果要进一步提升其抑爆效果,需要将不同抑爆剂或抑爆材料的特点有效结合起来,使其优势互补,形成正耦合,达到更好的抑爆效果。近年来,气-液、气-固、气-液-固等不同相态的复合抑爆剂在试验中得到研究,但气-固、气-液-固等复合灭火剂是否具有显著的抑爆效能有待进一步验证,对其协同抑爆机理需进行深入研究。

4) 金属化合物 KOH 、 Na_2CO_3 等在吸水或加入水中后有强碱性,会对灭火现场的电器设备等产生较强的腐蚀性,卤代烃氟化酮等灭火过程中会产生有毒气体,对救灾人员产生危害,且要达到完全抑爆,需要充入的抑爆剂浓度较高。所以在选择灭火剂的时候,应尽量选择腐蚀性较小或对人员没有影响的灭火剂,同时,开发清洁、高效、无腐蚀的灭火剂成为未来发展的方向。

参考文献 (References) :

- [1] 葛 瑛,傅 贵.特别重大瓦斯爆炸事故行为原因及预防策略研究[J].煤矿安全,2018,49(10):234-236.
GE Ying,FU Gui.Special serious gas explosion accidents and prevention strategy [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49 (10): 234-236.
- [2] 张景林,肖 林,寇丽平等.气体爆炸抑制技术研究[J].兵工学报,2000(3):261-263.
ZHANG Jinglin,XIAO Lin,KOU Liping,et al.A study the suppression of gas-explosion hazards[J].Acta Armamentarii,2000(3):261-263.
- [3] COWARD H F,JONES G W.Limits of flammability of gases and vapors,Bulletin 503 [R]. Washington D C: US B US Bureau of Mines,1952.
- [4] BRAIDECH M M,NEALE J A,MATSON A.F,et al.The mechanisms of extinguishment of fire by finely divided water [C]//Underwriters Laboratories Inc,for the National Board of Fire Underwriters New York,1955,73.
- [5] RASBASH D J.ROGOWSHI Z W.Exinction of fires in liquids by cooling with water sprays[J].Combustion and Flame,1957,1(4):453-466.
- [6] LAFFITTE P,BOUCHET R.Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders [J]. Seventh Symposium (Intern.) on Combust,1959:504-508.
- [7] 罗振敏,苏 彬,王 涛,等.矿井瓦斯控爆技术及材料研究进展[J].中国安全生产科学技术,2019,15(2):17-24.
LUO Zhenmin,SU Bin,WANG Tao,et al.Research progress on explosion control technology and materials of mining gas [J]. Journal of Safety Science and Technology,2019,15(2):17-24.
- [8] 余明高,阳旭峰,郑 凯,等.我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2020,45(1):168-188.

- YU Minggao, YANG Xufeng, ZHENG Kai, *et al.* Progress and development of coal mine gas explosion suppression and disaster reduction technology in china [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 168-188.
- [9] SASO Y. Roles of inhibitors in global gas-phase combustion kinetics [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 337-344.
- [10] LISOCHKIN Y A, V I POZNYAK. Inerting of methane-Air mixtures by compositions based on carbon dioxide and nitrogen with addition of halocarbons [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2005, 41(5): 504-509.
- [11] V V Azatyan, Yu N Shebeko, Bolod'yan I A, *et al.* Effect of diluents of various chemical nature on the flammability limits of gas mixtures [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2006, 42(6): 708-714.
- [12] AZATYAN V V, YU N Shebeko, Bolod'yan I A, *et al.* Concentration limits of flammability of $H_2-N_2-O_2$ -inhibitor mixtures [J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, Focus on Physics, 2008, 2(4): 568-574.
- [13] AZATYANA V V, SHEBEKOB YU N, SHEBEKOB A Yu, *et al.* Promotion and inhibition of the combustion of methane in oxidative gases with various oxygen concentrations by fluorinated hydrocarbons [J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2010, 4(5): 760-768.
- [14] RUBTSOV N M, SEPLYARSKII B S, TROSHIN K Ya, *et al.* Features of the propagation of laminar spherical flames initiated by a spark discharge in mixtures of methane, pentane, and hydrogen with air at atmospheric pressure [J]. Russian Journal of Physical Chemistry A, 2011, 85(10): 1707-1716.
