

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.016

烟囱定向爆破拆除前冲及塌落触地振动研究

费鸿禄,王帅,钱起飞

(辽宁工程技术大学 爆破技术研究院,阜新 123000)

摘要: 烟囱定向爆破拆除的前冲决定着烟囱倒塌范围和塌落振动阈值,为了探讨烟囱定向倾倒的前冲机理,基于钢筋混凝土烟囱定向爆破倾倒力学分析,考虑烟囱的3种触地姿态,分析烟囱前冲作用规律,得出烟囱定向爆破倾倒前冲距离及倒塌范围的计算公式;同时在此理论研究基础上,结合工程实例分析烟囱塌落触地振动响应特征,对比验证理论推导的准确性和合理性。研究表明:建立的烟囱前冲过程分析理论模型可较好的对烟囱的前冲过程进行描述,且该理论模型计算结果偏于保守,可为类似爆破工程安全防护设计提供参考;并且在实际拆除工程中,由于难以精确获取支撑部位的摩擦系数,将判据一作为烟囱发生前冲时的力学依据更为合理,在前冲分析的基础上对烟囱的塌落触地振动进行研究更为可靠。

关键词: 钢筋混凝土烟囱;定向爆破拆除;前冲;触地姿态;塌落触地振动

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0095-09

Research on Forward Thrust and Ground Impact Vibration of Chimney Demolition by Directional Blasting

FEI Hong-lu, WANG Shuai, QIAN Qi-fei

(Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The forward thrust of the chimney demolition by directional blasting determines the collapse range and the threshold of collapse impact vibration of the chimney. In order to find the forward thrust mechanism of the directional toppling of chimney, mechanical analysis was conducted by considering three touchdown postures of a reinforced concrete chimney, which leads to the calculation formulas for the forward thrust distance and collapse range of the directional blasting of the chimney. At the same time, the characteristics of the ground impact vibration induced by the chimney collapse was analyzed to verify the accuracy and reasonableness of the previous theoretical derivation based on engineering examples. The research results show that the established theoretical model can describe the chimney forward thrust process very well. And the calculation result can provide a reference for the safety protection design of similar blasting projects due to its conservatism. In addition, it is more reasonable to use criterion 1 as the mechanical basis when the chimney has a forward thrust because it is difficult to accurately obtain the friction coefficient of the supporting parts in actual demolition projects. And it is also more reliable to study the impact vibration of the chimney on the basis of the forward thrust analysis.

Key words: RC chimney; directional blasting demolition; forward; touchdown posture; ground impact vibration

收稿日期:2021-04-26

作者简介:费鸿禄(1963-),男,教授、博士生导师,主要从事爆破工程和地下工程方面的科研与教学工作,(E-mail) feihonglu@163.com。

通讯作者:王帅(1998-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程和爆破工程方面的研究,(E-mail) wangsh4415@163.com。

近年来,由于城市改建、扩建工程进入大规模的发展阶段,因此拆除建(构)筑物的需求也越来越大^[1]。与传统拆除方法相比,拆除爆破是清除废旧建(构)筑物的一种实用、经济、高效、安全的方法。但这项高危作业,尤其是在城市地区,可能会引起邻

近居民不必要的恐慌,且若待拆除的建(构)筑物自身结构、周边环境极其复杂,则任何微小的错误都可能导致悲剧的发生^[2,3]。因此,在当前情况下对建(构)筑物爆破拆除整个过程及危害效应的研究益加重要。

控制爆破是钢筋混凝土烟囱拆除的主要方式之一,为确保爆破拆除过程更加精细、安全,广大学者对钢筋混凝土烟囱爆破拆除的相关领域进行了大量的研究。由现场观测或数值模拟结果可知^[4-7]:钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除倒塌过程主要分为爆破切口形成、中性轴形成及后移、定向倾倒和塌落触地4个阶段。在爆破切口形成后,余留支撑部位通常都会经历中性轴未形成期和中性轴稳定期两个阶段,中性轴的后移由烟囱自重和拉区弯矩形成的载荷与压区抗力的纵向平衡决定^[7-9]。烟囱在定向倒塌过程中可能会伴随有前冲、下坐、后坐或空中折断的发生。爆破切口形成瞬间由上部筒体产生的突加荷载^[7]、中性轴的后移^[8,9]、烟囱自身结构特征及爆破切口参数是造成烟囱下坐的主要原因;烟囱的后坐、前冲、空中折断则与烟囱的爆破切口形状、倾向倒塌运动状态及筒体材料的力学性能密切相关^[10-12]。大量工程实测数据表明,在塌落触地阶段建(构)筑物连续塌落诱发的塌落振动对周围建(构)筑物的危害最严重^[13],因此周家汉、Lin F等分别建立筒形类高大建(构)筑物爆破拆除塌落振动速度计算模型^[14,15],对建(构)筑物爆破拆除塌落诱发的振动进行预报。

工程实践表明:烟囱定向爆破拆除过程中的前冲决定着烟囱倒塌范围和塌落振动的大小,且与烟囱的触地姿态密切相关。烟囱爆破拆除尽管已经达到了可控性,但烟囱爆破拆除过程中前冲仍是一个威胁着拆除安全、成功的问题。本文基于烟囱定向爆破倾倒过程力学分析,结合实际爆破拆除工程,对烟囱的前冲机理进行深入探究;然后从烟囱的触地姿态入手,对前冲过程进行深入分析;最后在此研究的基础上对烟囱的塌落触地振动进行研究。

