

D7 超声乳化理论和技术

罗曾义 (中国科学院声学所,北京·100080)

1 引言

超声乳化与一般乳化工艺和设备(如螺旋浆、胶体磨和均化器)相比具有许多优点:

(1) 所形成的乳液平均液滴尺寸小,可为 0.2~2 μm;液滴尺寸分布范围窄,可为 0.1~10 μm 或更窄;浓度高,纯乳液浓度可超过 30%,外加乳化剂可高达 70%。

(2) 所形成的乳液更加稳定。超声乳化的一个重要特点就是可以不用或少用乳化剂使产生极稳定的乳液。

(3) 可以控制乳液的类型。采用超声乳化,在某些声场条件下, O/W(水包油)和 W/O(油包水)型乳液都可制备,然而用机械乳化方法这是不可能的。此时只有乳化剂的性质才能控制乳液的类型。例如:甲苯在水中乳化,在低声强条件下可以形成一种类型的乳液,而在高声强条件下则可能形成另一种类型的乳液。

(4) 生产乳液所需功率小。如:制备 4.55m³/h 液滴尺寸为 1 μm 的乳液,若采用簧片哨当工作压力为 10.5~14.1kg/cm² 时,只需 5~7 马力的驱动功率,而采用高压均化器,工作压力为 70.3~351.6kg/cm² 时,则需 40~50 马力的驱动功率。此外,簧片式超声发生器还有结构简单、牢固、工作稳定成本低、维护方便、易于实现工业规模生产等优点。

超声乳化的明显优点已促使它在食品、造纸、油漆、化工、医药、纺织、石油、冶金等许多工业处理中已越来越多地得到应用,其中燃油掺水燃烧在国内就是重新兴起的一个重要项目。

为了在使用中更好地发挥超声乳化的优点,下面就超声乳化理论和技术作一简单介绍。

2 超声乳化理论

Wood 和 Loomis 首次对在超声的作用下乳液的形成进行了研究。他提出乳化是由于容器壁附近破裂的气泡使液体残缺不全地射入另一种液体之中进一步分散成细滴而产生。

Sollner 等定性定量地分析了乳化过程。他们得出的结论是:油-水乳化,空化条件是必备的,而汞-水乳化,空化条件则非主要的。因为当系统外加压力超过 8 个大气压时(此时空化受到抑制),汞能很容易地分散在水中。为解释汞-水乳化,Marinesco 从他的雾化研究中提出超声乳化可能是由于表面波(有人认为是毛细波)的不稳定性所引起。这两种机理,一种是根据空化,另一种是根据表面不稳定性,是现在一般人们所接受的对超声乳化的理论解释,另外, Faikin 提出另一个可能引起乳化的原因是在超声的作用下所引起的微冲流。

2.1 空化机理

空化是指液体中气泡或空腔的产生、增长和随后迅速破灭的现象。本来在液体中要拉开某一区域使形成空腔或气泡需要有很高的拉力,因此是困难的。但是在液体中往往存在有许多容易产生空化的点(常称为空化核),这些空化核可能是由于热波动产生的空气泡、外来微小物质使液体形成的断点、为表面膜所阻止的溶解气体、为宇宙射线和其他天然辐射所电离的质点,当用超声照射时,在交变声压场作用下,则容易在这些点拉开而产生空化。

超声空化过程的重要见识是分析处在 $P_0 - P_a \sin t$ 声压场中气泡的特性取得的。这样一个气泡所产生的现象与超声频率 ω 和气泡自然频率 ω_0 的相对大小有关。此处,

$$\omega_0 = \frac{1}{R_0} \left(\frac{3}{2} (P_0 + \frac{2}{R_0}) \right)^{\frac{1}{2}}$$

P_0 为气泡半径为 R_0 的液体的密度, $\rho = C_p/C_v$ 为气泡所包含气体的定压比热与定容比热之比, σ 为表面张力, P_0 为液体静压力, P_a 为声压幅值。

