

# 模态声发射基本理论

耿荣生, 沈功田<sup>1)</sup>, 刘时风<sup>2)</sup>

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

**摘要:** 论述薄板中声发射(AE)信号波形分析技术的主要手段——模态声发射技术的原理, 介绍这一技术在工程实践中的应用前景。

**关键词:** 声发射检验; 模态声发射; 波形分析; 信号处理

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2002)07-0302-05

## A STUDY ON MODAL ACOUSTIC EMISSION THEORY

GENG Rong-sheng SHEN Gong-tian<sup>1)</sup>, LIU Shi-feng<sup>2)</sup>

(Beijing Aeronautical Technology Research Centre Beijing 100076 China)

**Abstract:** Description has been made of the basic theory of modal acoustic emission (MAE) for thin plate and its application prospective for engineering.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Modal acoustic emission; Waveform analysis; Signal processing

兰姆(Lamb)波在超声检测中一直受到重视并得到广泛应用<sup>[1,2]</sup>, 但很长时期以来, 它并未在 AE 领域获得应用。在超声检测中, 由于使用的频率较高(兆赫频率段), 板中可能存在模式较多, 人们可以根据缺陷的性质选择合适的模式以达到最佳检测效果。可通过改变工作频率、楔块角度(即声波入射角)或叉指式换能器的间距来选择所需模式, 它对提高检测可靠性和缺陷定量分析十分重要。例如, 在厚度为 2.5mm 左右的钢板中, 使用  $S_0$  模式(最低阶对称波), 缺陷上反射波的幅度与缺陷(在深度方向)的大小成比例, 但使用  $A_0$  模式(最低阶反对称波), 虽然也能获得反射波, 反射波的幅度对缺陷大小并不很敏感。显然, 为获得更多缺陷信息, 应当使用  $S_0$  模式, 这可以通过采用  $30^\circ$  楔块、800kHz 工作频率加以实现<sup>[3]</sup>。

对于 AE 检测来说, 由于 AE 是结构内缺陷动态变化过程产生的瞬态弹性波, 人们无法作出上述选择。因此, 虽然认识到兰姆波理论的重要性, 但直

到 1991 年, 在美国学者 Gorman 发表了板波声发射<sup>[4]</sup> 论文后, 有关在声发射检测技术中使用 Lamb 波理论的问题才逐步引起重视。板波声发射(PWAE)后来又称为模态声发射(MAE), 它是利用兰姆波理论研究板中 AE 波的特点, 从而将 AE 波形与特定的物理过程相联系。

### 1 基本理论

毫无疑问, 兰姆波的基本理论也适用于 AE 检测, 但问题在于如何用好这一理论。工程中大量使用板状结构, 如飞机机翼、隔框、复合材料舵面(平尾、垂尾和方向舵)、压力容器壳体以及压力管道等。对于图 1 所示厚度方向尺寸远小于其它两个方向的板而言, 相应于一定的激励条件, 在其中主要形成的是板波(Lamb 波)。设波沿  $x$  方向传播, 板厚方向为  $z$  (两板平面分别为  $z = -b$  和  $z = +b$ ), 并设标量势为  $\phi$ , 矢量势为  $\psi$  并认为它们都与坐标  $y$  无关,

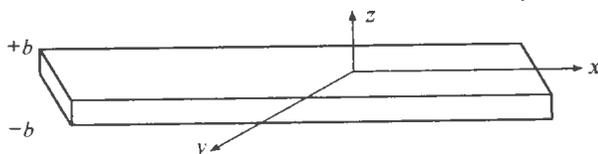


图 1 板结构坐标的示意图

收稿日期: 2002-04-08

1) 国家质量监督检验检疫总局锅炉压力容器检测研究中心, 北京 100013

2) 清华大学 机械系, 北京 100084

则  $\phi$  和  $\psi$  满足方程(1)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k_l^2 \phi &= 0 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k_t^2 \psi &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $k_l, k_t$ ——相应于纵波和切变波的波矢量

