

# 燃气爆炸事故对住宅建筑的破坏

韩永利<sup>1</sup>, 陈龙珠<sup>2</sup>

(1. 上海原构设计咨询有限公司, 上海 200232; 2. 上海交通大学 船建学院安全与防灾工程研究所, 上海 200240)

**摘要:**目前燃气爆炸事故灾后调查中,尚缺乏有关其破坏机理及特点方面的研究。介绍了发生于上海的2起燃气爆炸事故的概况及处理方案。运用理论计算、数值模拟等方法得出了2起事故中破坏较为严重的预制板和现浇板的抗爆能力,估算出2起事故的爆炸超压。分析了2起事故爆炸超压相差不大,但破坏后果却相差较大的原因。进而对燃气爆炸对房屋造成损坏的特点进行了分析,认为:1)双向现浇板的抗爆能力要远优于单向预制板;2)点火源所在房间直接受到超压波的冲击作用而破坏最为严重,周围房间的破坏则是由震动引起的,距离爆炸点越远影响越小。

**关键词:**燃气爆炸;抗爆能力;爆炸超压;楼板;破坏分析

**中图分类号:**TU312.3;O383.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)06-0120-04

## Failure Analysis of Residential Buildings under the Gas Explosion Accident

HAN Yong-li<sup>1</sup>, CHEN Long-zhu<sup>2</sup>

(1. ACO Architects and Consultants, Shanghai 200232, P. R. China; 2. Institute of Engineering Safety & Disaster Prevention, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China)

**Abstract:** At present, there is a lack of study on the destruction mechanism and characteristic in the investigation after gas explosion accident. The destruction and treatment scheme of two accidents happened in Shanghai were introduced. According to the precast slab and poured slab that badly damaged in the two accidents, the anti-explosion ability of the slab was obtained through theoretical calculation and numerical simulation, and then explosion overpressure was estimated. The reason why the overpressure differs little but the destruction differs much in the two accidents and the destruction characteristic of the gas explosion to the building were all analyzed. It is considered that: 1) the anti-explosion ability of the poured slab is far superior to the one-way precast slab; 2) Room with the ignition source is impacted by the overpressure directly and the damage is most serious, while the destruction of the other rooms is caused by the vibration, and its influence is smaller as the house is far from the explosion.

**Key words:** gas explosion; anti-explosion ability; explosion overpressure; slabs; failure analysis

自从1968年Ronan公寓燃气爆炸引起连续性倒塌以来,该类事故逐渐引起了人们的注意<sup>[1-3]</sup>。相比于普通炸药爆炸或核爆炸,发生于住宅内部的燃气爆炸威力很小,通常只有5~50 kPa的超压,但其持续时间较长、构件受力方向改变,仍较易造成楼板、墙体等构件的破坏,这是除烧伤之外造成人员伤亡的主要原因。

防爆研究造价较高且目前中国研究多是针对炸药爆炸,关于住宅燃气爆炸方面的文章多为鉴定部门所进行的灾后调查和加固、修复意见,很少有针对性的深入研究,如有关燃气爆炸造成建筑物破坏的原因和机理<sup>[4-5]</sup>。

结合发生于上海的2起燃爆事故(由上海市房屋质量检测站提供相关资料),从构件抗力和爆

炸超压2个角度进行分析,研究其带来严重损失的原因和特点。

## 1 2起燃爆事故简介

### 1.1 案例1

2009年3月18日,上海市松江区谷阳北路881弄104号102室发生燃气爆炸事故,造成1死3伤。该住宅楼为6层砖混结构,承重墙采用多孔砖砌筑,楼板为钢筋混凝土现浇板。

104号102室为爆炸中心,破坏最为严重。爆炸造成天井围墙倒塌,见图1;室内装修、电器等均损毁,墙面粉刷大面积剥落;客厅平顶东侧楼板断裂,钢筋外露,断裂处楼板上下错位约8mm;其它墙体、过梁、楼板等多处开裂。

