

国家自然科学基金重点项目子课题 (50534090) 资助

国家自然科学基金面上项目 (50674090) 资助

资助

2007A001) 资助

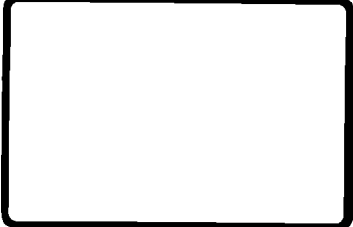
版基金资助

真空腔对瓦斯爆炸 抑制作用研究

吴征艳 蒋曙光 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



基金重点项目子课题(50534090)资助

国家自然科学基金面上项目(50674090)资助

国家青年科学基金(50804047)资助

中国矿业大学青年科研基金(2007A001)资助

中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

真空腔对瓦斯爆炸抑制作用研究

吴征艳 蒋曙光 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

鉴于现有阻隔爆装置的现状,本书采用实验研究和理论分析等手段对管道内(受限空间)瓦斯爆炸的真空腔抑制作用进行一系列研究。从对受限空间内可燃气体爆炸传播规律和爆炸波破坏效应的研究入手,分析了爆炸从爆燃向爆轰转变时气体状态参数的变化规律及瓦斯爆炸强度的影响因素;给出了衡量爆炸波破坏效应的特征参量的计算方法和数学公式,提出火焰传播距离、P-I 准则三个指标的瓦斯爆炸抑制作用评价模式。通过改变甲烷浓度、腔体结构尺寸,从火焰传播速度和距离、最大超压峰值、冲击波作用的冲量大小等参量指标综合考察真空腔结构的泄爆效果,研究结果证实真空腔具有较好的熄火、泄压作用,并找出具有最佳抑爆效果的真空腔结构形状和安装位置。基于爆炸传播过程的不同,本书分别从热理论、表面更新理论和链锁反应理论及管道内爆炸发展等方面对真空腔的泄爆机理进行详细分析,指出表面更新理论较双膜理论更能较好地解释连续流和稀薄流之间的传质过程。

图书在版编目(CIP)数据

真空腔对瓦斯爆炸抑制作用研究/吴征艳,蒋曙光著.

徐州:中国矿业大学出版社,2009.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0512 - 4

I. 真… II. ① 吴…② 蒋… III. 瓦斯爆炸—真空处理—研究 IV. TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 203831 号

书 名 真空腔对瓦斯爆炸抑制作用研究

著 者 吴征艳 蒋曙光

责任编辑 周 红

责任校对 何晓惠

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 徐州中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 9 字数 171 千字

版次印次 2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

定 价 20.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

煤矿工业安全生产的最突出问题是煤矿瓦斯灾害比较严重,重特大瓦斯事故多发。事故统计表明:仅瓦斯爆炸造成的重大伤亡事故就占整个煤炭行业重大伤亡事故的70%以上。随着开采深度的增加、机械化程度的提高、开采强度的增大,瓦斯涌出量会进一步增大,瓦斯灾害的治理仍是煤矿灾害防治工作的重点。在我国预防煤矿瓦斯事故过程中除抽放、监控技术等措施外,抑爆是有效地减弱和控制爆炸灾害的重要手段,在工业爆炸防治实践中得到了广泛的运用。然而,我国“六五”期间开发研制的系列煤矿隔爆抑爆装置如隔爆水槽、水袋、岩粉棚等,大都是被动式隔爆,对火焰只起到降温作用,效果不理想,缺乏对湍流场的抑制作用。阻爆隔爆设施的安设位置也缺乏科学的依据,在实际使用中占用空间大,并没有起到应有的作用等。

为此,作者在国家自然科学基金项目和中国矿业大学资助下,研制出具有原始创新性的真空腔抑爆技术,开展了几十次不同条件的真空腔抑爆实验,较系统地考察了真空腔抑爆特性,并找出具有最佳抑爆效果的真空腔结构形状,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所著而成。

本书共分6章:第1章介绍了国内外阻隔爆技术研究现状及发展形势,提出了本书的主要研究内容;第2章从受限空间内可燃气体爆炸传播规律和爆炸波破坏效应的研究入手,分析了爆炸从爆燃向爆轰转变时气体状态参数的变化规律及瓦斯爆炸强度的影响因素;第3章介绍了自行研制的真空腔结构及抑爆实验系统;第4章在不同实验条件下对真空腔抑爆作用进行试验研究;第5章分别从热理论、表面更新理论和连锁反应理论及管道内爆炸发展等方面对真空腔的抑爆机理进行详细分析;第6章是对全书研究成果的总结及对相关研究工作的展望。

