

●研究简报●

基于UG的预应力层裂实验靶板的有限元仿真研究*

FINITE ELEMENT EMULATOR OF TARGET PLATE STUDY BASED ON UG
IN THE PRESTRESSED SPALLATION EXPERIMENT

冯东升** 张世文 汤铁钢

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

FENG DongSheng ZHANG ShiWen TANG TieGang

(Institute of Fluid Physics China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

摘要 针对预应力层裂实验所需均匀应力区问题,利用UG软件对预应力层裂实验装置中的靶板进行三维建模,使用高级仿真模块对其进行有限元分析,确定了均匀应力区有效范围,同时验证结构设计的强度。通过分析结果与实验结果的对比,为预拉伸装置的结构优化提供参考依据。

关键词 靶板 UG软件 应力 有限元仿真

中图分类号 TB115.1

Abstract In light of the uniform stress imposed by spallation experiment, target plate of the setup processes a three-dimensional model using UG software. The advanced emulator model is employed to confirm the effective range of uniform stress zone and validate the strength of the designed structure through finite element analysis. The comparisons between simulation and experiment provide the referenced benchmark for the structure optimization of the pre-tensile setup.

Key words Target plate; UG software; Stress; Finite element simulator

Corresponding author: FENG DongSheng, E-mail: fldongsh@163.com, Tel: +86-816-2484162, Fax: +86-816-2485039

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11272297, 10772165).

Manuscript received 20131226, in revised form 20140609

引言

层裂是冲击载荷作用下材料的一种破坏模式,是应力波在自由面反射时在材料内部产生拉应力,一旦拉应力超过材料的动态拉伸强度,就会导致材料破坏的一种动态现象。对层裂现象的研究,有助于理解材料在高应变率载荷与准静态或疲劳载荷下损伤演化的差异。但是许多的工程构件由于受自重、环境温度变化的影响,甚至受装配等工序的影响,会在材料承受外部载荷前已产生内应力,而目前已有实验结果表明,初始预应力使得材料更容易产生层裂^[1]。而如何设计一个可控的、满足精密实验需要的预应力层裂实验装置,对于此类的材料基础研究显得尤为重要。

UG软件的有限元分析模块是一个集成化的有限元建模及解算工具模块。使用UG建模模块生成的几何模型可以直接转化为有限元分析模型,通过一定的前置处理后,利用NX Nastran以及MSC Nastran Ansys等多种解算器进行解算^[2]。计算结果以图形的方式

显示出模型的位移、应力、应变分布情况,并提供具体数据,可以为各类实验装置中关键构件提供设计依据。

本文利用UG软件对预应力层裂实验装置中的主要构件——靶板进行有限元分析,通过分析确定均匀应力区有效范围和大小,从而完成预应力层裂实验装置的结构设计及结构强度的校验。

1 预应力实验装置概况

1.1 实验条件及平台要求

预应力层裂实验要求靶板的中心部位产生能够满足实验所需要的均匀的径向拉伸应力,且其区域不小于 $\Phi 40$ mm。预应力层裂实验的精度要求较高,为此采用轻气炮加载飞片方式,高速飞行的飞片可以达数公里每秒,精确可控制在十米每秒之内^[3]。作为一种重复加载平台,轻气炮靶室(实验装置放置在其前端)是一种重复型容器,为了确保其安全运行,严禁实验装置产生大量破片、气体,且不许使用具可燃性、污染后难清理的材料。靶室在安装必要的防护装置后,实验

* 20131226收到初稿,20140609收到修改稿。国家自然科学基金项目(11272297, 10772165)资助。

**冯东升,男,1975年9月生,陕西省韩城市人,汉族,中国工程物理研究院流体物理研究所,高级工程师,本科,研究方向为爆炸容器密封及实验装置的结构设计。

装置的实际放置空间高度有限 ($H < 400 \text{ mm}$), 气炮的相关的空间结构及位置见图 1。因此, 在此特定的实验条件下, 传统的双轴或者多轴加载装置体积比较大^[4-5], 无法放入轻气炮靶室内, 此外拉伸机构也存在较多影响靶室安全运行的因素, 不适宜采用轻气炮加载方式。因此需要设计一套既操作简便、预应力可调, 同时占用空间较小的预应力实验装置。

