

国家“十三五”重点研发计划项目（2016YFC0801703、2017YFC0805207）资助
山东省自然科学基金项目（ZR2015PE005）资助
山东科技项目（2015RCJJ038）资助

环境因素对瓦斯爆炸 特性影响研究

孟祥豹 张延松 著
李润之 高 娜

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

发计划项目(2016YFC0801703、2017YFC0805207)资助

山东省自然科学基金项目(ZR2015PE005)资助

山东科技大学人才引进科研启动基金项目(2015RCJJ038)资助

环境因素对瓦斯爆炸 特性影响研究

孟祥豹 张延松 著
李润之 高 娜



中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书在对瓦斯爆炸机理和特性理论进行梳理、分析的基础上,通过爆炸管道实验和数值模拟实验,开展了点火能量、初始温度、初始压力等环境因素对瓦斯爆炸极限、爆炸特性的影响研究。为了解不同环境条件下瓦斯爆炸的发生、发展及爆炸特性,指导瓦斯爆炸事故分析、相关行业标准的制定以及隔爆、抑爆产品的研发提供了重要的参考。

本书可供从事瓦斯爆炸方面工作的科研人员和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

环境因素对瓦斯爆炸特性影响研究/孟祥豹等著

·一徐州:中国矿业大学出版社,2018.4

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3934 - 1

I. ①环… II. ①孟… III. ①瓦斯爆炸—理论 IV.

①TD712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 059808 号

书 名 环境因素对瓦斯爆炸特性影响研究

著 者 孟祥豹 张延松 李润之 高 娜

责任编辑 赵朋举 黄本斌

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 字数 166 千字

版次印次 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 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

我国现有的能源结构中,虽然新能源的开发越来越受到重视,而且替代水平也日益提高,但是煤炭作为我国主体能源的地位仍然没有改变。2015年,我国原煤的产量为37.5亿t,在一次能源生产总量中占72.1%;煤炭的消费量为39.6亿t,占一次能源消费总量的64.0%。由于我国富煤贫油少气的能源特点,在今后相当长一段时间内,煤炭仍将保持主体能源的地位。我国煤层埋藏深且赋存地质条件复杂多变,瓦斯不均匀地分布其中,瓦斯灾害事故时有发生,严重制约了我国煤炭行业的健康快速发展。随着科技的进步和国家对煤矿安全生产的重视,煤矿灾害事故的发生频率、人员伤亡和经济损失等方面都有了一定的改善,但是,煤矿的瓦斯爆炸事故仍未完全杜绝。

瓦斯爆炸事故的发生,不仅损害国家财产、危及人民安全,还不利于社会稳定以及和谐社会的发展,损害我国的国际形象,同时还影响了煤炭生产对我国国民经济快速发展的保障作用。煤炭企业管理水平的提高,可以在一定程度上防止瓦斯爆炸事故的发生。然而,要从根本上防止瓦斯爆炸,还必须解决一系列技术难题,例如对高温高压等特殊环境对瓦斯爆炸的影响、低浓度瓦斯燃爆特点、强点火源对瓦斯燃爆特性的影响等的认识。本书对点火能量、初始温度、初始压力三个环境因素对瓦斯爆炸极限和爆炸压力的影响进行研究,这对了解不同环境条件下瓦斯爆炸的发生、发展及爆炸特性,指导瓦斯爆炸事故分析、相关行业标准制定以及隔爆、抑爆产品的研发具有重要的参考意义。

本书主要由以下几方面内容组成:一是对瓦斯爆炸极限、特性的理论梳理和分析;二是单因素点火能量、初始温度、初始压力影响瓦斯爆炸极限和特性的实验研究;三是多因素耦合对瓦斯爆炸极限的影响实验研究;四是瓦斯爆炸的化学动力学和流体动力学数值模拟研究。

