石灰软化-絮凝法处理地下水硬度的试验研究

莫文婷[1]，陈涛[2]，唐友尧[2]
(1. 华中科技大学武昌分校 城市建设学院，湖北 武汉 430064；2. 华中科技大学 环境科学与工程学院，湖北 武汉 430074)

[摘 要]采用石灰软化-絮凝法处理华南地区某水厂地下水硬度。在实验室进行静态烧杯试验研究，考察石灰投加量、混凝剂投加量、沉淀时间和过滤条件对试验效果的影响。试验结果表明，石灰投加量为 180~240 mg/L，PAC 投加量为 15~30 mg/L，沉淀时间小于 30 min，滤料粒径为 0.5 mm、滤速为 10 m/h 时处理效果最佳。

[关键词]石灰软化-絮凝法；地下水；石灰投加量；混凝剂投加量；沉淀时间；滤料粒径；滤速
[中图分类号]TQ [文献标识码]A [文章编号]1007-1865(2014)09-0030-03

Study on Treatment of Hardness of Groundwater by Lime Softening-Flocculation Process

Mo Wenting[1], Chen Tao[2], Tang Youyao[2]
(1. Huazhong University of Science and Technology Wuchang Branch,Institute of urban construction, Wuhan 430064；
2. Huazhong University of Science and Technology, School of Environmental Science & Engineering, Wuhan 430074, China)

Abstract: The study determined the treatment of hardness of groundwater by lime softening coagulation-flocculation in a waterworks in South China. Static jar tested the influence of lime dosage, coagulant dosage, sedimentation time, and filtration conditions on the test results. The test results show that when the lime dosage is 180~240 mg/L, PAC dosage is 15~30 mg/L, precipitation time is less than 30 min and the filter material particle size is 0.5 mm, filter speed is 10 m/h, the best treating result will be obtained.

Keywords: lime softening-flocculation process；groundwater；lime dosage；coagulant Dosage；sedimentation time；filter material particle size；filter speed

据调查，我国农村生活饮用水的水源主要以地下水为主，饮用地下水的人口占 74.87 %[1]。华南地区某市为解决农村生活饮用水安全问题，拟采用石灰软化-絮凝法处理地下水。试验对象为该市某供水厂地下水水源，开采量为 800 m^3/d。

该水厂地下水清澈透明，水中硬度(以 $CaCO_3$ 计)含量为 300 mg/L 以下，符合《地下水水质标准》Ⅱ类水质标准。存在的问题是煮沸后有白色沉淀或漂浮物，影响视觉感官，当地村民无法接受。分析原因，主要是地下水中经常含有的阳离子为钙、镁、铁、锰等，阴离子主要有碳酸氢根、碳酸根、硫酸根、氯、氟等，其中钙、镁离子以游离态存在。在碳酸系碱度存在情况下，加热后易于形成白色沉淀及白色漂浮物质，这些物质成分为碳酸钙、氢氧化镁及少量的碳酸钡。钙镁离子对健康不会造成直接危害，饮用适量的硬水还会有益于健康。但是会对生活产生诸多不便，如用水器结垢、肥皂清洁剂效率低、皮肤干燥、衣物发硬等[2]。为使村民安全、放心地使用自来水，需对该地下水进行软化处理。

目前，水的软化处理主要的几种方法：一是基于浓度积原理，加入某些药剂，把水中钙、镁离子转变成难溶化合物使之沉淀析出，这一方法称为水的药剂软化法或沉淀软化法；二是基于离子交换原理, 利用某些离子交换剂所具有的阳离子(Na^+或 H^+)与水中钙、镁离子进行反应，达到软化的目的，称为水的离子交换软化法；还有基于电渗析原理，利用离子交换膜的选择透过性，在外加直流电场作用下，通过离子的迁移，在进行水的局部除盐的同时，达到软化的目的[2]。此外，膜软化法近年来也被逐渐用于水的软化处理。

