

陈忠林, 陈 杰, 焦中志, 等. 2006. 高锰酸钾预氧化控制氯 / 氯胺消毒的卤乙酸生成量 [J]. 环境科学学报, 26 (7): 1082 - 1086

Chen ZL, Chen J, Jiao Z Z, *et al* 2006. Controlling HAA s yields in chlorine/chloramine disinfection by potassium permanganate preoxidation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26 (7): 1082 - 1086

## 高锰酸钾预氧化控制氯 / 氯胺消毒的卤乙酸生成量

陈忠林\*, 陈 杰, 焦中志, 李圭白

哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090

收稿日期: 2005-09-30 修回日期: 2006-03-10 录用日期: 2006-03-28

**摘要:** 结合南方某市典型受污染水源, 研究了高锰酸钾预氧化对后继氯或氯胺消毒工艺中卤乙酸 (HAA s) 生成量和生成形态的影响. 研究结果表明, 氯胺消毒比自由氯消毒可降低 HAA s 生成量 60% ~ 80% 左右; 通过一致性生成条件试验比较表明, 高锰酸钾的最佳投量范围是  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 在高锰酸钾为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的条件下, 后续氯消毒工艺的 HAA s 生成量降低了 30.9%; 而后续氯胺消毒工艺的 HAA s 生成量则降低了 25.3%; 高锰酸钾预氧化对 DCAA 生成量的影响相对较大, 高锰酸钾预氧化可降低氯 / 氯胺消毒工艺的 HAA s 生成量.

**关键词:** 高锰酸钾; 氯; 氯胺; 一致性生成条件试验; 卤乙酸; 化学物安全性

文章编号: 0253-2468 (2006) 07-1082-05 中图分类号: TU991.25 文献标识码: A

## Controlling HAA s yields in chlorine/chloramine disinfection by potassium permanganate preoxidation

CHEN Zhonglin\*, CHEN Jie, JIAO Zhongzhi, LI Guibai

School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090

Received 30 September 2005; received in revised form 10 March 2006; accepted 28 March 2006

**Abstract:** The influence of potassium permanganate (PP) preoxidation on the yields and forms of halacetic acids (HAA s) was investigated in the subsequent chlorine/chloramine disinfection process for southern typical contaminated resource water. The results showed that the HAA s yields with chloramination was reduced 60% ~ 80% than chlorination; Uniform formation conditions test (UFC) was used to evaluate HAA s formation after PP preoxidation. The optimal dosage of PP was  $0.5 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; When PP dosage was  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , the total HAA s yields during the subsequent chlorine and chloramine disinfection process was reduced 30.9% ~ 25.3% respectively. And PP preoxidation has more effect on the yields of dichloroacetic acid (DCAA) than trichloroacetic acid (TCAA). And PP preoxidation process could reduce the HAA s yields in chlorine/chloramine disinfection process.

**Keywords:** potassium permanganate; chlorine; chloramine; uniform formation conditions test; HAA s; chemistry safety

### 1 引言 (Introduction)

卤乙酸是一种典型的非挥发性卤代消毒副产物, 它具有沸点高、不可吹脱、致癌风险大等特点 (张晓健等, 2000). 已有研究表明, 卤乙酸可增加神经、心脏等系统发育异常的危险性 (林辉等, 2002). 为了确保饮用水的化学物安全性, 美国《消毒剂和消毒副产物法规》以及我国新颁布的《生活饮用水水质卫生标准》都对卤乙酸最高允许浓度做了明确的规定 (刘文君, 2004).

