DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0269-10

飞机撞击建(构)筑物研究进展*

刘晶波[1],韩鹏飞[1,2],林 丽[3],陆新征[1],岑 松[3]
(1. 清华大学土木水利学院土木工程系,北京 100084;
2. 总参谋部工程兵科研三所,河南 洛阳 471023;
3. 清华大学航天航空学院工程力学系,北京 100084)

摘要: 飞机撞击重要建(构)筑物会导致灾难性后果。本文从试验研究、理论分析、数值模拟等 3 个方面对飞机撞击建(构)筑物的国内外研究现状,相关研究难点、需要注意的问题和研究方向及趋势进行总结,包括:缩比试验的系统和验证,飞机撞击力模型,撞击所致局部破坏计算公式,飞机和建(构)筑物的精细化建模,撞击所致振动特性,撞击荷载和火荷载对结构的耦合毁伤效应,一般模型和精细化模型、解耦和耦合方法以及不同数值模拟程序计算结果的对比分析等方面,以期为后续研究提供参考。

关键词: 爆炸力学;精细化模型;撞击载荷;耦合毁伤效应;飞机撞击
中图分类号: O383;TU312;TB122 **国标学科代码**: 1303530 **文献标志码**: A

飞机撞击重要建(构)筑物可能会导致灾难性后果。J. D. Riera[1]把飞机视为变形弹体,提出一维变形弹体撞击刚性靶体的模型,研究了撞击荷载时程曲线,开启了飞机撞击建(构)筑物的先河。美国核管会对三哩岛核电站的安全评估中,首次加入了飞机撞击核电站的安全评估内容[2],许多学者通过理论分析、试验和数值模拟对飞机撞击建(构)筑物的撞击机理、撞击荷载、撞击破坏现象陆续进行了研究。鬼怪式战斗机的撞击荷载曲线曾被选为飞机撞击的设计荷载[3],而后一些国家所有核电站均明确考虑飞机的意外撞击。

上述安全评估和设计基准只是基于小型战斗机或小型商用飞机的撞击荷载。9·11 事件之后,建(构)筑物抵抗飞机撞击的研究及设计建议越发重要,尤其以飞机撞击核电站安全壳最为热门,相关的法规也开始出现。美国核管会颁布了新的联邦法规,使得抵御大型商用飞机撞击成为新建核电厂安全性评审的一项重要内容[4]。目前,欧洲一些国家在压水堆核电(EPR)的设计中将抵抗大型商用飞机撞击作为设计基准[5]。

目前,飞机撞击建(构)筑物的研究内容主要集中在 3 个方面:(1)撞击力计算公式或者撞击力时程曲线的研究;(2)飞机对被撞建筑物的毁伤作用,包括撞击以及飞机燃油燃烧造成的火荷载对结构的破坏;(3)撞击过程中结构内部组件诸如设备、管道位置处由于撞击引起的振动效应。本文中将对以往工作进行较为全面的整理和回顾,拟从试验、理论分析、数值模拟等方面总结飞机撞击建(构)筑物的国内外研究现状,讨论相关研究难点、需要注意的问题和研究方向及趋势,以期为后续的研究工作提供参考。

1 试验研究

1.1 缩比试验

W. Nachtsheim 等[6]和 E. Rüdiger 等[7]研究了大变形弹体的撞击力曲线,并研究钢筋混凝土靶板遭受撞击的极限承载能力。试验表明,撞击速度以及弹体变形行为是钢筋混凝土靶板的极限承载能力的关键因素,靶板厚度的变化比钢筋率的变化更能影响靶板对撞击的响应。N. Herrmann 等[8]对装有液体的弹体撞击刚性靶的荷载时程进行了试验研究,试验弹体根据大型商用飞机缩比而来,未考虑机翼

* **收稿日期**: 2014-09-15; **修回日期**: 2014-11-25
基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX06002-10)
第一作者: 刘晶波(1956—),男,博士,教授,博士生导师; **通讯作者**: 韩鹏飞,feixuehan2003@sina.com。

的几何尺寸和发动机的模拟。弹体含有 1 个液体储存罐，用于模拟不同质量分布，弹体示意图如图 1 所示。通过变化储存罐所装物质的质量、撞击速度和撞击角度给出了不同情况下的撞击荷载时程曲线。

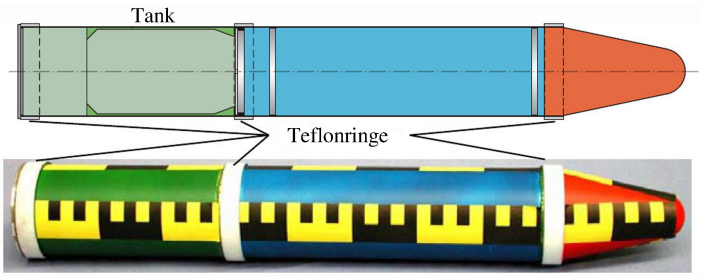

图 1 撞击试验中弹体示意图

Fig. 1 Sketch of projectile in impact test

芬兰技术研究中心[9]对装有液体的可变形弹体进行了试验研究，弹体为圆柱壳弹体，质量分布与商用飞机质量分布一致，弹体配有液体储存罐，用来模拟飞机燃油在撞击中的响应，可以考虑弹体的侧向延伸，形成有翼弹体来更真实的模拟商用飞机，可以模拟机身、机翼、以及“硬撞击”的发动机[10-11]，该试验为验证和校准飞机撞击核电站的数值模型提供了数据支持，图 2 所示为试验装置和试验弹体。A. Silde 等[12]对装有液体的弹体撞击现象进行了测试，获得了液体从破碎弹丸抛射出的速度和方向，水散落到地板上的覆盖区域，离靶体较远处水的抛散程度，以及水滴的大小等试验数据。文献[9]、文献[13]通过大量试验，获得了丰富的数据信息；未来的试验会向更复杂、更接近于飞机实际情况的弹体设计进行，进一步验证装有液体的弹体比未装液体的破坏能力强的结论，以及给出“硬撞击”经验公式的折减因子，从而得到飞机所谓“软撞击”的经验公式。