1 烟囱定向倾倒过程力学分析

钢筋混凝土烟囱从爆破切口形成瞬间到切口上部筒体触地解体之前,烟囱在自身倾覆力矩作用下定向倒塌。通过观测以往烟囱爆破拆除效果^[4],可以发现从爆破切口形成后至切口闭合前,烟囱绕余留支撑部中性轴发生缓慢定轴转动;切口闭合之后,烟囱以切口下沿对应的预留体为转轴定轴转动。为简化分析,假设在定向倾倒过程中烟囱完好未发生

解体破坏,切口截面平整,忽略空气阻力、爆炸荷载对烟囱倾倒过程的影响。

如图1所示,根据达朗贝尔原理列出下列平衡方程

$$\begin{cases} N + ml\omega^2 - mg \cos \theta = 0 \\ R + ml\varepsilon - mg \sin \theta = 0 \\ mgl \sin \theta - ml^2 \varepsilon = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为切口部位薄弱截面以上部分烟囱质量; g 为重力加速度; N 、 R 分别为支座反力的径向力、切向力; ε 为切口闭合之后阶段烟囱定向倾倒的角加速度,设烟囱倾倒方向为正,根据拉格朗日方程可求得

$$\varepsilon = \frac{mgl \sin \theta}{J_B} \quad (2)$$

ω 为切口闭合之后阶段烟囱定向倾倒的角速度,根据机械能守恒定律可求得

$$\omega = \sqrt{\frac{2mgl(\cos \theta_0 - \cos \theta)}{J_B} + \omega_b^2} \quad (3)$$

式中: l 为切口闭合之后阶段切口部位薄弱截面以上部分烟囱质心到转轴的距离; J_b 为切口闭合之后阶段烟囱的转动惯量; θ_0 为切口闭合之后阶段烟囱的初始倾角, $\theta_0 = \alpha_0 - \theta_1$; α_0 为切口闭合角; θ_1 为切口闭合之后阶段烟囱质心与转轴连线与烟囱中线的夹角; θ 为切口闭合之后阶段烟囱的瞬时倾角; ε_b 为切口闭合瞬间烟囱定向倾倒的角加速度

$$\varepsilon_b = \frac{mgl_b \sin(\varphi_0 + \alpha_0) - M_{\alpha_0}}{J_A}$$

ω_b 为切口闭合瞬间烟囱定向倾倒的角速度

$$\omega_b = \sqrt{\frac{2\{mgl_b[\cos \varphi_0 - \cos(\varphi_0 + \alpha_0)] - k\}}{J_A}}$$

式中, $k = \int_0^{\alpha_0} M_\varphi d\varphi$

式中: l_b 为切口闭合瞬间切口部位薄弱截面以上部分烟囱质心到中性轴的距离; φ_0 为切口部位薄弱截面以上部分烟囱质心与中性轴的连线与竖直方向的夹角; J_A 为切口闭合瞬间烟囱的转动惯量; M_{α_0} 为切口闭合瞬间支撑部位的残余塑性铰弯矩; M_φ 为转角为 φ 时对应的塑性铰弯矩,可根据下式进行计算^[16]

$$M_\varphi = M_b \cos(\varphi/2)$$

式中: M_b 为支撑部位的塑性铰极限抵抗弯矩^[17]

$$M_b = M_{ct} \left(1 + \rho \frac{f_{st}}{f_{ct}}\right) + M_{cc} \left(1 + \rho \frac{f_{sc}}{f_{cc}}\right)$$

式中: f_{ct} 、 f_{cc} 分别为混凝土的抗拉和抗压强度;

f_{st} 、 f_{sc} 分别为钢筋的抗拉和抗压强度; ρ 为烟囱切口部位的纵筋配筋率; M_{ct} 、 M_{cc} 分别为受拉区、受压区混凝土的极限抵抗弯矩, 可由下式进行计算

$$\begin{cases} M_{ct} = \frac{1}{3}f_{ct}[2(R_1^3 - r_1^3) \sin \beta_2 - 3e(R_1^2 - r_1^2)\beta_2] \\ M_{cc} = \frac{1}{3}f_{cc}[3e(R_1^2 - r_1^2)(\beta_1 - \beta_2) - 2(R_1^3 - r_1^3)(\sin \beta_1 - \sin \beta_2)] \end{cases}$$

式中: β_1 为支撑部薄弱截面圆心角之半; r_1 、 R_1 分别为切口部位薄弱截面的内、外半径; e 为中性轴位置到烟囱切口断面形心的距离, $e = \left(\frac{R_1 + r_1}{2}\right) \cos \beta_2$; β_2 为受拉区与受压区边界(中性轴)圆心角之半, 可根据下式进行计算

$$\beta_2 = \frac{(f_{cc} + \rho f_{sc})(R_1^2 - r_1^2)\beta_1 - mg}{(f_{ct} + \rho f_{st} + f_{cc} + \rho f_{sc})(R_1^2 - r_1^2)}$$

将上述结果代入(1)式整理可得

$$\begin{cases} N = mg \cos \theta - \frac{ml}{J_B}[2mgl(\cos \theta_0 - \cos \theta) + J_B \omega_b^2] \\ R = mg \sin \theta - \frac{ml}{J_B}mgl \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