中国绝大多数水厂采用的折点预氯化法和氯消毒技术会生成大量有机副产物, 显著降低了饮用水的化学物安全性. 高锰酸钾预氧化具有明显的助凝、除藻、除微污染等优点, 且无对人体健康有害的副产物 (Ma *et al*, 1993; 李星等, 2004), 方法经济简单易行, 已在我国许多地区推广应用. 但是高锰酸钾对后继消毒工艺副产物生成量的影响如何是一个非常值得探讨的问题. 许多学者研究了高锰酸钾预氧化对后继氯消毒工艺三卤甲烷生成量的影响, 但结论不一. Singer 等人 (1980) 针对江水的研究

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (No. 2002AA601120)

Supported by the Hi-tech Research and Development Program of China (863) (No. 2002AA601120)

作者简介: 陈忠林 (1967—), 男, 教授 (博士); \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: zhonglinchen@263.net

Biography: CHEN Zhonglin (1967—), male, professor, Ph D; \* Corresponding author, E-mail: zhonglinchen@263.net

结果表明,投加高锰酸钾与不投加高锰酸钾相比三氯甲烷生成量有显著降低。Moyer等人(1985)研究发现,高锰酸钾对水样进行处理后再经氯化所产生的三氯甲烷生成量比不经高锰酸钾处理时有所升高,而马军等人(1990)的研究认为高锰酸钾预氧化对氯消毒过程中三氯甲烷生成量影响不大。目前高锰酸钾对后继消毒工艺中卤乙酸生成量的影响还未见过报道。目前,水厂使用最广泛的消毒剂是氯,其次是氯胺。本研究结合南方某市典型受污染水源,探讨高锰酸钾预氧化对后继氯或氯胺消毒工艺HAA<sub>s</sub>生成量和生成形态的影响,以期高锰酸钾在净水厂的生产应用提供理论基础和技术指导。

## 2 实验材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 原水水质特征

实验在南方某水务公司的水厂进行,实验用原水与实际水厂相同,主要具有低浊、高有机物、高藻3个特点,属于典型的南方受污染水体。

表 1 原水水质参数  
Table 1 Raw water parameters

浊度 / (NTU)	UV <sub>254</sub> / cm <sup>-1</sup>	TOC / (mg·L <sup>-1</sup> )	pH	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N / (mg·L <sup>-1</sup> )
6.91	0.068	2.7	6.89	0.09

### 2.2 实验方法

2.2.1 氯和氯胺的卤乙酸生成特性实验 实验原水用0.45μm滤膜过滤,再用0.1 mol·L<sup>-1</sup>的磷酸二氢钾-氢氧化钠缓冲溶液调解原水的pH值至7.0±0.2,分装到136 mL的氯化反应瓶中,在4个反应瓶中分别加入浓度分别为1.0、3.0、5.0、7.0 mg·L<sup>-1</sup>的自由氯,在另外4个反应瓶中分别加入预先配制的不同氮氯比(质量比)的氯胺(有效氯浓度为5.0 mg·L<sup>-1</sup>),密封反应瓶在20 °C的条件下避光反应(24.0±0.5) h,终止反应后取水样测定HAA<sub>s</sub>生成量。

2.2.2 直接高锰酸钾预氧化对原水中HAA<sub>s</sub>前体物的影响实验 将原水加入5个1500 mL大的烧杯中,分别加入浓度分别为0.5、1.0、1.5、2.0、3.0 mg·L<sup>-1</sup>的高锰酸钾,以300 r·min<sup>-1</sup>的转速搅拌氧化反应20 min后,水样经0.45 μm滤膜过滤后,采用一致性生成条件试验(Uniform Formation Conditions Test, UFC)方法测定水中的HAA<sub>s</sub>前体物浓度,并与原水比较。

UFC试验程序如下(Summers *et al.*, 1996):首

先用0.1 mol·L<sup>-1</sup>的硼酸-氢氧化钠缓冲溶液调解水样的pH值至8.0±0.2,分装到一系列136 mL氯化反应瓶中,然后根据预先估计的需氯量加入系列浓度的自由氯,每个自由氯浓度做平行样(一个测余氯,一个测HAA<sub>s</sub>浓度)。在20 °C条件下,密封避光反应(24.0±0.5) h后,测定水样中的余氯,取余氯在预定范围内的水样测定HAA<sub>s</sub>浓度,所得值即为HAA<sub>s</sub>前体物浓度。通常自由氯消毒的余氯(RC)在(1.0±0.2) mg·L<sup>-1</sup>范围内,氯胺消毒的余氯则在(2.0±0.3) mg·L<sup>-1</sup>范围内即可。