图 2 装有液体的弹体撞击试验装置

Fig. 2 Impact test apparatus of projectile loaded with liquid

J. Mizuno 等[14]进行了缩比飞机撞击(单)双钢板混凝土复合靶板的试验，飞机模型根据鬼怪战斗机进行 1∶7.5 缩比，撞击速度为 150 m/s，靶板具体构造措施如图 3 所示。通过试验研究了钢板混凝土复合板和飞机模型的破坏机理，获得了飞机模型撞击钢板混凝土复合板的减速特性和贯穿后剩余速度，以及背面钢板的应变和变形数据，为后续离散元数值模拟提供了良好的数据支持。试验数据表明，钢板尤其是背面钢板可有效防止混凝土的震塌抛射，所提供的撞击阻力比常规钢筋混凝土板要大得多，可使板的贯穿厚度降低 30%左右。

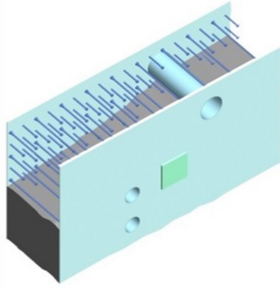

图 3 双钢板混凝土复合靶板结构图

Fig. 3 Structural diagram of steel-concrete-steel sandwich composite plate target

W. Riedel 等[15]进行过飞机发动机撞击混凝土结构的缩比模型试验，分析了纤维增强超高性能混凝土在发动机撞击条件下，“侵彻”、“成坑”、“贯穿”等局部破坏现象。与常规混凝土相比，由于纤维增强超高性能混凝土抗压强度的提高，降低了发动机撞击的侵入深度以及靶板前表面混凝土的飞溅程度，靶体中的纤维大大降低了靶板背部混凝土的开裂和震塌。试验中所用的纤维增强超高性能混凝土使弹道极限速度增加幅度超过了 100 m/s，相应的动能吸收量提高了 1.1 倍。C. Pontiroli 等[16]为获取更多的飞机撞击问题的试验数据并验证数值分析模型的有效性，进行了缩比变形弹体撞击薄钢筋混凝土板的

试验研究。弹体为不同厚度的钢制圆柱壳弹体，试验加速系统为 90 mm 直径管状气炮。弹体的撞击速度为 70～135 m/s，从而可获得不同的毁伤效应。弹体和加速系统如图 4 所示。试验获得的数据和对数值模型的验证，为后续原型飞机撞击建(构)筑物完成了基础性工作。

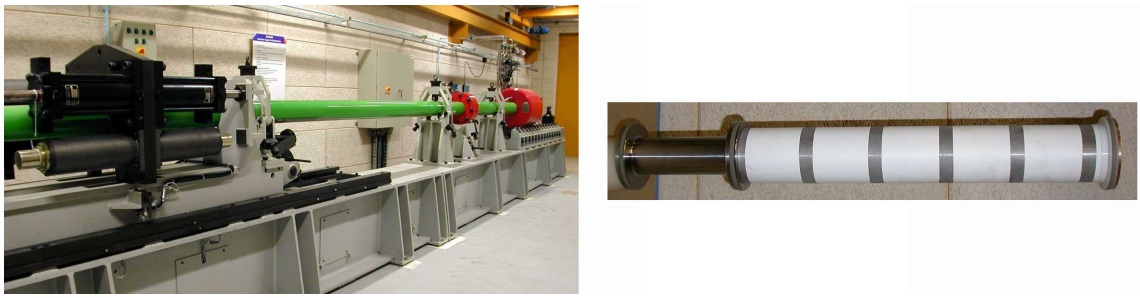

图 4　加速系统和弹体

Fig. 4　Acceleration system and projectile

1.2　原型试验

文献[17]介绍了在美国桑迪亚实验室进行的鬼怪原型飞机撞击混凝土靶板的试验。试验所用飞机重 19 T，其中用 4.8 T 水模拟飞机燃油以提供与实际情况相符的质量分布，飞机用两级火箭加速；靶板为 7 m 见方，厚度为 3.66 m 的钢筋混凝土板，用特殊充气装置支撑，以使靶板与地面的摩擦力近似为零。图 5 所示为鬼怪飞机撞击钢筋混凝土板以及撞击过后靶板的破坏情景。试验结果表明，鬼怪战斗机的一小部分机翼和尾翼被剪断，剩余的飞机部分包括发动机在撞击过程完全破碎，飞机发动机与靶板撞击接触时，才与机翼脱离，在之前撞击阶段，发动机未与飞机有相对位移，水的抛散范围相对较小；撞击的能量基本上转化为靶板的动能，对结构的破坏较小，机身对靶板的侵入深度为 20 mm，而发动机的侵入深度为 60 mm，机身对靶板的破坏能力相对于发动机要小得多，飞机的质量分布情况对撞击荷载影响较大。

