

# 调频超声清洗技术的研究

张镜澄

(中国科学院东海研究站 上海·200032)

目前使用的超声清洗设备多采用单频方式工作,而单频工作会在清洗槽内形成驻波场,出现“清洗盲区”。若改用调频方式工作,即可克服此弊端,提高清洗效果。本文阐述了调频超声清洗技术的原理、优点、主要技术参数的选定及其实验结果。

## 1 引言

近年来,超声清洗技术的应用日趋广泛,正迅速向工业、农业、国防、科研乃至日常生活诸领域渗透。但目前使用的各类超声清洗设备多采用单频方式工作,单频工作会在清洗槽内形成驻波场<sup>[1-3]</sup>,在声压振幅波节处,声压最小,低于空化阈,失去清洗效果。这些区域称为“清洗盲区”。为消除此弊病,我们设想以调频方式代替单频方式,使对某一频率为声压波节的那些区域,对其他频率不再是波节。实验结果表明,此法能消除清洗盲区,改善槽内声压分布的均匀度,提高清洗效果。

## 2 调频清洗的原理

在清洗槽内,由底部向液面辐射的超声波与液面的反射波迭加而在液体内部形成驻波场。此驻波场可表为

$$\begin{aligned} P(x, t) &= 2P_1 \sin \frac{2\pi f}{c} x e^{j(2\pi f t - \phi)} \\ &= 2P_1 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} e^{j(2\pi f t - \phi)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $P_1$ 为辐射超声波的声压幅值, $f$ 、 $\lambda$ 分别为超声波的频率与波长, $c$ 为液体中声速, $x$ 为液面向下的深度。由此式可见,当液深 $x = n\lambda/2$  ( $n = 1, 2, \dots$ )时, $P = 0$ ,声压振幅最小,为声压波节;当 $x = (2n - 1)\lambda/4$  ( $n = 1, 2, \dots$ )时, $P = 2P_1$ ,声压振幅最大,为声压波腹;在液面上( $x = 0$ ),合成声压 $P$ 恒为零,也即液面处永远为声压波节(参见图1)。驻波效应使清洗槽内声压分布明显不均,在各节面附近出现清洗盲区。

为使声场均匀,对辐射超声波的频率施行调制。调制周期( $T$ )满足 $cT \gg h$  ( $h$ 为液位高度,这意味着对每一个观察瞬间,清洗槽内传播的超声波可视作单频,槽内有相应的驻波场生成。调频后,液深 $x$ 处的清洗效果将取决于在一个调制周期内,一系列单频驻波场在该处的声压振幅的平均值的大小(通常,清洗时间总是大于调制周期)。所需之调频范围(即最大频偏)可确定如下:假定 $f = f_1$  (上限频率)时, $x$ 处为第 $n$ 个声压节面,我们希望当 $f = f_2$  (下限频率)时,该处变为第 $n$ 个声压腹面。即

收稿日期: 93-2-1

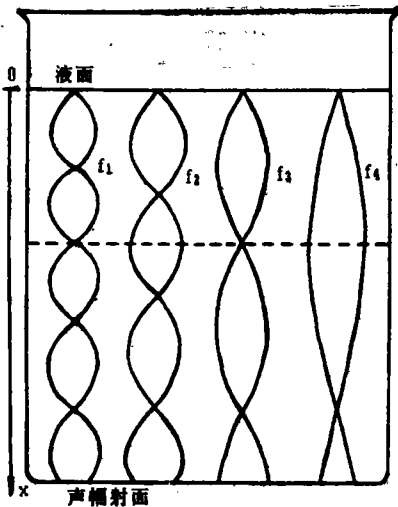


图1 超声清洗槽内的声压分布

$$\text{当 } \lambda = \lambda_1 \text{ 时, } x = n \frac{\lambda_1}{2}, \lambda_1 = \frac{2x}{n} \quad (2)$$

$$\text{当 } \lambda = \lambda_2 \text{ 时, } x = (2n-1) \frac{\lambda_2}{4}, \lambda_2 = \frac{4x}{2n-1} \quad (3)$$

调频范围为

$$\begin{aligned} \Delta f &= f_1 - f_2 = \frac{c}{\lambda_1} - \frac{c}{\lambda_2} \\ &= c \left( \frac{n}{2x} - \frac{2n-1}{4x} \right) \\ &= \frac{c}{4x} \quad (4) \end{aligned}$$

假如清洗液为水, 水中声速  $c$  约  $1500\text{m/s}$ , 则  $\Delta f = \frac{150}{4x}$  (kHz), 式中  $x$  单位为  $\text{cm}$ 。

