

爆炸冲击下薄板塑性应变预测模型及验证

李童¹, 武锦辉^{1*}, 刘吉², 谷广健¹, 王镇局²

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为解决自研制的效应靶法测量爆炸冲击波存在的高成本问题, 以及有限元分析中实验验证不足的局限, 本文提出了一种融合效应靶实验与 Abaqus/Explicit 有限元仿真的闭环研究方法, 适配直径 40 mm 微型效应靶的动态响应预测需求。通过集成 Brode 公式、修正 Friedlander 波形与 CONWEP 载荷算法, 并结合 Johnson-Cook 模型, 构建了“载荷-结构-材料”链式仿真模型, 系统研究了 1060 铝薄板在爆炸冲击下的塑性动态响应。仿真结果经激波管与外场效应靶实验双重验证, 薄板中心挠度预测相对误差小于 6%。参数敏感性分析表明, 材料屈服强度是影响精度的最关键参数, 而 0.5 mm 网格在效率与精度间取得最优平衡。与现有典型模型对比, 本文方法将预测误差从 10.3%~16.1% 显著降低至 5.7%。该方法可在实验前完成靶板参数虚拟优化, 减少实验次数 40% 以上, 为军事装备抗爆设计提供了一种高效、低耗的技术途径。

关键词: 爆炸冲击; 有限元分析; Abaqus/Explicit; 效应靶; Johnson-Cook 模型; 参数敏感性

中图分类号: O347

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.11.0019

引用格式: 李童, 武锦辉, 刘吉, 等. 爆炸冲击下薄板塑性应变预测模型及验证[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(3): 353-362.

LI Tong, WU Jinhui, LIU Ji, et al. Prediction model and verification of plastic strain in thin plates under blast loading[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(3): 353-362.

Prediction Model and Verification of Plastic Strain in Thin Plates Under Blast Loading

LI Tong¹, WU Jinhui^{1*}, LIU Ji², GU Guangjian¹, WANG Zhenju²

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the high cost issue of measuring blast shock waves using the self-developed effect target method and the limitation of insufficient experimental validation in finite element analysis, this paper proposed a closed-loop research methodology integrating effect target experiments with Abaqus/Explicit finite element simulation, adapted for predicting the dynamic response of a 40 mm diameter micro effect target. By integrating the Brode formula, a modified Friedlander waveform and the CONWEP load algorithm, and combined with the Johnson-Cook dynamic constitutive model, a “load-structure-material” chain simulation model was constructed to systematically investigate the plastic dynamic response of 1060 aluminum thin plates under blast loading. The simulation results were validated by both shock tube and

收稿日期: 2025-11-12

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202403021222181); 山西省科技成果转化引导专项(202404021301029)

作者简介: 李童(1998—), 男, 硕士生, 主要从事嵌入式系统及仪器方面的研究。

* 通信作者: 武锦辉(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事高动态光参数光电探测技术、光纤传感技术、嵌入式系统及仪器方面的研究。

E-mail: wujinhui@nuc.edu.cn.

field effect target experiments, with the relative error in predicting central deflection being less than 6%. Parametric sensitivity analysis indicates that the material yield strength is the most critical parameter affecting accuracy, and a 0.5 mm mesh achieves the optimal balance between efficiency and accuracy. Compared with existing typical models, the proposed method significantly reduces the prediction error from 10.3%~16.1% to 5.7%. This method can complete the virtual optimization of target plate parameters before experiments, reducing the number of experiments by more than 40%, providing an efficient and low-cost technical approach for the anti-explosion design of military equipment.

Key words: blast loading; finite element analysis; Abaqus/Explicit; effect target; Johnson-Cook model; parametric sensitivity

0 引言

爆炸冲击波的测量与响应研究在军事防护工程中具有重要意义,尤其是在现代装备中大量采用薄板结构的背景下。薄板在遭受爆炸冲击时易发生显著塑性变形,影响结构整体性能与任务执行能力。因此,深入研究薄板结构在爆炸载荷作用下的动态响应规律,已成为当前工程防护设计的重要课题^[1-3]。在军事装备的设计与制造过程中,准确把握其在爆炸冲击波作用下的动态响应行为,有助于提升结构对极端载荷的适应能力。尤其是对薄板结构的塑性变形特性及其最大塑性形变能力的掌握,对于提升整体结构的安全性和功能保持能力具有积极意义。

目前,对于爆炸载荷与冲击波压力的研究主要分为两类,一类是基于有限元仿真的数值方法,另一类是依赖效应靶法的实验测量。陈新祥等^[4]使用 LS-DYNA 软件模拟靶板的动态响应,陈建良等^[5]结合 CONWEP 算法探讨了大型舰船结构的爆炸毁伤机制。张云峰等^[6]采用修正 Friedlander 方程建立了自由场冲击波模型。周诗超等^[7]设计了一种基于数传电台组网的无线多通道冲击波超压采集系统,用于实时反馈测试状态。陈家辉等^[8]设计了压力传感器隔振组件,解决了坑道内爆炸引起的振动冲击和热冲击问题。黄帅^[9]采用 CONWEP 算法加载近距离侧向爆炸荷载。毛伯永等^[10]验证了圆形效应靶薄板的冲击响应模型。Gharababaei 等^[11]通过实验给出了金属圆薄板的塑性变形模型,提供了金属塑性变形建模基础。Villavicencio 等^[12]通过落锤冲击实验与 LS-DYNA 模拟对比了铝圆板动态响应。Henchie 等^[13]在钢板上施加重复爆炸载荷,观察圆板中心偏转增加的趋势。

