

高耸建筑物定向爆破倾倒时的 后座及其对策

齐世福 阎家良

(工程兵工程学院)

摘要 高耸建筑物定向爆破倾倒时,对周围保留建筑物、设施等的安全性产生影响的危害效应之一是后座问题。研究和探讨后座现象以及提出预防措施,对高耸建筑物在有限坍塌范围的复杂环境中,爆破拆除时安全性预测及合理选择爆破参数、确保良好的爆破效果将有很大帮助。本文通过对不同类型的高耸建筑物(文中分为两类:一类是筒式支撑的烟囱、水塔等;另一类是钢筋混凝土框架结构或砖混楼房、框架支撑的水塔等)在定向爆破倾倒过程中不同阶段的力学分析,较全面地讨论了后座产生的原因、现象及可能出现的后座范围。在力学分析中,还给出了两类高耸建筑物从爆破开始至倾倒落地不同阶段的受力状态解析图和相应的解析式,以及不同材料爆破目标的破坏失稳条件,可为爆破设计中正确选择有关参数提供理论依据,然后,在力学分析的基础上以及根据爆破目标可能出现的后座现象,综合我们及国内其他学者大量工程实践经验,分别对筒式烟囱(水塔)及框架结构,提出了在爆破设计和施工中为防止或减小后座所应采取的对策。对筒式烟囱(水塔),预防后座的主要对策是保证倾倒过程中,未爆的支撑筒壁(保留部分)有足够的强度与稳定性,这主要取决于爆破切口的形状、切口尺寸、切口下沿至地表面的距离、药量、烟道和出灰口的位置以及结构本身的强度,同时给出了选取合理参数的基本原则。而对于框架结构,认为采用倒向前后爆破高度大致相同(或倒向爆高稍大于背向爆高),用起爆时间差控制定向时,对减小后座效果显著,且起爆时间差一般应控制在0.3~0.5秒以内为好。最后给出了两个工程实例,供参考。

关键词 高耸建筑物 定向倾倒 后座

一、引言

目前我国在市政建设和厂矿企业改扩建工程中,用控制爆破拆除高耸建筑物,大多采用定向倾倒的爆破方式。实践表明,爆破时常常出现“后座”现象。然而,在鳞次栉比的建筑群或人口稠密区,允许倒塌范围往往极为有限。爆破时若控制不好,后座距离将超过允许的范围,有可能造成意想不到的严重后果。这个问题已为愈来愈多的人们所认识。因此,研究和探讨后座问题及其对策,对于优化爆破设计方案和正确指导施工,获取良好的爆破效果,是十分必要的。

二、力学分析与后座现象

为便于分析讨论,将高耸建筑物按其爆破处的截面形状大致分为两类:一类是筒式支撑的烟囱、水塔等;另一类为钢筋混凝土框架结构或砖混楼房、框架支撑的水塔等。爆破拆除

时，第一类常用的方法是在其倒向底部爆出一个缺口，而在其反方向保留一定的筒壁；第二类通常是爆破其倒向的柱（壁），保留反方向的柱（壁），或亦爆破一定高度。这样，建筑物在爆破时即因自身的重力作用产生偏心力矩，呈失稳状态，从而达到定向倾倒之目的。

1. 筒式烟囱（水塔）

据实际工程观察，此类建筑物爆破时可归纳为这样一个力学问题：爆破目标在起爆瞬间产生微小倾斜的一段时间内（姑且称之“初期阶段”），可将其视为由一段筒壁（保留部分）支撑的偏心刚体，在此阶段内，若保留的筒壁（呈偏心受压状态）强度不够，往往迅速发生破坏而筒体出现下沉现象；此后至倾倒落地整个过程（不妨谓之“后期阶段”），可简化成刚体定轴转动的力学问题（诚然，若筒体整体性较差，在触地瞬间其触地断面因受剪受压将导致破坏，筒体呈粉碎状坍塌于地）。两个阶段的受力状态（以筒体为研究对象）分别见图 1 与图 2。

(1) 初期阶段

对筒体而言，在此阶段受到三个力的作用：重力 mg ；支反力 $\bar{Y}_0 = mg$ ；支反弯矩 $M_0 = mgx_c$ ， x_c 为偏心距（见图 3），其大小为

