

污水热能利用现状与潜在用途

郝晓地, 叶嘉洲, 李季, 江瀚

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘要: 污水余温含有比有机物化学能高近 10 倍的热能,应审时度势予以开发。在污水管道上直接利用热量存在热交换器(热泵)防污、防堵、防腐构造问题,需要严控技术设计与采用特殊材料。居家水平原位利用热能亦存在同样问题,需要与源分离卫生设施相结合。国内外目前已有污水热能利用项目以管道在线利用为主,但规模不大,这不仅取决于热泵材料与质量,重要的是难以保持长期稳定运行。污水处理后在出水端进行集中热交换优点颇多,但是被交换出的巨大热量需要就近、稳定的热量用户。出水集中热能利用首选是服务于周边住宅或工企空调热量交换;出水交换热量亦可用于污泥热干化补充热量;交换热量还可用于污水处理厂周边农业大棚/温室。因此,污水处理厂若利用热能终将会演变为“能源工厂”,并以热量输出交换方式间接实现“碳中和”运行。

关键词: 污水热能; 水源热泵; 能效比(COP); 供热/制冷; 集中利用; 污泥热干化
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)18-0015-08

Status and Potential Applications of Thermal Energy from Wastewater

HAO Xiao-di, YE Jia-zhou, LI Ji, JIANG Han

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The residual temperature of the wastewater contains a large amount of thermal energy which is almost ten times higher than the chemical energy of the organic matter, and should be exploited duly. Directly utilizing thermal energy from sewers needs to resolve such practical problems of heat exchangers (heat pumps) as anti-fouling, anti-blocking, anti-corrosion, etc., which should be associated with both strict technical design and special materials. There are also the similar problems with on-situ household utilization of thermal energy, which should be involved in source separation facilities. At present, existing thermal energy utilization projects at home and abroad are mainly based on directly utilization of energy from sewers, which are still in small scale applications due to the quality of exchangers' materials and long-term stable operation. Clearly, there are many advantages on the system of centralized heat exchange from effluents of WWTPs. However, the huge heat exchanged needs to have reliable neighboring users for heating/cooling. The first choice of centralized utilization is to serve the heat exchange of air conditioning of neighboring residence and/or industrial buildings for air-condition;

the heat exchange of effluent can also be used to dry excess sludge after dewatering for direct incineration; and the thermal energy can also be utilized for heating needs of greenhouses around WWTPs as well. In this way, WWTPs would become “power plants”, which makes them indirectly achieve carbon-neutral operation.

Key words: thermal energy in wastewater; water source heat pump; coefficient of performance (COP); heating/cooling; centralized utilization; thermal drying of excess sludge

生活过程因热量输入导致污水排放出口温度(平均为 27 °C)比自来水温度高出 2 ~ 17 °C^[1-3]。这意味着,污水余温所含热能较多,约占城市废热排放总量的 15% ~ 40%^[1]。城市污水四季温差变化不大、流量稳定,具有冬暖夏凉的特点,可以成为居家、楼宇空调的冷、热交换源,并以日趋成熟的水源热泵技术予以实现,不仅可以在市政污水处理厂实现集中交换,亦可以居家分散方式交换提取。

然而,从污水余温热能中提取的热量属于低品位能源(40 ~ 70 °C),难以用于发电,只能被直接利用,且热量有效输送半径仅为 3 ~ 5 km^[4-6]。这就决定了污水源热泵技术有限的应用距离,只能在污水处理厂内或周边用户中加以利用,或直接在居家水平原位利用。事实上,污水源热泵 COP(能效比)为 3.5 ~ 4.6,比空气源热泵(COP = 2.8 ~ 3.4)和地源热泵(COP = 3.3 ~ 3.8)都高^[7-8],这意味着交换同量热量比其他两种热源方式更省电。正因如此,国外对污水源热泵利用的兴趣更大。

西方国家对污水源热泵的利用始于 20 世纪 70 年代。目前,仅在北美和欧洲便有超过 3.3×10^8 m³/d 的污水用于供热和热水加热,可节省 15×10^8 GW/d 的天然气消耗量;世界范围内现有至少 500 个污水源热泵应用实例,热功率为 10 ~ 20 000 kW。欧洲、北美以及日本在污水源热泵技术方面走在了世界前列。首先介绍这些国家在污水热能利用以及污水源热泵技术方面的现状与进展,详述相关国家在污水热能利用方面的扶持政策以及相应的经济补贴。同时针对我国污水源热泵有限利用现状,结合我国污水处理厂多位于城乡结合部且周边住宅较少的特点,建议热能用于周边农业大棚供热,或根据剩余污泥处理、处置未来发展趋势,将污水热能原位用于污泥干化。

