

G

AOSONG GOZHUWU BAOPU
LILUN JI JISHU

高耸构筑物爆破 理论及技术

陈德志 李本伟 编著



科学出版社

高耸构筑物爆破理论及技术

陈德志 李本伟 编著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

本书结合理论分析、现场试验、数值模拟与工程应用,对特大型高耸构筑物爆破拆除技术进行系统论述。

本书对高耸构筑物爆破拆除倒塌过程进行了深入的力学分析,并建立了风荷载作用的力学模型;进行了爆破荷载对高耸构筑物的瞬态和稳态动力响应研究;研究了不同尺寸的导向窗对烟囱爆破拆除的影响;对电子雷管及其起爆系统的机理和主要技术进行了深入研究;对倒塌受力与运动进行了计算分析;通过爆破拆除振动效应、应力应变及高速摄影等现场测试,依据爆破地震波衰减规律,提出了相应的爆破振动计算公式;提供了拱形超大开口导向窗、触地危害效应综合防护、多层柔性复合材料交叉近体防护、定向窗精确控制等系列关键技术,并在具体工程实例中进行了介绍。

本书可供从事爆破拆除工作的研究人员和工程技术人员使用,亦可供力学、建筑、矿业等专业的院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高耸构筑物爆破理论及技术/陈德志,李本伟编著. —北京:科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059747-2

I. ①高… II. ①陈… ②李… III. ①高耸建筑物-爆破拆除-研究
IV. ①TU746.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 262347 号

责任编辑:李建峰 王 晶/责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中科兴业印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018 年 11 月第 一 版 印张:10 1/2 插图:8

2018 年 11 月第一次印刷 字数:269 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 高耸构筑物爆破拆除的产生和发展	1
1.2 高耸构筑物爆破拆除研究现状	2
1.2.1 国内研究现状	2
1.2.2 国外研究现状	8
第 2 章 高耸构筑物爆破拆除破坏机理研究	9
2.1 引言	9
2.2 烟囱倒塌过程力学分析	9
2.2.1 烟囱简化模型	9
2.2.2 烟囱绕爆破切口直径转动惯量	10
2.2.3 烟囱倾倒过程的动力学方程	11
2.3 爆破切口关键参数确定	14
2.3.1 爆破切口的切口角计算	14
2.3.2 爆破切口的高度计算	18
2.3.3 定向窗计算	20
2.4 风荷载对倒塌过程的影响	22
2.4.1 风荷载基本理论	22
2.4.2 顺风向运动风荷载计算	23
2.4.3 考虑漩涡脱落的横风向风振计算	24
2.4.4 总风荷载的计算	25
2.4.5 余留支撑体断面的受力分析	26
2.5 爆破荷载的瞬态动力响应及控制机理研究	28
2.5.1 爆破荷载的瞬态动力响应研究	28
2.5.2 重力二阶效应($P-\Delta$ 效应)	31
2.5.3 拱形超大定向窗爆破机理研究	33
第 3 章 高耸构筑物精确延时控制爆破拆除技术	39
3.1 引言	39
3.2 电子雷管技术及机理	39
3.2.1 电子雷管简介及国内外应用现状	39
3.2.2 电子雷管及其起爆系统	41
3.3 起爆网路设计及可靠性分析	43

3.3.1 起爆网路可靠性理论	43
3.3.2 起爆网路设计	45
3.3.3 起爆网路系统可靠性计算与分析	46
3.3.4 铍钵起爆网路可靠性技术分析	48
3.3.5 小结	48
3.4 精确延时控制爆破对爆破效果的影响分析	49
3.4.1 非电起爆网路系统的延时误差分析	49
3.4.2 延时误差对高耸构筑物倒塌效果影响的分析	54
3.4.3 精确延时控制爆破对爆破效果的影响	56
第4章 高耸构筑物爆破拆除数值模拟研究	57
4.1 引言	57
4.2 动力有限元分析方法	57
4.2.1 ANSYS 简介	57
4.2.2 非线性瞬态分析有限元基本理论与方法	57
4.3 接触问题	61
4.3.1 接触算法	61
4.3.2 非自动接触与自动接触的区别	62
4.3.3 接触阻尼	62
4.3.4 接触定义	62
4.4 建模过程中的假定和简化处理	62
4.4.1 基本假定	63
4.4.2 模型实体及单元划分	63
4.4.3 约束载荷的施加与爆破缺口的模拟	63
4.4.4 分离式模型	63
4.4.5 材料模型	64
4.4.6 接触界面的模拟	64
4.4.7 材料失效的准则	64
4.5 210 m 钢筋混凝土烟囱爆破拆除模拟	64
4.5.1 工程概况	64
4.5.2 整体式模型模拟	65
4.5.3 分离式模型建立	66
4.5.4 分离式模拟计算结果及分析	67
4.6 90 m 冷却塔拆除模拟计算	77
4.6.1 工程概况	77
4.6.2 模型建立	77
4.6.3 倒塌运动过程数值模拟	78

