

中国矿业大学图书馆藏书



C02374352



大跨空间结构爆炸 荷载及破坏响应

支旭东 范 峰 马加路 祁少博 著

Blast Loading and Failure Responses of
Large Span Space Structures Under Explosions



科学出版社

大跨空间结构爆炸荷载 及破坏响应

支旭东 范 峰 马加路 祁少博 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地总结了作者在大跨空间结构抗爆炸领域的研究成果及前沿进展,内容主要包括爆炸作用下空间结构遭受的冲击波荷载及破坏响应两方面。通过爆炸试验与数值仿真,获得了曲面壳体内、外表面冲击压力模型,掌握了冲击波沿曲面壳体的传播规律,建立了单层球面网壳爆炸荷载下的破坏模式、破坏机理及风险评估理论。

本书适合土木工程领域的学者、技术人员,以及高等院校相关专业的高年级本科生、研究生和教师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大跨空间结构爆炸荷载及破坏响应 / 支旭东等著. —北京: 科学出版社, 2020.7

ISBN 978-7-03-064569-2

I. ①大… II. ①支… III. ①大跨度结构-空间结构-抗爆性-研究 IV. ①TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 036635 号

责任编辑: 狄源硕 朱灵真 / 责任校对: 樊雅琼
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 7 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2020 年 7 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 257 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

2001年在美国发生的“9·11”恐怖袭击事件震惊了全世界，该事件所带来的经济损失、人员伤亡十分惨重。这次事件除给人类的思想意识带来巨大冲击外，也激发了国内外学者对民用建筑反恐抗爆措施的关注，相关的研究迅速展开，并在梁、板、柱、墙等构件的抗冲击/抗爆炸性能，新型/高性能混凝土及复合材料的动态本构，由这些材料组成的各种复合构件的耗能能力，民用建筑物抗冲击/抗爆炸的防护构造措施，以及多高层结构抗连续倒塌机理等方面积累了一系列重要成果。

近半个世纪以来，与建筑科技的进步和人类对生活环境的需求不断提升相呼应，大型公共建筑及相应的大跨空间结构发展十分迅速，其中有许多已成为一个城市或区域的标志性建筑。作为人流密集的大型公共建筑，显然极易成为恐怖袭击选择的目标，因而对这些重要建筑物采取必要的反恐防护措施具有重要的现实意义。事实上，目前对一些具体工程，如交通枢纽、会展建筑、大型体育场馆等，在方案规划上已经或多或少地考虑了这一问题。但受到研究成果的限制，目前的解决方案还是多采取“阻隔”的方式，即从交通流线上、建筑构造上、安保措施上使可能的冲击荷载远离主体结构；对于结构在直接受到冲击/爆炸作用时将承受多大的冲击力、结构将如何反应等理论问题，则知之甚少。

哈尔滨工业大学空间结构研究中心三十余年来致力于大跨空间结构领域的系统理论研究，在网壳结构非线性稳定、悬索结构解析理论、大跨度屋盖风荷载及抗风设计理论、网壳结构动力稳定性及强震下的失效机理等前沿领域均做出了自己的贡献。作为该研究中心的核心成员，作者在当时形势下认为，对大跨空间结构在冲击/爆炸荷载下的响应机理、失效模式、防护措施等问题进行系统深入研究是他们义不容辞的责任；这对于我国大跨空间结构的合理建造和防护具有重要的理论意义和实用价值。作为与国防工业紧密联系的科研院校，哈尔滨工业大学在建筑工程抗冲击/抗爆炸方面的研究工作开展得很早，但早期重点是关于人防工程方面的研究。“9·11”事件发生后，哈尔滨工业大学成立了国防抗爆与防护实验室，并进一步完善了必要的试验设备，这为作者的研究工作提供了重要支持。

自2005年起，作者选择大跨空间结构中常用的结构形式——网壳结构作为研究对象，以飞机意外撞击、施工高空坠物等为背景开始了冲击作用下结构失效机理的探索；随后，针对大跨空间结构在冲击/爆炸作用下的一系列理论问题不断扩展

研究方向，持续至今。经过十余年的持续努力，作者认为所取得的成果已较为系统完整，形成了比较完善的理论体系；由于内容较多，特将这些成果按抗冲击和抗爆炸两部分分别总结成册，与同行交流，并希望能为后续研究提供一定的借鉴。

我对作者及其研究团队（包括他们指导的许多研究生）十余年来所做的工作比较了解，觉得他们在抗冲击/抗爆炸方面取得的成果的确很有意义，不仅对加强大型公共建筑的反恐防护措施提供了科学依据，也对研究中心一直致力的为空间结构建立系统理论体系这一长期目标做出了贡献。

