

引用格式: 罗雨, 刘希灵, 马春德. 破损铝电解槽阴极钢棒的冲击回波法检测[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 288-294. [LUO Yu, LIU Xiling, MA Chunde. Detection of cathode steel rod of aluminium electrolyzer by impact echo method[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 288-294.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.02.021

# 破损铝电解槽阴极钢棒的冲击回波法检测

罗雨<sup>1</sup>, 刘希灵<sup>1</sup>, 马春德<sup>2</sup>

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学高等研究中心, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 电解槽的寿命及修复关系着整个电解铝行业的经济效益, 是不容忽视的技术问题。为能对破损电解槽进行及时修复从而延长电解槽寿命, 提出应用冲击回波法对电解槽破损状况进行评估。首先利用数值模拟方法探讨了冲击回波激励源特性对应力波脉冲宽度及应力峰值的影响, 得出激励源直径  $D$  与脉冲宽度  $t_c$  呈线性相关:  $t_c=0.004D$ , 且与应力峰值( $P$ )呈指数相关  $P=2e^8D^{1.928}$ , 而冲击速度  $v$  不改变脉冲宽度  $t_c$ , 但与应力峰值  $P$  呈线性相关:  $P=0.0751v-0.0686$ 。进而基于数值分析结果, 运用冲击回波法检测破损电解槽中的阴极钢棒, 通过对检测结果的时频域分析, 得出了阴极钢棒的破损状况及位置, 并与刨槽后真实的阴极钢棒对比。结果表明: 冲击回波法能很好地实现电解槽破损部位的定位, 可为电解槽寿命评估与修复提供参考。

**关键词:** 阴极钢棒; 冲击回波法; 数值模拟; 脉冲宽度; 应力峰值; 破损状况

中图分类号: TB52 TF82 文献标志码: A 文章编号: 1000-3630(2022)-02-0288-07

## Detection of cathode steel rod of aluminium electrolyzer by impact echo method

LUO Yu<sup>1</sup>, LIU Xiling<sup>1</sup>, MA Chunde<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;  
2. Advanced Research Center, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

**Abstract:** The service life and repair costs of electrolyzer are related to the economic benefits of the entire electrolytic aluminium industry, which is a technical issues that cannot be ignored. In order to repair the damaged electrolyzer in time and prolong the service life of the electrolyzer, the impact echo method is proposed to evaluate the damaged condition of the electrolyzer. Firstly, the influence of the characteristics of impact echo excitation source on the stress wave pulse width and stress peak is discussed by numerical simulation. The results show that there are a linear correlation between the diameter of the exciting source ( $D$ ) and the pulse width ( $t_c$ ) of stress wave ( $t_c = 0.004D$ ), and an exponential correlation between the diameter of the exciting source ( $D$ ) and the peak stress ( $P$ ) ( $P = 2e^8D^{1.928}$ ). However, the impact velocity ( $v$ ) does not change the pulse width ( $t_c$ ), but there is a linear correlation between the impact velocity ( $v$ ) and the peak stress  $P$  ( $P = 0.0751v - 0.0686$ ). Then, based on the results of numerical simulation, the impact echo method is used to detect the cathode steel bar in the damaged electrolyzer. Through the time-frequency analysis of the detection results, the damage condition and position of the cathode steel bar are obtained, and the analysis results are compared with the damage condition of the real cathode steel bar after grooving. The results show that the impact echo method can be used to locate the damaged parts of the electrolyzer, which can provide a reference for the life evaluation and repair of the electrolyzer.

**Key words:** cathode steel rod; impact echo method; numerical simulation; pulse width; peak stress; damage condition

## 0 引言

在电解铝生产过程中, 电解槽阴极在热、电、磁、流体及应力场的作用下易产生局部破损, 从而造成许多危害, 如高温铝液泄露引发火灾、铝产品质量降低等<sup>[1]</sup>。这就需要对电解槽阴极的破损状况

进行检测, 从而指导企业对电解槽进行局部修复或者停槽大修。然而现有的电解槽常规破损检测技术例如铝熔液中铁含量检测<sup>[2]</sup>、炉底温度检测<sup>[3]</sup>、阴极压降异常检测<sup>[4]</sup>及钢钎探查表面破损等方法没有参照标准, 无法评估破损程度和准确定位破损位置, 从而导致电解槽只要产生破损后就停槽大修而不是及时作出修复, 并且大修周期长、费用高以及系列铝电解生产线电流空耗, 大幅度增加电耗成本<sup>[5]</sup>。因此, 如果能检测电解槽相关部位的破损状态及位置, 即可以详细地评估电解槽的破损状况和使用寿命, 这对于电解槽修复能起到很好的指导作用。

