

超声波防除积垢节能技术及设备开发 (续)

丘泰球 胡爱军 姚成灿 刘石生 刘晓艳

(华南理工大学轻化工研究所 广州 510641)

(接上期第 11 页)

进行方差齐性检验:

$$F = \frac{s_0^2}{s_u^2} = \frac{4.9348 \times 10^{-5}}{4.7889 \times 10^{-5}} = 1.03$$

选择显著性水平为 $\alpha=0.05$, 查 F 分布表得,

$$F_{0.025}(6, 6) = 0.172$$

$$F_{0.975}(6, 6) = 5.82$$

所以 $F_{0.025}(6, 6) < F < F_{0.975}(6, 6)$

说明两组实验的方差是齐性的。

再进行总体均值检验, 计算统计量 t ,

$$\begin{aligned} t &= \frac{\bar{\phi}_0 - \bar{\phi}_u}{\sqrt{\frac{s_0^2}{n_0} + \frac{s_u^2}{n_u}}} \\ &= \frac{0.6071 - 0.5664}{\sqrt{\frac{4.9348 \times 10^{-5}}{7} + \frac{4.7889 \times 10^{-5}}{7}}} \\ &= 11.46 \end{aligned}$$

选择显著性水平为 $\alpha = 0.005$, 查 t 分布表得, $t_{0.995}(12) = 3.055$

所以 $t > t_{0.995}(12)$

说明有没有超声波作用对 CaCO_3 积垢速率有显著性差异, 即超声波降低 CaCO_3 积垢速率的效果是显著的。

(2) 超声波参数对防垢率的影响

不同的超声波作用参数对防垢率的影响不一样。我们的研究结果 (见图 3) 表明, 超声波功率一定时, 频率低、作用时间长, 防垢效果较好; 超声波频率一定时, 功率高、作用时间长, 防垢效果较好。当然, 超声波功率应与溶液处理量有关, 如果溶液处理量增加, 超声波

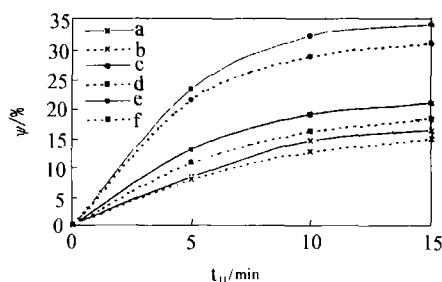


图 3 超声波参数对防垢率的影响

- a. 超声频, 150W, 水溶液
- b. 超声频, 150W, 含蔗糖水溶液
- c. 超声频, 250W, 水溶液
- d. 超声频, 250W, 含蔗糖水溶液
- e. 声 频, 150W, 水溶液
- f. 声 频, 150W, 含蔗糖水溶液

作用功率就要相应增大才能满足要求。

另外, 从图 3 可以看出, 超声波作用参数一定时, 处理含有 15% 蔗糖的水溶液的防垢效果要比处理不含蔗糖的水溶液的防垢效果差。这可能是因为含有 15% 蔗糖的水溶液的粘度比不含蔗糖水溶液的粘度大, 而粘度大的液体中空化较难发生, 空化事件减少, 超声波的作用效果随之减弱。

4 工厂试验

1997 年试制出样机在广东英德市糖厂进行动态、连续化试验, 1998 年 / 1999 年将原有的样机进行改进, 并在广东紫金糖厂继续进行动态试验, 取得了突破性进展, 1999 年 11 月列入广东省重点攻关项目, 研制出适应不同规模不同行业的工业化试验样机, 在广东紫金

糖厂首先投入使用,使用效果显著,设备运行性能良好。

4.1 工业化装置系统的结构及原理

根据设备职能和构造特点,超声波防除积垢系统由三个部分组成(见装置框图4):大功率超声波发生器、换能器、反应管道。其基本工作原理是:超声波发生器使用电源由三相四线制380V提供,产生稳定的超声波信号(把市电转换成超声频的电能),通过高频电缆传输给换能器;换能器安装在反应管底部,把电能转换成超声频的机械能;向流经反应管道的溶液发射超声波。

