

DOI: 10.11973/wsjc201712006

# 小角度纵波在固-气、固-液界面的反射

马雪艳, 莫润阳

(陕西师范大学 陕西省超声学重点实验室, 西安 710119)

**摘要:** 超声为液位检测提供了多种方案。对大孔径密闭容器, 一种可能的方案就是通过单探头从容器侧壁采集容器内壁面与液体形成的界面反射回波进行液位评价, 这时固-液、固-气反射回波的差异决定了液位评价方法的灵敏度。首先利用斯涅耳定理和边界条件, 理论分析了超声纵波由固体一侧倾斜入射到固体-真空和固体-液体界面时纵波的声压反射系数与入射角之间的函数关系; 结合密闭绝缘瓷套内部硅油油位的检测实例, 在已知容器壁材料及内部液体介质特性的情况下, 给出了纵波在陶瓷-硅油界面和陶瓷-空气界面反射系数与入射角之间的函数曲线, 获得两者取得最大差异时的最佳角度。为进一步优化超声侧壁油位检测方案及提高检测灵敏度提供依据。

**关键词:** 纵波; 反射系数; 瓷套管; 液位

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2017)12-0025-04

## The Reflection of Oblique Incidence P Wave at Small Angle in the Solid-Liquid and Solid-Gas Interface

MA Xueyan, MO Runyang

(Shaanxi Key of Laboratory Ultrasound, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Ultrasonic techniques offer several possible strategies for performing liquid level measurements. One possible solution is to use a pulse-echo measurement of reflection from the liquid-container interface by single probe for large container. The improvement of the difference of reflection coefficient between container-liquid and container-air interface is the key technology to enhance the detection sensitivity. Theoretical analysis on the reflection of longitudinal wave incidence obliquely in two types interface was performed based on Snell theorem and the boundary condition when the ultrasonic impedance of container material and liquid medium were fixed in some application. The functional relationship graphics between reflection coefficient and incidence angle in ceramic-silicone oil and ceramic-air interface were given. This is an example used in porcelain-bushing oil level measurement. In addition, there is an optimal incident angle for the incidence longitudinal wave with the maximum difference in the two type interface above mentioned, which is equal to 24.36°. The method would be a useful strategy for performing liquid level measurements, especially to the situation of low impedance liquid inside sealed containment vessels.

**Key words:** longitudinal wave; reflection coefficient; porcelain-bushing; liquid level

声波传播过程中遇到固/液、固-气界面时, 不仅会发生反射和折射现象, 当倾斜入射时还会发生波

型转换, 此时反射系数的大小不仅与界面两侧介质特性阻抗有关, 还与入射角度有关<sup>[1]</sup>。超声侧壁液位测量本质上是对容器侧壁使用超声脉冲反射或透射的方法来确定气液界面的位置<sup>[2]</sup>。有些情形下, 比如对特大型容器, 脉冲反射技术是唯一选择<sup>[3]</sup>。利用脉冲反射技术确定液位时, 提高声波在固-液, 固-气界面的反射率差异是提高该方法灵敏度的关键。笔者在各向同性介质情况下, 利用平面波的边界条件推导超声纵波倾斜入射到固体/气体/固体/

收稿日期: 2017-06-25

基金项目: 陕西省科技攻关资助项目(2016GY-057); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(GK201603102)

作者简介: 马雪艳(1994—), 女, 本科, 主要研究方向为超声检测, 1844540831@qq.com

通信作者: 莫润阳(1968—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为超声检测, mmrryyycn@snnu.edu.cn

液体界面时,声压反射系数与入射角之间的函数关系;并结合高压电缆终端瓷套管内绝缘油液位检测问题进行最佳入射角度的选取。

## 1 基本理论

超声纵波也叫膨胀波或者P波,而不变体积波或者剪切波叫S波也就是横波。根据位移偏振方向,S波又被分为SV波和SH波,位移偏振方向为水平的波称为SH波,位移偏振方向垂直于地面的波称为SV波<sup>[4]</sup>。文章主要关注P波倾斜入射时,声波在固体/气体、固体/液体界面反射率的差异。

### 1.1 P波在固体/液体界面的反射特性

当P波在固体/液体界面由固体一侧倾斜入射到界面时会发生模式转换,反射波有纵波和横波两种模式,但由于液体中不能传播横波,所以折射波只有P波。P波倾斜入射到固体/液体界面,发生的反射和折射如图1所示。图中,α为P波的入射角(P波的反射角角度等于α的值);β为反射SV波的角度;α'为折射P波的折射角。

