

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0459-06

# 高烟囱爆破拆除倾倒折断力学分析

杨建华<sup>1</sup>, 马玉岩<sup>1</sup>, 卢文波<sup>1</sup>, 孙金山<sup>2</sup>, 陈 明<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 针对 150 m 以上高烟囱在爆破拆除过程中频繁发生空中折断的现象, 按照国内烟囱设计规范<sup>[1]</sup>, 选定相应烟囱结构设计参数, 通过建立高耸钢筋混凝土烟囱在爆破拆除定向倾倒过程中的力学模型, 推导了任一时刻烟囱任一截面的内力分布表达式和极限承载能力表达式, 分析了其破坏机制。根据所受的荷载和承载能力对烟囱倾倒过程中是否会发生空中断裂进行了判断, 结果表明, 高度超过 150 m 的钢筋混凝土烟囱在倾倒角度超过 40° ~ 60° 后, 均可能在离顶部约 1/3 烟囱高度处发生断裂。

**关 键 词:** 高耸烟囱; 爆破拆除; 定向倾倒; 承载力; 折断

**中图分类号:** TU 279.7

**文献标识码:** A

## Analysis of fracture mechanics for falling tall chimneys during demolition blasting

YANG Jian-hua<sup>1</sup>, MA Yu-yan<sup>1</sup>, LU Wen-bo<sup>1</sup>, SUN Jin-shan<sup>2</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to explain the frequent phenomenon that tall chimneys with a height more than 150m always fracture during falling process during demolition blasting, a mechanical model of tall reinforced concrete chimneys is set up in the directional falling process through the appropriate structural design parameters selected in accordance with the design standard of chimneys. The inner force distribution and limit bearing capacity expressions of chimney section at any time are derived; and the failure mechanism is analyzed. And then the evaluation is carried out if chimneys will fracture or not during demolition blasting according to its load and section strength. Results show that tall chimneys with a height more than 150 m will fracture at the section to the top 1/3 height when the tilting angle reaches to 40° -60° during demolition blasting.

**Key words:** tall chimneys; demolition blasting; directional falling; bearing capacity; fracturing

## 1 引 言

控制爆破拆除烟囱具有快速、安全的优点, 但在目前定向爆破拆除高耸钢筋混凝土烟囱工程实践中, 不少 150 m 以上的烟囱在倾倒过程中发生了空中折断<sup>[2-4]</sup>, 这直接影响到爆破拆除的安全性。发生这一现象是属于偶然的工程事故, 还是存在必然的力学规律, 需要进一步探讨。国内学者杨人光、金骥良等<sup>[5-6]</sup>通过建立烟囱不同的力学模型, 对烟囱的倒塌过程进行了力学分析, 计算出了最大拉应力、最大剪应力及最大弯矩所在截面的高度; 贾永

胜等<sup>[7]</sup>通过有限元方法对建(构)筑物的爆破拆除过程进行了数值模拟。据此对钢筋混凝土烟囱发生空中折断的机制及位置进行了判断。

鉴于高耸钢筋混凝土烟囱是否发生空中折断主要取决于自身结构设计参数, 本文针对烟囱设计手册中不同高度的钢筋混凝土烟囱, 根据烟囱截面所受的荷载及极限承载能力, 从受弯破坏和受剪破坏两方面对烟囱倾倒过程中的筒壁安全性进行分析, 对破坏折断机制进行判断, 并计算出折断的具体位置, 以解释高耸钢筋混凝土烟囱爆破拆除倾倒折断的原因, 找出其力学规律。

收稿日期: 2010-03-02

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目 (No. 2008BAB29B01); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (No. NCET-06-0616); 湖北省自然科学基金杰出青年人才项目 (No. 2007ABB026)。

第一作者简介: 杨建华, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要从事与岩石爆破相关的岩石动力学问题研究。E-mail: yjh69959609@163.com

