

流动液体中夹杂物超声去除的影响因素*

白晓清 李东辉 张林 赫冀成

(东北大学材料电磁过程教育部重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要 以高密度聚乙烯 (HDPE) 颗粒和水形成的悬浮液为研究体系, 考察了有无超声波作用下, 介质流量、夹杂物数量以及夹杂物的粒径对总去除率、上浮去除率、壁面粘附去除率的影响。实验结果表明, 在短时间内 (30 s) 超声波对流动液体中的夹杂物具有明显的去除效果, 总去除率达 93%。夹杂物的总去除率随着超声波输入电功率的增大而提高; 超声波对较多数量或较大粒径的夹杂物去除效果更显著。超声波作用下流动液体中的夹杂物比静止液体中的更容易去除。超声波对流动液体中夹杂物去除效果的去除机理主要是通过气泡捕获夹杂物、超声空化效应产生直接包裹夹杂物的气泡以及通过夹杂物碰撞凝聚使夹杂物容易上浮实现去除。

关键词 超声波处理, 夹杂物去除, 流动液体, 上浮去除, 粘附去除

中图法分类号 O426.4

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)05-0483-07

ULTRASONIC SEPARATION OF INCLUSIONS FROM FLOW LIQUID

BAI Xiaqing, LI Donghui, ZHANG Lin, HE Jicheng

Key Laboratory of Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: BAI Xiaqing, lecturer, Tel: (024)83682417, Fax: (024)23906316,

E-mail: epmlab@mail.neu.edu.cn

Supported by Major State Basic Research Projects of China (G1998061510)

Manuscript received 2001-08-21, in revised form 2001-11-26

ABSTRACT By using the suspension made of high density polyethylene particles and water as a model, the possibility of ultrasonic separation of inclusions in flow fluid has been experimentally investigated. The variations of parameters such as ultrasound power input, flow rate, amount of particle input and particle size, have been found to have significant effects on total removal rate (TRR), floatation removal rate (FRR) and adhesion removal rate (ARR) of inclusion particles. The experimental results showed that the inclusions in flow liquid were obviously removed (up to 93%) under short time (30 s) imposing ultrasound, and that TRR increased with increasing ultrasound power. It has been shown that the higher TRRS are obtained for more amount of particle input and larger size inclusion, and the inclusions in flow liquid are removed easier than those in static liquid. The separation process is through the acoustic cavitation induced bubbles, bubbles trapping the inclusions, and the floatation due to accumulation of inclusions.

KEY WORDS ultrasonic separation, inclusion removal, flow liquid, floatation removal rate, adhesion removal rate

洁净钢对非金属夹杂物的数量和尺寸都有着严格的要求^[1]。超声波作为外场对金属液的脱气、凝固组织的晶粒细化以及防止偏析等作用都得到了证实^[2-4]。同时, 利用超声波分离液体中的液滴、气泡或夹杂物的技术^[5-8]也成为超声应用研究的热点之一。大多数研究者是利用

超声波在容器中形成驻波场, 夹杂物或气泡等在声辐射力的作用下向垂直于声传播方向的声压节或声压腹平面运动。在声交互作用力 (acoustic force) 以及旁力 (lateral force) 的作用下形成凝聚物。当停止超声波导入后, 凝聚物会因重力或浮力迅速地下降或上升^[5,6]。另一些研究者致力于利用超声波对流动液体的“分批分离” (batch fractionation) 技术的开发。根据被分离粒子和母液的不同声学特性, 需要精确地计算设计声分离室^[7,8]。上述超声分离的研究都是在静止或流速很低 ($Q = A \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, A 为小于 10 的常数) 的液体中进行的。然而, 在冶金生产

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1998061510 资助

收到初稿日期: 2001-08-21, 收到修改稿日期: 2001-11-26

作者简介: 白晓清, 女, 1968 年生, 讲师, 博士生

过程中,许多过程是在流动速度较大($Q = A \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)的条件下进行的,例如在连铸过程中,金属液从钢包到中间包或从中间包到结晶器等过程。另外,最好是在金属液凝固之前能够有效地去除夹杂物,即去除夹杂物的时间越短越好。本文的目的是探索超声波在较短的时间里去除流动金属液体中夹杂物的可能性。

