

文章编号: 1000-4750(2014)09-0063-08

商用客机对核安全壳撞击破坏效应的数值模拟分析

曹健伟, 方 秦, 龚自明, 吴 昊

(解放军理工大学国防工程学院, 南京 210007)

摘 要: 为研究商用客机撞击下新型核反应堆安全壳安全防护性能, 该文建立新舟 600 飞机和安全壳精细化有限元模型, 采用 LS-DYNA 软件对撞击全过程进行数值模拟, 分析安全壳结构位移响应和局部损伤破坏情况。分析表明: 新舟 600 撞击力时程曲线中的峰值荷载是因引擎和机翼撞击安全壳所致, 撞击力时程曲线与 Phantom F4 战斗机和 Boeing 707 客机撞击力时程曲线的形状大体相似, 但撞击持续时间、峰值荷载大小有较大差别; 在正常巡航速度撞击下核安全壳局部破坏较为严重, 局部变形量超过规范许可值, 密闭性能受到影响; 采用在直接施加撞击荷载的计算方法不能反映安全壳真实的响应和损伤破坏。

关键词: 核安全壳; 飞机撞击; 精细化分析模型; 数值模拟; 损伤

中图分类号: TU378 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.03.0255

NUMERICAL INVESTIGATION ON RESPONSE AND DAMAGE OF NUCLEAR CONTAINMENTS UNDER AIRCRAFT IMPACT

CAO Jian-wei, FANG Qin, GONG Zi-ming, WU Hao

(College of National Defence Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: In order to analyze the protection performance of nuclear containment under the impact of commercial aircraft, the refined finite element models of aircraft MA600 and nuclear containment are established in this paper. The impact process is simulated by using the commercial finite element software LS-DYNA. The structural integral displacement and local failure modes of the containment are analyzed. The results show that the peak load of MA600 on the nuclear containment during the whole process is mainly caused by the impact of wings and engines; the impact load-time curve of the MA600 is similar with that of the Phantom F4 and Boeing 707, but the time duration and the peak load are different; under the normal patrol velocity, the local deformation of nuclear containment will exceed the allowance value in current criterion, as a result, the obturation performance of nuclear containment will be affected due to the serious local damage; the actual dynamic behaviour and failure of nuclear containment cannot be evaluated by applying the impact load directly on the nuclear containment.

Key words: nuclear containment; aircraft impact; refined analytical model; numerical simulation; damage

虽然飞机撞击核安全壳是极小概率的事件, 但是核安全壳一旦发生破坏, 其后果是灾难性的, 为此国内外学者对核设施特别是核反应堆安全壳在飞机撞击下的安全防护性能进行广泛研究^[1]。左家

红等^[2]利用 ADINA 商用有限元软件对秦山核电站安全壳在飞机撞击荷载下的结构反应进行了分析, 其中撞击荷载采用修正的刚性载荷函数, 得到了安全壳位移、内力、开裂及破坏等方面响应,

收稿日期: 2013-03-27; 修改日期: 2013-06-23

通讯作者: 方 秦(1962—), 男, 福建福清人, 教授, 博士, 博导, 从事武器效应与工程防护研究(E-mail: fangqinjs@139.com).

作者简介: 曹健伟(1987—), 男, 江苏南通人, 硕士生, 从事防护工程领域研究(E-mail: caojianweipla@163.com);

龚自明(1975—), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士, 从事防护工程领域研究(E-mail: gongziming@sohu.com);

吴 昊(1981—), 男, 陕西宝鸡人, 讲师, 博士, 从事冲击作用下工程结构动态响应研究(E-mail: abrahamhao@126.com).

指出安全壳穹顶撞击区附近的局部非线性效应比较明显,而在撞击区以外变形和内力量值衰减很快,撞击不会对安全壳整体造成重大威胁。Frano等^[3]提出了四种不同飞机的撞击力荷载时程函数,并通过数值模拟对四种荷载函数作用下安全壳响应及损伤破坏状况进行对比分析。王晓雯等^[4]选取我国核安全导则中规定的标准化荷载函数作为撞击荷载,并建立了精细化的核安全壳有限元模型,考虑了钢筋混凝土主体部分、预应力钢束和钢衬里的共同作用,分析结果表明,半圆顶核安全壳在小型飞机撞击下可以保持结构完整,在商用飞机撞击下结构不会发生整体性破坏。李笑天等^[5]运用DYTRAN软件分析了飞机撞击安全壳的动力学问题,飞机采用相同质量与速度的长方体实体块等效模型,给出了混凝土变形图与撞击物速度衰减曲线。Iqbal等^[6]运用ABAQUS软件对波音707飞机撞击核安全壳进行数值模拟,采用Riera方程修正得到的撞击力时程曲线直接加载,安全壳考虑内外层钢筋加固,分析了安全壳位移和变形等响应。Bangash^[7]建立了狂风战斗机与核安全壳的精细化有限元模型,通过ISOPAR软件对撞击过程进行数值模拟,对安全壳破坏响应进行分析。Masahide等^[8]建立了波音747有限元模型,采用AUTODYN软件对其撞击混凝土靶体情况进行分析,并研究不同厚度及配筋率对靶体损伤的影响。

