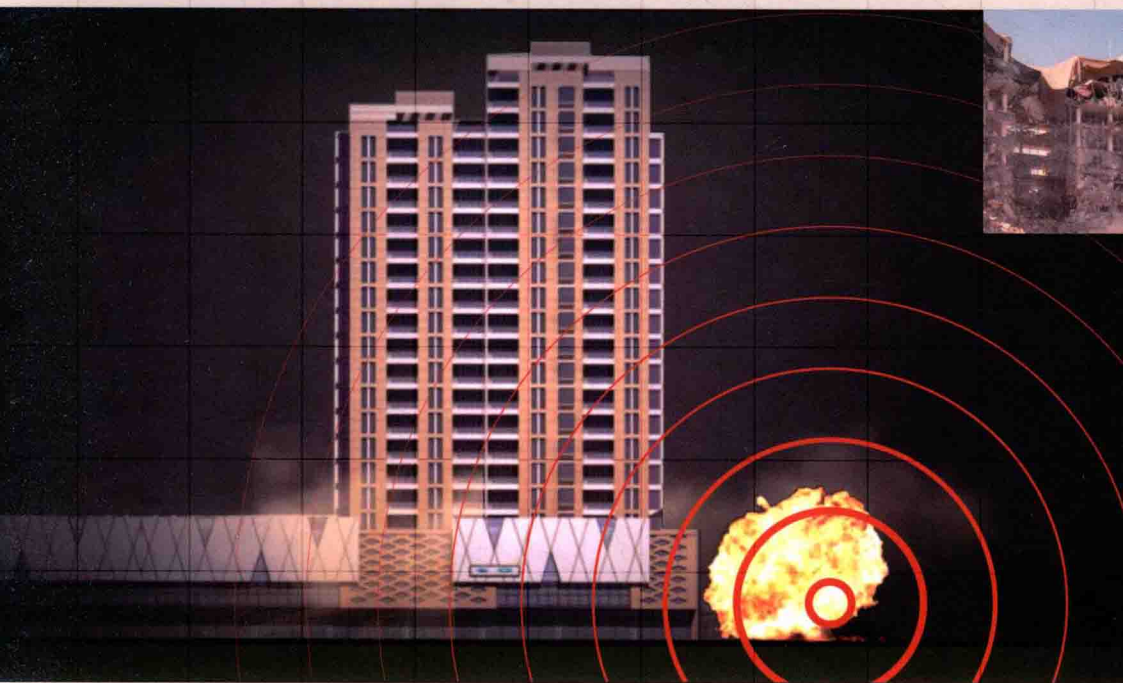




建筑结构抗爆分析理论

Blast Analysis of Building Structures

李忠献 师燕超 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

建筑结构抗爆分析理论

Blast Analysis of Building Structures

李忠献 师燕超 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结作者及研究团队近二十年来在民用建筑结构抗爆领域的研究成果。主要内容包括:爆炸冲击波在城市复杂环境中典型建筑物内部的传播规律,以及作用于建筑结构上的爆炸荷载模型;建筑材料动态性能的试验方法,以及常用建筑材料的动力性能及动态本构关系;爆炸荷载作用下梁、板、柱等结构构件的动态响应、破坏模式与损伤机理,砌体填充墙等非结构构件的破碎过程及灾害效应;爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构构件的损伤评估方法,以及爆炸荷载与火灾联合作用下钢结构构件的损伤评估方法;建筑结构连续倒塌分析的常用方法,以及爆炸荷载作用下建筑结构连续倒塌分析的高效方法;爆炸荷载作用下典型建筑结构的动态响应行为与连续倒塌机理,以及建筑结构防连续倒塌设计方法;建筑结构抗爆的分类设防标准与概念设计方法,以及建筑抗爆安全防护距离等。

本书可供从事建筑结构抗爆防爆科研和设计人员参考,也可作为高等院校土木工程专业研究生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构抗爆分析理论/李忠献,师燕超著. —北京:科学出版社,2015.3
ISBN 978-7-03-043658-0

I. ①建… II. ①李…②师… III. ①建筑结构-抗爆性 IV. ①TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 046238 号

责任编辑:刘宝莉 孙 芳 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 3 月第一次印刷 印张:28 3/4 插页:4

