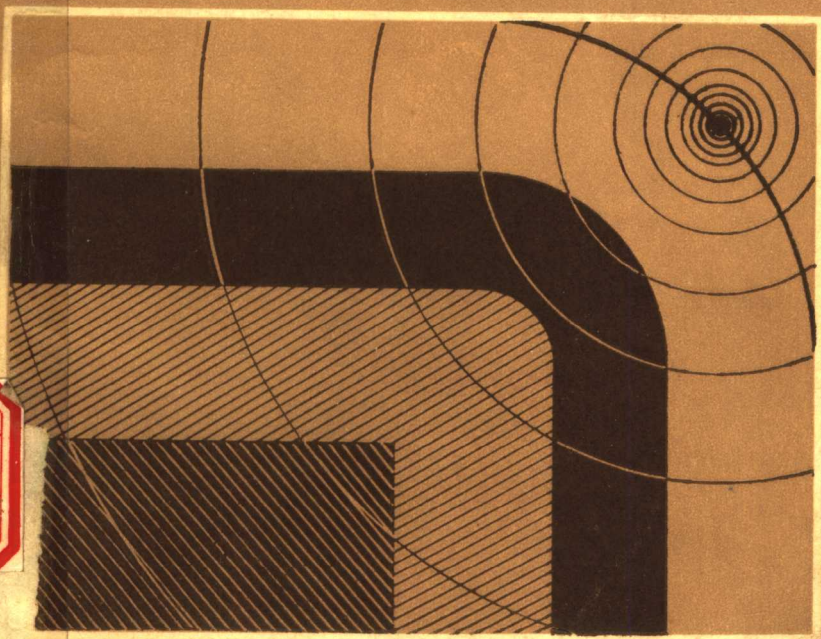


超声波探伤 经验

王文忠 译
郑家勋 王务同校
张玉美 编辑



译 者 话

· 为了促进我国无损检测事业的发展，适应广大无损检测人员在职培训的需要，学习国外先进的无损检测技术和经验，我们翻译了由西德无损检测专家H-W. Covsepius 博士所著的《超声波探伤经验》一书。

《超声波探伤经验》一书，详尽地阐述了超声波检测的原理、方法，并列举了大量应用实例，为从事超声波检测工作的人员提供了许多值得借鉴的经验。

本书理论联系实际，深入浅出，图文并茂，适合作超声波检测人员的培训教材，对从事超声波检测工作的技术人员，本书亦是一本不可多得的专业参考书。

鉴于时间仓促和译者的水平所限，错误和缺点在所难免，诚望有志于发展我国无损检测事业的同行们提出宝贵意见。

本书在校对出版过程中得到了陈永昌同志的大力支持，在此表示衷心感谢！

译 者

一九八六年一月

目 录

前 言

1. 为什么要进行超声波无损检测	(1)
2. 超声波检测的任务	(1)
2.1. 缺陷的检测	(3)
2.2. 缺陷的定位	(6)
2.3. 缺陷的评价	(8)
2.3.1. 扫查法	(9)
2.3.2. 信号最大值的评价法	(10)
2.4 缺陷类型的判别	(12)
3. 超声波辐射和接收器—探头	(12)
3.1. 压电晶片的固有频率	(14)
3.2. 压电晶片的阻尼	(14)
3.3. 声脉冲的辐射	(15)
3.4. 声脉冲的接收	(17)
3.5. 脉冲回波法	(17)
4. 超声波检测仪—电路及其工作原理	(19)
4.1. 荧光屏上的探伤图形	(22)
5. 应用不同波型进行检测	(27)
6. 标准系列探头及其特性	(31)
6.1. 直探头	(32)
6.2. 斜探头	(34)

6. 3. 收发式探头	(38)
7. 耦合技术	(46)
7.1. 表面状态	(47)
7.2. 延迟块的作用	(51)
7.3. 探头耦合	(55)
7.3.1. 软膜直探头	(55)
7.3.2. 硬膜直探头	(57)
7.3.3. 收发式直探头	(58)
7.3.4. 斜探头	(60)
7.4. 薄层耦合法	(61)
7.5. 水浸法	(66)
7.5.1. 水延迟区	(68)
7.5.2. 水延迟区的作用	(69)
7.5.3. 不变水延迟声程检测方法	(71)
7.5.4. 变化水延迟声程检测方法	(73)
7.6. 局部水浸法	(78)
7.7. 旋转探头法	(84)
7.8. 热表面部件的检测法	(86)
7.8.1. 防热的水延迟声程	(88)
7.8.2. 防热的恒温延迟块	(92)
7.8.3. 干耦合	(93)
8. 超声波反射体的定位	(94)
8.1. 根据传播时间测定反射体距离	(96)
8.2. 超声波检测仪器的校正	(98)
8.2.1. 适当的对比试块	(100)
8.2.2. 直探头校正的建议	(105)