我乐于为之作序。

沈世钊 院士/教授
哈尔滨工业大学
2019年9月11日

前 言

爆炸是一种偶然荷载作用，发生概率低，在很长一段时间内并未得到工程领域科研人员的重视。直到美国的“9·11”事件后，人们才开始意识到，在当今社会环境下，民用建筑也会遭受飞机撞击、汽车炸弹等恐怖袭击，再加上近些年化工厂、危险品仓储结构、工业能源结构不断发生爆炸事故，民用建筑的反恐、抗爆防护逐渐引起了研究者的关注。大跨空间结构常用作人员密集区域的交通枢纽、体育场馆、工业厂房或高风险建筑，遭遇偶然爆炸、恐怖袭击的概率更大，其在抗爆安全方面的需求也更为迫切。

与冲击荷载有很大区别，爆炸荷载以大范围的“面”的形式施加在工程结构上，而且爆炸冲击波从爆源开始向结构表面传播，在遭遇结构后有复杂的反射、折射、衍射等传播现象，使得作用在结构上的荷载存在明显的时空分布特性且更为复杂，结构的响应也与冲击荷载作用下的情况明显不同。正是为了理解这些理论问题，为了建立大跨空间结构的抗爆防护理论，本书作者及团队成员从2007年开始深入这一研究方向并开展工作。在当时，大跨空间结构的抗爆研究成果非常稀少，作者基于在大跨空间结构理论研究上的技术积累，在复杂曲面结构的爆炸荷载和网壳结构的爆炸响应两个方面同时开展工作，建立了不同曲面壳体表面的爆炸荷载模型，定义了网壳结构的爆炸破坏模式；在后续的工作中则不断补充、拓展，开展了建筑钢材、索材，以及各类高性能吸能材料的动态特性及本构模型研究，开展了刚性壳体模型的爆炸荷载试验和缩尺模型的破坏性试验，研究了网壳结构在爆炸荷载下的破坏概率及基于概率的风险评估方法等。经过十余年的工作，尽管还有许多理论问题需要解决、丰富，研究工作还在持续深入，但是大跨空间结构抗爆炸的理论体系已经基本建立，研究成果对于实现大跨空间结构的抗爆分析及防护评估提供了可行的技术方法。基于上述考虑，特将这些研究成果总结成册，与同行交流，并希望能为后续研究提供一定的借鉴。

在研究过程中，除本书作者外，还有很多的研究生参与完成了书中所述的工作，王海峰、倪晋峰、梁婷婷、杨帆、邵庆梧、郭梦慧、姚峰峰、黄超均以本方向作为主要内容完成了学位论文，他们配合开展的较多试验、数值分析为本书的撰写提供了丰富的素材。研究中作者还受到国家重点研发计划课题（2018YFC0705703）、国

国家自然科学基金项目（50978077、51478144）的持续资助，在此一并表示感谢。
由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

支旭东

2019年9月11日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大跨空间结构抗爆研究的背景和意义	1
1.2 建筑物上的爆炸荷载	2
1.3 工程结构的爆炸响应	3
1.4 大跨空间结构抗爆研究的特殊性	5
参考文献	6
第 2 章 球面壳体的内爆荷载	9
2.1 球面壳体中心内爆测压试验	10
2.1.1 试验方案及设计	10
2.1.2 试验现场准备	11
2.1.3 试验结果	14
2.2 爆炸荷载大小及分布特性	20
2.2.1 数值仿真方法及验证	20
2.2.2 爆炸荷载分布规律	23
2.2.3 非中心爆炸荷载分布规律	28
2.3 内爆荷载简化模型	30
参考文献	33
第 3 章 大跨平屋盖结构的内爆荷载	34
3.1 有限元建模	34
3.2 1/4 模型峰值超压场特性	36
3.2.1 冲击波传播特性	36
3.2.2 结构超压分布	38
3.2.3 参数分析	39
3.3 矩形 1/2 模型峰值超压场特性	42
3.3.1 冲击波传播特性	42
3.3.2 结构超压分布	44
3.3.3 参数分析	46
3.4 对角线 1/2 模型峰值超压场特性	48
3.4.1 冲击波传播特性	48

