

# 小直径棒材爬波检测新技术及相关理论探讨

Non-conventional Ultrasonic Testing Technique for Small Bars  
and Study of Relevant Theory

南昌航空工业学院 彭应秋 李坚 薛丽华 邹韬  
Peng Yingqiu Li Jian Xue Lihua Zou Tao  
(Nanchang Institute of Aeronautical Technology)

**[摘要]** 小直径棒材的检测一直是比较棘手的问题,本文介绍一种适于此类棒材检测的新技术——单探头爬波水浸聚焦法,并对相关理论问题进行了回顾和探讨。

**关键词:** 爬波 探头 超声波水浸聚焦 小直径棒材

**[Abstract]** A single probe creeping longitudinal wave ultrasonic immersed focusing method is introduced. It is suited for testing bars in small diameter. The theory, which is relevant to this method, has been discussed and reviewed.

**Keywords:** creeping longitudinal wave probe ultrasonic immersed focusing method bars in small diameter

## 1 前言

小直径高温合金棒材的检测一直为人们所关注,直径为4~25mm的紧固件用高温合金小棒材,质量要求高,不论其表面或内部都不允许有超标缺陷。由于传统的超声检测方法存在盲区,故对小直径棒材尤其是丝材的检测通常采用涡流法,但涡流法只能检测表面和近表面缺陷,不能检测内部缺陷,而且此法对棒材的表面精度有很高的要求,无法对拔制法生产的高温合金棒材直接进行检测。为了同时检出小直径棒材的内部和近表面缺陷,本文从几何声学 and 波动声学的原理出发,分析了爬波的产生机理和特点,并据此分析了爬波用于小棒材探伤的可行性,介绍了试验参数和检测结果。

## 2 爬波的产生机理和特点

爬波也称为爬行纵波或头波。当纵波以第一临界角入射于界面时,在第二介质(必须是固体介质)中形成的一种非均匀波,此波在介质表面下以接近纵波的速度传播。

下面根据几何声学原理和 Snell 定律分析爬波的产生条件。根据 Snell 定律,当声波倾斜入射于两介质界面时,折射角随入射角的增大而增大,若第一介质中的纵

波声速  $C_{1L}$  与第二介质中的纵波声速  $C_{2L}$ 、横波声速  $C_{2T}$  满足下述关系:

$$C_{1L} < C_{2T} < C_{2L} \quad (1)$$

则当入射角  $\alpha = \arcsin\left(\frac{C_{1L}}{C_{2L}}\right)$  时,折射纵波沿界面传播,我们把此时的入射角称为第一临界角,以  $\alpha_{c1}$  表示,此时横波折射角  $\gamma_{c1}$  可由下式求出:

$$\gamma_{c1} = \sin^{-1}\left(\frac{C_{2T}}{C_{1L}} \sin \alpha_{c1}\right) \quad (2)$$

入射角不同时,对于液体/固体界面,纵波和横波透射系数  $D_{LL}$ 、 $D_{LT}$  可分别由(3)式和(4)式求出<sup>[1]</sup>

$$D_{LL} = \frac{\rho}{\rho_2} \frac{2Z_1 \cos 2\gamma}{Z_1 \cos^2 2\gamma + Z_T \sin^2 2\gamma + Z} \quad (3)$$

$$D_{LT} = \frac{\rho}{\rho_2} \frac{2Z_1 \sin 2\gamma}{Z_T \cos^2 2\gamma + Z_T \sin^2 2\gamma + Z} \quad (4)$$

其中  $Z = \frac{\rho C_{1L}}{\cos \alpha}$ ,  $Z_1 = \frac{\rho_2 C_{2L}}{\cos \beta}$ ,  $Z_T = \frac{\rho_2 C_{2T}}{\cos \gamma}$

式中  $\rho$ 、 $\rho_2$  分别为第一和第二介质的密度, $Z$ 、 $Z_1$  和  $Z_T$  表示倾斜入射时等效的垂直波阻抗, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为纵波入射角、纵波折射角及横波折射角,如图1所示。

有人计算过水/铝界面的  $D_{LL}$  和  $D_{LT}$  随入射角  $\alpha$  的变化曲线<sup>[2]</sup>,如图2所示。由图可见,当  $\alpha = \alpha_{c1}$  时,  $D_{LL}$  产生突变,达到最大值,而  $D_{LT}$  趋于零,因此可以认为,透

