DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0215-07

飞机撞击混凝土结构的动力学分析*

李小军[1],侯春林[2],贺秋梅[1],梅泽洪[1]
(1. 中国地震局地球物理研究所,北京 100080;
2. 环境保护部核与辐射安全中心,北京 100082)

摘要:基于已有的飞机撞击混凝土结构的实验数据,利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,选用可模拟冲击作用下混凝土性能的 4 种不同材料模型,在同一接触算法、同一失效准则下,进行飞机撞击混凝土结构的数值模拟与动力学分析,探讨了 4 种混凝土材料模型在模拟飞机撞击下混凝土结构破坏效应的能力。结果表明:4 种混凝土材料模型均能模拟飞机撞击混凝土结构的穿入、散裂、碎甲等局部破坏效应,但在考虑正、背面破坏面积及剩余速度等因素时,MAT072R3 和 MAT084 材料模型的计算结果与实验结果较接近,MAT111 材料模型次之,MAT159 材料模型有较大的差异。本文的研究结果可为后续评估混凝土结构安全壳抵抗飞机撞击能力时提供基础参数。

关键词:爆炸力学;飞机撞击;材料模型;混凝土结构;动力学分析
中图分类号:O383.2;P315 **国标学科代码**:1303520 **文献标志码**:A

大型商用飞机撞击核电厂是一种潜在的威胁,9·11 事件以后尤其得到重视。对核电厂而言,一旦发生破坏,造成的危害不堪设想,目前在核岛结构的设计中考虑大型商用飞机撞击的影响已经纳入规范。美国核管会在 2009 年将评价核设施结构防御飞机撞击能力作为联邦法规的新条款颁布[1],同年发布 NEI 07-13[2],提供评价大型商用飞机撞击下核设施结构的响应的方法,并在 2011 年正式发布了 RG 1.217[3],要求核设施申请者应提交大型商用飞机撞击下核设施结构响应的评价报告。在我国,《核电厂厂址选择的外部人为事件》[4]中尚未强制要求评价核电厂结构防御大型商用飞机撞击能力,但福岛核事故后,对于一些超设计基准事件,包括大型商用飞机撞击对核电厂的影响,也越来越受到重视[5]。新项目审批重新开启时要求新项目须符合三代标准,提高准入门槛,按照国际最高安全要求新建核电项目。这说明,新建的项目除应满足我国规范体系外,还应按较高的国际标准进行校核验算,这就要求新建的三代核电厂须评价核岛结构防御飞机撞击的能力。

近年来,人们开展了在飞机撞击下混凝土结构响应的研究[6-7,11-13],这些研究多借鉴了其他冲击荷载(如弹体、弹丸及爆炸等)下混凝土结构响应的研究成果[6-10],而飞机撞击混凝土结构的数值模拟及动力学分析仍需进一步深入。由于大型商用飞机撞击核电厂结构会产生两种效应,局部破坏和整体振动,即由飞机发动机引起的局部破坏(穿入、散裂、碎甲和穿透)和由整个飞机冲击引起的整体结构的反应分析,因此,需要进行两种典型的结构破坏模式的评估。由于飞机撞击混凝土结构具有短时强载的特征,其破坏机制非常复杂[12-13]。整个撞击过程是一个瞬态、高应变率、复杂的破坏过程,包含着几何、材料非线性方面的诸多问题,也涉及接触面上伴随接触-撞击过程而产生的撞击能量的传递与交换、接触面的滑移、分离等非线性接触问题。在进行飞机撞击下混凝土结构响应的评价时,通常先基于局部破坏的数值模拟,验证选用的结构材料参数及失效准则的合理性,再进行结构的整体响应分析。对于混凝土结构在飞机撞击下的局部破坏,由于飞机属于硬碰撞物,局部侵彻需要考虑[2,10-11]。局部破坏由连续的 3 个阶段组成[2,8],飞射物穿入标靶,标靶的散裂和碎甲,飞射物穿透标靶。各状态定义如下:穿入(Penetration)为飞射物进入标靶;散裂(Spalling)为标靶正前面材料的散裂(飞射物冲击的正面);碎甲(Scab-

