

# 靶板厚度对破片声发射信号特征的影响研究

张恒庆,商飞,赵永鑫

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**为研究铝合金靶板厚度对靶板声发射信号特征参数的影响,对直径 8 mm 球形破片侵入不同厚度铝合金靶板进行数值模拟研究,获得靶板侵入过程中的声发射信号。仿真分析不同速度下靶板厚度对破片侵入过程中声发射信号特征参数的变化,研究发现:靶板厚度在 3 mm~10 mm 范围的声发射信号特征值幅度随破片速度的增大而增大;根据靶板厚度与靶板声发射信号特征参数的关系,选择合适厚度靶板对破片声发射信号进行分析。

**关键词:**靶板厚度;破片侵入;声发射信号;幅度;速度评估

**中图分类号:**TJ510.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)02-0023-04

## Study of Target Plate Thickness Effect on Characteristics of Fragment Acoustic Emission Signal

ZHANG Hengqing, SHANG Fei, ZHAO Yongxin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To study the influence over the thickness of aluminum alloy target plate on the characteristic parameters of the acoustic emission signal of the target plate, numerical simulations of the spherical shattering chip of 8 mm diameter penetrating different thicknesses of aluminum alloy target plate were carried out to obtain the acoustic emission signal during the target plate penetration process. With the simulation analysis of the thickness of the target plate at different speeds on the changes of acoustic emission signal characteristic parameters in the process of chip penetratio, it is found that the target plate thickness in the range of 3 mm-10 mm acoustic emission signal eigenvalue amplitude increases with the increase of chip speed. According to the relationship between the thickness of the target plate and the characteristic parameters of the target plate acoustic emission signal, the appropriate thickness of the target plate should be selected to analyze the fragment acoustic emission signal.

**Keywords:** thickness of target plate; fragmentation penetration; acoustic emission signal; amplitude; velocity evaluation

## 0 引言

破片侵入有限靶板的研究对破片毁伤威力的评估及实战应用有着重要的军事意义<sup>[1]</sup>。针对不同厚度条件下的靶板侵入效果,现有研究的经验公式对靶板侵入深度以及弹道极限具有较为有效的工程预测,然而破片侵入靶板是一个复杂的过程,经验公式需要长时间补充修改,会大量浪费人力物力。近年来关于声发射技术的应用已经扩展到石油化工、航空航天、交通运输以及材料试验等领域<sup>[2]</sup>,当靶板因破片冲击产生破碎、沉坑、崩落和贯穿现象,会因为撞击点局部源快速释放能量发出瞬态弹性波。因此,研究破片撞击靶板引起应力波的产生及传播对破片毁伤威力评估新方法非常有必要。

通过声发射信号特性反推声发射源信息的研究已经积累了多年的经验,BECK P 等通过分析研究声发射信号特征参量与材料断裂特征之间的关系,发现裂纹深度与信号能量呈线性关系<sup>[3]</sup>;SUNG D U 等利用小波技术对层合复合材料板受低速冲击产生不同损伤时的声发射信号进

行分析,结果表明该方法能够区分基体裂纹、纤维分层等不同损伤模式<sup>[4]</sup>;庞宝君等利用 ANSYS 有限元仿真软件对超高速空间碎片撞击靶板进行数值仿真,建立声发射信号参数与靶板损伤模式的关系,波形模态与撞击参数及损伤模式关系对撞击源识别奠定了理论基础<sup>[5]</sup>;葛涛等对弹丸贯穿有限厚度混凝土靶体的力学特性进行了理论上的分析,解释了弹丸侵入靶板过程中的拉伸波及压缩波的传播造成混凝土断裂的现象,对声发射信号分析混凝土侵入贯穿效应有了初步的基础<sup>[6]</sup>;HU K 等利用小波包技术和能量熵理论对压气机叶片硬质物体冲击过程的声发射信号进行了分析,得到了冲击速度与声发射信号的小波包能量熵之间的关系<sup>[7]</sup>,为使用声发射技术的发动机叶片冲击监测提供了一种新方法;HESSER D F 等利用不同直径的钢球为冲击源激发有压电传感器的铝板,基于卷积神经网络和深度转移学习方法训练声发射时域信号以及频域信号,结果实现了 AE 源损伤程度的量化评估<sup>[8]</sup>。