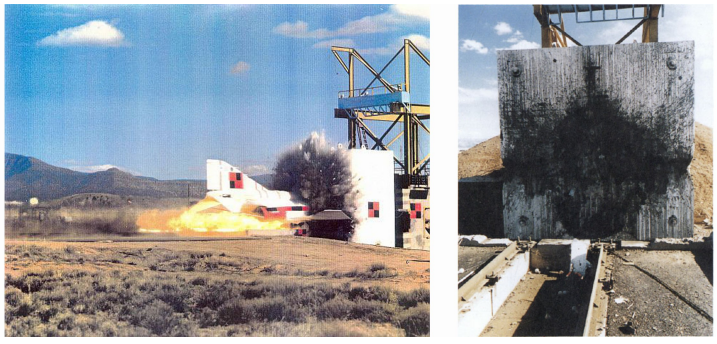

图 5　F-4 鬼怪飞机撞击和靶板破坏情景[17]

Fig. 5　View of F-4 phantom aircraft during impact and target damage after impact[17]

T. Sugano 等[18-19]针对可变形弹体/发动机进行了一系列的撞击钢筋混凝土板的试验，其中包括发动机的小缩比 1∶7.5、中型缩比 1∶2.5、全比例模型的撞击，3 种比例模型试验目的是互相检验和印证彼此所得的试验结果，发动机为鬼怪战斗机发动机的 GE-J79 涡轮发动机。通过试验，检验了简化模型的合理性，讨论了可以根据刚性弹体局部破坏经验公式进行折减来用于预测发动机对靶板的局部破坏，另外，试验表明钢筋配筋率大小对局部破坏影响甚小。

1.3　基于试验研究的评价

通过缩比试验可以研究在某种比例或多种比例下飞机对靶板的毁伤效应和飞机的撞击荷载，而对于毁伤效应，未包括燃油所致火荷载对结构的破坏，以及撞击和火荷载耦合作用下的毁伤，也未包括撞击振动效应的研究。缩比试验对飞机简化的合理性，包括质量分布和刚度分布对撞击结果的影响是研究难点之一；另外，由于撞击现象的非线性效应和缩比尺寸效应，某种缩比试验得出的科学规律是否可以推广到其它比例下的情况还需要进行系统的试验研究，最后推广到原型机的撞击规律，这也是缩比试

验研究的难点。由于原型试验很难实施,那么数值模拟缩比试验,并通过缩比试验来进行验证数值模拟的合理性和可靠性,比如本构关系的选取,参数的取值等等。通过多种比例试验和数值模拟的相互印证,最后推广到原型试验的数值模拟,这样得出的结果就会更有可信性和科学性,所以缩比试验的主要作用还是研究某种比例下的撞击行为或者多种比例下撞击行为的差异性,并可为原型飞机撞击的有限元模拟提供有力的数据支撑。飞机撞击混凝土结构的破坏范围包括发动机和飞机相对刚性部分对结构的局部破坏,以及整个飞机造成的结构整体的弹塑性响应。其中局部破坏包括成坑、震塌,以及侵彻等现象。预测局部破坏的许多经验公式都是针对刚性弹体的,而不能用于飞机撞击,不过可以通过相关试验对上述经验公式进行修正来获取因飞机撞击所造成局部破坏的经验公式。

2 理论分析

2.1 理论假设

J. D. Riera[1]对飞机撞击建筑物的分析模型进行简化,假设飞机模型为一维模型,可承担所有的撞击力,不考虑撞击力的位置分布情况;飞行轴线与飞行轨迹重合,且与靶体垂直;飞机模型的变形压碎部分不产生抛射物。距离靶体较近的部分受到撞击不断压缩而变形甚或破碎,远离靶体部分未受到撞击压缩,可视为刚性部分。根据飞机撞击时受到的动量、冲量守恒定律,并将靶体视为刚性体得出撞击力计算公式。K. Hornyik[20]在 J. D. Riera 所提出模型的基础上,在考虑了动量守恒的前提下,通过考虑能量守恒来分析讨论,假设材料为理想弹塑性模型,给出了计算关系式;L. Y. Bahar 等[21]从 J. D. Riera 所提出的公式出发,考虑撞击变形区域速度的折减,引入惯性撞击力比例因数 α,文献[22]给出的 α 的取值为 0.5,T. Sugano 等[17]通过该公式与试验数据对比,给出 α 的相对最佳取值为 0.9;H. Abbas 等[22]对飞机的撞击荷载时程曲线的研究是建立在质量、动量和能量守恒的基础上,考虑能量守恒:飞机未变形部分撞击进入变形区域,其减少的能量假设转化为飞机的塑性变形能,飞机变形部分的动能,撞击过程中产生的热能、声能,以及靶体的动能和应变能。上述模型的计算公式如表 1 所示。

表 1 文献中撞击力计算公式

Table 1 Impact force calculation formulas in reference

模型来源	撞击力计算公式
文献[1]	$F = p_c + \mu v_r^2$
文献[20]	$F = -\left[\frac{1}{2}\mu v_r^2(1+f)+e\right]$
文献[21]	$F = p_c + \alpha\mu v_r^2$
文献[22]	$F = p_c + \frac{1}{2}\mu v_r^2(1+f)+\sqrt{f}m_c\frac{\mathrm{d}v_t}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{v_r}\frac{\mathrm{d}E_a}{\mathrm{d}t}$