* **收稿日期**:2013-08-29;**修回日期**:2014-01-13
基金项目:国家自然科学基金项目(51408255);国家重点科技攻关项目(2011ZX06002-10-7)
第一作者:李小军(1965—),男,研究员,博士生导师;**通讯作者**:侯春林,hou.chunlin@gmail.com。

bing)为标靶后面材料的碎片(冲击面的背面);穿透(Perforation)为飞射物完全穿透标靶。穿透速度是飞射物恰好完全穿透标靶并且没有穿出时的初始速度。剩余速度是当飞射物的初始速度大于穿透速度时,飞射物从标靶中穿出的速度。在飞机撞击下混凝土结构响应数值模拟的精确性,取决于混凝土材料本构方程及其参数选取的正确性,因此数值模拟中如何选用合适的本构模型以及模型中参数,已经成为数值模拟的关键。

本文中,基于 ANSYS/LS-DYNA 的几种常用的材料参数模型,进行在飞机撞击下混凝土结构局部破坏的数值分析,并将数值分析结果与实验结果比较,给出各个材料参数在模拟飞机撞击混凝土结构的适用性和准确性,为整体评价飞机撞击下核电厂结构的防御能力提供可信的模拟方法和基础参数。

1 基于 ANSYS/LS-DYNA 的数值模拟分析

1.1 实验模型

对于混凝土结构在飞机撞击下的局部破坏评价,多采用侵彻动力分析方法。由于侵彻动力分析的准确性受多个参数的影响,有很大的不确定性,在进行侵彻动力分析中,常辅以真实的实验过程及实验数据校正数值模拟结果的可靠性。比较典型的飞机撞击混凝土结构实验有,H. Tsubota 等[16-18]描述的飞机撞击钢筋混凝土及钢板混凝土结构的实验。为评价飞机撞击混凝土结构的数值模拟结果,本文中选取比较典型的飞机撞击钢筋混凝土响应的实验。飞机撞击钢筋混凝土实验中,飞机垂直撞击钢筋混凝土靶板;钢筋混凝土板的尺寸为 1 500 mm×1 500 mm×600 mm,钢筋间距为 D3 mm@25 mm;取 1/7.5 全尺寸飞机模型,飞机模型由 4 种材料组成,总重量为 245.6 N。表 1 为实验中飞机模型中 4 种材料的主要材料参数和重量;图 1 为实验中飞机撞击钢板混凝土结构的模型剖面示意图。

表 1 飞机模型的材料参数和重量

Table 1 The parameters and the weight of aircraft model

部件	材料	E/GPa	Y/MPa	ε_f	W/N
机身外壳	玻璃	6.37	82.3	0.013	81.3
机身填充物	高密度泡沫	2.28	0.6	0.10	129.4
引擎	钢	206	797.4	0.20	28.1
赫氏支撑轴	碳纤维板	0.168	12.9	∞	6.8