目前研究人员尚未利用声发射技术研究靶板侵入过程,针对撞击靶板过程中靶板厚度对声发射特征值的影响规律,本文利用数值模拟软件,开展直径 8 mm 球形破片侵

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(11372143)

**第一作者简介:**张恒庆(1995—),男,江苏徐州人,研究生,研究方向为破片动能测量新方法研究。

彻靶板声发射信号的特征参数分析,研究破片不同速度下靶板厚度对声发射信号特征参数的影响。

## 1 数值模拟

### 1.1 几何模型

利用 Autodyn 有限元软件对破片侵彻铝合金靶板的过程进行二维数值计算,图 1 为数值计算侵彻几何模型,靶板撞击点 40 mm 处高斯点采集声发射信号。靶板材料选用 Al7039,高度 200 mm,厚度不定;破片采用钨珠材料,直径 8 mm;破片撞击初始速度为不定;计算模型采用轴对称模型;算法采用拉格朗日(Lagrange)算法。

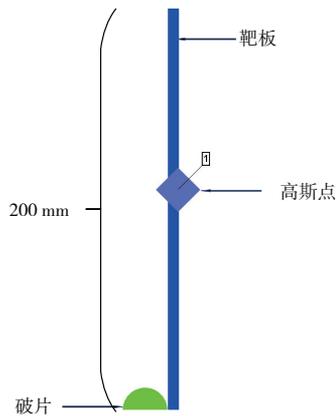


图 1 仿真模型示意图

### 1.2 材料模型

材料模型是进行破片高速撞击实验仿真的基础,材料模型包含物态方程、强度方程和失效模型,弹靶均采用 Shock 状态方程,Johnson-Cook 强度模型,最大拉应力准则失效模型。

Johnson-Cook 强度模型等效应力如式(1)所示。

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n) (1 + c \ln \varepsilon^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $c$ 、 $n$  为材料常数; $m$  为温度软化系数; $\varepsilon^*$  为标准化等效塑性应变率。

参考相关文献,破片材料钨及铝合金 7039 的 Johnson-Cook 模型参数如表 1 所示。

表 1 靶板材料参数

材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E / \text{GPa}$	$\nu$	$A / \text{MPa}$	$B / \text{MPa}$
铝 7039	2.77	79	0.330	337	343
钨	1.76	350	0.284	350	275

Shock 状态方程材料冲击速度-粒子速度关系如式(2)所示。

$$U_s = C_0 + Su_p \quad (2)$$

式中: $U_s$  为冲击速度; $u_p$  为粒子速度; $S$  为  $U_s$  和  $u_p$  关系的斜率; $C_0$  为体声波速。

参考相关文献,两种材料状态方程参数如表 2 所示。

表 2 Shock 状态方程材料参数

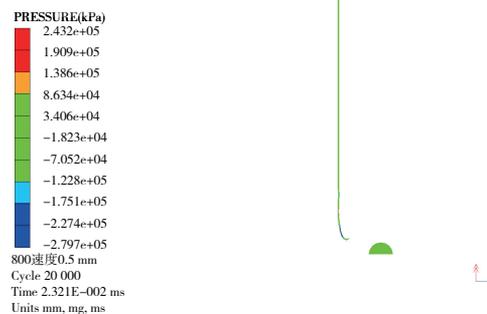
材料	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_0 / (\text{m/s})$	$S$
铝 7039	2.77	5 328	2.00
钨	1.76	4 029	1.54

破片侵彻靶板的过程中会形成压缩波,当压缩波传播到靶体自由面时发生发射变为拉伸波,当破片拉应力超过材料断裂强度后,破片会发生破碎现象。因此本文采用拉应力准则作为材料失效的依据。

