

电磁声 (EMA) 检测技术的研究、 开发与工程化

张 广 纯

(冶金部钢铁研究总院 北京 100081)

1994 年 9 月 13 日收到

摘要 本文概述了近年来 EMA 技术的研究、开发与工程化的进展情况。从中可以看出: EMA 检测技术已进入了工程应用阶段。特别是在冶金工业中,它的应用已趋成熟。在机械制造、能源和铁道运输工业中,也开始进入了工程应用阶段。但其基础性研究工作,尚待努力加强。

关键词 电磁,声学,检测

Research, development and engineering of the EMA Inspection Technique

Zhang Guangchun

(central iron & steel research institute, Beijing 100080)

Abstract Progresses in research, development and engineering of EMA inspection technique are briefly reviewed. Here in it can be seen that the EMA Inspection Technique has gone into the engineering phase. Particularly in the metallurgical industry, its applications have ripened. In the machinery industry, the energy industry and the railway transportation, it has also begun its engineering phase. However, the basic research of EMA remains to be strengthened.

Key words Electromagnetism, Acoustics, Inspection

1 EMA 技术简述

本世纪 60 年代末与声发射、声全息同时问世的 EMA 技术,以更快的步伐进入了工程化阶段。而且近年来,其发展越来越快。它以不可替代的优势,登上了探伤和材料性能评价的舞台。

EMA 技术的核心是电磁声换能器 (EMAT)。根据使用目的,EMAT 可以有各

种形式,但其主要组成部分只有三个:(1)提供外磁化场的电磁铁或永久磁铁(2)高频线圈(3)被检工件。其中被检工件也构成 EMAT 的不可缺少的一部分,是 EMAT 与压电换能器的本质区别之一,也是 EMAT 不需要声耦合的原因所在。

