

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210888

## 陶瓷品敲击检测方法的有限元仿真分析研究\*

刘利平<sup>1,2</sup> 孙文悦<sup>1</sup>

(1. 华北理工大学人工智能学院 唐山 063210; 2. 上海电子信息职业技术学院机械与能源工程学院 上海 201411)

**摘要:** 利用 COMSOL 软件构建了敲击法陶瓷品检测的力学模型,用于预测冲击动态量中的最大冲击力。将陶瓷结构简化为立方体陶瓷试验片,对其受力信号进行时域分析,研究了合格陶瓷品与缺陷陶瓷品所受的敲击法冲击力信号波形的差异,以及缺陷尺寸大小对敲击冲击力的响应差异。结果表明,合格陶瓷品得到的冲击力信号峰值高于缺陷陶瓷品;缺陷的宽度和长度影响冲击力信号的幅值,缺陷宽度越宽或缺陷长度越长,冲击力信号峰值越低;缺陷深度较小的情况下对冲击力信号峰值的影响不明显。该研究结果揭示了合格陶瓷品和缺陷陶瓷品对敲击冲击力响应的特性差异,能为自动化生产线的在线检测过程中缺陷陶瓷品的准确识别提供有效的理论支撑。

**关键词:** 有限元仿真;敲击法;陶瓷;缺陷;力信号

**中图分类号:** TQ174 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.1050

## Finite element simulation study on coin-tap sound of ceramics

Liu Liping<sup>1,2</sup> Sun Wen Yue<sup>1</sup>(1. College of Artificial Intelligence, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;  
2. College of Mechanical and Energy Engineering, Shanghai Technical Institute of Electronics Information, Shanghai 201411, China)

**Abstract:** Using COMSOL, the mechanical model of ceramic products detection by coin-tap sound is constructed to predict the maximum impact force in the impact dynamic quantity. The ceramic structure is simplified as a cube ceramic test piece, and its stress signal is analyzed in time domain. The difference of the impact signal waveform of the coin-tap sound between qualified ceramics and defective ceramics, as well as the response difference of the size of the defect to the percussion impact force, are studied. The results show that the peak value of impact force signal of qualified ceramics is higher than that of defective ceramics. The width and length of the defect affect the amplitude of the impact force signal. The wider the defect width or the longer the defect length, the lower the peak value of the impact force signal. When the defect depth is small, the influence on the peak value of impact force signal is not obvious. The research results reveal the difference in the response characteristics of qualified ceramics and defective ceramics to impact force, which can provide an effective theoretical support for the accurate identification of defective ceramics in the online detection process of automatic production line.

**Keywords:** finite element a simulation; coin-tap; ceramics; defects; force signal

## 0 引言

陶瓷品在日常生活中很常见,融实用性、文化艺术性于一体。但是在生产加工过程中,很容易受混合、烧结等因素的影响,造成陶瓷制品内部或外部的缺陷,如果不能及时有效地检测出陶瓷品中的缺陷,不仅会影响其美观而且严重影响后续产品的使用,所以对陶瓷品的质量检测需求成为热点<sup>[1]</sup>。目前,国内外陶瓷品缺陷检测方法主要有计算机视觉检测、超声检测、射线检测以及敲击检测等<sup>[2]</sup>。

计算机视觉检测具有效率高、成本低等优点,是未来发展的主要方向<sup>[3]</sup>。王俊祥等<sup>[4]</sup>设计了一套计算机视觉陶瓷缺陷检测系统,通过对陶瓷外边界提取、圆心计算及其稳定性分析,快速地提取陶瓷外边界并判断相应的圆度。郭萌等<sup>[5]</sup>将 Kirsch 算子与 Canny 算子相结合,实现了缺陷陶瓷碗的边缘检测。该方法可以抑制噪声干扰,并且提高了边缘定位精度和检测精度。虽然基于计算机视觉的陶瓷缺陷检测方法易实现,但是仅适用于表面结构相对简单的陶瓷产品,而且对复杂陶瓷产品的内部缺陷检测效果并不理想。