3.4.2	参数分析	50
3.5	平屋盖结构峰值超压场模型	51
3.5.1	屋盖超压场分区简化	51
3.5.2	形函数插值法	59
3.5.3	基于作用叠加的峰值超压场预测	60
第4章	球面壳体的外爆荷载	70
4.1	球面壳体外爆测压试验	70
4.1.1	试验目的与方案	70
4.1.2	试验概况	72
4.1.3	传统半经验公式的误差讨论	73
4.2	球壳外爆仿真技术及屋盖荷载特性	74
4.2.1	有限元模型建立	74
4.2.2	流固耦合效应	76
4.2.3	平行效应	77
4.2.4	超压时程曲线简化	81
4.2.5	壳面爆炸流场传播规律	82
4.3	球壳外爆荷载参数分析	87
4.3.1	反射效应	87
4.3.2	清除效应	89
4.4	球壳外爆荷载简化模型	91
4.5	球面壳体外爆荷载的不确定性	93
4.5.1	外爆荷载不确定性试验	93
4.5.2	外爆荷载概率分布	97
4.5.3	基于分位值的球壳外爆荷载因子	104
	参考文献	106
第5章	单层球面网壳结构的内爆破坏机理	108
5.1	内爆分析方法	108
5.2	内爆失效模式	110
5.2.1	失效模式1: 小幅振动	110
5.2.2	失效模式2: 局部凹陷	112
5.2.3	失效模式3: 冲胀变形	114
5.2.4	失效模式4: 整体塌陷	116
5.2.5	失效模式5: 冲破破坏	118
5.3	内爆破坏机理分析	120
5.4	中心内爆作用参数分析	121

5.4.1 均布脉冲作用	122
5.4.2 基于内爆荷载模型的失效规律	124
5.4.3 两种加载方式结果对比	126
参考文献	128
第 6 章 单层球面网壳结构的外爆破坏响应	129
6.1 外爆响应数值分析方法	129
6.1.1 数值分析模型建立	129
6.1.2 ConWep 方法的适用性	131
6.2 单层球面网壳外爆响应参数分析	137
6.2.1 炸药质量	137
6.2.2 炸药高度	138
6.2.3 炸药水平偏离距离	139
6.2.4 矢跨比	139
6.2.5 杆件截面	140
6.2.6 屋面板厚度	140
6.2.7 屋面质量	141
6.3 单层球面网壳外爆失效模式	142
6.4 单层球面网壳结构损伤模型	143
6.5 单层球面网壳外爆损伤程度分级	145
6.6 单层球面网壳缩尺模型外爆试验	147
6.6.1 可燃气体外爆试验	147
6.6.2 固体 TNT 炸药外爆试验	151
参考文献	159
第 7 章 爆炸作用下单层球面网壳的风险及防御	160
7.1 引言	160
7.2 单层球面网壳有限元模型	160
7.3 单层球面网壳在外爆作用下的可靠度	161
7.3.1 基于 Monte-Carlo 抽样的可靠度分析	162
7.3.2 单层球面网壳的失效概率	167
7.4 单层球面网壳在外爆作用下的风险评估	174
7.4.1 风险评估的基本原理	175
7.4.2 爆炸作用下网壳结构经济损失模型	175
7.4.3 基于防撞柱防护措施的评估与布置优化	177
7.4.4 基于投资最优原则的结构方案优化	181
参考文献	193

第1章 绪 论

1.1 大跨空间结构抗爆研究的背景和意义

大跨空间结构具有优美的造型和空间受力性能,近30年来高速发展,在国内外的重大工程中获得了广泛应用。很多结构已经成为一个城市或区域的地标性建筑,并代表了这一时代的建筑科技水平。例如,我国为2008年北京奥运会建设的国家体育场鸟巢(短轴为296.4m,长轴为332.3m),屋面为马鞍形曲面的壳体结构,采用了钢构件“编织”的网格形式,在结构构型、材料组成、构件制造等方面均有重要创新;2005年完成的国家大剧院,覆盖212m(长轴)×144m(短轴)的准椭圆空间,这两项空间结构均已成为北京市的地标性建筑。1997年建成的名古屋穹顶,是目前跨度最大(187m)的单层球面网壳结构,其三向网格形式构成了一个简洁通透的室内空间,充分体现单层网壳结构的优势。随着人类对建筑功能需求的提升,空间结构在向更大体量、更大跨度、更复杂体型发展,其社会、经济重要性不断增强,抗灾防御能力的需求提升已经成为结构工程领域的理论挑战。