第 5 章 高耸构筑物爆破拆除实验研究	81
5.1 爆破振动测试	81
5.1.1 基本理论	81
5.1.2 现场测试	83
5.1.3 结果分析	90
5.2 应力应变测试	91
5.2.1 电阻应变测试原理	91
5.2.2 现场测试	95
5.2.3 结果分析	99
5.3 高速摄影监测	100
5.3.1 概述	100
5.3.2 监测仪器及测点布置	100
5.3.3 高速摄影监测结果及其分析	102
第 6 章 高耸构筑物爆破拆除关键技术及工程应用	110
6.1 高耸构筑物爆破拆除的核心关键技术	110
6.1.1 定向窗精确开凿技术	110
6.1.2 拱形超大开口导向窗技术	111
6.1.3 高耸构筑物爆破拆除综合防护技术	112
6.1.4 多层柔性复合材料交叉近体防护技术	113
6.1.5 高耸构筑物爆破拆除数码雷管起爆技术	116
6.2 皖能合肥发电有限公司 2 座 90 m 高冷却塔及 150 m 高钢筋砼烟囱爆破拆除	119
6.2.1 工程概况	119
6.2.2 总体爆破方案	121
6.2.3 爆破设计	122
6.2.4 预拆除	125
6.2.5 安全技术措施	127
6.2.6 爆破振动监测及分析	130
6.2.7 爆破效果	133
6.2.8 爆破小结	136
6.3 铜陵电厂 180 m 钢筋混凝土烟囱爆破拆除工程	137
6.3.1 工程概况	137
6.3.2 总体爆破方案	138
6.3.3 爆破设计	138
6.3.4 安全技术措施	141
6.3.5 爆破振动测试与分析	142

6.3.6 爆破效果及科研观测分析	143
6.4 江西南昌发电厂 210 m 烟囱爆破拆除	144
6.4.1 工程概况	144
6.4.2 爆破方案	146
6.4.3 爆破技术设计	146
6.4.4 应用的核心关键技术	147
6.4.5 爆破切口理论校核	150
6.4.6 风荷载对 210 m 烟囱倒塌过程影响的计算	150
6.5 施工要点	152
参考文献	154

第 1 章 概 述

1.1 高耸构筑物爆破拆除的产生和发展

高耸构筑物是指如烟筒、水塔、塔楼等高径比大,重心高,支撑面积相对小^[1-2]的构筑物。随着国民经济的飞速发展和“上大压小、节能减排”政策的实施^[3-4],以及控制爆破拆除高耸构筑物具有安全、经济、迅速等优点^[5-7],近年来我国在厂矿企业的改建、扩建工程和城市发展中,废弃烟筒、水塔、冷却塔、塔楼等高耸构筑物越来越多地采用爆破拆除技术。由于高耸构筑物多是位于环境复杂、人口稠密的建筑群之中,在拆除高耸构筑物时,对倒塌范围、倾倒方向、爆破飞石、爆破振动、触地振动和粉尘等提出了严格的要求。如果倾倒方向偏差过大,甚至出现反方向倒塌,将造成严重的后果^[8-10]。随着城市综合减灾大安全观念的提高,人们对高耸构筑物拆除爆破时产生的有害效应控制的要求越来越高^[11-12]。目前,国内对高耸构筑物的控制爆破拆除设计主要依赖于实际经验、一些定性的分析和根据若干次爆破试验和实践总结出来的经验和半经验公式。因此,研究高耸构筑物控制爆破拆除理论并进行关键技术的开发已成为当务之急,要求爆破拆除高耸构筑物时,能使构筑物安全、平稳、准确地定向倾倒。

爆破拆除高耸构筑物的基本原理:在拆除高耸构筑物倾倒的底部及适当部位和范围内实施爆破,形成缺口,而在其反向保留一定长度的支撑体,采用炸高差(不同部位选用不同爆破破坏高度)、时间差(不同部位选用不同的起爆时间)造成构筑物失稳,继而在重力作用下产生倾覆力矩使高耸构筑物失稳倾斜;当开口闭合时,高耸构筑物重心投影应偏出支撑面,使之在重力作用下加速倾倒^[13-15]。烟筒类高耸构筑物定向爆破时可归纳为两个阶段:①初期阶段,即起爆瞬间产生微小倾斜的一个时间阶段,可将其视为由一段保留筒壁支撑的偏心刚体。在此阶段内,若偏心受压的保留筒壁强度不够,筒体迅速发生破坏,出现下沉现象,筒体下沉时会倾斜一定角度。这样,保留的筒壁就会向外挤压坍塌,从而出现后坐现象。②后期阶段,即筒体倾倒落地整个过程,可简化为刚体定轴转动的力学问题,若烟筒类高耸构筑物筒体整体强度较差,其触地断面在触地瞬间受剪压破坏,筒体呈断裂状坍塌于地^[16-17]。

自从采用定向爆破技术拆除高耸构筑物后,在爆破拆除理论研究方面虽然取得了一定的进展,但目前总的状况是理论研究明显滞后于工程实践水平^[18-20]。目前已经形成了一套基于实践经验的比较完整的爆破设计和施工技术,也成功控制爆破拆除了一些高难度的高耸构筑物,到目前为止成功爆破拆除超过 150 m 高的钢筋混凝土烟筒已有几十例,这类工程爆破施工场地大多位于城市繁华地段和工厂管网设备密集地,周边环境复杂苛刻,周围的设备、建筑物和设施对爆破的可靠性和准确性提出了苛刻要求。2012 年 2 月 12 日中钢集团武汉安全环保研究院成功爆破拆除“亚洲第一高”江西南昌电厂 210 m 钢筋