板中任一点的位移矢量  $V$  为

$$V = \text{grad}\phi + \text{rot}\psi$$

再设  $\phi$  和  $\psi$  都含有  $e^{j(kx - \omega t)}$  项, 即它们代表沿  $x$  方向传播的波。一般有<sup>[1, 2]</sup>

$$F(\alpha, \beta, k) = \frac{\text{tg}\beta b}{\text{tg}\alpha b} + \left[ \frac{4\alpha\beta k^2}{(k^2 - \beta^2)^2} \right]^{\pm 1} = 0 \quad (2)$$

+1 相应于对称模式波, -1 相应于反对称模式波。

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= \frac{\omega^2}{c_l^2} - k^2 \\ \beta^2 &= \frac{\omega^2}{c_t^2} - k^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $k$ ——波数

$$k = \frac{\omega}{c}$$

$\omega$ ——角频率

$c$ ——板波相速度

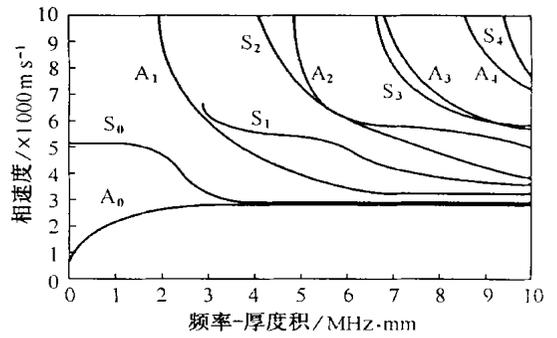
$c_l, c_t$ ——无限介质中纵波速度和横波速度

由此即可获得人所共知的板中不同模式 Lamb 波相速度  $c$ (或群速度  $c_g$ )和频率-板厚乘积(或波数-板厚乘积)的关系曲线(图 2)<sup>[1]</sup>。它告诉我们, 当板厚从很薄变到很厚(无限厚)时, 最低阶对称波的相速度从  $c_e$  变为  $c_r$ , 而最低阶反对称波的相速度从  $c_f$  变为  $c_r$ ( $c_r$  为表面波速度)。在垂线  $x = 1$  的左边, 即当频率-板厚乘积  $< 1$  时, 仅有最低阶模式  $S_0$  和  $A_0$  存在, 它们分别是零阶对称波和零阶反对称波。以上这些论述可以在文献[ 1, 2] 或一些经典教课书中找到。因此, 问题的关键是如何将这一理论用到声发射检测的实践中。

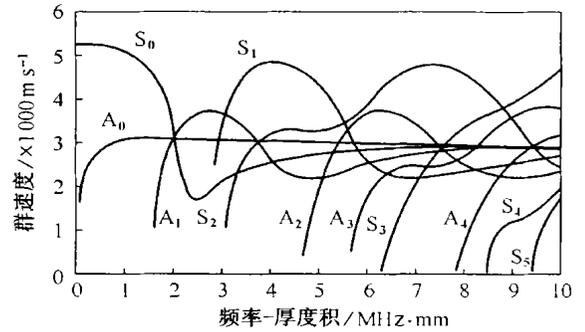
## 2 薄板问题

以上是对板中一般问题的求解方法。实际上, 就 AE 检测而言, 工程中遇到最多的是薄板问题。我们知道, 在绝大多数 AE 检测中, 主要频率段大概是几百千赫, 因此, 声波的波长应  $> 10\text{mm}$ , (远)比板厚大。对这类板, 图 2 中横轴的频率-厚度积在 1 左右或更小, 无论是从相速度或群速度的图上都可以看到, 起主导作用的仅是两个最低阶模式声波  $S_0$  和  $A_0$ , 因此, 问题可以大大简化。