针对该地下水总硬度不高、pH 偏低、煮沸后有白色沉淀或漂浮物的特点，采用石灰软化-絮凝法处理该地下水。本文考察石灰投加量、混凝剂投加量、沉淀时间和过滤条件对试验效果的影响。

1 材料与方法

1.1 试验仪器与材料

主要分析仪器：AUX220 电子天秤、电子万用炉、HACH 便携式浊度仪(2100P)、TS-110 型 pH 计、JB-3 型定时恒温磁力搅拌器、MY3000-6 智能型混凝试验搅拌仪以及锥形瓶、滴定管、移液管、中速滤纸等常用玻璃仪器。

试验试剂：钙标准溶液：10 mmol/L；EDTA-2Na 标准溶液：10 mmol/L；氨水缓冲溶液(pH=10)；0.5 %铬黑 T 指示剂；0.5 %硫化钠溶液；1.0 %盐酸羟胺溶液；10 %氰化钾溶液；聚合氯化铝(配制成 4 %溶液)；聚丙烯酰胺(配制成 0.01 %溶液)；紫脲酸铵指示剂等。

1.2 原水水质

原水水质见表 1。

表 1 地下水水质

Tab.1 Quality of Groundwater

检测项目	pH	浊度/NTU	碳酸盐硬度/(mg·L^{-1})	非碳酸盐硬度/(mg·L^{-1})	总碱度/(mg·L^{-1})	钙硬度/(mg·L^{-1})	镁硬度/(mg·L^{-1})
数值	7.2	0.3	246.5	37.5	246.5	245.3	27.4

水源总碱度即为非碳酸盐碱度。由表 1 可知，总硬度在 300 mg/L 以下，主要以碳酸盐硬度和钙硬度为主，钙硬度含量较镁硬度含量高，这也是煮沸后产生漂浮物的原因所在。

本试验向水样中投加 1 %的熟石灰溶液(由 85 %、400 目的水处理级石灰配制而成)后，水中将发生一系列反应，最终生成 $CaCO_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 沉淀，从而达到软化目的。

1.3 试验方法

总硬度：EDTA 滴定法；总碱度：酸碱滴定法；钙、镁硬度：EDTA-Na2 容量法；浊度：浊度仪；pH：玻璃电极法。

如图 1 所示。

1.4 分析方法

利用正交试验设计法安排小试(烧杯)试验并进行分析优化试验条件。[3]本试验影响硬度、浊度去除效果的因素很多，如石灰投加量、石灰混合反应时间、搅拌速度、絮凝剂投加量等。经全面考虑，最后取 $Ca(OH)_2$ 投加量、PAC 投加量、石灰反应时间和沉淀时间四个因素，且不考虑因素间的相互影响作用。$Ca(OH)_2$ 投加量(mg/L)有 160、180、200、220 和 240 五个水平，PAC 投加量(mg/L)有 10、15、20、25 和 30 五个水平，石灰反应时间(min)有 0、5、10、15 和 20 五个水平，沉淀时间(min)有 15、20、25、30 和 35 五个水平。

利用正交试验分析方法，得出最佳试验条件的基础上，进行中试(动态)试验。中试试验主要是进一步明确以上四要素的最佳数值范围。

采用直观分析法，对硬度、碱度、浊度和 pH 四个指标进行分析。去除效果以硬度(以 $CaCO_3$ 计)、碱度去除率(%)表征。

[收稿日期] 2014-03-18
[作者简介] 莫文婷(1980-)，女，桂林人，硕士研究生，主要研究方向为水处理理论。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