收稿日期:2022-07-29

\* 基金项目:河北省省级科技计划项目(20327218D)资助

超声检测具有灵敏度高、成本低等优势<sup>[6]</sup>,在陶瓷材料的缺陷检测中使用十分广泛。Kesharaju等<sup>[7]</sup>描述了一种基于自动高频超声检测的分类系统,用于检测和定位装甲陶瓷组件内的任何缺陷和微观结构变化。温银堂等<sup>[8]</sup>在对陶瓷基复合材料的脱粘缺陷检测中,提出利用小波包时频域分析及能量谱分析的方法获取超声回波信号的频谱和能量谱特征,并用自适应小波包阈值算法进行降噪处理,提高了检测精度。基于超声波的陶瓷无损检测在工业应用中是一种低成本的选择,但对于精度要求高的陶瓷产品仍然存在检测精度差的缺点。除了上述无损检测方法外,一些学者还提出了其他检测方法。Thoranton等<sup>[9]</sup>通过使用微X射线计算机断层扫描方法评估了陶瓷基体的失效。赵海涛等<sup>[10]</sup>进行声发射局部化实验研究,结果表明该方法可以直接反映陶瓷材料的微裂纹、扩展和突破过程。Sun等<sup>[11]</sup>提出了一种基于中红外超短脉冲激光的陶瓷材料无损检测新方法。Anjum等<sup>[12]</sup>提议使用射频天线对陶瓷绝缘子中的缺陷进行检测和分类。但是这些检测法存在操作困难、成本高、对检测环境要求高和检测效果差等不足,不适合实际生产厂检测使用。

相比以上这些检测方法,敲击法具有操作简单、适用性高等优点<sup>[13-15]</sup>,目前为大多数陶瓷生产厂家使用来实现陶瓷的内、外部质量检测。然而现阶段针对敲击法检测陶瓷缺陷的研究主要集中在信号处理上,在理论分析上相对匮乏。基于上述问题,本文利用COMSOL有限元分析软件对陶瓷制品进行敲击缺陷检测模拟,分析完好陶瓷制品和缺陷陶瓷制品的敲击力信号的区别,同时分析缺陷的尺寸对力信号的影响,为自动化生产线的在线检测过程中缺陷陶瓷品的准确识别提供有效的理论支撑。

## 1 敲击法检测原理

敲击检测结构物缺陷时,通过敲击锤敲击到被测物产生小持续时间的振动,在振动形式下产生应力波通过结构传播,并由内部缺陷和外部表面反射回来<sup>[16-17]</sup>。敲击法可以确定结构中裂缝、分层和空洞等缺陷的存在和位置。

敲击碰撞过程可以假设为被测构件的瞬态激励<sup>[18]</sup>,由于材料阻尼的存在,振动过程的特点是幅值衰减很快,为了有利于对敲击模型的建立,可忽略材料阻尼和一些比较复杂的、但对系统影响相对较小的因素。因此,将敲击锤简化为一个质量为 $m$ 的质量块,冲击头视为一个无质量的弹簧,其弹性系数为 $k$ ,因此敲击简化力学模型如图1所示。

当敲击陶瓷品时,假设敲击锤的敲击速度 $v = \dot{x}$ ,敲击锤的质量为 $m$ ,敲击锤的冲击头刚度系数为 $k$ ,敲击锤的冲击头形变位移为 $x$ ,则该系统的运动微分方程可以表示为<sup>[19]</sup>:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

系统运动微分方程的通解为:

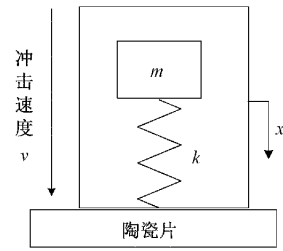


图1 敲击力学简化模型图

$$x = C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) \quad (2)$$

式中: $C_1$ 和 $C_2$ 为常数。

在初始条件为 $t = 0, x = 0, \dot{x} = \dot{x}_0$ 时,该系统的微分方程的自由解为:

$$x = \begin{cases} \frac{\dot{x}_0}{\sqrt{\frac{k}{m}}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right), & 0 \leq t \leq \pi\sqrt{\frac{m}{k}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

于是,敲击锤敲击陶瓷品产生的激励力脉冲信号为:

$$f(t) = kx = \sqrt{km}\dot{x}_0 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right), 0 \leq t \leq \pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4)$$

则有:

$$f(t) = A \sin\left(\frac{\pi}{\tau}t\right) \quad (0 \leq t \leq \tau) \quad (5)$$