## 2 烟囱倾倒过程中筒壁的受力分析

视烟囱为从下到上均匀变化、壁厚连续收缩的圆筒,并且假定烟囱倾倒的支点在烟囱轴线的底部,可以得到任一截面的外半径和内半径:

$$\left. \begin{aligned} R &= R_2 - Kl; \quad r = r_2 - kl \\ K &= (R_2 - R_1)/H; \quad k = (r_2 - r_1)/H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $K$  为烟囱筒壁外半径变化率;  $k$  为烟囱筒壁内半径变化率;  $R_1$  为烟囱顶部外半径;  $R_2$  为烟囱底部外半径;  $r_1$  为烟囱顶部内半径;  $r_2$  为烟囱底部内半径;  $H$  为烟囱高度;  $l$  为任一截面到转动支点的距离。

取一高度为  $dl$  的单元体,此时的倾角为  $\varphi$ ,单元体受力分析如图 1 所示,图中  $\rho$  为烟囱筒壁密度;  $S(l)$  为单元体截面面积;  $v_l$  为单元体转动速度;  $\varphi$  为烟囱转角。

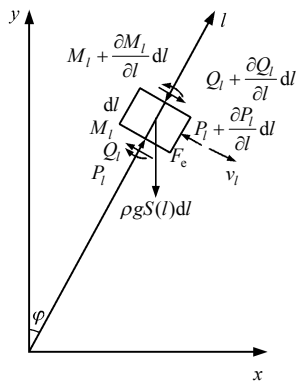


图 1 单元体受力分析

Fig.1 Force analysis of unit body

单元体所受的荷载有重力、轴力、剪力、弯矩、轴向惯性力、切向惯性力、惯性弯矩及空气阻力,  $F_e$  为空气阻力,  $F_e = 0.7\rho_0 v_l^2 R dl$  [5], 空气阻力为分布荷载,但由于  $dl$  足够的小,因此认为空气阻力作用点在单元体厚度的中心,其中,  $\rho_0$  为空气密度,通常取  $1.29 \text{ kg/m}^3$ 。

根据达兰贝尔原理[8]有

轴向力:

$$-\rho g S(l) dl \cos \varphi + P_l - \left( P_l + \frac{\partial P_l}{\partial l} dl \right) + \rho S(l) dl \frac{v_l^2}{l} = 0 \quad (2)$$

切向力:

$$-\rho g S(l) dl \sin \varphi + Q_l - \left( Q_l + \frac{\partial Q_l}{\partial l} dl \right) + \rho S(l) dl \frac{dv_l}{dt} + 0.7\rho_0 v_l^2 (R_2 - Kl) dl = 0 \quad (3)$$

弯矩为

$$-\rho g S(l) dl \sin \varphi - M_l + \left( M_l + \frac{\partial M_l}{\partial l} dl \right) + Q_l l - \left( Q_l + \frac{\partial Q_l}{\partial l} dl \right) (l + dl) + \left( l + \frac{dl}{2} \right) \rho S(l) dl \frac{dv_l}{dt} + 0.7\rho_0 v_l^2 R dl \left( l + \frac{dl}{2} \right) = 0 \quad (4)$$