2.2.3 高锰酸钾预氧化对后继消毒工艺HAA<sub>s</sub>生成量的影响试验 将原水加入6个1500 mL烧杯中,加入浓度分别为0.05、1.0、2.0、3.0、5.0 mg·L<sup>-1</sup>的高锰酸钾,在ZR4-6混凝试验搅拌机以300 r·min<sup>-1</sup>的转速搅拌20 min后,投加1.5 mg·L<sup>-1</sup>(以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>计)的混凝剂,继续以300 r·min<sup>-1</sup>的转速搅拌1 min,然后以60 r·min<sup>-1</sup>的转速搅拌10 min,静置20 min后在液面1 cm下取上清液,采用上述的UFC试验方法测定氯或氯胺消毒时的HAA<sub>s</sub>生成量,以此评价高锰酸钾预氧化对氯或氯胺消毒工艺中HAA<sub>s</sub>生成量的影响。

### 2.3 氯胺的配制

用市售分析纯次氯酸钠配制成自由氯浓度为2.0 g·L<sup>-1</sup>的次氯酸钠溶液,用分析纯氯化铵配制成NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度为0.5 g·L<sup>-1</sup>的氯化铵溶液。在pH为8.0的条件下,将自由氯溶液缓缓加入到氯化铵溶液中,慢速搅拌混匀20 min,即配制成氯胺溶液。用DPD硫酸亚铁铵滴定法区分测定有效氯浓度,主要成份为一氯胺。每次使用现场现时配制,用碘量法标定浓度。

### 2.4 分析指标与检测方法

HAA<sub>s</sub>采用衍生化气相色谱法测定(安捷伦6890N气相色谱仪); TOC采用日本岛津公司产TOC5000A总有机碳分析仪测定;浊度采用Hach2100AN型浊度仪测定;UV<sub>254</sub>采用北京普析通用仪器有限责任公司TU-1901双光束紫外可见分光光度计分析;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;余氯采用DPD硫酸亚铁铵滴定法测定;pH值采用美国ORION公司868-2型pH计测定。

## 3 实验结果 (Results)

### 3.1 氯和氯胺的HAA<sub>s</sub>生成特性

首先研究了2种典型消毒剂氯和氯胺的卤乙酸

生成特性,结果如图 1所示.

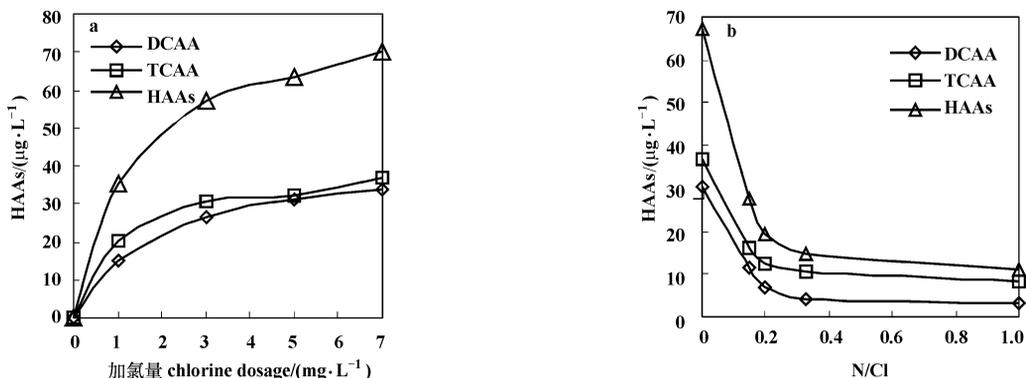


图 1 氯和氯胺的卤乙酸生成特性 ( $\text{pH} = 7.0 \pm 0.2$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $t = 24\text{ h}$ )