以上分析可以看出,已有研究较多采用修正后的飞机撞击荷载-时间函数来描述飞机撞击安全壳的作用,通过建立精细化飞机模型确定撞击荷载并分析安全壳响应及损伤破坏还不多见。实际上,采用荷载-时间函数加载的方法有很大的局限性:首先,荷载-时间函数难以准确确定;其次,荷载作用面积的确定也存在很大随机性;再者,飞机撞击区的局部损伤破坏难以评估。

随着数值模拟方法和高性能计算机的发展,采用精细化有限元建模和大规模计算模拟已成为一种重要的研究手段。本文以国产新舟飞机和新型核安全壳为研究对象,新舟飞机模型包含整个机身结构,安全壳模型包括钢筋混凝土主体、预应力钢束和钢衬里等三个部分。通过建立精细化有限元模型,并采用LS-DYNA有限元软件对撞击全过程进行模拟,对撞击过程中飞机及安全壳响应及损伤破坏进行分析;在此基础上,对数值模拟得到的荷载-时间函数曲线作用下安全壳的响应及损伤破坏

进行了分析,讨论了以上两种分析方法的优缺点。

1 计算模型

1.1 新舟飞机及新型核安全壳的描述

选用广东岭澳核电站反应堆厂房安全壳为分析模型,它由圆柱形筒体和半球体壳体组成,内径37.0m,筒壁及半球顶壁厚0.9m,筒壁高度为44.6m,且有6mm厚的钢衬里锚固在混凝土内表面上(图1)。筒壁环向预应力钢束绕360°锚固在扶壁上;筒壁竖向钢束与穹顶竖向钢束合二为一,绕过穹顶呈倒U字形布置,在穹顶处分成正交的两组。在穹顶仰角45°下附加环向预应力钢束,弥补径向钢束的薄弱部位。预应力体系俯视图见图2。飞机模型选用西飞自主研发的新舟600飞机,该飞机作为国内主流支线商业飞机已经大量投入使用,其主要参数如下:翼展29.2m,机高8.85m,机长24.7m,自重14000kg,最大巡航速度514km/h。

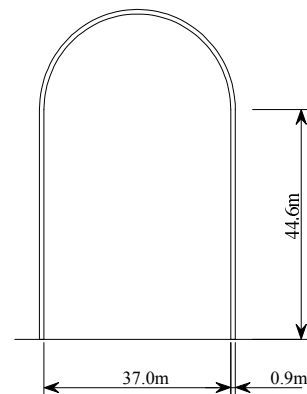


图1 核安全壳尺寸示意图

Fig.1 The size of nuclear containment

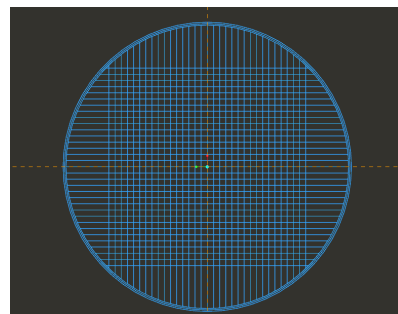


图2 预应力体系俯视图

Fig.2 Vertical view of prestressing system

1.2 钢筋混凝土安全壳有限元模型

按照真实尺寸建立安全壳模型,钢筋混凝土采用六面体实体单元模拟(图3(a)),考虑计算精度及计算效率,单元尺寸为600mm×600mm×100mm(沿着筒壁壁厚方向),对筒壁中部的撞击区域进行局部

加密(图 3(b)), 加密范围为筒壁距离地面 10m 处至 30m 处, 单元尺寸 100mm×100mm×100mm。由于普通钢筋的布置较为复杂且会大大增加计算时间, 于是将钢筋混凝土采用整体式建模, 并考虑 1.2%配筋率。