当超声频率 $\omega = \omega_0$ 时,气泡以一定幅度接近似正弦振荡。当 $\omega < \omega_0$ 时,气泡则在瞬间压力减小时增大尺寸,而当气泡受到压缩时,特别是当 P_a 超过某一极限值时,引起破灭。而且破裂开始的相位与 P_a 、 P_0 和 P_0 有关。因此不同气泡将在不同瞬时破裂,破裂速度也不同,其瞬间质点速度可达超声速并产生

冲击波而促使混合液乳化。据计算,当一个半径为 1 m 的蒸气泡,在频率 4MHz 和压力 $P_a = 4$ 大气压的超声作用下于几分之一 s 内破裂,冲击波压力可达数千大气压,但实际上由于液体的粘滞性和压缩性,以及破裂时 Rayleigh-Taylor 不稳定性所引起气泡球表面破裂,冲击波将远小于此。冲击波的强度不仅与液体的粘滞性,而且与温度和含气量以及声波的频率和强度有关。例如:频率为 1kHz 时,空化阈强度是 $0.1W/cm^2$,而频率为 10MHz 时,阈强度则为 $10W/cm^2$ 。也就是说空化在低频时很容易产生,而在高频时开始空化则很困难。尤其对高含气量、低粘度的液体,用低频声波则更容易产生空化。国内汪承浩、张德俊等同志曾专门研究过空化和乳化现象,并用高速摄影方法证明乳化是在空化气泡闭合瞬间开始发生的。另外,按空化机理,乳化也可以由于界面附近气泡的迅速破灭而产生的很高吸力所引起。因为吸力使一相液体通过界面进入另一相。

2.2 界面不稳定性机理

Benjamin 和 Ursell 首先详细地研究了在周期性加速下界面的稳定性,但未提到乳化问题。Fogler, H. S 等注意到当超声射到两液体分界面上时,界面受到很高的周期性加速度。对于界面受到垂直加速度作用的稳定性问题,从经典的 Rayleigh-Taylor 稳定性分析指出:当加速度方向是从较轻液体到较重液体时, Rayleigh-Taylor 不稳定性就开始了,对于这一类不稳定性的不稳定模数 K 可由下式给出:

$$K < K_c = \frac{(2 - \rho_1/\rho_2)g^{1/3}}{2} \quad \rho_2 > \rho_1 = 2$$

ρ_2 为较重液体密度, ρ_1 为较轻液体密度, g 为重力加速度, σ 为界面张力, K 为波数, ν 为运动粘性系数。

不稳定性可使界面的扰动增大,而最后引起一种液体残缺不全地射入另一种液体,从而导致乳化。由于粘度不同,在这两种液体中这些波的增长率也不同,因而在两液体分界面上发生了相对的内切速度 $(U_1 - U_2)$ 。这一质点速度差将产生 Kelvin-Helmoltz 型的不稳定性。其判据是: $(U_1 - U_2)^2 >$

$[\frac{g(\rho_1 + \rho_2)}{K}(\rho_1 - \rho_2) + \frac{K\sigma}{g}]$ 如果是横向传播的波,也会发生不稳定性。Peskin 和 Raco 对在声场中由于液体受到周期性加速而产生雾化的一级近似分析指出:在声强超过某一临界值时会产生界面的不稳定性,这种不稳定性随密度差、振幅的增加和声频率的下降而增加。Eknadiosyants 观察了显然是由于表面

波机理所引起的超声成雾过程,其液滴从表面驻波波峰射出。正如从电影胶片上所观察到的那样,当表面振荡幅度变得足够大时,雾滴从各个爆炸点射出 Marinsco 首次提出超声乳化可以由毛细波的不稳定性引起,而从流体动力学的观点,雾滴可以看作是一个连续相密度变得很小的“乳化”。因此通常关于表面波不稳定性的讨论即可用于雾化也可用于乳化。Peskin 和 Raco 发现大多数不稳定性发生在:

$$\frac{(2 - \rho_1/\rho_2)g_0k}{(2 + \rho_1/\rho_2)^2} + \frac{2k^3}{(2 + \rho_1/\rho_2)^2} > 2.5$$