EMAT 的另一优点是它可以很容易地改变所能激发与接收的声波的模式。只要改变高频线圈与磁铁的相对配置,或改变高频线圈中

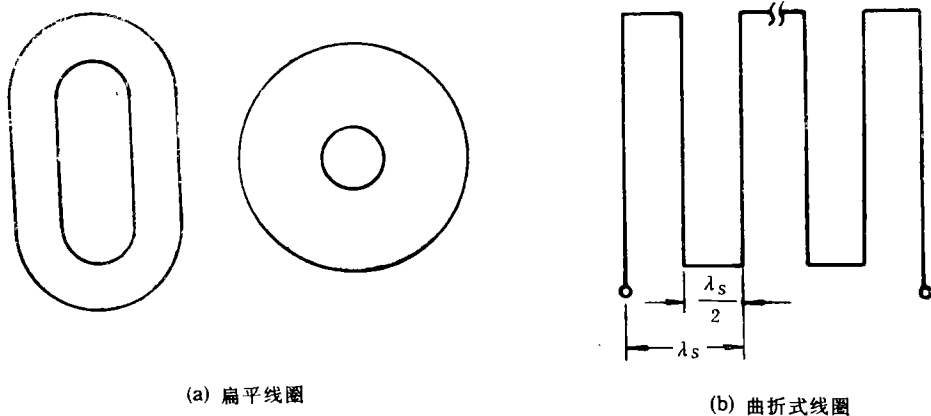


图 1 高频线圈的基本形式

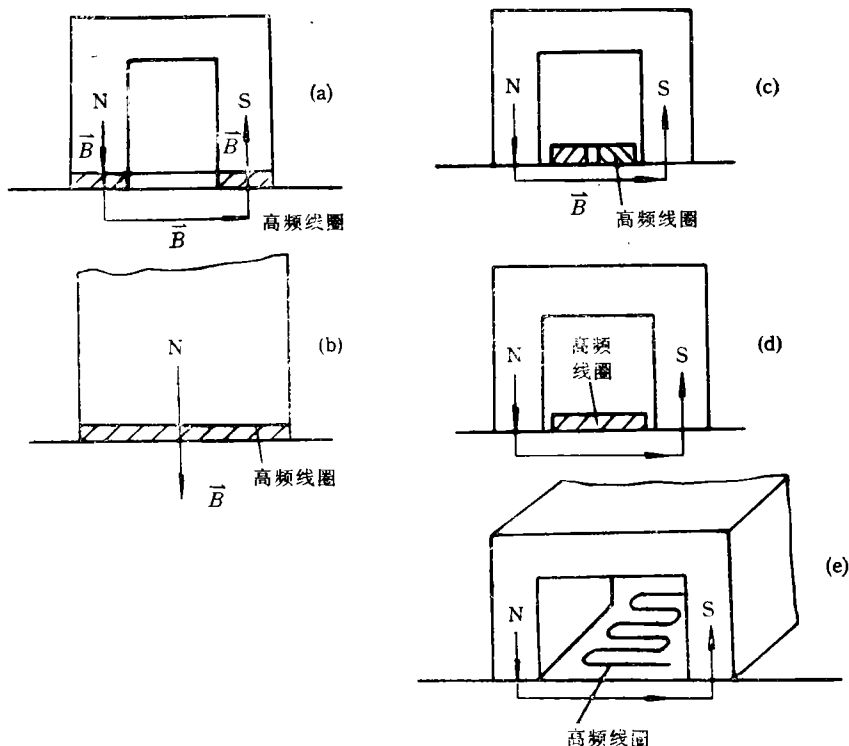


图 2 磁铁与高频线圈的配置

的电流频率,就会改变声波模式。

但是, EMAT 也有不可忽视的缺点: (1) 它的换能效率要比 PZT 压电换能器低 20—40 dB。当然, 这个缺点可以用精心设计与制造电子发射机与接收机、换能器来弥补。而且在一些磁致伸缩性能好的工件上, 其换能效率并不比压电换能器低多少。 (2) 高频线圈-工件间

隙不能太大。对于非铁磁性材料, 采用曲折式高频线圈, 此间隙效应曲线的斜率约为 $-107 \text{ dB}/\lambda_s$ 。而对于铁磁性材料, 采用曲折式高频线圈, 它约为 $-96 \text{ dB}/\lambda_s$ 。 (λ_s 为曲折式线圈的绕线波长, 即其周期(见图 1b)。这就是说, 线圈从工件表面每提离一个 λ_s 的距离, 声信号幅度就要下降 107dB 和 96dB。

为提供外磁化场的电磁铁，可以是直流电磁铁，交流电磁铁及脉冲电磁铁。

高频线圈则有两大类型：(1) 扁平线圈 (Pancake Coil) 和 (2) 曲折式线圈 (Meander Coil) (见图 1)，扁平线圈用于激发与接收体波。而曲折式线圈则不仅可以激发与接收体波，还可激发与接收瑞利波，Lamb 波和 SH 波。

磁铁与高频线圈的配置主要有二种：(1) 外磁场垂直于线圈绕制平面也垂直于工件表面 (见图 2(a)、(b))，(2) 外磁场平行于线圈绕制平面和工件表面 (见图 2(c)、(d)、(e))。

2 EMAT 的研究

EMAT 的研究工作与压电换能器相比，显得很初浅。由于 EMAT 包含工件在内，故工件的电、磁、声学性能会直接影响 EMAT 的特征。所以 EMAT 的性能要比压电换能器更复杂，研究工作亟待加强。

迄今为止，只有为数不多的研究工作集中在 EMAT 换能机制及声模式分析和声场特征上。

EMAT 的换能机制有三种：(1) Lorentz 力机制，(2) 在非均匀磁场中磁偶极子受的磁性力机制，(3) 磁致伸缩力机制。在铁磁性金属中，三种力机制同时存在。