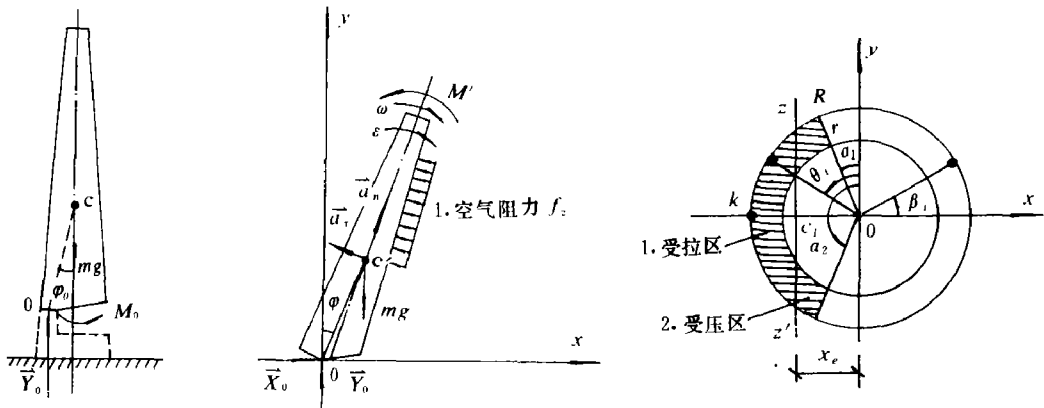


图 1 初期阶段受力状态

图 2 后期阶段受力状态

图 3 保留筒壁断面解析图

Fig. 1 Loading state at bursting moment

Fig. 2 Loading state in fall-tripping

Fig. 3 Cutaway view of non-blasted part of chimney wall

$$x_c = \frac{4(R^3 - r^3)\sin(\alpha/2)}{3\alpha(R^2 - r^2)} \quad (1)$$

式中， r 、 R ——分别为筒体在爆破处的内、外半径； α ——保留筒壁对应的角度， $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ （见图 3）； m ——筒体总质量； g ——重力加速度。

对保留筒壁而言，若材料为砖砌体或素混凝土，则同时受到两个力作用：弯矩 $M'_0 = M_0$ ；压力 $p_c = Y_0$ 。在此两力作用下，外侧受拉，内侧受压，且外缘 k 点拉应力最大，其值为

$$\sigma_{pk} = mg \left[\frac{x_c(R - x_c)}{I_z} - \frac{2}{\alpha(R^2 - r^2)} \right] \quad (2)$$

式中， I_z 为保留筒壁断面对中性轴（ $z - z'$ ）的惯矩，其大小为

$$I_z = (1/8)(R^4 - r^4) \left[(1/2)(\sin 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_2) + \alpha \right] -$$

$$\frac{8\sin^2(\alpha/2)(R^3-r^3)^2}{9\alpha(R^2-r^2)} \quad (3)$$

对于抗拉强度较低的材料,在 σ_m 作用下将立即被拉裂,且裂缝迅速向断面内(右)扩展,直至拉断为止。同时,若压力 p 超过材料的极限抗压强度 $[\sigma_c]$,则靠近切口处的材料将产生压缩破坏,并向外(左)迅速延伸。从多次工程实践来看,若材料强度较低或保留的筒壁较小,则相对于整个倾倒过程而言,拉压破坏过程是很短的。故一旦爆破形成切口,整个筒体就会迅速下沉。因筒体下沉时并非完全垂直,而是倾斜某一角度 φ ,这样,保留的筒壁就会向外挤压坍塌,从而出现后座现象。

对于含筋较多的钢筋混凝土筒壁,因抗拉压强度较高,在初期阶段其保留的筒壁通常不会迅速压垮导致筒体下沉,故后座现象往往不很明显。此类材料的破坏失稳条件^[1]为

$$M_0' \geq \xi M_0^* \quad (4)$$

式中, ξ ——解体破坏保证系数,可取1.5~2.0; M_0^* ——材料的极限抗弯强度。

按照钢筋混凝土有关理论分析得知

$$M_0^* = N_1 A_{e1} \sigma_T h' + (R-r)x'^2 \sigma_R - 25 \times 10^{-6} E \pi^3 d_{\max}^2 \times \sum_{i=1}^m [(R-\delta)\cos\beta_i + x_i] \quad (5)$$

其中,

$$h' = \sum_{i=1}^{N_1} [(R-\delta)\sin\theta_i - x_i] / N_1 \quad (6)$$

$$x' = \frac{N_1 A_{e1} \sigma_T - N_2 A_{e2} \sigma_B - mg}{2(R-r)\sigma_R} \quad (7)$$

(5)~(7)式中, h' 、 x' ——分别为保留断面内受拉区配筋的拉力中心至弯矩中心的距离及受压区等效宽度; N_1 、 N_2 ——分别为保留断面内受拉区和受压区配筋总数目; A_{e1} 、 A_{e2} ——分别为保留断面内受拉区和受压区每根钢筋截面积; σ_T 、 σ_B ——分别为配筋的极限抗拉和抗压强度; σ_R ——混凝土极限抗压强度,可近似取 $\sigma_R \approx R_0$ (R_0 为水泥标号,采用SI制时应注意换算); δ ——配筋外水泥保护层厚度; θ_i ——受拉区第 i 根钢筋到圆心的连线与 y 轴的夹角; E ——配筋的弹性模量; d_{\max} ——配筋的最大直径; m ——爆破缺口内配筋总数目; β_i ——爆破缺口内第 i 根钢筋到圆心的连线与 x 轴的夹角,其它符号含义同前。