104号其它房间以及相邻的97—99号、103—105号房屋出现不同程度的装修损坏,包括门框开裂、瓷砖脱落、吊顶损坏、塑钢门窗变形断裂等,但主体结构未受损坏。

处理意见为:对102室楼盖结构凿除后重新浇筑,新老结构连接处采用膨胀混凝土处理。其它轻微损伤按原样进行修缮处理。



图1 案例1天井围墙倒塌

### 1.2 案例2

2009年6月20日,上海市青浦区章浜新村10号404室发生煤气爆炸事故,导致8人受伤。该住宅楼为砖混结构,楼板为预制多孔板。

爆炸致使整幢居民楼的玻璃窗全部碎裂,10号4层局部承重墙体严重坍塌,404室西外墙、北外墙被炸成“镂空”状态,见图2;504室预制板也因爆炸而坍塌,南侧阳台也均有变形。

现场检测时,10号房屋已经部分拆除。剩余部分1—6层房屋除装修损坏严重外,主体结构存在一定的损坏现象,部分承重墙体及平顶开裂。周围多个单元房屋均存在一定程度的装修损坏,包括玻璃破碎、门窗变形等,房屋主体结构未发现有明显损坏。

1)对拆除的10号104—604室按照原样重建,抗震设防比原结构适当提高,楼屋面采用现浇混凝土



图2 案例2爆炸现场破坏情况

土结构,在纵横墙体交接处设置构造柱、圈梁。重建部分和保留结构要有可靠连接。

2)对10号103—603室及楼梯间保留,严重损坏部位可参照相关规程采用水泥砂浆面层和钢筋网砂浆面层对墙体进行加固。其它非结构性损坏进行对症修复。

## 2 楼板抗力及爆炸超压分析

案例1仅需对1块楼板进行加固,而案例2不仅发生爆炸的单元全部拆除重建,剩余部分的加固修复工作量也很大。结构的破坏程度取决于构件自身抵抗力和爆炸荷载的大小,故研究2起事故破坏后果相差较大的原因,首先必须解决这2个问题。

### 2.1 楼板抗力的计算

案例1现浇板尺寸为3.6m×5.0m,由于资料有限,假定混凝土等级为C20,板厚90mm,双层双向配筋均为Φ8@200,层高2.6m。

案例2预制板宽1.0m,跨度3.2m,简支边界,双层配筋,底部为Φ8@100,上部为Φ8@200;C20混凝土,板厚90mm。

#### 1)数值模拟

建立楼板分离式有限元模型,钢筋和混凝土分别使用LS-DYNA提供的3号和111号材料模型,使用图3所示具有燃气爆炸荷载特征的简化曲线<sup>[6-8]</sup>, $P_v$ 、 $P_m$ 表示泄爆超压和峰值超压, $t_v$ 、 $t_m$ 为其对应时间。尽管升压时间可达数百ms,但大部分的超压产生于最后几十ms。计算时为减少计算量,可以只选取ABC段。对于普通住宅房间,升压和降压时间可取50ms<sup>[6]</sup>。有限元模型如图4、5所示,2楼板均是反向加载。

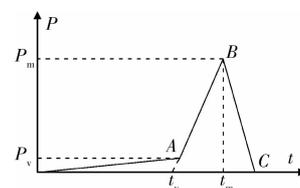


图3 燃气爆炸荷载曲线

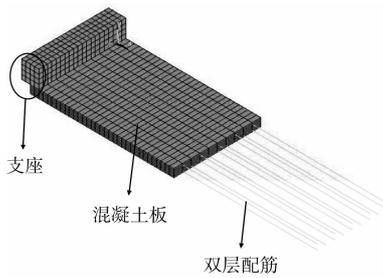


图 4 预制板有限元模型

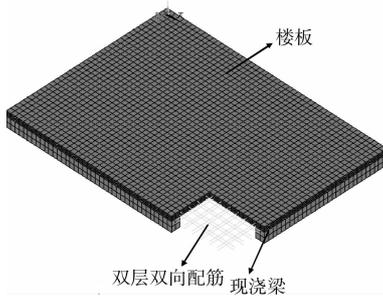


图 5 现浇板有限元模型

气体爆炸所引起的材料应变速率典型值为  $(50 \sim 500) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。使用文献[9]引用的 CEB、Malvar 修正、K&C 模型、Tedesco 和 Ross 公式,以及肖诗云<sup>[10]</sup>、Grote<sup>[11]</sup>等学者提供的多组计算式进行计算。综合分析以后最终决定,对于 C20 混凝土材料,抗拉、抗压 DIF(动力提高系数)分别取 1.3 和 1.2;不考虑钢筋强度的提高。

