

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.01.014

## 椭圆形框架核心筒结构楼房爆破拆除技术研究\*

夏治园<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1,2</sup>, 王刚<sup>3</sup>, 马立飞<sup>1</sup>, 杨翎<sup>1</sup>, 陈欢<sup>1</sup>, 罗国安<sup>1</sup>, 高朋飞<sup>2,3</sup>

(1. 安徽江南爆破工程有限公司, 宣城 242300; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 淮南 232001;  
3. 安徽江南化工股份有限公司, 合肥 230000)

**摘要:** 针对某地 18 层椭圆形框架-核心筒结构楼房爆破拆除工况, 通过系统分析楼房受力特征发现: 椭圆形框架结构楼房高宽比小、跨度长等特点, 易发生后座甚至塌而不倒现象, 核心筒内部剪力墙分布不规则, 倒塌时易出现应力分布不均现象, 导致楼体偏移设计方向。针对上述工程难点, 设计时采用延期爆破、辅助弱化方式进行爆破拆除, 首先通过拆分切割、化筒为墙等预处理方式破坏楼房抗侧移结构属性, 避免楼体倒塌时发生偏移, 再将爆破切口细致划分成 4 个爆破分区并逐步增大各区延期时间, 尤其是将最后两分区延期时间提高至 1 s, 实现余留区域支撑点前移, 避免塌而不倒现象, 同时适当增大最末段起爆区域的支撑面积以控制后座, 设计中选用上下双切口折叠爆破方法, 控制楼房触地振动幅度, 提高楼房整体解离效果。现场爆破拆除时, 椭圆形楼房倒塌过程历时约 5 s, 基本沿设计方向倒塌, 存在轻微后座, 支柱失效明显, 各层楼板依次折叠, 爆堆集中, 拆除爆破效果良好, 为类似工程提供了借鉴。

**关键词:** 椭圆形楼房; 框架-核心筒; 爆破参数设计; 控制爆破; 倒塌条件

**中图分类号:** TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)01-0116-09

## Study on Blasting Demolition Technology for Building with Oval Frame and Core Tube Structure

XIA Zhi-yuan<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1,2</sup>, WANG Gang<sup>3</sup>, MA Li-fei<sup>1</sup>,  
YANG Ling<sup>1</sup>, CHEN Huan<sup>1</sup>, LUO Guo-an<sup>1</sup>, GAO Peng-fei<sup>2,3</sup>

(1. Anhui Jiangnan Blasting Engineering Co., Ltd., Xuancheng 242300, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology,  
Huainan 232001, China; 3. Anhui Jiangnan Chemical Co., Ltd., Hefei 230000, China)

**Abstract:** This study addresses the blasting demolition of an 18-story oval frame-core tube structure. Systematic analysis revealed that the structure's small height-width ratio and long span contribute to potential instability and collapse, with uneven stress distribution due to irregular shear wall placement within the core tube. To mitigate these challenges, delayed blasting and auxiliary weakening techniques were employed. The approach included pre-treatments such as splitting and cutting to transform the cylindrical structure into a wall-like form, reducing deviation during collapse. The building was divided into four blasting zones with increasing delay times, particularly extending the

收稿日期 (Date of reception): 2024-04-27

网络首发日期 (Published online): 2024-06-20

作者简介: 夏治园 (1995-), 男, 硕士、工程师, 从事爆破施工管理与爆破技术的研究工作, (E-mail) 1728435807@qq.com。

通讯作者: 高朋飞 (1989-), 男, 博士、高级工程师, 从事爆破施工管理与爆破技术的研究工作, (E-mail) 568662152@qq.com。

基金项目: 安徽省爆破器材与技术工程实验室开放基金重点项目 (编号: AHBP2022A-02); 安徽理工大学专利转化培育项目 (编号: ZL201908)

**About the author:** XIA Zhi-yuan (1995-), male, master, engineer, engaged in the research of blasting construction management and blasting technology, (E-mail) 1728435807@qq.com.

**Corresponding author:** GAO Peng-fei (1989-), male, doctor, senior engineer, engaged in the research of blasting construction management and blasting technology, (E-mail) 568662152@qq.com.

**Fund Programs:** Key Project of Anhui Blasting Equipment and Technology Engineering Laboratory Open Fund (No. AHBP2022A-02); Anhui University of Science and Technology Patent Transformation and Cultivation Project (No. ZL201908)

delay for the last two zones by 1 second to ensure sequential support point failure and prevent incomplete collapse. Additionally, the upper and lower double-incision folding blasting method was utilized to control vibration upon ground impact and enhance overall dissociation. The demolition process, lasting approximately 5 seconds, resulted in the building collapsing primarily along the designed direction with minimal backseat movement and evident structural failures. The sequential floor folding and concentrated pile blasting demonstrated effective demolition.

