

筒形建筑物爆破拆除的失稳原理 及其参数分析

张 奇

(西安矿业学院)

摘要 筒形建筑物爆破拆除参数的选取直接影响到建筑物倾倒的失稳过程、影响到建筑物倾倒时对地面的冲击作用,而建筑物对地面的冲击作用恰恰是爆破拆除应该控制的一个基本因素。本文阐述了筒形建筑物爆破拆除的物理过程,并由此导出最佳爆破参数。对于强度高、厚度大的建筑物,切口长度不宜小于圆周长度的60%,一般必须大于圆周长度的50%。切口长度的大小取决于建筑物的强度、密度和几何尺寸。本文最后讨论了烟囱爆破拆除对地面冲击作用问题,并提出冲量的最小值与烟囱的材料和几何尺寸有关。

关键词 爆破拆除,控制爆破,失稳过程,切口长度。

1. 前言

建筑物爆破拆除时,由于建筑物附近常常存在着需要保护的结构物或建筑物,因此建筑物倾倒对地面的冲击作用是爆破控制目的之一。为了保证爆破安全,有必要在施爆以前,根据若干参数进行安全性方面的预测,然而目前这方面的研究刚刚开始。本文讨论筒形建筑物(如烟囱、水塔等)爆破拆除的物理过程、失稳原理、参数选择以及建筑物倾倒时对地面的冲量问题。为爆破安全性预测提供理论依据。

2. 筒形建筑物失稳的基本条件

筒形建筑物爆破拆除的基本依据是失稳原理,因而筒形建筑物爆破拆除控制的基本目的是建筑物倾倒的失稳过程。筒形建筑物的爆破拆除工程已经积累了许多经验^[1],而这方面的研究则远落后于工程实践。下面以烟囱为例,分析筒形建筑物的破断过程及其有关参数。

烟囱施爆前,烟囱本身的重力作用在其中心线上,烟囱各断面上承受着均匀的压缩作用。烟囱切口(即布置药包部分)施爆后,切口处的烟囱承载面发生变化(如图1),而且承载面的应力分布也发生变化。这时烟囱的重力对于承载断面有两个作用:一是均匀压缩,它是烟囱定向破坏和失稳的阻碍因素;另一个是重心处重力对承载部分的断面形心轴(图1中的 y 轴)的弯曲作用,它是烟囱定向破裂失稳的根本原因。然而烟囱要发生定向失稳倾倒,必须首先发生断裂,因此断裂是定向倾倒的前提。由于烟囱等筒形建筑物都是由脆性材料构成的,因此断裂面的断裂过程中,可以忽略烟囱转动的惯性力作用。爆破形成切口以后,承载断面上作用着重力的压缩和重力对断面中性轴的弯曲作用(图2)。在弯曲作用下,以中性轴为界,断面的一部分受压,一部分受拉。 A 点的应力状态决定了承载面的破坏形势。当下式成立时

$$-\sigma_A \geq [\sigma_p] \tag{1}$$

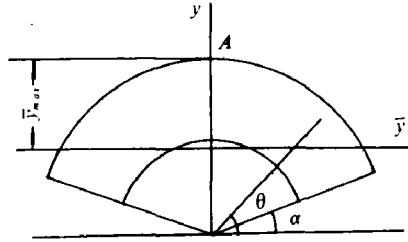


图1 烟囱施爆后承载断面图

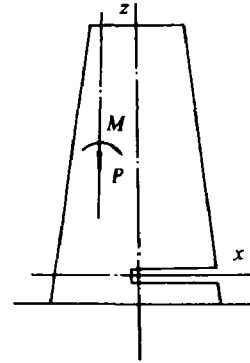


图2 烟囱施爆后受力分析图

式中 σ_A 是 A 点的正应力, $[\sigma_p]$ 是烟囱材料的单向抗压强度。这时 σ_A 为压应力。说明承载面上的正应力均为压, 而且都达到了抗压强度, 烟囱可能产生瞬时下沉现象, 这种情况不利于定向倾倒, 达不到爆破定向控制的目的。由于一般脆性材料抗压强度很高, 而且考虑到筒形建筑物重量与几何特点, 这种情况不易发生。如果 A 点的正应力是拉伸, 而且能够达到烟囱材料的弯曲抗拉强度, 那么承载面的破坏是一个断裂过程, 断裂的条件是

