

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.017

超高钢筋混凝土烟囱爆破切口角度选取的研究*

柴亚博¹, 罗宁^{1,2,3}, 袁翊硕¹, 杨振³, 韩涛², 曹祺⁴

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 徐州 221116; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221116;
3. 河南省洛阳宇航爆破工程有限公司, 洛阳 471000; 4. 淮南职业技术学院 能源工程学院, 淮南 232001)

摘要: 爆破拆除典型钢筋混凝土烟囱过程中, 切口角度的合理选择是爆破拆除成功的重要因素。为确定切口角度的选取范围, 根据余留截面的受力和破坏特征, 采取隔离法, 建立应力求解和应力及弯矩条件的理论模型; 推导出余留截面上任意角度位置的应力求解公式, 并定义了一个修订系数 k 来表达非切口截面上部的筒体, 对余留截面不同角度位置产生的压应力影响效果的差异; 建立筒体倾倒的应力及弯矩条件, 结合应力求解公式与倾倒条件得出切口角度的选取范围。结合实际工程案例进行分析, 研究表明: 随着切口角度的增大, 最大拉应力、最大压应力以及切口上部筒体产生的弯矩均呈现增大的趋势, 而余留截面的抵抗力矩则呈现减小的趋势; 最大拉应力达到材料强度极限时可得到切口角度的选取上限, 两种弯矩相等时即可确定切口角度的选取下限; 切口角度的改变对应力变化的影响要大于切口高度。工程案例中实际切口高度选择为 4.5 m 的条件下, 依据所建立的理论模型得到切口角度的选取范围为 $[198^\circ, 237.6^\circ]$, 而实际切口角度为 216° , 处于理论选取范围之内, 进一步验证了理论模型的可靠性, 以期待更广泛地应用并指导工程实践。

关键词: 钢筋混凝土烟囱; 隔离法; 应力及弯矩求解; 应力及弯矩条件; 切口参数

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)04-0124-08

Study on Selection of Blasting Incision Angle of Ultra-high Reinforced Concrete Chimney

CHAI Ya-bo¹, LUO Ning^{1,2,3}, YUAN Yi-shuo¹, YANG Zhen³, HAN Tao², CAO Qi⁴

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China; 3. Luoyang Yu hang Blasting Engineering Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 4. School of Energy Engineering, Huainan Vocational and Technical College, Huainan 232001, China)

Abstract: The reasonable selection of the incision angle is an important factor for the success of blasting demolition of a typical reinforced concrete chimney. In order to determine the selection range of incision angle, the isolation method was adopted to establish a theoretical model according to the force and failure characteristics of the residual

收稿日期 (Date of reception): 2022-09-18

网络首发日期 (Published online): 2023-04-10

作者简介: 柴亚博 (1998-), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事爆破拆除技术方面研究, (E-mail) 1915483059@qq.com。

通讯作者: 罗宁 (1980-), 男, 安徽人, 教授/博导, 主要从事工程力学科研教学及智能爆破技术方面的研究, (E-mail) nluo@cumt.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12072363); 精细爆破重点实验室开发基金重点项目 (BL2021-03); 安徽高校自然科学研究重点项目 (KJ2020A1160)

About the author: CHAI Ya-bo (1998-), male, born in Henan province, postgraduate, mainly engaged in the research of blasting and demolition technology, (E-mail) 1915483059@qq.com.

Corresponding author: LUO Ning (1980-), male, born in Anhui province, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in engineering mechanics research and teaching and intelligent blasting technology, (E-mail) nluo@cumt.edu.cn.

Fund projects: National Natural Science Foundation of China (12072363), Key project of the Development Fund of the State Key Laboratory of Precision Blasting (BL2021-03), Key project of natural science research in Anhui universities (KJ2020A1160)

section. The solution formula of any angle position on the residual section was derived, and a revision coefficient k was defined to express the influence of the cylinder at the upper part of the unnotched section. Furthermore, the stress and bending moment conditions of the dumping cylinder were established, and the selection range of the incision angle was obtained by combining the solution formula and the damping conditions. The case study shows that with the increase of the incision angle, the maximum tensile stress, the maximum compressive stress and the bending moment generated by the upper cylinder of the incision tend to increase, while the resistance moment of the residual section tends to decrease. The upper limit of the selection of the incision angle can be obtained when the maximum tensile stress reaches to the material strength limit, and the lower limit can be determined when the two bending moments are equal. Changing the incision angle would have a greater effect on stress than changing the incision height. Under the condition that the actual incision height is 4.5 m in the engineering case, the selection range of incision angle based on the established theoretical model is $198^\circ \sim 237.6^\circ$, and the actual incision angle is 216° within the theoretical selection range, which further verifies the reliability of the theoretical model. More extensive application and guide engineering practice are expected.

Key words: reinforced concrete chimney; isolation method; stress and bending moment solving; stress and bending moment conditions; incision parameters

随着国家将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局,中国制定了“将力争于2030年前实现二氧化碳排放达到峰值、2060年前实现碳中和”的伟大目标。烟囱、冷却塔等传统化工产业的产物造成极大的碳排放量,加快相关产业进行改造和升级对达到碳中和目标具有积极的意义^[1-3]。而能否成功爆破拆除钢筋混凝土烟囱的关键在于切口参数的设计和选取^[4],切口参数主要包含切口角度、切口高度两方面。加强对相关方面的研究可以增强钢筋混凝土烟囱爆破拆除的安全性和可靠性,减小爆破拆除失败所带来的损失。爆破切口参数设计的相关研究工作相对丰富,贺五一等以梯形切口为例^[5],利用力学理论推导计算了爆破切口角度、长度和高度等关键参数;金冀良依据力学原理^[6],应用数学方法推导出一定条件下的爆破切口参数的计算公式以解决高层建筑物和烟囱类高耸构筑物的整体定向爆破倒塌问题;龚相超等采取塑性分析方法及压杆稳定分析方法分别建立了倾倒弯矩条件和切口高度计算模型^[7],并计算了切口裸露钢筋对切口角度影响;张宝岗等通过有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 主要研究了不同切口角度对冷却塔爆破拆除中产生振动效果的影响^[8];李玉岐等建立了切口角度、高度的数学模型^[9],并研究了不同形状切口下最小切口高度的确定;傅菊根等按照强度、刚度及稳定性要求得出切口高度的计算^[10];言志信等运用动力学原理建立余留截面处应力模型^[11],分析了中性轴的变化规律,并提出冲压系数的概念来表示突加载荷的作用和影响;郑炳旭等提出烟囱发生脆性破坏后形成“塑性铰”的概念^[12],并提出烟囱倾倒的失稳保证率 k 来判断筒体的倾倒情况和突加载荷受压