传热设备加热面上积垢的形成遵循物质结晶的一般规律。对洁净的加热表面,表面的不平整有效地降低成核时的表面能位垒,为非均成核提供了许多核化点,吸附作用将使晶垢核在这些不均匀的地方优先形成。如果在传热设备之前装上超声波防除积垢装置,在超声空化效应影响下,溶液中生成垢晶的各种成垢物质(钙镁等盐类及二氧化硅等非盐类)的诱导期缩短,迅速生成晶垢核,溶液中析出的沉淀物沉积在晶垢核上,继续悬浮在溶液中,使其变软、疏松而不致于强烈吸附在管壁上。另外,由于空化泡的内外压力差十分悬殊,在空化泡消失时具有很大的冲击力,当传热设备加热表面受到这个压力冲击时,粘附在其表面的污物就被脱落。

系统的主要组成环节是大功率超声波发生器,该发生器的元器件全部使用晶体管和集成块,采用积木式功率电路板设计,机内设有自动保护功能,遇到电源电压过高或过低、任何原因引起的“双导通”、过载均能迅速动作自动保护。发射换能器采用居里点较高、换能效率高的压电材料,能承受较高工作温度。机器能自动进行频率跟踪,使发生器和换能器在最佳状态工作,充分发挥其卓越性能。

本装置采用一个控制柜作远距离控制,由总电源开关控制起动、停止。每块功率电路板推动若干个换能器,四块功率电路板为一组,

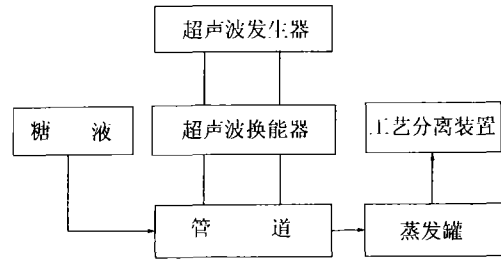


图4 超声防垢实验装置框图

共四组,分别用四个开关控制,每组设有独立的电流表显示电流。

4.2 生产试验方法

生产试验在广东紫金糖厂进行。该厂蒸发工段采用六罐轮洗的五效真空蒸发方案,蒸发罐列的加热管除第一罐加热管是铜管外,其余均是钢管,积垢比较严重,传热系数比较低,以往每天轮洗两只蒸发罐,并要用除垢剂和盐酸煮罐。

1998年/1999年榨季的试验由广东省紫金糖厂和华南理工大学共同专门组织了试验查定小组,进行了查定试验(见查定报告)。试验先分三个阶段进行。第一阶段(10天)和第三阶段(6天)使用超声波防除积垢装置,第二阶段(4天)停用超声波防除积垢装置作空白试验。每个阶段分别进行以下各操作:①每半小时各取清汁、各效蒸发罐糖浆样一次,并记录各效蒸发罐汽室、汽鼓压力,温度及清汁流量,每四次(即2h)的对应样混合作为集样,分析各集样的糖锤度,计算各效蒸发罐的蒸发强度和传热系数,取每天数次的平均值;②每天测定一次入罐清汁与末效糖浆集样的粘度,取各个阶段平均值作为本阶段的平均粘度;③在每效汽鼓的上盖板吊一根 $\phi 42 \times 100\text{mm}$ 钢管,当蒸发罐按惯例轮洗停罐时,取下吊管观察形态并烘干称量积垢重量;④跟踪统计各编号产品质量指标。

工业化样机2000年11月在广东紫金糖厂首先投入使用,由该厂工程技术人员及岗位工人从生产实践确认其使用效果,在榨季即将结束的前几天(即2001年1月9日-1月13

日)由华南农业大学食品科学与工程系及广东省工业大学电子与信息学院、食品科学与工程系三位教授组成的专家小组对超声波防除积垢工业化装置进行查试检测(有检测报告)。检测方法:①进行两种条件(用防除积垢装置和不用防除积垢装置)的对比,检测防除积垢效果。测定末效蒸发罐传热系数;测定蒸发罐防垢效率;测定蒸发罐通洗难易程度(耗时×人数);化学清洗剂的消耗量;②测定在使用或不使用超声波防除积垢装置对产品白砂糖质量指标的影响;③测定超声波防除积垢装置的运行性能。

4.3 试验结果与讨论

4.3.1 超声波对蒸发强度和传热系数的影响

蒸发罐的传热系数与积垢热阻的关系为:

$$1/K = 1/K_0 + R_f$$

而 $R_f = \frac{x}{\lambda}$
其中: K 是有积垢生成时换热管的传热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$); K_0 是没有积垢生成时换热管的传热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$); x 是积垢厚度 (m); λ 是积垢导热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)。由上式可知,积垢量越多,积垢厚度越厚,蒸发罐的传热系数就越低。