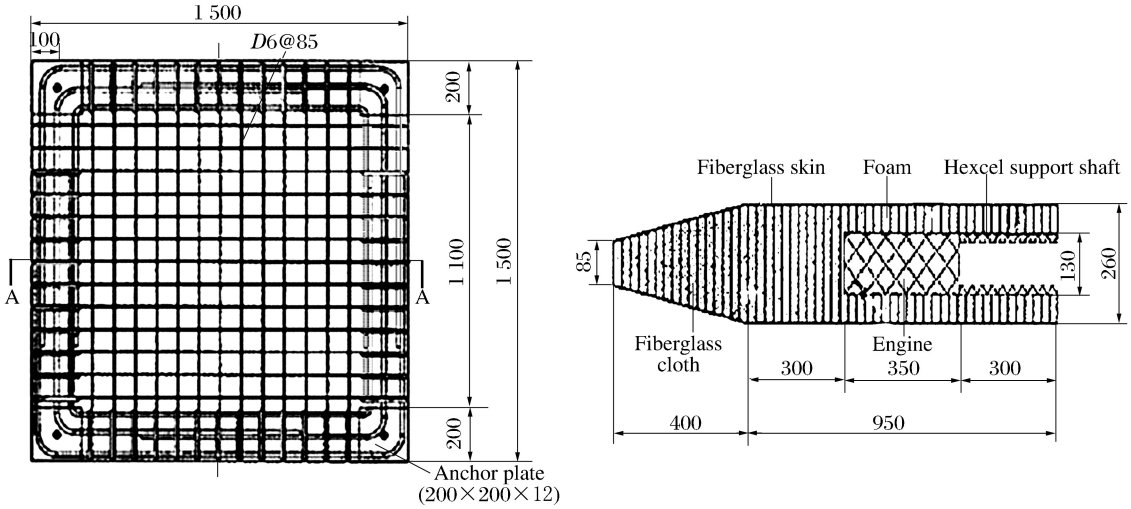

图 1 飞机撞击钢筋混凝土的实验模型剖面示意图

Fig. 1 Schematic section of experimental model of aircraft crashing on the concrete structures

1.2 有限元模型

有限元模型建立过程中,钢筋混凝土的位移协调分离式模型,即钢筋采用空间梁单元 beam 161 划

分网格，混凝土采用三维实体 solid 164 单元，钢筋与混凝土单元通过 Constrained_Lagrange_In_Solid 连接，飞机模型中机身外壳和支撑轴采用壳 shell 163 单元，机身填充物和引擎用实体 solid 164 单元。为保证求解过程的高效及计算结果的收敛性，混凝土结构模型采用映射法划分网格，飞机有限元模型均采用与混凝土结构模型一致的网格，整个有限元模型如图 2 所示。对于材料单元中无失效准则的，通过 Mat_Add_Erosion 定义失效，飞机模型中材料的失效准则均与实验模型中提供的参数一致，采用混凝土材料的失效准则。飞机撞击混凝土结构的接触算法通过 Contact_Eroding_Surface_To_Surface 和 Contact_Surfact_To_Surfact 定义。计算过程中不同混凝土材料模型时，飞机模型与混凝土结构间的接触算法不变，同时为防止出现沙漏现象，还加入了 Control_Energy 和 Control_Hourglass。

