

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.011

高过载条件下 CFRP 壳体演化行为的数值模拟

王荣惠,李树虎,陈以蔚,王丹勇,彭刚,李萍,徐井利,贾华敏,秦贞明

(中国兵器工业集团第五三研究所,济南 250031)

摘要: 针对未来弹药武器关键新材料部件所面临的高过载服役环境,通过 LS-DYNA 动力学分析软件建立了霍普金森压杆 (SHPB) 和碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 壳体的仿真模型,对 CFRP 壳体抗高速压缩性能进行了动态数值仿真。通过渐进损伤与最大应变控制的破坏准则,描述了复合材料壳体在高速压缩下的损伤失效行为,比较分析发现,模拟结果和试验结果具有较好的一致性。计算得出 CFRP 壳体的最大承载应力为 634 MPa,试验所测得的最大应力为 602 MPa (误差为 5.4%),仿真得出的壳体损伤状态与试验结果相吻合,以加强环根部剪切破坏为主。

关键词: 高过载;碳纤维增强树脂基复合材料壳体;数值模拟

中图分类号: TQ316.6+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)05-0052-04

Numerical Simulation for Evolutive Process of CFRP Shell under Condition of High Overload

Wang Ronghui, Li Shuhu, Chen Yiwei, Wang Danyong, Peng Gang, Li Ping, Xu Jingli, Jia Huamin, Qin Zhenming

(Shandong Non-metallic Materials Institute, Jinan 250031, China)

Abstract : Aiming at the high-overloading service conditions of the key new-material components in the future projectile weapons, the simulation models of split hopkinson pressure bar (SHPB) and carbon fiber reinforced resin matrix composites (CFRP) shell were established by the dynamic analysis software LS-DYNA. Then the dynamic numerical simulation on anti high-speed compression of shell with resin-based carbon fiber reinforced composite materials was carried out. The failure behavior of the composite shell under high speed compression was described through the failure criterion which was controlled by the progressive damage and the maximum strain. The numerical simulation results and the experiment results have better consistency by mean of comparison and analysis. The calculated maximum stress of CFRP shell is 634 MPa, the measured values is 602 MPa (error is 5.4%), the shear failure near the roots of the reinforcing rings is the mainly failure mode, and the damage status of simulation agree well with the experimental results.

Keywords : high overload ; carbon fiber reinforced resin matrix composites shell ; numerical simulation

复合材料高速发射状态下的动态力学响应和高过载下行为演化的规律特点,将直接影响弹药武器复合材料部件的设计和可靠应用。复合材料在高过载冲击压缩动载荷下的力学行为(如弹性模量、强度、应变及损伤失效状态等)与加载应变率、应力波的传播密切相关,与静载荷下明显不同。目前,分离式霍普金森压杆技术(SHPB)是用于材料在高应变率下的力学性能试验和表征的主要技术。国外对复合材料高过载、高应变率响应的相关研究,主要集中在复合材料高应变率下力学性能研究方向^[1-5]。

美国的塔斯基吉大学宇航科学与工程先进材料中心、伯明翰大学材料科学与工程系和陆军工程发展研究中心、牛津大学科学工程系等均采用 SHPB 技术对材料在高应变率下的力学性能进行了深入的研究。

复合材料结构部件高过载条件下的数值模拟与仿真是极端条件下复合材料研制和应用评估的重要环节。例如,美国 120 mm 复合材料弹托、超高速发射战斗部复合材料壳体、喷管等从结构、承载设计到使用评估等均经过多次的数值模拟考核。复合材料的抗冲击模拟方面,国外也做了大量的工作^[6-7]。

通讯作者: 王荣惠,硕士,主要从事抗冲击、爆轰、复合材料损伤失效分析等有限元仿真计算研究 E-mail: wangronghui2000@126.com

收稿日期: 2018-03-02

引用格式: 王荣惠,李树虎,陈以蔚,等. 高过载条件下 CFRP 壳体演化行为的数值模拟[J]. 工程塑料应用,2018,46(5): 52-56.