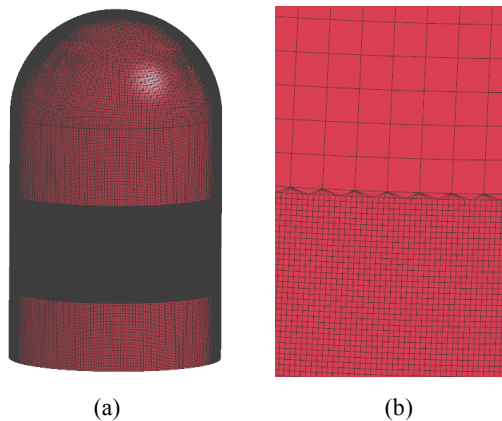


图 3 钢筋混凝土部分有限元模型

Fig.3 The FE model of reinforced concrete

1.3 预应力钢束有限元模型

岭澳核电站安全壳采用第三代半圆顶安全壳, 且在预应力钢束的布置上较以往有较大的改进。为真实反映新一代预应力体系承载力情况, 建模时按照实际预应力钢束的位置及方向布置二力杆单元^[9], 其有限元模型见图 4。预应力钢束和混凝土采用分离建模, 不考虑预应力钢束与混凝土的粘结滑移。预应力钢束与钢筋混凝土单元划分网格后共节点并能够协同变形。

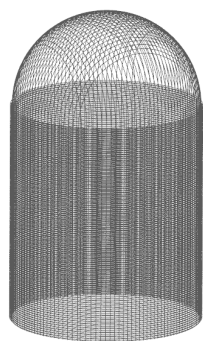


图 4 预应力体系布置图

Fig.4 The plan of prestressing system

1.4 飞机有限元模型

飞机有限元模型由壳单元(图 5)与梁单元(图 6)组成, 壳单元主要模拟机身机翼蒙皮等, 梁单元主要模拟飞机内梁、肋等骨架。飞机有限元模型只考虑飞机空机重量部分, 重量为 13t。该模型包含大约 25 万个梁单元和 22 万个壳单元。有限元模型前处理过程中, 将具有同样单元属性与材料属性的单

元归结为一个集合(Part)。模型中梁单元有 1437 个集合(Part), 壳单元有 416 个集合(Part), 每个集合(Part)中单元尺寸不同但均按实际情况选取。飞机模型总质量及质量分布与实际情况大体一致, 保证了飞机有限元模型的可信度。在进行撞击数值模拟时, 飞机的初始撞击速度为正常巡航速度 145m/s, 并假定飞机平行于地面垂直撞击安全壳筒壁, 撞击高度距地面垂直高度为 20m(图 7)。

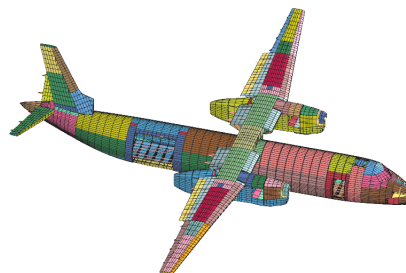


图 5 飞机模型壳单元部分

Fig.5 The shell elements of the plane

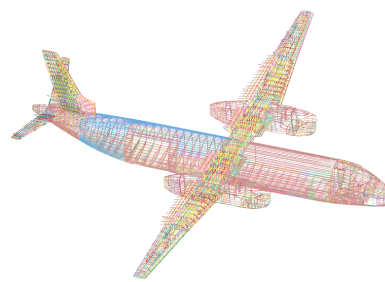


图 6 飞机模型梁单元部分

Fig.6 The beam elements of the plane

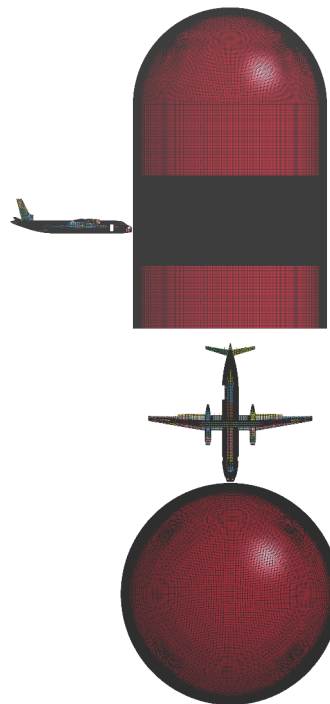


图 7 飞机撞击安全壳有限元模型

Fig.7 The FE model of the plane crashing on the containment

1.5 钢衬里有限元模型

钢衬里是安全壳结构重要组成部分,主要是保证安全壳的密闭性能,但是其也有提升安全壳整体结构性能的作用^[10]。选用薄壳单元模拟钢衬里结构,壳单元厚度取实际工程的 6mm。模型整体划分网格,对筒壁中部的撞击区域进行局部加密,加密形式同安全壳钢筋混凝土部分。钢衬里壳单元与钢筋混凝土安全壳最里层混凝土实体单元共节点。

