

# 功率超声与清洗技术

高永慧

超声波是物理学的一个分支,它是指频率在 20kHz 以上的声波. 由于它具有良好的束射性、很高的强度和很强的穿透能力等特点,所以应用十分广泛. 超声波的应用可以分为两大类:一类是检测超声;另一类是功率超声. 检测超声是利用超声波的性质来对物质进行各种检验和测量,如 B 超、流量和液位测量等;而功率超声则是利用超声波振动形式的能量使物质的一些物理、化学和生物性质或状态发生改变. 利用超声波进行清洗,是功率超声一种最广泛的应用,它起始于五十年代初,其特点是清洗速度快、质量高、易于实现自动化. 特别适用于清洗表面形状复杂的工件,如对于精密工件上空穴、狭缝、凹槽、微孔及暗洞处,通常的洗刷方法难以奏效,但利用超声波清洗则可取得理想的效果. 在某些场合下,还可用水代替有机溶液进行清洗. 在一些难以清洗并有损人体健康的场合,如核工业及医疗中的放射性污物等,则可用超声波进行清洗,必要时实现遥控或自动化. 因此利用超声波进行清洗越来越广泛.

## 一、超声波清洗的物理机制

超声波清洗的机理主要是超声空化现象,它是指在强超声作用下,液体中某一区域会形成暂时负压,于是在液体中产生空穴或气泡. 这些充有蒸气或空气的气泡处于非稳定状态,当它们突然闭合时会产生激波和高温,并在其周围产生上千个大气压,破坏不溶性污物而使它们分散在清洗液中,如图 1 所示. 超声空化一般分为瞬态空化和稳态空化两种类型;瞬态空化是指在较高声强(大于  $10\text{W}/\text{cm}^2$ ) 发生,只在一个声周期内完成;而稳态空化是在较低声强(小于  $10\text{W}/\text{cm}^2$ ) 发生,是在几个声周期内完成. 蒸气型气泡对污层的反复冲击,一方面破

坏污物与清洗表面的吸附,另一方面也会引起污物层的疲劳而与工件表面脱落. 气体型气泡的振动对固体表面进行擦洗,油层一旦有缝可钻,气泡还能“钻入”裂缝中作振动,使污层脱落. 空化气泡在振动过程中,将伴随着一系列二阶现象发生,如辐射扭力. 在均匀液体中辐射扭力作用于液体本身,从而导致液体本身的环流,即称为声流. 这个声流可达到 cm 级较大的范围,也可限于  $\mu\text{m}$  级较小的范围内,后者被称之为微声流,它可使脉动气泡表面处在很高的速度梯度和粘滞应力,这种应力有时高达  $100\text{dyn}/\text{cm}^2$  以上,足以对工件表面污物造成破坏而使其脱落. 超声空化在固体和液体界面上所产生的高速微射流能够除去或削弱边界污层,增加搅拌作用,加速可溶性污物的溶解,强化化学清洗剂的清洗作用.

另外超声振动本身对清洗也有很大贡献. 例如  $20\text{kHz}$ 、 $2\text{W}/\text{cm}^2$  的超声波在清洗液中传播时,它将引起质点的振动位移幅度为  $1.32\mu\text{m}$ ,

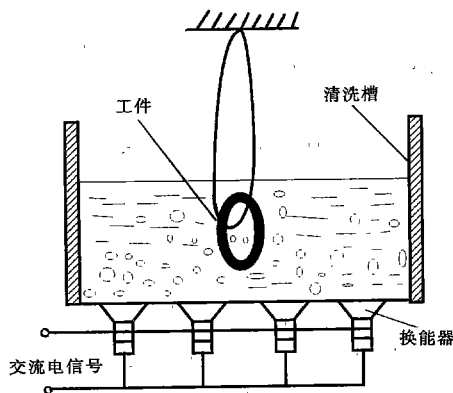


图1 超声波清洗示意图

速度为  $0.16\text{m}/\text{s}$ , 加速度为  $2.04 \times 10^4\text{m}/\text{s}^2$  (约为  $2000g$ ,  $g$  为重力加速度), 声压为  $2.45 \times 10^5\text{Pa}$  (相当  $2.45\text{atm}$ ). 这表明: 工件表面的污层每秒钟将遭受到清洗液 2 万次从正 2.45 个大气压到负 2.45 个大气压激烈冲击, 这是对于行波场计

