

声发射在精冲模具崩刃在线检测中的应用

潘智鹏，陈鹏，曹传亮，张祥林

(华中科技大学 材料科学与工程学院，湖北 武汉 430074)

摘要：经过对精冲企业的详细调研发现，在精冲过程中模具冲头主要失效形式为断裂和崩刃，其中模具冲头崩刃难以检测，造成成品率下降并且阻碍了高速精冲生产线的全自动化。通过多次实验，探索性地提出利用声发射信号检测技术在精冲模具生产线上实施在线检测，主要介绍了声发射信号产生的基本原理和其常见的分析方法以及模具冲头崩刃的发生机理，深入分析了金属板材冲压过程的声发信号。通过识别冲压过程中的 AE 信号，探究基于声发射系统在模具崩刃在线检测中的可行性。

关键词：模具崩刃；声发射检测；信号分析

中图分类号： TG 115.28

文献标志码： A

引言

精冲生产线上的模具冲头发生崩刃是其常见的损坏形式之一^[1]，其在线检测一直以来都是一个阻碍精冲生产线实现进一步自动化的难题，在此提出利用声发射信号分析原理来完成对模具崩刃的在线检测。冲头崩刃的主要原因是模具在冲压过程中冲头受力情况较差，作用在其边缘的载荷大而集中，冲头工作时其受压应力，卸件时受拉应力，在交变应力的反复作用下，冲头很容易发生崩刃^[2]；在冲压的过程中，金属板材内部发生结构断裂和组织破坏，在这个过程中晶格需要释放应变能，一部分应变能将以弹性波的形式释放出去，从而产生了声发射现象。而且考虑到模具冲压是一个不断重复的过程，如果模具不发生崩刃，那么理论上在这整个过程中的金属板材的声发射参数会呈现出相同的规律。如果能获取主要参数，并弄清楚各参数的变化规律，便可以以此为依据捕捉冲头崩刃的异常声发信号，进而完成对模具冲头崩刃的检测，为此提出了基于声发射的模具崩刃在线检测方法。

本文利用声发射采集装置对实际精冲模具生产过程进行检测实验，并对实验结果进行详细分析，在崩刃检测方面做了些尝试和探索，为日后专家检测系统的研发提供参考。

1 金属板材冲压断裂过程中的 AE 产生理论

1.1 金属板材 AE 信号的板波理论

收稿日期：2012年3月16日 **修改日期：**2012年3月16日

基金项目：高档数控机床与基础制造装备科技重大专项子课题(2009ZX04014-073-04)；国家自然科学基金项目(50875094)。

作者简介：潘智鹏(1990—)，男，(汉)湖北武汉，华中科技大学材料科学与工程学院，学生，本科，(电话：15271865322)；(Email:245228630@qq.com)。

导师：张祥林，男，教授，博士生导师，(13886186966)；(Email:hust_zxl@mail.hust.edu.cn)。

以我们常用的冲压金属板材为例，其厚度方向尺寸远小于其它两个方向，相应于一定的激励条件，其中主要形成的板波^[2]。直观上讲，板波是由相对于z轴斜向运行的P波和SV波两个分量组成，如图1所示。

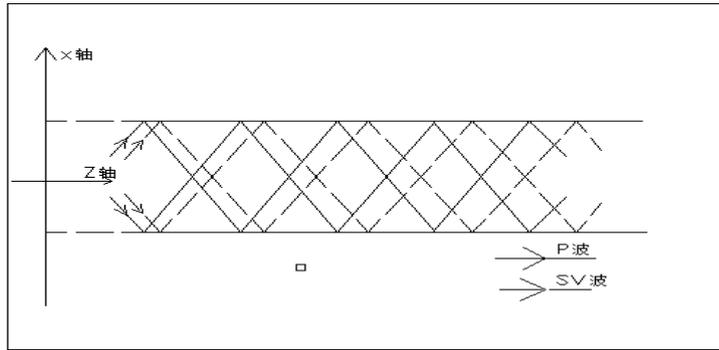


图1 板波形成原理示意图

Fig.1 The schematic diagram for the formation of the plate wave

设板波沿x方向传播，板厚方向为z轴（连个板面分别为 $z=d$ 和 $z=-d$ ），并设标量势为 Φ ，矢量势为 $\Psi = \Psi(x, z)$ (y方向的矢量)，则其满足以下方程：

