

# 钢筋混凝土烟囱的定向爆破拆除

刘小春 吕力行 林大能

(湘潭工学院 湘潭 411201)

[提要] 研究了钢筋混凝土烟囱定向爆破拆除的爆破方案设计、爆破重要措施的确定、起爆网路的合理选择、爆破事故的防止和安全验算及防护措施,为同类工程实践提供了详细的思路。

[关键词] 钢筋混凝土 烟囱 定向爆破

Design about directional blasting demolition of the reinforced concrete chimney is discussed. Determinations of important blasting measure, reasonable selection of blasting circuit, prevention of blasting accident and safe calculating and measure of safety are studied. The blasting ideas for solving analogous engineering practice are provided in detail.

**Keywords** reinforced concrete ; chimney ; directional blasting ; demolition

在位于人口稠密的城镇和厂矿区内的建筑群中,爆破拆除钢筋混凝土烟囱难度很大。需要掌握现场总平面、烟囱设计施工、烟囱几何尺寸(高、直径、壁厚、内衬等)、形状、结构的强度、重量、配筋粗细、风化程度等资料,以便决定最佳的定向爆破方案。

## 一、爆破方案设计

### 1. 设计原理<sup>[1]</sup>

钢筋混凝土烟囱爆破拆除是根据刚性整体绕定轴稳定转动倾倒的原理,将烟囱势能转为动能,使筒体在触地的瞬间受冲击荷载作用而破碎和破裂解体。其失稳原理是在烟囱一侧的底部,将其支承筒壁炸开具有一定高度、宽度的爆破切口,破坏其结构的稳定性,使整个结构失稳和重心外移,在缺口以上烟囱自重的作用下形成倾覆力矩,导致烟囱按预定方向倾倒。

### 2. 倾倒方向确定

要想使烟囱定向向一侧倒塌,需要有一块空地,它的长度、宽度应分别满足<sup>[2]</sup>

$$S \geq (1.0 \sim 1.2)H \quad (1)$$

$$B \geq (3.0 \sim 4.0)D \quad (2)$$

式中: $S$ 为空地长度, $H$ 为烟囱高度, $B$ 为空地宽度, $D$ 为烟囱最大直径。

在定向爆破方案确定后,根据设计及总平面图,到现场准确找出定向中心线的关键点,用经纬仪多次测量烟囱爆破部位及附近的中心点,确定平均中心线,用于施工放线。

### 3. 爆破切口形式

钢筋混凝土烟囱的切口形状可控制烟囱倒塌下落的速度、后坐程度、落地前冲距离,十分重要。常见的切口有梯形、三角形或菱形,梯形分正梯形和倒梯形,梯形的锐角一般为 $25^\circ \sim 35^\circ$ ,倒梯形的锐角一般为 $40^\circ$ 。

$\sim 55^\circ$ 。大量的工程经验表明,对于高度小于 $35\text{m}$ 的钢筋混凝土烟囱,可采用梯形切口准确定向,施工方便,且可根据工程需要采用正梯形或倒梯形;对于高度为 $35\text{m}$ 以上的钢筋混凝土烟囱,以三角形或菱形为佳,切口高度必须满足 $H \geq R$ ( $H$ 为切口高度, $R$ 为烟囱切口部位的外半径)<sup>[3,4]</sup>。

### 4. 爆破切口长度

切口长度太大,则保留的起临时支承作用的筒壁太短,承受不了烟囱的全部重量,在倾倒之前会迅速压垮,而发生过早下沉和后坐事故,达不到定向倒塌要求。切口长度太小,则保留的筒壁具有足够的强度来支承烟囱的全部重量,烟囱一时倒塌不下来。据经验,钢筋混凝土烟囱切口长度一般取 $L = (2/3)\pi D$ 为宜, $D$ 为爆破切口圆筒外径。