字数:564 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

恐怖袭击或生产生活中的意外事故所引发的各种突发性爆炸事件,导致众多的人员伤亡和大量的财产损失,严重干扰和阻碍了人类社会的稳定和文明的进步。爆炸一旦发生,不仅直接对爆源附近的人员和财产造成杀伤和毁坏,而且爆炸产生的冲击波和碎片作用到周边建筑上,会引起建筑结构的局部破坏甚至整体倒塌,加剧灾害程度。因此,如何提高建筑抗爆安全性,降低建筑爆炸灾害,减少生命和财产损失,成为世界各国学术界和工程界的一项迫切任务。

自 2001 年 9 月 11 日美国纽约世贸中心大厦因飞机撞击倒塌以来,世界范围内对建筑结构的抗爆分析与设计开展了广泛的研究,并且已有一些国家制订了较完善的设计标准,实现了工程应用。本书纵观国内外建筑结构抗爆分析与设计领域的发展动态,系统总结作者及研究团队近二十年来在此领域的研究成果。全书共 8 章。第 1 章主要综述了国内外恐怖袭击或意外事故爆炸引发的建筑结构破坏与倒塌事件,包括美国 Oklahoma 州联邦大楼恐怖爆炸致倒塌事件和纽约世贸中心双子塔遭飞机撞击致坍塌事件等。第 2 章主要阐述了爆炸冲击波在城市复杂环境中和典型建筑物内部的传播规律,及其作用于建筑结构及关键结构构件上的爆炸荷载及简化模型。第 3 章主要阐述了动力荷载作用下建筑钢材、混凝土、钢筋及砖砌体材料的动力性能及动态本构关系,以及建筑材料动态性能的试验方法等。第 4 章主要阐述了梁、板、柱等结构主要受力构件在爆炸荷载作用下的动态响应特征、破坏模式与损伤破坏机理,以及砌体填充墙等非结构构件在爆炸荷载作用下的破碎分析及灾害效应评估等。第 5 章主要阐述了建筑结构梁、板、柱等结构受力构件在爆炸荷载作用后的损伤程度评估方法,以及钢柱在爆炸与火灾联合作用后的损伤程度评估方法等。第 6 章主要阐述了建筑结构连续倒塌分析的常用方法,以及爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构、钢结构、高层建筑结构等连续倒塌分析的高效方法等。第 7 章主要阐述了爆炸荷载作用下典型钢筋混凝土结构和钢结构的动态响应行为与连续倒塌机理,以及建筑结构防连续倒塌设计方法。第 8 章主要阐述了建筑结构抗爆的分类设防标准、概念设计方法和安全防护距离等。

本书是作者及研究团队近二十年来相关研究成果的结晶,团队成员郝洪教授参加了第 3、5、6 章的部分研究工作,丁阳教授参加了第 4、5、6、8 章的部分研究工作,都浩博士参加了第 2、4、7 章的部分研究工作,汪明博士参加了第 4、5、6 章的部分研究工作,曲树盛博士参加了第 2 章的部分研究工作等。他们的辛勤工作和创

新成果是本书的基础,在此表示衷心感谢。

本书研究工作得到国家杰出青年科学基金项目(50425824)、海外青年学者合作研究基金项目(50528808)、国家自然科学基金重点项目(50638030、51238007)、国家自然科学基金仪器专项(51227006)、国家自然科学基金面上项目(51378346、51178306)和国家自然科学基金青年基金项目(51008209)等的资助,同时得到“十一五”和“十二五”国家科技支撑计划重点课题(2006BAJ13B02、2012BAJ07B05)、天津市科技计划项目(08JCZDJC19500、06QTPTSF05600、12JCQNJC04800)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120032110049、20100032120042)等的资助,对此表示衷心的感谢。

