



# 第九届世界无损检测会议

译文选集

1981

# 序 言

第九届世界无损检测学术会议于1979年11月18~23日在澳大利亚墨尔本召开。出席会议的有32个国家503名代表。中国机械工程学会无损检测学会派出6人代表团参加了会议，并宣读了3篇论文。在11月18日的国际无损检测委员会成员国第13次会议上，还一致通过了我国的入会申请，接受我国为该委员会的正式成员国，这对于密切我国与国际的交往，进一步促进我国无损检测技术的发展将发挥积极的作用。

本届会议共发表论文217篇，除大会宣读的5篇论文外，其余212篇按专业分类如下：超声87篇；射线34篇；涡流及其它电磁方法27篇；声发射16篇；渗透2篇；其它技术21篇；综合9篇；培训11篇；标准5篇。其中以超声方面的论文最多。

为了便于国内无损检测工作者参考，学会会刊《无损检测》杂志编辑部，在出席会议的我国代表团的协助下，对本届会议的论文进行了筛选和翻译，共收集论文近百篇，现将其中40篇作为选集出版，其余将在《国外无损检测》杂志上陆续发表。

本选集在编辑、组织译、校及出版过程中，得到了各方面的大力支持，我们在此谨向有关单位和有关同志表示衷心的感谢。由于时间仓促、编选水平有限，难免有缺点和错误，请读者批评指正。

应 崇 福

一九八〇年四月二十九日

# 目 录

## 一、大会宣读的论文

- 1、无损检测的国家标准与国际标准——取得与产品性能有关的更佳重复性和测量方法……………( 1 )
- 2、在无损伤检测中用于产生、耦合和接收超声的非常规方法……………( 7 )

## 二、分组宣读的论文

- 1A-3 评定球墨铸铁中石墨球化率所用的无损检测方法与其它方法的比较……………( 16 )
- 1B-5 在轧制过程中用超声反散射法测定奥氏体材料的晶粒度……………( 20 )
- 1C-11 钢棒表面和内部缺陷的自动检验系统……………( 23 )
- 1C-12 令人满意的手控无损检测技术的自动化……………( 27 )
- 2B-4 台湾核工程中用超声技术检测反应堆控制棒驱动机构密封壳的评述……………( 31 )
- 2B-8 快中子增殖反应堆结构材料 SUS 304 声发射特性的实验研究……………( 35 )
- 3A-1 第八届世界会议以来国际焊接学会第五委员会的无损检测工作报告……………( 38 )
- 3B-1 用超声波对焊缝缺陷作定量定性和评价……………( 42 )
- 3B-3 鉴别焊缝各类缺陷的最新超声方法……………( 48 )
- 3B-7 焊缝超声检验技术的改进……………( 53 )
- 3B-8 点焊工序中的超声检验……………( 56 )
- 3B-11 奥氏体不锈钢焊缝的超声检查……………( 60 )
- 3B-12 304 奥氏体不锈钢管焊接试样的应力腐蚀裂纹对几何反射体分类的分析……………( 65 )
- 3B-14 用纵波斜探头检验奥氏体钢焊缝的效益……………( 70 )
- 4A-2 高温阴极的显微全息照相无损检验技术……………( 73 )
- 4A-3 用计算机控制扫描的三维声场测试系统……………( 77 )
- 4A-8 用磁噪测量法评定钢表层物理状态……………( 81 )
- 4A-24 磁橡胶检验技术使用中的实际问题……………( 86 )
- 4B-1 用涡流法评定金属管中的斜裂缝……………( 90 )
- 4B-6 相敏涡流检验的理论研究……………( 94 )
- 4B-8 微处理器和微计算机在涡流无损检测仪器中应用的可能性……………( 98 )
- 4D-1 用射线照像法检测缺陷的高度……………( 100 )
- 4D-2 无损检测领域中应用胶片——金属荧光屏装置的现状……………( 105 )
- 4E-4 反射体的特性：实验和数值研究……………( 110 )

4E-5	计算机化的超声检验·····	( 115 )
4E-7	以超声信号分析为基础预测胶接强度的综合算法·····	( 120 )
4E-9	用超声波直接测定应力·····	( 126 )
4E-11	用于奥氏体粗晶焊缝的超声检测方法的现状·····	( 130 )
4G-1	用聚焦探头测定取向不佳的平面型缺陷的尺寸和取向·····	( 139 )
4G-6	缺陷倾角对斜探头超声检验的影响·····	( 145 )
4H-3	不用外加磁场激发电磁超声波及其在钢生产线上的应用·····	( 152 )
4H-4	钢制品的电磁超声检验·····	( 157 )
4H-5	快速均值装置在高相干噪声材料超声检测中的应用·····	( 162 )
4J-6	用声学方法评定层状接头的胶接质量·····	( 169 )
4J-9	真实和模拟的声发射信号的脉冲宽度和频谱·····	( 171 )
5A-2	陶瓷材料机电性能的无损检测·····	( 175 )
5A-3	无损检测预应力混凝土桥梁用的高能辐射电视系统·····	( 179 )
5B-1	胶接接头的无损检测·····	( 182 )

# 无损检测的国家标准与国际标准—— 取得与产品性能有关的更佳重复性和测量方法

(美) Berger, H.

[摘要] 无损检测(NDT)标准提供了一种实际程序,使NDT测量具有重复性。然而,为了在产品性能分析中改善重复性並提供定量数据,都需要更为完善的各种标准。

## 引 言

使用无损检测(NDT)标准有助于获得均一和有重复性的检验结果,並能表示产品质量的验收水平。虽然产品质量是最终目标,但人们认为目前使用的(NDT)技术在以定量单位表示产品质量的能力方面是极为有限的。肯定地说,问题的一部份在于我们知识的贫乏,即关于(1)施加的能量与被检验介质之间的相互作用,(2)(NDT)的结果(能量场的变化)与被测产品的质量或产品性能特徵之间的关系,对于现实世界的复杂情况来说,采用相互作用简化模型往往是不充分的。

然而,(NDT)标准大都基于经验方法及实际考虑(例如成本,生产率和安全的要求,可得到的仪器设备以及人员的资格鉴定),它成功地缩小了理想模型与现实检验问题之间的差距,这些产生于局部地区(或国家)的标准使我们能达到某种程度的可比性。没有这些标准,(NDT)就完全不可能作为质量控制的工具。

这些概念,可以用目前使用的射线照相,超声和其他NDT技术的国家标准和国际标准的例子来讨论和表示。国际标准化组织(ISO)和国际焊接学会(IIW)等组织对国际标准化工作的贡献是大家所知并讨论的。

