

物理法处理工业循环冷却水质研究进展

王晓红*, 田鹏

(青岛科技大学化工学院, 山东 青岛 266042)

摘要:探讨了国内外物理法, 主要包括电化学法、电磁法及超声法处理工业循环冷却水质的新技术的研究进展, 详细对比了七种方法的优缺点, 提出物理法的理论研究还需进一步完善, 并不断扩大在工业领域中的应用。

关键词:循环冷却水; 物理法; 技术研究; 工业应用

中图分类号: TQ021.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)04-0047-05

Progress of physical water treatment in industrial recycling cooling water

WANG Xiao-hong*, TIAN Peng

(College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The progress of physical water treatment in the industrial recycling cooling water is introduced, including electrochemical, electromagnetic and ultrasonic method. The advantages and disadvantages of these methods at home and abroad are compared. The suggestions about further improvement of the theory of physical water treatment and wide application in industry are put forward in the end.

Key words: recycling cooling water; physical water treatment; technology study; industrial application

循环冷却水系统在工业应用乃至日常生活中已相当广泛, 不仅可以满足工业生产要求, 也可达到节能的目的。由于循环水本身含有大量的钙、镁等重金属离子, 长时间使用后在管路设备内壁形成结实的碳酸盐水垢, 而循环水本身的温度和潮湿的环境又会给微生物及藻类提供生存条件, 久之使得管路存在传热效率低、热阻高、设备腐蚀脆裂的危害, 严重影响工业生产的正常运转。

目前国内外常用的处理工业循环冷却水的方法可以分为化学处理法和物理处理法2大类。化学处理法包括加入阻垢剂、酸化、碱化法等。由于化学法开发早、简单易操作、成本低, 因此被广泛采用。然而长久使用化学药剂对管路及设备造成严重的腐蚀, 缩短设备使用寿命, 造成环境的二次污染^[1]。近年随着环境友好及可持续发展战略的提出, 人们开始积极转向对环境无危害的物理处理法^[2]。目前国内外物理处理法主要是利用电、磁、超声、光等手段^[3-4], 改变硬水中重金属离子及水分子的结构及藻类微生物的生存环境, 达到净化水质的目的, 物理处理法突破了传统化学法对环境造成二次污染的弊端, 且能量利用率高, 可控制性强。本文中综述了近年来国内外对于物理法处理工业循环冷却水质取得的突破性成果和实际应用, 分析了其中存在的问题并提出了发展趋势。

1 电化学技术

电化学技术在我国属于早期出现的物理法处理

循环冷却水的方法, 其工作原理是采用阴阳极装置, 通入直流或者交变电流, 通过电场或者电解对水质的物理化学结构产生影响。根据电化学作用机理不同, 可以分为高压静电极化技术和低压电解技术。

1.1 高压静电极化技术

高压静电极化技术于20世纪60年代在美国开发成功^[1], 此技术的阻垢机理是通入高压电源形成高压静电场, 水分子的极性分子结构在高压静电场作用下极性增强, 偶极矩增大, 可以包围在钙、镁重金属盐离子及酸根离子周围, 阻碍了这种离子间的有效碰撞, 由于水的极性增强, 更易溶解管壁存在的积垢, 达到阻垢的目的。高压静电场下水分子可电解成强氧化性的 O_2^- 和过氧离子, 破坏微生物的细胞膜, 使生物酶变性达到杀灭微生物的目的。

经过高压静电场处理的水质pH、硬度、电导率等数据都会产生明显的变化, 在外界条件恒定时监测这些数据的变化可以清楚地知晓静电场对硬水的抑垢效果^[4]。这一方面与高压静电场的处理效果有关, 也与硬水本身的水质有关。当硬水中钙离子浓度很低时, 水中 CO_2 和大气中 CO_2 浓度达到平衡, 参数基本保持恒定, 处理效果不明显。当采样水质硬度较高时, 静电场下电导率有明显的降低。Liu等^[4]通过对比实验, 恒温条件下经过稳定高压静电场(1.5~2.0 kV)处理的硬水显示出良好的抗垢效果, 抑垢率可达到23%。

比较高压静电场处理后碳酸钙晶核的变化情

况,从物理学角度考虑静电场的抑垢效果。在 2 kV 高压静电场强下,不仅可以有效地降低金属离子与酸根离子的有效碰撞,而且碳酸钙的晶型由大块的方解石形状转化为捆束状的结构^[5],如图 1 所示。这种捆束结构更容易随水流剪切力移出,不易沉积。

