

DOI:10.13205/j.hjgc.202404007

张倬玮,薛松,巫寅虎,等.我国城镇供热管网输配再生水的应用前景与风险管控分析[J].环境工程,2024,42(4):58-65.

我国城镇供热管网输配再生水的应用前景与风险管控分析

张倬玮^{1,2} 薛松^{1,2,3,4} 巫寅虎^{1,2} 孙博⁵ 管运涛⁶ 胡洪营^{1,2*}

(1.清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室,北京 100084; 2.环境前沿技术北京实验室,北京 100084; 3.中建环能科技股份有限公司,成都 610045; 4.中建环能(北京)环保有限公司,北京 100043; 5.太原市热力集团有限责任公司,太原 030027; 6.清华大学深圳国际研究生院,广东 深圳 518055)

摘 要:为解决当前我国再生水管网建设滞后难题,提高再生水利用效率,提出了利用供热管网输配再生水,分析了我国供热管网输配再生水的应用前景,识别了风险类型和主要风险因子,提出了管控措施建议。结果表明:化学腐蚀、生物腐蚀、结垢和“黄水”是供热管网输配再生水的主要风险。A 级再生水是供热管网补水的优选水源。pH、无机盐和有机物是供热管网输配再生水用于工业的风险因子,营养物质、重金属是用于景观环境、城镇杂用和农业的风险因子。软化、脱氧和去除有机物是供热管网输配再生水风险管控必备措施。去除营养物质,控制重金属,降低拉森指数,按比例切换水源是各情景的针对性风险管控关键点。结合太原市水质分析了主要应用情景与管控措施的可行性,可为城镇供热管网输配再生水提供理论依据和技术参考。

关键词:再生水;供热管网;应用前景;风险;管控

ANALYSIS OF APPLICATION SITUATIONS AND RISK CONTROL FOR RECLAIMED WATER DISTRIBUTION BY MUNICIPAL HEAT-SUPPLY NETWORKS IN CHINA

ZHANG Zhuowei^{1,2}, XUE Song^{1,2,3,4}, WU Yinhu^{1,2}, SUN Bo⁵, GUAN Yuntao⁶, HU Hongying^{1,2*}

(1. Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control (SMARC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Laboratory for Environmental Frontier Technologies, Beijing 100084, China; 3. CSCEC SCIMEE Sci. & Tech. Co., Ltd., Chengdu 610045, China; 4. CSCEC SCIMEE (Beijing) Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100043, China; 5. Taiyuan Thermal Group Co., Ltd., Taiyuan 030027, China; 6. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To solve the current problem of lagging construction of reclaimed water-supply networks in China, the distribution of reclaimed water using heat-supply networks was proposed. The application situations of reclaimed water distribution through a heat-supply network were analyzed, and the risk types and factors were identified, and then the control methods also were proposed. Chem-corrosion, bio-corrosion, scaling and *yellow water* were the main risks of the reclaimed water distribution by heat-supply network. Reclaimed water with grade A level could be the preferred water source for the heat-supply replenishment. The risk factors of the reclaimed water distribution by the heat-supply network for industrial reuse mainly included pH, inorganic and organic matters. Besides the above risk factors, nutrients and heavy metals were also included for

收稿日期:2023-03-24

基金项目:太原市国家可持续发展议程创新示范区建设专项(KCX2020-3-07)

第一作者:张倬玮(1992-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为水处理与再生利用理论与技术。zhangzw9292@163.com

* 通信作者:胡洪营(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为再生水水质安全评价与风险控制。hyhu@tsinghua.edu.cn

the landscape environment, municipal and agricultural reuse. The essential control methods of the reclaimed water distribution by the heat-supply network were water softening, de-oxygen, and organic matter removal. In addition, the key control points for each situation were the removal of nutrients and heavy metals, reduction of Larsen index, and proportional switching of water sources. Then the feasibility of above application situations and control methods was analyzed in a case in Taiyuan as an example. It could provide theoretical basis and technical reference for the reclaimed water distribution by the heat-supply network.