- [15] JOHN L Pagliaro, GREGORY T Linteris, PETER B Sunderland, *et al.* Combustion inhibition and enhancement of premixed methane-air flames by halon replacements [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(1): 41-49.
- [16] MATHIEU O, GOULIER J, GOURMEL F, *et al.* Experimental study of the effect of CF_3I addition on the ignition delay time and laminar flame speed of methane, ethylene, and propane [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 2731-2739.
- [17] OSORIO C H, MORONES A, PLICHTA D, *et al.* Influence of C_2HF_5 and C_3HF_7 on CH_4 and C_3H_8 Combustion; Flame Speed and Ignition Delay Time Measurements [C] // 8th U. S. National Combustion Meeting, Salt Lake City, U. S., 2013.
- [18] MITU M, PRODAN M, GIURCAN V, *et al.* Influence of inert gas addition on propagation indices of methane-air deflagrations [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016(102): 513-522.
- [19] CUI Chuanbo, SHAO Hao, JIANG Shuguang, *et al.* Experimental study on gas explosion suppression by coupling CO_2 to a vacuum chamber [J]. Powder Technology, 2018, 335: 42-53.
- [20] 邱雁, 高广伟, 罗海珠. 充注惰气抑制矿井火区瓦斯爆炸机理 [J]. 煤矿安全, 2003, 34(2): 8-9.
- QIU Yan, GAO Guangwei, LUO Haizhu. Mechanism of pumping inert gas into mine fire area for inhibition of methane explosion [J]. Safety in Coal Mines, 2003, 34(2): 8-9.
- [21] 邓军, 程超, 吴晓春. 煤矿可燃性气体爆炸氧浓度的实验研究 [J]. 煤矿安全, 2007, 38(6): 5-7.
- DENG Jun, CHENG Chao, WU Xiaochun. Experimental study on explosive oxygen concentration of coal mine combustible gases [J]. Safety in Coal Mines, 2007, 38(6): 5-7.
- [22] 何昆. 二氧化碳抑爆性能实验研究 [J]. 消防科学与技术, 2011, 30(6): 476-478.
- HE Kun. Experiment on performance of CO_2 suppressing methane explosion [J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(6): 476-478.
- [23] 任韶然, 李海奎, 李磊兵, 等. 惰性及特种可燃气体对甲烷爆炸特性的影响实验及分析 [J]. 天然气工业, 2013, 33(10): 110-115.
- REN Shaoran, LI Haikui, LI Leibing. An experimental study of effects of inert and special flammable gases on methane explosion characteristics [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(10): 110-115.
- [24] 陈晓坤, 丁园月, 程方明, 等. CO_2 对矿井多组分可燃性气体抑爆特性的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(3): 43-47.
- CHEN Xiaokun, DING Yuanyue, CHENG Fangming, *et al.* Influence of CO_2 on explosion suppression characteristics of multi-component flammable gas in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 43-47.
- [25] 罗振敏, 王涛, 程方明, 等. 小尺寸管道内二氧化碳抑制甲烷爆炸效果的实验及数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3): 393-400.
- LUO Zhenmin, WANG Tao, CHENG Fangming, *et al.* Experimental and numerical studies on the suppression of methane explosion using CO_2 in a mini vessel [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 393-400.
- [26] 张迎新, 吴强, 刘传海, 等. 惰性气体 N_2/CO_2 抑制瓦斯爆炸实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 906-912.
- ZHANG Yingxin, WU Qiang, LIU Chuanhai, *et al.* Experimental study on inert gas N_2/CO_2 to suppress gas explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(05): 906-912.
- [27] 罗振敏, 康凯. CO_2 抑制甲烷-空气链式爆炸微观机理的仿真分析 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(5): 42-48.
- LUO Zhenmin, KANG Kai. Simulative analysis of microscopic mechanism of CO_2 inhibiting methane-air chain explosion [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(5): 42-48.
- [28] 周福宝, 王德明. 含氮气三相泡沫惰化火区的机理及应用研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 443-446.
- ZHOU Fubao, WANG Deming. Research on the mechanism and application of three-phase nitrogen-containing foam inertized fire zone [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 443-446.
- [29] 祝钊, 贾振元, 罗海珠. 瓦斯输送管道内抑爆过程数值模拟研究 [J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(1): 37-42.