区高度系数 k_A 来判断支撑部被突加载荷破坏情况等。切口参数研究虽较为丰富但仍存在一定的不足,贺五一等利用力学原理给出了圆心角和切口高度的计算方式^[5],但并没有给出圆心角与余留截面应力之间的联系;李玉岐等提出不同切口形式下^[9],截面应力和倾倒力矩的以及最小切口高度的计算方法,但并没有对不同切口高度对切口角度选取的影响加以探究;言志信等运用动力学原理建立余留截面处应力模型^[11],但只是较为笼统地建立了竖向应力平衡方程,并未给出应力求解的具体数学表达。已有的关于切口参数研究方法主要有塑性分析、压杆稳定分析、动力学原理、建立支座“塑性铰”等,且它们都基于一种大致的整体简化分析,未能较好考虑上部筒体对切口截面不同角度位置的影响差异。基于力学分析方法中的隔离法,将充分考虑上部筒体对切口截面不同角度处的差异化影响,给出一种截面应力求解方法和倾倒弯矩条件,并通过工程案例对所建立的理论模型加以验证。

1 理论模型建立

1.1 烟囱模型简化

烟囱爆破拆除过程中,根据实际情况的需要,有多种切口形式可供选择,如正梯形、矩形、倒梯形、三角形等^[13]。而正梯形切口和矩形切口是其中被最广泛采用的,选取案例中烟囱等比例缩放简化模型如图1所示,并基于此两种切口方式展开研究。

假设烟囱切口形式采取为正梯形或矩形切口,左右两部分筒体高为 h_1 的竖向截面上应力状态可简化为图2所示。

为探究爆破切口形成瞬间,切口截面的瞬时应

力状态,不同于大多数从截面几何分析或竖直方向受力平衡等出发建立平衡方程求解中性轴的分析方法^[8,14],本文采用隔离法予以探究。将切口截面的上部筒体即左侧筒体单独看作一个整体进行受力分析,可知,右侧筒体的重力将由 B 点处上方高为 h_1 的竖向截面上的切向应力提供,由相互作用力的性质可知,右侧筒体将对左侧筒体的两个竖向截面提供方向为竖直向下的切向应力 τ_s ,由于烟囱的顶端和底部截面壁厚差值相对于竖向截面的高度来说很小,故可近似假设截面为矩形。

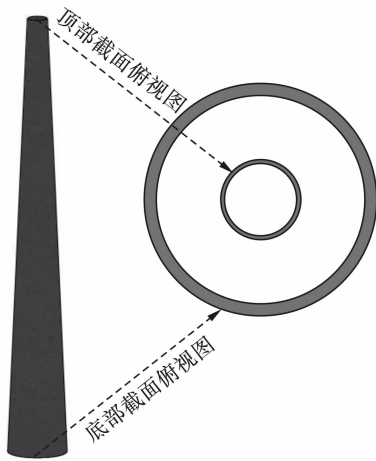


图1 烟囱模型图

Fig. 1 Chimney model diagram

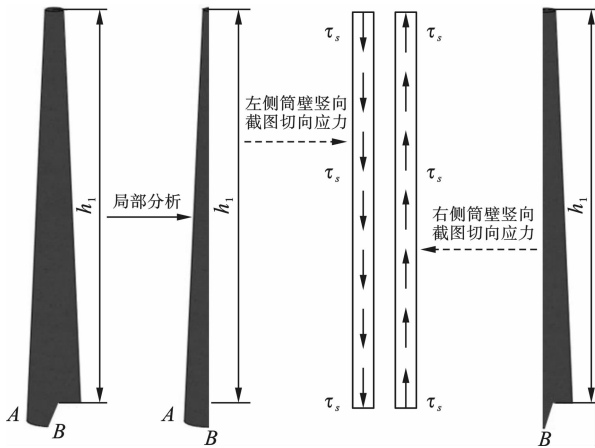


图2 烟囱整体-局部分析简化图

Fig. 2 Simplified diagram of chimney whole-local analysis

1.2 应力求解

由图3所示,根据几何关系可将左右两部分筒体的体积、重力等参数分别求出,进而可求得竖向截面上的切向应力 τ_s 。

图3中: r_1, R_1 分别为底部截面内外半径; r_2, R_2 分别为顶部截面内外半径; 2α 为切口处余留截面对应圆心角。

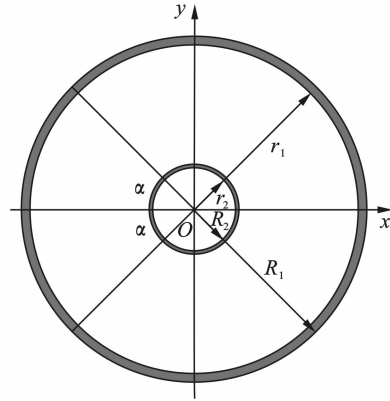


图3 烟囱顶、底部横向截面示意图

Fig. 3 Cross section diagram of the top and bottom of the chimney

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi h_1 \left(1 - \frac{2\alpha}{360^\circ} \right) (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2 - r_1^2 - r_2^2 - r_1 r_2)$$

$$m_2 = \rho V_2$$

$$S_2 = [(R_1 - r_1) + (R_2 - r_2)] h_1$$

式中: V_2 为右侧筒体体积; m_2 为右侧筒体质量; S_2 为竖向截面面积。

竖向截面上的切向应力为

$$\tau_s = \rho V_2 g / S_2 \quad (1)$$

余留截面的上部筒体受到筒体重力、地面支撑力及竖向截面的竖直向下的切向应力 τ_s ,余留截面上各处的应力状态将由左侧筒体重力产生的压应力、左侧筒壁截面上的竖直向下的切向应力以及切向应力提供的弯矩产生的拉应力共同决定。为方便分析,假设左侧筒体对余留截面的压应力是均匀分布的。