Keywords: reclaimed water; heat-supply network; application situations; risk; control

0 引言

当前,我国面临水资源分布不均、水资源短缺和水环境污染等突出问题。加强污水再生利用是解决上述问题,保证经济社会可持续高质量发展的必要手段,已受到广泛关注^[1,2]。2021 年由十部委发布的《关于推进污水资源化利用的指导意见》^[3]指出,“到 2025 年全国地级及以上缺水城市再生水利用率达到 25% 以上,京津冀地区达到 35% 以上。缺水城市新建城区要因地制宜提前规划布局再生水管网,有序开展相关建设”。该文件为推进污水再生利用提供了目标。

健全再生水输配管网设施是保障再生水利用的重要基础和必要条件,而目前我国再生水管网建设严重滞后,已成为制约再生水利用的关键瓶颈。因此,保证再生水高效输配是实现再生水利用目标亟须解决的关键问题。与再生水管网相比,我国城镇供热管网具有覆盖范围广、周期使用性等特点^[4]。在供暖季或者非供暖季利用再生水作为供热管网的补水,或者通过城镇供热管网输配再生水用于工业企业、景观环境、城市杂用等途径,实现供热管网对再生水和供热管网水安全、灵活输配,能够降低城市再生水管网建设费用,充分提高供热管网利用率,提升再生水利用量,对于破解当前我国再生水管网建设严重滞后难题、推动再生水高效利用、助力城市绿色可持续发展具有十分重要的意义。

本文系统分析了城镇供热管网输配再生水用于供热管网补水、工业利用、农业利用、景观环境利用和城市杂用等不同应用情景的可行性,识别不同应用情境的风险类型和关键风险因子,归纳控制难点,提出风险管控要点和应用技术,以太原市为案例分析应用情景与管控措施的可行性,以期城镇供热管网输配再生水提供理论依据和技术参考。

1 我国城镇再生水输配管网与供热管网现状对比

根据我国 2021 年城乡建设统计年鉴结果^[5],2011—2021 年,我国城镇再生水与供热管网总长度

变化见表 1。2021 年我国各省、自治区、直辖市的再生水和供热管网长度及再生水利用情况见表 2。由表 1 可知:近 11 年,我国再生水管网建设总长度从 5851 km 增加至 15291 km,仅增加了 1.6 倍,而再生水生产能力从 2193.5 万 m³/d 增加至 7134.6 万 m³/d,提高了近 2.3 倍(表 2)。可见我国再生水管网的建设已严重滞后于再生水生产能力的发展,阻碍了再生水利用效率的提高。

表 1 我国再生水管网与城镇供热管网长度
Table 1 Length of heat-supply network and reclaimed water-supply network in China

年份	再生水管网长度/km	供热管网长度/km
2011	5851	133957
2012	6440	147390
2013	7193	165877
2014	7498	174708
2015	8499	192721
2016	9031.1	201389
2017	12893	276288
2018	10339	371120
2019	12140	392917
2020	14630	425982
2021	15291	461493

相比之下,我国城镇供热管网规模发展迅速,覆盖率和服务面积提升明显(表 1、表 2)。截至 2021 年底,城镇供热管网长度达到 4.61493×10^5 km,城区覆盖率已在 90% 以上,服务面积达到 1.06×10^{10} m²。由表 2 可知:目前我国至少有 23 个省、自治区、直辖市已建设供热管网,其中北京、天津、山西、黑龙江等 20 个省、自治区、直辖市的供热管网长度是再生水管网的 10 倍以上。另外,我国城镇供热管网的使用具有周期性,建设具有地域性。具体表现为:平均每年使用期为 4 个月,闲置期为 8 个月。使用期间,再生水可作为供热管网补水,闲置期期间,供热管网输配再生水可用于工业利用、景观环境、城镇杂用和农业利用。北方缺水地区的供热管网建设更加完善,如山西省供热管网长度达到 23320 km,是再生水管网的 40.2 倍。我国再生水需求高的地区供热管网则更加

表 2 我国各省、自治区、直辖市供热管道长度、再生水管道长度和再生水利用情况

Table 2 Length of the heat-supply network, reclaimed water-supply network, and utilization of reclaimed water in each province, autonomous region and municipality in China						
序号	地区	供热管网长度/ km	再生水管网长度/ km	污水处理总量/ 万 m ³	再生水生产能力/ 万 m ³ /d	再生水利用率/ %
1	北京	65376	2165	205971.45	707.9	26.78
2	天津	35145	1965	114972	172.2	33.72
3	内蒙古	24761	1425	62831.41	175.3	44.10
4	新疆	14489	1349	63487.56	170.6	45.86
5	山东	88076	1275	358768.56	757.4	47.53
6	甘肃	12822	1187	47417.83	61.4	15.45
7	河北	43786	832	152424.98	488.2	49.84
8	河南	15371	744	252085.19	551.8	42.54
9	山西	23320	580	106072.68	244.7	23.13
10	江苏	404	532	499719.95	592.4	28.14
11	云南	461	489	119903.85	43.1	32.90
12	辽宁	61256	443	319788.79	284.5	20.37
13	陕西	4756	369	162416.92	142.8	24.46
14	宁夏	7226	358	28829.49	58.8	31.28
15	安徽	785	222	221754.8	340.3	45.04
16	浙江	—	184	378820.47	191.8	10.49
17	四川	25	175	279291.1	196.1	18.19
18	海南	—	140	40984.81	21.8	7.18
19	福建	—	127	159948	206.7	21.98
20	湖南	—	126	255632.32	100.6	12.31
21	黑龙江	23653	92	126399.49	48.6	14.41
22	重庆	—	88	148611.11	14.0	1.07
23	吉林	34762	86	134483.7	103.8	16.96
24	青海	2105	80	17314.96	19.1	23.34
25	广东	—	78	908773.24	1024.7	41.07
26	湖北	618	57	315646.43	252.4	17.80
27	新疆生产建设兵团	1950	54	11458.57	37.5	57.84
28	广西	—	34	166016.2	89.0	18.11
29	贵州	46	32	100329.77	37.6	4.44
30	江西	—	0	123754.81	—	2.40
31	上海	—	0	225939.35	—	0.00
32	西藏	300	0	9106.31	—	0.00