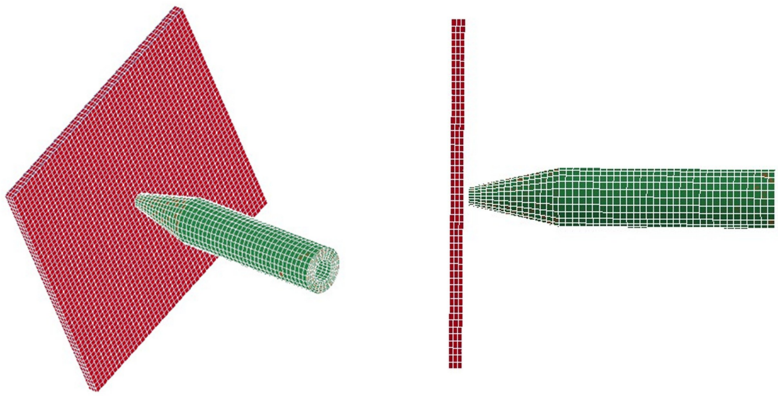

图 2　飞机撞击混凝土结构的有限元网格划分模型

Fig. 2　Finite element mesh model of aircraft crashing on reinforced concrete

1.3　混凝土本构模型

ANSYS/LS-DYNA 广泛应用于爆炸和冲击荷载作用下结构响应的计算，提供了丰富的混凝土材料模型[14-15]，如：Mat_Pseudo_Tensor(MAT016)；Mat_Concrete_Damage_R3(MAT072R3)；Mat_Winfrith_Concrete(MAT084)；Mat_Johson_Holmquist_Concrete(MAT111)；Mat_Soil_Concrete(MAT078)；Mat_Brittle_Damage(MAT096)；Mat_CSCM_Concrete(MAT159)。每个模型都有自己的优缺点，需要进行分析才能选到合适的混凝土材料模型。本文中选取 4 种模型进行飞机撞击混凝土结构的模拟，用以分析各个混凝土材料参数模拟飞机撞击混凝土结构的反应规律。

1.3.1　损伤混凝土材料模型

MAT072R3 为损伤混凝土材料模型，是原 72 号混凝土材料模型的改进版，采用 3 个剪切失效面，同时考虑损伤和应变率的影响。由于材料模型的参数众多且复杂，最后又对材料模型添加了参数自动生成功能，该模型一般只需要混凝土抗压强度等较少的信息，所以该材料模型适合于模拟混凝土爆炸以及碰撞载荷下的响应。

1.3.2　连续帽盖混凝土模型

MAT159 为连续帽盖混凝土模型，该模型针对用于安全设施的混凝土模型，如高速路旁的混凝土护栏、桥梁护栏等在受到碰撞时，其变形和破坏能够很好地用该材料模型模拟，它是地帽模型的扩展，包括各向同性连续方程、屈服及硬化强度面、破坏方程，同时也考虑了应变率效应。该材料模型主要用于模拟埋有钢筋的加强混凝土，可用钢筋、混凝土耦合算法共同模拟钢筋混凝土。

1.3.3　混凝土累积损伤模型

MAT111 是混凝土累积损伤模型，Johnson-Holmquist-Concrete 本构模型及损伤模型是针对混凝土在大应变、高应变率及高围压条件下提出的一种混凝土材料本构关系，该模型考虑了材料损伤、应变率效应以及静水压力对于屈服应力的影响。它能较好地描述混凝土在高速撞击与侵彻下所产生的损伤、破碎及断裂(或层裂)，在数值模拟中得到了广泛的使用。

1.3.4　混凝土 Ottosen 塑性模型

MAT084 是基于剪切破坏提出的混凝土的塑性模型，主要用于解决冲击荷载作用下钢筋混凝土的响应，该模型允许每个单元的三向裂纹开展，而且可在 Ls-Prepost 查看裂纹。该模型主要应用在模拟冲击荷载作用下混凝土结构的响应。

这些材料模型的理论公式及详细介绍可参见 ANSYS/LSDYNA 使用手册，参见文献[14-15]。在第三代核电机组设计中评价飞机撞击混凝土安全壳结构时，这些模型有很好的应用，如 AP1000 核电机组设计中评价屏蔽厂房在大型商用飞机撞击下的响应时，采用的是混凝土 Ottosen 塑性模型；EPR 核电机组设计中评价混凝土安全壳结构在大型商用分析撞击下的响应时，采用连续帽盖混凝土模型。

2 数值分析结果

2.1 计算结果

飞机撞击混凝土钢板的数值计算过程为 15 ms。5 ms 左右前，飞机引擎未到达混凝土靶板，混凝土几乎没有破坏；5 ms 左右时，飞机引擎开始撞击混凝土靶板；9 ms 左右，整个飞机模型即将穿透混凝土靶板；11 ms 后，飞机引擎穿透混凝土结构后飞离混凝土靶板。图 3 为 9 ms 时靶板的正面破坏状态；图 4 为 9 ms 时靶板的背面的破坏状态；图 5 为 9 ms 时飞机穿透靶板的侧视图。由图可知，MAT084、MAT159、MAT111 和 MAT72R3 均能模拟飞机撞击混凝土结构的局部效应，飞机引擎撞击混凝土结构时均出现混凝土的破坏失效和钢筋的断裂的现象；混凝土结构的背面破坏面积大于正面破坏面积；相同撞击条件下，根据混凝土结构破坏面积得到 MAT072R3 和 MAT084 两种模型计算结果较接近，MAT111 和 MAT159 两种模型计算结果较接近，且 MAT072R3 和 MAT084 模型比 MAT111 和 MAT159 模型破坏面积大。