因此, 烟囱定向倾倒过程中的水平和竖向支座反力 F_x 、 F_y 分别为

$$\begin{cases} F_x = \frac{ml}{J_B}[mgl(3 \cos \theta - 2 \cos \theta_0) - J_B \omega_b^2] \sin \theta \\ F_y = mg - \frac{ml}{J_B}\{mgl - [mgl(3 \cos \theta - 2 \cos \theta_0) + J_B \omega_b^2] \sin \theta\} \end{cases} \quad (5)$$

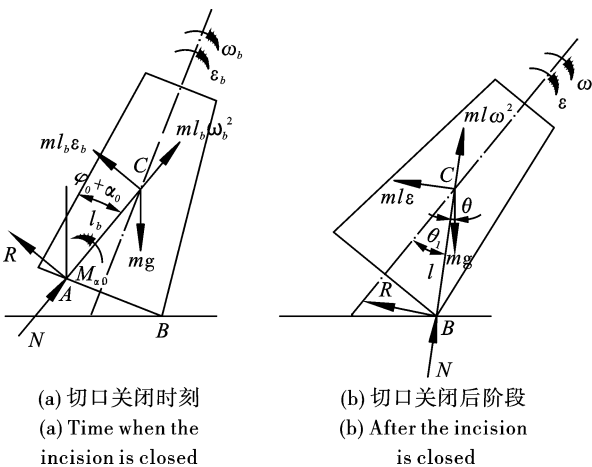


图 1 烟囱定向倾倒受力分析简图

Fig. 1 Force analysis diagram of chimney directional dumping

2 烟囱定向倾倒前冲分析

烟囱在定向倾倒过程中, 当倾倒至某一角度时往往会伴随着前冲的发生^[11]。对该问题的研究, 可在烟囱定向倾倒受力分析的基础上对烟囱的前冲机理进行分析, 根据分析结果对前冲过程进行研究。为简化分析, 假设烟囱在前冲瞬间与支撑部位相连的钢筋已经被拉断。

2.1 前冲机理分析

烟囱在定向倾倒过程中, 由于烟囱在自重作用下倾覆造成烟囱发生前冲现象, 尤其是在高位切口烟囱爆破拆除过程中。对于前冲问题可从两个角度进行分析: 一是烟囱定向倾倒过程中支座反力的径向力(又称前冲力)大于零, 即认为当前冲力大于零时, 烟囱将脱离支撑部位发生前冲; 二是烟囱倾倒过程中的水平支座反力大于该瞬间支撑部位提供的摩擦力, 即认为烟囱在定向倾倒过程中, 随着倾角的增加, 支撑部位提供的摩擦力小于该瞬间烟囱的水平支座反力时, 烟囱将发生前冲。本节分别从这两个角度进行分析, 并与实际工程进行对比, 找出烟囱前冲的原因。

判据一: 当 $N = 0$ 时, 则

$$[\theta] = \arccos\left(\frac{2m^2gl^2 \cos \theta_0 / J_B + ml\omega_b^2}{mg + 2m^2gl^2 / J_B}\right)$$

判据二: 为方便分析, 令 F 为等效力, 则当 $F = F_x - |\mu_1 F_y| = 0$ 时, 烟囱即将发生前冲。将该式代入 MATLAB 软件中进行求解可得 $[\theta]$ 值。

式中: $[\theta]$ 为烟囱即将发生前冲时的转角(下文简称前冲倾角); μ_1 为支撑部位的摩擦系数^[18], 本文在理论计算时取 $\mu_1 = 0.7$ 。

由上述分析可知, 当烟囱定向倾倒至转角 $[\theta]$ 时, N 、 F 的方向将发生改变, 在不发生较大范围后坐的情况下, 烟囱将脱离支撑部位做近似平面运动, 即前冲。

2.2 前冲过程分析

爆破切口形成后, 烟囱在自身重力作用下定轴转动, 当转动至前冲倾角 $[\theta]$ 值时, 由于受力状态发生了改变, 烟囱原有的动态平衡被打破, 烟囱将开始发生前冲。根据文献^[19]可知: 烟囱的前冲可分为两部分, 一是烟囱从开始前冲至触地瞬间的运动, 二是烟囱触地后克服摩擦力在地面上的运动。为便于表述, 设烟囱从开始前冲至触地瞬间的运动为一次前冲, 烟囱触地后克服摩擦力在地面的运动为二次前冲。

由 2.1 节分析可知: 烟囱在发生前冲瞬间, 有

$$\begin{cases} \varepsilon_q = \frac{mgl \sin[\theta]}{J_B} \\ \omega_q = \sqrt{\frac{2mgl(\cos \theta_0 - \cos[\theta])}{J_B} + \omega_b^2} \\ v_x = \omega_q l \cos[\theta] \\ v_y = \omega_q l \sin[\theta] \end{cases} \quad (6)$$

2.2.1 一次前冲

由相关力学分析可知,烟囱的一次前冲可近似分解为绕质心的转动和随质心的平抛运动^[1]。在烟囱定向倾倒过程中,由于其触地姿态的不同会导致其前冲范围不同,为对前冲范围进行分析,因此需根据烟囱不同的触地姿态分别进行讨论。

