

引文格式: 段建刚, 熊瑛. 线聚焦探头的声反射特性和检测应用的研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(21): 57-67.

DUAN Jiangan, XIONG Ying. Study on acoustic reflection characteristics and detection application of line focusing probe[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(21): 57-67.

# 线聚焦探头的声反射特性和检测应用的研究

段建刚, 熊 瑛

(中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

**[摘要]** 选取焦距分别为 25mm、35mm、45mm 和 50mm 的线聚焦探头, 用  $\phi 1.5\text{mm}$  钢棒作为反射体, 通过改变探头与钢棒的位置关系, 对线聚焦探头水中声场的声反射特性进行测量, 得出不同焦距线聚焦探头的可检测棒材直径范围; 选取焦距为 45mm 的线聚焦探头, 对  $\phi 47\text{GH}4169$  高温合金棒材样件在不同水距下进行试验, 得出用于确定棒材检测灵敏度的平底孔位置; 选取  $\phi 18\text{TC}4$  棒材样件和焦距分别为 25mm、35mm、45mm 和 50mm 的线聚焦探头, 进行表征声波往复透射率和声束指向性的试验, 得出用于确定棒材检测灵敏度平底孔的最高反射波幅对应水距的选择方法; 选取焦距分别为 25mm、35mm、45mm 和 50mm 的线聚焦探头, 对不同直径的 TC4 钛合金棒材样件进行检测试验, 验证不同焦距线聚焦探头的可检测棒材直径范围, 解决了线聚焦探头的声反射特性测量、表征及在棒材检测中的应用问题。

**关键词:** 线聚焦探头; 反射体; 声反射特性; 往复透射率; 声束指向性

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2021.21.057



段建刚

高级工程师, 硕士, 主要从事原材料和航空发动机零件的无损检测技术研究。

航空发动机结构件、叶片等零件常用中小直径棒材 ( $\phi 8\sim\phi 58$ ) 进行加工制造, 棒材的缺陷检测成为保证结构件、叶片等零件加工和使用质量的主要手段<sup>[1-3]</sup>; 小直径棒材为曲界面入射, 目前国外航空发动机公司多采用水浸线聚焦超声检测方法对小直径棒材进行缺陷检测, 而棒材直径  $>\phi 58$  时接近平界面入射, 可采用点聚焦超声检测方法, 棒材直径  $<\phi 8$  时纵波检测区域太小适宜采用其他检测方法<sup>[4]</sup>。线聚焦探头是针对小直径棒材曲界面入射的一种特殊应用, 点聚焦探头是用于平界面入射的工件检测, 点聚焦探头入射到棒材曲界面圆周方向的声束进入棒材后会迅速发散, 导致声束指向性变差, 检测

灵敏度和信噪比均低于线聚焦探头。超声波从声透镜经历折射后进入水介质<sup>[5]</sup>, 然后入射到水-金属圆柱界面进入棒材, 期间声束发生了多次变化<sup>[6-7]</sup>, 探头选择和使用不当会造成检测灵敏度和信噪比降低, 特别是检测钛合金棒材时容易引起杂波升高造成误判。目前, 有关点聚焦探头在平面工件的检测研究<sup>[8-9]</sup>, 可参考进行平面工件水浸超声聚焦检测时探头的选择和使用; 有关点聚焦探头在球体工件上的检测研究<sup>[10]</sup>, 可参考进行球体工件水浸超声聚焦检测时探头的选择和使用; 但未开展线聚焦探头在圆柱体工件(棒材)的相关研究, 因此开展线聚焦探头在圆柱体工件中的研究对中小直径棒材水

浸超声检测时探头的选择和使用具有重要意义。

针对上述问题,本研究对线聚焦探头声场不同区域的声束反射特性和棒材中声束指向性等影响检测灵敏度和信噪比的因素展开研究。

### 线聚焦探头声反射特性测量方法的确定

线聚焦探头的声反射特性与 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 3个方向有关,综合考虑测量反射体足够小和直度的情况下选择 $\phi 1.5\text{mm}$ 钢棒作为测量反射体,以焦距 $F$ 处 $y$ 和 $z$ 两个方向的声反射特性测量方法进行测量方法示意,如图1所示,其中晶片长度 $L$ 、宽度 $d$ ,声透镜为圆柱面,可分别测量声束的(-2dB)宽度、(-3dB)宽度和(-6dB)宽度;由于(-6dB)宽度测量时反射波幅降低50%,试验可操作性更强,测量结果更准确,故测量时选择(-6dB)宽度。

$x$ 与 $y$ 方向是线聚焦探头聚焦特性的主要方向,决定棒材中声能的分布情况,进而影响检测灵敏度,而 $z$ 方向决定探头在棒材轴线上的螺距设置,如图2所示(其中 $S$ 为螺距),故研究线聚焦探头检测灵敏度应对探头 $x$ 与 $y$ 方向的声反射特性进行测量。

通过测量线聚焦探头聚焦特性主方向 $x$ 与 $y$ 方向的声反射特性,可

得出水距变化时探头聚焦声束中心方向上的声能变化情况和聚焦声束分布情况,测量方法如图3所示,在水中采用1.5mm小直径钢棒测量 $x$ 与 $y$ 方向的声反射特性,测量时应保证线聚焦探头 $z$ 方向与小直径棒材轴线平行,以位置 $A$ 为例,应先测量探头聚焦声束中心 $OF$ 方向( $x$ 方向)位置 $A$ 处的反射波幅,再分别测量位置 $A$ 对应的 $A(y^+-6\text{dB})$ 与 $A(y^--6\text{dB})$ 的宽度( $y$ 方向),完成测量后沿聚焦声束中心 $OF$ 方向移动到位置 $B$ 进行测量,改变水距从盲区外可测量的第1位置测起,测过焦距 $F$ 后直至 $x$ 方向的波幅降至与第1位置的波幅相等。

45mm和50mm的线聚焦探头,用棒材工装固定 $\phi 1.5$ 钢棒, $\phi 1.5$ 钢棒轴线沿自动检测时棒材前进的方向( $z$ 方向),线聚焦探头的频率为10MHz,测量试验中仪器参数固定。以焦距为25mm的探头为例给出焦距 $F$ 处的测量结果,聚焦声束中心 $OF$ 方向( $x$ 方向)的测量状态和对应的仪器测量波形界面如图4所示;焦距 $F$ 处 $y$ 方向的测量状态和对应的仪器测量波形界面如图5所示。

按照上述方法完成焦距分别为25mm、35mm、45mm和50mm的线聚焦探头的声反射特性测量,得出探头声束中心反射波幅随探头与反射体距离(水距)的变化(图6)和形成不同焦距线聚焦探头在水中的声束变化(图7),结合图6和7可以确定焦距25mm探头的聚焦区为23~29mm;焦距35mm探头的聚焦