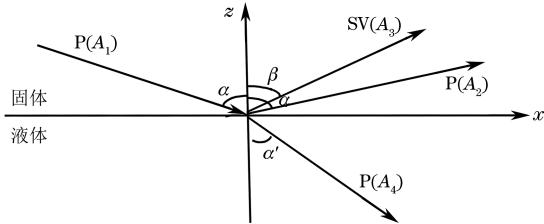


图1 入射P波在固体/液体界面的反射和折射示意

入射P波的位移为

$$\varphi^{(1)} = A_1 \exp[j(k_x^{(1)}x + k_z^{(1)}z - \omega t)] \quad (1)$$

反射纵波和反射SV波的位移分别为

$$\varphi^{(2)} = A_2 \exp[j(k_x^{(2)}x + k_z^{(2)}z - \omega t)] \quad (2)$$

$$\psi^{(3)} = A_3 \exp[j(k_x^{(3)}x + k_z^{(3)}z - \omega t)] \quad (3)$$

折射纵波的位移为

$$\varphi^{(4)} = A_4 \exp[j(k_x^{(4)}x + k_z^{(4)}z - \omega t)] \quad (4)$$

式中: $A_1, A_2, A_3, A_4$ 分别为4个波的振幅; $k^{(1)} = k^{(2)} = k_{1p}$ 为固体中P波的波数; $k^{(3)} = k_{1s}$ 为固体中SV波的波数; $k^{(4)} = k_{2p}$ 为液体中P波的波数; $k_x, k_z$ 分别为k在x,z方向的分量; $\omega$ 为声波的圆频率。

与P波入射到固-固界面同理,得到在固-液界面的斯涅耳定律为

$$\frac{v_{1p}}{\sin \alpha} = \frac{v_{1s}}{\sin \beta} = \frac{v_{2p}}{\sin \alpha'} \quad (5)$$

式中: $v_{1p}$ 和 $v_{1s}$ 分别为固体中P波和SV波的声速; $v_{2p}$ 为液体中P波的声速。

在固/液界面,固体边界上的切应力 $\sigma_{zz}$ 为零,正应力 $\sigma_{xz}$ 等于流体压强 $p$ 的相反数,法向位移连续,所以超声波反射在该界面处的边界条件为,在 $z=0$ 处

$$\begin{cases} u_1 = u_2 \\ \sigma_{zz} = -p \\ \sigma_{xz} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_1, u_2$ 分别为固体和液体的应变;流体压强 $p = -\rho_2 \frac{\partial^2 \varphi^{(4)}}{\partial t^2}$ ( $\rho_2$ 为液体的密度)。根据边界条件,可以得到对应的三个方程

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \beta & \cos \alpha' \\ \cos 2\beta & \eta^{-1} \sin 2\beta & -\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{v_{1p}}{v_{2p}} \cos 2\beta \\ \sin 2\alpha & \eta \cos 2\beta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ -\cos 2\beta \\ \sin 2\alpha \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: $\rho_1$ 为固体的密度; $R_{pp}, R_{ps}$ 分别为反射P波和反射SV波的位移反射系数; $T_{pp}$ 为P波的折射率。

结合斯涅耳定理,求解式(7)就可得 $R_{pp}$ 值

$$R_{pp} = \frac{Z_t + Z_r \sin^2 2\beta - Z_i \cos^2 2\beta}{Z_t + Z_r \sin^2 2\beta + Z_i \cos^2 2\beta} \quad (8)$$

式中: $Z_i, Z_r, Z_t$ 分别为固体中P波,SV波和液体中P波的阻抗,如式(9)~(11)表示。

$$Z_i = \frac{\rho_1 v_{1p}}{\cos \alpha} \quad (9)$$

$$Z_r = \frac{\rho_1 v_{1s}}{\cos \beta} \quad (10)$$

$$Z_t = \frac{\rho_2 v_{2p}}{\cos \alpha'} \quad (11)$$

由式(8)可见,固体/液体界面声压反射系数 $R_{pp}$ 除了与入射角 $\alpha$ 有关外,还与界面两侧固体、液体介质的声特性,包括密度、声速及固体材料的泊松比等有关。