1998 年 /1999 年榨季试验过程中,各效蒸发罐蒸发强度和传热系数的变化趋势如图 5、图 6 所示,三个阶段各效蒸发罐平均蒸发强度和平均传热系数如表 4 所示。结果表明,用超声波防垢装置时,各效罐的蒸发强度和传热系数随使用时间的延长基本保持稳定,说明

基本上没有积垢生成;当停止使用超声防除积垢装置时,各效罐的蒸发强度和传热系数快速下降,说明积垢厚度迅速增加,有大量积垢生成;再恢复使用超声波防除积垢装置时,蒸发强度和传热系数则反弹回升,接近第一阶段时的状态,说明积垢厚度不断变薄,超声波不但防止了积垢的生成,而且还清除了前阶段已生成的积垢。2001 年 1 月工业化装置查试检测结果如表 5。

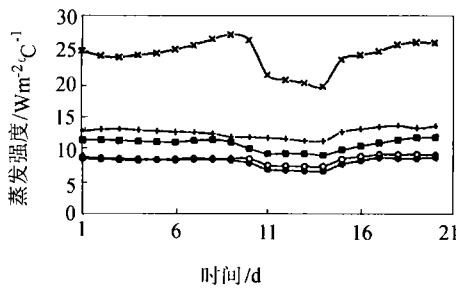


图 5 蒸发强度变化趋势图

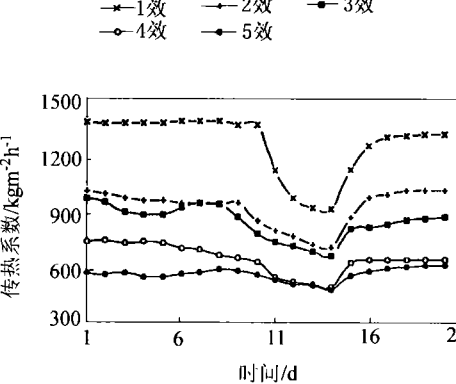


图 6 传热系数变化趋势图

表 4 各效蒸发罐平均蒸发强度和传热系数

试验阶段	平均蒸发强度 (kg·m ⁻² ·h ⁻¹)					平均传热系数 (W·m ⁻² ·°C ⁻¹)				
	1 效	2 效	3 效	4 效	5 效	1 效	2 效	3 效	4 效	5 效
1	25.07	11.85	10.95	8.02	8.34	1380	967	908	644	573
2	19.94	10.96	8.60	6.07	7.04	982	752	716	520	446
3	24.10	12.35	10.08	7.96	7.51	1299	977	840	722	597

从表 5 可以看出使用工业化防除积垢装置能显著提高蒸发强度和传热系数,比 1998/1999 年榨季使用的样机提高的幅度更大。

4.3.2 超声波对积垢物理性状和生成速率的影响

根据称量小钢管的重量变化,及悬挂时

表 5 末效蒸发罐平均蒸发强度和传热系数

试验方式	平均蒸发强度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均蒸发系数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	备注
使用超声波装置	10.6	715	14 次平均
未用超声波装置	9.2	502	11 次平均

间、钢管表面积计算得到各号蒸发罐积垢生成速率。

从表 6 中可以看出,使用超声防除积垢装置后,各号罐中积垢的生成速率都比没有使用超声防除积垢装置时的积垢速率小。

未使用超声防除积垢装置时,从蒸发罐内取下的小钢管上积垢致密呈片状,烘干后略显

黄色,即使使用钢刷也难以刷净。当使用超声防除积垢装置时,从蒸发罐内取下的小钢管上积垢疏板呈糊状,烘干后显白色,轻轻敲打即可除掉大部分积垢。另外,使用该装置时,各效蒸发罐有较多积垢脱落到悬挂在罐底的取样瓶中。

可见,使用超声防除积垢装置不仅可以改

表 6 各号蒸发罐积垢生成速率

积垢生成速率 ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$)	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
使用超声波防垢装置	159.4	240.5	305.7	349.4	384.6	441.0
未用超声波防垢装置	225.9	355.5	385.8	446.2	524.9	598.8