Wang Ronghui, Li Shuhu, Chen Yiwei, et al. Numerical simulation for the evolutive process of CFRP shell under the condition of high overload [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5): 52-56.

国内兵器系统、高校等虽然也有许多单位在开展材料动态响应研究,但主要集中在金属、非金属均匀化材料或泡沫等材料的研究方面,较少涉及结构复杂各向异性的复合材料。

笔者针对发动机复合材料壳体的设计和应用需求,开展先进结构复合材料在高速冲击大过载发射环境下的动态损伤与力学行为演化的模拟研究,探索复合材料部件在高过载发射环境下的行为演化规律,为先进结构复合材料在弹箭武器上的设计应用和可靠性评估提供科学依据和基础支撑。

1 典型模拟结构(发动机壳体模拟缩比件)结构设计

典型模拟结构选用发动机壳体缩比件,为复合材料圆筒状结构。发动机壳体缩比件由 T300 型碳纤维单向层加织物层构成,采用多次成型的方式,将模具表面处理后卷铺预浸料,压紧压实,缠绕环向后成为 1 层;按照预先设计的铺层方式,重复卷铺和缠绕多层,直至试件达到要求尺寸,然后进行试件热固化工艺处理。

发动机壳体缩比件内径为 60 mm,外径为 74 mm,高度为 80 mm。试件所用碳纤维复合材料密度为 1.54 g/cm³,单个铺层厚度为 0.25 mm,共 28 层,发动机壳体缩比件具体形状如图 1。

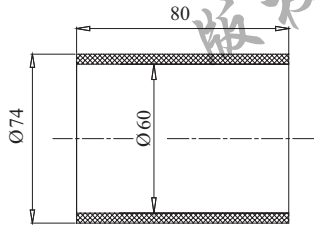


图 1 发动机壳体缩比件形状

2 复合材料损伤失效模型研究

正交各向异性本构模型是目前针对复合材料应用最为广泛的材料模型,但是在模拟复合材料抗高过载的工况时,由于其附带破坏准则的不同,也呈现出多样性和复杂性。各破坏准则都有明显的优缺点,通常每种准则只对复合材料在某些特定条件下的破坏行为进行描述,研究人员应该根据所研究问题的具体情况选择相应的准则^[8]。

一般认为纤维增强复合材料的破坏属于逐渐破坏过程,用逐渐破坏模型来模拟是较好的选择,逐渐破坏模型的核心理论是刚度退化^[9]。Chang-Chang 在 1987 年提出了一个预测带开孔的层合板在拉伸载荷作用下的极限强度的逐渐破坏模型,

Chang-Chang 准则在各有限元程序中得到了广泛的应用,该准则主要由 5 个材料强度参数参与描述:纵向拉伸强度 S_1 、横向拉伸强度 S_2 、剪切强度 S_{12} 、横向压缩强度 C_2 、非线性剪切应力参数,其中 S_1 , S_2 , S_{12} , C_2 需要通过材料强度测试获得,通过材料剪切应力-应变关系得到^[10-11]。

在平面应力中,应力和应变关系如下:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1}(\sigma_1 - \nu_1 \sigma_2) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2}(\sigma_2 - \nu_2 \sigma_1) \quad (2)$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3 \quad (3)$$

式中, ε_1 , ε_2 , ε_{12} 为应变, σ_1 , σ_2 , τ_{12} 为应力, E_1 , E_2 , G_{12} 为弹性模量, ν_1 , ν_2 为泊松比, α 为非线性剪切应力参数。

另外有纤维-基体剪切公式(即剪切应力与剪切强度的比率):

$$\tau = \frac{\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha\tau_{12}^4}{\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4}\alpha S_{12}^4} \quad (4)$$

在 LS-DYNA 程序中, Chang-Chang 复合材料失效准则内嵌三个准则:基体开裂失效准则、压缩失效准则和最终纤维断裂失效准则。 $F_{\max}$, F_{comp} , F_{fiber} 均为 LS-DYNA 程序中的失效准则所对应的参考值,是判据参数。

