

中国机械工程学会无损检测学会 主编

国外无损检测

上海科学技术文献出版社

前 言

现代冶炼加工技术，要提供完全没有任何缺陷且又材质均匀的工件，实是极为困难。可是，材料内部的缺陷特别是对于承受高温、高压、高速运转等恶劣条件下工作的机件来说，乃是相当危险的隐患。

在现代工业中，特别是宇航、原子能、航空、冶金、机械制造等对于产品和服务的质量可靠性以及安全性已越来越离不开无损检测。

由于无损检测在国家工业生产中占有重要地位，因而，世界各国极为重视，自 1950 年比利时教授霍姆发起组织国际无损检测会议以来，迄今已举行了九次会议。

为能借鉴国外先进技术，今选译日本无损检测标准；钢焊缝的超声波自动探伤方法；英国标准“无损检测”术语简介；切变波偏振对不锈钢焊缝探伤的影响以及利用 X 射线进行探伤等 14 篇国外无损检测文章，以供有关工程技术人员、大专院校师生参考。

编 者

一九八〇年十一月

目 录

切变波偏振对不锈钢焊缝探伤的影响	
〔美〕D. S. Kupperman K. J. Reimann	1
60° 斜角超声波法测定焊缝裂纹高度	
〔日〕小仓幸夫	17
利用波型转换的表面波测量内部缺陷尺寸的方法	
〔日〕小仓幸夫	29
以超声波滞后时间法判定裂纹尺寸	
金昌旭 编译	49
超声斜角探伤中圆盘状缺陷倾角的影响	
〔日〕小仓幸夫	60
超声斜角探伤中缺陷位置的判定精度	
〔日〕小仓幸夫	84
一种可供非破坏试验用的 150 kV 微焦棒式阳极 X 射线 装置	
〔荷兰〕L. A. Fontijn 〔美〕R. S. Peugevt	108
热交换器管子的厚度测量	
〔荷兰〕J. Boogaard	116
X 射线与放射性同位素在内部检查管道焊缝的摄影方法	
〔美〕B. E. Foster 〔R. W. McChung	122
增感屏-胶片接触不良对射线照片象质量的影响	
〔西德〕Thiele H. Praegler H. Kraeske W.	125
用电容传感器检测非金属材料的质量	

[苏] Matiss I. G.136

日本无损检测学会标准

钢焊缝的超声波自动探伤方法

NDIS 2407-76142

钢焊缝的超声波自动探伤方法的解释155

英国标准“无损检测”术语简介

BS3683 第1~5部分

一、渗透探伤174

二、磁粉探伤179

三、射线探伤185

四、超声探伤198

五、涡流探伤211

切变波偏振对不锈钢 焊缝探伤的影响

[美] D. S. Kupperman K. J. Reimann

前 言

对奥氏体不锈钢焊缝进行超声检验，由于与零件几何形状及真实缺陷无关的假信号干扰，往往使得检验结果难以解释。但是，在许多情况下又只能采用超声方法。近来，讨论了焊缝探伤中所遇到的严重衰减之类的问题。平行于枝晶长轴传播的声波可能会沿曲线路径导行。超声波束在焊缝-基体金属界面上的折射会引起回波定位的严重误差。沿枝晶长轴传播所遇到的晶界较少，因此，超声的散射衰减可以随传播方向而变化。

在不锈钢焊缝检验中遇到的问题是因为不锈钢焊缝不象铁素体钢那样在冷却时发生相变，结果，缓慢冷却导致焊缝中大晶粒(枝晶)的形式；枝晶不仅沿 $\langle 100 \rangle$ 方向长大，而且基本上沿散热线方向长大。由于散射与晶粒尺寸和波长的比值有关，因此，衰减可用产生较小晶粒的焊接技术来减小。但是，在检查粗晶焊缝时选用适当的声波型式也可改善探测的可靠性和灵敏度，因而，就得到一种大体上改进了的超声检验方法。