此处 g_0 是界面的声波质点振动幅度。因此,当声波强度达到某一极值时,则使界而不稳定并破裂。

Fogler, H. S 等获得了汞-水、汞-蓖麻油和汞-甘油等界面波照片,这些照片显示出界面上的不稳定性可能就是汞-液系统乳化的主要机理。关于液-液界面运动的直线化的稳定性分析指出,波的不稳定性所必须的液体质点位移阈值 δ 是:

$$\delta = \frac{4K(\rho_1 + \rho_2)}{(2 - \rho_1/\rho_2)}$$

K 为波数, ν 为粘度, ω 为角频率, ρ 为密度。脚注 1 和 2 分别指上、下层液体。此式表明密度差很大和粘度很低的一些系统按表面波机理是最容易乳化的。

2.3 空化机理与界面不稳定性机理的比较

如上所述,空化和界面不稳定性都可以引起乳化。支持空化机理的主要论据是空化和乳化都和液体的密度及其含气量以及声学条件等参数有关,而且其依赖关系无论在定性和定量方面都是相似的。Neduzhii 提出的主要论据如下:

(1) 开始空化和乳化所需的声强阈值几乎相同。

(2) 对于空化和乳化这两种过程,此阈值都随声频率增加而增加。

(3) 乳液的液珠尺寸开始时实际与声强无关,尽管乳化速率(随声强)线性增加(如果乳化是由表面不稳定性机理所支配,则液珠尺寸会与声强有关)。根据 Neduzhii 理论,输入到换能器的超过阈值的额外功率会引起更大量的破灭空腔,可是空化强度基本保持不变。

(4) 液珠的大小几乎与声波频率无关。

(5) 对同一组液体在不同的声强阈值时(后者大概相当于每一相液体的空化阈值,而表面不稳定性应是相同的) O/W 和 W/O 型乳液都可以形成。

(6) 液体的含气量、粘度、温度及本系统的外加压力,对空化作用和超声乳化都有相似的影响。

但 Neduzhii 的论据不能解释互相矛盾的观测

结果。例如: Sollner 看不出所溶解的气体对乳液性质有任何影响。虽然所溶解气体的性质对许多空化效应都有强烈的影响。同样地在很高的超声频(例如 2880kHz) 或者很高的系统压力下(例如 8 个大气压) 的乳化用空化机理解释不了。因为在这些条件下发生空化简直是不太可能。此外, 在很高的外界压力下, 汞在完全除气的水中的乳化用空化理论也是不能解释的。

Dohiewski 声称他在声强远低于空化强度阈值时曾产生过煤油-水乳液, 虽然只能在较低频率下获得明显的乳化。另外, 在悬浮质点或液滴雾化的研究中也报导过类似的结果, 这就揭示我们在低频时是表面不稳定性机理而非空化机理起支配作用。

据报道, Dohiewski, Sollner 等认为在低频时乳液液珠的平均尺寸取决于声波频率和强度。而 Neduzhii 和 Beal 等却认为没有这样的关系。这一矛盾的原因可能在于测量声学条件的方法上。如: Dohiewski 用测量辐射压力来量度声波强度, 但在空化条件下这样却得不到声强的真值。此外, 在测量中采样时间对于取得的最后数据也应有很大的影响。

Neduzhii 有一个令人感兴趣的观察结果是: 在水-酞系统中首先形成 O/W 型乳液, 在界面上 O/W 型乳液达到某一浓度后, 在同样的声学条件下也形成 W/O 型乳液, Neduzhii 未作任何解释。Fogler, H. S 认为这可能是由于二层之间界面张力的改变或由有界面位置的变化而引起空化区的改变所致。Neduzhii 也提到在所有情况下, 乳化首先在上层(相对于换能器来说) 观察到, 而与液体的性质无关。如果注意到当界面上有很强的声波反射时, 则空化状态可以限定于界面的一侧的话, 这些观察结果是可以解释的。

由此看来空化和表面不稳定性都是造成超声乳化的原因。这两种机理或者单独地支配乳化过程或者互相补充, 这取决于实验条件。在中等频率和有利的液体条件下(如有溶解气体、低外压力、低粘滞性等), 空化机理似乎是主要的。当二液体密度相差很大或频率很低时, 表面不稳定性可能是支配因素。由于水-油系统密度相差很小, 故将遵循空化机理。反之, 汞-水系统将遵循表面不稳定性机理。

