

北京某水厂模拟管网内部腐蚀特性分析

黄凯锋, 刘文君

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 以北京市某大型水厂活性炭滤后水为原水, 构建了两套流量均为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 的非循环管网模拟系统(分别采用间歇运行和连续运行), 考察了两系统的管网内部腐蚀特性。结果表明, 当管垢层趋于稳定时, 管垢中的亚铁/总铁值为 $30\% \sim 70\%$, 且在相同的管径下, 间歇运行的管网其管垢中的亚铁含量比连续运行的管网要高; 垢层中所含的元素有 Zn、Fe、Ca、S、Si, 其中以 Zn 和 Fe 为主; 管垢中的腐蚀产物部分是以晶体状态存在的, 晶体的成分主要为 $\alpha\text{-Fe}(\text{OH})_2$ 、 Fe_2O_3 、 CaCO_3 、 CaSiO_3 及其络合产物; 管道的腐蚀速率随水温 and 流速的提高而加快, 间歇运行管网的管道腐蚀速率比连续运行的快。

关键词: 管网模拟系统; 管道腐蚀; 管垢; 腐蚀速率

中图分类号: TU991 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2007)13-0063-03

Analysis of Internal Corrosion Characteristic of Simulated Pipe-loop Systems in a Waterworks in Beijing

HUANG Kai-feng, LIU Wen-jun

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Taking the treated water of GAC filter in a large-scale waterworks in Beijing as raw water, two non-circulating simulated pipe-loop systems with each flow rate of $3 \text{ m}^3/\text{h}$, operated intermittently and continuously were set up, and their internal corrosion characteristics were investigated. The results show that when the pipe scale tends to be stable, the proportion of Fe^{2+} to total Fe is between 30% and 70% . Under the condition of same diameter, the ferrous content of pipe scale in the intermittently operated system is higher than that in the continuously operated system. The EDS examination indicates that the elements in pipe scale include Zn, Fe, Ca, S and Si, most of them are Zn and Fe. Some of pipe scale are crystals, and the components of crystal include goethite, magnetite, calcium carbonate, wollastonite and their complexes. Moreover, the corrosion rates of the systems rise with the water temperature and flow rate, and the corrosion rate in the intermittently operated system is faster than that in the continuously operated system.

Key words: simulated pipe-loop system; pipe corrosion; pipe scale; corrosion rate

笔者以北京市某大型水厂的活性炭滤后水为试验原水, 构建了两套流量均为 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 的非循环管网模拟系统, 考察了两套模拟管网的内部腐蚀特性。其中系统 A 为模拟实际管网中居民的用水规律(每天 3 个用水高峰, 每个高峰按 2h 计)而采用间歇运行; 系统 B 则为连续运行。A、B 两套系统的管材均为镀锌钢管, 每套系统均由管径分别为 DN32 和 DN40 的管段连接而成。

1 试验水质分析

以北京市某水厂活性炭滤后水为试验原水, 其水质如表 1 所示。

表 1 原水水质参数
Tab. 1 Quality of raw water

指标	温度/ ℃	pH	Ca ²⁺ 浓 度/(mg · L ⁻¹)	Mg ²⁺ 浓 度/(mg · L ⁻¹)	TDS/ (mg · L ⁻¹)	总硬度/ (mg · L ⁻¹)	总碱度/ (mg · L ⁻¹)
范围	3 ~ 11	7.71 ~ 7.99	112 ~ 140	62 ~ 78	209 ~ 283	178 ~ 216	140 ~ 155
注：表中数据为 2005 年 9 月—2006 年 2 月的监测数据；Ca ²⁺ 浓度、Mg ²⁺ 浓度、总硬度、总碱度均以 CaCO ₃ 计。							

通过 Langelier 饱和指数 (LSI) 和 Ryznar 稳定指数 (RSI) 来判断原水的腐蚀或结垢倾向。

$$LSI = pH_a - pH_s \quad (1)$$

式中 pH_a ——水的实测 pH 值

pH_s ——在实际水质条件下, CaCO₃ 达溶解平衡时的 pH 值

当 $LSI > 0$ 时, 原水有结垢倾向; 当 $LSI < 0$ 时, 原水有腐蚀倾向。

$$RSI = 2 pH_s - pH_a \quad (2)$$

当 $RSI \leq 6$ 时, 原水有结垢倾向; 当 $RSI = 6 \sim 7$ 时, 原水水质基本稳定; 当 $RSI \geq 7$ 时, 原水有腐蚀倾向^[1]。

经计算得到原水的 LSI 及 RSI 值, 见表 2。

表 2 原水的 LSI 及 RSI 值
Tab. 2 LSI and RSI of raw water

取样 时间	2005 年 9 月	2005 年 10 月	2005 年 11 月	2005 年 12 月	2006 年 1 月	2006 年 2 月
LSI	0.011	-0.037	0.060	0.217	-0.099	0.106
RSI	7.718	7.854	7.760	7.555	7.948	7.768

由表 2 可见, 原水的 LSI 指数缺乏规律性, 但 RSI 指数均大于 7.5, 表现为腐蚀型水质。从管网模拟系统的运行情况来看, 两套系统的管道内均发生了不同程度的腐蚀, 由此可以判断试验原水属腐蚀型水质。

2 管垢分析

管网模拟系统于 2005 年 11 月正式运行, 4 个月后, 管网内壁已初步形成管垢, 试验管段满足取样要求。

2.1 形貌观察

取管网模拟系统管道内表面的沉积物(统称为管垢), 在常温下真空烘干后进

行扫描电镜(HITA-CHI S450)观察，结果见图 1.