- ZHU Zhao, JIA Zhenyuan, LUO Haizhu. Numerical simulation research on explosion suppression process in gas transmission pipeline [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(1): 37-42.
- [30] 罗振敏, 康凯, 任军莹. NH_3 对甲烷链式爆炸的微观作用机理 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(4): 876-883.

- LUO Zhenmin, KANG Kai, REN Junying. Microscopic mechanism of NH_3 on chain of methane explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(4): 876-883.
- [31] 罗振敏. 活化水蒸气控制瓦斯爆炸的实验[J]. *煤田地质与勘探*, 2008, 36(3): 23-26.
LUO Zhenmin. Experiment study on controlling gas explosion by active steam [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2008, 36(3): 23-26.
- [32] 李成兵, 吴国栋, 经福谦. 水蒸气抑制甲烷燃烧和爆炸实验研究与数值计算[J]. *中国安全科学学报*, 2009, 19(1): 118-124.
LI Chengbing, WU Guodong, JING Fuqian. Experimental investigation and numerical computation of methane combustion and explosion suppressed by vapor [J]. *China Safety Science Journal*, 2009, 19(1): 118-124.
- [33] 梁运涛, 曾文. 封闭空间瓦斯爆炸与抑制机理的反应动力学模拟[J]. *化工学报*, 2009, 60(7): 1700-1706.
LIANG Yuntao, ZENG Wen. Kinetic simulation of gas explosion and inhibition mechanism in enclosed space [J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(7): 1700-1706.
- [34] 贾宝山, 李艳红, 曾文, 等. 定容体系中氮气影响瓦斯爆炸反应的动力学模拟[J]. *过程工程学报*, 2011, 11(5): 812-817.
JIA Baoshan, LI Yanhong, ZENG Wen, et al. Kinetic Simulation for the effect of N_2 content on gas Explosion in an constant volume system [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2011, 11(5): 812-817.
- [35] 贾宝山, 温海燕, 梁运涛, 等. 煤矿巷道内 N_2 及 CO_2 抑制瓦斯爆炸的机理特性[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(3): 361-366.
JIA Baoshan, WEN Haiyan, LIANG Yuntao. Study on mechanism characteristic of N_2 & H_2O on inhibiting gas explosion in coal mine tunnel [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(3): 361-366.
- [36] 邓军, 朱熹, 程方明. 氟化酮灭火剂用于瓦斯抑爆研究综述[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(7): 181-183.
DENG Jun, ZHU Xi, CHENG Fangming. Research overview of decanfluoro-2-methylpentan-3-one fire suppression agent used in gas explosion suppression [J]. *Safety in Coal Mines Safety in Coal Mines*, 2017, 48(7): 181-183.
- [37] 丛北华, 齐飞, 廖光焯, 等. 三氟甲烷抑制 CH_4/O_2 低压预混平面火焰的实验研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(16): 1789-1793.
CONG Beihua, QI Fei, LIAO Guangxuan, et al. Experimental study on trifluoromethane inhibiting CH_4/O_2 low pressure premixed plane flame [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(16): 1789-1793.
- [38] 薛少谦. 七氟丙烷抑制甲烷空气预混气体爆炸的实验研究[J]. *矿业安全与环保*, 2017, 44(1): 5-8.
XUE Shaoqian. Experimental study on heptafluoropropane inhibiting explosion of methane air premixed gas [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2017, 44(1): 5-8.
- [39] 路长, 刘洋, 王鸿波, 等. CO_2 、 H_2 对 CH_4/Air 预混气爆炸特性的影响[J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(5): 1788-1795.
LU Chang, LIU Yang, WANG Hongbo, et al. Experimental study of the effects of CO_2/H_2 on the characteristic features of methane/air bursts [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(5): 1788-1795.
- [40] RASBASH D J, ROGOWSKI Z W. Extinction of fires in liquids by cooling with water sprays [J]. *Combustion and Flame*, 1957, 1(4): 453-466.
- [41] LAFFITTE P, BOUCHET R. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders [J]. *Seventh Symposium (Intern.) on Combust*, 1959: 504-508.
- [42] THOMAS G O, JONES A, EDWARDS D H. Influence of water sprays on explosion development in fuel-air mixtures [J]. *Combustion Science and Technology*, 1991, 80(1-3): 47-61.
