

建筑物内爆炸荷载研究综述

高康华¹, 金丰年¹, 王德荣¹, 马士良²

(1. 中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007;

2. 镇江市城市建设投资集团公司, 江苏镇江 212004)

[摘要] 室内爆炸已成为当前建筑物面临爆炸灾害的主要形式之一。本文针对建筑物内化学炸药爆炸和可燃性气体混合物爆燃两种情况, 从理论研究、模型试验和数值模拟3个方面总结并评述了当前国内外的研究现状, 指出相关研究多以容器及管道内的爆炸试验或数值模拟为主, 现有的理论模型对建筑物特点及使用功能考虑较少。

[关键词] 建筑物; 内爆炸荷载; 化学炸药; 可燃性气体混合物; 爆燃

[中图分类号] TQ56 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)05-0059-06

1 前言

当前世界各国之间的利益争夺、能源掠夺造成的局部战争从未停止, 种族矛盾和宗教冲突引发的国际恐怖主义更是愈演愈烈, 地面经济目标和地下防护结构等重要建筑物面临的爆炸威胁日益严峻。随着精确制导武器、深钻地弹的发展及恐怖袭击中移动炸弹的大量使用, 建筑物内部爆炸逐渐成为爆炸打击的重要形式。如1998年我国驻南联盟大使馆遭到北约空袭, 导弹直接侵入主体建筑内部; 2004年莫斯科地铁车站内遭受恐怖袭击发生剧烈爆炸, 造成50多人死亡等。此外, 工业和民用上可燃性气体的大量使用, 由于仪器设备操作失误、保养不当、维护滞后引发的燃气泄露时有发生, 造成的燃气爆炸也逐渐成为生产和生活领域中爆炸灾害的主要形式。如2010年昆明某制药公司由于电器火花引爆乙醇气体发生爆炸事故, 造成5人死亡、8人受伤, 爆炸冲击波将生产车间的各分区隔墙、吊顶隔板、通风设施、玻璃窗、生产设施等全部毁坏; 2011年, 北京朝阳区一居民楼首层发生燃气爆燃事故, 造成6人死亡、1人受伤, 6户房屋整体坍塌、局部房屋严重受损。

由此可见, 建筑物内部爆炸已成为结构爆炸灾害的主要形式。内爆炸荷载是结构抗爆、防爆设计的基础, 也是评估爆炸破坏效应的关键, 国内外学者在此方面进行了大量的研究并取得了一系列成果, 但由于建筑物内部空间的不规则性及爆炸流场演化的复杂性, 当前对其研究多以模型试验和数值模拟为主, 至今尚未形成一套完整的理论体系。

2 建筑物内部炸药爆炸

建筑物内部炸药爆炸多发生于战争中精制导武器或钻地弹对指挥所、掩蔽部、核反应堆安全壳等重要军事和经济目标的打击, 以及恐怖分子对空间较为封闭、人员流动频繁、车辆密集度大的交通隧道一类的重要建筑的袭击, 此类爆炸往往以战争威慑和政治意图为目的, 一经发生必将造成严重破坏及大量人员伤亡。爆炸时炸药在结构内部瞬间转变为高温高压爆轰产物, 形成爆炸冲击波在结构内壁多次反射、汇聚, 并在高温高压下与结构之间产生强烈的动态流固耦合, 即结构一方面在冲击波作用下发生快速动态变形, 一方面又限制和影响爆炸流场的分布和演化, 使得作用在结构内壁的爆炸荷载十分复杂。

[收稿日期] 2013-03-15

[基金项目] 国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目(51021001)

[作者简介] 高康华(1983—), 男, 河南太康县人, 工程师, 研究方向为防灾减灾工程及防护工程; E-mail: weikang515@163.com

2.1 有限空间内爆炸

对于综合指挥所、大型地下商场、地面建筑房屋等一类有限空间结构内部爆炸,国内外已有的相关结构抗爆防护专著^[1-3]及设计规范、手册^[4,5]普遍认为,爆炸荷载主要包括两个阶段:第一阶段是由空气冲击波与结构相互作用形成的荷载,包括入射波、反射波、气流滞止动压等;第二阶段则是结构约束对高温、高压爆炸产物产生的附加压力,也即由超压引起的准静态气体压力荷载,其峰值较低且衰减较慢。