2 材料模型及计算参数

2.1 钢筋混凝土

钢筋混凝土材料选用 K&C 模型 (MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) 进行模拟,该材料模型可以通过设置配筋率来模拟整体式钢筋混凝土。对于常用混凝土如 C30、C50 等, K&C 模型只需输入混凝土的密度 ρ 、泊松比 ν 、单轴抗压强度和材料应变率关系曲线,则能自动生成单轴抗拉强度,确定极限面的材料参数、控制损伤的参数、损伤变量 λ - η 关系、以及状态方程,并且具有较好的准确性^[11]。实际情况下安全壳一般选用 C50 混凝土, K&C 混凝土材料模型计算参数为:密度 $\rho=2500\text{kg/m}^3$,泊松比 $\nu=0.2$,单轴抗压强度 $f'_c=41\text{MPa}$ 。为模拟混凝土开坑压碎等破坏效果,通过 LS-DYNA 中“MAT_ADD_EROSION”关键字定义失效应变来模拟单元破坏情况。

2.2 预应力钢束及钢衬里

安全壳预应力钢束由钢绞线组成,钢衬里材料为 A3 钢材,均采用塑性随动硬化 (PLASTIC_KINMATIC) 材料模型来描述它们的材料本构关系并考虑了应变率相关和材料失效。预应力钢束及钢衬里的计算参数取值见表 1,材料应变率参数 C 、 P 取值参考了文献[12],单元变形过大时失效应变值 FS 取值参考了文献[13]。

2.3 新舟飞机壳体及梁单元

飞机结构上采用的航空铝合金材料属于弹塑性材料,采用塑性随动硬化 (PLASTIC_KINMATIC) 材料模型描述其材料本构关系。当撞击过程中飞机机身发生较大变形时,壳单元和梁单元会因达到失效应变 FS ^[13]而被删除。材料考虑应变率效应^[12],具体参数见表 1。

3 计算方法

本文采用 LS-DYNA 有限元软件中 Lagrangian

表 1 材料模型的计算参数

| | $\rho/(\text{kg/m}^3)$ | E/GPa | ν | σ_y/MPa | C | P | FS |
|-------|------------------------|----------------|-------|-----------------------|--------|-----|------|
| 预应力钢束 | 7850 | 190 | 0.29 | 1480 | 641.0 | 7.3 | 0.01 |
| 钢衬里 | 7850 | 210 | 0.29 | 300 | 40.4 | 5.0 | 0.8 |
| 航空铝合金 | 2700 | 71 | 0.33 | 470 | 6500.0 | 4.0 | 1.0 |

描述增量法进行数值模拟。选用全积分壳单元和常应力实体单元。预应力钢束与安全壳钢筋混凝土单元共节点,钢衬里壳单元与钢筋混凝土部分最内层实体单元共节点,飞机梁单元与壳单元共节点,安全壳底部采用固端约束。飞机撞击安全壳过程中的接触问题十分复杂,包括了飞机本身的自接触,飞机壳单元分别与钢筋混凝土、预应力钢束和钢衬里的接触以及飞机梁单元分别与安全壳各部分的接触。为防止撞击过程中飞机自身壳单元或梁单元由于变形过大而产生互相穿透,分别定义壳单元和梁单元的自接触“CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE”^[14]。考虑到飞机壳单元和梁单元与安全壳各部分发生撞击接触时,接触的双方都存在单元删除的情况,所以采用侵蚀接触算法^[14] (CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE),以保证单元失效被删除后,剩下的单元依然能够考虑接触。计算时间步长比例因子为 0.9,且不进行质量缩放。实体单元采用基于单元体积的沙漏模式^[14]进行控制。LS-DYNA 有限元软件中撞击接触计算方法的详细介绍参见文献[15]。

4 计算结果及其分析

以下首先采用飞机撞击安全壳耦合分析,研究飞机和安全壳的变形及损伤破坏,在此基础上,依据耦合分析得到的撞击力时程曲线,进行安全壳的变形及损伤破坏非耦合分析,并对比两种分析方法的计算结果。

4.1 飞机撞击作用下响应及损伤破坏(耦合分析)

4.1.1 新舟飞机

图 8 实线是飞机撞击安全壳的总作用力时程曲线,其第一个波峰出现在 0.01s 左右,最大值为 $2 \times 10^7 \text{N}$,这是飞机机身前部驾驶舱及设备刚度较大导致;随后撞击力下降至一个平稳水平,大小在 $1 \times 10^7 \text{N}$ 上下波动;0.07s 之后引擎和机翼开始撞击安全壳,而引擎的刚度和重量很大,所以撞击荷载迅速提高;0.08s 左右撞击力达到最大值 $4.82 \times 10^7 \text{N}$,并且持续大约 0.1s 而没有较明显下降;之后荷载曲线迅速下降,至 0.12s 左右基本降