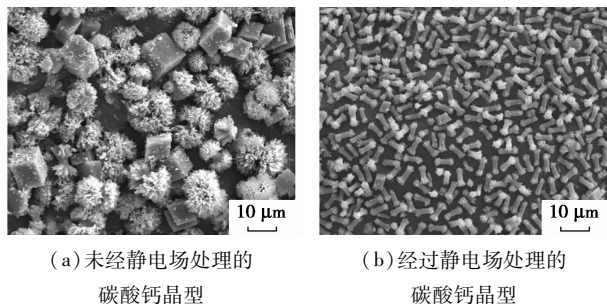


图 1 水质中碳酸钙晶型

高压静电场在实验中确实可以达到较好的抑垢效果,灭菌灭藻也是一个重要的因素。Scott 等^[6]在一个循环冷却水塔塔底水槽中设立了 2 块高压电极板,经过一段层叠过滤装置用水泵将水槽水抽至塔顶,实时监测水槽与塔顶抽提水质微生物含量及水样电导率。4 周实时测定结果,水质总硬度下降了 78.8%,达到了较好的阻垢效果,可是水质中微生物的含量仅下降 18%。利用高压静电场装置对民用空调循环水系统蓄水池水质阻垢以及灭菌效果进行对比,由于处理水量大,水质微生物含量高,在设备运转 1 季度后发现,空调循环水系统管路几乎无新垢产生,然而对循环水采样分析发现,水中细菌的数量并没有显著下降^[7]。所以高压静电场的灭菌效果有待进一步验证。

1.2 低压电解技术

低压电子水处理技术是 20 世纪 90 年代出现的高新技术。主要原理是在直流电场作用下,阴极发生还原反应,水中的阳离子,如 H^+ , 重金属 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 得到电子生成氢气和碳酸盐,以此降低循环水的总硬度。阳极发生氧化反应,在阳极通过放电生成 H_2O_2 、 O_3 、 ClO^- 具有强氧化性,可以抑制菌类藻类的生长;另一方面,强氧化性离子可以增强与重金属盐离子的结合力,促使原有的污垢变软,逐渐剥落。

低压电解设备与静电场虽然都需要发电装置,但是两者对于水质处理的机理却大不相同。如图 2 所示,Leonard 等^[8-9]使用双极石墨装置来产生射频电场,以不同的电压和射频使得循环水中的矿物离子转化为矿物盐,附着于悬浮颗粒的表面,随着水流剪切力清除。这是通过电化学原理在水样中使得水垢迅速沉淀下来,再将污垢清除。装置通过实时温

度检测模块和数据测试模块,将水样的硬度、电导率记录下来。根据装置电压的差异,在较低频率电场下出现结垢诱导期,导致沉降初期在换热器表面立刻发生沉积,污垢阻力有一个大幅度增加,处理效果缓慢,抑垢率仅为 10%。之后增加电压与频率之后,在处理前期即突破了结垢诱导期的限制,最高抑垢率可达 76%。与高压静电场类似,初始硬度越高的水质,热阻值下降梯度越大。经电镜分析,碳酸钙晶型由类似斜方晶体的霏石转变为小块方解石,形状很容易随水流移走。



图 2 射频电场发生装置

在实验室及工业应用中较常见的电解除垢设备是采用类似电解池的低压电解抗垢装置,以阴阳两极作为传热介质对水质进行测定^[10]。这类装置如图 3 所示,由直流电源作为电解装置,严格控制电压及功率,电极以钛金属作为阳极,不会因腐蚀影响测定,不锈钢外壳作为阴极,用聚四氟乙烯环将两极隔开,测定硬水水样在两极之间进行换热。一段时间运转后,发现沉积在两极上的污垢很少,硬度降低了 90%。

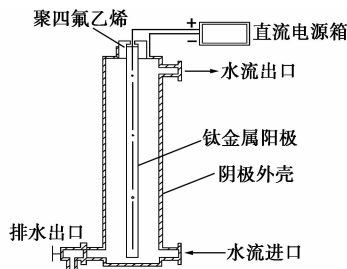


图 3 低压电解抗垢装置

低压电解技术的实际应用方面较为广泛,在冷却塔的循环水中已经成为必不可少的设备。John^[11]将电解技术应用于塔型水处理装置并成功投入工业市场。通过实际使用监测,在塔型内部电极芯上附着大量水垢,微生物含量减少,对防止腐蚀很有效果。楚天氧气有限公司将板式电化学水处理装置用于循环水车间,循环水量为 $9\ 000\ m^3/h$,经过 8 周的周期监测得到结果,相比加入化学药剂清除污垢,板式电化学处理循环水的硬度和电导率分别降低了 49% 和 58%,达到很好的阻垢效果^[12]。