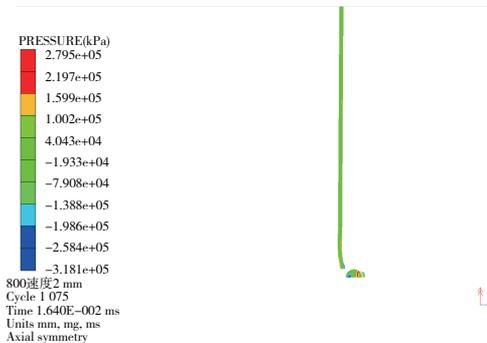
## 2 仿真结果及分析

### 2.1 仿真结果

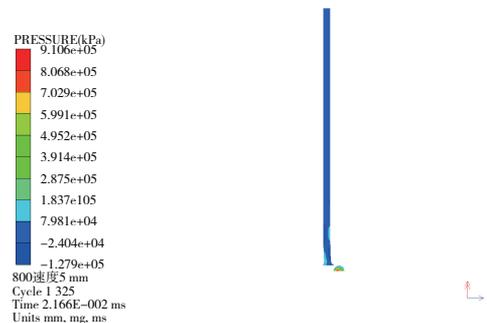
图 2 为破片速度 800 m/s 下、侵彻厚度为 0.5 mm、2 mm、5 mm、7 mm、9 mm、10 mm 靶板的仿真。明显看出破片在 800 m/s 速度下,靶板 0.5 mm~10 mm 厚度范围内发生贯穿现象。在 2 mm 以下厚度的靶板由于受到拉伸波的作用,导致靶背面出现一定程度上的鼓包,随着靶板厚度的增加靶板产生的压力变大。即在相同速度下随靶板厚度变化应力波的产生和传播会有一定的影响。



(a) 0.5 mm 厚度靶板



(b) 2 mm 厚度靶板



(c) 5 mm 厚度靶板

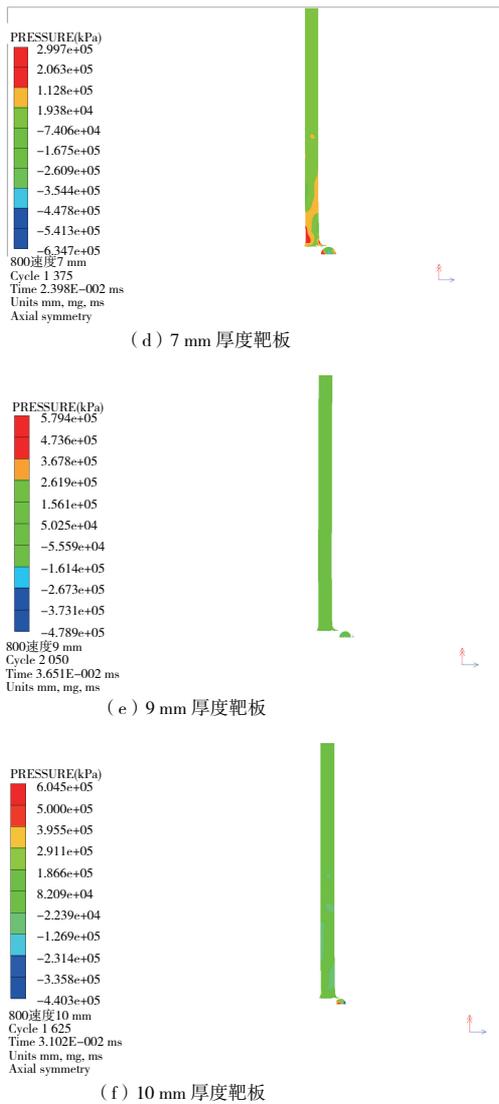


图2 不同厚度靶板侵彻压力状态图

将仿真破片侵彻靶板过程中模拟计算的声发射信号结果进行数据分析,破片速度 850 m/s 下侵彻 0.5 mm 靶板声发射信号结果如图 3 所示,属于突发型声发射信号,其时域特征参数包括振铃计数、幅度、持续时间、有效值电压 RMS(方均根值)等。声发射信号幅度主要优点有检测方便,无需建立声发射信号模型,反应灵敏,可实现对小幅值信号的精确检测。

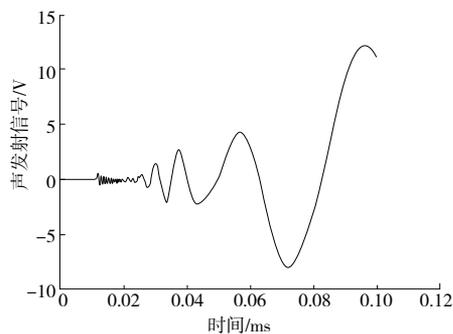
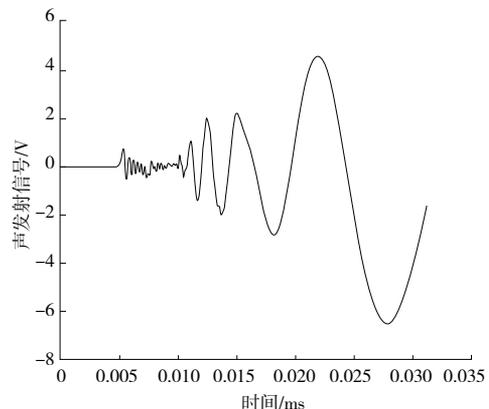


