

国家自然科学基金项目(51004048,51074161,50974060) 资助
湖南科技大学学术著作出版基金资助

受限空间 瓦斯爆炸传播特性

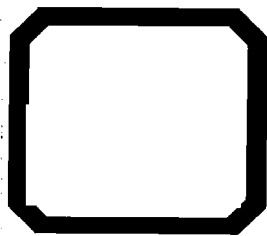
Shouxian Kongjian

Wasi Baozha Chuanbo Texing

叶 青 林柏泉 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



项目(51004048,51074161,50974060) 资助
著作出版基金资助

受限空间瓦斯爆炸传播特性

叶 青 林柏泉 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

煤矿井下瓦斯爆炸灾害一直是困扰煤矿企业安全生产的一大顽疾,针对矿井瓦斯爆炸机理及其传播特性研究存在的不足,本书以瓦斯爆炸动力学和传热学为基础,阐述了瓦斯爆炸过程的氧化反应机理及冲击波超压(冲量)破坏机理,分析了管内瓦斯爆炸传播过程中火焰传播规律及其加速机理,建立了适合管内瓦斯爆炸传播的数学模型,推导了管内瓦斯爆炸传播过程爆炸波结构、爆炸波阵面参数变化特性,平面冲击波、斜冲击波、球面冲击波在管内传播过程及其特性。在实验室实验、统计理论分析及数值模拟研究的基础上,系统地分析了瓦斯爆炸传播特性与管道形状、多孔金属材料的关系,得出了瓦斯爆炸在复杂管道及多孔金属材料内的传播规律和瓦斯爆炸传播动力演化特性,最后提出了相应的瓦斯爆炸防治技术措施,并对近几年的瓦斯爆炸事故案例进行了分析。

本书可供从事矿井瓦斯灾害防治工作等相关领域研究的科技工作者、高等院校师生、工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

受限空间瓦斯爆炸传播特性/叶青,林柏泉著. —徐州:

中国矿业大学出版社,2012.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1503 - 1

I. ①受… II. ①叶…②林… III. ①瓦斯爆炸—研究 IV.

①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 121858 号

书 名 受限空间瓦斯爆炸传播特性

著 者 叶 青 林柏泉

责任编辑 刘红岗

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 8.75 字数 218 千字

版次印次 2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

由于煤炭是世界能源的一个重要组成部分,所以煤炭行业一直受到各国的关注。但是,与煤伴生的瓦斯却严重威胁着煤矿的安全生产,是时时刻刻严重威胁煤矿井下安全生产的自然因素之一。在煤炭开采过程中,瓦斯灾害主要表现为瓦斯爆炸(瓦斯煤尘爆炸)和煤与瓦斯突出事故。煤矿瓦斯爆炸不仅会造成大量的人员伤亡,而且还会摧毁矿井设施,造成通风系统紊乱、中断生产,有时还会引起煤尘爆炸、矿井火灾、井巷垮塌和顶板冒落等二次事故。在近代煤炭开采史上,瓦斯灾害每年都造成众多人员伤亡和巨大财产损失。从全国的情况来看(根据有关资料统计),煤矿企业一次死亡 10 人以上的特大事故中约 70%是瓦斯爆炸或瓦斯煤尘爆炸事故。

为了防治煤矿瓦斯灾害,经过几代煤炭科技人员和职工的艰苦努力,我国煤矿安全技术迅速进步,煤矿安全技术保障体系已经基本形成,并在瓦斯综合治理方面取得了卓越的成绩,而且在实践工作中积累了丰富的经验,矿井瓦斯爆炸防治理论和技术也取得了长足的进步,大大减少了煤矿瓦斯事故的发生,改善了煤矿安全状况。

但是近年来,随着煤矿生产机械化水平和生产集约化程度的提高,以及不少特大型矿区相继进入深部开采,特别是以高产高效为基本特征的集约化生产技术的采用,已有的瓦斯灾害防治技术及装备已经不能有效地防治矿井重大瓦斯灾害事故。不少煤矿由低瓦斯矿井变为高瓦斯矿井,原来没有煤与瓦斯突出的矿井变为有突出危险的矿井,煤尘产生量增大及煤尘危害变得更加严重,大功率采掘机械随时都有产生摩擦火花引发瓦斯爆炸的可能,致使发生瓦斯煤尘爆炸的潜在危险性增大,恶性瓦斯事故时有发生。尽管近年来对煤矿的安全生产投入了很大的人力、物力和财力,但由于上述自然条件 and 生产环境的变化,使得煤矿生产不安全因素增多、危险性更加严重。

本书针对矿井瓦斯爆炸及其传播特性研究存在的不足,系统、深入地分析了瓦斯爆炸机理、冲击波波阵面结构及其参数变化特征、管内瓦斯爆炸传播过程的各种冲击波传播特性以及复杂管道内瓦斯爆炸传播规律。全书共分七章:第一章分析了瓦斯爆炸机理及其危害;第二章分析了受限空间瓦斯爆炸传播特性;第三章介绍了实验系统及实验方法;第四章通过实验测定了复杂管道内瓦斯爆炸传播规律;第五章通过数值模拟研究了复杂管道内及多孔金属材料内瓦斯爆炸传播规律;第六章介绍了瓦斯爆炸灾害防治技术;第七章进行了瓦斯爆炸事故案例分析。

本书在撰写过程中查阅了矿井瓦斯灾害防治方面已有的资料,并得到了许多老师和同

学的热情帮助和大力支持。本书出版得到了国家自然科学基金、湖南科技大学学术著作出版基金、中国博士后科学基金的资助。湖南科技大学的领导、老师和朋友在本书的撰写和出版方面给予了大力支持,借本书出版之际,作者谨向给予本书出版支持和帮助的各位领导、老师、专家学者、参考文献作者和广大同仁表示衷心的感谢!