Lorentz 力的表达式为：

$$\mathbf{f}_L = \mu_0 \mathbf{J} \times \mathbf{H}$$

式中， $\mathbf{J}$ ：涡流密度矢量。

$\mathbf{H}$ ：外磁场强度矢量。

磁致伸缩力的表达式为：

$$\mathbf{f}_{MS} = E\epsilon(\Delta M_B \mathbf{B} + \Delta M_H \mathbf{H}_i)$$

式中， ϵ ：磁致伸缩应变系数。

E ：杨氏模量。

ΔM_B 和 ΔM_H ：分别为工件磁感应强度变化造成的和电源元的磁场强度变化造成的磁化强度变化。

$\mathbf{B}$ ：磁感应强度矢量。

$\mathbf{H}_i$ ：电流源产生的磁场强度矢量。

磁性力的表达式为：

$$\mathbf{f}_M = \mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x}$$

式中， $\mathbf{M}$ ：磁化强度矢量

$\partial \mathbf{H} / \partial x$ ：磁场强度的梯度。

设在铁磁性材料表面放有曲折式高频线圈，取其中一段电流元分析，上述三种力的方向如图 3 所示。在图 3 所示的电流元-磁场-工件的相互配置下，Lorentz 力 $\mathbf{f}_L$ 可以用右手定则来判断。磁致伸缩力 $\mathbf{f}_{MS}$ 是由于非 180° 的自发磁化矢量的转动引起的。在图 3(a)(b) 中 $\mathbf{f}_{MS}$ 是沿电流元的形成的交变磁场方向，即平行于工件表面的方向。而在图 3(c) 中， $\mathbf{f}_{MS}$ 的方向本应是沿外磁场与电流元磁场的矢量和方向的。但就曲折式线圈的各线元的 $\mathbf{f}_{MS}$ 的合成方向又是沿 $\mathbf{B}$ 方向的。在图 3(c) 中， $\mathbf{f}_L$ 与 $\mathbf{f}_M$ 均为零。磁性力 $\mathbf{f}_M$ 是由 $\mathbf{M}$ 和磁场强度的梯度的点积所决定的，而其方向指向 $\partial \mathbf{H} / \partial x$ 最大的方向。故在图 3(a) 情况下它是与 $\mathbf{B}$ 平行的力偶，而在图 3(b) 情况下是与 $\mathbf{B}$ 垂直的力，而在图 3(c) 情况下 $\mathbf{H}_i$ 与 $\mathbf{B}$ 垂直， $\mathbf{M} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} = 0$ ，故无 $\mathbf{f}_M$ 存在。