式(4)表明, 使  $x$  处从波节变为波腹所需之最小调频范围与该波节距液面的深度有关,  $x$  愈小(愈近液面), 所需之调频范围愈大。例如, 当工作频率为  $39.5\text{kHz}$ , 清洗槽水位为  $16.5\text{cm}$  时, 水面以下有 8 个波节:  $x_1 = 1.94\text{cm}$ ,  $x_2 = 3.88\text{cm}$ ,  $x_3 = 5.82\text{cm}$ ,  $x_4 = 7.76\text{cm}$ ,  $x_5 = 9.70\text{cm}$ ,  $x_6 = 11.64$

$\text{cm}$ ,  $x_7 = 13.58\text{cm}$ ,  $x_8 = 15.52\text{cm}$ 。欲使  $x_2$  变为波腹,  $\Delta f = 9.86\text{kHz}$ ; 欲使  $x_4$  变为波腹,  $\Delta f = 4.93\text{kHz}$ ; 欲使  $x_8$  变为波腹,  $\Delta f$  仅需  $2.46\text{kHz}$ 。显然, 不管  $\Delta f$  有多大, 液面永远为波节。

如调频范围太小(如上例中  $\Delta f < 2.46\text{kHz}$ ), 则所有波节都不可能变为波腹。但即使如此, 与单频相比, 各波节处的声压都有所提高, 故清洗槽内声场均匀度仍可得到一定程度之改善。这种情况下, 第  $n$  个波节(对  $f_1$  而言)的声压振幅将从零提高到  $f_2$  时的  $P'_n$ :

$$\begin{aligned} P'_n &= P_m \sin \frac{2\pi f_2}{c} \left( \frac{n\lambda_1}{2} \right) \\ &= P_m \sin \left( n\pi \frac{f_2}{f_1} \right) \\ &= P_m \sin \left( n\pi \frac{f_1 - \Delta f}{f_1} \right) \\ &= P_m \sin \left( n\pi \frac{\Delta f}{f_1} \right), \quad (5) \end{aligned}$$

式中  $P_m$  为单频下波幅的声压振幅 ( $P_m = 2P_1$ )。上例中, 如果  $\Delta f = 1.5\text{kHz}$ , 则各节面对应的  $P'_n/P_m$  值列于表 1。

表 1  $\Delta f = 1.5\text{kHz}$  时各节面的  $P'_n/P_m$  值

节面深度	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
$P'_n/P_m$ (%)	12	24	34	46	56	66	73	82

此外, 由图 1 可见, 清洗槽底面(即换能器辐射面)上声压振幅的大小取决于槽内液位的高度及声波长。如波长不变(单频情况), 此处的声压振幅将随液位相应作周期性变化, 这种声场对换能器的反作用力, 在换能器电端表现为其等效负载阻抗随液位而变化; 如波长也在变化(调频情况), 则此阻抗又随频率而异。引入调频后, 此阻抗在一个调制周期内的平均值随液位而变的变化量将有所减小。值得指出, 当液位高度恰好等于半波长的整数倍时, 换能器辐射面上的声

压振幅将近于零(恒为节面),此时,声辐射阻抗变至最小,换能器电声效率下降。我们称此为“水层共振”现象。显然,调频也有助于削弱这一现象。

### 3 实验结果

调频超声清洗实验装置的原理性框图示于图2。其中调制电压为三角波,改变三角波的幅值,即可改变调频范围( $\Delta f$ )。由于受换能器工作带宽的限制,实验选定的调频范围较小: $\Delta f = 1.5\text{kHz}$ 。压控振荡器的中心频率选为: $f_0 = 39.5\text{kHz}$ 。实验用清洗槽容积为:长350mm、宽250mm、深200mm,内注水170mm。加到换能器的电功率为500W。

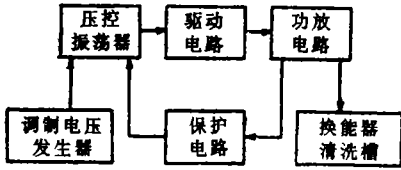


图2 调频超声清洗实验装置原理框图

为检验调频前后清洗槽内声场的变化,我们采用两块厚0.06mm铝箔(固定在170mm×50mm的铅丝框架上),垂直于换能器辐射面插入清洗液(水)中。然后分别就单频及调频两种情况,各加超声10秒钟,观察铝箔受超声空化作用而产生的孔蚀情况,其结果示于图3(图中大小不等的黑斑即铝箔上的空化孔洞)。由图可见:(1)单频情况下(图3(b)),清洗槽内存在明显的驻波场,在铝箔孔洞密集处,声压大,清洗效果好,为声压波腹。在相邻两个波腹中间处,几乎看不到孔洞,说明该处声压小,清洗效果差(甚至失去清洗作用),为声压波节。相邻两个波腹(或波节)间的距离大致等于半波长;(2)施加调频后(图3(a)),近水面的两三个波节处的孔洞稍有增加,而近槽底的三四个波节处的孔洞则明显增加,驻波现象基本上消失;(3)水面附近区域在施加调频后,仍无孔洞