一、声学性质

超声波检验不锈钢所遇到的两个主要问题是粗大的树枝状

结晶和晶粒的择优取向。在弹性各向异性的材料(不锈钢)中,由于声阻抗的变化,与弹性各向同性材料(如钨)相比,总的说来,晶界散射使较大部分的能量耗散在界面上。

单晶体中声传播的特性,有助于理解从多晶体(如不锈钢焊缝)中得到的数据。弹性各向异性可以定量地用参数 A 来表示。 A 与单晶弹性常数(C_{11} , C_{12} 和 $C_{\psi\psi}$)的关系为:

$$A = 2C_{\psi\psi}/C_{11} - C_{12} \quad (1)$$

对于弹性各向同性材料, $A=1$ 。用 Matsumoto 和 Kumura 的数据, 304 不锈钢的弹性常数为:

$$C_{11} = 21.6 \times 10^{10} N_m^{-2}$$

$$C_{12} = 14.5 \times 10^{10} N_m^{-2}$$

$$C_{\psi\psi} = 12.9 \times 10^{10} N_m^{-2}$$

便得 $A=3.63$, 此数据高于钨的 $A=1$ 及锆的 $A=1.7$ 。在 304 不锈钢焊缝中, 由于有少量的 δ 铁素体存在, 因此, 304 不锈钢的弹性数值用于焊缝是不严密的。然而, 由于 δ 的百分数小 ($<8\%$), 而且 304 不锈钢的单晶与体心立方 δ 铁素体间的弹性数值相差不大 ($<10\%$), 所以, 净误差小于 1% 。

各向异性值指明在固体中, 哪一个结晶方向可能会出现最大的纵波速度, 即声速是沿单晶主轴方向传播的函数, 这可从下列关系看出:

$$\langle 100 \rangle \text{方向 } \rho V_L^2 = C_{11} \text{ 纵波}$$

$$\rho V_{T1}^2 = \rho V_{T2}^2 = C_{\psi\psi} \text{ 横波}$$

$$\langle 110 \rangle \text{方向 } \rho V_L^2 = 1/2(C_{11} + C_{12} + 2C_{\psi\psi}) \text{ 纵波}$$

$$\rho V_{T1}^2 = C_{\psi\psi} \text{ 横波}$$

$$\rho V_{T2}^2 = 1/2(C_{11} - C_{12}) \text{ 横波}$$

$$\langle 111 \rangle \text{方向 } \rho V_L^2 = 1/3(C_{11} + 2C_{12} + 4C_{\psi\psi}) \text{ 纵波}$$

$$\rho V_{T1}^2 = \rho V_{T2}^2 = 1/2(C_{11} - C_{12} + C_{\psi\psi}) \text{ 横波}$$

式中 V_c 为纵波速, V_t 为横波速度; ρ 为材料密度。最大和最小声速沿主轴产生^[7]。比较

$$C_{11}, 1/2(C_{11}+C_{12}+2C_{\psi\psi}) \quad \text{及} \quad 1/3(C_{11}+2C_{12}+4C_{\psi\psi})$$

以决定最大和最小值的方向。比较这些关系式证明: 假如

$$1/3(C_{11}+2C_{12}+4C_{\psi\psi}) > 1/2(C_{11}+C_{12}+2C_{\psi\psi})$$

或
$$2C_{\psi\psi}/(C_{11}-C_{12}) > 1$$

或
$$A > 1,$$

$V_{L_{111}}$ 是最大值。对于 304 不锈钢, $A > 1$; 因此, 最大纵波声速出现在 $\langle 111 \rangle$ 结晶方向, 最小值出现在 $\langle 100 \rangle$ 方向, 因:

$$\frac{2C_{\psi\psi}}{C_{11}-C_{12}} > 1$$

$$C_{11}-C_{12} < 2C_{\psi\psi}$$

所以:
$$2C_{11} < C_{11}+C_{12}+2_{\psi\psi}C$$

即:
$$C_{11} < 1/2(C_{11}+C_{12}+2C_{\psi\psi})$$

$$\rho V_{L100}^2 = C_{11} < \rho V_{L110}^2 = 1/2(C_{11}+C_{12}+2C_{\psi\psi})$$