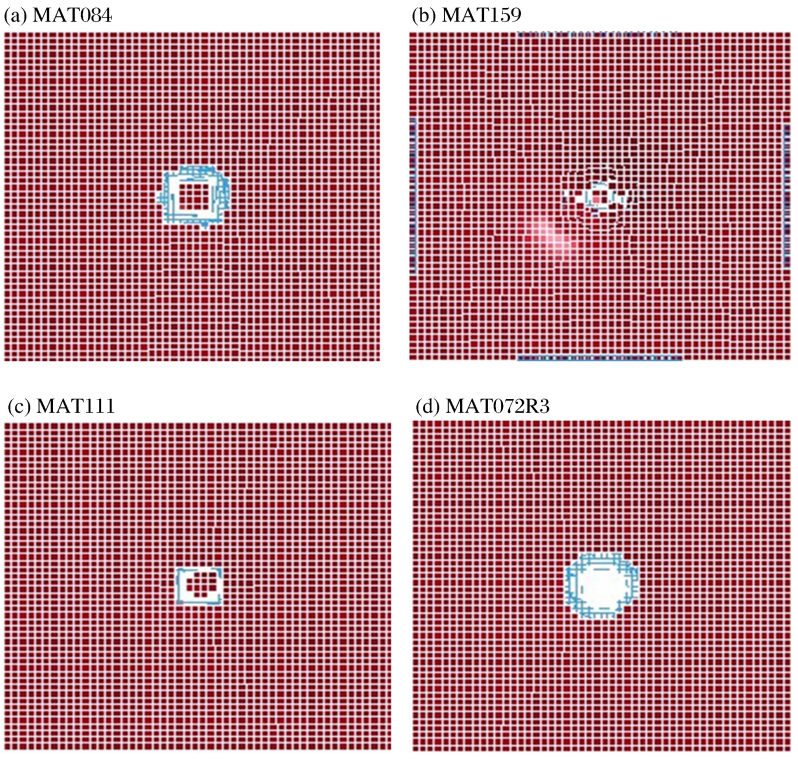

图 3 9 ms 时靶板正面的破坏状态

Fig. 3 The damage state of target positive at 9 ms

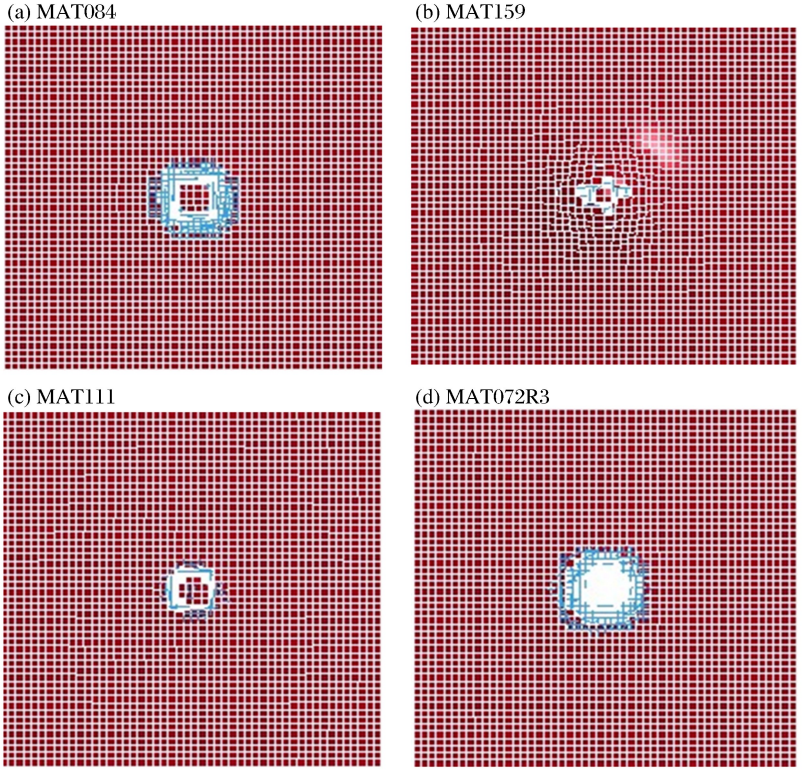

图 4 9 ms 时靶板背面的破坏状态

Fig. 4 The damage state of target backside at 9 ms

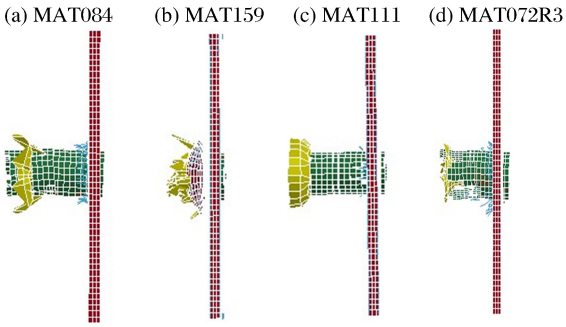

图 5　9 ms 时飞机穿透靶板的状态

Fig. 5　The state of aircraft penetrating the target at 9 ms

2.2　与实验结果的比较

为更精确地说明 4 种混凝土材料模型在模拟飞机撞击混凝土结构的使用性，图 6 为飞机引擎和穿透机身速度的变化过程；表 2 列出了飞机撞击混凝土的数值分析结果与实验结果的对比。表中，d_p 为正面破坏面积直径，A_b 为背面破坏面积。从图 6 中可以看到，MAT084、MAT111 和 MAT72R3 变化趋势一致，穿透机身外壳的剩余速度在 110 m/s 左右，引擎的剩余速度在 60 m/s 左右。表 2 列出的实验结果机身外壳的剩余速度在 110 m/s，引擎的剩余速度在 80 m/s。MAT084、MAT111 和 MAT72R3 材料模型计算的机身外壳的剩余速度均与实验结果较接近；对于引擎剩余速度，MAT72R3 计算的 68m/s 较接近于实验结果。