$$\sigma_A \geq [\sigma_s] \tag{2}$$

式中 σ_A 是 A 点的拉应力, $[\sigma_s]$ 是烟囱材料的弯曲抗拉强度。这种情况有利于烟囱的定向倾倒。如果烟囱的材料视为均匀体, 那么应有

$$-\sigma_A = \frac{P}{F} - \frac{My_{max}}{J} \tag{3}$$

式中 y_{max} 是 A 点到承载面中性轴 (\bar{y}) 的距离, P 是烟囱的重力, F 是承载断面的面积, J 是承载断面对中性轴 (\bar{y} 轴) 的惯性矩。

$$J = J_x - \bar{y}^2 F \tag{4}$$

其中 J_x 是承载断面对 x 轴 (图1) 的惯性矩, \bar{y} 是中性轴到 x 轴的距离。

根据定义有

$$J_x = \int_F y^2 dF \tag{5}$$

其中 $y = R \sin \theta$, $dF = R d\theta dR$, 因此 (5) 式变为

$$J_x = \frac{1}{8} (R^4 - r^4) (\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) \tag{6}$$

式中 R 、 r 分别是烟囱施爆处的外半径和内半径, α 意义如图1。

承载面面积

$$F = (1/2)(\pi - 2\alpha) (R^2 - r^2) \tag{7}$$

承载面中性轴位置由下式确定

$$\bar{y} F = \int_F y dF = \frac{2}{3} (R^3 - r^3) \cos \alpha \quad (8)$$

重力对断面中性轴的力矩为

$$M = y P \quad (9)$$

图1中A点的拉伸断裂是烟囱承载面定向破坏的开始。在承载面的断裂过程中,承载面面积越来越小,断面的中性轴逐渐向烟囱施爆处的横截面中心轴(x轴)靠近。但是如果保证烟囱承载面断裂完成以后能够倾倒,则倾倒开始时必须有 $M_{min} - \bar{y}_{min} P > 0$ 。式中 \bar{y}_{min} 是烟囱承载面断裂结束时,承载面中性轴到x轴的距离, M_{min} 是相应的力矩。因此可以得到

$$\bar{y}_{min} = 0 \quad (10)$$

为了满足上式,从图1所示,应有

$$\alpha = 0 \quad (11)$$

(11)式指出切口施爆以后,对切口实际长度的要求,但在烟囱爆破拆除施工中发现,切口施爆后的开口长度大于切口布置炮孔范围的长度,因此在布孔长度设计时应按下式

$$a_{min} = 0 \quad (12)$$

确定布孔范围所对应的圆周长度,有时也能满足烟囱倾倒的要求,即烟囱爆破切口长度的最小值为

$$l_{min} = L/2 \quad (13)$$

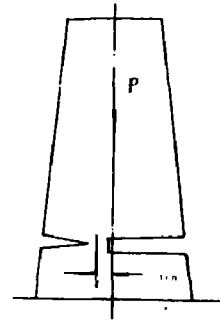


图3 烟囱开始倾倒时的状态

式中 L 是烟囱施爆处的周长。这一结果与工程实际情况相吻合。

在承载面断裂过程中,当断面减小到一定程度时,如果烟囱的强度、密度和几何尺寸满足某种特定条件,断裂的破坏形式将由拉伸变为压缩破碎,这时也将产生烟囱倾倒过程的瞬时下沉运动。在爆破施工中发现承载面的断裂并不是一条裂缝,而是一个豁口,因此有限的下沉运动是可能的。下沉至一定距离后发展成倾倒运动,或者是下沉与倾倒同时进行。切口长度满足(13)式,只能保证施爆处的承载断面完全断裂以后烟囱能够定向倾倒,但是它不能保证承载面的断裂。承载面的定向断裂首先发生在图1中的A点。

根据上述讨论,可知

$$\alpha = 0 \quad (14)$$

因此由(5)(6)和(14)式可得

$$J \geq \frac{1}{4} F (R^2 + r^2) \quad (15)$$

再由(3)式和(15)式得

$$J \geq \frac{1}{4} F (R^2 + r^2) - y^2 F \quad (16)$$

根据(2)、(3)、(9)和(16)式可得A点断裂的必要条件为

$$\frac{\bar{y} y_{\max}}{[1/4(R^2+r^2)-\bar{y}^2]} \geq 1 + \frac{[\sigma_s]}{P/F} \quad (17)$$

由几何关系可知 $y_{\max} = R - \bar{y}$, 因此上式变为

$$\bar{y}^2 + (R/A)\bar{y} - C/A \geq 0 \quad (18)$$

式中 $A = \frac{[\sigma_s]}{P/F}$, $C = (1+A) \frac{R^2+r^2}{4}$

考虑到(14)式, 应有 $\bar{y} \geq 0$, 因此上式的解为

$$\bar{y} \geq \frac{R}{2A} \left(\sqrt{1 + \frac{4AC}{R^2}} - 1 \right) \quad (19)$$