收稿日期: 2021-01-31; 修回日期: 2021-04-01

作者简介: 罗雨(1996—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为电解铝工艺及安全检测。

通信作者: 刘希灵, E-mail: lxlenglish@163.com

然而由于电解槽结构复杂, 很难对直接与高温熔融液接触的阴极炭块进行研究。但阴极炭块中包裹的阴极钢棒有端部出露在电解槽外, 则可以通过检测阴极钢棒来间接反映阴极炭块的破损状况。因此, 如果能用无损检测的方法通过阴极钢棒出露部位对其破损状况进行检测, 则能及时有效评估阴极钢棒的完整性, 并且评估整个电解槽的破损状态。通常对金属材料中缺陷的检测采用超声波探伤的方法<sup>[6-8]</sup>, 但由于工程现场条件存在强磁场以及超声探伤中所采用信号的发射频率较高, 无法在高温和铝熔液侵蚀的钢棒中传播较长的距离, 其探测精度受限。因而, 对电解槽内阴极钢棒的检测需要选用激发信号频率较低、穿透性较好的检测技术。而冲击回波检测技术正好满足这种检测要求, 其被广泛用于材料内部缺陷的检测中, 如木材内部空洞位置探测<sup>[9]</sup>、桩基完整性检测<sup>[10]</sup>、混凝土内部缺陷检测<sup>[11]</sup>、岩石内部缺陷检测<sup>[12]</sup>以及高炉耐火壁厚度测量<sup>[13]</sup>等。相关研究结果也表明, 冲击回波法可较好地识别材料结构的完整性以及缺陷位置。基于此, 本文利用 ABAQUS 软件探讨了激振源对冲击回波法检测效果的影响, 得到了冲击回波探测阴极钢棒中缺陷的激振参数, 并以此为基础开展了工程现场检测, 很好地评估了阴极钢棒的破损状况并对破损部位进行定位。这是首次将冲击回波探测技术用于电解槽阴极钢棒的缺陷测试, 其结果可为整个行业提供参考, 从而减少由电解槽部分破损导致的不必要停槽大修带来的经济损失。

## 1 冲击回波法基本原理

在电解槽中阴极钢棒的长度远远大于其截面尺寸, 可假设为一维弹性杆件, 并以平面应力波波动理论为基础<sup>[14]</sup>。冲击回波法的示意图如图 1 所示。利用激振设备敲击阴极钢棒顶端, 在冲击力的激励作用下, 顶端振动以应力波的形式沿钢棒向下传播, 如果遇到缺陷则产生部分反射波, 通过阴极钢棒顶端传感器接收回波, 根据回波的到达时刻及相位可判别缺陷的位置、性质等, 而余下的应力波会继续传播直至钢棒底端界面处再反射回来; 其中, 应力波反射和透射的能量大小取决于缺陷处介质波阻抗的大小。图 1 中, R 波为 P 波与 S 波耦合生成的非均匀平面波, 沿固体表面传播。 $\Delta t$  表示 P 波被其他波(R 波、S 波)干扰的时间。文中阴极钢棒缺陷处含有电解质、铝液等杂质, 波阻抗变小, 反射波与入射波相位相同。此外, 应力波会在弹性体内周期性来回反射, 若传感器靠近冲击点, 则 P

波一次反射的距离为  $2L$ , 将 P 波周期性反射的加速度-时间曲线通过傅里叶变换得到频率域中的峰值  $f$ , 则可得到:

$$f = c / (2L) \quad (1)$$

其中:  $L$  为弹性杆的长度(m);  $c$  为 P 波在弹性杆中的传播速度( $m \cdot s^{-1}$ )。

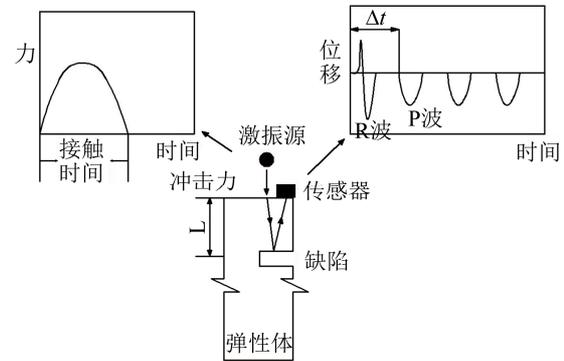


图 1 冲击回波法示意图

Fig.1 Schematic diagram of impact echo method

## 2 冲击回波法激振参数的确定

通常在运用冲击回波方法对材料结构进行缺陷检测时需要着重考虑两方面的问题: 一是激振应力波的能量, 保证应力波信号能够到达结构底端; 二是激振应力波的频率, 保证其包含的频率成分能识别一定尺寸的缺陷。这就需要对冲击回波激振源进行详细地研究。因此, 本文通过数值模拟方法分析了应力波信号频率、能量与激振设备间的关系。由于电解槽中存在强磁场, 且阴极钢棒长度也较短, 故选择用不同直径的铜球来激振应力波信号<sup>[13]</sup>。利用 ABAQUS 软件模拟应力波在阴极钢棒中的传播, 在计算过程中, 采用实体单元对阴极钢棒和铜球进行建模, 阴极钢棒以及激振铜球的各项物理力学参数如表 1 所示。阴极钢棒尺寸与现场实际保持一致, 长度为 2.2 m, 断面长方形的尺寸为  $0.2 m \times 0.1 m$ , 其中阴极钢棒采用六面体网格划分, 共 51 051 个节点、44 000 个单元; 激振源小球采用四面体网格划分, 共 5 068 个节点、3 281 个单元。

表 1 阴极钢棒及激振小球的材料参数  
Table 1 Material parameters of cathode steel rod and excitation ball

部件	材料	密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/ ( $N \cdot m^{-2}$ )	波速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	泊松比
阴极钢棒	Q195 钢	7 690	$2.12 \times 10^{11}$	5 250	0.286
激振小球	铜	8 500	$8 \times 10^{10}$	-	0.360

此外, 由于阴极钢棒处于阴极炭块的包裹之中且阴极炭块的声阻抗远远小于钢棒的阻抗, 因此将其四周看作是完全反射边界; 其次小球冲击力很小, 几乎不会与炭块存在相对位移, 故将阴极钢棒底端设置为固定约束。

### 2.1 不同直径小球激振的脉冲宽度特征

激振信号的频率由阴极钢棒长度方向的振动特性来决定。采用铜球进行激振应力波时, 弹性冲击力与时间的关系近似为半周期的正弦曲线, 表达式为

$$F(t) = A \sin\left(\frac{\pi}{t_c} \cdot t \cdot g\right) \quad (2)$$

其中:  $t_c$  为铜球与阴极钢棒的接触时间,  $g$  为重力加速度。

接触时间  $t_c$  的大小决定了激振应力波的频率成份, 而  $t_c$  主要取决于激振球的直径以及阴极钢棒的表面条件<sup>[15]</sup>。接触时间与铜球半径的关系式为

$$t_c = K \frac{r}{\left(\frac{v^2}{2g}\right)^{0.1}} \quad (3)$$

其中:  $K$  为系数;  $r$  为铜球的半径(m);  $v$  为铜球的冲击速度(m·s<sup>-1</sup>)。

在利用冲击回波进行测试时, 冲击速度通常不会太大, 从而冲击速度对接触时间  $t_c$  的影响可以忽略。因此, 在通过数值计算方法研究激振源对应力波频率的影响时, 仅考虑激振小球直径这一因素, 即分别用直径为 2、3、4、5 以及 6 cm 的铜球以 10 m·s<sup>-1</sup> 的速度撞击阴极钢棒的过程, 距离小球激振中心附近单元的计算结果如表 2, 应力时程曲线如图 2 所示。

表 2 不同直径小球数值模拟结果  
Table 2 Numerical simulation results of the ball with different diameters

铜球直径/cm	接触时间/ms	应力峰值/MPa	钢棒长度/m
2	0.090	0.123	2.263
3	0.118	0.304	2.273
4	0.184	0.451	2.258
5	0.214	0.693	2.268
6	0.244	1.115	2.268

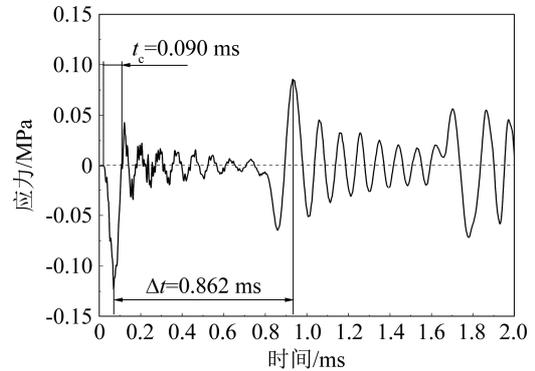
根据表 2 中的数据拟合得到了接触时间  $t_c$  (s) 与铜球直径  $D$  (m) 的近似关系:

$$t_c = 0.004D, R^2 = 0.9766 \quad (4)$$

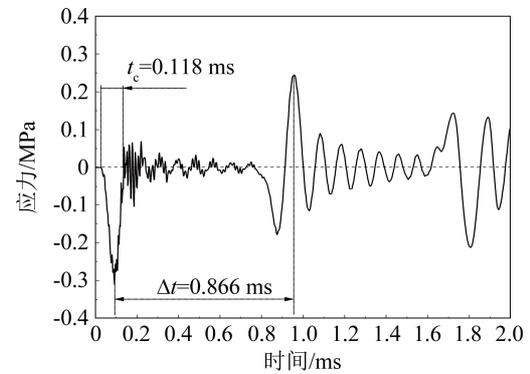
式中:  $R^2$  表示拟合度。再者, 不同直径的小球由于重量不同, 而冲击过程中, 球的动能将会转化为在阴极钢棒内部的弹性势能, 产生应力波的质点位移与冲击力成正比, 故应力峰值  $P$  (MPa) 与铜球直径

$D$  (m) 也存在近似关系:

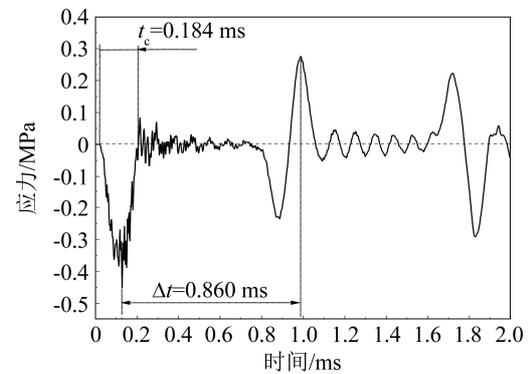
$$P = 2e^8 D^{1.9288}, R^2 = 0.9923 \quad (5)$$



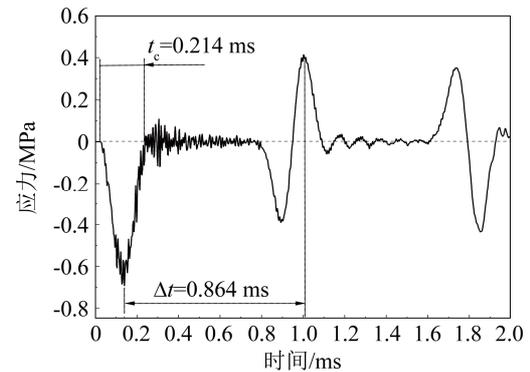
(a) 小球直径为 2 cm



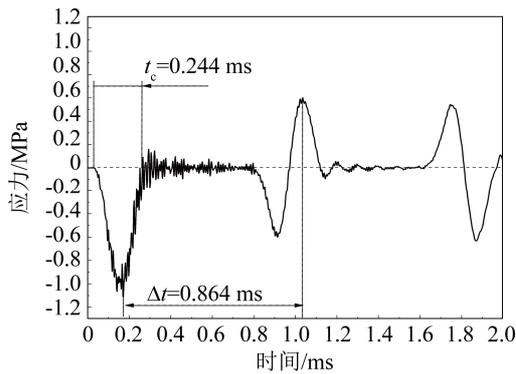
(b) 小球直径为 3 cm



(c) 小球直径为 4 cm



(d) 小球直径为 5 cm



(e) 小球直径为 6 cm

图 2 阴极钢棒中心附近单元的应力时程曲线

Fig.2 Stress-time curves of the element near the center of cathode steel rod

在工程应用中，通常采用增加激振源直径(重量)或者冲击速度来增加激振能量，但是过度依赖激振源重量来保证获得清晰的反射回波信号，往往会造成应力波频率太小，以至于丧失对微小缺陷的识别能力；因此在应用过程中应先确定好合适的检测频率即确定激振源的直径(重量)，后通过增加冲击速度或者敲击力的大小来获得清晰的反射回波，这在 2.2 节中会进行详细分析。此外，从表 2 可看出虽然不同直径小球激振得出的阴极钢棒长度都在 2.2 m 附近，且经计算其误差在 5% 以内，但如图 2 所示，直径为 2、3、4 cm 小球激振得到的钢棒底端反射回波附近存在部分干扰波形，会影响到钢棒底端反射回波的采集，而直径为 5、6 cm 的小球激振得到的阴极钢棒底端反射回波附近几乎没有其他波形干扰，能够被清晰地识别出来。因此，在对现场电解槽中阴极钢棒进行检测的过程中，为保证冲击回波法对缺陷检测具有足够的分辨率以及能够很好地识别到底端的反射回波，以 5 cm 直径的铜球作为激振源。