失效准则的取值对计算结果影响极大,其取值一直没有统一标准,各学者给出的数值相差极大。如对于混凝土材料的失效主拉应变,各文献中使用的数值有 0.002<sup>[12]</sup>、0.003 5<sup>[13]</sup>、0.01<sup>[14]</sup>、0.5<sup>[15]</sup>等。故拟根据中国多所高校的静载试验建立几十组楼板模型,反推出适用于燃气爆炸荷载的材料失效准则的取值。经过修正以后决定,文中 C20 混凝土的失效主应力取 3.45 MPa,钢筋失效主应变取 0.012。

以楼板混凝土大量开裂或钢筋拉断作为楼板破坏判定标志,计算出图 4、图 5 中楼板抗爆能力分别为 9.0~10.0 kPa 和 25.0~28.0 kPa。

实际建筑中构件之间相互挤压,这与该文建立的简支边界有所区别,故图 4 模型的结果应当适当提高;借助软件计算出约提高 30%。由于是反向受力,两楼板需加上 4 kPa 使用荷载。

经修正,最终确定两楼板的实际抗燃气爆炸能力为 29~32 kPa(图 5)和 15.7~17 kPa(图 4)。

## 2) 理论公式计算

根据塑性铰线理论,由于现浇楼板双层双向配筋,各个方向配筋相同,各塑性铰线单位宽度内的极

限弯矩应该也是相同的,简化后的公式如式(1)和式(2)。式(3)为双筋梁正截面受弯承载力计算公式,计算简支预制板承载力。

$$q = 48m\lambda^2 / [l_x^2 (\sqrt{1+3\lambda^2} - 1)^2] \quad (1)$$

$$m = \gamma_1 f_y A_s h_0 \quad (2)$$

$$M = \gamma_2 f_y A_s (h_0 - a') = ql^2 / 8 \quad (3)$$

式中,  $m$  表示沿短跨和长跨方向塑性铰线上单位宽度内的极限弯矩;  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  为双向板和单向板的双筋截面单位宽度抗弯能力比单筋截面的提高系数,同样借助有限元软件计算出  $\gamma_1 = 1.2$ ,  $\gamma_2 = 1.1$ ;  $f_y$ 、 $A_s$  为受拉钢筋强度和截面积;  $h_0$  为计算高度,  $a'$  为保护层厚度;  $\lambda = l_y / l_x$ ,  $l_y$  和  $l_x$  分别为双向板长、短跨计算长度,  $l$  为单向板计算长度;  $q$  为板的极限承载能力。

由于薄膜效应只在楼板变形相当大时对其极限承载力的提高才有重要作用<sup>[16]</sup>。进一步计算显示,图 5 模型达到极限承载能力之前中点挠度的最大值约为 50 mm,该值要小于楼板厚度。因此,没有考虑受拉薄膜效应。文献[17]在计算燃气爆炸下双向板抗爆能力时也未考虑大变形和边界约束带来的薄膜效应。

使用标准值计算,结果约为 16 kPa(图 5)和 8 kPa(图 4),该数值为静载值,需修正以获得燃爆荷载下的数值(提高约 20%),式(3)还需考虑边界修正,加上使用荷载后,分别为 27 kPa 和 16.5 kPa,与数值模拟结果比较接近。

## 2.2 爆炸超压的估算

爆炸后可根据构件的抗力和其破坏程度近似推求作用在其上面的超压值,这也是目前灾后鉴定中常用的爆炸超压估算方法。

通常认为,小于 30 kPa 的超压人体是可以忍受的,达到 66.2 kPa 可使 50% 成人鼓膜穿孔;达到 100 kPa 时,鼓膜几乎 100% 破裂<sup>[18]</sup>。预制板的承载能力只有十几 kPa,现浇板可以达到几十 kPa 以上。结合相关资料、数值模拟结果以及媒体报道,整理了燃气爆炸对建筑物及人员的损坏程度(除烧伤),汇总于表 1。