下面讨论两种极限情况:

(1) $A \rightarrow 0$ (如 P 一定, 烟囱的强度较小时) 有

$$\bar{y} \geq \frac{R}{4} (1 + \Delta^2) \quad (20)$$

式中 $\Delta^2 = r^2/R^2$ 。即

$$(\bar{y}|_{A \rightarrow 0})_{\min} = \frac{R}{4} (1 + \Delta^2)$$

(2) $A \rightarrow \infty$ (如 P 一定, $[\sigma_s]$ 较大时) 有

$$\bar{y} \geq \frac{R}{2} \sqrt{1 + \Delta^2} \quad (21)$$

或

$$(\bar{y}|_{A \rightarrow \infty})_{\min} = \frac{R}{2} \sqrt{1 + \Delta^2}$$

因 $\Delta < 1$, 故有

$$(\bar{y}|_{A \rightarrow \infty})_{\min} > (\bar{y}|_{A \rightarrow 0})_{\min} \quad (22)$$

上式说明, 在烟囱几何尺寸和重量相同时, 烟囱的强度越高, 承载断面中性轴距离 x 轴的长度应该越大, 即爆破切口的长度应越大。但在通常情况下, 强度不同时, 烟囱的材料也将发生变化, 因此烟囱的重量也不同。强度增大, 其重量也相应增大。在几何尺寸一定的条件下, 不同材料筑成的烟囱, $[\sigma_s]/P$ 仅略有不同, 相应的切口参数也相差不大。例如在工程上无论是混凝土烟囱还是砖烟囱通常都按烟囱周长 $1/2 \sim 2/3$ 的切口长度来考虑。

令
$$g(A) = \frac{R}{2A} \left(\sqrt{1 + \frac{4AC}{R^2}} - 1 \right) \quad (23)$$

则有

$$\frac{dg(A)}{dA} > 0 \quad (24)$$

因此, $g(A)$ 是 A 的单增函数, 函数的最大值为

$$g_{\max}(A) = \lim_{A \rightarrow \infty} g(A) = (R/2) \sqrt{1 + \Delta^2} \quad (25)$$

根据上述可知,无论烟囱的强度、密度和几何尺寸如何,只要烟囱的材料近似均质的,那么只有设计的爆破切口能够满足(21)式,烟囱才有可能首先在A点发生定向断裂。由于承载断面开始断裂时的承载能力最强,断裂一旦开始,其承载能力逐渐减小。根据烟囱本身的几何尺寸、强度和密度以及切口的设计参数,断裂过程可能有两种情况:一种是切口的外侧拉伸断裂直到承载面最后完全破裂(承载面这时理论上变为一直线),这种情况烟囱是直接倾倒,没有下蹲现象,工程上可以见到这样的实例;另一种是切口外侧拉伸断裂的同时,内侧的压缩应力超过材料的抗压强度而发生压碎现象,即外侧断裂与内侧破坏同时进行。当外侧断裂到一定程度时,承载面上只有压应力作用,而且压应力达到抗压强度时,烟囱也可能出现瞬时下蹲,最后倾倒。工程上也时常可以见到这样的实例。

因为承载面开始断裂时的承载能力最强,因此A点若能发生断裂,承载断面就一定能够完全断裂。因此(21)式是烟囱承载面完全断裂和烟囱施爆后倾倒的必要条件。显然上述讨论同样适合于其他筒形建筑物的爆破拆除过程。

3. 筒形建筑物壁厚对切口长度的影响

筒形建筑物施爆处内外径相对比值对爆破切口长度的影响反映了建筑物壁厚的作用。由(7)、(8)和(21)式可得

$$\frac{8(1+\Delta+\Delta^2)\cos\alpha}{3\sqrt{1+\Delta^2}(1+\Delta)(\pi-2\alpha)} = 1 \quad (26)$$

上式可改写成等式

$$\frac{8(1+\Delta+\Delta^2)\cos\alpha_{min}}{3\sqrt{1+\Delta^2}(1+\Delta)(\pi-2\alpha_{min})} = 1 \quad (27)$$

上式是关于 α_{min} 的一个非线性方程,采用牛顿切线法求数值解。令

$$f(\alpha_{min}) = \frac{8(1+\Delta+\Delta^2)\cos\alpha_{min}}{3\sqrt{1+\Delta^2}(1+\Delta)(\pi-2\alpha_{min})} - 1$$

$$f'(\alpha_{min}) = \frac{K[2\cos\alpha_{min} - (\pi-2\alpha_{min})\sin\alpha_{min}]}{(\pi-2\alpha_{min})^2}$$