Fig 1 HAA5 formation characteristic of chlorine and monochloramine

从图 1a可以看出, HAA5生成量随着加氯量的增加而明显增加. 由于原水中溴离子浓度较低, 仅有 DCAA 和 TCAA 两种副产物检出, 并且两者比例基本上在 1:1 左右. 加氯量  $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时 HAA5 生成量为  $35.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 加氯量  $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时增加到  $57.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 随后卤乙酸生成量逐步趋于稳定. 从图 1b 可以看出, 氯胺消毒工艺的 HAA5 生成量明显低于自由氯, 并且随着 N/Cl 值的升高而降低. 在有效氯投量  $5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的条件下, 自由氯的 HAA5 生成量为  $67.3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , N/Cl 值分别为 0.15、0.2、1.0 氯胺的 HAA5 生成量与自由氯消毒相比较分别减少了 59.1%、71.2%、83.4%.

### 3.2 直接高锰酸钾预氧化对原水中 HAA5 前体物的影响

比较不同投量的高锰酸钾直接预氧化对原水中 HAA5 前体物的影响, 结果如图 2 所示.

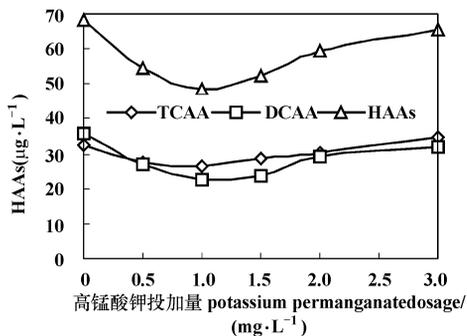


图 2 直接高锰酸钾预氧化对原水中 HAA5 前体物的影响 ( $\text{pH} = 8.0 \pm 0.2$ ,  $t = 24\text{ h}$ ,  $\text{RC} = (1.0 \pm 0.3)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ )

Fig 2 Effect of potassium permanganate direct preoxidation on the HAA5 precursors in raw water

从图 2 可以看出, 单独的高锰酸钾预氧化对水中的 HAA5 前体物有较大的影响. 随着高锰酸钾投加量的增加, HAA5 生成量出现先降低后增加的规律. 与原水的 HAA5 前体物浓度相比较, 投加  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  高锰酸钾 HAA5 前体物浓度降低了 14.2%, 投加量  $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时降低了 19.9%, 进一步增加高锰酸钾的投加量, HAA5 前体物浓度开始升高, 说明高锰酸钾把一部分有机物氧化成了卤乙酸前体物质. 高锰酸钾预氧化对 DCAA 的生成量影响较大, 对 TCAA 的生成量影响相对较小.

### 3.3 高锰酸钾预氧化对后继氯消毒工艺 HAA5 生成量的影响

高锰酸钾预氧化对后继氯消毒工艺的 HAA5 生成量和生成形态的影响如图 3 所示. 从图 3 可以明显看出, 高锰酸钾预氧化明显降低后继氯消毒工艺的 HAA5 生成量. 与不投加高锰酸钾相比, 投加浓度为  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的高锰酸钾以后, DCAA、TCAA、HAA5 生成量分别降低了 34.2%、7.3%、23.2%; 随着高锰酸钾投量的进一步增加, DCAA 和 TCAA 生成量开始回升; 当高锰酸钾投量增加到  $5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, DCAA 降低了 16.9%, TCAA 生成量反而增加了  $1.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 从 DCAA 和 TCAA 的比值来看, 高锰酸钾预氧化以后, 比值明显降低, 在投加量  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \sim 3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的范围内稳定在 1.0 左右, 降低了 0.44 左右, 说明高锰酸钾预氧化对 DCAA 的控制效果较好.

