

# 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, 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。通过多次试验, 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的方法。介绍了声发射信号产生的基本原理、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声发射信号, 探究了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: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)09-0030-04

## 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, China)

**Abstract:** Tremendous researches on the fine molding process in certain enterprises indicate that mold chipping is one of the most common forms of mold failures and this kind of mold failure is especially difficult to detect which will result in yield decline and hindering 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. The basic theories of the generation of acoustic emission in sheet metal were introduced and the method of how to analyze the signal and the mold chipping mechanism was presented. Finally, an in-depth analysis of acoustic emission in the metal sheet stamping process was proposed, trying to validate the feasibility of the acoustic emission based detecting technology in the online mold chipping.

**Keywords:** Mold chipping; Acoustic emission detection; Signal analysis

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<sup>[1]</sup>, 其在线检测一直以来都是阻碍精冲生产线实现进一步自动化的难题。笔者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方法。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<sup>[1]</sup>。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(AE)。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射信号, 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。

收稿日期: 2012-03-16

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资助项目(2009ZX04014-073-04); 国家自然科学基金资助项目(50875094)

作者简介: 潘智鹏(1990—), 男, 本科生, 主要从事精冲模具表面涂层性能研究和应用。

以下利用声发射采集装置对实际精冲模具生产过程进行检测试验,并对试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

以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,其中主要形成的是板波<sup>[2]</sup>。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。

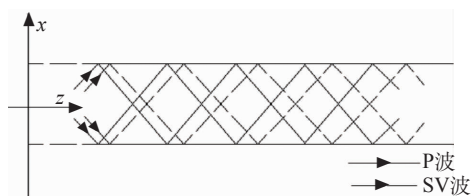


图 1 板波形成原理示意图

设板波沿 $x$ 方向传播,板厚方向为 $z$ 轴( $z=d$ 和 $z=-d$ ),并设标量势为 $\Phi$ ,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 $k_L, k_T$ 分别为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,求解得到对应于板中对称波和反对称波的波速<sup>[2]</sup>分别为:

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

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

式中 $E$ 为杨氏模量; $\sigma$ 为泊松比; $\rho$ 为密度; $d$ 为半板厚; $\omega$ 为角频率。

很容易看出 $c_d$ 的速度是一个定值,无频散效应; $c_i$ 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。金属板材冲压断裂过程中,板材自身就是强声发射源,受到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的异常信号。

### 1.2 精冲过程的 AE 信号特征与产生机理

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<sup>[3]</sup>。

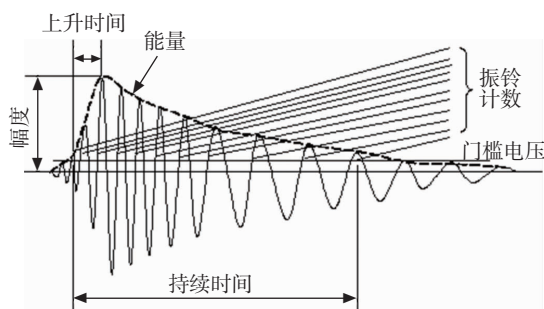


图 2 声发射信号简化波形参数定义图

金属板材冲压过程中在上凸模急剧下压的外力作用下,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,形成声发射信号。

#### 1.2.1 45 号钢板冲压中范性变形的 AE 特性

试验结果证实,晶体的范性变形是通过位错运动来实现的<sup>[4]</sup>。稳定的位错处于低能状态,当受到外切应力 $\tau$ 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部可动位错密度变化有关,并提出两者之间的关系式为:

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

式中 $dN/dt$ 为单位时间的声发射计数; $\rho_m$ 为可动位错密度。

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。进入加工硬化阶段后,声发射计数率急剧减小。

#### 1.2.2 45 号钢板冲压断裂的 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。试验所用材料为 45 号钢,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 100 dB 的大振幅的 AE 事件。

## 2 精冲模具冲压声发射试验

采用北京声华公司生产的 SAEU2S 两通道 USB 声发射仪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 mm×80 mm×15 mm,表面粗糙度为 20  $\mu\text{m}$ 。由于试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。考虑到声发射信号在传播过程中可能出现的变异性,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以去除油漆、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。

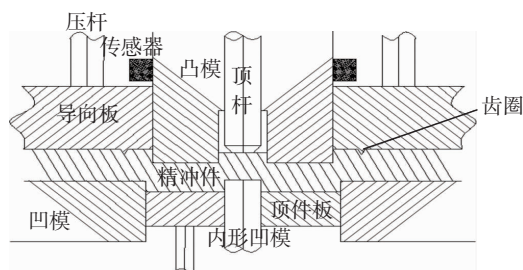


图 3 试验装置原理图

声发射系统的板卡主要参数设置为采样频率 2 500 kHz,采样长度 131 070,参数间隔 600  $\mu\text{s}$ ,锁闭时间 1 000  $\mu\text{s}$ ,软件锁闭时间 300  $\mu\text{s}$ 。通道主要参数设置为波形门限 40 dB,主放增益 40 dB,滤波器为高通,声速 5 100 m/s,参数门限 40 dB。