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + k_L^2 = 0$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k_T^2 = 0$$

式中 k_L, k_T --- 相应于纵波和切变波的波矢量

板中任意一点的位移矢量为 $V = \text{grad}\Phi + \text{rot}\Psi$

在简谐振动的条件下求解得到对应于这两种不同的波速，它们分别为：

$$c_d = \left[\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$c_i = \left[\frac{E}{3\rho(1-\sigma^2)} \right]^{\frac{1}{4}} (wd)^{\frac{1}{2}}$$

式中 w --- 为角频率

很容易看出前者扩展波的速度是一个定值，无频散效应；后者是一种弯曲波，其传播速度与角频率的平方根成正比，有频散效应。金属板材冲压断裂这一过程中，板材自身就是强声发射源，其受模具冲头的剪切力作用，因此主要产生弯曲类型的板波。而模具本身的损伤则是多种应力波的组合，因此可以通过检测板材冲压断裂过程中产生的声发射板波来识别由于模具崩刃而产生异常信号。

1.2 精冲过程的 AE 信号特性与产生机理

在精冲模具冲压过程中，由于上凸模的快速下压，声发射信号为突发型。图2为突发型标准声发射信号简化波形参数的定义，由这一模型可得到波击(事件)计数、振铃计数、能量、幅度、持续时间和上升时

间等参数^[3]。

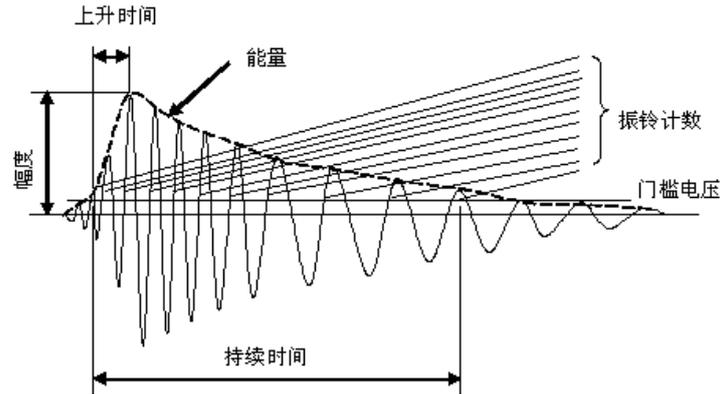


图 2 声发射信号简化波形参数定义图

Fig.2 The simplified definition figure for the parameters in acoustic emission signals

金属板材冲压过程中在上凸模急剧下压的外力的作用下，其内部形成了应力场，并产生相应的形变。外力增大时，应力和应变也随之变大，此时材料处于高能量不稳定的状态。范性变形和断裂是材料在不同阶段松弛应力的两种主要方式，其释放的一部分能量以应力波的形式进行传输，形成AE。

1.2.1 45 钢板材冲压中范性变形 AE 特性

实验结果证实晶体的范性变形是通过位错的运动来实现的^[4]。稳定的位错处于低能状态，当受到外切应力 τ 作用时，点阵发生畸变，能量升高，位错从高能位向低能位运动时，释放出多余的应变能，其中一部分成为弹性振动波。在实际检测中，由于检测仪器灵敏度的限制，不是材料内部释放的弹性波都能被仪器检测到。因此，在材料中可动位错的长度和位错移动的距离存在一个低限，低于这个下限值将不能检测到声发射。Carpenter 等人认为声发射率与晶体内可动位错密度变化有关，并提出两者之间的关系式：

$$\frac{dN}{dt} = 10^{-4} \frac{d\rho_m}{dt}$$

式中： $\frac{dN}{dt}$ 一单位时间的声发射计数

ρ_m 一可动位错密度

因此，大多数金属板材料在屈服点附近出现声发射计数率高峰，进入加工硬化阶段，声发射计数率急剧减小。

1.2.2 45 钢板材冲压断裂 AE 特性

材料在裂纹形成和扩展的动态过程中释放应变能产生AE。由于不同材料的断裂机制有很大的差异，由此产生的AE 信号特性就有很大区别。本试验所用的试验材料45钢，具有较好的韧性，往往是在平面应力的条件下，以微孔集合形式发生金属断裂，裂纹尖端范性区的形成和裂纹的稳态扩展都会产生AE，但这些AE 事件振幅都较小，精冲模冲头的模具钢中的非金属涂层和合金成分对材料的AE 特征有很大影响，界面的破坏和涂层的断裂都能产生高于100dB的大振幅的AE事件。