注:—为无统计数据。

完善,为开展供热管网输配再生水的工程实践奠定了基础。由此可见,供热管网输配再生水,二者在使用时间上并不冲突,在使用空间上更具有明显的协同性。

由此可见,与再生水管网相比,我国城镇供热管网具有覆盖范围广、服务面积大、周期使用性和地域相关性等特点。利用供热管网对再生水和热水进行灵活输配,实现一网多用、增效协同,能够降低城市再生水管网建设费用,对于破解当前我国再生水管网建设严重滞后难题,推动再生水高效利用,助力城市绿色可持续发展具有十分重要的意义。

为实现供热管网对再生水和供热管网水的灵活输配,输配管材和水质的差异是不容忽视的关键问题

之一^[6]。目前,我国再生水常用的输配管材主要包括金属和非金属 2 类。其中,金属管材主要为球墨铸铁管和不锈钢管等,非金属管材主要为玻璃钢管和 PE 塑料管等。由于再生水水质较为复杂,为保障输配与使用安全,通常会在金属管材内壁增加水泥砂浆、环氧陶瓷或聚氨酯等耐腐蚀涂层,以防止发生腐蚀问题。而对于供热管网,CJJ/T 34—2022《城镇供热管网设计标准》^[7]规定,供热管网的管材应为无缝钢管、电弧焊或高频焊焊接钢管,目前常用的主要有 Q235B、L290、10 号、20 号钢和 Q335B 等碳素钢。由此可见,供热管网多为金属管材,这些材质虽然能够承受较高温度,但普遍耐腐蚀性能较弱,易因受水质变化影响,而产生管网腐蚀等问题。

由此可见,采用供热管网输配再生水时,由于再生水水质复杂,存在对供热管网产生腐蚀、结垢的可能,因此需深入分析再生水与供热管网水的水质特征,明确供热管网输配再生水时易引发腐蚀、结垢的关键风险因子及控制限值,为提出相应管控要点奠定基础。

2 我国再生水与供热管网水的水质特征与风险分析

2.1 再生水与供热管网水的水质特征

我国再生水主要利用途径包括景观环境利用、城镇杂用、工业利用和农业利用等^[8-12],根据不同用途分别规定了相应的水质要求。我国供热管网水根据补水用途可分为热水管网补水和锅炉补给水,相应的水质分别执行 CJJ/T 34—2022 和 GB/T 1576—2018《工业锅炉水质》^[13]。为进一步明确再生水与供热管网水的水质特征,把握城镇供热管网输配用途再生水风险,本研究从水质稳定性角度切入,解析再生水与供热管网水的水质差异性。输配的水质稳定性是再生水安全利用的前提,稳定的水质能有效防止管网腐蚀和结垢的发生。

水质稳定可分为化学稳定性和生物稳定性。化学稳定性是指水在储存、输配或使用中各组分通过自然沉淀、化学反应等过程在管网内壁发生结垢或腐蚀问题,如 CaCO₃ 在与水接触的管网和设备上沉积结垢,金属管材表面腐蚀等^[14]。pH、浊度、碱度、硬度、

二氧化硅(SiO₂)、铁(Fe)、硫酸盐(SO₄²⁻)、氯离子(Cl⁻)等水质指标是影响化学稳定性的重要因素^[13]。生物稳定性是指水在储存、输配或使用中微生物通过利用水中有机质进行繁殖,在管网内壁发展为生物膜,并通过产酸直接诱导腐蚀或者破坏金属表面的钝化膜加速腐蚀^[14]。化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)等水质指标是影响生物稳定性的重要因素^[15]。若水中与化学稳定性和生物稳定性相关的水质指标数值高于相应的国家标准,则易发生腐蚀、结垢等问题。