本书在成书过程中广泛参阅了前人的研究成果和国内外有关著述,在此谨致谢意。感谢中国矿业大学蒋曙光教授在实验研究和理论分析中给予的大量帮助,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。

本书中提出的许多新思想和新观点还有待于今后进行更深入细致的研究。由于作者水平有限,书中疏漏不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2009年8月

主要符号表

拉丁字母符号

A	面积	M	相对分子质量
C	音速	p	压力
D	绝对速度;管径	q	热量
D_L	分子扩散系数	Q	能量
DN	等级破坏准数	r	位置
e	比热力学能	R	通用气体常数;径向距离
$E_{a,b}$	内能	s	熵
$E_{a,f}$	活化能	t	时间
G	常数	T	温度
i	比冲量	u	速度
I	冲量	V	体积
k_L	气相传质分系数	W	重量
K	反应速度常数	Δx	间距
l	距离	Y	气体浓度
m	质量	x, y, z	坐标

希腊字母符号

γ	绝热系数	ϕ	半径
λ	化学反应度	τ	时间
ϵ	表面更新频率	ξ	拉格朗日变量
ρ	密度	Γ	积分常数
δ	长径比		

下 角 标

0 初始的;未燃区;波前	e 出口截面
1 扰动区	f 火焰;燃烧波
2 已燃区	i 预热带;分量
— 负相;散热	in 入口
+ 正相;反应放热	out 出口
a 空气	p 压力
b 反应带;背压	s 持续
c 临界状态	ν 比热容
d 动作	w 激波

上 角 标

' 脉动分量	— 低于常压
0 初态	* 特征值
n 多方指数	

无 量 纲

Ma 马赫数	$\hat{u}$ 速度
$\hat{p}$ 压力	$\hat{\mu}$ 黏度
$\hat{t}$ 时间	$\hat{\rho}$ 密度

目 录

1 绪论	1
1.1 国内外阻隔爆技术研究现状	2
1.2 国内外研究成果概述	9
1.3 本书研究内容	10
2 瓦斯爆炸传播规律及爆炸波破坏机理	12
2.1 瓦斯爆炸传播理论	12
2.2 爆炸波的破坏效应	28
2.3 本章小结	38
3 真空腔抑爆研究的实验系统	39
3.1 真空的性能	39
3.2 实验目的及真空腔抑爆原理	40
3.3 实验系统	41
3.4 实验步骤和实验系统工作原理	48
3.5 实验项目及测点布置	50
4 真空腔抑爆作用的实验研究	56
4.1 甲烷浓度对无腔管道内爆炸传播的影响	56
4.2 相同位置接入同一真空腔的抑爆作用	67
4.3 不同位置接入同一真空腔的抑爆作用	78
4.4 同一位置接入不同形状和尺寸的真空腔的抑爆作用	89
4.5 多级真空腔的抑爆作用	105
4.6 本章小结	112
5 真空腔抑爆作用的机理分析	114
5.1 爆燃和爆炸传播过程中的抑爆	114
5.2 爆轰的抑爆机理分析	121
5.3 本章小结	126

6 结论及展望	127
6.1 结论	127
6.2 展望	128
参考文献	130

1 绪 论

我国“十一五”规划同步编制的《能源中长期发展规划》提出了“煤为基础、多元发展”的战略,但我国是“富煤、少气、缺油”的能源结构,并且也是世界上少数几个一次性能源以煤为主的国家,“煤为基础”是一个难以在短期内改变的现实。我国 2004 年的煤炭产量达到 19.56 亿 t,比上年(16.67 亿 t)增长 17.3%,2005 年达到 20.6 亿 t,同比增长 5.3%,2006 年是“十一五”规划的第一年,若要符合“单位国内生产总值能源消耗比‘十五’期末降低 20%左右”的规划建议,煤炭总产量就须继续减缓,然而我国煤炭产量已经达到了 23.25 亿 t,同比增长了 12.86%^[1]。预计到 2050 年,随着新能源和可再生能源、水电和核电站的发展和推广,煤炭在一次性能源中的消费比重将会有所下降,但还将占我国一次能源生产和消费结构的 50%以上。因此,煤炭在相当长的时期内仍将是我国的主要能源^[2-3],必须确保煤炭工业持续、稳定、健康地发展。