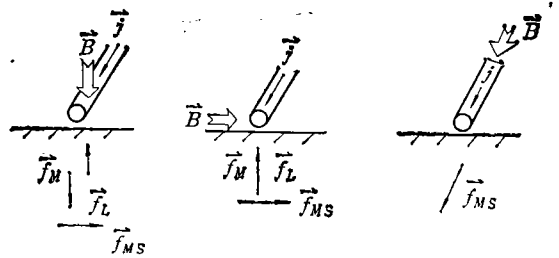


图 3 单段电流元在铁磁金属工件上产生的三种力

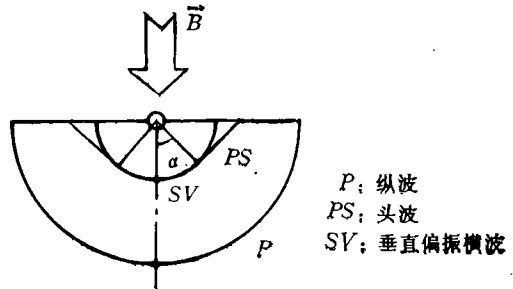


图 4 垂直磁场中单段线元在铁磁性金属试块上激发的波

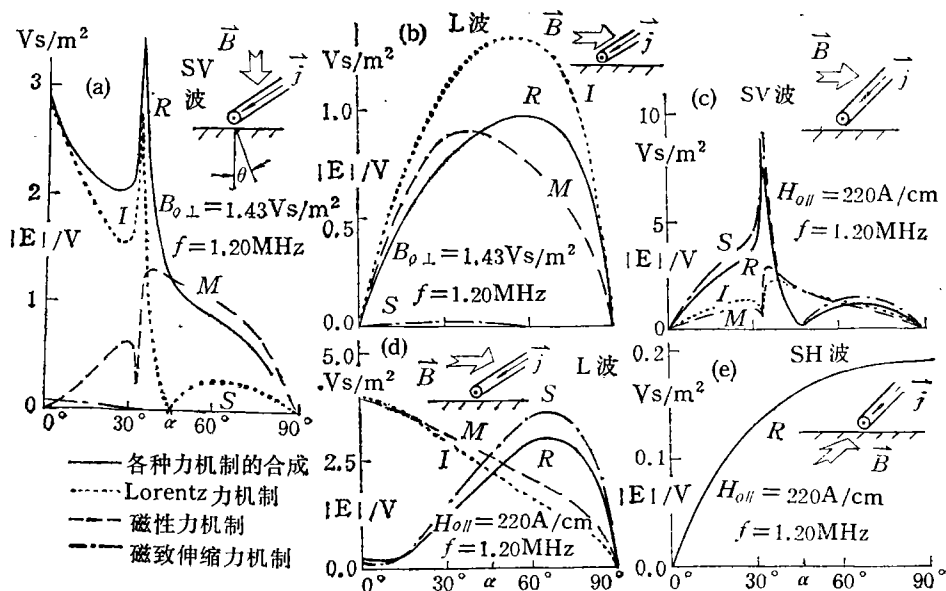


图5 单段线元在铁磁性金属上所能激发和接收的声波及其指向性

图4给出 F_L , F_{Ms} 和 F_M 三种力在铁磁性金属工件上所能激发的几种波。

由图4可知, EMAT 所辐射的声波是双向的。在圆柱状工件上, 这两个方向声波要产生干涉, 因而要影响探伤效果。为此, 需采用电子学方法, 使两列波在一个方向产生相长干涉, 另一方向产生相消干涉, 以形成单方向占优势的声辐射。或者采用倾斜分布的 $T-R$ 形式的发收线圈, 以便在空间上减小反向辐射波的接收量, 达到抑制反向辐射的目的。

按图3所示的三种配置方式的电流线元在铁磁性金属中所能激发的声波及其指向性特征如图5所示^[1]。这是线元与工件无间隙情况下计算得到的。随着间隙的增大, 不仅声波幅度要下降, 而且指向性也要产生剧烈变化^[2]。

图5中的纵坐标是声波在接收 EMAT 上产生的电场强度绝对值 $|E|$ 被质点振速 V 的规一化值, 其单位为伏·秒/米²(即 vs/m^2)。可以看出, 在图5(c)所示的水平磁场情况下, 所产生的声波幅度是最强的, 其主要贡献来自磁致伸缩力。波幅最强处位于 $\alpha = 30^\circ$ 多些的第三临界角下。而在图5(a)所示的垂直磁场下, 声波幅度次之, 其主要贡献来自 Lorentz

力, 其最大信号幅度也在第三临界角下。当 α 角更大时, 则磁性力机制占优势, 但其幅度要比第三临界角下的 Lorentz 力产生的声波小一倍左右。而此 Lorentz 力产生声波的最大幅度要比图5(c)中磁致伸缩力的最大幅度又小一倍以上。

曲折式线圈实际上是许多单段电流线元组成的相阵。知道了单段线元的指向性函数 $D(\alpha)$, 尚须求出曲折式线圈的群指向性函数 $M(\alpha)$ ^[3]。

$$M(\alpha) = \frac{\sin \left[\frac{n}{2} \left(2\pi \frac{a}{r} \sin \alpha - \gamma \right) \right]}{n \sin \left[\frac{1}{2} \left(2\pi \frac{a}{\lambda} \sin \alpha - \gamma \right) \right]}$$

式中, n : 组成曲折式线圈的单个辐射器数量。

$a = \frac{\lambda_i}{2}$: 相邻单段辐射器距离

λ_i : 曲折式线圈的绕线波长,

α : 辐射角

γ : 相邻的单段辐射器

如果 $a = \frac{\lambda}{2}$, $\gamma = \pi$ 。再将 $\lambda = c/f$ 代入, 上

式可化简成:

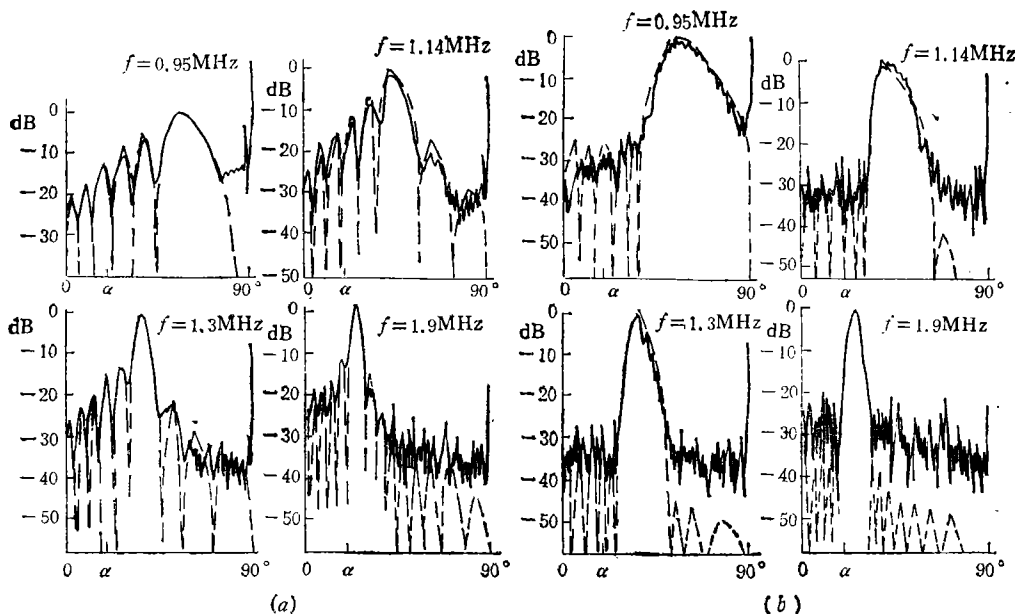


图6 在铁磁性钢材上曲折式线圈激发的SV波指向性图

$$M(\alpha) = \frac{\sin \left[\frac{n\pi}{2} \left(\frac{\lambda f}{c} \sin \alpha - 1 \right) \right]}{n \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{\lambda f}{c} \sin \alpha - 1 \right) \right]}$$

将单段辐射器的指向性函数与群指向性函数相乘,便得出总指向性函数 $G(\alpha)$:

$$G(\alpha) = M(\alpha) \cdot D(\alpha).$$

将上式计算结果(虚线)与实测结果(实线)一并示于图6。此图是 $\lambda_s = 4\text{mm}$, 6个周期的曲折式线圈在铁磁性钢材上在各种频率下激发出声波(SV波)的指向性图(左侧(a))。图右侧(b)是道尔夫-切比雪夫加权线圈的相应的指向性图^[3]。

由此图可知:随着频率的提高,主声束辐射角 α 逐渐减小,即主声束逐渐从试样表面向内倾斜。这是由于当电信号频率变化时,绕线波长 λ_s 不变,各个线源中电流相位不一样,因而致使子声波相位不一致造成的。在各个频率下,声波的辐射角 α 可由下式求出:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{c}{\lambda_s f} \right)$$

式中 c : 所激发的声波的传播速度。

λ_s : 曲折式线圈的绕线波长。

f : 激励频率。

3 EMAT 的工程化

3.1 钢板、钢管探伤

钢板、钢管的 EMA 探伤设备从本世纪 70 年代就开始研制^[4]。但由于在工程上遇到了种种难以解决的问题,一直未进入商品化阶段。钢铁研究总院所研制的钢板和钢管电磁声探伤设备,经多年的工程实践,不断改进,现已用于生产之中^[5-8]。

3.2 深冲金属板 γ 值的 EMA 评价

随着汽车工业、包装工业的迅猛发展,深冲金属薄板的需求量越来越大。但深冲成型工艺对金属薄板的组织性能,尤其是各向异性要求很高。衡量各向异性的重要指标是 γ 值。其定义是:薄板在单向拉伸情况下,试样宽度方向与厚度方向的真应变之比称为 γ 值。它实际上反映板平面方向和厚度方向上金属流动的难易程度,也可以说是板抵抗厚度减薄和破裂的能力大小。从本世纪 80 年代末,国外就集中了大量人力、财力开展了 γ 值的在线 EMA 评价研究工作。研究开发出几种方法:例如在不同方向上用渡越时间法测 SH 波、Lamb 波声速;