我国在建筑结构抗爆分析与设计领域的研究工作起步较晚,相关研究成果和技术集成相对较少。因此,希望本书的出版可以促进我国开展相关领域的研究和应用。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 恐怖或意外爆炸事件中建筑结构的破坏现象	1
1.1.1 Oklahoma 州联邦大楼	2
1.1.2 纽约世贸中心大厦	3
1.1.3 伦敦 Ronan Point 公寓楼	4
1.1.4 辽宁盘锦某办公大楼	5
1.2 爆炸破坏效应	6
1.2.1 爆炸冲击波的破坏效应	6
1.2.2 爆炸碎片的破坏效应	7
1.2.3 爆炸地震的破坏效应	8
1.2.4 爆炸引起的次生灾害	8
1.3 建筑结构抗爆研究现状	9
1.3.1 作用于建筑结构上的爆炸荷载	9
1.3.2 结构构件在爆炸荷载作用下的力学行为	10
1.3.3 地面建(构)筑物抗爆研究	10
1.3.4 地下结构抗爆研究	11
1.3.5 建筑结构抗爆设计及防爆措施	12
1.4 本书内容	13
参考文献	14
第 2 章 爆炸荷载	19
2.1 爆炸荷载的分类	19
2.1.1 无约束爆炸荷载	19
2.1.2 约束爆炸荷载	22
2.1.3 作用于建筑结构上的爆炸荷载	23
2.2 建筑外部爆炸情况下作用于结构上的爆炸荷载	24
2.2.1 城市复杂环境中作用于建筑结构上的爆炸荷载	24
2.2.2 建筑外部爆炸作用于结构柱上的爆炸荷载	43
2.3 建筑内部爆炸情况下作用于结构上的爆炸荷载	81
2.3.1 典型结构内部爆炸波的传播规律与超压荷载模型	81

2.3.2 地铁车站内爆炸波的传播规律与超压荷载模型	93
2.4 本章小结	122
参考文献	123
第3章 建筑材料的动态本构关系	126
3.1 混凝土	126
3.1.1 混凝土抗压强度的应变率效应	127
3.1.2 混凝土抗拉强度的应变率效应	130
3.1.3 混凝土的动态本构模型	131
3.2 结构钢材与钢筋	140
3.2.1 钢材的应变率效应	140
3.2.2 钢材动态本构模型	143
3.3 砌体	145
3.3.1 黏土砖的动态增大系数	145
3.3.2 砂浆的动态增大系数	146
3.3.3 黏土砖和砂浆的动态本构模型	148
3.4 本章小结	151
参考文献	151
第4章 爆炸荷载作用下结构构件的动态响应与损伤破坏	161
4.1 钢筋混凝土柱	161
4.1.1 钢筋混凝土柱动力响应的数值模拟	162
4.1.2 钢筋混凝土柱动力响应的参数分析	167
4.1.3 钢筋混凝土柱的破坏模式	171
4.2 钢柱	173
4.2.1 考虑损伤累积效应钢材的动态本构模型	173
4.2.2 考虑材料损伤累积影响的评判标准	174
4.2.3 损伤演化方程	174
4.2.4 爆炸荷载作用下钢柱的动力响应和破坏模式	175
4.3 钢筋混凝土梁	179
4.3.1 钢筋混凝土梁抗爆性能分析的数值模型	180
4.3.2 钢筋混凝土梁的破坏模式	187
4.3.3 钢筋混凝土梁抗爆性能的影响因素分析	191
4.4 钢筋混凝土板	199
4.4.1 钢筋混凝土板的计算模型	200
4.4.2 钢筋混凝土板动力响应的影响因素分析	202
4.4.3 钢筋混凝土板的破坏形态分析	207

4.5 砌体填充墙	215
4.5.1 裂缝发展和碎片形成理论	216
4.5.2 砌体材料模型	219
4.5.3 砌体墙有限元模型和爆炸响应分析	229
4.5.4 爆炸荷载作用下砌体墙碎片尺寸分析	233
4.5.5 爆炸荷载作用下砌体墙的碎片抛射距离分析	235
4.5.6 爆炸荷载作用下砌体墙的碎片统计特性	239
4.5.7 爆炸荷载作用下砌体墙的破碎过程模拟	251
4.6 本章小结	255
参考文献	256
第5章 爆炸荷载作用下结构构件的损伤程度评估	262
5.1 确定结构构件 $P-I$ 曲线的现有方法	263
5.1.1 解析方法	263
5.1.2 试验方法	264
5.1.3 数值方法	265
5.2 钢筋混凝土柱	265
5.2.1 确定钢筋混凝土柱 $P-I$ 曲线的简化数值方法	265
5.2.2 钢筋混凝土柱 $P-I$ 曲线的参数分析	271
5.2.3 任意钢筋混凝土柱 $P-I$ 曲线的预测公式	275
5.2.4 比较和验证	277
5.3 钢柱	280
5.3.1 钢材材料模型	280
5.3.2 爆炸荷载作用下钢柱的损伤评估	288
5.3.3 爆炸荷载作用后钢柱的抗火分析	292
5.4 钢筋混凝土板	303
5.4.1 破坏参数	303
5.4.2 基准极限弯矩	304
5.4.3 冲击破坏及 $P-I$ 曲线的绘制	305
5.5 本章小结	308
参考文献	308
第6章 爆炸荷载作用下建筑结构的连续倒塌分析方法	311
6.1 直接模拟方法	311
6.2 替代传力路径法	312
6.3 考虑爆炸荷载效应的新方法	314
6.3.1 临界炸药起爆位置和炸药量的确定	314