本实验采用水模型实验,将超声波从容器的底部导入,对流动状态下的液体中夹杂物的去除效果进行可视化观察,分类收集被去除的夹杂物,对超声波作用下不同实验条件下的去除效果定量考察并分析讨论

1 实验方法

1.1 实验液体的选择

选用普通自来水作为实验液体,普通自来水采用净水器过滤并放置一段时间,使其含气量在常温常压下达到饱和状态。

1.2 夹杂物的选择及表面处理

钢液中的非金属夹杂物主要以脱氧产物 SiO_2 和 Al_2O_3 为主,其密度分别为 2700 和 $3900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比钢水的密度 ($7200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 低。模拟夹杂物颗粒选用齐鲁石油化工塑料厂生产的高密度聚乙烯塑料颗粒,其牌号为 DGDA6098,密度为 $940 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,模拟溶液水的比重为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由于选用的塑料颗粒与水不浸润,难以直接加入水中,采用表面活性剂来降低水—塑料颗粒表面间的表面张力,改善塑料颗粒与水的亲合性。

1.3 实验装置

实验装置如图 1 所示,容器内径为 94 mm ,材质为有机玻璃,实验液体深为 180 mm ,浸入水口直径为 8 mm ,浸入液体深度为 30 mm ,超声波发生器为中国科学院声学所制造,超声波波型为平面波,频率为 24.1 kHz 。将直径为 30 mm 的超声换能器从容器底部导入,每次实验时先用实验液将容器注满后,施加超声波并且调至共振状态,打开阀门待流动稳定后,用注射器注入夹杂物,主要实验参数见表 1,将夹杂物按下节定义的考察指标分类收集,用 300 目不锈钢网筛收集夹杂物,干燥后称量,每一实验重复进行三次。

2 实验考察指标

2.1 夹杂物分类收集

为了考证超声波在较短的时间里去除流动金属液

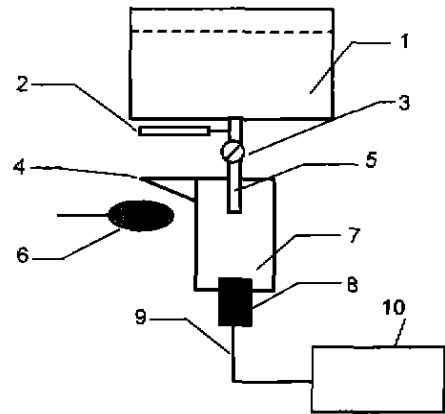


图 1 实验装置简图

Fig.1 Schematic of experiment setting of ultrasound separation inclusion

1-Tank 2-Syringe 3-Flow meter
4-Spillage 5-Nozzle 6-Filter
7-Vessel 8-Transducer 9-Line

体夹杂物的效果,设定收集夹杂物的上浮量的时间为 30 s 。每次实验加入的夹杂物分 4 类进行收集,干燥后称量,收集分类如下:

上浮量: 夹杂物开始加入计时至 30 s 内,停止超声波导入,上浮至液面的夹杂物收集量,用符号 T_1 表示。

未去除量: 停止超声波导入一段时间后,上浮至液面的夹杂物收集量,该部分实际上是自然上浮量,但是考虑到实验目的是考查超声波作用下的夹杂物去除效果及收集方法等因素,因此,在本实验中视为未去除量,用符号 T_2 表示。

粘附去除量: 容器壁面及底部粘附夹杂物的收集量,用符号 T_3 表示。

残余量: 包括注射针管内的残余夹杂物及注口和导管中残余夹杂物的收集量,用符号 T_4 表示。残余量的收集是为了计算每次夹杂物收集量的误差,经计算,每次收集误差不超过 3% 。