### 不同焦距线聚焦探头的声反射特性测量

选择焦距分别为25mm、35mm、

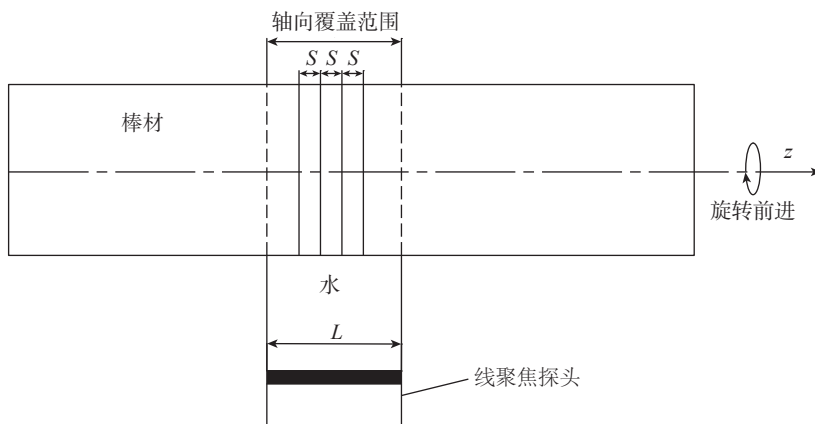


图2 线聚焦探头 $z$ 方向对棒材检查的影响

Fig.2 Effect of  $z$ -direction of line focusing probe on bar inspection

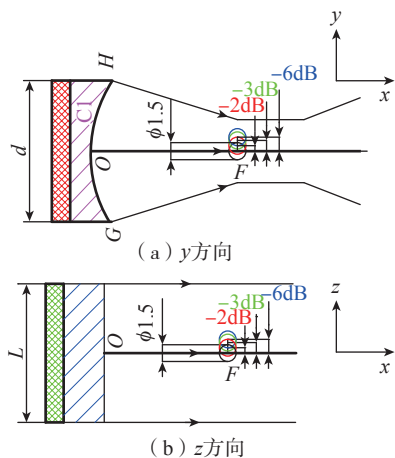


图1 测量示意图

Fig.1 Sketch map of measurement

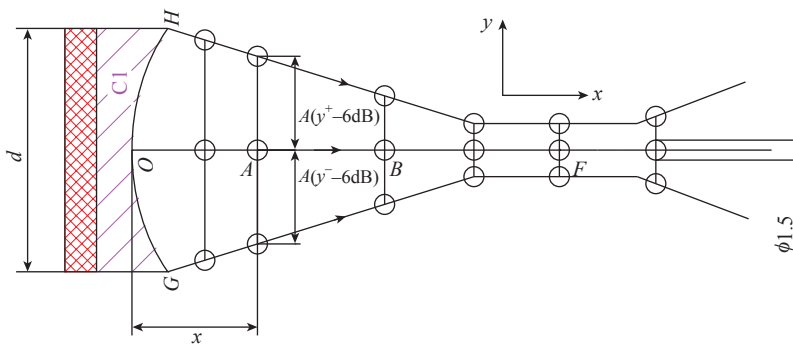
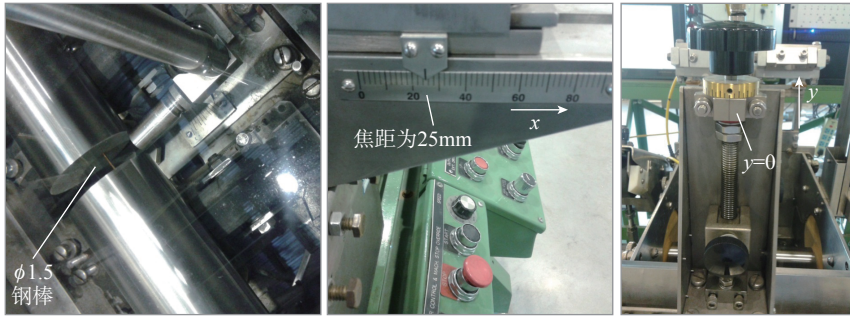
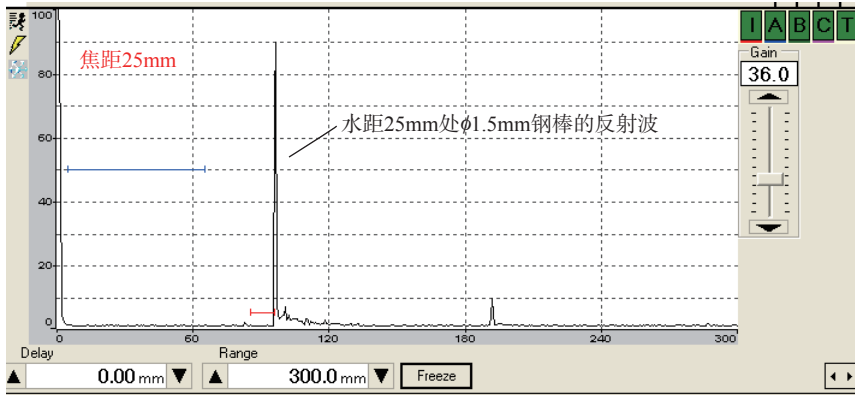


图3 线聚焦探头 $x$ 与 $y$ 方向的声反射特性测量方法

Fig.3 Measurement method of sound reflection characteristics in  $x$  and  $y$  directions of line



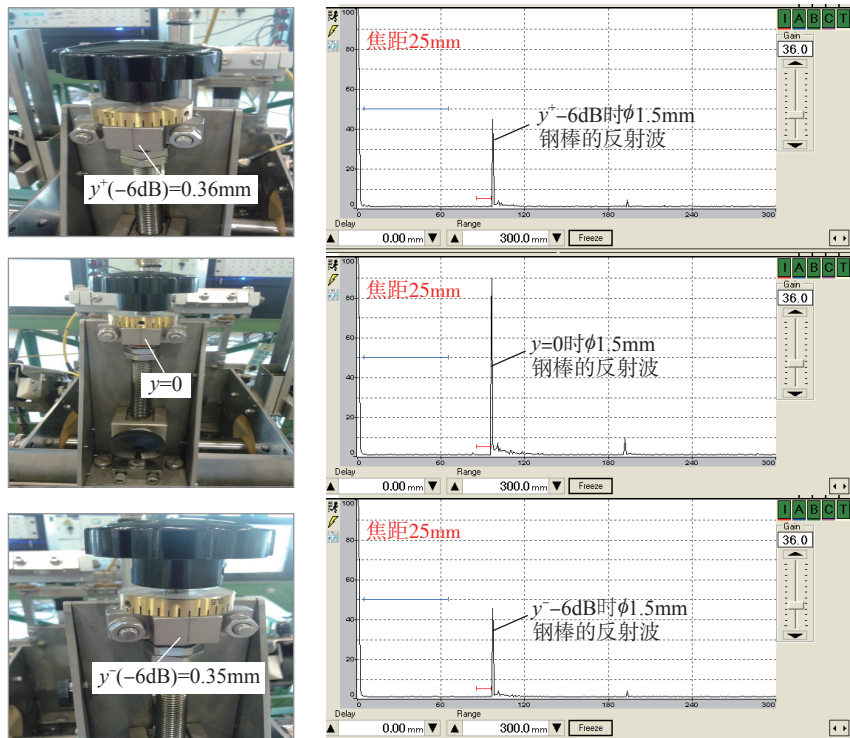
(a) x方向的测量状态



(b) 焦距处x方向的测量波形

图4 x方向的测量状态和对应的测量波形

Fig.4 Measurement status and measurement waveform of x direction



(a) y方向的测量状态

(b) 焦距处y方向的测量波形

图5 y方向的测量状态和对应的测量波形

Fig.5 Measurement status and measurement waveform of y direction

区为32~38mm; 焦距45mm探头的聚焦区为40~49mm; 焦距50mm探头的聚焦区为45~54mm。得出焦距25mm、35mm、45mm和50mm探头分别对应的近场区、线性区1和线性区2,如图8所示。

通过对图6~8进行分析,可得出如下结论:

(1)从图6可以看出线聚焦探头近场区附近声束中心能量较弱,从图7和8可以看出线聚焦探头近场区附近声束宽,与带有曲率的棒材耦合后声束易发散,会导致棒材中传播的声束指向性变差。

(2)线性区1的特点是随水距增加,对应的声束中心能量逐渐变大直至焦距处,对应的声束宽度逐渐变小,声束指向性逐渐变好;线性区2的特点是随水距增加,对应的声束中心能量从焦距处逐渐变小直至与探头初始水距处相等,对应的声束宽度逐渐变大,声束指向性逐渐变差。

(3)线聚焦探头聚焦区长度有限,其中焦距25mm的探头为6mm;焦距35mm的探头为6mm;焦距45mm的探头为9mm;焦距50mm的探头为9mm。探头聚焦区位于线性区1和线性区2之内,当水距满足棒材一次底波位于二次界面波之前时,探头聚焦区以外的线性区1和线性区2会影响棒材直径方向上的声束能量分布,棒材直径方向的检测区域不宜超过线性区2。