在本书的撰写过程中,得到了张新燕、陈海燕等老师以及俞海玲、杜文州、王相、徐翠翠、刘博、黄兴旺、张毓媛、胡凯、解庆鑫等博士、硕士研究生的大力支持,在此表示感谢。同时国内外许多学者的相关研究成果为本书所引用,使得本书能够比较系统地呈现在读者的面前;国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0801703、2017YFC0805207)、山东省自然科学基金项目(ZR2015PE005)、山东科技大学人才引进科研启动基金项目(2015RCJJ038)的

资助使得本书得以出版,在此一并表示感谢。

本书是课题组十多年来研究成果的总结,由于作者水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,有些问题需进一步商榷和深入研究,不当之处敬请广大读者予以批评指正。

作 者

2017 年 12 月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 瓦斯爆炸机理	2
1.3 瓦斯爆炸特性	7
1.4 瓦斯爆炸特性研究现状	11
2 环境因素对瓦斯爆炸特性的影响理论分析	15
2.1 引言	15
2.2 初始温度对瓦斯爆炸特性的影响	15
2.3 初始压力对瓦斯爆炸特性的影响	19
2.4 点火能量对瓦斯爆炸特性的影响	24
3 单因素对瓦斯爆炸特性的影响实验研究	26
3.1 引言	26
3.2 实验系统简介	26
3.3 实验方案	30
3.4 点火能量对瓦斯爆炸特性的影响	32
3.5 初始温度对瓦斯爆炸特性的影响	38
3.6 初始压力对瓦斯爆炸特性的影响	49
4 多因素耦合对瓦斯爆炸极限的影响实验研究	55
4.1 引言	55
4.2 实验系统简介	55
4.3 实验方案	56
4.4 初始温度和点火能量耦合对瓦斯爆炸极限的影响	57
4.5 初始温度和初始压力耦合对瓦斯爆炸极限的影响	63

4.6	初始压力和点火能量耦合对瓦斯爆炸上限的影响·····	70
4.7	临界爆炸极限·····	72
5	瓦斯爆炸化学动力学数值模拟研究·····	73
5.1	引言·····	73
5.2	模型的建立·····	73
5.3	瓦斯爆炸化学动力学过程分析·····	75
6	瓦斯爆炸流体动力学数值模拟研究·····	83
6.1	引言·····	83
6.2	理论模型的建立·····	83
6.3	数值计算方法·····	87
6.4	建模与分网·····	90
6.5	模拟结果分析·····	93
	参考文献·····	117

1 绪 论

1.1 引 言

在我国现有的能源结构中,虽然新能源的开发越来越受到重视,而且替代水平也日益提高,但是煤炭作为我国主体能源的地位仍然没有改变。由于我国富煤贫油少气的能源特点,在今后相当长一段时间内,煤炭仍将保持主体能源的地位。我国煤层埋藏深且煤层赋存地质条件复杂多变,瓦斯不均匀地分布其中,瓦斯灾害事故时有发生,严重制约了我国煤炭行业的健康快速发展。随着科技的进步和国家对煤矿安全生产的重视,煤矿灾害事故的发生频率、人员伤亡和经济损失等方面都有了一定的改善。但是,煤矿的瓦斯爆炸事故仍未完全杜绝。这类爆炸事故的发生,不仅损害国家财产、危及人民安全,还不利于社会稳定以及和谐社会的发展,损害我国的国际形象,同时还影响了煤炭生产对我国国民经济快速发展的保障作用。

煤炭企业管理水平的提高和操作方法的完善,可以在一定程度上防止瓦斯爆炸事故的发生。然而,要从根本上防治瓦斯爆炸,就必须解决一些技术难题,例如对瓦斯爆炸作用机理、高温高压等特殊环境对瓦斯爆炸特性的影响、低浓度瓦斯燃爆特点、强点火源对瓦斯燃爆特性的影响、障碍物对瓦斯爆炸传播的影响等的认识^[1]。因此,对瓦斯爆炸机理开展深入研究,掌握瓦斯爆炸的发生、发展过程及爆炸特性,对于瓦斯爆炸事故的分析 and 防治以及相关行业标准的制定具有非常重要的现实意义。