**Key words:** oval building; frame-core tube; blasting parameter design; controlled blasting; collapse condition

随着我国城市改扩建进程的不断加速, 高耸建筑物群越来越多地出现在人们的视野中<sup>[1,2]</sup>, 为保障高耸建筑物结构稳定, 设计过程中通常会采用框架-核心筒组合结构。框架-核心筒结构由框架和芯筒构成, 芯筒具有较强的抗侧移刚度, 框架、芯筒均可承担竖向荷载, 结构整体刚度大且高度可达百米至几百米<sup>[3,4]</sup>, 能有效抵御台风和地震灾害<sup>[5,6]</sup>。然而, “框架-核心筒”结构筒体一般采用现浇钢筋混凝土或高强度钢筋混凝土, 其强度大, 整体性好且该类建筑物内部结构复杂<sup>[7]</sup>, 基本无法用机械和人工方法进行拆除, 因此框架-核心筒结构建筑物拆除常会考虑采用钻爆法。

在框架-核心筒建筑物爆破拆除研究方面: 杨国梁采用共节点分离式钢筋混凝土模型对典型的框-筒结构的折叠拆除进行三维模拟研究<sup>[8]</sup>。吴建宇采用多段延时起爆技术进行框筒楼房爆破拆除<sup>[9]</sup>, 并对倒塌过程进行了仿真分析。费鸿禄提出框筒楼房“立体化渐变起爆”方法<sup>[10]</sup>, 实现空间上延时起爆。杨志红采用双切口对向倒塌爆破拆除两栋高层框架核心筒结构大楼<sup>[11]</sup>, 唐启超采用非电多回路网格式起爆网路实现了同向双切口定向爆破拆

除<sup>[12]</sup>。费鸿禄采用“内向折叠”的爆破拆除方案成功拆除 6 层框-筒结构的建筑物<sup>[13]</sup>。

就现有研究成果来看, 目前对于框架-核心筒结构高层楼房爆破拆除工况相对较少, 成熟经验较为有限, 对于形状不规则框筒结构楼房爆破拆除更是鲜有研究, 本文基于某地 18 层椭圆形框架-核心筒结构烂尾楼, 通过系统分析了楼房结构受力特征, 提出了克服工程重难点相关措施, 精确计算了爆破参数并提出了相关优化方案, 顺利拆除了该栋不规则框筒结构楼房。

## 1 工程概况

### 1.1 工程环境

现有待拆椭圆形楼房, 因烂尾已超过 5 年, 严重阻碍了当地经济发展, 需进行爆破拆除。楼房周边环境较为复杂, 东距 28 m 为“景观河”, 以远距 60 m 为在建楼房。南距 8 m 为新建规划道路, 以远为待开发用地或场平区等。西侧 60 m 为建筑群, 远至陵园路(距 350 m), 西北侧有两栋待拆楼房。北侧 105 m 有部分待拆除楼房, 远至阳德路(距 260 m), 楼房周边环境如图 1 所示。

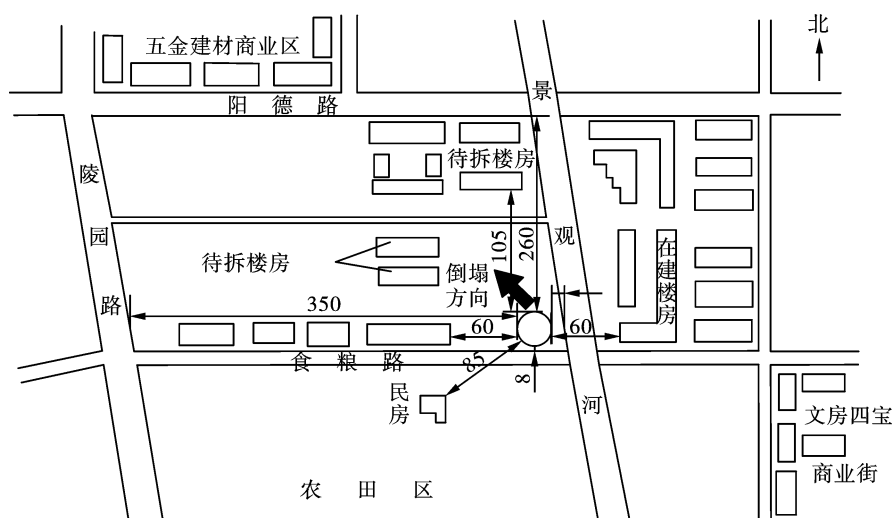


图 1 待拆楼房周边环境(单位:m)

Fig. 1 Surrounding environment of the building to be demolished(unit:m)

### 1.2 楼房结构

椭圆形楼房主楼为 18 层, 裙楼 3 层。平面结构

为椭圆形, 长轴 36 m, 短轴 31.5 m。主楼为框架-核心筒结构, 1 楼层间高度为 5 m, 2 至 18 楼的层间

高度均为3.7 m,主楼地面以上的总高度为72.2 m,爆破拆除的总建筑面积为27921 m<sup>2</sup>。

楼房在平面布置上沿椭圆轮廓线布置有16根立柱,立柱断面为圆形,3层以上直径为0.8 m,1~2层直径为0.9 m。立柱的层间高度:第1层高为5.0 m,梁下高度为4.3 m;第2层以上高度分别为3.7 m。立柱层间分布有径向的大梁,大梁断面规格为:宽×高=0.4×0.7 m,两根大梁之间分布有结构小梁,断面规格为:宽×高=0.25×0.4 m。向心方向距7.0 m为砌块墙构成的环形廊道,环形廊道宽2.0 m。中心部分为框架-核心筒+砌块墙构成的筒形结构,分布有电梯井、楼梯间和管线井等。中心部分平面结构同样为椭圆形,长轴17.7 m,短轴12.9 m。中心筒形断面沿长轴方向被电梯等候厅廊道分成两部分,形成上、下(北为上)两个椭圆弓形,厅廊宽度为3.0 m;剪力墙厚度为0.25 m,圈梁以下高度3.0 m,两个弓形剪力墙的总长度为65.85 m,楼房实际形态及平面结构如图2、图3所示。