### 1.2 P波在固体/气体界面的反射特性

当P波倾斜入射到固体/真空界面时,一般会同时反射出P波和SV波<sup>[4]</sup>。从数学上看,只反射一种波并不能满足自由表面的边界条件;从试验上看,同时反射出两种波得到普遍的证实,没有折射波。P波倾斜入射到固体/真空界面的反射示意如图2所示。

入射P波的位移是

$$\varphi^{(1)} = A_1 \exp[j(k_x^{(1)}x + k_z^{(1)}z - \omega t)] \quad (12)$$

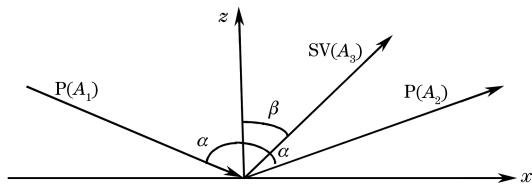


图 2 P 波入射在固体/真空界面的反射示意

反射 P 波和反射 SV 波的位移分别是

$$\varphi^{(2)} = A_2 \exp[j(k_x^{(2)}x + k_z^{(2)}z - \omega t)] \quad (13)$$

$$\psi^{(3)} = A_3 \exp[j(k_x^{(3)}x + k_z^{(3)}z - \omega t)] \quad (14)$$

在该界面,切向应力和法向应力都为零,即  $z=0$  处,超声波满足的边界条件是切向应力分量  $\sigma_{zz}=0$ ,法向应力分量  $\sigma_{zx}=0$ 。在该条件下由斯涅耳定理得

$$\frac{v_{1P}}{\sin \alpha} = \frac{v_{1S}}{\sin \beta} \quad (15)$$

根据边界条件可得

$$\begin{pmatrix} \cos 2\beta & \cos 2\beta \\ \sin 2\alpha & -\sin 2\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{pp} \\ R_{ps} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin 2\beta \\ -\left(\frac{v_{1d}}{v_{1S}}\right)^2 \cos 2\beta \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中:  $v_{1d}$  为固体中的 P 波声速。

于是可得当 P 波从固体一侧倾斜入射到固体/真空界面时,P 波的反射系数  $R_{pp}$  为

$$R_{pp} = \frac{\sin 2\alpha \sin 2\beta - \eta^2 \cos^2 2\beta}{\sin 2\alpha \sin 2\beta + \eta^2 \cos^2 2\beta} = \frac{\sin 2\alpha \sin 2\beta - \left[\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}\right] \cos^2 2\beta}{\sin 2\alpha \sin 2\beta + \left[\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}\right] \cos^2 2\beta} \quad (17)$$

式中:  $\eta^2 = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$ ,  $\nu$  为材料的泊松比。

由式(17)可知,固体/气体界面声压反射系数  $R_{pp}$  除了与入射角  $\alpha$  有关外,界面两侧介质材料参数方面,仅与固体材料的泊松比  $\nu$  有关。

下面结合高压瓷套管内部绝缘油液位检测这一具体案例,来分析 P 波倾斜入射到异质界面时,入射角与声压反射系数的量化关系,进而寻找对某具体结构的最佳 P 波入射角。

## 2 检测应用案例

充油瓷套广泛应用于各变电站的高压电缆终端绝缘中。瓷套内部填充硅油作为绝缘、冷却介质,与其他绝缘件等构成电缆终端的绝缘系统<sup>[5-6]</sup>。瓷套管漏油是困扰电缆运行安全的隐患,故对绝缘瓷套内部油位的监测是定期巡检必须进

行的项目。现行的油位检测是通过定期断电方式进行的,其需打开电缆终端瓷套来观测油面高度,是一种离线方法,无法在巡检时带电检测。红外法<sup>[7]</sup>虽可带电检测套管内的油位,但易受环境温度、周围红外射线干扰等外界因素的影响,检测结果易出现偏差,存在一定的局限性<sup>[8]</sup>。莫润阳等<sup>[3]</sup>提出了一种根据多次反射回波声压幅度的衰减率评定液位的方法。但因瓷套壁厚的变化,垂直于侧壁入射的 P 波在传播至陶瓷/硅油(空气)界面时会产生一个入射角  $\alpha$ (见图 3,图中  $T_0$  与  $R$  分别为瓷套的最高点与最低点的厚度,  $h$  为瓷套的高度,  $T$  为测量点的瓷套厚度,  $L$  为测量点到最高点的距离),降低了声压反射系数,而使液位检测灵敏度受到影响。