6.3.2	结构构件非零初始条件的确定和数值模拟	315
6.3.3	结构构件初始损伤的确定和数值模拟	318
6.3.4	构件非零初始条件和初始损伤确定方法的数值验证	319
6.3.5	连续倒塌分析新方法的一般分析步骤	320
6.3.6	比较和验证	321
6.4	子结构法	335
6.4.1	子结构选取原则	335
6.4.2	子结构边界条件的确定	337
6.4.3	结构倒塌判定准则及抗连续倒塌性能评估方法	338
6.4.4	钢框架抗连续倒塌性能评估	339
6.5	本章小结	345
	参考文献	346
第7章	爆炸荷载作用下建筑结构的连续倒塌机制	348
7.1	钢筋混凝土框架结构的连续倒塌机制	348
7.1.1	材料模型的选取	349
7.1.2	建模中应注意的问题	350
7.1.3	钢筋混凝土框架结构连续倒塌分析	351
7.2	高层钢筋混凝土结构的连续倒塌机制	360
7.2.1	高层钢筋混凝土结构多尺度模型的建立	360
7.2.2	高层钢筋混凝土结构连续倒塌分析	362
7.2.3	高层钢筋混凝土结构连续倒塌机制与倒塌模式	365
7.3	钢框架结构的连续倒塌机制	369
7.3.1	框架梁、柱表面爆炸荷载计算	370
7.3.2	爆炸荷载作用下钢框架结构的动态响应与破坏倒塌分析	379
7.4	钢平板网架的破坏倒塌	385
7.4.1	平板网架结构有限元模型和爆炸荷载	386
7.4.2	爆炸荷载作用下平板网架结构的破坏倒塌分析	387
7.5	本章小结	403
	参考文献	403
第8章	建筑结构抗爆设防标准与概念设计	406
8.1	建筑结构抗爆设防标准	407
8.1.1	抗爆设防烈度	407
8.1.2	抗爆设防等级	409
8.1.3	抗爆设防标准	412
8.1.4	抗爆设防类别	417

8.2 建筑结构抗爆概念设计	418
8.2.1 抗爆概念设计的重要性	418
8.2.2 抗爆防护设计目标	419
8.2.3 抗爆概念设计理念	419
8.2.4 抗爆构造措施	426
8.2.5 建筑结构抗爆概念设计要点	431
8.3 建筑结构抗爆防护安全指标	432
8.3.1 爆炸破坏效应	432
8.3.2 爆炸防护荷载标准	434
8.3.3 比例距离	437
8.3.4 防护安全指标	440
8.3.5 天津西站抗爆防护分析	441
8.4 本章小结	443
参考文献	444
索引	447
彩图	

第1章 绪 论

随着人类社会物质生产力的巨大发展,人们的工作和生活条件得到了质的改善。然而在人们尽享现代文明和富足生活之时,诸如地震、飓风、火山喷发、海啸、战争、恐怖袭击以及生产生活中的意外事故等各种自然或人为灾害时有发生,导致大量的财产损失和众多的人员伤亡,严重干扰和阻碍了人类社会的稳定和文明的进步^[1,2]。在这些灾害中,作为一种特殊的灾害类型,因恐怖袭击以及生产和生活中的疏忽和不慎而引发的各种突发性爆炸事故,越来越受到人们的重视。爆炸一旦发生,不仅直接对爆源附近的人员和财产造成杀伤和毁坏,而且爆炸产生的冲击波以及飞片作用到周边建筑上,还可引起建筑结构的局部破坏甚至整体倒塌,从而加剧灾害程度。