声乳化研究至今几乎全部都是定性的, 同时常未提到实验条件。显而易见, 缺乏进行研究的严格步骤, 而选择实验条件也往往有偶然性。此外, 输入到换能器的功率曾被作为相对声强的量度。因此直径不同、效率各异的换能器(在其他实验条件相同时)

将会给出不同的结果。液体条件的稍许变化(例如溶解气体含量和微量杂质) 也会引起类似的偏差。特别是两液相之间的界面张力对微量杂质是非常敏感的。因此很难比较各个研究工作者的实验结果。例如: Rajagopal 等和 Neduzhii 提出乳化有一初始时期, 而 Sollner 和其他人则没有提到这一点。假定空化是主要机理, 这个初始时期可能是由于液体中气泡核增长到可以有效地发生空化的气泡尺寸时所经过的时间。此外, 如果两液相没有达到相互饱和浸润, 则初始的一些液滴将会溶解, 因而在乳化开始时所测出的乳液液珠尺寸是不正确的。

容器和换能器的尺寸在乳化过程中也有莫大影响。因此不同的容器尺寸和换能器直径, 也将导致不同的实验结果。例如 Sollner 和 Richard 提到容器壁附近发生强烈的空化表示发散的超声束充满整个容器。振动的容器壁在分界面上将发送横波, 从而使表面不稳定性机理活跃起来。因此, 如果 Neduzhii 和 Rajagopal 等利用一束足以避免容器壁强烈振动的狭窄超声束的话, 即使他们工作频率、强度与前述几个研究者相同, 他们的工作结果也会不同。

Baram 曾用一种数量级分析确定了表面波机理乳化的判据, 他发现当 Dn/f^{-1} 时表面波可以影响超声乳化(D 为液滴直径, f 为频率)。

3 超声乳化技术

超声乳化器与搅拌机、胶体磨、均化器等沿用乳化器相比, 具有乳化质量好、生产效率高、成本低等优点, 已越来越受到各工业部门的重视和采用, 并成为现代重要乳化设备之一。然而要想获得预期的乳化效果, 还必须掌握一定的超声乳化技术, 即掌握根据乳化需要正确选取超声乳化用换能器类型及其工作参数和超声乳化工艺流程及其工艺条件。

3.1 超声乳化用换能器类型及其工作参数的选取

(1) 类型:

常用超声换能器有压电式、磁致伸缩式、电磁式和流体动力式(或机械式)等 4 种。超声乳化用换能器一般要求有较大的功率(这只在频率约低于 5MHz 时才是可行的), 因为乳化效果往往与在液体中所能产生声强的大小有关。压电式换能器工作频率可达千兆赫以上, 但这对乳化不利, 一般建议使用小于 50MHz 的较低频率。压电换能器可以产生每平方米数 10W 级的声强, 这已足以使许多混合液体良好乳化。但是压电换能器所用晶片一般性能较脆易碎而且需要成本较高的高频电源和较高的维护要

求,因此以前在工业规模乳化中尚不十分常用。随着技术的发展,压电超声功率源效率的不断提高,这种换能器无论在实验室或工业上应用已越来越普遍。

磁致伸缩换能器结构牢固、承受机械强度大,较佳频率范围一般是 50kHz 以下,若设计适当,单个换能器可以产生 100~2000W 的功率。由于它使用电压较低,不用密封工艺可直接浸入处理液体中,这对换能器冷却有利。但磁致伸缩换能器目前国内是用镍等具有磁致伸缩效应的金属制成,材料来源缺乏且贵,效率比压电换能器低,故未进入广泛的工业化应用中去。以上两种换能器,使用变幅杆放大振幅,可使乳化更加有效。