由于时间仓促、水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

作 者

2011年9月于湘潭

前 言

瓦斯又称甲烷,这一成煤过程的伴生物,早在 15 世纪就开始为人们所认识。我国明代宋应星在《天工开物》(初刊于 1637 年)一书中曾介绍,在煤炭开采时,煤层中存在着一种能使人窒息且可燃的气体,并提出了利用竹管引排该种气体的方法。16 世纪末,英国和其他西欧国家在采煤时,也遇到了“有害的”气体,但并未引起人们的重视。只是到了 18 世纪初期,英国有的煤矿开始发生瓦斯爆炸,1839 年美国有的煤矿也发生了瓦斯爆炸,此后断断续续又发生了许多瓦斯爆炸事故,导致了人员大量伤亡和财产严重损失,这时人们才逐渐重视并开始研究瓦斯爆炸的原因及应采取的防范措施。

我国是煤炭资源大国,也是以煤炭为主要能源的国家。在我国,煤炭消耗量占一次能源构成的 70% 以上,并且在今后相当长的一段时间内,我国仍然要以煤炭资源为主要能源,所以煤炭生产在国民经济发展中占有举足轻重的地位。然而在煤炭开采过程中发生的灾难事故也是惊人的,尤其是特别重大瓦斯爆炸事故导致群死群伤、巷道设备严重破坏和巨大财产损失,造成了不良的社会影响。例如,2004 年 10 月河南大平煤矿瓦斯爆炸事故造成 148 人死亡、矿井西翼通风构筑物几乎全部被摧毁、通风系统和机电运输设备被严重破坏,直接经济损失达 3 935.7 万元。2004 年 11 月陕西省铜川市陈家山煤矿瓦斯爆炸事故造成 166 人死亡、煤矿巷道遭到严重破坏(在瓦斯爆炸事故中,玻璃钢瓦斯抽放管路的爆炸又导致灾害扩大),巷道维修及设备更新等耗资近 1 亿元。2005 年 2 月辽宁省阜新矿业(集团)有限责任公司孙家湾煤矿海州立井发生特别重大瓦斯爆炸事故,造成 214 人死亡、30 人受伤、设施及巷道遭到严重毁坏,直接经济损失达 4 968.9 万元。2007 年 12 月山西瑞之源煤业公司瓦斯爆炸事故造成 105 人死亡、巷道和爆源附近的设备遭到严重破坏,直接经济损失达 4 275 万元。瓦斯爆炸灾害事故接连不断地发生,不但造成了巨大的财产损失和人员伤亡,而且严重地影响了我国的国际声誉,这与国家“以人为本,建立和谐社会”的治国方针极不协调。同时,瓦斯因素还极大地限制了矿井生产能力的提高,在高瓦斯矿井中,采煤、掘进、运输机械化装备难以发挥其应用效能,降低了生产效率。此外,全国每年有 70 亿 m^3 以上的瓦斯排入大气,既浪费了宝贵的煤层气资源,也污染了环境。在“以人为本、关爱生命、建立和谐社会”的时代背景条件下,我国煤矿企业必须加大科技投入,努力提高瓦斯综合治理的技术水平,大幅度减少和控制各种瓦斯事故的发生,加强瓦斯爆炸灾害的防治,从根本上控制瓦斯爆炸事故的发生是确保煤炭能源的稳定可靠供应、促进国民经济全面健康发展的重要保证,也是煤炭工业需要解决的一个十分重要的问题。

通过煤矿井下瓦斯爆炸事故原因分析可知,一般情况下由于局部瓦斯积聚达到爆炸极限,遇到火源,便引燃瓦斯爆炸,然后迅速传播,在传播过程中冲击波和火焰对矿井设施造成破坏、对人员生命安全造成伤害。在火焰和冲击波的传播过程中,两者是相互影响的,它们之间存在着一定的空间位置关系,所以爆炸传播过程中的火焰、冲击波的发展变化特性对瓦斯爆炸事故具有十分重要的作用,它决定了瓦斯爆炸事故的破坏程度和范围。因此,对瓦斯爆炸传播过程中火焰冲击波传播规律及其加速机理的研究,对瓦斯爆炸冲击波结构及其参数变化特性的分析,对冲击波碰到管道壁面时的反射、绕射和被吸收以及产生二次冲击波等传播过程的研究,对反射前后冲击波结构变化等的研究尤显重要。同时只有搞清楚井下瓦斯爆炸传播特性及其影响因素,特别是复杂巷道中的瓦斯爆炸传播规律及动力演化机理,才能在巷道开采设计过程中减少和消除促进瓦斯爆炸的条件,才能针对矿井具体条件,预测瓦斯爆炸可能传播的范围及造成的损失,减少瓦斯爆炸造成的危害,降低其破坏程度;只有搞清楚瓦斯爆炸过程中冲击波结构、参数变化特性、传播规律,才能有效地防止燃烧转向爆燃、爆燃转向爆轰。只有定性、定量分析瓦斯爆炸威力特别是爆炸压力及火焰传播速度,了解其破坏方式和规律,较精确地描述整个爆炸过程,寻找和发现瓦斯爆炸的抑制机理及方法,才可能有效地提出减灾防护措施。瓦斯爆炸带来的灾害主要体现在瓦斯爆炸传播阶段,所以只有在瓦斯爆炸产生和传播过程中削弱和控制了爆炸,才算从真正意义上控制了瓦斯爆炸;只有掌握瓦斯爆炸传播抑制技术,才能对瓦斯爆炸预防和控制新技术的研究进行理论指导,研制出性能稳定、安全可靠的阻隔爆设施。因此研究瓦斯爆炸在多孔金属材料约束条件下的传播不仅可以进一步认识瓦斯爆炸及其传播的本质,减少煤矿瓦斯爆炸事故的发生,而且还可推广到其他工业的抑爆、隔爆、熄爆等安全领域,所以具有较高的学术价值和广泛的应用前景。