图2 楼体实际形态

Fig. 2 Actual form of the building

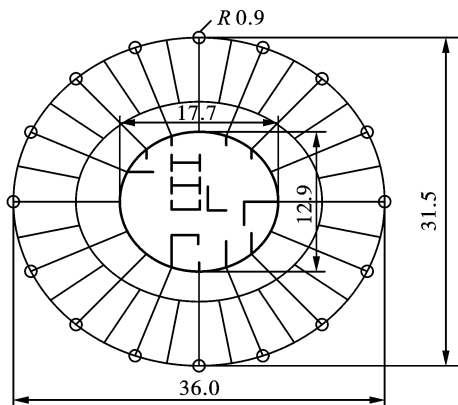


图3 楼房平面布置图(单位:m)

Fig. 3 Floor plan of the building(unit:m)

### 1.3 工程重难点分析

综合考虑楼房结构、周边环境等多种因素发现

本爆破工程存在以下难点:

(1)椭圆形楼房结构为不规则框架-核心筒结构,核心筒平面结构呈椭圆形,内部不规则布置有多个隔间,各隔间剪力墙分布奇特,剪力墙布置沿楼房长、短轴线均呈明显的不对称分布,且剪力墙数量呈现北部多,南部少,西部多,东部少等特点,见图3,剪力墙间更是布置有大量不规则过道,易导致倒塌过程出现应力分布不均,导致楼房整体或部分偏移。

(2)楼房椭圆形短轴两侧分别有围墙、粮台路和景观河,因此不能选择沿短轴方向倒塌,只能选择长轴方向,这样会导致高宽比由原来的2.29降至2.0,增加了重心偏移的距离,增大了楼房塌而不倒的风险。

(3)楼有内外两个圈梁,9×0.4×0.7 m结构梁16根,7×0.25×0.40 m结构梁16根,筒体结构的圈梁进一步提高了楼房稳定性,易出现楼房塌而不倒的危险情况。

(4)椭圆形楼房的主要承重构件为立柱和核心筒,中心核心筒部位结构复杂,立柱排数少,排间跨度大,势能转换快,不易控制后座,而楼房离南侧围墙和围墙外粮台路不足10 m,为保障市政管线、路灯等设施安全,应保证爆破时不能发生明显后座,因此需要精心设计、严密防护,控制好倒塌方向和爆破飞石。

(5)楼房钢筋砼立柱、核心筒结构,整体强度高,质量大,易产生较大的触地振动,对周围建筑造成损害,且倒塌后不易完全解体,会对后续渣堆处理造成一定难度。

## 2 爆破方案的选择与确定

### 2.1 工程难点解决思路

(1)针对椭圆形楼房结构不规则,倒塌过程易出现应力分布不均,设计将爆破切口内所有支柱、核心筒体、非承重墙全部拆除,其中核心筒体先预处理,化筒为墙,预处理墙体开凿以及后续钻孔爆破均沿倒塌中心线对称作业,避免出现应力不均匀现象。

(2)鉴于楼房高宽比2.0左右,爆破分区时,将最后两片区延期时间适当增加,实现支撑点前移效果,从而保障楼房顺利倾倒。

(3)内外两圈梁采用弱化爆破处理方式,破坏其结构稳定性。

(4)面对椭圆形楼房南侧围墙和围墙外粮台路不足10 m需控制后座问题,爆破分区时适当增大最后分区的面积,避免分散楼房倾倒时的拉压应力,避免应力集中导致立柱提前断裂,产生明显后座。

(5) 对于楼房整体强度高, 不易解离, 质量大, 易产生较大的触地振动问题, 爆破设计时考虑采用双切口折叠爆破方式。

### 2.2 倒塌方向

由于楼房的结构平面布局为椭圆形且长轴方向为北偏西呈 45°角, 呈轴对称布置。根据楼房周围的爆破环境, 兼顾北、西两个方向上均为待拆除的烂尾建筑以及足够的倒塌空间、场地条件等, 确定楼房爆破的倒塌方向为北偏西 45°方向。

### 2.3 爆破切口参数确定

#### 2.3.1 切口高度计算

高层建筑物爆破时偶尔会出现倾而不倒或部分不倒现象, 如何保证建筑物全部倒塌是爆破切口高度设计需要考虑的重要因素<sup>[14,15]</sup>。高层建筑物整体爆破倒塌爆破切口必须满足两个条件: 一是楼房倾倒时重力矩必须大于预留支撑的截面抗矩, 二是爆破切口闭合时, 楼房重心必须在楼房触地点的外侧。根据这两个条件, 利用图 4 所示的楼房倾倒的平面简化计算模型, 可计算出爆破切口高度。

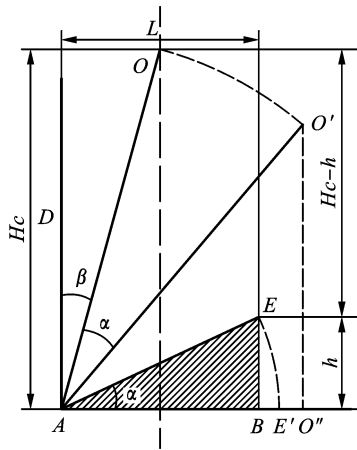


图 4 楼房倾倒简化模型

Fig. 4 Simplified model of building toppling

如图 4 所示, 建筑物的重心高度为  $H_c$ , 爆破切口高度  $h$ , 爆破切口角度  $\alpha$ , 爆破后整个建筑物将绕 A 点轴转动, 重心 O 的转动半径是 AO, 爆破切口的上切点 E, 以 AE 为半径转动。如果选取的转动角  $\alpha$ , 上切点 E 在倾倒落地时,  $E'$  将成为楼房的新支撑点, 此时若重心的转动半径 AO 在水平方向上投影  $AO''$  大于切口半径  $AE'$ , 楼房将以  $E'$  为铰链点继续旋转, 直至完全倒塌, 即要想实现建筑物顺利倒塌, 整个建筑物的重心  $O'$ , 一定会偏过 E 点的着地点  $E'$  点。