(4)根据界面波盲区大小、底面纵向分辨率、自动检测闸门随动反应时间,GE标准中 $\phi 8 \sim \phi 50$ 棒材的检测区域为直径方向3mm~ $D-3$ mm,如图9所示,当探头水距满足棒材一次底波位于二次界面波之前时,水距 $x$ 不小于 $0.25D$ ,棒材直径方向 $D-3$ mm处不超过线性区2时,结合图8可以得出,焦距25mm探头的可检测棒材直径范围为 $\phi 8 \sim \phi 36$ ;焦距35mm探头的可检测棒材直径范围为 $\phi 8 \sim \phi 42$ ;焦距45mm探头的可

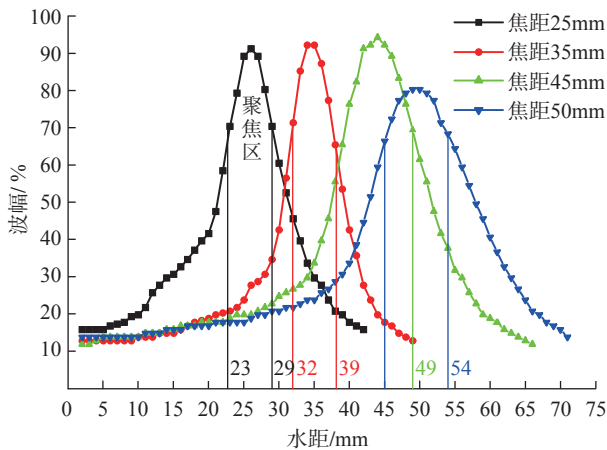


图6 波幅随水距的变化

Fig.6 Variation of wave amplitude with water distance

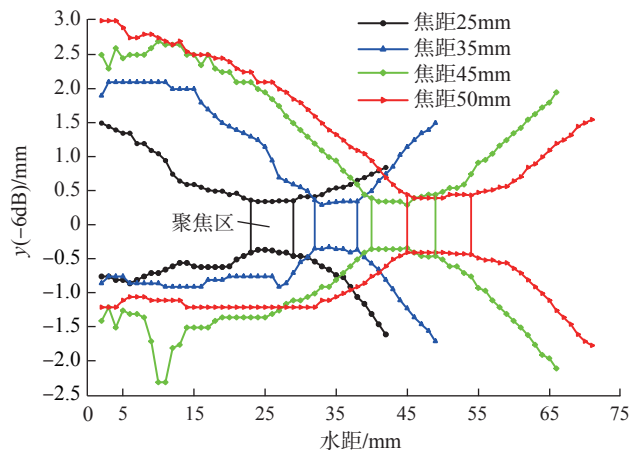
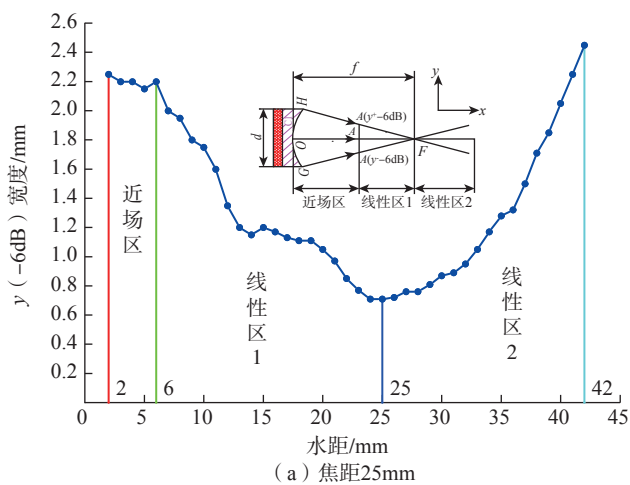
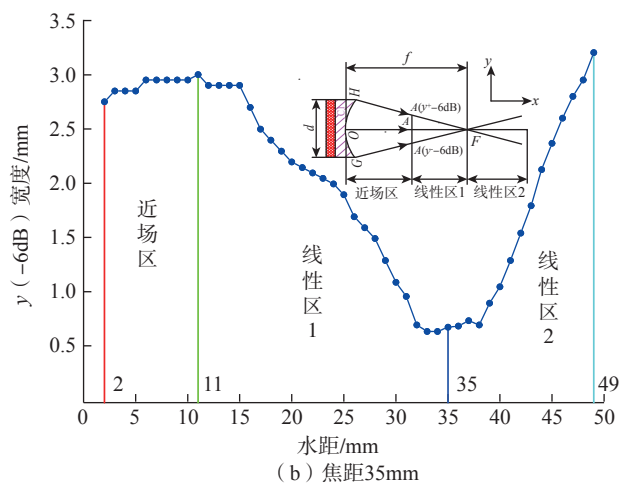


图7 声束变化

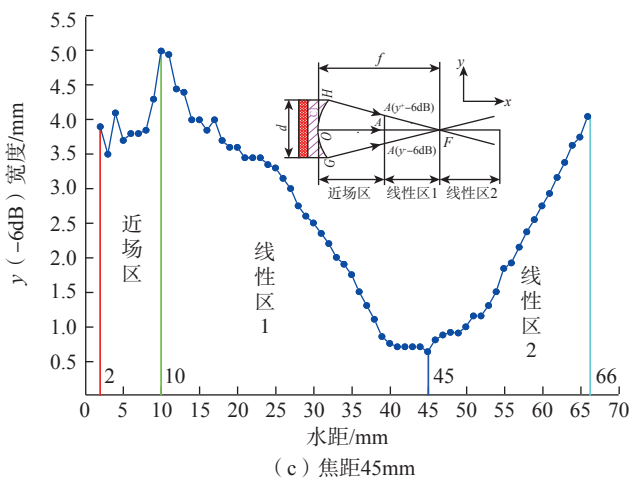
Fig.7 Variation of sound beam



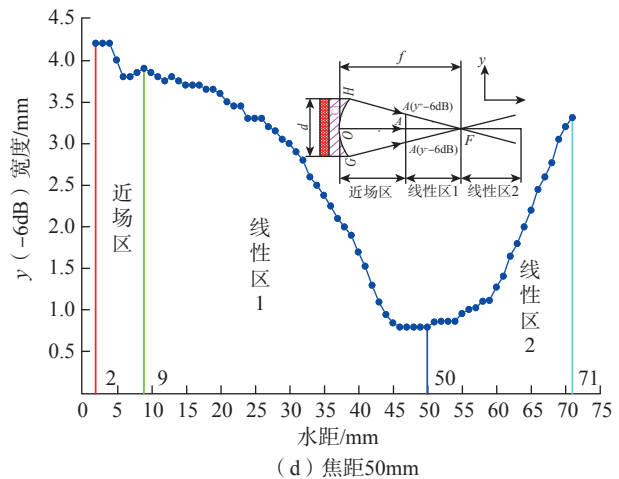
(a) 焦距25mm



(b) 焦距35mm



(c) 焦距45mm



(d) 焦距50mm

图8 不同焦距对应的近场区、线性区1和线性区2

Fig.8 Near field region, linear region 1 and linear region 2 corresponding to different focal

检测棒材直径范围为 $\phi 8 \sim \phi 55$ ；焦距50mm探头的可检测棒材直径范围为 $\phi 8 \sim \phi 58$ 。

### 棒材检测灵敏度的确定

线聚焦探头检测棒材时,检测区

域为棒材直径方向 $3\text{mm} \sim D-3\text{mm}$ ,对比样件如图10所示,包含埋深为 $3\text{mm}$ 、 $0.5$ 、 $D-3\text{mm}$ 的平底孔,检测