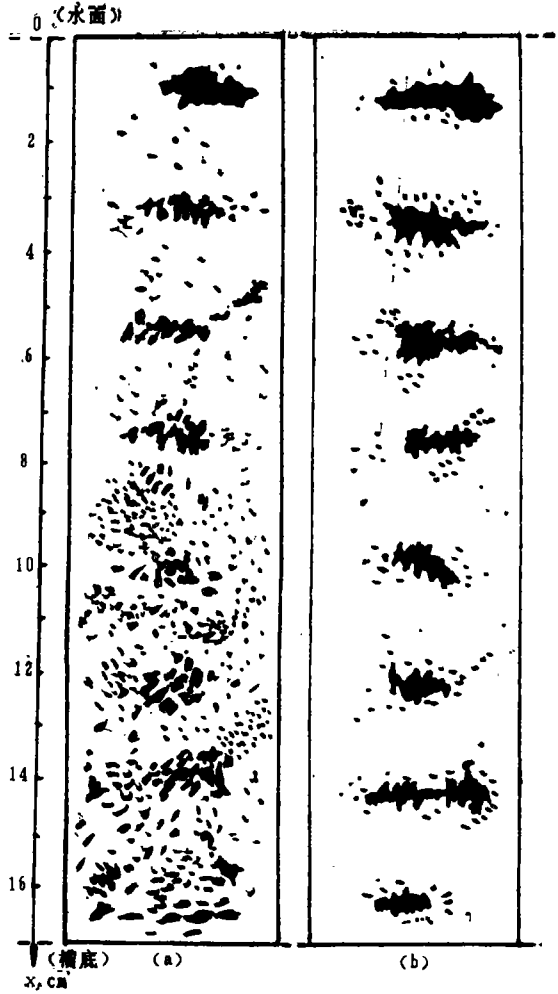


图3 调频(a)及单频(b)两种情况下,铝箔的孔蚀情况。

出现。

这些结果与前面原理部分的分析基本相符。考虑到前面的分析是在假定声波是小振幅平面波的前提下进行的,而实际上清洗槽是工作在大振幅空化状态,因此,精确测定槽内声压分布意义不大。此外,由于空化气泡群对超声波的散射和吸收,液面反射波的声压势必小于入射波声压,这将使波节变“粗”(驻波比变小),即使是单频工作,波节声压也并非为零。我们用 $\phi 9\text{mm}$ 水听器探测,单频时,最小波节声压约为波腹的 $\frac{1}{4}$ ;施加调频后,波节声压有所提高,波腹声压

(下转36页)

(上接30页)

有所下降,前者约为后者的 $1/2$ 。必须指出,由于受空化噪声的影响,此项测量的精度较差;此外,由于所用的水听器的尺寸与波长相比也并非很小,这将使波节声压的测量值大于实际值。

最后,关于调制频率(F),有人选取50 Hz或100 Hz<sup>[4]</sup>。但我们在实验中发现,清洗槽工作时,除了空化噪声,还会伴随发出一种令人不愉快的低频哼声,其频率恰等于调制频率。为此,我们将调制频率选在人耳听觉的下限,即 $F \approx 20$  Hz。

#### 4 结语

以上分析和实验结果表明,调频超声清洗法能有效地消除清洗槽内因驻波效应造成

的清洗盲区,能改善声场均匀度,提高清洗效果。即使因受换能器带宽的限制,调频范围( $\Delta f$ )取得较小,这一优越性仍然清晰可见。如能进一步拓宽换能器的工作频带,此法的优越性必将得到更充分的体现。

#### 参考文献

1. R. Pohlman, B. Werden, R. Marziniak. *Ultrasonics*, 1972, 7: 156~161.
2. 井上幹夫, 土子良治. 电子技术, 1967; 9 (12): 38~40.
3. U. S. PATENT, No. 3,371, 233, 2 (1968).
4. А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш, *Ультразвуковые Электротехнологические Установки*, Л. Энергоиздат, 1982, 108~109.

空 邮

请贴邮票

中国惠普有限公司电子仪器部  
北京市建国门外大街一号  
中国国际贸易中心西办公楼