

文章编号:1008-1534(2009)03-0195-05

高盐度有机废水处理技术研究进展

边蔚^{1,2},王路光²,李洪波²

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院,河北石家庄 050018;2. 河北省环境科学研究院,河北石家庄 050051)

摘要:就高盐度有机废水的物理化学及生物处理技术进行了综述,并简述了生物法与其他方法组合工艺处理高盐度有机废水的研究进展,指出嗜盐菌和耐盐酵母菌在处理高含盐废水方面的广阔应用前景。

关键词:高盐度有机废水;物理化学法;生物法;组合工艺;嗜盐菌;耐盐酵母菌

中图分类号:X703.1 文献标识码:A

Review of high salinity organic wastewater treatment

BIAN Wei^{1,2}, WANG Lu-guang², LI Hong-bo²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China; 2. Hebei Provincial Academy of Environmental Science, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

Abstract: This article summarized the physical chemistry and biological treatment technologies of high salinity organic wastewater and introduced combined processes of biological and other treatments. Halophilic bacteria and salt-tolerant microzyme have wide practicability in the treatment of high salinity wastewater.

Key words: high salinity organic wastewater; physical chemistry; biological method; combined processes; halophilic bacteria; salt-tolerant microzyme

高盐度有机废水是指含有机物和至少 3.5% (质量分数)的总溶解性固体物(TDS)的废水^[1]。此类废水主要有 2 个来源:1)海水直接用于工业生产和生活后排放的废水,如工业上,海水可以广泛地用作锅炉冷却水,城市生活中,海水可以替代淡水作为冲厕水,此类废水的含盐量一般为 $2.50 \times 10^4 \sim 3.50 \times 10^4$ mg/L (质量浓度,下同);2)某些工业行业生产过程中排放的废水,如皂素废水、石油开采废水以及印染、造纸、制药、化工、奶制品加工和农药行业排放的废水,含盐量一般在 15% ~ 25% 左右^[2]。高盐度有机废水带来的环境污染十分严重,特别是含盐工业废水,往往含有高浓度的可溶性无机盐

Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} 以及难降解或有毒的有机物,且其排放量呈急剧增长的趋势。因此,探索行之有效的高盐度有机废水处理技术已经成为目前废水处理的热点之一。

1 物理化学法处理高盐度有机废水

1.1 电化学法

在高盐度条件下,废水具有较高的导电性,这一特点为电化学法在高盐度有机废水处理方面提供了良好的发展空间。紫胶合成树脂生产过程中排放的高盐度有机废水 Cl^- 的质量浓度高达 1.23×10^5 mg/L,王宏等应用电解絮凝法处理该废水的实验结果表明,该方法能够有效地去除废水中的有机污染物,提高透明度,COD 去除率达 94%, BOD_5 去除率达 90% 以上,并且设备简单、耐冲击性好、操作方便、不需要投加化学药剂,易实现现代化管理^[3]。黄

收稿日期:2008-10-23;修回日期:2008-12-29

责任编辑:王海云

作者简介:边蔚(1983-),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事生态规划与评价方面的研究。

瑾等用铁碳微电解法处理高盐度有机废水,废水中有苯胺、硫化物等多种难降解有机化合物,COD的质量浓度为4 000~7 000 mg/L,苯胺的质量浓度为40~100 mg/L,盐度为20~40 g/L,pH值为5~9,BOD₅/COD小于0.2^[4]。实验结果表明:在反应初始pH值为4.0,铁碳质量比为1,反应时间为60 min,过氧化氢加入量为0.10% (体积分数),曝气条件下,COD去除率为57.6%;处理后废水的可生化性有明显的改善,BOD₅/COD可达0.65;对COD的去除基本符合一级动力学规律。刘占孟应用电化学法处理染料中间体生产排放的高盐度有机废水,实验结果表明,该法能够有效地去除废水中的有机物,提高透明度,在电流密度为0.015 A/cm²,槽电压为8.4 V,电解90 min时,COD和色度的去除率分别为65%和70%^[5]。实验亦发现电介质的存在能有效提高溶液的电导率,从而提高电解的处理效果,电解中产生的游离氯和Fe²⁺对有机物降解起重要作用。