混凝土烟囱就是高耸构筑物爆破拆除从理论研究到工程应用的成功经验。

尽管爆破拆除技术已发展到一个较高的水平,但由于爆破过程的复杂性,测试手段的局限性和爆破工程的高安全性,目前在高耸构筑物爆破拆除领域,还存在一些问题:

1) 高耸构筑物爆破拆除的原理研究还不深入^[21-23]。目前高耸构筑物爆破拆除设计以经验公式和半经验公式为基础,以爆破工程技术人员的经验进行技术设计。实际工程中烟囱倾倒方向偏差过大,甚至出现反方向倒塌,砸坏周围建、构筑物的事故也时有发生^[24-25]。加强高耸构筑物控制爆破拆除的理论研究则是当务之急。

2) 实际爆破工程中,高耸筒形构筑物往往只考虑了顺风向的平均风荷载和脉动风荷载,没有顾及横风向的风振响应^[26-29],而《烟囱设计规范》(GB 50051—2002)也没有相关规定。当烟囱出现横风向漩涡脱落共振响应时,横向风振和临界风速下顺风向响应的共同作用可能对高耸筒形构筑物起控制作用,对定向爆破倾倒角度有影响。

3) 高耸结构的爆破拆除过程是一个复杂的力学过程,出于对爆破安全的更高要求,需要对爆破切口各参数和倒塌过程的动力学分析做细致透彻的研究。然而其力学模型的建立需要多学科的交叉,对于钢筋混凝土构件塑性阶段的破坏机理、介质的变形、风荷载的影响和压杆稳定性诸多问题的研究还不够深入,系统准确的理论体系还未能建立起来。

4) 随着爆破工程规模的日益扩大,控制爆破中延时误差对爆破效果的影响相应变大,因此对爆破延时精度的要求也将越来越高。采用传统起爆技术难以达到延时绝对精确的目的,不能适应爆破技术发展的需要,而电子雷管起爆系统延时的极高准确性却能满足爆破技术发展和爆破工程应用的需要。因此,迫切需要针对高耸构筑物周围环境和结构本身的特殊性,开发高耸构筑物爆破拆除电子数码雷管起爆技术,实现高精度起爆时序控制,为精确爆破设计、爆破效果控制提供技术支持。

5) 在高耸构筑物定向倾倒的准确性的控制方面,由于研究手段和测试技术还不成熟,测试分析主要凭工程经验^[30-33]。而高耸构筑物爆破坍塌范围及破碎程度的确定完全取决于高耸构筑物的结构特征、自身的高度、岩土地基的动载特性和材料性质等各种因素的影响。

6) 关于高耸构筑物触地振动和触地产生的飞溅物对周边建筑物的影响控制研究比较落后,在实际工程中人们越来越关注触地振动和触地产生的飞溅物对周边结构物破坏的原理及控制方法研究。高耸构筑物倒塌引起的触地振动振动频率较低,与周围结构物自振频率较接近,因此如何降低高耸构筑物触地振动对周围结构物的影响是当前需要解决的一大问题^[20,34-35]。

综上所述,加快高耸构筑物控制爆破拆除的理论研究和关键技术的开发已经是一个十分紧迫的课题。

1.2 高耸构筑物爆破拆除研究现状

1.2.1 国内研究现状

随着爆破拆除技术的成熟,爆破拆除已成为拆除业中最有竞争力的方法之一。由于爆破拆除法具有快速、安全、经济等优点,各国的专家、学者对高耸构筑物爆破拆除理论的

研究日趋深入,并取得了一些成果^[36-37]。

我国已经爆破拆除数百例超过 100 m 高的钢筋混凝土烟囱。在这些烟囱的拆除工程中,爆破技术人员通过工程实践的不断总结和探索,以及对重要爆破参数的设计理论依据和选用方法的研究,推动了高耸构筑物爆破倾倒地机理及理论研究的不断进步。中钢集团武汉安全环保研究院通过其独特的设计施工体系先后成功完成了武汉钢铁公司 4 座 100 m 烟囱一次性爆破、武汉钢铁公司 120 m 烟囱爆破拆除、大唐桂冠合山发电厂 120 m 烟囱爆破拆除、山东济宁高新开发区 180 m 烟囱爆破拆除、汉江集团铝业公司 100 m 烟囱爆破拆除、万州索特盐化 100 m 烟囱爆破拆除、淄博焦化厂 3 座 100 m 烟囱爆破拆除、皖能铜陵电厂 180 m 烟囱爆破拆除、皖能合肥电厂 150 m 烟囱爆破拆除、石嘴山电厂 2 座 120 m 烟囱爆破拆除、南昌发电厂 210 m 烟囱爆破拆除等工程项目。表 1-1 为近年来国内爆破拆除的高度在 100 m 以上的钢筋混凝土烟囱。