图1给出了圆柱形容器结构内壁发生冲击波反射示意图,图中显示筒顶、筒底和内壁均承受反射压力,且内表面的斜反射有可能形成马赫波,反射过程十分复杂。Lewis^[6]等通过实际测量和理论计算,指出炸药爆炸后容器内壁压力具有非线性和多峰值的特点;Charis等^[7]进一步提出了结构内壁爆炸荷载随时间变化的指数分布规律。为了简化计算,Baker^[1]根据反射冲击波比例爆炸参数资料和近似方程,考虑结构内壁前3个反射脉冲,给出了结构内表面某点处简化超压模型(见图2)。图中 p 为压力, T 为冲击波持续时间, i 为冲量,下标 r 表示反射,模型中假设第二个冲击波幅值与冲量为起始冲击波的一半,第三个冲击波幅值与冲量则为第二个冲击波的一半。冲击波每反射一次就衰减一次,最后达到一个缓慢衰减的数量级上。文献[2]给出了内爆炸荷载两个阶段的简化近似示意图(见图3)。文献[4,5]则基于试验结果,结合理论方法提出了结构内部平均冲击波荷载和准静态气体压力计算的近似方法,并编程绘制了一系列计算曲线。

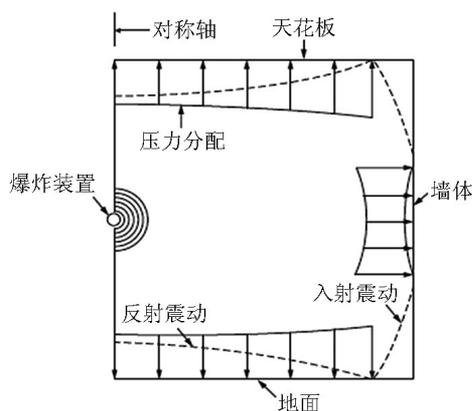


图1 结构内部冲击波反射示意图^[1,2]

Fig.1 Diagram of shock wave reflection in building^[1,2]

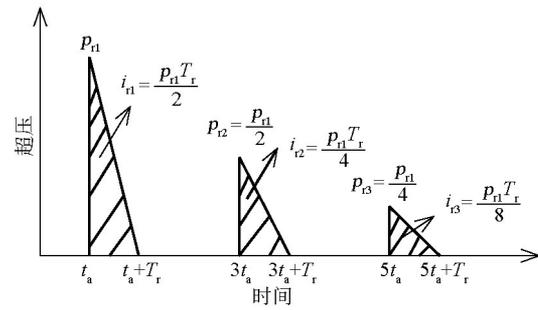


图2 结构内爆炸冲击波超压简化形式^[1]

Fig.2 Simplified form of blast wave overpressure in building^[1]

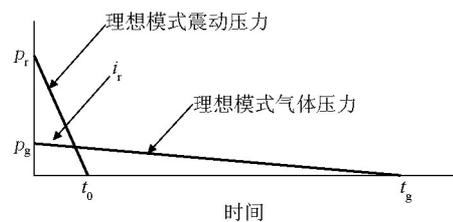


图3 内爆炸荷载简化形式^[2]

Fig.3 Simplified form of internal blast load^[2]