表 1 中:F 为飞机所受撞击力,m_c 为变形压碎部分质量,v_r 为飞机刚性部分的速度,v_t 为飞机变形压碎部分与靶体结构的速度,μ 为 t 时刻飞机单位长度质量,p_c 为飞机结构的压溃力,为瞬时值,计算比较困难,通常用平均压溃力来代替,国内外许多学者提出不少经验公式,不过计算值差别较大,所以合理选取压溃力就是该模型使用的一个关键点;e 为每单位长度因变形耗散的能量,f 为变形部分剩余速度与撞击速度之比的平方,当 $f=1$ 时,则 Hornyik 公式退化为 Riera 公式;E_a 为撞击过程中热能、声能、靶体动能和应变能之和,H. Abbas 等[22]提出公式的最后一项的量值很难估计,若忽略此项,又会低估撞击荷载的影响,对靶体的设计不利。

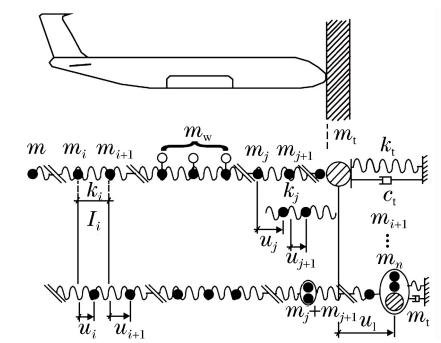

图 6 机撞击变形靶板(集中质量模型)

Fig. 6 Aircraft impact on deformable target (lumped-mass model)

J. P. Wolf 等[23]提出了集中质量、弹塑性的模型，机身质量简化为 n 个集中质量，通过具有一定长度和刚度的弹簧相连，弹簧可压缩和拉伸，机翼质量假设在机身撞击到一定长度后与其脱离。当弹簧与靶板接触时，仅为压缩状态，当达到压溃力时，弹簧开始压溃，并在应变达到 -1 时完全压溃；当弹簧处于拉伸状态时，在达到断裂应变时而断裂。根据上述假设给出了飞机撞击刚性靶板和可变形靶板的撞击模型，图 6 所示为飞机撞击变形靶板的撞击模型。J. P. Wolf 等[23]利用撞击刚性靶板模型，计算了波音 707 和 FB-111 战斗机的撞击荷载时程曲线，并与 Riera 模型的计算结果进行了对比分析，两种模型的结果达到了很好的一致性；并对比分析了 2 种飞机撞击可变形靶板和刚性靶板的撞击荷载时程曲线，计算结果很接近，无太大差别。

王远功等[24]介绍了 J. D. Riera[1]提出的刚性荷载函数与考虑靶体变形的实际荷载函数的不同，总结了 K. Drittler 等[25]、N. J. Krutzik 等[26]考虑靶体变形的情况下所给出的鬼怪战斗机的修正撞击荷载函数，在此基础上根据冲量守恒的原理，给出多边形近似曲线来包络撞击荷载。

2.2　基于理论分析的评价

理论分析对撞击荷载的研究居多，其它的研究内容很少见。通过现有理论模型的总结对比分析，后续理论模型与 Riera 模型相比，是对 Riera 模型的再发展，虽然考虑了飞机与靶体的相互作用，但是飞机变形部分剩余速度的折减系数较难确定，这不仅跟飞机有关，还与靶体自身因素有关，需要通过大量的试验或者有效的数值计算来确定其大小范围，目前相关研究较少。而 Riera 模型简单实用，考虑大变形，关键是压溃力的合理确定，该模型是一维模型，仅考虑了轴向上的质量分布，其它方向上未予考虑，并不能表述荷载的分布情况。从而对靶体的整体撞击作用是适合的，对撞击部位的局部作用受到较大限制，也未考虑靶体的变形。对于撞击荷载需进一步研究考虑弹/靶响应的计算模型和计算方法。

3　数值模拟

3.1　数值方法

飞机撞击建(构)筑物的数值模拟对象，可分为 3 类。由前面的试验研究可以看出，试验研究通常分为缩比试验和原型试验，那么对缩比试验的数值模拟可分为第 1 类，其主要目的是对比分析数值计算与试验数据，增强数值计算可靠性，比如验证计算模型的本构关系是否合理，参数取值是否合适，从而增加原型飞机撞击数值计算结果的可信性。例如，A. Saarenheimo 等[27]采用混凝土塑性损伤模型和开裂模型来模拟混凝土，利用 ABAQUS 对芬兰技术研究中心的试验[9]进行了数值计算；O. Martina 等[28-29]对混凝土和钢材分别采用 Han and Chen 模型和 Johnson-Cook 模型运用 RADIOSS 模拟了芬兰技术研究中心的试验[9]，完善了有限元数值模拟钢筋混凝土结构对飞机撞击的响应；J. Mizuno 等[30-31]采用离散元方法、单元失效采用摩尔库伦准则，模拟了 F-16 战机撞击单、双钢板混凝土复合板缩比试验，并通过试验数据分析计算的有效性，最后给出了原型 F-16 战机撞击复合板的数值计算结果，如图 7 所示，研究了上述复合结构的毁伤机制和防护能力。