表 3 对我国再生水与供热管网水的水质进行比较。可知:在水质指标数值上,再生水标准均不同程度低于供热管网水质标准,特别是浊度、硬度、Cl⁻、COD、BOD₅ 等指标。而且在水质指标管控数量上,再生水也明显少于供热管网水。如再生水用于农业时,与供热管网水标准相比,缺少对于硬度、Fe、碱度、SiO₂、SO₄²⁻、Cl⁻、NH₃-N、TP 等关键指标的管控要求。而硬度、Fe、Cl⁻、SO₄²⁻ 等是保证再生水化学稳定性的关键指标,COD、BOD₅、NH₃-N、TP 等是保证再生水生物稳定性的关键指标。若上述关键指标数值高于标准要求,或缺失管控,极易引发管道腐蚀、水垢增加和微生物生长等风险。由此可见,供热管网输配再生水时,易引发管道腐蚀、水垢增加和微生物生长等风险,需重点关注。

表 3 我国再生水与供热管网水的水质比较

Table 3 Comparison of the water quality of reclaimed water and thermal water

水质 类型	水质 指标	再生水水质标准												供热管网水 水质标准		
		景观环境利用 ^[7]			城镇杂用 ^[8]		工业利用 ^[9]				农业利用 ^[10]				热水 管网 补水 ^[5]	锅炉 补给水 水源 ^[11]
		观赏类	娱乐类	景观 湿地	冲厕、 车辆 清洗	城市绿化、 道路清扫、 消防、 建筑施工	直流 冷却水	循环 冷却 补水	洗涤 用水	工艺与 产品 用水	纤维 作物	旱地 作物 与油料 作物	水田 谷物	露地 蔬菜		
化学	pH		6~9		6~9		6.5~9.0					5.5~8.5		7~11	6.5~8.5	
稳定性	浊度/NTU	10 (5)	10 (5)	10	5	10	—	5	—	5		—		5	5	
	硬度/mg/L		—			—	450	450	450	450		—		60	3	
	$\rho(\text{Fe})/(\text{mg/L})$		—		0.3	—	—	0.3	0.3	0.3		—		0.3	0.3	
	碱度/(mg/L)		—		—	—	350	350	350	350		—		—	350	
	$\rho(\text{SiO}_2)/(\text{mg/L})$		—		—	—	50	50	—	30		—		—	30	
	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg/L})$		—		—	—	600	250	250	250		—		—	250	
	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg/L})$		—		—	—	250	250	250	250		350		25	—	
	$\rho(\text{COD})/(\text{mg/L})$		—		—	—	—	60	—	60	200	180	150	100	—	60
稳定性	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg/L})$	10 (6)	10 (6)	10	10	10	30	10	30	10	100	—	60	40	—	10
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg/L})$	5 (3)	5 (3)	5	5	8	—	10	—	10		—		—		10
	$\rho(\text{TP})/(\text{mg/L})$	0.5 (0.3)	0.5 (0.3)	0.5 (0.3)	—	—	—	1	—	1		—		—	—	1

水源切换也是管网输配过程中不容忽视的关键环节。当前后切换的水源水质差异性较大时,特别是

SO₄²⁻、Cl⁻等浓度大幅变化,会破坏供水管网内长期形成的管垢与水相之间的平衡,使管垢铁锈发生溶解,

破坏管道内壁的钝化层,腐蚀管壁,造成过量铁释放,从而发生“黄水”问题,影响安全输配^[16,17]。拉森指数是评价水源切换时管网输配过程水质稳定性的关键指标。通常拉森指数越大,水质对管网内壁腐蚀性越强,水源切换时发生“黄水”的可能性越高^[18,19]。根据目前我国关于不同应用情景再生水水质指标(表3),计算得出相应的拉森指数,结果见表4。可知:当再生水用于循环冷却补水、洗涤用水和工艺与产品用水时,拉森指数>2,而用于直流冷却水时拉森指数为4.34。张雅君等^[19]研究发现,拉森指数>2时,水质切换后第2天即可达到最大腐蚀速率;而拉森指数>4时,第1天就能够达到最大腐蚀速率。由此可见,水源切换时,在满足供热管网水标准基础上,应重点关注 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等造成“黄水”问题的风险因子。

表 4 我国再生水工业利用水质指标限制的拉森指数
(计算值)