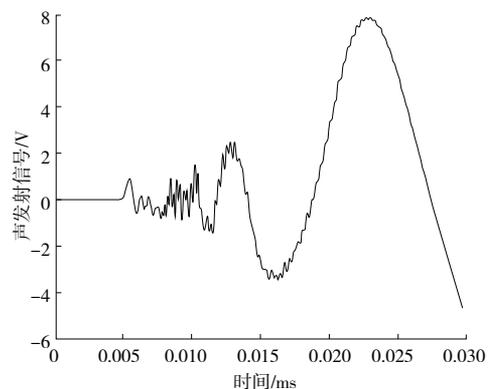
图3 速度 850 m/s 下 0.5 mm 靶板声发射信号波形

## 2.2 不同厚度靶板声发射信号分析

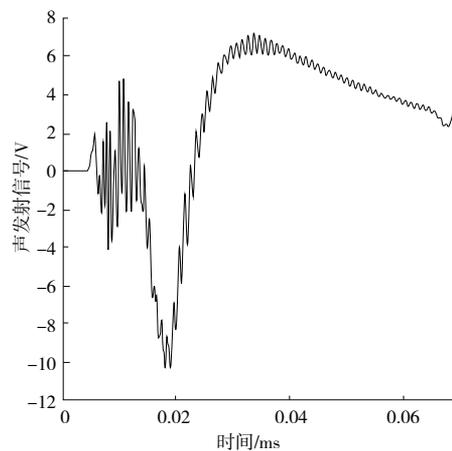
数值模拟相同速度下的破片撞击不同厚度靶板的声发射信号,靶板厚度包含 0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm、5 mm、7 mm、8 mm、9 mm、10 mm。图 4 为破片在 1 300 m/s 速度下距离靶板撞击点 135 mm 处高斯点撞击不同厚度靶板获得的声发射信号波形。由图可见,随着靶板厚度的增大,撞击声发射信号的幅度增加;同时可以看出,靶板厚度在 3 mm 以下时,随着速度的增加,信号的高频成分增多。



(a) 厚度0.5 mm



(b) 厚度1 mm



(c) 厚度3 mm

图4 速度 1 300 m/s 下撞击不同厚度靶板声发射信号波形

进一步研究声发射信号特征与靶板厚度的关系,进行不同厚度靶板撞击实验的数值模拟,对在 1 300 m/s 速度

下 0.5 mm~10 mm 厚靶板产生的声发射信号特征值幅度、RMS(方均根值)进行数据分析,其结果如表 3 所示。

表 3 速度 1300 m/s 下靶板声发射信号特征参数变化

厚度/mm	幅度/V	RMS/V	损伤模式
0.5	6.52	2 962.80	穿孔
1.0	7.89	3 526.45	穿孔
3.0	10.35	4 842.82	穿孔
7.0	10.58	4 240.29	穿孔
9.0	11.97	3 774.88	穿孔

当靶板厚度在 0.5 mm~3.0 mm 范围内,撞击声发射信号的幅度和 RMS 随靶板厚度的增大而增大;当厚度超过 7 mm 时,由于高频信号大量产生的原因,声发射信号 RMS 值不再增大而是随速度的增大而减少直至处在一个稳定状态,而幅度依旧随厚度的增大而增大;破片初速较大时,靶板形成穿孔损伤,在这种条件下,随着靶板厚度的增大,破片贯穿靶板后的剩余速度越小,作用于靶板应力波能量变大,相应的信号幅值增大。

### 2.3 不同速度下靶板声发射信号分析

针对不同速度下的破片对不同厚度靶板的侵入分析,对获得的声发射信号进行参数提取分析。破片速度有 800 m/s、850 m/s、1 300 m/s、1 450 m/s、1 500 m/s、1 600 m/s,由于上节分析声发射 RMS 值准确度不高,所以声发射特征参数采用幅度。幅度随靶板厚度的变化如图 5 所示。