鉴于瓦斯爆炸事故对我国煤矿安全生产造成的严重威胁,从煤矿安全生产成本、煤矿安全管理、煤矿安全监察、社会效应等各种角度来看,都有必要对瓦斯爆炸机理和传播特性及其抑制机理进行深入研究、开发新的隔爆、防爆、抑爆技术,以便为瓦斯爆炸事故预防和控制提供理论技术上的指导。在国家自然科学基金项目和国家“973”项目的资助下,开展了矿井瓦斯动力灾害演化及防治技术的研究。本书作为该项目研究成果的一部分,主要阐述了管内瓦斯爆炸传播特性,以期揭示瓦斯爆炸传播规律及瓦斯爆炸传播动力演化特性,为煤矿采取瓦斯爆炸防治技术措施提供理论依据,希望对从事煤矿瓦斯爆炸灾害防治工作的科技人员有所帮助。

目 录

1 瓦斯爆炸机理及其危害	1
1.1 瓦斯爆炸机理	1
1.2 瓦斯爆炸危害及破坏机理	8
2 受限空间瓦斯爆炸传播特性	11
2.1 管内瓦斯爆炸传播特性	11
2.2 瓦斯爆炸在多孔金属材料中的传播特性	32
3 实验系统及实验方法	42
3.1 实验系统	42
3.2 工作原理及步骤	45
4 复杂管内瓦斯爆炸传播规律	46
4.1 瓦斯爆炸在分岔管道中的传播	46
4.2 瓦斯爆炸在拐弯管道中的传播	53
4.3 瓦斯爆炸在连续拐弯管道中的传播	62
4.4 瓦斯爆炸在 T 形管道中的传播	71
4.5 瓦斯爆炸在变径管道中的传播	77
5 瓦斯爆炸在复杂管内及多孔金属材料内传播的数值模拟	82
5.1 软件简介	82
5.2 数值模拟结果及分析	85
6 矿井瓦斯爆炸灾害防治技术	102
6.1 瓦斯爆炸防治措施	102
6.2 瓦斯爆炸事故处理的一般原则和程序	107
7 矿井瓦斯爆炸事故案例分析	109
7.1 木冲沟煤矿“9·27”瓦斯煤尘爆炸事故	109
7.2 大平煤矿“10·20”特别重大瓦斯爆炸事故	113

7.3	陈家山煤矿“11·28”特别重大瓦斯爆炸事故	117
7.4	孙家湾煤矿海州立井“2·14”特别重大瓦斯爆炸事故	120
7.5	刘官屯煤矿“12·7”特别重大瓦斯煤尘爆炸事故	123
7.6	瓦窑堡镇煤矿“4·29”特大瓦斯爆炸事故	126
参考文献		128

1 瓦斯爆炸机理及其危害

爆炸是系统能量在有限体积内瞬间释放或急骤转变为动能、机械能以及光和热的辐射过程。它有物理爆炸和化学爆炸之分,矿井瓦斯爆炸属于化学爆炸。在许多领域,大量研究人员对爆炸现象及其过程进行了长期、深入的研究,证实爆炸具有三个特点:① 爆炸反应过程具有放热性;② 爆炸反应过程具有高速性,并能自持传播;③ 爆炸反应生成大量的气态产物。这三个特征在任何化学反应成为爆炸反应的必要条件,在不同爆炸过程具有不同程度的表现,而且研究还证实这三个方面对爆炸的形成互为因素、互相关联、缺一不可。因此,可以认为爆炸现象是一种高速进行的能自动传播的化学反应过程,并同时放出大量的热量和生成大量的气态产物。瓦斯爆炸是火焰从火源占据的空间不断传播到爆炸混合气体所在的整个空间的过程。

1.1 瓦斯爆炸机理

理论和实验研究表明:瓦斯爆炸是热爆炸机理和链式反应机理共同作用的结果。热爆炸理论认为,爆炸过程是由于系统反应放出的热量大于系统向环境中散失的热量,使得系统温度不断升高而引起的。在这个过程中,化学反应放热使温度升高,温度升高又使反应速度加快、反应放热增加,这样的反复影响使反应速度变得非常迅速,以至发生爆炸。链式反应理论认为,链式反应逐渐积累自由基可以使系统反应自动加速,直至反应系统爆炸。系统中自由基数目能否发生积累是链式反应过程中自由基增长因素与自由基销毁因素相互作用的结果。自由基增长因素占优势,系统就会发生自由基积累,当自由基积累速率达到一定值时,系统就会发生爆炸。

就本质而言,煤矿瓦斯爆炸是一定浓度的瓦斯和空气中的氧相互作用产生的剧烈氧化反应。就单纯瓦斯燃烧而言,其反应很简单,但在瓦斯爆炸发展过程中,瞬间产物的产生导致瓦斯爆炸成为一个复杂的化学反应过程,并且在爆炸过程中受外界条件的影响,涉及因素众多。

1.1.1 瓦斯爆炸产生条件

众所周知,煤矿井下瓦斯爆炸的发生必须具备三个条件:① 瓦斯浓度处于爆炸极限范围内(5%~16%);② 有足以引爆瓦斯的火源(温度高于最低点燃温度和点燃时间长于感应期);③ 井下空气中氧含量大于12%。这三个条件也是预防瓦斯爆炸事故的基本技术依据,只要控制或消除其中一个因素,就可以防止瓦斯爆炸的发生。但是由于矿井生产的需要,井下空气的氧含量一般都大于12%;井下潜在的引火源也较多;矿井瓦斯异常涌出或通风不良都可能使瓦斯积聚导致其浓度超限,所以井下瓦斯爆炸的发生条件很容易满足。在生产实践中,为了防止瓦斯爆炸的发生,通常采取技术措施控制火源和瓦斯浓度。