1 污水热能利用国际现状

在化石燃料日渐稀缺与气候变化双重压力下,可再生能源利用日渐获得重视。其中,污水余温热

能易得,水源热泵热交换技术已日趋完善,且在一些发达国家普遍获得应用,可以在一定范围内满足居民供热、制冷需要,甚至出现了以居家原位利用的分散利用方式。

1.1 集中利用

欧洲研究者很早便发现,污水处理厂出水比原污水具有更高的潜热值,通过水源热泵系统提取热能也相对容易。况且,污水处理后在出水口利用热能对冬季污水处理运行没有任何性能影响。污水热能在污水处理厂内用于供热、制冷显然热量利用空间十分有限,而向污水处理厂周边辐射则是欧洲国家对污水热能利用的主要方向。

瑞士和瑞典早在 20 世纪七八十年代便建成超过 50 个污水处理厂余温热能利用工程^[9],不仅满足厂内利用,还兼顾周边民宅供热、制冷需要。为此,瑞士设计了电子多步热泵功率控制系统和低温区域管网输送系统,成为当时的领先技术。瑞典首都斯德哥尔摩 40% 采用水源热泵技术供热的建筑物中有 10% 的热源来自污水处理厂出水^[9]。

欧洲其他国家对污水处理厂出水集中热能利用亦进行了研究。奥地利学者通过 GIS 对三类不同处理能力的污水处理厂周边可消纳热能用户进行了分析;他们以可持续过程指数(SPI)作为指标,对沼气热电联产(CHP)和热泵系统进行能量输出全生命周期影响评价(LCIA),得出使用可再生能源发电供给热泵系统交换热量对环境的影响最小;总计 173 个污水处理厂中约 3/4 的出水潜热可以利用,并在厂外可以找到稳定的热源用户^[10]。欧洲有人甚至提出,出水热能可用于农业、林业产品脱水和满足水产养殖业的更大热量需求^[11]。英国学者分析了英格兰南部污水处理厂利用出水热能方式的经济性,得出集中利用热能用于维持 55 °C 厌氧消化进行热电联产应该具有更高的经济回报率^[12]。荷兰在建立了小规模出水热能集中利用工程后,计划于 2021 年在乌特勒支 De Stichtse Rijnlanden 污水处理厂建

成 25 MW 的水源热泵系统,可为 10 000 户家庭提供供热服务。

在日本,东京市政府污水处理局自 1987 年开始进行污水余热热能利用。初期建设热能利用项目主要服务于污水处理厂内自行使用(建筑物空调),稍后在政府支持下逐步形成了较为成熟的商业化服务体系。截至 2018 年,日本建成污水余热利用工程项目共计 43 个,其中,利用污水处理厂出水热能向厂外范围提供服务的工程共有 5 个。此外,札幌市为解决冬季街道、居住区积雪堆放和处理问题,他们还直接利用污水处理厂出水余热在调节池内融化运输而来的积雪;1 m³ 出水可融化 0.085 m³ 积雪,融雪水无需处理而直接排放下水道。

1.2 原位利用

污水余热集中利用存在远距离输送热量损失及系统输送费用问题,这就催生了从用户端原位利用污水热能的水源热泵系统。污水热能原位利用系统分居家形式和管道形式两种,如图 1 所示。与集中式利用不同,原位利用腐蚀热泵机组问题较为严重。因此,原位利用对热交换器的防污、防堵、防腐能力存在特殊要求。污水热能原位利用必然导致进入污水处理厂的水温降低,在冬季可能会影响污水生物处理效果。对此,瑞士有关部门规定原位利用热交换系统出口水温不得低于 10 ℃。同时,考虑到输送热损失问题,要求原位利用取水设施与建筑物的距离不应超过 200 m^[13]。