Table 4 Larsen index of reclaimed water quality standard
for industrial reuse

再生水工业利用途径	拉森指数
直流冷却水	4.34
循环冷却补水	2.72
洗涤用水	2.72
工艺与产品用水	2.72

2.2 城镇供热管网输配不同用途再生水的风险分析

由于再生水与供热管网水执行的相关标准在水质上存在差异,因此,供热管网输配再生水时,可能易引发相关风险。为此,分析城镇供热管网输配不同用途再生水时易引发的风险类型,识别主要风险因子是风险管控的关键。具体如下:

1) 供热管网输配再生水用于供热管网补水时,景观环境利用、城镇杂用、工业利用和农业利用的再生水标准中的水质指标^[9-12],如 pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 等,均低于热水管网补水要求,或并未设限。而浊度、Fe、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 超标则易引发管网化学腐蚀问题,COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 超标则易引发管网生物腐蚀问题,硬度和碱度超标则易引发管网结垢问题。因此,上述水质指标为引发化学腐蚀、生物腐蚀、结垢管网风险的主要风险因子。

2) 供热管网输配再生水用于工业利用时,GB/T 19923—2005《城市污水再生利用 工业用水水质》^[11]规定的水质指标中,如 pH、硬度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、

Cl^- 和 BOD_5 等指标均低于热水管网补水要求,或并未设限。而 SiO_2 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 超标则易引发管网化学腐蚀问题, BOD_5 超标则易引发管网生物腐蚀问题,硬度超标则易引发管网结垢问题。另外,当再生水用于工业利用时,拉森指数均>2,水源切换时易引发“黄水”问题。因此,上述水质指标为引发化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、“黄水”等风险的主要风险因子。

3) 供热管网输配再生水用于景观环境利用时,GB/T 18921—2019《城市污水再生利用 景观环境用水水质》^[9]规定的水质指标中,如 pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 COD 等指标均低于热水管网补水要求,或并未设限。而浊度、Fe、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 超标易引发管网化学腐蚀问题,COD 超标易引发管网生物腐蚀问题,硬度和碱度超标易引发管网结垢问题。另外,当再生水用于景观环境利用时,水源切换时由于 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等浓度大幅变化,因此易引发“黄水”问题。因此,上述水质指标为引发化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、“黄水”等风险的主要风险因子。

4) 供热管网输配再生水用于城镇杂用时,GB/T 18920—2020《城市污水再生利用 城市杂用水水质》^[10]规定的水质指标中,如 pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD 和 TP 等指标均低于热水管网补水要求,或并未设限。而浊度、Fe、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 超标则易引发管网化学腐蚀问题,COD 和 TP 超标则易引发管网生物腐蚀问题,硬度和碱度超标则易引发管网结垢问题。另外,当再生水用于城镇杂用时,水源切换时由于 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等浓度大幅变化,易引发“黄水”问题。因此,上述水质指标为引发化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、“黄水”等风险的主要风险因子。

5) 供热管网输配再生水用于农业利用时,GB/T 20922—2007《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》^[12]规定的水质指标中,如 pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 指标均低于热水管网补水要求,或并未设限。而浊度、Fe、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 超标则易引发管网化学腐蚀问题,COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 超标则易引发管网生物腐蚀问题,硬度和碱度超标则易引发管网结垢问题。另外,当再生水用于农业利用时,水源切换时由于 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等浓度大幅变化,因此易引发“黄水”问题。因此,上述水质指标为引发化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、

“黄水”等风险的主要风险因子。

由此可见,为避免供热管网内壁发生腐蚀、结垢、“黄水”等问题,实现安全灵活输配再生水和供热管网水,在采用供热管网输配再生水时,各项水质指标应优先满足热水管网补水要求,而后者未规定的指标应满足锅炉补给水水源要求。同时,鉴于目前我国对再生水景观环境利用、城镇杂用和农业利用的水质指标管控数量远低于工业用水,管控限值高于工业用水。因此相对而言,供热管网输配前三者情景的再生水所面临腐蚀、结垢的风险更大,可见供热管网宜优

先输配工业利用的再生水,且应强化管控浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD、 BOD_5 、 NH_3-N 、TP 等风险因子。

综上,不同情景下供热管网输配再生水的管网风险及风险因子见表 5。供热管网输配再生水时,易引发管道腐蚀、水垢增加、微生物生长和“黄水”等风险。由于不同应用情景的再生水水质不同,主要管控的风险因子亦存在差异。因此,针对不同应用途径的再生水风险因子,提出相应风险控制措施和技术,有助于推动供热管网输配再生水。