1.1.2 瓦斯爆炸影响因素

瓦斯爆炸影响因素可以分为两种,即内在影响因素和外在影响因素。内在影响因素有瓦斯浓度、点火源、氧浓度等,外在影响因素主要是环境条件因素。

1.1.2.1 瓦斯浓度

根据链式反应,一定浓度的瓦斯吸收足够的热量后,就将分解出大量的活化中心,完成整个氧化过程,并放出一定热量。如果生成的热量超过周围介质的吸收和散热能力,且混合物中又有足够的瓦斯和氧存在,则在此条件下会生成更多的活化中心,使氧化过程迅速发展为爆炸。瓦斯爆炸具有一定的浓度范围,在新鲜空气中,瓦斯爆炸极限一般为5%~16%,其化学当量浓度为9.5%(这里的瓦斯爆炸浓度极限是瓦斯和空气混合气体中瓦斯的体积浓度或摩尔浓度)时爆炸最激烈,凡是浓度低于爆炸下限或高于爆炸上限的混合物与点火源接触时都不会引起火焰自行传播。当浓度低于爆炸下限时,由于过量的空气作为惰性介质参与燃烧反应,消耗一部分反应热,起了冷却作用,因而阻碍火焰自行传播;相反,浓度高于爆炸上限时,由于瓦斯气体过剩,即氧气不足,导致化学反应的不完全,反应放出的热量小于损耗的热量,因而也阻碍火焰蔓延。爆炸极限并不是固定不变的,它会受到许多因素的影响,如可燃气体的混入,煤尘的混入,惰性气体的混入,混合气体的初始温度、湿度,火源等。瓦斯浓度是影响瓦斯爆炸反应的关键因素之一,它直接影响反应的速度和火焰的最高温度。在反应当量浓度下,瓦斯爆炸反应最快、爆炸强度也最大。

1.1.2.2 原始压力

在增加压力的情况下,瓦斯爆炸极限的变化不大。一般压力增大,爆炸极限范围扩大,且上限随压力增加而变化较为显著。对于一般的煤矿气体,环境气压对甲烷以及其他碳氢化合物的体积百分比浓度爆炸上下限也有一定影响,但一般来说,对爆炸下限影响小,对爆炸上限影响大。这是因为系统压力增加,物质分子间距缩小,碰撞几率增加,使燃烧的最初反应和反应的进行更为容易。如果压力降低,则气体分子间距拉大,爆炸极限范围会变小。待压力降到某一数值时,其上限即与下限重合,出现一个临界值;若压力再下降,系统便成为不燃不爆系统。因此,在密闭容器内进行负压操作,对安全生产是有利的。

1.1.2.3 初始温度

瓦斯爆炸发生必备的一个条件就是瓦斯浓度在爆炸极限内,研究证明,当空气中瓦斯浓度在4.9%~15.4%时易发生爆炸。最易燃烧的瓦斯浓度是8%,当瓦斯浓度在9.5%时爆炸力量最大。温度增高使甲烷空气混合气体的可爆炸性下限降低,当温度为400℃时,其可爆下限等于3%。当与温度为700~800℃的热原体接触时,瓦斯不能立刻燃烧或爆炸,而是需要经过一段时间后才被点燃,这段时间称之为感应期。这是因为瓦斯的热容量大,需要吸收一定热量后才开始分解和燃烧。在压力一定时,感应期的长短主要取决于瓦斯的浓度和火源的温度,一般情况下,在爆炸极限范围内,瓦斯浓度越高,感应期就越长;火焰温度越高,感应期就越短。

当燃烧温度为650℃时,感应期为10s;当燃烧温度为1000℃时,感应期为1s。可见,瓦斯爆炸极限不是一成不变的,它受到可燃混合气体初始温度等因素的影响而发生变化,这种变化在复杂的煤矿井下条件下是不容忽略的。

1.1.2.4 惰性气体

若混合物中加入惰性气体,则爆炸极限范围缩小,惰性气体的浓度提高到某数值时,可

使混合物不燃不爆。

1.1.2.5 混合气体中的氧浓度

瓦斯和空气的混合气体只有在瓦斯爆炸极限范围内才能发生爆炸,而瓦斯爆炸极限随氧浓度的降低而缩小。当氧浓度降低时,瓦斯爆炸下限慢慢地增高,爆炸上限则迅速下降;当氧浓度降低到12%时,瓦斯空气混合气体就会失去爆炸性,遇火也不爆炸,该点的氧浓度称为失爆氧浓度;因此,为防止火区瓦斯爆炸,控制火区内氧含量具有重要的作用。

1.1.2.6 点火源

瓦斯爆炸的第二个条件是点火源的存在。井下瓦斯爆炸的火源点燃大致分为四类,即火花点燃、热点燃、火焰点燃和机械点火花点燃,这四种点燃的作用机理有显著的差异:火花点燃可看成是井下电气设备放电激发一定空间范围内的可燃气体分子,从而获得必需的活化能的过程;热点燃可以使用突然涌入预混气体空间中的热流来描述;火焰点燃可以看成是井下瓦斯空间突然出现其他燃烧放热反应所致;机械点火花点燃也可以采用点火花点燃模型来考虑,但形成机理比较复杂,如摩擦和撞击产生机械点火花。

瓦斯点燃的最低温度为650~750℃,不同浓度的瓦斯,其点燃温度也不同,目前,认为瓦斯最容易点燃的浓度为7%~8%,在标准条件下,最小点火能为0.28 mJ,只有大于最小点燃能量的火源才能引起瓦斯的燃烧或爆炸。