得到烟囱倾倒过程中的内力分布为

$$\left. \begin{aligned} P_l &= G \left[ \cos \varphi \left( 1 - \frac{A_1(l)}{V} \right) - \frac{2ml_c^2}{J_A} \right. \\ &\quad \left. (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) \left( 1 - \frac{A_2(l)}{l_c V} \right) \right] \\ Q_l &= G \sin \varphi \left[ \left( 1 - \frac{A_1(l)}{V} \right) - \frac{ml_c^2}{J_A} \left( 1 - \frac{A_2(l)}{l_c V} \right) \right] - \\ &\quad \frac{G\rho_0 l_c}{J_A} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) A_4(l) \\ M_l &= lG \sin \varphi \left[ \left( 1 - \frac{A_1(l)}{V} + \frac{A_2(l)}{lV} \right) - \frac{ml_c^2}{J_A} \right. \\ &\quad \left. \left( 1 - \frac{A_2(l)}{l_c V} + \frac{A_3(l)}{ll_c V} \right) \right] + \frac{G\rho_0 l_c}{J_A} (\cos \varphi_0 - \cos \varphi) A_5(l) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $m$  为烟囱质量;  $G$  为烟囱重力;  $V$  为烟囱体积;  $J_A$  为烟囱转动惯量;  $l_c$  为烟囱质心到转动支点的距离;  $v_c$  为烟囱质心转动速度;  $\varphi_0$  为形成塑性铰时烟囱转动的角度,该角度很小[6],可以认为  $\varphi_0 = 0$ 。

$$A_1(l) = \int_0^l S(l) dl =$$

$$\pi l \left[ (R_2^2 - r_2^2) - (KR_2 - kr_2)l + \frac{1}{3}(K^2 - k^2)l^2 \right] \quad (6)$$

$$A_2(l) = \int_0^l l S(l) dl = \pi l^2 \left[ \frac{1}{2}(R_2^2 - r_2^2) - \frac{2}{3}(KR_2 - kr_2)l + \frac{1}{4}(K^2 - k^2)l^2 \right] \quad (7)$$

$$A_3(l) = \int_0^l l^2 S(l) dl = \pi l^3 \left[ \frac{1}{3}(R_2^2 - r_2^2) - \frac{1}{2}(KR_2 - kr_2)l + \frac{1}{5}(K^2 - k^2)l^2 \right] \quad (8)$$

$$A_4(l) = \frac{7}{15} R_2 (H^3 - l^3) - \frac{7}{20} K (H^4 - l^4) \quad (9)$$

$$A_5(l) = \frac{7}{20} (R_2 - Kl) (H^4 - l^4) - \frac{7}{15} R_2 l (H^3 - l^3) - \frac{7}{25} (H^5 - l^5) \quad (10)$$

$$V = A_1(H) = \frac{\pi H}{3}(R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2 - r_1^2 - r_2^2 - r_1 r_2) \quad (11)$$

$$I_c = \frac{A_2(H)}{V} = \frac{\pi H^2}{V} \left[ \frac{1}{12}(R_2^2 - r_2^2) + \frac{1}{4}(R_1^2 - r_1^2) + \frac{1}{6}(R_1 R_2 - r_1 r_2) \right] \quad (12)$$

$$J_A = \rho A_3(H) = \rho \pi H^3 \left[ \frac{1}{30}(R_2^2 - r_2^2) + \frac{1}{5}(R_1^2 - r_1^2) + \frac{1}{10}(R_1 R_2 - r_1 r_2) \right] \quad (13)$$

### 3 烟囱截面承载能力

烟囱在倾倒过程中是否会折断,取决于两方面,一是烟囱截面所受的荷载;二是烟囱截面的极限承载能力。

#### 3.1 截面抗弯承载能力

截面抗弯承载力确定中作如下假设:①截面应变符合平截面假定,受压区混凝土边缘极限压应变 $\varepsilon_{cu}$ 取0.002;②由于混凝土的抗拉强度很低,不考虑受拉区混凝土的作用;③根据静力等效的原则,将实际的曲线状应力分布图形简化为矩形应力分布图形;④将纵向钢筋按面积等效简化为一个钢环进行计算<sup>[9]</sup>。由此得到截面的极限抵抗矩:

$$M_u = \alpha_1 f_{ck} S(l) \frac{R+r}{2} \frac{\sin \alpha \pi}{\pi} + f_{yk} A_s \frac{R+r}{2} \frac{\sin \alpha \pi + \sin \alpha_1 \pi}{\pi} \quad (14)$$

