

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.002

城市供水管网中铝形态特征分析

李 礼, 赵 蓓, 柴 文, 顾军农, 李玉仙

(北京市自来水集团有限责任公司 北京市供水水质工程技术研究中心, 北京
100192)

摘 要: 城市供水管网的水力及水质变化均会对管网水中铝的形态产生一定的影响,为了明确管网中铝的形态特征及变化规律,采用挖取的实际管段设置了不同的管段通水环境,考察管段进水和管段浸泡后出水中溶解铝、颗粒铝、总铝浓度的变化情况。结果显示,管网内水力条件较好时析出颗粒铝的概率较小;pH值升高会促进颗粒铝的溶解;新生成的颗粒铝易于被水流带出;水流停滞、pH值降低是促进颗粒铝发生析出和沉积的重要因素;非均相体系中的颗粒铝被水流带出,是导致少数龙头水总铝过高的原因。

关键词: 供水管网; 铝形态特征; 颗粒铝

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0009-05

Analysis on Morphological Characteristics of Aluminum in Urban Drinking Water Distribution System

LI Li, ZHAO Bei, CHAI Wen, GU Jun-nong, LI Yu-xian

(Beijing Engineering Research Center for Drinking Water Quality, Technology Institute of Beijing
Waterworks Group Co. Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: The hydraulic and water quality changes in the urban drinking water distribution system will have a certain influence on the form of aluminum in water. To clarify the morphological characteristics and variation rules of aluminum in the pipe network, different water supply environments were set in actual excavated pipe sections, and the changes of dissolved aluminum, particulate aluminum and total aluminum concentrations in the influent and effluent after soaking of the pipe sections were investigated. When the hydraulic condition in the pipe network was good, the probability of precipitation of particulate aluminum was small. The rise of pH promoted the dissolution of particulate aluminum. The newly formed particulate aluminum was easily carried out by the water flow. The stagnation of water flow and the decrease of pH were the key factors promoting the precipitation and deposition of particulate aluminum. The precipitated particulate aluminum in heterogeneous system was carried out by water flow, which led to high total aluminum concentration in a few tap water.

Key words: drinking water distribution system; aluminum morphological characteristics; particulate aluminum

饮用水中残余铝的问题早已引起了关注,如高佳丽等^[1]的研究显示,城市中部分自来水水样存在

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108002)

铝浓度偏高甚至铝超标的问题;张玥等^[2]的研究认为管网中管垢及含铝沉积物是导致铝超标的原因;而赵园园等^[3]、王文东等^[4]的研究表明,pH值、水温等众多水质因素均会影响管网中铝的形态;胡芳等^[5]调查了供水系统中铝形态的分布情况,但目前尚无研究明确阐述铝形态在整个城市供水管网中的变化规律。M市为多水源供水的典型城市,该市既有以地表水为水源的自来水厂,也有以地下水为水源的自来水厂。同时该市具有大型供水管网,不同水厂出厂水在管网中既有混合区又有各自相对稳定的供水区域,其管网水质情况复杂多变。笔者在前期研究中对该市水厂和管网的大量监测点实测数据进行了分析,认为管网中的水力及水质变化会导致出厂水中的残余铝在管网中发生沉淀-溶解的相互转化,最终导致不同管网点水样中的总铝浓度有较大差异^[6]。为了验证该规律并明确城市供水管网中铝形态的特征,笔者设计了相应的管段试验,考察M市实际供水管网水质条件下铝形态的变化规律及特征。

1 材料与方法

1.1 试验装置

挖取M市实际供水管网中的甲、乙两根具有不同通水水质特征的管段。甲管段原通水以地下水为水源并以次氯酸钠作为消毒剂,乙管段原通水以地表水为水源并以氯胺作为消毒剂。将各管段的两端封闭,设置一端为进水口,另一端为出水口。试验装置如图1所示。