1.2 反渗透法

应用于海水和苦咸水淡化的反渗透淡化技术已相当成熟,也可用于高浓度废水的脱盐工艺。卢彦越等将反渗透过程进行了优化设计应用于某化工厂的废水处理,该厂废水中含大量的Ca²⁺和Cl⁻,排放量为450 m³/h,Cl⁻的质量浓度为13 000 mg/L,采用该工艺脱盐后,质量浓度降至4 000 mg/L,表明此种方法是比较有效的^[6]。但当给水浓度较高时,反渗透系统需要更高的操作压力,能量消耗大。

1.3 渗透法

受渗透基本原理的启发,付守琪等提出了渗透法处理高盐度废水的新工艺^[7]。渗透压的数学表达式为 $\pi = iRTc$ 。式中 π 为渗透压,Pa; R 为理想气体常数,Pa·L/(mol·K); c 为溶质的浓度,mol/L; T 为绝对温度,K; i 为范特霍夫系数。由此可见,温度相同,渗透压与范特霍夫系数 i 和溶质的浓度 c 成正比。综合分析各种电解质:不饱和强电解质溶液的 i 值均不会大于4;弱电解质不饱和溶液的 i 值大于1;而不饱和非电解质的 i 值为1。即相同温度下,强电解质溶液的 i 值是弱电解质的1~4倍。受此启发,即可设计出一种新的水溶液,该水溶液具有如下特征:1)在一定条件下,浓度比较高;2)在外部条件改变的情况下,水和溶质较易分离。作者以溶质氨的设计溶液为例分析了该工艺的可行性,认为在约100 kPa和20℃时,1体积水可以溶解700体积氨气,则1 mol水至少可以溶解30 mol氨气。氨水为非电解质,近似饱和的氨水溶液的渗透压约等于30RT。在相同的温度下,假设强电解质溶液的 i

值是氨水的4倍,则近似饱和的氨水溶液的渗透压至少大于7 mol/L的强电解质溶液,故理论上用氨水作为设计溶液是符合要求的。作者进一步分析了该工艺的流程,认为在自然条件下使高含盐废水浓缩,同时通过半透膜使水进入到氨的设计溶液(氨水溶液)中。由于氨具有较强的挥发性,可采用气提法来分离氨和水,将排出的氨水溶液中的氨气提出回用,补充膜反应器中的氨水溶液。并对反渗透工艺,该新工艺的优点是去掉了高压泵和增压泵这2个主要耗能设备,代之以氨水的气提处理,可降低成本,是高含盐废水处理方法的一个新的研究方向。但作者仅从理论上探讨了设计溶液溶质为氨时的工艺,须进行相应的实验以确定此工艺具体的应用参数,比如合适的氨浓度等。新工艺的关键是设计理想的溶液配制,以氨为溶质进行溶液的配制是今后重要的研究方向。

1.4 蒸馏法

油田废水量很大,含盐量很高,将膜蒸馏技术用于油田废水脱盐,在节能上更具优势。因为,含水原油在电化学脱水之前,一般都要升至较高温度,故排出的废水温度也比较高,多数油田废水温度为40~50℃,有的甚至更高,如华北油田废水温度为60~70℃^[8]。而膜蒸馏的突出优点是操作温度低,热侧水溶液一般在40~50℃,甚至可以在40℃下操作^[9]。由此可见,膜蒸馏淡化油田废水基本上无需额外加热即可满足工艺要求。王车礼等采用聚丙烯中空纤维膜,在较低真空度下采取减压膜蒸馏技术浓缩油田高含盐废水,实验结果表明:随着膜下游真空度增加,膜通量先缓慢增大,当真空度超过某一临界值后,膜通量急剧增加;废水温度增加,膜通量增大,且真空度越高,膜通量随温度变化的曲线越陡;提高废水流量可增大膜通量;随着废水含盐量增加,膜通量减小,当废水含盐量大于220 g/L(质量浓度)时,馏出液电导率明显增加,但各次实验的截留率仍然接近100%,表明实验用聚丙烯中空纤维膜具有很好的疏水性^[10]。

1.5 焚烧法

焚烧技术已经越来越多地使用于高浓度有机废水的处理。为提高有机废热的热值,降低焚烧的处理成本,预处理在整个焚烧工艺中是必不可少的。对于挥发性有机物和半挥发性有机物,蒸发工艺可以将含盐有机废水转化成不含盐的有机废水蒸气,但少量的蒸发残液含有饱和浓度的无机盐和高沸点的有机物^[11]。对于富含高沸点有机物的含盐废水,单独的蒸发预处理不能完全分离有机物和碱金属盐类等无机物。为此,马静颖等提出了采用萃取技术