近年来,世界社会政治形势不断演变,爆炸恐怖袭击在世界范围内不断发生,严重威胁重要公共建筑、人员密集场所的安全。据不完全统计,仅1980~1999年短短20年时间里美国境内就发生了457起恐怖袭击。这其中包括美国俄克拉何马城的爆炸案(图1-1),除造成848人的伤亡外,还使得方圆16个街区的324幢建筑受损。进入21世纪后,世界上发生恐怖袭击的概率持续增长。最为典型的是“9·11”恐怖袭击事件(图1-2),世贸双塔的设计代表了当代先进设计水平,甚至曾考虑过Boeing707飞机的撞击作用,但事件中的飞机撞击及一系列并发作用仍然导致了世贸双塔的连续倒塌,直接造成近3000人死亡,以及其后严重的社会及心理负面影响。除此之外,易爆品存储不当、室内燃气爆炸等偶然爆炸荷载作用每年也给人类造成了巨大的财产损失与人员伤亡。2007年11月24日,上海市一个加油站内意外发生爆炸,导致4人死亡,约40人不同程度受伤;2011年11月1日,两辆装有72t炸药的汽车在贵州马场坪收费站发生爆炸,事故导致8人死亡,约300人受伤;2015年8月12日,天津市滨海新区瑞海公司危险品仓库发生重大爆炸事故,造成165人遇难,798人受伤,受损建筑达304幢,核定的直接经济损失高达69亿元。可以看出,研究这些公共建筑在遭受爆炸荷载作用时的破坏

机理,掌握可靠的抗爆防护措施,恰当提高建筑的防护能力,对于在遭受偶然爆炸事件时降低结构的破坏程度、减轻经济损失具有重要意义。



图 1-1 俄克拉何马城爆炸 (1995 年)

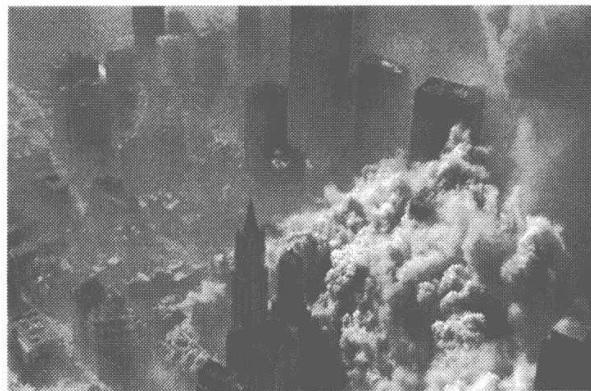


图 1-2 “9·11”恐怖袭击事件 (2001 年)

由于爆炸荷载的特殊性,能量大、持时短,荷载瞬间作用下材料的动态表现与静态情况下差异巨大,因此其研究难度很大。传统工程结构的抗爆研究主要集中在军事领域,为军事工程服务;直到“9·11”事件后,民用建筑反恐抗爆炸、抗冲击的研究才真正引起国内外学者的重视并全面展开,在近些年取得了相当多坚实的成果。为了从宏观上大致了解本书作者开展研究时的技术基础和学术背景,下面对国内外相关领域的研究成果进行简述,主要从建筑物上的爆炸荷载和工程结构的爆炸响应两个方面展开。

1.2 建筑物上的爆炸荷载

在近一个世纪,国内外学者基于大量爆炸试验,针对爆炸荷载的计算回归了许多半经验公式,被广泛地应用于各种领域。关于建筑物上爆炸荷载的成果,目前能够查阅到的最为系统的资料是美国军方发行的 UFC 3-340-02 手册(2008)(在 TM5-1300 基础上进行修订而成),手册中几乎涵盖了各种典型条件下的爆炸问题,并提供了一系列用来预测不同条件建筑物上爆炸荷载的公式和图表。李翼祺(1992)是国内较早对爆炸问题开展全面研究的学者,他对炸药的性质、爆炸冲击波传播、防护工程设计等一系列问题进行了详细的分析与探讨,同时在其《爆炸力学》一书中还专门针对各国研究人员提供的爆炸荷载经验公式进行了综述,并将各经验公式与我国国防规范中所提供的荷载预测公式进行了对比,进而阐述了各国对于爆炸荷载取值的不同认识。许多学者对建筑物上的爆炸荷载进行了试验,积累了大量的试验数据。学者 Hu 等(2011)、Wu 等(2013; 2010)基于爆炸试验结果,对炸药的各种参数对爆炸荷载的影响进行了讨论,其中包含了炸药当量、