变积垢物理性状,减缓积垢形成,而且还能起到脱除积垢的作用。

4.3.3 超声波防除积垢效率检测结果

从表 7 和图 7 可以看出,使用超声波防除积垢装置时,0 号蒸发罐积垢很少,防垢效率高达 97.9%,一号罐防垢效率也高达 85.9%,其余各号蒸发罐防垢效率也在 65~72% 之间,其平均防垢效率为 76.4%,由此可见超声波防除积垢效果显著。

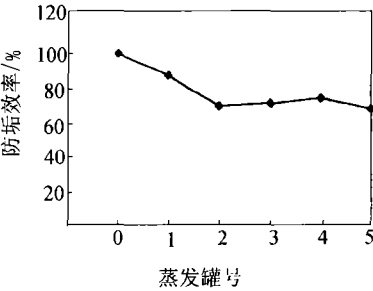


图 7 超声波防除各效蒸发罐积垢效率

表 7 超声波防除积垢效率对比

蒸 发 罐 号	0	1	2	3	4	5
未用防垢装置垢重 (g)	75.1	120.2	128.5	147.5	173.3	198.5
使用防垢装置垢重 (g)	1.6	16.9	41.8	45.4	48.2	68.5
使用防垢装置后减少的垢重 (g)	73.5	103.3	86.7	102.1	125.1	130.0
防垢效率 (%)	97.9	85.9	67.5	69.2	72.2	65.5
防垢效率平均值 (%)	76.4					

4.3.4 超声波对蒸发罐通洗难易程度的影响

从表 8、表 9 可以看出: 0 号和 1 号蒸发罐在未使用和使用防垢器两种情况下,通洗耗时基本接近,因为两者均已达到洗罐的最低

极限值,但实际通洗过程中,未使用防垢器比使用防垢器的要吃力,劳动强度较大; 2 号、3 号、4 号、5 号蒸发罐未使用防垢器比使用防垢器,明显难通洗,2 号、3 号通洗耗时比

不用防垢器约减少一半，4号、5号通洗耗时减少更明显，不使用防垢器比使用防垢器耗时约增加2-3倍。另外，根据工人反映，检修期蒸发罐外循环管积垢自采用防垢器后随使用锤敲打即可去除，而过去未使用防垢器其外循环管积垢厚而硬，难清除，要用火烤才能清除干净。

表 8 两根标定管通洗耗时对比

蒸发罐号	开罐时间 (h)	使用防垢器 通洗耗时人 数×时间	未用防垢器 通洗耗时人 数×时间
4	24	1×0:04	1×0:12
5	24	1×0:06	1×0:18

注：通洗耗时 × 人 = 1×0 : 04 为 1 人通洗 4 分钟，下同。

表 9 各效蒸发罐通洗耗时对比

蒸发罐号	蒸发罐加热 面积 (m ²)	开罐时间 (d)	使用防垢器通洗 耗时人数×时间	未用防垢器通洗 耗时人数×时间
0	350	9	3 × 2 : 00	3 × 2 : 05
1	250	8	3 × 1 : 30	3 × 1 : 36
2	200	4	3 × 2 : 30	3 × 4 : 30
3	170	4	3 × 2 : 10	3 × 4 : 20
4	170	1	4 × 2 : 00	4 × 5 : 20
5	170	1	4 × 2 : 15	4 × 5 : 30

注：0-3号蒸发罐通洗耗时及开罐时间是根据广东省紫金糖厂 1998/1999-2000/2001 榨季使用超声防垢器与不使用超声防垢器查定使用情况的统计平均值，4号、5号蒸发罐通洗耗时及开罐时间以这次检测实测值为主。

5 结论与展望

(1) 超声波可有效地缩短溶液中晶体的成核诱导期，加速成垢物质在溶液主体中成核。在超声波作用下，进入蒸发罐换热面之前，成垢物质就已在溶液主体中成核、结晶析出并随液流流走，降低溶液主体与换热面之间成垢物质离子的浓度梯度，削弱它们向换热器表面的扩散过程，从而降低积垢在换热器表面的沉积速率；超声波的空化效应和机械效应，改变了溶液和已沉积在管壁上积垢的物理化学性质，使其溶解脱落。由此可见，超声波防除积垢装置既能防止积垢的形成，又能破坏已有积垢的双重作用，是其它方法只防不除或只除不防所无法比拟的防除积垢节能技术。

(2) 该项目在弄清作用机理的基础上，筛选出最佳的声场参数，研制出结构简单、可靠性高、方向性好、电声转换效率高的强超声波防除积垢装置，防除积垢效果显著，成本较低。