电磁式换能器实际是用电磁铁驱动的振动片或振动台,它们在材料试验等研究中有一定的实际意义,但在乳化等方面不容易被采用。

流体动力式(或机械式)换能器所产生的频率和声强较低,但用于乳化却有很好的效果,尤其是簧片式超声发生器,由于具有前面所提到的优点,更是日益广泛地为各工业部门所采用。国内工业炉燃油掺水所用超声乳化器多为此类型。

综上所述,目前实验室小量制备乳液多采用压电式超声换能器,工业上大量制备乳液多采用簧片式超声换能器,或簧片式超声换能器和压电式超声换能器组合使用。中国科学院声学所研制有 T-1 型系列压电超声换能器和 X 型系列簧片式超声换能器,可供实验室研究和工业生产使用。

(2) 工作参数:

参数的选取主要根据超声乳化机理使有利于乳化的产生和取得较好效果,另外还应结合工业应用经济、实用等要求。空化和表面不稳定性都是造成超声乳化的原因。这两种机理或者单独地支配乳化过程或者互相补充,这取决于实验条件。在中等频率和有利的液体条件下(如:有溶解气体、低外压力、低粘滞性等),空化机理是主要的。当两液体密度相差很大或频率很低时,表面不稳定性可能是支配因素。由于水-油系统密度相差很小,故将遵循空化机理。因此参数选取的核心在于使有利于空化的产生和根据需要对其强度加以适当控制。超声乳化用换能器的声学工作参数主要有频率、声强、总功率及效率等。其他工作条件如:乳化腔、输液工作压力、喷口尺寸等将作为工艺条件在后论述。

频率参数:一般认为频率高虽然能够使流体质点产生较大的速度和加速度,但产生超声空化较困难。据试验表明,频率 15kHz,产生空化所需声强是

0.16~2.6W/cm², 175kHz 则是 10W/cm², 而 500kHz 则为 100~400W/cm²。因此一般希望采用较低频率。但声频范围内噪音较大,所以一般也不采用低于 20kHz 的声频。对于压电式超声换能器即是这样。然而对于簧片哨等流体动力式超声换能器,由于直接浸入被处理的液体之中,而泵、电机等的噪音也较大。所以簧片哨本身的噪音问题并不突出,更主要的是只有声频范围,簧片哨才能取得较大的声强,具有较佳的工作稳定性。另外也可降低对零件加工精度和工业应用的要求(如:宽喷口、宽工作压力范围等),因此,对簧片哨采用声频是较适当的。

声强参数:一般认为声强大,空化强度亦大,乳化速度也快,而且所能获取的乳液粒度小、浓度大。据试验表明,大簧片强烈振动的高声强条件下,可以制得 20% 浓度的油-水乳液,粒度小、分层慢,而在无簧片的低声强条件下,只制得 5% 浓度的油-水乳液,而且粒度粗、分层快。在实验室中,我们用压电超声换能器进行乳化试验研究时,控制输入换能器的电压、功率,即控制其所能产生的声强大小,也能较明显地观察到声强大乳化质量好(稳定时间延长)这一现象。当然声强的大小还要根据实际要求来确定,如果已能达到乳化要求,则不必要求过大的声强,以致使超声换能器工作条件恶化或增加成本,因此应适当掌握。

总功率参数:一般应根据实际处理混合液量的大小去考虑决定。处理单位容积的液体所消耗能量的大小经常作为衡量比较的一项技术经济指标。

3.2 超声乳化工艺流程及其工艺条件的选取

(1) 工艺流程

超声乳化工艺流程主要有罐式和管道式两种。而管道式随加料方式之不同又可分为渐次法(连续相先循环,然后逐步加入分散相,乳液逐步形成)、瞬间法(连续相和分散相按比例同时进泵和进入乳化器,乳液瞬间形成)、单次法(连续相和分散相先混合,再一起进泵、进入乳化器,乳液一次处理形成)和多次法(单次法的多次重复)4种。上述工艺流程如图 1 和图 2 所示。罐式适合于工业上间断式生产,由于反复循环处理,乳化质量较好,尤其适宜对乳液质量要求较高的场合,实验室常用烧杯或试管进行小样乳化处理,亦是小型的罐式。显然这些场合采用罐式是适宜的。管道式适合于工业上连续式生产,流程简单、生产效率高,往往还不需要增加乳化动力泵,尤其适宜对乳液质量要求不高的场合。工业炉低压雾化系统燃油掺水乳化燃烧则可直接采用。当然罐