点燃位置和强度对瓦斯爆炸过程的发展也很重要,独头巷道封闭端的点燃通常造成更大的超压和更快的火焰燃烧速度。例如,在掘进工作面发生的爆炸,产生的破坏性更大;点燃强度对瓦斯爆炸的影响则从实验中得到证实,在相同条件下,高强度点火源如雷管、炸药起爆可以直接引发爆轰。矿井瓦斯爆炸点燃属于弱点燃,在实验中也多使用电火花点燃方式。

1.1.2.7 爆炸有限空间体积

爆炸源所在有限体积空间(或容器)的大小对瓦斯爆炸亦有影响。实验证明,爆炸容器体积直径越小,爆炸范围越窄,这可从传热作用和器壁效应进行解释。从传热方面来说,随容器或管道直径的减小,单位体积的气体就有更多的热量消耗在管壁上。有文献报导,当散出热量等于火焰释放能量的23%时,火焰会熄灭,所以热损失的增加必然降低火焰的传播速度并影响爆炸极限。从器壁效应来说,燃烧之所以能持续下去,其条件是新生的自由基数量必须等于或大于消失的自由基数量。可是,随着管径的缩小,自由基与反应分子间的碰撞几率也不断减少,而自由基与器壁碰撞的概率反而不断增大;当器壁间距小到某一数值时,这种器壁效应就会使火焰燃烧无法继续。

1.1.2.8 外部环境条件因素

由于井下瓦斯爆炸发生在巷道内,其环境条件是复杂的,环境条件对瓦斯爆炸的影响主要有巷道尺寸、巷道构造形式、巷道中的障碍物、煤尘(粉尘)等。①巷道的尺寸:井下巷道系统是为了生产和通风而建造的,断面积较大,小尺寸的管道爆炸实验结果与实际巷道尺寸的爆炸存在一定的差别。②巷道构造形式:包括巷道是否拐弯、是否存在分支以及断面是否变化、断面形状等。这些因素对爆炸的过程有显著的影响,如巷道的拐弯会造成局部地点超压的大幅度升高和压力波的反射,而另一些因素的影响则不显著,如巷道的形状。③巷道中的障碍物:井下巷道中障碍物总是存在的,除了巷道的支护外,采掘使用的各种机械和运输设备、通风设备等是最常见的障碍物。这些障碍物的分布通常是不规律的,在进行数值

计算、实验研究时,只能简化为规律性的布置。实验研究和现场调查发现障碍物能促进瓦斯爆炸及其传播。④ 巷道中煤尘(粉尘)等:煤尘(粉尘)在瓦斯爆炸时被前驱冲击波吹扬起来散布在空气中,可能参与爆炸,从而对瓦斯爆炸的传播有重要影响。

1.1.3 煤矿井下瓦斯爆炸事故特征

煤矿井下瓦斯爆炸事故一般具有如下特征:

(1) 瓦斯爆炸事故发生的潜在性大。

由于瓦斯是成煤过程中的伴生产物,煤层中一般均含有或多或少的瓦斯。在煤矿井下采掘过程中,煤层中的瓦斯会不断地涌入采掘空间并混合于井下空气中,造成局部地区瓦斯积聚,并且只要瓦斯浓度达到爆炸界限,遇高温热源就会引起爆炸。而对于高瓦斯和煤与瓦斯突出矿井而言,要使井下瓦斯都得到有效控制,防止瓦斯积聚而达到爆炸界限,往往十分困难,这就为瓦斯爆炸的发生提供了潜在的条件,所以,矿井发生瓦斯爆炸的潜在性是比较大的。

(2) 瓦斯爆炸事故造成的伤亡事故严重。

矿井瓦斯爆炸是可燃性气体和氧气发生化学反应造成的;在瓦斯爆炸过程中,往往会产生大量的 CO_2 和 CO ,同时会产生爆炸冲击波。在冲击波的作用下,矿井通风系统容易受到不同程度的破坏,所产生的 CO_2 和 CO 气体会随紊乱的风流到处弥漫,波及范围较大,易造成大量人员的窒息、中毒伤亡事故;从国内外瓦斯爆炸事故统计资料来看,瓦斯爆炸造成的伤亡和损失是十分严重的。

(3) 影响瓦斯爆炸事故发生的因素比较复杂。

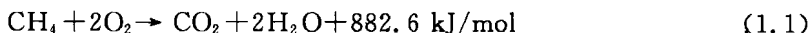
从理论上讲,瓦斯爆炸发生的条件比较简单,即只要瓦斯浓度达到爆炸界限,氧含量大于失爆氧浓度,存在一定条件的引火源,就可引起瓦斯爆炸。但实际上,影响瓦斯浓度和产生引爆热源的因素是非常复杂的。在矿井中,要把瓦斯浓度严格控制在爆炸下限以下,并消除一切引燃火源是极其困难的,往往难以办到。目前,在矿井中,虽然也采取了一些预防瓦斯爆炸的措施,但瓦斯爆炸事故还是屡有发生,其原因除了在技术上还缺乏十分有效的控制措施外,还和管理上存在漏洞有关。因此,在我国目前的技术水平条件下,对处理瓦斯爆炸事故应从技术上和管理上给予足够重视。