2 精冲模具冲压声发实验

本文利用北京声华公司提供的SAEU2S-2通道USB声发射仪器对实际运作的精冲过程进行实时检测。

冲裁的板料为45号钢，表面磨削加工，钢板尺寸为 $500\text{mm}\times 80\text{mm}\times 15\text{mm}$ 表面粗糙度为 $20\ \mu\text{m}$ 。由于实验材料为金属型板材结构，确定采用双通道即两个传感器，分布在模具上模的前后两侧，按照图3所示布置传感器。考虑到声发信号在传播过程中的可能出现的变异性，在对传感器安置前需要对传感器的安装部位进行表面打磨去除油漆、氧化皮或油垢等，在传感器接触面上涂抹适量耦合剂，按压传感器使之与被检物体表面接触，通过磁铁安装和固定。声发系统的各项参数设置由表1和表2数据给出。

表1 板卡主要参数设置

Table1 The setting for the main parameter on the board

采样频率/kHz	采样长度	参数间隔/ μs	锁闭时间/ μs	软件锁闭时间/ μs
2500	131070	600	1000	300

表2 通道主要参数设置

Table2 The setting for the main parameters in the channels

波形门限/dB	主放增益/dB	滤波器	声速/ m/s	参数门限/dB
40	40	高通	5100	40

在各项参数设置好后，需要对系统进行灵敏度校正。传感器灵敏度标定通常采用直径为0.5mm的国产HB铅笔芯折断信号，笔芯与构件表面夹角为 30° 。

表3 各传感器灵敏度标定

Table3 Calibration for the sensitivity of each sensor

模拟源	探头1灵敏度/dB	探头2灵敏度/dB	探头平均灵敏度/dB
HB $\Phi 0.5\text{mm}$ 铅笔折断	96	98	97