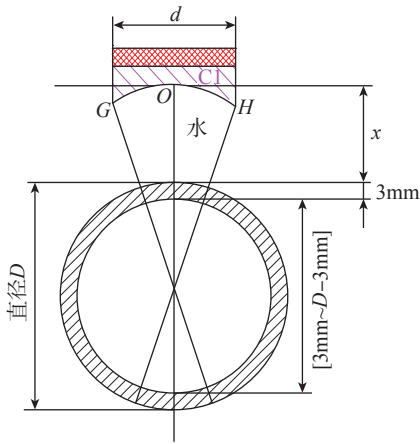


图9 棒材检测区域示意图

Fig.9 Sketch map of bar detection area

时应以其中灵敏度最低的平底孔用于检测灵敏度的确定。

不同的水距会带来声束在棒材中的变化,导致探头线性区1和线性区2在棒材中的分布情况出现差异,这种差异引起了棒材直径方向上灵敏度分布的差异,其中探头线性区1中靠近探头近场区远离聚焦区的区域和探头线性区2中远离探头聚焦区的区域灵敏度较低,以焦距45mm的探头为例说明,如图11所示。

以棒材直径方向上0.5D处的最高灵敏度对应的水距作为基准水距,基准水距变大变小会带来声束变化(图12),据此采用焦距为45mm的线聚焦探头对 $\phi 47GH4169$ 棒材样件进行试验,样件上带有埋深3mm、23.5mm、44mm的 $\phi 1.2mm$ 平底孔,按照基准水距(19mm)、基准水距变大(22mm)、基准水距变小(16mm)3种情况对样件上平底孔进行检测试验,试验结果如图13所示,据此得出3种情况下棒材检测区域中的灵敏度分布及对应探头的声束中心波幅变化情况如图14所示。

从图14可以得出棒材检测区域中的灵敏度分布与棒材检测区域处在探头线性区1和线性区2的位置有关,基准水距、基准水距变大、基准水距变小3种情况下均为棒材检测区域上埋深为 $D-3mm$ 的平底孔灵

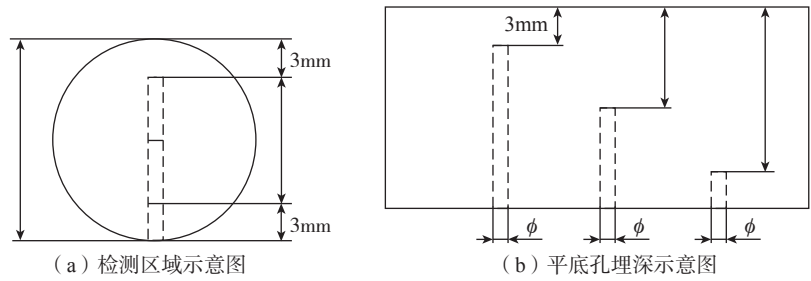


图10 对比样件示意图

Fig.10 Sketch map of contrast sample

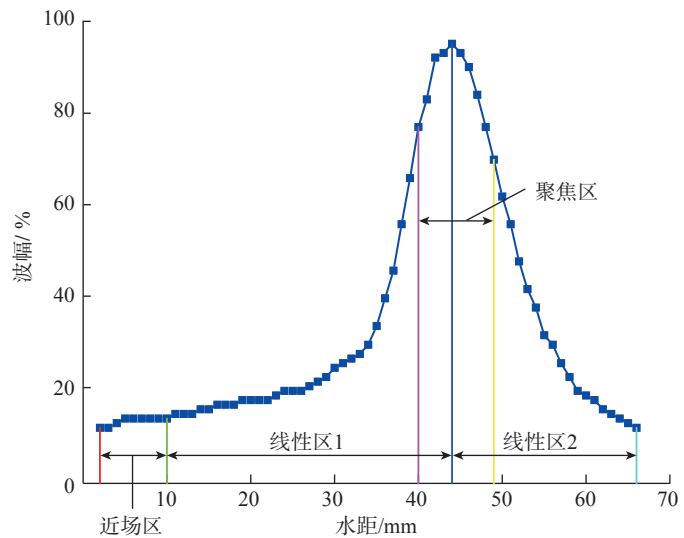


图11 焦距45mm探头声束中心波幅变化

Fig.11 Variation of center wave amplitude of focal 45mm probe

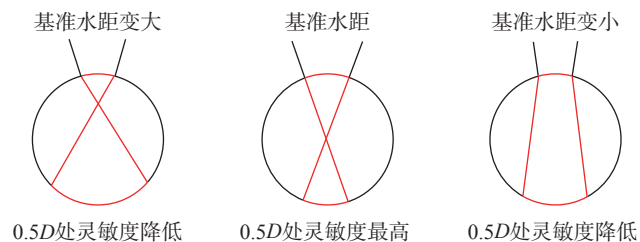


图12 水距变化时棒材中的声束变化

Fig.12 Variation of sound beam in bar during water distance change

敏度最低,故应以埋深为 $D-3mm$ 的平底孔确定棒材检测灵敏度,检测时应找到埋深为 $D-3mm$ 的平底孔的最高反射波幅。

### 声波往复透射率和声束指向性的表征

线聚焦探头检测棒材时的界面分为3个,其中包括探头环氧树脂与水形成的界面(界面1)、水与棒材前

表面形成的界面(界面2)和棒材后表面与水形成的界面(界面3),一定声压 $P_0$ 的超声波从压电晶片传出后需要经过两个界面后进入棒材中,如图15所示,其中 $P_1$ 为从压电晶片直接传入环氧树脂中的超声波, $P_r$ 为 $P_1$ 在环氧树脂与水形成的界面上的反射波, $P_{t1}$ 为 $P_1$ 在环氧树脂与水形成的界面上的透射波, $P_{r1}$ 为 $P_{t1}$ 在水与棒材前表面形成的界面上的反射