式也可实现连续生产,主要是采用多台动力设备使混合液边乳化边输送,而管道式也可间断生产。管道式一次处理乳化质量较差,为改善乳化质量,又不增加动力设备,我们提出管道式部分循环流程。即将乳液一部分送去使用,一部分回流至泵入口再次处理,控制回流量大小即可控制平均乳化处理次数。其流程如图3。

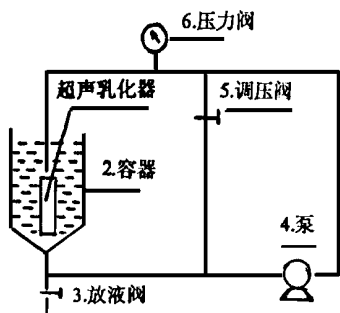


图1 罐式乳化处理流程图

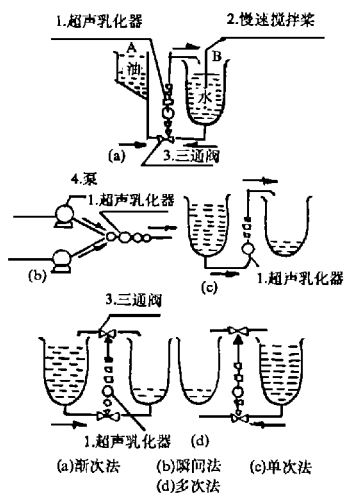


图2 管道式乳化处理流程图(超声乳化器安装在管道中)

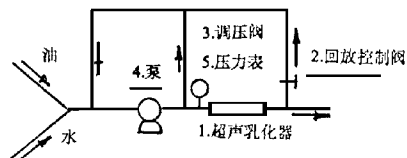


图3 管道式部分循环乳化处理工艺流程图

(2) 工艺条件:

(a) 配比(相体积比): 乳液有两相,即连续相(或称外相)和分散相(或称内相),油包水型乳液,油为连续相、水为分散相。水包油型乳液则相反。油水两相占总体积的比称为相体积比或配比。有人从理论分析得出:对一定体系,相体积比在0.74和0.26之间,油包水型(W/O)和水包油型(O/W)乳液皆可形成。但在0.26以下或0.74以上,只有一种类型乳液可存在。另外,二相体积比相差较大,或分散相浓度较小,则乳化较易。而两相体积比相差较小,或分散相浓度较大,乳化较困难,甚至导致乳液变型。配比的选取一般根据制备乳液的需要而定。但若所需配比处于0.74和0.26之间,为保证某一类型乳液的形成则应加入所需类型的适量乳化剂。因为乳化剂也是控制乳液类型的重要因素。当然选取配比应尽量使其处于有利条件之下。燃油掺水燃烧一般希望获取油包水型乳液,因此,控制掺水量不超过26%是有利的。

(b) 乳化剂: 加入乳化剂主要是降低相界面张力,促进乳化并维持乳液稳定。前已提到乳化剂类型也是控制乳液类型的重要因素,亲水性强的乳化剂可制成水包油型(O/W)乳液,亲油性强的乳化剂可制成油包水型(W/O)乳液。显然,加入乳化剂的类型和用量对乳液质量有重要影响。乳化剂一般以其亲水性和亲油性的平衡即以H.L.B(Hydrophile Lipophile Balance)值来调配。由于实际使用这一方法的某些困难,也常用试验法调配。乳化剂加入量一般为1~10%,由于经济原因,希望尽量少加,能控制至1%更好。超声乳化的重要特点之一就是可以少加或者不加乳化剂而达到所需乳化质量。燃油掺水乳化中,原、重、渣油由于含有天然乳化剂沥青质,可以不必再加入乳化剂。柴油、汽油等轻质油则应加入少量乳化剂。一般既加入亲油性又加入亲水性乳化剂加以调配为宜。日本一专利汽油掺水乳化剂配方是:失水山梨醇单油酸酯1.8%;聚氧乙稀失水山梨醇单月桂酸酯0.2%;水25%;汽油73%。