根据分析可得, 令重心转动半径

$$a = AO = AO' = \sqrt{H_c^2 + L^2/4} \quad (1)$$

半径  $AO'$  在水平方向上投影

$$AO'' = a \sin(\alpha + \beta) \quad (2)$$

根据三角函数关系

$$\sin \beta = \frac{L}{2a} \quad (3)$$

$$\cos \beta = \frac{H_c}{a} \quad (4)$$

$$h/L = \tan \alpha \quad (5)$$

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \quad (6)$$

将上述几何关系代入楼房整体倾倒条件

$$AO'' \geq AE' = AE = \sqrt{h^2 + L^2} \quad (7)$$

结合式(5)可得

$$\sqrt{h^2 + L^2} = L \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} \quad (8)$$

结合式(7)可得, 化简得

$$\tan^2 \alpha - H_c \tan \alpha / L + 1/2 \leq 0 \quad (9)$$

解不等式得两根为

$$\tan \alpha_{1,2} = [H_c/L \pm \sqrt{(H_c/L)^2 - 2}] / 2 \quad (10)$$

其中上式成立条件为

$$(H_c/L)^2 - 2 \geq 0 \quad (11)$$

即

$$H_c \geq \sqrt{2}L \quad (12)$$

由此可得

$$[H_c/L - \sqrt{(H_c/L)^2 - 2}] / 2 \leq \tan \alpha \leq$$

$$[H_c/L + \sqrt{(H_c/L)^2 - 2}] / 2 \quad (13)$$

对式(13)进行调整, 得

$$[H_c/L - \sqrt{H_c^2 - 2L^2}] / 2 \leq h \leq H_c/2 \quad (14)$$

采用整体爆破定向倒塌方式应符合上述楼房高宽比的倾倒条件, 否则就会发生楼房爆破后倾而不倒的情况, 尤其是高层楼房, 更要科学计算和合理选择爆破切口的设计参数, 保证楼房充分地倒塌。倒塌角度  $\alpha$ , 一般取 25° ~ 40°。

根据场地条件以及椭圆形楼房结构特点, 楼房沿着北偏西 45°方向倒塌。楼房高 72.2 m, 长轴长 36 m, 高宽比

$$H_c/L = 1.0 < \sqrt{2} \quad (15)$$

由此可见, 楼房不满足以纵向边缘为支撑点的定向倒塌条件, 为此把支撑点(转动铰链)前移两根柱子, 以 7 ~ 11 号柱为支撑点(转动铰链), 同时把延期区域第三部分和第二部分之间的延期时间扩大为 1 s 左右, 以达到支撑点前移的目的。计算可得, 支撑点共前移 11.8 m。

$$H_c/L = 1.49 > \sqrt{2} \quad (16)$$

此时已满足定向倒塌的条件, 取  $\alpha = 30^\circ$ , 计算

可得  $h = 20.7 \text{ m}$ , 代入式(14) 计算发现符合理论设计要求。

### 2.3.2 切口爆破设计

考虑到椭圆形钢混结构楼房质量大, 易发生后坐, 设计在倒塌方向上对楼房多段分区, 共分为4个区域, 同时适当增大第4区域面积, 分散楼房倾倒过程中产生的拉、压应力, 避免出现应力集中现象导致立柱提前断裂, 产生后座。

根据设计思路对楼房进行分区, 楼房爆破切口延期区域划分如图5所示。

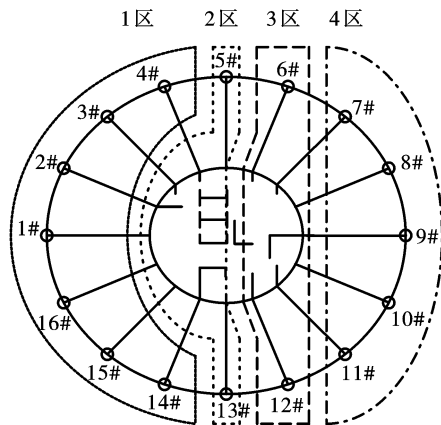


图5 楼房爆破切口延期区域划分图

Fig. 5 Division map of delay regions and blasting incisions in building

为减少预拆除量和钻爆工程量, 第一部分立柱采用六层炸高(23.5 m), 第二部分立柱和核心筒体部分采用五层炸高(19.8 m), 第三部分立柱和核心筒体部分采用四层炸高(16.1 m), 第四部分立柱为支撑区, 爆区截面为三角形, 最高为10.6 m, 9号柱仅布置少许铰链孔切断柱体。

同时, 为降低爆破振动, 提高楼房混凝土解离效果, 采用双切口设计<sup>[16]</sup>, 在12层和13层局部进行弱化处理, 切口高度为7.4 m, 1~3区域同高, 4区域9号柱同样布置少许铰链孔切断柱体。

楼房爆破切口呈阶梯形, 图6为楼房爆破切口示意图。

## 2.4 预处理措施

爆破前对楼房进行预处理, 减少爆破装药量, 控制爆破危害, 同时削弱楼房的整体刚度, 以取得更好的爆破效果。预处理方案包括: 爆破切口范围内的剪力墙、楼梯、非承重隔墙, 非爆破层不做预处理。