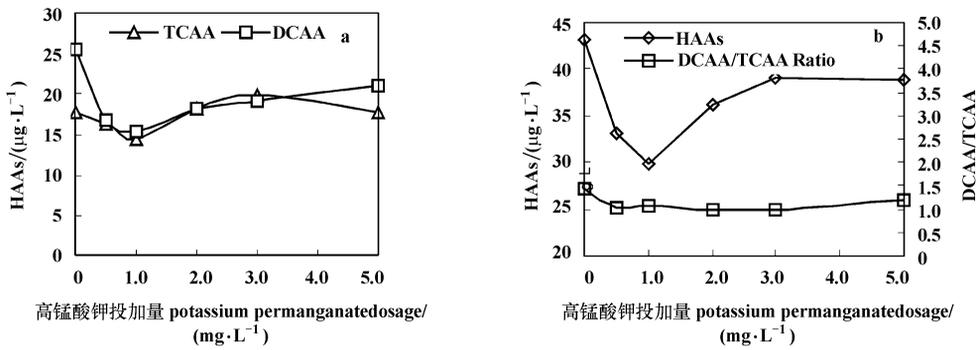


图3 高锰酸钾预氧化对氯消毒 HAA s生成量和组态的影响 ( $\text{pH}=8.0 \pm 0.2$ ,  $t=24 \text{ h}$ ,  $\text{RC}=(1.0 \pm 0.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $=20$ )

Fig 3 Effect of PP dosage on the formation and forms of HAA s during chlorine disinfection process

### 3.4 高锰酸钾预氧化对后继氯胺消毒工艺 HAA s生成量的影响

高锰酸钾预氧化对后继氯胺消毒工艺的 HAA s生成量和生成形态的影响如图4所示。

从图4可以看出,高锰酸钾预氧化明显降低了后继氯胺消毒工艺的 HAA s生成量.与不投加高锰酸钾相比,投加  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  高锰酸钾后, DCAA、TCAA、HAA s生成量与普通常规工艺相比分别降低

了 33.3%、21.3%、25.3%;当高锰酸钾投加量继续增加至  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, DCAA 和 TCAA 生成量开始回升;投加量  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时 HAA s生成量与常规工艺相比仅降低了 4.3%.从 DCAA 和 TCAA 的比值来看,高锰酸钾  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时比值明显降低,随后逐渐增加,投量  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时比值增加到 0.68.高锰酸钾投加量对氯胺消毒工艺中的 DCAA 生成量影响较大,对 TCAA 影响相对较小。

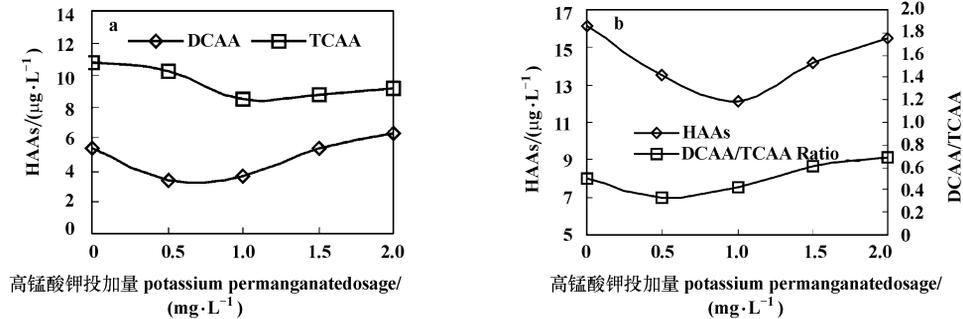


图4 高锰酸钾预氧化对氯胺消毒 HAA s生成量和组态的影响 ( $\text{pH}=8.0 \pm 0.2$ ,  $t=24 \text{ h}$ ,  $\text{RC}=(2.0 \pm 0.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $=20$ ,  $\text{N/C1}=1.4$ )

Fig 4 Effect of PP dosage on the formation and forms of HAA s during monochloramine disinfection process