若爆前预先切割爆破范围内的配筋,则(5)式中后一项为零。保留的筒壁如果满足(4)式,即可视为一塑性铰。

(2) 后期阶段

在此阶段内,无论保留的筒壁因拉压破坏导致筒体下沉还是变成塑性铰,均可视筒体为刚体绕定轴转动的力学问题。按照有关力学理论分析,并考虑到空气阻力的影响,得知筒体此时受力状态如图2所示。其中,

水平支反力

$$X_0 = \frac{mg l}{J_0} \left[\frac{1}{2} m l (3\sin 2\varphi - 4\sin \varphi) + \frac{14}{15} R \rho_0 \bar{H}^3 (\cos \varphi - \cos^2 \varphi) \right] \quad (8)$$

垂直支反力

$$Y_0 \doteq \frac{mg}{J_0} \left[\frac{J_0}{l} - ml(1 + 2\cos\varphi - 3\cos^2\varphi) - \frac{7}{15} R \rho_0 \bar{H}^3 (2\sin\varphi - \sin 2\varphi) \right] \quad (9)$$

筒体的角速度及角加速度分别为

$$\omega \doteq [2mg / (\cos\varphi_0 - \cos\varphi) / J_0]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$\varepsilon = mg / \sin\varphi / J_0 \quad (11)$$

筒体的切向惯性力、离心惯性力及惯性力偶矩分别为

$$a_t = m^2 l^2 g \sin\varphi \cos\varphi / J_0 \quad (12)$$

$$a_n = 2m^2 l^2 g (\cos\varphi_0 - \cos\varphi) \sin\varphi / J_0 \quad (13)$$

$$M' = mg / \sin\varphi \quad (14)$$

(8) ~ (14) 式中, φ_0, φ ——分别为筒体转动初始及任意时刻 $\overline{Oc'}$ 与 y 轴的夹角; l —— $\overline{Oc'}$ 之长, 可近似取 $l \doteq \frac{1}{2}\bar{H}$; \bar{H} ——筒体等效高度, $\bar{H} = \frac{4m}{\pi\rho[(R_1 + R_2)^2 - (r_1 + r_2)^2]}$; ρ, ρ_0 ——分别为材料、空气密度; r_1, R_1 及 r_2, R_2 ——分别为烟囱上、下部的内、外半径; J_0 ——筒体对其转动轴的转动惯量, 对于烟囱, $J_0 \doteq m\bar{H}^2/3$; 而对水塔, $J_0 \doteq m_1 H_1^2 + m_2 H_2^2/3$; m_1, m_2 ——分别为水塔的水罐及塔身质量; H_1, H_2 ——分别为水罐质心及底部至地表之距。其它符号含义同前。

上述分析不难看出, 在筒体倾倒过程中, 保留的筒壁同时受到两个力的作用, 垂直压力 $\overline{R}_v = -\overline{Y}_0$ 及水平推力 $\overline{R}_h = -\overline{X}_0$ (负号表示方向相反), 而且在整个后期阶段, 这两个力一直对保留的筒壁起作用。由于在初期阶段保留的筒壁已发生破坏 (坍塌) 或强度减弱 (产生裂缝), 因此, 若 $\overline{R}_h \leq f\overline{R}_v$ (f 为摩擦系数, 见下表), 则筒体底部不会产生位移, 即不会再产生更多的后座; 否则, 残留的筒壁将逐渐向后推去, 从而出现较大的后座距离^[2]。

摩擦系数 (f) 值

Value of friction coefficient (f)

材 料 类 别	摩擦面情况	
	干燥	潮湿
砌体沿砌体或混凝土滑动	0.70	0.60
砌体、混凝土沿砂或卵石滑动	0.60	0.50
砌体、混凝土沿砂质粘土滑动	0.55	0.40
砌体、混凝土沿粘土滑动	0.50	0.30

2. 框架结构

此类结构的力学分析可完全仿照第一类情况讨论。为避免重复, 着重论述不同之处。

(1) 初期阶段

因此类结构爆破时保留的柱 (壁) 断面 (见图 4) 异于筒式建筑物, 故在应用 (2)、(4) 两式时, 应注意公式 (参数) 的变化。对于保留柱 (壁) 为砖砌体或素混凝土的情况, (2) 式改为

$$\sigma_{pk} = mg \left(\frac{h \cdot x_{e2}}{2I_z} - \frac{1}{A_p} \right) \quad (15)$$