表 1-1 近年来国内爆破拆除的高度在 100 m 以上的钢筋混凝土烟囱统计表

序号	名称	年份	高度/m	倾倒地方式	实施单位	备注
1	茂名石化电厂	1995	120	定向	宏大爆破公司	2 座
2	武汉钢铁公司	1998	100	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	4 座
3	广州恒运电厂	1998	120	定向	宏大爆破公司	1 座
4	十里泉电厂	2000	180	人工拆除	西北电力爆破公司	1 座
5	宣威电厂	2001	120	定向	云南天宇爆破公司	1 座
6	广西会山电厂	2001	120	定向	中国铁道科学研究院	1 座
7	鞍钢二电厂	2001	120	定向	鞍钢建设公司	1 座
8	天津大港油田	2002	120	定向	中国铁道科学研究院	1 座
9	山东新汶电厂	2002	120	定向	宏大爆破公司	1 座
10	攀枝花电厂	2003	100	定向	川投爆破公司	1 座
11	浙江镇海电厂	2003	150	双向折叠	宏大爆破公司	1 座
12	武汉钢铁公司	2007	120	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1 座
13	大唐桂冠合山发电厂	2007	120	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1 座
14	贵州华电清镇发电厂	2007	120	定向	广东中人集团	1 座
15	华电黄石电厂	2007	150	定向	武汉爆破公司	1 座
16	华能成都电厂	2007	210	定向	上海爆破技术工程联合公司	1 座
17	南京热电厂	2008	180	定向	解放军理工大学	1 座
18	华能成都电厂	2008	210	定向	上海爆破技术工程联合公司	1 座
19	华电淄博热电有限公司	2008	210	分次拆除	淄博四海爆破工程有限公司	1 座
20	徐州发电厂	2008	210	定向	解放军理工大学	1 座
21	武汉青山热电厂	2009	100	定向	武汉爆破公司	1 座
22	山东济宁高新开发区	2009	180	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1 座
23	汉江集团铝业公司	2010	100	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1 座

续表

序号	名称	年份	高度/m	倾倒方式	实施单位	备注
24	万州索特盐化	2010	100	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座
25	华能聊城热电	2010	150	定向	解放军理工大学	2座
26	华银发电厂	2010	180	分段拆除	河南迅达	1座
27	马鞍山发电厂	2010	150	定向	上海同济爆破公司	1座
28	淄博焦化厂	2010	100	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	3座
29	连云港新海电厂	2011	210	定向	解放军理工大学	1座
30	山西太原第一热电厂	2011	210	定向	北京中科力爆炸技术工程有限公司	1座
31	成都嘉陵电厂	2011	210	定向	四川宏达爆破工程有限公司	1座
32	皖能铜陵电厂	2011	180	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座
33	皖能合肥电厂	2011	150	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座
34	南昌发电厂	2012	210	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座
35	石嘴山电厂	2012	150	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	3座
36	广西合山电厂	2013	180	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座
37	荆门电厂	2014	210	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座
38	台州电厂	2014	210	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座
39	景德镇电厂	2017	180	定向	中钢集团武汉安全环保研究院	1座

尽管爆破工程技术人员经过长期的理论分析和爆破实践,总结了一些高耸构筑物爆破拆除的基本原理,但相对于蓬勃发展的高耸构筑物爆破拆除工程而言,当前高耸构筑物爆破拆除的理论研究工作是远远不够的,还没有一个精确而统一的理论。目前国内对高耸构筑物的控制爆破拆除设计主要依赖于实际经验、一些定性的分析与经验和半经验公式,这些经验和半经验公式都是根据若干次爆破试验和实践总结出来的。烟囱倾倒方向偏差过大,甚至出现反方向倒塌,砸坏周围建、构筑物的事故也时有发生^[38-40]。例如,2001年6月25日,在爆破拆除宝钢集团二钢公司废弃烟囱时出现偏差,倒地的烟囱偏差了至少3 m,并砸向紧邻的钢丝仓库,并砸坏四根输气输油管道;仓库临烟囱的那面墙上也砸出一个大洞,部分车间停产,一人受轻伤。2001年某电厂120 m高烟囱的爆破拆除中,当烟囱触地时,反弹起的碎石呼啸砸向离爆破地点约200 m的贵宾席,造成多人受伤。2011年某电厂210 m高烟囱起爆飞石溅射附近小区,造成近百家的住户玻璃震碎。

对于烟囱、高塔等高耸构筑物拆除爆破的失稳断裂分析研究国内已经做了大量工作,强度破坏准则是最早的结构倒塌判断准则,认为结构的最大内力或应力达到允许值时就会破坏。由于没有考虑结构的塑性变形的强度准则,所以只对脆性材料适用,反映筒体结构从弹性状态进入塑性状态这一过程。筒体的断裂会直接影响倒塌的方向和范围,因此爆破产生的安全问题尤为突出^[41-42]。

随后出现的变形准则是结构极限变形达到或超过结构的极限变形能力时,结构产生破坏,变形准则没能考虑应力循环反复作用的影响。

20 世纪 60 年代出现了结构的积累变形能超过它的耗散能时,结构发生破坏的能量破坏准则。能量准则公式在钢结构中的应用较为成功,由于钢筋混凝土材料能量关系的确定和计算都十分困难,能量准则公式在钢筋混凝土结构中的应用受到了限制。

韩秋善、叶序双等采用运动学原理和动力学原理,利用计算机对钢筋混凝土烟囱拆除爆破过程进行了数值模拟研究,并现场测试分析烟囱拆除爆破过程,提出了余留支撑体受力情况的分析计算。

为了使高耸构筑物拆除爆破朝更科学、安全、可控、准确的方向发展,利用有限元法进行高耸构筑物结构动力学分析计算已经得到广泛的应用,相应开发可进行以线性、非线性结构静力分析和谐波响应、瞬态动力响应、谱、随机振动等分析为主的结构动力分析的大型有限元分析软件 ANSYS,为爆破工程技术人员广泛使用。高耸构筑物拆除爆破将现代先进的技术手段应用于研究中,减少了对经验的依赖。杨军等采用不连续变形分析法(DDA 法)进行了钢筋混凝土的爆破拆除和倒塌过程的数值模拟。