至为零。图 8 中虚线是网格细化(单元尺寸 50mm×50mm×50mm)的计算结果,由此可见,1.2 节确定的单元尺寸可满足计算精度要求。

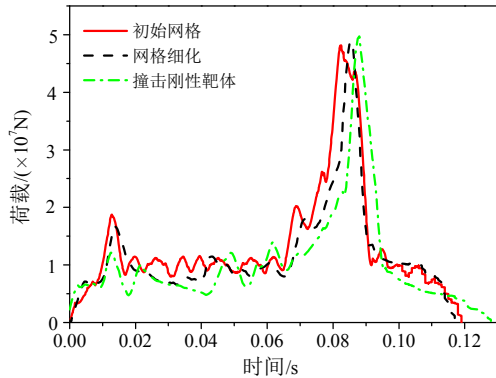


图 8 新舟 600 飞机撞击力时程曲线

Fig.8 The impact load-time curve of MA600

新舟 600(MA600)的撞击力时程曲线与 Phantom F4 战斗机和 Boeing 707 客机撞击力曲线^[3]对比情况如图 9 所示。这三种飞机的撞击力曲线形状大体一致,但峰值大小、峰值出现时间、撞击持续时间等有较大差别。这跟飞机的型号和撞击速度有很大关系(图 9)。由于本文飞机模型只考虑了飞机的空机重量部分,其重量大小为 13t,比 Phantom F4 轻 6t,但不到波音 707 重量的 1/10,且撞击速度也比另外两种飞机小许多。

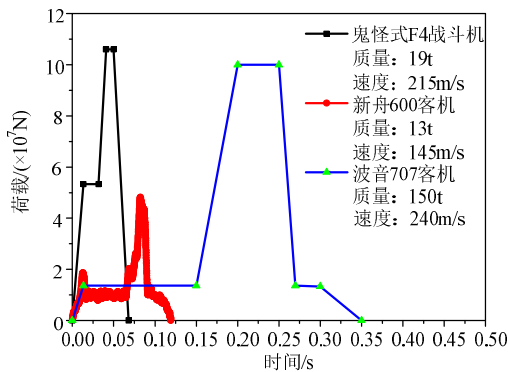


图 9 三种飞机的撞击力时程曲线

Fig.9 The impact load-time curve of three planes

图 10 是新舟 600 飞机在不同时刻的损伤破坏发展过程。由此可见,撞击过程中飞机损伤破坏严重。

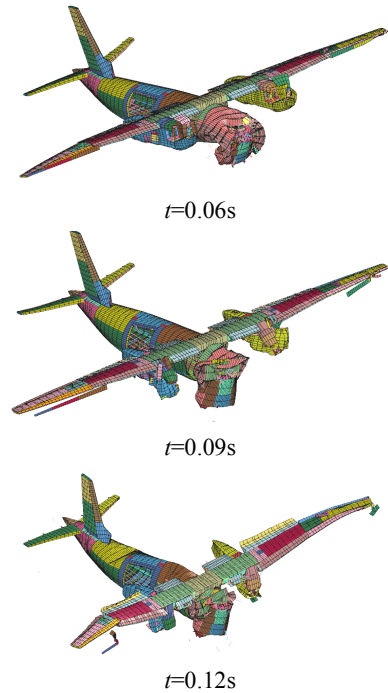
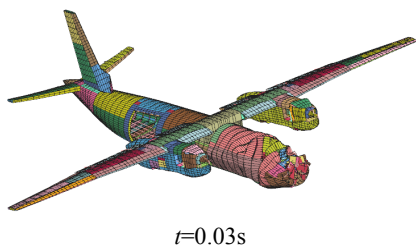


图 10 新舟 600 飞机不同时刻的损伤破坏情况

Fig.10 Damage of MA600 at different time

4.1.2 核安全壳

1) 位移响应。

图 11 和图 12 是内层混凝土位移量值沿垂直方向和水平圆弧方向远离撞击中心时的衰减情况。从图 11 和图 12 可以看出,被飞机撞击的局部区域有较大位移,撞击中心处最大位移达到 305mm,但随着远离撞击区域,位移量值迅速衰减,在距离撞击中心 3m 左右时,位移量值已经非常小。由此可见,撞击产生的变形仅发生在撞击中心半径为 3m 的区域内。

2) 钢筋混凝土壳体的损伤破坏。

安全壳在撞击中心附近范围损伤较大(图 13(a))。撞击区域等效塑性应变放大图见图 13(c),图中黑线以内实体单元被删除,为撞击破坏区,黑线以外的近似矩形区域以及周围四块明显的较小区域为塑性区,其余为未受影响区;主要塑性区上方的横向条状塑性区域为预应力箍筋张拉引起的塑性应变。

撞击过程中外层混凝土压碎面积不断增大,至 0.12s 时面积达到约 15m²。外层混凝土绝大部分压碎厚度为 100mm,最大开坑深度为 300mm(图 14)。安全壳混凝土内部沿壳壁方向产生范围较大的局部层裂(图 15(a))。