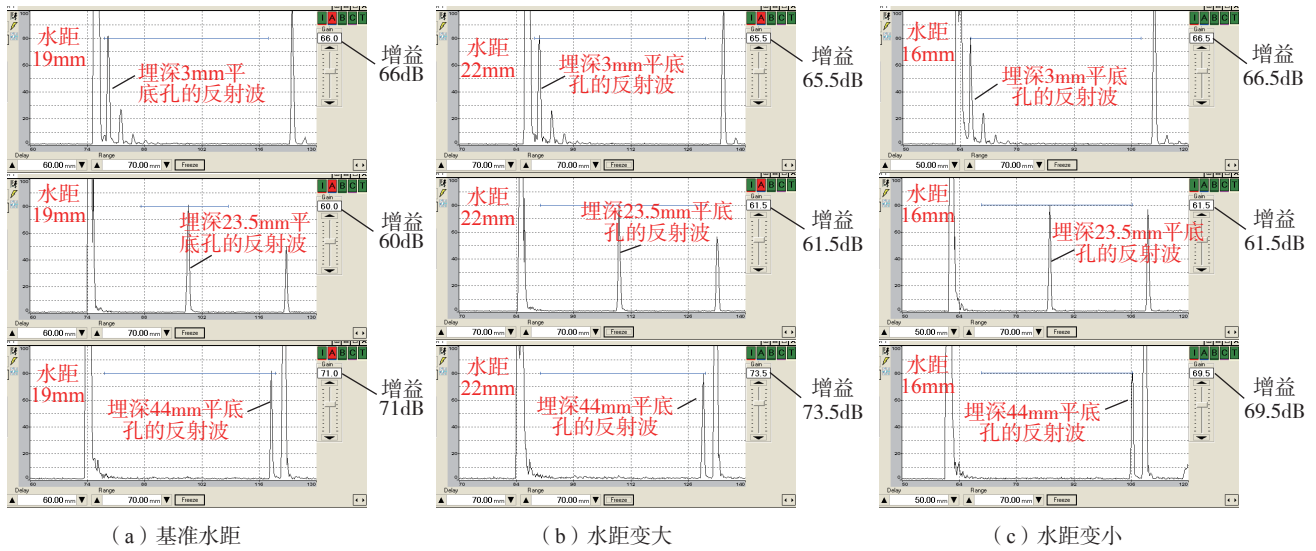


图 13 样品平底孔检测试验  
Fig.13 Test of sample flat bottom hole

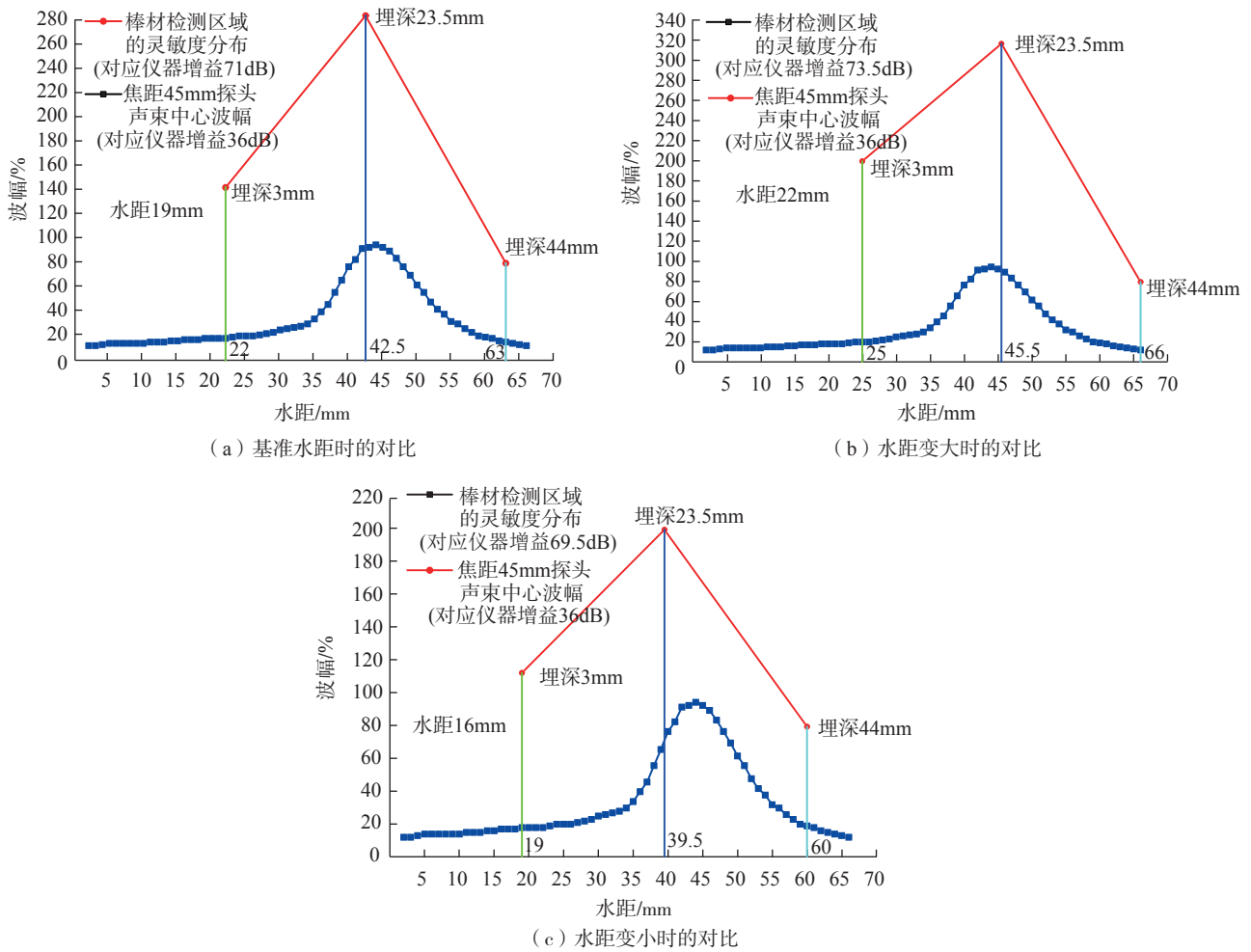


图 14 灵敏度分布及对应探头的声束中心波幅变化  
Fig.14 Sensitivity distribution and amplitude change of sound beam center corresponding to probe

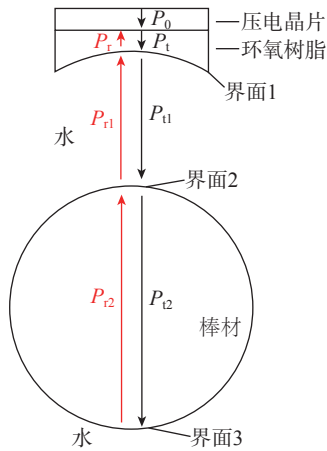


图 15 超声波传播示意图

Fig.15 Sketch map of ultrasonic propagation

波,  $P_{r2}$  为  $P_{t1}$  在水与棒材前表面形成的界面上的透射波,  $P_{r2}$  为  $P_{t2}$  在棒材后表面与水形成的界面上的反射波。界面 2 处的声波往复透射率和棒材中透射波  $P_{t2}$  的声束指向性决定着棒材检测区域的灵敏度分布, 而通过改变界面 1 与界面 2 的距离(水距), 会改变界面 2 处的声波往复透射率和棒材中透射波  $P_{t2}$  的声束指向性, 而界面 3 处的反射波  $P_{r2}$  可表征界面 2 处的声波往复透射率和棒材中透射波  $P_{t2}$  的声束指向性, 对应超声检测仪器界面的波形如图 16 所示, 仪器反射波  $P_{r2}$  波幅越大, 界面 2 处的声波往复透射率越高, 棒材中透射波  $P_{t2}$  的声束指向性越好, 靠近界面 3 处的检测灵敏度越高, 对应的可找到埋深为  $D-3\text{mm}$  的平底孔的最高反射波幅。

选择焦距为 25mm、35mm、45mm 和 50mm 的线聚焦探头对  $\phi 18\text{TC4}$  棒材进行试验, 试验中固定探头激励电压 400V、阻尼 50Ohm、增益 32dB, 固定棒材与水的界面, 改变水距记录  $P_{r1}$  和  $P_{r2}$  的反射波幅, 得出焦距为 25mm、35mm、45mm 和 50mm, 探头水距变化时  $P_{r1}$  和  $P_{r2}$  的变化规律如图 17 所示, 其中 I 区为近场区附近对应的水距范围, II 区为声波往复透射率高和声束指向性好时对应的水距范围。

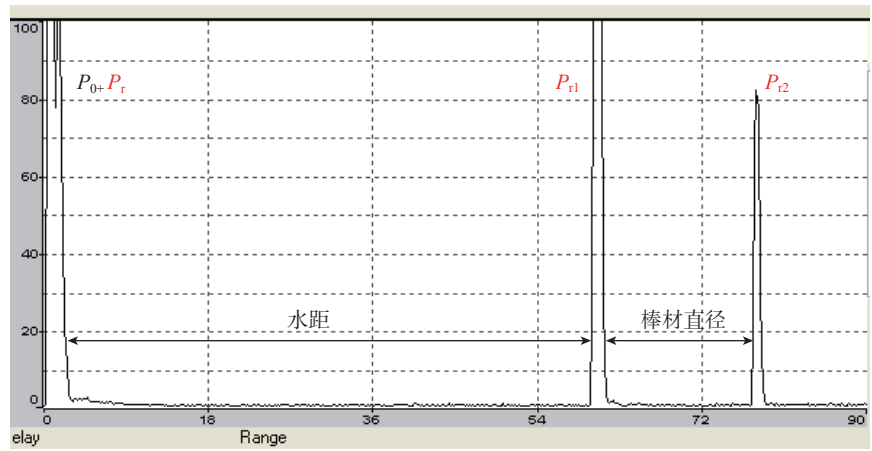


图 16 仪器界面波形

Fig.16 Waveform of instrument interface

从图 17 可以得出焦距 25mm、35mm、45mm 和 50mm 的探头近场区附近对应的水距范围分别为 6~10mm、6~13mm、6~17mm、6~18mm, 声波往复透射率和声束指向性好时对应的水距范围分别为 12~17mm、21~25mm、28~35mm、34~40mm, 对  $\phi 18\text{TC4}$  棒材上埋深为 15mm 的  $\phi 1.2$  平底孔在声波往复透射率高和声束指向性好时对应的水距范围进行试验, 试验中固定探头激励电压 400V、阻尼 50Ohm、增益 63dB, 找到各个水距对应的平底孔最大反射波幅, 给出焦距 25mm 的探头试验结果(图 18), 其余焦距 35mm、45mm 和 50mm 的探头试验结果见表 1。