### 2.4.1 核心筒预处理

从楼房一层至顶层的筒体剪力分布由大变, 其中一楼的筒体所受剪力最大。根据框架-核心筒结构建筑物的受力特点, 在立柱支撑强度满足的情

况下, 核心筒处理原则为:

(1) 楼房一层核心筒体全部预拆除, 破坏楼房核心筒的抗侧移刚度, 拆除过程中采用液压破碎锤处理。

(2) 一层以上切口范围内的筒体通过机械+钻孔爆破方式处理, 化筒为墙, 破坏其抗侧移刚度, 仅保留其支撑作用, 预留的筒体沿倒塌方向对称分布。

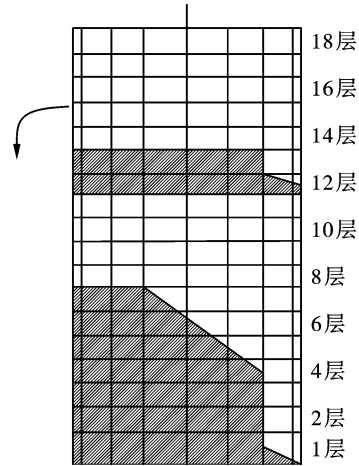


图6 楼房爆破切口示意图

Fig. 6 Schematic diagram of blasting incisions in building

### 2.4.2 非承重墙预处理

爆破切口范围内的卫生间、厨房、房间内非承重的隔墙, 在爆破前全部进行拆除。

### 2.4.3 楼梯间

楼梯均为现浇钢筋混凝土, 第一层在保留墙体钻孔完毕后, 剩余墙体使用液压破碎锤从楼房外面全部破除, 包括楼梯间剪力墙和楼梯踏步, 二层以上采用楼梯转弯处钻孔爆破的方式进行处理。

## 2.5 爆破参数设计

### 2.5.1 立柱爆破参数

(1) 孔深  $l_1$

$$l_1 = 0.8D_1 \quad (17)$$

式中:  $D_1$  为立柱直径; 经计算:  $\phi 90$  立柱取 0.7 m,  $\phi 80$  立柱取 0.65 m。

(2) 抵抗线  $w_1$

$$w_1 = 0.5D_1 \quad (18)$$

经计算:  $\phi 90$  立柱取 0.45 m,  $\phi 80$  立柱取 0.3 m。

(3) 孔距  $a$

$$a_1(1.0 \sim 1.2)w_1 \quad (19)$$

经计算:  $a_1 = 0.3 \sim 0.36 \text{ m}$ ,  $\phi 90$  立柱和  $\phi 80$  立柱均取 0.3 m。

(4) 炸药单耗: 根据工程类比和经验, 采用加强

松动爆破时,考虑配筋加密的因素,这里取炸药单耗为: $q=2.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(5)单孔装药量

$$Q_1 = q_1 a_1 S_1 \quad (20)$$

式中: $S_1$ 为圆形立柱的截面积, $S = \pi r^2$ 。计算可得: $\phi 90$ 立柱每孔药量取0.5 kg, $\phi 80$ 立柱每孔药量取0.4 kg。

(6)炮孔数目和总药量:主爆破11根立柱,弱爆5根立柱,去除梁高,第一层剩余高度4.3 m,其余各层剩余高度3.0 m,每柱炮孔数分别为15个和11个,则主切口立柱爆破的炮孔数约为860个。上部切口炮孔数约为240个,立柱爆破合计炮孔数 $N_1 = 1100$ 个。装药量约合计为450~500 kg。

### 2.5.2 楼房梁柱节点弱爆参数

(1)炮孔深度

$$l_2 = 0.8H \quad (21)$$

式中: $H$ 为梁的高度, $H = 0.7 \text{ m}$ ,经计算: $l_2 = 0.6 \text{ m}$ 。

(2)抵抗线

$$w_2 = 0.5D_2 \quad (22)$$

式中: $D_2$ 为梁的宽度,经计算: $w_2 = 0.2 \text{ m}$ 。

(3)炮孔间距

$$a_2 = (1.0 \sim 2.0)w_2 \quad (23)$$

经计算: $a_2 = 0.2 \sim 0.4 \text{ m}$ ,取 $a_2 = 0.4 \text{ m}$ ,梁柱节点爆破均为单排孔布置,每个爆破点布置3个下向的垂直孔。

(3)炸药单耗:根据工程类比和经验,采用加强松动爆破时,考虑配筋加密的因素,这里取炸药单耗为: $q_2 = 2.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(4)单孔装药量

$$Q_2 = q_2 a_2 B_2 H \quad (24)$$

式中: $B_2$ 为梁厚,计算可得梁单孔装药量 $Q_2 = 0.224 \text{ kg}$ ,取0.22 kg。

(5)装药结构:采用分层装药结构,下层药包0.12 kg,上层药包0.1 kg,中间用炮泥间隔。

(6)炮孔数目及装药量:梁柱采用节点爆破方式,每根立柱旁可布置3个爆破点,立柱大梁的径向中心端每根立柱实际有4个爆破点;每层11根立柱可布置44个爆破点,加上电梯等候厅廊的2个爆破点,则每层可布置的爆破点合计为46个,炮孔数约为184个。2层至6层梁柱节点爆破立柱爆破合计炮孔数 $N_2 = 1100$ 个,装药量合计约为150 kg。见表1。