在上述分析中,人们认识到:NDT测试必须提供能用来评定产品性能的资料;NDT

的测试也必须是能重复产生相似结果的方法,极为重要的是这些要求应反映到NDT标准中去。对横跨阿拉斯加输油管道上环焊缝的检验结果进行分析,以说明NDT和产品性能评价之间所需要的关系<sup>[1]</sup>,对NDT标准的这种研究(和相似的其它例子)的意义是很重要的。

## 标准的比较

可以用射线照相法来说明现实问题的复杂性和NDT标准提供的解答。辐射场与介质之间的相互作用通常以单色能量和狭几何波束的简化模型来描述。然而实际上通常是多色能量辐射和宽几何波束,此种情况与简单模型是不相符的。其它各种因素也强烈地影响射线照相检验的结果。这些是几何因素(焦点尺寸,射源至胶片的距离,被检工件的几何形状和缺陷的特徵),与记录有关的各种参数(胶片和增感屏的特性以及冲洗条件)和与解释有关的因数(评片者的水平和经验与观察条件)。在一个模型中要包括所有这些参数及其影响,並与大量实验结果相符,按这门技术的目前水平来说,尚相距甚远。

为了应付问题的复杂性,根据射线照相法标准引入了二种辅助手段,即象质计(IQI)<sup>[2~7]</sup>和参考用射线照片<sup>[8~17]</sup>,IQI用于确保射线照片的质量水平。可以认为具有同样背景黑度和相似的象质指示的射线照片将

带来相似的信息。因此,能够评价在不同时间和不同地点拍摄的射线照片。不同产品的标准参考射线照片则用来将缺陷分类并决定它们的相对严重程度。

当然,标准不能提供绝对定量的解答,但它是一种实用的、简单而经济的方法,使检验员能建立较合理的可比性和一定程度的定量化。因此,射线照相法能用作一种很好的检验工具。这个例子表明如何使用标准化工作来克服NDT实际问题的复杂性。

在超声脉冲反射法中,要获得可比性和定量化的检验结果比在射线照相法中更为困难。为了达到一定程度的可比性和定量化的结果,采用具有已知形状、大小和位置的反射体的标准考试块<sup>[18~23]</sup>。用它们确立超声检测系统的灵敏度和估计缺陷尺寸。可惜,真正的缺陷往往对超声探测波束的反应与标准反射体不同。真实缺陷的特征将更为复杂和不可预测。而且,回波幅度极为严重地受到耦合效率、仪器和换能器的性能特征、介质的声学性质等因素的影响,这些可变因素造成的结果使直接评定缺陷的特征成为不可能。其结果是,超声回波幅度法在提供可比性和定量化结果方面的能力是很有限的。

且不管所有的这些缺点,在没有得到更好的实际解决办法之前,还是用标准反射体来确定超声检验系统的灵敏度和估计缺陷的大小。为了减少误差,标准反射体的用途被限制在与调节到同样灵敏度水平和相同测试条件的特定系统所获得的结果相比较。即使有了全部这些限制和规定条件,但定量化和可比性仍很低,而且肯定不能满足需要。这就促进了新技术的发展。在作为脉冲反射法基础的反射率之外,声与介质相互作用的其它现象如折射、散射、干涉和弥散都曾被研究过。目前在信号显示和信号分析方面更高级的系统如成象系统、适应性学习系统(adaptive learning systems)、频谱分析仪和信号处理装置都正在发展中。将来的新技术肯定

需要更高级的标准来加以校准,美国国家标准局在超声标准方面(1979年)的报告<sup>[20]</sup>,总结了包括这些新技术在内的校准和标准化方面的活动。

以其它NDT方法获得的显示结果,例如磁粉、涡流、声发射和着色渗透等,也都会受到多种参数的影响。举例来说,磁粉探伤显示的迹痕受到磁场强度和磁场取向对缺陷的影响,又受到磁化方法、缺陷大小、形状和位置、工件表面情况及其磁性特征和几何形状的影响,以及磁粉的物理性质、磁性特征和施加磁粉的方法等因素的影响。在这些情况下,同样也没有简单的模型能作为缺陷定量合适的基准。

因而NDT方法本身提供的资料基本上是定性的,标准的应用有助于达到某种程度的定量化和可比性,这就使NDT方法有可能作为质量检验的工具。

## NDT 标准国际化

在各种NDT方法发展的早期,就感到标准化的需要,这就导致了标准的地区性起源,其结果是造成了很多地区性的标准和规范。

在射线照相法的发展过程中,曾经采用了设计成线状、孔、槽、缝、阶梯形等的各种像质计(IQI),这种多样性不仅阻碍了国际交往,即使在一个国家内也是如此。幸而IQI的数量已减少,目前普遍使用的只有几种<sup>[2~7]</sup>。最主要的几种IQI相互关系的研究已发表在几篇文章中,其中几篇列在参考文献[30~33]中。

ISO和IIW曾对IQI的国际标准化工作做出过重要贡献。IIW比任何其它组织对NDT的国际标准化工作做了更大的贡献,这就反映出焊接极其需要可靠的NDT的事实,由于ISO和IIW的努力,在西欧,IQI的实际应用数量已减少到二种,即AFNOR阶式孔型[IQI AFNOR NF A-0304(法国)<sup>[5]</sup>]和



DIN 线状型 [IQI DIN 54109 (德国)<sup>[4]</sup>]。这些象质计现在都已在 ISO 推荐方法 R1027 中采用,并为所有西欧国家所熟悉。美国最广泛应用的 IQI 是 ASTM 片状型<sup>[7]</sup> [ASTME-142 77]。在苏联,所有型式的 IQI,即槽式、线状和片状或孔型的都列入官方的国家标准<sup>[6]</sup> [GOST 7512-75]。

在超声探伤方法方面,已设计了很多具有平底孔、横孔、V形槽、方形槽和狭缝的参考试块,并设计了采用钢球和平面反射体的校准方法。在产品验收检验中,多数情况下都采用特别设计的参考试块,其材料和形状都与被检工件相同。这些参考试块及其使用方法通常都在制造厂的规范中加以说明。仅在极少情况下,产品验收用的参考试块会列入国家标准,但是在校正用的标准试块方面,主要由于 IIW 的努力,其标准化工作,已达到了高度国际化和国家化。

三种校正用试块已获得很广泛的承认。IIW 的第一种试块<sup>[18,19,21,23]</sup>已取得全世界认可<sup>[16,20,21,23,28]</sup>; IIW 的第二种试块<sup>[22]</sup>已在很多国家标准中采用,并很可能也成为一种全世界认可的标准。最后,美国应用的平底孔试块最近已被苏联 (USSR) 标准采用<sup>[25]</sup>。