首先研究第一类问题, 此时, 外力作用方向与板



(a) 相速度曲线



(b) 群速度曲线

图 2 钢板中不同模式声波的相速度和群速度与频率-厚度乘积的关系曲线

平面垂直, 复合材料的分层和脱粘等缺陷以及点蚀过程产生的声发射源都可看成是这样的声源。由于板厚  $h = 2b$ , 板的平衡方程可化简为<sup>[5]</sup>

$$D\Delta^2\zeta - P = 0 \quad (4)$$

式中  $D$ ——板的抗弯强度

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)}$$

$P$ ——作用在板表面上单位面积的外力

$E$ ——杨氏模量

$\sigma$ ——泊松比

板的自由振动方程可以由上面平衡方程得到, 只需将单位面积上的外力  $P$  改为加速度(它等于  $\zeta$  对时间的两次导数)与单位面积的质量  $\rho h$  相乘并改变符号即可。由此得

$$\rho h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{Eh^3}{12(1 - \sigma^2)} \Delta^2 \zeta = 0 \quad (5)$$

式中  $\rho$ ——密度

$$\text{或} \quad \rho \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{Eh^2}{12(1 - \sigma^2)} \Delta^2 \zeta = 0 \quad (6)$$

可设  $\zeta = \zeta_0 \exp[j(kx - \omega t)]$ ,  $\zeta_0$  为常数。对一维问题

$$\Delta = \frac{d^2}{dx^2}$$

所以, 从上式可得

$$\rho(-\omega^2) + Ak^4 = 0 \quad A = \frac{D}{h}$$

代入得

$$\omega^2 = \frac{h^2 Ek^4}{12\rho(1-\sigma^2)} \quad (7)$$

由于相速度  $c = \omega/k$ , 据此可得

$$c = \left[ \frac{h^2 E}{12\rho(1-\sigma^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \sqrt{\omega} = \left[ \frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \sqrt{\omega h} \quad (8)$$

而群速度  $c_g$  由下式表示

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \sqrt{\frac{h^2 E}{3\rho(1-\sigma^2)}} k = \left( \frac{4E}{3\rho(1-\sigma^2)} \right)^{\frac{1}{4}} \sqrt{\omega h} = 2c \quad (9)$$

由式(9)可见, 板中的弯曲波, 其群速度刚好是相速度的两倍。在声发射测试中, 群速度可能比相速度更有实际意义。

其次, 我们再研究一下作用力在板平面内的问题。此时, 力的作用方向与板平面平行。这类问题可分为质点位移与波传播方向都在  $x$  方向以及质点位移在  $y$  方向, 传播方向在  $x$  方向两种声波。复合材料纤维断裂和疲劳裂纹扩展产生的 AE 信号都相当于此类 AE 声源。一般情况下这两种波是相互耦合的, 其运动方程分别为

$$\frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{1}{1-\sigma^2} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{1}{2(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{1}{2(1-\sigma)} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} \quad (10)$$

$$\frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{1}{1-\sigma^2} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{1}{2(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{1}{2(1-\sigma)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} \quad (11)$$

如不考虑两者之间的耦合, 则有

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho(1-\sigma^2)} \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{E}{2\rho(1+\sigma)} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} \quad (13)$$

由此可得, 沿  $x$  方向传播的扩展波速度为

$$c_{\text{ext}} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (14)$$

而沿  $x$  方向传播的横波(不是弯曲波)速度为

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (15)$$

由此可得

$$c_t = \left[ \frac{1-\sigma}{2} \right]^{\frac{1}{2}} c_{\text{ext}}$$

$c_t$  与无限大介质中传播的横波速度完全一样。由于一般有  $\sigma=0.2\sim 0.4$ , 所以,  $x$  向横波速度约是扩展波的 0.6 倍。板厚增加到一定程度, 这种在板内传播的 SH 波也可变得很重要。由于这种波不像 SV 波那样参与板中模式转换, 板中各模式的波并没有它的位置, 因而它常被忽略。Dunegan 在其最近的研究中证明, 这种 SH 波可由面内(IP)作用力产生, 也可由垂直于板平面作用力(又称离面作用力 OOP)产生, 它没有频散效应, 主要集中在 100kHz 以上的高频段<sup>[6,7]</sup>。对大型构件, 这种 SH 波有时会起很重要作用。在此, 为使问题简单, 特别是对薄板, 可暂不考虑 SH 波的影响。