形状、位置,以及多点起爆问题等。中国人民解放军陆军工程大学的方秦等(2007)、杨石刚等(2014)、鲍麒等(2012)对化学炸药、气体爆炸等的爆炸荷载进行了细致的研究,对炸药爆炸的爆轰过程进行了讨论,同时也对比了不同浓度的可燃气体发生爆炸时爆炸荷载的影响。

现阶段,用数值模拟方法研究爆炸荷载成为越来越多人的选择。中北大学的张广福等(2009)通过数值模拟的方法对爆炸产生的冲击波在自由空气中的传播规律进行了研究,结果表明 LS-DYNA 对自由空气中爆炸荷载的模拟结果与通过爆炸超压经验公式计算的结果基本一致。中国人民解放军火箭军工程大学的丁宁等(2008)基于 LS-DYNA 对球形炸药在无限水域中发生爆炸时荷载问题的研究,对模型的网格、状态方程以及黏性等一系列参数的取值进行了讨论,研究表明,合理地设置建模参数能够获得较为精确的爆炸荷载。爆炸冲击波形成之后会在介质中不断地传播,与此同时也会因为遇到障碍物而产生一定的反射及绕射现象。这种情况通常非常复杂,一般均是通过数值模拟来详细地了解其反射及绕射的整个过程。天津大学的李忠献等(2009)通过使用 LS-DYNA 中的任意拉格朗日-欧拉(arbitrary Lagrange-Euler, ALE)方法,对爆炸冲击波在城市复杂环境中的传播进行了研究。武汉理工大学的申祖武等(2006)通过使用 ALE 方法研究了障碍物对空气冲击波的复杂环流现象的影响。结果表明,该方法能够较好地描述空气冲击波流场的分布和变化,数值模拟的结果与客观规律基本一致。同时,爆炸冲击波作用于结构上时还会在其内部产生应力波,其中拉伸波也是造成脆性材料发生破坏的主要原因。长沙矿冶研究院的高文蛟等(2001)对爆炸应力波的透射系数进行了理论研究,得到了爆炸冲击波在有一定厚度的结构表面传播时其透射系数的理论公式及入射角与透射系数之间的关系。中国人民解放军陆军工程大学的国胜兵等(2005)针对爆炸引发地震动的问题提出了精细化的功率谱密度幅值包络图模型,并根据能量守恒定律对其进行了研究。

1.3 工程结构的爆炸响应

相对于建筑上爆炸荷载的研究,更直接的是研究爆炸作用下结构或构件在爆炸发生时的动态响应,即结构的损伤破坏状态;但由于材料在高速冲击作用下反应的复杂性、爆炸荷载作用的局域性,当前在构件层面上的研究成果更多一些。

梁是最基本的结构构件,加拿大的 Nassr 等(2012)对宽翼缘梁在爆炸作用下的动力响应模式进行了讨论,澳大利亚的 Jama 等(2009)在对薄壁方钢管爆炸响应的研究中考虑了应变率效应和温升软化效应,贾昊凯和吴桂英(2012)以及同济大学的匡志平等(2009)、中国人民解放军陆军工程大学的柳锦春和方秦(2003)则分别研究了 H 型钢梁、钢筋混凝土梁的失效模式。包括以上几例的大

量梁方面的研究均可以得到以下两点主要结论：①材料的应变率效应和温升软化效应是不可忽略的影响，因此材料在高应变率下的动态本构以及高温性能往往是构件乃至结构抗爆研究的基础工作；②不同于静态、准静态下梁构件多以弯曲破坏为主，在高速冲击作用下梁构件很多情况下会发生剪切破坏模式，这种剪切破坏没有征兆，也被定义为“直剪破坏”。对柱的研究与梁类似，韩国的 Lee 等（2009）对爆炸作用下宽翼缘型钢柱的响应进行了数值模拟，结果表明钢柱更容易沿着其弱轴方向发生破坏，固定支座会导致柱子的腹板、翼缘的交汇处出现较大的塑性变形。天津大学的师燕超和李忠献（2008）使用数值模拟的方法定义了钢筋混凝土柱在爆炸作用下的三种破坏模式。沈阳建筑大学的阎石等（2010）研究了比例距离和柱端约束形式对钢管混凝土柱破坏模式的影响。