(1) 烟囱水平触地

设烟囱以水平落地姿态触地时烟囱下坐完成瞬间所在截面(后文简称烟囱下坐完成截面)距地面的高度为 H_0 , 该种情况的受力分析见图2, 根据烟囱落地过程中的运动规律有

$$\frac{\pi}{2} - [\theta] = \omega_q t_1 \quad (7)$$

式中: t_1 为烟囱发生一次前冲所经历的时间, 由(7)式可得

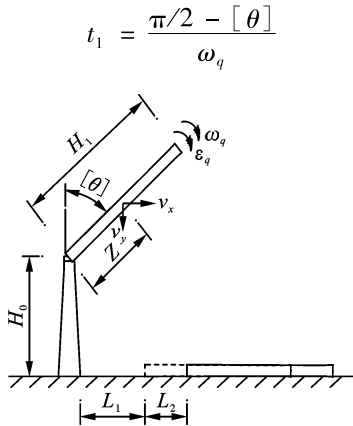


图2 烟囱水平触地情况

Fig. 2 Horizontal grounding of chimney

根据烟囱落地的运动规律及几何关系有

$$H_0 + Z \cos[\theta] = v_y t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \quad (8)$$

因此, 当烟囱下坐完成截面距地面高度 $H = H_0 = v_y t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 - Z \cos[\theta]$ 时, 烟囱以水平姿态触地。

(2) 烟囱底部先触地, 即 $H < H_0$

此时, 受力分析见图3, 根据烟囱前冲过程的运动规律及几何关系有

$$H + Z \cos[\theta] - Z \sin(\pi/2 - [\theta] - \omega_q t_1) = v_y t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \quad (9)$$

将式(9)带入 MATLAB 软件中求解得 t_1 。

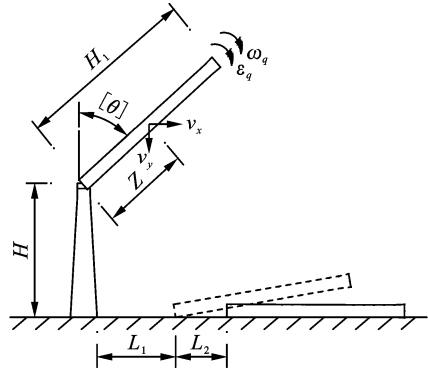


图3 烟囱底部先触地情况

Fig. 3 The bottom of the chimney touches the ground first

(3) 烟囱顶部先触地, 即 $H > H_0$

此时, 受力分析见图4, 根据烟囱前冲过程的运动规律及几何关系有

$$H + Z \cos[\theta] - (H_1 - Z) \cos(\pi - [\theta] - \omega_q t_1) = v_y t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \quad (10)$$

式中: H_1 为切口部位薄弱截面以上部分烟囱的高度。同理将式(10)带入 MATLAB 软件中求解可得 t_1 。

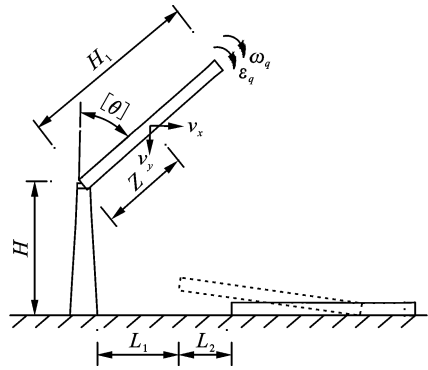


图4 烟囱顶部先触地情况

Fig. 4 The top of the chimney touches the ground first

2.2.2 二次前冲

烟囱触地后, 筒体发生破碎或断裂, 但由于烟囱在触地瞬间仍存在着水平加速度分量, 且钢筋混凝土烟囱的强度较高, 因此烟囱在触地后部分筒体会发生二次前冲。为保守分析, 设烟囱在触地瞬间未完全发生解体破坏, 如图2~图4所示, 根据二次前冲的运动规律有

$$v_x = \mu_2 g t_2 \quad (11)$$

式中: μ_2 为烟囱与地面的摩擦系数; t_2 为烟囱发生二次前冲所经历的时间, 由式(11)得 $t_2 = \frac{v_x}{\mu_2 g}$ 。

2.3 前冲距离计算

烟囱一次前冲的前冲距离理论上为烟囱从开始前冲到触地瞬间的水平位移量减去烟囱倾倒过程中

的后坐和下坐量^[20],即

$$L_1 = l_1 - l_2 - l_3 - R_2 \quad (12)$$

式中: L_1 为烟囱发生一次前冲的前冲距离; l_1 为烟囱从开始前冲到触地瞬间的水平位移量, $l_1 = v_x t_1$; l_2 、 l_3 分别为烟囱倾倒过程中的后坐量、下坐量; R_2 为烟囱底部截面的外半径。

烟囱发生二次前冲的前冲距离为

$$L_2 = v_x t_2 - \frac{1}{2} \mu_2 g t_2^2 \quad (13)$$

式中: L_2 为烟囱发生二次前冲的前冲距离。

由此得到烟囱倒塌前冲距离 S 的计算公式
烟囱水平触地或底部先触地

$$S = H_1 \cos\left(\frac{\pi}{2} - [\theta] - \omega_q t_1\right) + L_1 + L_2 \quad (14)$$

烟囱顶部先触地

$$S = H_1 \cos\left([\theta] + \omega_q t_1 - \frac{\pi}{2}\right) + L_1 + L_2 \quad (15)$$