式中, x_{e2} ——保留柱 (壁) 至爆体质心的水平距离; A_p ——保留柱 (壁) 总截面积, 对于柱

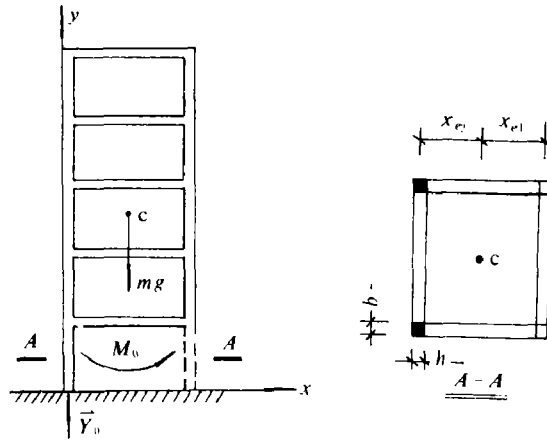


图 4 初期阶段受力分析

Fig. 4 Analysis of Loading at bursting moment

且截面相同时, $A_p = nbh$; I_z ——保留柱(壁)总惯矩,对于柱且截面相同时, $I_z = nbh^3/12$; b, h ——保留柱的两个边长(见图 4); n ——保留的同一排柱数目,其它符号含义同前。

对于钢筋混凝土框架结构:

$$M_0^* \approx mg x_{e2} - 25 \times 10^{-6} n E \pi^2 (x_{e1} + x_{e2}) m_1^* d_{max}^2 \quad (16)$$

$$[M_B^*]_{max} \approx m_2^* (N_1 A_{e1} \sigma_T h' + \frac{1}{2} b \sigma_R \delta^2) \quad (17)$$

(16)、(17) 两式中, x_{e1}, x_{e2} ——分别为破坏柱与保留柱至爆体重心的水平距离(见图 4); m_1^*, m_2^* ——分别为破坏柱与保留柱的数目; h' ——保留柱受拉区配筋的拉力中心至弯矩中心的距离(以图 5 配筋为例,下同。余者依此类推),即 $h' = [(N_{11}(h - 2\delta) + N_{12}(h - 2\delta - \delta_1))]/N_1$; N_{11}, N_{12} ——分别为保留柱受拉区第一、二层配筋数目,且 $N_{11} + N_{12} = N_1$ (N_1 为受拉区配筋总数目); h, b ——分别为保留柱平行、垂直于倒向的柱截面边长; δ_1 ——保留柱受拉区第一、二层钢筋之距。其它符号含义同前

则破坏失稳条件为

$$M_0^* \geq \xi [M_B^*]_{max} \quad (18)$$

(2) 后期阶段

除框架支撑的水塔外,尽管此类建筑物在爆破时其爆体是作定向倾倒的,但它并不遵循刚体定轴转动的运动规律,而是一个十分复杂的拉、压、剪、弯、破坏坍塌过程,不仅有静载作用,而且爆体落地时的撞击动载作用亦相当突出,难以用一个简单的力学模型来描述。另

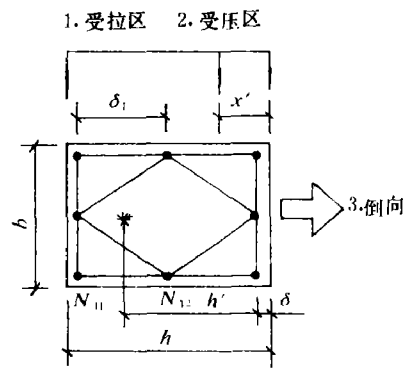


图 5 抗弯截面计算图

Fig. 5 Calculating diagram of sectional area of bending

- 1. Tensile area;
- 2. Compressive area;
- 3. Collapse direction

外，因此类建筑物在其构造、材料等各方面亦存在较大差异，故很难作出具有普遍性的定量分析，还有待于作进一步的研究和探讨。

根据多次工程实践观察，此类建筑物的后座现象通常有两种情况：

a.保留的柱（壁）下部基本没有位移，但其上部的梁向后倾倒，即发生后座，且多为底部一层。设层高为 H ，前后跨度为 L ，则最大后座距离不大于 $L - (L^2 - H^2)^{\frac{1}{2}}$ 。此现象多发生在倒向的柱（壁）爆破高度较大，而保留柱（壁）未作处理或虽对钢筋混凝土柱进行了处理，但前后起爆时间差较大的情况，上部重量大时尤甚。

b.与第一情况相反，即保留柱（壁）的底部向后推移，而上部虽已解体但原联系不断且无较大位移。最大推移距离通常不大于 $H - H'$ （ H' 为保留柱的爆破高度）。此现象多发生在保留柱不仅也爆破了一定高度，而且预切了配筋以及前后起爆时间差亦较大这种情况。