楼板或墙一类构件具有较大的面积，因此在爆炸作用中会承受更多的冲击作用。英国的 Louca 和 Pan（1998）对油气爆炸作用中的钢筋混凝土墙板的爆炸响应进行了分析，结果表明墙板的支承条件对爆炸作用下板的局部最大变形有明显的影响。墨尔本大学的 Ngo 等（2007）对普通混凝土和超高强混凝土板进行了一系列爆炸对比试验研究，并研究了炸药当量及爆距的改变导致的不同爆炸作用下混凝土板的破坏程度。中国台湾的 Tai 等（2011）通过使用流固耦合（fluid-structure interaction, FSI）算法研究了钢筋混凝土板在空中爆炸下的动力响应特性，发现 TNT 起爆点和炸药当量的改变会导致受到爆炸作用的局部区域破坏形式发生改变，并且指出配筋率与爆炸下钢筋混凝土板的破坏之间存在一定的关系。

关于爆炸作用下节点性能的研究，美国的 Sabuwala 等（2005）利用 ABAQUS 有限元软件对梁与柱连接处的钢节点的抗爆炸性能进行了研究，研究表明，仅依据 TM5-1300 相关条文规定而设计的钢节点在某些情况下的抗爆性能存在一定的隐患。上海交通大学的于文静等（2012）在其研究中指出，ANSYS 对 T 型相贯节点抗爆炸性能的数值模拟结果与试验结果比较接近，说明数值方法可以有效地对爆炸产生的高压高温过程中的节点性能进行预测。

各种构件的大量研究结果都可以绘制成构件的 $P-I$ 曲线，以供爆炸作用下构件的设计或者损伤评估时使用。Li 和 Meng（2002）通过使用单自由度理论模型，研究了爆炸荷载的形状等参数对构件 $P-I$ 曲线形状及其渐近线位置的影响。Dragos 和 Wu（2013）使用基于 Timoshenko 梁理论的有限自由度模型，绘制了爆炸荷载作用下梁的 $P-I$ 曲线。Shi 等（2008）对爆炸作用后柱的剩余承载力进行了计算，并建立了以剩余承载力衡量损伤程度的评估准则，绘制了柱子的 $P-I$ 曲线。

随着分析手段的进步，对整体结构在爆炸作用下的破坏研究也日益受到研究人员的关注。美国军方较早就开展了关于如何提高建筑物抵御恐怖袭击能力方面的研究，在美国军方出版的 UFC 3-340-02 手册（2008）中详细地介绍了有关钢结构、混凝土结构以及砌体结构等的抗爆设计要求，并对设计要领进行了相关规定。

太原理工大学的李海旺和李彦君(2007)对爆炸作用下带楼板的空间钢框架的动力响应及破坏机理进行了研究。中国人民解放军陆军工程大学的方秦等(2007)对钢筋混凝土结构的破坏模式进行了研究,类似于钢筋混凝土梁和柱等构件的失效模式,对结构的破坏模式也进行了分类。哈尔滨工业大学的路胜卓等(2015)通过爆炸试验和数值模拟的方法研究了大型钢制储油罐在可燃气体爆炸作用下的破坏机理。前述已经说过,通常的爆炸作用在地面附近,冲击波将仅对建筑的较低楼层或者距离较近的构件产生巨大的破坏作用,但此时带来的一个严重问题就是局部主要构件的破坏有可能导致结构整体的连续倒塌。在“9·11”事件中,世贸双塔即由飞机撞击造成楼体局部的破坏导致了整栋建筑的连续倒塌,该事件引起了国内外学者对结构连续倒塌问题的关注。天津大学的李忠献等(2009)对钢筋混凝土框架的连续倒塌问题进行了研究,提出了一种基于“替代传力路径法”的研究框架结构连续倒塌的方法。哈尔滨工业大学的田玉滨等(2013)对底部框架砌体结构在爆炸荷载作用下的倒塌破坏机理进行了研究,基于LS-DYNA的重启动功能提出了“两阶段分析法”。Jayasooriya等(2014; 2011)通过有限元分析对爆炸后结构的整体特性及破坏程度进行了考察,提出了对钢筋混凝土框架的薄弱环节进行加强以避免结构在爆炸作用下发生连续倒塌的建议。

除此之外,对于爆炸作用下结构的防护方法很多学者也开展了工作。结构的防护主要有两种思路,一种思路是通过设置阻挡装置或吸能构件对建筑物上受到的爆炸作用进行阻隔,从而减小建筑物受到的爆炸作用。例如,Zhou和Hao(2008)研究了在建筑物前设置抗爆墙对后部建筑受到爆炸作用的影响,他们对比了抗爆墙的不同高度及距离对建筑物不同位置爆炸荷载超压的影响,并指出抗爆墙的位置如果设置不合理,反而可能会加重其后部结构受到的爆炸作用。另一种思路是通过新型的构造形式发生部分破坏或者吸能材料产生变形而耗散爆炸能量,使爆炸作用得到衰减。例如,Chen和Hao(2012)通过ConWep施加爆炸荷载的方法对一种新型的双层多孔型抗爆门进行了优化设计,并将其抗爆性能与传统的抗爆门进行了对比。Hao和Wu(2005; 2003)在上部结构与下部基础间设置了一定厚度的沙层,该措施能够有效地吸收爆炸所产生的高频波,并可以减小结构的响应幅度。清华大学的陆新征和江见鲸(2003)对某抗爆门的抗爆性能进行了分析,研究发现,目前的设计方法用于指导一系列抗爆门的设计偏于保守。