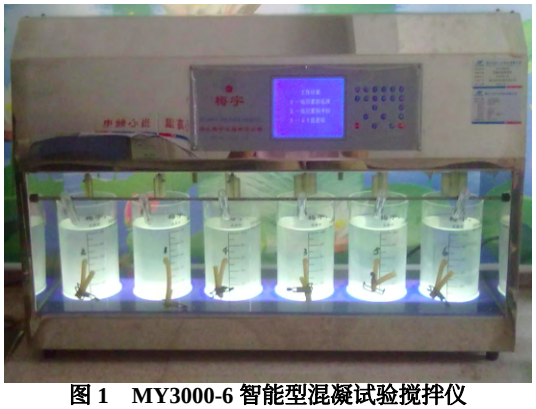

图 1　MY3000-6 智能型混凝试验搅拌仪
Fig.1　MY3000-6 Intelligent Coagulation Test Mixing Apparatus

2 结果与讨论

2.1 石灰投加量对试验效果的影响

取 1000 mL 水样, 投加 1 %的熟石灰溶液, 投加量分别为 120、140、160、180、200、220、240、260、280 和 300 mg/L。采用 4 %的 PAC 作为混凝剂，投加量为 15 mg/L。在一定水力条件下(见表 2)反应一段时间，静置 30 min 后过滤，测量反应后水样的硬度以及碱度，再将水样烧开后测量浊度观察肉眼可见物，结果如图 2 所示。

显然，石灰投加量为 180 mg/L 时，水样的总硬度为 140.1 mg/L，总碱度为 119.1 mg/L，硬度和碱度的去除率分别为 50.02 %和 59.22 %，水样烧开后的浊度为 0.171 NTU，已无肉眼可见物。

石灰的过量投加会使原水的 pH 升高, 回调 pH 所要加酸的量也会随之增加。实验中测得当石灰投加量低于 180 mg/L 时，无需进行加酸回调。考虑到后续加酸回调和消毒，石灰投加量不宜过高。因此，石灰投加量范围为 180~240 mg/L 之间。

表 2　试验混凝搅拌水力条件
Tab.2　Coagulation Mixing Hydraulic Conditions

试验阶段	转速/(r·min^{-1})	时间/min
混合	300	2
絮凝(投加 PAC)	300	0.5
	160	4
	130	4
	100	4
	60	4
	30	4
沉淀	0	30

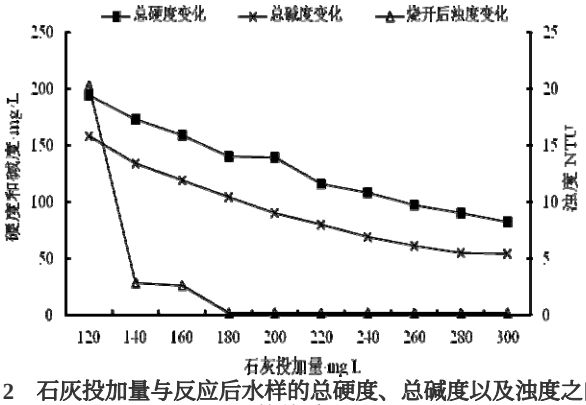

图 2　石灰投加量与反应后水样的总硬度、总碱度以及浊度之间的关系
Fig.2　the Relationship Between the Lime Dosage and Total Hardness ,Total Alkalinity and Tturbidity of Reaction Water

2.2 混凝剂投加量对试验效果的影响

由于 PAC 是目前应用最广的混凝剂, 适用 pH 宽, 适应性强, 成本较低，因此试验选用 PAC 作为混凝剂。

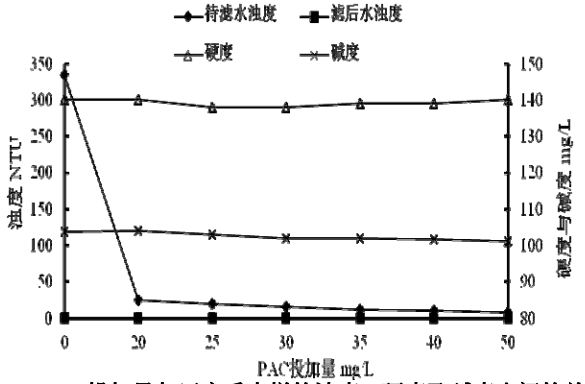

图 3　PAC 投加量与反应后水样的浊度、硬度及碱度之间的关系
Fig.3　the Relationship Between the PAC Dosage andTurbidity ,Hardness and Alkalinity of Reaction Water