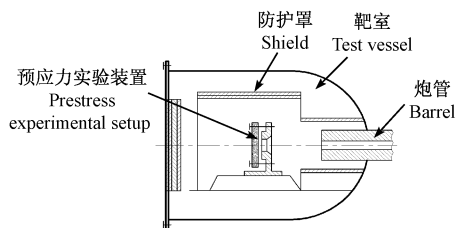


图 1 预应力实验装置在靶室中的布局

Fig. 1 Test vessel layout of prestress experimental setup

1.2 预拉伸应力的实现方法

施加均匀的径向拉伸应力最理想的方法是靶板所有边界 (靶板上下面除外) 施加均匀拉伸应力。从力学角度可以推导, 对于任意形状的等厚度靶板, 在全部边界上受有均匀拉伸应力 σ , 则靶板内部每一处受到均匀应力场, 应力大小即为所施加的外部应力 σ ^[6]。对于双向加载实验^[7], 在剪应力为 0 的情况下, 当双轴方向上的拉伸或压缩应力完全相等时, 即满足上述法则, 由莫尔圆^[8]可知, 当两个正交主应力大小相等时且剪应力极小时, 莫尔圆退化为一个点, 则在板内各个方向均受到均匀的径向应力。即双轴加载也可以作为施加径向预应力一种方式, 只不过径向应力均匀区会减小。

为了获得较大范围的应力均匀区, 希望预应力靶板边界都能获得拉伸应力。在实际的双向加载实验中, 由于受夹具的影响, 不能保证所有边界均受到相同的拉伸或压缩应力, 考虑到加载部位的应力集中以及圣维南原理, 真正的应力均匀区只在中心及附近区域。不过, 即使很小的应力均匀区也可满足固体力学其它研究对象 (比如在准静态拉伸破坏试验中, 只要考察关注区的损伤演化即可, 不必考虑较大范围的周边应力场分布) 的需要, 但对于本文而言, 还需要满足层裂研究的相关条件, 即应力均匀区足够大, 不能让旁侧稀疏波在测试时间范围内传到靶板中心。

1.3 预应力实验装置结构的确定

根据以上实验要求、条件及方法, 为了在靶板径向方向获得较大的预应力, 同时又要满足实验靶室的空间尺寸限制, 预应力装置必须小巧而紧凑。目前拉伸机构有机械、液压及热膨胀等, 但大部分结构复杂、机构庞大。为此, 基于螺纹旋合原理, 我们设计了一个预

应力拉伸的实验装置, 结构见图 2。

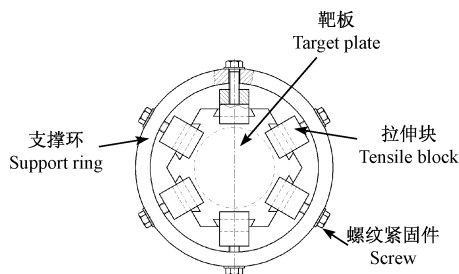


图 2 预应力拉伸实验装置主体部件

Fig. 2 Main part of pre-tensile experimental setup

该装置的优点是尺寸小, 辅助定位机构少, 预置拉伸应力可根据实验要求, 通过调整螺纹紧固件拧紧力矩来实现。同时, 由于采用了对称结构, 容易实现均匀应力区。此装置设计的关键点有两个:

1 为了装配需要, 必须给拉伸块足够空间, 因此径向预应力只能由靶板突出的六块承担, 作为粗略估计, 如果这六块突起与拉伸块接触面积为 s_1 , 靶板完整绕一圈突起面积为 s_2 , 则这六块承受的拉伸应力近似为 $s_2/s_1 \cdot \sigma$ 。拉伸块越小, 作用在靶板局部的应力越大, 很容易达到材料破坏强度。