2.2 去除率定义

将夹杂物最初加入总量 (2.00 g) 减去未能进入容器内的夹杂物的残余量 (R) 的值定义为实际加入量,实际加入量 T 为

表 1 主要实验参数
Table 1 Operating parameters

Power input of ultrasound $P, \text{ W}$	125	156	189	224
Flow rate $Q, \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	2.78	3.17	5.56	6.94
Amount of inclusions M (mass fraction, %)	0.8	1.6	2.4	3.2
Diameter of inclusions $d, \mu\text{m}$	280—180	180—154	154—105	105—88

$$T = 2.00 - R \quad (1)$$

式中, 各量单位为 g, 总去除率定义为

$$\eta_t = ((T_1 + T_3)/T) \times 100\% \quad (2)$$

上浮去除率定义为

$$\eta_f = (T_1/T) \times 100\% \quad (3)$$

粘附去除率定义为

$$\eta_a = (T_3/T) \times 100\% \quad (4)$$

3 实验结果

3.1 实验结果的可视化观察

图 2 为用数码相机拍摄的实验现象照片。实验条件为: 实验液为普通水, 流量 Q 为 $5.56 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 超声波输入电功率 P 为 224 W, 夹杂物的粒径为 $d=180-154 \mu\text{m}$, 夹杂物加入量质量百分率为 $M=1.6\%$ 。图中上下两组照片分别为施加超声波前后的实验现象对比。图 2a 和 d, b 和 e, c 和 f 分别为夹杂物加入后 2、15 和 30 s

时拍摄的情况。由图可见, 无超声波作用下, 夹杂物会自然上浮至液面并且仅有少量的夹杂物粘附于容器的壁面和底部; 在超声波作用下, 夹杂物因凝聚效应在短时间内上浮至液体自由表面或粘附于容器的壁面和底部。在 15 s 和 30 s 时, 可以明显观察到有超声波作用的液体更为清澈, 从图片可见, 凝聚物基本都在容器壁上。

3.2 超声波输入电功率的影响

为考察超声波输入电功率的影响, 采用的实验条件为: $P=125-224 \text{ W}$, $Q = 5.56 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $M=1.6\%$, $d=180-154 \mu\text{m}$ 。图 3 示出了超声波输入电功率对夹杂物总去除率, 上浮去除率以及粘附去除率的影响。由图可知, 超声波对夹杂物的去除效果随输入电功率增加而增大, 上浮去除率明显高于粘附去除率。当功率达到 224 W 时, 总去除率达到 93.5%, 增大功率夹杂物的总去除率有进一步增大的可能。

3.3 液体流量的影响

为考察液体流量的影响, 采用的实验条件为: $Q = 2.78 \times 10^{-5}-6.94 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $P=2.24 \text{ W}$, $M=1.6\%$, $d=180-154 \mu\text{m}$ 。图 4 示出了液体流量对夹杂