此外，尚须说明的是，如果爆破目标整体性较差，则落地后解体较充分，在非倾倒方向亦会产生约 $1/3 \sim 1/4$ 框架高度的自然塌散距离，该距离有时会超过原后座距离。

三、对后座问题采取的对策

根据上述力学分析以及可能出现的后座现象，结合作者及国内其它学者的大量工程实践经验，建议在设计 and 施工中对防止或减小后座应采取如下对策。

1.筒式烟囱（水塔）

此类建筑物预防后座的主要对策是保证倾倒过程中未爆的支撑筒壁（保留筒壁）有足够的强度与稳定性。影响该部分筒体强度及稳定性的主要因素是：爆破切口的形状、切口尺寸、切口下沿至地表的距离、药量、烟道和出灰口的位置，以及本身结构的强度。在本身强度一定的前提下，与后座关系最密切的是前五个因素。

（1）切口形状

目前采用的切口形状较多，主要有水平的“—”字形，折线式的“√”形、“∩”形和“∪”形，以及梯形（倒、正梯形）等。切口形状的不同，不仅对后座距离有影响，而且对施工工作量亦有影响。按照前面的力学分析及工程实践表明，“—”字形切口不仅施工方便，而且爆破倾倒时转动轴和切口中部在同一水平面上，不会象“∩”形和“√”形那样因切口中部下垂，产生向后的摆动力^[3]（由于转轴位置较高及该摆动力作用可导致后座），故“—”形切口一般无后座现象；而“∩”形和“√”形以及在保留筒壁内布辅助孔，不仅施工复杂，而且最易引起后座。

（2）切口尺寸

切口尺寸指爆破后切口的弧长（切口长度）及切口上、下沿之间的距离（切口高度）。切口长度及切口高度愈大，尽管愈能保证倾倒，但对保留筒壁的强度和稳定性影响亦愈大，而且增加了施工量，使防护困难，对安全不利。据实践观测^[3]，爆破切口大时，初始倾倒速度快，且伴有后座现象；切口小时，初始倾倒速度缓慢，以后逐步加快而无后座现象。因此，切口尺寸不宜过大。切口长度一般取 $1/2 \sim 3/5$ 圆周长（爆破断面处）为好，取值应视筒体本身强度而定，强度较弱时取小值，反之取大值。切口的高度应满足爆体倾倒的基本条件，即保证切口闭合后爆体重心位移的距离 $\overline{cc'}$ （见图2）在水平面上的投影大于或等于切口处的筒体外径，但不应过大。

(3) 切口下沿至地表面的距离(高度)

此距离愈大,特别是保留筒壁强度较弱而在倾倒过程中被挤压坍塌后,由此引起的后座范围就愈大。因此,从减小后座的角度看,切口下沿的高度宜小不宜大^[4],通常按照既施工方便,又有足够高度保证爆破的碎碴能够塌散开来而不影响切口的闭合为原则。

(4) 爆破药量

药量大小对保持支撑筒壁的完整性以及能否按照设计要求形成爆破切口至关重要,故应严格控制,不可过大。一般应坚持切口水平方向的对称中心线及底部药量稍大,切口上部及两侧药量逐渐取小的原则,以防造成过大的切口而导致较大的后座(甚至影响方向)。保证支撑筒壁完整性而不受药量影响的一条重要措施是,预先在切口左右两侧的边缘处用机械法开设竖槽(定向槽)^[4],以减轻装药爆炸对保留筒壁的作用。

(5) 烟道和出灰口

选择倾倒方向时,要尽量使保留的筒壁避开原有的烟道和出灰口,若不能避开,则爆前应将其予以砌实。这样不仅能防止后座,而且能避免扭转,保证定向准确。

2. 框架结构

此类结构在进行爆破设计时,应首先弄清结构形式、相互联系、构造特征、周围环境及安全要求等。因情况各异,故采取的对策亦不能一概而论,应根据实际情况作具体分析,研究和制定切实可行的对策。按照工程实践经验来看,此类结构爆破时,采用前后爆破高度大致相同(或倒向爆高大于背向爆高),用起爆时间差控制定向时,后座距离较小,效果比较明显。起爆时间差不宜过大,一般控制在0.3~0.5秒内较好。而仅用爆破高度差控制定向时,后座距离往往较大,但如果采取一定措施,如同时破坏保留柱上部的结点,而其下部柱内配筋不作预先切割,则采用爆破高度差定向时,其后座范围亦较小。

四、工程实例

1. 靖江食品厂烟囱爆破

该烟囱为砖结构(见图6),高40.0m。+1.2m处外径1.84m,内径1.02m,顶部外径0.84m,内径0.6m。外壁由*100、*25混合砂浆砌筑,厚0.54m;内衬亦用普通砖砌筑,厚0.24m,隔层0.04m,烟囱全重2749MN。东面2.6m有一配电房,北面5.4m有高压输电线,北面4.7m及南面4.3m处均有架空管道,西北面50.0m有一水泵房。只有西面一个方向允许倒塌。