根据上述试验结果, 探头焦距落在棒材轴线并不是最优的声波往复透射率和声束指向性上, 但接近最优的声波往复透射率和声束指向性, 因此得出用于确定棒材检测灵敏度平底孔的最高反射波幅对应水距的方法为: 应先使探头焦距落在棒材中心, 再微调水距找到埋深为  $D-3\text{mm}$  的平底孔的最高反射波幅。

### 线聚焦探头可检测棒材直径范围的验证

按照埋深为  $D-3\text{mm}$  的平底孔的最高反射波幅的确定方法, 根据焦距 25mm、35mm、45mm 和 50mm

的探头分别对应的可检测棒材直径范围  $\phi 8\sim\phi 36$ 、 $\phi 8\sim\phi 42$ 、 $\phi 8\sim\phi 55$ 、 $\phi 8\sim\phi 58$ , 对  $\phi 8$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 25$ 、 $\phi 35$ 、 $\phi 40$ 、 $\phi 46$  和  $\phi 54$  TC4 棒材样件进行检测试验, 得出试验结果如下:

(1) 以  $\phi 40$  TC4 棒材为例, 焦距 25mm、35mm、45mm 和 50mm 的检测灵敏度依次为: 78dB、63dB、64dB 和 65dB, 由于  $\phi 40$  超出了焦距 25mm 探头的可检测直径范围  $\phi 8\sim\phi 36$ , 如图 19 所示, 导致检测灵敏度偏低, 检测区域整体杂波水平升高, 局部出现杂波误报。

(2) 以  $\phi 46$  TC4 棒材为例, 焦距 25mm、35mm、45mm 和 50mm 的检测灵敏度依次为: 80.5dB、73dB、64dB 和 65dB, 由于  $\phi 46$  超出了焦距 25mm 探头的可检测直径范围  $\phi 8\sim\phi 36$ 、焦距 35mm 探头的可检测棒材直径范围为  $\phi 8\sim\phi 42$ , 如图 20 所示, 导致检测灵敏度偏低, 检测区域整体杂波水平升高, 局部出现杂波误报。

(3) 以  $\phi 54\text{TC4}$  棒材为例, 焦距 25mm、35mm、45mm、50mm 的检测灵敏度依次为: 84dB、81dB、66.5 dB 和 66.5dB, 由于  $\phi 54$  超出了焦距 25mm 探头的可检测直径范围  $\phi 8\sim\phi 36$ 、焦距 35mm 探头的可检测棒材直径范围为  $\phi 8\sim\phi 42$ , 如图 21 所示, 导致检测灵敏度偏低, 检测区域整体杂波水平升高, 局部出现杂