但是,制约我国煤矿工业安全生产的最突出问题是煤矿瓦斯灾害比较严重,重特大瓦斯事故多发。据统计,在 100 个国有重点煤炭生产企业的 609 处矿井中,高瓦斯矿井占 26.8%,煤与瓦斯突出矿井占 17.6%,低瓦斯矿井占 55.6%,而在国有地方和乡镇煤矿中,高瓦斯矿井和煤与瓦斯突出矿井也占到 15%左右。一旦这些可燃物质与空气混合并在外界火源作用下发生爆炸,往往造成矿毁人亡的恶性瓦斯爆炸事故,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灾害,从而加重了灾害后果。事故统计表明:仅瓦斯爆炸造成的重大伤亡事故就占整个煤炭行业重大伤亡事故的 70%以上。近几年,煤矿瓦斯爆炸事故频发,造成大量的人员伤亡和严重的财产损失。如 2005 年,仅一年时间里全国煤矿发生瓦斯事故 405 起,死亡 2 157 人,占全国煤矿事故总死亡人数的 36.0%,煤矿百万吨死亡率为 2.81,约是美国的 70 倍、印度和俄罗斯的 7 倍、南非的 17 倍、波兰的 10 倍。2005 年 2 月 14 日的辽宁阜新孙家湾煤矿特大瓦斯事故造成 214 人死亡,这是 45 年来全国死亡人数最多的一次矿难。2006 年,全国煤矿共发生瓦斯事故 327 起,死亡 1 319 人,占全国煤矿事故总死亡人数的 27.8%,百万吨死亡率为 0.567,但却没有发生一起死亡 50 人以上特别重大瓦斯事故,达到了历史最好水平。

随着开采深度的增加、机械化程度的提高、开采强度的增大,瓦斯涌出量将进一步增大,瓦斯灾害的治理仍是煤矿灾害防治的重点。目前,我国预防煤矿瓦

斯事故除抽放、监控技术措施外,还采用作为煤矿控制或减弱瓦斯爆炸的主要手段之一、我国“六五”期间开发研制的系列煤矿隔爆抑爆装置如隔爆水槽、水袋、岩粉棚等,其在煤矿及其他工业爆炸防治中得到了广泛的运用并发挥了一定的作用。但是,这些隔爆抑爆装置大多是被动式隔爆,对火焰只起到降温作用,效果不理想,缺乏对湍流场的抑制作用,且阻爆隔爆设施的安设位置也缺乏科学的依据,在实际使用中占用空间大,并没有起到应有的作用。因为“抽放、监控”措施超前预防时空较大,而“隔爆水槽、水袋、岩粉棚”等又是极其被动式的预防,因此,其间缺少一个非常重要的抑爆环节,需要进一步开展瓦斯爆炸动力学特性及其阻爆隔爆新技术的研究工作。

如今,针对我国煤层瓦斯赋存条件复杂多变的总体开发背景,立足于降低煤矿重大瓦斯事故发生率和开发有效防治新技术的根本目的,国家“‘十一五’安全生产科技发展规划”已将矿井防火新材料和抑制剂、抑爆技术与装置分别列为政策引导项目和重点推广技术。因此,探索新型的阻火抑爆材料和结构已是当前煤矿安全生产的迫切需要,也顺应了安全形势发展的潮流。

1.1 国内外阻隔爆技术研究现状

根据大量地质资料,矿井瓦斯的主要成分是甲烷(CH_4),瓦斯爆炸可以看做是甲烷气体在外界热源激发下的剧烈的热化学反应过程,并伴有高温高压和有毒有害气体。煤矿瓦斯爆炸在极短时间内可产生巨大的爆炸威力,使数千米的巷道受到破坏,爆炸产生的火焰甚至能喷出井口,其破坏程度极具毁灭性。因此,为防止事故的发生,从根本上消除爆炸事故的隐患,首先采取包括预防有效点火源的产生、阻碍瓦斯等可燃性气体与空气混合物的形成、惰化爆炸危险场所等措施;其次,一旦瓦斯爆炸发生,就要防止事故的扩大和蔓延,使事故控制在一定的范围内,或采取各种技术措施,使爆炸效应降低到安全所允许的最低限度标准。通常采用抗爆结构实现爆炸约束、抑爆和泄爆以及防止二次爆炸产生等防治手段。