### 5. 爆破切口高度

爆破部位切口高度高一些,可防止烟囱在倾倒过程中发生偏转,有利于提高倒塌方向的准确性。但过高,在支承侧会造成烟囱有过大的转动势能,从而导致后坐现象发生。其高度可用下式进行计算<sup>[4]</sup>:

$$H_{\min} = (\pi/2) \sqrt{EJn/P} \quad (3)$$

式中: $H_{\min}$ 为理论计算爆炸切口的最小炸高, $E$ 为钢筋的弹性模量, $J$ 为截面惯性矩, $n$ 为钢筋数, $P$ 为钢筋骨架压力荷载。

$$H = k(\delta + H_{\min}) \quad (4)$$

式中: $\delta$ 为烟囱壁厚; $k$ 为经验系数,取 $1.0 \sim 2.0$ ; $H$ 为爆炸切口的炸高,也可用下列公式确定<sup>[4,5]</sup>:

$$H = (1.5 \sim 3.0)\delta \quad (5)$$

$$H > (1/6 \sim 1/4)D \quad (6)$$

$$H > 50d \quad (7)$$

式中 $d$ 为钢筋直径。

对于钢混结构烟囱来说,确定其切口高度应用压杆失稳原理计算,即式(4)比式(5)~(7)更科学。

## 6. 定向孔、定位孔

在钢筋混凝土烟囱的定向爆破拆除中,开设定向孔和定位孔是非常重要的,定向孔可以帮助我们准确了解建筑物切口部位的厚度、布筋情况和内衬等,可及时修改爆破方案。另外开设定向孔、定位孔后,主体爆破成为非单一曲板爆破,大大减小了夹制作用,对于支承部分无直接破坏。这样确保爆破部分飞散得快,保留部分却相对稳定。作者认为,对于高度在60m以下的烟囱,开设定向孔、定位孔后不会导致烟囱因自重而下坐,剩余截面仍有较高的抗压保险系数。对于60m以上烟囱,在大风情况下施工,需作风荷载校核<sup>[6]</sup>。

一般情况下,定向孔、定位孔开设在爆破切口的两端或中间,在两端开窗口的爆破称为“两洞式爆破”,这时窗口可适当宽一些;如在切口中间预先开设窗口,则称为“三洞式爆破”,这时每个窗口宽度应适当小一些,以保证保留部分支撑烟囱的可靠性。若环境条件允许,定向窗宜选在通烟口或掏灰口方向,利用其作为爆破临空面,以减少切口的钻孔量和装药量。

定位孔的形式常有三角形、矩形、圆形或任意形。作者认为矩形、圆形或任意形对定向的意义不大,而三角形可起到定向使用。保证三角形后顶点(含标高)的对称,就能保证支承区对称,这是满足准确定向的必要条件。而且三角形定向孔后顶点离地面较为接近,对推迟和防止烟囱下坐、后坐有积极意义<sup>[7]</sup>。

## 7. 孔网参数确定<sup>[2,5,8]</sup>

孔深  $l = (0.65 \sim 0.72)\delta$ ; 眼间距  $a = (0.85 \sim 1)l$ ; 排距  $b = 0.85a$ ; 单孔装药量为

$$Q = qab\delta \quad (8a)$$

$$Q = 0.35Ak_Bk_fk_p\omega^3 \quad (8b)$$

式中  $q$  为炸药的单耗,取值见表1;  $A$  为材料抗力系数,取为5;  $k_B$  为破坏系数,一般为2~3;  $k_f$  为临空面修正系数,取值见表2;  $k_p$  为爆破物体厚度修正系数,当爆体厚度  $\delta < 0.8\text{m}$  时,  $k_p = 0.9/\delta$ , 当  $\delta \geq 0.8\text{m}$  时,  $k_p = 1$ ;  $\omega$  为最小抵抗线,取  $0.5\alpha(\text{m})$ 。