- [43] EWAN B C R, MOATAMEDI M. Induced water atomization devices for gas explosion suppression [J]. *Process Safety Progress*, 2002, 21(2): 164-169.
- [44] CLIVE Catlin. Passive explosion suppression by blast-induced atomization from water containers [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 94(2): 103-132.
- [45] 陆守香, 何杰, 于春红, 等. 水抑制瓦斯爆炸的机理研究[J]. *煤炭学报*, 1998, 23(4): 83-87.
LU Shouxiang, HE Jie, YU Chunhong, et al. Mechanism of gas explosion suppression by water [J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 23(4): 83-87.
- [46] 刘暄亚, 陆守香, 秦俊. 水雾作用下气体爆炸火焰传播的实验研究[J]. *火灾科学*, 2003, 12(1): 11-18.
LIU Xuanya, LU Shouxiang, QIN Jun. The experimental study of the propagation of gas explosion flame influenced by water sprays [J]. *Fire Safety Science*, 2003, 12(1): 11-18.
- [47] 王发辉, 陈卫, 温小萍, 等. 超声细水雾抑制管内瓦斯爆炸的试验[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(6): 1971-1977.
WANG Fahui, CHEN Wei, WEN Xiaoping, et al. Experiment for gas burst or explosion suppression via the ultrasonic water mist [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(6): 1971-1977.
- [48] 张鹏鹏. 超细水雾增强与抑制瓦斯爆炸的实龄研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [49] 余明高, 安安, 游浩. 细水雾抑制管道瓦斯爆炸的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(3): 417-422.
YU Minggao, AN An, YOU Hao. Experimental study on inhibiting the gas explosion by water spray in tube [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(3): 417-422.
- [50] 刘长春, 徐绍亮, 马砺, 等. 超细水雾作用下 CH_4 层流火焰传播速度数值研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(9): 233-238.
LIU Changchun, XU Shaoliang, MA Li, et al. Numerical investigation of CH_4 laminar flame propagation speed affected by ultra fine water mist [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(9): 233-238.
- [51] PAN R, XIAO Z, YU M. The characteristics of methane combustion suppression by water mist and its engineering applications [J]. *Energies*, 2017, 10(10): 1566.
- [52] SONG Yifan, ZHANG Qi. Quantitative research on gas explosion inhibition by water mist [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 363: 16-25.

- [53] LI Haitao, CHEN Xiaokun, SHU Chimin, *et al.* Experimental and numerical investigation of the influence of laterally sprayed water mist on a methane-air jet flame [J]. Elsevier, 2019, 356: 554-569.
- [54] CHELLIAH H K, LAZZARINI A K., WANIGARATHNE P C., *et al.* Inhibition of premixed and non-premixed flames with fine droplets of water and solutions [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 369-376.
- [55] 林滢. 瓦斯爆炸水系抑制剂的实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2006.
- [56] 陈晓坤, 林滢, 罗振敏. 水系抑制剂控制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 603-606.
- CHEN Xiaokun, LIN Ying, LUO Zhenmin. Experiment study on controlling gas explosion by water-depressant [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 603-606.
- [57] 高旭亮. 超细水雾抑制甲烷爆炸实验与数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [58] 曹兴岩. 超细水雾抑制甲烷-空气爆炸机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [59] 李定启, 吴强, 余明高. 细水雾影响瓦斯爆炸浓度下限的实验研究 [J]. 煤矿安全, 2008, 39(11): 5-7.
- LI Dingqi, WU Qiang, YU Minggao. Study on experiments of influencing gas explosion lower limit by water mist [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39(11): 5-7.
- [60] 李定启, 吴强, 余明高. 含添加剂细水雾降低瓦斯爆炸下限的实验研究 [J]. 矿业安全与环保, 2009, 36(2): 1-3.
- LI Dingqi, WU Qiang, YU Minggao. Water mist containing additives reduces gas explosion experimental study of the lower limit [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2009, 36(2): 1-3.
- [61] 刘江虹, 廖光焯. 含添加剂细水雾熄灭甲烷/空气火焰的研究 [J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(10): 1240-1244.
- LIU Jianghong, LIAO Guangxuan. Experiment research on CH₄/Air fire suppression using water mist with additives [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(10): 1240-1244.