式中: $\alpha$ 为受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值, $\alpha = \frac{P_l + f_{yk} A_s}{\alpha_1 f_{ck} S(l) + 2.5 f_{yk} A_s}$ ,当 $\alpha \geq 2/3$ 时, $\alpha =$

$\frac{P_l}{\alpha_1 f_{ck} S(l) + f_{yk} A_s}$ ;  $\alpha_1$ 为受压区混凝土矩形应力图的

应力与混凝土抗压强度设计值的比值,当混凝土强度等级不超过C50时, $\alpha_1 = 1.0$ ,当为C80时, $\alpha_1 = 0.94$ ,其间按线性内插法取值; $\alpha_1$ 为受拉纵向钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值, $\alpha_1 = 1 - 1.5\alpha$ ,当 $\alpha \geq 2/3$ 时, $\alpha_1 = 0$ ;  $A_s$ 为计算截面纵向钢筋总面积; $f_{ck}$ 为混凝土轴心抗压强度标准值; $f_{yk}$ 为计算截面钢筋的抗拉强度标准值。

#### 3.2 截面抗剪承载能力

由于影响斜截面抗剪承载能力的因素很多,有关斜截面抗剪承载能力的计算方法还不完全一致。本文所采用的公式是基于试验数据的统计分析而建

立的半理论、半经验实用计算公式<sup>[10]</sup>。偏心受压构件斜截面极限抗剪能力 $Q_u$ 为

$$Q_u = \frac{0.2}{\lambda + 1.5} f_{ck} S(l) + 1.25 f_{yk} A_{sv} + 0.07 P_l \quad (15)$$

式中: $\lambda$ 为偏心受压构件计算截面的剪跨比,对高耸烟囱, $\lambda = 3.0$ ;  $f_{yk}$ 为烟囱环向箍筋抗拉强度标准值; $A_{sv}$ 为每米烟囱高度内的环向箍筋截面面积。

出于判断烟囱是否会发生纯剪破坏的目的,只考虑混凝土和纵向钢筋,按纯剪情况计算截面的抗剪承载能力时,其截面极限抗剪能力为

$$Q_u = \tau_{ck} S(l) + f_{yk} A_s \quad (16)$$

式中: $\tau_{ck}$ 为混凝土抗剪强度标准值,对于混凝土,其抗剪强度略小于轴心抗拉强度,但已十分接近轴心抗拉强度,本文计算时采用混凝土抗剪强度等于轴心抗拉强度。

### 4 烟囱倾倒过程中折断判断

由前面的计算可知,烟囱在倾倒过程中,任一截面上承受着轴力 $P_l$ ,剪力 $Q_l$ 和弯矩 $M_l$ ,可能发生正截面受弯破坏而折断,在剪力和弯矩共同作用下,还可能产生斜裂缝,沿斜截面发生受剪破坏而折断,同时,由于轴向力的存在会对斜截面的承载力产生明显的影响。

定义烟囱倾倒过程中的抗弯安全系数为 $f_1$ ,抗剪安全系数为 $f_2$ :

$$f_1 = M_u / M_l; f_2 = Q_u / Q_l \quad (17)$$

式中: $f_1$ 、 $f_2$ 都是 $\varphi$ 和 $l$ 的函数,当烟囱转动到某一角度时,就可以求出各个横截面上的 $f_1$ 、 $f_2$ ,其中 $f_1$ 值最小的截面为发生受弯破坏的最危险截面, $f_2$ 值最小的截面为发生受剪破坏的最危险截面。若2个最危险截面的安全系数都大于1,则烟囱不会折断;若最危险截面的 $f_1 < 1$ ,则烟囱在倾倒过程中就会在该处发生受弯破坏而折断,若最危险截面的 $f_2 < 1$ ,则烟囱在倾倒过程中就会在该处发生受剪破坏而折断。分别令