以上研究方法存在明显局限:有限元分析虽

然可以模拟响应,但缺乏充分的实验验证,结果易偏离实际;效应靶法虽然可以直接测量冲击波压力,但大规模或高精度的实验能耗高、成本大,难以系统研究参数的影响。例如,文献[4]虽然使用 LS-DYNA 模拟靶板响应,但未提供足够的实验对比验证其模型精度;文献[5]和文献[6]聚焦舰船结构或自由场冲击波建模,应用于薄板局部响应时,成本与效率问题突出。针对上述问题,本文提出了一种结合 Abaqus/Explicit 有限元分析与激波管^[14]及外场效应靶实验的闭环研究框架。通过构建基于 Brode 公式的 CONWEP 爆炸模型,引入修正 Friedlander 波形表征压力时间历程,利用 Johnson-Cook 材料模型准确描述铝片高应变率下的塑性行为,建立可用于实验前预估响应和优化设计的高可信度数值模型。

1 理论建模

1.1 爆炸冲击波理论分析

炸药在爆炸时会产生高温高压气体并快速膨胀,压缩周围空气,形成传播速度极快的冲击波。该冲击波在传播过程中,其压力从峰值迅速衰减并进入负压区,随后由于空气回弹作用,压力出现正向回升,最终回归到环境压力。此过程具有强烈的非线性与瞬态特征^[15-16]。

冲击波信号属于瞬态加载,具有陡峭的上升沿、极短的正压持续时间和较高的超压峰值。理想自由场条件下,其压力-时间曲线可近似描述为 Friedlander 方程

$$p(t) = p_{\max} \left(1 - \frac{t - t_a}{t_0} \right) e^{-\frac{b(t - t_a)}{t_0}}, \quad (1)$$

式中: $p_{\max}$ 为峰值超压,是评估冲击波毁伤能力的关键参数; t_a 为冲击波到达时间; t_0 为正压持续时间; b 为波形衰减系数。通过该公式,可以描述冲击波正

压区域内的压力变化,对应曲线如图 1 所示。

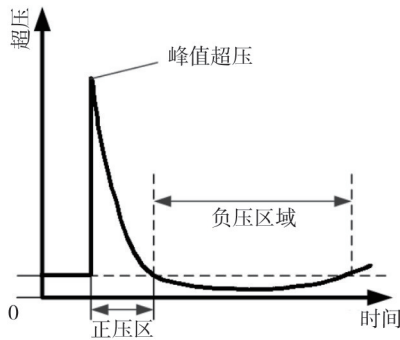


图 1 Friedlander 波形

Fig. 1 Friedlander waveform

峰值超压 $p_{\max}$ 是冲击波在正压区域所能达到的最大压力值,其大小与爆炸能量、距离等因素密切相关。 $P_{\max}$ 的计算可以通过 Brode 公式^[17]来实现。Brode 公式采用有限差分法对无限大理想气体中的爆炸冲击波超压进行计算,结果拟合为

$$p_{\max} = \frac{0.096}{Z} + \frac{0.143}{Z^2} + \frac{0.573}{Z^3} + 0.0019. \quad (2)$$

其中, $Z = R/W^{1/3}$, 是一个无量纲的比例距离,定义为从爆炸点到观察点的距离与特征长度的比值。 R 是观察点到炸药中心的距离(单位为米), W 是装药质量(单位为千克)。

修正 Friedlander 波形结合 CONWEP 算法,是对效应靶外场实验典型爆炸场景的工程化建模。尽管实际近地爆炸波系复杂,但该模型已通过激波管与多次外场实验数据反演校准(如衰减系数 $b=0.35$),能有效表征设备所处测点位置的等效载荷历程。该方法在类似实验距离下的适用性见文献[6]和文献[17]。根据 2.2 节实验验证可得实验模型与设备实测数据的良好吻合(误差 $<6\%$),该载荷模型适用于为效应靶外场实验提供载荷输入参考与结果预判。

1.2 靶板最大变形理论

受爆炸冲击波作用的固定边界铝靶板,其中心区域会在短时高强度载荷作用下发生轴对称下凹变形^[18]。针对直径 40 mm、厚度 0.2 mm 的薄圆板,其最大挠度 $\omega_{\max}$ 可基于薄板动力响应理论初步估算

$$\omega_{\max} \approx \frac{\alpha P_s a^4}{E h^3}, \quad (3)$$

式中: α 为经验系数,视加载时间与板参数而定(典型范围为 10~15); a 为圆板半径; E 为杨氏模量; h 为圆板厚度。

1.3 靶板材料模型

爆炸载荷具有极高的超压峰值和短暂的持续时间,铝材在这种高应变率条件下表现出显著的塑性响应特性^[19]。因此,材料模型的设计必须综合考虑高应变率下的塑性应力行为以及应变率效应的影响。本文采用 Johnson-Cook 模型^[20-21]描述 1060 铝的动态应力-应变行为,具体公式为

$$\sigma = (A + B\xi_p^n)(1 + C \ln \dot{\xi}^*)(1 - T^{*m}), \quad (4)$$

式中: σ 为流动应力; A 、 B 、 n 、 C 和 m 分别为材料屈服强度、硬化模量、硬化指数、应变率敏感性系数与热软化指数; T^* 为归一化温度; ξ_p 为等效塑性应变; $\dot{\xi}^*$ 为无量纲化等效塑性应变率, $\dot{\xi}^* = \dot{\xi}_p / \dot{\xi}_0$, 其中, $\dot{\xi}_0$ 为参考应变率。

本文采用的 Johnson-Cook 塑性模型旨在预测靶板在设备实验载荷范围内的塑性变形历程,目前未集成损伤失效准则。这是因为当前设备配套实验的关注重点在于测量冲击波超压与结构动态变形之间的关联关系,而非靶板的极限破坏状态。