如何有效地防止建筑结构在各种突发性强烈爆炸作用下发生破坏和倒塌,从而大幅度地降低人民生命和财产的损失,已经成为各国科学研究与工程技术人员所面临的一项重要而又迫切的攻关课题。当前的主要研究领域有如下三个方面:①通过搜集情报、排除隐患,预防爆炸发生;②通过设置障碍,隔离爆源,防护爆炸对建筑的冲击作用,避免建筑的破坏和倒塌;③通过建筑抗爆设计与加固,抗御爆炸对建筑的冲击作用,防止建筑的破坏和倒塌。土木工程领域的专家和学者更多关注的是②和③方面的研究,因此,本书亦针对②和③对建筑结构的抗爆防爆设计,防倒塌设计以及防护设计等方面进行阐述。

1.1 恐怖或意外爆炸事件中建筑结构的破坏现象

建筑结构内部或周围的恐怖或意外爆炸在造成人员伤亡的同时,往往会造成建筑物的局部或整体破坏。有的爆炸事件能够摧毁整座建筑结构,有的则导致结构局部关键构件的失效或者引起砌体填充墙、门窗等非受力构件的破坏。与此同时,建筑结构在爆炸引起的碎片、地面振动以及火灾等次生灾害作用下,亦有可能发生显著的局部破坏,以及因局部破坏引起的连续倒塌。

爆炸事件引起的建筑结构破坏,一方面取决于结构本身的类型、几何布置、材料等,另一方面则取决于炸药与结构的相对位置以及炸药的质量。本小节将简单综述近几十年来恐怖或意外爆炸事件引起的建筑结构破坏情况。近几十年,世界范围内已经发生的爆炸事件众多,并且导致了很多的建筑结构受到破坏,本节仅从不同国家的众多爆炸事件中选取典型事件进行描述。

1.1.1 Oklahoma 州联邦大楼

1995 年 4 月 19 日美国 Oklahoma 州联邦大楼门前遭汽车炸弹爆炸事件为美国遭受的较大恐怖袭击之一。根据爆炸事件后的分析,一辆载有重约 1800kg 炸药的汽车炸弹,停放在距离大楼北侧(正面)3~5m,距离大楼东部 12~15m 处发生爆炸,导致 168 人死亡,500 多人受伤,引发建筑前部的连续坍塌,导致整个建筑毁坏,如图 1.1 所示。除此之外,联邦大楼周围约 75 栋建筑物,也受到了不同程度的破坏。



(a) 爆炸前



(b) 爆炸后

图 1.1 美国 Oklahoma 州联邦大楼汽车炸弹爆炸事件

该联邦大楼共 9 层,为钢筋混凝土框架结构,长 61.5m,宽 21.5m。爆炸引起的巨大爆坑长 9.15m,宽 2.45m。爆炸破坏掉了 4 根底层柱,包括 3 根前排柱,1 根中排柱。上层地板向北方下倾,导致 200mm 厚的钢筋混凝土板脱离中排柱,最终导致建筑北部 10 跨中的 8 跨,建筑南部失效中排柱两侧的 2 跨倒塌。同时,在南入口处二层的相邻两跨楼板倒塌。

1.1.2 纽约世贸中心大厦

早在 1993 年 2 月 26 日,纽约世贸中心地下停车场发生汽车炸弹爆炸,致使 6 人死亡、1000 多人受伤,地下室的多层楼板被炸开一个大洞,如图 1.2 所示。若按恐怖分子预想的遭爆炸破坏的一座大楼倒向另一座大楼,则可能会引起高达数万人死亡。



图 1.2 纽约世贸中心大厦内部遭汽车炸弹袭击事件

纽约世贸中心两座塔楼在地面以上均为 110 层,高 411m,另有 6 层地下室。塔楼平面为正方形,边长 63m,采用钢框架套筒体系,9 层以下承重外柱间距为 3m,9 层以上外柱间距为 1m,标准层窗宽约 0.55m。

据事后判断,汽车炸弹炸药重约 900kg,于北塔地下 2 层停车场南墙附近发生爆炸。爆炸造成了地板的严重破坏,北塔南墙上的砌体填充墙碎片被抛射到建筑外部。

2001 年 9 月 11 日,恐怖分子劫持了 2 架商业飞机,分别撞向了纽约世贸中心双子塔,随后发生爆炸并引发火灾,造成两座摩天大楼彻底倒塌和近 3000 人死亡,如图 1.3 所示。