$$df_1 / dl = 0; df_2 / dl = 0 \quad (18)$$

就可以解出受弯最危险截面和受剪最危险截面离支座的距离 $l$ 的数值解。

### 5 工程算例

#### 5.1 烟囱基本资料

根据烟囱设计手册<sup>[1]</sup>,选取75、90、120、150、180、210、240 m这7个典型的高耸钢筋混凝土

烟囱进行计算，找出高耸烟囱倾倒折断规律。基本参数见表 1，钢筋混凝土的重度取  $25.0 \text{ kN/m}^3$ 。

表 1 烟囱基本参数表  
Table 1 Basic parameters of chimneys

高度 /m	顶部外 半径 /m	底部外 半径 /m	顶部内 半径 /m	底部内 半径 /m	混凝土 等级	钢筋 等级	配筋率/%	
							竖向	环向
75	1.25	3.22	1.11	2.96	C20	II	0.62	0.62
90	1.38	3.57	1.20	3.22	C20	II	0.54	0.54
120	1.88	4.28	1.70	3.88	C25	II	0.51	0.51
150	3.00	8.46	2.84	8.06	C25	II	0.47	0.47
180	3.00	9.35	2.84	8.93	C30	II	0.48	0.48
210	3.50	10.60	3.32	10.00	C35	II	0.58	0.48
240	4.00	12.20	3.78	11.40	C35	II	0.65	0.50

5.2 受弯折断安全分析

烟囱在倾倒过程中受弯最危险截面的安全系数和高度是不断变化的，以上 7 个烟囱在倾倒过程中受弯最危险截面的变化过程如图 2、3 所示。从图中可以看出，75~240 m 高的烟囱，在倾倒过程中发生空中受弯折断的临界烟囱高度为 120~150 m。高度低于 120 m 的烟囱，在倾倒过程中不发生空中断裂；高度超过 150 m 的烟囱，倾倒至  $63^\circ$  左右时，无一例外地发生空中折断，而且折断部位均在离顶部约 1/3 烟囱高度处。

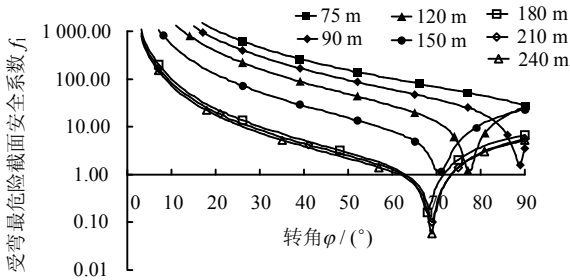


图 2 受弯最危险截面安全系数与转角关系曲线  
Fig.2 Curves of relation between the safety factor of the most dangerous section in bending and the angle

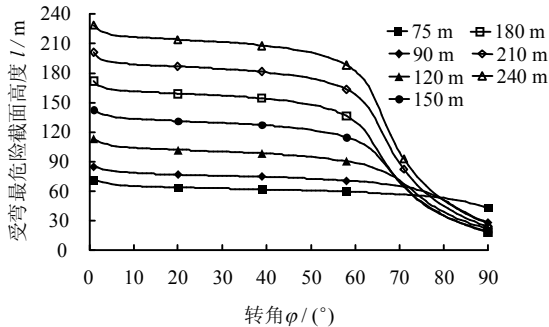


图 3 受弯最危险截面高度与转角关系曲线  
Fig.3 Curves of relation between the height of the most dangerous section in bending and the angle

5.3 受剪折断安全分析

(1) 斜截面抗剪能力工况

烟囱在倾倒过程中受剪最危险截面的安全系数和高度也是不断变化的，以上 7 个烟囱在倾倒过程中的受剪最危险截面的变化过程如图 4 所示。从图中可以看出，7 个烟囱的受剪最危险截面安全系数  $f_2$  在倾倒过程中不断减小，但始终都大于 1，也就是说，不会发生受剪破坏；烟囱高度越大，其受剪最危险截面安全系数越低。计算结果还表明，所有烟囱受剪最危险截面都在烟囱最底部，并且在倾倒过程中位置保持不变。