1.4 效应靶动态响应建模

本文基于 Abaqus/Explicit 平台中的 CONWEP 算法^[22]实现爆炸载荷的仿真施加。该算法以实测爆炸数据库为基础,以 Brode 公式为核心对爆炸强度进行定量表征;同时结合 Friedlander 波形描述冲击波的非线性传播特征,从而构建时间历程载荷曲线并施加于靶板表面。整个加载过程无需对爆炸物理场进行显式建模,兼具计算效率与工程适用性^[23]。在结构响应分析中,靶板采用边缘固支的 1060 铝圆片,其动态挠度由爆压幅值、加载时间及板厚共同决定,仿真中基于薄板大变形理论对响应趋势进行估算。为真实反映材料在高应变率下的塑性行为,引入 Johnson-Cook 模型,对铝材在瞬态爆炸载荷作用下的应力-应变演化过程进行动态计算。

1.5 模型构建细节与参数设置

本文所建立的有限元模型在 Abaqus/Explicit 平台上实现了“Brode 公式→修正 Friedlander 波形→CONWEP 加载→板结构响应→Johnson-Cook 材料响应”的链式仿真逻辑。与现有研究相比,本模型在载荷施加效率与材料动态响应精度方面具有显著优势。

CONWEP 算法: 基于 Brode 公式计算峰值超

压 $p_{\max}$, 其中, 比例距离 Z 的取值范围对应于0.1~0.8 MPa的超压区间, TNT当量 W 根据实验装药量设定为0.05~0.3 kg, 距离 R 设定为0.5~2 m, 以匹配激波管与外场实验条件。

修正Friedlander波形参数: 波形衰减系数 b 取值为0.35, 该值基于激波管实验数据反演校准, 能更准确地描述冲击波在正压区间的非线性衰减行为。

Johnson-Cook材料参数: 1060铝材的本构参数如表1所示, 其中 A 、 B 、 n 、 C 和 m 参考自文献[20], 并经动态力学实验验证。

表1 1060铝材参数

Tab. 1 1060 aluminum specifications

参数	A/MPa	B/MPa	n	C	m	$\dot{\xi}_0$
取值	70	100	0.65	0.01	1.0	1.0

边界与加载设定: 靶板四周采用完全固定约束, 模拟焊接边界; 采用理想固支与均质材料假设, 是基于对实际实验装置中焊接装配工艺的一致性考量。该简化虽未体现热影响区的材料梯度, 但文献[11]和文献[20]指出此类边界效应对薄板中心区域动力响应的预测影响较小(约2%~4%)。本文旨在模拟与设备配套的特定效应靶行为, 并通过实验数据进行校正, 当前边界模型已能有效复现设备采集的中心挠度变化规律, 满足为实验提供预测参考的工程目的。

本文未考虑流固耦合效应, 但在设计外场实验环境对应的实验爆距(0.5~2 m)与超压范围(0.1~0.8 MPa)内, 靶板中心最大挠度与板半径之比($\omega_{\max}/a$)小于0.1, 结构运动对冲击波压力场分布的影响较弱。文献[19]和文献[22]也表明, 在此类工况下, 单向耦合已能较好地复现结构动力响应趋势。本模型的核心目标是为设备外场实验提供快速、可靠的数值参考, 单向耦合方法在保证计算效率的同时, 已能实现与实验数据误差小于6%的良好匹配, 满足辅助实验的分析需求。

2 实验与结果分析

2.1 数值仿真

2.1.1 仿真过程

为研究薄铝圆片在爆炸冲击载荷作用下的动态响应, 使用Abaqus/Explicit平台建立有限元模型。本文的有限元仿真流程涵盖前处理、求解与后处理三个阶段, 具体步骤如下:

1) 前处理阶段。

几何建模: 建立直径40 mm、厚度分别为0.2 mm、0.25 mm与0.3 mm的圆形平面壳模型。

材料赋值: 定义1060铝的Johnson-Cook模型参数及失效准则。

网格划分: 采用0.5 mm单元尺寸进行结构化网格划分, 生成约21 500个S4R壳单元, 在保证计算精度的同时控制求解规模。

边界与载荷: 约束模型四周全部自由度, 通过CONWEP模块施加修正Friedlander波形载荷。

所建立的效应靶靶板铝片的有限元模型以及超压载荷曲线如图2所示。

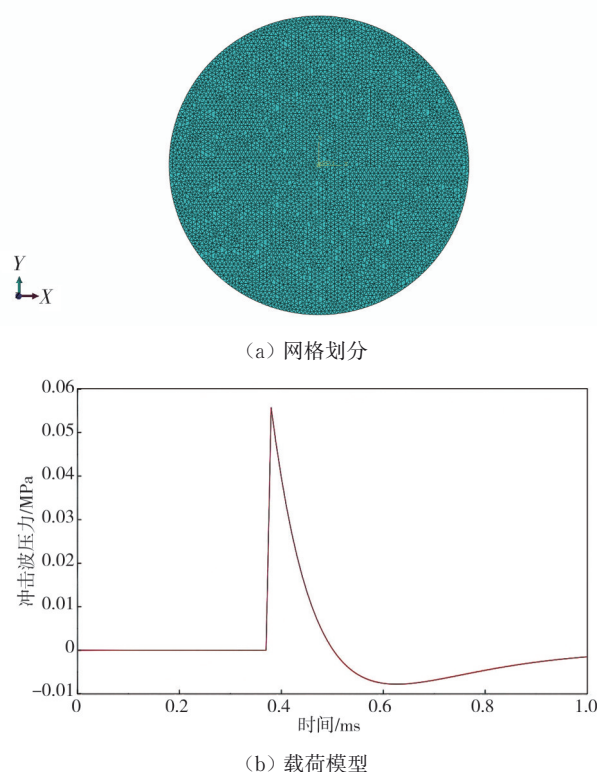


图2 网格划分及载荷模型

Fig. 2 Grid partitioning and load model

2) 求解阶段。

分析步类型: 显式动态分析(Dynamic, Explicit), 时长2 ms, 初始增量步设为 1×10^{-4} ms, 适应冲击载荷的高频特性。

质量缩放系数设为1, 在保证计算稳定性的前提下避免惯性失真。

3) 后处理阶段。

输出中心节点位移、等效应力、等效塑性应变(PEEQ)等关键变量。

通过Abaqus/Viewer提取靶板中心挠度-时间曲线, 并记录最大值用于后续比对。

整个仿真流程如图 3 所示,形成了从模型构建到结果验证的闭环。

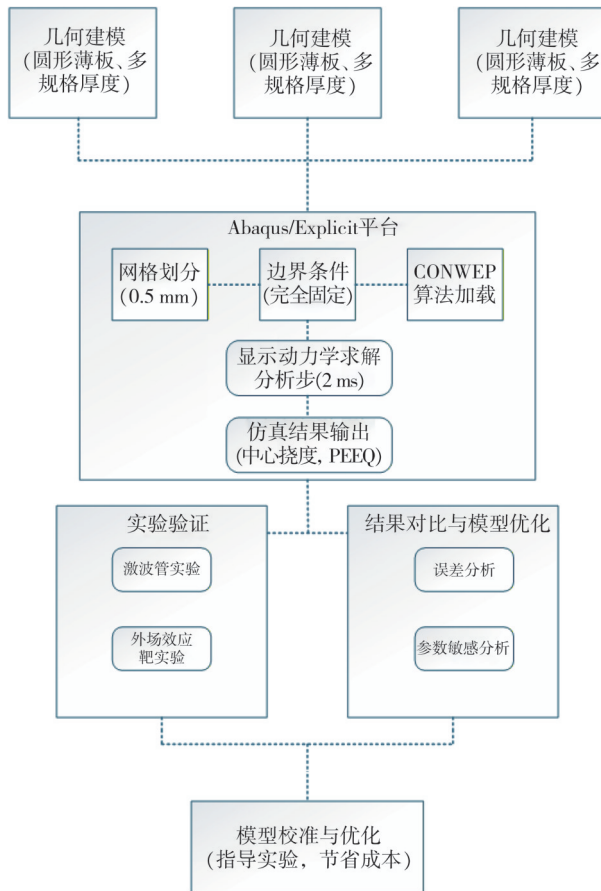
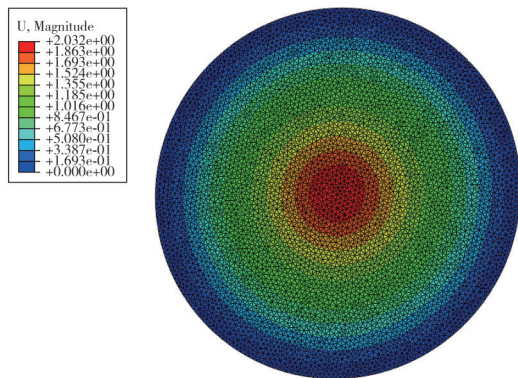


图 3 有限元仿真流程图

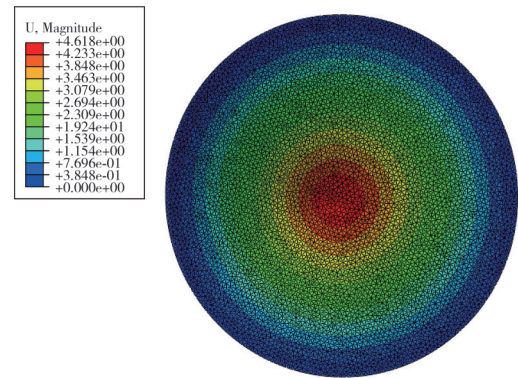
Fig. 3 Finite element simulation flowchart

2.1.2 数值仿真结果

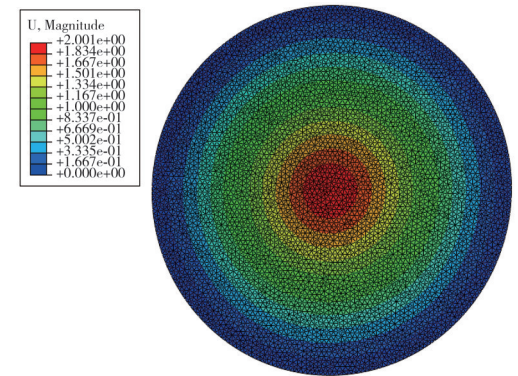
根据效应靶的工作量程范围,设置质量缩放系数为 1,通过调整 TNT 当量大小对模型施加 0.1~0.8 MPa 的载荷进行模拟。图 4 展示了部分典型载荷下靶板的等效位移云图。仿真超压值与中心最大形变对应关系如图 5 所示。