(1) 爆破设计

根据环境要求,确定西偏南($\pi/15$)rad为倒向(烟道在切口以内),但出灰口位于保留筒壁内,爆前予以砌实。本次爆破对定向及后座范围均有较高要求,左右允许偏差小于($\pi/180$)rad,后座范围仅2.6m。为确保安全,根据上述有关预防后座的对策确定了如下参数:采用“—”字形切口,外壁布4排孔(共42孔),其中上、下两排在切口两侧均少布2孔,单孔药量最大60g,最小40g,按照切口中间大而两侧及上沿小的原则分布。内衬布3排孔(共23孔),每孔20g(均为*2AN-TNT炸药)。切口长度取0.583倍圆周长,即($7\pi/6$)rad,中间部分切口高为1.24m,两侧0.5m。切口下沿至地表距离取0.5m。为保证支撑筒壁的完整性,在切口两侧均预先开设了一个 $0.24 \times 0.5\text{m}^2$ 的定向槽。

(2) 后座范围预测

首先考虑初期阶段，已知： $m=2.54 \times 10^5 \text{ kg}$ ， $\rho=1800 \text{ kg/m}^3$ ， $\rho_0=1.29 \text{ kg/m}^3$ ， $r=R_1=1.02 \text{ m}$ ， $R=R_2=1.84 \text{ m}$ ， $r_1=0.6 \text{ m}$ ， $r_2=0.84 \text{ m}$ ， $\alpha=2.62 \text{ rad}$ ， $\alpha_1=0.26 \text{ rad}$ ， $\alpha_2=2.88 \text{ rad}$ 。分别代入 (1)、(3)、(2) 式得： $X_c=1.084 \text{ m}$ ， $I_z=0.44 \text{ m}^4$ ， $\sigma_{pk}=3.85 \text{ MPa}$ ，保留筒壁受到的压力为 $mg/A_p=0.81 \text{ MPa}$ ，而筒壁抗压强度为 $\sigma_B=2.45 \text{ MPa}$ ，说明在初期阶段保留筒壁因 $\sigma_B > mg/A_p$ 不会压碎，但因其抗拉强度趋于零，在 σ_{pk} 作用下外侧会立即拉裂作定向倾倒。由于在倾倒过程中因挤压产生剪力，必定使抗剪能力极弱的外壁产生坍落，但因保留筒壁高度较小，即使全部坍落下来也不会对配电房造成任何损坏。关键是看后期阶段筒体下部会不会后移。按照上述已知条件首先求出 $\bar{H}=29.43 \text{ m}$ ， $l=14.71 \text{ m}$ ， $J_0=7.33 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ， $\varphi_0=0.074 \text{ rad}$ ，然后 φ 从切口闭合开始 ($\varphi_1=0.38 \text{ rad}$) 取值，再分别取 $\varphi_2=\pi/6$ ， $\varphi_3=\pi/4$ ， $\varphi_4=\pi/3$ ， $\varphi_5=\pi/2$ 代入 (8)、(9) 两式，求得 $R_{x1}=0.55 \text{ MN}$ ， $R_{y1}=1.97 \text{ MN}$ ； $R_{x2}=0.56 \text{ MN}$ ， $R_{y2}=1.59 \text{ MN}$ ； $R_{x3}=0.17 \text{ MN}$ ， $R_{y3}=0.78 \text{ MN}$ ； $R_{x4}=-0.80 \text{ MN}$ (表明在惯性作用下已开始前冲)， $R_{y4}=0.14 \text{ MN}$ ； $R_{x5}=-3.73 \text{ MN}$ ， $R_{y5}=0.59 \text{ MN}$ 。取 $f=0.7$ ，则条件 $R_x \leq fR_y$ 均满足，故可断定在后期阶段不会再产生更大的后座，因而是安全的。

(3) 爆破效果

爆破后完全按预计情况定向倾倒，方向准确无误，周围建筑及管道安全无恙。后座情况与预测的结果完全吻合，烟囱主体部分未向后推移，只有部分保留筒壁因挤压坍落下来 (见图 7)。