余留截面受到均布压应力为

$$\sigma_y = \rho V_1 g / S_1$$

$$V_1 = \frac{1}{3} \pi H \left(1 - \frac{2\alpha}{360^\circ} \right) (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2 - r_1^2 - r_2^2 - r_1 r_2)$$

$$S_1 = \pi \frac{2\alpha}{360^\circ} (R_2^2 - r_1^2)$$

(2)

式中: V_1 为左侧筒体体积; S_1 为余留截面面积。

切口余留截面如图4所示。

由于非切口截面上部筒体对余留截面各角度产生的压应力效果并不相同,故定义一个修订系数 k 来表达这种作用效果的不同,例如设 B 点处的压应力为: $\sigma_y = k \rho V_2 g / S_1$ 。对 B 点作用效果最明显, A 点作用最小,可以近似忽略不计。在爆破切口形成后 B 点处为余留截面内压应力峰值点,这也解释了在倒塌过程中,切口定向窗口处先发生压缩及压剪破坏的现象。

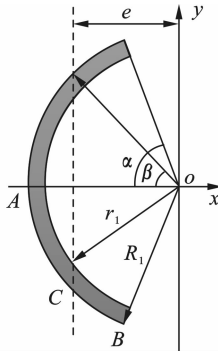


图 4 切口截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the cut section

假设右侧竖向截面上切向应力集中在截面的中心线上, 余留截面所对应圆心角平均分为 2α 份, 故角度为 β 。横截面上受到切向应力产生的弯矩为

$$M' = \frac{\rho V_2 g}{S'} (r_e \cos \theta + r \cos \beta)$$

$$S' = \frac{\pi(R_2^2 - r_1^2)(360^\circ - 2\alpha)}{360^\circ}$$

$$M = \frac{\rho V_2 g}{S'} \int_{r_1}^{R_1} \int_0^\gamma r(r_e \cos \theta + r \cos \beta) dr d\theta =$$

$$\frac{\rho g h_1 (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2 - r_1^2 - r_2^2 - r_1 r_2)}{3(R_1^2 - r_1^2)}$$

$$\sigma_l = \frac{180 \frac{\rho V_2 g}{S'} \left[\frac{4(R_1^2 - r_1^2)r_e^2(4\gamma + \sin 2\gamma)}{8} + \frac{2(R_1^3 - r_1^3)r_e}{3} \cos \beta \sin \gamma + \frac{R_1^4 - r_1^4}{4} \gamma \cos^2 \beta \right]}{\frac{R_1^4 - r_1^4}{8\alpha\pi} - \frac{S_1}{2\alpha\pi} (r_e \cos \alpha)^2} \quad (5)$$

任意角度 β 对应筒体外壁处的应力为: $\sigma = \sigma_l - \sigma_y$ 。当 $\sigma = 0$ 时, β 所对应角度即为中性轴所在位置。拉应力为

$$\sigma_A = \frac{180 \frac{\rho V_2 g}{S'} \left[\frac{4(R_1^2 - r_1^2)r_e^2(4\gamma + \sin 2\gamma)}{8} + \frac{2(R_1^3 - r_1^3)r_e}{3} \cos \beta \sin \gamma + \frac{R_1^4 - r_1^4}{4} \gamma \cos^2 \beta \right]}{\frac{R_1^4 - r_1^4}{8\alpha\pi} - \frac{S_1}{2\alpha\pi} (r_e \cos \alpha)^2} - \rho V_1 g / S_1 \quad (6)$$

非切口截面上部筒体对 B 点同样会产生拉应力作用, 即为 $\sigma_l (\beta = \alpha)$, 在爆破切口形成瞬间 B 点受到的瞬时压应力为

$$\sigma_B = \sigma_y + \sigma_y' - \sigma_l = (\rho V_2 g / k + \rho V_1 g) / S_1 -$$

$$\frac{180 \frac{\rho V_2 g}{S'} \left[\frac{4(R_1^2 - r_1^2)r_e^2(4\gamma + \sin 2\gamma)}{8} + \frac{2(R_1^3 - r_1^3)r_e}{3} \cos \alpha \sin \gamma + \frac{R_1^4 - r_1^4}{4} \gamma \cos^2 \alpha \right]}{\frac{R_1^4 - r_1^4}{8\alpha\pi} - \frac{S_1}{2\alpha\pi} (r_e \cos \alpha)^2} \quad (7)$$

采用 MATLAB 对应力求解公式进行可视化处理, 得到选取的圆心角范围内 B 点位置压应力的变化规律和数值区间, 结合应力及弯矩条件可知对于 B 点处, k 取 $1/8$ 比较合理。

$$\left[\frac{(R_1^2 - r_1^2)r_e}{2} \sin \gamma + \frac{(R_1^3 - r_1^3)\gamma}{3} \cos \beta \right] \quad (3)$$

$$My = \frac{\rho V_2 g}{S'} \int_{r_1}^{R_1} \int_0^\gamma r(r_e \cos \theta + r \cos \beta)^2 dr d\theta =$$

$$\frac{\rho V_2 g}{S'} \left[\frac{4(R_1^2 - r_1^2)r_e^2(4\gamma + \sin 2\gamma)}{8} + \frac{2(R_1^3 - r_1^3)r_e}{3} \cos \beta \sin \gamma + \frac{R_1^4 - r_1^4}{4} \gamma \cos^2 \beta \right]$$