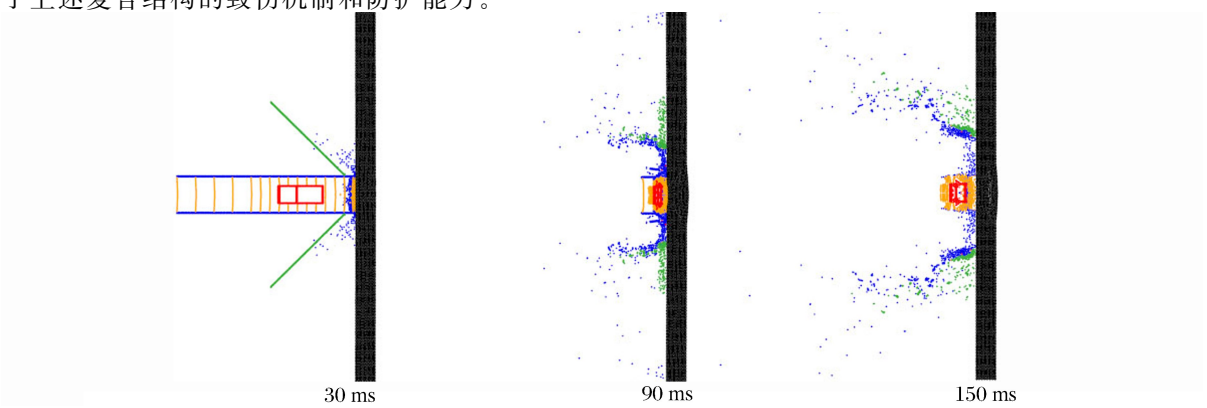

图 7　F-16 战机撞击双钢板混凝土板

Fig. 7　F-16 Aircraft impact on steel-concrete-steel sandwich composite plate

第 2 类是解耦方法，将飞机撞击力时程曲线加载到所研究的结构上(以核电站安全壳居多)进行数值计算。H. Abbas 等[32]利用波音 707，FB-111 和鬼怪这 3 种飞机的撞击时程曲线加载到半球壳型安全壳上，对比分析了不同加载部位的破坏效应、进行了混凝土不同开裂应变对数值计算结果的影响分析，得出鬼怪飞机撞击破坏作用偏大的结论；L. R. Frano 等[33]利用上述几种飞机的撞击力曲线探讨了某安全壳的抗撞性，M. Kukreja 等[34]对混凝土本构采用考虑双轴和三轴应力条件的单轴应力应变关系，钢筋等钢材采用双线性弹塑性本构，根据波音 707 和空中客车 A300 的撞击力曲线对 500 MW 预应力安全壳是否能承受大型飞机的撞击进行了详细的评估；M. A. Iqbal 等[35]和 M. R. Sadique 等[36]采用 ABAQUS 的混凝土塑性损伤模型并考虑应变率效应，钢筋采用 Johnson-Cook 模型，利用上述文献中的几种荷载时程曲线直接加载到安全壳，对安全壳产生的应力、变形、关键单元的破坏情况进行了讨论，比较分析了局部破坏和整体响应；G. Dundulis 等[37]对混凝土采用 Hsieh-Ting-Chen 本构，使用鬼怪 F-4 战机的撞击荷载曲线研究了核电站被撞击结构的整体完整性和采用经验公式研究了发动机对结构的局部破坏作用；左家红[38]对秦山核电站安全壳施加撞击荷载函数，对安全壳穹顶位移及应力、开裂、安全壳的整体动力响应、撞击区的非线性响应进行了讨论分析。

第 3 类方法是耦合方法，建立飞机和建(构)筑物模型，模拟两者的撞击作用。李笑天等[39]利用2 m×1 m×2 m 的实体块模拟飞机来撞击安全壳，比较了不同材料模型对结果的影响；徐征宇[40]利用 LS-DYNA 软件对波音 737 撞击 AP1000 屏蔽厂房进行了有限元分析，飞机及屏蔽厂房所用金属采用塑性强化模型，混凝土采用 HJC 模型，认为屏蔽厂房能够有效抵御飞机撞击；J. Arros 等[41]建立了波音 747 飞机模型，用来撞击 1 个虚拟的建筑物，混凝土采用 Winfrith 本构，用文献[1]中方法得到的波音 747 飞机撞击时程曲线及数值模拟获得的曲线，两者总动量相差较少，但是采用荷载时程曲线直接加载和用原型飞机模型进行数值模拟撞击的结果是不同的，结构内力和动态响应是有区别的；T. Wierzbicki 等[42]建立了简化的飞机机翼模型，研究了飞机机翼撞击世贸大楼外围柱子的破坏形式；M. R. Karim 等[43]在 T. Wierzbicki 等[42]工作的基础上，飞机机身和发动机简化为圆柱壳，机翼简化为箱梁结构并考虑燃油质量，飞机和世贸钢柱所用金属采用 Johnson-Cook 模型，考虑材料非线性和应变率效应，给出了飞机侵入外围柱结构的最小速度和飞机最大撞击速度条件下柱子的最小厚度；郑文凯[44]利用 LS-DYNA 软件对波音 767 飞机撞击双钢板混凝土屏蔽厂房的撞击荷载进行了数值计算，讨论了材料模型、网格尺寸对计算结果的影响。

