

抑制爆炸波传播的方法*

喻健良 刘润杰 毕明树 王淑兰

大连理工大学, 大连 116012

摘要 抑制燃烧爆炸产生的压力波是非常重要的研究课题. 针对抑制爆炸波传播的研究方法进行了评述, 介绍了网孔结构或可压缩材料抑制爆炸波强度的理论和研究结果. 指出了目前研究所存在的问题, 并对要解决的关键问题提出了见解.

关键词 爆炸波, 网状结构, 可压缩材料

1 引言

伴随压力和温度显著升高的燃烧爆炸事故是近年来危害人类最为严重的灾害之一. 由于所有的燃烧爆炸造成的灾害都和燃烧与爆炸冲击波有关, 因此抑制燃烧和削弱爆炸波强度, 一直是防灾减灾的科研工作者关心的课题, 世界各国对此开展了大量的研究工作. 本文针对国内外抑制爆炸波强度的研究, 阐述了研究现状, 并提出了要解决的关键问题.

2 抑制爆炸波的方法

近年来人们试图采用多孔可压缩材料来抑制爆炸波, 并出现了两种抑制爆炸波的理论.

2.1 横波抑制

爆轰能够自持稳定传播的原因是横波的产生和发展. 因此, 消除横波以破坏爆轰波自持传播的机理成为探索抑制爆轰的一种研究思路.

Gvozdeva^[1] 发现用多孔、可压缩材料在某些条件下可明显地衰减反射波. Dupre^[2] 利用衬在管壁上的吸收材料显著地降低了爆轰波, 研究认为横波的声吸收是强力衰减爆轰波的主要原因, 而衬有吸收材料的管壁上热量和动量的损失是可以忽略的次要因素. Vasil'ev^[3] 引入了横波与管壁非弹性碰撞的概念, 在衬有多孔管壁的管道内研究了临近极限的爆轰, 并试图用反射系数来解释这种衰减. Teodoreczyk^[4] 对氢-氧混合气体爆轰波的衰减作了照相记录, 并提出了一个关于爆轰波沿多孔材料传播时大为简化的模型.

收稿日期: 2001-08-07, 修回日期: 2002-04-30

* 国家自然科学基金 (50076006) 和博士基金 (97014114) 资助项目

郭长铭等^[5,6]用玻璃板记录到了 Mach 反射的三波点迹线,直接用压电传感器测得了 Mach 杆后方的爆轰波压力,并将 Chester-Chisnell-Whitham 理论改进后用到爆轰波研究中.同时用烟迹法得到了爆轰波通过狭缝时,胞格结构的消失和恢复过程.由于研究问题的复杂性,还未有关于从机理上解释边界条件变化对爆轰波传播的影响.郭长铭^[7]还研究了在方形和圆形管道内气相爆轰波在阻尼管道中传播时的衰减现象.先是在光滑管壁的管道中产生稳定的具有胞格结构的爆轰波,然后使其通过专门设计的管壁上衬有网孔材料(金属丝网或不锈钢纤维)的阻尼段,利用高速摄影、压力传感和烟迹技术等手段,发现爆轰波被有效抑制,管内的压力波显著地衰减.衰减的主要机理是网孔材料吸收了爆轰波波阵面的横波.可见,设法消除横波和破坏横波维持机理不失为抑制爆轰波的有效途径.研究还发现,如果气相爆轰波在衬有多孔钢板^[8]的管道中传播,在光滑管壁的管道中先产生稳定的具有胞格结构的爆轰波,然后通过专门的管壁上衬有的多孔钢板的阻尼段时,发现爆轰波在通过多孔钢板的阻尼段时有先衰减后加强的现象.证实了多孔钢板等一类吸收材料既有吸收横波、削弱爆轰波的作用,又有加强湍流使爆轰波得以恢复的作用,形成 DDT 现象.而对金属丝网和不锈钢纤维来说,产生强反射激波造成自动点火这种机制比较弱,因此,很容易实现将爆轰波转变为强爆燃.多孔板产生强反射激波造成自动点火的机制要强于金属丝网和不锈钢纤维,因为它的表面除了钻透的孔外就是坚硬平整的钢板,有利于反射,同时,密布的孔会造成湍流混合.这样,在两种机制的共同作用下,出现了 DDT 过程.可见,多孔钢板对爆轰波的衰减抑制作用远不如金属丝网和不锈钢纤维.

综上所述,选择合适的网孔结构材料,可以大大抑制管内爆炸压力波,并且用横波吸收理论得到合理解释.