对于具有择优取向织构, 也就是说对于具有各向异性声特性的结晶材料, 焊缝的纵波速度极值可从单晶性质来估计。相似的变量可用于切变波。对于切变波, 要考虑的另外参数是波的偏振。注意, 两个相互垂直偏振的切变波可沿任何结晶方向传播, 只有在 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 方向两个切变波的速度才相等。在所有其它方向两个切变波以不同速度传播, 在 $\langle 110 \rangle$ 方向偏差最大。由于波长 λ 和频率 f 的关系是:

$$\lambda f = V$$

其中 V 为声速, 所以, 对给定的频率 f , 两个切变波的波长 λ 不等。在 $\langle 110 \rangle$ 方向两种横波有最大和最小的切变波速度^[7]。各种偏振波在无择优取向的细晶粒试样中传播后其速度平均化,

介于极值速度之间。这时，只能测出一个切变波和一个纵波的速度。

对于具有择优取向的材料不必观测其结晶的平均值。由于切变波以不同的速度传播，所以，依赖于偏振而变的不同平均速度，波长(和衰减)的单个切变波可以在择优织构材料中观察到。材料的弹性各向异性值越大，不同偏振面的横波在该物质中传播时可能产生的速度差就越大。对于304不锈钢，当取

$\rho = 7.9 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ 时，横波速度的极值为：

$$V_{t_{\max}} = 4.04 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

$$V_{t_{\min}} = 2.12 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

测量了304不锈钢多晶体的速度，其值为：

$$V_{L_{\text{多晶}}} = 5.7 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

$$V_{t_{\text{多晶}}} = 3.14 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

这些多晶体的波速平均值在其波速极值平均值的3%以内。在 $\lambda > \bar{D}$ 时，由于超声散射与波长有关(这里 λ 为声波波长； \bar{D} 为平均晶粒直径)，衰减明显地随偏振而变，由于不锈钢具有极明显的弹性各向异性，所以超声衰减主要是由散射引起。散射的类型是^[6]：

(1) 瑞利型 $\lambda/\bar{D} \gg 1$

(2) 随机型 $\lambda/\bar{D} \sim 1$

(3) 漫散型 $\lambda/\bar{D} < 1$

对于瑞利散射，衰减系数 α 与波长四次方成反比^[6]，可写为：

$$\alpha = K\lambda^{-4}$$

对于随机散射

$$\alpha = K'\lambda^{-2} \quad (K' \text{ 为常数})$$

对于漫散射，衰减与波长无关。

就 304 不锈钢而言, 假如多晶体速度平均值取 3.14×10^3 ms^{-1} , 在 2.25MHz 时, $\lambda = 1.4 \text{mm}$, 由于焊缝存在枝晶要给出焊缝金属的平均晶粒尺寸很困难。但一般说来, 如果枝晶横截面不大于横波波长, 我们可以认为衰减与波长紧密相关。因此, 改变偏振就会影响超声衰减。

影响超声散射的另一个因素是, 在固体界面(晶界)上超声切变波的波型转换。假如偏振平行于界面则不产生纵波; 假如偏振倾斜于界面, 则产生纵波; 这时, 反射与透射纵波都可能出现。

因此, 随偏振方向不同而出现波型转换的差异, 会导致衰减与偏振有关。此外, 当声波在枝晶中传波时, 还可以观察到波导效应, 这时枝晶侧壁的内散射会导致异常的衰减特性, 这与声程长度及枝晶横截面与声波长之比有关^[9, 10]。还有, 在晶界上发生反射时, 纵波也会转换成切变波, 而切变波则不会转换成纵波, 除非入射角接近直角。因此, 由于声波的传播方向平行于枝晶长轴, 导行切变波可比纵波更有效地传播。

二、实验方法

试样取自 308 不锈钢焊条焊接的 304 不锈钢板, 尺寸为 $300 \times 150 \times 50$ 毫米, 夹角为 70° 。焊缝是“V”形多道金属弧保护焊焊缝。试样沿长度方向对切, 再从切开的一半上取出 $24 \times 25 \times 38$ 毫米的焊缝金属作超声检查, 如图 1 所示。第二块试样(图 2)用来验证切变波偏振对超声检测的影响。

图 3 是图 1 中焊缝试样六个面的显微图片。声速的数据是用 Panametrics 5053 型超声间隔测量仪, 利用脉冲回声重迭法获得的。探头是垂直入射的横波探头及纵波探头, 频率为 2.25