其中, $A = \sqrt{km}\dot{x}_0$ ;  $\tau = \pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 。A为激励力脉冲的峰值; $\tau$ 为激励力脉冲的宽度。

根据上面的敲击力学简化模型可以得到,当被检测陶瓷品中存在缺陷,它相当于在完好的结构中串联了一个因缺陷所引起的弹簧<sup>[20]</sup>,如图2所示。图中 $k_1$ 是缺陷对应的弹性系数; $k$ 是敲击时锤头与结构的接触系数。当构件中存在裂纹、脱层等损伤时,等效的弹性系数, $k' = \frac{k_1 k}{k_1 + k} \leq k$ ,由式(5)可知,由于弹性系数 $k'$ 变小,激励力脉冲峰值也将变小。下面将利用此原理用有限元动力学仿真模拟敲击不同大小缺陷的应力峰值。

## 2 数值模拟

数值模拟方法可以应用于敲击无损检测技术的研究<sup>[21]</sup>,是理论和实验重要的验证手段,其中有限元模拟方法理论基础比较成熟,具有通用性和灵活性。国内外学者近十年来应用有限元数值模拟方法对敲击法检测进行了一系列的研究,但针对陶瓷材料的缺陷识别方面的研究还比较少。为了深入地认识敲击法检测陶瓷材料缺陷的力信号特征,本文采用有限元数值模拟方法模拟实验的敲击检测过程,模拟结果可以为敲击法检测陶瓷材料缺陷理论和

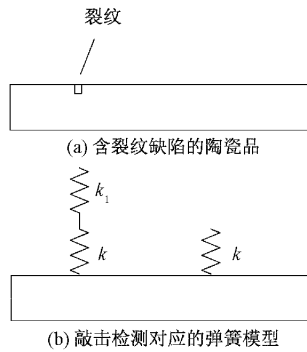


图 2 弹簧模型

实验研究提供参考。

2.1 敲击模型的制作

使用 COMSOL 有限元分析软件进行仿真建模, 本文测试的实验装置如图 3 所示。该模型分为两部分: 摆锤和陶瓷品。为了简化运算的复杂度, 将装置的支架部分进行了省略处理, 陶瓷品简化为立方体的陶瓷试验片。首先将敲击锤升起至与竖直方向成 30° 的位置, 敲击锤在重力的作用下绕着旋转轴下落, 直至敲击到检测物陶瓷试验片后反弹离开, 以此实现对试验片的固定位置施加固定力激励。为保证锤击面与敲击试验品完全接触, 试验片的位置设于摆锤下降到最低点的位置。设计检测模型共 4 种, 分别为完好、不同缺陷长度、宽度、深度模型。几种缺陷为同一种仿真模型, 通过改变缺陷的大小进行仿真, 缺陷仿真模型如图 4 所示, 仿真具体参数如表 1 所示。

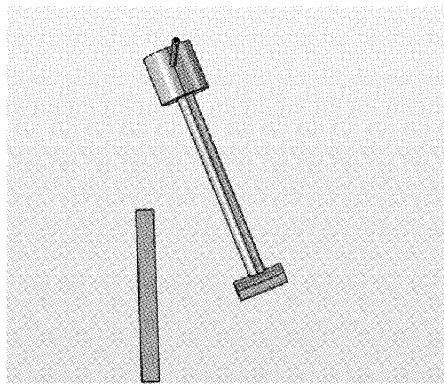


图 3 敲击装置仿真模型

表 1 仿真参数

参数	尺寸/ mm	材料	杨氏模量/ GPa	泊松比	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
试验片	100×100×10	陶瓷	240	0.3	5 500
锤头	36×30π	钢	200	0.3	7 850