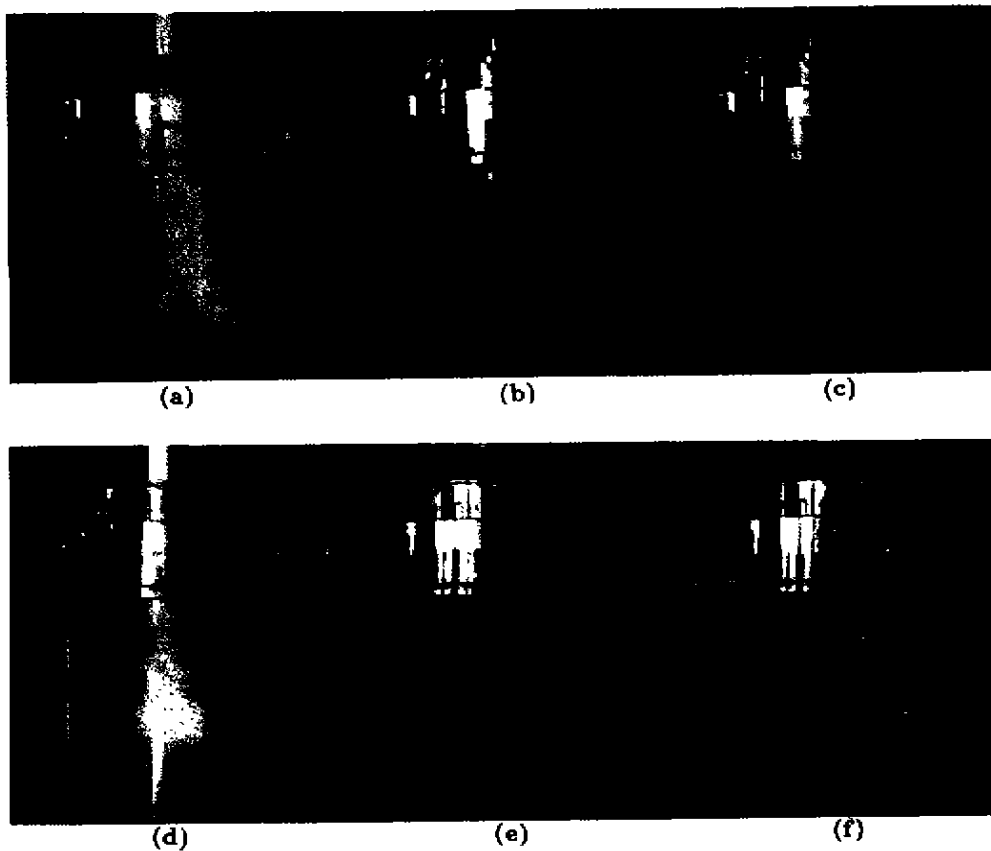


图 2 夹杂物分离实验现象照片

Fig.2 Photos of inclusion separation without ultrasound (a,b,c) and with ultrasound (d, e, f), showing the water becoming clear after 15 s and clearer after 30 s under ultrasound and the white spots in Figs (e) and (f) being inclusions adhering to the wall of the vessel

(a, d) $t=2 \text{ s}$ (b, e) $t=15 \text{ s}$ (c, f) $t=30 \text{ s}$

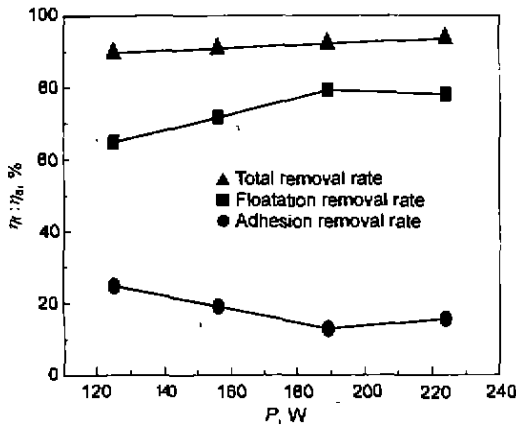


图3 超声波输入电功率对夹杂物去除率的影响

Fig.3 Effects of ultrasound power input on removal rates of inclusion

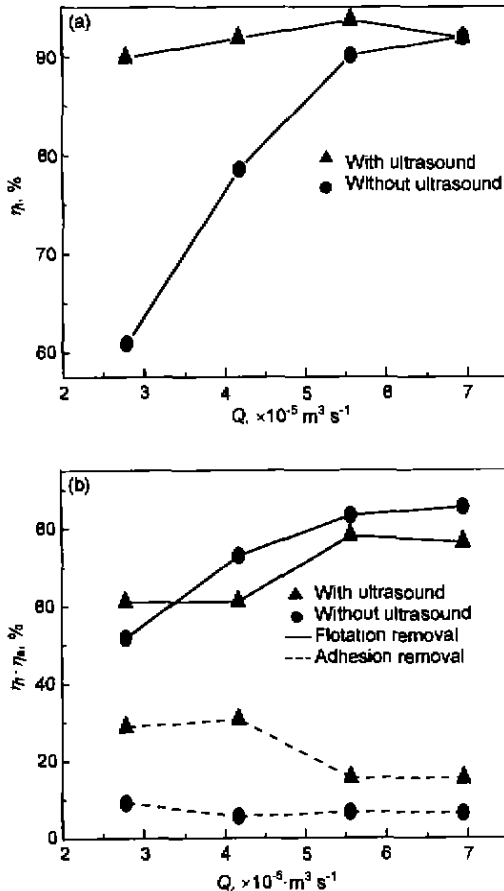


图4 液体流量对夹杂物去除率的影响

Fig.4 Effect of flow rate on removal rates of inclusions with and without ultrasound (a) total removal rate (b) flotation and adhesion removal rates