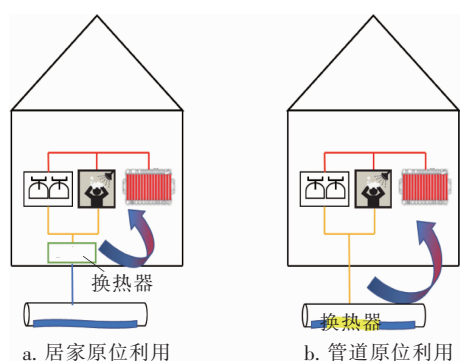


图 1 污水热能原位利用形式

Fig. 1 Schematic diagrams of on-situ utilization of thermal energy in wastewater

1.2.1 居家原位利用

生活污水中所含热能主要来自于灰水,居家排水出口温度可达 30 ~ 65 ℃^[14]。因此,原位利用污水余热可最大限度(理论上可以回收污水所含热能

的 70% ~ 90%)避免热能的损失。同时,原位利用还可降低投资成本和施工难度。然而,居家污水热能原位利用一般需与污水源分离系统联系在一起,以避免粪尿的介入,这就需要考虑污水源分离效果和分离后热能短时储存问题。在此方面,潜热蓄热技术(LHS)和相变材料(PCMs)应用于灰水热能回收则可以较好地提升传热热密度。

美国拥有较多的灰水热能回收技术专利,对美国等具有较多分散式住宅的国家具有技术推广应用价值。2012 年 Nolde & Partner 水概念公司在德国联邦环境基金会(DBU)资助下完成了第一个分散式建筑灰水余热回收项目,并在汉堡、法兰克福结合污水源分离技术建立了污水余热回收示范样板^[15]。此外,苏格兰 SHARC 公司在加拿大温哥华 Seven 35 大楼 60 户家庭中安装了居家污水余热回收试验系统,采用美国 FHP 热泵和双壁通风换热器,并实时监控、记录系统运行情况。

1.2.2 管道原位利用

欧洲在管道原位利用污水热能方面起步较早。挪威从 1980 年开始便专注于建设管道原位利用污水热能的热泵系统,并开发了淋水式换热器,用以解决换热器堵塞问题。目前,挪威已建成 2 个利用市政管道污水交换热源的供热工程。

瑞士在热泵系统清洁、防堵技术上进行了很多研究,以降低热泵系统运行成本。1981 年瑞士人发明“FEKA”箱式系统,通过沉淀和筛分分离固体进行管道原位热能利用,工程应用一直持续至 21 世纪。20 世纪 90 年代,瑞士人还利用排水管道底部一体化沟槽式换热器发明了“Rabtherm”系统,并在瑞士 Basel - Bachgraben 体育场稳定运行了 25 年;该系统 2001 年安装应用于宾宁根,到现在也未出现污垢堵塞现象。

德国对污水热能利用主要以分散方式进行,并针对换热器结垢现象发明了不同类型的清洗技术,其中,琥珀公司发明的 Huber Thermwin 在线自动清洗热泵系统被用于德国多个小区的热泵系统,同时也在瑞士一些中小型建筑污水热能原位利用项目上获得应用。

苏格兰 SHARC 公司也在积极推广商业化民用污水热能利用设备,为苏格兰、英格兰不少学校和民宅提供了能源利用改造服务,并将业务范围延伸到北美地区(如前所述,在温哥华的服务)。在北美,

加拿大率先通过分散式系统利用污水热能。2010 年温哥华“东南福溪”新区冬季奥运村开始使用邻里能源设施(NEU)就近回收原污水中的热能,整个城区在 2020 年完全建成时,将向约 32 hm² 的建筑物供热,年供热量将达 62 000 MW·h,可满足 16 000 位居民供暖需求。美国热泵技术发展亦十分成熟,但主要用于地源热泵。2012 年费城水务局与 Nova Thermal Energy 公司合作开发了污水热能原位利用系统,利用污水厂内污水管道为建筑物提供热能。芝加哥在同年也启动了类似的原污水热能回收系统,与伊利诺伊大学芝加哥分校展开合作,获得伊利诺伊州清洁能源社区基金会 87 500 美元的资助。

为系统化原位利用污水中热能,获取相关数据信息对设计与建设者来说十分重要。为此,瑞士几个城市编制、标记出可以进行污水热能利用的点位图,并列入市政建设规划中。日本大阪大学 and Sogo Setsubi 咨询股份有限公司共同建立了用于评估城市区域下水道潜热分布图,并计算出建筑物需热量、分析地理信息数据库中下水道位置,以判断原位利用污水热能的可行性^[16]。日本国土交通省和环境部于 2013 年还建立了《污水潜热能图制作指南》,