2.2 网格划分及求解

网格的划分直接影响仿真结果的准确性。摆锤和陶瓷试验品均采用自由四面体的网格划分, 为使模拟结果更接近实际, 需要对碰撞区域的网格进行加密, 网格剖分图如

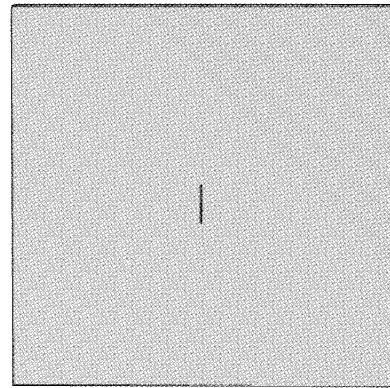


图 4 缺陷局部仿真模型

图 5 所示。试验片的底部进行固定约束防止发生位移, 设置瞬态求解器进行物理场求解。

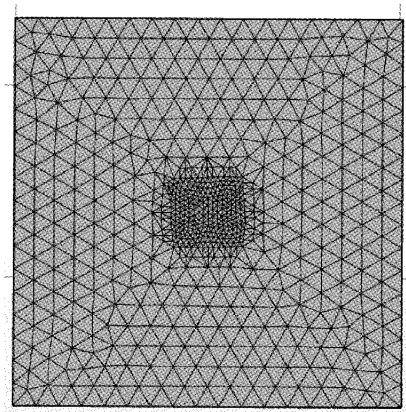


图 5 网格剖分图

3 结果分析

3.1 完好陶瓷品与缺陷陶瓷品的应力传播差异

基于上述模型及理论的数值计算, 得到完好和缺陷陶瓷品的振动应力云图如图 6 所示。图 6(a) 和 (b) 分别描述了敲击完好陶瓷品时的力信号产生和传播过程, 可以看出, 完整的陶瓷品在受到力冲击时, 陶瓷品表面的应力波传播是连续的; 对比图 6(c) 和 (d) 分别为敲击缺陷陶瓷品时的力信号产生和传播过程图, 可以看出表面应力波的传播是不连续的。那是由于裂纹的存在, 陶瓷品的完整性受到破坏, 导致应力波的不连续。

3.2 完好陶瓷品与缺陷陶瓷品的波形差异

以最大接触力 y 分量为参照, 对比分析完好和缺陷陶瓷品的波形差异, 如图 7 所示。由图 7(a) 完好陶瓷品波形可以观察到, 产生的信号主要由两部分组成: 第 1 部分为敲击锤与陶瓷品接触瞬时产生的冲击力信号, 产生时间段 0.158 46~0.158 47 s, 峰值为 2 747.8 N。第 2 部分反弹信号, 产生时间段为 0.158 87~0.158 91 s, 该部分由于陶瓷品固定在某个位置, 在受到力作用时发生机械振动而产生