2 由于泊松效应, 要使径向拉伸应力达到与单向拉伸应变 (ϵ_x , x 为拉伸方向) 相同数值, 施加的径向应力将会超过单向拉伸应力近 50%, 如果设泊松比 ν 为 0.33, 则径向应力与径向应变关系为 $\sigma_r = E/(1-\nu)\epsilon_r$, 而不是 $\sigma_x = E\epsilon_x$ 。

鉴于此, 对靶板突起和拉伸块的设计以及强度计算非常关键。

2 有限元模型的建立

由于整个预应力拉伸装置的结构复杂, 零部件数量多, 为了提高分析效率, 在建模时其主体为靶板, 其余部件是作为施加载荷和确保整体结构稳定的, 只须进行单独结构强度分析即可; 螺纹紧固件的设计、强度分析、失效分析可使用专业软件、设计手册进行, 本文不作详细描述。

2.1 靶板的计算模型建立和处理

预应力拉伸层裂实验要求靶板的中心部位 $\Phi 40 \text{ mm}$ 产生均匀的径向拉伸应力区。考虑到六个方向拉伸机构的加载会造成靶板受力位置附近拉伸应力较大, 因此靶板有效结构区域初步定为 $\Phi 140 \text{ mm}$ 。接下来使用 UG 软件的建模模块, 通过对称拉伸完成正六边形 (厚度为 8 mm) 的构建; 其后使用对称拉伸、实体特征阵列, 并使用布尔操作的“求合” (Ansys 中的分析对象往往不支持复杂的布尔操作^[9]), 完成了整个靶板的建模。建立的靶板模型见图 3。

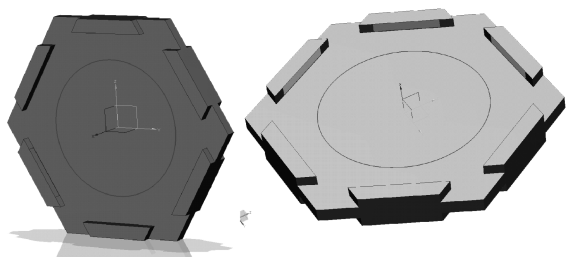


图3 靶板的三维实体模型

Fig. 3 Three-dimensional solid model of the target plate

模型建立完成后,为了模拟实际加载条件,在六个承载部位的受力面草绘出拉伸块与靶板的接触面。并使用分割面命令将受力面分离出来(如图 3 右侧所示)。由于不考虑倒角等细节特征,建模完成后可直接转入高级仿真模块。由于使用同一软件的两个模块,仿真计算时可根据需要随时返回主模型进行修改、调整。

指派材料为库材料中的 Aluminum_2014,有限元模型全部采用实体单元,并采用单元库中 10 节点的 3D 四面体网格单元(属二阶单元,具有较高的刚度以及较高的计算精度),单元大小初设为 3 mm。网络质量选项的中节点方法采用“混合”,最大雅克比值为 10。模型的材料属性为:密度 $\rho=2\,794\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=73\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.33$ 。

2.2 约束及载荷类型的选取

在静力学分析时,主要求解结构在与时间无关或时间作用效果可忽略的静力载荷作用下的响应。靶板在静载条件下结构的变形及应力分布是相对于静平衡位置,但是实现装置中预应力拉伸条件下,为了主要体现靶板受预拉伸后应力和变形,将其中一个承载部位并与主平面平行的面进行固定约束,从而避免分析过程中重力的影响。

在施加载荷时,可在点、线、面、体及边缘上加载包括重力、离心力和温度载荷在内的各种外加载荷。作用于模型的载荷为拉伸块施加在靶板上的力,因此只需将载荷类型选取为力(仅定义幅值和方向)。其作用面为建模时所创建的六个承载部位的 12 个分离面。为了确定拉伸力与预应力的关系,以及施加拉伸