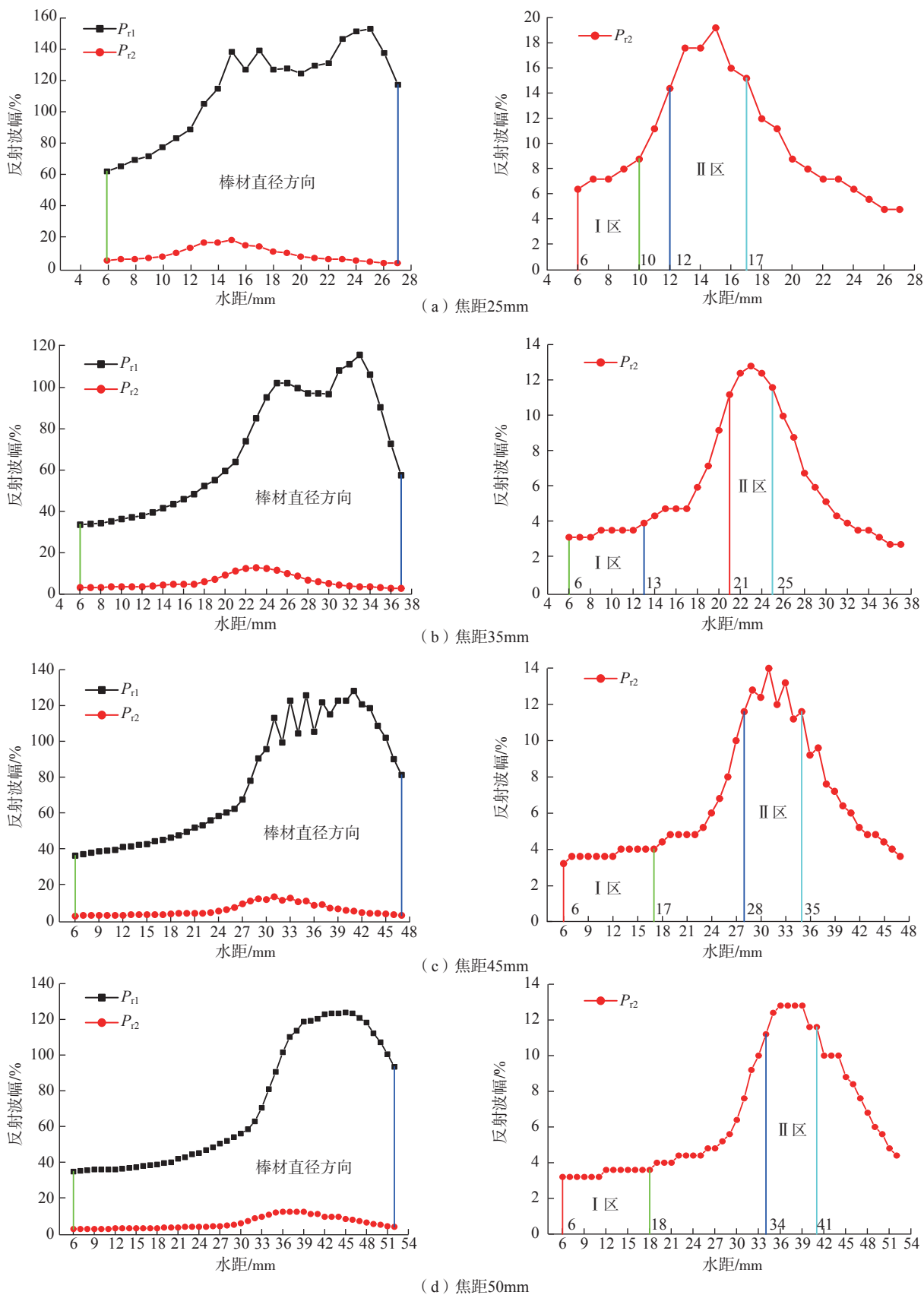


图 17 不同焦距探头  $P_{r1}$  和  $P_{r2}$  的变化规律

Fig.17 Variation of  $P_{r1}$  and  $P_{r2}$  of different focal length probes

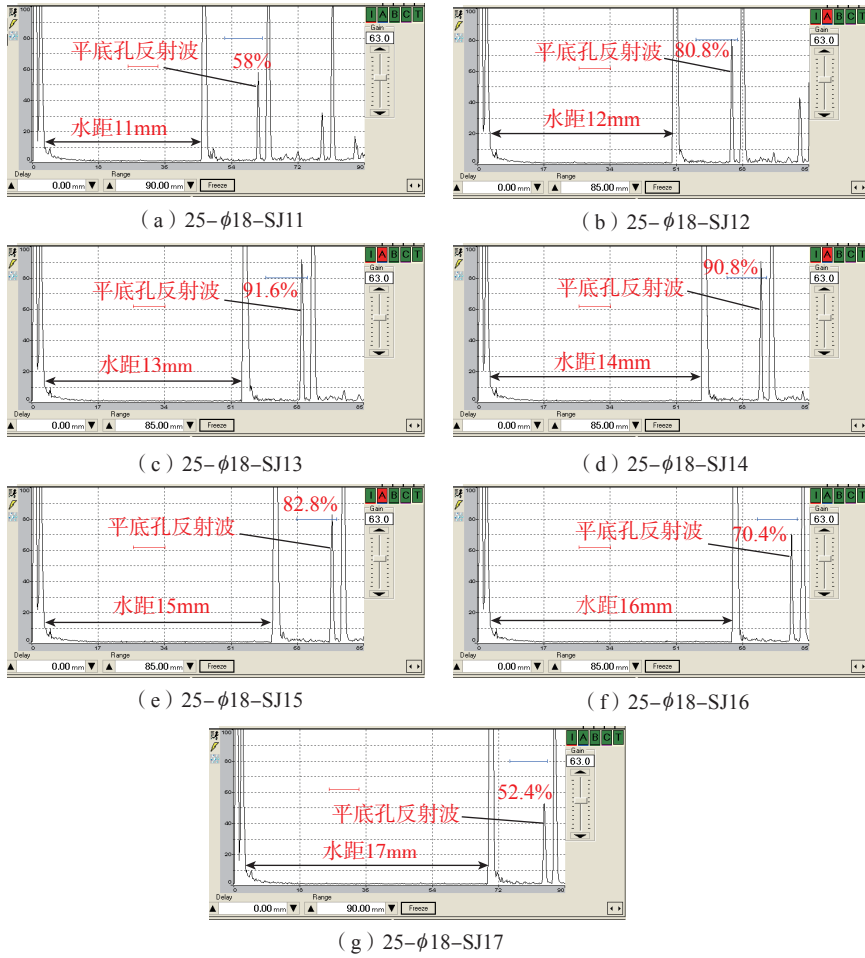
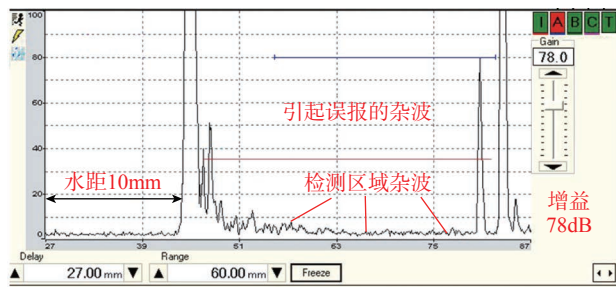


图 18 焦距 25mm 的探头试验结果

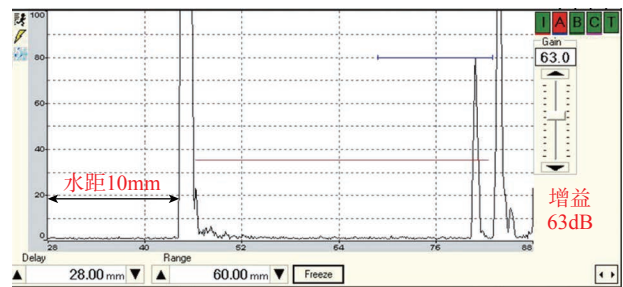
Fig.18 Test results of probe with focal length of 25mm

表 1 试验结果  
Table 1 Test results

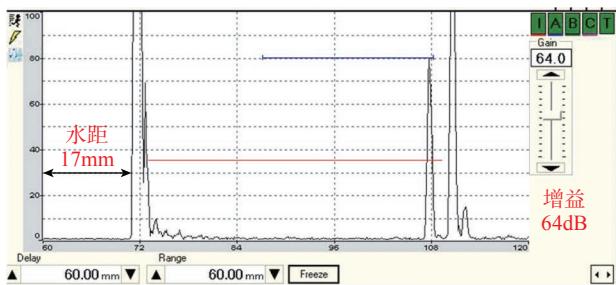
焦距 /mm	水距 /mm	反射波幅 /%
35	19	66.4
	20	84.4
	21	96.4 ( max )
	22	96.4 ( max )
	23	91.2
	24	81.6
	25	67.6
45	28	82.8
	29	91.2
	30	95.6
	31	96.8 ( max )
	32	92.8
	33	88
	34	79.6
50	34	81.2
	35	84
	36	85.6 ( max )
	37	84.4
	38	80
	39	76
	40	70.4