近年来,国内外大批学者对有限空间内爆炸冲击波传播机理以及结构荷载模型展开了分析和研究,鉴于结构内爆炸波反射的复杂性,多数研究是在模型试验基础上对荷载定性分析并提出经验公式^[8-13],但由于结构内爆炸荷载受爆室形状、装药类型、起爆位置等众多因素影响,当前得到的经验公式在使用时必须注意公式拟合所用的数据来源,并应利用试验或数值模拟进行校验。在评估内爆炸荷载的破坏效应时,除 Baker 提出的多三角形荷载简化形式外,还有单三角形^[13]、双三角形叠加^[14]等简化荷载,多数学者假定图2中第一脉冲峰值与自由大气中相应位置的空气冲击波反射超压相同^[15],而准静态压力则视结构密闭程度而定。随着计算机和流体力学计算方法的飞速发展,数值模拟方法由于能够更好地分析内爆炸荷载的分布规律,较为全面地反映结构内部爆炸流场发展过程,也被越来越多地应用到内爆炸荷载的研究中。当前大多数研究将内爆炸计算视为流固耦合问题^[16-19],但文献[20]也指出由于结构变形的滞后性及爆炸波快速衰减,多数情况下爆炸荷载流固耦合与解耦计算结果相差不大。

2.2 坑道、隧道内爆炸

对于诸如坑道、隧道等某一方向上尺寸较大的

通道内部爆炸,冲击波入射至结构内壁后向中间汇聚、碰撞,空气冲击波压力增大并在内壁限制下沿轴向传播,随着传播距离的增大,壁面开始出现马赫反射、形成马赫杆并逐渐形成平面冲击波,这一范围大概在4~8倍通道直径以外^[21],而冲击波强度也由于内壁粗糙度、冲击波内层粘性摩擦、热能耗散等因素影响而不断衰减,最终转化为声波^[22]。

当前国内外学者运用试验和数值模拟对此类通道中空气冲击波传播及衰减规律做了大量研究。对于防护坑道内爆炸,美国水道试验站^[23]和国内总参工程兵科研三所进行了一系列有关坑道内外爆炸的模型试验,系统地研究了坑道内冲击波的发展规律。庞伟宾等^[24]通过坑道口内、外爆炸试验,研究了适用于坑道内高能炸药爆炸冲击波到时预测公式;陈海天等^[25]根据等截面钢筋混凝土直墙圆拱坑道内爆炸试验,研究了冲击波冲量传播规律,并拟合了内爆冲击波冲量经验公式;李秀地等^[26]数值模拟了长坑道内冲击波传播过程,并结合模型试验得到冲击波正冲量沿等截面直坑道传播的工程经验模型;杨科之等^[27]利用三维数值模拟计算程序,对长坑道中的化爆流场进行了数值计算,归纳出空气冲击波沿坑道方向的传播规律。

对于隧道内爆炸,文献[28]基于一系列内爆炸试验,给出了用于预测隧道内部冲击波超压的计算公式;田志敏^[29]、邬玉斌^[30]对大型隧道进行了一系列内爆炸试验,考虑装药量、装药爆高、装药形状及爆炸位置的影响,拟合出隧道内壁反射压力发展曲线,具有更宽的适用范围。

3 建筑物内可燃气体爆燃

建筑物中发生的可燃性气体爆炸事故大多数属于爆燃情况^[31],工业车间和民用住宅则是事故多发地,如室内容器、管道破裂时燃料的飞散,管道接口处燃气的渗漏,易燃液体、化学溶剂的渗漏或挥发等均会导致可燃气体混合物形成并引发爆燃。建筑内气体爆燃时,门、窗等薄弱结构或泄放设施会随室内压力增大由封闭至逐渐开启,可将其视为有约束泄压受限空间内爆燃泄放问题,但同时要兼顾考虑建筑本身使用功能特点,如室内障碍物对火焰的加速,空间尺寸对爆燃压力发展的影响等。