对蒸发残液进行预处理,将脱盐后的有机物再进行焚烧处理的工艺^[12]。通过萃取,可以实现高沸点有机物和无机盐的分离,使焚烧对象彻底脱盐。

2 生物化学法处理高盐度有机废水的研究

无机盐类在微生物生长过程中起着促进酶反应、维持膜平衡和调节渗透压的重要作用,但盐浓度过高,会对微生物的生长产生抑制。为此,高含盐废水的生物处理需要对废水进行稀释,使盐的质量分数小于1%,但这又会造成水资源的浪费,使处理设施庞大,投资增加,运行费用提高。目前高盐度废水处理主要偏向于不脱盐、不稀释,直接进行生物处理。因此,研究生物处理的可行性、反应机理和处理条件,设计合适的生物反应器是目前处理高盐度废水的一个热点。

2.1 耐盐微生物的研究

2.1.1 嗜盐菌^[13]

根据细菌最佳生长所需的盐浓度(一般以NaCl计),细菌可分为非嗜盐菌、海洋细菌和嗜盐细菌。海洋细菌,也称弱嗜盐菌,适于生长在含盐量为1%~3%(质量分数,下同)的介质中。嗜盐细菌只有在含盐的环境中才能生长,按最适宜生长所需的盐量又分为中度嗜盐菌和极端嗜盐菌。中度嗜盐菌在含盐量为3%~15%的环境中能良好生长。极端嗜盐菌最适宜生长含盐量为20%~25%,甚至在饱和浓度中也能生长。嗜盐菌为革兰氏阴性菌,能利用的碳源十分广泛,适宜于偏碱性的环境(pH值为9~10)。嗜盐菌中大多数酶的活性和稳定性、核蛋白的稳定性和功能的发挥以及细胞的生长都需要一定含量的NaCl和KCl来维持。

2.1.2 其他耐盐微生物

在高盐度环境中也存在着一些原生动物,如轮虫、游泳性纤毛虫、有柄纤毛虫、展现突口虫、红色角毛虫、绿模瘦尾虫和扇状游仕虫等^[14]。还有一些浮游生物,如嗜盐舟形藻、衣藻、光甲藻、绿裸藻、啮蚀隐藻、尖尾蓝隐藻等。它们的种类随含盐量的不同而有所变化^[15]。

有研究表明,耐盐酵母也可以用来处理高有机物、高含盐废水,但其耐盐机理还没有彻底弄清^[16]。SHIN等用酵母菌*Rhodotorula rubra*处理泡菜生产废水,48 h后废水的BOD₅由11 000 mg/L(质量浓度,下同)降到3 200 mg/L以下,去除率为70%。OSWAL等用海生酵母*Yarrowia lipolytica* NCIM 3589处理棕榈油废水,该废水COD为250 g/L(质量浓度,下同),BOD₅为11 g/L,TDS为65 mg/L,

氯仿为9 g/L,当停留时间为2 d时,COD的去除率为95%,再加絮凝剂,COD去除率可达99%。CHOL等用耐盐高渗透压酵母菌*Pichia guilliermondii* A9处理泡菜生产废水,24 h后BOD₅由1 210 mg/L降到120 mg/L,去除率达到90%,NaCl质量分数为10%时,A9的生长没有受到抑制,NaCl质量分数大于12%时,A9的生长速率减慢。可见,耐盐酵母菌在处理高含盐废水方面有广阔的应用前景。

2.1.3 嗜盐微生物的培养、驯化

嗜盐菌的分离筛选比较简单,目前国内外已有许多学者培养出了各种嗜盐菌种,如BIRGITTE和NYGAARD研究了嗜盐菌的抗嘌呤突变体;周培瑾等人从新疆吐鲁番艾丁湖分离一株嗜盐小盒菌(*Haloarcu la aid-inensis sp. nov.*);徐德强等从江苏黄海盐场分离一株盐单胞菌(*Halomonas huanghaiensis sp. nov.*);田新玉等从内蒙古察汗淖碱湖分离到一株极端嗜盐嗜碱杆菌(*Naatronobacterium sp.*);李卫等从青岛附近海产品盐渍中分离得到2个菌株——符合盐单胞菌特征属CM1,CM4。他们的方法虽然不尽相同,但原理相似,都是利用微生物对环境的逐渐适应,优胜劣汰,最终获得高效、优质的菌种^[17]。