物总去除率，上浮去除率以及粘附去除率的影响。

由图可见，在低流速下，超声波去除夹杂物的效果更为明显。无超声波作用下夹杂物的总去除率随着流量增大而增大，当流量达到某一数值后，夹杂物的总去除率达到

一个峰值，这主要是由于射流作用使夹杂物随着上返流更容易上浮至自由液面。超声波作用下，低流速时，流量变化对夹杂物的总去除率的影响不大；随着流速的增大，夹杂物总去除率有下降趋势。超声波对上浮去除效果不显著，对粘附去除效果显著。这一特征在以下实验中同样出现。有超声波作用时，夹杂物就会形成不定形状的凝聚物，它们在振动过程中上浮，结果有三种：

- (1) 被大的凝聚物吸引并随之上浮至液面；
- (2) 独自上浮至液面；
- (3) 被容器壁面或底部粘附而不能继续上浮至液面。

3.4 夹杂物数量的影响

为考察夹杂物数量的影响，采用的实验条件为： $M=0.8\%—3.2\%$ ， $Q=5.56 \times 10^{-5} m^3 \cdot s^{-1}$ ， $d=180—154 \mu m$ 。图5示出了夹杂物质量百分率对夹杂物总去除率、上浮去除率以及粘附去除率的影响。

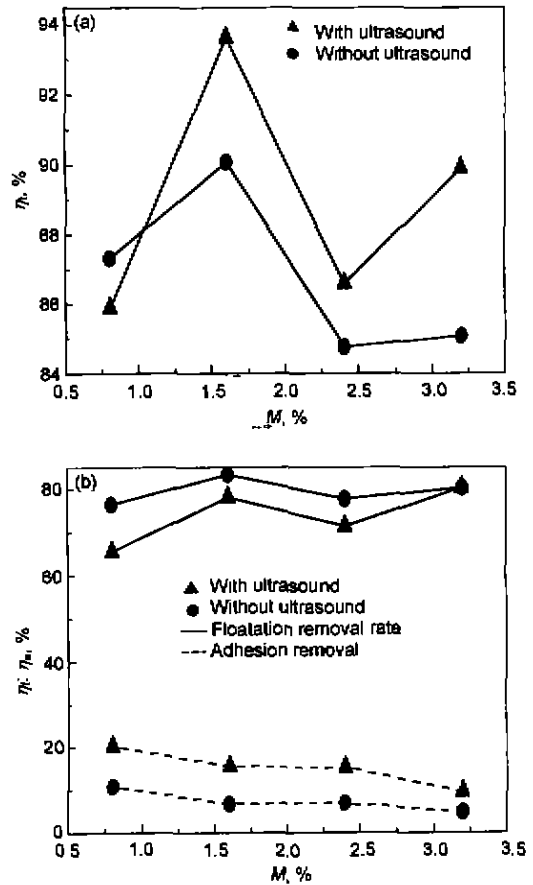


图5 夹杂物质量百分率对夹杂物去除率的影响

Fig.5 Effects of amount of input inclusion on removal rates with and without ultrasound (a) total removal rate (b) flotation or adhesion removal rates

由图可见，总体来说，超声波对不同数量的夹杂物去除都有较好效果，对夹杂物的粘附去除有利，但对上浮去除不利。有无超声波作用下，夹杂物总去除率的变化趋势是一致的。

3.5 夹杂物粒径的影响

为考察夹杂物粒径的影响, 采用的实验条件为: $d=280-88 \mu\text{m}$, $Q=5.56 \times 10^{-5} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $P=224 \text{W}$, $M=1.6\%$. 图 6 示出了夹杂物的粒径与夹杂物总去除率、上浮去除率以及粘附去除率之间的关系.