瓦斯爆炸需满足三个基本条件:一定浓度的甲烷、一定浓度的氧以及一定能量的点火源,其中一定浓度的甲烷和氧是伴随着煤矿生产固有的不可杜绝的因素,因而瓦斯爆炸最活跃的影响因素点火源就成了研究和控制的重点。煤矿瓦斯发生爆炸的主要原因之一是瓦斯的点火能很低,通常只需数毫焦到十几焦的能量就能将其点燃。在最敏感情况下,瓦斯的最低点火能仅为 0.28 mJ,因此矿井下瓦斯爆炸大部分是由类似于电火花、金属火花、静电火花、金属撞击火花等一类较弱的点火源引起的。另外,由于煤矿开采过程中采空区存在大量的遗留浮煤,浮煤的存在为煤矿自燃提供了物质条件,自燃的结果使煤矿采空区内温度

有不同程度的升高。此外,摩擦生热、燃烧生热等通过热传递使环境温度高于常温,此时瓦斯爆炸极限及其爆炸特性就有可能发生变化,从而容易引发瓦斯爆炸事故,造成严重的损失。因此,研究环境条件,如初始温度、初始压力和点火能量等对瓦斯爆炸特性的影响就显得十分重要。

1.2 瓦斯爆炸机理

瓦斯爆炸是一个剧烈的放热反应过程。在瓦斯爆炸的整个过程中,点火过程是反应从静止状态向强放热状态转变的重要阶段,它决定着火焰能否自持燃烧以致达到爆炸的程度。热爆炸理论和链式反应理论可以分别用来描述瓦斯爆炸的点火和发展过程。

1.2.1 热爆炸理论

假设瓦斯-空气混合气体在球形容器中反应,且反应由火花中心点火引发。点火火花先使点火点周围的一小部分混合气体温度瞬间升高,即在点火点周围瞬间建立起一个很小的球形高温气体热源。此点火气体热源与周围初始气体之间存在很大的温度梯度。气体热源边缘处的未燃气体随着温度的升高发生化学反应,因而形成了近似球对称向外传播的燃烧波火焰阵面^[2],如图1-1所示。

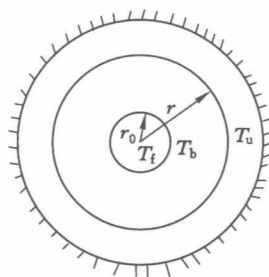


图 1-1 中心火花点火模型

随着火焰不断向未燃气体推进,气体热源的温度也逐渐降低。假设气体热源体积足够小,可认为在其温度变化过程中热源体积不变且体积内温度变化情况相同。当气体热源温度降低到正常火焰温度附近 T_i 时,已燃气体的反应区半径增至 r 时,系统内的温度至少满足式(1-1),则火焰才能发展到稳定状态以持续传播下去。此时的反应区半径 r 即为临界最小火焰半径。

$$\frac{T_u - T_i}{r - r_0} = \left(\frac{dT}{dr} \right)_w \quad (1-1)$$

式中 T_u ——未燃气体的温度, K;

T_f ——气体热源当时的温度, K;

r ——已燃气体区域半径, m;

r_0 ——气体热源半径, m。

式(1-1)等式左边 $(T_u - T_f)/(r - r_0)$ 为系统中气体热源温度与外层未燃气体之间的温度梯度, 等式右边 $(dT/dr)_w$ 为瓦斯气体燃烧时稳态火焰的温度梯度。在这种情况下, 系统内的放热速率与散热速率相等, 且单位温度变化下的放热量和散热量也相同^[3], 即

$$\begin{cases} q_G = q_L \\ \frac{dq_G}{dT} = \frac{dq_L}{dT} \end{cases} \quad (1-2)$$

瓦斯爆炸反应可看作是甲烷与氧气剧烈的氧化反应, 化学反应式如下:



若认为该反应为二级反应, 则反应速率 R 可表示为:

$$R = A[\text{CH}_4][\text{O}_2]\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1-4)$$

式中 A ——指前因子;

$[\text{CH}_4]$, $[\text{O}_2]$ ——甲烷和氧气的摩尔浓度, mol/L;

E_a ——活化能, J/mol;

R ——气体常数, 一般取 $8.314 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$;

T ——系统温度, K。

混合气体单位时间的放热量 q_G 为:

$$q_G = QR = QA[\text{CH}_4][\text{O}_2]\exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1-5)$$

式中 Q ——单位质量混合气体反应放热量, J。

由上式可知, 混合气体单位时间的放热量随系统温度的升高而指数增加。

假设反应区向未燃区热量的散失单纯依靠热传导, 则单位时间的散热量 q_L 可以用牛顿冷却定律来表示:

$$q_L = \alpha S(T_b - T_u) \quad (1-6)$$

式中 α ——热传导系数;

S ——导热面积;

T_b ——已燃气体温度;

T_u ——未燃气体温度。

因此, 要使燃烧火焰能持续传播, 即保证瓦斯爆炸反应点火的成功, 至少满足以下条件:

$$\begin{cases} QA[\text{CH}_4][\text{O}_2]\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) = \alpha S(T_b - T_a) \\ \frac{d\left\{QA[\text{CH}_4][\text{O}_2]\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)\right\}}{dT} = \frac{d[\alpha S(T_b - T_a)]}{dT} \end{cases} \quad (1-7)$$

当气体热源温度降低到正常火焰温度附近时,若化学反应区半径大于或等于临界最小火焰半径 r ,即化学反应区内的释热速率大于预热未燃气体区放热的损失速率,则化学反应区温度不断升高而能保证反应的继续进行,火焰得以向未燃区传播,即可能完成爆炸点火;若化学反应区半径小于 r ,则化学反应区的释热速率不足以补偿热损失速率,也就是热量的损失量不断地超过化学反应所得到的热量,以致反应区的温度降低至无法维持反应的继续进行,因而仅在高温气体热源附近有少量气体进行了反应,不能维持火焰的持续传播。

在球形容器中,对瓦斯进行中心火花点火后,球形燃烧波从中心向壁面发展。对于流动矢量和扩散矢量大体上彼此平行且都与表面相垂直的很小火焰面上来说,可以把此球形燃烧波看作是平面燃烧波,分布示意图如图 1-2 所示。

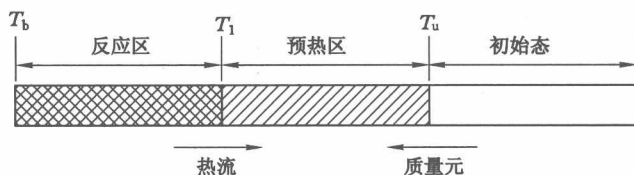


图 1-2 燃烧波分布示意图

热流从反应区流向未燃区,而质量流流向与其相反。质量元通过燃烧波时,通过热传导获得热量,同时也将一部分热量交由较冷的逆流质量元。起初阶段,质量元获得的热量多于损失的热量,因而温度升高,超过其初始温度 T_i ;当质量元温度高于 T_1 后,其转变为热源,加热逆流质量元的热量多于从获得的热量,但与此同时,质量元参与化学反应而释放热量,因而质量元的温度继续增加,直至反应结束,温度升至 T_b 。浓度梯度在化学反应中的产生,造成了扩散现象的发生:反应物分子按 $u \rightarrow b$ 的方向扩散;燃烧产物分子按 $b \rightarrow u$ 的方向扩散;中间产物分子则向这两个方向扩散。随着化学反应的消耗,反应物分子连续地减少,直至燃烧波推进至壁面处。