3.1 受限空间内障碍物对爆燃发展的影响

一般而言,建筑物内往往存在着影响爆燃火焰传播的障碍物,如厂房中的工业设备及附属设施,

矿道中的矿车,房厅中的楼梯、支撑柱等。爆燃火焰遇到障碍物后会形成湍流火焰,导致火焰加速和爆燃压力升高,在多个障碍物作用下甚至发生爆燃转爆轰现象,由于这一过程极为复杂,当前常以试验研究和数值模拟为主,且研究受限空间内火焰与障碍物相互作用时,通常通过检测管道压力、测试流场速度或拍摄试验照片等方法来描述试验现象;而在数值模拟中则常采用雷诺应力模型、 $k-\epsilon$ 模型和大涡模拟处理湍流问题。如Ritsu^[32]、Masri等^[33]对管道内可燃气体爆燃强度进行了研究,定性描述了障碍物形状对爆燃压力的影响;Ibrahim等^[34]通过试验综合研究了障碍物尺寸、阻塞率对可燃性气体混合物火焰爆燃超压的影响,得到火焰的形状和传播速度随障碍物阻塞率而变化,且最大超压通常随阻塞率的升高而升高;林柏泉等^[35,36]利用瓦斯爆炸试验管道研究了障碍物对火焰和爆炸波传播的影响;齐峰^[37]针对有障碍物存在条件下甲烷-煤粉混合物的爆炸特性进行了试验研究,得到了障碍物形状、尺寸、数量等对爆燃特性的影响规律;毕明树等^[38]通过试验研究了障碍物对密闭管道内甲烷-空气爆炸威力的影响。

数值研究方面,Fairweather等^[39]通过爆炸管中气体爆炸火焰传播的数值模拟研究得出了“管道中爆炸超压主要是由于障碍物产生的湍流燃烧引起”的结论;应展烽^[40]对预混火焰翻越矩形柱、楔形柱、穿越回形柱及绕过方柱、圆柱、三角柱的过程进行了试验研究,利用大涡模拟(LES)对试验过程进行了数值模拟,详细探讨了火焰与各种障碍物作用过程中出现的复杂现象;李帆^[41]通过数值模拟研究了管道内不同障碍物形状、不同数量、不同间距对火焰传播阵面、速度和压力的影响。

3.2 建筑物内爆燃泄放过程研究

可燃气体爆燃发展过程实际上是燃烧的快速发展过程,属于伴随有化学反应的不定常流动过程。爆燃时瞬间放出热,使产物状态突变,此突变以燃烧波的形式自爆源向外传播,遇结构形成的荷载是用有限的压力上升时间和缓慢的上升规律表征的,可视为准静态发展过程。

当前对受限空间内部气体爆燃已有较为成熟的研究成果^[42-44]并形成了相关标准、规范^[45-48]。通常研究气体爆炸泄放的模型主要有域模型和计算流体力学(CFD)模型。多域模型将爆炸泄放分为密闭燃烧和泄放燃烧两阶段,对密闭燃烧阶段,在考虑温度、压力对燃烧速度影响的同时引入了燃烧不

稳定因子^[49]；对泄放阶段引入气体泄漏产生的湍流因子^[50]。这种模型适用于空间形状简单，初始为常压、常温的气体爆燃泄放，对偏离模型条件的实际问题偏差较大。CFD模型是建立在流体动力学计算方法上的模型，可用于求解大部分实际工程的爆炸泄放问题，但其建模复杂，影响火焰流动的因素多，且工程使用经验少^[51,52]。