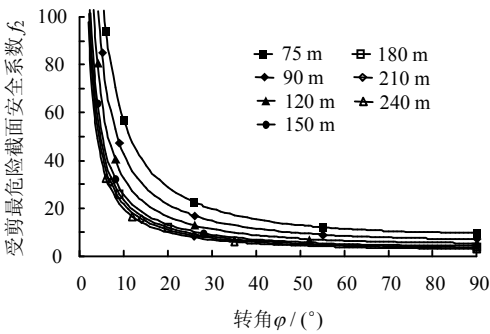


图 4 斜截面受剪最危险截面安全系数与转角关系曲线  
Fig.4 Curves of relation between the safety factor of the most dangerous section in oblique cross-section shear and the angle

(2) 纯剪计算工况

纯剪破坏模式下，各个烟囱受剪最危险截面的安全系数变化如图 5 所示。变化规律与按斜截面抗剪承载力计算时基本一致，7 个烟囱受剪最危险截面都在烟囱最底部，并且在倾倒过程中位置保持不变。比较图 5 与图 4 可以看出，按纯剪情况计算截面抗剪承载力时，最危险截面的抗剪安全系数  $f_2$  要大于按斜截面计算时的安全系数。因此，判断烟囱是否会发生受剪破坏，采用斜截面抗剪承载力

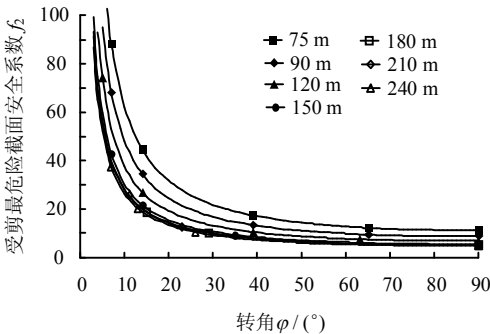


图 5 纯剪最危险截面安全系数与转角关系曲线  
Fig.5 Curves of relation between the safety factor of the most dangerous section in pure shear and the angle

力计算安全系数更为合适。因而下文强度折减后受剪安全性分析时,都采用斜截面抗剪承载力计算安全系数。

#### 5.4 考虑强度折减后的弯剪折断安全分析

以上分析的是烟囱材料力学参数在理想状况下的折断情况,实际上所要爆破拆除的烟囱往往年久陈旧,加之在爆破过程中爆炸应力波的影响,材料的力学强度会有所降低<sup>[11]</sup>,材料强度的折减对其倾倒折断会有所影响。本文分析以下3种强度折减情况:①钢筋强度降低20%,混凝土强度保持不变;②钢筋强度保持不变,混凝土强度降低20%;③钢筋和混凝土强度均降低20%。

对于第①种情况,钢筋强度降低后,烟囱在倾倒过程中受弯最危险截面的变化过程如图6所示。与图2相比较,发生空中受弯折断的临界烟囱高度仍然是120~150 m;各个烟囱在倾倒过程中受弯最危险截面的抗弯安全系数都有所降低,超过150 m的烟囱,开始发生折断的时间有所提前,发生的高度也有所升高。受剪最危险截面的变化过程如图7所示,各个烟囱受剪最危险截面的安全系数约降低了20%。计算结果还表明,受剪最危险截面仍在爆破切口的上缘,并且在倾倒过程中位置保持不变。对于第②种情况,混凝土强度降低后,烟囱在倾倒过程中最危险截面的变化过程与材料强度不折减基本相同,如图2~4所示。对于第③种情况,钢筋和混凝土强度均降低后,烟囱在倾倒过程中最危险截面的变化过程与只降低钢筋强度基本相同,如图6、7所示。这是因为混凝土的强度比钢筋的强度小得多,以至于混凝土强度的折减对安全系数基本上没影响,钢筋起着主要作用。