环境从低盐到高盐时,微生物有一个适应期,含盐量的变化可能引起微生物代谢途径的改变。细菌驯化过程就是使代谢方式逐渐适应高盐环境,并使耐盐菌大量增殖的过程,但这需要一定的时间,急剧地变化盐量或驯化时间过短都会使细菌受到抑制。因此,把握含盐量的变化程度和驯化时间是十分重要的^[18]。袁红兵等在低温高盐条件下成功驯化出了适应此类环境的微生物菌群,证明在寒冷地区高含盐条件可以实现对污水中COD的有效去除^[19]。

2.2 生物反应器的研究

刘峰利用上流式厌氧生物滤池处理高盐度有机废水,在容积负荷为4 kg/(m³·d),进水氯离子质量浓度在3 000 mg/L,水力停留时间24 h时,COD去除率达到85%左右^[20]。

MILIS利用煤渣作填料的滴滤器处理含盐量为6 000 mg/L的间歇排放废水,取得了较好的出水效果^[21]。

YANG和LAI用生物滤塔处理高含盐度石油废水,在含盐量达到40 g/L时,TOC的去除率达到95%^[21]。

张学洪等利用厌氧折板反应器(ABR+SBR)活性污泥法联合工艺处理高含盐含氯采油废水,出水各项指标均能达到《污水综合排放标准》(GB

8978—1996)一级标准,且试验成果已用于涠洲终端处理厂采油废水处理系统^[22]。

王发珍等通过试验研究了 A/DAT-IAT 生物膜法处理高含盐废水的新工艺^[23]。他们以含盐量为 60 000 mg/L (以 NaCl 的质量浓度计)的模拟工业废水为研究对象,利用 A/DAT-IAT 生物膜反应器,研究了 A/DAT-IAT 工艺对投加悬浮填料后高含盐废水的处理,并以 COD、 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等作为评价指标。试验结果表明, A/DAT-IAT 生物膜法较其他活性污泥法有了较大的提高。

齐鲁石化公司氯碱厂的氯乙烯、聚氯乙烯和环氧氯丙烯三套生产装置排出的高含盐污水,进水 COD 为 2 370 mg/L,含盐量(以 Cl 的质量分数计)为 1.2%~1.7%,采用纯氧曝气和生物接触氧化两段生化方式,处理后出水 BOD_5 小于 30 mg/L, COD 小于 100 mg/L, COD 总去除率达 96%^[14]。

3 生物法与其他方法组合工艺处理高盐度有机废水的研究

最近,生物法与其他方法组合工艺在含盐有机废水治理方面,成为一个研究亮点。

3.1 液/液萃取-膜生物反应器组合工艺^[24]

液/液萃取-膜生物反应器组合工艺(combined liquid-liquid extraction and a membrane bioreactor)又称萃取膜生物反应器(extraction membrane bioreactor, EMBR)工艺,该工艺主要包括萃取、剥离、油/水乳状液分离和生物量分离膜与生物反应器 4 个单元。

1) 萃取单元 酸性废水中的有机污染物通过不溶于水的有机溶剂萃取。经萃取处理后的废水经亲水性微滤膜过滤后排放,此时绝大多数无机盐存在于这部分废水中,通过萃取单元,实现了有机污染物与高浓度无机盐的分离。

2) 剥离单元 有机污染物在剥离单元内转变为碱性液相物质从有机溶剂中分离出来。在此过程中,pH 值变化是至关重要的因素。

3) 油/水乳状液分离和生物量分离膜 剥离单元剩余液中的有机液滴经亲水性微滤膜过滤,实现有机污染物与残余有机溶剂的分离,有机污染物进入生物反应器。同理,膜也可保持生物反应器中的微生物浓度。

4) 生物反应器 有机污染物在生物反应器内作为微生物的碳源和能源被氧化分解。

3.2 活性污泥法和颗粒活性炭组合工艺

LIU 等采用活性污泥法和颗粒活性炭组合工

艺处理高盐度废水,即在反应器内加入活性炭颗粒,利用活性炭的吸附性能和以生物膜形式固定于活性炭表面的微生物氧化能力降解废水中的有机污染物^[25]。安立超等对活性炭生物强化技术处理高含盐实际工业废水的工艺条件和参数进行了研究,活性炭强化工艺的饱和常数(K_s)为 25.17 mg/L (质量浓度),COD 的去除率为 80%左右,最佳操作参数分别为有机负荷(N_s)为 0.28~0.35 kg/(kg·d),容积负荷(N_v)为 0.45~0.64 kg/(kg·d),为该技术的实际应用提供了理论依据^[26]。