8.2.3. 斜探头校正用的标准对比试块	(116)
8.2.4. K_1 试块上的调节和校验	(119)
8.2.5. K_2 试块上的调节和校验	(125)
8.2.6. 距离和深度	(128)
8.2.7. 缩短的水平距离	(132)
8.2.8. 收发式探头的调节	(139)
8.2.9. 节点跨距——影响普通收发式探头的 因素.....	(144)
8.2.10. 收发式直探头在曲率表面上的调节和 检测.....	(149)
8.2.11. 收发式斜探头检测时的调节校正.....	(153)
9. 超声波反射体的评价	(157)
9.1. 耦合误差——评价误差的主要原因	(157)
9.2. 声束的形状	(159)
9.2.1. 直探头的声束	(162)
9.2.2. 斜探头的声束	(166)
9.2.3. 收发式探头的声束	(169)
9.2.4. 水延迟区对声束形状的影响	(174)
9.2.5. 声束的聚焦	(176)
9.3. 扫查法的缺陷评价	(178)
9.4. 回波振幅的评价	(188)
9.4.1. AVG图表.....	(191)
9.4.2. 回波高度差的测量	(197)
9.4.3. AVG图表中dB差.....	(201)
9.4.4. 直探头检测评价用的基准反射体	(203)
9.4.5. 斜探头检测评价用的基准反射体	(211)

9.4.6. 传输修正	(222)
9.4.7. 声衰减的测量	(224)
9.4.8. 超声波衰减和传输损失修正后回波高度评价.....	(232)
10. 缺陷类型的判断.....	(238)

前 言

迄今为止,“超声波无损检测”已有30多年历史。从最初根据超声波在不同材料中的振动原理检测缺陷试验到今天,它已成为一种以测量各种影响参数为基础的典型检测方法。多年来,有经验的超声波检测人员对这些影响参数作了粗略的计算,并能在检测技术中,适当地利用这些影响参数。

因此,本书的任务就是列出这些影响参数,区别它们之间的差异,并对测量这些影响参数的可能性作出解释。然而,并非所有的影响参数都是不利因素,因此,检测人员在检测时应对此加以分析。在许多实际应用中,只要测量误差没超过允许范围,有些影响参数是可忽略不计的。这样便可简化检测工序,减少检测时间,降低检测费用。随着仪器技术的进步,无损检测的明天将属于那些能不断更新知识的超声波检测人员。

本书专为检测人员基础知识的更新提供了丰富的经验总结。

另外无损检测人员也认识到材料超声波的应用与物理仪器技术有着密切的联系。

1. 为什么要进行超声波无损检测

工件表面缺陷无损检测方法除着色法和磁粉法外,至50年代初,检测内部缺陷还只能采用X射线法。第二次世界大战后,由于缺乏足够的X射线设备,所以,研究发展了超声波检测的设备。

然而,人们很快发现,射线透照法和超声波法在缺陷检出能力上有明显的不同;同时还发现,缺陷所处的位置、材料厚度等因素对检测灵敏度有影响,与射线法相比,超声波检验法具有下列特性:

1. 一般来说,检测薄壁工件中的细小夹杂物,超声波法较X射线法差;
2. 被检工件厚度越大,超声波法比之射线法愈能有效地检测出缺陷;
3. 检测材料表面开裂,如:裂纹和未熔合缺陷,用射线法通常难以或根本不可能发现;

4. 超声波法对材料的表面裂纹和分层检出效果最佳；
5. 在许多情况下，超声波检测所需费用低于X射线法；
6. 超声波法与射线法相比，不能提供直观的按比例缺陷图象；
7. 超声波法易于自动化；
8. 射线法原则上不能实现快速、自动化检测。