(1) 基体开裂失效准则:

$$F_{\max} = \left(\frac{\sigma_2}{S_2}\right)^2 + \tau \quad (5)$$

如果 $F_{\max} > 1$,则认为基体开裂失效,此时材料常数 E_2 , G_{12} , ν_1 , ν_2 退化为 0。

(2) 压缩破坏失效准则:

$$F_{\text{comp}} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_2}{C_2} + \tau \quad (6)$$

如果 $F_{\text{comp}} > 1$,则认为压缩失效,此时材料常数 E_2 , ν_1 , ν_2 退化为 0。

(3) 最终纤维断裂失效准则:

$$F_{\text{fiber}} = \left(\frac{\sigma_1}{S_1}\right)^2 + \tau \quad (7)$$

如果 $F_{\text{fiber}} > 1$,则认为纤维断裂失效,此时材料常数 E_1 , E_2 , G_{12} , ν_1 , ν_2 退化为 0。

3 典型模拟结构高过载条件下演化行为的数值模拟

3.1 计算模型

基于 SHPB 试验的理论和计算公式,结合实际

所选用的 SHPB 试验系统,针对发动机壳体缩比件结构特点,采用 ANSYS/MECHANICAL 前处理软件,使用参数化建模语言 (APDL) 编制程序,实现对模型尺寸、网格剖分(疏密程度)、边界条件、求解控制、后处理等的参数化,方便优化设计、提升求解效率,程序文件为 TXT 格式,可以在 ANSYS 软件中调用并执行。建模时为了更好的进行强度损伤分析和渐进破坏模式研究,通过多层实体单元建模,每层实体单元对应实际的复合材料铺层。为了更好的模拟复合材料的层间破坏行为,采用固连接触算法的处理方式,通过设置层间拉伸应力、层间剪切应力来控制模拟。除渐进损伤准则外,采用最大应变的方式控制复合材料过度变形失真。

本次计算模型主要包括 SPHB 系统和复合材料发动机壳体缩比件两部分,其中 SPHB 系统主要由输入杆和输出杆组成,考虑的几何模型与工况条件的对称性,建立 1/4 对称计算模型。壳体缩比件的端部状态是影响其压缩性能的重要因素,实际试验过程中,为避免试样端部过早破坏而采用金属环进行加强,因此计算模型中同样在端部建立金属加强箍。模型主要包括输出杆、发动机壳体缩比件(端部约束状态-带金属加强环)、输入杆三部分,其网格剖分与缩比件剖分示意参见图 2。

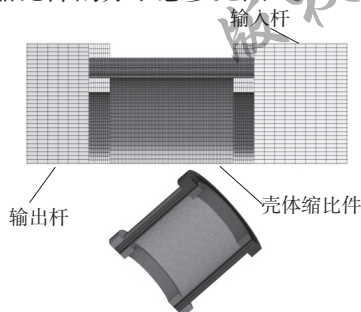


图2 模型及网格图

3.2 求解控制

根据实际工况,本次仿真计算在提交前进行了一些特定的求解设置和求解条件,具体有如下几方面:因计算模型的单元及节点数庞大(含8节点实体单元26万),所以求解器选用 LS-DYNA(32核并行);结合试验及应用背景,输入杆右端面施加如图3所示类膛压曲线(与实际试验曲线形状一致);为保证系统整体的能量平衡,对计算系统进行了沙漏控制,加入粘性阻尼,降低能量损失;为提高计算效率,输入杆与壳体缩比件之间、输出杆与壳体缩比件之间进行自动面-面接触设置;为实现更好地损伤