在文献 [34] 中讨论了用于原子能设备检验方面的超声设备校验的方法的差别。这些差别包括试块型式和参考孔的型式 (在侧面钻的横孔和平底孔), 表面光洁度, 换能器扫查行程的疏密程度, 以及最重要的是缺陷记录电平和报废标准。例如: 美国 (ASME 标准第 11 篇) 对在役检查的要求是: 如果超声信号幅度达到 DAC 曲线的一定百分率 (通常为 50%), 则必需加以记录 (DAC 曲线是从校正试块的横孔上——对不同厚度, 横孔的直径也不同——产生的回波幅度制成的距离幅度校正曲线), 然后用断裂力学分析该缺陷, 以确定是否应加以修理或监视。

在德国系统中 (德意志联邦共和国, AD-Mark 规范的 HP 系列) 反射幅度更低的缺陷

信号也要加以记录。德国试块上有校正用的平底孔 (但也能用侧面钻的横孔), 而其主要的重点在于应用 Krautkrämer 的 AVG 曲线图 (即 DGS, 距离—增益—灵敏度曲线图)。密集的小信号也可以解释为缺陷信号。

检验原子能部件方法上的这些实际差别, 使一个国家的公司企图在另一个国家销售其产品时, 造成一些问题。如果我们要在市场上避免引起混乱, 双方必需知道和同意检验的宗旨和校正方法。

## 产品性能——有关的 NDT 测量

从本文前几节中我们已知道, 要取得有重复性的 NDT 结果是困难的, 虽然, 人们认识到, 目前的国家标准和国际标准对我们探索解决的途径提供了很多帮助。此外, 要取得以定量化表示的缺陷或材料特征的 NDT 结果也是困难的, 肯定地说, 如果没有缺陷类型、位置、取向和尺寸的可靠测量数据, 就难以肯定缺陷对产品性能的影响。然而, 如果 NDT 将变得更为有用的话, 就必须解决这些问题。

当断裂力学和其它与产品性能分析有关的先进技术更为人们熟悉和接受后, 定量化的无损评价 (NDE) 检测技术就显得比任何时候都更为需要了。为了表明这一观点, 考虑在管道焊缝的质量评定工作中, 需要对横跨阿拉斯加输油管上的一些有问题的环焊缝加以报废<sup>[1]</sup>。由于在这些焊缝中的缺陷大于美国运输部门 (DOT) 规程中允许的量, 按照报废要求, 管道合同承包商向 DOT 提交了一系列可允许存在缺陷大小的曲线, 其主要依据来自英国标准草案<sup>[35]</sup>。其中一条曲线示于图 1, 适用于非平面状缺陷, 缺陷尺寸在曲线以下区域中的被认为是安全的, 而在曲线以上的缺陷则被认为是会造成破坏的, 同时也示出其它几条曲线, 代表不同的分析方法<sup>[1]</sup>。

如图 1 所示的表示可允许缺陷尺寸的曲线被用来决定焊缝是否能验收。

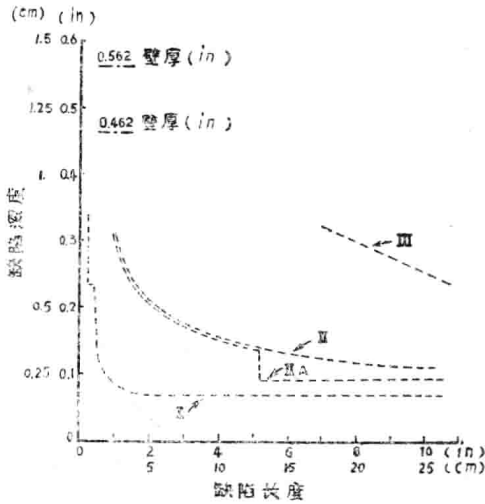


图 1 环焊缝中几种可允许非平面性缺陷尺寸(深度—长度)的曲线,曲线 I 根据英国标准草案;曲线 II 及 II A 根据临界裂纹张开位移;曲线 III 根据塑性不稳定性。见参考文献 [1]

无损检测必须提供有关缺陷尺寸的数据(以及缺陷的类型,因为对于不同的缺陷有不同的曲线),在横跨阿拉斯加的输油管道的例子中,缺陷尺寸必须从现场摄得的 X 射线照片原板上测定。在缺陷长度测定方面没有什么问题,这个尺寸可被测得以满足现有法规和规程的要求,然而,缺陷深度(见图 2)的测量,并不是射线照相法的原来目标。在理论上,

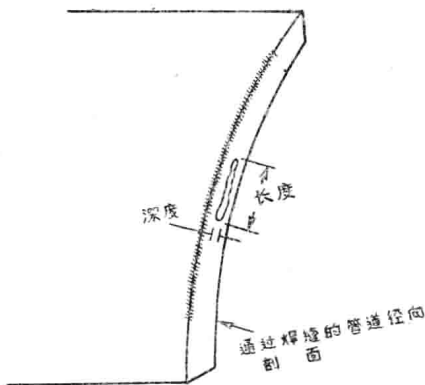


图 2 焊缝缺陷的取向

从缺陷投影处底片黑度的增加,可以测定焊缝中所失去的金属量。但实际上,由于通常在现场射线照相法中所遇到的 X 射线技术和软

片冲洗方面的大量可变因素,就难以获得缺陷深度与底片黑度之间的关系。在三个焊缝中有已知的大于规程允许的缺陷,在它们的报废过程中,DOT 在缺陷深度测量中,采用了乘以系数  $\alpha$  [36],采用三种方法中最好的方法测定的缺陷深度,在将其数值列入可允许缺陷尺寸曲线时,都乘上系数  $\alpha$ 。当然,这个对缺陷尺寸所乘上的系数并不包括在可允许缺陷尺寸曲线测定时的不定因素之内。

当我们在产品性能分析方面的信心不断增长时,我们就需要更为可靠的测定缺陷尺寸的 NDT 方法。这将随之而产生 NDT 标准的变化。回到输油管道焊缝的例子来说,标准方面的变化可能包括只允许采用较小范围的 X 射线能量,胶片冲洗能力的保证(或许采用定期冲洗黑度试验片的要求),或采用一片厚的带槽的象质计 (IQI),以校准每张底片上材料厚度与底片黑度之间的对应关系(如参考文献 [37] 中 Konkoly 与 Tarnay 所建议的方法)。这些变化将使我们对从 NDT 检测中(在此例中则是射线照相法)所测得的缺陷尺寸产生信心,并可能减低那些用于应付不定因素所乘上的系数。

在管道环焊缝的特定例子中,美国现在已开创了一个先例,即放弃那些建立已久并根据工艺制定的规程,而利用断裂力学分析去决定可能达到的产品性能。制订法规的单位,例如美国石油学会,明显地倾向于允许采用这种改变的方法去评价产品性能。