武汉大学孙金山和卢文波对钢筋混凝土烟囱拆除爆破双向折叠定向倾倒方案关键技术进行了研究。通过钢筋混凝土烟囱双向折叠倾倒过程的动力学模拟,并结合运动过程中上切口支撑筒壁破坏历程的分析,对双向折叠倾倒方案中的上切口位置和上下切口起爆时差的选取等关键问题进行了探讨^[43]。

中国铁道科学研究院刘世波在百米以上钢筋混凝土烟囱拆除爆破研究中,通过有限元法分析了高大钢筋混凝土烟囱的定向倾倒过程。他通过有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 分析了三种不同切口形式的烟囱倒塌过程,采用整体式有限元模型,对烟囱支撑部位在自重作用下的破坏作用过程进行了非线性有限元分析,结合工程实践观测到的结果,对钢筋混凝土烟囱的定向倾倒过程进行了研究,探讨了烟囱下坐的原因及对定向倾倒准确性的影响,同时对影响定向倾倒准确性的因素进行了分析,运用材料力学理论,初步研究了烟囱爆破切口角的选取,提出了一种能够有效控制倾倒方向偏差的爆破切口形式^[1]。

武汉理工大学的叶海旺基于 LS-DYNA 的钢筋混凝土烟囱爆破拆除进行了模拟研究^[44]。为确保复杂环境下钢筋混凝土烟囱安全地拆除,爆破拆除前先采用有限元软件 LS-DYNA 来模拟钢筋混凝土烟囱的爆破拆除倒塌过程。对钢筋混凝土烟囱单向倒塌过程中倒塌倾角与历时的变化关系,倒塌触地长度随时间的变化情况,倒塌过程中的支撑部位的压力变化以及筒体倒塌触地振动等进行模拟。通过模拟分析,可以帮助爆破工程技术人员指导实际爆破设计和施工。

西安科技学院的罗艾民对高耸筒式构筑物控制爆破拆除进行了研究^[45],建立了高耸筒式构筑物控制爆破拆除的理论计算模型,并应用该模型编制了爆破切口参数设计的计算机辅助设计(CAD)系统,其能对砖烟囱和钢筋混凝土烟囱的控爆拆除切口参数进行设计,为工程设计带来了极大的方便;初步探讨了建、构筑物触地冲击力、冲击地压的理论计算方法,以及地表浅埋结构受塌落振动的动力响应问题。

重庆大学的言志信博士对筒形结构爆破拆除进行了分析,认为实际爆破切口角越大,对控制筒体倾倒方向越不利,配筋越少越细就越容易倾倒。

桂林空军学院的贺五一及解放军理工大学工程兵工程学院的谭雪刚进行了复杂结构

高耸建筑物爆破拆除切口的研究^[46]。针对墙体材料多样、结构复杂的高耸建筑物的爆破拆除,通过实验研究确定了爆破切口形式,运用力学理论推导了余留支撑体所对应的圆心角和爆破切口高度计算公式,并在工程实践中得到验证。

近年来,高耸结构触地振动方面研究成果并不多见^[47-48]。工程实践中触地振动的计算还沿用落锤经验公式的方法,将高大钢筋混凝土烟囱塌落触地振动简化为烟囱重心以自由落体撞击地面而引起的振动,应用此方法得出的烟囱塌落振动速度是以圆形规律分布的。但是,高大钢筋混凝土烟囱倾倒触地区域是矩形区域,采用经验公式计算的方法不能真实地反映出高大烟囱塌落振动速度的分布规律已被实践证明^[49-50]。

中钢集团武汉安全环保研究院陈德志等针对冷却塔底部直径大、可倾倒范围小的环境特点,采用预先开凿加大高度的导向窗和减荷槽、抬高爆破切口等新技术,可实现冷却塔倒塌过程中充分解体,爆堆的长度和高度小,触地振动小。通过把爆破切口提高到+17.0 m 标高处,实现 150 m 高烟囱在只有 156 m 可倾倒长度范围内定向倒塌。

闫统钊、张智宇、黄永辉等成功爆破拆除一座 55 m 高的砖结构烟囱。根据周围环境、烟囱高度及其结构特点,选取了合适的爆破倾倒方向和合理的爆破参数,采用了倒梯形爆破切口,并通过对烟囱倾倒需满足的条件进行计算,确定其满足条件的爆破圆心角范围;设计了小角度爆破切口,其对应圆心角为 185° ,并且在爆破前进行预处理,起爆后,烟囱按照设计方向顺利倾倒,取得了较好的爆破效果。振动监测结果均在安全允许范围内,验证了砖烟囱小角度切口爆破拆除的可行性,可为类似工程提供参考(55 m 砖烟囱小角度切口爆破拆除)。