1.4 大跨空间结构抗爆研究的特殊性

如前所述,目前国内外民用建筑抗爆方面的研究对象还多是针对单一构件或者量大面广的多高层结构开展的,对于大跨空间结构爆炸响应的研究比较少。与传统结构明显不同,大跨空间结构的抗爆研究有其特殊性,具体表现在:①大跨

空间结构往往具有丰富的建筑形体,这种由合理受力决定的建筑曲面外形也给其上爆炸荷载的确定带来了挑战。爆炸荷载在表现形式上是冲击波在空气中的高速传播,当冲击波遇到不同介质时会发生反射、折射、衍射等复杂的传播行为。当前学者对于体型相对规则的多高层建筑研究较多,例如,在美国军方发行的 UFC 3-340-02 手册(2008)中已经对一些常见的情况给予了细致的规定,但是对于曲面壳体上爆炸冲击波规律的研究则比较稀少,对于大跨空间结构在爆炸(包括内爆或外爆)发生后遭受到的爆炸荷载的系统研究还未见报道。②大跨空间结构的动力特性与传统多高层结构也有明显不同。这主要体现在,大跨空间结构多为屋盖结构,刚度相对较弱(周期长),在动力荷载作用下其竖向振动与水平振动同样明显,在爆炸发生后结构的损毁情况、破坏模式均有其特殊性。③大跨空间结构多为一个城市或地区的标志性建筑,平面尺度较大,作为体育建筑、交通枢纽等时人员密集,针对该类建筑的抗爆防护标准和防护措施也需开展相应的工作。

紧随民用建筑抗爆炸、抗冲击的研究趋势,作者及其研究团队从 2007 年开始在大跨空间结构的爆炸荷载、抗爆炸性能等方面开展工作,到目前为止,已经取得了一些研究成果,从理论框架上看也比较完整,本书将这些成果进行梳理,编撰成册,以飨读者。

近些年,除作者及其研究团队外,国内其他院校的科研人员也开展了这一方向的研究工作。例如,华侨大学的高轩能等(2015; 2010)研究了大跨度单层柱面网壳的爆炸响应,对炸药在结构内部的位置、当量等参数变化引起的影响进行了讨论,提出了网壳结构爆炸响应的简化计算方法。瞿海雁(2007)对一个单层球面网壳体育馆的爆炸动力响应进行了仿真模拟,分析发现整体结构在爆炸作用中的破坏是由柱子失效导致的。丁阳等(2010)对爆炸作用下平板网架的动力响应及破坏模式进行了研究。与本书目标相同,以上这些成果均为我国大跨空间结构抗爆防护理论的形成提供了良好的理论素材。

参 考 文 献

- 鲍麒,方秦,范俊余. 2012. 外爆炸条件下框架柱上荷载的特点及分布规律[J]. 防护工程, 34(4): 24-30.
- 丁宁,余文力,王涛. 2008. LS-DYNA 模拟无限水介质爆炸中参数设置对计算结果的影响[J]. 弹箭与制导学报, 28(2): 127-130.
- 丁阳,汪明,李忠献. 2010. 爆炸荷载作用下平板网架结构破坏倒塌分析[J]. 土木工程学报, 43(s): 34-41.
- 方秦,陈力,张亚栋. 2007. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构的动态响应与破坏模式的数值分析[J]. 工程力学, 24(s2): 135-144.
- 高文蛟,单仁亮,李建湘. 2001. 爆炸应力波入射一定厚度结构面时透射系数分析[J]. 矿冶工程, 21(1): 16-18.
- 高轩能,王书鹏. 2010. 大空间柱壳结构爆炸动力响应 Ritz-POD 数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 32(2): 64-70.
- 高轩能,李超,江媛. 2015. 单层球面网壳结构在内爆炸作用下的动力响应[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 48(s): 102-109.

