蜂窝夹芯板超高速碰撞仿真

徐小刚 黄 海 贾光辉

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 蜂窝夹芯板是一种多用于航天器的特殊结构,采用光滑粒子流体动力学算法(SPH)对蜂窝夹芯板进行超高速碰撞研究时主要存在2个问题:蜂窝芯的几何建模过程复杂;蜂窝芯层非常薄,为保证仿真精度采用相等的粒子间距必然生成超过计算容忍的粒子数量.结合参数化程序设计语言(APDL)、用户界面设计语言(UIDL)进行结构建模,编制了APDL生成蜂窝芯的程序,采用UIDL将该程序集成到ANSYS交互式界面中,能够方便快捷的生成任意尺度的正六边形蜂窝芯.针对此方法得到的模型,采用SPH单元与壳单元相结合的方法,其中蜂窝芯采用壳单元,入射体、蜂窝夹芯板的前、后面板采用SPH单元,对蜂窝夹芯板进行了超高速碰撞仿真研究.仿真结果与相关试验进行了对比,仿真得到的后板破口尺寸与试验比较接近,证实了该方法适用于蜂窝夹芯板的超高速仿真.

关 键 词: 蜂窝夹芯板; 超高速碰撞; SPH算法; ANSYS二次开发

中图分类号: V 414.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)01-0018-04

Simulation of hypervelocity impact to honeycomb sandwich

Xu Xiaogang Huang Hai Jia Guanghui

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Honeycomb sandwich is a special configuration which often used in spacecraft. The method of smoothing particle hydrodynamics (SPH) in the hypervelocity impact simulation to the honeycomb presents two questions: it is problematic to model the honeycomb, the distance between the neighboring particles should be equal, however, the honeycomb is so thin that the particles would be created too much to compute. The ANSYS parametric design language (APDL) and the ANSYS user interface design language (UIDL) were integrated to create the honeycomb core. The program was written in APDL, and the APDL program was integrated in the ANSYS user interface with the UIDL. Arbitrary hexagon honeycomb core can be created in this method expediently. The honeycomb core was simulated with shell element while the front facesheet and the rear facesheet was simulated with SPH element in the simulation. The hole size by the simulation was compared with the experiment which shows almost equal in size. It is confirmed that the method is suited to the simulation of hypervelocity impact to honeycomb sandwich.

Key words: honeycomb sandwich; hypervelocity impact; smoothed particle hydrodynamics method; ANSYS newly empoison

采用SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)算法进行结构超高速碰撞研究已经在许多领域取得了较好的结果[1-2],数值仿真手段已经成为研究超高速碰撞的"虚拟试验和效果评估平台".空间碎片超高速撞击飞行器,逐渐成为每次航天活动必须考虑的因素.蜂窝夹芯板是一种多用于航天器的结构材料,对蜂窝夹芯板进行超高速碰撞研究具有重要的现实意义.

采用SPH算法对蜂窝夹芯板进行超高速碰撞研究时主要存在2个问题:蜂窝芯的几何建模

收稿日期: 2006-01-04

作者简介: 徐小刚(1981-),男,山东莱阳人,博士生, xg_xu@ansys.com.cn.

过程复杂;蜂窝芯层非常薄,为保证仿真精度采用相等的粒子间距必然生成超过计算容忍的粒子数量.针对六边形蜂窝芯的结构特点,本文结合 ANSYS软件中便利的二次开发工具 APDL和 UIDL进行结构建模,编制了 APDL生成蜂窝芯的程序,采用 UIDL将程序集成到 ANSYS的交互式用户界面中,能够方便快捷地生成不同尺度的正六边形蜂窝芯.目前国内对蜂窝夹芯板的仿真研究尚无公开文献的发表,国外的仿真研究中在文献[3]提到了采用 AUTODYN分析蜂窝夹芯板的超高速碰撞问题,本文参考文献[3]中的思路,采用 LS-DYNA分析蜂窝夹芯板的超高速问题,采用 SPH单元与壳单元相结合的方法,对蜂窝夹芯板进行超高速碰撞仿真研究,其中蜂窝芯采用壳单元,入射体、蜂窝夹芯板的前、后板采用 SPH单元.本文给出适用于 SPH单元与壳单元相互作用的接触算法,保证能够对结构进行合理的计算,并将计算结果与现有试验结果进行了对比验证.