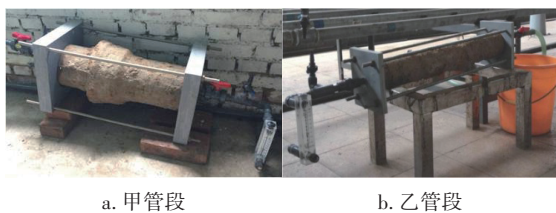


图1 试验装置

Fig.1 Schematics of test device

1.2 试验方案

将M市某地表水厂的炭滤池出水分别投加两种不同的消毒剂(次氯酸钠和氯胺)后通入甲、乙两根管段,两两组合得到4种通水水质条件,见表1,其中氯胺1和其他氯胺浓度不同。

M市实际供水管网中的水质按不同水厂处理工艺可分为三类:地下水+次氯酸钠消毒、地表水+次

氯酸钠消毒、地表水+氯胺消毒,这三类出厂水在管网内存在多种混合情况,各水厂供水量的变化将导致同一管段在不同时刻通水水质发生改变。本试验所模拟的管段通水环境力求尽可能贴近真实管网内的混合情况,但由于管段挖取条件及试验用水条件所限,暂设置了表1中的4种通水环境,其中既包含了管内通水水质不变的情况(C),也包含了通水由地下水变为地表水以及消毒方式改变的情况(A、B、D),借此进行试验来反映真实管网中可能发生的铝形态变化规律,具有一定的代表性。

表1 试验管段通水环境设置情况

Tab.1 Setting of water supply environment in test pipe sections

试验 编号	管段 名称	历史通水环境		试验通水环境	
		水源 类别	消毒方式	水源 类别	消毒方式
A	甲	地下水	次氯酸钠	地表水	次氯酸钠
B	甲	地下水	次氯酸钠	地表水	氯胺
C	乙	地表水	氯胺	地表水	氯胺
D	甲	地下水	次氯酸钠	地表水	氯胺1

试验开始时按4种通水环境分别持续通水至管段出口溢流数分钟,此时在进、出水口同时取水样,分别记为进水水样和0 h出水水样。然后关闭进、出口使水静止在管内开始浸泡,6 h后在出水口取水样,记为6 h出水水样。测定进水、0 h出水、6 h出水水样的总铝及溶解铝浓度,并计算颗粒铝浓度。另外,选择通水环境A和B记录进水、0 h出水、6 h出水水样的pH值,考察管段中铝形态变化与pH值的关系。试验选择浸泡的形式来模拟实际管网中水流停滞这种极端条件,旨在放大管网水力及水质变化对铝形态的影响。

1.3 样品检测方法

本试验将总铝形态分为溶解铝和颗粒铝两部分。铝元素含量采用原子吸收光谱仪进行测定。颗粒态或溶解态的判断标准以是否能够通过0.45 μm水系玻璃纤维膜为准,能够通过该膜的为溶解铝。总铝是指溶解铝和颗粒铝的总和,其测定方法:向水样中加入浓硝酸使pH值<2,直接进行检测。溶解铝的测定方法:水样先用0.45 μm水系玻璃纤维膜过滤,向滤液中加入浓硝酸使pH值<2,然后进行检测。颗粒铝浓度采用总铝浓度减去溶解铝浓度得出。本研究未对溶解铝与颗粒铝各自所

包含的具体形态结构进行进一步的区分。

2 结果与讨论

2.1 试验管段中铝形态的变化规律

2.1.1 溶解铝的变化规律

不同通水环境下各管段水样中溶解铝浓度的变化如图2所示。可以看出,在4种通水环境下,浸泡6 h后的溶解铝浓度均比进水溶解铝浓度有所降低,但0 h出水中的溶解铝浓度相比进水在多数情况下均有小幅升高(通水环境A、B、C)。推测原有管段管垢中可能已存在一定量的不定形铝,水流在快速通过管段时可能会有少量铝溶解,但随着水流在管段内停滞下来,6 h后溶解铝的总体趋势是向颗粒铝转化,使得溶解铝浓度降低。

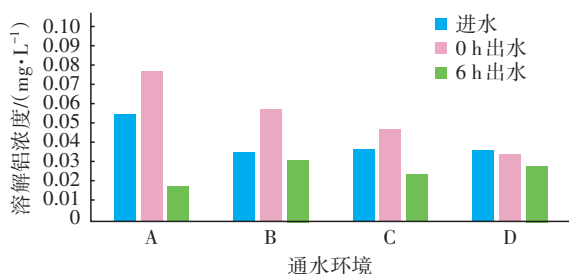


图2 不同通水环境下溶解铝浓度的变化

Fig.2 Change of dissolved aluminum concentration under different water supply environment