## 结 论

我们在 NDT 领域中工作的人需要更深入地了解我们现在所应用的模型的局限性,以便 (1) 去评价被测试物与所施加的 NDT 能量型式之间的相互关系,以及 (2) 从 NDT 检测中取得定量的资料。这种新的理解将产生更进步的 NDT 方法和标准。这些因素又会相应地有助于使 NDT 提供这类资料,即当先进的产品性能分析方法完善地建立起



来后肯定需要的资料。这种情况已经在输油管道的焊缝检验中遇到,如本文所述的例子,並发生在其它工业如宇航和原子能工业中。由于产品性能分析方面取得的飞速发展,我们在 NDT 领域中工作的人,不应在发展各种能提供有关缺陷类型和尺寸的可靠资料的工作中损失任何时间。

无损检测是一个相对新发展的领域,尚未被长期的传统、习惯和投资所压抑(例如在测量长度和质量的系统中的情况)。因此,国际标准相对说来尚易于实现。在旅行和国际贸易相当方便而使世界变得更小的情况下,为了达到更为一致的评价,我们必须作好工作,以获得有意义的国际化 NDT 标准。並且,需要去支持国家负责的,以及如 IIW 和 ISO 等国际组织负责的重要的标准化工作。如果你们中间谁有 NDT 方面的知识,就应对解决 NDT 标准这个重要问题作出贡献。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Berger, H. and Smith J. H., "Consideration of Fracture Mechanics Analysis and Defect Dimension Measurement Assessment for the Trans-Alaska Oil Pipeline Girth Welds," Report NBSIR 76-1154, National Bureau of Standards, Washington, DC (1976).
- [ 2 ] AFNOR NF A04304 1958. Radiographic Examination of Steel or Cast Iron Parts Not Exceeding 180 mm Thickness: Image Quality Indicators, Association Francais de Normalization (1958).
- [ 3 ] B. S. 3971. Specification for Image Quality Indicators for Radiography and Recommendations for Their Use, British Standards Institute (1966).
- [ 4 ] DIN 54109. Nondestructive Testing. Image Quality of X-ray and Gamma-ray Radiographs of Metallic Materials, Deutscher Normenausschuss (1969).
- [ 5 ] ISO Recommendation R1207. Radiographic Image Quality Indicators, Principles and Identification, International Organization for Standardization (1969).
- [ 6 ] GOST 7512-75. Non-destructive testing. Welded Joint Radiography Method, Gosvdarstviennye Komitat Standartovt (1976).
- [ 7 ] ANSI/ASTM E 142-77. Standard Method for Controlling Quality of Radiographic Testing, American Society for Testing and Materials (1977).
- [ 8 ] ANSI/ASTM E 242-68. Standard Reference Radiographs for Appearances of Radiographic Images as Certain Parameters Are Changed (1974).
- [ 9 ] ANSI/ASTM E 186-75. Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (2 to 4-1/2 in. (51 to 114 mm)) Steel Castings (1975).
- [ 10 ] ANSI/ASTM E 192-75. Standard Reference Radiographs of Investment Steel Castings for Aerospace Applications (1975).
- [ 11 ] ANSI/ASTM E 272-75. Standard Reference Radiographs for High-Strength Copper-Base and Nickel-Copper Alloy Castings (1975).
- [ 12 ] ANSI/ASTM E 280-75. Standard Reference Radiographs for Heavy-Walled (4-1/2 to 12-in. (114 to 305 mm)) Steel Castings (1975).
- [ 13 ] ANSI/ASTM E 310-75. Standard Reference Radiographs for Tin Bronze Castings (1975).
- [ 14 ] ANSI/ASTM E 390-75. Standard Reference Radiographs for Steel Fusion Welds (1975).
- [ 15 ] ANSI/ASTM E 446-75; Standard Reference Radiographs for Steel Castings up to 2 in. (51 mm) in Thickness (1975).
- [ 16 ] ANSI/ASTM E 505-75. Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Castings (1975).
- [ 17 ] ANSI/ASTM E 155-76. Standard Reference Radiographs for Inspection of Aluminum and Magnesium Castings (1976).
- [ 18 ] AFNOR ANO4-311. Produits Siderurgiques. Blocs Detalonnage Ex-

- men Par Ultrasons de Pieces en Acier (1964).
- [19] B. S. 2704. Specificatoin for Calibration Blocks and Recommendations for Their Use in Ultrasonic Flaw Detection (1966).
- [20] ISO 2400. Welds in Steel-Reference Blocks for the Calibration of Equipment for Ultrasonic Examination (1972).
- [21] DIN 54120. Non-destructive Testing. Calibration Block 1 and Its Use for the Adjustment and Control of Ultrasonic Echo Equipment (1973).
- [22] DIN 54122. Non-destructive Test ing. Reference Block 2 and Its Use for the Adjustment and Control of Ultrasonic Echo Equipment (1973).
- [23] ASTM E 164-74. Standard Recommended Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments (1974).
- [24] ANSI/ASTM E 127-75. Standard Recommended Practice for Fabricating and Checking Aluminum Alloy Ultrasonic Standard Reference Blocks (1975).
- [25] GOST 21397-75. Non-detructive Testing. Set of Standard Samples for Ultrasonic Testing of Aluminum Semi-Finished and Finished Products. Basic Parameters and Technical Requirements (1975).
- [26] GOST 14782-76. Non-destructive Testing. Welded Joints. Ultrasonic Method (1976).
- [27] ASTM E 428-77. Standard Recommended Practice for Fabrication and Control of Steel Reference Blocks Used in Ultrasonic Inspection (1977).
- [28] B. S. 4331. Methods for Assessing the Performance Characteristics of Ultrasonic Flaw Detection Equipment. Part 3. (1979).
- [29] Eitzen, D. G. and Birnbaum, G., "A Systematic Approach to Ultrasonic NDE Standards," National Bureau of Standards report, to be Published
- [30] Feaver, M. S., "The Measurement of Radiograph Image Quality." Non-destructive Testing, Vol. 1, No. 3, pp. 173-182 (Feb. 1968).
- [31] Criscuolo, E. L., "Correlation of Radiographic Penetrimeters." Materials Research & Standards Vol. 3, No. 6, PP. 465-471 (June 1963).
- [32] Halmshaw, R. "Physics of Industrial Radiology," Chapter 9, Sensitivity and Image-Quality Indicators, Heywood Books, London (1966).
- [33] Foster, B. E., McClung, R. W. and Davis, E. V. "Penetrimeter Sensitivity and Crack Detectability After Degradation of the Radiographic Procedure," Oak Ridge National Lab Report ORNL/NUREG TM-273 (March, 1979).
- [34] Meyer, H. J. "Relation Between Ultrasonic Indicatons and Flaw Size in Pressure Vessel Welds," Babcock & Wilcox-TUV Conference on NDE, Washington, DC, November 18, 1976.
- [35] Draft Standard Rules for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints (Document 75/77081, DC), British Standards Insitution Technical Committee WEE/37-Acceptance Levels for Welds, February 1976. British Standards Institution, London.
- [36] Barnum, J. W., "Decision on Petition for Waiver of Girth Weld Regulations." Federal Register 41, no. 233 (1976):52933-40.
- [37] Konkoly, T., and Tarnay, G. Y., "The Possibility to Determine the Deepness of the Defects Based on the Radiogramme by Means of Etalons." Paper 3E9. Presented at the Eighth World Conference on Nondestructive Testing, Cannes, France, 1976.