式中: $r_e = (R_1 - r) / 2$, $\gamma = 180^\circ - \alpha$ 。

由偏心受压理论可知 $\sigma_l = \frac{My}{I}$, $I = I_c - Ae^2$

$$I_c = \int_{r_1}^{R_1} \int_{\frac{i}{\alpha}}^{\frac{i+1}{\alpha}} r^2 \cos^2 \theta r dr d\theta =$$

$$\frac{R_1^4 - r_1^4}{8} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\sin \frac{2i+2}{\alpha} - \sin \frac{2i}{\alpha}}{4} \right)$$

由于 $2/\alpha$ 相对较小, 故 $\sin \frac{2i+2}{\alpha} - \sin \frac{2i}{\alpha} \approx 0$ 。又

有 $A = \frac{S_1}{2\alpha}$, $e = r_e \cos \alpha$, 故

$$I = \frac{R_1^4 - r_1^4}{8\alpha\pi} - \frac{S_1}{2\alpha\pi} (r_e \cos \alpha)^2 \quad (4)$$

1.3 支撑区瞬时动态压力复核

切口爆破瞬间, 还存在突加载荷的问题, 切口上方的烟囱会以突加载荷的方式叠加在余留支撑面上, 余留支撑区有可能被压溃导致下坐的发生, 因此

支撑区在切口形成瞬间所承受的动态压力需要被考虑^[15]。考虑到动载效应^[7],余留截面最大压应力受到突加载荷的影响还应该满足

$$K_d = 1 + \frac{\alpha}{\pi} \quad (8)$$

$$\sigma_{cd} = K_d \frac{mg}{S_1} \leq f_{cd} \quad (9)$$

式中: σ_{cd} 为余留截面的动应力; f_{cd} 为混凝土动态极限抗压强度; K_d 为动载荷冲击因数; m 为切口上部筒体重力。

2 定向倾倒条件

2.1 应力条件

应力条件指在爆炸载荷作用下形成切口之后,保证在重力载荷下,弯矩作用产生的对支撑体余留截面的拉应力能够克服混凝土和钢筋的极限抗拉强度而产生破坏,保证后续顺利定向倾倒^[1,3]。而受压区的最大压应力则要小于此处钢筋和混凝土所提供的极限抗压强度,保证在断裂缝隙形成过程中,支撑体受压区能不被完全压剪切破坏而影响筒体的后续转动。

考虑钢筋混凝土烟囱的截面材料属性,假设横截面内单位面积混凝土配筋率为 μ_0 。倾倒应力条件可以表示为

$$\begin{cases} \sigma_A > f_{ct} + \mu_0 f_{st} \\ \sigma_B < f_{cc} + \mu_0 f_{sc} \end{cases} \quad (10)$$

式中: f_{ct} 为混凝土极限抗拉强度; f_{st} 为钢筋极限抗拉强度; f_{cc} 为混凝土极限抗压强度; f_{sc} 为钢筋极限抗压强度。

2.2 弯矩条件

当爆破切口形成后,保证烟囱能够顺利倒塌的关键位置在余留支撑体筒壁的最外侧,不但要满足该位置的应力条件,还要满足相应的弯矩条件以保证能够继续倒塌^[3,16]。在之前相关研究中,弯矩条件的建立大都是以支撑底座以上的筒体的整体重力对余留截面上中性轴的弯矩要能够克服余留截面上的受拉区和受压区的钢筋和混凝土所产生的抵抗力矩之和为依据。但是上部筒体对余留截面上各位置处产生的应力及弯矩作用效果是不同的,因此采取集中于烟囱筒体重心位置的重力对中心轴产生的弯矩来考虑对余留截面整体的影响是不够全面的。假设弯矩条件建立在余留截面的关键局部位置也是合理的,在切口形成后,只要A点处的拉应力能够克服钢筋与混凝土的极限强度,右侧筒体在该处产生的弯矩克服该位置处所产生的抵抗力矩之和便可使

得烟囱筒壁外侧可以顺利产生裂缝和断裂,使得支撑体裂缝得以继续扩展和贯穿。

A点位置局部面积截面上钢筋与混凝土产生的抵抗力矩之和为

$$M_t = \bar{S}[\mu_0 f_{st} + (1 - \mu_0) f_{ct}] \quad (11)$$

左侧筒壁竖向截面上的切向应力在A点位置产生的弯矩为

$$M = \frac{\rho g h_1 (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2 - r_1^2 - r_2^2 - r_1 r_2)}{3(R_1^2 - r_1^2)} \cdot \left[\frac{(R_1^2 - r_1^2) r_e}{2} \sin \gamma + \frac{(R_1^3 - r_1^3) \gamma}{3} \right] \quad (12)$$

故相应弯矩条件可表示为

$$M > M_t \quad (13)$$

结合应力及弯矩的求解公式(6~7),代入建立的应力条件(10)及弯矩条件(13),即可得到爆破切口角度的选取范围。

3 案例验证

国电宿州第二热电有限公司响应国家“上大压小、节能减排”政策号召拆除180 m钢筋混凝土结构烟囱(如图5),筒身采用标号C30的混凝土浇筑而成。底部、顶部外径分别为16.6 m和5.8 m,底部、顶部壁厚分别为460 mm和180 mm。在±0标高处烟囱的底部南、北方向各有1个1.5 m×2.5 m的门洞,其外径16.6 m、壁厚460 mm,无隔热层和内衬;烟囱+8.10~+13.7 m标高处东、西方向各有1个3.98 m×5.6 m的烟道口,其外径15.2 m、壁厚460 mm,隔热层厚度为100 mm,内衬厚度为240 mm;0~8.0 m标高处烟囱内部中间有4个横断面为500 mm×500 mm井字梁支撑上部出灰平台,下部为钢制灰斗,井字梁放在筒壁的牛腿上;出灰平台直径为14.106 m,厚1 m。筒壁体积1654 m³,隔热层体积495 m³,内衬体积677 m³。烟囱钢筋重128.5 t,烟囱总重约6959 t,重心高度为75 m。实际拆除中烟囱采用切口角度为216°的正梯形切口,对应文中 $\alpha = 72^\circ$,详细切口参数如表1所示。