在密闭燃烧阶段，Bartknecht^[42]通过试验指出密闭空间内最大压力上升速度与容器体积的立方根的乘积为一常数，王宝兴^[53]则根据经验公式推证出这一结论适用于建筑物爆炸泄压；Phylakton和Andrews^[54]根据容器管道系统内气体爆炸试验，讨论了引燃源位置和气体浓度对气体爆炸强度的影响；沈伟等^[55]针对工程场所可燃气体爆燃过程设计了试验系统，研究了空间尺度对气体爆燃波发展过程的影响。张英浩^[56]在水平管道试验装置的基础上，建立了可燃气体爆炸压力测试系统，研究了管道长度对可燃气体最大爆炸压力的影响。理论研究方面，由于受限空间气体爆炸发展过程较为复杂，目前提出的多为通过各种假设满足实际工程需要的各种爆炸模型：Nagy^[57]提出了等温爆炸模型，假设爆炸产物与未反应气体温度在爆炸过程中始终保持不变；Zabetakis^[58]提出了绝热爆炸模型，认为火焰面扩展速度较快，可将爆炸过程近似看成绝热过程，而未反应气体温度随绝热压缩而升高；Lee于1985年提出了密闭容器中气体爆炸发展的一般模型，较为详细地描述了爆炸点火前容器内初始状态，点火后气体燃烧和火焰面到达容器壁面的状况。此后，国内外研究者^[59,60]从等容绝热燃烧模式出发，采用球面火焰假设对受限空间气体爆炸进行了研究；张艳春等^[61]运用有效能概念预测了密闭空间可燃气体爆燃所产生的最大压力；吴志远等^[62]研究多元可燃性混合气体在定容、绝热情况下发生爆炸时最大爆炸压力的简化计算方法。数值模拟方面，Ulrich等^[63]利用火焰轨迹方法对密闭管道内混合气体爆燃过程进行了数值模拟，预测了管道内最大爆炸压力和压力上升速度以及火焰到达管道内某处的时间；毕明树等^[64,65]采用均匀能量释放模型，对管道内气体爆炸进行了数值计算，获得了受限空间气体爆炸压力和压力上升速度；张宏翔^[66]建立了二维封闭管道模型和流体力学、燃烧学控制方程组，对预混甲烷-空气混合气体在管道内的爆炸传播进行了二维数值模拟，研究了爆炸波的加速传播机理。

在泄放燃烧阶段，文献[31,44]将室内气体泄放视为一维定常等熵流动，爆燃压力随着爆燃产物的形成和室内气体的泄放而变化。为方便使用，工程设计中常运用爆炸泄放试验得到简化计算公式预测爆炸泄放超压^[67,68]，此类试验大多在初始条件为常压、常温的中、小型容器中进行，容器形状一般为球形、立方形以及长径比小于5的柱形和矩形，点火时容器内气体静止无扰动，点火位置大多在中心，试验介质大多为碳氢化合物。国内部分高校和研究机构对单个容器或管道的气体的爆炸泄压过程进行了一些试验研究，探索气体泄爆发展规律以及泄爆面积、泄爆压力等参数对泄爆过程的影响。如大连理工大学王淑兰、丁信伟等^[69,70]探讨了容器内压力与泄放比、泄爆压力之间的关系；胡俊等^[71]采用底端中心点火方式研究了可燃预混气体泄爆过程中的压力发展规律；师喜林等^[72]从流体力学和化学反应动力学守恒出发，采用 κ - ε 湍流模型和EBU-Arrhenius燃烧模型得到了气体燃烧过程中火焰和压力传播特性以及气体流动特性，较为清晰地反应出泄爆的整个过程；尤明伟等^[73]利用流体力学软件Fluent对球形容器泄爆过程中流场进行数值模拟，分析泄爆导管长度和泄放压力对爆炸压力和爆炸强度的影响，以及泄爆过程中火焰阵面和速度场的变化。

4 研究现状分析

1) 结构内部化爆条件下荷载的形成和发展十分复杂，当前对其研究多以试验研究和数值模拟为主，得到了大量的定性结论和经验公式，这些结论和公式可应用于建筑内部爆炸研究中，对建筑内爆炸压力流场的发展和结构振动响应进行了理论分析，但由于多数试验在爆炸容器内进行，且小比例模型试验较多，原型试验较少，得到的经验公式往往受到较为严格的条件限定，难以用统一的数学公式归纳。数值模拟尽管可较全面地反映内爆炸流场规律，但其准确性受理论模型、材料参数、建模时的网格划分等诸多因素的影响，有效控制误差是数值模拟结论正确的关键。

2) 受限空间爆燃火焰速度直接影响爆燃压力发展，建筑物内障碍物会加速火焰传播，并诱导爆炸压力增强。当前许多研究多在规则形状或固定位置条件下（如在圆形或矩形管道内设置挡板、格栅一类障碍物）考虑障碍物与火焰作用的流场变