由上可见这两种方法在检测缺陷能力等方面有着重要的区别。

但是，超声波检测法在缺陷大小等定量评价方面还存在问题。其量值的精确度，既与检测所用的设备性能有关，也与缺陷取向、检测前工件的准备条件、检测设备的调节情况有关。

这两种方法究竟哪一种更好些，迄今还有争议。不过，各种检测方法均有各自的特点，彼此之间不应相互排斥，而应取长补短，这就是说，工件的检测，在许多情况下要综合采用多种适当的方法，而不是只采用一种方法。超声波检测除自动或半自动检测半成品(如板材、带材、复合材料、管材、棒材等)外，也可检测重型大锻件和厚壁容器。在建造核电站时，如不采用超声波法而要执行严格的安全规范是难以想象的。因此，在这种情况下，超声波检测可能是最实用的方法。

2. 超声波检测的任务

对于无损检测人员来说，首先会提出这样的问题：应用无损检测特别是超声波检测的任务是什么？应该怎样理解和考虑这些内容？

由于人们往往重视判断工件中(被检件)可能存在的缺陷，而忽略检查材料的特性，所以，超声波检测的任务只限于以下几点：

1. 检出缺陷；
2. 缺陷定位；
3. 缺陷评价；
4. 缺陷类型判别。

在讨论上述各项任务之前，有必要对“缺陷”这一概念作一论述。实际检测时，对材料中不规则性往往用“缺陷”这一概念。缺陷分大、小、长、短缺陷，体积和平面缺陷，允许和不允许缺陷。我们不应将含有“不规则”性的材料作为废品报销，而应对“缺陷”有所抉择。

对检测人员来说,知道这一点是很重要的,因此,我们必须对这一概念有足够的理解,这样,检测人员或检测专家才能确定材料中含有的不规则性是缺陷还是不是缺陷,如被检出的不是缺陷,那就是有疑问的“不规则性”。

当然,也不可采用“有疑问的不规则性”这一概念,几年前曾有人建议采用与上述概念意义相同的名称“不连续性”,虽说这种说法不尽完善,但它具有两个优点,即简短和能在窘迫状态中帮助我们解决问题,所以,超声波检测的任务实际是:

1. 检出不连续性;
2. 不连续的定位;
3. 不连续的评价;
4. 不连续类型的判别。

2.1 缺陷的检测

超声波检测人员的实用“工具”就是探头,用它对工件进行检测,但是,发现缺陷的并不是探头,而是由探头辐射到工件中的超声波,假如它被工件中的缺陷反射回至探头,则被探头接收(图1)。探头辐射的超声波具有一定方向性,即:超声波只入射到探头范围内的某一部分工件。这种波是“一束”的,故称为“声束”。声束的轴线,称为中心射线。

工件内的体积型缺陷(三维缺陷),超声波射及时其反射波具有许多方向,只有很少一部份声线返回探头(图2),探头接收到的声能大小与声束射至缺陷的入射方向有关,如果接收到的声能足以产生可辨认的信号则该体积型缺陷就可发现,即:检测人员可通过不同方向入射的“声波”进行检测。例如,如图3所示,将探头依次在工件的六个表面探测,借助某一面上声束的最大反射波而查获缺陷。

“平面”缺陷(二维缺陷)的反射波则按一定方向反射,入射到工件中的声波(图4)。如果,反射波没有返回探头,则就不能发现,显然只有,当平面缺陷与声束的轴线相垂直时,才可能检测出如图1所示的缺陷。但是,上述情况只适合于工件内单个分散存在的和不靠近表面的平面缺陷。

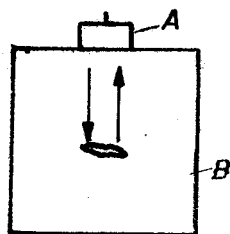


图 1 用一只兼作辐射和接收超声波的探头检测工件B中的缺陷

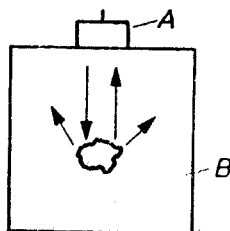


图 2 超声波在一个立体形缺陷上的反射
A-探头；B-缺陷工件

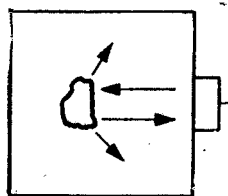


图3 从各个方向入射声波以获得不规则体型缺陷的最大反射

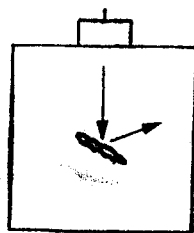


图 4 超声波在一个平面型缺陷上的反射

与检测表面垂直的侧面上的表面缺陷，例如一个垂直伸入材料侧面的裂纹(横向裂纹)，尽管它与声束垂直，但往往仍不能保证获得满意的检出效果，因为侧面效应即侧面反射引起声束迭加，而且还会使射至侧面的声束发生绕射(图5)。