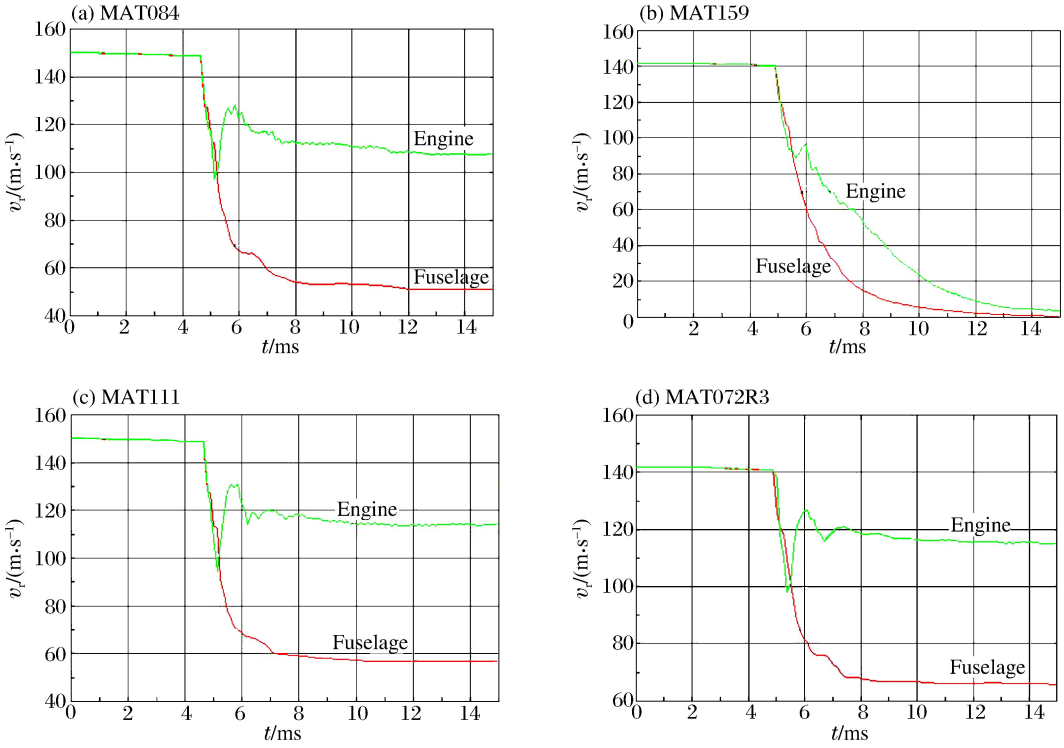

图 6　机身和引擎的速度曲线

Fig. 6　Speed curve of the fuselage and engine

表 2　数值分析结果与实验结果的对比

Table 2　Comparison of numerical and the experimental results

模型	v_0/(m·s^{-1})	v_r/(m·s^{-1})		d_p/cm	A_b/(cm·cm)
		机身	引擎		
实验	142	110	80	33	50×55
MAT084	142	108	52	30	39×42
MAT159	142	10	5	24	18×27
MAT111	142	113	58	18	30×33
MAT072R3	142	113	68	30	42×42

3 结 论

利用 ANSYS/LSDYNA 提供的可用于模拟冲击作用下混凝土结构性能的 4 种材料参数，对日本 Kobori 综合研究公司的飞机撞击混凝土结构的实验进行了数值模拟分析，比较了不同混凝土材料模型在飞机撞击下混凝土结构动力分析时，混凝土结构靶板的正、背面破坏面积及飞机剩余速度等计算结果。得到：

(1) ANSYS/LSDYNA 中混凝土材料模型较多，各自有着其适用的领域，在相同分析计算领域中，不同的混凝土材料模型计算结果也不尽一致。选择合适的混凝土材料模型本构，有利于提高数值分析计算结果的准确度。

(2)飞机撞击混凝土结构数值模拟中，采用的 4 种混凝土模型参数均能模拟飞机引擎穿入、散裂、碎甲等混凝土结构的局部破坏效应，但计算的飞机撞击混凝土的正、背面破坏面积及剩余速度不同，MAT072R3 和 MAT084 材料模型的计算结果与实验结果较接近，MAT111 材料模型次之，而 MAT159 材料模型有较大的差异，正、背面破坏面积偏小，剩余速度几乎降低为零。

(3) 由于数值分析计算结果存在一定的不确定性，所以采用的 MAT072R3、MAT084 和 MAT111 混凝土材料模型参数均可为后续评估混凝土结构安全壳抵抗飞机撞击能力时提供基础参数，也可应用于飞机撞击混凝土结构最不利撞击角度、飞机撞击混凝土结构的穿透公式及飞机撞击混凝土结构的安全壳的整体响应分析等方面的进一步研究中。

参考文献：

[1] US Nuclear Regulatory Commission. 10 CFR 50 Domestic licensing of production and utilization facilities[S]. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission, 2009.

[2] Nuclear Energy Institute. NEI 07-13 Methodology for performing aircraft impact assessments for new plant designs, Revision 7[S]. Washington, DC: Nuclear Energy Institute, 2009.

[3] US Nuclear Regulatory Commission. RG 1.217 Guidance for the assessment of beyond-design-basis aircraft impacts [S]. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission, 2011.