根据试验结果可知, 待滤水浊度随 PAC 投加量增加而明显降低。不投加 PAC 时，待滤水浊度为 334 NTU，投加少量(20 mg/L)PAC 浊度即降低到 25.3 NTU，当 PAC 投加量为 40 mg/L 以上，待滤水浊度可以控制在 10 NTU 以下。硬度、碱度基本不受 PAC 投加量影响。虽然从试验数据分析，PAC 投加量对过滤后水样的浊度影响不大，但待滤水浊度过高会对过滤材料产生影响，考虑到后续的生产实际，PAC 投加量建议取 15~30 mg/L。

2.3 沉淀时间对试验效果的影响

表 3　沉淀时间对试验效果的影响
Tab.3　the Affection of Sedimentation Time on Test Results

沉淀时间	沉淀前/pH	待滤水浊度/NTU	待滤水/pH	滤后水浊度/NTU	滤后水/pH	碱度/(mg·L^{-1})	硬度/(mg·L^{-1})
0 min	8.93	224	8.93	0.306	8.83	80.0	113.2
30 min	8.93	28.3	8.92	0.211	8.83	79.1	112.7
60 min	8.94	26.5	8.94	0.205	8.85	74.1	110.3
90 min	8.95	22.9	8.97	0.171	8.91	74.1	111.3
120 min	8.97	17.6	9.01	0.294	8.95	72.9	109.1

根据表 3 可知，沉淀时间对 pH、碱度、硬度的影响很小，pH 基本稳定在 8.9 左右。反应后总硬度约为 110 mg/L，总碱度在 70~80 mg/L 的范围内。待滤水浊度随沉淀时间延长不断降低，但是对滤后水的浊度影响不大，说明过滤效果很明显。为减少沉淀池容积，降低建造成本，建议沉淀时间不超过 30 min。

2.4 过滤条件对试验效果的影响

表 4　滤砂粒径为 1.2mm、砂滤速度约为 15m/h 时的试验结果
Tab.4　the Test Results on Sand filter particle diameter of 1.2 mm, sand filter speed of about 15 m/h

水样	待滤水/pH	待滤水浊度/NTU	滤后水浊度/NTU	滤后水/pH	碱度/(mg·L^{-1})	硬度/(mg·L^{-1})	烧开后沉淀	烧开后浊度/NTU
1	8.52	29.3	0.798	8.47	110.3	144.3	少量漂浮物	8.04
2	8.54	33.0	0.697	8.51	107.7	142.3	少量漂浮物	6.89
3	8.54	32.7	0.647	8.51	108.5	147.9	少量漂浮物	7.07

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 滤砂粒径为 1.2 mm、砂滤速度约为 10 m/h 时的试验结果

Tab.5 the Test Results on Sand filter particle diameter of 1.2 mm, sand filter speed of about 10 m/h

水样	待滤水/pH	待滤水浊度/NTU	滤后水浊度/NTU	滤后水/pH	碱度/(mg·L^{-1})	硬度/(mg·L^{-1})	烧开后沉淀	烧开后浊度/NTU
1	8.68	29.9	0.433	8.67	92.1	124.1	少量漂浮物	1.16
2	8.73	34.1	0.420	8.69	92.1	125.1	少量漂浮物	1.04
3	8.77	32.2	0.586	8.73	94.1	124.1	少量漂浮物	1.21

表 6 滤砂粒径为 0.5 mm、砂滤速度约为 10 m/h 时的试验结果

Tab.6 the Test Results on Sand filter particle diameter of 0.5 mm, sand filter speed of about 10 m/h