3 工程实例

3.1 工程概况

某电厂待拆除烟囱为钢筋混凝土结构,高180 m,C40 混凝土,HRB335 级钢筋。标高0.00 m处,烟囱外半径8.335 m,壁厚0.5 m,无隔热层和内衬;标高12.90 m处,烟囱外半径7.561 m,壁厚0.5 m,隔热层厚0.06 m,内衬厚0.24 m;标高92.75 m处,烟囱外半径3.080 m,壁厚0.4 m,隔热层厚0.06 m,内衬厚0.12 m。竖筋为双层布筋,环筋为水平箍筋。标高12.90 m处外侧布设235根 $\phi 22$ 竖筋,内侧布设58根 $\phi 16$ 、60根 $\phi 14$ 竖筋,环筋布置规格为 $\phi 18@200$;标高92.75 m处外侧布设100根 $\phi 28$ 竖向筋,内侧布设48根 $\phi 14$ 竖筋,环筋布置规格为 $\phi 14@200$ 。标高12.90 m至90.50 m范围内筒体自重4072.16 t,重心高度40.49 m。标

高92.75 m以上筒体自重1410.45 t,重心高度132.21 m。

根据现场周边情况及相关资料,综合考虑爆破危害效应对周边环境的影响,确定该烟囱采用分段定向控制爆破拆除。首先在烟囱上部开设高位爆破切口对上半段筒体实施定向爆破拆除,然后在底部开设爆破切口对下半段筒体实施定向爆破拆除。烟囱爆破切口参数见表1。

表1 烟囱爆破切口参数

Table 1 Chimney blasting incision parameters

切口位置	高位切口	下部切口
切口处标高/m	90.5	8.7
切口处外半径/m	3.08	7.813
切口处壁厚/m	0.4	0.5
切口形状	倒梯形	倒梯形
切口角度/°	200	209.3
切口高度/m	2.25	4.2
定向窗尺寸/m	1.50×0.90	2.10×1.20
定向窗夹角/°	30.96	29.74

3.2 烟囱倒塌过程分析

观察实际烟囱爆破过程(图5、图6)可知,烟囱倒塌过程主要分为两个部分。首先,爆破切口形成瞬间,烟囱在自身倾覆力矩作用下定向倒塌,爆破切口逐渐闭合,此过程伴随有筒体的下坐;当烟囱定向倒塌至一定角度时,筒体将脱离支撑部位发生前冲,直至触地解体破坏。这与理论分析结果相吻合。通过观察爆破倒塌视频可知:烟囱高位切口爆破拆除和下部切口爆破拆除前冲过程中均为烟囱顶部先触地,测量得到两次爆破筒体的下坐量均近似等于切口高度,且没发生明显后坐。



图5 烟囱高位切口爆破倒塌过程

Fig. 5 Chimney blasting collapse process with high incision



图6 烟囱下部切口爆破倒塌过程

Fig. 6 Chimney blasting collapse process with lower incision

3.3 前冲分析

3.3.1 前冲机理分析

根据烟囱自身结构和尺寸带入相关参数计算可得表2和图7结果,其中表2为两种不同判据条件下烟囱前冲倾角理论值与实测值统计表,图7为判据二条件下 μ_1 与 $[\theta]$ 的关系曲线。由表2可得,在判据一和判据二($\mu_1=0.7$ 时)条件下烟囱的前冲倾角近似相等,二者与实测值的误差在可接受的范围内,因此可认为这两种判据是合理的。但由图7可知,对于判据二前冲倾角 $[\theta]$ 会随着 μ_1 的增加而增大,当 μ_1 取较小值时,其与实测值的误差会增大。因此,当 μ_1 值确定时,两种判据均可作为烟囱发生前冲时的力学依据,只是其分析原理不同,反之则采用判据一对烟囱的前冲进行判断。实际工程中,在设计时往往难于精确测定支撑部位的摩擦系数,因此将判据一作为烟囱发生前冲时的力学依据更为合理。

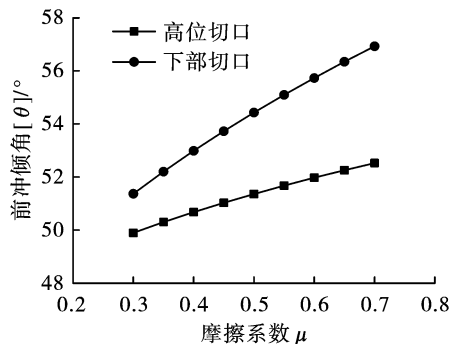


图7 判据二条件下 μ_1 与 $[\theta]$ 的关系曲线^[18]

Fig. 7 The relationship curve between the μ_1 and $[\theta]$ under criterion 2^[18]

3.3.2 前冲过程分析

在判据一条件下根据烟囱自身结构和尺寸带入相关参数计算可得表3结果,表3为烟囱前冲过程分析结果,其中下部切口的一次前冲距离为负值是因为筒体虽然发生前冲,但仍然处于烟囱自身的建筑限界之内;除此之外,由于在爆破拆除过程中采取了一系列的防冲措施,难于准确量测出筒体的二次前冲距离,因此烟囱的二次前冲距离仅有理论计算值。

由表3可得,烟囱前冲过程的理论分析结果与实测结果吻合较好,由此说明本文提出的前冲分析理论计算模型是合理的。两次爆破拆除烟囱倒塌范围 S 的理论值均大于实测值,是因为在实际爆破拆除过程中采取了铺设减振堤坝、防冲墙等一系列的防冲措施造成烟囱的二次前冲距离较小,这也说明该理论计算模型的计算结果偏于保守,可为类似工程提供参考。