综上所述,电化学水处理技术是目前发展较为

成熟、应用范围较广的循环冷却水处理方法,具有节约资源、绿色环保、效率高及能耗低的特点。由于高端设备发展欠缺,目前的电化学处理技术仅在民用工程中应用广泛,并没有大规模在工业领域中涉足。对于某些地区高硬度的循环水处理效果较弱,灭菌灭藻效果也没能达到较高的标准,所以电化学水处理技术还待日后进一步发展完善。

2 电磁化技术

电磁化技术设备主要采用永磁铁和电磁铁,通过磁化作用改变水质中碳酸钙和水分子的结构,达到阻垢的目的。磁化法水处理技术根据磁场的作用条件不同,可以分为磁场处理技术和电磁脉冲技术。

2.1 磁场处理技术

磁场处理技术报道于20世纪40年代的比利时工程师 Vermeriven^[13],他采用水流与磁场方向正交的方法,并在锅炉循环水的应用上发现了磁场可以抑制水垢的生成。其基本原理是,磁防垢设备产生的磁场与水流方向正交,水质中碳酸钙结晶条件改变,快速形成微小颗粒,随水流剪切力除去不会沉积在管壁上。同时在正交磁场的作用下,水分子被切割成小分子水集团,增加了水的渗透性和活性^[14]。

测定磁场对水质的影响与电场的测定流程类似,通过对比实验,在一定的磁场强度下研究水质的电导率、pH和硬度的变化。实验装置一般采用小型冷却塔循环水作为样品,在换热器之前的进料管外套用一段电磁线圈产生感应磁场,为了保证条件恒定,设备内部以铜管为内层,石英管为外层进行换热污垢沉积测定^[15]。结垢初期120 h内水样呈现出典型的污垢热阻曲线,可能原因是出现了与电场类似的结构诱导期或者是本体沉淀过快导致的测试延滞。在之后的260 h之内,经过电磁场处理的水质热阻上升明显减缓,阻垢率可达到61%。为了精确说明换热器污垢沉降是由于磁场抑制而不是本体沉淀,通过激光微粒测试比较,经过电磁场处理后的微粒数始终比未处理水质低8%~60%,并且颗粒尺寸更小,表明电磁场确实达到了抑制污垢生成的目的。

碳酸钙晶核生成速率是磁场对水质影响最关键的因素。为了避免副反应对水垢测定的影响,Fathi等^[16]采用的实验水样中仅含有 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} ,热水浴保证水流的温度,在4.5℃硬度水流进入恒温水槽之前经过一段感应磁场装置处理,以不同流速及停留时间来测定磁场抑垢效果。数据表明,经过磁场处理后,硬水整体结垢速率增加10%~21%,且

流速增加时,结垢速率的上升梯度更大。增加磁场强度后碳酸钙成核的诱导期缩短了22%~25%,碳酸钙晶核的生成速率增加了约29.6%,且对于初始硬度越高的硬水效果越好。

磁场强度与碳酸钙晶型的变化也是一项重要的因素。在提高生成速率后需要水垢及时随着水流剪切力清除,因此有学者从物理学角度分析了两者的作用^[17]。采用2种不同频率和电压的电磁发生装置探究磁场强度对硬水阻垢诱导效果。在该电磁发生装置中采用变频电场,改变分子间的结合力,使金属离子无法结合成金属盐,当电压或者频率越高时,这种结合力的扰动就越弱,抑垢效果更好。在电压恒定时,随着频率增加,经过电磁处理后的水质阻垢率比空白试验高6%~14%;频率恒定时,阻垢率比空白试验高3%~5%。经过电镜分析,处理后的污垢晶核尺寸结构更加小,不易附着,随水流剪切力清除。

在实际应用方面,磁除垢设备对发电厂的循环冷却水使用较为广泛,Zhang等^[18]在发电厂实际运转后进行磁抗垢对比测定。由工厂数据分析知,相比之前的化学处理法,物理法可以提高阻垢率至80%,换热系数几乎保持不变,冷却管和换热器冷凝器表面几乎无污垢沉积,节约大量能源。但是设备无法有效地控制电磁场下管内污垢的结垢趋势,设备运转稳定性不够成熟,实际应用还有待进一步完善。