- [62] ZHANG T, HAN Z, DU Z, *et al.* Application of thermal mechanism to evaluate the effectiveness of the extinguishment of CH₄/air cup-burner flame by water mist with additives [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(33): 15078-15088.
- [63] 张增志, 谷娜, 张际飞. Span80 在瓦斯吸收抑爆材料中的应用 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 366-370.
- ZHANG Zengzhi, GU Na, ZHANG Jifei. The application of span80 in methane absorption and explosion suppression material [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 366-370.
- [64] TIANWEI Z, HAO L, HAN Z, *et al.* Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 429-438.
- [65] 杨克, 纪虹, 邢志祥, 等. 含草酸钾的超细水雾抑制甲烷爆炸的特性 [J]. 化工学报, 2018, 69(12): 5359-5369.
- YANG Ke, JI Hong, XING Zhixiang, *et al.* Characteristics on methane explosion suppression by ultrafine water mist containing potassium oxalate [J]. CIESC Journal, 2018, 69(12): 5359-5369.
- [66] 余明高, 梁栋林, 徐永亮, 等. 荷电细水雾抑制瓦斯爆炸实验研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2232-2238.
- YU Minggao, LIANG Donglin, XU Yongliang. Experimental study on inhibiting the gas explosion by charged water mist [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2232-2238.
- [67] XU Yongliang, WANG Lanyun, YU Minggao, *et al.* Study on the characteristics of gas explosion affected by induction charged water mist in confined space [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40: 227-233.
- [68] VANPEE M, SHIRODKAR P P. A study of flame inhibition by metal compounds [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1987, 117: 787-795.
- [69] LINTERIS G T, RUMMINGER M, BABUSHOK V. Final report: effective non-toxic metallic fire suppressants NI-STIR 6875 [R]. [S.I]: National of Standards and Technology, 2002.
- [70] LAFFITTE P, BOUCHET R. Suppression of explosion waves in gaseous mixtures by means of fine powders [C]//Symposium (International) on Combustion, 1958, 7(1): 504-508.
- [71] KAUFFMAN C W, WOLANSKI P, ARISOY A, *et al.* Dust, hybrid and dusty detonations [C]//AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics: Dynamics of shock waves, explosions and detonations, 1984, 94: 221-240.
- [72] 范宝春, 李鸿志. 惰性颗粒抑爆过程的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 208-214.
- FAN Baochun, LI Hongzhi. Numerical simulations of explosion suppression by inert particles. [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 208-214.
- [73] 范宝春, 谢波, 张小和, 等. 惰性粉尘抑爆过程的实验研究 [J]. 流体力学实验与测量, 2001, 15(4): 20-25.
- FAN Baochun, XIE Bo, ZHANG Xiaohe, *et al.* Experimental research on explosion suppression by inert particles [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2001, 15(4): 20-25.
- [74] 邢晓江, 范宝春, 杨宏伟. 管内粉尘抑爆效果的实验研究 [J]. 弹道学报, 2000, 12(4): 72-76.
- XING Xiaojiang, FAN Baochun, YANG Hongwei. The experiment research on explosion suppression of fine powder in tube [J]. Journal of Ballistics, 2000, 12(4): 72-76.
- [75] 谢波, 范宝春. 人型管道中主动式粉尘抑爆现象的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 54-57.
- XIE Bo, FAN Baochun. Study on active explosion suppression by powder in large-scale duct [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 54-57.
- [76] 蔡周全, 张引合. 干粉灭火剂粒度对抑爆性能的影响 [J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(4): 14-16.
- CAI Zhouquan, ZHANG Yinhe. Effect of dry powder fire extinguishing agent particle size on explosion suppression performance [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2001, 28(4): 14-16.
- [77] 郑立刚, 王亚磊, 于水军, 等. NaHCO₃ 抑制瓦斯爆炸火焰与压力的耦合分析 [J]. 化工学报, 2018, 69(9): 4129-4136.
- ZHENG Ligang, WANG Yalei, YU Shuijun, *et al.* Coupled relationship between flame and overpressure of gas explosion inhibited

- by NaHCO_3 [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(9): 4129-4136.