单孔装药量可根据式(8a)(8b)确定。

钢筋混凝土烟囱的  $q$  值 表 1

$\alpha(\text{cm})$	$q(\text{g}/\text{m}^3)$	$\delta(\text{cm})$	$q(\text{g}/\text{m}^3)$
50	900~1000	70	480~530
60	660~730	80	410~450

临空面修正系数  $k_f$  值 表 2

临空面数	1	2	3	4	5
$k_f$	1.00	0.9	0.66	0.5	0.4

## 二、爆破技术重要措施

1. 定向孔、定位孔的钢筋预先切割。对于钢筋直径大于18mm以上的,还应将倒塌反方向的正方的5~7根受力钢筋预先切割,以减弱烟囱倒塌时后侧的拉应力,更利于烟囱顺利定向倒塌。

2. 将爆破切口外的烟囱或掏灰口砌堵严实,以防背侧过于薄弱造成反向倒塌或后坐偏差失误。

3. 采用耐火砖内衬和外壁同时爆破或利用“三洞式”爆破缺口方案。若内衬与外壁间有煤尘,应对其处理,以防煤尘爆破,而使倒塌方向失控。

4. 将烟囱上避雷针等影响倒塌的一切器材切断。

5. 设计时,应对爆破切口进行力学验算,在大风情况下施工时还应进行风荷载校核。

## 三、起爆网路合理选择

一般选择微差起爆。选择时,应严格控制段数,必须以烟囱垂直中心线为轴对称布置,且微差间隔总时间不超过150ms,段间微差以25~50ms为宜。

起爆网路应设计为复式起爆系统,为防止雷电、磁电、杂电干扰,以复式并联非电导爆管起爆系统为宜,通常采用双路起爆系统。若确无杂散电流等,可选用电雷管起爆系统。但必须选用较好的爆破器材和仪表,对各电雷管之间的阻值差要求小于  $0.2\Omega$ ,且均使用同厂、同期、同批产品。

## 四、爆破事故预防

1. 防炸而不倒。设计和施工必须有足够的炸高、炸宽。必须进行试爆以了解受压钢筋的分布情况,切出爆破切口处钢筋,必要时处理倒塌反向的钢筋。加大爆破孔装药量。

2. 防后坐。对于配筋较多的钢筋混凝土烟囱,因拉、压强度高,在初始阶段其后坐现象不明显。但对于配筋量较少的钢混烟囱,必须通过降低预留支撑高度且爆破切口不宜过长来消除或减轻“后坐”影响。

3. 防倒塌方向不准。开设窗口必须等距,相互对称。若爆破窗口有利用不上的烟道或掏灰口,必须加固。装药量必须一样多。

4. 防下坐或原地倒塌。装药量不应过大,而且后侧预留支撑不应过少。

## 五、爆破安全验算及防护措施

### 1. 防飞石

在设计、施工中采取以下主动措施:1)选取适宜的最小抵抗线方向及数值,确定适宜的装药量;2)保证堵塞长度不少于最小抵抗线;3)切忌药包位于裂缝、混凝土接触缝附近;4)堵塞要密实、连续,堵塞物中应避免夹杂碎石;5)选用低爆速炸药,采用非连续装药结构。而且要采取被动措施,也就是加覆盖材料。

飞石飞行的最大距离(m)<sup>9]</sup>根据下式计算,来判断是否会对周围建筑物造成破坏和对人员有伤害:

$$X_{\max} = K(\sqrt[3]{Q/\omega})^4 \quad (9)$$

式中:K为介质种类系数,取9.23。

## 2. 防震动

一般来说,由于该类爆破拆除所用药量不大,爆破震动不会产生较大危害。可用萨道夫斯公式计算周围建筑的振动速度

$$v = KK_1(\sqrt[3]{Q'/R})^\alpha \quad (10)$$

式中:v为介质质点振动速度(cm/s);Q'为炸药总量(kg);R为测点至爆心距(m);K为爆区介质系数,坚硬岩石取50~150,中硬岩石取150~250,软弱岩石取250~350;K<sub>1</sub>为修正系数,根据临空面多少取值,取0.25~1.0;α为衰减系数,坚硬岩石取1.3~1.5,中硬岩石取1.5~1.8,软弱岩石取1.8~2.0。