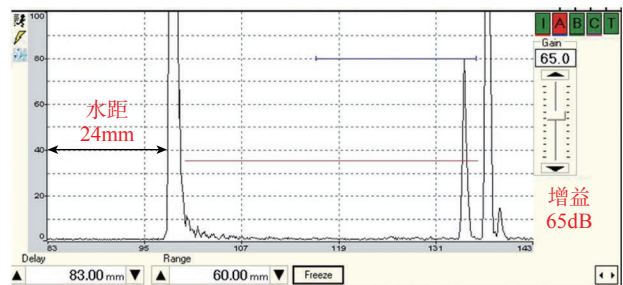
(a) 25-φ40



(b) 35-φ40

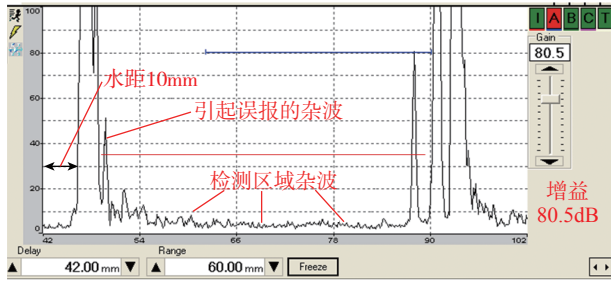


(c) 45-φ40

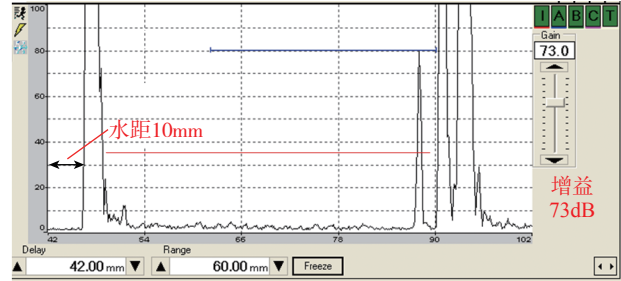


(d) 50-φ40

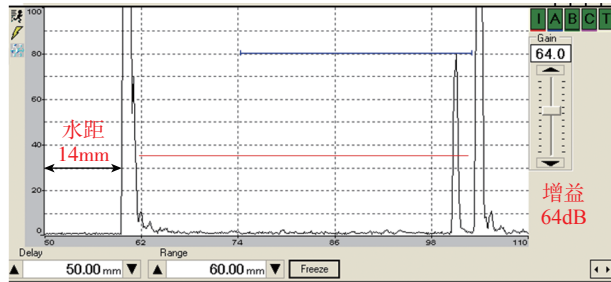
图 19 φ40 TC4  
Fig.19 φ40 TC4



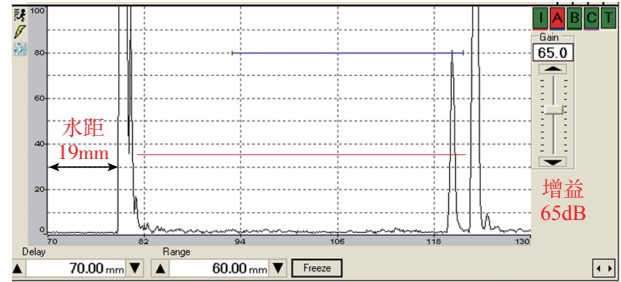
(a) 25- $\phi$ 46



(b) 35- $\phi$ 46

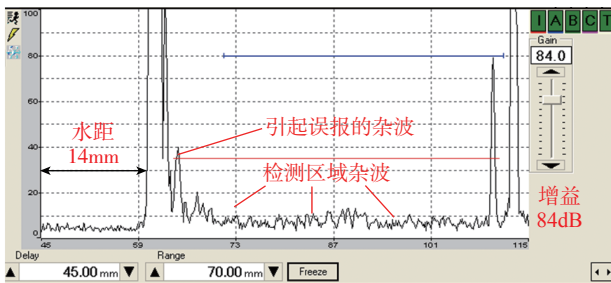


(c) 45- $\phi$ 46

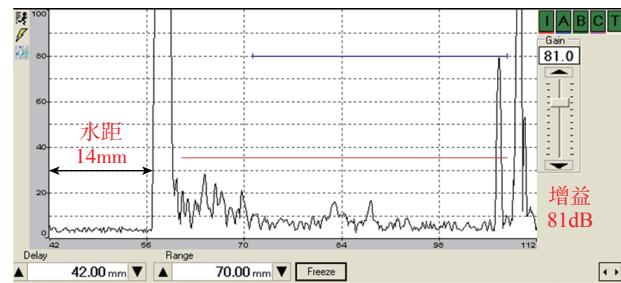


(d) 50- $\phi$ 46

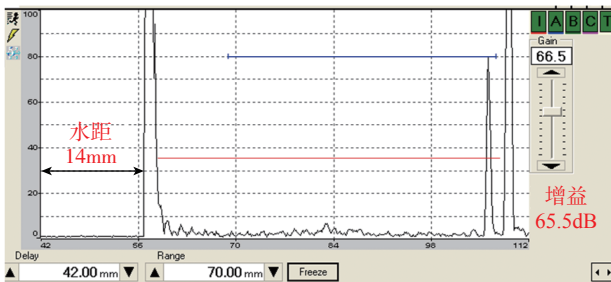
图20  $\phi$ 46 TC4  
Fig.20  $\phi$ 46 TC4



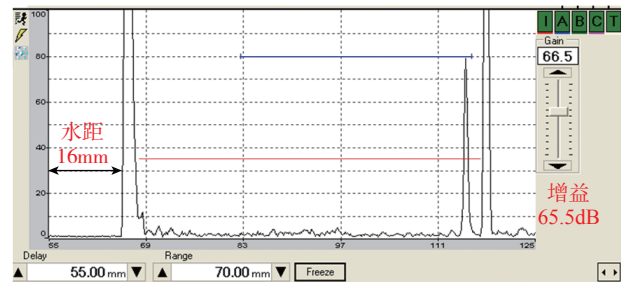
(a) 25- $\phi$ 54



(b) 35- $\phi$ 54



(c) 45- $\phi$ 54



(d) 50- $\phi$ 54

图21  $\phi$ 54 TC4  
Fig.21  $\phi$ 54 TC4

波误报。

### 结论

(1) 探头的检测报告仅给出焦距的试验测量结果,工业应用中工厂无法根据实际需要检测的棒材直径范围进行探头的选择,本研究给

出的线聚焦探头的声反射特性测量和表征方法,既可确定不同焦距线聚焦探头的可检测棒材直径范围,规范现场应用,也可根据需要进行检测的棒材直径范围采购合适的探头,降低生产成本。

(2) 通过对不同焦距线聚焦探

头在棒材中声束指向性的测量,得出探头最高检测灵敏度对应的水距应使埋深为  $D-3\text{mm}$  的平底孔反射波幅为最高,对应水距的调节方法为:应先使探头焦距落在棒材中心,再微调水距找到埋深为  $D-3\text{mm}$  的平底孔的最高反射波幅。水距的调节在

线聚焦探头检测棒材的工业应用中至关重要,本文给出的水距调节方法具有呈现试验结论、操作快速(兼顾效率)和现场防错的作用,探头焦距落在棒材中心并不是最优的声波往复透射率和声束指向性,但是接近最优的声波往复透射率和声束指向性,这样操作人员容易快速地完成调节,现场形成简单快速一致的使用方法,即使忘记微调也不至于给检测结果带来大的影响,既提高了生产效率也保证了检测质量一致性。

### 参考文献

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB 1538A—2008 航空结构件用钛合金棒材规范[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部, 2008.  
National Defense Science, Technology and Industry Commission. GJB 1538A—2008 Specification for titanium alloy bars for aeronautical structures[S]. Beijing: Ministry of Publication and Distribution of Military Standards, Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2008.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 2965—2007 钛及钛合金棒材[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 2965—2007 China National Standardization Administration Commission. Titanium and titanium alloy bars[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [3] 国防科学技术工业委员会. GJB 494A—2008 航空发动机压气机叶片用钛合金棒材规范[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2008.  
National Defense Science, Technology and Industry Commission. GJB 494A—2008 Specification for titanium alloy bars for aeroengine compressor blades[S]. Beijing: Ministry of Publication and Distribution of Military Standards, Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2008.
- [4] General Electric Company. P3TF34—S4 Ultrasonic inspection of metallic bar stock using pulse echo immersion techniques[S]. Cincinnati: General Electric Company, 2007.
- [5] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册—超声卷[M].《美国无损检测手册》译审委员会译. 上海: 世界图书出版公司, 1996.  
American Society for Nondestructive Testing. American nondestructive testing manual (Volume 1 of ultrasonic)[M]. Review Committee of American Nondestructive Testing Manual, Trans. Shanghai: World Book Publishing Company, 1996.
- [6] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
LI Jiawei, CHEN Jimao. Nondestructive testing manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [7] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会. 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材: 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
The Editorial Board of Training Materials for Qualification and Certification of NDT Personnel in National Defense Science and Technology Industry. Training materials for qualification and certification of NDT personnel in national defense science and technology industry: Ultrasonic testing[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [8] 卞伟, 谢航云. 超声波聚焦检测焦距的探讨[J]. 宁夏电力, 2005(Z1): 286—288.  
BIAN Wei, XIE Hangyun. Discussion on focusing distance of ultrasonic focus detection[J]. Ningxia Electric Power, 2005(Z1): 286—288.
- [9] SEOK C, SCIENCE K, KIM Y H. Development of variable focal length ultrasonic transducer by changing curvature of PVDF[J]. Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 2014, 35: 241—242.
- [10] 濮海明, 王哲, 康宜华. 超声点聚焦探头在球体中的声束发散与聚焦[J]. 中国机械工程, 2018, 28(11): 1268—1273.  
PU Haiming, WANG Zhe, KANG Yihua. Sound beam's divergence and focus of ultrasonic point focusing probes in spheres[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 28(11): 1268—1273.

## Study on Acoustic Reflection Characteristics and Detection Application of Line Focusing Probe

DUAN Jiangang, XIONG Ying

(AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

**[ABSTRACT]** The line focusing probes with focal lengths of 25mm, 35mm, 45mm and 50mm were selected,  $\phi 1.5$ mm steel bar was used as reflector, by changing the relationship of position between the probe and the steel bar, the acoustic reflection characteristics of the line focusing probe in water were measured, and the detectable diameter range of the bar with different focal length was obtained; A line focusing probe with a focal length of 45mm was selected,  $\phi 47$  GH4169 superalloy bar sample was tested under different water distances, and the position of flat bottom hole used to determine the detection sensitivity of bar was obtained;  $\phi 18$  TC4 bar sample and the line focusing probes with focal lengths of 25mm, 35mm, 45mm and 50mm were selected, the experiments to characterize the reciprocating transmission of sound wave and directivity of sound beam were carried out, the selection method of water distance corresponding to the highest reflected wave amplitude of flat bottom hole used to determine the detection sensitivity of bar was obtained; The line focusing probes with focal lengths of 25mm, 35mm, 45mm and 50mm were selected, TC4 titanium alloy bar samples with different diameters were tested, the diameter range of detectable bar with line focusing probes of different focal length was verified. The measurement and characterization of acoustic reflection characteristics of line focusing probe and its application in bar inspection were solved.

**Keywords:** Line focusing probe; Reflector; Acoustic reflection characteristics; Reciprocating transmission; Sound beam directivity

(责编 阳光)