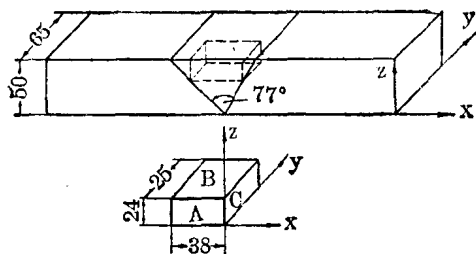
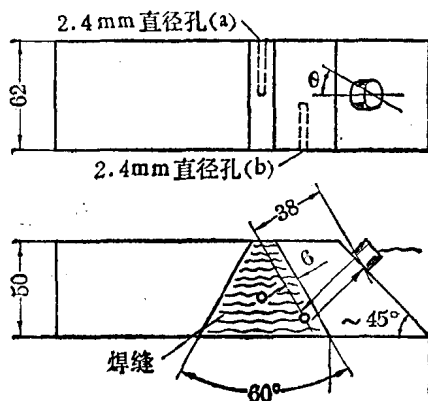


图1 用于测量声学性质的焊接金属试样



2.25 MHz 13 mm 直径的切变波换能器

θ = 偏振角 $\theta = 0^\circ$: SV $\theta = 90^\circ$: SH

图2 用于评价切变波偏振角对探测壁钻孔影响的不锈钢焊缝试样(基本金属 304 不锈钢, 焊接金属 308 不锈钢)

表1 308 不锈钢焊接金属的纵波声速

传播方向	声速 [$10^6 \text{ mms}^{-1} (\pm 0.02)$]	相对信号强度
x	5.69	中
y	5.63	中
z	5.43	强

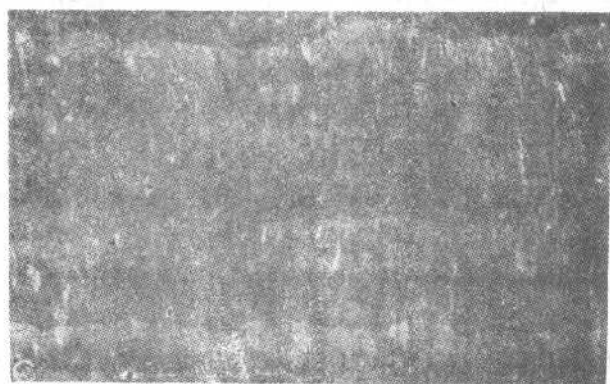
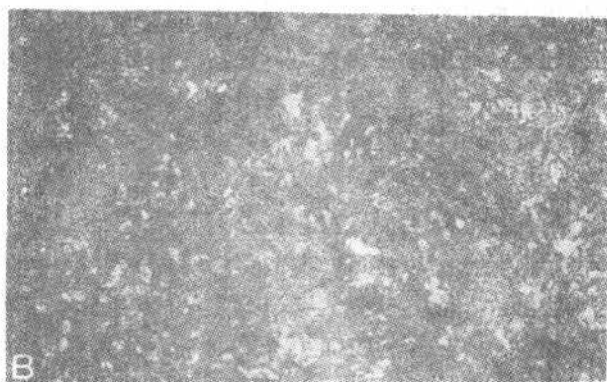
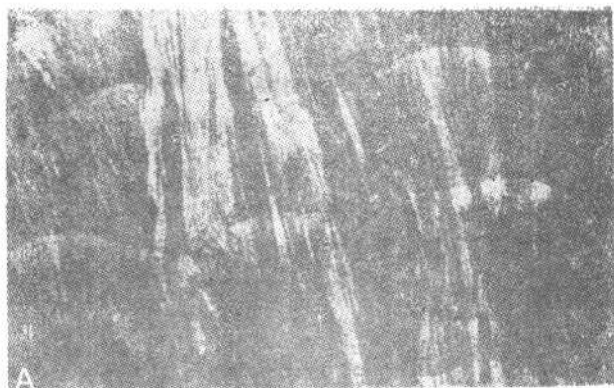