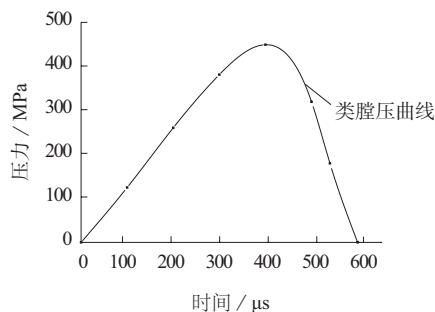


图3 输入杆右端施加的类膛压曲线

效果,复合材料各铺层之间设置了固连接触。

3.3 CFRP 壳体数值模拟结果

通过仿真计算,得到了 CFRP 壳体的数值模拟结果,下面从系统能量、应力波传播、损伤失效状态三个方面作简要分析。

模型系统能量曲线如图4所示。0~600 μs 时间段是类膛压曲线施加阶段,也是对系统能量输入的阶段,在此时间段内整个系统内能和动能持续增加,系统总能量也持续增加。在 600 μs 以后,能量输入过程结束,整个系统总能量守恒不变。在 1000 μs 左右应力波由输入杆通过试件传递到输出杆,形成透射波且输出杆开始移动,系统内能降低、动能升高,总能量依然守恒。在整个计算过程中,沙漏能(Hourglass)一直处于较低的水平,低于内能的 10%,符合计算精度要求。

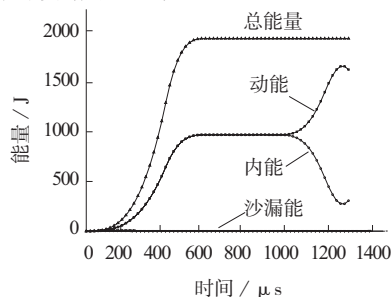


图4 模型系统能量图

模型应力波传播过程如图5所示。从输入杆的监控单元可以看出,经过约 600 μs 压缩应力波(负值)从输入杆右侧端部传播至此单元,然后至 1200 μs 左右完成了完整入射波形的传播;在应力波到达输入杆左侧端部与试件的界面处,形成反射拉伸波(正值),在 1350 μs 左右到达监控单元,经 600 μs 左右完成一个完整的反射波形传播。从图中还可以看出,在 1100 μs 左右,应力波经过试件后在输出杆的监控单元上出现,经约 250 μs 左右出现峰值,并在 1400 μs 左右完成一个完整透射波形的传播。

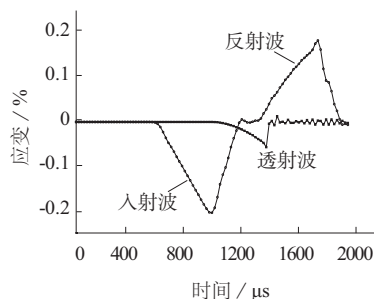


图5 模型系统应力波传播图

基于 SHPB 实验的理论和计算公式,结合图 5 所示透射应变的波形,得到 CFRP 壳体试件的应力-时间曲线,如图 6 所示,试件所承载的平均最大应力为 634 MPa。

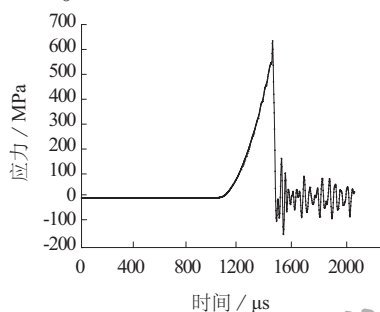


图6 CFRP 试件应力-时间曲线

CFRP 壳体在高过载条件下损伤演化行为如图 7 所示。从计算结果和损伤状态看,在端头约束(加强金属环)状态下,随着输入杆冲击载荷的瞬间加载,靠近输入杆的壳体端部尤其是加强环的下端部首先产生局部纤维屈曲、断裂、分层、剪切,随着冲击载荷的持续作用,CFRP 壳体损伤失效以加强环根部附近的剪切失效为主,随着冲击波的进一步作用,分层及裂纹破坏迅速向端头和另一端扩展,直至壳体失效。