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 0.5 mm 的国产 HB 铅笔芯折断信号,笔芯与构件表面夹角为 30°。设探头 1 灵敏度为 96 dB,探头 2 灵敏度为 98 dB。

## 3 试验结果及分析

精冲的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。该信号可作为正常冲裁的 AE 信号,用于对比崩刃的异常信号。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 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、孪晶变形等大位错现象开始发生,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。

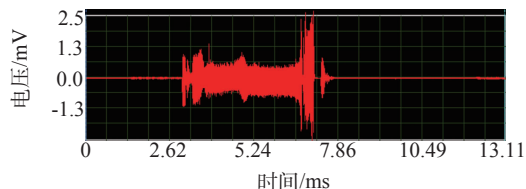


图 4 正常冲压一个周期的 AE 信号

通过 AE 信号分析方法对图 4 正常冲压的一个周期内的 AE 信号进行分析处理,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(图 5~8)。

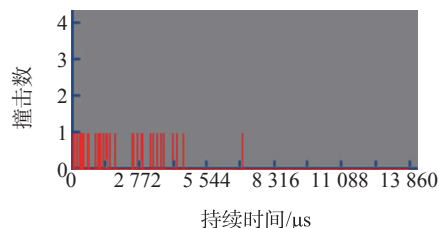


图 5 撞击数-时间变化图

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



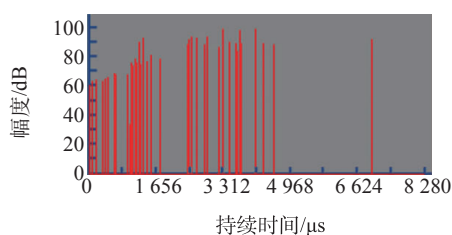


图6 幅度-时间变化图

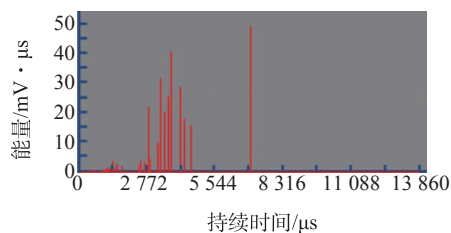


图7 能量-时间变化图

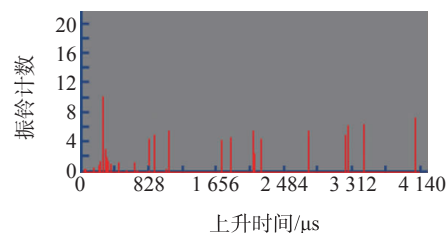


图8 振铃计数-时间变化图

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

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。

比较分析各参数描述的材料断裂过程,发现撞

击数更准确地描述了冲压过程中钢材的断裂过程,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1。

表1 撞击次数统计表

试验	0~1 500 $\mu$ s (弹性变形阶段)	1 500~3 000 $\mu$ s (屈服阶段)	3 000~3 500 $\mu$ s (强化阶段)	3 500~4 500 $\mu$ s (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

表1可见,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模型对比,即可对模具的崩刃进行检测。

#### 4 结语

提出利用声发射理论对精冲生产线的冲压过程实施声发射在线检测的方法。通过分析正常冲压过程中的声发射信号,发现撞击数呈现出明显的规律,建立起金属板材冲压过程声发射信号撞击数的数学模型,从而可以利用此模型在线监测精冲模具的冲压过程,对模具损坏情况进行预测。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,因此如何排除实际生产线上的外界干扰,获取有效的声发信号将成为后续此项研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] 梅瑛,黄大宇,弓金霞.冷挤压冲头的损坏形式研究[J].金属成型工艺,1997(1):31-33.
- [2] 张志刚,阙沛文,雷华明,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(3):22-24.
- [3] 沈功田,耿荣生,刘时风,等.声发射信号的参数分析法[J].无损检测,2002(2):72-77.
- [4] 张守苗,席镇,杨殿魁,等.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(11):109-114.