遇到这种情况，如果利用“角反射效应”，就能提高此类缺陷的检出能力。此时，声束中心线如果射至工件表面和裂纹的呈 90° 的夹角之顶端，则该声线便可直接反射回来(图6)。如果声束射在构成角镜的两个表面中的任一表面，则声波在此两表面之间偏转，反射波平行于入射波返回

探头(图7); 如果是一个近表面的垂直于表面的平面缺陷, 则也可利用角反射效应将其检出(图8)。

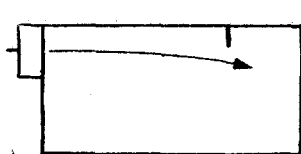


图 5 声束因侧面效应产生绕射, 从而降低了表面裂纹的检出能力

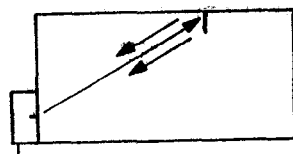


图 6 借助于斜入射声波检出表面裂纹(利用角反射效应)

这种近表面的垂直倾向的缺陷, 往往如同角镜一样, 其反射波可被既作辐射又作接收的探头接收, 但是, 假如工件厚度较大, 而且缺陷是平面型的并位于工件内部, 则大部份反射波不再回到探头, 在这种情况下, 一般采用两个探头作“串列法”检测, 即其中一个探头辐射, 另一个探头接收(图9)。借助于两个探头前后配制的间距改变, 可以检出工件不同深度范围内的平面型的垂直的缺陷(图10)。

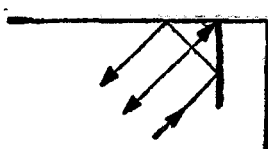


图 7 90°角镜的角反射效应(由表面和表面缺陷构成)

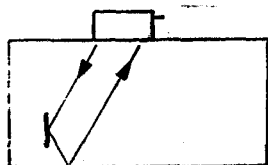


图 8 近表面垂直倾向缺陷的角反射效应的应用

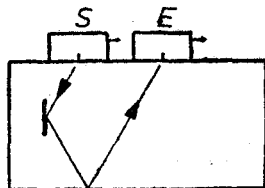
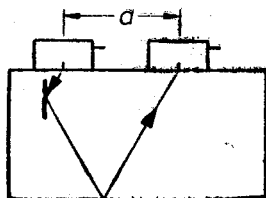


图 9 利用两个探头(一个作辐射另一个作接收)(串列法)的角反射效应的应用
S-发射探头; E-接收探头

虽然串列法的操作并不困难，然而还有不少检测人员仍然喜欢采用单探头法。应该指出，单探头法对检测工件内部的平面缺陷通常不能获得 90° 的入射角和角反射效应，以致检出效果不佳，例如在检测平均厚度为10~30毫米的X型焊缝时就会遇到这种情况(图11)。尽管由于缺陷的延伸、工件的几何形状、缺陷表面的不光洁和声束的扩散，使部份声波或多或少甚至是偶然地由缺陷反射回探头，但这种单探头法，毕竟会降低平面缺陷的检测能力。



$$d = T - \frac{a}{2}k$$

图 10 改变两个探头之间距，用串列法检测工件不同深度的缺陷。

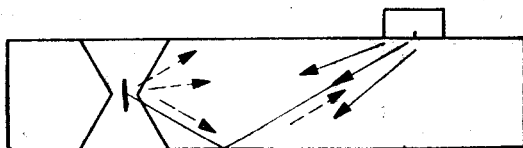


图 11 放弃检测灵敏度较高的方法，而用缺陷“偶然的”反射来发现X型焊缝中垂直取向的根部平面缺陷

图11所举例子证明，为了可靠地发现各种缺陷有必要综合采用几种检验方法。我们还可以肯定，在大多数工件应用超声波检测时，都应寻求一种检测灵敏度很高的途径。

以上所述，不能解决本章节的一些具体问题，但可作为了解以后几个章节和进一步讨论定量问题的前提。在此，本章暂先告一段落，以便在合适的机会再作进一步的分析和介绍。

2.2. 缺陷的定位

雷雨将至，电光烁闪，滚滚乌云激起隆隆雷声，它作为声波的一种

型式，从远方传至我们的耳朵。声波或超声波信息的传递用的是同样的方式，它们都借助于介质质点振动而形成了波动，隆隆的雷声就能使空气中的分子(质点)振动。

用超声波检测材料时，材料的质点也会振动。这些质点有原子、原子链、分子或其它的型式，质点之间弹性相连，一个振动波及其余，从而将超声波传播至缺陷，随后由缺陷反射到探头。声波在材料中传播都具有一定的速度，即声速，它是材料的一种常数；声波在空气中传播速度约为 330m/s ，这是大家都知道的，而在钢中的声或超声波传播速度较快，约为 6000m/s 。