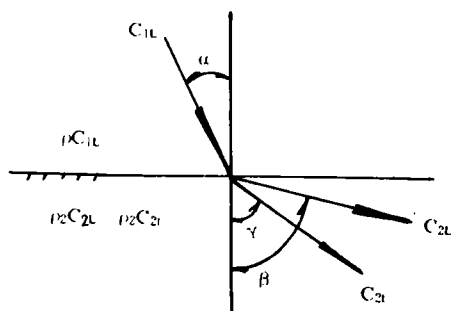
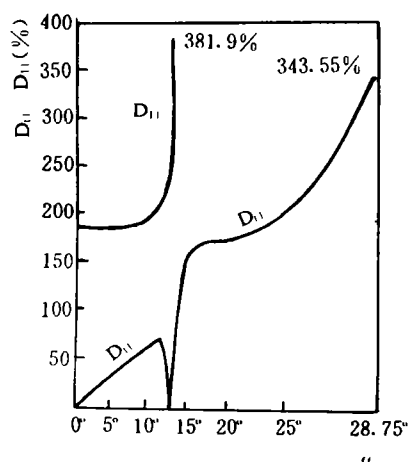


图1 入射波与折射波的方向示意图

图2 水/铝界面透射系数随入射角 $\alpha$ 的变化规律

射进入第二介质的能量全部转变为爬波的能量，即当入

射角等于第一临界角时，在第二介质中传播的为爬波。

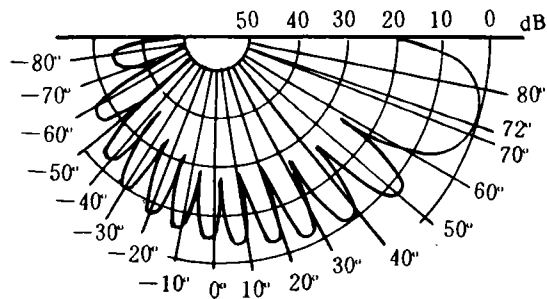
图2描绘的虽是水/铝界面的透射规律，但对满足(1)式的界面，其规律具有普遍性，即当入射角等于第一临界角时，折射纵波沿界面传播，且折射系数最大，而折射横波系数则趋于零。应当注意的是，图1中的 $D_{LL}$ 和 $D_{LL}$ 是相应势函数之比，而不是声压之比，因此其系数可达百分之数百。

上述分析能解释爬波的某些现象，但不能解释为什么爬波对表面粗糙度不敏感，为什么能检测表面下一定深度的缺陷，且具有比表面高得多的灵敏度。对此，有人用波动声学的原理进行过分析<sup>[3]</sup>。根据波动声学理论，爬波实际上是入射角等于第一临界角时折射纵波和折射横波的合成，此时质点的位移 $\vec{S}$ 可表示为：

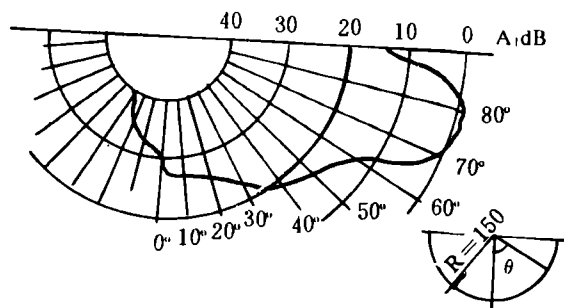
$$\vec{S} = \text{grad}\Phi + \text{rot}\vec{\Psi} \quad (5)$$

式中 $\Phi$ 和 $\vec{\Psi}$ 分别为折射纵波和折射波的势函数。图3为 $f=1.8\text{MHz}$ 、晶片 $D=18\text{mm}$ 、距入射点距离 $r=150\text{mm}$ 处、且入射角为第一临界角时的位移 $S$ 的幅值（以极坐标表示的指向性图）。

由图可见，爬波能量（或质点位移）虽集中于表面附近，但极大值并不是沿表面，而是与表面成一定角度（根据入射角在第一临界角附近的变化，此角度大约为 $14\sim 18^\circ$ ），且幅值比表面约高20dB，据此就能很好解释前面的疑问，而且可以得出下述结论：(1)爬波是入射角等于第一临界角时产生的一种特殊模式的波，它以接



(a) 理论计算值



(b) 测量值

图3 爬波的指向性图

近于纵波的速度传播，因此在其他条件相同时，其速度和波长都较大，故表面散射相对较弱，从而对表面粗糙度不敏感；(2)因爬波的最大幅度方向与表面成一定角度，此极大值并不是沿表面或平行于表面，故不能断言爬波就是折射角等于 $90^\circ$ 的纵波。根据波动声学原理，