(3) 工厂试验结果表明：使用超声波防除

积垢装置能提高蒸发系统传热系数 40% 倍以上；提高生产能力 15% 以上；不必再用化学清洗剂煮罐；因可停止使用化学清洗剂，减少了对蒸发罐加热管的腐蚀，延长了蒸发罐等设备使用寿命，减少设备维修费。

(4) 社会效益好，超声波防除积垢装置连续化、自动化水平高，无化学污染，无须专人操作，通洗时间大大缩短，减轻工人劳动强度。

(5) 在水溶液蒸发量大的工业中，如制糖工业、化肥工业、制浆造纸工业、栲胶工业、农副产品加工业，采用超声波防除积垢技术，可以卓有成效地提高蒸发站的生产效率。本技术除了在蒸发站的蒸发罐中使用之外，估计还可以广泛地应用在锅炉、热交换器、冷凝器等的防除积垢中，具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

1 丘泰球, 李月花. 甘蔗糖业, 1992, (4): 49-52.
2 Chepurnoi M N. Pishchevaya Tekhnoloya, 1990, (4): 68-70.

- 3 Kem D Q. Seaton R E. *British Chemical Engineering*, 1959, 4(5): 258-262.
- 4 Qiu Taiqiu, Zhang Ximei. *International Sugar Journal*, 1996, 98(1176): 683-686.
- 5 丘泰球, 姚成灿, 胡松青. 甘蔗糖业, 1999, (4): 29-34.
- 6 姚成灿. 华南理工大学硕士学位论文, 2000: 26-28, 33-38, 47-56.
- 7 Yao Chengcan, Qiu Taiqiu, Zhang Ximei, et al. *International Sugar Journal*, 1999, 101(1212): 602-605
- 8 姚成灿, 丘泰球, 胡松青等. 华南理工大学学报, 2000, 28(5): 91-95.
- 9 广东省紫金糖厂, 华南理工大学. 超声波防除蒸发罐积垢查定报告. 1998 年 /1999 年榨季, 1999 年 2 月.
- 10 华南农业大学, 广东工业大学教授专家检测小组. 超声波防除积垢节能技术及其设备检测报告, 2001 年 1 月.

声学标准化技术委员会四届五次次会议在上海举行

全国声标技委会四届五次次会议于 2001 年 11 月初在上海举行。会议得到了国家标准化管理委员会、中国科学院和中科院声学所的重视与支持。出席会议的委员等共计 51 人。

会议由主任委员马大猷院士主持, 对委员在经费紧张的情况下, 保持高昂的工作热情、不计报酬和无私奉献的精神表示衷心的感谢, 并对审查程序作了安排。

国家标准化管理委员会戴红处长感谢委员为声学标准化工作呕心沥血、默默奉献, 并传达了国务委员吴仪关于标准化问题的重要讲话。田静所长代表中科院声学所对委员的辛勤工作表示感谢, 再次强调了标准化工作是声学所社会工作的一个“亮点”, 是对国家标准化事业做出的一份奉献, 并表示对声标委的支持力度会随着知识创新工程的深入而不断增强。

章汝威秘书长作了 2001 年度声标技委会工作报告。会议审查并通过了下列 10 项标准的送审稿, 也提出一些修改意见:

- 1、阻抗管中吸声系数声阻抗的测量第二部分: 传递函数法
- 2、声压法测定噪声源声功率级混响室精密法
- 3、声压法测定噪声源声功率级混响场中小型可移动

声源工程法第一部分: 硬壁测试室比较法

- 4、声压法测定噪声源声功率级混响场中小型可移动声源工程法第二部分: 专用混响测试室法
- 5、汽车车内噪声测量方法
- 6、信息技术设备和通信设备噪声发射值的标示
- 7、隔声罩的隔声性能测定第 1 部分: 实验室条件下测量(标示用)
- 8、隔声罩的隔声性能测定第 2 部分: 现场测量(验收和检验)
- 9、水声换能器测量
- 10、水声发射器的大功率特性和测量

会议对 2002-2003 年度工作计划、声标委的换届(2002 年 10 月将在京举行五届一次会议)等内容进行了讨论, 委员对秘书处工作给予了充分肯定, 并通过了 2001 年度声标委工作报告。

四天的会期内容丰富、紧张有序, 在与会代表的热烈掌声中圆满结束。

(全国声标技委会秘书处 徐欣)

(据悉: 国家标准审查部对此十项标准近日已审查通过)