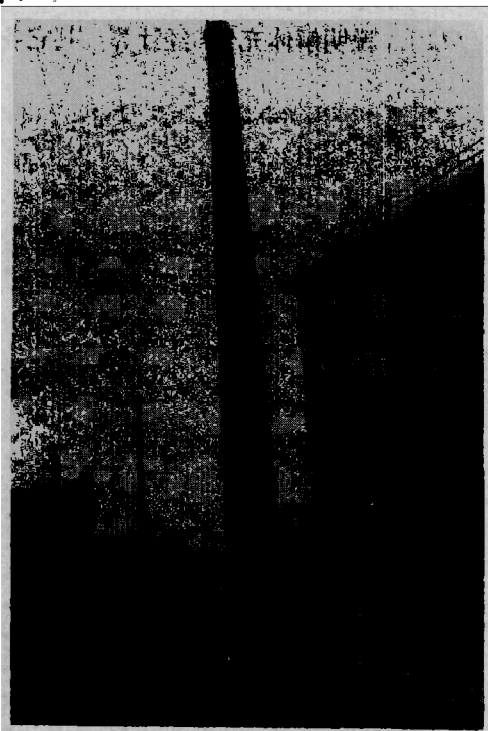


图 6 爆前景象(烟囱周围情况)
Fig. 6 Appearance before demolition
(conditions around the chimney)

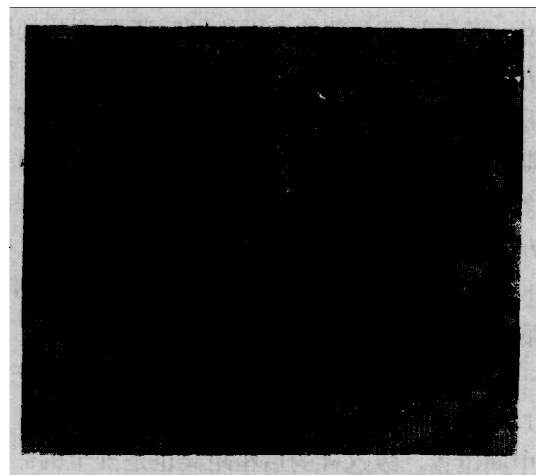


图 7 爆后烟囱底部后座情况
Fig. 7 Recoil of the chimney

2. 南京化工厂氯化苯厂房拆除爆破

欲拆除厂房为整体混凝土框架结构，长 6.2 m，宽 5.2 m，高 16.0 m，重 1.88 MN。分四层，层高 4.0 m，每层由 4 根承重柱支撑，柱

为变截面, 第一层柱为 $0.45 \times 0.45 \text{ m}^2$, 二、三层为 $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$, 四层为 $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ 。每层由厚 0.1 m 的楼板及纵横梁组成, 梁截面最大者为 $0.7 \times 0.37 \text{ m}^2$, 最小者为 $0.35 \times 0.15 \text{ m}^2$, 共有梁50根。厂房两侧东西方向有同高度楼房用预制板或工字钢与之连为一体, 倒向的背后(正南)中央 2.2 m 处有一 20 m 高的铁塔, 只有一个方向(正北)允许倒塌。

(1) 爆破设计

因三面夹制, 须作手术式的爆破拆除。为此, 爆前预先切除与该厂房的一切联系(实际切割最小宽度仅为 0.3 m), 确定北面为坍塌方向。其主要设计参数(仅限于涉及后座问题的参数)如下: 对承重柱, 每层均从地面(或楼板) 0.5 m 起布孔, 第一层倒向每柱7孔, 背向每柱3孔, 可形成悬空高分别为 2.8 m 及 1.3 m , 二、三层每柱4孔, 悬空高 1.6 m , 四层未布孔。对于梁, 每层爆破6根主梁(两端及中间三处布孔, 每处3孔)。分4段起爆, 每段间隔 0.5 s 。

(2) 解体计算与后座预测

a. 解体计算 以背向第一层两根承重柱与第一层梁的解体计算为例, 其它依此类推。已知 $m = 1.92 \times 10^5 \text{ kg}$, $X_{e1} = X_{e2} = 2.65 \text{ m}$, $m_1^* = m_2^* = 2$, 承重柱截面与材料为: $b = h = 0.45 \text{ m}$; 水泥标号为*400, 即 $\sigma_R = 39.23 \text{ MPa}$, $\delta = 0.03 \text{ m}$; $\delta_1 = 0.2 \text{ m}$; 配筋为1级热轧($\phi 16$), $n = 8$, $\sigma_T = 3.73 \times 10^2 \text{ MPa}$, $d_{\max} = 0.016 \text{ m}$, $A_{s1} = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $E = 2.06 \times 10^2 \text{ GPa}$, $N_{11} = 3$, $N_{12} = 2$, $N = 5$ 。将上述数据分别代入(16)、(17)两式, 可求得 $M_0' = 1.51 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$, $[M_B^*]_{\max} = 2.47 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 取 $\zeta = 2$, 有 $M_0' > \zeta [M_B^*]_n$, 说明解体充分。经计算, 其它各层均能充分解体(计算过程从略)。

b. 后座预测 上述爆破参数对减少后座来说, 并不是最合理的, 因为同时还要顾及到厂方对工期、块度和坍塌范围等方面的要求。要是再提高爆高, 无疑将增加施工难度, 影响工期(要求两天, 实际不到两天即爆完), 只有在多方兼顾的条件下满足后座的要求。已知层高 $H = 4 \text{ m}$, 前后跨度 $L = 6 \text{ m}$, 背向柱爆高 $H' = 1.3 \text{ m}$, 且知梁柱已能充分解体。这样, 背向柱底部后座距离将不会大于 $H - H' = 2.7 \text{ m}$, 第一层梁后座距离不会超过 $L - (L^2 - H'^2)^{1/2} = 1.53 \text{ m}$ 。由于 2.2 m 处的铁塔在该厂房的背向中间位置, 故这样的后座距离也是安全的。