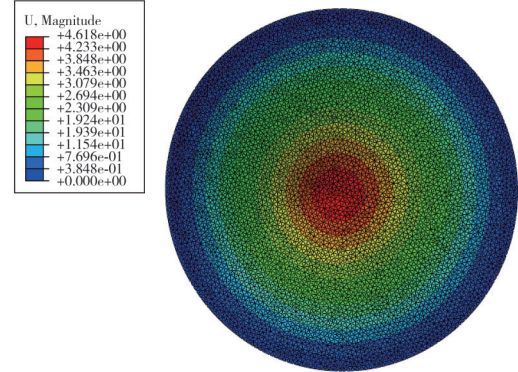
(a) 0.4 MPa 超压 | 厚度为 0.2 mm 的铝片



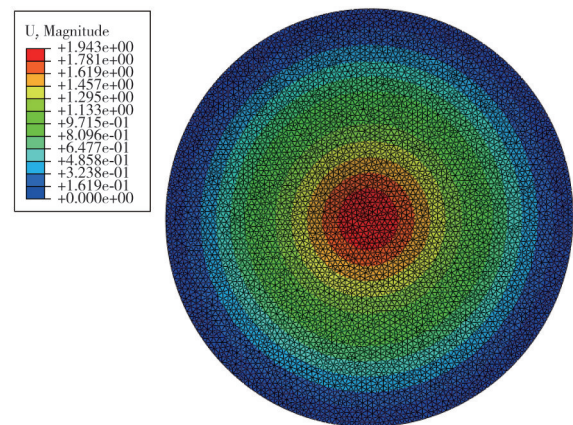
(b) 0.8 MPa 超压 | 厚度为 0.2 mm 的铝片



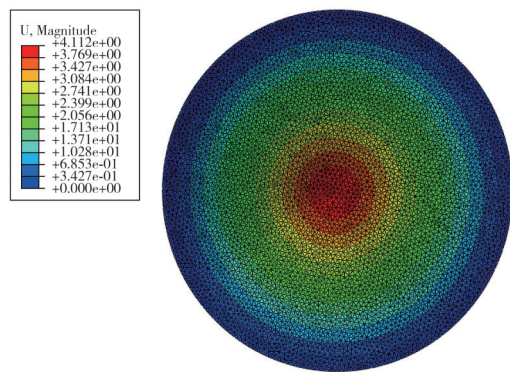
(c) 0.4 MPa 超压 | 厚度为 0.25 mm 的铝片



(d) 0.8 MPa 超压 | 厚度为 0.25 mm 的铝片



(e) 0.4 MPa 超压 | 厚度为 0.3 mm 的铝片



(f) 0.8 MPa超压 | 厚度为0.3 mm的铝片

图4 靶板应变云图

Fig. 4 Strain cloud map of target plate

由图5可以看出,随着超压值的增大,不同厚度铝片的中心最大形变均呈单调上升趋势,变化规律与爆炸冲击载荷下薄板的动力响应特征一致。

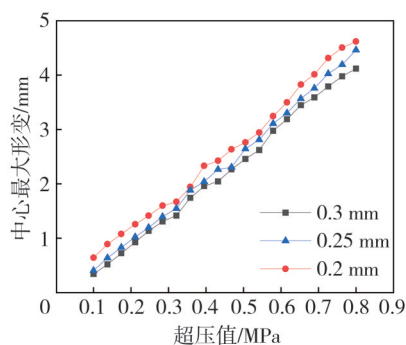


图5 数值仿真结果

Fig. 5 Numerical simulation results

2.2 实验验证

2.2.1 激波管实验

采用内径为40 mm的激波管开展激波加载,如图6所示。



图6 激波管的实验装置

Fig. 6 Shock tube experimental apparatus

为构建固定边界条件,将外径为46 mm,厚度分别为0.3 mm、0.25 mm、0.2 mm的1060铝制圆片焊接于空心圆环上,并安装于激波管末端管口处。圆环内径为40 mm,与激波管口径一致,

对应铝片的有效受载面积。实验开始后打开安全阀,将高压气源的氮气充入高压驱动段管腔,并通过压力表读取管腔的压力数据。当达到实验所需压力值(0.1~0.8 MPa之间)后按下撞针开关,启动撞针机构击穿隔膜,产生激波并作用于激波管末端的金属圆片。铝片的中心位移通过激光位移传感器进行测量。多次实验后取均值得到的数据如图7所示。

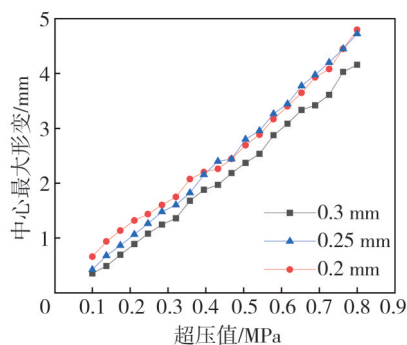


图7 激波管实验结果

Fig. 7 Shock tube experimental results

2.2.2 外场实验

为获取真实爆炸环境下薄板的动态响应数据,开展了外场爆炸实验。采用基于机电转换原理的效应靶系统,通过电机驱动传动机构实时测量靶板形变。主要实验步骤如下:

1) 场地与布局: 实验在开阔平坦场地进行,靶板安装于距地面1.2 m的支架上,确保冲击波作用面与装药中心同高,布局如图8所示。



(a) 效应靶布置



(b) 靶板形变情况

图8 外场实验

Fig. 8 Field experiment

2) 装药与引爆: 采用TNT药柱(0.05~0.3 kg),水平距离0.5~2.0 m,使用电雷管与导爆索起爆网络保证同步性。

3) 数据采集与处理: 每组工况重复实验3次。爆炸作用前后,通过效应靶系统分别测量靶板形变状态,基于形变量与压力的标定关系计算冲击波压力。采集系统与起爆信号同步触发,采样频率为1 MHz。取3次实验的平均值作为最终有效数据,如图9所示。