(下转第36页)

标,制作曲线如图 6。

以  $L$ - $X$  曲线为依据,假设发现一处异常信号,通过测量入射点距离焊缝边缘的距离  $L$ ,在坐标轴中找到相应的  $L$  位置,向上垂直画线,交曲线于  $A, B$  两点,找出对应纵坐标

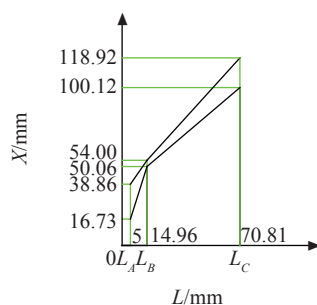


图 6 5P6×6 的 45°探头图表

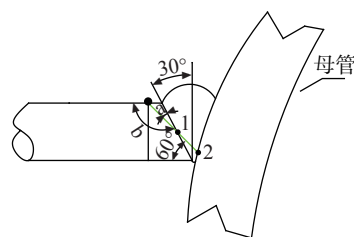
数值  $X_1, X_2$ ,再读取仪器显示声程值,如声程值在  $X_1$ - $X_2$  之间则为缺陷信号。同时根据缺陷声程值所在  $X_1$  至  $X_2$  之间的位置,确定缺陷在焊缝中的位置是偏向主管道侧还是偏向支管侧,或是熔合区中间的缺陷,同样也可判断是否为热影响区的缺陷。缺陷最大回波处的深度也较易得出。使用该方法可减少现场工作时间,方便而直观地给缺陷定位。

### 2.3 公式法的讨论说明

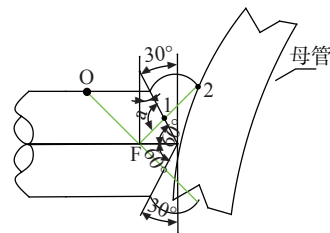
通过图 6 可以得知,在一次波和二次波的声程范围中, $L$  与声束穿过焊缝熔合面的声程  $X$  分别存在函数对应关系。分别画出该探头一次波及二次波的声程截面图,如图 7。

现继续选用 45°探头,通过图 7(a)可得  $L/\sin a = S_{0-1}/\sin b$ 。现已知坡口角度,通过计算得  $a=15^\circ$ ,  $b=120^\circ$ ;故可得  $S_{0-1}=L \cdot \sin b/\sin a=3.346L$ 。 $S_{1-2}=S_{0-2}-S_{0-1}$ , $S_{0-2}$  为检测中已知,故声束穿过焊缝熔合面的声程  $X(S_{1-2})=S_{0-2}-3.346L$ 。即单纯为  $X$  与  $L$  的关系。在一次波状态下,就可以采用该公式方便地判断缺陷位置。

继续选用 45°探头,已知坡口角度及支管厚度为 35 mm,同样通过图 7(b)可得  $S_{0-2}=S_{0-F}+S_{F-1}+S_{1-2}$ ;已知  $S_{0-F}=49.5$  mm,由三角函数得  $S_{F-1}/\sin 30^\circ=(35+L-35/\tan 30^\circ)/\sin 105^\circ$ ,则  $S_{F-1}=(0.5L-12.8)/0.965$ 。 $S_{1-2}=S_{0-2}-S_{0-F}-S_{F-1}$ ,在  $S_{0-2}-S_{0-F}$  已知的情况下,同样可以确定声束穿过焊



(a) 一次波示意图



(b) 二次波示意图

图 7 声程截面图

缝熔合面的声程  $X$  与  $L$  的关系。

上述两种方法在实际操作中方便简单,但同样存在不足,该方法中公式及图表仅针对单个角度探头,如需多种角度检测,前期准备较为繁琐。计算法受数值精度影响同样会产生误差。对于检测试件也仅限于对固定角度(以上仅针对  $270^\circ, 90^\circ$ )位置试件,一般仅对几处典型角度位置试件进行如上曲线制作。其它几处角度与角度之间的缺陷位置坐标图校正则需要大量试验验证。

### 3 结语

缺陷定位对 ASG 管脚焊缝的评定很重要,以上方法仅限于固定角度位置试件检测,而角度与角度之间的缺陷位置坐标图校正需要大量试验验证。以上方法都是建立在缺陷的最高回波为探头中心声束上,而在实际工作中受缺陷取向等原因影响,缺陷的最大反射波不一定为探头中心声束所经过,故仍存在超声检测的方法误差。

(上接第 33 页)

- [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[J]. 无损检测,2009(6):464-467.
- [6] 卢文祥,杜润生. 工程测试与信息处理(第二版)[M]. 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(8):105-108.
- [8] 耿荣生,景鹏,付刚强. 声发射波形分析技术在复合材料

料故障评价中的作用[J]. 无损检测,1999(7):289.

- [9] Stefanie E. Stanzl-Tschegg, Louise Filion, et al. Strength properties and density of  $SO_2$  polluted spruce wood[J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 1999, 57(2):121-128.
- [10] Reiterer A, Stanzl-Tschegg S E, Tschegg E K. Mode I fracture and acoustic emission of softwood and hardwood[J]. Wood Science and Technology, 2000, 34(5):417-430.