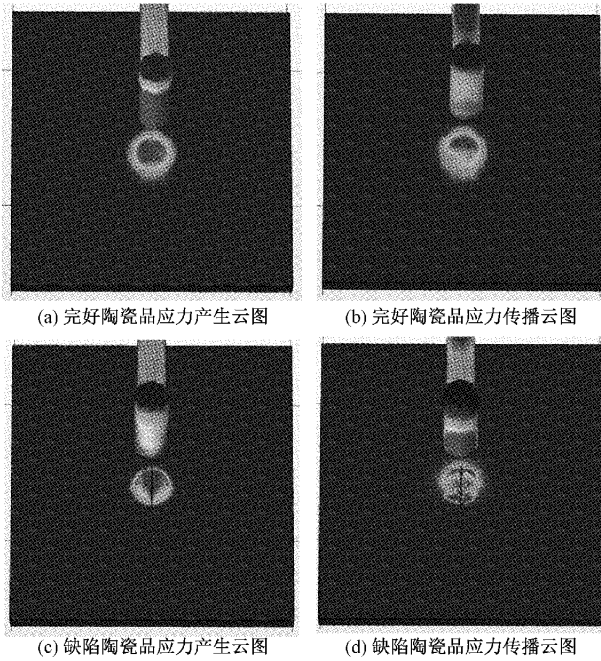


图6 敲击应力云图

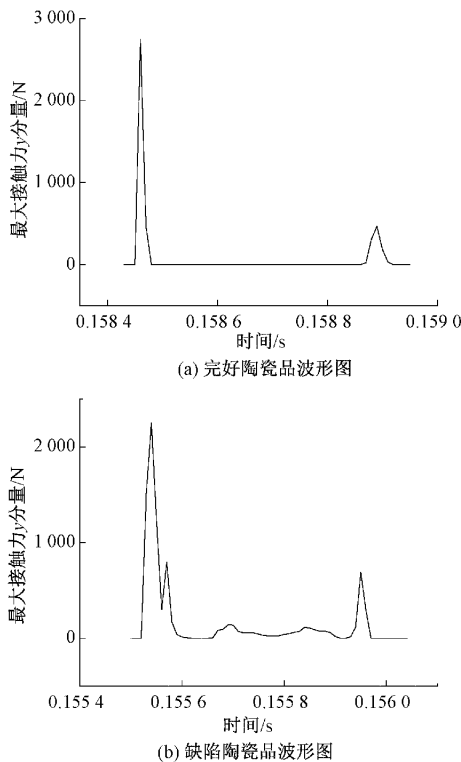


图7 波形对比图

的信号,该信号的峰值相对于瞬态冲击过程的力脉冲峰值较小,所以后续对信号的分析主要以由瞬态冲击产生的信号为研究对象。设置缺陷长 10 mm、宽 0.1 mm、深度 0.4 mm 的裂纹缺陷进行敲击仿真得到力信号波形如图 7(b)所示,该波形与完好陶瓷品的力信号组成相同,也

是由瞬时冲击产生的信号和反弹信号两部分组成。与之不同的是,由于缺陷的存在,会改变力信号传播路径,从而导致各时间段都能感受到力信号。因此,通过以上分析可以得到,敲击完好陶瓷品得到的敲击力信号峰值比缺陷陶瓷品的更高,曲线更平滑。

### 3.3 不同尺寸缺陷的波形对比

为了进一步研究缺陷大小与波形幅值的关系,分析当缺陷长度、深度一定时,缺陷宽度对峰值的影响,缺陷宽度、深度一定时,缺陷长度对峰值的影响以及缺陷的长度、宽度一定时,缺陷深度对峰值的影响。

#### 1) 缺陷宽度对波形的影响

设置缺陷长 10、深 0.4 mm,取缺陷深度 0.09、0.11、0.13、0.15 mm 作为研究对象,仿真得到力信号波形如图 8(a)~(c)所示,可以看出瞬时冲击产生的信号峰值随缺陷的宽度增大而减少,信号的持续时间变化不明显。绘

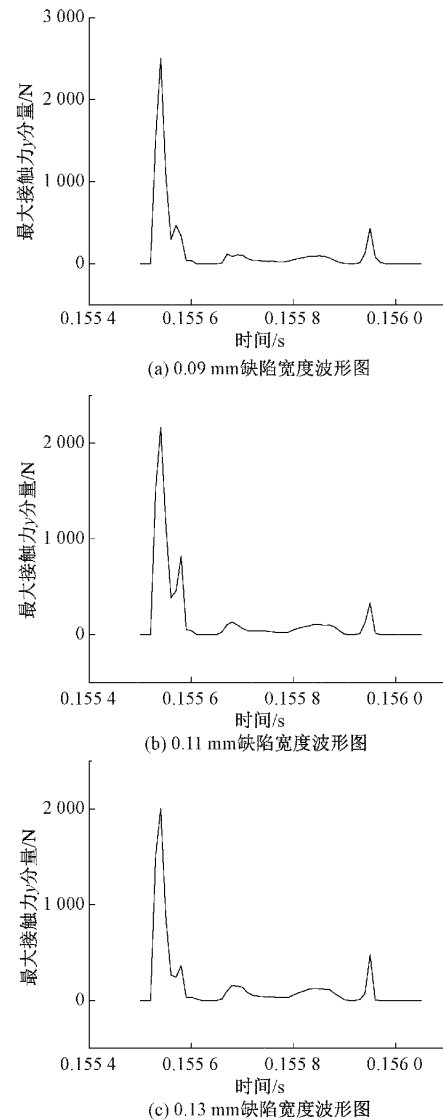


图8 改变缺陷宽度波形图

制信号峰值与缺陷宽度变化关系图进行定量分析,如图 9 所示,可以明显地看出信号峰值随缺陷的宽度增大而减少。具体峰值数据如表 2 所示。增加试验研究以消除结果的偶然性时发现,随着缺陷宽度的增大,信号的峰值总体呈下降趋势,但是对一定小范围内的缺陷,信号峰值会存在一定的波动。比如,可能会出现宽度略宽峰值也略大的情况,这是由于计算精度还不够足以识别这些细小的变化。