徐鹏飞等介绍了苛刻条件下 180 m 高钢筋混凝土烟囱不能采用整体定向爆破和双向折叠爆破,仅能采用两段单向控制爆破拆除。为了避开烟囱烟道口的不利影响,解决倒塌空间受限问题,通过在烟囱+90 m 和+21 m 高度处布设高位切口。上下切口分别采用倒梯形和正梯形切口设计,定向窗角度分别为 30.96° 和 29.74° ,上、下切口圆心角分别为 205.4° 和 207.50° ,切口高度分别为 2.5 m 和 3.6 m。钢筋混凝土烟囱分两次、分两段爆破,确保了烟囱按照设计方向倒塌并有效控制了烟囱后坐。通过开挖减振沟、在倒塌区域铺设缓冲垫层和采取相应防飞石措施,有效控制了烟囱倒塌触地振动和飞石飞散距离。两次爆破均取得了良好的爆破效果,达到了安全、精细爆破拆除的目的,可为今后复杂环境下高耸烟囱爆破工程提供参考(180 m 钢筋混凝土烟囱两段单向控制爆破拆除)。

李本伟等介绍了在复杂环境中,采用控制爆破技术拆除 180 m 钢筋混凝土烟囱的工程实例。针对烟囱尺寸大、钢筋密、混凝土强度高的结构特点,预先开凿大尺寸导向窗,减小了爆破面积。特别针对烟囱高度特别高,自重大的特点,针对性地进行防护土堤的设计。通过多角度观察,确认防护土堤有效地控制了爆破次生灾害的产生。

司君婷等通过一座 210 m 高钢筋混凝土烟囱控制爆破拆除工程,介绍了烟囱高位缺口爆破的参数设计和安全措施。受倒塌场地条件的限制,设计利用 100 m 高度位置的检修平台作为高位爆破缺口进行分段分次爆破拆除;由于爆破缺口位置较高,设计采用了利于准确定向的倒梯形缺口,并对缺口参数和爆破参数进行了优化选取;为了保证缺口 1:2

爆破和整体倒塌效果,对内衬和背部钢筋等进行了预处理施工;同时针对高缺口爆破飞石较远、上段倒塌触地震动较大等爆破危害采取了覆盖防护、控减震沟和铺缓冲层等有效防护措施。爆破倒塌过程对下段烟囱形成了撕裂破坏,但整体爆破效果良好(210 m 钢筋混凝土烟囱高位缺口控制爆破拆除实践)。

朱宽等以某特大钢筋混凝土烟囱定向爆破工程为研究对象,采用高速摄影、应力应变测量两种测量手段,对烟囱爆破倒塌过程进行实验研究,获取倾倒过程中的各种运动参量。数据对比分析结果发现烟囱倾倒过程分为爆破切口形成、整体下坐、定轴转动、局部折断、冲击撞地五个阶段。

李科斌等运用预先危险性分析法(PHA)对高耸烟囱拆除爆破安全评价的内容和方法进行了探讨,依照 PHA 理论,结合高耸烟囱拆除爆破的特点,对此类爆破工程中的危险源通过划分评价单元和确定相应的危险等级进行了辨识分析,最终建立了高耸烟囱拆除爆破作业单元危险性评价表,为制订爆破次生灾害预防措施和现场施工管理决策提供了科学依据,对保证爆破工程的施工安全、降低爆破事故发生概率和危害程度具有参考意义。

周浩仓等通过具体工程实例详细论述了利用爆破法开定向窗拆除不对称烟道烟囱的控制爆破方法、爆破参数设计、微差时间选择、爆破振动控制和飞石防护等技术,以给类似烟囱爆破拆除工程提供借鉴经验。

谭志敏等针对待拆除的 65 m 高烟囱的基本情况和复杂的周围环境,充分考虑场地宽度不够等实际情况,采用双切口分段折叠定向爆破的方法对烟囱进行拆除。在设计中,进行了双爆破切口位置的爆高计算和校核,选择了上、下两个切口的孔网参数、单耗和总药量等爆破参数,进行了爆破振动安全的验算,确定了有效的安全防护措施,实现了烟囱的安全、定向拆除,达到了预期的效果。

袁绍国等介绍了分段控制爆破技术在实际工程中的具体应用。通过在烟囱 100 m 处和底部开设倒梯形爆破切口、梅花形布孔,确保烟囱倒塌方向;爆破采用毫秒延时起爆、在烟囱倒塌方向开挖减震沟、烟囱触地地面铺设松软黄土缓冲层、倒塌方向三面搭设防护屏障等措施有效地控制了爆破振动和飞石危害,达到了比较理想的效果。

贺五一等结合新余钢铁有限公司焦化厂粗苯塔的拆除工程,经试验采用聚能装药爆破,可以对高耸金属筒形构筑物较薄的金属筒壁切割成矩形和六边形爆破切口。对薄壁金属筒余留支撑部位所对应的圆心角和爆破切口高度进行系统的研究,并给出了关系式,为以后金属筒形构筑物拆除提供理论依据。

孙飞等以一座 120 m 高钢结构烟囱爆破拆除工程为研究背景,为获得该工程中所用线型聚能切割器较优的结构参数组合,采用正交优化设计的方法,研究了线型聚能切割器罩顶角 2α 、母线长 d mm、罩壁厚 δ 和炸高 H 四个主要因素对聚能射流的影响,选取 L27(313)正交优化表,以射流侵彻钢板最大深度 Y_i 作为评判指标,利用 LS-DYNA 有限元分析软件进行数值计算,得到 4 个因素对评判指标 Y_i 影响的主次顺序,获得了最佳的结构参数组合:罩顶角 2α 取 90° 、母线长 d mm 取 25 mm、罩壁厚 δ 取 1.0 mm、炸高 H 取 10 mm。将优化后的线型聚能切割器应用于实际工程中,效果良好,符合工程要求。