(3) 爆破效果

爆破后梁柱完全解体破碎, 块度较小, 定向准确, 未造成任何损失, 完全达到了设计要求和预期目的(见图8), 背向铁塔的油漆保持完好, 第一层背向柱底部向后推移 2.7 m , 与预测的完全吻合, 梁后座 1.5 m , 亦基本吻合。

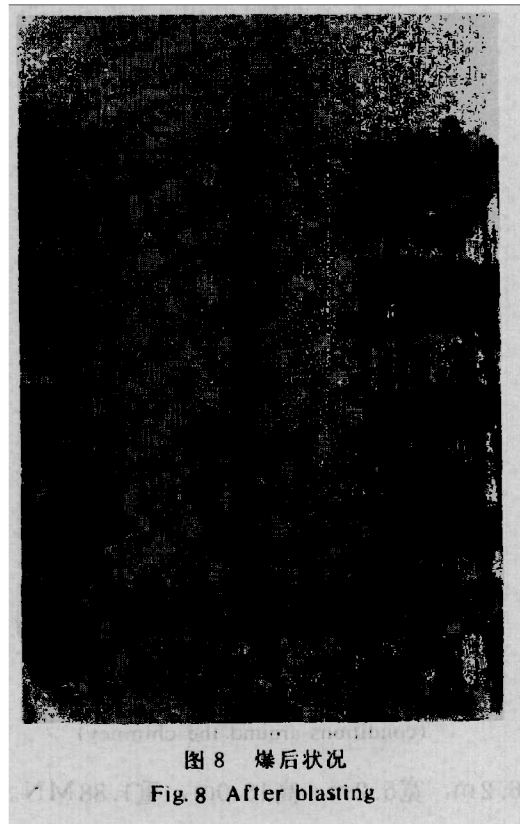


图8 爆后状况

Fig. 8 After blasting

作者对沈贤玃教授的热情指导及林学圣教授的认真审阅表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 齐世福, 连体框架结构中间一跨拆除爆破理论设计与工程实践, 中国力学学会工程爆破专业委员会第一届全国青年学术交流会议论文集, 第二册 (1987), 1.
- [2] 姚 尧、赵福兴, 拆除高耸建筑控制爆破中的几个力学问题, 第三届全国工程爆破学术交流会论文集, 第二册 (1986).
- [3] 郝庆桃, 有关烟囱爆破倾倒的几个问题, 爆破, 1 (1986), 31.
- [4] 李起山, 高大烟囱爆破拆除时发生反向倾倒的原因初探, 爆破器材, 2 (1987), 21.

RECOIL OF TOWERING CONSTRUCTION OF BURSTING DEMOLISHED BY DIRECTIONAL BLASTING AND APPROPRIATE MEASURES

Qi Shifu, Yan Jiliang

(*Engineering Institute, Engineer Corps, PLA.*)

ABSTRACT Recoil of towering constructions of bursting in directional blasting potentially has harm effects to the preserved buildings, installations and facilities. Studies on the recoil will bring much helps to estimate the reliable safety and optimization of choosing parameters of directional blasting in the limited collapsing area with complicated surroundings. This paper presents the mechanical analysis in different collapsing stages of various towering constructions (tube-supported such as chimney or water tower etc. reinforced concrete such as frame structural and concrete masonry building, frame supported water tower etc.), comprehensively discusses the causes of recoil phenomena and the possible recoil area.

In mechanical analysis, some schematic diagrams show the loading states of the demolished towering constructions, the relevant analysis formulas and their imbalance conditions are given. These may be helpful to optimize the parameters of blasting planning and provide some theoretical basis. On the basis of these analysis and engineering experiences of the author and other persons, some safety measures for planning blasting are suggested. The main measure against recoil in demolishing tube chimney or water tower is to ensure that the non-demolished part of the wall of the towering construction at the moment of blasting has enough strength and stability to support itself, which depends upon the blasting cut shape, its dimension and place on the wall, charge amount and the structure of the construction. As to the frame construction, the author proposes to control the heights of blasting and the bursting time in both falling and backward directions. Some examples are given.

KEY WORDS towering construction, directional blasting, recoil.