## 2.2 不同冲击速度激振的应力峰值特征

激振信号的能量需要考虑到阴极钢棒本身和周围阴极炭块中的应力波传播损失，阴极钢棒和阴极炭块在高温状态下相对常温状态会产生软化行为，应力波能量损失会增大，故测试过程中必须加大冲击回波的能量。虽然通过增加激振小球的直径可以增大应力峰值，但其同时也会改变冲击回波的激振频率，从而影响冲击回波检测技术的分辨率。因此，为保证每次对阴极钢棒激振时接触时间(频率)保持不变，采用相同直径的小球以不同冲击速度对阴极钢棒激振。采用 2.1 节中确定的直径为 5 cm 的铜球作为激振源，分别以 2、4、6、8、10 m·s<sup>-1</sup> 的速度对阴极钢棒进行激振，得到应力峰值与冲击

速度间的关系，从而为现场选择冲击速度提供依据。小球激振中心附近单元冲击速度与应力峰值的计算结果如表 3 所示，应力时程曲线如图 3 所示。

表 3 冲击速度与应力峰值计算结果  
Table 3 Calculation results of impact velocity and peak stress

冲击速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	应力峰值/ (MPa)	冲击速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	应力峰值/ (MPa)
2	0.107	8	0.543
4	0.213	10	0.693
6	0.354		

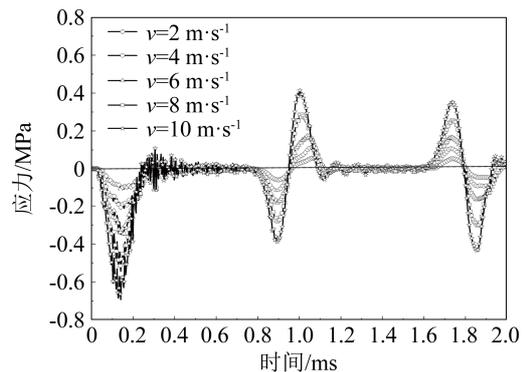


图 3 不同冲击速度的应力时程曲线

Fig.3 Stress-time curves at different impact velocities

通过线性回归分析，可以得出应力峰值与冲击速度的关系满足关系式：

$$P = 0.0751v - 0.0686, R^2 = 0.9912 \quad (6)$$

其中： $P$  为应力峰值(MPa)； $v$  为冲击速度(m·s<sup>-1</sup>)。

从图 3 中可看出，增大冲击速度几乎不改变激振小球与阴极钢棒的接触时间，而仅仅改变了应力波的峰值也就是激振能量。因此，在工程应用中，若不能得到明显的反射回波，可以根据式(6)适当增加冲击速度来增大应力峰值，从而达到检测要求。

基于上述模拟结果可见，激振小球的直径对冲击回波检测频率及能量有着密切关系，而且从结果分析中来看，5 cm 直径的铜球激振阴极钢棒既能保证反射回波被很好地采集，也能使得冲击回波检测频率尽可能高。另外，对于阴极钢棒底端的反射回波能否到达顶端露头处，则考虑通过控制铜球的冲击速度来实现。

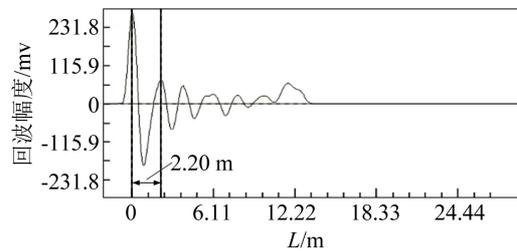
## 3 阴极钢棒冲击回波法缺陷检测的现场应用

采用冲击回波装置 RS-1616(KS)对重庆旗能电铝有限公司电解铝车间破损电解槽中的阴极钢棒进行了检测。由于现场环境限制，无法安装小球发射装置，将手锤端部制作成为 5 cm 直径的铜球(保

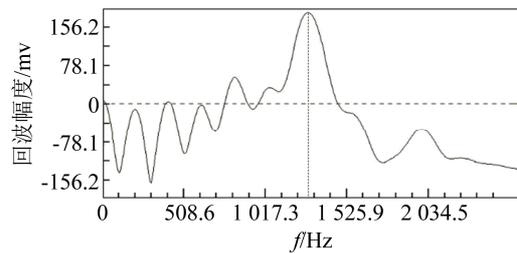
证敲击阴极钢棒端部时保持一致的接触面积)对阴极钢棒激振应力波信号,通过控制敲击速度的大小来保证传感器接收到钢棒底端的反射回波。由于脉冲宽度  $t_c$  的大小决定了激振产生应力波的频率成份,一般来说最高的频率成份的频率值约为  $1.5/t_c$  (即频带为  $0\sim 1.5/t_c$ )<sup>[15]</sup>,而 5 cm 直径的铜球的激振所产生的脉冲宽度为 0.214 ms,即最高频率成份为 7 kHz,故本实验中选用频率范围为 0.5~10 kHz 的加速度传感器,其型号为 RS-LC,灵敏度为  $100\text{ mv}\cdot\text{g}^{-1}$ ,量程为 50 g,并将其安置于敲击点附近。冲击回波装置的采集参数设置为低噪声前置放大 10 倍,浮点放大 64 倍,A/D 转换位数 16 bit,采样间隔 12  $\mu\text{s}$ ,采样长度 1 024 点,通道触发方式。