表1 烟囱爆破切口参数表

Table 1 Chimney blasting incision parameters

爆破切口参数	切口底弧长	余留弧长	切口圆心角	切口高度
+0.5 m 标高	31.27 m	20.85 m	216°	4.50 m

切口角度为216°时,由式(8)可知动载荷冲击因数为 $K_d = 1.4$,由式(9)可得余留界面上的瞬时动

应力为 $\sigma_{cd} = 10.5 \text{ MPa} < f_{cd}$, 因此爆破切口形成瞬间烟囱不会发生下坐, 切口角度设计是合理的。

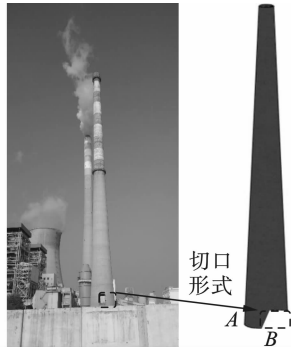
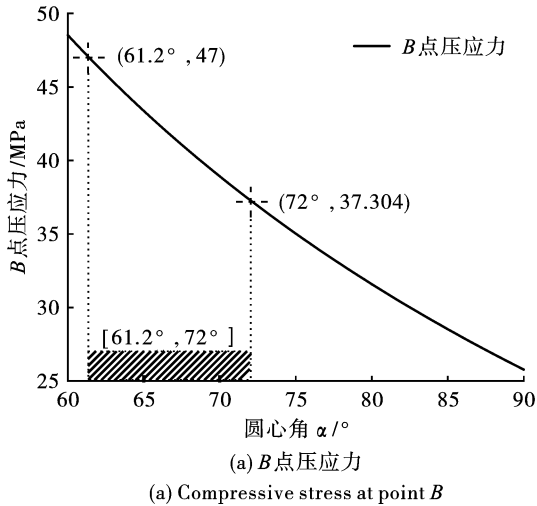


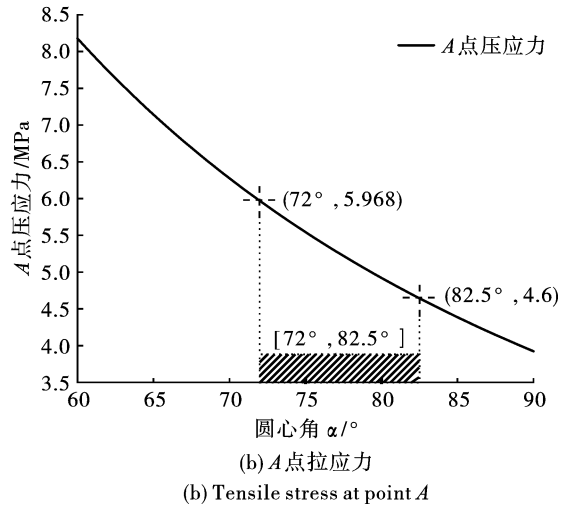
图 5 钢筋混凝土烟囱实物图及切口简化模型图

Fig. 5 The picture and the model diagram with simplified incision of the reinforced concrete chimney

应用式(6)和式(7)式进行分析计算, 断裂点 A



(a) Compressive stress at point B



(b) Tensile stress at point A

图 6 应力变化规律图

Fig. 6 Variation of the stress

由所建立的倾倒弯矩条件, 建立余留截面抵抗力矩和右侧筒体对 A 点处单位面积截面产生的弯矩与圆心角度关系, 由图 7 可知, 随着切口角度的增大, 余留截面和右侧筒体对 A 点处所产生的弯矩分别呈现逐渐减小和增加的趋势, 当切口角度为 198° 时, 刚好处于弯矩持平的极限状态, 进一步增大切口角度时, 即满足倾倒所需要的弯矩条件, 结合应力条件可以得出在建立的物理-力学模型下, 达到倾倒要求的切口角度范围为 $[198^\circ, 237.6^\circ]$ 。可以发现, 在倾倒条件中, 应力条件与弯矩条件缺一不可, 但切口角度的选取范围主要由应力条件决定, 因此可以认为应力条件是占据主导地位的。进一步验证了案例中拆除选取的 216° 切口角度的合理性, 也证明了所建立的钢筋混凝土烟囱拆除的理论模型的可靠性。

处拉应力及 B 点处压应力与切口角之间的数值关系如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着角度 α 的减小即切口角度的增加, A 点拉应力和 B 点压应力均呈现增大的趋势。对于所选取工程案例中采取的切口角度和高度 A 点和 B 点处拉应力和压应力分别为 $\sigma_A = 5.968 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_B = 37.3 \text{ MPa}$ 。根据烟囱混凝土与钢筋设计规范^[17], 采用倾倒应力条件计算可得 A 点材料等效极限抗拉强度及 B 点压力区域的材料等效极限抗压强度分别为: $f_{bt} = f_{ct} + \mu_0 f_{st} = 4.6 \text{ MPa}$, $f_{bc} = f_{cc} + \mu_0 f_{sc} = 47 \text{ MPa}$ 满足倾倒应力条件。由应力曲线可得满足极限抗拉强度和极限抗压强度时余留截面圆心角度范围分别为: $\alpha \leq 82.5^\circ$ 及 $\alpha \geq 61.2^\circ$, 故满足条件的切口角度范围为 $[195^\circ, 237.6^\circ]$ 。