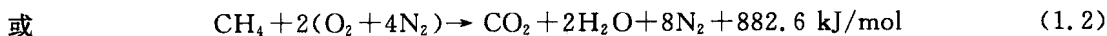
(4) 瓦斯爆炸事故还会诱发其他事故发生。

在瓦斯爆炸事故的发生发展过程中,爆炸会产生高温气流向外冲击;而煤矿井下又存在煤尘及各种可燃物质。因此,当煤尘被吹扬至空中,遇爆炸产生的高温火源时,往往会诱发煤尘爆炸,而可燃物质遇到爆炸产生的高温火源时,就会诱发外因火灾;此外,瓦斯爆炸产生的高压冲击波不仅会破坏井下各种设施设备(如通风构筑物、轨道、机械设备、管线架),还可能摧毁巷道支架,造成巷道塌冒事故。这种状况会给处理瓦斯爆炸事故和恢复生产造成极大的困难,甚至会使个别矿井难以恢复生产,导致矿井报废,如日本的夕张新矿。

1.1.4 瓦斯爆炸化学反应

国内外研究成果表明,矿井瓦斯的主要成分为甲烷(CH_4),所以矿井瓦斯爆炸可以看做是甲烷气体在外界热源激发作用下的剧烈的热化学反应过程^[1,2],其化学反应式可以简单表示如下:





瓦斯爆炸过程是一个复杂的化学反应过程,上式只反映最终结果,但根据化学动力学研究成果,它远远不能表达瓦斯爆炸过程物理和化学反应的本质特征。当爆炸混合物吸收一定的能量后,反应物分子的链断裂,离解成两个或两个以上的游离基(自由基)。这种游离基具有很强的化学活性,成为反应连续进行的活化中心,在适当条件下,每个游离基又可进一步分解,产生两个或两个以上的游离基,如此循环不已,化学反应速度越来越快,最后发展成为燃烧或爆炸式的氧化反应,最终产物是 CO_2 和 H_2O 。如果氧不足,反应则不完全,也可能产生 CO 。

1.1.5 瓦斯爆炸过程的氧化反应机理

瓦斯爆炸是一个十分复杂并极为快速的物理化学反应,爆炸过程涉及许多中间产物和瞬间产物,例如,分子、自由基、离子、电子等。人们对碳氢燃料反应时的离子形成过程进行了多年的研究,这些研究主要集中于测定不同燃烧条件下荷电粒子的浓度和分析他们形成粒子的过程,人们曾用烟迹方法来分析碳氢离子的形成过程。在过去几年中,人们对爆炸过程动力问题和燃烧过程控制进行了大量研究,简单的碳氢燃料是 CH_4 , 尽管 CH_4 和其他饱和碳氢燃料(C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_{10})的动力特征有很大差别,但是,在原始状态和激活状态下, CH 根的形成机理都是相似的。许多学者^[3-5]对 CH_4 的氧化反应机理进行了研究,虽然中间产物的许多细节还不是很清楚,但研究成果已能初步反映火焰的主要特征。Edwards J. B, Mario, Cannon S. M, Dupont V 等人^[6-9]对 CH_4 爆炸(燃烧)过程中 N_2 的反应进行了研究。 CH_4 氧化是通过一系列基元的自由基反应来进行的,瓦斯爆炸就是由这些基元的自由基反应组成的,其完整反应机理结构非常复杂。实验观察到的最普通的物质是 CO_2 、 H_2O 以及 $-\text{H}$ 、 $-\text{O}$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{CHO}$ 等大量自由基。由于瓦斯混合气体主要组成元素为 C、H、O、N,以致中间产物、瞬间产物都是 C、H、O、N 组成的分子和离子。作为活化中心,这些中间产物(特别是自由基)对反应的延续、加速及终止起重要的作用,随着这些中间产物的生成并参与反应, CH_4 在反应过程中不断地进行着碳分子、功能团、几何形状的变化,以及伴随这些过程的能量变化。因此,对甲烷的氧化机理研究重点是对自由基等中间产物的生成、反应形式的研究。

G. J. Minkoff 等人^[10]对低温(小于 700 K)反应进行了许多详细的研究,其结果表明,在低温条件,即甲烷刚点燃阶段,其反应机理主要为化学反应式(1.1)所示的反应,当反应持续进行,放出大量的热,并产生许多离子、分子等中间产物和瞬间产物时,其反应机理见图 1-1。

对于 CH_4 ,一般在高温下,其反应进程可以简化为:



上式可认为是 CH_4 、 H_2 、 CH_2O 、 CO 的氧化,但随着燃烧的不断进行,放热量增大,反应区的温度升高,反应速度迅速增大,反应速度的迅速增大又对反应进行程度、放热、温度升高起正反馈的作用,出现了爆燃,在这期间,具有巨大的动能、动量、冲量的高温离子、分子、电子大量产生,并剧烈碰撞,这样就撞击了体积分子数占大多数的 N_2 分子,并促使其发生分解,导致在反应过程中 N_2 参加了反应。 N_2 分子参加反应严重地改变了所有过程的动力特性,即 CH_4 在空气中的爆炸反应过程与 CH_4 在氧气中的反应过程不一样,甲烷在空气中的

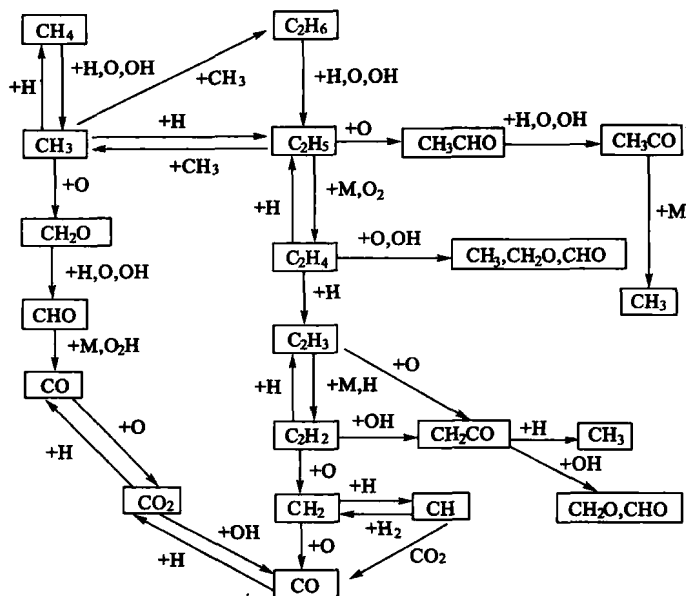


图 1-1 甲烷与氧的详细反应机理结构图

详细反应机理见图 1-2。因此,简而言之,我们考虑 CH_4 和空气的反应是在温度 $1\,000 \sim 1\,500\text{ K}$, 压力 $0.1 \sim 1\text{ MPa}$, 不同空气燃料比例时的反应。通常分子旋转、振动、转化程度处于热力学平衡状态,所以在此情况下,描述温度、成分变化的方程包含能量方程、中性荷电状态粒子密度变化方程以及状态方程^[11]。