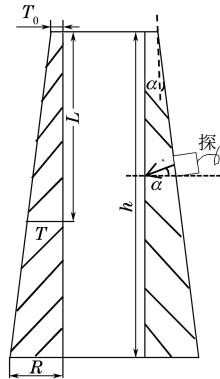
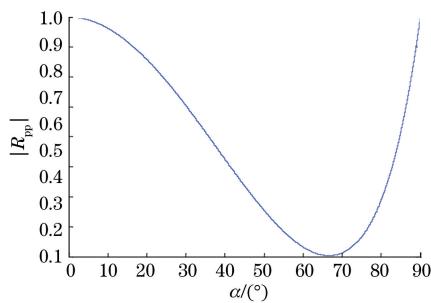


图 3 P 波垂直入射在陶瓷/硅油或空气界面的入射角

侧壁液位评定的实质就是确定空气/硅油界面的位置,若超声从外侧壁面入射进行检测,该问题就转变成如何辨别陶瓷/空气和陶瓷/硅油界面的问题,而寻找到两个界面的声压反射系数差异最大时的入射角则成为核心问题。考虑瓷套壁厚变化也会引起反射系数差异,莫润阳等曾专门研究了壁厚变化对反射系数的影响,并找出了补偿方法,故在此暂不考虑壁厚变化引起的反射系数差异,仅考虑入射角变化对反射系数的影响。绝缘瓷套的材料为电工陶瓷,其泊松比  $\nu$  为 0.30。

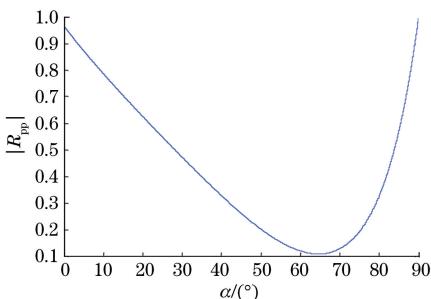
### 2.1 陶瓷/空气, 陶瓷/硅油界面的 $R_{pp}-\alpha$ 关系

当探头所在位置的高度高于内部绝缘油的液位时,声波反射界面是陶瓷/空气界面(固体/真空界面)。若瓷套规格、材料泊松比已知,超声 P 波从侧壁实施液位检测时,声波入射角  $\alpha$  一定, P 波反射系数  $R_{pp}$  与入射角  $\alpha$ , SV 波反射角  $\beta$  之间满足式(17)。图 4 所示为绝缘瓷套材料的泊松比  $\nu = 0.30$  时,陶瓷/空气界面的  $|R_{pp}|-\alpha$  的曲线。由图 4 可见,泊松比  $\nu$  一定、P 波入射角在  $0^\circ \sim 66.72^\circ$  时,

图 4 陶瓷/空气界面的  $|R_{pp}|$ - $\alpha$  曲线

$|R_{pp}|$  随入射角的增大而减小。垂直入射 ( $\alpha=0^\circ$ ) 时  $|R_{pp}|$  最大,  $|R_{pp}|$  随  $\alpha$  增大而逐渐减小, 当  $\alpha$  分别取  $0^\circ, 8^\circ, 16^\circ, 24^\circ$  时对应的  $|R_{pp}|$  值见表 1。当  $\alpha=66.72^\circ$  时  $|R_{pp}|$  最小, 为 0.2035, 反射波以变形横波为主。