表 5 供热管网输配不同情景再生水的风险类型、风险因子及管控要点

Table 5 Risk types, risk factors and control key points of the reclaimed water distribution by heat-supply network in various senarios				
应用情景	管网风险类型	风险因子	风险管控要点	处理技术
供热管网补水	化学腐蚀、生物腐蚀、结垢	pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD、 BOD_5 、 NH_3-N 、TP	软化、脱氧、去除重金属、有机物和营养物质等	曝气生物滤池、混凝沉淀/臭氧氧化、投加阻垢剂、反渗透等
工业利用	化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、“黄水”	pH、硬度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 BOD_5	软化、脱氧、去除有机物、降低拉森指数、比例切换水源等	混凝沉淀/臭氧氧化、投加阻垢剂、反渗透等
景观环境利用	化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、“黄水”	pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD	软化、脱氧、去除重金属和有机物、降低拉森指数、比例切换水源等	混凝沉淀/臭氧氧化、膜蒸馏、投加阻垢剂、反渗透等
城镇杂用	化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、“黄水”	pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD、TP	软化、脱氧、去除重金属、有机物和营养物质、降低拉森指数、比例切换水源等	曝气生物滤池、混凝沉淀/臭氧氧化、投加阻垢剂、反渗透等
农业利用	化学腐蚀、生物腐蚀、结垢、“黄水”	pH、浊度、硬度、Fe、碱度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、COD、 BOD_5 、 NH_3-N 、TP	软化、脱氧、去除重金属、有机物和营养物质、降低拉森指数、比例切换水源等	曝气生物滤池、混凝沉淀/臭氧氧化、投加阻垢剂、反渗透等

3 城镇供热管网输配不同用途再生水的风险管控要点

3.1 输配再生水用于供热管网补水的风险管控要点

供热管网运行期间,管网系统常存在供热管网水“跑冒滴漏”现象,或偶尔出现爆管等事故,造成供热管网内水压波动,为此常采用软化、脱氧处理后的自来水进行补水。若在供暖期,再生水替代自来水实现供热管网水补水,则可显著减少自来水使用量,提高再生水利用效率。因此,供暖期补充供热管网水是供热管网输配再生水的优先利用模式。

由于供热管网输配再生水用于供热管网补水主要为满足供暖需求,因此水源切换可能引发的“黄水”可适当忽略。而由于结垢会引发热传导效率下降,腐蚀会造成管壁变薄,因此供热管网的结垢、腐蚀问题需重点考虑。若采用 B 级再生水[满足用于农田灌溉(蔬菜)、绿地灌溉、工业利用(冷却用水)、景观环境利用和城市杂用水质要求的再生水]^[18]作为供热管网补水,由于 B 级再生水具有低 pH、高硬度、含有一定量有机物和营养物质等特征,为避免管道结垢和水质劣化,在补入供热管网前需控制水质指标中

的浊度、硬度、重金属、无机盐、有机物和营养物质等指标,使其符合供热管网补水的水质要求。若采用 A 级再生水[满足用于工业利用(锅炉补给、电子级水)、地下水回灌水质要求的再生水]^[20]作为供热管网补水,虽然 A 级再生水在制备过程中反渗透去除了水中大部分离子,降低了再生水的腐蚀性,但输配过程会溶解管网内壁氧化层,因此需要通过补充少量碱剂或提高硬度等方法,提高其化学稳定性^[21]。

3.2 输配再生水用于工业利用的风险管控要点

城镇供热管网输配再生水作为工业用水时,需考虑供非暖季和供暖季 2 种情形。非供暖季时,应重点关注造成管网发生化学腐蚀、生物腐蚀和结垢的主要风险因子,包括 pH、无机盐(硬度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)和有机物(BOD_5)。为此,再生水在供热管网输配前,应调节 pH 值至 7~11,并采用混凝沉淀、臭氧氧化、反渗透等技术去除无机盐和有机物。同时,进行紫外和氯联合消毒,控制大肠菌群数量,且控制水中余氯浓度不低于 0.05 mg/L,该条件满足 CJJ/T34—2022 对供热管网补水 $\rho(\text{Cl}^-) \leq 25 \text{ mg/L}$ 的要求。另外,还应

加强管网日常维护。

供暖季时,供热管网水除水温(约 60 ℃)高于常规工业利用需求,其他风险因子无机盐、有机物等浓度均低于再生利用工业用水水质。为此,仅需建立换热站进行余热回收。同时,供热管网在运行时为封闭式系统,而当用于再生水输配时则变为开放式系统。此时需充分考察压力、水量、水力条件等环境变化对供热管网造成的影响,保证供热管网的安全稳定运行。另外,若输配再生水用于工业利用,在采用非供暖季时相应的技术措施外,注意再生水进入供热管网后会降低水温,需论证温度变化对热源供热效率的影响,必要时可在工业企业取水处进行余热回收利用。