2.1.2 颗粒铝的变化规律

通水后管段中的颗粒铝包含三部分:管内已有颗粒铝 $P_{管}$ 、进水本身含有的颗粒铝 $P_{进}$ 、由进水溶解铝转化而来的颗粒铝 $P_{转}$ 。经6 h静置沉降后,这三部分颗粒铝在取样时会出现两种极端情况:完全被带出或完全不被带出,这取决于取样时的水流大小、放水时间长短等水力条件。可以预见,在实际管网中,用户放出的龙头水大多数情况会介于两者之间,即有部分颗粒铝被带出。试验条件下颗粒铝浓度的变化如图3所示。可以看出,进水中的颗粒铝浓度均很低(当颗粒铝浓度 ≤ 0.0001 mg/L时可以认为未检出颗粒铝),6 h后取样时 $P_{出}$ 浓度在4种通水环境下大都高于 $P_{进}$ 浓度(通水环境A、C、D),其中在通水环境A、C条件下 $P_{出}$ 浓度略有升高,而在通水环境D条件下 $P_{出}$ 浓度明显升高,高达0.323 mg/L。在个别条件下如通水环境B,6 h出水的 $P_{出}$ 浓度低于 $P_{进}$ 浓度,这可能是因为取样时流量平稳导致沉淀作用明显,带出的颗粒铝数量极少,小于进水中所含有的量。

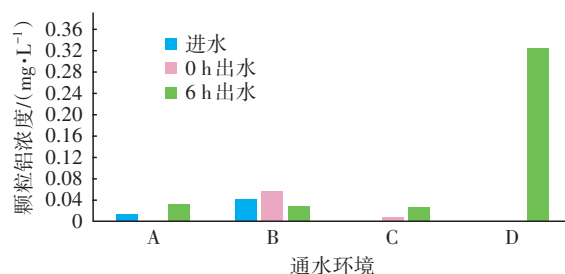


图3 不同通水环境下颗粒铝浓度的变化

Fig.3 Change of particulate aluminum concentration under different water supply environment

2.1.3 总铝的变化规律

总铝是溶解铝和颗粒铝之和。进水溶解铝记为 $D_{进}$,若其中部分转化为颗粒铝,转化后溶解铝记为 $D_{转}$ 、颗粒铝记为 $P_{转}$,则有 $D_{进}=D_{转}+P_{转}$,6 h后的总铝量为 $D_{转}+P_{出}$,既取决于浸泡时溶解铝的变化,又取决于取样时被带出的颗粒铝 $P_{出}$ 的多少, $P_{出}$ 中可能含有 $P_{管}$ 、 $P_{进}$ 、 $P_{转}$ 中的一种或几种,如果 $P_{出}$ 在数量上恰好等于 $P_{进}+P_{转}$,那么总铝应该保持不变,容易估计,实际管网中水龙头放出的水样一般不会碰巧出现恰好相等的情况。从图4的试验结果来看,在通水环境A、B条件下,浸泡6 h后总铝浓度降低了,说明浸泡后取样时的 $P_{出}<(P_{进}+P_{转})$,也即颗粒铝的带出作用小于沉淀作用,此时总铝浓度是降低的;反之,如通水环境C、D所示,颗粒铝的带出作用大于沉淀作用,所以总铝浓度升高了。通水环境D条件下总铝浓度升高幅度较大,这是因为其中所含的颗粒铝量很高,如图3所示,带出的颗粒铝 $P_{出}$ 已达0.323 mg/L,已远远大于 $P_{进}+P_{转}$,因此,出水总铝浓度大幅度升高。

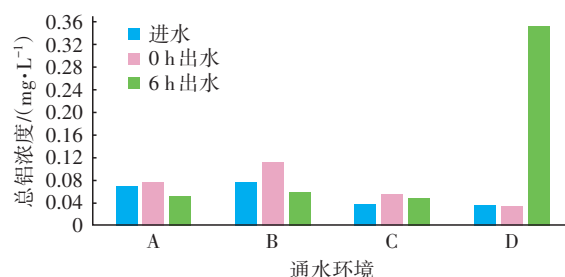


图4 不同通水环境下总铝浓度的变化

Fig.4 Change of total aluminum concentration under different water supply environment

2.2 pH值对铝形态转化的影响

pH值是影响水中铝形态的重要因素。当温度为25℃且pH值 >7 时,若体系中有固相的 $Al(OH)_3(s)$

(即颗粒铝)存在,那么它的浓度和溶解态的主要物种 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (即溶解铝)存在一个平衡。pH 值升高,体系中本来存在的颗粒铝将向溶解铝转化,导致溶解铝浓度升高。某 pH 值下溶解铝的理论值可通过平衡常数计算得到。试验记录了通水环境 A、B 条件下各取样点的 pH 值,计算了该 pH 值下溶解铝的理论平衡浓度值 $C_{\text{Al},t}$,并计算了进水至 0 h 出水以及 0 h 出水至 6 h 出水的溶解铝理论可变值 $\Delta C_{\text{Al},t}$,结果见表 2。