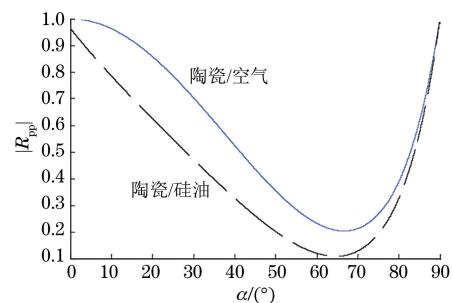
当探头所在位置的高度在瓷套内部绝缘油液位以下时, 超声波的反射界面是陶瓷/硅油界面(固体/液体界面)。此处取硅油密度  $\rho_2$  为  $0.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 陶瓷材料密度  $\rho_1$  为  $7.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 瓷套中纵波声速  $v_{1P}$  为  $7094 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 硅油中纵波声速  $v_{2P}$  为  $1057 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 将这些参数代入式(8)可得 P 波的反射系数  $R_{pp}$ 。图 5 所示为绝缘瓷套材料泊松比  $\nu=0.30$  时, 陶瓷/硅油界面的  $|R_{pp}|$ - $\alpha$  的曲线。由图 5 可见,  $R_{pp}$  在瓷套/硅油界面具有与陶瓷-空气界面的类似规律, 即随  $\alpha$  的增大, 其减小速度更快,  $\alpha=64.95^\circ$  时  $|R_{pp}|$  达最小仅有 0.1082。当  $\alpha$  分别取  $0^\circ, 8^\circ, 16^\circ, 24^\circ$  时, 对应的  $|R_{pp}|$  的取值如表 1 所示, 可见, 其较相应的陶瓷/空气界面的  $|R_{pp}|$  取值要低。

图 5 陶瓷/硅油界面的  $|R_{pp}|$ - $\alpha$  曲线表 1 P 波小角度斜入射时, 陶瓷/空气、陶瓷/硅油界面的  $|R_{pp}|$ 

$\alpha /(^{\circ})$	$ R_{pp} $	
	陶瓷/空气	陶瓷/硅油
0	1.0000	0.9645
8	0.9764	0.8202
16	0.9079	0.6885
24	0.8019	0.5637

## 2.2 电工瓷质容器液位评定的最佳入射角度

用文献[3]中的方法检测瓷套管内油位时, 声波在两种界面(陶瓷/空气或陶瓷/硅油)的反射系数的差值越大, 越容易区分界面的种类(陶瓷/硅油界面, 陶瓷/空气界面), 评定结果也就越准确。图 6 所示为绝缘瓷套材料的泊松比  $\nu=0.3$  时, 两种界面反射系数的绝对值随入射角的变化曲线。通过比较两条曲线, 寻找  $|R_{pp}|$  的最大差值对应的  $\alpha$ , 此即为瓷套液位评定的最佳入射角。

图 6 陶瓷/空气、陶瓷/硅油界面的  $|R_{pp}|$ - $\alpha$  曲线

通过分析计算得出, 当入射角  $\alpha=24.36^\circ$  时, 两种界面的反射系数的差值  $|\Delta R_{pp}|$  取得最大值, 为 0.2395。而当 P 波垂直入射时, 两种界面的反射系数差值的绝对值  $|\Delta R_{pp}|_{\alpha=0}=0.0355$ 。该值远小于入射角为  $24.36^\circ$  时的  $|R_{pp}|$ 。可见寻找出最佳入射角可以大幅提高对瓷套内部液位检测的灵敏度及液位评定的准确度。

## 3 结语

利用数学关系和边界条件, 可以计算求解出 P 波倾斜入射到不同介质界面处, 不同模式的反射波和折射波的反射系数和折射系数。超声侧壁液位检测中, 通常利用纵波垂直入射方法, 根据声波在固-气、固-液界面的声压反射率或衰减率进行液位评定。为提高液位检测灵敏度, 在实际测量应用中, 可通过控制超声纵波的入射角, 使声波在固-气、固-液界面的反射系数的差值的绝对值  $|\Delta R_{pp}|$  最大。

## 参考文献:

- [1] 法林, 孙继刚, 何兆普, 等. P 波入射到岩石界面上的反射折射系数的研究与应用 [J]. 石油仪器, 2013, 27(5): 52-60.
- [2] 安兆亭, 胡央丽. 侧向贴壁式超声波液位计校准方法探索 [J]. 声学技术, 2010, 20(6): 366-367.
- [3] 马雪艳, 魏文君, 莫润阳. 变壁厚绝缘瓷套内绝缘介质液位的超声测量 [J]. 声学技术, 2016, 35(4): 268-271.