陈祝年 译 王务同 校

# 在无损伤检测中用于产生、耦合和接收超声的非常规方法

(西德) Josef Krautkrämer

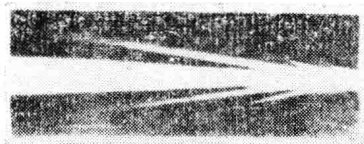
〔摘要〕 由于大自然的恩惠，材料的超声检测付之实际应用三十多年来，直至今日，超声检测几乎还是百分之百地依靠压电产生超声和液体耦合。但这一方法本身还存在不少问题或缺点，可以采用完全不同的方法来克服。如采用干接触法和允许探头与被测物体间保持一定距离的方法。这些方法可以作为课题来研究，由于这些技术也有缺点，在实际中只能应用于很小的范围，但遇到问题时应该考虑这些方法。本文因此要研究这些方法的物理原理和实际应用问题。

三十年前在有关材料超声检测的会议上宣读过的少数论文，至今仍象空中楼阁那样地具有吸引力。目前，它们已经构成了无损检验方法中的极大部分。更令人惊讶的是，在大多数的手工检测应用中，即使在今天我们仍然采用着和那时所用的基本上相同的简单手段，而所做的只不过是某些不重要的改进而已。到处都仍在使用着那些优良的老材料：石英圆盘，也许还有有机玻璃延迟块。石英圆盘与被测物体直接接触，它是耐用的和低廉的。目前，探头的种类比以前多得多，它们的灵敏度和分辨率等性能也更好了。检测系统的尺寸则已大大减小。然而，为什么在那个时候就已经能够用简单的手段来满足各种工作的需要？

显然其中的一个原因是：由于偶然巧合，在被测试的材料（其中的不连续性是我们所关心的）中声衰减很小，因而从一个小接触面积所通过的声束具有很强的方向性，并能传播若干米的较大距离。对于几乎所有的问题，1~5 MHz 的频率范围是足够的。几乎所有的情况下，一个 25mm 直径的晶片可以得到良好的耦合。在另一方面，被探测的缺

陷尺寸很少小于一个波长，即在 1mm 左右，因此它们仍能产生良好的回波。当然，在原则上这可能是不同的：在方向性、衰减、和缺陷信号高度等三者之间取得良好统一的频率窗口，可以小得多。

为了提醒注意，图 1 示出了某些探头在钢中所产生的声波瓣图。如果我们记着即使在三倍近场距离的地方，声压幅度仍近似等于靠近探头前方的声压值，我们将可看出一个非常方便的接触晶片所能产生的实际的探照灯作用。此外，横波具有良好的性能而且产生的方法简单。因此，根据需要声波可以垂直或倾斜入射至被测物体。



一个超声探头的声场（相同的颜色 = 相同的声压）

（根据 E. Hiedemann 和 K. Osterhammel）KRAUTKRÄMER

图 1 一个换能器的声场

由于自然界所提供的优越条件，我们显然可以不必再进一步发展探头和检测系统，而本文也将是不需要的。然而，物理学家在任何时候都在窥视着猎取新的目标，这还可以解释为：即使是尚待特殊发展的罕有检测问题，也有可能变得相当重要。

在下述的讨论中，还应注意避免采用传统方法中的湿耦合方式。因为在应用高速自动化检测方法，尤其是检测高温物体时，这种方式更会成为严重的问题，这里暂且还不提在空间中的检测问题。而且，超声材料检测人员都是一些具有高度才智和责任心的人，他们实际上不喜欢弄脏手。显然，如果他们的手和衣服不是经常弄得很油腻，将更容易使他们坚持工作。他们的担任射线和涡流检测工作的同事们，在这方面条件当然要好一些。

图2示出许多物理效应中的一部分，在个别的实际应用中它们有取代压电的希望，其中大多数采用干耦合。它们之中，有的只能用于发射或只用于接收，因而必需与其它方法合用。

效 应	机械	光学		电 磁		磁致伸缩 (磁弹性)
		声学 (激光)	光 学	有磁场	无磁场	
发射器	○	○		●	○	●
接收器	—	—	○	●	—	●
耦合方式	○				○	
干	○	○	○	●	○	●

● 已在使用中      ○ 可实现,但尚未使用

图 2 某些非压电方法

## 机械效应

虽然声是一种机械现象，然而产生声的各种机械方法，诸如敲击、擦刷、碾磨等等，对于我们来说是不大有用的。虽然，有时它们能够产生极强的超声波，但是波的频带很宽，一直低达可听声域，而且大多是无方向

性的。例如它们曾被用于检测混凝土，与其他方法(也是压电的)结合在一起作为接收之用，然而没有获得多大的成功。在声发射方法中，曾经一度把放在表面上的硬石墨给以固定的敲击或将其击碎作为推荐的标准信号。短促而强烈的气体爆炸也已被用来产生上升时间极短的脉冲<sup>[1]</sup>。

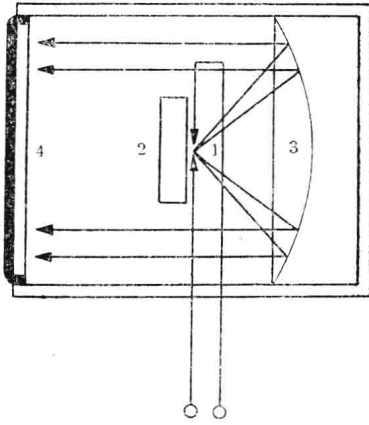
作为接收整个图象之用，Pohlmann 箔片槽曾经一度起重要作用，它是基于悬浮在液体中的盘形金属箔片的机械排列作用。目前，液晶有某些成功的指望，它会在声波的影响下发生变化。不过遗憾的是，如此这般接收方法的低灵敏度仍然使超声成像方法造成困难。