1　蜂窝芯几何建模

结构分析软件 ANSYS具有较好的通用性和良好的开放性,便于用户对 ANSYS进行功能扩充和系统集成,生成具有行业分析特点和符合用户需要的 ANSYS程序.为了方便结构建模、分析和用户二次开发的需要,ANSYS主要提供了 3种有效的工具: APDL, UIDL、用户程序特性 (UPFS).其中 APDL主要用于编写参数化的用户程序,为实现有限元分析提供便利,甚至可以实现有限元分析的全过程; UIDL使用户能够在扩充 ANSYS功能的同时建立起对应的图形驱动界面,提供命令的各类输入参数接口和控制开关,使 APDL的应用更加简便、直观[4].

1.1　蜂窝芯 APDL建模思路

正六边形蜂窝芯由于具有特殊的结构形式,可以通过建立图 1所示的蜂窝芯基本元素,通过大量复制得到任意大的蜂窝芯平面结构,图 1是由 12根线组成的简单模型,可以采用自下向上的建模方法生成.将蜂窝芯平面结构沿着垂直于蜂窝芯平面的方向拖拉,能够迅速得到蜂窝芯结构.

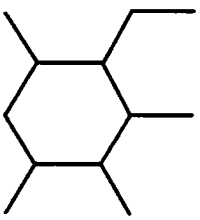


图 1　蜂窝芯基本元素

将蜂窝芯的主要尺寸采用变量代替,通过改变这些变量就能够得到不同的蜂窝芯结构,初始输入参数包括:蜂窝芯六边形边长、蜂窝芯高度、正负 x和正负 y方向上基本元素的复制数量.

1.2　APDL中用到的主要命令和算法

APDL中用到的主要命令包括: RPR4和 ADELE得到基本元素中的 6条边; K和 LSTR生成基本元素中的另外 6条边线; LGEN复制基本元素; ADRAG进行线的拖拉,生成给定高度的蜂窝芯. APDL中需要计算的参数包括:蜂窝芯包含的关键点数量;蜂窝芯包含的线数量.

通过以上的命令和方法,本文编制了用于蜂窝芯建模的 APDL程序.

1.3　UIDL用户界面设计

采用 UIDL进行界面设计,把 APDL程序直接集成到 ANSYS/LS-DYNA的图形界面中,使模型参数的输入更加便捷.通过编辑“UMENU. GRN”文件,在主菜单中增加了菜单项“developed by buaa”,见图 2中左侧的主菜单.通过编辑“UMENU2. GRN”文件,将程序的初始输入参数通过“model honeycomb sandwich”读入,点击“OK”实现界面菜单与 APDL程序传递初始输入参数,并运行该菜单项所对应的 APDL程序,简便地实现了正六边形蜂窝芯的建模过程.在图形界面中点击“model honeycomb sandwich”后出现输入窗口,如图 2中主界面所示,建模需要的初始输入参数在输入窗口给出了详细的中文提示,图 3中给出了蜂窝芯模型.

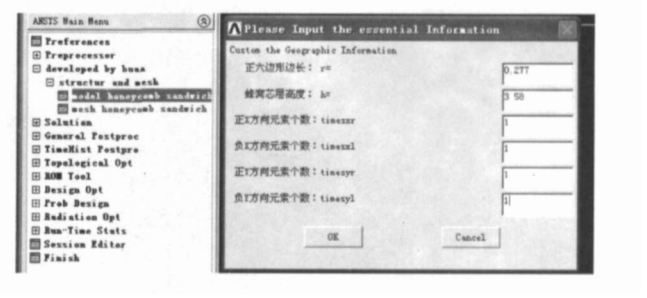


图 2　输入窗口



图 3　蜂窝芯模型

2 蜂窝夹芯板超高速碰撞仿真模型

2.1 结构建模分析

本文参考文献[3]中的思路,采用 SPH 单元与壳单元相结合的方法研究蜂窝夹芯板的超高速碰撞问题. 本研究中的入射球、蜂窝夹芯板的前、后板采用 SPH 单元,LSTC 公司开发的前后处理工具 LSPREPOST提供了建立 SPH 单元的便捷方法,能够简便地生成 SPH 单元;蜂窝芯采用壳单元模拟,在 ANSYS/LS-DYNA 中通过图 2所示自行开发的建模工具得到蜂窝芯模型. 为了保证计算结果的精确性,应保证 SPH 单元和壳单元的网格间距尽量一致并划分精细的单元. 由于采用 ANSYS/LS-DYNA 和 LSPREPOST 2种前处理工具进行结构建模,在 ANSYS/LS-DYNA 中对蜂窝芯划分网格时应该采用较大的初始节点号避免节点号重复,因为 2种软件中采用了 2种不同的单元类型: SPH 单元和壳单元,单元号允许重复.