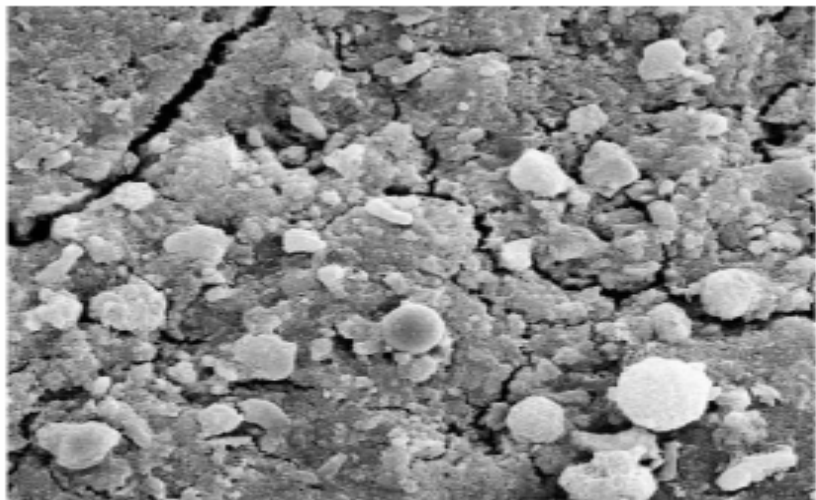


图 1 管垢扫描电镜图

Fig. 1 SEM photo of pipe scale

由图 1 可见，烘干后的管垢表面有龟裂状缝隙，表明管垢已具有相当的厚度。另外，管垢表面凹凸不平，并有一定数量的固体颗粒-}x}附于其表面。值得注意的是，大量的球状白色颗粒也吸附于管垢表面，其直径均为 3-10 μm ，远大于球菌的直径(0.2--0.7 μm)，可能是管垢表面的物质与水中物质发生反应的产物。

2.2 管垢中亚铁离子占总铁的比例

刮取一定量的管垢，迅速将其放入 300 mL 去离子水中，加入 20 mL 浓 HCl，密封保存，在尽可能短的时间内测定亚铁和总铁含量。

自 2006 年 2 月—10 月，每月从系统 A,B 中分别选取 DN40 和 DN32 的管道各一根，测定其管垢中亚铁离子占总铁的比例，结果如图 2 所示。

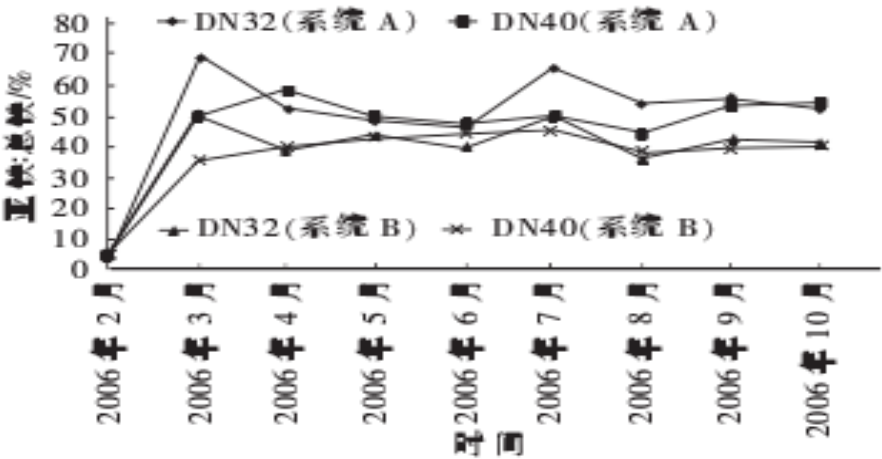


图 2 管垢中亚铁与总铁的比例

Fig. 2 Ratio of Fe^{2+} to Fe in pipe scale

由图 2 可见，2006 年 2 月，系统 A,B 管垢中的亚铁/总铁值最低(< 5%) ;2006 年 3 月以后两系统管垢中的亚铁含量明显增高，亚铁/总铁值稳定在 30% ~ 70%; 相同管径下，系统 A 管垢中的亚铁含量比系统 B 的高。