S. W. Kirkpatrick 等[45]叙述了飞机和世贸大厦的有限元建立过程，对比分析了网格尺寸对撞击行为的影响程度，建立了飞机和世贸大厦精细化模型，评估了撞击造成的毁伤效应。C. Hoffmann 等[46]、P. Rosen 等[47]和 V. Popescu 等[48]对飞机撞击世贸大厦和五角大楼的有限元数值模拟进行了系统研究，对飞机和建筑物进行了精细化建模，利用 LS-DYNA 模拟了撞击的全过程，采用 ALE 和 SPH 方法模拟了燃油的抛洒过程，但并未给出燃油形成的火荷载对结构的毁伤效应。S. W. Kirkpatrick 等[45]和 P. Rosen 等[47]给出的数值模拟结果与实际情况有很好的一致性，如图 8 所示。



图 8(a) 波音 767 飞机撞击世贸大厦实际场景

Fig. 8(a) Actual photograph of Boeing 767 aircraft impacting the World Trade Center

B. M. Jin 等[49]对大型商用飞机撞击核电站引起的振动特性进行了初步分析，指出飞机撞击引起的振动不同于地震事件。飞机撞击荷载与地震荷载相比持时短，撞击引起的振动频率主要集中在高频，建立了核电站简化模型并研究了不同参数对振动特性的影响。M. Kostov 等[50]根据定义的损伤指标对 A92 核电站的屏蔽厂房抵御大型商用飞机产生的振动效应进行了安全评估。

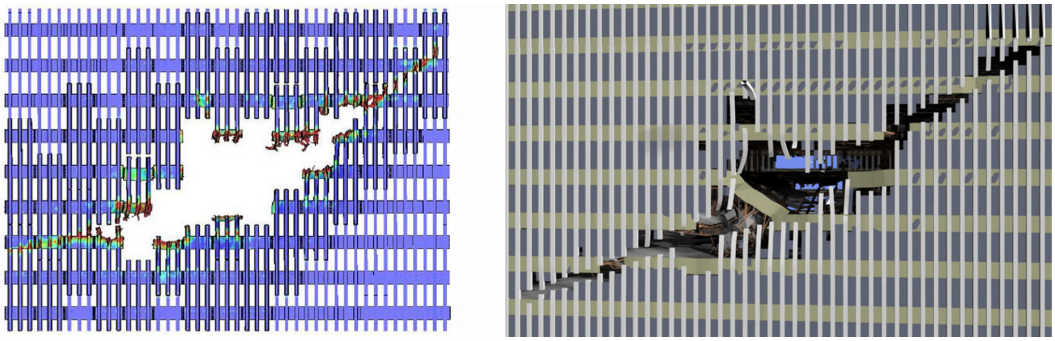

图 8(b)　波音 767 飞机撞击世贸大厦数值模拟结果

Fig. 8(b)　Simulation result of Boeing 767 aircraft impacting the World Trade Center

3.2　基于数值模拟的评价

数值模拟研究的内容比较全面，包括撞击荷载、毁伤效应、撞击振动特性等。数值方法中对缩比试验进行的数值模拟，主要目的是通过试验验证数值模拟的合理性，包括材料本构和失效参数的选取，从而推广到原型机撞击的数值模拟中去。解耦方法中，如果通过理论模型获得撞击荷载，飞机的合理简化和压溃力的选取值得研究，如果通过飞机数值模型撞击刚性墙获得撞击荷载，飞机合理建模是重点，解耦方法较难准确评估局部毁伤效应，因此撞击荷载的加载面积以及沿作用截面的分布规律就是研究的关键问题；耦合方法中，考虑了飞机与建(构)筑物的相互作用，即飞机直接撞击建(构)筑物，一般模型(比如飞机机身重量分配到飞机的蒙皮上和地板梁结构上)和精细化模型(比如考虑机身蒙皮，机翼翼肋、尾翼翼肋、机身框、机身桁条及地板梁，壳单元厚度和梁截面尺寸，飞机燃油的建模)对结果的影响也需要进行相关分析。解耦方法和耦合方法数值模拟结果的差异性也是研究的一个趋势，再者不同的数值模拟程序计算结果的对比分析也是未来的一个方向。另外，飞机撞击过程中或撞击过后可能会有火荷载对结构造成毁伤，相关研究通常分别考虑撞击荷载和火荷载作用，或者仅考虑撞击荷载，而两者耦合作用下对建(构)筑物的毁伤很少见，所以研究其机理也是重点之一。

4　结　语

国内外的学者针对飞机撞击建(构)筑物进行了大量的研究工作，取得了丰硕的成果。包括撞击荷载、撞击毁伤效应、撞击引起的振动特性等。缩比试验能给出特定比例飞机的撞击规律，能否推广到其它比例上去，还需进行系统的研究和验证，原型试验能直接揭示撞击响应规律，但开展得较少；理论分析模型有其对应的适应条件，理论模型的修正和提出并给出适合飞机撞击力和局部毁伤破坏的计算公式是未来研究的一个重点；对于数值模拟，关键是对飞机和建(构)筑物的精细化数值建模，包括飞机的质量和刚度分布，燃油的影响，加载面积的确定，飞机和建(构)筑物材料失效的精确模拟等，撞击荷载和火荷载耦合作用下建筑物的毁伤机理，撞击所致振动特性研究，各种方法计算结果的对比，比如一般数值模型和精细化数值模型计算结果对比，解耦方法和耦合方法计算结果的对比，不同数值模拟程序计算结果的对比等都是未来研究的方向。

参考文献：

[1]　Riera J D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces[J]. Nuclear Engineering and Design, 1968,8(4):415-426.