- [78] 王信群,王 婷,徐海顺,等. BC 粉体抑爆剂改性及抑制甲烷/空气混合物爆炸[J]. *化工学报*, 2015, 66(12): 5171-5178.
WANG Xinqun, WANG Ting, XU Haishun, *et al.* Modification of commercial BC dry chemical powder suppressant and experiments on suppression of methane-air explosion [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(12): 5171-5178.
- [79] 王 婷,王信群,吕 岳,等. 超细活性及惰性粉体对甲烷/空气预混物层流火焰传播的影响[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1720-1727.
WANG Ting, WANG Xinqun, LYU Yue, *et al.* Interaction of ultra-fine chemical active and inert powder with premixed laminar flame of methane-air mixtures [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1720-1727.
- [80] 张宇明,邹高万,郜 冶,等. ABC 干粉对爆燃火焰传播抑制实验[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(4): 449-453.
ZHANG Yuming, ZOU Gaowan, GAO Ye, *et al.* Experimental research on denaturation flame propagation suppression by ABC powder [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(4): 449-453.
- [81] 张宇明,邹高万,郜 冶,等. ABC 干粉对爆炸超压的抑制[J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(5): 456-460.
ZHANG Yuming, ZOU Gaowan, GAO Ye. Explosion overpressure suppression by ABC powder [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(5): 456-460.
- [82] 文 虎,曹 玮,王开阔,等. ABC 干粉抑制瓦斯爆炸的实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(6): 9-12.
WEN Hu, CAO Wei, WANG Kaikuo, *et al.* Experimental study on ABC dry powder to repress gas explosion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2011, 7(6): 9-12.
- [83] 王信群,孔丽丽,徐海顺,等. 超细粉体云幕抑制大型管道内瓦斯爆炸火焰传播[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1482-1488.
WANG Xinqun, KONG Lili, XU Haishun, *et al.* Suppression of methane/air flame propagation in large scale pipelines by clouds of ultrafine powders [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1482-1488.
- [84] 罗振敏,张 江,任军莹,等. $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体热分解产物在瓦斯爆炸中的作用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1489-1495.
LUO Zhenming, ZHANG Jiang, REN Junying, *et al.* Role of thermal decomposition products of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ powder in gas explosions [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1489-1495.
- [85] 罗振敏. 瓦斯爆炸抑制材料的特性及抑爆作用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [86] 王秋红,邓 军,罗振敏,等. 超细氢氧化镁粉体抑制甲烷-空气混合物爆炸效能研究[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(12): 33-37.
WANG Qihong, DENG Jun, LUO Zhenming, *et al.* Research on effects of methane explosion suppression by ultrafine magnesium hydroxide powder [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 24(12): 33-37.
- [87] 文 虎,王秋红,罗振敏,等. 超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体抑制甲烷爆炸的实验研究[J]. *西安科技大学学报*, 2009, 29(4): 388-390, 395.
WEN Hu, WANG Qihong, LUO Zhenmin, *et al.* Experiment on $\text{Al}(\text{OH})_3$ ultra fine powder suppressing methane explosion [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2009, 29(4): 388-390, 395.
- [88] YU M G, ZHENG K, ZHENG L G, *et al.* Experimental study on gas explosion suppression based on ferrocene [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2013, 19(3): 358-362.
- [89] 余明高,孔 杰,王 燕,等. 改性赤泥粉体抑制瓦斯爆炸的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(7): 1289-1295.
YU Minggao, KONG Jie, WANG Yan, *et al.* Experimental research on gas explosion suppression by modified red mud [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(7): 1289-1295.
- [90] ZHENG L, ZHENG K, PAN RK, *et al.* Inhibition of the premixed CH_4 /Air deflagration by powdered extinguishing agents [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 71: 230-237.
- [91] WANG Y, CHENG YS, YU MG, *et al.* Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO_3 /red-mud composite powders with core-shell structure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 335: 84-91.
- [92] SUN Y, YUAN B, CHEN X, *et al.* Suppression of methane/air explosion by kaolinite-based multi-component inhibitor [J]. *Powder Technology*, 2019, 343: 279-286.
- [93] 罗振敏,葛岭梅,邓 军,等. 纳米粉体对矿井瓦斯的抑爆作用[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 24(2): 19-23.