将 ANSYS/LS-DYNA 和 LSPREPOST 生成的".K"文件合并得到整个模型的文件,在合并后的文件中添加控制项得到能够合理模拟整个问题的计算文件. 计算文件中 SPH 单元和壳单元均采用 JOHNSON-COOK 材料模型, SPH 单元与壳单元之间的作用关系采用接触关键字 * CONTACT_ AUTOMATIC_ NODES_ TO_ SURFACE定义.

2.2 结构仿真模型

本文采用直径 0.2 cm、入射速度 0.457 cm·μs^{-1}的铝球,撞击边长 2.4 cm ×2.6 cm 的蜂窝夹芯板,蜂窝夹芯板前板厚度 0.05 cm,蜂窝夹芯板后板厚度 0.04 cm,蜂窝芯高度 3.58 cm,壁厚 0.001 78 cm,基本元素正六边形边长 0.277 cm. 图4中给出了本文整体计算模型.

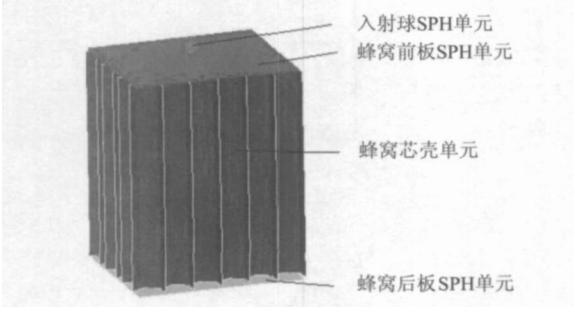


图 4 整体计算模型

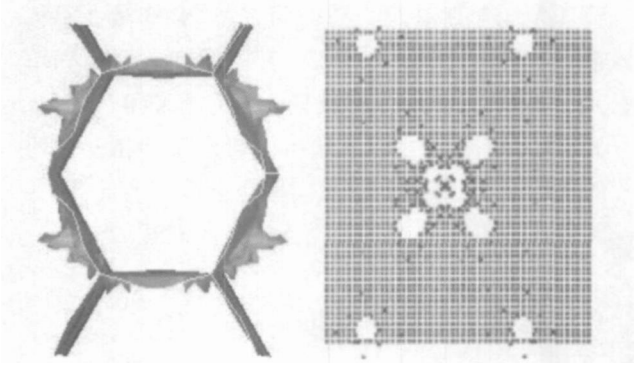
3 蜂窝夹芯板仿真结果与分析

3.1 蜂窝夹芯板仿真结果

采用 LS970求解器对本文得到的模型进行仿真计算,得到超高速碰撞后蜂窝夹芯板的计算结果如图 5所示.

图 5a给出了正对入射球位置的蜂窝芯结构应力与变形,从图 5a中可以看出,入射球撞击蜂窝前板后形成的碎片云对正对入射球位置的蜂窝芯造成了较大程度的破坏,导致壳体的大量变形和失效。

图 5b中给出了后板破口,从图 5b中可以看出,后板上集中的最大破口直径为 0.56 cm,主破口附近 4个对称的较小破口直径 0.3 cm,另外在板的边界附近有 4个更小的破口,破口直径 0.12 cm.



a 蜂窝芯响应 b 后板破口

图 5 蜂窝夹芯板计算结果

3.2 试验模型与结果

文献[5]中进行了蜂窝夹芯板超高速碰撞试验,试验模型参数见表 1. 在文献[3]和文献[5]中分别对表 1中模型的结果进行了描述,文献[5]中简要地给出,蜂窝夹芯板后板最大破口直径 0.58 cm,在文献[3]中,进一步给出了该模型的计算结果,蜂窝夹芯板后板正对入射球位置产生约为一个蜂窝芯单元的直径(蜂窝芯单元直径 0.577 cm)的最大破口,在主要破口的临近位置产生了较小的椭圆形破口,小破口距中心破口的距离约为一个蜂窝芯单元的直径,如图 6所示,可以看出,较小的椭圆形破口长径与六边形边长接近,约为 0.25 cm.