4 烟囱爆破拆除塌落触地振动分析

研究表明,烟囱爆破拆除过程中塌落振动对周围建(构)筑物的危害最严重^[13],且塌落触地振动速度不仅与塌落段烟囱的动能有关,还与烟囱倒塌过程中的触地姿态有关^[5],而通过本文分析可知烟囱倒塌过程中的触地姿态影响着烟囱的前冲距离,进而影响着烟囱的塌落触地点,最终对塌落触地振动速度产生影响。因此,为进一步研究烟囱的触地姿态对塌落触地振动速度的影响,在前冲分析的基础上通过理论计算得出两次爆破拆除烟囱塌落触地振动速度的预报值,并与实测值进行对比,对理论模型的准确性和合理性进行验证。

根据建(构)筑物爆破拆除过程中的塌落振动速度计算公式^[14]

$$v_i = K_i \left[\frac{R_i}{(mgH_c/\sigma)^{1/3}} \right]^\beta \quad (16)$$

式中: v_i 为建(构)筑物塌落引起的地面振动速度; m 为塌落段建(构)筑物的质量; H_c 为塌落段建(构)筑物的重心下落高度; σ 为材料的破坏强度; R_i 为监测点到建(构)筑物触地冲击地面中心的距离; K_i 、 β 分别为建(构)筑物塌落振动速度衰减系数和指数,分别取 $K_i=3.37 \sim 4.09$, $\beta=-1.66 \sim -1.80$ 。

大量烟囱爆破拆除塌落振动监测数据分析表明^[14],当地面采取减振措施时,能保证烟囱的塌落振动速度减少70%。分别采用本文的方法对两次烟囱爆破拆除塌落触地振动速度进行理论计算,并与文献^[21]的理论计算值进行对比,计算结果见表4。

表2 不同判据烟囱前冲倾角理论值与实测值

Table 2 The comparison results of theoretical and measured values of chimney forward angle under two different criteria

切口位置	理论值 $[\theta]/^\circ$		实测值 $^\circ$	绝对误差 $^\circ$		相对误差/%	
	判据一	判据二		判据一	判据二	判据一	判据二
高位切口	52.82	52.52	55.00	2.18	2.48	3.96	4.51
下部切口	56.49	56.93	60.00	3.51	3.07	5.85	5.12

表 3 烟囱前冲过程分析结果

Table 3 Analysis results of chimney forward process

切口位置	触地姿态		一次前冲距离 L_1		二次前冲距离 L_2		倒塌范围 S		
	理论计算/m	实际观测	理论值/m	实测值/m	理论值/m	实测值/m	理论值/m	实测值/m	相对误差
高位切口	$H(90.5) > H_0(10.39)$, 顶部先触地	顶部先触地	18.79	18.03	6.24	—	98.02	92.90	5.51
下部切口	$H(8.70) > H_0(7.53)$, 顶部先触地	顶部先触地	-3.14	-3.61	3.43	—	77.89	74.12	5.09

表 4 烟囱爆破拆除塌落触地振动速度理论值

Table 4 Theoretical value of collapse grounding vibration velocity in chimney blasting demolition

计算方法	测点编号	烟囱高位切口爆破拆除			烟囱下部切口爆破拆除		
		距离 R_i/m	塌落振速/ ($cm \cdot s^{-1}$)	采取减振措施后的塌落 振速 $v_i/(cm \cdot s^{-1})$	距离 R_i/m	塌落振速/ ($cm \cdot s^{-1}$)	采取减振措施后的塌落 振速 $v_i/(cm \cdot s^{-1})$
本文	1	79.10	2.90 ~ 3.48	0.87 ~ 1.04	69.76	4.16 ~ 5.14	1.25 ~ 1.54
	2	86.59	2.50 ~ 2.96	0.75 ~ 0.89	91.50	2.63 ~ 3.13	0.79 ~ 0.94
	3	101.66	1.92 ~ 2.22	0.58 ~ 0.67	58.32	5.56 ~ 7.03	1.67 ~ 2.11
文献 [21]	1	60.00	4.37 ~ 5.50	1.31 ~ 1.65	60.00	3.78 ~ 4.66	1.13 ~ 1.40
	2	62.00	4.13 ~ 5.15	1.24 ~ 1.55	62.00	3.56 ~ 4.35	1.07 ~ 1.31
	3	70.00	3.42 ~ 4.12	1.03 ~ 1.24	70.00	2.93 ~ 3.50	0.88 ~ 1.05

注:表中距离均由理论计算并利用地图测距得出。

为确定烟囱爆破拆除对周围重点保护建(构)筑物的影响,起爆前分别在监测点 1、2、3 位置布置振动监测仪器对相应位置的振动进行监测。爆破结束后,将两次爆破拆除烟囱塌落触地振动速度监测值整理见表 5。

表 5 烟囱爆破拆除塌落触地振动速度实测值

Table 5 Measured value of collapse grounding vibration velocity of chimney blasting demolition

测点编号	烟囱高位切口爆破拆除		烟囱下部切口爆破拆除	
	距离 R_i/m	塌落振速 $v_i/(cm \cdot s^{-1})$	距离 R_i/m	塌落振速 $v_i/(cm \cdot s^{-1})$
1	77.00	1.03	69.00	1.53
2	88.00	0.70	91.00	1.23
3	106.00	0.61	60.00	1.99

注:表中距离均由厂区平面图测得。

由表 4 和表 5 中的数据对比可知,在前冲分析的基础上,两次爆破拆除烟囱塌落触地点到监测点的距离 R_i 与实测值偏差较小,塌落触地振动速度与实际监测值吻合较好,而文献[21]中两次爆破拆除烟囱的 R_i 值与实测值存在差异,导致塌落触地振动速度与实际监测值差异较大。因此在实际工程中,应考虑烟囱的触地姿态对塌落触地振动速度的影响,在前冲分析的基础上研究烟囱的塌落触地振动更可靠。