(c) 乳化处理时间: 乳化处理时间过短,乳液质量不好。乳化处理时间过长,既不必要,甚至导致乳液分散相重新凝聚和乳液分离,显然应有一乳化处理较佳时间,而这一时间又与乳化对象及条件有关。对于难乳化液体此时间则应长些,而声强大,此时间则可短些。一般可实验确定。例如:我们用簧片哨对重油、柴油等乳化,发现平均乳化处理3~5次为好(处理时间则与设备乳化处理能力总容量有

关)。

(d) 乳化处理温度: 乳化处理温度对乳液质量有一定影响。温度高、粘度小、有利于乳化;但另一方面,液体分子运动和碰撞增加,易于凝聚。另外,温度高低也直接影响超声空化的产生及其强度的大小,对每混合液都有一较佳乳化温度。以上二因素应综合考虑,一般也可通过试验确定。例如:对原油、重油掺水乳化,试验表明油温 $70 \sim 85$,水温不高于油温为好。油温高于 90 ,会出现很多泡沫并有可能引起起冒顶。油温太低(如冷水掺入)则流速太低,从而有可能出现凝结现象。轻油掺水则常温较宜。

(e) 其他工艺条件 乳化腔(即乳化处理室)的大小、形状,对于充分利用声能、提高乳化效果是有重要作用的。一般希望乳化在超声换能器声强区进行,并使声能通过反射得到充分利用。

簧片哨工作压力、喷嘴尺寸对乳化也有一定影响,工作压力大,显然流速高,液体流动所形成的湍流乳化效果较好,但消耗动力较大。一般希望以较低的工作压力获得较佳的乳化效果,这就需要注意发挥声能的作用。对燃油掺水,工作压力应大于 $4\text{kg}/\text{cm}^2$ 。乳液粘度大者应适当提高工作压力,粘度小者则可适当降低工作压力。喷嘴尺寸既要满足乳化处理流量的要求,又要能产生较高声强,工艺上希望用较大喷嘴厚度,这样不易堵塞,但喷嘴厚度大又不利于乳化,因此应综合考虑。对于重油掺水乳化,喷嘴厚度 $S = 1.2 \sim 2.0\text{mm}$,轻油乳化 $S = 0.8\text{mm}$ 为宜。在此条件下再适当选取工作参数,尽量使之产生高声强。乳化处理的环境压力(外压力),对乳化效果也有一定影响。这主要由于空化的产生及其强弱与环境压力有关。据在水中试验,当外压力小于 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 时,空化强度则随压力增加而增强。当压力大于 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 时,空化强度则随压力增加而减弱,直至达到 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ 时,空化受到抑制。因此,乳化处理时,混合液与水相近者,应注意使用压力小于 $2\text{kg}/\text{cm}^2$,尤其要小于 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

以上只是超声乳化技术的粗略概况,有些也只是考虑因素,由于目前乳状液理论尚不够完善、严格,往往乳化技术或工艺的重要性更显突出。因此,更需要从大量实践中去总结、提高、完善。本文只作简单的综述介绍,以抛砖引玉,不当之处,欢迎批评指正。

4. 超声乳化的一些应用实例

燃油掺水乳化燃烧,仍然是国内外超声乳化应

用的重要项目之一,目前我国工业上所用超声乳化器多为声学所研制的簧片哨乳化器,频率 $0.6 \sim 2.0\text{kHz}$ 左右,实验室多采用各单位研制、生产的高强度压电超声乳化器。频率一般为 20kHz 左右,功率一般 250W 。