1.1.1 阻隔爆技术的应用研究

抑爆是能够有效减弱或控制爆炸灾害的重要手段,并在工业爆炸防治实践中得到了广泛的运用。“六五”以来,我国相继开展了各种阻隔爆技术的研究^[4-12],取得了一定的进展。总的说来,抑制爆炸的原理有降温、惰性化、中止反应、阻隔、淬熄等;采用的手段有高压水幕、岩粉棚、水袋、干粉灭火剂、隔火棚淬熄等。根据抑爆方式的不同,抑爆技术可分为被动式抑爆和自动式抑爆两大类。

(1) 被动式抑爆技术

被动式抑爆技术是利用爆炸激波自身的能量作用于预先设置在爆炸传播通道中的抑爆剂,形成一定区段的抑爆带,扑灭随后到达的传播火焰,同时耗散激波能量,防止形成过高压力,达到抑爆的目的。被动式抑爆剂可以是化学活性的,如 ABC 干粉(磷酸铵盐)、BC 干粉(碳酸氢钠)等;也可以是化学惰性的,如岩粉、水等。隔爆水槽、水袋和岩粉棚都是基本的被动隔爆方式。

根据被动式抑爆原理知道,其触发和消焰剂的喷洒都是由瓦斯、煤尘爆炸所产生的前驱爆炸波完成的。就井下巷道中隔爆棚布置图来说明其动作原理,如图 1-1 所示,当发生瓦斯、煤尘爆炸时,在爆炸火焰到达隔爆棚区前,爆炸产生的前驱爆炸波掀翻盛放岩粉的木板或使水槽、水袋破碎,形成弥漫飞扬状态的惰性岩粉或水雾,在巷道中形成扑灭火焰的抑制带,起到吸热、降温、阻燃的作用,使瓦斯煤尘爆炸火焰限制在爆源附近。

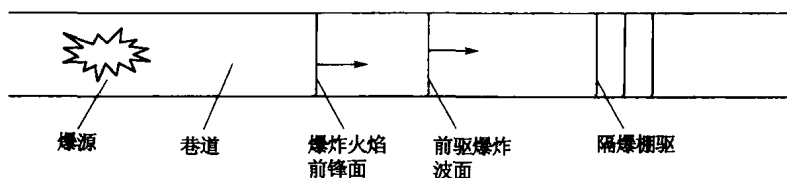


图 1-1 爆炸火焰、前驱爆炸波及隔爆棚的位置关系

被动式抑爆装置最早采用撒布岩粉和设置普通岩粉棚,波兰、澳大利亚、南非、英国、美国等国还制定了相应的标准,虽然对于爆炸传播的防止效果较好,但由于采煤机械化的普遍使用,采煤强度不断增大,所需风量增大,风速增加,使得工作环境恶劣,从而危害人体健康;再者,井下潮湿环境会使岩粉棚中干燥的岩粉吸湿结块,岩粉棚隔爆设施动作后减少甚至失去飞扬能力,不能形成有效的岩粉烟,还易混入煤尘等可燃物,从而降低甚至失去隔爆性能。在对岩粉的惰性取样分析化验时,若发现可燃物含量超过设计规定,须更换岩粉,这给技术管理工作增加了难度。因此我国煤矿现在几乎不采用这两种方法。

对于水抑制瓦斯爆炸机理,主要体现在水抑制了瓦斯爆炸自由基的产生速度和数量,从而控制了瓦斯燃烧速度,起到抑爆效果。在 20 世纪 90 年代,煤炭科学研究总院重庆分院开发了以水作为消焰剂的隔爆水槽(脆性)和隔爆水袋。然而,水棚的水分易蒸发、缺失,需要经常冲水、换水,增加了工人的工作量和劳动强度,尤其是在风量大、气温高的采区,水中易混入矿尘,造成灭火水雾因水量不足而不能有效隔断爆炸火焰的传播。回采巷道中的水袋棚,按设计规定应该

采用易脱钩吊挂的方式,但实际应用中的水袋棚却多用铁丝拴吊于棚梁上,这使得此被动形式的隔爆设施在动作时雾化愈加不充分,大大降低隔爆的效果。

煤矿隔爆棚发挥隔爆作用的前提条件有两个:一是前驱爆炸波能掀翻隔爆棚,形成悬浮状态的岩粉或水雾带;二是爆炸火焰滞后前驱爆炸波到达隔爆棚的时间大于隔爆棚的动作时间过程,同时又小于隔爆棚的动作时间与水雾或岩粉的持续时间之和,因此隔爆棚的隔爆条件可表达为:

$$p \geq p_d$$

$$t_d < (t_w - t_i) < t_d + t_s$$

式中, p 是前驱爆炸波压力; p_d 是隔爆棚动作所需压力; t_d 是隔爆棚动作所需的时间; t_s 是水雾或岩粉的持续时间; t_w 是前驱爆炸波到达隔爆棚的时刻; t_i 是爆炸火焰到达隔爆棚的时刻。