化,对火焰与不同形状及不同摆放位置障碍物的研究较少,缺少一套适用于房屋内部障碍物对爆燃火焰传播速度增强的评估准则。

3)当前大部分对受限空间内气体爆燃泄放的研究多在容器、设备、管道等内部空间进行,相关成果可对建筑房屋内气体爆燃提供研究基础,但针对工业、民用建筑物内气体爆燃荷载的实用简便计算方法研究不多。此外,多数研究得到的公式、标准建立在试验和数值模拟基础上,适用范围受到很大限制,预测的结果与试验结果有较大的偏差^[74,75]。建筑物一般采用有封堵物的泄压装置,这些孔口从封闭到完全敞开往往需要一个过程,如窗户玻璃的破碎、轻质泄爆板的转动或移动开启,泄压口敞开时间的滞后性将使得根据现有一些公式确定的泄压面积难以满足要求。

5 结语

建筑物内炸药爆炸和可燃性气体爆燃是十分复杂的过程,当前对其研究多以模型试验和数值模拟为主,得到的经验公式适用性受到很大限制。现有的理论模型多以爆燃容器、管道等小型空间内爆炸为主,对建筑物特点及其使用功能考虑较少。

参考文献

- [1] Baker W E. 爆炸危险性及其评估 [M]. 张国顺,文以民,刘定吉,译.北京:群众出版社,1988.
- [2] Theodor Krauthammer. Modern Protective Structures [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [3] Bangash M Y H. Shock, Impact and Explosion Structural Analysis and Design [M]. Berlin: Springer Press, 2009.
- [4] TM5-855-1, Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons [S]. Waterway Experimental Station, Department of the Army, 1986.
- [5] TM5-1300, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions [S]. Washington DC: Department of the Army Technical Manual, 1990.
- [6] Lewis B B. Final report for confinement vessel analysis task 1: Correlation of new vessel data with finite element results [R]. LA-SUB-94-146-Task-1, 1993.
- [7] Charis J G, Nikos G P. Elastic-plastic response spectra for exponential blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(3): 1388-1416.
- [8] Schekliniski-Glueck G. Development of an engineering model for inside detonations in 3-chamber systems [C]// 9th International Symposium on the Interactions of the Effects of Munitions and Structures. 1999.
- [9] Andreson C E, Baker W E. Quasi-static pressure and impulse for explosions in structures [J]. Int J Mech Sci, 1983, 25(6): 455-464.
- [10] 张 舵,吴克刚,卢芳云. 建筑物内爆炸波的动压荷载研究[J]. 采矿技术, 2009, 9(5): 68-73.
- [11] 周 清. 密闭结构内爆炸引起的内壁超压分布规律及简化计算研究[D]. 天津:天津大学, 2008.
- [12] 张德志. 柱形爆炸容器载荷与塑性结构响应研究[D]. 西安:西北核技术研究所, 2012.
- [13] 李 铮. 钢筋混凝土抑爆间室的试验研究[C]// 防护工程学会第四届理事会暨第七次学术年会论文集. 井冈山, 2000.
- [14] 王春明,陈剑杰. 密闭爆室爆炸冲击波载荷下相似性数值分析[C]//中国土木工程年会防护工程第八次防护工程学术年会论文集. 三亚, 2003.
- [15] White J J, Trott B D. Scaling law for the elastic response of spherical explosion containment vessels [J]. Experimental Mechanics, 1980, 20(5): 174-177.
- [16] 杨科之,杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37-40.