通过以上计算发现,烟囱倾倒至 $50^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 时开始折断,烟囱高度越大,开始折断的时间越早,随着钢筋强度的降低,开始折断的时间会提前。那么烟囱是否会在倾倒至 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 时就发生折断呢?现在将180、210、240 m 3个烟囱的钢筋和混凝土的强度均降低80%,烟囱在倾倒过程中受弯最危险截面的变化过程如图8所示。由图可以看出,即使将强度降低80%,也要倾倒至 $36^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 左右折断。

由于受剪最危险截面的位置始终保持不变,由式(15)、(17)可知,钢筋强度的折减会使受剪最危险截面的安全系数同等大小的降低,前面的计算已经说明了这一点。在以上7个烟囱中,在强度不折减时240 m高的烟囱倾倒至 $90^{\circ}$ 时,受剪最危险截面的安全系数 $f_2$ 最小,为3.18,若要发生受剪破

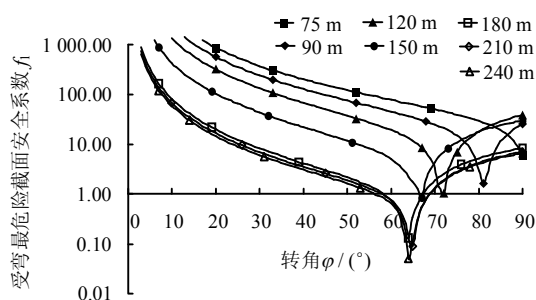


图6 钢筋强度降低20%后受弯最危险截面安全系数与转角关系曲线

Fig.6 Curves of relation between the safety factor of the most dangerous section in bending and the angle with steel strength reduced by 20%

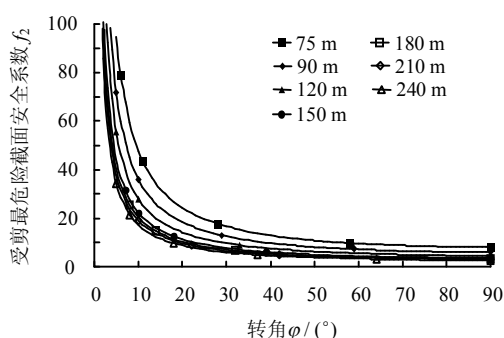


图7 钢筋强度降低20%后受剪最危险截面安全系数与转角关系曲线

Fig.7 Curves of relation between the safety factor of the most dangerous section in shear and the angle with steel strength reduced by 20%

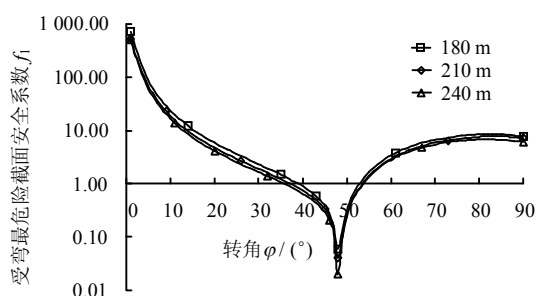


图8 材料强度降低80%后受弯最危险截面安全系数与转角关系曲线

Fig.8 Curves of relation between the safety factor of the most dangerous section in bending and the angle with steel strength reduced by 80%

坏,钢筋和混凝土的强度至少要降低70%,对于其他烟囱降低会更大。若要在 $50^{\circ}$ 左右发生受剪破坏,钢筋和混凝土的强度至少要降低78%。这再一次说明了高耸钢筋混凝土烟囱倾倒断裂是由受弯破坏引起的,而不是由受剪破坏引起的。实际工程中,爆破切口处仅有1/3截面承载,必然会引起该截面因剪切破坏而发生“后坐”,这方面问题国内有很多学者讨论过<sup>[12-13]</sup>,本文不作深入研究。