由此,抑爆性能失效的原因除了受本身的抑爆剂质量影响外,还与这两个基本条件有关,国内相关文献已有报道^[13-15]。如果阻隔爆装置的动作压力过低,即灵敏度过高,则火焰前面较远处稍低一些的前驱压力波就会使阻隔爆装置动作,在火焰到达前就释放出了抑制剂,这样在火焰到达阻隔爆装置位置时,由于抑制剂已被提前释放出来,且因重力作用大部分已沉落到巷道的底板上,只剩下悬浮在空间中浓度较低的抑制剂。虽然含有抑制剂的瓦斯气体可能超出了爆炸界限,但由于爆炸火焰具有较高的内聚力和较好的整体性,火焰仍可能在巨大的爆炸产物压力的推动下,穿过该区域并引爆前面的瓦斯气体而继续向前传播,阻隔爆装置起不到阻隔爆的作用。如果阻隔爆装置的动作压力高于前驱压力波的压力,或阻隔爆装置的动作延迟时间超过了火焰到达装置所需的时间,其释放的抑制剂就会降落在火焰区后部,甚至落在火焰区之后,则未受到抑制剂影响的火焰前部就会继续向前传播,阻隔爆装置也起不到阻隔爆的作用。

针对过去被动式隔爆措施不能有效地隔绝弱爆炸且保护范围仅为 60~200 m 的不足,“八五”以来又研制成功了动作更为灵敏、保护范围为 40~240 m 的 XGS 型隔爆水棚,提高了被动式隔爆措施的有效性和可靠性^[16]。同时 XGS 型隔爆棚安装移动方便,可适应工作面的快速推进,实现了对工作面的动态保护。煤炭科学研究总院重庆分院也利用 7.2 m² 断面、896 m 长的爆炸试验巷道和地面系列钢制爆炸试验管道,研制成功了 ZGB-Y 自动隔爆装置和 GD 隔爆水袋、GPS 隔爆水槽和 FFY 型防潮岩粉棚等系列被动式隔爆棚,并在煤炭行业得到了广泛的推广应用。

(2) 自动式抑爆技术

尽管隔爆棚技术正在不断更新完善,但隔爆棚在爆炸发生后的动作存在不定性,此外,在低矮、狭窄和拐弯多的巷道中使用也极其不利,不能发挥抑爆作

用。针对这些缺点各国研究并使用了自动式抑爆技术。

自动式抑爆技术是通过传感器等敏感元件及时探测爆炸信号(如爆炸压力和爆炸火焰等),并通过控制单元快速触发抑爆剂喷洒装置动作,以高压引射或爆炸抛洒等方式喷洒抑爆剂,扑灭火焰和衰减爆炸激波,完成抑爆。适用于自动隔爆装置的抑制剂主要有液体抑制剂水、水加卤代烷,粉末无机盐类抑制剂和卤代烃。

图 1-2 为一典型的用抑爆剂抑制爆炸波的原理。一旦容器内可燃气体燃烧爆炸,在爆炸初期传感器即可发现爆炸信号,并迅速打开抑制剂系统向容器内喷洒抑制剂,同时命令位于气体进口和出口位置的隔爆装置动作,将容器内燃烧火源与所有相连管线隔离,扑灭火焰,抑制爆炸的发生。