- 国胜兵, 潘越峰, 高培正. 2005. 爆炸地震波模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 25 (4): 335-340.
- 贾昊凯, 吴桂英. 2012. H型钢梁在爆炸荷载作用下的动力响应及破坏模式研究[J]. 重庆建筑, 11 (1): 29-33.
- 匡志平, 杨秋华, 崔满. 2009. 爆炸荷载下钢筋混凝土梁的试验研究和破坏形态[J]. 同济大学学报, 37 (9): 1153-1156.
- 李海旺, 李彦君. 2007. 爆炸荷载作用下空间钢框架破坏过程分析[J]. 太原理工大学学报, 38 (3): 259-263.
- 李翼祺. 1992. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 李忠献, 师燕超, 周浩璋. 2009. 城市复杂环境中爆炸波的传播规律与超压荷载[J]. 工程力学, 26 (6): 178-183.
- 柳锦春, 方秦. 2003. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应及破坏形态分析[J]. 爆炸与冲击, 23 (1): 25-30.
- 陆新征, 江见鲸. 2003. 抗爆门结构考虑接触影响的动力有限元分析[J]. 力学与实践, 25 (2): 74-76.
- 路胜卓, 王伟, 陈卫东. 2015. 浮顶式储油罐的爆炸冲击失效[J]. 爆炸与冲击, 35 (5): 696-702.
- 瞿海雁. 2007. 爆炸荷载作用下体育场馆的动力响应分析[D]. 北京: 北京工业大学.
- 申祖武, 张耀辉, 谢伟平. 2006. 爆炸冲击波的环流效应数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 28 (2): 42-44.
- 师燕超, 李忠献. 2008. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱的动力响应与破坏模式[J]. 建筑结构学报, 29 (4): 112-117.
- 田玉滨, 王忠楠, 张春巍, 等. 2013. 底框上部砌体结构抗爆性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 33 (s): 28-36.
- 阎石, 齐宝欣, 辛志强. 2010. 高温与爆炸作用下轻钢柱动力响应与破坏模式数值分析[J]. 土木工程学报, 43 (s): 484-489.
- 杨石刚, 方秦, 张亚栋. 2014. 非均匀混合可燃气体爆炸的数值计算方法[J]. 天然气工业, 34 (6): 155-161.
- 于文静, 赵金城, 龚景海, 等. 2012. T型相贯节点在爆炸冲击和火灾作用下力学性能的有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 46 (2): 335-340.
- 张广福, 刘玉存, 王建华. 2009. 爆炸冲击波无限空气领域传播的数值模拟研究[J]. 山西化工, 29 (1): 43-46.
- Chen W S, Hao H. 2012. Numerical study of a new multi-arch double-layered blast-resistance door panel[J]. International Journal of Impact Engineering, 43 (5) : 16-28.
- Dragos J, Wu C Q. 2013. A new general approach to derive normalised pressure impulse curves[J]. International Journal of Impact Engineering, 62 (12) : 1-12.
- Hao H, Wu C Q. 2003. Characteristics of stress waves recorded in small-scale field blast tests on a layered rock-soil site[J]. Géotechnique, 53 (6) : 587-599.
- Hu Y, Wu C Q, Lukaszewicz M. 2011. Characteristics of confined blast loading in unvented structures[J]. International Journal of Protective Structures, 2 (1) : 21-44.
- Jama H H, Bambach M R, Nurick G N. 2009. Numerical modelling of square tubular steel beams subjected to transverse blast loads[J]. Thin-Walled Structures, 47 (12) : 1523-1534.
- Jayasooriya R, Thambiratnam D P, Perera N J, et al. 2011. Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings[J]. Engineering Structures, 33 (12) : 3483-3495.
- Jayasooriya R, Thambiratnam D P, Perera N J. 2014. Blast response and safety evaluation of a composite column for use as key element in structural systems[J]. Engineering Structures, 61 (1) : 31-43.
- Lee K, Kim T, Kim J. 2009. Local response of W-shaped steel columns under blast loading[J]. Structural Engineering & Mechanics, 31 (1) : 25-38.
- Li Q, Meng H. 2002. Pulse loading shape effects on pressure-impulse diagram of an elastic plastic single degree of freedom structural model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 44 (9) : 1985-1998.
- Li Z, Shi Y, Hao H. 2008. Numerical analysis of progressive collapse of RC frame under blast loading[J]. IABSE Congress Report, 17 (4) : 442-453.
- Louca L, Pan Y. 1998. Response of stiffened and unstiffened plates subjected to blast loading[J]. Engineering Structures,