力后靶板结构不发生较大变形或破坏,分别按 300 N、1 kN、2 kN 施加力,力的方向为分离面向外。施加约束和载荷后模型见图 4。

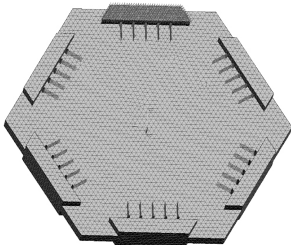


图4 计算模型约束及载荷情况

Fig. 4 Constraint and loading condition of the computational model

3 仿真计算结果及分析

采用 UG 高级仿真计算,预应力拉伸实验装置中靶板受 6 个方向上的相同载荷时,在中部约 $\Phi 123\text{ mm}$ 范围内产生了一个较为均匀的应力区,其应力值随载荷增大而增大,但均匀应力区大小并无明显变化,受力面的根部出现应力集中区。当载荷增大至 2 000 N 时,最大应力为 27.16 MPa,最大应变为 3.29×10^{-4} 。不同载荷条件下的计算结果见表 1。

靶板在三种载荷条件下应力分布云纹图见图 5。从左至右分别为 300 N、1 000 N、2 000 N。

表 1 不同载荷条件下应力分布

Tab. 1 Stress distribution under different loading conditions				
序号 No.	载荷 Load/ N	最大应力 Max stress/ MPa	最大应变 Max strain	中部均匀区域应力 Middle uniform region stress/MPa
1	300	4.07	4.94×10^{-5}	1.37
2	1 000	13.58	1.65×10^{-4}	4.55
3	2 000	27.16	3.29×10^{-4}	9.11

一般来说,利用有限元法得到的应力计算结果,其总体分布状况即应力的相对值是足够准确的,而最大应力值(绝对值)的误差可能比较大^[10]。但是即便如此,应力集中区最大应力仍远小于材料的许用应力 $[\sigma]$ 。如发生计算结果较接近许用应力,则应再对计算模型局部网格进行修改、调试,或开展实物测试进行验证。

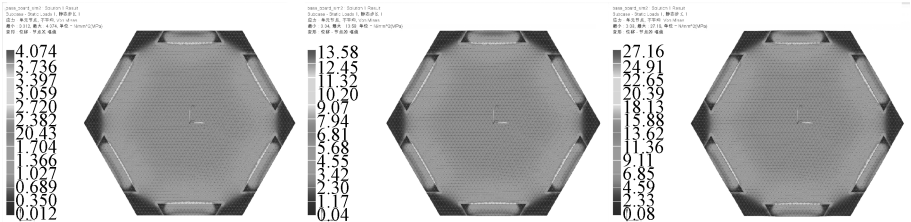


图5 靶板在三种载何条件下的应力分布云纹图(单位:MPa)

Fig. 5 Stress distribution contour of the target plate under three loading conditions(unit:MPa)

4 实验结果

由于实验装置结构经仿真计算,并不存在失稳或破坏可能性。因此转入样件加工。如图 5 所示,在靶板中部对称安装 4 个应变片进行测试,测试结果表明,均匀应力区直径超过 100 mm,应变值在 $1.51 \times 10^{-4} \sim 1.71 \times 10^{-4}$ 范围内,满足设计输入的要求。同时,经过实验装置受冲击后回收检查,表明螺纹紧固件、拉伸块和支撑环均没有塑性变形,可以重复使用,满足设计要求。预拉伸实验装置在实验前后状态照片见图 6。

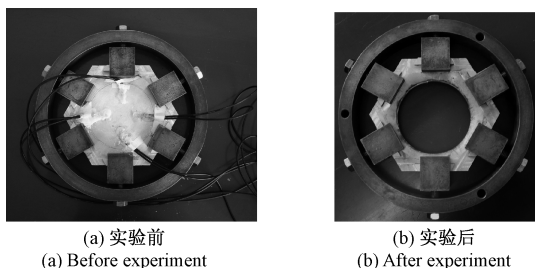


图 6 实验前后的预拉伸装置对比照片

Fig. 6 Comparison photos of pre-tension setup before and after experiment

5 结论

利用 UG 进行三维实体建模和有限元分析,可以实现结构设计阶段,同步进行分析和模型修改。在预应力层裂实验装置的结构设计中也体现了这一点。经过实验结果验证,表明靶板预应力加载装置的结构设计满足实验技术指标要求。同时,通过对靶板有限元分析发现,其有效测试范围仍有扩展空间,预应力仍可加大;同时靶板尺寸还可以缩小、变薄,相应的拉伸块等零部件可同步减重。分析结果为后期实验装置的优化设计提供了宝贵的参考数据。