2.3 能量电镜分析

将管壁上的管垢用刮刀慢慢刮落，对其进行能量电镜(energy dispersive

spectroscopy, EDS)分析。结果表明,垢层中所含的元素有 Zn,Fe,Ca,S,Si.各元素的质量分数如表 3 所示。

表 3 垢层中元素的质量分数

Tab. 3 Mass fraction of element in corrosion scale %

元素	质量分数
Fe	11.29
Zn	85.48
Ca	0.92
S	0.99
Si	1.32

由表 3 可见,垢层中的元素以 Zn,Fe 为主;其中 Zn 元素的质量分数为 85.48%,表明有大量的 Zn 释放到管垢中,镀锌钢管的内壁保护层遭到破坏,管壁易发生腐蚀;铁元素的质量分数为 11.29%,表明管件已发生锈蚀;Ca,Si 的出现验证了管道结垢现象,其可能的结垢产物为 CaCO_3 及 CaSiO_3 ;由于原水中没有检测到 S 元素,而 EDS 分析中检测到了 S 元素,故可以推断管壁上发生了微生物腐蚀,且腐蚀管壁的微生物中有硫酸盐还原菌存在。

2.4 X 射线衍射分析

EDS 分析虽然可大致了解管垢中的主要元素,但无法了解其中的化合物组成,为此对管垢样品进行了 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析。结果表明,管垢中的腐蚀产物部分是以晶体状态存在的,其晶体成分主要为 $\alpha\text{-Fe}(\text{OH})_2$, Fe_2O_3 , CaCO_3 、 CaSiO_3 及其络合产物。晶体结构腐蚀产物的形成,说明了稳定的垢层已形成。

3 腐蚀速率分析

试验中每月对系统 A,B 中不同管径的管段进行一次腐蚀速率的测定和计算[2,3],并对月平均水温进行记录,结果如图 3 所示。

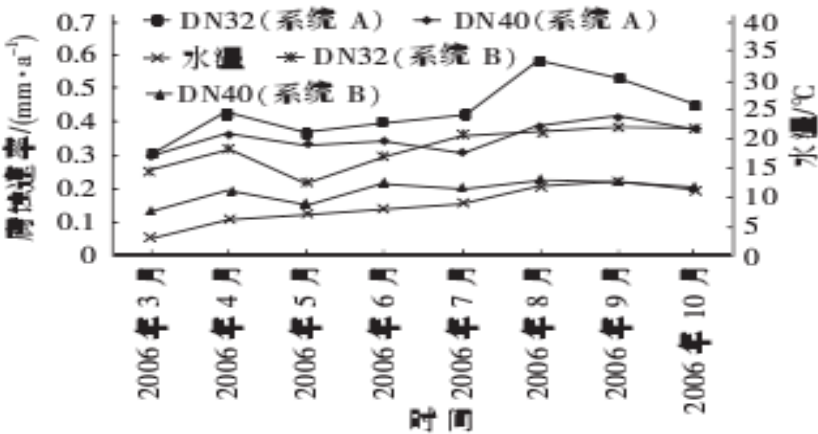


图 3 腐蚀速率与温度的关系

Fig. 3 Relationship between corrosion rate and temperature

由图 3 可见,管道的腐蚀速率随着水温的上升而加速;相同管径下,间歇运行管网模拟系统的管道腐蚀速率比连续运行管网模拟系统的要快;同一管网模拟系统中流速大的管道,其腐蚀速率比流速小的管道要快。

4 结论

①该水厂活性炭滤后水的 LSI 指数缺乏规律性, 但 RSI 值均大于 7.5, 表现为腐蚀型水质; 结合管网模拟系统的腐蚀现状, 判断试验原水为腐蚀型水质。

②当管垢层趋于稳定时, 两系统管垢中的亚铁/总铁值基本稳定在 30%-70%; 相同管径下, 间歇运行的管网其管垢中的亚铁含量比连续运行的管网要高。

③垢层中所含的元素有 Zn, Fe, Ca, S, Si, 其中以 Zn 和 Fe 为主。

④管垢中的腐蚀产物部分是以晶体状态存在的, 晶体的成分主要为 α -Fe(OH)₂, Fe₂O₃, CaCO₃、CaSiO₃ 及其络合产物。

① 管道的腐蚀速率随水温 and 流速的升高而加速; 间歇运行的管网, 其管道腐蚀速率比连续运行的管网要快。

参考文献:

- [1] Snoeyink V L, Jenkins D. Water Chemistry[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1980.
- [2] Liang M T, Yang R J. Theoretical elucidation on the on-site measurements of corrosion rate of reinforcements[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(3): 175 - 180.
- [3] Tan Yong-jun. An experimental comparison of three wire beam electrode based methods for determining corrosion rates and patterns[J]. Corros Sci, 2005, 47(7): 1653 - 1665.

电话: (010) 62775362

E-mail: hkf03@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2007-02-12