表2 通水环境 A、B 条件下的 pH 值、 $C_{\text{Al},t}$ 及 $\Delta C_{\text{Al},t}$

Tab.2 pH, $C_{\text{Al},t}$ and $\Delta C_{\text{Al},t}$ under water supply environment A and B

项 目	通水环境 A			通水环境 B		
	pH 值	$C_{\text{Al},t}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\Delta C_{\text{Al},t}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	$C_{\text{Al},t}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\Delta C_{\text{Al},t}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	7.090	0.066		7.004	0.054	
0 h 出水	7.395	0.134	0.068	7.231	0.092	0.038
6 h 出水	7.560	0.196	0.062	7.316	0.112	0.020

在通水环境 A、B 两种情况下,管段 0 h 出水的 pH 值均比进水略有升高(管段通水时会控制一定的进水流量,水流从管段进水端到出水端直至溢出的充满过程,实际上存在一定的管内停留时间,水流并不是瞬间通过,因此,与进水水样相比,出口处 0 h 水样的 pH 值发生变化是可能的),而且 0 h 出水 $C_{\text{Al},t}$ 均比进水 $C_{\text{Al},t}$ 要高,分别升高了 0.068、0.038 mg/L。而实测 A、B 两种情况下溶解铝的浓度 $C_{\text{Al},m}$ 均升高了 0.022 mg/L (见表 3)。可见实测升高情况与理论计算的变化趋势相同,且其数值也在理论变化范围内,试验结果能够反映 pH 值对铝形态的影响。关于工艺中溶解铝浓度与 pH 值的关系在黄昌飞^[7]的研究中也有相同的结论。

表3 通水环境 A 和 B 条件下的 $C_{\text{Al},m}$ 及 $\Delta C_{\text{Al},m}$

Tab.3 $C_{\text{Al},m}$ and $\Delta C_{\text{Al},m}$ under water supply environment A and B $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	通水环境 A		通水环境 B	
	$C_{\text{Al},m}$	$\Delta C_{\text{Al},m}$	$C_{\text{Al},m}$	$\Delta C_{\text{Al},m}$
进水	0.054		0.035	
0 h 出水	0.076	0.022	0.057	0.022
6 h 出水	0.017	-0.059	0.031	-0.026

另外,观察浸泡 6 h 后的情况,A、B 两种情况下 pH 值继续上升(见表 2),然而实测溶解铝浓度却降低了(见表 3)。这是因为,随着水流停滞时间的

延长,管段中的铝晶体结构发生了相变,新沉淀的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 老化变得不易溶解。在相同的 pH 值条件下,老化的沉淀溶解度更低,因此 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 会析出。有关溶解铝在输配水过程中继续进行水解聚合导致析出沉积的说法,在 Zhang 等人^[8]和 Snoeyink 等人^[9]的研究中也曾出现过。试验结果显示, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 析出量已经高于 pH 值升高所能溶解的量,导致最终的溶解铝浓度是下降的,这与图 2 的结果一致。

pH 值变化对铝形态的影响只能用溶解铝浓度变化来验证而不能用颗粒铝,是因为一旦体系中出现不溶的颗粒铝,该体系即成为非均相体系,颗粒铝浓度不均匀,检测时所取的样品一般只是体系中的一部分,因此样品中颗粒铝浓度是受取样影响的,其浓度取决于取样时颗粒铝的悬浮条件,水流缓慢平稳则不容易被取出。而总铝为溶解铝与颗粒铝之和,因而也不能用来验证该影响。

2.3 铝形态变化规律统计与特征分析

综上,由于试验使用了 M 市的真实管段和实际出厂水,且模拟的通水环境包含了该市实际管网的大部分通水环境,因此通过统计铝形态的各种变化出现在这 4 种通水环境下的概率,可以对 M 市真实管网内的铝形态特征进行如下推测分析:

① 通过观察溶解铝的变化发现:4 种通水环境下,静置后的水样溶解铝浓度均有降低,说明在实际管网中无论何种通水水质条件,只要在水流停滞的时间或空间内,就有较大概率溶解铝会向颗粒铝转化,即使 pH 值升高,这种向颗粒铝的转化也是存在的。另外,根据 pH 值检测结果推测,当不存在水流停滞时,管网水中的溶解铝浓度则受 pH 值影响较大,在水流速度较快、pH 值升高时,管网水中已有的颗粒铝或管垢中的颗粒铝可发生溶解。