用于仙台、浦安、丰田、茨城、神户和福冈等 6 个城市未来下水道热能利用工程。

2 发达国家污水热能利用政策

污水余温热能藉日臻完善的水源热泵技术,工程应用在技术上已不存在太多问题,关键取决于政府对这一可再生清洁能源的认识、态度以及相应的政策、法律和经济补贴。因此,有必要了解上述发达国家在这一方面的做法与经验。

2.1 相关法律

2.1.1 欧洲

虽然欧洲国家为减少化石燃料使用,鼓励利用可再生能源(至 2014 年,欧盟国家家庭供热和制冷能源约有 18% 来源于可再生清洁能源),但欧盟对于污水热能回收还没有制定出十分准确的政策规定,仅在宏观上建立了应对气候变化的弹性能源联盟,主要开展能源供应安全、内部能源市场、节能减排和相关技术研究。

欧盟从 2009 年开始颁布一系列相关法律文件(见表 1)^[17],似乎并没有微观规定至采用热泵技术回收污水热能。但是,宏观内容在一定程度上鼓励了一些国家对热泵技术的发展,并制定出一些相应的政策和补贴细则。

表 1 影响欧洲热泵技术发展的法律文件

Tab. 1 Legal documents affecting developing heat pump technologies in Europe

发布年份	立法名	针对目标
2009 年	可再生能源指令(RED)	可再生能源
2009 年	能效标签指令	能量效率
2009 年	能源产品相关生态设计一框架指令(ErP)	能量效率
2010 年	建筑能效指令(EPBD)	可再生能源能量效率
2010 年	能源效率指令(EED)	能量效率
2013 年	加热器和热水器生态设计法规	能量效率
2013 年	加热器和热水器能源标签法规	能量效率
2014 年	含氟气体法规	温室气体排放
2014 年	生态标签框架指令:热泵、液体循环加热系统和办公楼生态标签认证	能量效率、可再生能源、温室气体排放
2014 年	政府绿色公共采购	能量效率、可再生能源、温室气体排放
2016 年	欧洲供热制冷战略	家庭/企业费用、温室气体排放

在欧盟可再生能源以及能量效率法律框架之下,一些欧盟国家相继出台了各自法律细则。2015 年,德国颁布了《可再生热法》,明确指出利用热泵技术回收环境热量属于可再生能源;德国联邦环境、自然保护、建筑和核安全部(BMUB)于 2016 年 12 月 19 日颁布了《促进制冷和空调系统准则》,已涉及到废热和余热回收设备补贴措施;2018 年 2 月 21

日德国又发布了《促进与市场相关的气候保护产品的指南》,明确对建筑物灰水分散热回收提供经济补贴的措施。

2014 年挪威政府通过新的税收法案对氢氟碳化物制冷剂(HFCs)税额的增收倍增 44%,并且提高供热所耗燃油、天然气价格,以推进污水源热泵技术的发展和旧供热系统的升级改造。

虽然瑞士属于非欧盟国家,但对污水热能回收给予了相当的重视,并为之立法。早在2004年,瑞士联邦能源办公室便发布了《污水热能回收指南》,提倡利用污水热能;随后,又相继出台了《能源法》(2014)和《能量调节法》(2015)。前者在宏观上构建了能源供应框架,后者则从微观角度详细规定、规范了对污水处理厂余热热能的利用。

2.1.2 日本

日本在推进城市污水余热热能利用方面已颁布了相关的法律。1972年颁布的《热供给事业法》对污水余热热回收事业化、发展服务业进行了相关规定;2012年修订《下水道法》,对下水道管路换热器等部件安装和不同单位获取下水道水源许可进行了规定;2011年修订的《都市再生特别措施法》和2012年颁布的《城市低碳化促进法》分别对特定城市再生能源使用地区和低碳城市规划区建立了民间、企业利用下水道获取污水余热热能许可证制度;2016年修订的《道路法》对地下供热导管配置给予占用许可。可见,日本在法律上对城市污水余热热能回收事业化发展和规划相当重视。