1.2.2 国外研究现状

理论研究方面,国外研究主要集中在高层建筑物的爆破拆除方面,虽然高层建筑物在结构上与高大钢筋混凝土烟囱存有本质差别,但也可对高大钢筋混凝土烟囱爆破拆除研究提供借鉴^[51-72]。

日本在拆除爆破理论研究方面做了大量工作。日本工业火药协会用高速摄影机研究爆破拆除时飞石的飞行轨迹和防护材料的变化特征,提出了拆除爆破的倒塌过程的离散单元模型模拟,并把数值模拟和图像运用计算机显示,以掌握建筑物的倒塌堆积和破坏状况,并对保护性拆除爆破进行了研究。Tosaka 等应用变刚度技术和直接刚度法模拟不同倒塌形式的建筑物的倒塌动态行为。

德国 Melzer 博士在汉堡高层建筑物的拆除爆破中研究了建筑物倒塌触地后振动的传播和对周围建筑物的影响问题及如何保证预处理后的建筑物在爆破前不会因偶然因素而丧失稳定性的问题。德国鲁尔大学的 Stangenberg 进行了钢筋混凝土烟囱的爆破拆除试验和数值计算的研究。

2007 年 Bazant 和 Verdure 进行了渐进式坍塌的力学过程的研究^[37]。以世贸大厦坍塌为例讲述高层建筑物渐进式坍塌破坏的过程,提出动态的一维连续模型,采用能量法进行分析,利用反演计算确定渐进式坍塌破坏的相关参数,提出通过高速摄像记录精确拆除中的模式。

2009 年 Song 和 Sezen 进行了钢结构建筑物的渐进式坍塌评估的研究。就现存的建筑物进行了渐进式坍塌特性研究。现场试验与分析研究获得了一般结构的现存建筑物的坍塌响应信息。商用程序 SAP2000 用来建立模型与分析,本书给出了弹性状态与非线性动态分析结果,同时也对其隐式方程进行了讨论。

随着爆破器材、施工技术、爆破机理等方面的研究进步和突破,在工程方面从 20 世纪 60~70 年代起,瑞典、法国、捷克、匈牙利、美国等也都用爆破方法拆除了大量的各类框架结构大楼、烟囱、水塔等高耸构筑物。1975 年,巴西圣保罗市一座 32 层的钢筋混凝土结构大楼被美国爆破公司成功爆破;1978~1988 年联邦德国爆破拆除了几百座桥梁;1981 年,英国公司在南非爆破拆除了高 270 m 的烟囱。1979~1993 年英国爆破拆除了 30 余座 12~25 层的高大建筑物。

在工程中也有一些失败的例子,例如,1981 年在南非采用“原地坍塌”方式爆破拆除一座高大烟囱时,烟囱未坍塌部分突然倾斜倒塌,砸毁了邻近某发电厂厂房及设备,损失数百万美元。2010 年 11 月,美国在爆破拆迁一座烟囱时发生意外,85 m 高的烟囱在爆破后,没有按照预定向东倒下,而是倒向了东南方向,不仅压垮了附近的一个建筑,还砸断了 2 根高压线,造成民众恐慌,4 000 户居民断电。

国外研究主要集中在高层建筑物爆破拆除方面,对高大钢筋混凝土烟囱爆破拆除的研究并不深入。但是近年来,西方对环保要求越来越严格,爆破拆除受到了限制。

第2章 高耸构筑物爆破拆除破坏机理研究

2.1 引言

高耸结构的爆破拆除过程是一个复杂的力学过程,出于对爆破安全的更高要求,需要对爆破切口各参数和倒塌过程的动力学分析做细致透彻的研究。然而其力学模型的建立需要多学科交叉,对于钢筋混凝土构件塑性阶段的破坏机理、介质的变形、风荷载的影响和压杆稳定性诸多问题的研究还不够深入,系统准确的理论体系还未能建立起来。

对于高耸构筑物控制爆破拆除,目前高耸构筑物爆破拆除设计以经验公式和半经验公式为基础,以爆破工程技术人员的经验进行技术设计。实际工程中烟囱倾倒方向偏差过大,甚至出现反方向倒塌,砸坏周围建、构筑物的事故也时有发生。加强高耸构筑物控制爆破拆除的理论研究则是当务之急。本书将对高耸构筑物爆破拆除倒塌过程进行深入的力学分析,建立相关的失稳及破坏模型,得出高耸构筑物爆破倒塌的力学条件,提出爆破失稳倒塌综合判据和爆破切口高度的综合判据。

实际爆破工程中,高耸筒形构筑物往往只考虑了顺风向的平均风荷载和脉动风荷载,没有顾及横风向的风振响应,而《烟囱设计规范》也没有相关规定。当烟囱出现横风向漩涡脱落共振响应时,横向风振和临界风速下顺风向响应的共同作用可能对高耸筒形构筑物起控制作用,对定向爆破倾倒角度有影响。本书将建立风荷载作用下筒形高耸构筑物定向倾倒的力学模型,对定向爆破切口进行受力分析,着重研究漩涡脱落的横风向风振作用对倾倒力学条件的改变及对倾倒方向的影响。