② 通过观察颗粒铝的变化发现:静置后的水样中颗粒铝浓度比进水颗粒铝浓度降低的情况是少数,而升高是多数情况。可以推测,在供水管网中产生的颗粒铝有易于被水流带出的特性,不容易沉降累积,只有在少数情况下,比如管段内水流停滞、龙头水流极其平稳时,颗粒铝才有机会沉积在管段内。

③ 通过观察总铝的变化发现:在几种通水环境下并在水流停滞时,出水总铝浓度相比进水有升降,并无多数升高或多数降低的趋势,原因在于,总铝是溶解铝和颗粒铝之和,龙头出水的总铝浓度

既取决于 $D_{\text{转}}$ 又取决于 $P_{\text{出}}$,而 $P_{\text{出}}$ 的多少是导致总铝出现大幅度变化的主要因素。可以推测,当既存在颗粒铝又被大量带出的情况下,龙头水总铝浓度才会大幅升高。

3 结论

① 当供水管网内水力条件较好、水流无严重停滞且管网整体pH值较高(高于出厂水pH值)时,管网内析出颗粒铝的概率较小。管网内水流停滞、pH值降低是促进颗粒铝析出、沉积的重要因素。

② 若管网内已存在析出的颗粒铝,当其所在区域的pH值升高时这些颗粒铝还有机会溶解,若来不及溶解,仍然是易于被水流带出的,因此颗粒铝在管网中并不易于沉降累积,这对于保证供水管网龙头水总铝达标是有利的。

③ 虽然颗粒铝不易于沉降累积,但在少数管网水力条件差的时间、空间内仍会发生析出,而析出后的管网水成为非均相体系,颗粒铝浓度不均匀,若检测到的少数龙头水总铝过高,其原因可能是由于取样带出了较多的颗粒铝。

参考文献:

- [1] 高佳丽,刘泉利,宋来洲,等. 东部地区农村供水管网中铝含量及形态分析[J]. 给水排水, 2019, 45(6): 120-125.
GAO Jiali, LIU Quanli, SONG Laizhou, *et al.* The content and existing form of aluminum in rural water distribution system in Eastern China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(6): 120-125 (in Chinese).
- [2] 张玥,石宝友,宛云杰,等. 给水管网管垢中铝的分布特征及其来源分析[J]. 给水排水, 2015, 41(9): 151-156.
ZHANG Yue, SHI Baoyou, WAN Yunjie, *et al.* Analysis on the distribution and source of aluminum in pipe scale of water distribution system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(9): 151-156 (in Chinese).
- [3] 赵园园,张玥,李素英,等. 聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3870-3876.
ZHAO Yuanyuan, ZHANG Yue, LI Suying, *et al.* Effect of polysilicic acid on the deposition behavior of different aluminum species [J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 3870-3876 (in Chinese).
- [4] 王文东,杨宏伟,蒋晶,等. 水温和pH对饮用水中铝形态分布的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2259-2262.
WANG Wendong, YANG Hongwei, JIANG Jing, *et al.* Effects of temperature and pH on the distribution of aluminum species in drinking water [J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2259-2262 (in Chinese).
- [5] 胡芳,李伟,王兰,等. 黄河下游地区多水源供水系统中铝形态分布[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 49-53.
HU Fang, LI Wei, WANG Lan, *et al.* Aluminum species distribution in water supply system with multiple source in lower reaches of Yellow River [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 49-53 (in Chinese).
- [6] 李礼,郑鹏,赵蓓,等. 城市管网终端给水点总铝浓度差异分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7): 32-36.
LI Li, ZHENG Peng, ZHAO Bei, *et al.* Difference analysis of total aluminum concentration at terminal node of urban water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7): 32-36 (in Chinese).
- [7] 黄昌飞. 某净水厂各工艺段出水中铝元素转化规律研究[J]. 净水技术, 2017, 36(S1): 22-24.
HUANG Changfei. Study on the transformation of aluminum in each water treatment process in water purification plant [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(S1): 22-24 (in Chinese).
- [8] ZHANG Y, SHI B, ZHAO Y, *et al.* Deposition behavior of residual aluminum in drinking water distribution systems: effect of aluminum speciation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 42(4): 142-151.
- [9] SNOEYINK V L, SCHOCK M R, SARIN P, *et al.* Aluminum-containing scales in water distribution systems: prevalence and composition [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology, 2003, 52(7): 455-474.

作者简介:李礼(1982-),女,北京人,大学本科,高级工程师,主要从事给水处理相关技术研究。

E-mail:cafesarah@163.com

收稿日期:2020-10-12

修回日期:2021-01-22

(编辑:刘贵春)