水样	待滤水/pH	待滤水浊度/NTU	滤后水浊度/NTU	滤后水/pH	碱度/(mg·L^{-1})	硬度/(mg·L^{-1})	烧开后沉淀	烧开后浊度/NTU
1	9.10	38.3	0.200	9.12	33.0	66.1	无	0.315
2	8.92	29.5	0.172	8.88	38.0	72.1	无	0.295
3	8.95	28.6	0.151	8.87	41.0	72.1	无	0.215

由上述试验结果可以看出：(1)滤砂粒径、滤速对浊度有较大影响，粒径为 0.5 mm，滤速为 10 m/h 时，除浊效果最好，表明小粒径、低滤速有利于浊度去除；(2)滤砂粒径、滤速对 pH、硬度、碱度影响较小；(3)pH 对硬度、碱度去除有较大影响，当 pH≤8.5 时，滤后水烧开仍有少量漂浮物；当 pH＞8.9 时，滤后水烧开未见漂浮物；(4)为保证硬度去除效果，建议选用石英砂粒径为 0.5 mm，滤速为 10 m/h，pH 控制在 8.7 左右。

2.5 中试试验结果

根据水源水的水质特点及居民对水质的要求，选用的工艺应着重于硬度、浊度的去除。根据烧杯试验结果，加入石灰后，出水的 pH 会升高，因此需进行加酸回调。后期采用次氯酸钠进行杀菌消毒，拟确定试验工艺流程见图 4 所示。

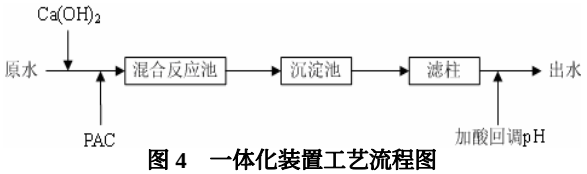

图 4 一体化装置工艺流程图

Fig.4 Integration of Process Flow Diagram

中试试验装置的水处理能力 1 m^3/h。从原供水系统取水泵后的分管取水，配进水流量计及调压阀等。配置 1~2 支 pH 计，用于实时监测加药后和回调后的 pH 变化。

分别在原水管(加药前)，反应池后段(加药后)、沉淀池上部上清液、沉淀池底部排泥区、滤池滤后水(pH 调节前)、滤池滤后水(pH 调节后)等处设采样点。

中试运行部分主要参数：石灰混合反应时间 10 min；穿孔旋流反应池反应时间 26 min；斜管沉淀池表面负荷 1.85 m^3/m^2·h，沉淀时间 50 min；砂滤池滤速为 8 m/h，水反冲洗强度 12~15 L/s.m^2。

通过动态试验，$Ca(OH)_2$ 投加量为 299.1~361.3 mg/L 区间较佳，PAC 投加量为 43.6~48.7 mg/L 之间较佳。总硬度降低为 110 mg/L 左右，去除率可达 55 %~67 %。总碱度可降低为 80 mg/L 左右，去除率可达 65 %~77 %。

3 结论

(1)通过动态试验，$Ca(OH)_2$ 投加量为 299.1~361.3 mg/L 区间较佳，PAC 投加量为 43.6~48.7 mg/L 之间较佳。

(2)沉淀时间对 pH、碱度、硬度的影响很小，待滤水浊度随沉淀时间延长不断降低，但是对滤后水的浊度影响不大。为减少沉淀池容积，降低建造成本，建议沉淀时间不超过 30 min。

(3)滤砂粒径、滤速对浊度有较大影响，粒径为 0.5 mm，滤速为 10 m/h 时，除浊效果最好，表明小粒径、低滤速有利于浊度去除。为保证硬度去除效果，建议选用石英砂粒径为 0.5 mm，滤速为 10 m/h，pH 控制在 8.7 左右。

(4)本套中试试验装置已经在华南地区几个类似水质的小镇投入应用。应用效果较好，达到如期目标，村民很满意。

参考文献

[1]张荣，李洪兴，武先锋，等．我国农村饮用水水质现状[J]．环境与健康杂志，2009，1，26(1)：3-5.
[2]严熙世，范瑾初．给水工程(第四版)[M]．北京：中国建筑工业出版社，1999：(1)：393-395.
[3]莫文婷，陈涛，唐友尧．正交实验法优化地下水的石灰软化-絮凝处理工艺[J]．化学与生物工程，2013，30(6)：87-90.