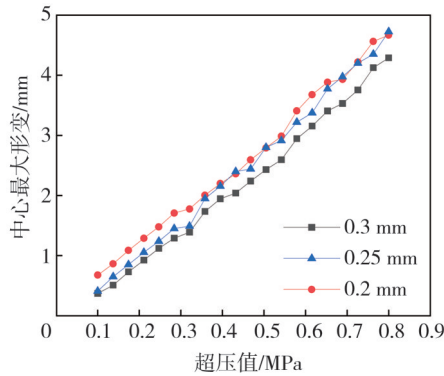


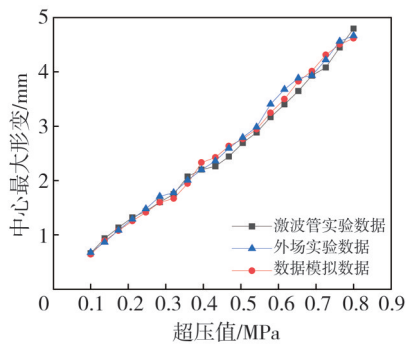
图9 外场实验结果

Fig. 9 Field experiment results

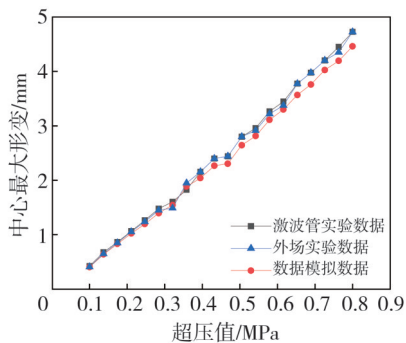
该实验为数值模型在真实爆炸场景中的验证提供了可靠的数据支持。

2.3 结果分析

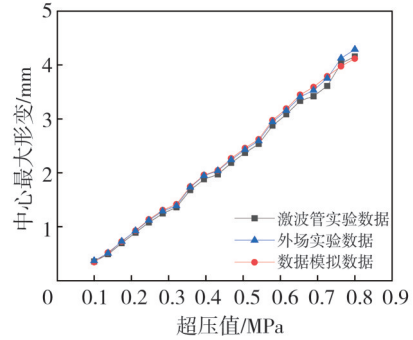
本文将仿真结果与激波管实验及外场效应靶实验数据进行系统对比, 20组样本的误差均控制在6%以内, 结果表明所构建的有限元模型在预测薄板结构爆炸冲击响应方面具有较高的准确性与稳定性。如图10所示, 数值模拟结果与两类实验测量数据高度吻合, 响应趋势一致。



(a) 0.2 mm 铝片数据对比



(b) 0.25 mm 铝片数据对比



(c) 0.3 mm 铝片数据对比

图10 实验结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental results

将有限元仿真结果分别与激波管实验及外场效应靶实验数据进行系统对比分析, 以全面评估模型在不同实验条件下的预测精度与稳定性。具体对比如下:

1) 与激波管实验对比, 在0.1~0.8 MPa爆压范围内, 仿真与激波管实验的中心挠度吻合良好。0.2, 0.25和0.3 mm 3类厚度铝板的平均相对误差分别为4.8%、3.9%和2.7%。

最小误差出现在0.3 mm厚度板、0.284 MPa工况, 仿真值为1.307 mm, 实验值为1.245 mm, 相对误差为4.98%。

最大误差出现在0.2 mm厚度板、0.395 MPa工况, 仿真值为2.332 mm, 实验值为2.20 mm, 相对误差为6.00%。

2) 与外场效应靶实验对比, 外场实验受地面反射、环境扰动等因素影响, 载荷条件更为复杂。仿真与外场实验的平均相对误差分别为: 0.2 mm厚度板5.1%, 0.25 mm厚度板4.2%, 0.3 mm厚度板3.4%。

最小误差出现在0.25 mm厚度板、0.689 MPa工况, 仿真值为3.758 mm, 外场实验值为3.97 mm, 相对误差为5.34%。

最大误差出现在0.2 mm厚度板、0.689 MPa工况(同前文所述), 仿真值为4.01 mm, 外场实验值为3.933 mm, 相对误差为1.96%; 而0.25 mm厚度板在0.689 MPa下误差为5.44%, 0.3 mm厚度板在0.8 MPa下误差为4.09%, 整体仍符合小于6%的误差控制要求。

整体而言, 仿真结果与两类实验数据在全部对比样本中, 相对误差均在6%以内, 表明所建模型具有良好的预测一致性与工况适应性。随板厚增加误差分布呈现略降低的趋势, 说明模型对边界效应与材料响应的仿真效果在较薄板中仍有小幅偏差。主

要误差来源包括:激光位移传感器测量误差(± 0.1 mm)、材料参数分散性、边界条件理想化以及外场实验中波系反射的未完全建模等。

该模型不仅为爆炸冲击下薄板动态响应提供了可靠的预测工具,也可为后续靶板参数优化与防护结构设计提供数值依据。

2.4 参数敏感性分析与成本效率评估

为评估模型鲁棒性与工程适用性,进一步开展了参数敏感性分析与成本效率量化研究。

1) 网格敏感性分析

对比0.5 mm、1.0 mm与1.5 mm三种网格尺寸下的中心挠度误差与计算时间(见表2)可知,随着网格尺寸减小,中心挠度误差显著降低,0.5 mm网格的误差可控制在5%以内;同时,相较于1.0 mm网格,0.5 mm网格的计算时间增幅仅为16.7% ($\leq 20\%$),在计算精度与效率之间取得了最优平衡,适用于爆炸冲击类瞬态仿真分析。

2) 材料参数敏感性

对Johnson-Cook模型中的屈服强度 A 与应变

率系数 C 进行 $\pm 10\%$ 扰动,分析其对中心挠度的影响。结果显示, A 的敏感性最高,扰动 $\pm 10\%$ 导致挠度变化约7.2%,说明材料强度参数的准确性对预测结果影响显著。