图3 图1中焊接金属试样显微图

MHz, 直径为 13mm。用 Panametrics No5070 型切变波耦合剂将切变波直接耦合到焊接金属中。同样用这些探头来探伤并用 Aerotech U7A3 脉冲接收系统及 Hewlett-Packard 141T 频谱分析仪作频谱分析。X 射线衍射技术用于估算焊缝试样的择优取向。试样各个面的 X 射线布拉格(Bragg)峰采用通用电气公司的 X 射线衍射仪记录。该仪器配有 Cu 靶 K_2 射线束 X 光管, 束截面为 60 平方毫米。

纵波和横波在试块(见图 1)中传播时, 它们的声速、衰减和频谱随传播方向的变化而变化。焊缝金属的显微组织如图 3 所示。同样还从焊板上取下后进行腐蚀、并用 X 射线衍射技术进行检查。所得结果在不锈焊缝探伤中都是有代表性的, 长度达 10mm, 截面 1mm 的枝晶也可以观测到。X 射线结果表明 $\langle 100 \rangle$ 择优取向是在 z 和 y 方向, 而 x 方向无择优取向。当然, X 射线衍射数据仅从被测试样表面获得。从表 1 纵波速度的测量结果可看出最低的纵波速度与 z 传播方向有关。如前所述, 纵波速度愈低, 结晶结构取向与 $\langle 100 \rangle$ 方向愈接近。这时的 X 射线数据表明, 在三个检查面中 y 方向有最强的 $\langle 100 \rangle$ 择优取向。但声速却是 z 方向最低。测量纵波声速来测定整体的结晶结构要比 X 射线方法优越。对横波声速也进行了测量(表 2), 假如 y 和 z 方向具有 $\langle 100 \rangle$ 方向的择优取向(如 X 射线衍射数据所表明的那样), 而 x 方向则没有。当切变波偏振方向分别为 z 与 y 方向并沿 y 与 z 方向传播时, 它们的速度在极大值上, 这是因为当波沿接近于 $\langle 100 \rangle$ 方向传播时(或 $\langle 110 \rangle$ 方向传播在 $\langle 100 \rangle$ 方向偏振时), 横波声速是在它的极大值上。从表 2 可以看出 y 与 z 方向传播的数据和 X 射线衍射数据很一致, 当波沿 x 方向传播时, 结果则明显地不一致。沿 x 方向传播时, X 射线指明没有择优结构。事实是传播着的快、慢切变波两者表明

表 2 308 不锈钢焊接金属的横波声速

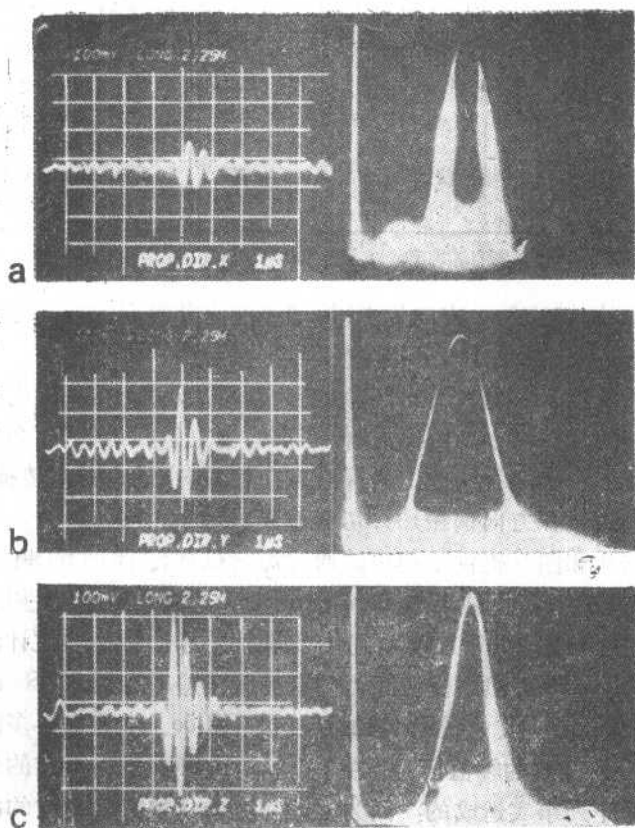
传播方向	偏振方向	速度 [10^6mms^{-1}](± 0.02)	相对信号 强度	平均速度 [10^6mms^{-1}]	速度差 [10^6mms^{-1}]
x	y	2.97	中	3.34	0.73
x	z	3.70	弱		
y	x	2.92	中	3.39	0.93
y	z	3.85	强		
z	x	(2.85) (3~9)*	弱	3.34	0.98
z	y	3.83	中		