2.2 电磁脉冲技术

脉冲磁场技术是近年新兴的技术,主要是利用脉冲发生器制造脉冲电磁场,以波动型磁场对污垢及微生物的物理化学特征改变,达到阻垢抑垢的目的,脉冲技术效率高,处理效果好,操作简便,由于设备生产精密度高,只在小试中进行验证,广泛应用的实例并不多,因此电磁脉冲技术在实际应用中还需进一步研究。

电磁脉冲功率系统与磁场处理的方法相同,加入了脉冲磁场以后效果更加显著。此类实验装置是与过滤器相结合的系统,通过换热器表面阻垢及传热系数变化有效性测定^[19]。在测定前期污垢生成曲线相差无几,在330 h之后,基准实验的污垢热阻一直持续地增加,一直增加到比工业标准结垢限额更加高,并持续以线性关系增长到实验结束,而脉冲功率系统则一直保持不变。开始的污垢热阻增加是因为污垢在铜管上沉淀,之后污垢的稳定增加是因为电磁脉冲场抑制了污垢的生成,可是在实验过程中能耗较高,这方面还需改进。

基于2种磁场的工作原理,Lipus等^[20]对比了

电磁脉冲与强感应场对循环水质阻垢的影响, 实验测试中使用高频脉冲电磁发生器产生脉冲磁场(0.1 ~ 1.2 T)。在晶核形成初期沉淀缓慢, 在电流较大时阻垢率才快速增加, 这是因为脉冲磁场方向在不断地变化, 阻碍离子间的相互碰撞。从沉淀变化来看, 脉冲磁场中污垢的形成速度平稳, 适宜长时间运行。结果表明, 高频脉冲磁场阻垢率比强感应磁场高约 16.8%, 然而对于低硬度的水质处理效果与感应磁场相差较小, 需进一步研究。

实际应用方面, 变频式直流脉冲电磁水处理技术应用于循环水处理中, 通过强直流脉冲电压, 不断地改变频率, 提高装置水处理效能, 击穿细胞膜杀灭细菌, 达到抑垢除垢的目的, 该装置成功应用于实际的工业生产并取得良好效果^[21]。在山东胜利油田冷却水系统中采用变频式直流脉冲水处理技术, 电耗减小, 管道流速增大。江苏油田锅炉冷却系统采用该技术后, 水垢层脱落, 几乎无新垢产生, 每年节约 1.4 万 ~ 2.9 万元。

综上所述, 经过电磁法处理后的循环水可以不同程度地减少原有污垢, 也可以抑制新污垢的产生, 同时在灭藻灭菌上也有较好的处理效果。无污染、成本低、安全性高及适用范围较广。随着近年来在工业锅炉、冶金厂换热器及油田发电站的应用也显露出局限性, 磁场处理受当地水质硬度、pH、流速、温度等因素制约性较强, 没有一套完整的理论体系来论证这些因素对磁场处理效果的影响, 影响了该技术进一步的推广, 今后还需要在具体的理论体系方面及维稳性上更加完善。

3 超声技术

近年来, 随着超声技术迅猛发展, 在循环冷却水质处理上也得到推广。Chepurnoi^[22] 在 20 世纪 90 年代初, 首次将超声波除垢技术应用于糖厂蒸发循环冷却水系统, 在运转整个生产期后都不需要进行污垢清洗, 超声处理循环水垢取得了首次成功。

超声传播方向性好、穿透力强, 以超声波技术除垢是近年来发展的新技术, 工业应用广泛, 主要机理为: ①空化效应, 在超声波的辐射下水中产生大量的空穴和气泡, 水流中气泡和空穴相互挤压, 在周围产生强大的压力峰以粉碎水中的水垢并使得管壁上沉积的污垢脱落, 这是超声抑垢除菌的最主要因素; ②活化效应; ③剪切效应; ④抑制效应。