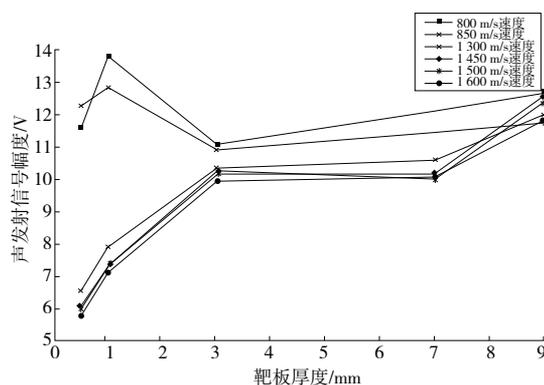


图 5 靶板厚度对声发射信号幅度的影响

观察图 5 可知破片速度在 1 300 m/s 以上时幅度随靶板厚度的增大而增大;破片速度在 850 m/s 速度以下时,在靶板厚度 3 mm 以下时声发射信号幅度随靶板厚度的变化无明显规律,靶板厚度大于 3 mm 时声发射信号幅度随靶板厚度的增大而增大;当靶板厚度小于 3 mm 时,靶板背面拉伸波产生的鼓包引起应变能变化,即不同材料极限拉应力产生鼓包现象会因破片速度的不同而不同,破片速度发生变化时声发射信号幅度发生较大的变化。根据不

同厚度铝合金靶板对靶板声发射信号幅度的敏感程度,选择合适厚度靶板材料作为试验靶板。由数据分析可知,当靶板厚度小于 2 mm 或者处于 6 mm~7 mm 时对不同速度下的破片声发射信号特征值更敏感。

## 3 结语

开展直径 8 mm 破片侵入不同厚度铝合金靶板的数值仿真研究,结合 Lagrange 算法计算获取靶板声发射信号,并对破片撞击靶板声发射信号特征值幅度及 RMS 值与靶板厚度关系的分析。研究获得了以下几个结论。

1) 利用 Autodyn 软件模拟试验破片侵入靶板过程,在靶板厚度 3 mm 以上时,8 mm 直径破片在同一速度撞击下产生的声发射波形幅度值随靶板厚度的增大而增大。

2) 破片初速较慢时靶板声发射信号频率低频分量为主要频段,随破片初速度的增大声发射信号频率往高频移动。

3) 靶板厚度区间在 0.5 mm~2.0 mm 时声发射信号特征参数幅度会随破片速度的变化发生明显变化,对量化分析靶板厚度与声发射信号特征参数关系具有重要参考。

#### 参考文献:

- [1] 侯博,张军,李鸿雁. 反舰导弹战斗部威力评估指标体系[J]. 飞航导弹,2014(3):85-89.
- [2] BARILE C, CASAVOLA C, PAPPALETTERA G, et al. Damage characterization in composite materials using acoustic emission signal-based and parameter-based data[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 178:107469.
- [3] BECK P, BRADSHAW T P, LARK R J, et al. A quantitative study of the relationship between concrete crack parameters and acoustic emission energy released during failure [J]. Key Engineering Materials, 2003, 245/246:461-466.
- [4] SUNG D U, KIM C G, HONG C S. Monitoring of impact damages in composite laminates using wavelet transform [J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33(1):35-43.
- [5] 庞宝君,张凯,林敏,等. 碎片云超高速撞击声发射信号特征分析[J]. 高压物理学报,2014,28(6):664-670.
- [6] 葛涛,刘保荣,王明洋. 弹体侵入与贯穿有限厚度混凝土靶体的力学特性[J]. 爆炸与冲击,2010,30(2):159-163.
- [7] HU K, YANG G A, ZHANG Z H, et al. Energy identification of engine blade produced by impact based on acoustic emission[C]// 2018 Ninth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP). Wanzhou, China: IEEE, 2018:111-116.
- [8] HESSER D F, MOSTAFAVI S, KOCUR G K, et al. Identification of acoustic emission sources for structural health monitoring applications based on convolutional neural networks and deep transfer learning [J]. Neurocomputing, 2021, 453: 1-12.

收稿日期:2021-10-29