(a) 撞击前



(b) 撞击后

图 1.3 纽约世贸中心大厦遭飞机撞击事件

纽约世贸中心双子塔遭到撞击后,虽然显著遭到破坏,尤其是局部破坏,整个建筑结构并未倒塌。然而,由于每架飞机都载有大量燃油,燃油泄漏到地板上、电梯间等处,导致上部建筑的严重火灾。火灾导致钢框架结构的钢材强度降低,最终导致了两幢建筑结构的整体坍塌。建筑结构倒塌时,建筑碎片抛向周围的建筑结构,导致部分结构的严重破坏,以及一些结构的倒塌。事件造成 10 幢建筑整体或局部坍塌,超过 3000 万 ft^2 ^① 的商业办公空间不能正常使用。

1.1.3 伦敦 Ronan Point 公寓楼

1986 年 5 月 16 日,英国伦敦 Ronan Point 公寓楼因 18 层东南角某室内煤气爆炸而导致大楼一角连续倒塌,造成 4 人死亡,17 人受伤。

Ronan Point 公寓楼共 22 层,高 64m,由预制构件装配而成。该楼建于 1966~1968 年,由于当时伦敦正处在第二次世界大战之后的重建期,为了加快建设速度,这一时期的建筑多采用工厂预制结构构件,现场整体装配的建设形式。

煤气爆炸由 18 层东南角的居住者点燃火柴引起,爆炸首先引起该房间外墙破坏,由于该外墙直接承受上部荷载,直接导致 19~22 层的上部结构连续的坍塌,上部四层的楼板落到 18 层楼板上产生的冲击效应导致该楼板破坏,自上而下坍塌,直到地面,如图 1.4 所示。

^① 1ft^2 (平方英尺) $=9.290304\times 10^{-2}\text{m}^2$ 。



图 1.4 伦敦 Ronan Point 公寓楼燃气爆炸事件

研究表明,导致伦敦 Ronan Point 公寓楼连续坍塌的爆炸荷载低于 70kPa ,该楼的倒塌是由于设计缺陷,导致结构整体性能差。

1.1.4 辽宁盘锦某办公大楼

1990年2月12日,辽宁盘锦某办公大楼因天然气管道泄漏遇明火爆炸, 3600m^2 的办公大楼全部坍塌,造成 24 人死亡,17 人受伤。

该办公大楼共 5 层,与 1 层的裙房相连,如图 1.5 所示,为砖混结构,按照 7 度抗震设防标准设计。



图 1.5 辽宁盘锦某办公大楼煤气爆炸事件

当天,与该办公大楼相连的独立单层裙房内发生天然气管道泄漏,早晨遇明火后发生燃气爆炸,爆炸压力通过门厅进入办公楼的底层,爆炸冲击波推倒了一面承重墙,进而引起大楼的连续倒塌,整个大楼瞬时夷为平地。

1.2 爆炸破坏效应

爆炸作用对邻近建筑、设备和人员等均产生强烈的破坏效应。根据作用原理不同,其破坏效应体现在四个方面,即爆炸冲击波的破坏效应;爆炸碎片的破坏效应;爆炸地震的破坏效应;爆炸引发的次生灾害。

1.2.1 爆炸冲击波的破坏效应

以空气为传播介质的爆炸冲击波是最主要的爆炸破坏形式。用于表征爆炸冲击波杀伤力的参数包括超压峰值、超压冲量、动压等。

冲击波对人体的伤害主要表现在对肺、鼓膜、肝脏等器官的破坏作用。当超压峰值到达一定数值后,人体各种器官将产生不同程度的损伤。生理学研究表明肺在不同超压峰值情况下的破坏概率可用图 1.6 表示^[3]。