[2]　Riera J D. A critical reappraisal of nuclear power plant safety against accidental aircraft impact[J]. Nuclear Engineering and Design, 1980,57(1):193-206.

[3]　Henkel F O, Wölfel H. Building concept against airplane crash[J]. Nuclear Engineering and Design, 1984,79(3):397-409.

[4]　汤搏. 关于核电厂防大型商用飞机撞击的要求：核电发展面临的新挑战[J]. 核安全，2010(3):1-12.
Tang Bo. Discussion on the impact of large commercial airplane to nuclear power plant[J]. Nuclear Safety, 2010

(3):1-12.

[5] Luther W, Müller W C. FDS simulation of the fuel fireball from a hypothetical commercial airliner crash on a generic nuclear power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009,239(10):2056-2069.

[6] Nachtsheim W, Stangenberg F. Selected results of Meppen slab tests-state of interpretation, comparison with computational investigations[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Chicago, 1983:379-386.

[7] Rüdiger E, Riech H. Experimental and theoretical investigations on the impact of deformable missiles onto reinforced concrete slabs[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Chicago, 1983:387-394.

[8] Herrmann N, Kreuser K, Stempniewski L. An experimental approach to determine load-functions for the impact of fluid-filled projectiles[C]// Proceedings of the 76th Shock and Vibration Symposium. Destin, Florida, 2005.

[9] Lastunen A, Hakola I, Jarvinen E, et al. Impact test facility[C]// Proceedings of the 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Toronto, 2007:1-8.

[10] Saarenheimo A, Hakola I, Kaernae T, et al. Numerical and experimental studies on impact loaded concrete structures[C]// Proceedings of the 14th International Conference on Nuclear Engineering. Miami, 2006:249-261.

[11] Kuutti J, Lastunen A. Studies of medium scale non-axisymmetric missile impacts[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Finland, 2009:1-9.

[12] Silde A, Hostikka S, Kankkunen A, et al. Experimental and numerical studies of liquid dispersal from a soft projectile impacting a wall[C]// Proceedings of the 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Toronto, 2007:1-8.

[13] Tarallo F, Rambach J M, Bourasseau N, et al. VTT IMPACT program-first phase: lessons gained by IRSN[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Helsinki, 2009:1-10.

[14] Mizuno J, Koshika N, Morikawa H, et al. Investigation on impact resistance of steel plate reinforced concrete barriers against aircraft impact Part 1: Test program and results[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Beijing, 2005:2566-2579.

[15] Riedel W, Nöldgena M, Straβburger E, et al. Local damage to ultra high performance concrete structures caused by an impact of aircraft engine missiles[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240(10):2633-2642.

[16] Pontiroli C, Rouquand A, Daudeville L, et al. Soft projectile impacts analysis on thin reinforced concrete slabs: Tests, modeling and simulations[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012,16(9): 1058-1073.

[17] Sugano T, Tsubota H, Kasai Y, et al. Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993,140(3):373-385.

[18] Sugano T, Tsubota H, Kasai Y, et al. Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 1: Test program, method and results[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993,140(3): 387-405.

[19] Sugano T, Tsubota H, Kasai Y, et al. Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 2: Evaluation of test results[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993,140(3):407-423.

[20] Hornyik K. Analytic modeling of the impact of soft missiles on protective walls[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. San Francisco, 1977:1-12.

[21] Bahar L Y, Rice J S. Simplified derivation of the reaction-time history in aircraft impact on a nuclear power plant [J]. Nuclear Engineering and Design, 1978,49(3):263-268.

[22] Abbas H, Paul D K, Godbole P N, et al. Soft missile impact on rigid targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995,16(5/6):727-737.

[23] Wolf J P, Bucher K M, Skrikerud P E. Response of equipment to aircraft impact[J]. Nuclear Engineering and Design, 1978,47(1):169-193.

[24] 王远功,余爱萍. 飞机撞击核反应堆安全壳荷载-时间曲线的确定[J]. 核科学与工程,1991,11(3):208-215.

Wang Yuangong, Yu Aiping. The determination of load-time curve for a reactor containment which undergoes the impact of an airplane[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1993,11(3):208-215.

[25] Drittler K, Gruner P. Calculation of the total force acting upon a rigid wall by projectiles[J]. Nuclear Engineering and Design, 1976,37(2):231-244.

[26] Krutzik N J. Reduction of the dynamic response by aircraft crash on building structures[J]. Nuclear Engineering and Design, 1988,110(2):191-200.

[27] Saarenheimo A, Calonius K, Tuomala M, et al. Soft missile impact on shear reinforced concrete wall[J]. Journal of Disaster Research, 2010,5(4):426-436.

[28] Martina O, Centrob V, Schwoertzigb T. Finite element analysis on the Meppen-Ⅱ-4 slab test[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012,247(6):1-10.

[29] Martina O, Centrob V, Schwoertzigb T. Finite element analysis on the VTT-IRSN flexural failure test[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012,252(12): 1-10.