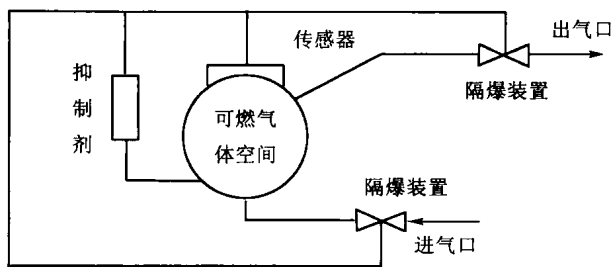


图 1-2 自动抑爆系统原理

对于传播速度较低的火焰来说,抑爆剂可采用惰性粉末或水雾,通过物理机制消除火焰的能量;也可采用粉状的有机酸盐、碳酸盐和碳酸氢盐一类的化学物质(如单铵磷酸盐),它们能够利用火焰的能量发生反应,产生 CO_2 ,而后者是一种耐用又有效的抑爆物质。然而对于爆轰这样的高速传播过程,若依然采用上述技术则要求有灵敏度更高的阀门和更有效的抑爆剂。卤代烃(哈龙)系列产品是灭火抑爆效果最佳的抑制剂,典型的有 1211(CF_2ClBr),其工作原理是它们能与氢原子和氧原子强烈反应,与作为燃烧反应活性中心的中间功能团强烈反应,使之变成稳定的化合物,从而抑制链式反应的发展。但该方法会破坏臭氧层,随着人们环境意识的增强,卤代烃系列产品对环境的破坏已引起世界各国的重视,世界范围内已开始限制使用造成环境污染的卤代烃系列产品。惰化技术要求整个生产装置封闭,抑制剂始终充满可燃混合物的流动空间,抑制剂消耗大,并且它们是目前公认的运行成本最高的技术。

目前,南非 HR 公司以光学原理生产出的主动式抑爆系统,现已在我国山西省晋城地区煤矿中试用。其工作原理是:采用外接电源和内置电源两种供电方式,当作业监测区出现瓦斯爆炸时,监测装置以光学原理捕捉信号并传送到信

号装置进行光谱分析,如信号被解析辨识为设定的事故对象,则发出抑爆指令,触发装置及其配套的储能器立即响应,排出处于压缩状态的抑爆介质(氩气和磷酸铵盐粉末状混合物),迅速生成高能抑爆屏障,抑爆屏障对爆炸产生的冲击波压力 and 高温进行降压降温,实现主动抑爆。然而该技术以光学原理实现现场的实时监测,只适用于直线巷道中。

1.1.2 淬熄技术

· 阻火器由外壳、阻火芯及附属配件组成。阻火器是阻止可燃气体、易燃液体、易燃蒸气的火焰蔓延和防止回火的安全装置,目前广泛用于石油化工行业。其基本工作原理为淬熄,当火焰、热气体快速穿过阻火器时,通过阻火元件的孔壁向外释放热量,火焰、热气体在完全穿过阻火器之前被充分冷却,实现阻火^[17]。

金属材料阻火元件能够使火焰淬熄的理论有两种^[18,19]:一种是热理论,即火焰进入阻火结构时,由于阻火结构夺走了火焰的热量而阻止火焰的传播;另一种是连锁反应理论(器壁效应),即火焰在结构表面上碰撞失去了自由基,从而燃烧反应停止,阻止了火焰传播。多数学者认为热理论是火焰发生淬熄的主要原因,但也有人认为连锁反应理论较为接近实际^[20]。

阻火器按阻火芯件的不同可分为金属网型、波纹型、平行板型、多孔板型、焊接金属蜂窝型、泡沫金属型、充填型、水封型等结构。文献^[11,21,22]对这些结构的特点和设计要求进行了详尽的描述,指出烧结金属多孔结构和管式结构比较具有发展价值,尤其前者最具发展潜力,目前广泛使用的波纹板型,生产时可以随意变换其结构形状,在没有找到完全新型结构之前不失为一种良好的阻火装置。

津田健(津田健 & 北条英光,1989;北条英光,津田健 & 加纳能一,1984)对多层金属网的层数、间隔以及放置角度对消焰性能的影响进行了实验研究,证明金属丝网对火焰的传播的确有抑制作用。Dupre(1988)利用衬在管壁上的多孔材料测得了爆轰波在阻尼段上游和下游的变化情况,认为横波的声吸收是爆轰波在通过阻尼段后衰减以致蜕变的主要原因。

大连理工大学的喻健良、孟伟等^[23-25]在内径为 81 mm、长度从 1.4 m 至 2.9 m 可调的一端封闭、一端开口的圆形管道中研究了多层丝网结构对开敞空间内乙炔-空气混合可燃气体压力波的抑制作用规律及较高火焰速度时火焰淬熄过程,得到了描述丝网几何参数(目数、层数、金属丝直径等)与临界淬熄速度之间规律的经验公式。

中国科学技术大学郭长铭等^[26,27]设计制作了由起爆段、过渡段、稳定爆轰段和测试段构成的 40 mm×40 mm 的方形截面封闭激波管,在此基础上研究了

多孔钢板对气相爆轰波传播的影响,实验表明多孔钢板等一类吸收材料具有吸收横波削弱爆轰波的作用,但因其表面除了钻透的孔外就是坚硬平整的钢板,有利于反射,容易造成较强的自动点火机制,同时,密布的孔会造成湍流混合,在这两种机制的共同作用下则会出现 DDT 过程,对抑制可燃气体爆炸极为不利。相对而言,金属丝网和不锈钢纤维产生强反射激波造成自动点火,这种机制比较弱,很容易将爆轰转变为强爆燃。