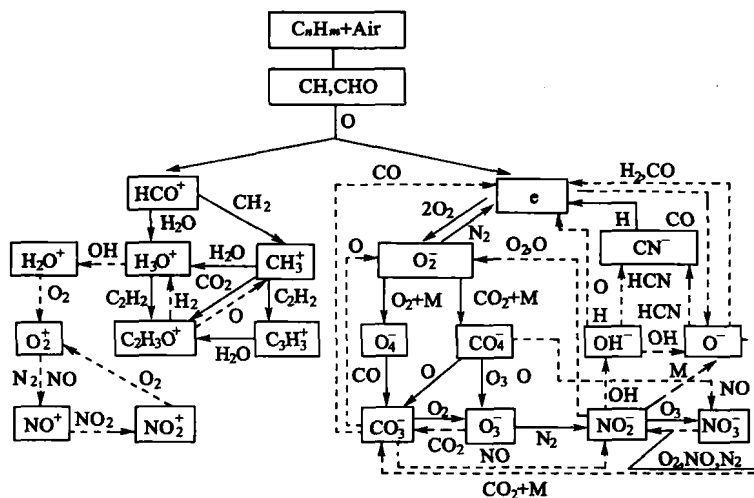


图 1-2 甲烷在空气中的详细反应机理结构图

直到现在,人们才认识到在 CH_4 和空气的混合物中,促使粒子荷电的主要途径是化学过程 $\text{CH} + \text{O} \rightarrow \text{CHO}^+ + \text{e}^-$ 和 $\text{CH}(\text{a}^4\Sigma^-) + \text{O} \rightarrow \text{CHO}^+ + \text{e}^-$, 电子接触到 O_2 分子就形成

O_2^- ,再结合 O_2 和 CO_2 就形成了 O_4^- 和 CO_4^- 离子,类似这个过程, CHO^+ 的 H^+ 和 H_2O^+ 、 CH_2 产生 H_3O^+ 、 CH_3^+ ,它们再结合 C_2H_2 又形成 $C_2H_3O^+$ 、 $C_3H_3^+$,在后来的时间,正离子 NO^+ 形成,负离子 CO_3^- 、 O_3^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 产生,在混合物中, $O^- + HCN = CN^- + OH$ 和 $OH^- + HCN = CN^- + H_2O$ 反应就变成 CN^- 离子形成的重要过程。离子形成的另外一个途径是电子和 O_2 的反应: $O_2 + e^- + M \rightarrow O_2^- + M$ 。然而,当空气作为氧化剂时,荷电粒子形成的可能途径是 $N + O = NO^+ + e^-$,许多学者对冲击波后 $N + O$ 的反应及电子放电进行了广泛的研究,针对瓦斯爆炸反应过程中出现的情况,主要对饱和、不饱和碳氢根离子与 O_2^+ 、 O^+ 、 H_3O^+ 、 NO^+ 、 N^+ 、 N_2^+ 、 O^- 、 O_2^- 、 NO_3^- 离子的形成反应进行研究,即 CH_4 、 C_2H_6 、 O^+ 、 N^+ 、 N_2^+ 和离子分子的反应(包括 CH_4 与空气反应过程中形成的复合物)。为了描述 CH_4 和空气的燃烧动力特性,A. M Starik 和 N. S Titova 分析了 392 种反应、59 种生成物质(包括中间产物、瞬间产物和燃烧产物): H_z 、 N_z ($z=1,2$)、 O_x ($x=1,2,3$)、 HQ_z 、 H_2O_z 、 NO_x 、 N_2O 、 HNO_y ($y=1,2,3,4$)、 N_zH_y 、 C_z 、 CH_y 、 C_zH_n ($n=1\sim6$)、 CO_z 、 $C_2H_yO_z$ 、 CN_z 、 C_2N_z 、 NCO 、 HCN ,这些产物与前人的实验观察结果符合。

除了 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NO^+ 离子的形成外, CH_4 和空气的燃烧与 CH_4 和 O_2 燃烧的不同之处在于:一方面是达到平衡状态的时间不同;另一方面是离子浓度的变化不同。

1.1.6 瓦斯爆炸动力特性

在燃烧理论中,认为当气流的流速较低时,燃烧速度较慢,火焰锋面前后的压差较小,称之为缓燃,一般的工业及生活中的燃烧均属于缓燃,当预混气体的流速大到有冲击波出现并同时伴随着燃烧时,在火焰锋面两侧有很大的压力突变,称之为爆燃,此时的燃烧速度极快;爆轰则是由化学反应支持的超音速冲击波(相对于波前状态)。化学反应区通常被称为“火焰区”、“火焰阵面”、“反应波”等。在火焰区内,发生着快速反应,而且通常会从火焰区发出光亮。