4 结 语

目前,高盐度有机废水的处理方法主要分为物理化学法和生物化学法。物理化学法一般包括电解法、反渗透法、渗透法、蒸馏法、焚烧法等,但费用较高,还可能带来二次污染。而生物处理由于具有独特的优势而备受青睐,是目前公认的较好的方法。嗜盐菌价廉,来源广,可以利用许多有机物(包括难降解和有毒物质)作为碳源,因此利用嗜盐细菌处理高含盐有机废水具有广阔的应用前景,其中快捷的嗜盐菌选择驯化方法及嗜盐菌的降盐机理是研究热点。目前国内外已有许多学者筛选、培养出了各种嗜盐菌种,但大多数研究尚处在实验的配水阶段,如何利用嗜盐菌的降盐机理,并结合合适的构筑物处理实际的工业废水,还有待于进一步地研究和探讨。耐盐酵母菌的耐盐机理还没有彻底弄清,目前应用实例较少,但已有学者研究表明酵母基因组中约有 200 个基因与盐有关,在高盐条件下,酵母菌的基质利用率、污泥最大比增长率、半速率常数以及营养物去除能力更高,比普通的好氧或厌氧细菌处理效果更好。将嗜盐菌和耐盐酵母菌结合处理高盐废水,充分发挥它们在实际废水中的处理作用,对实际应用和理论研究均具有重要意义。

参考文献:

- [1] BINDER. Use of SBR'S to treat pesticide wastewater[A]. Presented at the Notre Dame/ Mile Hazardous Waste Conference[C]. South Bend: University of Notre Dame, 1992.
- [2] 何建, 陈立伟, 李顺鹏. 高盐度难降解工业废水生化处理的研究[J]. 中国沼气, 2000, 18(2): 12-16.
- [3] 王宏, 郑一新, 钱彪, 等. 电解凝聚法处理高盐度有机废水的实验研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(2): 51-53.
- [4] 黄瑾, 胡翔, 李毅, 等. 铁碳微电解法处理高盐度有机废水[J]. 化工环保, 2007, 27(3): 250-252.
- [5] 刘占孟. 电化学法处理高盐度燃料中间体废水实验研究[J]. 山东轻工业学院学报, 2005, 19(4): 30-33.
- [6] 卢彦越, 胡仰栋, 徐冬梅, 等. 反渗透海水淡化系统的优化设计

- [J]. 水处理技术, 2005, 31(3): 9-14.
- [7] 付守琪, 陈萍, 罗专溪. 渗透法处理高盐废水的原理及工艺[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(7): 96-98.
- [8] 李化民. 油田含油污水处理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- [9] 蒋维钧. 新型传质分离技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [10] 王车礼, 王军. 膜蒸馏淡化处理油田高含盐废水的实验研究[J]. 膜科学与技术, 2004, 24(1): 46-49.
- [11] MA J Y, MA Z Y, YAN J H, et al. Development of an evaporation crystallizer for desalination of alkaline organic wastewater before incineration[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005, 5(10): 1100-1106.
- [12] 马静颖, 马增益, 严建华, 等. 萃取在含盐有机废水焚烧处理中的应用[J]. 环境科学学报, 2007, 27(1): 86-91.
- [13] 安立超, 严学亿, 胡磊, 等. 嗜盐菌的特性与高盐废水生物处理的进展[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(5): 293-296.
- [14] 夏世斌. 高含盐石化废水生化处理的研究进展[J]. 中国水运(学术版), 2006, 6(7): 93-94.
- [15] 申屠青春, 董双林, 赵文, 等. 盐度、碱度对浮游生物和水化因子的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 449-454.
- [16] 方静, 曾抗美. 含盐废水处理研究动态[J]. 工业水处理, 2005, 25(2): 1-4.
- [17] 雷云, 解庆林, 李艳红. 高盐度废水处理研究进展[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 94-98.
- [18] 刘铁汉, 周培瑾. 嗜盐微生物[J]. 微生物学报, 1999, 23(3): 232.
- [19] 袁红兵, 季麟. 寒冷地区高含盐条件污水处理[J]. 辽宁化工, 2007, 36(1): 63-66.
- [20] 刘峰, 吴建华, 马向华, 等. 上流式厌氧生物滤池处理高含盐废水的试验研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2003, 16(2): 34-38.
- [21] 李耀辰, 鲍建国, 周旋, 等. 高盐度有机废水对生物处理系统的影响研究进展[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(6): 109-111.
- [22] 张学洪, 李艳红, 曾全方, 等. 高含盐含氯采油废水生物处理现场试验[J]. 给水排水, 2005, 31(10): 48-51.
- [23] 王发珍, 蒋进元, 周岳溪, 等. A/DAT-IAT生物膜法处理高含盐废水[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(6): 25-28.
- [24] 杨晔, 陆芳, 潘志彦, 等. 高盐度有机废水处理研究进展[J]. 中国沼气, 2003, 21(1): 22-25.
- [25] LIU W, HOWELL J A, ARNOTTTT C, et al. A novel extractive membrane bioreactor for treating bio refractory organic pollutants in the presence of high concentration of inorganic: Application to synthetic acidic effluent containing high concentrations of chloroprene and salt[J]. Journal of Membrane Science, 2001, 181: 127-140.
- [26] 安立超, 陆路德, 汪信, 等. 活性炭强化生物处理高含盐有机废水研究[J]. 南京理工大学学报, 2003, 27(6): 715-719.