(本文文献格式：莫文婷，陈涛，唐友尧．石灰软化-絮凝法处理地下水硬度的试验研究[J]．广东化工，2014，41(9)：30-32)

(上接第 38 页)

表 11 超声波-微波联用先后顺序对芒果多酚得率的影响

Tab.11 Ultrasonic wave, microwave combined order effects on mango polyphenol yield

先后顺序	先微波			先超声波		
多酚得率/%	19.26	19.13	19.92	19.91	20.30	20.15

由表 11 可见，超声波-微波联用，先微波萃取，芒果多酚得率均值为 19.44 %，而先超声波萃取，芒果多酚得率均值为 20.12 %。

综合以上实验结果，认为按乙醇浓度为 60 %、超声提取次数为 2 次、微波功率为 100 W、超声时间为 1 h、微波时间为 60 s、料液比为 1：20，超声波-微波联用(先超声波)为萃取芒果核多酚的最佳工艺条件。

3 讨论

(1)微波萃取芒果核多酚的最佳工艺条件为：乙醇浓度为 60 %、微波功率 100 W、微波时间为 60 s、料液比为 1：15。在此条件下重复实验三次，取其含量的平均值为 17.89 %。

(2)超声波萃取芒果核多酚的最佳工艺条件为：乙醇浓度为 60 %、超声提取次数为 2 次、超声波时间为 1 h、料液比为 1：20。在此条件下重复实验三次，取其含量的平均值为 18.76 %。

(3)超声波-微波联用萃取芒果核多酚的最佳工艺条件为：先超声再微波，乙醇浓度为 60 %、超声提取次数为 2 次、微波功率为 100 W、超声时间为 1 h、微波时间为 60 s、料液比为 1：20，在此条件下重复试验三次，取其含量的平均值为 20.12 %

(4)以芒果核多酚得率为评价指标，对比最佳条件下微波、超声波和超声波-微波联用萃取芒果核多酚得率的结果，超声波-微波联用萃取的芒果核多酚得率较单独使用微波萃取或超声波萃取所得的芒果核多酚得率更高。

参考文献

[1]贾淑平，曾睿，但卫华，等．植物多酚药理作用的研究及应用[J]．中国药房，2009，20(12)：953-955.
[2]王雪飞，张华．多酚类物质生理功能的研究进展[J]．食品研究与开发，2012，33(2)：16-18.
[3]邓家刚. 农作物废弃物药用研究的战略意义与基本思路[J]. 广西中医药，2010，33(1)：1-3.
[4]阮玉凤，黄祉健，朱晓莹，等．植物多酚提取方法的研究进展[J]．广东化工，2013，21(40)：89-90.
[5]苏妹芬，罗宝芳，黄祉健，等．正交试验优选芒果叶多酚的微波提取工艺[J]．右江民族医学院学报，2013，(6)：790-792.
[6]周丽明．芒果多酚的提取、分离纯化及抗氧化、抑菌作用研究[D]．武汉：华中农业大学，2007.
[7]张妙芬. 茶叶中茶多酚含量测定方法的研究[J]. 化学工程与装备，2012，(5)：152-155.
[8]许丽丽，黄晓东．芒果叶多酚的提取工艺筛选[J]．贵州农业科学，2010，38(3)：170-172.
[9]于帅，杜彬，杨越冬，等．植物中多酚的研究进展[J]．河北科技师范学院学报，2011，24(3)：67-74.
[10]张素霞．茶多酚提取工艺的研究[J]．食品科技，2010，35(8)：267-270.

(本文文献格式：谢彩军，覃靖娟，朱晓莹．微波，超声波及其联合萃取芒果核多酚工艺的比较[J]．广东化工，2014，41(9)：37-38)

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net