### 3.1 完整阴极钢棒检测结果

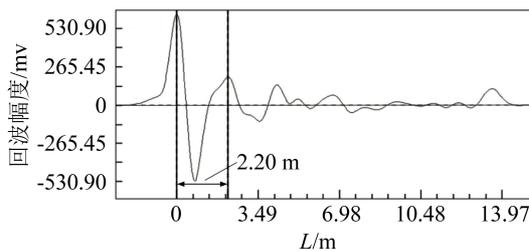
图 4 分别为阴极钢棒  $A_1$ 、 $A_2$  的实测时域及频域曲线图。其中图 4(a)为阴极棒  $A_1$  的实测时域波形图,图 4(b)是对时域波形图进行傅里叶变换得到的频域图。从图 4(a)中可见有明显的从阴极钢棒顶端和底端的反射回波,且期间未出现其他反射回波,波形完整规则,且相邻两波峰之间的时间间隔近似相等,振幅也逐渐衰减。从频域角度来看,图 4(b)



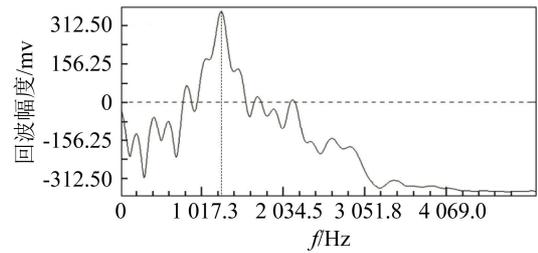
(a)  $A_1$  实测时域曲线



(b)  $A_1$  实测频域曲线



(c)  $A_2$  实测时域曲线



(d)  $A_2$  实测频域曲线

图 4 阴极钢棒中检测得到的时域、频域曲线

Fig.4 Time and frequency domain waveforms detected in steel rod

的  $A_1$  频谱图中基频  $f_m$  为 1 286.8 Hz,波速  $c$  为  $5\,093\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $f=c/(2L)=1\,157\text{ Hz}$ ;图 4(d)的  $A_2$  号阴极钢棒频谱图中基频  $f_m$  为 1 261.39 Hz,波速  $c$  为  $5\,820\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $f=c/(2L)=1\,332.7\text{ Hz}$ ;两者的基频与  $f$  值均相差不大。因此判断这两根阴极钢棒完整程度较好。此外,通过电解槽停槽后的实际破损位置验证了判断结果,如图 5 所示。



(a)  $A_1$



(b)  $A_2$

图 5 阴极钢棒的实际破损位置

Fig.5 Actual damage positions of cathode steel rod

### 3.2 含缺陷阴极钢棒检测结果

图 6 为阴极钢棒含缺陷时的实测时域、频域曲线图,其中图 6(a)为时域波形图,图 6(b)是对时域波形图进行傅里叶变换得到的频域图。从图 6(a)中可区分阴极钢棒顶端和底端反射回波,但期间出现了同相位的反射回波,因此判断其钢棒中存在缺陷。且通过时域曲线可得出,  $A_3$ 、 $A_4$  号阴极钢棒分别约在 1.01、0.94 m 处存在缺陷。根据频域分析理论,  $A_3$  的缺陷位置为  $d=c/(2f)=3\,107/1\,525/2=1.01\text{ m}$ ,  $A_4$  的缺陷位置为  $d=c/(2f)=2\,026/1\,220.74/2=0.82\text{ m}$ ,结果显示两者均与时域分析出的缺陷位置相差不大。图 6(b)中  $A_3$  频谱中基频  $f_m$  为 686.85 Hz;图 6(d)中  $A_3$  频谱中基频  $f_m$  为 946.04 Hz。此外,频谱图中阴极钢棒长度对应的频率向低频移动,而缺陷处的频率则向高频漂移,这与 Zhou 等<sup>[16]</sup>通过数值模拟得出的结构体厚度及损伤的结论一致。此外,通过电解槽停槽后的实际破损位置验证了判断结果,如图 7 所示。