表1 楼房立柱和梁的爆破参数

Table 1 Blasting parameters of columns and beams in buildings

截面尺寸/ (cm × cm)	最小 抵抗线/m	孔距/m	排距/cm	孔深/m	炸药单耗/ (kg · m <sup>-3</sup> )	单孔 装药量/kg
φ 90	0.45	0.30	/	0.70	2.60	0.50
φ 80	0.40	0.30	/	0.60	2.60	0.40
70 × 40	0.20	0.30	/	0.50	2.00	0.22

### 2.5.3 筒体爆破参数

(1)炮孔深度

$$l_3 = (0.6 \sim 0.85)B_3 \quad (25)$$

式中: $B_3$ 为筒体壁厚,0.25 m。计算可得 $l_3 = 0.15 \sim 0.21 \text{ m}$ ,取炮孔深度为0.18 m。

(2)抵抗线

$$w_3 = 0.5B_3 \quad (26)$$

经计算: $w_3 = 0.125 \text{ m}$ 。

(3)炮孔间距

$$a_3 = (1.0 \sim 2.0)w_3 \quad (27)$$

经计算: $a_3 = 0.125 \sim 0.25 \text{ m}$ ,取0.25 m。

(4)炮孔排距

$$b_3 = (0.8 \sim 1.0)a_3 \quad (28)$$

经计算: $b_3 = 0.2 \sim 0.25 \text{ m}$ ,取0.2 m。

(5)炸药单耗:根据工程类比经验,采用加强松动爆破时,考虑配筋加密的因素,这里取炸药单耗为: $q_3 = 6.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(6)单孔装药量

$$Q_3 = q_3 a_3 b_3 B_3 \quad (29)$$

经计算:主爆破单孔装药量为: $Q_3 = 0.075 \text{ kg}$ ,取0.08 kg。孔网参数如表2所示。

表2 楼房剪力墙及楼板爆破参数

Table 2 Blasting parameters of shear wall and floor slab of building

剪力墙 厚度/m	最小 抵抗线/m	孔距/m	排距/m	孔深/m	炸药单耗/ (kg · m <sup>-3</sup> )	单孔 装药量/kg
0.250	0.125	0.250	0.200	0.180	6.000	0.080

### (7) 炮孔数目和总药量

1) 主爆破的炮孔数: 每层楼房剪力墙的总长度约为 65.85 m, 其中需保留的剪力墙(主爆破)长度约为 20.7 m, 主爆破炸高 2 m, 需爆破面积约 41.4 m<sup>2</sup>; 每个炮孔承担的爆破面积约 0.3 × 0.3 m<sup>2</sup>, 则计算得, 每层剪力墙主爆破的炮孔数约为 460 个; 一、二层剪力墙主要通过机械预拆除, 预留主爆破炮孔数约为 100 个, 三至五层剪力墙主爆破炮孔约为 1380 个, 合计约为 1480 个。装药量合计约为 120 kg。

2) 预拆除切缝爆破的炮孔数: 需进行预拆除切缝爆破的长度约为 45.15 m, 两排炮孔布置, 上下各一道切缝, 竖直方向上另加十四道切缝, 则每层切缝的累积长度为 118.3 m, 炮孔数约为 789 个, 预拆除切缝爆破单孔装药量取 0.07 kg。一、二层预拆除采用机械法, 则三至五层剪力墙预拆除爆破的炮孔数合计约为 2367 个。装药量合计约为 160 kg。

### 2.6 爆破网路和起爆延期时间

本次拆除爆破, 所处环境条件较为复杂, 需避免对周围人员、建(构)筑物、交通造成影响。爆破网路的设计应力求简洁, 便于装药和检查。本次爆破网路设计主要考虑以下几点:

(1) 每栋楼的一层从切口边缘分区顺序延期起爆, 以减少最大段爆破药量。最后区域弱爆破, 只形成铰链, 延期时间应较长。

(2) 各楼层之间上下对应位置延期起爆, 上层比下层延期起爆<sup>[17,18]</sup>。

结合图 5、图 6, 对于椭圆形楼房的区域进行划分并布置孔内延期时间。见表 3。

表 3 楼房孔内延期时间分布表  
Table 3 Distribution Table of delay time in building holes

层数	1 区域/ms	2 区域/ms	3 区域/ms	4 区域/ms
11 ~ 12 层	1610	1650	1700	
6 层	310			
5 层	250	550		
4 层	200	550	1500	
3 层	150	550	1500	2500
2 层	110	550	1500	2500
1 层	110	550	1500	2500

## 3 爆破效果

按照爆破设计对楼房进行预处理和爆破, 倒塌过程如图 7 所示。

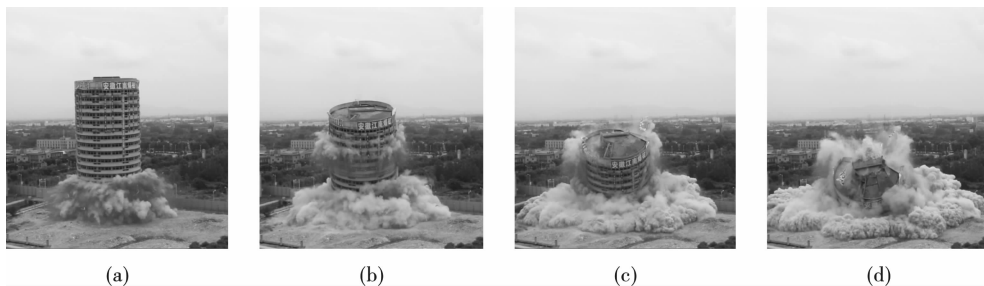


图 7 椭圆形楼房爆破倒塌过程

Fig. 7 Blasting collapse process of oval building

整个倒塌过程历时 5 s, 倾倒方向精准, 未发生明显后座, 散落物多集中在 10 m 以内, 楼房后方道路路灯和两侧建筑无一损毁。楼房爆堆见图 8。图中楼房支柱破坏明显, 楼板呈倾斜式叠放, 经测量, 楼房倒塌后爆堆长度约 37 m, 高度全部在 10 m 以内, 较为集中, 楼房倒塌效果符合设计要求。