[4] 中国国家核安全局. HAD101/04 核电厂厂址选择的外部人为事件[S]. 1989

[5] 汤搏. 关于核电厂防大型商用飞机撞击的要求[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.

[6] 李世民，李晓军. 几种常用混凝土动态损伤本构模型评述[J]. 混凝土，2011(6)：19-22.
Li Shi-min, Li Xiao-jun. Review on current dynamic damage constitutive models of concrete[J]. Concrete, 2011 (6):19-22.

[7] 赵振东，钟江荣，余世舟. 钢混结构物受外来飞射体撞击的破坏效应研究[J]. 地震工程与工程振动，2003，23(5)：88-94.
Zhao Zhen-dong, Zhong Jiang-rong, Yu Shi-zhou, et al. Study on damage to reinforced concrete structures by impacting of an aircraft[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003,23(5):88-94.

[8] 冯国忠. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的混凝土靶板侵彻问题的数值模拟与分析[D]. 中国地震局工程力学研究所，2006.

[9] 郭香华，张庆明，何远航. 混凝土厚靶在弹体正侵彻下的响应研究[J]. 北京理工大学学报，2011，31(7)：765-767.
Guo Xiang-hua, Zhang Qing-ming, He Yuan-hang. Study on behavior of semi-infinite concrete targets subjected to projectile normal penetration[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011,31(7):765-767.

[10] 张晶，贾宏光，丁玲，等. 弹丸侵彻混凝土靶的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报，2012，32(2)：89-98.
Zhang Jing, Jia Hong-guang, Ding Ling, et al. The numerical simulation of projectile penetrating into concrete target[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012,32(2):89-98.

[11] 陈仰光，周羽. 飞机撞击混凝土平板的动力学分析[C]//第 15 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册). 河南焦

作,2006.

[12] 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.

[13] Hossain Q A, Kennedy R P, Murray R C, et al. Structures, systems, and components evaluation technical support documents, DOE standard, accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities[R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1997.

[14] LS-DYNA keyword manual version 971[R]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.

[15] Murray Y D. User's manual of LS-DYNA concrete material model 159[R]. Federal Highway Administration, 2007.

[16] Tsubota H, Koshika N, Mizuno J, et al. Scale model tests of multiple barriers against aircraft impact: Part 1. Experimental program and test results[C]// Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Seoul, Korea, 1999.

[17] Tsubota H, Koshika N, Mizuno J, et al. Scale model tests of multiple barriers against aircraft impact: Part 2. Simulation analyses of scale model impact tests[C]// Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Seoul, Korea, 1999.

[18] Tsubota H, Koshika N, Mizuno J, et al. Scale model tests of multiple barriers against aircraft impact: Part 3. Analytical evaluation of multiple barriers against full-scale aircraft impact[C]// Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Seoul, Korea, 1999.

Dynamic analysis of aircraft impacting on concrete structures

Li Xiao-jun[1], Hou Chun-lin[2], He Qiu-mei[1], Mei Ze-hong[1]

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing* 100081, *China*;
2. *Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection of PRC, Beijing* 100082, *China*)

Abstract: We carried out the analysis of aircraft crashing on the concrete structures through numerical simulation and dynamic analysis using the matured software of ANSYS/LS-DYNA. The analysis uses the same contacting algorithm for four different material models and the results of damage effects are discussed in detail. The numerical simulation results are listed as follows. First, all of four material models can simulate the crashing process of penetration, spallation, and some other local damage effects. Second, if the damage is in front and back side, multiplying with velocity is considered, though the results of MAT072R3 and MAT084 are close to each other. The result of MAT111 is not very close to the previous two models. The model of MAT159 is significantly different from the results of 3 models mentioned above. The results of this research provide some basic parameters for subsequent evaluation of concrete structures resisting under aircraft impact.

Key words: mechanics of explosion; impact of aircraft; material model; concrete structure; dynamic analysis

(责任编辑　丁　峰)