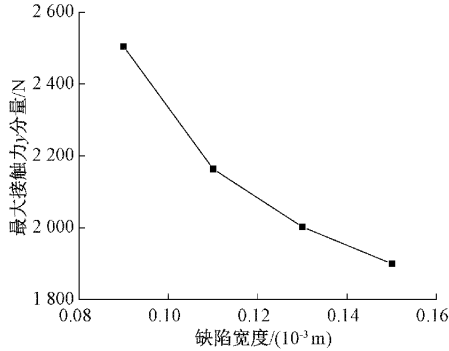


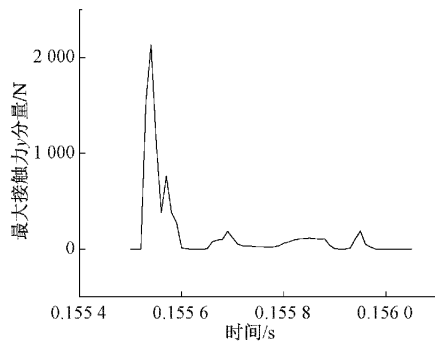
图 9 改变缺陷宽度波形峰值变化图

表 2 不同缺陷宽度峰值

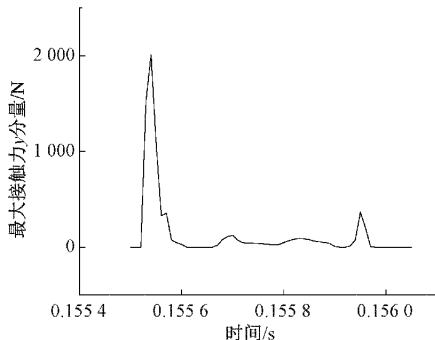
缺陷宽度/mm	0.09	0.11	0.13	0.15
峰值/N	2 504	2 163	2 002	1 899

2) 缺陷长度对波形的影响

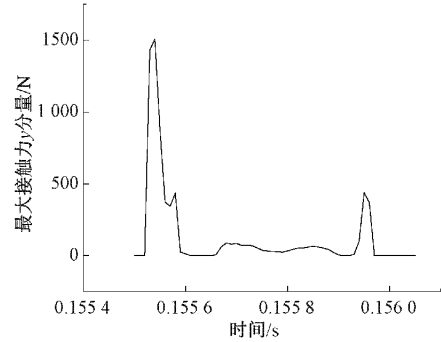
设置缺陷宽 0.1、深 0.4 mm,取缺陷长度 8、9、10、11、12、13 mm 作为研究对象,仿真得到力信号波形如图 10(a)~(c) 所示,可以看出瞬时冲击产生的信号峰值随缺陷的长度增



(a) 9 mm 缺陷长度波形图



(b) 11 mm 缺陷长度波形图



(c) 13 mm 缺陷长度波形图

图 10 改变缺陷长度波形图

大而减少,信号的持续时间变化不明显。绘制信号峰值与缺陷长度变化关系图进行定量分析,如图 11 所示,可以看出信号峰值随缺陷的长度增大总体呈下降趋势,增加实验发现随着缺陷长度增大这种下降趋势会越来越缓慢,最后稳定在 1 500 N 左右。具体峰值数据如表 3 所示。

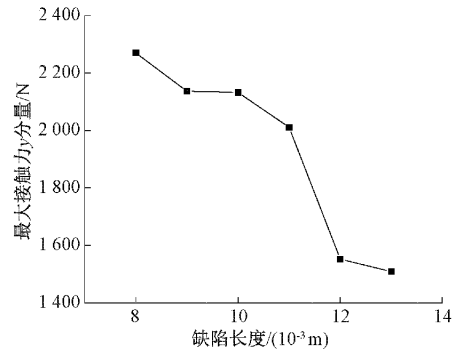


图 11 改变缺陷深度峰值变化图

表 3 不同缺陷长度峰值

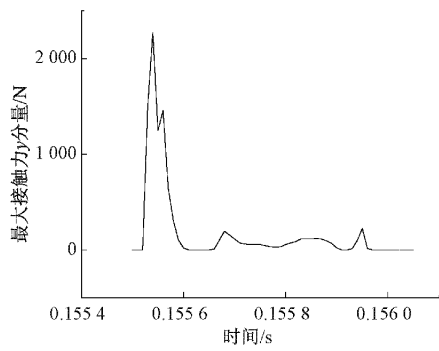
缺陷长度/mm	8	9	10	11	12
峰值/N	2 269	2 136	2 132	2 010	1 552