## 4 讨论 (discussion)

高锰酸钾的直接氧化作用对水中 HAA s前体物的影响规律较为复杂,投加量对其影响较大.顾平等 (1998) 的研究表明,水中的三卤甲烷生成量随着高锰酸钾投加量的增加出现先降低后增加的规律. Moyer 等人 (1985) 的研究认为,高锰酸钾将天然大分子有机物氧化成小分子的有机物,而这部分有机物不易被沉淀工艺除去,且较易与氯反应生成三卤甲烷.陈超等人 (2005) 结合黄河水的研究表明,少量的高锰酸盐复合药剂 (以高锰酸钾为主) 预氧化后 HAA s前体物浓度略有增加,这可能与高锰

酸钾对有机物官能团的选择性氧化有关。

本文的研究结果 (图2) 进一步证实,高锰酸钾的强氧化作用对 HAA s前体物具有正反两方面的作用:一方面可将一部分 HAA s前体物质氧化去除,或者破坏水中有机物的 HAA s生成位,降低 HAA s前体物浓度;另一方面也可使有机物的 HAA s生成位增加,将一部分非 HAA s前体物氧化成 HAA s前体物.对于本试验水质,低投量条件下 ( $0 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) HAA s前体物浓度随着高锰酸钾投加量的增加而降低,说明前一种作用占优,进一步增加高锰酸钾的投加量,后一种作用逐渐占优,从而出现了 HAA s前体物浓度回升的规律。

高锰酸钾对后继氯或氯胺消毒工艺的 HAA<sub>s</sub>生成量的降低存在一个最佳投量范围. 高锰酸钾预氧化对后继消毒工艺 HAA<sub>s</sub>生成量的影响主要有 3 个方面:首先如上所述,高锰酸钾的氧化作用对水中 HAA<sub>s</sub>的前体物的影响有正反两方面的作用,该作用取决于水中的有机物特性和高锰酸钾投加量;其次,高锰酸钾的氧化中间产物新生态水合二氧化锰作为一种中间价态的产物,既具有一定的催化氧化性,同时又由于其在水中的溶解度很小,且具有较大的比表面积(刘锐平等,2005a),可吸附一部分有机物,从而去除一部分 HAA<sub>s</sub>前体物质,该作用随着高锰酸钾投量的增加而增强;再者,高锰酸钾预氧化有强化混凝去除有机物的作用.高锰酸钾预氧化可以使水中的无机胶体颗粒易于脱稳,以新生态水合二氧化锰为核心形成密实絮体,从而提高混凝工艺对水中有机物的去除效果(刘锐平等,2005b),相应去除了一部分 HAA<sub>s</sub>前体物质.以上 3 种效能的共同作用对不同水体的影响不同,与水体的有机物特性密切相关,因此,对于不同的水体可能体现不同的规律,要结合实际水体进行实验研究,合理选择高锰酸钾投加量,以免起到相反的效果.

试验原水是南方地区典型的受污染水源,具有一定的代表性.而实际净水厂的高锰酸钾投加量通常在  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间,因此,采用高锰酸钾预氧化工艺可以降低氯或氯胺消毒工艺的 HAA<sub>s</sub>生成量,提高饮用水的化学物安全性.

## 5 结论 (Conclusions)

- 1) 氯消毒生成较高浓度的卤乙酸,氯胺可降低 HAA<sub>s</sub>生成量 60% ~ 80% 左右.
- 2) 单独高锰酸钾的氧化作用对水中 HAA<sub>s</sub>前体物的去除效果受其投加量影响较大.在本试验条件下,低投量的高锰酸钾可使水中的 HAA<sub>s</sub>前体物浓度降低,高投量反而使 HAA<sub>s</sub>前体物浓度升高.
- 3) 高锰酸钾预氧化明显降低了后继氯或氯胺消毒工艺 HAA<sub>s</sub>生成量.在本试验条件下,最佳投量范围为  $0.5 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;投加  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的高锰酸钾,后继氯消毒工艺的 HAA<sub>s</sub>生成量降低了 30.9%,氯胺消毒工艺的 HAA<sub>s</sub>生成量降低了 25.3%.