1963 年 K. N. Palmer 和 Tonkin 研究了丙烷—空气爆燃火焰通过波纹板阻火器时的淬熄规律,并给出了火焰传播速度与三角形孔径(体现在单位面积上三角形孔的数量)及淬熄长度的关系,并得到实验结果的支持。1972 年 Rogowski 和 Ames 研究了波纹板阻火器表面的驻定火焰燃烧现象,即阻火器的耐烧实验,给出了在一定燃气流量下阻火芯表面温升与时间的关系。

中国科学技术大学的周凯元等^[28,29]在一截面为 110 mm×20 mm、长为 4 m 的扁矩形激波管中对甲烷、丙烷、乙炔和氢气四种气体与空气的预混气体穿过平行板狭缝时的爆燃淬熄进行了实验和理论研究,给出了火焰传播速度与淬熄间距、淬熄长度之间的关系,对气体爆燃火焰的淬熄理论模型进行了探讨。采用相似的实验装置对我国在 20 世纪 80 年代末期新研制的波纹板阻火器的阻火性能作了实验研究^[30],并从理论模型研究中所得到的结论出发导出了正三角形波纹高度、波纹板阻火器的阻火芯厚度与爆燃火焰速度的关系,给出了适用于 II A 类可燃气体与空气混合物爆燃火焰的阻火器参数计算公式。

虽然早在 1928 年阻火材料就应用于石油工业中,以后又广泛用于矿山、煤矿、水运及化学工业等部门,但在煤矿瓦斯爆炸的抑制方面很少有文献报道。

最早见于 19 世纪初期英国汉弗莱·戴维(Humphrey Davy)发明的矿工安全灯是用金属网罩起来的灯,供井下工人挖煤时照明用。1815 年戴维发现细的金属管子火焰不能通过,而外部的空气却能够自由进入。这是由于热传导起着决定性的作用。铁或铜等金属都是热的良导体,它们能很快地把热从受热端传向远处。在网罩内燃烧着的火焰,温度当然高于着火点,但金属网罩能不断地导热散热,使罩子外面的温度低于着火点,因此即使罩外有瓦斯,但由于温度达不到瓦斯着火点,瓦斯不能燃烧。

在管道输送瓦斯中,煤炭科学研究总院抚顺分院在一个长 116 m、直径 250~300 mm 的管道中针对不同浓度的瓦斯气体(9.5%、10.5%、11%)共做了 150 余次瓦斯爆炸实验,研究金属网对瓦斯爆炸的抑制作用,证实了金属网的抑爆效果。

美国矿业局^[31]对由开孔不锈钢泡沫材料构成的一种名为 RETIMET 的隔爆栅进行了实验研究(实验容器构造见图 1-3),结果表明,这种结构具有良好的

实验室性能,能成功地淬熄瓦斯浓度为 9.75% 的混合气体爆炸火焰。

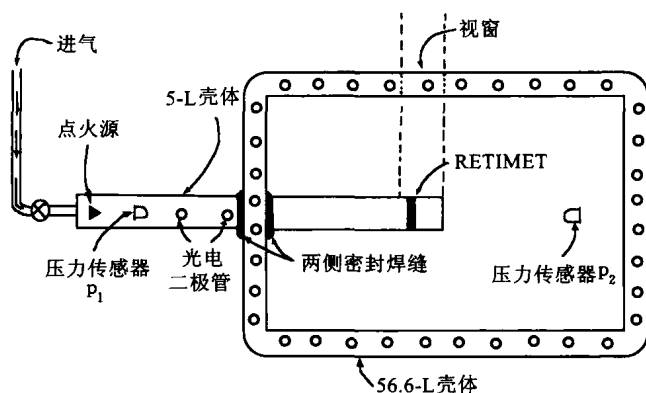


图 1-3 实验容器构造俯视图

一些文献^[32]提出了将金属网孔结构用于抑制煤矿瓦斯爆炸火焰和压力的设想,还有文献^[33]就金属多层丝网结构对火焰的淬熄作用建立了抑燃数学模型,从丝网结构几何尺寸上考虑了火焰淬熄作用影响因素。不过,要从实验角度来考察其对瓦斯爆炸抑制的可行性。