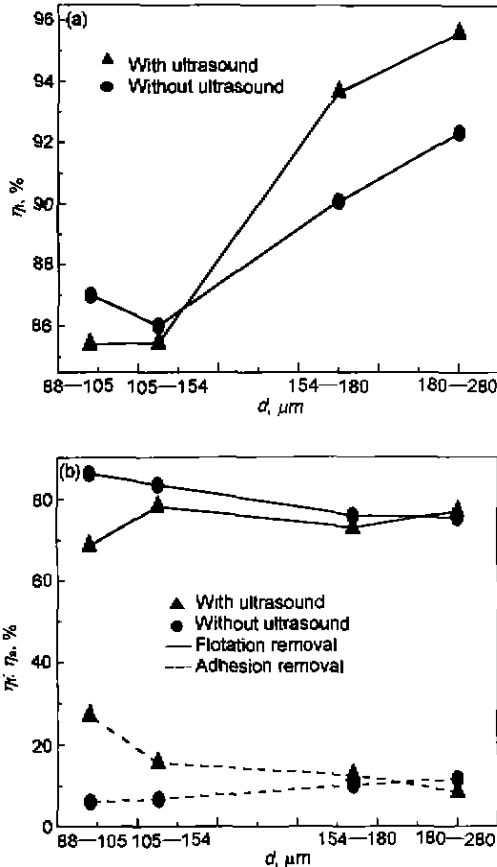


图 6 夹杂物的粒径与去除率的关系

Fig.6 Relationships between inclusion diameter and removal rates with and without ultrasound
(a) effect on total removal rate
(b) effect on floatation and adhesion removal rates

由图可见, 超声波对大粒径的夹杂物去除效果更显著, 对夹杂物的粘附去除有利, 对上浮去除不利.

4 讨论

4.1 超声波的去除机理

超声振动可使气、液媒质中悬浮粒子以不同速度运动, 增加碰撞机会. 在驻波场的作用下, 使它们向声压腹或声压节平面运动, 发生凝聚效应. 含气的悬浮液在超声波作用下, 随着超声波输入电功率的增加, 凝聚效果增强, 夹杂物总去除率提高.

4.1.1 超声驻波场的影响 从换能器表面到自由液面的高度 H 为 $\lambda/4$ (λ 为超声波的波长) 的奇数倍时, 超声波在液体中传播时形成具有较大压力幅度的共振驻波场. 当液面 H 的高度为 $\lambda/4$ 的偶数倍时, 形成抗共振

驻波场. 本实验中取 $\lambda=62.24 \text{mm}$, 液体深度选为 $J/4$ 的 13 倍, 即 171mm . 换能器浸入液体的高度为 9mm , 所以从容器底部至液体自由液面的实际深度为 $H=180 \text{mm}$. 文献 [9,10] 表明, 在静止的驻波场下, 高密度聚乙烯塑料颗粒在声压节平面凝聚. 由于实验是在流动的液体中进行的, 观察到夹杂物形成絮状物上浮至自由液面或被容器壁面粘附. 絮状物并未在所有的声压节凝聚, 大多数是在容器的上半部空间形成. 这是因为在换能器附近强烈的声流作用使夹杂物还未来得及潜入容器底部就形成了凝聚物. 于是, 超声波作用下凝聚的夹杂物团会因体积增大而以较大速度上升. 如果将超声波导入钢液中, 非金属夹杂物凝聚上浮后可以被保护渣吸附.

4.1.2 气泡的影响 气泡的行为对于浮选过程中夹杂物收集具有重要的作用 [11,12]. 利用气泡对夹杂物的捕捉过程受到很多因素的影响, 诸如流体的流动状况, 夹杂物的尺寸和成分, 气泡的尺寸数量和分布以及气泡在液体中的停留时间等. 在超声波的作用下, 小气泡会在声辐射力的作用下进行振动、长大或破裂. 一个气泡的谐振频率为 [13]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_1} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right)} \quad (5)$$

式中, R_0 为气泡的初始尺寸; ρ_1 液体的密度; P_0 液体的静压力; γ 气泡内气体的多变指数; σ 为气泡的表面张力.

设超声波频率为 f , 当 $f_0 > f$ 时, 气泡被压碎而破裂; $f_0 < f$ 时, 气泡作复杂的运动或者长得足够大而迅速上浮至自由液面. 在本实验条件下, 尽管普通水中含有一定量的气体. 由于作为表面活性剂的乙醇具有暂时消泡功能, 利用气泡捕捉夹杂物的作用估计不显著. 如果将超声波导入钢液中, 超声波作用下大大增加了气泡与夹杂物的碰撞机会, 使夹杂物粘附于气泡得以去除. 由于非金属夹杂物的非浸润性, 这种去除机制是非常可能的.