表2 网格尺寸对比

Tab. 2 Grid size comparison

网格尺寸/mm	中心挠度误差/%	计算时间/min
1.5	12.3	8
1.0	8.0	12
0.5	4.9	14

3) 成本评估

本文所提“仿真优先+实验验证”的方法,可在实验前完成靶板参数优化、减少外场实验试错成本等工作,显著降低实验次数与成本。

2.5 模型精度对比与误差分析

为客观评价本文模型的预测精度,选取文献[10]中圆形效应靶模型作为对比基准,在相同载荷(0.69 MPa)与靶板规格(0.25 mm)下进行中心挠度预测对比,如表3所示。

表3 模型精度对比

Tab. 3 Model accuracy comparison

模型	模型类型	预测中心挠度/mm	相对实验误差/%
实验值	—	4.28	—
文献[11]	经验解析模型	3.59	16.1
文献[4]	LS-DYNA 仿真模型	3.71	13.3
文献[10]	效应靶专用模型	3.84	10.3
本文模型	Abaqus/CONWEP-JC集成模型	4.04	5.7

本文模型与文献所用模型对比分析表明:

1) 与经验解析模型对比,文献[11]提供的塑性变形模型基于理想刚塑性假设,未充分考虑材料的应变率效应和载荷波形细节,导致其预测结果偏小,误差最大(16.1%);由于Johnson-Cook模型准确描述了1060铝在高应变率下的塑性硬化行为,本文模型因引入了Johnson-Cook模型和修正Friedlander波形,对动态塑性变形的描述更为精确。

2) 与通用仿真模型对比,文献[4]虽同样采用有限元法(LS-DYNA),但其载荷施加可能依赖于简化的三角形脉冲,且材料模型未明确考虑应变率敏感性,导致误差(13.3%)显著高于本文模型(5.7%)。这凸显了本文采用的CONWEP载荷模型与Johnson-Cook材料模型相结合在模拟爆炸冲击问题上的独特优势。

3) 与专用效应靶模型对比,文献[10]的模型针对效应靶进行了优化,精度较高,但其模型适

用范围较窄;本文模型在保持更高精度的同时,兼具更强的通用性和清晰的“载荷-结构-材料”链式仿真逻辑,便于推广至其他爆炸冲击场景。

本文模型误差显著降低,其主要原因如下:

1) 载荷模型更真实。采用CONWEP算法与修正Friedlander波形,精确描述了冲击波传播的非线性及衰减特性,优于简化的载荷假设。

2) 材料本构更贴合动态响应。Johnson-Cook模型准确刻画了1060铝在高应变率下的塑性硬化行为,克服了理想塑性或低应变率模型的不足。

3) 建模策略的系统性。本文集成了经过工程验证的载荷模型、动态本构和优化的网格技术,形成了前后衔接、相互印证的完整仿真框架。

本文模型仍存在约5.7%的误差,主要源于:激光位移传感器测量误差(± 0.1 mm)、材料参数(尤其是Johnson-Cook参数)的固有分散性,以及数值仿真中对边界条件(理想固支)的理想化处

理。后续研究可通过参数反演、考虑边界柔度以及引入损伤失效准则来进一步降低系统误差。

需要特别说明的是,本文构建的数值模型具有明确的专用性与场景依赖性。其目标是精确复现与特定实验设备(直径 40 mm 效应靶)相匹配的薄板动态响应,而非建立一个普适于任意尺度结构的通用预测模型。因此,本文未考虑尺寸效应的影响,模型的全部参数与验证均围绕配套实验设备展开,其价值在于为该设备的后续外场实验提供可靠的数值辅助与优化建议,可以减少实验次数,降低实验成本。

3 结 论

本文针对效应靶实验中的爆炸冲击测试需求,建立了一种集仿真与实验于一体的薄板动态响应预测方法,为外场实验提供了高效、高精度的数值辅助工具。1) 通过融合 CONWEP 载荷算法、修正 Friedlander 波形与 Johnson-Cook 材料模型,构建了“载荷-结构-材料”链式仿真模型,实现了对薄板塑性变形的全过程模拟。2) 仿真结果经激波管与外场效应靶实验双重验证,在 0.1~0.8 MPa 爆炸超压范围内,中心挠度预测误差小于 6%,较文献典型模型精度显著提高。3) 通过参数敏感性分析确定了材料屈服强度是影响预测精度的最关键参数,并验证了 0.5 mm 网格可在计算效率与模拟精度之间取得最优平衡。4) 本方法可在实验前对靶板参数进行虚拟优化,预估可减少 40% 以上的外场实爆次数,有效降低实验成本与安全风险,具备良好的工程实用性与设备配套适用性。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 周游,纪冲,王雷元,等. 重复爆炸载荷作用下薄壁方管动力响应研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(9): 1871-1880.
ZHOU You, JI Chong, WANG Leiyuan, et al. Research on the dynamic response of thin-walled square tube under repeated blast loads[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(9): 1871-1880. (in Chinese)
- [2] 陶洋,张会锁,谢天奇,等. 丝织物编织结构与迎/背爆面组合对抗爆性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(1): 46-52.
TAO Yang, ZHANG Huisuo, XIE Tianqi, et al. Influence of the weaving structure of silk fabrics and the combination of the front and back explosion sides on the anti-explosion performance [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2026, 47(1): 46-52. (in Chinese)
- [3] SHI Lichen, WANG Jian, DOU Weitao, et al. Simulation on dynamic characteristics of TC4 cutting with crack defects. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2024, 15(3): 387-396.
- [4] 陈新祥,刘彦. 爆炸冲击载荷作用下靶板动态响应研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 149-153.
CHEN Xinyan, LIU Yan. Research on dynamic response of target plate under blast impact loading[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(S2): 149-153. (in Chinese)
- [5] 陈建良,李继承,屈明,等. 爆炸冲击波对大型复杂舰船结构毁伤效应数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(11): 1176-1186.
CHEN Jianliang, LI Jicheng, QU Ming, et al. A numerical simulation analysis for destruct effect of blast load on large complex warship structure[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(11): 1176-1186. (in Chinese)
- [6] 张云峰,陈博,魏欣,等. 空气自由场爆炸冲击波数值建模及应用[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(11): 136-153.
ZHANG Yunfen, CHEN Bo, WEI Xin, et al. Numerical modeling and application of shock wave of free-field air explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(11): 136-153. (in Chinese)
- [7] 周诗超,李凯,温鹏,等. 无线多通道冲击波采集存储技术[J]. 电子测量技术, 2022, 45(24): 85-90.
ZHOU Shichao, LI Kai, WEN Peng, et al. Wireless multi-channel shock wave acquisition and storage technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(24): 85-90. (in Chinese)
- [8] 陈家辉,孔德仁,徐春冬,等. 坑道内冲击波压力测试与分析[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(12): 63-68.
CHEN Jiahui, KONG Deren, XU Chundong, et al. Shock wave pressure test and analysis in tunnel [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(12): 63-68. (in Chinese)
- [9] 黄帅. 近距离侧向爆炸荷载作用下钢筋珊瑚混凝土梁的动力响应[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [10] 毛伯永,翟红波,苏健军,等. 圆形效应靶薄板的冲