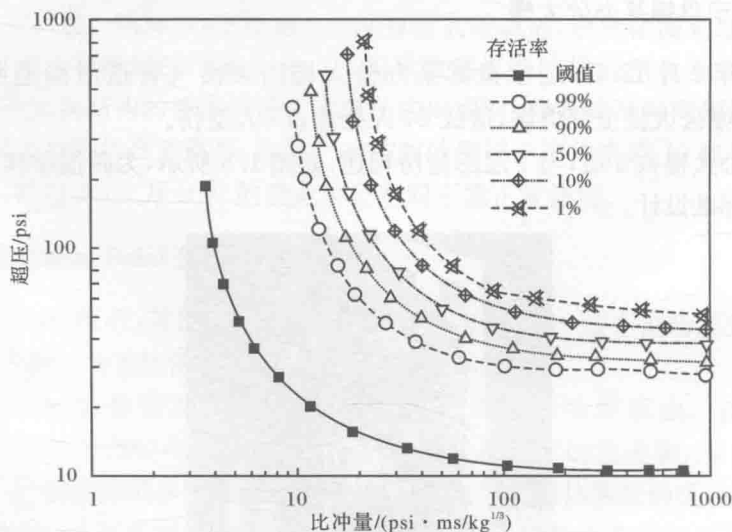


图 1.6 爆炸超压与肺破坏概率的关系^[3] (1psi(每平方英寸)=0.155cm⁻²)

冲击波对建筑物的破坏程度不仅与爆炸荷载的特点有关,还与结构自振周期 T 有关。若爆炸正压持时 t_p 远远小于 T ,则建筑物的破坏程度取决于爆炸冲击冲量;若爆炸正压持时 t_p 远远大于 T ,则建筑的破坏取决于冲击波的超压峰值。根据对一些爆炸事件中建筑物破坏程度的统计,得到表 1.1 所列的统计结果^[4]。

表 1.1 空气冲击波超压、冲量与建筑物破坏程度的关系^[4]

超压值/($\times 10^5$ Pa)	冲量值/($\times 10^{-3}$ N $\cdot$ s/m ²)	建筑物的破坏程度
0.001~0.05	0.01~0.015	门窗玻璃完全无损
0.08~0.10	0.016~0.02	门窗玻璃有局部损坏
0.15~0.20	0.05~0.10	门窗玻璃完全破坏
0.25~0.40	0.10~0.30	门、窗框、隔板损坏;不坚固的干砌砖墙、铁皮烟囱被摧毁
0.45~0.70	0.30~0.60	轻型结构完全破坏;输电线铁塔倒塌;大树连根拔起
0.75~1.00	0.50~1.00	砖瓦结构的房屋被摧毁;钢结构建筑物严重破坏

对于部分特殊建筑物,需特别考虑正压消逝后的负压作用。与正压阶段相比,负压的峰值较小,但持时较长,因此,一般情况下,负压冲量与正压冲量相当。对于一些由脆性材料构成的建筑物,在高压正压作用下,易开裂,甚至形成大量碎片,建材的开裂消耗大量爆炸波正压能量,当碎片的抛射动能不大时,易在负压的吸力作用下往与爆炸波相反的方向运动。

1.2.2 爆炸碎片的破坏效应

根据碎片母体不同,爆炸所产生的碎片可分为一级碎片和二级碎片两大类。一级碎片通常是指炸药金属壳体或容器在爆轰发生时猝然解体而产生的金属碎片;二级碎片是指建筑物或设备在爆炸荷载作用下开裂、破碎形成的碎片。决定碎片破坏力和杀伤力的因素包括碎片数量、碎片尺寸、碎片抛射速度等。

与二级碎片相比,一级碎片具有抛射速度快、数量多、尺寸小等特点。碎片特性与炸药容器的形状、厚度、材质、工艺等因素有关。一级碎片的特性在一定程度上是可预判的,是炸弹设计的一项重要设计内容。

除了碎片速度,一级碎片的重量分布、抛射轨迹等重要特性均可按照一些经验公式计算确定。

关于爆炸产生的二级碎片的研究比较复杂。二级碎片的特性与爆炸荷载、碎片母体材料特性、结构约束条件等诸多不确定因素相关。因此,二级碎片的破坏效应难以预估。但是,由于脆性建筑材料普遍应用于建筑物中,在爆炸发生时,由二级碎片导致的伤亡和破坏效应不容忽视。

人员对碎片撞击的承受力很低。试验数据表明,爆炸碎片刺透皮肤概率达到50%所需的碎片速度,随碎片撞击面积与其质量的比值增大而增加^[5]。一级碎片的速度快、质量小,因此对人员的杀伤力很大;二级碎片的质量较大,当与人体发生碰撞时也同样会给人体产生严重损伤。