另外,采用再生水作为工业用水时,为保证再生水输配安全,水源切换引发“黄水”问题不容忽视。为此,在切换水源时,一方面实时监测再生水硬度、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等指标浓度,保证各项水质指标满足供热管网补水标准,并控制拉森指数不高于实际供热管网水拉森指数。另一方面,水源切换应采用比例切换原则,即逐渐增加再生水比例,避免水源水质突变而引发“黄水”问题。

3.3 输配再生水用于景观环境、城镇杂用、农业利用的风险管控要点

我国城市再生水的景观环境利用、城镇杂用和农业利用具有明显的季节性和时段性,这些应用情景多发生在非供暖季。采用供热管网输配再生水用于景观环境利用、城镇杂用、农业利用时,应重点关注造成管网发生化学腐蚀、生物腐蚀和结垢的主要风险因子,包括 pH、无机盐(浊度、硬度、 SiO_2 、 SO_4^{2-} 、 Cl^-)、重金属(Fe 等)、有机物(COD、 BOD_5)和营养物质(NH_3 、TP)。为此,再生水在供热管网输配前,应调节 pH 值至 7~11,并采用混凝沉淀、臭氧氧化、曝气生物滤池、反渗透等组合技术去除无机盐、有机物和营养物质。同时,进行紫外和氯联合消毒,控制大肠菌群数量,且控制水中余氯浓度 $\geq 0.05 \text{ mg/L}$,该条件满足 CJJ/T 34—2022 对供热管网补水 $\rho(\text{Cl}^-) \leq 25 \text{ mg/L}$ 的要求。另外,还应加强管网日常维护。

另外,采用再生水作为景观环境、城镇杂用、农业利用时,也应重点关注水源切换引发“黄水”问题。可参考输配再生水作为工业用水时的情景。同时,由于该应用情景的用水输配具有明显的季节性和时段性特点,会使供热管网内水量、水压波动变化较为频繁,因此需充分考察水量、压力等外部参数的变化对

供热管网造成的影响,确保供热管网的安全稳定运行。

综上,城镇供热管网输配不同应用情景再生水时,均需首要考虑软化、脱氧、去除有机物,同时根据不同情景下的风险因子采取其他针对性的风险管控措施,如去除营养物质、控制重金属、降低拉森指数等,以避免供热管网发生结垢、腐蚀、“黄水”等问题,保障供热管网灵活安全输配再生水,以维系供热管网的长期安全和供暖水的稳定性。

4 城镇供热管网输配不同应用情景再生水的案例分析

山西省太原市是我国典型严重缺水城市之一,随着城市发展,水资源供需结构矛盾日益突显。再生水高效利用是解决水资源供需结构矛盾的关键抓手。该市为提高再生水利用,开展了城市供热管网输配再生水的规划探索。表 6 为该市再生水与供热管网水的水质对比结果。

表 6 太原市再生水与供热管网水的水质对比

Table 6 Comparison of the quality of reclaimed water and thermal water in Taiyuan

水质类型	水质指标	供热管网 补水	供热管网 回水	污水厂 出水
化学稳定性	pH	8.6	8.5	7.0~7.2
	浊度/NTU	0.5	0.5	N. D. ~0.5
	硬度/(mg/L)	7	46	673~713
	$\rho(\text{Fe})/(\text{mg/L})$	0.17	0.0049	0.043~0.046
	碱度/(mg/L)	189	128	260~290
	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg/L})$	129	106	391~442
	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg/L})$	77	51	225~254
生物稳定性	拉森指数	1.28	1.42	2.77~2.82
	$\rho(\text{COD})/(\text{mg/L})$	1.0	0.9	9~18
	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg/L})$	0.8	0.7	5.2~7.5
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg/L})$	0.061	0.043	0.22~1.92
	$\rho(\text{TP})/(\text{mg/L})$	0.0031	0.015	0.16~0.21

由表 6 可知:污水厂出水满足再生水景观利用、城镇杂用和农业利用水质要求。结合表 5 给出的供热管网输配不同情景再生水的风险类型、风险因子及管控措施,为保证该市供热管网安全稳定输配再生水,污水厂出水需软化、脱氧、去除重金属和有机物。同时,根据拉森指数计算结果,该市供热管网补水和供热管网回水的拉森指数均低于 1.5,而污水厂出水的拉森指数为 2.77~2.82。因此,水源切换时腐蚀倾向明显,不宜直接进入供热管网,需在去除无机盐等措施的基础上,采用比例切换原则,即逐渐增加再生水比例。王艳蕾等^[21]采用响应曲面法分析了水质控制目标,即通过调节 pH,采用软化、脱氧、控制水力流