- 击响应建模及参数影响分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(1): 8-13.
- MAO Boyong, ZHAI Hongbo, SU Jianjun, et al. Impact response modeling and parameter influence analysis of a circular effect target sheet [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(1): 8-13. (in Chinese)
- [11] GHARABABAEI H, DARVIZEH A. Experimental and analytical investigation of large deformation of thin circular plates subjected to localized and uniform impulsive loading [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2010, 38(2): 171-189.
- [12] VILLAVICENCIO R, SUTHERLAND L, SOARES C G. Numerical simulation of transversely impacted, clamped circular aluminium plates [J]. Ships and Offshore Structures, 2012, 7(1): 31-45.
- [13] HENCHIE T F, CHUNG KIM YUEN S, NURICK G N, et al. The response of circular plates to repeated uniform blast loads: An experimental and numerical study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 74: 36-45.
- [14] 李永生, 姚贞建, 丁义凡. 激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 10-18.
- LI Yongsheng, YAO Zhenjian, DING Yifan. High-accuracy estimation of the rise time of shock tube reflection step pressure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 10-18. (in Chinese)
- [15] XUE Z Q, LI S, XIN C L, et al. Modeling of the whole process of shock wave overpressure of free-field air explosion [J]. Defence Technology, 2019, 15(5): 815-820.
- [16] ANGELIDES S C, MORISON C, BURGAN B A, et al. A methodology for predicting far-field blast loading on structures[J]. Structures, 2023, 58: 105619.
- [17] 杨军, 张帝, 任光. 基于 CONWEP 动态加载的建筑物爆破拆除数值模拟[J]. 工程爆破, 2016, 22(5): 1-6, 91.
- YANG Jun, ZHANG Di, REN Guang. Numerical simulation of blasting demolition of buildings and structures based on CONWEP dynamic loading [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(5): 1-6, 91. (in Chinese)
- [18] 叶希洋, 苏健军, 姬建荣. 冲击波测试效应靶法综述[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(12): 55-61, 124.
- YE Xiyang, SU Jianjun, JI Jianrong. Review of effect target method for shock wave measurement [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 55-61, 124. (in Chinese)
- [19] 陈新发, 黄西成, 豆清波, 等. 工程分析中爆炸冲击载荷的计算方法[J]. 强度与环境, 2020, 47(1): 26-32.
- CHEN Xinfu, HUANG Xicheng, DOU Qingbo, et al. Calculation method of blast loadings in engineering analysis [J]. Structure & Environment Engineering, 2020, 47(1): 26-32. (in Chinese)
- [20] 毛伯永, 刘强, 叶希洋, 等. 基于 Johnson-Cook 本构模型的 1060 铝动态力学性能参数识别及验证[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(34): 14531-14536.
- MAO Boyong, LIU Qiang, YE Xiyang, et al. Identification and verification of dynamic mechanical properties of 1060 aluminum based on Johnson-cook constitutive model [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(34): 14531-14536. (in Chinese)
- [21] 高鹏, 徐鹏. 装药弹体高空跌落冲击动态响应研究[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2): 179-186.
- GAO Peng, XU Peng. Dynamic response of charged projectile under high drop impact [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2): 179-186. (in Chinese)
- [22] 崔子鑫, 李海超, 庞彧, 等. Conwep 算法和压力时程曲线荷载施加法在爆炸毁伤分析中的适用性[J]. 军事交通学院学报, 2021, 23(1): 88-94.
- CUI Zixin, LI Haichao, PANG Yu, et al. Applicability of conwep algorithm and pressure-time curve load application method in explosion damage analysis [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2021, 23(1): 88-94. (in Chinese)
- [23] 王慧鹏, 刘欣荣, 张鑫, 等. 多孔孔板流量计结构参数的数值研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9): 75-84.
- WANG Huipeng, LIU Xinrong, ZHANG Xin, et al. Numerical study of structural parameters of the multi-hole orifice flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9): 75-84. (in Chinese)