## 4 结论

本文基于某地椭圆形框架-核心筒楼房爆破拆除实际工况, 采用理论分析精确计算了爆破切口高度和立柱、横梁、核心筒壁爆破参数, 成功实现了该楼房的爆破拆除, 并得出以下结论:



图 8 椭圆形楼房爆堆

Fig. 8 Explosive pile of oval building

(1) 椭圆形钢混结构楼房跨度长、质量高, 重力

势能转化快,楼房倾倒时间短,易发生后座,不易控制其倒塌过程,通过在倒塌方向上对楼房进行多段分区,增大最后一片分区的支撑面积,有效发挥余留支撑体支撑作用,避免因楼房倒塌时应力过度集中导致支撑区域提前断裂,产生后座。

(2)针对楼房高宽比较小,不满足楼房倾倒理论条件,易产生塌而不倒的问题,通过将最后两段分区之间的延期间隔扩大为1 s左右,实现倒塌过程中支撑点前移,保障楼房中心能偏过新支撑点,从而顺利倾倒。

(3)对于不规则框筒结构建筑物,爆破设计时将爆破切口内所有支柱、核心筒体、非承重墙全部拆除,破坏其抗侧移刚度,同时预处理墙体开凿以及后续钻孔爆破均沿倒塌中心线对称作业,可有效避免出现应力分布不均匀现象,避免楼体出现偏离倒塌方向的情况。

### 参考文献 (References)

- [1] 高文乐,赵德龙,李元振,等. 延期时差对多截面承重立柱框架结构拆除爆破效果的影响[J]. 爆破器材, 2021,50(2):50-54.
- [1] GAO Wen-le, ZHAO De-long, LI Yuan-zhen, et al. Influence of delayed time difference on demolition blasting effect of multi-section load-bearing column frame structure [J]. *Blasting Equipment*, 2021, 50(2): 50-54. (in Chinese)
- [2] 杨帆,张新雨,胡坤伦,等. 大跨距高楼房爆破拆除控制技术与倒塌形态分析[J]. 爆破, 2021,38(1):87-92.
- [2] YANG Fan, ZHANG Xin-yu, HU Kun-lun, et al. Blasting demolition control technology and collapse form analysis of long-span tall buildings [J]. *Blasting*, 2021, 38(1): 87-92. (in Chinese)
- [3] 崔家春,徐自然,徐继东,等. 框架-阻尼框筒结构抗震性能模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023,44(9):104-114.
- [3] CUI Jia-chun, XU Zi-ran, XU Ji-dong, et al. Experimental study on seismic performance model of frame-tube structure with damping [J]. *Journal of Building Structure*, 2023, 44(9): 104-114. (in Chinese)
- [4] 常磊,崔济东,廖耘,等. 框架承担倾覆力矩的合理计算方法[J]. 建筑结构, 2024,54(4):124-135.
- [4] CHANG Lei, CUI Ji-dong, LIAO Yun, et al. Reasonable calculation method of overturning moment of frame [J]. *Building Structure*, 2024, 54(4): 124-135. (in Chinese)
- [5] 任重翠,李建辉,唐意,等. 风震联合作用下高层建筑主体结构 and 玻璃幕墙的性能研究[J]. 工程力学, 2022,39(7):58-69.
- [5] REN Chong-cui, LI Jian-hui, TANG Yi, et al. Study on the performance of the main structure and glass curtain wall of high-rise buildings under the combined action of wind and earthquake [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(7): 58-69. (in Chinese)
- [6] 安东亚. 框架-核心筒结构外框刚度贡献的直接计算法与间接评估法[J]. 地震工程与工程振动, 2023,43(4):52-62.
- [6] AN Dong-ya. Direct calculation method and indirect evaluation method of stiffness contribution of frame-core tube structure [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2023, 43(4): 52-62. (in Chinese)
- [7] 沈捷攀,朱旦阳,林晨. 某复杂超限高层框筒结构抗震设计——以杭州某经济园主塔楼为例[J]. 建筑结构, 2023,53(S2):603-607.
- [7] SHEN Jie-pan, ZHU Dan-yang, LIN Chen. Seismic design of a complex tall frame-tube structure-taking the main tower of an economic park in Hangzhou as an example [J]. *Architectural Structure*, 2023, 53(S2): 603-607. (in Chinese)
- [8] 杨国梁,杨军,姜琳琳. 框-筒结构建筑物的折叠爆破拆除[J]. 爆炸与冲击, 2009,29(4):380-384.
- [8] YANG Guo-liang, YANG Jun, JIANG Lin-lin. Folding blasting demolition of frame-tube structures [J]. *Explosion and Impact*, 2009, 29(4): 380-384. (in Chinese)
- [9] 吴建宇,龙源,纪冲,等. 城市高层框架-筒体结构建筑物拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2015,32(2):95-99.
- [9] WU Jian-yu, LONG Yuan, JI Chong, et al. Numerical simulation study on demolition of urban high-rise frame-tube structure buildings [J]. *Blasting*, 2015, 32(2): 95-99. (in Chinese)
- [10] 费鸿禄,张志强,包士杰,等. 框-筒结构楼房折叠爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2023,40(3):134-142.
- [10] FEI Hong-lu, ZHANG Zhi-qiang, BAO Shi-jie, et al. Numerical simulation study on folding blasting demolition of frame-tube structure building [J]. *Blasting*, 2023, 40(3): 134-142. (in Chinese)
- [11] 杨志红,郑文富,何慧明,等. 框架核心筒结构高层建筑的对称倒塌爆破拆除[J]. 爆破器材, 2022,51(6):60-64.
- [11] YANG Zhi-hong, ZHENG Wen-fu, HE Hui-ming, et al. Demolition of high-rise building with frame-core tube structure by opposite collapse blasting [J]. *Blasting Equipment*, 2022, 51(6): 60-64. (in Chinese)
- [12] 唐启超,龙源,谢兴博,等. 框架剪力墙筒状结构大厦爆破拆除[J]. 工程爆破, 2014,20(4):15-18.
- [12] TANG Qi-chao, LONG Yuan, XIE Xing-bo, et al. Blasting