声波在每一均质材料中的传播速度是均恒的，因此我们可以利用这一事实。例如：闪电不仅能预报雷声的到来，而且也能告诉我们雷声策源的云层离地面的距离，当我们已知闪电和获得雷声之间的时间差(秒)，再乘上330，就可知道该雷云的距离是多少。

大家知道，闪电的光以 $300,000\text{km/s}$ 这样高的速度传播到眼球视网膜上，所需时间几乎为零，而闪电过后直至人们听到雷声的时间，则是它的传播时间，这样便可得到如下公式：

$$\text{传播时间} \times \text{声速} = \text{传播距离}$$

也即

$$t \cdot c = a$$

式中：t——传播时间；

c——声速；

a——传播距离。

例如：从看到闪电和听到雷声的时间亦即雷声的传播时间为 4s ，即

$$t = 4\text{s}$$

空气中的声速约为 330m/s ，即

$$c = 330\text{m/s}$$

根据上式，雷源和观测者的距离为

$$a = t \cdot c$$

$$= 4\text{s} \times 330\text{m/s}$$

$$= 1320\text{m}$$

测定工件的缺陷距离，也是根据这一原理(图12)。然而，反射式超

声波检测时，缺陷的发现是依据它的反射来实现的，超声波实际传播的是射至缺陷与由缺陷返回这两者的距离，即 $2a$ ，根据已知的声速和整个传播时间的乘积，同样可以由下式求得，即

$$2a = c \cdot t$$

将上式稍加变化，便可得出我们感兴趣的也即缺陷至工件探测表面的单程距离 a ，计算公式如下：

$$a = (c/2) \cdot t$$

如果按照适当的方式，根据所测材料的声速将超声波检测仪的测距标度调节为每格 $c/2$ ，则缺陷的测定就成了简便的“传播时间测定法”。

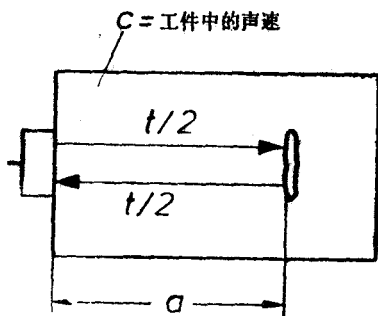


图 12 由半声速 $C/2$ 和总传播时间 t 的乘积
算出缺陷至工件探测面的距离 a

在超声波检测仪中，必须配有尽可能精确的“秒表”，这个“秒表”用以计测从声波辐射开始直至返回探头为止的时间，此外，也可从它的时标上尽可能方便地读取 a 值距离。

关于超声波检测仪“秒表”的外形以后再介绍。这种“秒表”可以精确地测量亿分之几分钟的传播时间，亦即可精确地测定缺陷的距离。

2.3. 缺陷的评价

对材料中的缺陷，亦即不连续大小的最理想的评价，就是尽可能精

确地求得缺陷的真实尺寸。因此，检测人员希望有一种可获得真实尺寸的检测方法。但是，这种希望一般都很难实现甚至不可能。因此，人们就很自然地想到射线法应用于缺陷照相时，能否清晰地分辨出裂纹？X射线照相是否能记录缺陷的真实尺寸？

答案是：用射线照相时，人们可以在垂直于射线方向的平面上获得缺陷的延伸情况，如果在另外几个角度上进行多次透照也能在照相上显示出缺陷，这样就可根据各个方向上透照的结果，描绘出缺陷的实际延伸范围。对于未熔合之类非体积型缺陷来说，则只能在最佳的条件下可在照相上看到一条黑线、如果射线的方向与未熔合的高度方向不是基本平行，则在照相上什么也辨别不出！