用共振法测声速。然后由声速算出弹性模量 E ，再由 E 值与 γ 值的相关关系求出 γ 值。这方面的研究开发工作已成熟，进入了技术转让阶段。

3.3 火车轮踏面裂纹的 EMAT 动态监测

火车轮的完好性是铁道运输安全的重要保障。在动态下监测车轮是否产生裂纹及其扩展情况是压电换能器难以解决的问题。近年来，人们把注意力转向 EMAT 上来了。德、美、日、加拿大等国研究人员近年来相继开展了这方面的研究工作。其方法是将小巧的 EMAT 嵌入钢轨中，用来激发和接收表面波。当车轮从 EMAT 上驶过的一瞬间，声表面波以 3000 m/s 的速度在车轮表面传几周，实现车轮踏面裂纹的动态监测。近几年，这种研究工作已扩展到监测车轮的残余应力方向上了。进展相当快，可以预料，这项技术很快就会进入工程化阶段。

3.4 EMAT 测厚

压电探头的测厚精度易受耦合介质的影响，故 EMAT 在此方面有其独特优点。EMAT 测厚的关键是波模纯、声束窄、脉冲窄(但要有足够的幅度)及消除工件电、磁、声性能的变化对测量的影响。由于 EMAT 采用垂直入射的横波，故纵向分辨力要比压电换能器高出一倍。目前，德国等几个国家的公司已有商品 EMAT 测厚仪出售。但售价很高。

3.5 连铸坯高温 EMA 检测

连铸连轧是冶金工业生产工艺的重大革

新。目前国外工业先进国家生产的连铸钢材已占整个钢材产量的 90% 以上。在连铸生产中，如果在连铸坯阶段就出现严重缺陷而未检测出来，那么它将一直延续到连轧后的成品钢材上去，就会造成巨大的浪费。此外，连铸坯凝固层厚度的检测也是改进坯质量和连轧工艺的重要环节。从 70 年代末起，日本等国就开始探索了用 EMAT 进行连铸坯探伤和凝固层厚度测量的开发工作。他们采用大功率高压放电式激励源敲击 EMAT，使之产生较强的声波。用穿透法测量声波在坯中的渡越时间，再根据坯中固体(凝固层)与液体(未凝固的钢液)的声速换算出各自的厚度。此方法只能给出在声传播方向上两层厚度的平均值。此外，高压绝缘防护、热和机械防护都是大难题。据报道，新日铁等单位联合研制的连铸坯 EMAT 高温测厚仪已用于生产线上的检测^[9]。

参 考 文 献

- [1] Wilbrand A. *Materialprüf*, 1984, 26(1—2): 7—11.
- [2] Ильин И В. *Дефектоскопия*, 1987, №12, 13—21
- [3] Mohr W, Repplinger W., *Materialprüf*, 1978, 20(4): 147—154.
- [4] Mohr W, Höller P, *IEEE, SU23*, 1976, p369.
- [5] 张广纯, 无损检测, 1990, 12(4): 103.
- [6] Zhang. Guangchun, *Proceedings 7th Asian-Pacific on NDT*. p383. 1993. Shanghai, China.
- [7] 中国发明专利. ZL90109231. 2. 1993. 8. 22.
- [8] 中国实用新型专利. No. 91. 2. 03560. 9. 1992. 3. 25.
- [9] 吉田透, 等. 铁と鋼. 1984. No. 9. 1123—1130.

中国声学学会科普委员会启事

中国声学学会科普委员会的宗旨是向社会公众义务普及声学知识和技术。如果有关单位希望深入普及声学知识和技术，中国声学学会科普委员会可以义务联系声学专家为您们做声学科普讲座和协助解决疑难问题。科普活动费用另议。有需要的单位请按下面地

址联系。

通讯地址：北京市 100084，清华大学物理系，陈宇收。（请在信封上注明“科普”）

（中国声学学会科普委员会）