- ting demolition of tubular structure building with frame shear wall[J]. Engineering Blasting, 2014, 20(4): 15-18. (in Chinese)
- [13] 费鸿禄,张广贝,何文斌,等. 复杂环境下框-筒结构楼房内向折叠爆破拆除技术研究[J]. 爆破, 2021, 38(1): 80-86.
- [13] FEI Hong-lu, ZHANG Guang-bei, HE Wen-bin, et al. Study on inward folding blasting demolition technology of frame-tube structure building in complex environment[J]. Blasting, 2021, 38(1): 80-86. (in Chinese)
- [14] 刘文广. 中心城区超高层楼群多缺口折叠爆破拆除[J]. 爆破器材, 2021, 50(5): 58-64.
- [14] LIU Wen-guang. Multi-notch folding blasting demolition of super high-rise buildings in central city[J]. Blasting Equipment, 2021, 50(5): 58-64. (in Chinese)
- [15] 高文乐,王燕萍,李琛豪,等. 小高宽比框架结构爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2024, 41(1): 112-119.
- [15] GAO Wen-le, WANG Yan-ping, LI Chen-hao, et al. Numerical simulation study on demolition of frame structure with small height-width ratio by blasting[J]. Blasting, 2024, 41(1): 112-119. (in Chinese)
- [16] 高文乐,赵德龙,李元振,等. 延期时差对多截面承重立柱框架结构拆除爆破效果的影响[J]. 爆破器材, 2021, 50(2): 50-54.
- [16] GAO Wen-le, ZHAO De-long, LI Yuan-zhen, et al. Influence of delayed time difference on demolition blasting effect of multi-section load-bearing column frame structure[J]. Blasting Equipment, 2021, 50(2): 50-54. (in Chinese)
- [17] 高文乐,朱茂迅,李元振,等. 发电厂双曲线型冷却塔的定向爆破拆除及爆破效果数值分析[J]. 爆破器材, 2020, 49(4): 52-57.
- [17] GAO Wen-le, ZHU Mao-xun, LI Yuan-zhen, et al. Directional blasting demolition of hyperbolic cooling tower in power plant and numerical analysis of blasting effect[J]. Blasting Equipment, 2020, 49(4): 52-57. (in Chinese)
- [18] 于淑宝. 复杂环境下超高烟囱同向折叠爆破拆除原理及应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- [18] YU Shu-bao. Study on demolition principle and application of ultra-high chimney by co-directional folding blasting in complex environment[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019. (in Chinese)

## 科技论文写作小知识——摘要

摘要是以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记述文献重要内容的短文。摘要应具有独立性和自明性,并且拥有与文献同等量的主要信息,即不阅读全文,就能获得必要的信息。一篇完整的论文都要求写随文摘要,按摘要的不同功能来划分,大致有如下3种类型:

### (1) 报道性摘要

报道性摘要是指明一次文献的主题范围及内容梗概的简明摘要,相当于简介。报道性摘要一般用来反映科技论文的目的、方法及主要结果与结论,在有限的字数内向读者提供尽可能多的定性或定量的信息,充分反映该研究的创新之处。科技论文如果没有创新内容,如果没有经得起检验的与众不同的方法或结论,是不会引起读者的阅读兴趣的,所以建议学术性期刊(或论文集)多选用报道性摘要,用比其他类摘要字数稍多的篇幅,向读者介绍论文的主要内容,以“摘要要点”的形式报道出作者的主要研究成果和比较完整的定量及定性的信息,篇幅以300字左右为宜。

### (2) 指示性摘要

指示性摘要是指明一次文献的论题及取得的成果的性质和水平的摘要,其目的是使读者对该研究的主要内容(即作者做了什么工作)有一个轮廓性的了解。创新内容较少的论文,其摘要可写成指示性摘要,一般适用于学术性期刊的简报、问题讨论等栏目以及技术性期刊等只概括地介绍论文的论题,使读者对论文的主要内容有大致地了解,篇幅以100字左右为宜。

### (3) 报道-指示性摘要

报道-指示性摘要是以报道性摘要的形式表述论文中价值最高的那部分内容,其余部分则以指示性摘要形式表达,篇幅以100~200字为宜。

论文发表的最终目的是要被人利用,如果摘要写得不好,在当今信息激增的时代论文进入文摘、杂志、检索数据库后,被人阅读、引用的机会就会少得多,甚至丧失,一篇论文价值很高,创新内容很多,若写成指示性摘要,也可能会失去较多的读者。所以一般地说,向学术性期刊投稿,应选用报道性摘要形式,只有创新内容较少的论文,其摘要可写成报道-指示性或指示性摘要。