由式(14)和(8)可以看出, 板中存在两种波, 即最低阶对称波  $S_0$  和反对称波  $A_0$ , 在模态声发射理论中, 前者称为扩展波, 后者叫弯曲波。可以看出, 扩展波无频散效应, 而弯曲波有频散效应。两种波位移的相对幅度与激励方式有关, 由于一般实际力源总是既有垂直分量, 又有水平分量, 这两种波总是同时存在。显然, 当激励力源作用方向与板平面垂直时, 板中产生的应当主要是  $A_0$  型弯曲波。例如, 航空用铝合金板的点蚀过程可看成是垂直力源, 它产生的 AE 信号如图 3 所示<sup>[5]</sup>。由图 3 可见, 先行到达传感器的是传播速度较快的扩展波, 后来到达的是占主导地位的速度较慢的弯曲波, 它有频散效应。一般而言, 扩展波的高频成分要比弯曲波丰富得多。从式(8)可以看出, 弯曲波的相速度与频率的平方根成正比, 表现在图 3 上就是先行抵达的弯曲波频率较高, 而那些姗姗来迟的弯曲波频率都较低(脉冲宽度变大)。当利用 MAE 技术检测复合材料时, 可把复合材料中不同的缺陷看成是不同的激励源, 它们所产生的板波特性(波形和主要频率成分)

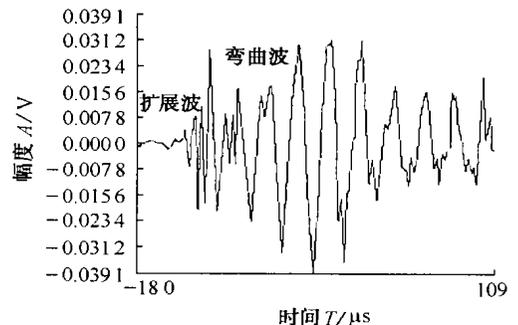


图 3 点蚀过程(垂直方向激励)产生弯曲波为主 AE 信号

应当不一样。因此,利用所接收信号的波形来获得有关复合材料性能或损伤的信息应当是有可能的。

当力作用方向与板表面平行时,如在板的侧面进行断铅心试验,将获得以扩展波为主的信号。为了说明这一点,我们用  $680\text{mm} \times 400\text{mm} \times 12.5\text{mm}$  铝板(图4)做了试验。断铅心点在板侧面,两传感器相距  $320\text{mm}$ (它们分别与左、右边相距  $180\text{mm}$ )。

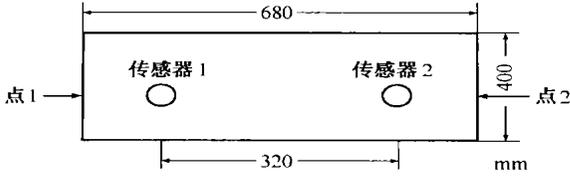


图4 试验用铝板

试验所得模拟 AE 波形基本上是等幅度的波,频散效应不明显。由于仪器具有同步触发功能,根据从点1和点2进行断铅心试验所获得的时差,可以求得声波在板中的传播速度。当在点1断铅时,第一通道传感器先接收到信号(图5),反之,应当是第二通道传感器先接收到信号(图6)。