冲击回波检测结果与阴极钢棒实际破损位置

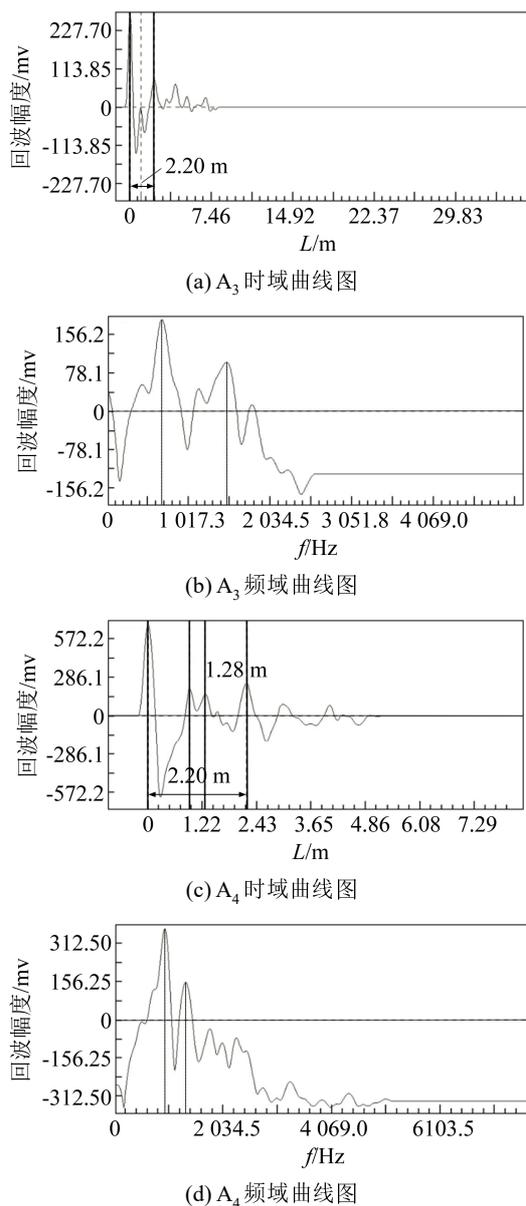


图 6 含缺陷时的时域、频域曲线图

Fig.6 Time and frequency domain waveforms detected in the defective steel rod

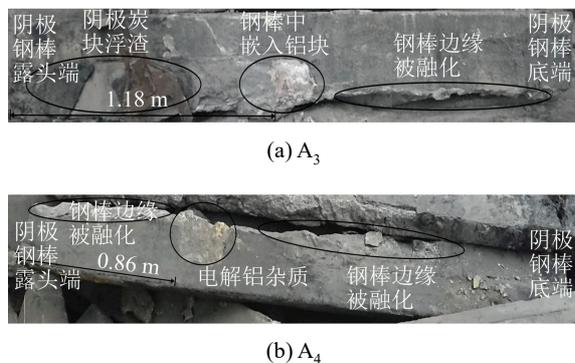


图 7 含缺陷阴极钢棒的实际破损位置

Fig.7 Actual damage positions of the defective cathode steel rod

列于表 4。现场试验结果表明，冲击回波技术能较好地识别阴极钢棒中的缺陷，且误差也在允许范围

以内，可被用于铝电解槽生产过程中的状态检测。

表 4 冲击回波检测结果与实际破损位置  
Table 4 The results of impact echo detection and actual damage location

编号	时域分析缺陷位置/m	实际缺陷位置/m	钢棒底端位置/m	误差/%
A <sub>1</sub>	2.2	-	2.20	-
A <sub>2</sub>	2.2	-	2.20	-
A <sub>3</sub>	1.01	1.18	2.20	14.4
A <sub>4</sub>	0.94	0.86	2.20	9.3

## 4 结论

通过以上的研究分析，得出以下结论：

(1) 本文利用有限元分析方法对冲击回波技术的激振源进行了研究，得出了应力波频率主要和激振源与阴极钢棒的接触时间有关，而接触时间  $t_c$  与激振小球直径  $D$  存在  $t_c=0.004D$  的近似关系，且激振小球的直径  $D$  与应力峰值  $P$  间存在  $P=2e^8 D^{1.9288}$  的关系式。为保证传感器能够接收到阴极钢棒底端反射回波，对不同冲击速度的应力波能量进行研究，得到了激振小球冲击速度  $v$  与应力峰值  $P$  间的关系式： $P=0.0751v-0.0686$ 。此外，通过对数值模拟结果得出了适用于电解槽中阴极钢棒破损状况检测的激振源直径与冲击速度。