在食品工业方面,果汁、果酱、番茄酱、蛋黄酱、人造奶油、婴儿食物、巧克力、色拉油、油糖水等乳化国内外都曾有试验和采用,取得了提高产品质量和生产效率的效果。近期水剂胡萝卜素乳化已试验成功并用于生产。轻工业方面国内早期曾进行过鞋油、牙膏乳化试验,多年来液体鞋油、硅油乳剂、家具保护剂、浮选剂、防水剂、沥清乳液、液态石蜡乳剂、洗涤剂、涂油、涂料、颜料乳剂、化妆品等乳化国内外有过试验和采用。医药上,制备鱼肝油乳剂、喜树碱混悬剂、肝脏造影剂、硫酸钡混悬剂、扫描诊断剂、疫苗、杀虫剂、杀菌剂、D. D. T 乳剂、涂敷药、按摩油、药水等也有试验和应用。在机械工业方面,可用于制备切削油乳剂等,在化学和矿冶工业方面可用于制备胶、漂白乳剂、抗氧化物、填料、障壁油、菱铁矿洗涤剂、矿物油乳剂、浮选剂等。另外,超声制备农药乳剂,也常有采用,如制备“混灭威”乳剂、 $25 \sim 30\%$ 的“西维因”水悬剂等,粒度细化,药效显著提高。以上乳化,液滴尺寸一般可达 $2 \sim 5 \mu\text{m}$,有的达 $1 \mu\text{m}$ 左右,甚至 $0.1 \mu\text{m}$ 质量很好。

参考文献

1. Eknadiosyants, O. K. Soviet Phys. acoust. 1963; 9: 201 ~ 202
2. Gopal, E. S. R. In Emulsion Scienc. Philip Sherman, ed, Academic Press, New York(1968)
3. H. scott Fogler editor. Sonochemical engineering. 1971; 67(109)
4. Peskin, R. L and Raco, RJ, J. Acoust Soc Am 1963; 35. 1378 ~ 1381
5. 别尔格曼·超声. 1963
6. P. 贝歇尔·乳状液理论和实践. 傅鹰译. 1964
7. B. Brown and J. E. Goodman. High intensity ultrasonics industrial applications. 1965
8. J. Lissant. Emulsions and Emulsion Technology. Part 1, 1974
9. A. L. Smith. Theory and practice of emulsion technology. 1974
10. P. R. Chende and H. S. Fogler. Macrosonics in industry. Ultrasonics 1975; 13

书讯和书评

《换能器与聚焦系统》简介

本书将换能器和聚焦系统适当地结合, 构成较为系统的论述。内容包括电声换能器原理, 芯片物理特性, 振动模式分析和测量, 典型换能器特性分析, 凹面聚焦, 透镜聚焦, 相控聚焦, 反射聚焦, Gauss 振幅分布聚焦和非线性参量阵的方向性等等。参照实验, 给出转换、振动与非线性等的理论分析, 结合工程应用, 提供设计指南, 提示工业和医疗应用的现实与前景。可供科学技术人员和大、中、专科学校教师研究参考, 也可以作为物理、声学、水声、光学、医学超声和生物医学工程等专业的学生和研究生的教材或参考书。

换能器在水声学的发展中曾经起过并仍在起着重要的关键作用。近代医声学的发展也与换能器的发展密切结合。换能器聚焦系统则是在近年来结合电声学、超声学、医学和工业等应用获得快速的发展。本书首次较为系统地论述换能器与聚焦系统的历史演进、基本原理、新近理论和实验、技术面貌及各种应用, 并适当阐明作者等在近十年来有关的科研成果, 以求推进这门科学技术及应用的更快进步。

本书叙述上由浅入深、循序渐进、力求简明扼要, 使初学者易于接受并尽可能较快接触最新文献和成果。

在本书有关课题的研究中曾经得到国家自然科学基金、国家教委博士点专项基金和上海交通大学科学基金等的资助。有关的论文已经或者即将发表, 这些是本书的基干。参加者还有乐建威、钱纪鹏、丁纛、李忠强、何芸、杨一鸿、商勇智、韩春明、陆淮君、吉晨、朱小明、钱德初、朱维彬、于洪斌、黄平、鲍苏苏、钱盛友等同志。

本书的出版适逢交通大学百年大庆, 谨向领导、组织校庆出版的上海交通大学和出版社致谢并感谢仪器工程系和生物医学工程及仪器教研室(BME研究所)的支持。

作者 王鸿樟(教授、博士生导师)