* 两种切变波产生的信号都较弱

择尤结构。然而, x 方向的慢、快切变波之差没有 y 或 z 方向的大。这说明, 在 x 方向上很少发现择尤结构。

纵波沿 z 方向传播时, 观察到的衰减最小, 而在 y 方向传播时横波的衰减最小。因此, 要使超声检验灵敏度最佳化, 必须采用横波和纵波两种波型。沿焊道方向偏振(或沿 x 方向传播, 沿焊缝金属堆积方向偏振)时, 切变波衰减最小。

图 4 和图 5 提供了超声波通过焊缝试样传播时的频谱信息, 在定性分析上结果与 Serabian^[11] 的数据一致。纵波沿 x 、 y 、 z 方向传播时几乎没有看到什么差别。中心频率与估计的一样都为 2MHz。然而横波频谱却有显著偏差。在约 2MHz 时慢的切变波(图 5a、b)要比快的切变波(图 5c、e)有大得多的衰减。慢切变波的峰值信号发生在约 1MHz 时, 这时衰减的偏差可能是下列事实造成的: 因为慢的切变波比快的切变波的波长更短(因速度不同), 晶界散射更大。对任何的特定频率, 这就要产生更大的衰减。如所讨论的, 假如波型转换是个影响因素, x 方向传播 z 方向偏振(平行于枝晶)的切变波应比在 y 方向偏振的波衰减小。可是情况并非如此。还要注意表 2。尽管切变波速度随偏振角而变, 平均切变波速还是基本保持不变。



传播方向: $a-x$, $b-y$, $c-z$

图4 用2.25MHz换能器,脉冲回声法从焊接金属样坯获得的纵波高频信号及频谱

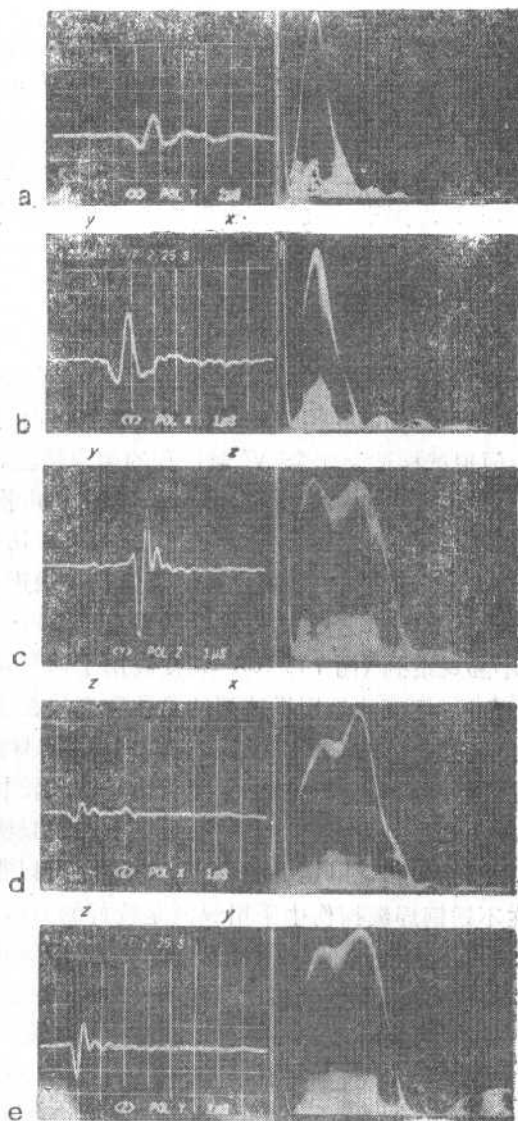


图5 用2.25MHz换能器,穿透法从焊接金属样坯中得到的横波高频信号及频谱

声传播特征的显著偏差,特别是切变波,指明了不锈钢焊缝的探伤不仅随波型(纵波或横波)而变化,而且采用切变波时,也随偏振而变。偏振可能是:仅有一种切变波被激发(慢的或快的),或者两种都激发,而它们的幅度都较小,当然两种切变波的存在使信号的解释更困难。直接向焊缝耦合切变波是个难题,因为它需要固体,如:赛璐珞或象本实验所用的粘性耦合剂,因此,应尽可能采用无接触的电磁超声换能器^[12]。