当然，这里不是贬低X射线法，仅想说明它与其它的所有无损检测方法一样，对缺陷真实尺寸的评价也有类似的困难。

超声波检测法对缺陷的评价主要有以下两种。

2.3.1. 扫查法

用超声波法评定缺陷，如果缺陷大于声束直径，人们往往可以通过探头在不同方向上的移动来测定缺陷的边界，以测定延伸度的数值，再求得缺陷的真实尺寸(图13)。

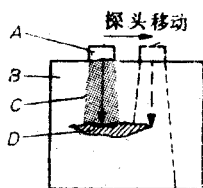


图 13 用移动探头法求出大缺陷的延伸度
A-探头；B-工件；
C-大缺陷；D-声束

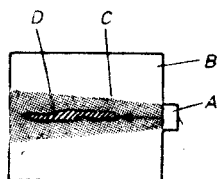


图 14 延伸方向平行于声束，反射面小于声束宽度的缺陷检出效果不佳
A-探头；B-工件；C-声束；D-反射面小的缺陷

然而，当缺陷延伸度小于相应的声束宽度时(图14)，则在该延伸方向上不能求得缺陷的实际尺寸。

更困难的是测量那些取向不佳的小于声束宽度的小缺陷和微小缺陷的实际尺寸(图15)，这里可采用扫查法，目前有一种在声束直径只有2mm或更小的聚焦探头(图16)。对于上述缺陷可采用这种探头，采用水浸法进行检测(图17)，但这种方式需要水槽等附加设备，在某些情况下所需费用较高。

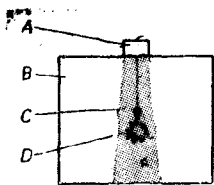


图 15 小缺陷(所有方向的延伸度均小于声束宽度)用探头移动法测定时检测效果不佳
A-探头；B-工件；C-声束；D-缺陷

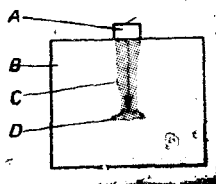


图 16 用窄声束聚焦点测量小缺陷尺寸
A-探头；B-工件；C-声束；D-缺陷

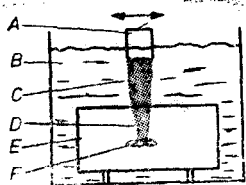


图 17 用聚焦探头作水浸式检测小缺陷
A-液浸式探头，B-水，C-水中声束，D-工件中声束，E-工件，F-缺陷

2.3.2. 信号最大值的评价法

小缺陷尺寸的评价，可应用对比回波信号最大值的方法(图18)。应用此法时，探头在工件表面扫查待获得缺陷反射后再在该处稍作移动，以便得到尽可能高的缺陷反射声压，这在仪器显示器上可看到尽可能高的缺陷信号指示。一般来说，信号指示愈高，就表示缺陷尺寸愈大。

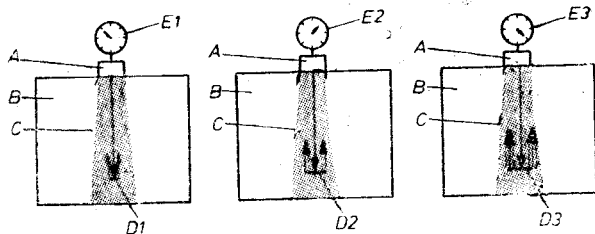


图18 缺陷反射声压的最大指示值随缺陷面积加大而增大

A-探头; B-工件; C-声束; D-缺陷; E-反射声压最大指示值

例如：将自然缺陷的信号与直径为2毫米的平底孔信号作一比较，就可直接对缺陷作出评价。如果工件中的缺陷最大信号指示值是直径2毫米平底孔最大指示值的四倍，缺陷的深度与平底孔一样，而且缺陷比较平滑，界面反射率为100%，这样就可得出结论，缺陷反射面积约为平底孔反射面积的四倍，根据截面积与直径的关系，该缺陷的直径可能为4毫米（图19）。

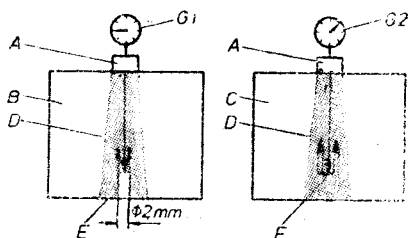


图19 利用试块B的 $\phi 2\text{mm}$ 平底孔对比评价工件C中的缺陷大小

A-探头; B-试块; C-工件; D-声束; E-2mm平底孔;
F-缺陷; G-反射声压指示