式中

$$K = \frac{8(1+\Delta+\Delta^2)}{3\sqrt{1+\Delta^2}(1+\Delta)}$$

解方程(27)得到表1。表1说明对于强度高、壁厚大的筒形建筑物,只有保证切口长度大

表1 Δ 与切口长度的关系

$\Delta = r/R$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$2\alpha_{min}$	0.570	0.534	0.490	0.450	0.420	0.392	0.370	0.364
l_{min}/L (%)	59.1	58.5	57.8	57.2	56.7	56.2	56.0	55.8

注:表中 l_{min}/L 是切口长度与切口处烟囱外周长之比。

于施爆处周长的60%时,烟囱才能够定向断裂和倾倒。随着壁厚的减小,切口长度略有减小。这是因为:(1)在其他条件相同时,壁厚增大意味着烟囱重量的增加。重量增加导致重力对承载面弯曲作用和压缩作用的同时增加,弯曲作用是定向断裂和倾倒的积极因素,而压缩

作用是定向断裂和倾倒的阻碍因素,两者同时变化,对切口长度的大小影响具有抵消作用,因此,切口长度变化不大;(2)壁厚增大,承载面相应增大,而承载面的惯性矩也相应增大。两者在烟囱定向断裂和倾倒过程中也是一对矛盾的影响因素,由于壁厚增大导致两者同时增大,因此切口长度的变化不大。

切口长度的最佳值应保证筒形建筑物开始倾倒的初速度达到最小,这样才能使烟囱倒下之后对地面的冲击作用最小,以减小影响范围。

4.筒形建筑物对地面冲击作用的分析

筒形建筑物施爆后,建筑物开始倾倒时的总能量包括动能和位能两部分,而其中的动能取决于切口尺寸。

设建筑物开始倾倒时初角速度为 $\dot{\varphi}_0$,则建筑物沿其轴线各点的线速度初值为

$$V_0 = z \dot{\varphi}_0 \quad (28)$$

沿建筑物轴线方向取一单元体(高度无限小的圆筒),单元体的初始动能为

$$dE_{动}^0 = \frac{V_0^2}{2} dm \quad (29)$$

其中 $dm = \pi [R^2(z) - r^2(z)] \rho dz$, ρ 是烟囱材料的密度。而对于烟囱((不考虑内衬)有

$$R(z) = R - z \operatorname{tg} \beta, \quad r(z) = r - z \operatorname{tg} \beta \quad (30)$$

式中 $R(z)$ 和 $r(z)$ 分别是不同高度上烟囱的外半径与内半径。设施爆处以上的烟囱高度为 h ,则有

$$\operatorname{tg} \beta = (R - R_{min}) / h \quad (31)$$

式中 R_{min} 是烟囱顶端的外半径(认为烟囱是等壁厚)。将(30)~(31)式代入(29)式,并积分得

$$E_{动}^0 = \frac{\pi \rho \dot{\varphi}_0^2 h^3}{12} (R - r) (2r - R + 3R_{min}) \quad (32)$$

烟囱开始倾倒时的位能为

$$E_{势}^0 = PH \quad (33)$$

式中 H 是烟囱重心高度(相对地面)。总初始能量为

$$E^0 = E_{动}^0 + E_{势}^0 \quad (34)$$

在烟囱的倾倒过程中,有时发生沿某一断面破裂的现象,但破裂段数一般不超过二、三段,因此忽略烟囱倾倒过程中由于断面破裂的能量损失。

此外在烟囱倾倒过程中,由于离心力的作用,烟囱倾倒与地面接触时,不仅有与地面垂直的运动速度,而且具有平行于地面的速度分量。但是,在烟囱爆破施工中发现,烟囱在地面上的前冲仅限于烟囱上部或端部,特别是切口尺寸适当时,前冲量更小,可以近似地认为烟囱倾倒与地面接触时的线速度与地面垂直。因此烟囱倾倒与地面接触时的动能近似为

$$E_{动}^1 = \frac{\dot{\varphi}_1^2 \rho \pi h^3}{12} (R - r) (2r - R + 3R_{min}) \quad (35)$$