3) 钢衬里的损伤破坏。

图 16(a)是钢衬里撞击区域等效塑性应变图。由

该图可知，钢衬里最大压应变值 1.13×10^{-2} (图 17) 大于规范^[16]规定的允许极限压应变值 5×10^{-3} ；图 18 也表明钢衬里撞击区域应力达到 320MPa，超过屈服值。由此可见，新舟 600 撞击可能会对钢衬里密闭性能造成影响。

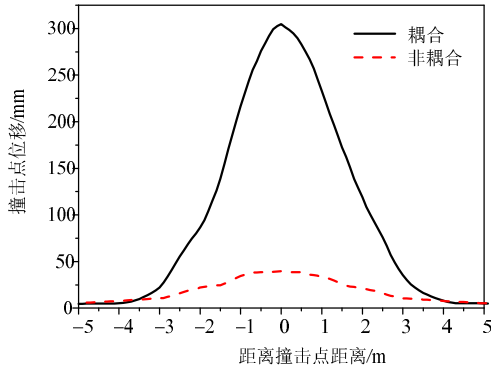


图 11 竖直方向安全壳变形衰减曲线

Fig.11 The attenuation of deformation in vertical direction

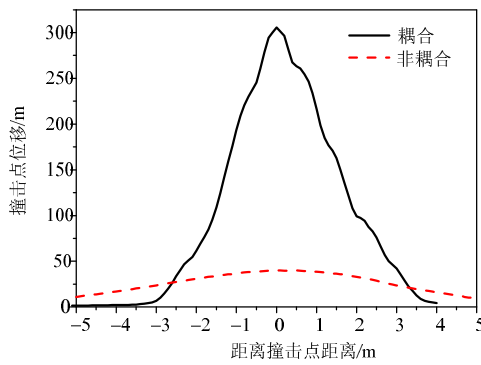


图 12 水平圆弧方向安全壳变形衰减曲线

Fig.12 The attenuation of deformation in horizontal direction

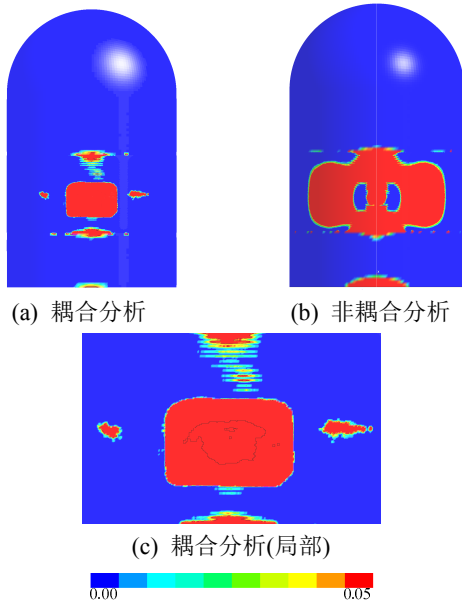


图 13 安全壳表面钢筋混凝土损伤情况($t=0.12s$)

Fig.13 Damage of reinforced concrete on the surface ($t=0.12s$)

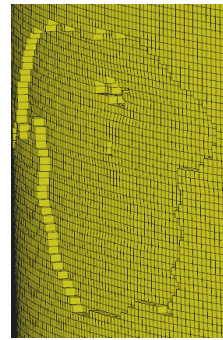
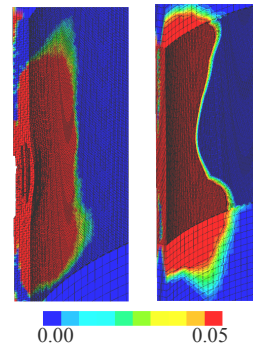


图 14 安全壳外层局部破坏($t=0.12s$)

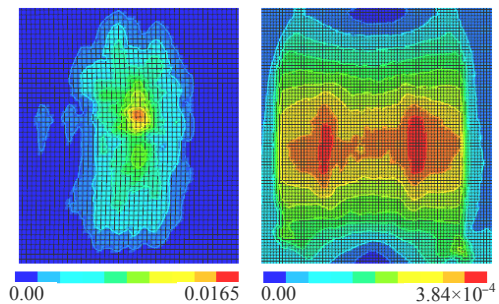
Fig.14 Local damage of the outer layer of the containment ($t=0.12s$)



(a) 耦合分析 (b) 非耦合分析

图 15 安全壳钢筋混凝土损伤剖面图($t=0.12s$)

Fig.15 Damage of the containment on the cross-section ($t=0.12s$)



(a) 耦合分析 (b) 非耦合分析

图 16 钢衬里撞击区域等效塑性应变图($t=0.12s$)

Fig.16 The effective plastic strain of steel liner ($t=0.12s$)