湍流火焰及加速过程更是直接导致爆轰转捩、产生爆炸灾害的关键环节,因此,对气相湍流预混火焰传播的研究已有近 100 年的历史,这方面的研究很多。迄今为止,研究手段主要是实验,并从实验数据中总结有用的经验公式,这方面的理论与数值计算主要是对物理模型的探讨。研究目的主要是确定湍流燃烧速度与层流燃烧速度之间、湍流燃烧速度与湍流参数之间的关系,从层流燃烧到湍流燃烧的转变、进而向爆轰转变的可能性。

因此,爆燃是由前驱压力波和随后的火焰阵面构成的,是一种不稳定状态的燃烧波,它可以因约束条件的减弱、排气及时等使压力波减弱,直至压力波减弱为定压燃烧。此时爆燃波传播速度很慢,在行进的每一个时刻压力都能达到平衡,所以该种燃烧不会引起压力升高或形成压力波,更不会产生破坏性的冲击波。相对而言,定容爆炸就是爆燃的另一个极端,是一个理想化的概念,假定容器中混合气体被突然加热到快速燃烧温度,或容器中混合气体瞬间被点燃而发生的爆炸,可以将定容爆炸看成是爆燃速度无限大的一种极端情况,是一个瞬时的整体爆燃形式。对于实际密闭容器中混合气体的爆炸参数可以近似使用定容爆炸的参数。那么对于爆燃波,若其边界约束增强,压力波强度增强,火焰加速,直至火焰阵面追赶上前驱压力波阵面,此时火焰阵面和压力波阵面合二为一,形成一个带有化学反应的冲击波,就是我们通常称的爆轰波,那么此过程就称之为 DDT 过程(爆燃转爆轰过程)。目前,多数认为^[12,13],可燃气体的引爆过程是按以下的方式发展的:引爆源产生的火焰在气体

中产生一个压缩波,在引爆源的某一距离处逐渐变成冲击波,使气体流动变成湍流,湍流的作用使火焰燃烧面积增加,反应加剧,这样就逐渐加强了冲击波,火焰燃烧速度逐渐增加并赶上前驱冲击波,最终发展为爆轰。所以瓦斯混合气体从被点燃到爆轰形成共经历四个阶段:① 点火阶段;② 火焰缓慢传播阶段,在这一阶段,放热化学反应阵面前气流位移很小,火焰传播(燃烧)速度也很小;③ 火焰传播再加速阶段,在这一阶段,湍流火焰出现,形成冲击波;④ 爆燃转爆轰阶段,在这一阶段,DDT 过程发生,产生超高压,并有可能形成稳定爆轰。一般气体爆炸事故绝大多数是以爆燃形式出现的,而很少以爆轰这种极端形式出现。相比较而言,爆燃事故所形成的爆炸波,其特点是爆炸波的峰值压力较低,但压力的持续时间较长,因而冲量大,产生的破坏作用也很大。

1.2 瓦斯爆炸危害及破坏机理

1.2.1 瓦斯爆炸危害

早在 1868 年,Thar 就发表了一份关于爆炸事故毁伤效应分析报告,但是当时对冲击波伤害机理的理论研究还不成熟。多年的实验研究和多次矿井瓦斯爆炸事故现场勘察结果表明,瓦斯爆炸产生的致命危险因素有:爆炸冲击波的超压破坏及作用时间、爆炸热辐射高温灼烧、井巷内有毒有害气体成分以及窒息等^[14,15]。目前国内外有关瓦斯爆炸破坏和伤害研究的重点是冲击波的破坏和伤害机理与效应^[16,17],对瓦斯爆炸后产生热辐射作用(包括爆生气体的热辐射作用)的研究较少。实验室测试结果显示火焰锋面的最大传播速度可达到 2 500 m/s,爆炸现场的温度可以达到 2 300 ℃。爆炸后一段时间内的受冲击的矿井巷道大气成分会发生明显变化,产生大量的 CO 和 CO₂,在极短时间内致人死亡。瓦斯爆炸产生的强大冲击波在冲击巷道的同时,也往往危及爆炸源附近一定范围内井下工程的稳定与安全。当火焰速度小于 100 m/s 时,所产生冲击波可近似处理成声波,引起的结构破坏较小;一旦火焰加速达到 200 m/s 时,则会引起严重的湍流效应,这种高速火焰的压力波引起的爆炸波的破坏效应与爆轰波产生的破坏效应相当,产生的结构破坏程度很大,冲击波的破坏范围可达数千米^[18,19]。在一些矿井,瓦斯爆炸产生的冲击波甚至通过井口破坏地面建筑物,伤害地面人员。在瓦斯爆炸事故调查中还发现,爆炸区域的人员和设备受高温的破坏很大^[20],特别是当整个巷道充满瓦斯或产生连续瓦斯爆炸,其反应时间相对较长,瓦斯爆炸火球产生的热杀伤和窒息作用非常明显,尤其是在独头巷道,这些破坏作用更加明显。

1.2.2 瓦斯爆炸冲击波破坏机理

由于瓦斯从煤与围岩中涌出并积聚在一定的空间内,所以矿井瓦斯爆炸是一种非点源爆炸,其爆炸特性与凝聚相炸药爆炸特性有很大区别,这类爆炸对环境条件的依赖性很强。其爆炸过程涉及湍流作用、传热传质、化学反应及火焰与压力波之间的耦合作用,该过程的显著特点是爆炸产生冲击波,从而具有相当大的破坏作用,一般情况下,火焰在传播过程中不断地被加速,在一定条件下会诱发出冲击波,甚至产生爆轰,具有更大的破坏作用。通常瓦斯爆炸的传播形式多为亚声速传播的爆炸燃烧。爆炸过程从时间上可分为瓦斯被点燃和爆炸传播两个阶段,瓦斯爆炸的破坏性主要体现在爆炸传播阶段,传播阶段的火焰和冲击波是造成破坏的主要因素。