对于钢混烟囱定向倒塌整体冲击地面,产生的振动强度大,频率低,持续时间长,对周围建筑物产生危害也较大。烟囱倒塌触地有反弹或下侵两种危害,为防止危害,可用砂袋筑防下侵、防反弹的减波软堤,也可铺较厚的砂子或稻草或挖减震沟。利用中科院的经验公式<sup>[10]</sup>来计算烟囱坍塌振动速度:

$$v = 0.08(\sqrt[3]{I/R})^{1.67} \quad (11)$$

式中:I=M√2gh,为烟囱倒地时的冲量,M为触及地面时解体构件质量(kg),g为重力加速度(cm/s<sup>2</sup>),h为解体构件落高(m),R为落地构件所在位置与被保护物间距离(m)。

若式(10)(11)计算出的v≤5cm/s,则符合《爆破安全规程》,周围建筑物是安全的。

## 3. 防空气冲击波

在该类爆破中,可用木桩或竹杆支架,草帘、荆芭等作覆盖物架成的防护排架,一般形状为人字形,也可采用半圆形。对重点保护对象,采用双排或多排支架。也可在爆源上加覆盖物,如盖装砂或土的草袋,或盖胶管帘等覆盖物。利用这些措施来减弱冲击波的危害。

空气冲击波安全距离计算公式:

$$R' = \kappa \sqrt[3]{Q} \quad (12)$$

式中:κ为系数,对爆破作业人员,取25,对周围居民和其它人员,取60;对建筑物,取55。

根据上式计算的安全距离,在实际工程中,可按现场条件适当调整。如爆破是在街中进行,或在被保护对象的后部有墙、堤等障碍物时,安全距离要适当加大,相反,如果建筑物与爆源之间有冲击波传播的障碍物时,可适当减少安全距离。

## 六、工程实例

某待拆钢筋混凝土烟囱,高35m,底部外径4.0m,

壁厚0.5m,出口处外径1.8m。内衬为耐火砖结构,厚为0.24m。单层布筋,主筋为Φ14,共布筋18根,全重12t。整个爆区环境如图1。

### 1. 爆破设计

#### (1) 爆破切口形式

为满足构筑物初始倾倒阶段具有辅助支撑、定向准确、防止折断及控制后坐的作用,同时满足施工简便、布孔规模和工作量适中,采用倒梯形切口。

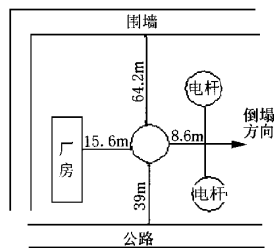


图1 爆区环境图

#### (2) 爆破切口长度

$$L = 2/3 \times 3.14 \times 4.0 = 8.4\text{m}$$

#### (3) 爆破切口高度

$$d = 0.014\text{m}, J = \pi d^4 / 64 = 0.1885 \times 10^{-8}\text{m}^4, F = \pi d^2 / 4 = 1.53 \times 10^{-4}\text{m}^2, E = 2.0 \times 10^5\text{MPa}, P/n = 12 \times 10^4 / 18 = 6.7 \times 10^3\text{N} [\sigma_p] F = 2 \times 10^8 \times 1.53 \times 10^{-4} = 3.06 \times 10^4\text{N}.$$

因 $[\sigma_p] F > P/n$ ,故使用欧拉公式计算,则:

$$H_{\min} = \frac{3.14}{2} \sqrt{\frac{2.0 \times 10^{11} \times 0.1885 \times 10^{-8} \times 18}{12 \times 10^4}} = 0.374\text{m}$$

$$H = k(\delta + H_{\min}) = 1.4 \times (0.5 + 0.374) = 1.22\text{m}$$

实际取1.2m。

#### (4) 孔网参数

$$\omega = 0.5\delta = 25\text{cm}, l = 0.72\delta = 36\text{cm}, a = 0.95l = 34.2\text{cm}, \text{实取 } 35\text{cm}. b = 0.85a = 29.75\text{cm}, \text{实取 } 30\text{cm}.$$