(2) 现场试验结果表明，冲击回波法可用于对电解槽阴极钢棒进行破损检测，其中完整阴极钢棒时域曲线中存在明显的多次反射回波，且每次反射回波的时间间隔相同；而在破损阴极钢棒中顶端和底端反射回波之间会存在同相位的缺陷处回波，且在频谱图中会出现显著的高频成分，试验结果可为电解铝行业中电解槽的破损程度的评估提供参考。

(3) 冲击回波法是基于应力波的一种检测结构厚度、缺陷的无损检测方法，能在电解铝生产过程中得出电解槽的破损状态。然而目前文中得出的阴极钢棒破损位置虽能对电解槽停槽及修复提供指导，但其检测精度还有待提高。因此，考虑到阴极钢棒还存在温度梯度，在今后的研究中还将详细研究应力波在阴极钢棒中随温度变化的传播特性，着力提高冲击回波法检测阴极钢棒破损位置的精度。

## 参 考 文 献

[1] 白卫国, 曹永峰, 解宇斌, 等. 铝电解槽阴极钢棒被侵蚀现象探析[J]. 世界有色金属, 2020(20): 5-7.  
BAI Weiguo, CAO Yongfeng, XIE Yubin, et al. Analysis of corrosion phenomenon of cathode steel bar in aluminum electrolytic cell[J]. World Nonferrous Metals, 2020(20): 5-7.

[2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 铝及铝合金化

- 学分析方法 第 4 部分: 铁含量的测定: GB/T 20975.4—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [3] 王进录, 施哲, 丁吉林, 等. 铝电解槽破损判定标准的分析与探讨[J]. 轻金属, 2011(8): 39-41.  
WANG Jinlu, SHI Zhe, DING Jilin, et al. Analysis and discussion for the criterion of the damaged aluminium electrolysis cell[J]. Light Metals, 2011(8): 39-41.
- [4] HAUPIN W E. Cathode Voltage Loss in Aluminum Smelting Cells Essential Readings in Light Metals, 2016.
- [5] 杨军龙, 杨永. 铝电解槽底部阴极炭块局部破损修复方法: CN106637301B[P]. 2019-01-04.
- [6] 孙锦中, 马世伟, 蔡叶青, 等. P91 钢高温热损伤的二次谐波评价[J]. 声学技术, 2015, 34(6): 510-514.  
SUN Jinzhong, MA Shiwei, CAI Yeqing, et al. Second-harmonic evaluation to the thermal damage of P91 steel[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(6): 510-514.
- [7] WANG Z, CHENG J W. Numerical and analytical study for ultrasonic testing of internal delamination defects considering surface roughness[J]. Ultrasonics, 2021, 110: 106290.
- [8] 王浩, 徐永乐. 超声波探伤在钢结构工程中的综合应用[J]. 无损探伤, 2016, 40(1): 47-48.  
WANG Hao, XU Yongle. Comprehensive application of ultrasonic flaw detection in steel structure engineering[J]. Nondestructive Testing Technology, 2016, 40(1): 47-48.
- [9] 梁臣, 冯海林, 方益明, 等. 基于冲击回波的原木内部空洞位置检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(11): 265-272.  
LIANG Chen, FENG Hailin, FANG Yiming, et al. Detection method for hole positions in logs based on impact echo[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 265-272.
- [10] NI S H, YANG Y Z, TSAI P H, et al. Evaluation of pile defects using complex continuous wavelet transform analysis[J]. NDT & E International, 2017, 87: 50-59.
- [11] 李炎隆, 王军忠, 陈俊豪, 等. 冲击回波法对混凝土内部损伤检测的试验研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(1): 149-154, 478.  
LI Yanlong, WANG Junzhong, CHEN Junhao, et al. Experimental study on the detection of internal damage of concrete by impact-echo method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1): 149-154, 478.
- [12] MONTIEL-ZAFRA V, CANADAS-QUESADA F, CAMPOS-SUÑOL M J, et al. Monitoring the internal quality of ornamental stone using impact-echo testing[J]. Applied Acoustics, 2019, 155: 180-189.
- [13] WANG C Y, CHIU C L, TSAI K Y, et al. Inspecting the current thickness of a refractory wall inside an operational blast furnace using the impact echo method[J]. NDT & E International, 2014, 66: 43-51.
- [14] YEH P L, LIU P L, HSU Y Y. Parametric analysis of the impact-echo phase method in the differentiation of reinforcing bar and crack signals[J]. Construction and Building Materials, 2018, 180: 375-381.
- [15] JIANG W, XIE Y J, WU J X, et al. Identifying bonding interface flaws in CRTS III type ballastless track structure using the impact-echo method[J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111429.
- [16] ZHOU C S, WANG P, HU Z P, et al. Numerical simulation of impact-echo method identify the depth of honeycomb damage in unballasted track[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 584-586: 2060-2067.