3) 缺陷深度对波形的影响

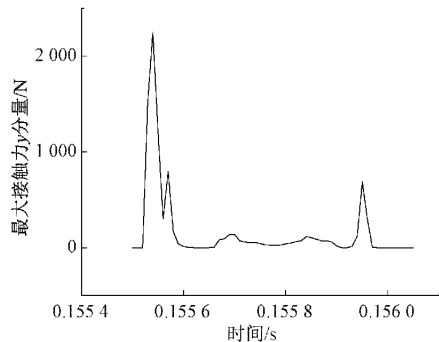
设置缺陷宽 0.1、长 10 mm,取缺陷深度 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mm 作为研究对象,仿真得到力信号波形图如图 12(a)~(c) 所示,可以看出瞬时冲击产生的信号峰值并没有随着缺陷深度的增加而明显的增加或减少,信号的持续时间变化也不明显。绘制图信号峰值与缺陷深度变化关系图进行定量分析,如图 13 所示,可以看出信号的峰值在 2 000~2 400 N 之间。因此可以得知,缺陷深度对敲击信号的峰值影响较小。具体峰值数据如表 4 所示。

3.4 实验结果

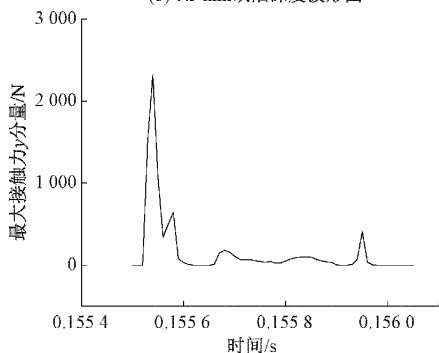
为验证仿真结果以信号峰值作为裂纹识别的可靠性,进行一次实验验证。通过实验室选取完好和缺陷陶瓷试验片进行敲击检测,小锤自由下落敲击试验片,用麦克风录制产生的声音信号,分析声音信号特征进行间接验证。通过 MATLAB 处理得到声音信号如图 14、15 所示。



(a) 0.2 mm缺陷深度波形图



(b) 0.3 mm缺陷深度波形图



(c) 0.4 mm缺陷深度波形图

图12 改变缺陷深度波形图

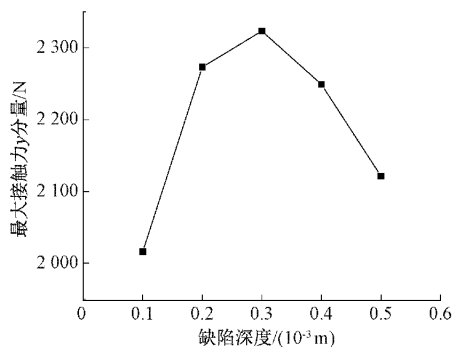


图13 改变缺陷深度峰值对比

表4 不同缺陷深度峰值

缺陷深度/mm	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
峰值/N	2 016	2 273	2 323	2 249	2 121