算的结果,事实上在清洗槽中更接近于混响场,可能使这一过程更加激烈。

## 二、液体的空化阈

空化现象在清洗中起着重要作用,使液体产生空化的最低声强或声压幅值被称为空化阈。对于纯净液体,由于分子内聚力很大,其结构强度很高。纯水在 20℃ 时结构强度的理论值约为 3250kg/cm<sup>2</sup>,如用声波作用把液体分子拉开,则所需声强高达 3.7 × 10<sup>6</sup>W/cm<sup>2</sup>,这是很难实现的。但实验表明,液体的空化阈要比理论值小得多,水的实际结构强度估计不会超过几百个大气压,这种现象可用气泡核学说来解释。空化首先从液体中强度最薄弱的地方发生,这些地方由于热起伏或其他物理原因出现一些很小的蒸气泡,或者那里原来就有溶解在液体中的微气泡(称为空化核),于是在声波负压的作用下,空化核膨胀而产生空化。一定状态下,空化核只能以一定大小存在于液体中,气泡太大会浮出液面,太小则在静压力及表面张力作用下溶于液体中。空化核的半径愈大,则该处液体结构强度愈弱,反之则愈强,那么产生空化也就需要更强的负外压。

设液体的静压力为  $p_0$ , 蒸汽压为  $p_v$ , 交变声压幅值为  $p_m$ , 则只有  $p_m > p_0$  时才能出现负压,负压超过液体结构强度时才形成空化。空化阈  $p_c$  可由下式表示:

$$p_c = p_0 - p_v + \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\sigma}{R_0}\right)^3 / \left(p_0 - p_v + \frac{2\sigma}{R_0}\right)} \quad (1)$$

上式中  $\sigma$  为液体表面张力系数,  $R_0$  为空化核开始时的半径。从上式可以看出,空化阈随不同液体而不同;对于同一液体,不同的温度、压力、空化核半径及含气量,空化阈值也不同;液体含气量越少,空化阈越高;空化阈随液体的静压力增加而增加。此外空化阈还与液体的粘滞性有关,它们之间的关系可用经验公式

$$p_c = 0.8(\log \eta + 5) \quad (2)$$

表示,  $\eta$  是粘滞系数。空化阈还和声波的频率

有密切关系,频率越高空化阈也越高,从 100kHz 到 1000kHz 之间空化阈值增加很快,到 5MHz 时空化阈值几乎超过 100 个大气压。

## 三、气泡的运动

气泡在声场作用下将进行振动,但不一定会发生内塌,也称为崩溃或闭合。当声波频率小于气泡谐振频率时才可能使气泡内塌,而当声波频率大于气泡谐振频率时,气泡将进行复杂的振动,一般不发生气泡内塌。气泡谐振频率  $f_0$  可由下式确定:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left( P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)} \quad (3)$$

式中  $\gamma$  是比热,  $\rho$  为液体的密度,  $R_0$  为气泡的原始半径。

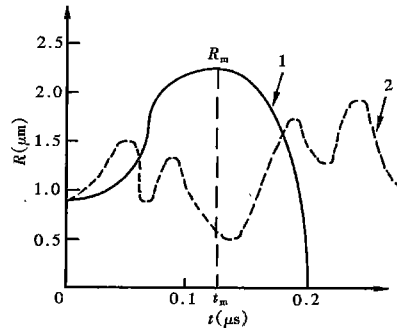


图2 气泡半径  $R$  随时间变化曲线

取  $p_0 = 10^5$ Pa, 声压幅值  $P_m = 4.05 \times 10^5$ Pa,  $R_0 = 0.8 \mu\text{m}$ , 则由 (3) 式可得: 气泡的共振频率  $f_0 = 5.2$ MHz, 气泡半径  $R$  随时间变化曲线如图 2 所示。第一种情况超声波频率  $f_1$  为 5MHz; 第二种情况超声波频率  $f_2$  为 15MHz。实线 1 对应于  $f_1 < f_0$  的情况: 气泡半径随声压趋于负值而不断增大,当声压为正压力时,由于气泡表面振动的惯性作用,仍以某一速度膨胀,达到某一最大值  $R_m$  以后开始收缩。在正压作用下,收缩速度愈来愈快,以至气泡迅速闭合。从气泡最大半径到闭合的时间只有  $10^{-8}$ s 数量级,是声波的四分之一周期。虚线 2 则对应于  $f_2 > f_0$  的情况: 气泡作非线性振动而不闭合。由此可见,气泡振动和声波频率有关。对于一定强度的超声波,能够产生空化气泡,其半径有一最小临界值,半径小于这个临界值的气泡不可能拉开;气泡半径也不能太