1.2.2 链式反应理论

通常,描述瓦斯爆炸的化学反应式为甲烷的氧化反应,见式(1-3)。在这个反应式中,将甲烷氧化反应描述为双分子反应。然而,实际上,甲烷的氧化反应并非如此简单的单步反应,而是极为复杂的链式反应。链式反应由很多步简单

的基元反应组成,在单步的基元反应分析中,可以运用热爆炸理论的相关知识,但是就整个反应过程来看,必须运用链式反应机理对其进行研究。

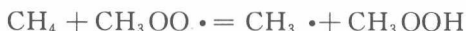
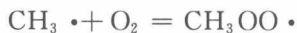
以一定能量 M 激发甲烷与氧气反应,甲烷分子吸收能量而离解成自由基,即:



甲烷分子也可以与氧直接作用而产生自由基,即:

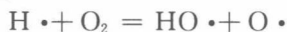
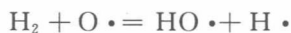
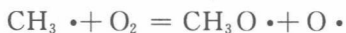
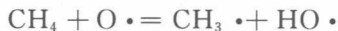


链式反应进行缓慢,需吸收大量能量才能激发。根据巴赫-恩格勒(Bax-Engler)的过程氧化理论,烃类氧化是以破坏氧的一个键而非两个键进行的。因此,甲烷氧化首先生成的是甲烷的过氧化物或过氧化物自由基,即:

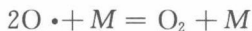
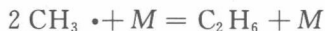


生成的甲基过氧化物由于—O—O—键较弱,容易断裂,可分解为甲醛、甲醇等。但是,过氧化物的分解比较缓慢,有些反应还具有一定的退化分支特点,因而甲烷的氧化反应会存在一个诱导期^[4]。在点火之前氧化反应的反应速率主要取决于作为活化中心的自由基的浓度。

随着自由基的不断产生,反应越来越显现出链式反应的特性,反应自动延续,并由于链分支反应而自动加速。下面化学式列出了几个链分支的基元反应:



在反应的进行中,链分支反应使自由基积累增加,而链断裂反应则使自由基消耗减少。链式反应能否持续地进行下去,主要取决于点火后自由基的积累速度及其消耗速度。下面化学式为几个链断裂的基元反应:



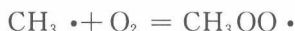
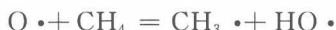
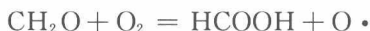
在分支链反应中,链传递过程中的链分支反应,使反应过程有了根本的改变。当链分支产生的自由基不仅可以补偿链断裂消亡的自由基,又可以抵消由于反应物浓度减少而带来的影响时,活化分子数目将不断地增加,越来越多的自

由基参与到基元反应中,使反应得以自动加速,最终导致甲烷与氧的支链爆炸。若自由基数目的增加不能消除链断裂及反应物浓度减小这两者的影响,则链式反应将平稳地进行直至反应结束,即为甲烷的稳态氧化过程。

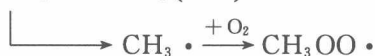
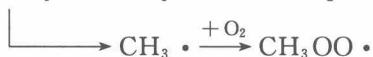
在链式反应理论中,链的引发对于整个链式反应的顺利进行具有重要的作用。在诱导期内,温度、压力等都没有明显升高,但是自由基却由于反应的进行而不断积累,以保证后续反应拥有足够的活化中心。曾有学者证实,甲醛(CH_2O)在诱导期内积累,并在诱导期末达到稳定浓度,且甲醛浓度随时间增加起初呈指数关系。诺里什(Norrish)等人曾通过在甲醛浓度等于消除诱导期的稳定浓度下进行的实验观测中证实了甲醛的链引发作用。伯纳德·刘易斯(Bernard Lewis)和京特·冯·埃尔贝(Guenther von Elbe)基于甲醛的链引发作用提出了一种甲烷与氧气的综合反应历程,其认为甲烷与氧气在反应初期缓慢反应生成了痕量的甲醛^[2]:



在甲醛(CH_2O)与氧气(O_2)的反应中,认为是 O_2 中氧原子(O)迁移到 CH_2O ,生成的 $\text{O}\cdot$ 继续参与反应,生成甲烷的过氧化自由基,即:



反应产生的自由基 $\text{CH}_3\text{OO}\cdot$ 参与到后续的反应中,即:



此反应历程适用于接近 800 K 的温度,此时 $\text{CH}_2(\text{OH})\text{OOH}$ 分解为 H_2O 和 CO ,反应可以以稳态反应的形式进行。而当温度升高到 1 500 K 以上时, $\text{CH}_2(\text{OH})\text{OOH}$ 的离解作用越来越重要,其将离解成自由基参与到后续反应

中。当温度升高到某临界温度时,将导致甲烷和氧的支链发生爆炸。

1.3 瓦斯爆炸特性

矿井瓦斯是指从煤层和岩层中放出的以甲烷为主的气体、矿井生产过程中产生的气体和化学及生物化学作用产生的气体的统称。甲烷是无色、无味、无臭、可以燃烧和爆炸的气体,甲烷对空气的相对密度为 0.554,甲烷的扩散性较强,扩散速度是空气的 1.34 倍。

瓦斯爆炸是指瓦斯与空气混合后,在一定的条件下,遇高温热源发生的热—链式氧化反应,并伴有温度和压力上升的现象。瓦斯爆炸通常会造成巨大的人员伤亡和设施、设备的毁坏,有时还会引起煤尘爆炸、火灾等次生灾害。只有充分了解瓦斯爆炸机理、特性及其传播规律,才能为有效地预防煤矿井下瓦斯爆炸事故提供重要的理论依据,这对保障煤矿的安全生产具有重要的现实意义。

1.3.1 燃烧速度和火焰速度

燃烧速度 S_b 是指火焰在未燃混合气体中的传播速度,它与反应物质有关,是反应物质的特征量。常温、常压下的层流燃烧速度叫基本燃烧速度。大量实验证明,燃料与氧气混合物的基本燃烧速度比燃料与空气混合物的基本燃烧速度高一个数量级,如甲烷-氧气混合物的基本燃烧速度为 4.5 m/s,而甲烷-空气混合物的基本燃烧速度则只有 0.40 m/s^[5]。

紊流燃烧速度较难测量,而层流燃烧速度较易测量。紊流燃烧速度的测定易受各种条件的影响,如气体流动中的耗散性、界面效应、管壁摩擦、密度差、重力作用、障碍物绕流及射流效应等可能引起湍流和漩涡,使火焰不稳定,其表面变得皱褶不平,从而增大火焰面积、体积和燃烧速率,增强爆炸破坏效应。

火焰速度 S_p 是指火焰相对于静止坐标系的速度,取决于火焰阵面前气流的扰动情况,可用高速摄影法、电离探针法和光导纤维探头法以及热电偶探测法直接测出。火焰速度在每秒数米到数百米之间变动,当火焰加速为爆轰时,则可达到 1 800~2 000 m/s。设未燃气体的流动速度为 u_n ,则火焰速度可表示为:

$$S_p = S_b + u_n \quad (1-8)$$

1.3.2 火焰温度

一定比例的可燃气体和空气的混合物产生的燃烧爆炸,它们的热量包括两部分:一是由可燃气体和空气带入的物理热量;二是它们发生化学反应放出的热量。如果反应是在绝热条件下进行的,这两部分热量都用来加热反应物,这时反应产物所能达到的温度称为理论燃烧温度,也称为火焰温度。严传俊、范玮编著的《燃烧学》给出的定义是:当空气-燃料比和温度一定时,绝热过程燃烧产物所达到的温度,称为绝热燃烧温度或火焰温度^[6]。火焰温度是决定可燃气体爆炸