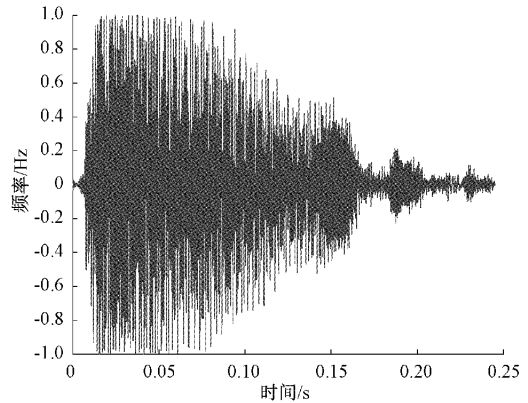


图14 完好陶瓷片声信号图

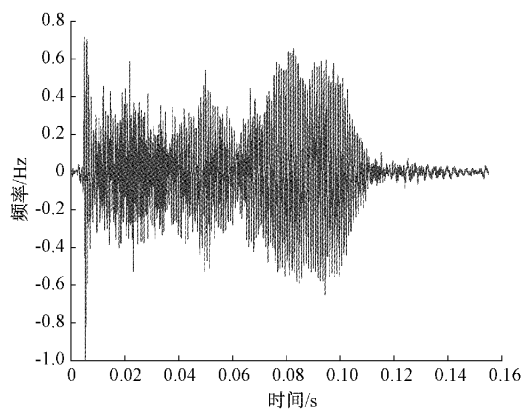


图15 缺陷陶瓷片声信号图

从上图可以看出,完好陶瓷试验片声信号的峰值要高于缺陷试验片声信号峰值,符合用 COMSOL 仿真得到的结果,同时也证明了用敲击法检测陶瓷品缺陷的可行性。

#### 4 结 论

通过以上分析和实验可知,用敲击检测陶瓷制品缺陷的方法是可行的。根据有限元仿真,用敲击法可以实现对陶瓷品的缺陷识别,并且不同大小缺陷于敲击力信号的峰值有明显的相关性。仿真结果表明:缺陷陶瓷品的冲击力持续时间大于完好陶瓷品、冲击力峰值小于完好陶瓷品,曲线平滑度劣于完好陶瓷品。缺陷的宽度和长度对影响敲击力信号的幅值,缺陷宽度越长或宽度越宽,信号的幅值越小,缺陷深度较小的情况下对信号幅值影响不大。该结果为实际的陶瓷品检测提供了敲击力信号计算机仿真研究的参考与理论分析支撑。

#### 参考文献

- [1] 邹大鹏,林奕钦,叶国良,等.无机非金属材料超声检测研究进展[J].中国测试,2022,48(7):8-15.
- [2] ZHAO Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics-ScienceDirect [J]. Ceramics International, 2021, 47(4):4389-4397.

- [3] 赵朗月, 吴一全. 基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 198-219.
- [4] 王俊祥, 彭华仓, 胡鸿豪, 等. 基于计算机视觉的陶瓷圆度快速检测系统研究[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(5): 530-535.
- [5] 郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 27-33.
- [6] 刘嘉同, 金永, 张浩亚, 等. 基于多层界面脱粘的超声检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 58-62.
- [7] KESHARAJU M, NAGARAJAH R. Feature selection for neural network based defect classification of ceramic components using high frequency ultrasound [J]. Ultrasonics, 2015, 62: 271-277.
- [8] 温银堂, 杨若然, 张玉燕. 新型陶瓷基复合材料粘接构件的脱粘超声检测信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 143-151.
- [9] THORNTON J, ARHATARI B D, SESSO M, et al. Failure evaluation of a SiC/SiC ceramic matrix composite during in-situ loading using micro X-ray computed tomography [J]. Microscopy and Microanalysis, 2019, 25(3): 1-9.
- [10] 赵海涛, 褚亮. 基于声发射的陶瓷材料损伤和增韧特性研究[J]. 中国陶瓷, 2017, 53(12): 39-45.
- [11] SUN S C, QI H, AN X Y, et al. Non-destructive testing of ceramic materials using mid-infrared ultrashort-pulse laser[J]. Applied Physics B, 2018, 124(4): 55.
- [12] ANJUM S, JAYARAM S, EL-HAG A, et al. Detection and classification of defects in ceramic insulators using RF antenna[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 183-190.
- [13] 肖强宏, 周强, 王莹, 等. 一种基于敲击声时-频分析的陶瓷结构缺陷检测方法研究[J]. 中国陶瓷, 2017, 53(9): 47-53.
- [14] 梁钊. 基于敲击信号的刹车片内部缺陷检测方法研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
- [15] 周山. 基于声学的陶瓷结构缺陷检测方法研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
- [16] 孙梁. 基于敲击法检测叶片脱层的模拟分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [17] SHEN Q, KURFESS T R, OMAR M, et al. Detection of internal cracks in rubber composite structures using an impact acoustic modality [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2014, 29(1): 29-51.
- [18] 廖俊智, 何勇. 基于 LS-DYNA 的钢筋混凝土梁落锤冲击响应分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(8): 74-78.
- [19] 戴其俊. 基于动力学信号分析的鸡蛋蛋壳裂纹检测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [20] 郭开龙. 基于力信号特征的古建筑木构件内部缺陷敲击筛查研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [21] 苏涉. 敲击法检测混凝土抗压强度的数值模拟分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

### 作者简介

刘利平, 教授, 博士, 主要研究方向为模式识别与智能系统。

E-mail: 11745430@qq.com

孙文悦(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为陶瓷材料的缺陷检测。

E-mail: ssunwenyue@163.com