2.2 组织与协作机制

在日本,下水道管理、相关企业、城市规划等部门间建立了三方协作关系,本质上为PPP协作模式,已在诸多工程得到有效运用,各部门职能见图2。

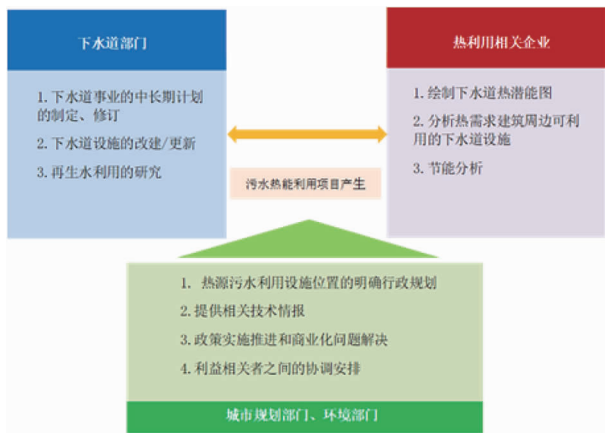


图2 日本利用下水道污水热能三方协作(PPP)模式

Fig.2 Collaborating mode of utilizing thermal energy from the sewers between stakeholders

在技术开发管理上,日本于1980年成立了新能源开发组织,并在2003年成为国家独立行政机构。在城市污水热能回收项目规划阶段,以公募资金形式汇集产业单位、学术界、政府等优势资源,对项目

运行阶段实施严格审查,以协作方式不仅推动政府部门出台扶持政策,同时也提高企业的竞争力。

欧盟25个国家的热泵和零部件制造商、大学/研究机构、测试实验室和能源机构总共128个成员组成了欧洲热泵协会(EHPA),向欧盟所属国以及地方当局在立法、监管和能源效率方面提供法律内容、技术支持和经济投入,旨在克服市场壁垒,传播信息,以加快热泵市场发展,推动污水热能用于供热、冷却和热水加热领域。

德国在推进家用分散式灰水热能回收基础设施建设方面采用相关利益者参与制度。为顾全各方相关利益,政府已筹备3次研讨会,利益相关者代表与科学家和技术管理部门一道举行圆桌讨论会,目的是确立统一的评价方法和标准。相关工作已在法兰克福和汉堡一些示范地区展开^[15]。

加拿大建立了一种未来城市优质能源系统(QUEST)。作为一个合作网络组织,其成员主要来自能源、技术和基础设施行业,也涵盖天然气与电力公司、各级政府、民间社会团体和社区的负责人、研究人员以及咨询机构。该组织鼓励并组织各参与方进行能源问题平等对话和信息交流,支持在加拿大各地发展综合社区能源系统(ICES),以提高专业知识和建设能力。ICES系统部分已开始涉及利用城市污水热能,开展独立、包容的应用研究,为社区和关键利益相关者建立一个协作框架,以尝试发掘仍未涉足的可再生能源。

2.3 经济政策

2.3.1 设备补贴

德国在2015年开始实行市场激励计划(MAP),为企业和住户使用可再生能源供热提供资金支持。在热泵补贴方面,开始只考虑对地源热泵和空气源热泵进行补贴,接着增加对新式高效热泵、有废热和余热回收的空调设备和建筑灰水热能回收系统进行补贴。达到规定输出热量的污水源热泵系统可获得6000欧元补贴;带有灰水换热器的淋浴设施亦可获得补贴,根据换热器安装数量可以得到200~250欧元补贴;安装第二套灰水换热器时获得的补贴额度可增至500~550欧元;符合要求的热泵系统升级也可一次性获得200欧元固定补贴。

瑞典为减少家庭供暖电能消耗,政府提供资金补助来鼓励使用污水源热泵交换供热;2006年—2010年间住宅和相似楼宇住户可以获得30%的设

备和安装费用补贴(最高不超过 30 000 克朗)。

英格兰、苏格兰和威尔士的住户在安装可再生能源供热系统时亦可获得高达 1 250 英镑的政府补贴。苏格兰政府还发放取暖贷款基金,用以解决实施地区供热财政和技术障碍;企业及民用工程最高可获得 50 万英镑低息无担保贷款(还款期 10 ~ 15 年)。自 2011 年以来,苏格兰已向 40 个不同项目提供了超过 1 000 万英镑的贷款。