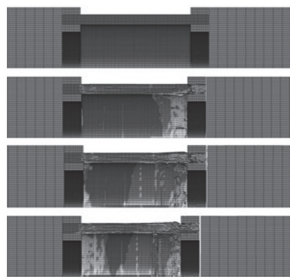


图7 CFRP 壳体损伤效果图(应变图)

3.4 仿真计算结果与试验结果对比

为验证数值仿真方法的可靠性及计算结果的准确性,将计算结果与试验结果进行了对比,具体如图 8 所示,计算得出 CFRP 壳体所承载的最大应力为 634 MPa,试验所测得最大应力 602 MPa,两者

误差为 5.4%。CFRP 壳体的试验损伤状态与仿真计算的损伤状态基本一致,以加强环根部剪切为主,分层、屈曲为辅,且试验中有的 CFRP 壳体直接在加强环根部剪断,见图 9 所示。由应力和损伤状态的对比可以看出,仿真结果与试验结果基本一致,验证了计算方法的可靠性及计算结果的准确性。

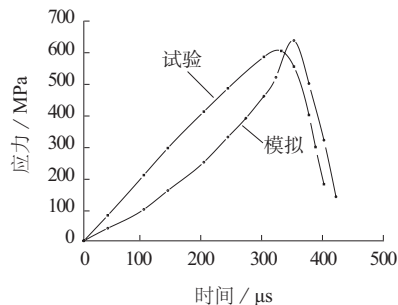


图8 试验、计算结果(破坏应力)对比

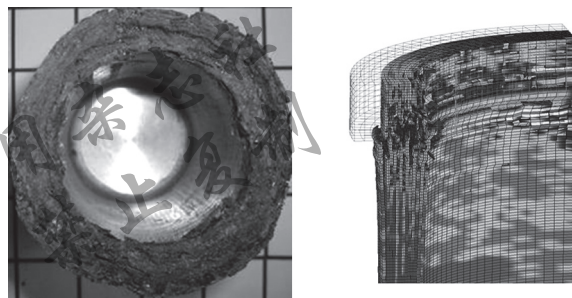


图9 CFRP 壳体试验、仿真结果(破坏形式)对比

4 结论

(1) 笔者建立的 SHPB 和 CFRP 壳体的仿真模型,每层实体单元与实际复合材料铺层对应,采用固连接模拟层间状态。这种建模方式与试验及材料的实际状态吻合,能全面的模拟复合材料在高过载条件下的损伤失效行为。

(2) 通过渐进损伤与最大应变控制的破坏准则,对 CFRP 壳体抗高速压缩进行了数值仿真。结果表明,渐进损伤准则能够通过动态强度阈值很好的描述复合材料的复杂失效过程,同时最大应变控制能够较好的控制单元过度变形,二者的配合使用是解决本类问题的关键。

(3) 模拟结果和试验结果具有较好一致性(两者误差为 5.4%),分析方法对研究复合材料的高过载行为具有较为重要的工程意义和参考价值,可以为先进结构复合材料在弹箭武器上的设计应用和可靠性评估提供科学依据。

参考文献

- [1] Jinho O, Maenghyo C, Jun-Sik K. Dynamic analysis of composite plate with multiple delaminations based on higher-order zigzag

- theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42: 6122-6140.
- [2] Iannucci L. Progressive failure modelling of woven carbon composite under impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32: 1013-1043.
- [3] Hochard C, Payan J, Montagnier O. Design and computation of laminated composite structures[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65: 467-474.
- [4] Lehr H F, Lach E, Wiese U, et al. On the application of fiber-reinforced materials of low density in construction elements subjected to high loads[J]. J. Phys IV France 7, 1997, C3-553 ~ C3-559.
- [5] Anand B D. Characterization of CFRP and GFRP composite materials at high strain rate tensile loading[D]. Wichita State University, India, 2002.
- [6] Hallet S R, Ruiz C, Harding J. The effect of strain rate on the interlaminar shear strength of a carbon / epoxy cross-ply laminate: comparison between experiment and numerical prediction[J]. Compos Sci Technol, 1999, 59: 749-758.
- [7] Boutte B, Cazeneuve C, Oytanta C. Effect of strain rate on interlaminar shear properties of carbon / epoxy composites[J]. Compos. Sci. Technol., 1992, 45: 313-321.
- [8] Paris F A. Study of failure criteria of fibrous composite materials[R]. NASA / CR, 2001: 2001-210661: 30-57.
- [9] 催维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟 [J]. 复合材料学报, 1996, 13(4): 102-111.
- Cui Weicheng. Computational simulation of progressive failure in composite structures[J]. Acta Metallurgica Sinica (English letters), 1996, 13(4): 102-111.
- [10] Chang F K, Chang K Y. Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure[J]. J. of Composite Materials, 1987, 21: 809-833.
- [11] Chang F K, Chang K Y. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentration[J]. J. of Composite Materials, 1987, 21: 834-855.