- [17] 张亚军,徐胜利. 中心内爆引起的圆柱壳流固耦合问题数值模拟[J]. 中国科技大学学报, 2007, 37(11): 6-12.
- [18] 张亚军. 爆炸流场及容器内爆炸流固耦合问题计算研究[D]. 北京:中国科技大学, 2007.
- [19] 刘宪德,管怀安. 密闭结构内爆炸流场的数值模拟[C]//中国土木工程协会第六次年会. 北京, 1998.
- [20] 宁鹏飞. 多层密闭结构抗内爆炸研究[D]. 南京:解放军理工大学, 2012.
- [21] 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬,译. 北京:科学出版社, 2011.
- [22] 王省身,谢之康. 矿井沼气爆炸安全距离的探讨[J]. 中国矿业大学学报, 1989, 18(4): 1-8.
- [23] Joachim C E. Shallow underground tunnel/chamber explosion test program summary report [R]. Structures laboratory, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, 1990.
- [24] 庞伟宾,李永池,何 翔. 化爆冲击波在T型通道内到时规律的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2007(1): 63-67.
- [25] 陈海天,李秀地,郑颖人. 内爆炸坑道中冲击波冲量试验[J]. 后勤工程学院学报, 2008, 24(2): 6-8, 13.
- [26] 李秀地,郑颖人,李列胜,等. 长坑道中化爆冲击波压力传播规律的数值模拟[J]. 爆破器材, 2005, 34(5): 4-7.
- [27] 杨科之,杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37-40.
- [28] Rickard Forsen. Tunnel explosion characteristics[R]. SP Sveriges provnings-och for skningsinstitut, 2008.
- [29] 田志敏,郭玉斌,罗奇峰. 隧道内爆炸冲击波传播特性及爆炸荷载分布规律研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 21-25.
- [30] 郭玉斌. 地下结构偶然性内爆炸效应研究[D]. 北京:中国地震局工程力学研究所, 2011.
- [31] 毕明树,杨国刚. 气体和粉尘爆炸防治工程学[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.
- [32] Ritsu Dobashi. Experimental study on gas explosion behavior in enclosure [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1997, 10(2): 83-89.
- [33] Masri A, Ibrahim S, Nehiat N, et al. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 21: 19-116.
- [34] Ibrahim S S, Masri A R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001, 14: 213-221.
- [35] 林柏泉,桂晓宏. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律的模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 31(1): 6-9.
- [36] 林柏泉,桂晓宏. 瓦斯爆炸过程中火焰厚度测定及其温度场数值模拟分析[J]. 试验力学, 2002, 17(2): 227-233.
- [37] 齐 峰. 障碍物对甲烷-煤粉爆炸强度影响的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [38] 毕明树,董呈杰. 密闭空间障碍物条件下甲烷-空气爆炸试验[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2009.
- [39] Fairweather M, Hargrave G K, Ibrahim S S, et al. Studies of premixed flame propagation in explosion tubes [J]. Combustion and Flame, 1999, 116(4): 504-518.
- [40] 应展峰. 预混火焰与障碍物相互作用的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2008.
- [41] 李 帆. 管道内障碍物对可燃气体燃爆影响的仿真研究[D].