美国能源部(DOE)通过气候辅助计划(WAP)向各州发放补助金,用于可再生供热设备改造,主要是用以提高低收入家庭能源利用效率;在降低住房能耗上的平均补助为每户 6 500 美元。

2.3.2 税收减免及其他优惠

瑞典自 2005 年 5 月 15 日开始对公共事业中商业建筑可再生能源供热设备(含污水源热泵)投资实施 30% 税收减免政策,单体建筑最高补助额为

5 000 000 克朗。

美国国家税务局发布了《商业能源投资税收抵免》(ITC)、《节能商业建筑减免》条例,对企业使用可再生能源供热、制冷设备予以 3 ~ 19 美元/m² 税收减免。《住宅能效税收抵免》条例规定对使用热泵交换热水器 COP 达到 2.0 以上的给予 300 美元税收抵免。

3 我国污水热能利用情况

我国部分城市已开始尝试利用污水余温热能供热、制冷工程,虽仍属于起步阶段,但发展速度较快。我国有关污水源热泵系统设计的研究较多^[2];通过污水处理厂出水实现厂内集中供热、制冷的案例已屡见不鲜,商业建筑原位利用污水的工程^[5,18-21]也开始显现(见表 2)。在北京、哈尔滨、长春、沈阳、天津、大连等 47 个大中城市每天排放的污水中可利用的余温热能总量可达 1.26 ~ 132.72 GJ/d^[22]。

表 2 我国城市部分商业建筑污水余温热能利用项目

Tab. 2 Commercial utilization projects of thermal energy from wastewater/effluent in some Chinese cities

地 点	热源类型	制热量/kW	制冷量/kW	建筑面积/m ²	换热器形式
山西国瑞大厦	原污水	1 880	2 994	66 945	管壳式
哈尔滨滨江宾馆	原污水	1 110	1 040	18 000	管壳式
哈尔滨太古商城	原污水	1 600	1 260	34 000	管壳式
重庆朝天门基良广场	原污水	1 834	8 369	32 140	浸没式
北京悦都大酒店	原污水	1 176	1 113	14 000	间接式
北京奥林匹克村	再生水	21 000	23 180	413 250	直接式
大连星海广场	再生水	126 380	167 160	2 000 000	直接式
天津公馆	原污水	2 797	1 070	54 000	喷淋式
呼和浩特温馨家园小区	原污水	10 700	5 640	238 200	管壳式

中央政府为降低建筑能耗出台了相关政策框架文件。其中,补贴政策文件有《节能技术改造财政奖励资金管理暂行办法》,规定每节省 1 t 标准煤享受中央财政奖励 200 ~ 250 元/t 标准煤,并对示范城市节能项目提供大额资金支持。然而,对于煤改电补贴对象多为空气源热泵,还未涉及到污水源热泵。

4 污水热能集中利用设想

上述国内外污水余温热能利用综述表明,已实施的工程以原位管道在线利用原污水为主。即使国外已开始倡导的居家原位利用污水热能的概念也基于源分离后的灰水。这就需要对热泵换热器堵塞、防腐、除垢等防护措施进行特别设计,以最大限度减少热泵运行异常情况并延长热泵的工作寿命。

事实上,污水处理后的出水水质相对干净,基本不存在利用原污水时需要考虑的换热器上述问题。

况且,大规模管道原位在线利用污水热能在冬季时不利于随后进入污水处理厂的生物处理设施,可能导致生物处理冬季运行时的效果变差。例如,北京地区冬季进入污水处理厂的水温最低为 12 ~ 14 ℃;如果前端管道普遍在线取 5 ℃ 温差用于热泵交换热量,则会使取用热量后进入污水处理厂的进水温度降至 10 ℃ 以下;这样,势必对生物处理造成极大负面影响。从这个意义上说,城市楼宇大规模采用管道原位利用污水热能的实践并不可取,也不应鼓励。

这可能会催生污水处理厂利用处理后出水集中交换热、冷量的实践。然而,从污水/出水中交换出的热量属于低品位能源,难以用于发电,只能直接利用热量,用于厂内或周边近距离(3 ~ 5 km)供热、制冷目的。固然,在污水处理厂周边已有或再建住宅小区/工企建筑就近利用集中交换出的热/冷能源为