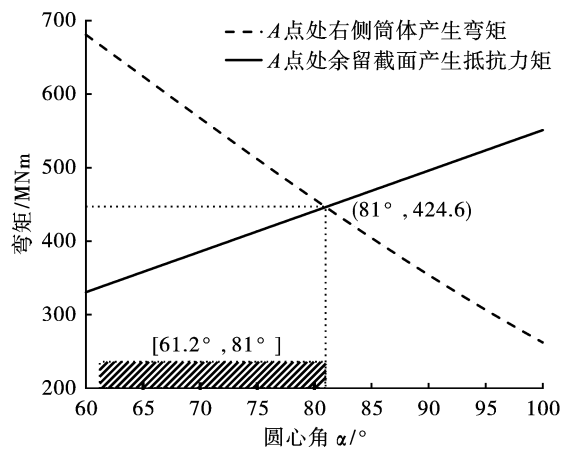


图 7 弯矩与圆心角度关系图

Fig. 7 The relationship between the bending moment and the center angle

切口高度的选取也已有较多的研究,大都以切口闭合后筒体重心水平线上位置超过闭合点为依据^[18-20],这种依据也被证实其合理性。但本文着重研究切口高度对切口角度范围选取的影响,当拆除中选取的切口高度发生改变时,切口角度的选取范围也发生相应的变化。以应力条件为依据,从图8中发现:随着切口角度的增加,不同切口高度下A点处拉应力和B点处压应力有着几乎相同的变化趋势,在一定范围内,随着切口高度得增加,切口角

度的选取上限将扩大,相反地其选取下限将缩小,但幅度均相对较小。当切口角度一定时,随着切口高度得增加,A点处拉应力将呈现出减小的趋势,B点处压应力也呈现出相同的变化趋势,变化幅度远远小于相同切口高度下,切口角度变化对应力变化的影响,因此可以认为,切口角度是切口参数中的更为关键的参数,但切口高度的选取也会影响切口角度的选取范围,二者是相互联系,相互影响的。

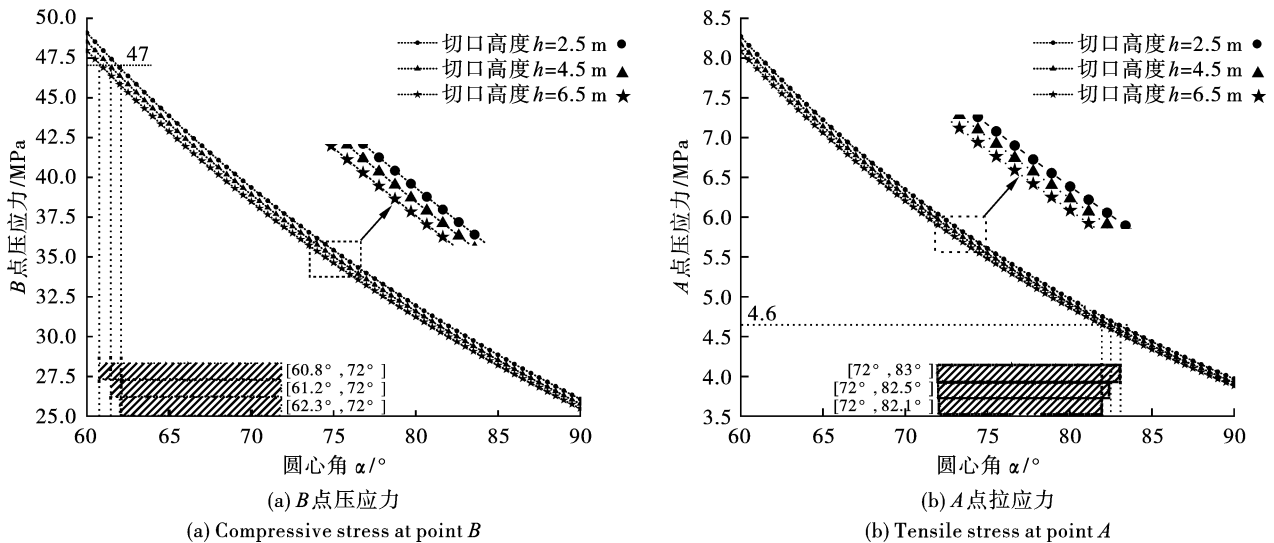


图8 不同切口高度下应力曲线图

Fig. 8 Stress curve at different incision heights

4 结论

提出了一种不同的应力及弯矩求解方法和倾倒弯矩条件判据,进而得到切口角度范围的选取原则,并简要分析了切口高度对切口角度的选取范围的影响。对于钢筋混凝土烟囱,采取梯形或者矩形切口形状时,可采取隔离法加以分析,当切口高度确定时,切口角度的选取范围便随之确定。主要结论如下:

(1)以文中选择的工程案例为例,切口角度选取范围为 $[198^\circ, 237.6^\circ]$ 。切口角度为 216° 时,最大拉应力和最大压应力分别为 5.968 MPa 和 37.3 MPa ,均满足应力条件。随着切口角度的增加,拉应力和压应力呈现出相同的变化趋势且与角度之间呈正相关的关系。余留截面所能提供的抵抗力矩随着切口角度的增大而减小,而右侧筒体产生的弯矩大小则具有相反的变化趋势,且其增大的速率明显大于抵抗力矩减小的速率。

(2)当抵抗力矩与产生的弯矩相等时,便达到了弯矩条件的极限平衡状态,此时的切口角度为

198° ,为切口角度选取范围的下限。在倾倒条件中,应力条件与弯矩条件均应被考虑,但切口角度的范围主要由应力条件决定,弯矩条件加以限定和补充。

(3)在一定范围内,随着切口高度的增加,切口角度的选取上限将扩大,相反地其选取下限将缩小,但幅度均相对较小。切口角度变化对A点及B点处应力影响程度远远大于切口高度变化所产生的影响,因此可以认为切口角度是切口参数中更为关键的参数。