由式(8a)(8b)分别得

$$Q = 950 \times 0.35 \times 0.30 \times 0.50 = 49.8\text{g}$$

$$Q = 0.35 \times 5 \times 2 \times 0.5 \times 0.9 / 0.5 \times 0.25^3 = 49.2\text{g}$$

实取50g,底部最下排炮眼加强装药为70g,整个炮眼布置如图2。

### 2. 爆破重要技术措施

爆破前用红砖、水泥浆将烟道砌好;切断烟囱上与地面相连的避雷针和圆筒形扶梯;拆除高压线;在倒塌方向布置定向孔和定位孔,并切断口内裸露钢筋。

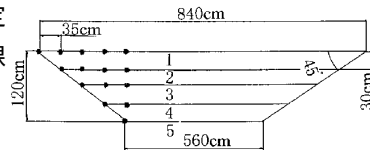


图2 爆破切口及药孔布置

### 3. 爆破网路

采用非电导爆管

双路起爆系统,分三

段起爆(1,3,5段)。每孔用一根导爆管引出,所有炮孔导爆管分五组簇联,每组用二发导爆管联接,然后接电雷管,用GM-2000C型发爆器起爆。

(下转第47页)

示)在现有最大裂缝基础上的裂缝宽度增量见表2。表中裂缝宽度增量是这样计算得到的:1)根据式(1)计算当前的钢筋应力 $\sigma_{ss}$ 水平;2)计算堆载标准值引起的内力;3)根据文[4]式(5.2.3-2)计算由堆载引起的钢筋应力增量 $\Delta\sigma_{ss}$ ;4)根据文[4]式(5.2.2-1)计算钢筋应力为 $\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{ss}$ 时的裂缝宽度;5)计算出的裂缝宽度与原有裂缝宽度之差即为堆载引起的裂缝宽度增量。

堆载引起裂缝宽度的增量 表2

梁	计算值(mm)	实验结果(mm)
L <sub>1</sub>	0.11	0.10
L <sub>2</sub>	0.09	0.10

从表2可以看出,由上述计算方法得到的裂缝宽度增量计算结果与实验结果基本相符。由此可以说明根据式(1)计算当前的钢筋应力水平是可靠的。由于对梁承载力的判断结果的准确性取决于对钢筋应力水平的判断,而实验的结果已证明了以规范公式为基础的钢筋应力水平的方法是正确的,因而,基于上述承载力的计算方法的计算结果是可信的。

#### 六、裂缝处理措施

在加固设计时,针对裂缝性质的不同,基于下述原则进行裂缝处理:

(1)对于收缩裂缝,当裂缝过大会使钢筋直接暴露于空气中,容易引起钢筋锈蚀。裂缝宽度小于0.3mm的,为满足使用要求,当裂缝浅而细且条数很多时,用环氧树脂浆液进行表面封闭;当裂缝细而深时,用低粘度环氧树脂浆液灌注。裂缝宽度大于或等于0.3mm的,用环氧树脂浆液灌注。裂缝宽度大于1.0mm的,

用微膨胀水泥浆液修补,修补前,应在裂缝表面涂刷一层水泥浆界面剂。

(2)在构件使用时是不允许出现剪切裂缝的。由于混凝土强度降低,可能会使部分构件截面不满足要求,即 $V > 0.25f_c b h_0$ ,这类构件若采用粘钢或外包钢加固仍不能满足要求,只能采用加大截面法进行加固。当截面满足要求,即 $V \leq 0.25f_c b h_0$ ,则可采用粘钢或外包钢进行加固,但必须与建筑等专业协调。