## 热 效 应

当急速加热时，热效应使物质膨胀，从而产生超声冲击波。首先是火花放电，特别是水下打火花。它的声输出很强，但是由于声源呈点状或线状，声输出是无方向性的。采用如图3所示的设计，可以制成一个具有良好方向性的探头，但是它又必需和被测物体作湿耦合。然而，如果检测时采用水浸法，如医学超声检查时那样，也可以使用无方向性的声波，同时使压电接收器保有必要的方向性。据说采用这种装置已经获得了高分辨率和适当的灵敏度<sup>[2]</sup>。火花放电的缺点是：蚀损问题和脉冲在幅度及相位上的不断变化(跳动)。

借助于激光，目前已能用类似于汽化等离子体的爆炸，就象在打火花和真正的爆炸时那样，有选择性地产生超声冲击波<sup>[3,4]</sup>。也可以使用粒子射流<sup>[5]</sup>。当射流对复盖着液体薄膜的吸收性表面进行冲击时，可得到最佳的效果，而且对于干表面这种效应也还是存在的。由于激光的效率极高以及脉冲极短，要产生足够的超声能量是不成问题的。然而，大功率激光器不是解决问题的方法，因为它

将使表面受损。



1-火花隙, 2-反射体,  
3-抛物面反射体, 4-橡皮膜。

图3 带火花隙的超声换能器

当受冲击的面积小时, 将产生无方向性的“白色”声脉冲。但是, 也可用透镜任意地扩大激光束。于是, 一个区域将被激发, 并且象压电园盘那样地对被测物体垂直地发射纵波, 不过这时所发射的是“白”超声。其中的高频成份将被聚焦。在声波的方向上, 自然焦点变得模糊起来。即使激光束是倾斜地冲击表面, 声束仍将与表面保持垂直, 这是由于光速比声速快得多, 因而表面上的各部分实际上是同时被激发的(图4)。弯曲的

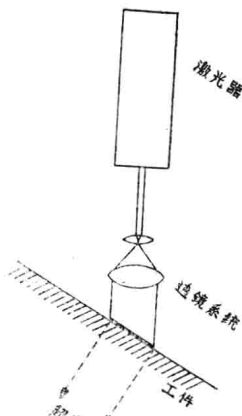


图4

表面具有和曲面晶片一样的效果, 也就是说, 其作用如同透镜。只要空气对激光的波长是

足够透明的, 激光器的距离实际上是无紧要的。仅在远红外范围内当距离达数米时, 才会产生某些吸收作用。否则, 激光的频率也是无紧要的。对于所有的波长, 在金属中的吸收是足够高的。表面光洁度的关系不大, 因此它不一定需要是光亮的。

脉冲宽度取决于激光脉冲发生器。老式激光脉冲发生器所产生的脉冲宽度, 可以和压电方法所产生的冲击脉冲相比拟。借助于锁模激光器, 可以获得短得多的脉冲, 其上升时间为微微秒级, 而脉冲宽度为毫微秒级。这种激光器以极高的重复频率(约10 MHz)产生大约包含10~100个脉冲的波列。从这些脉冲中我们能够过滤出一个单脉冲, 并将其用作原始脉冲。图5给出剃须刀片所产

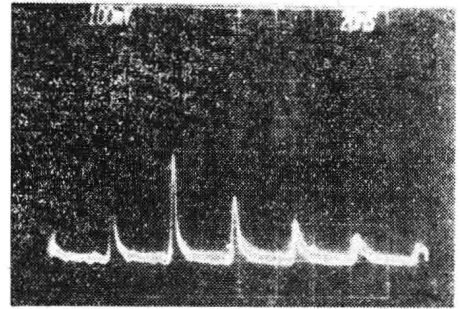


图5 来自剃须刀片的多次回波的示波屏图形

生多次回波的示波屏图形。当然这些脉冲不同于一般超声仪器中所出现的整流射频脉冲(视频图形), 它们所表示的是实际的声压响应。它们是用下面将讨论到的激光方法来接收到的。图6表示一个单脉冲。分辨1/10mm

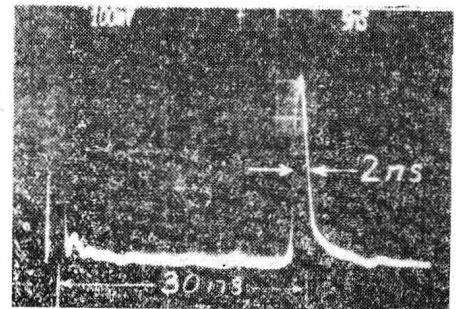


图6 单个脉冲



的厚度，将不会有什么问题！这种冲击波的中心频率范围在50~500MHz之间。材料中的固有衰减起着低通滤波器的作用，它决定着在个别情况中的实际中心频率。这里，激发面积约为1/10mm直径的圆面积。虽然这个面积是这样小，而声束基本上被聚焦在10~20mm处，即与一个10mm直径、5MHz的探头相似。因此，可以获得极其狭窄的声束，它可能为某些新的检测问题提供解答。Kaule在这方面所取得的成功见文献[6]。

激光脉冲非常适用于产生沿垂直方向传播的纵向冲击波。在波束中放入一个栅格，其间距等于所需要的表面波波长，便可得到由激发面积向两侧传播的表面波。但是，在这样做时，仍将保留一个很强的纵波瓣。只有借助于多个相控激光器，使它们连续地激发表面上的栅格元件，才能够产生真正的倾斜波。

## 光 学 法

如果把激光脉冲发生器算作热学法，那么其余的光学法只能作为接收方法。在光学法中，我们利用了超声波对光所产生的某种效应。因此，在激光接收器中，激光所起的作用和激光脉冲发生器不大相同。它只需较小的能量并连续地工作，或者为了节省能量以长脉冲形式工作。

当超声表面波在一个光亮表面上传播，而一个光束射至此表面时，其反射角将在超声频率作用下稍受调制。表面的作用如同摆动的旋转镜。在这方法中使用激光器并不绝对必要<sup>[7]</sup>。当表面在纵波作用下呈活塞形激发时，可将光束聚焦至表面上的一点。由于表面上的位移，使反向散射光强度稍受调制。在上述的任一情况中，借助于光电管，超声波幅度将被显示为亮度调制。由于要求很高的表面光洁度，这种方法实际上还没有起过任何重要作用。

按照Kaule<sup>[8]</sup>的意见，最好用迈克耳孙干涉仪来测量反射波的相移(图7)。一部分激光束被表面所反射，它和激光束的另一部分——即参考光束——产生干涉。如果表面振幅为1/4光波长，则光电管将按照超声波的周期接收到交变的光亮和黑暗。这可以如同用普通的探伤仪那样将其显示为A型扫描图形。