阻火结构最佳的性能是对火焰的淬熄,并且多数情况下是对爆燃火焰的淬熄。任何阻火装置,其本质特征在于它有一系列非常小的空穴、缝隙或者是小空间,所以对孔隙尺寸的要求特别严格,在期望获得较小流阻的同时又要具有高效的阻火性能。

1.1.3 泄爆技术

广义上的泄爆是指在爆炸初始阶段或爆炸扩展时,采取的使本来密闭的装置暂时地或持久地往无危险方向敞开的一切措施^[34,35]。

对爆炸性容器和装置,通过固定的开口及时泄压,保护设备不被炸毁和人员不受到伤害。石化工业为防止设备内部因超压发生破坏而广泛采用泄压技术^[36,37],设备一旦发生超压,设备的预定部位会立即敞开一条泄放通道,将造成超压的“多余”能量和(或)物料排放到设备以外的安全处,使设备内压力始终保持在某一规定值以内,从而避免设备造成过度塑性变形甚至破裂。

泄压装置可分为一次性使用的(如爆破片)和重复使用的(如安全阀)两种,其泄压原理是相同的,即在规定压力(动作压力)下会自动动作(爆破或掀开),开始泄放。爆破片对爆炸压力反应很迅速,其动作时间一般在 3~15 ms 内。而爆炸安全阀在动作时要克服较大的惯性才能完全掀开,因此其动作时间要比爆破

片长很多倍。另外,由于结构所致,爆炸安全阀对泄放介质的流动阻力较大,因此在相同泄放压力下,爆炸安全阀所需的泄放面积要比爆破片的大。鉴于井下环境呈现粗糙度高、障碍物普遍存在的特点,已经有人提出了井下防爆门(阀)强度计算方法。因为防爆门(阀)一次性投资小,运行成本低,动作准确可靠。

虽然泄放技术的基本出发点是当容器内部压力发生异常时,通过泄爆口卸去压力,保护压力容器安全。但对燃烧反应系统,当打开泄爆口泄爆时,将导致大量可燃混合物排入空气中,使容器内外流场发生剧烈的变化,从而可能造成破坏性更大的外部爆炸灾害,反过来使泄放容器内压力升高,Harrison^[38]的研究证实了这一点。Catlin^[39]在泄爆容器外距泄爆口 2 m 位置测得含两个脉冲峰值的超压信号,并认为第 2 个脉冲压力峰值是由外部可燃气体被点燃后由爆燃转爆轰产生的。Thomas 和 Jones^[40]利用激波管产生包含激波和火焰的射流排泄到充满甲烷-氧气的大容器中,用高速阴影摄像系统拍摄泄爆过程,从照片可清楚地看到爆轰波的生成过程。

1.2 国内外研究成果概述

防止瓦斯爆炸最积极的措施是阻止甲烷与空气(或氧气)混合形成爆炸混合物。这可采用爆炸抑制的方法来实现,即在巷道中用具有阻燃性等的惰性气体(如二氧化碳,氮气等)部分地取代空气中的氧气(不能全部取代,因为工作人员需要充足的氧气供以呼吸),使爆炸失去一个必要条件——足够的氧气浓度。然而,这种措施往往会使运行费用大大增加,且其应用场合有限,不适用于非密闭系统等。

遏制系统是把瓦斯等可燃气体爆炸事故控制在初始阶段或局部区域,降低灾害损失的程度和减小灾害范围。该技术通常利用爆炸探测器感应初始爆炸,中心控制单元触发抑制剂喷洒动作,扑灭爆炸火焰,防止设备或巷道空间产生过高的压力。但是设备的维护工作量(电子仪器)相当大,比如探测器反应要十分敏感,以便能及时地将爆炸信号传送给抑制喷洒器,并且喷洒器要具有比爆炸传播速度更快的速度,才能发挥作用;另外,易损耗的抑制剂(水、岩粉等)要经常更换,加大工人工作量。而事实上,在井下巷道这样大尺寸场合内抑爆隔爆装置往往不能发挥有效的抑制作用甚至普遍存在失效的情况。虽然实际已证明爆炸遏制是一种有效的防护措施,但由于上述原因,它在工业上的推广使用仍比较缓慢^[35]。

爆炸灾害的抑制,不仅是对火焰传播的抑制,其本质是流场中悬浮态抑爆剂对反应激波的抑制和衰减,还包括火焰和激波之间的相互耦合过程。因此,石化