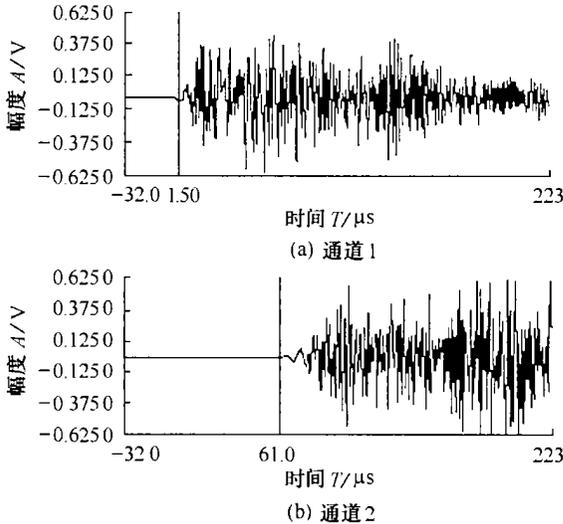


图5 在点1做断铅心试验时两通道波形图

两传感器相距  $320\text{mm}$ , 接收到声波的延迟时间分别为  $59$  和  $58\mu\text{s}$ , 这样,由试验所获得的扩展波声速平均值为  $v = 5\,520\text{m/s}$ , 与铝板中扩展波的理论值  $5\,700\text{m/s}$  十分接近。这一简单的分析已经告诉我们,采用板波 AE 理论对于固体中的 AE 源定位问题有多么重要,它已告诉我们,对铝板而言(其它金属板也一样),过去使用纵波速度、切变波速度或表面波速度进行定位的方法都会导致较大误差。上面的分析还说明,相应于不同模式的波,AE 波的传

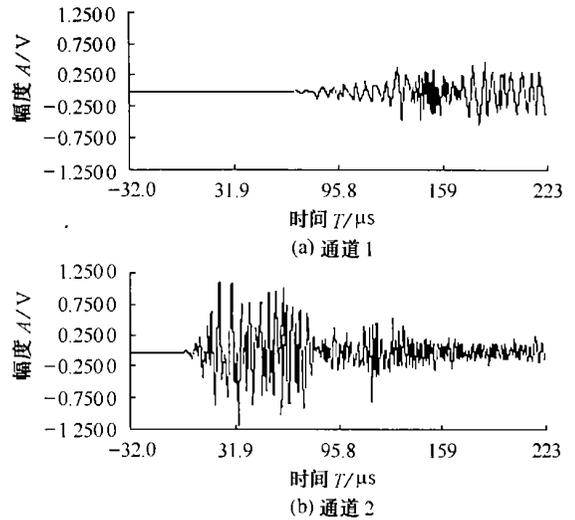


图6 在点2做断铅心试验时两通道波形图

播速度不同,而究竟应当使用何种模式的波又同 AE 源的特性有关,这些在定位时都需要考虑。如果是复合材料,问题会变得更加复杂,但 MAE 技术能为我们提供包括材料各向异性情况在内的更多有用信息<sup>[8]</sup>。有关模态声发射的一些具体应用问题将在下一期介绍。

### 3 板厚与板中声波幅度的关系

板厚除影响板中声波的模式外,对声波幅度的影响也很大。在薄板这一前提条件下,研究板厚对弯曲波幅度的影响更有实用意义,因为它将对利用板波诊断复合材料分层、脱粘等损伤具有指导意义。有了上面关于板内声波的基本关系后,我们来考虑在外力作用下板中的声波,进而推导声波幅度与板厚的关系。

设初始激励为  $f(x, t) = F \delta(x) e^{j\omega t}$ , 即作用力为在原点的简谐激励。此时,运动方程可改写为

$$\rho h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + D \Delta^2 \zeta = F \delta(x) e^{j\omega t} \quad (16)$$

可采用积分法解此方程,即先求解齐次方程,然后利用位移四阶导数的积分等于点作用力解出非齐次方程的解。这样,我们先解方程(16),并设右边等于零。设为简谐力输入,有

$$\rho h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} \Delta^2 \zeta = 0 \quad (17)$$

$$\zeta(x, t) = \zeta_0 \zeta(x) e^{j\omega t}$$

$$\text{得} \quad \zeta(x, t) = \zeta_0 e^{-j \left( \frac{\rho \omega^2 h}{D} \right)^{1/4} x} e^{j\omega t} \quad (18)$$

再由下式得式(19)

$$D \int \frac{d^4 \zeta}{dx^4} dx = F$$

$$\zeta_0 = \frac{F}{\sqrt[4]{D}} \cdot \frac{1}{(\rho \omega^2 h)^{\frac{3}{4}}} = F \cdot \left[ \frac{12(1-\sigma^2)}{E} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{1}{\omega h \sqrt{\omega h}} \quad (19)$$

说明接收信号幅度分别与板厚和频率的二分之三次方成反比。该结论对研究板中声波幅度与分层和脱粘等缺陷关系有指导意义。过去, 往往根据 Medick 的结论, 认为位移幅度与板厚  $h$  的平方成反比<sup>[9]</sup>。