2.2 抑制声振动不稳定燃烧压力峰

文献 [9,10] 报道,容器内的可燃气体或粉尘爆炸泄压,会出现图 1 所示的 3 次明显压力波动的曲线,第 1 次和第 2 次的波动压力峰值很低,第 3 次出现的声动不稳定燃烧压力峰 (P_3) 相当显著,是造成建筑物或者容器设备恶性破坏的主要原因,通过详细地研究各种参数对 P_3 影响,得到了 P_3 生成机理的合理解释.同时认为既然 P_3 是造成建筑物破坏的主要因素,如果消除了 P_3 ,则爆炸泄压的防护效果将更令人满意.研究消除或减弱 P_3 的措施就成了当今研究抑制爆炸的重要课题.

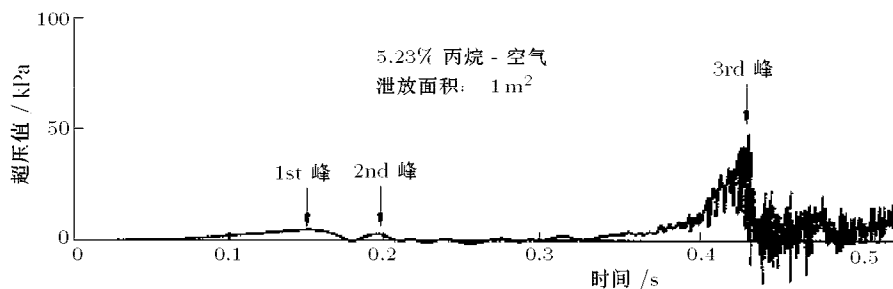


图 1 中心点火情况下容器内压力时间曲线 (三峰图)

Vanwingerden 等^[9]于 1983 年在 5.2 m^3 实验容器内衬上 50 mm 厚的可压缩的玻璃棉,成功地消除了 P_3 .

消除声振动不稳定燃烧压力峰的基本原理可用图 2 来表示.可燃混合气体在平行壁面点燃后开始泄压,点燃产生的声学振荡在两个平行的刚性壁面上产生驻波,可燃气质点以驻波方式作纵向振动.可燃质团在纵向振动的密状态下,燃烧加速,促使局部压力升高,在疏状态下,燃

烧减慢, 吸热, 使局部压力下降得更低, 引起振荡燃烧. 振荡燃烧又进一步加剧了压力振荡. 然后压力振荡又进一步加剧可燃混合气团的纵向迁移振动, 也即产生了一个正反馈, 引起回路发散, 燃烧转变为不稳定燃烧, 振荡的压力振幅急剧增加, 使残余可燃气体燃烧完为止. 这个过程产生了 P_3 , 如果消除了点燃后产生的可燃混合气体的声学驻波, 从而消除了 P_3 , 这就是消除声振动不稳定燃烧压力峰 P_3 的基本原理.

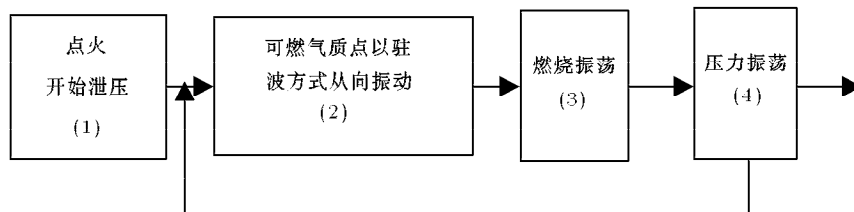


图 2 壁面附近可燃气质点纵向振动导致压力振荡建立的正反馈所引起的燃烧振荡加速方块

文献 [10] 用难燃或不燃、表面有特殊形状的材料制作成爆炸减压板, 它被贴于墙或容器的内壁来改变原来的声振的边界条件. 实验结果如表 1 所示, 装了爆炸泄压板, P_3 从最大值 101 kPa 减小到 4 kPa, 火焰从明亮减到暗红, 爆炸声响从啸叫变为低沉, 由于声振动的前进波遇到“减压板”后不能产生周期反转, 前进波和反射波不能相互干涉产生驻波, 消除了产生 P_3 的动力, 于是消除或者减弱了 P_3 .

表 1 减压板设置对压力波的抑制

实验编号	实验容器容积 /m ³	泄压口封盖材料塑料薄膜 /mm	A/V^3	P_3 /kPa	体积浓度	减压板设置情况	备注
1	1	0.05	0.264	101.0	5.1	无	声音啸叫 火焰明亮
2	1	0.05	0.264	2.0	5.1	左右后底四个内表面衬爆炸减压板	声音低闷
3	30	0.05	0.326	98.0	4.2	无	声音啸叫振荡时火焰明亮
4	30	0.05	0.326	4.0	4.3	左右后底四个内表面衬爆炸减压板	声音低闷

备注: 实验用可燃气体为液化石油气; A 代表泄压面积, V 代表实验容器的容积, A/V^3 为比例泄放比.