## 6 结 论

(1) 高耸钢筋混凝土烟囱在爆破拆除倾倒过程中发生空中折断是由于截面的弯矩超过了截面的极限抵抗矩而发生受弯破坏, 钢筋混凝土烟囱筒身截面强度高, 不会发生剪切破坏。

(2) 按照我国烟囱结构设计条件<sup>[1]</sup>, 发生空中折断的临界烟囱高度是 120~150 m, 高度越大, 安全系数越低, 对 150 m 以上的烟囱, 在倾倒过程中会发生空中折断。

(3) 150 m 以上的烟囱倾倒至 63° 左右时, 首先在烟囱顶部约 1/3 高度处发生折断, 出现这种情况的原因是烟囱上部的直径较小, 截面抵抗能力较小, 烟囱倾倒时截面上的弯矩极易达到极限抵抗矩而出现断裂现象。

(4) 考虑到实际烟囱使用后的强度折减, 会使折断的时间有所提前, 折断的高度也有所升高, 一般在倾倒至 40°~60° 时在离顶部约 1/3 烟囱高度处发生断裂, 高度越大, 开始折断的时间越早。

## 参 考 文 献

- [1] 建筑结构设计手册编委会编写组. 烟囱设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [2] 谢先启. 150 m 钢筋砼烟囱爆破拆除技术与分析[J]. 工程爆破, 2008, 14(1): 54—56.  
XIE Xian-qi. Blasting technology and effect analysis in demolition of a reinforced concrete chimney of 150 m height[J]. **Engineering Blasting**, 2008, 14(1): 54—56.
- [3] 黎丹清, 俞诚, 汤月华, 等. 210 m 钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除[J]. 工程爆破, 2009, 15(1): 48—50.  
LI Dan-qing, YU Cheng, TANG Yue-hua, et al. Demolition of a 210 m-high reinforced-concrete chimney by directional blasting[J]. **Engineering Blasting**, 2009, 15(1): 48—50.
- [4] 张继春, 曾庆福, 严军, 等. 成都华能电厂 210 m 钢筋砼烟囱控制爆破拆除[J]. 爆破, 2009, 26(2): 41—45.  
ZHANG Ji-chun, ZENG Qing-fu, YAN Jun, et al. Demolition of 210 m reinforced concrete chimney of Chengdu Huaneng plant by controlled blasting[J]. **Blasting**, 2009, 26(2): 41—45.
- [5] 杨人光, 史家埝. 建筑物爆破拆除[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [6] 金骥良, 顾毅成, 史雅语. 拆除爆破设计与施工[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [7] 贾永胜, 谢先启, 李欣宇, 等. 建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 285—288.  
JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, LI Xin-yu, et al. Numerical simulation for demolition of structures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 285—288.
- [8] 张云鹏, 甘德清, 郑瑞春. 拆除爆破[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [9] 杜引刚. 钢筋混凝土烟囱承载力计算[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 9(3): 284—287.  
DU Yin-gang. Calculation formula for bearing capacity of RC chimney[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture and Technology**, 1995, 9(3): 284—287.
- [10] 李传才. 水工混凝土结构[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [11] 吴亮, 钟冬望, 卢文波. 空气间隔装药爆炸冲击荷载作用下混凝土损伤分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3109—3114.  
WU Liang, ZHONG Dong-wang, LU Wen-bo. Study of concrete damage under blast loading of air-decking[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3109—3114.
- [12] 孙金山. 高耸(高层)建筑物拆除爆破倒塌过程模拟[硕士论文 D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [13] 郑炳旭, 魏晓林, 陈庆寿. 钢筋混凝土高烟囱爆破切口支撑部破坏观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3513—3517.  
ZHENG Bing-xu, WEI Xiao-lin, CHEN Qing-shou. Study on damage surveying of cutting-support of high reinforced concrete chimney demolished by blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3513—3517.