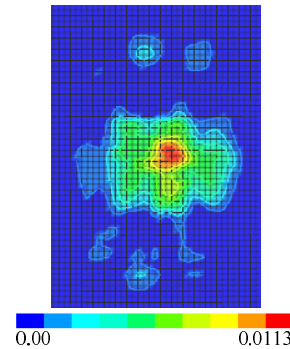


图 17 钢衬里最大压应变图

Fig.17 The peak compressive strain of steel liner

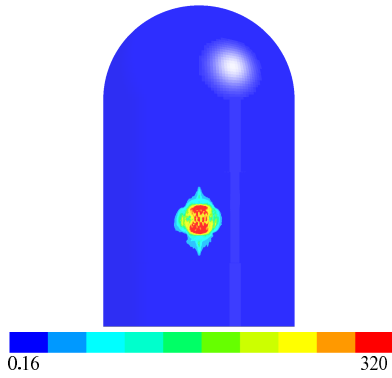


图 18 钢衬里 Von-Mises 应力图

Fig.18 Von-Mises stress of steel liner

4) 预应力体系的损伤破坏

图 19 是新舟飞机撞击安全壳过程中，预应力钢筋轴力图。由该图可知，撞击区域的钢筋束轴向压力峰值为 $6.88 \times 10^5 \text{ N}$ ，轴向拉力峰值为 $1.31 \times 10^6 \text{ N}$ ，均未达到预应力钢筋的屈服极限 ($4.5 \times 10^7 \text{ N}$)。由此可见，预应力体系整体处于弹性阶段。

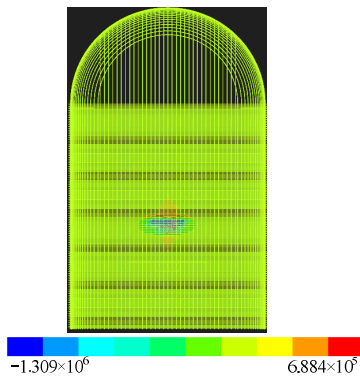


图 19 钢筋轴力图

Fig.19 Axial force of rebar

4.2 撞击力荷载作用下核安全壳响应及损伤破坏 (非耦合分析)

该方法是将上述耦合分析得到的新舟飞机撞击荷载直接加载在安全壳壳面混凝土单元进行数值模拟。撞击荷载选用新舟飞机撞击刚性靶体得出的荷载时程曲线(图 8)。由于撞击力是作用在壳面混凝土单元上，故将撞击力除以作用面积换算成压强，荷载作用面积取机舱横截面积 5.7 m^2 ，其中心距地面垂直高度为 20 m ，荷载作用方向平行于地面且垂直于安全壳筒壁(图 20)。

计算结果见图 11、图 12、图 13(b)、图 15(b)和图 16(b)。对比分析可知，耦合分析与非耦合的计算结果有较大差别。主要表现在：非耦合情况下安全壳撞击变形范围小于耦合分析结果(图 11 和图 12)；安全壳表面和剖面塑性区面积及形态差别

较大(图 13(a)和图 13(b))；非耦合情况下钢衬里等效塑性应变峰值为 3.84×10^{-4} ，其远小于耦合分析的结果(图 16)；非耦合情况下撞击中心位移仅为耦合分析结果的 1/8 左右(图 21)。

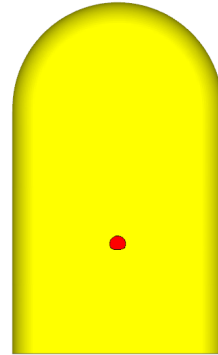


图 20 荷载作用范围示意图

Fig.20 The plan of load distribution range

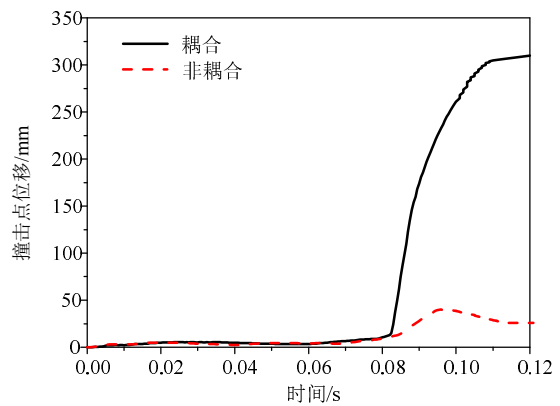


图 21 撞击中心位移时程图

Fig.21 The displacement-time curve at the center of impact area

综上所述，采用将撞击荷载直接施加在壳面单元上进行数值分析的方法是不可取的，建立精细化飞机模型进行数值模拟很有必要。

5 结论

本文选用我国自主研发的新舟 600 飞机和广东岭澳核电站安全壳作为原型。建立了精细化飞机有限元模型，用以代替以往的标准化荷载函数；同时建立钢筋混凝土、预应力钢束和钢衬里的精细化有限元模型；运用 LS-DYNA 有限元软件对撞击全过程进行了数值模拟，主要结论如下：