探测不锈钢焊缝中人工反射体的可能性,事实上受到试验中采用的切变波偏振变化的影响。试举两例,图2是试样的示意图。图中给出了切变波换能器的取向和用来指出两种切变波偏振的标志,模拟试样适于作全“V”形声程的超声检验。

用2.25MHz, $\phi 13\text{mm}$ 的Panametrics宽带超声换能器探测2.4mm的侧面钻孔,如图2所示(孔b)。用SH切变波(即所有质点运动都平行于反射平面时)孔的反射易与噪声相区别(图6)。可是,用SV切变波(即质点运动垂直于反射平面时),孔的反射则不易观察到(图7)。SV切变波用于通常切变波检验。在该检验中,切变波是用纵波型的晶体和楔块在楔金属界面上发生波型转换得到的。用2.5MHz, $\phi 13\text{mm}$ 的Gamma系列的纵波换能器(Aerotech制造的),尽管由于波长较长及振铃效应而具有较小的分辨力,也容易将孔的回波与背景噪声相区别(图8)。比较纵波和常用切变波(SV切变波)可以得出这样一个结论:在不锈钢焊缝探伤中采用纵波是较好的方法。然而,用SH切变波时,切变波与纵波却无差别。为了确定这些关系是否与声波传播方向及焊缝的显微组织有关,在同一焊缝的中心另钻了一个孔(图2中孔a),探伤时用垂直入射波。换能器放在试样底部(焊缝顶上),如图2所示。图9表示用SH切变波从孔上得到的高频信号(rf)。可见,信号与噪声清晰可分。图

10 表示用 SV 波时不出现孔的反射信号。纵波的测试结果示于图 11。信号与噪声虽然可以分辨，但不如用 SH 波那样清晰。用平行于焊道偏振的切变波探测侧面孔比垂直偏振的切变波更为有效。此结果与从焊缝样坯所得数据一致，这一数据说明平行于焊缝方向的偏振切变波衰减较小。为了比较起见，把所用的纵波换能器放在 45° 楔块上，用常用的切变波探测焊缝。从样坯上面或从下面进行检查时，都没有探出焊缝的中心孔，而

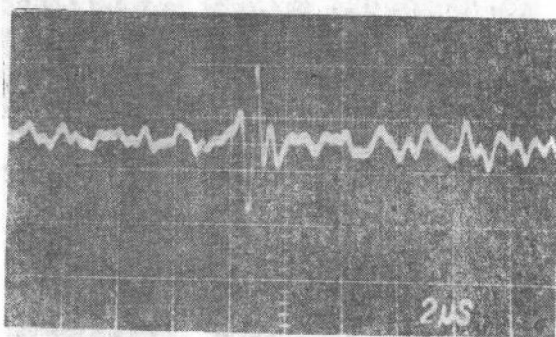


图 6 用 SH 切变波 (2.25MHz) 得到的在图 2 中示出的 2.4mm 直径孔 (孔“b”) 的超声信号

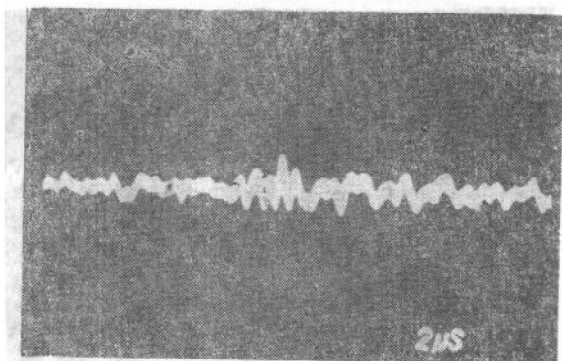


图 7 用 SV 切变波 (2.25MHz) 得到的图 2 中示出的 2.4mm 直径孔 (孔“b”) 的超声信号