(下转第 35 页)

流或直流激磁磁化、低频激磁电流磁化技术的发展，以及 LED 可见光及紫外线照明、图像识别、视频记录、WiFi 或蓝牙传输等技术的应用，和相关标准的不断更新和完善，具有针对表面/近表面缺陷高灵敏度、可记录并传输、高效安全、自供电、自照明等特点的多功能小型化智能化便携式磁轭法及交叉磁轭法将得到更广泛的应用。

#### 参考文献：

- [1] 沈功田.特种设备无损检测技术综述[J].无损检测,2006,28(1):34-38.
- [2] TSG G0001—2012 锅炉安全技术监察规程[S].
- [3] TSG R0004—2009 固定式压力容器安全技术监察规程[S].
- [4] GB 150—2011 压力容器[S].
- [5] TSG R7001—2013 压力容器定期检验规则[S].
- [6] 国质检锅[2003]108号 在用工业管道定期检验规程[S].
- [7] TSG D0001—2009 压力管道安全技术监察规程-工业管道[S].
- [8] 王晓雷.承压类特种设备无损检测相关知识(2013版)[M].北京:中国劳动社会保障出版社,2013:173.
- [9] 张俊哲.无损检测技术及其应用[M].北京:科学出版社,2010:13.
- [10] GB 6067.1—2010 起重机械安全规程 第1部分:总则[S].
- [11] TSG 21—2016 固定式压力容器安全技术监察规程[S].
- [12] TSG S7001—2013 客运索道监督检验和定期检验规则[S].
- [13] GB 8408—2008 游乐设施安全规范[S].
- [14] 彭军.超高压人造水晶釜体内台阶和退刀槽的无损检测方法[J].中国特种设备安全,2012,28(10):45-50.
- [15] NB/T 47013.4—2015 承压设备无损检测 第4部分:磁粉检测[S].
- [16] 刘彬.磁力探伤缺陷显示新方法-缺陷显示板[J].无损检测,2001,23(1):29-31.
- [17] 姚力,范吕慧.磁轭提升力指标的分析和讨论[J].无损检测,2005,27(7):345-348.
- [18] 姚力,范吕慧.交叉磁轭磁化规范与提升力指标关系讨论[J].无损探伤,2006,30(3):8-11.
- [19] 胡凯,姚力.旋转磁场交叉磁轭的磁化规范[J].无损探伤,2011,35(1):5-8.
- [20] 强天鹏.JB/T 4730.1~4730.6—2005《承压设备无损检测》学习指南[M].北京:新华出版社,2005.
- [21] 林锡忠.交流电磁轭的关节与检测灵敏度的关系[C]//第十届全国无损检测学术年会论文集.南昌:全国无损检测学会,2013.
- [22] 李龙.脉冲磁化技术在大型结构件磁粉检测中的应用[C]//第十届全国无损检测学术年会论文集.南昌:全国无损检测学会,2013.
- [23] 许才厚.便携式磁轭法应用范围探讨[J].无损探伤,2012,36(5):30-33.
- [24] 李博,李绪丰,唐经源.充电携带式旋转磁场探伤仪[C]//2014远东无损检测新技术论坛.成都:[出版者不详],2014.
- [25] 李博,李绪丰,唐经源.铁路专用一体式磁轭探伤仪[C]//2015远东无损检测新技术论坛.珠海:[出版者不详],2015.
- [26] 李博,李绪丰,唐经源.数字成像技术在磁粉检测应用研究[C]//2015远东无损检测新技术论坛.珠海:[出版者不详],2015.
- [27] 许遵言,周玉山,李华龙.磁轭法对近表面缺陷检出能力的试验研究[C]//2015远东无损检测新技术论坛.珠海:[出版者不详],2015.
- [28] 姚力,范吕慧.不同标准磁轭技术指标的比较与讨论[J].无损探伤,2003,27(5):11-15.
- [29] 周志伟.JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》答疑-磁粉检测部分(IV)[J].无损检测,2006,28(10):549-553.
- [30] JB/T 4730.4—2005 承压设备无损检测 第4部分:磁粉检测[S].

(上接第28页)

- [4] 应崇福.超声学[M].北京:科学出版社,1993:36.
- [5] 张建荣.干式高压电缆终端头登塔装置的设计与应用[J].电力与能源,2013(1): 97-99.
- [6] 沈学良,乔学军,胡保东,等.一起110 kV电缆终端头

爆炸事故原因分析[J].电子世界,2014(7):64-65.

- [7] 程明,马崇,陈韶瑜.基于超声波的变电站充油瓷套油位检测方法[J].河北电力技术,2014,33(6):41-42.
- [8] 莫润阳,牛海清,郭然,等.在役瓷套式电缆终端油位的超声检测[J].西北大学学报,2015,45(5): 745-748.