大,半径太大的气泡谐振频率低于超声频率时,气泡虽然被拉开,但不能闭合。

#### 四、气泡闭合时产生冲击波

设液体不可压缩,忽略气泡中的气体,则气泡收缩速度  $v$  为

$$v = \sqrt{\frac{2P_0}{3\rho} \left( \frac{R_m^3}{R^3} - 1 \right)} \quad (4)$$

式中  $R_m$  为气泡膨胀到最大时的半径。由上式可见,当  $R$  收缩到零时,收缩速度趋于无穷大,这显然是不可能的,由于上式没有考虑到媒质吸收,而且气泡压缩到很小时,绝热假设不成立,受压缩时温度会升高,形成温度梯度而产生热损失。所以上式是近似的,但说明收缩速度随半径减小愈来愈快。当气泡被压缩到  $R$  闭合时,在距离气泡中心为  $1.587R$  处产生的局部压力可达到上千个大气压,由此可看出空化可以产生巨大的冲击波。气泡原来半径愈大,闭合半径愈小,则冲击波压力也愈强。实际上气泡半径的最大值  $R_m$  决定于声压振幅  $P_m$  和频率,  $P_m$  愈大  $R_m$  愈大。当频率较低,即周期较大时,气泡可膨胀到相当大再闭合,于是所产生的冲击波更强。反之当声波频率比气泡的谐振频率高时,则气泡难以闭合。

另外应当注意,并不是声强越高,清洗效果越好。声强过高一方面会产生大量气泡,从而形成一道屏障,使声不易辐射到整个液体空间,

因而在远离声源的地方清洗作用减弱。另一方面,气泡可能膨胀过大以至在声波压缩相内来不及闭合。声波频率越高,空化阈越大,也就是说要产生超声空化需要大的声强。一般说来频率在 10kHz 左右空化较强,但噪声大,因此从清洗效果及经济考虑,频率一般选在 20—40 kHz 范围,而声强为  $1-2\text{W}/\text{cm}^2$ 。对于一些难以清洗的污物,则采用较高的声强。当清洗液的温度升高时,空化核增多对产生空化有利,但温度过高时,气泡中的蒸气压增大,使气泡在闭合期间增强了缓冲作用而使空化减弱。此外温度还与清洗液的溶解度有关,对于水清洗液,较适宜的温度约为  $60^\circ\text{C}$ 。

#### 五、结束语

利用超声波进行清洗以其高速度、高质量、易于实现自动化以及不受清洗件表面复杂形状限制等优点,已在许多工厂和实验室得到相当广泛的应用,特别是在精密机械制造和精密制品加工业中发挥着重要作用。尤其是 80 年代以来,超声清洗推动了声化学技术的发展,并为声化学技术推向工业规模展示出广阔的前景。超声波清洗的物理机制是声空化,伴随空化产生的冲击波、微声流、微射流以及清洗液超声振动本身的机械效应。声空化现象涉及到液体、声场及环境等多方面因素。所以必须选择适当声学参量和清洗液的性质,才能达到良好的清洗效果。

### 俄合成第 166 号化学元素

据《科学时报》报道 俄罗斯科学家最近合成第 166 号化学元素,这项成果又填补了门捷列夫元素周期表上一个空白。

据国际文传电讯社报道,第 166 号化学元素是设在莫斯科郊区的杜布纳核联合研究所的科学家合成的。该研究所所长弗拉基米尔·卡德舍夫斯基近日向媒体宣布说,新元素是 7 月 19 日在加速器上获得的,它存在了千分之 50 秒的时间。为了得到对该元素的确认和国际纯粹

及应用化学协会对其进行命名,这一过程约需两年的时间。

俄杜布纳的科学家曾于 1999 年 1 月在核反应实验室合成出第 114 号元素,并使其存在时间达到 30 秒。门捷列夫元素周期表上的第 105 号元素之后的超重元素在自然界很难发现,最近科学家发现的一系列超重元素都是在实验室合成的,存在极短时间后就分裂成其他原子量较小的元素。