实际爆破拆除中会有对筒状构筑物底部开设出烟口、考虑混凝土和钢筋老化导致材料参数改变等诸多因素的影响,需要适当对切口角度的选取范围加以缩小,以避免危险情况的发生。

参考文献 (References)

- [1] 邢光武,耿鹏. 复杂环境厚壁砖烟囱高切口爆破拆除[J]. 采矿技术, 2020, 20(5): 167-169.
- [1] XING Guang-wu, GENG Peng. Complex environment thick wall brick chimney high incision blasting demolition[J]. Mining Technology, 2020, 20(5): 167-169. (in Chinese)

- [2] 杨辉,袁翊硕,柴亚博,等. 复杂环境下180m高烟囱定向拆除爆破[J]. 工程爆破,2022,28(2):84-92.
- [2] YANG Hui, YUAN Yi-shuo, CHAI Ya-bo, et al. Directional demolition blasting of a 180m high chimney in a complex environment [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2):84-92. (in Chinese)
- [3] 王友新,杨云天,郑桂初,等. 新会双水发电厂100m高钢筋混凝土烟囱爆破拆除[J]. 煤矿爆破,2019,37(4):28-30.
- [3] WANG You-xin, YANG Tian-yun, ZHENG Gui-chu, et al. Xinhui Shuangshui Power Plant 100m high reinforced concrete chimney demolition blasting [J]. Coal Mine Blasting, 2019, 37(4):28-30. (in Chinese)
- [4] 胡彬,杨赛群,李洪伟,等. 超高钢混烟囱爆破切口角度计算及数值模拟[J]. 工程爆破,2022,28(1):99-106.
- [4] HU Bin, YANG Sai-qun, LI Hong-wei, et al. Calculation and numerical simulation of blasting cutting angle of an ultra-high reinforced concrete chimney [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(1):99-106. (in Chinese)
- [5] 贺五一,谭雪刚. 复杂结构高耸建筑物爆破拆除切口研究[J]. 爆破,2007(1):14-16.
- [5] HE Wu-yi, TAN Xue-gang. Study on blasting cut in demolition of tower tubular metal structure [J]. Blasting, 2007, 24(1):14-16. (in Chinese)
- [6] 金骥良. 高层建(构)筑物整体定向爆破倒塌的切口参数[J]. 工程爆破,2003(4):1-6.
- [6] JIN Ji-liang. The parameters of blasting cut for directional collapsing of high rise buildings and towering structures [J]. Engineering Blasting, 2003, 9(4):1-6. (in Chinese)
- [7] 龚相超,钟冬望,韩芳,等. 爆破拆除钢筋混凝土烟囱切口关键参数的研究[J]. 爆破,2013,30(4):32-35.
- [7] GONG Xiang-chao, ZHONG Dong-wang, HAN Fang, et al. Research of key parameters of blast cut in explosive demolition of reinforced concrete chimney [J]. Blasting, 2013, 30(4):32-35. (in Chinese)
- [8] 张宝岗,赵明生,余红兵,等. 切口角度对冷却塔爆破拆除影响研究[J]. 爆破,2018,35(1):109-115.
- [8] ZHANG Bao-gang, ZHAO Ming-sheng, YU Hong-bing, et al. Study on influence of cut angle on explosive demolition of cooling tower [J]. Blasting, 2018, 35(1):109-115. (in Chinese)
- [9] 李玉岐,焦永斌,谢康和. 钢筋砼烟囱爆破切口形状对切角大小和切口高度的影响[J]. 工程爆破,2004(3):27-30.
- [9] LI Yu-qi, XIE Kang-he. Study on cut parameters of chimney demolition by controlled blasting [J]. China Mining, 2004, 13(11):76-79. (in Chinese)
- [10] 傅菊根,姜建农,张宇本. 高耸建筑物爆破拆除切口高度理论计算[J]. 工程爆破,2006(2):56-58.
- [10] FU Ju-gen, JIANG Jian-nong, ZHANG Yu-ben. Theoretical calculation of notched height about tower building demolished by blasting [J]. Engineering Blasting, 2006, 12(2):56-58. (in Chinese)
- [11] 言志信,叶振辉,刘培林,等. 钢筋混凝土高烟囱定向爆破拆除倒塌过程研究[J]. 振动与冲击,2011,30(9):197-201.
- [11] YAN Zhi-xin, YE Zhen-hui, LIU Pei-lin, et al. Collapsing process of high reinforced concrete chimney in blasting demolition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9):197-201. (in Chinese)
- [12] 郑炳旭,魏晓林,陈庆寿. 钢筋混凝土高烟囱切口支撑部失稳力学分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007(S1):3348-3354.
- [12] ZHENG Bing-xu, WEI Xiao-lin, CHEN Qing-shou. Mechanical analysis of cutting-support destabilization of high reinforced concrete chimney [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(S1):3348-3354. (in Chinese)
- [13] 费鸿禄,钱起飞,刘雨,等. 切口形状对高烟囱拆除爆破倾后坐的影响[J]. 工程爆破,2021,27(1):53-61.
- [13] FEI Hong-lu, QIAN Qi-fei, LIU Yu, et al. Effect of cut shapes on dumping backward collapse of high chimney in demolition blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1):53-61. (in Chinese)
- [14] 高振儒,张俊男,王松江. 烟囱定向爆破切口设计与实践[J]. 爆破,2012,29(4):80-82.
- [14] GAO Zhen-ru, ZHANG Jun-nan, WANG Song-jiang. Blast cut design and practice of chimney directional blasting [J]. Blasting, 2012, 29(4):80-82. (in Chinese)
- [15] 孙金山,谢先启,贾永胜,等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除的下坐及早期断裂预测[J]. 爆炸与冲击,2022,42(8):160-174.
- [15] SUN Jin-san, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Prediction of sinking down and early break in the air of reinforced concrete chimney during blasting demolition [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(8):160-174. (in Chinese)
- [16] 张建平,费鸿禄,张北龙,等. 高耸烟囱定向爆破动态平衡的原理与应用[J]. 工程爆破,2016,22(6):23-27.
- [16] ZHANG Jian-ping, FEI Hong-lu, ZHANG Bei-long, et al. Principle and application of dynamic equilibrium in directional blasting of high chimney [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(6):23-27. (in Chinese)