## References:

- Chen C, Zhang X J, Zhu L X, *et al* 2005. Optimal process combination for control of disinfection by products and precursors [J]. *Environmental Science*, 26 (4): 87—94 (in Chinese)
- Gu P, Zhang F E, Xing G P. 1998. Reduction of chloroform in drinking water by adopting potassium permanganate [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 18 (1): 104—107 (in Chinese)
- Lin H, Song J Y, Li L. 2002. Precreation health and by-products of drinking water chlorination disinfection [J]. *Chinese Journal of Disinfection*, 19 (3): 175—178 (in Chinese)
- Liu W J. 2004. Forecast on advanced water disinfection [J]. *Water Wastewater Eng*, 30 (1): 2—5 (in Chinese)
- Li X, Yang Y L, Liu R P, *et al* 2004. Research on oxidation by-product in water treatment using potassium permanganate [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 24 (1): 56—59 (in Chinese)
- Liu R P, Yang Y L, Li G B, *et al* 2005a. Adsorptive behavior of humic acid on hydrous manganese dioxide [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25 (3): 351—355 (in Chinese)
- Liu R P, Yang Y L, Xia S J, *et al* 2005b. Surface chemistry of hydrous manganese dioxide characterization and its effectiveness of removing pollutants [J]. *Environmental Chemistry*, 24 (3): 338—341 (in Chinese)
- Moyer B, Wu J S. 1985. Removal organic precursors by permanganate oxidation and alum coagulation [J]. *Water Research*, 19 (3): 309—314
- Ma J, Li G B. 1990. Influence of permanganate pretreatment on the formation of trichloromethane in drinking water treatment [J]. *Journal of Harbin Archit & Civ Eng Inst*, 23 (1): 102—107 (in Chinese)
- Ma J, Li G B. 1993. Laboratory and full-scale plant studies of permanganate oxidation as an aid to the coagulation [J]. *Wat Sci Tech*, 27 (11): 47—54
- Singer, P C, Borchardt, J H, Colthurst J M. 1980. The effects of permanganate pretreatment on trihalomethane formation in drinking water [J]. *JAWWA*, 72 (10): 573—577
- Summers R S, Hooper S M, Shukairy H M, *et al* 1996. Assessing DBP Yield: uniform formation conditions [J]. *JAWWA*, 88 (7): 81—93
- Zhang X J, Li S. 2000. Halb-Acetic Acids as an indicator of the total carcinogenic risk of disinfection by-products [J]. *Water Wastewater Eng*, 26 (8): 1—6 (in Chinese)
- 中文参考文献:
- 陈超, 张晓健, 朱玲侠, 等. 2005. 控制消毒副产物及前体物的优化工艺组合 [J]. *环境科学*, 26 (4): 87—94
- 顾平, 张凤娥, 邢国平. 1998. 应用高锰酸钾降低水中三氯甲烷的研究 [J]. *环境科学学报*, 18 (1): 104—107
- 林辉, 宋建勇, 李莉. 2002. 氯消毒饮水的副产物与生殖健康 [J]. *中国消毒学杂志*, 19 (3): 175—178
- 刘文君. 2004. 给水处理消毒技术发展展望 [J]. *给水排水*, 30 (1): 2—5
- 李星, 杨艳玲, 刘锐平, 等. 2004. 高锰酸钾净水的氧化副产物研究 [J]. *环境科学学报*, 24 (1): 56—59
- 刘锐平, 杨艳玲, 李圭白, 等. 2005a. 腐殖酸在水合二氧化锰表面的吸附行为 [J]. *环境科学学报*, 25 (3): 351—355
- 刘锐平, 杨艳玲, 夏圣骥, 等. 2005b. 水合二氧化锰界面特性及其除污染效能 [J]. *环境化学*, 24 (3): 338—341
- 马军, 李圭白. 1990. 高锰酸钾预处理对于饮用水氯消毒过程中氯仿生成量的影响 [J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 23 (1): 102—107
- 张晓健, 李爽. 2000. 消毒副产物总致癌风险的首要指标参数—卤乙酸 [J]. *给水排水*, 26 (8): 1—6