最佳选择,荷兰等欧洲国家也开始实践。如果这种应用因建筑或热力规划受限,出水中巨大热量输出则需要有大而稳定的出路或用户。

对此,结合污水处理剩余污泥未来处理/处置路线,提出了“污泥干化后直接焚烧”的技术设想^[23]。从出水中集中交换出的热量可用于脱水污泥热干化,使脱水污泥含水率从80%降至40%~70%(取决于有机质含量)后直接焚烧,产生的高热热量可用于发电、灰分提磷后用作建筑材料。污泥干化后直接焚烧可采用污水厂内分散干化、集中至远离人口密集区焚烧方式,最大限度降低人们对污泥焚烧产生的主观担忧。从某种程度上看,污泥干化后焚烧相当于将低品位热能转化为可发电的高品位热能。再者,污泥焚烧厂亦可吸纳厨余等有机固体废物混烧,以增加热值并减少垃圾焚烧重复投资。最后,污泥焚烧厂实际上将会变为发电厂和磷资源回收与建材制造厂。

此外,出水集中交换热能后用于周边农业大棚/温室供热也不失为一种潜在选择。从城市规划以及居住喜好角度,污水处理厂周边少有民用建筑,往往都被设置在城乡结合部位置。因此,在污水处理厂周边农田建设大棚/温室实施农业、花卉种植,不仅可以就近获得加温热能,而且可以直接利用污水处理厂出水灌溉作物。

5 结语

污水中含有巨大余温热能,在可持续发展的全球主题下已渐渐被国际社会所关注。然而,污水热能为低品位能源,难以用于发电,只能就近用于热交换后的供热、制冷。水源热泵技术被用于交换污水中的热能,但是热交换器原位利用污水时存在堵塞、腐蚀、除垢等问题,对实际应用有些阻碍。因此,原位利用污水热能的国内外工程尽管已屡见不鲜,但应用进展缓慢,多为获得政府经济补贴支持的示范工程,维持长期运行存在争议。

尽管欧洲等一些国家提出了居家水平原位利用污水热能的设想,甚至已建设了示范工程,但这种分散式利用方式需以粪尿源分离为基础,往往只能在对生态循环认识水平达到相当高度的国家才能获得应用。日本直接利用污水余温冬季融雪的做法虽然简单,但应用范围和时间十分有限。

因此,污水经集中处理后在污水处理厂集中交换热能较分散式便于集中管理运行,且水质较好,不

会产生堵塞、结垢甚至腐蚀问题,有利于热交换器长期正常工作。重要的是,在污水处理末端回收热能不会在冬季降低进水温度而影响生物处理效果。在污水处理厂集中回收热能唯一缺陷是交换出的热量消纳问题,这就需要在厂内和厂周边找到稳定的热量消纳用户。

出水集中热能利用首选是服务于周边住宅或工企空调热量交换。从污水处理剩余污泥终极处理、处置角度,交换热量用于污泥热干化后焚烧则是一种不错的出路。此外,在污水处理厂周边农田建设大棚/温室,接收污水处理交换热能也是一种潜在、稳定的出路。

参考文献:

- [1] Hofman J, Hofman-Caris R, Nederlof M, *et al.* Water and energy as inseparable twins for sustainable solutions [J]. *Water Sci Technol*, 2011, 63(1): 88–92.
- [2] Hepbasli A, Biyik E, Ekren O, *et al.* A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems [J]. *Energ Convers Manage*, 2014, 88: 700–722.
- [3] Dürrenmatt D J, Wanner O. A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers [J]. *Water Res*, 2014, 48: 548–558.
- [4] Alekseiko L N, Slesarenko V V, Yudakov A A. Combination of wastewater treatment plants and heat pumps [J]. *Pacific Sci Rev*, 2014, 16(1): 36–39.
- [5] Fiore S, Genon G, Nedeff V, *et al.* Heat recovery from municipal wastewater: Evaluation and proposals [J]. *Environ Eng Manage J*, 2014, 13(7): 1595–1604.
- [6] Zhang M Y, Sun L Y, Jiang Y Q, *et al.* Comprehensive evaluation of sewage source heat pump system applied in Shanghai [A]. *International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment* [C]. USA: IEEE, 2010.
- [7] Shen C, Lei Z, Wang Y, *et al.* A review on the current research and application of wastewater source heat pumps in China [J]. *Therm Sci Eng Progr*, 2018, 6: 140–156.
- [8] Çakıra U, Çomaklıb K, Çomaklı Ö, *et al.* An experimental exergetic comparison of four different heat pump systems working at same conditions: As air to air, air to water, water to water and water to air [J]. *Energy*, 2013, 58: 210–219.
- [9] Averfalk H, Ingvarsson P, Persson U, *et al.* Large heat pumps in Swedish district heating systems [J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2017, 79: 1275–1284.