5 结论

结合力学理论分析了烟囱定向爆破倾倒过程和产生前冲的原因,在此基础上研究了烟囱的塌落触地振速。通过上述分析和讨论,得出以下结论:

(1)当支撑部位的摩擦系数 μ_1 值可精确测定时, $N=0$ 和 $F=0$ 两种判据均可作为烟囱发生前冲时的力学依据,但二者分析原理不同,反之则采用判据一对烟囱的前冲进行判断。鉴于在实际爆破工程中难以获取精确的支撑部位的摩擦系数,将判据一作为烟囱发生前冲时的力学依据更合理。

(2)新建前冲距离计算公式的理论结果与现场实测结果吻合较好,采用此模型分析烟囱的前冲合理可行。在实际爆破拆除过程中采取了铺设减振堤坝、防冲墙等一系列的防冲措施,导致烟囱的二次前冲距离较小,出现倒塌范围的理论值略大于实测值的情况,表征该理论模型的计算结果偏保守,可为类似工程提供参考。

(3)烟囱爆破拆除过程中其塌落触地振动与烟囱的触地姿态有关。在前冲分析的基础上,两次爆破拆除烟囱的塌落触地振动速度与实际监测值基本吻合。因此在实际工程中,结合前冲分析对烟囱的塌落触地振动进行研究更可靠。

参考文献 (References)

- [1] FUJIKAKE K, AEMLAOR P. Damage of reinforced concrete columns under demolition blasting[J]. Engineering Structures, 2013, 55: 116-125.
- [2] GU X, LI C. Computer simulation for reinforced concrete structures demolished by controlled explosion [C] // Computing in Civil and Building Engineering (2000), 2000: 82-89.
- [3] UENISHI K, TAKAHASHI H, YAMACHI H, et al. PC-based simulations of blasting demolition of RC structures [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2401-2410.
- [4] 郑长青, 张 静, 赖经建, 等. 钢筋混凝土烟囱拆除爆破倾倒过程摄影分析[J]. 爆破, 2017, 34(4): 110-112, 118.
- [4] ZHENG Chang-qing, ZHANG Jing, LAI Jing-jian, et al. Photography analysis of toppling process of reinforced concrete chimney during explosive demolition [J]. Blasting, 2017(4): 110-112, 118. (in Chinese)
- [5] 徐鹏飞, 刘殿书, 张英才. 烟囱高位组合切口定向爆破倒塌过程数值研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 265-270.
- [5] XU Peng-fei, LIU Dian-shu, ZHANG Ying-cai. Numerical study on the directional blasting collapse process of chimney with high [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15): 265-270. (in Chinese)
- [6] 褚怀保, 徐鹏飞, 叶红宇, 等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除倒塌与受力过程研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 183-186.
- [6] CHU Huai-bao, XU Peng-fei, YE Hong-yu, et al. Collapse process and load-bearing process of reinforced concrete chimney during blasting demolition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 183-186. (in Chinese)
- [7] 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.
- [7] 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)
- [8] 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(S2): 3513-3517.
- [8] ZHENG Bin-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(S2): 3513-3517. (in Chinese)
- [9] 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.
- [9] ZHENG Bin-xu, WEI Xiao-lin, CHEN Qing-shou. Mechanical analysis of cutting-support destabilization of high reinforced concrete chimney [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S1): 3348-3354. (in Chinese)
- [10] 林 哲, 张世平. 砖烟囱爆破拆除不同切口形状数值模拟[J]. 工程爆破, 2017, 23(4): 91-94.
- [10] LIN Zhe, 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)
- [11] 骆利锋, 段卫东, 程良奎, 等. 烟囱爆破拆除倾倒过程中的前冲问题[J]. 爆破, 2004(3): 8-10.
- [11] LUO Li-feng, DUAN Wei-dong, CHENG Liang-kui, et al. The forward setting in the process of demolition collapse of chimney blasting [J]. Blasting, 2004(3): 8-10. (in Chinese)
- [12] 王 宇, 姚颖康, 贾永胜, 等. 钢筋混凝土烟囱爆破拆除失稳下坐和空中断裂现象研究[J]. 爆破, 2018, 35(4): 120-127.
- [12] WANG Yu, YAO Ying-kang, JIA Yong-sheng, et al. Phenomenon of downward crush and break in air of reinforced concrete chimneys in blasting demolition [J]. Blasting, 2018, 35(4): 120-127. (in Chinese)
- [13] 费鸿禄, 张超逸, 吕金齐, 等. 冷却塔爆破拆除倾倒解体及振动研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 142-150.
- [13] FEI Hong-lu, ZHANG Chao-yi, LV Jin-qi, et al. On collapsing disintegration and vibration of a cooling tower-subjected to blasting demolition [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(2): 142-150. (in Chinese)
- [14] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 15(1): 1-4.
- [14] ZHOU Jia-han. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition [J]. Engineering Blasting, 2009(1): 1-4. (in Chinese)
- [15] LIN F, LI Y, GU X, et al. Prediction of ground vibration due to the collapse of a 235m high cooling tower under accidental loads [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 258: 89-101.
- [16] 魏晓林, 郑炳旭, 傅建秋. 爆破拆除高耸建筑定轴倾倒动力方程解析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(10): 1466-1468.
- [16] WEI Xiao-lin, ZHENG Bin-xu, FU Jian-qiu. Analytical solution to the dynamic equation of toppling buildings demolished by blasting [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009, 32(10): 1466-1468. (in Chinese)
- [17] ZHAO X M, WU Y F, LEUNG A Y T. Analyses of plastic hinge regions in reinforced concrete beams under monotonic loading [J]. Engineering Structures, 2012, 34(1): 466-482.