(3)对于出现受弯裂缝的构件,由于降低了构件的承载力,必须对其进行加固,当实测混凝土强度低于C15,采用粘钢或外包钢可能会引起截面纵筋超筋,故必须采用加大截面法进行加固。

#### 七、结论

主要讨论了以规范公式为基础的带裂缝梁的承载力的分析方法:根据裂缝的宽度计算钢筋当前的应力水平,再根据钢筋的应力状态判断梁构件残余的承载力,由此可判断梁构件是否满足极限承载能力的要求。现场堆载实验结果表明:以规范公式为基础的钢筋应力水平的计算方法是正确的,这说明本文提出的方法为解决实际工程中出现的实际问题提供了一种具体的思路和方法,将有助于工程技术人员解决实际工程问题。

#### 参 考 文 献

1. 日本混凝土工程协会,周国均等译.混凝土工程裂缝调查及补强加固技术规程.北京:地震出版社,1992.
2. 某办公大楼裂缝分析及承载力验算技术报告.中国建筑科学研究院抗震研究所,1999.
3. 卓尚木等.钢筋混凝土结构事故分析与加固.北京:地震出版社,1993.
4. 混凝土结构设计规范(GBJ10-89).北京:中国建筑工业出版社,1989.

(上接第59页)

#### 4. 安全防护设计

##### (1)防飞石

$$X_{\max} = 9.23 \times (\sqrt[3]{0.07/0.25})^4 \\ = 68.2\text{m} < 100\text{m}(\text{安全警界})$$

在烟囱表面裹几层麻袋,用铁丝绑住,再加几层竹架板,竹架板上再盖麻袋,来预防飞石。

##### (2)防地震波

$$v = 150 \times 0.25 \times (\sqrt[3]{5.32/15.6})^{1.5} = 1.4\text{cm/s}$$

可见 $v < 5\text{cm/s}$ 不会对周围建筑造成危害。

##### (3)防坍塌触地震动

$$\text{取 } h = \frac{35}{3} \times (1 + \frac{0.9}{2.0+0.9}) = 15.3\text{m}$$

$$I = 12 \times 10^3 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 15.3} \\ = 2.08 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{s}$$

$$v = 0.08 \times (\sqrt[3]{2.08 \times 10^5/15.6})^{1.67} = 0.74\text{cm/s}$$

可见,该振速符合《爆破安全规程》规定标准,不会

对周围房屋造成影响。

##### (4)防空气冲击波

$$R' = 25 \times \sqrt[3]{5.32} = 43.6\text{m} < 100\text{m}(\text{安全警界})$$

空气冲击波不会对人员有伤害。

工程起爆后,烟囱轻微下坐,然后分段倒塌,倒塌方向与设计方向一致,周围建筑和人员安然无恙,为委托方节约时间一个月以上,节约资金十万元左右。

#### 参 考 文 献

1. 花刚,卫东.高耸钢筋混凝土烟囱拆除爆破.爆破,1996,13(3).
2. 祝树枝,吴森康,杨昌森.近代爆炸理论与实践.武汉:中国地质大学出版社,1993.
3. 陈华腾,陈雁.烟囱的控制爆破拆除.爆破,1993(2).
4. 孙胜远,陈志峰,张明军.薄壁钢筋混凝土结构烟囱的爆破拆除.爆破,1996,13(1).
5. 陈付生.当代爆破实用技术.北京:冶金工业出版社,1993.
6. 朱振海,吴腾芳,曲广建.高耸建筑物控制爆破.爆破,1993(1).
7. 汤治.定向爆破拆除烟囱.煤炭科学技术,1997,25(4).
8. 现代钻爆理论与技术.北京:煤炭工业出版社,1998.
9. 林大能,刘小春.拆除爆破飞石及其防护研究.湘潭矿业学报,1999,14(3).
10. 董文柱,李伟.爆破拆除特殊结构烟囱.爆破,1997,14(2).