[30] Mizuno J, Koshika N, Morikawa H, et al. Investigation on impact resistance of steel plate reinforced concrete barriers against aircraft impact Part 2: Simulation analyses of scale model impact tests[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Beijing, 2005:2580-2590.

[31] Mizuno J, Koshika N, Tanaka E, et al. Investigation on impact resistance of steel plate reinforced concrete barriers against aircraft impact Part 3: analyses of full-scale aircraft impact[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Beijing, 2005:2591-2603.

[32] Abbas H, Paul D K, Godbole P N, et al. Aircraft crash upon outer containment of nuclear power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 1996,160(1/2):13-50.

[33] Frano L R, Forasassi G. Preliminary evaluation of aircraft impact on a near term nuclear power plant[C]// International Conference of Nuclear Energy for New Europe. Slovenia, 2009.

[34] Kukreja M. Damage evaluation of 500 MW Indian pressurized heavy water reactor nuclear containment for aircraft impact[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005,235(17/18/19):1807-1817.

[35] Iqbal M A, Rai S, Sadique M R, et al. Numerical simulation of aircraft crash on nuclear containment structure [J]. Nuclear Engineering and Design, 2012,243(2):321-335.

[36] Sadique M R, Iqbal M A, Bhargava P. Nuclear containment structure subjected to commercial and fighter aircraft crash[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013,260(7):30-46.

[37] Dundulis G, Kulak R F, Marchertas A, et al. Structural integrity analysis of an Ignalina nuclear power plant building subjected to an airplane crash[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007,237(14):1503-1512.

[38] 左家红. 秦山核电厂安全壳在飞机撞击下的非线性分析[J]. 核科学与工程,1992,12(1):35-42.
Zuo Jiahong. Nonlinear analysis of Qinshan NPP containment under missile impact[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1992,12(1):35-42.

[39] 李笑天，何树延. 飞机撞击核反应堆安全壳的动力学分析[J]. 核动力工程,2004,25(5):426-429.
Li Xiaotian, He Shuyan. Dynamic analysis of reactor containment subjected to aircraft impact loading[J]. Nuclear Power Engineering, 2004,25(5):426-429.

[40] 徐征宇. 飞机撞击核岛屏蔽厂房的有限元分析[J]. 核科学与工程,2010,30(S1):309-313.
Xu Zhengyu. Finite element analysis for aircraft impact to shield building[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2010,30(S1):309-313.

[41] Arros J, Doumbalski N. Analysis of aircraft impact to concrete structures[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007,237(12/13):1241-1249.

[42] Wierzbicki T, Teng X. How the airplane wing cut through the exterior columns of the World Trade Center[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(6):601-625.

[43] Karim M R, Fatt M S. Impact of the Boeing 767 aircraft into the World Trade Center[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005,131(10):1066-1072.

[44] 郑文凯. 大型商用飞机撞击核电站屏蔽厂房的荷载研究[D]. 北京：清华大学，2013.

[45] Kirkpatrick S W, Bocchieri R T, MacNeill R A, et al. Modeling methodologies for assessment of aircraft impact

damage to the World Trade Center Towers[C]// Proceedings of the 9th International LS-DYNA Users Conference. Dearborn, 2006:53-68.

[46] Hoffmann C, Popescu V, Kilic S, et al. Modelling, simulation and visualization: The pentagon on September 11th[J]. Computing in Science and Engineering, 2004,6(1):52-60.

[47] Rosen P, Popescu V, Hoffmann C, et al. A high-quality high-fidelity visualization of the September 11 attack on the World Trade Center[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008,14(4):937-947.

[48] Popescu V, Hoffmann C. General-purpose visualization of large-scale finite element analysis simulations[C]// Proceedings of Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference. Orlando, 2008:1-10.

[49] Jin B M, Kim Y J, Lee Y S, et al. Preliminary studies on vibration characteristics of nuclear power plant crashed by large civil aircraft[C]// Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, 2012.

[50] Kostov M, Henkel F O, Andonov A. Safety assessment of A92 reactor building for large commercial aircraft crash[C]// The 21th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. New Delhi, 2011: 967-974.

Research progress of buildings and structures subjected to aircraft impact

Liu Jingbo[1], Han Pengfei[1,2], Lin Li[3], Lu Xinzheng[1], Cen Song[3]

(1. *Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*;
2. *The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff of PLA, Luoyang* 471023, *Henan*, *China*;
3. *Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Studies on buildings and structures subjected to aircraft impact have been of greater concern, because malicious aircraft crash is one of the major means adopted in terrorist attacks due to the disastrous consequences and extremely bad influences involved. As the aircraft impact is related with multiple scientific issues, in this paper, the latest developments in the study of buildings and structures subjected to aircraft impact at home and aboard are summarized from three respects covered by test study, theoretical analysis, and numerical simulation, with special focus on difficulties and problems in research as well as the future research direction and trend, including firstly the system research and validation for scale model test, secondly the impact force model and local damage calculation formulas research, thirdly the establishment of the refined model of aircraft, buildings and structures, fourthly the vibration characteristics of buildings and structures subjected to aircraft impact, fifthly the coupling damage effect of impact load and fire load, and finally the comparative analysis of results calculated by the general model and the refined model, decoupling and coupling method, and various numerical simulation programs.

Key words: mechanics of explosion; refined model; impact load; coupling damage effect; aircraft impact

(责任编辑 王易难)