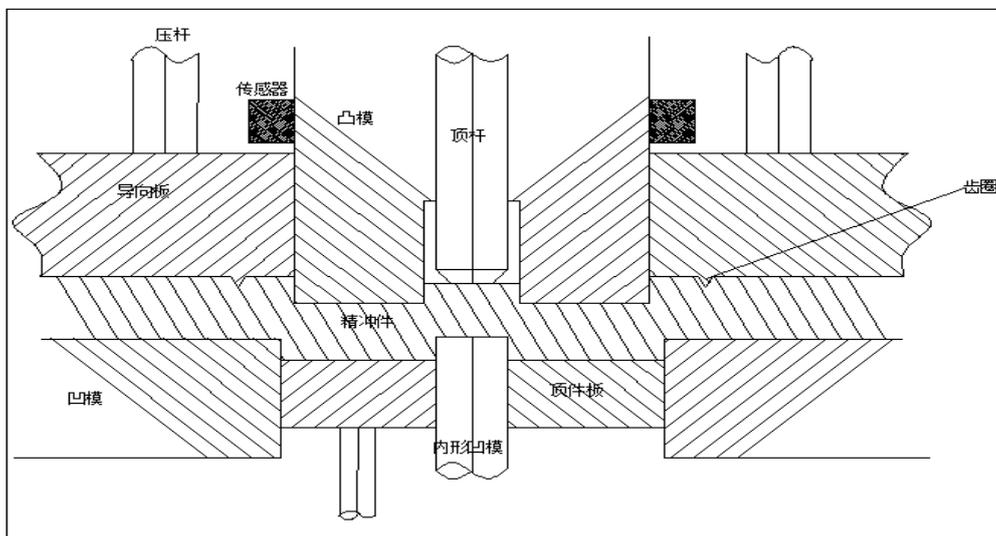


图3 实验装置原理图

Fig.3 The schematic of the experimental setup

3 实验结果及分析

精冲正常生产过程是个重复冲裁板料的过程，所测得的AE信号对应每次冲裁呈现周期性，图4所示为检测结果中截取的一个完整冲裁过程的AE信号。该信号可做为正常冲裁的AE信号，用于对比崩刃的异常信号的产生。钢材冲压断裂过程中声发射参数变化过程反映了材料的断裂过程。金属材料冲压断裂过程中的声发射源是金属材料内部位错的运动。弹性阶段前期，位错运动少，表现为几乎没有声发射信号，对应为图中的前期的平整段。随着载荷增加，位错被迅速发动，声发射撞击和计数等参数增加，但位错运动没有明显受阻，声发射能量、幅度参数值没有急剧增加，但波动AE信号波动较为明显，在图中对应起伏变化较大的阶段。在塑性变形时，位错运动量达到最大，滑移变形、孪晶变形等大位错开始现象发生，应力发生再分布，产生了高频率的声发射信号，计数、撞击、能量和幅度达到峰值。强化阶段时，随着金属板材变形的继续增加，位错滑移变得受到阻碍，导致发生位错堵塞，需要更大载荷发动堵塞的位错堆，声发射信号也相对减少。断裂阶段，随着载荷增加，大量位错堆积被拉动，位错群急剧运动，声发射信号急剧增加，材料瞬间发生断裂，释放出巨大能量，声发射信号各参数达到极大值。

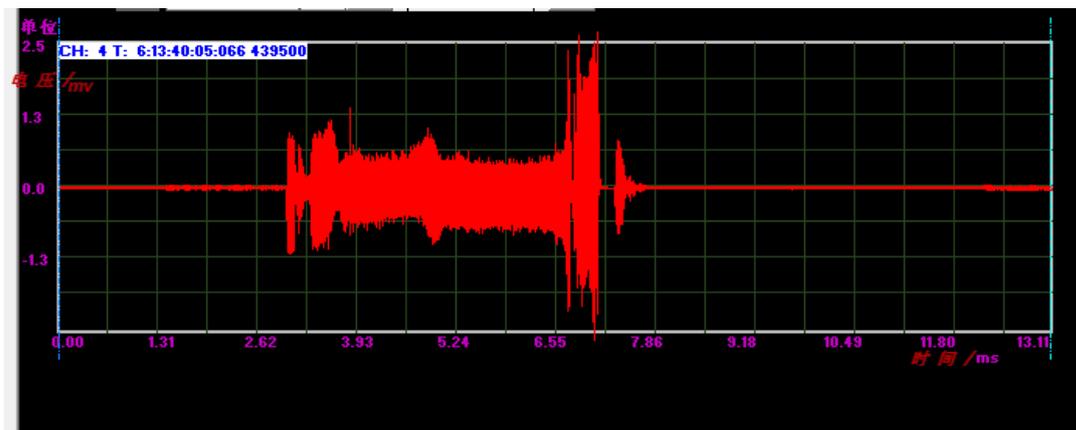


图 4 正常冲压一个周期的 AE 信号

Fig.4 A cycle AE signal in normal blanking

通过 AE 信号分析方法对图 4 的正常冲压的一个周期内的 AE 信号分析处理得到撞击数、幅度、能量和振铃计数四个参数在冲压过程中随时间变化的统计图，分别如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。