(1)水下CO₂气爆水击波超压因距离增加而下降趋势明显,随着水下裸爆的气瓶数增加,水击波超压明显增加。

(2)使用相同气瓶条件下,水下裸露CO₂气爆是水下钻孔CO₂气爆水击波超压的1.87~41.9倍。

(3)在距离相近、同等开挖规模条件下,水下钻孔CO₂气爆产生的振动速度值只有水下钻孔爆破产生的爆破振动速度值的1/10~1/3。

参考文献 (References)

- [1] 赵 根,黎卫超.水下爆破技术发展[J].爆破,2020,37(1):1-12.
- [1] ZHAO Gen,LI Wei-chao. Development of underwater blasting technology[J]. Blasting,2020,37(1):1-12. (in Chinese)
- [2] 赵 根,吴新霞,周先平,等.深水条件下岩塞钻孔爆破关键技术及应用[J].工程爆破,2016,22(5):13-17.
- [2] ZHAO Gen,WU Xin-xia,ZHOU Xian-ping, et al. Key technology and application of rock plug drilling blasting under deep water condition [J]. Engineering Blasting, 2016,22(5):13-17. (in Chinese)
- [3] 赵 根,季 荣,郑晓宁,等.乳化炸药水中爆炸冲击波传播规律试验研究[J].爆破,2011,28(2):1-4.
- [3] ZHAO Gen,JI Rong,ZHENG Xiao-ning, et al. Experimental investigation on propagation rule of shock wave by emulsion explosives under water blasting [J]. Blasting, 2011,28(2):1-4. (in Chinese)
- [4] 赵 根,吴新霞,张正宇.珠包山深孔控制爆破起爆网路设计与施工[J].爆破器材,2001(2):18-21.
- [4] ZHAO Gen,WU Xin-xia,ZHANG Zheng-yu. Design and construction of non-electric relay network in deep-hole controlled blasting at Zhubaoshan [J]. Explosive Materials,2001(2):18-21. (in Chinese)
- [5] 赵 根.深水条件下围堰拆除爆破技术研究(博士学位文)[D].合肥:中国科学与技术大学,2008.
- [5] ZHAO Gen. Study on technology of the cofferdam demolition blasting in deep water conditions (PH. D Dissertation) [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2008. (in Chinese)
- [6] 赵 根,吴新霞,周先平,等.电子雷管起爆系统及其在岩塞爆破中的应用[J].爆破,2015,32(3):91-94,149.
- [6] ZHAO Gen,WU Xin-xia,ZHOU Xian-ping, et al. Electronic detonator initiating system and application in rock plug blasting [J]. Blasting,2015,32(3):91-94,149. (in Chinese)
- [7] 吴新霞,胡英国,刘美山,等.水利水电工程爆破技术研究进展[J].长江科学院院报,2021,38(10):112-120,147.
- [7] WU Xin-xia,HU Ying-guo,LIU Mei-shan, et al. Research progress of blasting technology in hydropower engineering [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research institute,2021,38(10):112-120,147. (in Chinese)
- [8] 杜少卿,赵 根,黎卫超,等.襄阳市鱼梁洲东线沉管对接端止水墙爆破拆除[J].爆破,2021,38(3):88-94,103.
- [8] DU Shao-qing,ZHAO Gen,LI Wei-chao, et al. Blasting demolition of water stop wall at butt end of immersed tube in Yuliangzhou East Line of Xiangyang City [J]. Blasting, 2021,38(3):88-94,103. (in Chinese)
- [9] 吴新霞,程西江,赵 根,等.爆破有害效应监测公共信息分级管理系统[J].爆破,2013,30(2):12-15,46.
- [9] WU Xin-xia,CHENG Xi-jiang,ZHAO Gen, et al. Public information classification management system of blasting harmful effects monitoring [J]. Blasting,2013,30(2):12-15,46. (in Chinese)
- [10] 张 馨,孙金山,张湘平,等.钻孔爆破炮孔孔壁压力计算模型[J].爆破,2021,38(3):1-5.
- [10] ZHANG Xin,SUN Jin-shan,ZHANG Xiang-ping, et al. Calculation model of blasthole pressure [J]. Blasting, 2021,38(3):1-5. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚

(上接第131页)

- [17] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [17] GB50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [18] 林 哲,张世平.砖烟囱爆破拆除不同切口形状的数量模拟[J].工程爆破,2017,23(4):91-94.
- [18] LIN Ze,ZHANG Shi-ping. Numerical simulation study on the removal of chimney with different blasting notch shape [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(4):91-94. (in Chinese)
- [19] 王 刚.复杂环境下砖混结构烟囱爆破拆除数值模拟及方案设计[J].煤矿爆破,2022,40(2):14-18.
- [19] WANG Gang. Numerical simulation and scheme design of blasting demolition of brick-concrete chimney in complex environment [J]. Coal Mine Blasting,2022,40(2):14-18. (in Chinese)
- [20] 孙 飞,郭文华,顾 云,等.矮胖式筒仓集群爆破切口参数设计及预处理技术[J].爆破器材,2021,50(1):59-64.
- [20] SUN Fei,GUO Wen-hua,GU Yun, et al. Parameters design of blasting cut and pretreatment technology of chunky silo cluster [J]. Explosive Materials, 2021, 50(1):59-64. (in Chinese)

英文编辑:陈东方