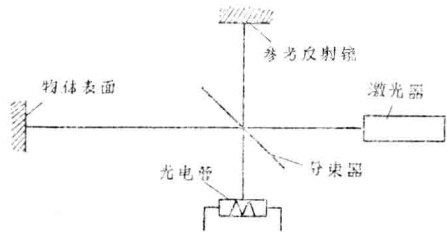


图7 用带有激光束的迈克耳孙干涉仪来接收超声

在实用上这种方法是并不重要的，由于整个被照明的表面积上的相位必须相同，这便要求表面必须是非常平滑的。

图8示出在原理上与前不同的一种干涉

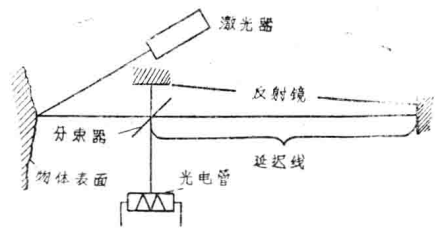


图8 带有延迟时间的干涉仪来接收超声

仪装置，它可用于任何性质的表面。其参考光束也来自反射的或反向散射的激光。而另一部分光束则在行进时间上被延迟后，再和第一个光束发生干涉。假如调整延迟量使等于波长的整倍数，则如果被测物体表面在延迟时间内是静止的话，两个光束将是同相的。譬如说，这时光电管所接收到的是光亮。那么当表面运动时，相位偏移随着超声频率而变得忽大忽小，从而产生了亮度调制。当表面移动了刚好1/4光波长度，而第二个光束的延迟时间又刚好等于半个声振动周期时，调



制深度达到最大，即亮度完全消失。但是即使位移和延迟时间较小，也可产生足够的调制，使我们能够测出声波的幅度。所以表面可以是倾斜的或不平的。

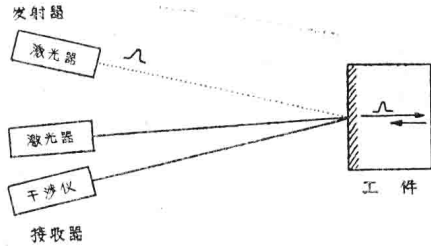


图 9

因此，如图 9 所示，两个激光器照射至同一点。图 5 和图 6 所示也是这种情况。

两个激光器可以相距数米。到现在为止，这种方法是唯一真正的非接触和干耦合方式。对于大多数的实际应用而言，普通激光器的较长脉冲是适用的，不过它们的功率应当是每平方毫米的辐射面积为 1 毫瓦的数量级。不过遗憾的是，这种方法仍然非常昂贵，以致眼前还不能看到它的工业应用。

光学还能提供许多其它接收超声的方法，如施利仑法、超声光衍射、光弹效应(固体中声波所产生的双折射)、等等。但是在所有这些方法中，首先必需通过液体将超声从被测物体耦合至测试槽。但是无论如何，一个优点是，超声脉冲不会因频率滤波器而发生畸变。当使用先进的光电二极管以及采用大功率激光二极管作为光源时，其灵敏度甚至可以比压电接收器的还要高。这种接收探头的大小可以做到和普通接收器差不多。然而，上面已经提到过的那些性能，至今还不足以使它们代替传统方法。

## 电磁效应

首先我们根据表 2 和图 10~13 来说明基本原理，然后再谈实际应用。

第一类是电动力法(也称为涡流声法)，

它采用一个线圈和超声频激励以便在被测物体的表面上产生涡流，为此被测物体必需是导体。涡流所进入的体积元被一个移动力—即 Lorentz 力所吸引。在图 10a 中，在磁铁极靴之间放置激励线圈，在它的绕组中电流都是同向的，磁铁所产生的磁感应  $B$  平行于表面。作用在涡流因子  $g$  的体积元上的吸引  $F$ ，方向是垂直的。因而，绕组平面之下的表面将发射出纵波。线圈绕组闭合在表面以外的无磁场空间。

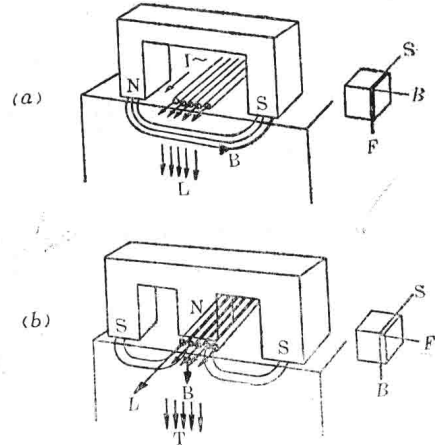


图 10 由电动力效应(Lorentz 力)产生纵波(a)和横波(b)

在图 10(b) 中，线圈放置在极靴之下，因而在垂直于表面的磁场中产生了涡流。这时作用力的方向是平行的，因而产生了垂直地穿透表面的横波。同样的，线圈又必需在表面以外闭合。如果激励线圈排列得足够紧，则在上述的任一情况下都能产生具有通常方向性图形的超声波束。

但是更简单的方法是，将一个饼式(扁平)线圈放置在图 10(b) 中的极靴下面。当然这时所产生的声束是相当特殊的，它是圆偏振的横波波束，而且对于轴线是径向对称的。在近场中的轴线上声压也等于零，因为在线圈中心的激励相互抵消成为零。但是对实际应用而言，这却并不是缺点。为了在干耦合情况下产生或接收垂直方向的横波，这样配置是重要的，因为大家都知道，这在压电方

法中将是困难的。

如图11所示，在不使用叠加磁场的情况

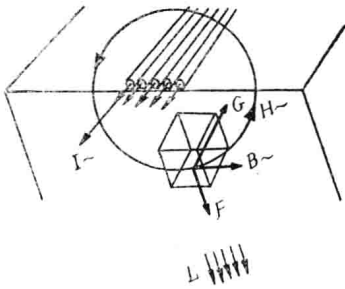


图11 不用叠加磁场时，由电动力方法产生声波

下，涡流也能产生声波。激励线圈在材料中也产生磁感应，一种交变的磁感应。于是就产生了垂直于表面的力  $F$ 。它可以和带有相反方向电流的两个线圈所产生的相互排斥力相比较。当磁感应  $B$  和涡流力  $g$  以相同的频率振荡时， $F$  的方向将保持不变：超声振动的频率将是此频率的二倍。同样的在这里也可以采用饼式线圈。不过它的作用是非常弱的。为了获得适当的声振幅，电流必须很强，最好利用火花放电来产生(图12)。对于导

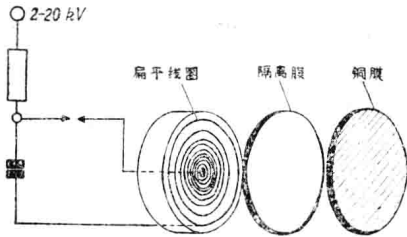


图12 不使用叠加磁场产生超声纵波的磁性发射器

电材料，这个方法是真正的干耦合发射方法。但是作为接收器时，磁场是必不可少的。在一个预先安装好的铜盘中可以产生强得多的效应，这是由于铜的导电率比钢大的缘故。这样就构成了纵波探头，然而这种探头却又要求液体耦合。采用这种方式可获得比压电方法大得多的超声输出，特别在约 100 kHz 的低频范围。当与另一种接收方法合用时，这种探头可以用于检测，例如检测混凝土。