科思创携手 Polymaker 推出 3D 打印新平台

材料制造商科思创及其合作伙伴 Polymaker 今天正式推出全新网站 3D PC, 旨在推广聚碳酸酯 (PC) 这一兼具优异力学性能和加工性能的工程塑料在 3D 打印领域的应用。该信息平台提供一系列与 PC 3D 打印相关的专业知识, 例如材料选择和打印条件, 为实现 3D 打印部件的批量生产提供必要信息。

PC 这一工程塑料已广泛应用于汽车、医疗保健和航空航天等行业, 而过去五年 3D 打印技术的快速发展为该聚合物开辟了新的潜在应用领域。3D 打印可以创造传统加工技术无法实现的几何形状, PC 的力学特性可以为这些形状带来功能性。3D PC 展示的先进打印和加工技术将帮助 PC 实现在更多全新行业和领域的应用。

随着 3D 打印行业向更专业的应用端发展, 打印机制造商开始针对特定应用领域进行专项开发, 同时, 材料开发也

正朝着类似的方向发展。打印机制造商和材料制造商共同致力于为工业用户所要求的可靠性和可重复性创造完美条件。具体的数据和工艺知识可以提高打印部件的精度、强度和打印速度, 从而为 PC 3D 打印应用到主流制造业创造条件。在这一背景下, 3D PC 这一信息平台应运而生。

越来越多的行业正将 3D 打印技术应用于研发和生产。3D PC 通过展示一系列案例分析和应用, 帮助用户更深入地了解 PC 在 3D 打印领域的应用。其中一个案例介绍了专为航空航天行业设计开发的防火等级 (UL-94, V-0) PC 材料。针对防火级 PC 在具体应用领域的研发, 将为该材料在所有对安全和防火等级有要求的行业的应用提供基础。

PC 天然透明且具有高耐热性, 也是照明应用领域前所未有的理想之选。结合其高冲击强度和广泛可用性, 该材料也是实现 3D 打印规模生产的绝佳材料——3D PC 将告诉用户正确的打开方式。 (中塑在线)

(上接第 51 页)

- Zhao Peng, Yang Weimin. Influence of plastic tire body structure on its performance and structure optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(11): 34-37.
- [13] 刘肖英, 何雪涛, 邓世涛, 等. 蜂窝密度对蜂窝塑料轮胎性能的影响 [J]. 塑料, 2014, 43(6): 97-100.
- Liu Xiaoying, He Xuetao, Deng Shitao, et al. Influence of cellular density on performance of honeycomb tire[J]. Plastics, 2014, 43(6): 97-100.
- [14] Behroozi M, Olatunbosun O A, Ding W. Finite element analysis of aircraft tyre—Effect of model complexity on tyre performance characteristics[J]. Materials and Design, 2012, 35: 810-819.
- [15] Hernandez J A, Al-Qadi I L, Ozer H. Baseline rolling resistance for tires' on-road fuel efficiency using finite element modeling[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(5): 424-432.
- [16] Li Hao, Christian S. Analysis of soil compaction and tire mobility with finite element method[J]. Institution of Mechanical Engineers, 2013, 227(3): 275-291.