速等措施,有助于推动城镇供热管网安全稳定输配再生水目标的实现。

目前,关于利用供热管网输配再生水或使用再生水作为供暖期补给水的实践案例较少。通过结合太原市案例分析,表明本研究所提出的城镇供热管网输配再生水风险因子和管控要点较为全面和准确,对于实现推广具有针对性和可行性,因此有助于推动城镇供热管网安全稳定输配再生水成功实践。

5 结 论

我国城镇供热管网具有覆盖范围广、服务面积大、周期使用性和地域相关性等特点。利用供热管网输配再生水,能够降低再生水管网的建设费用,对于破解当前我国再生水管网建设严重滞后难题、推动再生水高效利用、助力城市绿色可持续发展具有重要意义。本文分析了我国城镇供热管网输配再生水的应用前景,识别了风险类型和风险因子,提出了管控要点。供热管网输配再生水时,易引发管网化学腐蚀、生物腐蚀、结垢和“黄水”等风险。再生水与供热管网水的水质差异是导致风险的关键原因。补充供热管网水是供热管网输配再生水的优先利用模式,宜优先使用 A 级再生水作为水源,需重点关注腐蚀问题。供热管网输配再生水用于工业利用时,主要风险因子有 pH、无机盐和有机物。输配再生水用于景观环境、城镇杂用和农业利用时,除上述风险因子外,还需额外关注营养物质和重金属。城镇供热管网输配不同用途再生水均需首要考虑采用软化、脱氧和去除有机物的处理措施,同时根据不同情景下的风险因子采取其他针对性的风险管控措施,如去除营养物质、控制重金属、降低拉森指数至不高于实际供热管网水、比例切换水源等措施,保障供热管网安全、稳定、灵活输配再生水。结合太原市案例分析,验证了本研究提出的城镇供热管网输配再生水风险因子和管控措施具有针对性和可行性,可为城镇供热管网输配再生水提供理论依据和技术参考。

致谢:

太原市城乡管理委员会原主任张利提出利用城镇供热管网输配再生水的思路,并对本研究给予了大力支持和帮助,在此表示感谢。

参考文献

[1] 郝姝然,陈卓,徐傲,等.黄河流域主要城市再生水利用状况及潜力分析[J].环境工程,2022,40(10):1-8,79.
[2] 崔琦,陈卓,李魁晓,等.再生水系统的可靠性:内涵及其保障措施[J].环境工程,2019,37(12):75-79,108.

[3] 中华人民共和国发展改革委,工业和信息化部,财政部,等.关于推进污水资源化利用的指导意见[S].2021.
[4] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
[5] 中国国家统计局.2021年城乡建设统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022.
[6] 胡洪营.中国城镇污水处理与再生利用发展报告(1978—2020)[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城镇供热管网设计标准:CJJ/T 34—2022[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
[8] 中华人民共和国市场监督管理局,中国国家标准化管理委员会.城市污水再生利用分类:GB/T 18919—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
[9] 中华人民共和国市场监督管理局,中国国家标准化管理委员会.城市污水再生利用景观环境用水水质:GB/T 18921—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
[10] 中华人民共和国市场监督管理局,中国国家标准化管理委员会.城市污水再生利用城市杂用水水质:GB/T 18920—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.城市污水再生利用工业用水水质:GB/T 19923—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.
[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.城市污水再生利用农田灌溉用水水质:GB/T 20922—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
[13] 中华人民共和国市场监督管理局,中国国家标准化管理委员会.工业锅炉水质:GB/T 1576—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
[14] 张馨怡,魏东斌,杜宇国.再生水水质稳定性评价指标与体系[J].环境科学,2022,43(2):586-596.
[15] 中华人民共和国水利部.再生水水质标准:SL 368—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
[16] 张倬玮,张会宁,孙广垠,等.北方某市南水北调地表水厂建设及输配水管网改造[J].中国给水排水,2016,32(10):76-80.
[17] 王超,彭柱,郭浩,等.CIO₂对再生水管道中90°弯头的腐蚀研究[J].安全与环境学报,2022,22(3):1566-1574.
[18] SARIN L P, SNOEYINK V L, LYTLE D A, et al. Iron corrosion scales: model for scale growth, iron release, and colored water formation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(4): 364-374.
[19] 张雅君,杜婷婷,孙丽华,等.拉森指数对再生水管网腐蚀状况的影响研究[J].腐蚀科学与防护技术,2016,28(5):449-454.
[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.城市污水再生利用分类:GB/T 18919—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
[21] 王艳蕾,管涛涛.输送再生水的城市供水管道铁释放量的模型优化及应用[C]//中国环境科学学会.中国环境科学学会2022年科学技术年会论文集(二),2022:311-318.