上述研究是以抑制声振动不稳定燃烧压力峰的理论为基础得出的研究成果. 主要是以抑制容器内爆炸泄压时产生的压力振荡为最终目的而开展的实验研究工作.

3 存在的问题和解决方案

3.1 存在的问题

网孔结构和可压缩材料或者爆炸减压板都显著地改变了爆炸波传播的边界条件, 由上述研究结果可见, 边界条件的变化对爆炸波的传播产生很大的影响, 研究气相爆炸波在受约束空间(如有网孔结构的阻尼管道)中的传播不仅可以进一步认识爆炸波的本质, 有较高的学术价值; 而且也是工业上抑爆、隔爆、熄爆等安全技术的理论依据, 有深远的实际应用背景. 然而, 由于问题的复杂性, 至今未出现用一般的理论来处理这类问题. 而且, 目前所用材料和结构来抑制爆炸波强度所开展的工作几乎是以实验为主的经验型研究, 不管是抑制声振动不稳定燃烧压力峰的理论, 还是横波抑制理论, 都缺乏强有力的理论描述, 不能从机理上解释爆炸波衰减的过程, 还不能对爆炸波经过吸收材料时压力、温度、速度等场进行清晰的物理和数学描述, 只能对

现象作简单的测试和解释,甚至未能形成具有一定精度的经验公式,更不用说建立合理的物理模型,并用数值计算等手段来模拟.

3.2 解决方案

用网孔或可压缩材料抑制爆炸波毕竟涉及到湍流流动和传热、传质及复杂的化学反应等物理化学的综合作用,同时还伴有材料、结构与环境等外部干扰因素的耦合作用,所以它是一类非定常、非线性和非平衡态的动力学衰变过程.对于这样的现实动力学系统,尽管其各种初始条件具有强烈的随机性,从而导致系统变量极多,而难以求解.但是,采用 CFD(计算流体动力学)方法来解决爆炸波通过吸收材料的传播衰变规律,描述气体爆炸波流场、温度场、压力场等是非常有效的方法,关键问题是解决气体流动、燃烧化学反应和包括传导、对流、辐射在内的传热过程等多因素之间的耦合关系,建立描述这些过程的数学模型,找到适合这种复杂现象的解耦方法和合适的计算模型,当然也需要功能更强大的 CFD 软件以及更精确的实时测量和控制实验技术.这些问题的解决,将使抑制爆炸波的研究从宏观研究走向微观研究、从经验型实验研究走向实验和理论相结合的高级研究阶段,逐步形成新的抑制爆炸波理论,并开发出实用的防治爆炸的最新技术和产品.

参 考 文 献

- 1 Gvozdeva L G, et al. Normal shock waves reflection on porous compressible materials. *ATAA*, 1986, 106: 155~165
- 2 Dupre G, et al. Propagation of detonation waves in acoustic absorbing walled tube. *ATAA*, 1988, 114: 248~263
- 3 Vasil'ev A A. Near limiting detonation in channels with porous walls. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1994, 30: 101~106
- 4 Teodorczyk A, Lee J H S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls. *Shock Waves*, 1995(4): 225~236
- 5 郭长铭,周光泉,王正道.气相爆轰波在收缩管道中的传播. *爆炸与冲击*, 1998, 18(1): 21~27
- 6 郭长铭,张德良,谢巍.气相爆轰波在障碍物上 Mach 反射后流场的分析. *中国科学技术大学学报*, 2000, 30(6): 686~691
- 7 郭长铭,李剑.爆轰波在阻尼管道中声吸收的实验研究. *爆炸与冲击*, 2000, 20(4): 289~295
- 8 郭长铭,陈志刚.多孔钢板对气相爆轰波传播影响的实验研究. *实验力学*, 2000, 15(4): 400~407
- 9 王宝兴,李振彦.可燃气体爆炸泄压过程中声振动不稳定燃烧压力峰减弱方法的研究. *爆炸与冲击*, 1989, 9(2): 130~136
- 10 Vanwingerden C J M, Zeeven J P. On the role of acoustically driven flame instabilities in vented gas explosions and their elimination. *Combustion and flame*, 1983, 51: 109~111

THE MEASURES OF SUPPRESSING EXPLOSION WAVES*

Yu Jianliang Liu Runjie Bi Mingshu Wang Shulan

Dalian University of Technology, Dalian 110624, China

Abstract Suppressing pressure waves produced by combustion and explosion is a very important problem. The present measures about suppressing explosion waves are described in this paper. Theoretical results on suppressing explosion waves using mesh or compressive materials are introduced. The suggestion of how to solve the key problems is provided.

*The project supported by the Natural Science Foundation of China (50076006) and Doctor Foundation(97014114)

Keywords explosion wave, mesh, compressive material