在电磁方法中还有一种未提到的，就是用于铁磁材料的磁致伸缩法，如图13所示，它是用于发射的。在同样的装置中，我们可以利用磁弹性效应作为接收之用。磁场会使铁磁材料中沿磁场方向产生长度变化，因此，交变磁场将产生声波。在图13所示的装置中，产生的切向力  $F$  导致了垂直方向的横波。当没有直流磁场时，工作点将处于磁致伸缩曲线上的零点，这样一个交变磁场将产生二倍频率的声波。如果将工作点移至曲线中的最陡峭部分，便可获得大得多的振幅，也避免了倍频作用。

比较图13和图11，可以看出，在磁致伸缩材料中将同时产生一个弱的纵波(根据图11)和一个强的横波(根据图13)。无论如

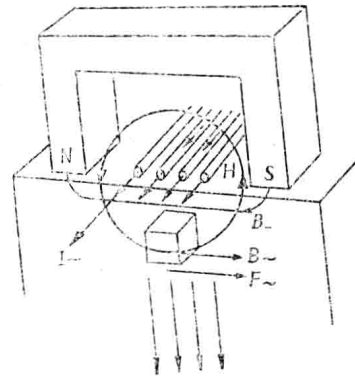


图13 用磁致伸缩方法产生声波

何，在电磁方法中出现不同类型声波的情况要比压电方法中多。

至今为止，只讨论了利用电磁方法来产生垂直入射的纵波或横波的装置。然而对于指向波(板波或表面波)而言，则需要倾斜入射的纵波或横波。它们可借助于分立的绕组而获得，这些绕组各自独立，作用象阵列。例如在图13中，如果令被测物体表面上的各个激励导体之间保持均匀的间距，并使此间距等于表面波波长，那么除了垂直方向的横波之外还将产生垂直于线圈并向两边传播的表面波。如将间距减半并使用在绕组中往返的激励电流，也可得到同样的效果。如采用其

它的间距,则除了主波瓣之外还要产生倾斜的横波或纵波部分。为了获得无方向性的声波,必需依次地对各个线圈包进行激励,也就是说,以移相方式激励(相控阵列)。

用电磁法产生倾斜的辐射时,由于入射角度的原故,所以从阵列的近端至远端,行进时间很不相同的各个部分都相加在一起,因而它的分辨率要比压电方法的差。起始脉冲应当具有较大的宽度,这样才有可能在一切方向上产生。对于指向波,特别是板波,这并不是缺点,因为一个长脉冲(即狭带脉冲)能够更清楚地激发出各别的波型。

采用相控阵列,可以得到象用压电方法所产生的那种较短脉冲。

除了不使用磁场的电磁激励方式外,在原则上所有的方法都可用于接收。虽然如此,通常还是采用独立的线圈来接收回波信号,这样对于发射电路和接收电路可以得到较好的匹配。使用错开 $1/4$ 波长的双接收线圈,还可以得到具有特殊形状的单向接收特性<sup>[9]</sup>。

很久以前就已经在实践中应用电磁方法在管状、棒状、和板状钢材中产生导波。利用磁致伸缩效应,可以容易地获得长量程和高灵敏度<sup>[10]</sup>。对于固定的测试设备而言,装有磁铁的庞大探头以及对大能量的需求都不是主要的缺点。在较早的阶段,就已将探头的激励线圈排成阵列的形式来对表面进行检测。当使用板波时,Licht和Salzburger<sup>[11]</sup>在这方面是相当成功的。如果改变激励频率,则在使用固定的阵列时,我们却能使自由声束摆动。对于导波而言,这就表示,不必改变波长就能从一个波型改变成另一个。因此,在板波检测中关于如何区分中间缺陷和表面下缺陷的老问题,已即将解决。

为了产生和接收自由声波,Mohr和Repplinger<sup>[12]</sup>改进了电动力探头。其目的

是对焊缝(例如,也可以对奥氏体钢的焊缝)进行非接触的斜声束扫查。即使在某些情况下回波脉冲仍比压电探头的宽,而灵敏度(用增益余量测量)则有时较高:对于钢为65dB,对于奥氏体钢为55dB。(增益余量是在最大背壁回波和噪声电平之间测量的。)如图10a和10b所示,用大约 $40^\circ \sim 65^\circ$ 的各种角度的探头,对于复盖厚壁焊缝是合适的。不再需要多久这种方法就可在实际中应用,特别是用于自动化检测,例如对核反应堆的检测,这时较大的重量以及能量消耗都将不成为问题。

对于手工检测,这种方法将首次被应用于在热表面上进行壁厚测量。为此用途的一些系统已经成为商品(图14)。它们采用了电

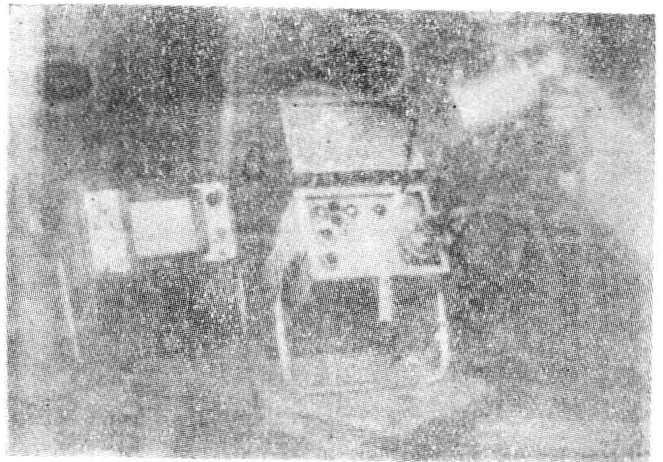


图 14 Wells-Krautkrämer 公司的 EMA 1 型仪器

磁铁,因为永久磁铁还不能达到所需要的10Oe以上的磁场强度。虽然探头有几Kg重,但是它们仍然是可以操纵的。设备中包括一台电池供电的常规探伤仪以及安放电池和磁化电流控制器的辅助单元。为了节约电能和防止探头内的温度过高,在定好位置和启动触发器之后,磁铁才被自动地激励仅0.5s。在这个时间内,可在示波屏上读出壁厚值,象目前所用的方法一样。线圈同时用于发射和接收,它的直径不大于6mm。因此,可以逐点地测量壁厚。对于平滑的壁,可测的厚