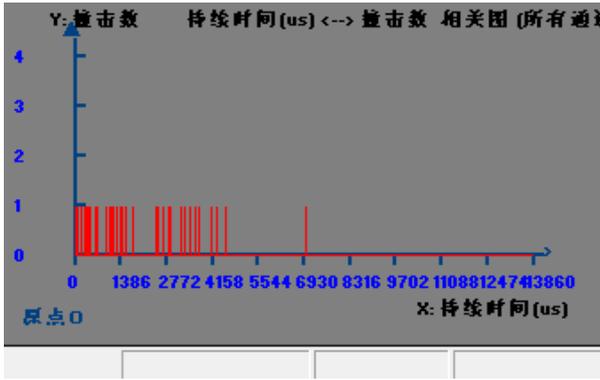


图5 撞击数-时间变化图

Fig.5 Hit numbers-time diagram

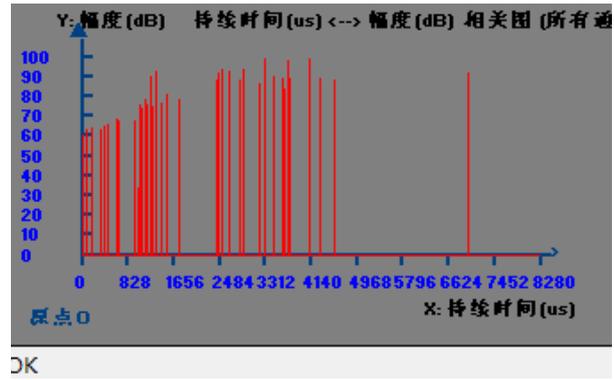


图6 幅度-时间变化图

Fig.6 Amplitude-time diagram

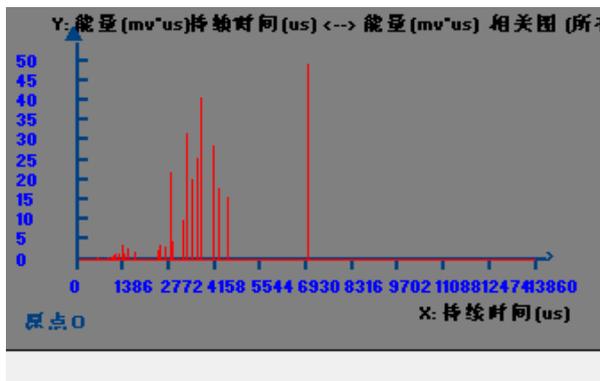


图7 能量-时间变化图

Fig.7 Energy-time diagram

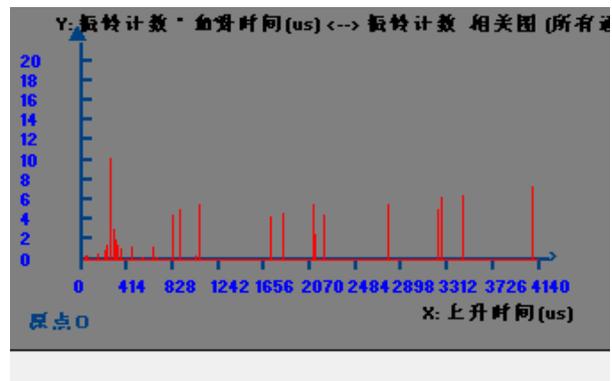


图8 振铃计数-时间变化图

Fig.8 Ringing count-time diagram

从图5中可以看出，板材在弹性阶段初始没有撞击信号，随后出现撞击信号，且撞击数量伴随时间快速增加，屈服阶段前后撞击数量的信号急剧增加，撞击数达到历程图中极大值，强化阶段时间相对较长，信号撞击数目初始较高，随着时间增加逐渐减少，到断裂前降至最低。断裂阶段撞击信号突然急剧增加，但没有屈服时撞击数多，断裂随即发生，撞击信号急剧下降。

从图6知，在弹性阶段和屈服前后阶段，大量信号幅度低于65dB，少量信号高于70dB，在强化阶段，信号基本上也是以低幅度（70dB）为主，少量的信号幅度在80~90dB之间，个别信号幅度超过90dB，断裂阶段信号幅值突然增加，断裂瞬间达到但未明显超过100dB。

图7显示，冲压过程中，在屈服阶段能量出现极值。断裂瞬间，能量快速释放，出现极大值，其它各阶段能量较小。能量分布表明冲压过程中在屈服阶段和断裂阶段是试样能量释放阶段。

在图8的振铃计数图中，弹性阶段信号逐渐增加，在屈服阶段声发射计数急剧增加，达到一个极值，强化阶段逐渐减少，计数仍保持较高值。断裂阶段前期计数值下降，后期计数信号急剧增加达到最高值，断裂瞬间达到极大值。

比较分析参数描述材料的断裂过程，发现撞击数更准确地描述了冲压过程中钢材断裂过程，而且在整个精冲过程中表现出很强的规律性，根据金属板材冲压变形的弹性、屈服、强化和断裂4个阶段来划分，