爬波引起的质点振动是纵波和横波的叠加，因此爬波实际上是入射角等于第一临界角时折射纵波与折射横波的合成，它是一种特殊模式的波；(3)爬波最大幅值方向与表面成一小的角度，故爬波适于检测近表面缺陷（离表面10mm左右）或薄件中的缺陷；(4)根据以上分

析,可以认为爬波适于检查表面精度较低的高温合金小直径棒材(小棒可视为薄片),并可以从试验得到验证。

### 3 方法、参数及试验结果

#### 3.1 探头

爬波检测是近几年才提出的一种探伤方法,迄今大都采用双探头方式,而且涉及到的工件大都具有平面表面。

根据小棒材的特点,我们采用单晶线聚焦探头进行探伤,而且采用水浸方式,且探头的聚焦线与棒轴平行。

探头在水中的焦距  $f$  可参照普通水浸聚焦探头的公式(6)进行计算,因水中只能传播纵波。

$$f = r(1 - C_2/C_1) \quad (6)$$

式中  $r$  为声透镜的曲率半径,  $C_1$  和  $C_2$  分别为透镜和水中的纵波声速。但应注意的是,此时  $f$  不是垂直水距,即:探头焦点(实为焦线)不在探头的正下方,而是按水/棒界面时第一临界角的方向偏移,如图4所示。

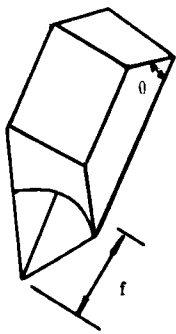


图4 探头斜楔示意图

水平偏移量  $L$  可按(7)式计算:

$$L = f \cdot \sin \alpha_{c1} \approx f \cdot \sin 14.5^\circ \approx 0.25f \quad (7)$$

因探头中声束是斜入射于声透镜,故探头斜楔的倾斜角  $\theta$  可由(8)式求出

$$\theta = \arcsin \left( \frac{C_0}{C_2} \sin \alpha_{c1} \right) \quad (8)$$

式中  $C_0$  和  $C_2$  分别为斜楔和水中声速。声束方向与探头斜楔倾角的关系示于图5。

试验表明,对于  $\phi 4 \sim 25\text{mm}$  的小直径棒材,当水中焦点落于棒材中心轴线与上表面之间时,其灵敏度、分辨率及信噪比都比较高。

考虑到被探棒材是按制而成的,缺陷的取向大都沿

棒轴延伸,故第一类人工反射体为加工在试棒端面的  $\phi 0.8$  平底孔,同时考虑到对各种取向缺陷的可探性,我们还加工了与棒轴垂直的平底孔,直径亦为  $\phi 0.8$ 。结果表明,上述人工缺陷均能可靠发现,并且具有较高的信噪比。且能发现位于下表面的表面裂纹。

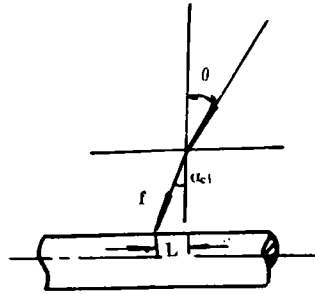


图5 声束方向

### 4 结论

(1) 单探头水浸线聚焦爬波法适合于检测直径为  $4 \sim 25\text{mm}$  高温合金小棒材,即使这类棒材具有较粗糙的表面。

(2) 此方法在检查小棒材时具有较高的灵敏度和分辨力,能同时检查棒材内部和靠近表面的缺陷。

#### 参考文献

- 1 何祚镛,赵玉芳.《声学理论基础》,国防工业出版社,1981, PP67~76
- 2 J. Krautkramer, H. Krautkramer. Ultrasonic Testing of Materials, third Ed., New York, 1983, PP611
- 3 李克明编译.表面下纵波的研究和实验,《国外无损检测》,1985年, No. 1, P2163~2166

\*\*\*\*\*  
(上接第16页)

### 4 结论

(1) 芳纶纤维缠绕铝内衬复合材料气瓶在打压爆破过程中存在早期声发射峰,这点与玻璃纤维相一致,但个别气瓶还有前期峰,这是玻璃纤维气瓶所没有的。

(2) 费利西蒂比是评价结构完整性重要指标,它与爆破强度存在着对应关系,有望作为气瓶质量筛选和分级的关键判据,但仍需要进一步研究。

(3) 临近爆破时,高幅值事件( $>96\text{dB}$ )明显出现,是气瓶破坏前重要预兆。

#### 参考文献(略)