空化效应对水质影响最大的就是不断地将水中的水垢粉碎并随水流冲走, 所以需要研究超声对水

质处理结垢的抑制作用^[23]。实验通过从涡流水槽中抽出循环水, 保证循环的水质中碳酸钙浓度相同, 在循环回路中经过超声发生装置来测定抑垢的效果。低频超声场下在 20 min 内因碳酸钙沉淀的“解聚焦作用”, 对沉淀的抑制效果较弱, 在 20 ~ 40 min 后抑垢率持续增长, 超声的物理作用不断将水中沉淀出的碳酸钙粉碎并随水流冲走, 最高抑垢率可达到 35%。之后使用高频超声波对同样水质进行处理, 在 10 min 时抑垢率即可达到 28%。

由于空化效应产生的压力峰, 超声场下碳酸钙晶核有较大差异。Broekman 等^[24] 对不同钙离子浓度下的 3 种水样经过超声处理后的晶核形状对比。实验以最典型的换热器表面结垢测试为模型, 采样分析后, 在钙离子浓度最低的水质中, 经超声场处理后的碳酸钙晶型与未处理水质类似, 并没有显著改变; 当浓度增大 1 倍时, 碳酸钙晶核数量减少, 且晶型为球状和少量方解石形状; 浓度增大至 3 倍时, 晶型基本为松散的霏石型。说明超声对硬度较高的水质有更加显著的抑垢效果, 晶核形状的改变使其很容易随水流剪切力除去。

超声在灭菌灭藻方面也有显著效果。高频的超声波可以迅速破坏微生物细胞膜, 可以持续抑制细菌及藻类的生长, 效果显著。Anicuta 等^[25] 研究了超声对于冷却塔水槽中细菌和微生物抑制的效果。实验采用了高频(1.5 ~ 2.0 MHz) 低功率超声装置, 抑菌率可以达到 42% ~ 50%, 且能耗小, 持续时间长。超声灭菌灭藻已经在工业冷却水塔成功应用, 运转 1 年后细菌总量仅为 100 CFU/mL, 且能耗低, 具有良好的发展前景。

综上所述, 随着超声领域的逐渐发展, 超声除垢在化工行业也越来越普及。超声除垢效率高、无污染, 能够长久保持循环水的抑垢率。然而超声除垢对于不同的水质采用的频率和功率较难掌握, 稳定性不够强, 难以达到最佳的除垢效果; 同时由于技术精密, 安装条件约束性强, 超声除垢法在技术的成熟性和实用性上还需要进一步完善。

4 物理法新技术

在物理法的研究过程中, 不少科研工作者也在尝试创新的方法。聚合物小球是一种物理法处理的媒介^[26], 利用非均相成核作用, 通过模板辅助结晶来清除水质中的重金属离子。这种聚合物小球不会涉及生物化学变化, 它利用特殊的半球形小孔结构, 以低能量渠道把水中的钙镁离子在小球中聚合起

来,伴随晶核的长大很容易被除去,阻垢率可达到99.6%。这种方法可以从水质源头上彻底清除污垢。张恒云等^[27]采用了分子震动环新型物理法水处理装置,该装置以高纯度铝为载体,通过发送与有害物质相同的低频振动波与其相互作用,影响其物理化学特征,进一步达到阻垢去垢和杀菌灭藻的作用。

新方法虽然具有高效易操作的特点,但是在制作成本及工艺条件方面还没有达到工业化水平,为了让技术更具成熟性,今后还需在装置的实用性上进一步研究。

5 结语与展望

物理法作为一种处理循环冷却水质的新技术,相比化学法的高污染、高能耗等缺点,在环保、资源节约、实用效率上具有明显优势,随着人类环保意识的不断提高,物理法将逐步替代化学法成为一种处理循环水质的重要手段。

然而目前,由于物理法处理过程中技术的局限性、设备运转的稳定性以及操作的复杂性导致其未能在工业领域大范围应用,因此在未来物理法处理循环水质研究中还需要进一步完善理论及实践体系,稳定性能,降低成本,不断提出创新的想法,以此不断提高物理法处理循环冷却水质的工业实用性。

参考文献

[1] Zhu Xianxin, Yang Hong, Wang Tianrui. Status of water treatment technology by electrostatic field[J]. China Environmental Protection Industry, 2006, 5(14): 295-299.

[2] 周其其, 金亚旻. 电化学处理技术在工业净循环水处理系统中的应用[J]. 冶金环境保护, 2012, 6(1): 19-21.

[3] Becker H A, Cohen J J. Electrochemical water treatment[J]. ECS Transactions, 2007, 6(9): 29-40.