爆破荷载作用的瞬间,会对高耸构筑物有冲击作用,当冲击荷载引起的动力响应较大时,会对高耸构筑物的定向爆破产生影响,严重时会影响偏转角度。本章将针对爆破荷载对高耸构筑物的瞬态和稳态动力响应,以及不同尺寸导向窗的烟囱爆破拆除机理进行研究。

2.2 烟囱倒塌过程力学分析

2.2.1 烟囱简化模型

烟囱是高耸构筑物的代表,其特点是重心高而支撑面积小,壁厚随着高度的变化而变薄,大多数烟囱都是下粗上细的结构,且其纵横比相当大,故将其抽象为质量分布均匀且其壁厚从底部到顶部按照线性连续变化的刚性烟囱。对于钢筋混凝土结构,为了简化计算,假设没有折断、前冲和后坐的现象。现在烟囱定向爆破拆除时,对其参数的计算主要是依据爆破切口以上部分的质量、体积、高度等,因此烟囱简化模型如图 2-1 所示^[7-8],假设爆破切口处的内外半径(梯形切口取切口底部半径)分别为 r_1 、 R_1 ,顶部的内外半径分

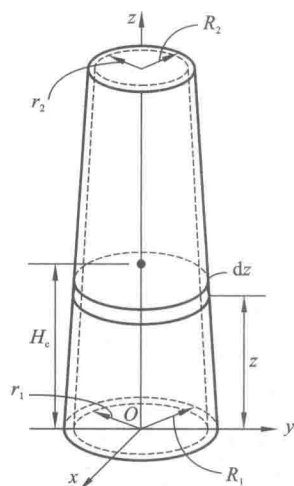


图 2-1 烟囱简化模型

别为 r_z 、 R_z ，切口以上烟囱高为 H ，开切口到底部距离为 h ，在高度为 z 处的内外半径分别为 r_z 、 R_z 。忽略隔热层、耐火砖以及配筋不同的影响，烟囱质量为 M 且均匀分布，质量体密度为 ρ ，则 z 处的内外半径为

$$r_z = r_1 - \frac{r_1 - r_2}{H}z \quad \text{和} \quad R_z = R_1 - \frac{R_1 - R_2}{H}z \quad (2-1)$$

烟囱体积和质量的计算(取切口以上部分的体积和质量)

$$\begin{aligned} V &= \int S(z) dz \\ &= \int_0^H \left[\left(R_1 - \frac{R_1 - R_2}{H}z \right)^2 - \left(r_1 - \frac{r_1 - r_2}{H}z \right)^2 \right] dz \\ &= \frac{1}{3} \pi H [R_1^2 - r_1^2 + R_1 R_2 - r_1 r_2 + (R_2^2 - r_2^2)] \quad (2-2) \end{aligned}$$

$$M = \rho V$$

烟囱重心的计算(取切口以上部分的高度)

$$H_c = \frac{H[(R_1^2 - R_2^2) + 2(R_1 r_1 - R_2 r_2) + 3(r_1^2 - r_2^2)]}{4[(R_1^2 - R_2^2) + (R_1 r_1 - R_2 r_2) + (r_1^2 - r_2^2)]} \quad (2-3)$$

2.2.2 烟囱绕爆破切口直径转动惯量

高耸烟囱定向爆破拆除时其倾倒过程是一个较为复杂的动力学问题，控制其定向倾倒技术难度比较大，在爆破前需要对烟囱进行精心的计算与设计。目前和实际情况吻合较好的是连续变截面筒体定轴转动模型。其中对爆破切口上部转动惯量的精确计算就显得尤为重要。转动惯量是衡量刚体转动时惯性的量度，不但建立烟囱倾倒的动力学微分方程要用到，而且计算烟囱倾倒力矩等问题也要用到。因此对烟囱转动惯量的研究可以为烟囱倒塌过程的力学分析提供参考，有较大的工程实际应用价值^[9,18,34]。

取切口以上部分的体积，如图 2-1 和图 2-2 所示。

根据平行移轴公式，垂直于 z 轴且厚度为 dz 的薄圆环对自身平面内的 x_1 轴转动惯量为

$$dI_{x1} = dI_{y1} = \frac{1}{2} dI_{oc} = \frac{1}{4} dm (R_z^2 - r_z^2) \quad (2-4)$$

因此根据平行移轴公式，薄圆环对切截面 x 轴的转动惯量为

$$dI_x = \rho \pi \left[\frac{1}{4} (R_z^2 - r_z^2)^2 + (R_z^2 - r_z^2) z^2 \right] dz \quad (2-5)$$

则上式的结果如下，对上式从 0 到 H 积分可得烟囱绕 x 轴的转动惯量：

$$J_x = \frac{1}{4} \rho \pi \int_0^H \{ [(R_1 - \mu_1 z)^2 - (r_1 - \mu_2 z)^2]^2 + 4[(R_1 - \mu_1 z)^2 - (r_1 - \mu_2 z)^2] z^2 \} dz \quad (2-6)$$

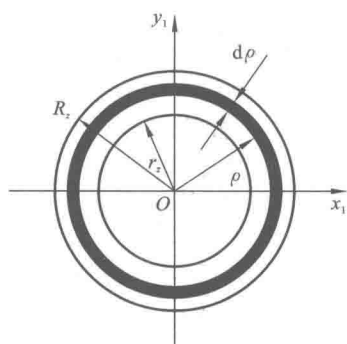


图 2-2 薄圆环的转动惯量