4.1.3 空化作用的影响 足够强的超声波作用于液体媒质时, 若交变声压的幅值 P_m 大于液体中的静压力 P_0 , 则在声压的负压相 (或称稀疏相) 中, 负压的峰值 $-P_m$ 不但可以抵消静压力, 还可以在液体中形成局部的负压作用区. 当负压 $-P_m + P_0$ 足以克服液体分子之间的结合力 (也称为液体强度) 时, 液体被拉断而形成空腔, 产生空化气泡. 根据文献 [13] 报道, 当夹杂物为非浸润性时, 在固体粒子的气隙中, 由于表面张力为负值, 可以使缝中的气体同时达到力学和热力学平衡. 顺而能稳定地存在. 当外加声压超过空化阈值时, 缝隙中的气体开始长大, 其液-气界面也由凹面 (图 7a) 变成凸面 (图 7b), 形成空化核. 图 7 示出了该机制的示意图 [14].

由于不同初始粒径的气泡具有相应的谐振频率, 如果气泡的谐振频率小于声波的频率 24.1kHz 时, 夹杂物缝

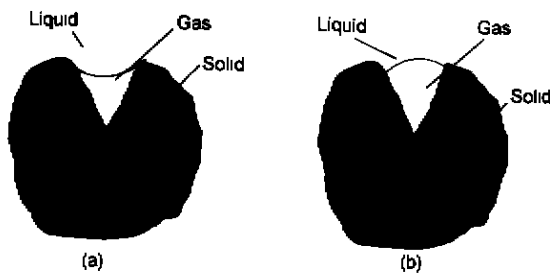


图7 固体粒子气隙型空化核形成机制示意图^[14]

Fig.7 Mechanism of cavitations of crevice model^[14]

(a) gas in the crevice being at a steady state

(b) gas becoming cavitation nuclei and then growing under ultrasound

隙中的气泡长大,包裹着夹杂物一同上浮至自由液面.与利用气泡粘附夹杂物的方法相比,空化气体成核是一个快速的过程,非常有利于夹杂物的去除,该机制有待于进一步验证.

4.2 与介质处于静止状态的比较

超声波作用下静止液体中夹杂物的运动行为以及去除效果已经被广泛地研究^[5,10].在其它条件相同的情况下,静止液体中夹杂物的去除效果与流动状况下夹杂物的去除效果的定量考察效果见表2.

表2 超声波作用下静止和流动状态下夹杂物去除效果的比较
Table 2 Comparison of removal rates of inclusions in static liquid and flow liquid with ultrasound

Flow rate $\times 10^{-5} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Total removal rate η_t	Floatation removal rate η_f	Adhesion removal rate η_a
0	0.857	0.303	0.554
2.78	0.899	0.609	0.289
4.17	0.918	0.611	0.307
5.56	0.936	0.781	0.158
6.94	0.918	0.764	0.155

由表可知,静止液体中的夹杂物的总去除率为0.857,小于流动状态下的总去除率;粘附去除率较流动状况下的高出许多;上浮去除率较流动状况下的低,说明超声波作用下流动状态有利于夹杂物的去除.另外,当流量大于某一数值时,总去除率和上浮去除率都下降,说明流动状态夹杂物的去除与流场分布有关,需要进一步进行考证.

4.3 容器尺寸的影响

在其它条件相同时,有无超声波作用下流动液体中夹杂物的去除效果除了与流动状况、夹杂物数量、几何尺寸、声学参数有关外,还与容器的尺寸有关.夹杂物在超声波

的作用下,增加了碰撞凝聚,易形成凝聚物.振动的单颗粒夹杂物和夹杂物凝聚物在有限尺寸的容器中与容器壁面或底部碰撞后,部分发生脱离,部分粘附其上.随着容器尺寸的增加,夹杂物的振动空间增大,夹杂物粘附于容器壁面或底部的机会减少,粘附去除率会减小.

4.4 夹杂物物性的影响

本实验中所使用的高密度聚乙烯塑料颗粒具有较强的疏水性,加入十分困难,用乙醇作为表面活性剂对其进行了表面处理.但是,由于表面活性剂的作用,实际上夹杂物的表面张力已经由 $31 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 降低为 $24.3 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,使其具有了一定的亲水性^[15].也就是说,如果夹杂物未经表面处理,普通水夹杂物的总去除率会提高.文献^[16]认为钢液中的非金属夹杂物 SiO_2 和 Al_2O_3 与钢液的接触角分别为 144° 和 115° ,这表明钢液中的夹杂物没有被钢液浸润,因此它们易于粘附于气泡,被液体中气泡捕捉,同时也易于聚集.