(1) 撞击过程中新舟飞机机身发生较大变形，引擎和机翼前部机身全部被压碎，后部机身扭曲变形较大。分析表明，撞击力时程曲线中的峰值荷载是因引擎和机翼撞击安全壳所致。新舟飞机撞击力曲线与 Phantom F4 战斗机和 Boeing 707 客机撞击

力曲线的形状大体相似,但撞击持续时间、峰值荷载大小有较大差别。

(2) 撞击中心区域混凝土发生冲击剥离破坏,位移最大值达 305mm,但远离撞击区域位移衰减迅速;撞击中心区域的钢衬里发生塑性变形,变形量超过规范值,密闭性能可能会受到影响;预应力钢束仍处于弹性阶段。

(3) 假定安全壳为刚性靶体得到的撞击力时间曲线与假定安全壳为变形体的计算结果相差不大;但采用在壳面单元直接施加撞击荷载的方法得到的计算结果与飞机直接撞击安全壳的耦合数值模拟结果差别较大。由此可见,建立飞机撞击安全壳的精细化耦合分析模型很有必要。

参考文献:

- [1] 吴昊, 方秦, 龚自明, 赵建魁. 冲击爆炸作用对核电站安全壳毁伤效应研究的进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(3): 384—392.
Wu Hao, Fang Qin, Gong Ziming, Zhao Jiankui. State of arts of impact and blast effects on the NPPC [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(3): 384—392. (in Chinese)
- [2] 左家红, 韩良弼, 夏祖武. 秦山核电站安全壳在飞机撞击下的整体动力反应[C]. 固体力学在工程中的应用学术会议论文集. 上海: 固体力学会议, 1989: 51—58.
Zuo Jiahong, Han Liangbi, Xia Zufeng. The dynamic response of the containment of the QinShan nuclear power plant for the aircraft impact loading [C]. The Conference of Solid Mechanics. Shanghai: The Conference of Solid Mechanics, 1989: 51—58. (in Chinese)
- [3] Frano R Lo, Forasassi G. Preliminary evaluation of aircraft impact on a near term nuclear power plant [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(12): 5245—5250.
- [4] 王晓雯, 王明弹. 先进半球顶安全壳在飞机撞击下的动态响应分析[C]. 北京: 第 15 届全国反应堆结构力学会议论文集, 2008: 17—24.
Wang Xiaowen, Wang Mingdan. Dynamic response of advanced containment with hemisphere dome under aircraft impact [C]. Beijing: The 15th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 2008: 17—24. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] Iqbal M A, Bhargava P, Rai S, Sadique M R. Response of nuclear containment structure to aircraft crash [M]. Topics in Modal Analysis II, Volume 6, Springer New York, 2012: 525—535.
- [7] Bangash M Y H. Structures for nuclear facilities [M]. Berlin Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011: 451—494.
- [8] Katayama M, Itoh M, Rainsberger R. Numerical simulation of jumbo jet impacting on thick concrete walls [C]. Nara Japan: The Second Asian Conference on High Pressure Research Organizing Committee, 2004: 26—35.
- [9] 张铁军. 反应堆厂房安全壳预应力施工技术[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10(4): 73—77.
Zhang Tiejun. Techniques associated with the reactor building prestressing activities [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2005, 10(4): 73—77. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 张传爱, 方秦, 陈力. 对 DYNA3D 中 K&C 混凝土模型的探讨[J]. 工业建筑, 2010, 40(6): 23—28.
Zhang Chuanai, Fang Qin, Chen Li. Discussion on K&C model for concrete in DYNA3D [J]. Industrial Construction, 2010, 40(6): 23—28. (in Chinese)
- [12] 刘云飞, 申祖武, 晏石林, 等. 预应力钢筋混凝土安全壳侵彻数值模拟分析[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(10): 51—54.
Liu Yunfei, Shen Zuwu, Yan Shilin, et al. Numerical simulation of projectile penetration into prestressed concrete containment [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(10): 51—54. (in Chinese)
- [13] Asardh L, Laine L. 3D FE-simulation of high-velocity fragment perforation of reinforced concrete slabs [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9): 911—922.
- [14] LS-DYNA. Keyword user's manual [M]. Livermore, California: Livermore Software Technology Coporation, 2007: 361—448.
- [15] LS-DYNA. Theoretical manual [M]. Livermore, California: Livermore Software Technology Coporation, 2007: 523—568.
- [16] ACI Standard 359-04. Code for concrete containment [S]. 2004.