[4] Liu Dan, Franck Hui, Jean Lédion, et al. Study of the scaling formation mechanism in recycling water[J]. Environmental Technology, 2011, 32(9): 1017-1030.

[5] Li Haihua, Liu Zhenfa, Li Xiaohui. Effect of electrostatic field on calcium carbonate precipitation[A]. Bioinformatics and Biomedical Engineering International Conference[C]. 2011: 978-982.

[6] Scott Duda, Janet E Stout, Radisav Vidic. Biological control in cooling water systems using nonchemical treatment devices[J]. HVAC & R Research, 2011, 17(5): 872-890.

[7] Anonumus. Bacterial infections; Pitt. Study suggests nonchemical water treatments touted as "Green" fail to prevent bacterial growth in air-cooling systems found in hospitals, large buildings [J]. Health & Medicine Week, 2010: 1702-1705.

[8] Leonard D Tijing, Hang Young Kim, Dong Hwan Lee, et al. Physical water treatment using RF electric fields for the mitigation of CaCO₃ fouling in cooling water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53: 1426-1437.

[9] Leonard D Tijing, Dong-Hwan Lee, Dong-Won Kim, et al. Effect of high-frequency electric fields on calcium carbonate scaling[J]. Desalination, 2011, 279(1/2/3): 47-53.

[10] Quan Zhenghua, Chen Yongchang, Ma Chongfang, et al. Experimental Study on anti-fouling performance in a heat exchanger with low voltage electrolysis treatment[J]. Heat Transfer Engineering, 2009, 30(3): 181-188.

[11] John Tomczyk. Chemical-Free cooling tower treatment[J]. Air Conditioning Heating and Refrigeration News, 2011, 244(1): 24-25.

[12] 张安龙, 李凯, 王飞朋, 等. 板式电化学水处理装置在循环水处理中的应用[J]. 武钢技术, 2011, 49(2): 36-38.

[13] 窦照英. 实用无污染防垢技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.

[14] Cai Ran, Yang Hongwei, He Jinsong, et al. The Effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds[J]. Journal of Molecular Structure, 2009, 938(1/2/3): 15-19.

[15] Cho Y I, Kim W T, Cho D J. Electro-Flocculation mechanism of physical water treatment for the mitigation of mineral fouling in heat exchangers[J]. Experimental Heat Transfer, 2007, 20(4): 323-335.

[16] Fathi Alimi, Mohamed Tlili, Mohamed Ben Amor, et al. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation[J]. Science Direct, 2007, 206(1/2/3): 163-168.

[17] Miao Xuefei, Xiong Lan, Chen Jiapeng, et al. Experimental study on calcium carbonate precipitation using electromagnetic field treatment[J]. Water Science & Technology, 2013, 67(12): 2784-2790.

[18] Zhang Xiaoni, Xiao Nanzhang, Wen Longwu, et al. Research and discussion on electro-magnetic treatment in circulating cooling water of power plant[J]. Advanced Materials Research, 2013, 732: 382-386.

[19] Young I Cho, John Lane, Wontae Kim. Pulsed-power treatment for physical water treatment[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32(7): 861-871.

[20] Lipus L C, Acko B, Hamler A. Electromagnets for high-flow water processing[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2011, 50(9): 952-958.

[21] 黄嘉顺, 袁善庆. 变频式直流脉冲电磁水处理技术[J]. 工业水处理, 2007, 27(3): 10-12.

[22] Chepurnoi M N. Influence of ultrasound on decrease of scale formation during evaporation of sugar solutions[J]. Pishcheyaya Tedhnoloya, 1990, 4: 68-70.

[23] Martijn R Wagterveld, Henk Miedema, Geert-Jan Witkamp. Effect of ultrasonic treatment on early growth during CaCO₃ precipitation [J]. Crystal Growth & Design, 2012, 12(9): 4403-4410.

[24] Broekman S, Pohlmann O, Beardwood E S, et al. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, 17(6): 1041-1048.

[25] Anicuta Stoica-Guzum, Marta Stroescu, Sorin Jinga, et al. Ultrasound influence upon calcium carbonate precipitation on bacterial cellulose membranes [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(4): 909-915.

[26] Karen R Smith. Can physical water treatment prevent and control scale[J]. Water Conditioning & Purification Magazine, 2007, 49(2): 98-102.

[27] 张恒云, 范声朴, 邵陇生, 等. 分子震动环在循环水系统方面的应用[J]. 化工进展, 2011, 30(s1): 834-835. ■