1) 根据表 1,结合 2 起事故中主体结构破坏情况,可以估算出 2 起事故的爆炸超压分别为 20~30 kPa(现浇)和 30~40 kPa(预制)。

2) 根据楼板抗力,案例 1 中现浇楼板并未被炸穿,实际超压当低于楼板的抗爆能力;而案例 2 中上部预制板已经完全塌陷,其爆炸超压当比楼板抗爆能力高出许多。

表 1 燃气爆炸破坏情况汇总

编号	超压 /kPa	建筑物破坏	人体伤害
(1)	< 2	基本无损坏,玻璃窗户偶尔开裂或震落。	—
(2)	2~10	门窗玻璃部分或大部分破坏。	—
(3)	10~30	轻度破坏,玻璃破坏严重,填充墙严重开裂或倒塌,楼板开裂。	爆炸碎块伤害
(4)	30~50	中等破坏,承重砖墙有较大裂缝或倾斜,预制楼板严重开裂甚至塌陷。	听觉器官损伤或骨折
(5)	50~100	严重破坏,门窗摧毁,承重砖墙开裂倾斜甚至倒塌,上下层预制楼板被炸穿,甚至现浇楼板塌陷。	内脏严重损伤或死亡
(6)	>100	砖墙倒塌,防震钢筋混凝土和大型钢框架结构破坏。	出现严重伤亡

最终确定,2起爆炸事故的爆炸超压分别为 20~25 kPa(现浇)和 30~35 kPa(预制)。可以看出,2起爆炸事故产生的超压仅相差 10 kPa 左右,但产生的破坏后果却相差较大。这是因为:2起爆炸事故产生的超压范围为 20~35 kPa,该值恰好介于普通单向预制板和现浇双向板的抗爆能力值之间,故前者破坏严重,而后者却可以承受住爆炸荷载。

### 3 房屋损坏特点分析

燃气爆炸时室内空气的压力瞬间急剧上升,并对周围物体产生破坏作用。其发展过程及破坏机理见图 6 所示。

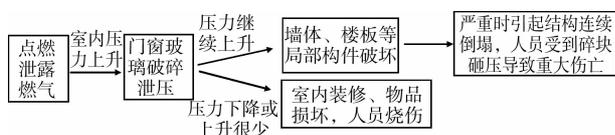


图 6 燃气爆炸产生破坏机理

影响室内燃气爆炸超压的因素有很多<sup>[6]</sup>,如混合气体浓度越接近最优配合比、泄爆压力越大、泄压面积越小、气体燃烧速率越大,则超压越大。另外,点火源位置、房间形状、内部障碍物等也都会对爆炸超压产生影响。

根据国内外发生的大量燃爆事故实例,可以得出以下具有普遍性的结论:

1)通常情况下,燃气爆炸超压较低,仅有十几 kPa 或者更低,故多数燃气爆炸仅造成了门窗、装饰的破坏,主体结构并未破坏。

2)当遇到不利情况时,爆炸超压可以达到几十 kPa,局部超压甚至更高。该数值要高于普通单向预制板以及填充墙体的抗爆能力,因此往往会造成部分预制楼板和墙体的破坏。例如本文中案例 1 中围护墙体倒塌;案例 2 中预制楼板及部分墙体倒塌。

3)发生爆炸的空间直接受到压力冲击,故其破坏最为严重,而其它相邻房间的损坏则是由于受到强烈震动所引起的。因此,相比于固体炸药爆炸,气体爆炸同样具有以下的特点:在一定范围内具有破坏力,距离爆裂点越远,影响越小。这一点也可以由

一些爆炸事故现场可以看出,房屋损坏越严重(爆炸越强烈)的爆炸事故,其周围受损房屋范围就越大。

### 4 结论

结合发生于上海的 2 起燃气爆炸事故,对钢筋混凝土楼板的抗爆能力以及爆炸超压进行了估算和分析,并分析了燃气爆炸对房屋带来损坏的特点。使用的分析方法和得出的结论可为住宅燃气爆炸的灾后鉴定和防护设计提供参考。