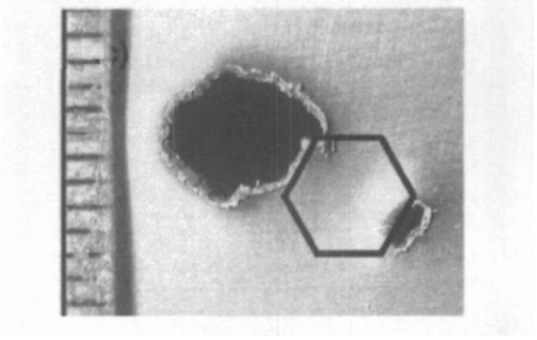


图 6 蜂窝夹芯板超高速试验结果

表 1　试验模型参数

参数	入射球直径/cm	入射速度/(cm·μs^{-1})	蜂窝前板厚/cm	蜂窝后板厚/cm	蜂窝芯边长/cm	蜂窝芯高度/cm	蜂窝芯壁厚/cm
数值	0.20	0.457	0.05	0.04	0.277	3.58	0.00178

3.3　蜂窝夹芯板仿真与试验对比分析

为了便于仿真结果与实验结果的对比,在表 2中列出了后板破口的计算结果与仿真结果.

表 2　后板破口的仿真结果与试验结果对比

结果	最大破口直径/cm	较小破口长度/cm	微小破口直径/cm
试验值	0.58	0.25	
仿真值	0.56	0.30	0.12

从表 2中可以看出,仿真研究中后板上的最大破口直径为 0.56 cm,与试验结果的最大破口直径 0.58 cm非常接近,仿真研究中后板上的较小破口直径为 0.3 cm,与试验结果 0.25 cm也很接近,说明采用本文的方法进行蜂窝结构超高速碰撞比较合理有效.

同时从图 5b中能够看出,仿真研究在最大破口附近产生了 4个较小的破口,较小破口以主要破口为中心,成对称性,破口长度 0.3 cm左右,而图 6中文献[3]给出的结果只在单一方向上产生了椭圆形破口,最大破口长度约为 0.25 cm.仿真计算得到的破口长度与试验结果比较接近,但是由于仿真计算的理想性,难免导致小破口围绕中心位置对称,试验中存在各种随机因素的影响,包括材料内部的缺陷、材料以及作用载荷的非均匀性等,只得到一个小的破口.

另外,图 5b中同时在边界上得到了微小的破口,破口位置距主要破口中心位置 1.2 cm,破口直径很小,这是在文献[3]、文献[5]中均未提及的.这可能是由 2个原因造成的:试验中结构尺寸较小,没有得到较远位置的结果;SPH算法稳定性差,可能导致单个粒子高速振荡等缺点,仿真中 SPH单元产生的碎片云可能与蜂窝芯的壳单元在作用过程中产生了一定的误差.任意飞散的粒子对破口产生的误差,有待于结合更多的试验对 SPH算法进行更加深入的研究.

4　结　论

本文采用 APDL语言编制了蜂窝芯建模程序,并采用 UDL语言集成到 ANSYS中,成功地解决了蜂窝夹芯板有限元建模的问题,本文通过对蜂窝夹芯板进行超高速仿真分析,主要得到如下结论:

1) 采用 SPH单元与壳单元相结合的方法,通过接触关键字定义 SPH单元与壳单元之间的作用,对蜂窝夹芯板的超高速碰撞问题进行仿真研究能够得到较好的结果;

2) 蜂窝夹芯板后板主破口计算结果与试验结果吻合很好,蜂窝夹芯板后板较小破口长度的计算结果与试验结果比较接近;

3) 对于仿真结果的对称性与试验结果的随机性等引起的破口数量不同需进一步深入研究,并有必要开展更多的物理试验对蜂窝夹芯板的仿真问题进行深入研究.

参考文献 (References)

[1] 张锁春.光滑质点流体动力学(SPH)方法(综述)[J].计算物理,1996,13(4):385-396
Zhang Suochun. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) method (a review) [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1996, 13(4): 385-396 (in Chinese)

[2] 贾光辉,黄海,胡震东.超高速撞击仿真结果分析[J].爆炸与冲击,2005,25(1):47-53
Jia Guanghui, Huang Hai, Hu Zhendong. Simulation analyse of hypervelocity impact perforation [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(1): 47-53 (in Chinese)

[3] Taylor Emma A, Glanville Jonathan P, Clegg Richard A, et al. Hypervelocity impact on spacecraft honeycomb: hydrocode simulation and damage laws[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003(29): 691-702

[4] ANSYS Incorporated. ANSYS theory manual [M]. Canonsburg: ANSYS Incorporated, 2004

[5] Turner Robert J, Taylor Emma A, Mcdonnell J A M, et al. Cost effective honeycomb and multi-layer insulation debris shields for unmanned spacecraft[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001(26): 785-796

[6] 乐莉,闫军,钟秋海.超高速撞击仿真算法分析[J].系统仿真学报,2004,16(9):1941-1943
Le Li, Yan Jun, Zhong Qiuhai. Simulation of debris impacts using three different algorithms [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 1941-1943 (in Chinese)

(责任编辑:张　嵘)