选择五个AE信号周期进行统计得到表4。

表4 撞击次数统计表

Table 4 Hit—number statistical table

试验编号	0~1500 μs	1500~3000 μs	3000~3500 μs	3500~4500 μs
撞击次数累加值 时间段	(弹性变形阶段)	(屈服阶段)	(强化阶段)	(断裂阶段)
1	18	44	32	36
2	17	43	31	35
3	18	45	32	35
4	17	44	31	35
5	18	45	33	36

发现精冲模具正常工作时,撞击数在冲压整个过程体现明显的规律性,而由金属AE信号产生理论可知,当模具崩刃时冲压过程的撞击次数会有明显的增加趋势,因此通过建立起特定钢板材在特定环境中的的冲压断裂过程中AE信号的撞击次数模型,将检测信号撞击数变化与建立的模型对比,即可对模具的崩刃进行检测。

4 结论

声发射信号检测在金属无损检测领域已有相当广泛的应用,但是对于模具崩刃在线检测理论,至今很少有文献涉及到此类研究。本文探索性的提出了利用声发射理论来对精冲生产线的冲压过程声发实施在线检测,通过分析正常冲压过程中中的的声发射信号,发现撞击数呈现出的明显规律,建立起金属板材冲压过程声发射信号撞击数数学模型,从而可以利用此模型在线监测精冲模具的冲压过程,对模具坏损情况进行预测。但是由于实际精冲模具生产线条件的复杂性对检测过程造成干扰,因此如何很好地排除实际生产线上的外界干扰,获取有效地声发信号将成为此项研究的的重点。在此论述了信号在冲压过程中的变化规律以及金属声发射信号的分析处理方法,对进一步完善声发模具检测原理和声发技术在金属无损检测领域中的应用有一定的指导性作用。

参考文献

- [1]梅瑛,黄大字,弓金霞. 冷挤压冲头的损坏形式研究[J]; 金属成型工艺; 1997年1期
- [2]张志刚等. Lamb波与SH板波双模式电磁超声检测系统的设计与实验[A]; 工业仪表与自动化装置; 2005年3期
- [3]沈功田等. 声发射信号参数分析法[J]; 无损检测; 2002年2期
- [4]张守苗,席镇,杨殿魁,贾园. 基于声发射技术的金属动态塑性摩擦研究[J]; 润滑与密封; 2006年11期

- [5]姚晓山, 张永祥, 明延涛. 基于经验模态分解的齿轮裂纹声发射检测[A]; 无损检测; 2009年第6期
- [6]卢文祥等. 工程测试与信息处理(第二版) 武汉, 华中科技大学出版社, 2008
- [7]秦国栋, 刘志明, 王文静. 16Mn 钢疲劳过程中的声发射特性研究[J]; 中国安全科学学报; 2005年08期
- [8]耿荣生, 景鹏, 付刚强. 声发射波形分析技术在复合材料故障评价中的作用[J]; 无损检测; 1999年7期
- [9]Stefanie E. Stanzl-Tschegg, Louise Filion, Elmar K. Tschegg, Alexander Reiterer. Strength properties and density of SO₂ polluted spruce wood[J]. Holz als Roh - und Werkstoff, 1999,57(2).
- [10]A. Reiterer, S. E. Stanzl-Tschegg, E. K. Tschegg. Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood[J]. Wood Science and Technology, 2000,34(5) .

The application of the acoustic emission in the online detection of fine blanking mold chipping

PAN Zhi-peng, CHEN-Peng, CAO Chuan-liang, ZHANG Xiang-lin

(School of material science and engineering, Huazhong University of Science and technology, Wuhan 430074, P.R.China)

Abstract: Tremendous researches on the the fine molding process in certain enterprises indicate that mold chipping is one of the most common forms of mold failures, while this kind of mold failure is especially difficult to detect which will result in yield decline and hindered fully automated process in high-speed production line. Here we explored the applicability of the acoustic emission based detection technology in fine mold production line ; introduced the basic theories of the generation of acoustic emission in sheet metal, the method of how to analyze the signal and the mold chipping mechanism; an in-depth analysis of acoustic emission in the metal sheet stamping process, tried to validate the feasibility of the acoustic emission based detecting technology in the online mold chipping.

Key words: mold chipping; acoustic emission detection ; signal analysis