- [10] Neugebauer G, Kretschmer F, Kollmann R, *et al.* Mapping thermal energy resource potentials from wastewater treatment plants[J]. *Sustainability*, 2015, 7(10):12988–13010.
- [11] Neugebauer G, Stöglehner G. Realising energy potentials from wastewater by integrating spatial and energy planning[J]. *Sust Sanit Pract*, 2015, 22:15–21.
- [12] Hawley C, Fenner R. The potential for thermal energy recovery from wastewater treatment works in southern England[J]. *J Water Climate Change*, 2012, 3(4):287–299.
- [13] Culha O, Gunerhan H, Biyik E, *et al.* Heat exchanger applications in wastewater source heat pumps for buildings: A key review[J]. *Energ Buildings*, 2015, 104:215–232.
- [14] Mazhar A R, Liu S, Shukla A. A key review of non-industrial greywater heat harnessing[J]. *Energies*, 2018. DOI:10.3390/en11020386.
- [15] Zimmermann M, Felmeden J, Michel B. Integrated assessment of novel urban water infrastructures in Frankfurt am Main and Hamburg, Germany[J]. *Water*, 2018. DOI:10.3390/W10020211.
- [16] Togano Y, Ueda K, Hasegawa Y, *et al.* Advanced heat pump systems using urban waste heat “Sewage Heat”[J]. *Mitsubishi Heavy Ind Tech Revi*, 2015, 52(4):80–87.
- [17] Gaigalis V, Skema R, Marcinauskas K, *et al.* A review on Heat Pumps implementation in Lithuania in compliance with the National Energy Strategy and EU policy[J]. *Renew Sust Energ Rev*, 2016, 53:841–858.
- [18] 侯亚芹, 司建伟. 污水源热泵的研究进展[J]. *建筑节能*, 2010(10):32–33.
Hou Yaqin, Si Jianwei. Development of sewage source heat pump[J]. *Building Energy Efficiency*, 2010(10):32–33(in Chinese).
- [19] 徐猛, 徐莹, 孙德兴. 原生污水源热泵的关键技术与工程实践[J]. *节能技术*, 2009, 27(1):74–77.
Xu Meng, Xu Ying, Sun Dexing. Chief technology and project practice of urban sewage heat pump[J]. *Energy Conservation Technology*, 2009, 27(1):74–77(in Chinese).
- [20] 刘义坤, 康侍民, 冷先凯, 等. 重庆市污水源热泵系统的工程应用与分析[J]. *制冷与空调*, 2010, 24(4):61–67.
- Liu Yikun, Kang Shimin, Leng Xiankai, *et al.* Application and economic analysis of sewage source heat pump system in Chongqing[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2010, 24(4):61–67(in Chinese).
- [21] 张亚立, 孙德兴, 张吉礼. 污水水源热泵供热技术经济性分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2006, 25(4):64–66, 70.
Zhang Yali, Sun Dexing, Zhang Jili. Cost-effectiveness analysis on sewage source heat pump[J]. *Building Energy & Environment*, 2006, 25(4):64–66, 70(in Chinese).
- [22] 宋孝春, 张亚立, 劳逸民, 等. 北京奥运村再生水热泵冷热源系统设计[J]. *暖通空调*, 2017, 47(1):74–79, 54.
Song Xiaochun, Zhang Yali, Lao Yimin, *et al.* Design of reuse water-source heat pump cold and heat source system for Beijing Olympic Village[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2017, 47(1):74–79, 54(in Chinese).
- [23] 郝晓地, 陈奇, 李季, 等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4):35–42.
Hao Xiaodi, Chen Qi, Li Ji, *et al.* The ultimate approach to handle excess sludge: Incineration and drying[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4):35–42(in Chinese).



作者简介:郝晓地(1960—),男,山西柳林人,博士,教授,从事市政与环境工程专业教学与科研工作,主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术,现为国际水协期刊《Water Research》区域主编(Editor)。

E-mail:haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期:2018–11–15