## 4 结论

就声发射检测所使用的频率范围而言, 可以认为, 工程上大量使用的板状结构, 主要存在扩展波(最低阶对称波  $S_0$ )、弯曲波(最低阶反对称波  $A_0$ )和切变波(SH 波)三种模式的声波。板平面内(IP)声源主要产生的是扩展波, 而相应于离开板平面(OOP)声源, 主要会产生弯曲波。这些波的传播速度不同, 频率特性也不同, 因而可以用波形分析的方法加以识别。在工程上可以利用这一特性来区分不同故障源、识别噪声和有用 AE 信号。文章还研究了薄板厚度对 AE 波幅度的影响, 它对于定量评估分层和脱粘等缺陷有实用意义。

参考文献:

- [1] Victorov IA. Rayleigh and Lamb Waves[M]. New York: Plenum Press 1967.
- [2] 刘镇清. 无损检测中的超声兰姆波[J]. 无损检测, 1999, 21(9): 409-413.
- [3] Jeong HD, Shin HJ, Rose JL. Detection of defects in a thin steel plate using ultrasonic guided wave[A]. Proceedings of 15<sup>th</sup> WCNDT[M/CD]. Rome, Italy; 2000. 020.
- [4] Gorman MR. Plate wave acoustic emission[J]. JASA, 1991, 90(1): 358-364.
- [5] 朗道  $\Delta\Delta$ , 李弗席兹 EM. 连续介质力学(第3册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1962.
- [6] Dunegan HL. Modal analysis of acoustic emission signals[J]. Journal of Acoustic Emission, 1998, 15: 1-4.
- [7] Dunegan HL. Use of plate wave analysis in acoustic emission testing to detect and measure crack growth in noisy environments[A]. Proceedings of Structural Materials Technology—An NDT Conference[C]. San Diego California; 1996.
- [8] 耿荣生. 利用模拟声发射源评价飞机雷达罩胶接状况[J]. 声学学报, 1999, 24(4): 367-372.
- [9] Medick MA. On the classical plate theory and wave propagation[J]. ASME Journal of Applied Mechanics 1961, 28: 223-228.

(上接第 301 页)

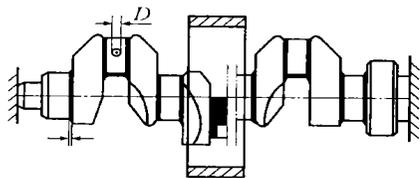


图 12 汽车发动机六缸曲轴磁化方法

在多向磁化设备上选用触头周向磁化(交流)+线圈纵向分段磁化(直流)的复合磁化方法, 或触头周向磁化(直流)和线圈纵向分段磁化(直流)分别单方向进行磁化(美国康明斯公司技术条件规定的方法)。

(3) 检测对象为波音飞机 737~777 机型系列起落架。美国波音公司(BAC)有关标准规定, 飞机起落架关键件属形状复杂应力集中易疲劳工件, 磁粉探伤只允许分别采用直流电触头进行周向磁化和直流线圈进行纵向磁化。所用 Gould-Bass 公司提供的专用多向磁粉探伤设备三组独立全波直流电源, 分别提供给触头周向磁化和两个独立移动式开合线圈纵向磁化。

## 3 结论

磁化技术的发展促进磁化设备的更新换代, 由单方向磁化技术发展发展到复合(摆动磁场和旋转磁场)磁化技术和多向磁化技术, 使设备的功能趋于完善, 适应了工业自动化生产中磁粉检测工序的需求。

多向磁化通用型设备具有三个独立电源, 可分别每个回路上选择交流、半波直流或全波直流电, 根据工件形状和尺寸实现多种复合磁化组合方式。这类设备最适于多品种小批量生产检测的需求。

参考文献:

- [1] 美国无损检测学会编, 美国无损检测手册译审委员会译. 美国无损检测手册·磁粉卷[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1994. 80-110, 224-227.
- [2] BS 6072-1981, 磁粉探伤方法[S].
- [3] MIL-HDBK-333(USAF)1974, 美军标准手册·无损检测方法标准手册[S]. 邓日红, 等译. 1986. 15.