通过仿真分析结果与实验结果的比较,由于 UG 有限元分析是建立在理想化模型上,不考虑局部细节特征,因此计算出的有效均匀应力区比实验测试出的稍大;同时有限元分析时的相关参数是采用 2A12 标准数据,其与材料实际供货状态、加工状态有一定差异。因此如果需要开展精确的分析计算则需对以上两方面细节进行完善。但是由于本类实验装置中靶板的应变可实时监测,因此只需要控制螺纹紧固件的拧紧力矩的数值和均匀性即可。同样,为减小多发实验结果的分散性,靶板材料的选用须满足同批次、同状态等基本要求。

参考文献 (References)

- [1] 张世文,刘仓理,李庆忠,等. 初始应力状态对材料层裂破坏特性影响研究[J]. 力学学报,2008,Vol. 40(4):535-542.
ZHANG ShiWen, LIU CangLi, LI QingZhong, et al. Study on spalling response of materials under pre-stress [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, Vol. 40(4): 535-542 (In Chinese).
- [2] 靳亚维,郑雄文. 基于 UG 的自卸车拉杆有限元分析[J]. 装备制造技术,2011,(7):42-43.
JIN YaWei, ZHENG XiongWen. Finite element analysis of self-unload mechanism based on ug software [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011, (7): 42-43 (In Chinese).
- [3] 经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M]. 北京:科学出版社. 1999:163-172.
JING FuQian. Introduction to experimental equation of state [M]. Beijing: Science Press, 1999: 163-172 (In Chinese).
- [4] 万敏,洪强,吴向东,等. 十字形试件双向拉深试验系统建立及加载精度分析[J]. 机械工程学报,2001,37(1):57-62.
WAN Min, HONG Qiang, WU XiangDong, et al. Establishment of biaxial tensile test of cruciform specimen and analysis of loading accuracy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(1): 57-62 (In Chinese).
- [5] 范志会,张丰发. 双向加载条件下尼龙-橡胶复合材料的应力松弛研究[J]. 固体力学学报,2005,26(2):145-150.
FAN ZhiHui, ZHANG FengFa. On the stress relaxation of nylon 6-rubber composite subjected to biaxial loading [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(2): 145-150 (In Chinese).
- [6] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:高等教育出版社. 1978. 1:46-47.
XU ZhiLun. Elastic mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1978. 1: 46-47 (In Chinese).
- [7] 付求舟,谢仁华,王兴业等. 双向拉伸载荷作用下层合板强度的实验研究[J]. 宇航材料工艺,1994(4):22-26.
FU QiuZhou, XIE RenHua, WANG XingYe, et al. Study on mechanical behavior of laminate under biaxial tensile load [J]. Aerospace Materials & Technology, 1994(4): 22-26 (In Chinese).
- [8] 苏翼林. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社. 1987:170-176.
SU Yilin. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987: 170-176 (In Chinese).
- [9] 李春旺,解武杰,杨尊袍,等. 基于 UG 预处理的 ANSYS 有限元分析方法[J]. 空军工程大学学报,2009,10(5):85-89.
LI ChunWang, XIE WuJie, YANG ZhunPao, et al. The ansys finite element analysis method based on the ug preprocess [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(5): 85-89 (In Chinese).
- [10] 韩建保,李邦国,龚雪莲,等. 某型装甲破障车车体结构强度有限元仿真研究[J]. 机械强度,2006,28(5):730-732.
HAN JianBao, LI BangGuo, GONG XueLian, et al. Study on structural properties of an armored vehicle body by FEM simulation [J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(5): 730-732 (In Chinese).