- [18] 齐世福,阎家良. 高耸建筑物定向爆破倾倒时的后座及其对策[J]. 爆炸与冲击,1989,9(4):318-327.
- [18] QI Shi-Fu, YAN Jia-Liang. Recoil of towering construction of bursting demolished by directional blasting and appropriate measures[J]. Explosion and Shock Waves, 1989,9(4):318-327. (in Chinese)
- [19] 张 奇,陈惠敏. 烟囱控爆拆除前冲过程的力学分析[C]//全国结构工程学术会议,1993:734-739.
- [19] ZHANG Qi, CHEN Hui-min. Mechanical analysis of forward process in chimney controlled blasting demolition [C] // National Structural Engineering Conference, 1993:734-739. (in Chinese)
- [20] 储照权. 高耸钢筋混凝土烟囱爆破拆除的理论研究和数值模拟[D]. 宁波:宁波大学,2009.
- [20] CHU Zhao-quan. Theoretic study and numerical simulation about the blasting demolition of high reinforced concrete chimney[D]. Ningbo: Ningbo University, 2009. (in Chinese)
- [21] 徐鹏飞,张英才,刘殿书,等. 180m 钢筋混凝土烟囱爆破拆除振动监测及分析[J]. 爆破,2016,33(4):94-97.
- [21] XU Peng-fei, ZHANG Ying-cai, LIU Dian-shu, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration by demolishing 180 m reinforced concrete chimney [J]. Blasting, 2016,33(4):94-97. (in Chinese)

英文编辑:柯 波

(上接第94页)

- [2] 司剑峰,钟冬望. 水下爆炸荷载下类岩石材料的累积损伤试验研究[J]. 爆破,2020,37(3):21-25.
- [2] SI Jian-feng, ZHONG Dong-wang. Experimental study on cumulative damage of rock like materials under underwater explosion load[J]. Blasting, 2020, 37(3):21-25. (in Chinese)
- [3] 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.
- [3] ZHAO Gen, WU Xin-xia, ZHOU Xian-ping, et al. Key technology and application of rock plug drilling and blasting in deep water [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(5):13-17. (in Chinese)
- [4] 陈敦科,苏利军. 三峡三期上游碾压混凝土围堰拆除方案综述[J]. 爆破,2007(2):49-51.
- [4] CHEN Dun-ke, SU Li-jun. Summary of demolition scheme for upstream RCC Cofferdam of Three Gorges Project[J]. Blasting, 2007(2):49-51. (in Chinese)
- [5] 赵 根,吴新霞,陈敦科,等. 三峡三期碾压混凝土围堰拆除爆破设计方案研究[J]. 工程爆破,2007(2):42-46,28.
- [5] ZHAO Gen, WU Xin-xia, CHEN Dun-ke, et al. Study on blasting design scheme of Three Gorges RCC cofferdam [J]. Engineering Blasting, 2007(2):42-46,28. (in Chinese)
- [6] 赵 根. 长江三峡水利枢纽三期上游碾压混凝土围堰拆除爆破成功[J]. 工程爆破,2006(2):85-86.
- [6] ZHAO Gen. Successful demolition blasting of RCC Cofferdam in the upper reaches of the third phase of the Three Gorges Project [J]. Engineering Blasting, 2006(2):85-86. (in Chinese)
- [7] 刘浩阳,赵 根,刘美山,等. 预留钢管桩岩坎爆破拆除关键技术措施研究[J]. 爆破,2020,37(2):92-96.
- [7] LIU Hao-yang, ZHAO Gen, LIU Mei-shan, et al. Study on the key technical measures of blasting demolition of reserved steel pipe pile Rock Ridge [J]. Blasting, 2020, 37(2):92-96. (in Chinese)
- [8] 袁江霞,许毓才. 中部引黄工程取水口预留岩坎围堰拆除爆破设计[J]. 中国农村水利水电,2020(8):211-213.
- [8] YUAN Jiang-xia, XU Yu-cai. Blasting design for demolition of reserved rock sill Cofferdam at water intake of central Yellow River Diversion Project [J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2020(8):211-213. (in Chinese)
- [9] 孙云峰,李 冲,孟 涛,等. 某引水工程取水口围堰和预留岩坎拆除爆破[J]. 工程爆破,2020,26(3):38-44.
- [9] SUN Yun-feng, LI Chong, MENG Tao, et al. Demolition blasting of water intake cofferdam and reserved rock sill in a water diversion project [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(3):38-44. (in Chinese)
- [10] GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [10] GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standard Press, 2015. (in Chinese)
- [11] NBT35047—2015 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [11] NBT35047—2015 Code for seismic design of hydraulic structures in hydropower projects[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese)
- [12] 赵 根,黎卫超. 水下爆破技术发展[J]. 爆破,2020,37(1):1-12.
- [12] ZHAO Gen, LI Wei-chao. Development of underwater blasting technology [J]. Blasting, 2020, 37(1):1-12. (in Chinese)
- [13] 张正宇,张文焯,吴兴霞,等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

英文编辑:柯 波