破坏力大小的一个重要参数,可以根据爆炸热效应来进行计算。

爆炸热效应的计算是依据盖斯定律,即在定容或定压条件下,反应的热效应与反应的途径无关,而只取决于反应的初态和终态。燃料空气混合物的爆热 Q 可由下式计算:

$$Q = -\Delta H = -\left[\left(\sum n_j \Delta H_{j,298}^0\right) - \left(\sum n_i \Delta H_{i,298}^0\right)\right] \quad (1-9)$$

式中,带有下标 j 的表示产物,带有下标 i 的表示反应物。

假设爆炸过程是绝热的,爆炸反应所放出的热量全部用来加热爆炸产物,则定压爆炸反应热效应 Q_P 可由下式得到:

$$Q_P = \int_{T_0}^{T_f} c_p dT = (T_f - T_0) \sum n_j c_{pj}^0 \quad (1-10)$$

式中 c_p ——比定压热容。

假定一火焰温度 T_{f1} , 算得对应的爆炸反应热 Q_{P1} , 与式(1-9)计算出的爆热 Q 进行比较,如果 $Q_{P1} \neq Q$, 则再假设另一火焰温度 T_{f2} , 得到与其对应的爆炸反应热 Q_{P2} ; 如果 $Q_{P2} = Q$, 则 T_{f2} 就是所求的火焰温度 T_f , 否则用线性插值法可以求得火焰温度 T_f 。

1.3.3 定容爆炸压力

理论上定容爆炸是指在刚壁容器内瞬时整体点火,且系统绝热,即不考虑容器壁的冷却效应与气体泄漏而带走的热损失情况下的爆炸,因此定容爆炸压力应当是爆炸最高压力。实际上,瞬时整体点火是不可能的,一般是在球形容器中心点火。在这种情况下测得的峰值压力接近于定容爆炸压力,因为只有火焰接近于球内壁时,才会产生壁面导热冷却效应,虽然此压力维持时间极短,并很快就衰减下去,但此时压力峰值接近定容爆炸压力值。

可燃气体混合物的爆炸压力与初始压力、温度、浓度、组分以及容器的形状、大小有关。如果已确定可燃气体的理论燃烧温度,则其定容爆炸压力可以利用理想气体状态方程计算得到,其计算公式如下:

$$p_f = p_i \frac{n_f T_f}{n_i T_i} \quad (1-11)$$

式中, p_i 、 n_i 、 T_i 分别为初始压力、摩尔数和温度, p_f 、 n_f 、 T_f 分别为终态压力、摩尔数和温度。

由于一般的混合气体爆炸前后摩尔数变化很小,所以实际上定容爆炸压力主要取决于火焰温度 T_f 。普通燃料空气混合物的火焰温度大约为 8~9 倍初始温度,因而定容爆炸压力(绝对值)大约为 $(8\sim9) \times 10^5$ Pa, 超压为 $(7\sim8) \times 10^5$ Pa。

对于一个球形密闭容器,理论定容爆炸压力波形如图 1-3 中虚线 a 所示。它对应于瞬时整体点火,且系统是绝热的,即不通过容器壁与外界进行热交换,而容器内也没有任何耗散效应。这种理想化的波形实际上是不存在的。

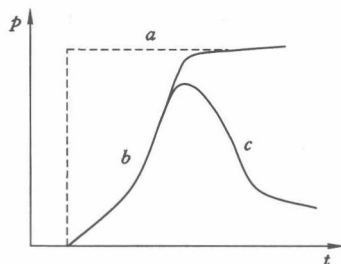


图 1-3 定容爆炸压力波形

对于中心点火,如果没有热损失,则压力极限值能维持(图 1-3 中曲线 *b* 所示)。一般情况下都存在热交换,所以压力未达到理论极限值就衰减(图 1-3 中曲线 *c* 所示)。曲线 *c* 是在密闭容器内实测到的压力波形,从此压力波形可看出,爆炸过程分为三个阶段:

① 爆炸压力上升阶段。该阶段的特点是爆炸反应放出的能量大于向周围热传导而损失的能量,因此反应过程中能量不断增加,导致压力不断上升,压力上升速率与化学反应动力学和燃烧速度有关。

② 爆炸压力最高点。当爆炸反应放出的能量等于向周围热传导而损失的能量时,爆炸压力达到最大。此值大小与化学反应热效应和热力学有关。

③ 爆炸压力衰减区。当爆炸反应放出的能量小于向周围热传导而损失的能量时,压力开始逐渐下降,能量损失的主要原因是容器器壁的冷却效应和气体泄漏而带走能量所致,因此压力衰减快慢与热传递和可压缩气体的流动有关。

1.3.4 爆炸压力上升速率及爆炸特征值

爆炸压力上升速率定义为压力-时间曲线上上升段拐点处的切线斜率,即压力差除以时间差所得的商,如图 1-4 所示。压力上升速率是衡量燃烧速度的重要指标。爆炸压力上升速率越大,由于泄压时间越短,爆炸产生的破坏力越大。爆炸压力上升速率主要与燃烧速度和化学反应容器体积有关。可燃气体的燃烧速度越快,其爆炸压力上升速率越大;反应容器的容积越大,其爆炸压力上升速率越小。可燃气体(或蒸气)的爆炸压力上升速率与体积的关系可用“三次方定律”表示,即:

$$(dp/dt)_{\max} \cdot V^{1/3} = K_G \quad (1-12)$$

这就是说,爆炸压力上升速率与容器体积的立方根的乘积等于常数。上式成立的四个条件为:容器形状相同;可燃气的最佳混合浓度相同;可燃气体与空气混合气的湍流度相同;点火源或点火能相同。在上述条件下, K_G 的值可看作一个特定的物理常数。通常把 K_G 称为可燃混合气体爆炸特征值,用来评价各种可燃混合气体的爆炸危险程度, K_G 值越大,爆炸危险程度越大。

1.3.5 点火能量和点火温度

在工业安全技术中,可燃气体爆炸的最小点火能量 $E_{\min}$ 是衡量可燃气体点

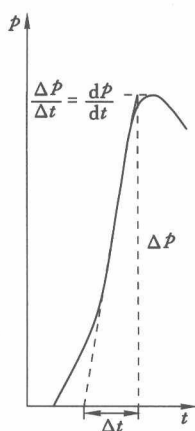


图 1-4 爆炸压力上升速率的定义

火敏感度的一个参量。

可燃气体的点火能量很低,只有几十到几百微焦耳量级,因此极易被点燃。常见碳氢化合物和空气混合气体的最小点火能约为 0.25 mJ 量级。取人体的平均电容为 200 pF,化纤衣服的静电位为 15 kV,则其放电能量为 22.5 mJ,这足以点燃可燃气体。

参考文献[7]给出的最小点火能量理论计算式为:

$$H_{\text{理论}} = \frac{\pi}{4} d^3 K c_p T_u \left(1 - \frac{T_u}{T_b} \right) \quad (1-13)$$

式中 d ——临界最小火焰直径,等同于实验测得的熄灭距离;
 c_p ——比定压热容;
 T_u ——未燃气体温度;
 T_b ——已燃气体温度;
 K ——Karlovitz 数。

上式表明, $H_{\text{理论}}$ 大体上与 d^3 呈正比,对于高温、快速燃烧的混合物来说, $H_{\text{理论}}$ 与 $H_{\text{实验}}$ 吻合得相当好,但对于低温、缓慢燃烧的混合物来说,偏差则较大。

而参考文献[8]给出的最小点火能量理论计算式如下式所列,认为最小点火能量大约正比于热传导系数和火焰温度,反比于燃烧速度。

$$H_{\text{理论}} = \alpha \frac{k}{S_b} (T_b - T_u) \quad (1-14)$$

式中 α ——近似常数,约等于 40;
 k ——热传导系数;
 S_b ——燃烧速度;
 T_b ——已燃气体温度;