式中 ϕ 是烟囱与地面接触时的角速度。

烟囱倾倒以后位能为零。根据能量守恒, 应有

$$E^0 = E_{\phi}^1 \quad (36)$$

将 (32)~(35) 代入上式, 整理后得

$$\phi_1^2 = PH/B + \phi_0^2 \quad (37)$$

式中 $B = \pi \rho h^3 (R-r) (2r-R-3R_{min})/12$ 。

由 (37) 式看出: 如果爆破切口过大, 以致 ϕ_0 增大而导致烟囱撞击地面的速度增大。如果切口长度合理, 应有

$$\lim_{\phi_0 \rightarrow 0} \phi_0 = 0 \quad (38)$$

这就要求切口长度在保证承载面断裂和烟囱定向倾倒的前提下, 尽量缩小切口尺寸。否则既浪费爆炸能量和钻孔又可能产生较大的爆破危害。反之如果希望利用烟囱倾倒与地面撞击使烟囱产生较大程度的破坏, 可以适当增大切口长度。

如果切口长度能满足 (38) 式的要求, 这时 (37) 式变为

$$\phi_1^2 = PH/B \quad (39)$$

烟囱撞击地面时, 各点的线速度由下式给出

$$V_x = \phi_1 x \quad (40)$$

式中 x 代表地面与烟囱接触某点到烟囱根部的距离。由 (41) 和 (42) 式得

$$V_x = \sqrt{x^2 PH/B} \quad (41)$$

烟囱倾倒与地面撞击的瞬时, 沿烟囱轴向取一单元体, 单元体对地面的冲击量为

$$dI = \pi \rho [R^2(x) - r^2(x)] \frac{V_{max}}{h} x dx \quad (42)$$

式中 V_{max} 是烟囱顶端撞击地面时的线速度。

$$R(x) = R - x \operatorname{tg} \beta, \quad r(x) = r - x \operatorname{tg} \beta \quad (43)$$

将 (43) 式代入 (42) 式并积分得: $I = \pi \rho V_{max} h (R-r) [(R+r)/2 - 2h \operatorname{tg} \beta/3]$ 。将 (31) 式代入上式有

$$I = \frac{1}{6} \pi \rho V_{max} h (R-r) (3r - R + 4R_{min}) \quad (44)$$

上式看出倒坍以后对地面的冲量取决于切口尺寸 (即 V_{max} 的影响)、烟囱的几何尺寸和材料密度。由 (41) 式可知: $V_{max} = (h^2 PH/B)^{1/2}$, 将它代入 (44) 式有

$$I = \frac{1}{6} \pi \rho \sqrt{h^2 PH/B} h (R-r) (3r - R + 4R_{min}) \quad (45)$$

(45)式给出了烟囱倾倒时对地面撞击冲量的最小值。它仅取决于烟囱的材料密度和几何尺寸。如果烟囱对地面的总冲量大于(45)式给出的计算值,说明切口长度可以适当减小。

5. 结语

(1) 本文是在均质筒形建筑物假设条件下进行讨论的,只要建筑材料的性质相差不大(如砖砌烟囱、水塔等),就可以按均质近似处理。对于材料性质相差较大者,本文仅作为参考。

(2) 确定筒形建筑物爆破拆除切口长度时应考虑两个因素:一是承载面断裂;二是断裂后倾倒。对高强度、壁较厚的筒形建筑物,其切口长度不应小于施爆处周长的60%。一般筒形建筑物切口长度不应小于施爆处周长的50%。切口长度随烟囱的强度和壁厚而增大,随烟囱材料的密度的增大而减小。

(3) 切口长度影响到烟囱对地面的冲击作用。为减小烟囱对地面的冲量,应尽量减小切口长度。烟囱对地面总冲量的最小值取决于烟囱的几何尺寸和材料密度。

(4) 烟囱施爆后的运动与多种因素有关,烟囱发生下蹲的具体条件、相应的位置和时间等有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] 黄吉顺等,土岩爆破文集(第二辑)、中国力学学会工程爆破专业委员会,冶金工业出版社,(1985),376.

IMBALANCE THEORY OF TUBE-SHAPED STRUCTURES IN PROCESS OF BLASTING DEMOLISH AND ANALYSES OF SOME PARAMETERS

Zhang Qi

(Xitan Mining Institute)

ABSTRACT The choice of tube-shaped structure blasting parameters affects the imbalance process of the structure and the shock of the structure impacting on the ground after the structure falls directly. The shock is just one of the factors that should be controlled during blasting. The blasting demolish physical processes of tube-shaped structures are analysed and the optimized blasting parameter formulae are deduced in this paper. In case of the wall is relatively more thick and tough, the cut length should not be smaller than 60% of the circumference where the cut is. Generally, the cut length must not be smaller than 50% of the circumference. The cut length depends on the strength, density of the structure material and its geometry size. The minimum of the shock on the ground depends on the cut length, the strength, the density of the chimney material and its geometry sizes of the chimney when the chimney falls.

KEY WORDS demolition blasting, controlled blasting, imbalance process, cut length.