进一步计算表明,影响楼板抗爆能力因素较多。其中,边界影响效果最为显著,其次为厚度,混凝土强度和配筋率的影响相对较小。

选取的 2 个案例涉及到预制板和现浇板,均为多层砖混结构,这也是在燃气爆炸下较易产生结构构件破坏的结构形式,案例具有普遍性和代表性。

今后应当进行相关试验研究,以更好的研究其破坏机理,验证分析结果,并找到可行的防护措施。

### 参考文献:

- [1] PEARSON C, DELATTE N. Lessons from the progressive collapse of the Ronan Point apartment tower[C]//San Diego, 3rd ASCE Forensic Engineering Congress, California, 2003: 190-200.
- [2] PEARSON C, DELATTE N. Ronan point apartment tower collapse and its effect on building codes[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2005, 19(2): 172-177.
- [3] TOSHISUKE H. Methodology for case studies of accidental gas explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001, 14: 553-557.
- [4] 高健. 室内燃气爆炸对居住房屋的危害及减灾措施[D]. 北京:清华大学,1991.
- [5] 叶宏. 民用燃气爆炸及对建筑结构影响的分析与研究[D]. 北京:清华大学,1994.
- [6] HAN Y L, CHEN L Z. Mechanical model of domestic gas explosion load[J]. Transactions of Tianjin University, 2008,14(6): 434-440.

(下转第 128 页)

thermal transmittance[S]. [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_ics/catalogue\\_detail\\_ics.htm?ics1=91&ics2=120&ics3=10&csnumber=17746](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?ics1=91&ics2=120&ics3=10&csnumber=17746).

- [14] ASTM. ASTM C1046-95 Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components [S]. <http://www.astm.org/Standards/C1046.htm>.
- [15] ASTM. ASTM C1155-95 Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data[S]. <http://www.astm.org/Standards/C1155.htm>.

[astm.org/Standards/C1155.htm](http://www.astm.org/Standards/C1155.htm).

- [16] 杨晚生. 太阳辐射对围护结构热流密度的现场检测误差分析[J]. 建筑节能, Vol37(7), 2009: 70-71.
- YANG WAN-SHENG. Error analysis of on-site detecting heating flux for envelope structure by solar radiation[J]. Construction Energy Conservation, 2009, 37(7): 70-71.

(编辑 胡玲)

(上接第123页)

- [7] SHEARER M J, TAM V H Y, CORR B. Analysis of results from large scale hydrocarbon gas explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13(2): 167-173.
- [8] QIAN X M, CHEN L S, FENG C G. Simulation analysis of indoor gas explosion damage[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 12(3): 286-289.
- [9] 宁建国, 商霖, 孙远翔. 混凝土材料动态性能的经验公式、强度理论与唯象本构模型[J]. 力学进展, 2006, 36(3): 389-405.
- NING J G, SHANG L, SUN Y X. The developments of dynamic constitutive behavior of concrete [J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(3): 389-405.
- [10] 肖诗云. 混凝土率型本构模型及其在拱坝动力分析中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [11] GROTESD L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(9): 869-886.
- [12] YUAN L, GONG S F, JIN W L. Spallation mechanism of RC slabs under contact detonation[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(6): 464-469.
- [13] ABBAS H, GUPTA N K, ALAM M. Nonlinear

response of concrete beams and plates under impact loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8/9): 1039-1053.

- [14] XU K, LU Y. Numerical simulation study of spallation in reinforced concrete plates subjected to blast loading [J]. Computers and Structures, 2006, 84(5/6): 431-438.
- [15] 盛利. 爆炸作用下钢筋混凝土梁动力响应数值模拟[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2007.
- [16] 李国强, 周昊圣, 郭士雄. 火灾下钢结构建筑楼板的薄膜效应机理及理论模型[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 40-47.
- LI G Q, ZHOU H S, GUO S X. Mechanism and theoretical model of membrane action in slabs of steel buildings subjected to fire [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 40-47.
- [17] 江见鲸, 王元清, 龚晓南, 等. 建筑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [18] 杨俊慧. 豚鼠低强度爆震聋后耳蜗细胞凋亡及其相关基因表达的变化[D]. 重庆: 第三军医大学, 2006.

(编辑 胡玲)