5 结论

通过水模型实验探索了超声波对流动液体中夹杂物的去除效果的影响,获得如下结论:

(1) 实验现象与定量分析显示,超声波有利于流动液体中夹杂物的去除.

(2) 超声波输入电功率对夹杂物总去除率存在极大值,当输入电功率由小变大时,夹杂物的总去除率不断增大直到极大值.

(3) 液体流速较小时,超声波去除夹杂物的效果更为显著.当介质流速增大时,超声波去除夹杂物的效果虽然也增加,与无超声波作用相比,超声波去除夹杂物效果开始下降,直至相近.

(4) 超声波对不同数量的夹杂物总去除率总体上具有显著效果,对粘附去除率的提高更有利.

(5) 超声波对较大粒径的夹杂物总去除率更显著,对上浮去除影响不大.

(6) 利用空化效应去除夹杂物的机理还需要进一步的验证.

参考文献

- [1] Liu Z Z, Cai K K. *Iron Steel*, 200; 35: 64
(刘中柱 蔡开科. 钢铁. 2000; 35: 64)
- [2] Abrama O V. *High-intensity Ultrasonics*. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1998: 487
- [3] Usawa Y, Arakane G, Takamori S, Sato A, Ohashi O. *Jpn Foundry Eng Soc*, 1999; 71: 98
- [4] Kawai S, Wang Q, Iwai K, Asai S. *Mater Trans*, 2001; 42: 275
- [5] Takenchi M, Yamanouchi K. *J Appl Phys*, 1994; 33: 3045
- [6] Kobayashi M, Kamata C, Ito K. *ISIJ Int*, 1997; 37: 9
- [7] Tolt L T, Fekete D L. *Chem Eng Sci*, 1993; 48: 527
- [8] Gupta S G, Fekete D L, Zloczower I M. *Chem Eng Sci*, 1995;

- 50: 3275
- [9] Laborde J L, Hita A, Caltagirone J P, Gernard A. *Ultrasonics*, 2000; 38: 297
- [10] Bai X Q, He J C. *J Northeastern Univ (Natural Science)*, 2001; 22: 413
(白晓清, 赫冀成. 东北大学学报(自然科学版), 2001; 22: 413)
- [11] Yoon R H, Luttrell G H. *Effect of Bubble Size on Fine Particle Flootation*. *Mineral Process*, 1989; 5: 101
- [12] Rees A J, Rodman D J, Zabel T F. *Separ Proc Tech*, 1980; 3: 19
- [13] He Z Y, Zhao Y F. *Basic Theory of Acoustics*. Beijing: National Defense Industry Press, 1982
(何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1982)
- [14] Prosperetti A. *Front Phys Acoustics*, 1986, 145
- [15] Ujimoto T. Translated by Gao Z J, Gu D Y. *Elements of Surfactants*. Beijing: Chemical Industry Press, 1989: 10
(藤本武彦, 高仲江, 顾德荣译. 新表面活性剂入门. 北京: 化学工业出版社, 1989: 10)
- [16] Pan W, Uemura K, Koyama S. *Tetsu-to-Hagane*, 1992; 5: 1361

附录

表 2 中收集项目中“一段时间”是根据 Stokes 定律计算出夹杂物上浮至液面所需要的时间。

夹杂物的上浮速度为 $v = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gd^2}{18\mu_1}$, 时间为 $t = \frac{h}{v}$ 。

式中, ρ_1 和 ρ_2 分别为液体与夹杂物的密度, g 为重力加速度, d 为夹杂物的粒径, μ_1 液体的粘度, t 为时间, h 为容器中的夹杂物距离液面的距离, v 为夹杂物的上浮速度。在本实验中, 夹杂物的粒径分布分别为 280—180 μm , 180—154 μm , 154—105 μm , 105—88 μm , 不同粒径分布范围最小粒径分别为 180, 154, 105, 88 μm , $\rho_1 = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho_2 = 940 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\mu_1 = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $g = 9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $h = 180 \text{ mm}$ 。将数据代入式中, 得到容器底部的夹杂物自停止超声波导入后至上浮至液体表面的时间。