- 太原:中北大学,2009.
- [42] Bartknecht W B. 爆炸及其安全措施[M]. 解魁文,洪季敏,译. 江苏:江苏科学技术出版社,1985.
- [43] Baker W E. 爆炸危险性及其评估[M]. 张国顺,文以民,刘定吉,译. 北京:群众出版社,1988.
- [44] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [45] NFPA 68. Guide for Venting of Deflagrations (2007 Edition) [S]. 2007.
- [46] VDI 3673 Part 1, Pressure Venting of Dust Explosions (2002 Edition) [S]. 2002.
- [47] GB 15605—2008. 粉尘爆炸泄压指南[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [48] GB 50016—2006. 建筑设计防火规范[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [49] 吴冬辉,王淑兰. 气体燃爆泄放过程中燃烧速率的评价[J]. 化学工业与工程技术,2005,26(3):4-7.
- [50] Dal Jae Park, Young Soon Lee. A comparison on predictive models of gas explosions [J]. Korean J Chem Eng, 2009, 26(2): 313-323.
- [51] Molkov V V, Korolchenko A, Alexandrov S V. Venting of deflagrations in buildings and equipment: universal correlation [C]// Proceedings of 5th International Symposium on Fire Safety Science. Australia; Melbourne, 1997: 1249-1260.
- [52] Molkov V V, Dobashi R, Suzuki M, et al. Modelling of vented hydrogen-air deflagrations and correlation for vent sizing [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, 12: 147-156.
- [53] 王宝兴. 立方体定律在建筑物爆炸泄压研究中应用的可能性[J]. 力学与实践, 1986(S1): 51-55.
- [54] Phylakton H, Andrews G E. Gas explosion in linked vessels [C]// 13th ICDERS. Japan, 1999.
- [55] 沈伟,杜扬. 受限空间尺度对可燃气体爆燃波发展过程的影响[J]. 试验力学, 2006, 21(2): 122-128.
- [56] 张英浩. 水平管道内可燃气体爆炸压力研究[D]. 太原:中北大学, 2009.
- [57] Nagy J. Development and Control of Dust Explosions [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1983.
- [58] Zabetakis M G. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors [M]. USA: US Bureau of Mines Bullet, 1965.
- [59] Chippett S. Modeling of vented deflagration [J]. Combustion and Flame, 1984, 55(2): 127-140.
- [60] 邢志祥. 密闭容器内液化石油气燃爆特性的计算[J]. 消防科学与技术, 2000(2): 61-62.
- [61] 张艳春,喻健良,丁信伟,等. 预测密闭容器内可燃气体爆燃最大压力的方法[J]. 化工机械, 2002, 29(6): 333-337.
- [62] 吴志远,胡双启,谭迎新. 多元可燃性混合气体最大爆炸压力的简化计算[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(2): 118-122.
- [63] Ulrich Bielert, Martin Sichel. Numerical simulation of premixed combustion processes in closed tubes [J]. Combustion and Flame, 1998, 114(3): 397-419.
- [64] 毕明树,尹旺华,丁信伟. 密闭容器非理想爆源爆炸过程的数值模拟[J]. 化学工业与工程技术, 2003, 24(2): 1-3.
- [65] 毕明树,尹旺华,丁信伟. 管道内可燃气体爆燃的一维数值模拟[J]. 天然气工业, 2003, 23(4): 89-92.
- [66] 张宏翔. 管道内预混可燃气体燃爆过程仿真研究[D]. 太原:中北大学, 2008.
- [67] Yao C. Explosion venting of low-strength equipment and structures [J]. Loss Prevention, 1974, 8: 1-9.
- [68] Bradley D, Mitcheson A. The venting of gaseous explosion in spherical-theory and experiment [J]. Combustion and Flame, 1978, 32: 237-255.
- [69] 王淑兰,丁信伟. 化工设备紧急泄爆安全设计[J]. 石油化工设备, 1994, 23(1): 28-29.
- [70] 王淑兰,丁信伟,贺匡国. 液化石油气燃爆泄放特性试验研究[J]. 化工机械, 1994, 21(2): 71-73.
- [71] 胡俊,浦以康,万士昕. 柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 47-52.
- [72] 师喜林,王志荣,蒋军成. 球形容器内气体的泄爆过程[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(4): 390-394.
- [73] 尤明伟,蒋军成,师喜林. 球形容器内可燃气体泄爆过程的数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(5): 28-29.
- [74] Molkov V, Dobashi R, Suzuki M, et al. Venting of deflagrations: Hydrocarbon-air and hydrogen air system [J]. J Loss Prev Process Industries, 2000, 13: 397-409.
- [75] 李岳,王淑兰,丁信伟,等. 气体爆炸泄放计算方法比较与试验[J]. 石油化工设备, 2003, 14(1): 6-10.

Review on internal explosion loading of building

Gao Kanghua¹, Jin Fengnian¹, Wang Derong¹, Ma Shiliang²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China; 2. The Zhenjiang City Invest Group, Zhenjiang, Jiangsu 212004, China)

[Abstract] Internal explosion has become one of the main forms of explosion disasters faced by buildings. According to chemical explosive internal explosion and combustible gas mixture interior deflagration, the domestic and international researches are summarized and commented from theoretical analysis, experimental study and numerical simulation. It shows that most research results are obtained by explosion experiment or numerical simulation in containers and pipes, and the buildings' characteristics and functions are considered little in the corresponding theoretical model of internal explosion.

[Key words] building; internal explosion loading; chemical explosive; combustible gas mixture; deflagration