LUO Zhenmin, GE Lingmei, DENG Jun, *et al.* Inhibitory effect on nanometer powder to gas explosion in coalmine [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology*, 2009, 24(2): 19-23.
- [94] 陈先锋,樊 傲,袁必和,等. 干水材料对瓦斯爆燃抑制的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(11): 123-133.
CHEN Xianfeng, FAN Ao, YUAN Bihe, *et al.* Experimental study on suppression of gas deflagration by dry water materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(11): 123-133.
- [95] PER B, YANG Yong, LI Jie, *et al.* Experimental study on suppression effect of inert gas two fluid water mist system on methane explosion [J]. *Procedia Engineering*, 2018, 211: 565-574.
- [96] 余明高,朱新娜,裴 蓓,等. 二氧化碳-超细水雾抑制甲烷爆炸实验研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(12): 2843-2848.
YU Minggao, ZHU Xinna, PEI Pei, *et al.* Experimental study on methane explosion suppression using carbon dioxide and ultra-fine water mist. [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(12): 2843-2848.
- [97] 裴 蓓,韦双明,余明高,等. 气液两相介质抑制管道甲烷爆炸协同增效作用[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(11): 3130-3136.
PEI Pei, WEI Shuangming, YU Minggao, *et al.* Synergistic inhibition effect on methane explosion in pipeline by gas-liquid two-phase medium [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(11): 3130-3136.
- [98] 裴 蓓,余明高,陈立伟,等. CO_2 -双流体细水雾抑制管道甲烷爆炸实验[J]. *化工学报*, 2016, 67(7): 3101-3108.
PEI Pei, YU Minggao, CHEN Liwei, *et al.* Suppression effect of CO_2 -two fluid water mist on methane/air explosion in vented duct [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(7): 3101-3108.

- [99] 裴 蓓, 韦双明, 陈立伟, 等. CO₂-超细水雾对 CH₄/Air 初期爆炸特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 169-178.
PEI Pei, WEI Shuangming, CHEN Liwei, *et al.* Effect of CO₂-ultrafine water mist on initial explosion characteristics of CH₄/Air [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(2): 169-178.
- [100] 余明高, 杨 勇, 裴 蓓, 等. N₂ 双流体细水雾抑制管道瓦斯爆炸实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 194-200.
YU Minggao, YANG Yong, PEI Pei, *et al.* Experimental study of methane explosion suppression by nitrogen twin-fluid water mist [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 194-200.
- [101] 郭成成. 惰气-添加剂-细水雾抑制瓦斯爆炸实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [102] 杨 勇. 含添加剂的 N₂-双流体细水雾抑制甲烷/空气爆炸衰减特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
- [103] 戴 彪, 张树海, 陈亚红. 新型冷气溶胶灭火剂灭火性能的研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(28): 308-312, 319.
DAI Biao, ZHANG Shuhai, CHEN Yahong. Numerical simulation of gas permeability characteristics of coal samples under thermal mechanical coupling [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(28): 308-312, 319.
- [104] MCHALE B G. Mixed phase fire suppression systems: Application and benefits [C]//Halon Options Technical Working Conference. Albuquerque, New Mexico, National Institute of Standards and Technology, Special Publication, 2002: 1-11.
- [105] 王 瑶. 气固复配灭火剂对瓦斯爆炸引燃初期火焰发展的影响[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [106] 计承杰. C₃HF₇ 和 NaHCO₃ 复配抑制 CH₄ 爆炸的实验研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [107] Skaggs R R. Assessment of the fire suppression mechanics for HFC-227ea combined with NaHCO₃ [C]//12th Proceedings of Halon Options Technical Working Conference. Albuquerque, New Mexico, 2002: 1-11.
- [108] 田志辉. 气-固混合抑制剂对矿井瓦斯的抑爆实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- [109] WANG Y, MENG X, JI W, *et al.* The Inhibition effect of gas-solid two-phase inhibitors on methane explosion [J]. *Energies*, 2019, 12(3): 398.
- [110] JIANG Bingyou, LIU Zegong, TANG Mingyun, *et al.* Active suppression of premixed methane/air explosion propagation by non-premixed suppressant with nitrogen and ABC powder in a semi-confined duct [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 29: 141-149.
- [111] 屈丽娜. K 型、S 型气溶胶抑制瓦斯爆炸实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.