(上接第 146 页)

用寿命影响最大, 流量影响最小, 其余因素介于它们之间。本研究结果为脱硫泵的设计、研究、选型和现场运行提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 赵占军. 金属抗磨材料对杂质泵寿命的影响[A]. 杂质泵及管道水力输送学术讨论会论文集[C]. 石家庄: 中国机械工程学会流体学会泵专业委员会, 1988. 210-214.
- [2] 陈金海. 杂质泵用材料室内筛选方法的探讨[J]. 润滑与密封, 1980, (3): 20-28.

1980, (3): 20-28.

- [3] 何希杰, 张勇. 脱硫泵现场使用寿命多元回归分析[A]. 全国第2届杂质泵及固体物管道水力输送学术讨论会论文集[C]. 自贡: 中国机械工程学会流体学会泵专业委员会, 1999. 100-107.
- [4] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武昌: 华中科技大学出版社, 2002.
- [5] 何希杰, 劳学苏. 耐磨白口铸铁的综合性能与价格比[J]. 现代铸铁, 2007, (1): 60-62.
- [6] 何希杰, 劳学苏. 耐磨白口铸铁综合性能评价[J]. 铸造技术, 2005, (3): 194-195.

(上接第 167 页)

围电路。结合网络通信技术, 采用 Java 的 Applet 小程序方式, 实现了基于 Web 的传感器。该系统已经通过了验收并且正式应用于某测量监控中, 且系统在 ARM 下开发尽量做到了体积小、成本低。本文可以对类似的系统开发起到借鉴作用, 具有很强的工程实践意义。

参考文献:

- [1] 赵宁. 嵌入式 Web 传感器软件系统的研究与设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [2] WOODS S. Smart sensors and world wide[J]. Web Sensors, 1996, (6): 50-53.
- [3] 马忠梅. AT91 系列 ARM 核微控制器结构与开发[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

- [4] ADAM D. μ IP0. 6 protocol stack [EB/OL]. URL: <http://www.sics.se/node/13>, 2002-04-12.
- [5] 王劲松, 李正熙, 夏旺盛. 嵌入式操作系统 μ C/OS-2 的内核实现[J]. 现代电子技术, 2003, (8): 48-50.
- [6] 杨成忠. 计算机操作系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [7] 徐甲同. 计算机操作系统教程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [8] 何鹏举, 陈明, 白耀辉. 基于 Internet 的嵌入式 Web 声表面波压力传感器研究[J]. 传感技术学报, 2004, 17(2): 245-248.
- [9] STEVENS R W. TCP/IP 详解卷 1: 协议[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [10] DUNKELS A. μ IP - a free small TCP/IP implementation for 8-and 16-bit microcontrollers [EB/OL]. URL: <http://www.sics.se/~adam/uip>, 2002-01-12.
- [11] 何梅. Java Applet 编程实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.