

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.16.003

《城镇地下式污水处理厂技术规程》要点简析

董磊^{1,2}, 张欣¹, 杨一烽¹

(1. 上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 地下式污水处理厂具有占地面积小、环境友好、二次污染少、不影响周边土地价值等优点,同时也存在建设投资高、运行能耗高、维护管理成本高等问题。地下式污水处理厂通风及排烟条件差、易受潮腐蚀,设备检修不便,设计和建设不当易发生受淹、中毒、燃爆以及逃生困难等重大危害。2021年1月,中国工程建设标准化协会发布实施《城镇地下式污水处理厂技术规程》(T/CECS 729—2020),以规范我国地下式污水厂的设计、建设和运维管理。从编制背景、编制思路、编制内容三方面对该规程进行重点解读,以利于工程技术人员深入理解地下式污水厂设计的关键技术要点,促进行业发展和技术进步。

关键词: 地下式污水处理厂; 安全保障; 规程要点

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)16-0014-07

Synopsis of Key Points for Technical Specification for Urban Underground Wastewater Treatment Plant

DONG Lei^{1,2}, ZHANG Xin¹, YANG Yi-feng¹

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Underground wastewater treatment plants have the advantages of small footprint, environmental friendliness, less secondary pollution, and no influence on the value of surrounding land. But it also has disadvantages such as high investment of construction, high energy consumption of operation, high cost of maintenance and management. In addition, the underground wastewater treatment plants have the following problems: (i) Ventilation and smoke exhaust conditions are poor. (ii) Facilities are susceptible to humidity and corrosion. (iii) Equipment maintenance is not convenient. (iv) Improper design and construction can easily lead to serious dangers such as floods, poisoning, explosions and difficulties in escape. In January 2021, the China Engineering Construction Standardization Association has issued the *Technical Specification for Urban Underground Wastewater Treatment Plant* (T/CECS 729—2020). The design, construction and operation system of the underground WWTP was standardized. The establishment background, ideas and contents of the regulations are mainly interpreted, which is helpful

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”项目(20QB1404800、21YF1443900); 上海市领军人才资助项目(2018088); 上海市人才发展资金资助项目(2021046)

通信作者: 张欣 E-mail: zhangxin@smedi.com

for engineers and technicians to deeply understand the key technical points of underground WWT design, promoting profession development and technological progress.

Key words: underground wastewater treatment plant; safety guarantee; key point of regulation

地下式污水处理厂(以下简称“地下厂”)具有环境友好、占地面积小、能够与绿化和水景有机结合、美观性好、可带动周边地块品质提升等优点,近年受到各地政府和周边居民的认可,建设需求急剧增加,成为新时期我国城市污水处理设施建设的重要发展方向^[1]。但是地下厂的设计、建设、管理等方面有别于传统地上式污水处理厂(以下简称“地上厂”),存在建设投资高、运行能耗高、维护管理成本高,易发生受淹、受潮,设备易腐蚀,通风及排烟条件差、检修不便、逃生困难等实际问题。

地下厂的建设普遍对土地综合利用、地下箱体集约化布置、设备选型要求、全专业安全保障设计等方面具有更高的设计要求,目前国内还缺少地下厂建设和设计技术相关的标准。2018年发布的《城镇污水处理厂节地技术导则》(T/CECS 511—2018),从节地设计角度对地下厂进行了简要规定;2019年12月发布的《地下式城镇污水处理厂工程技术指南》(T/CAEPI 23—2019),从污染防治角度提出了地下厂的总体技术要求;2020年6月浙江发布的《地埋式城镇污水处理厂建设技术导则(试行)》,针对浙江省地下厂的设计、施工和工程验收提出了技术指导和原则性要求,缺乏工艺、建筑、结构、暖通、电气、仪表等全专业的详细规定。

更重要的是,我国原有的标准、导则体系在地下厂的土地集约利用、总体布置、防淹、防潮、防腐、消防、通风、除臭等安全保障方面缺乏科学系统的指导。虽然地下厂具有节地的优势,但国内外建成的相同规模的地下厂占地面积大小、竖向设计、箱体布置区别较大,造价也有很大差异^[2],亟需做好顶层规范;地下厂遭遇失电或强降雨时,由于位于地下空间易发生雨水倒灌或污水外泄,受淹隐患高于地上厂,防淹设计的可靠性要求更高^[3];由于污水处理构筑物在地下,受湿度影响,设备设施更易受潮,因此,工艺、结构、电气、仪表专业迫切需要相应的防潮、防腐设计。虽然地下厂火灾危险性较低,但发生局部火灾时,地下箱体的人员疏散、消防设计要求与地上厂有较大不同,各地消防审批要求差异

也较大,尚未形成统一共识^[4-5];污水厂从地上转入地下后,自然通风往往难以满足设计要求,采用机械通风虽然保障度高,但能耗大幅上升,同时相对封闭的空间内更易形成臭气和毒气积聚,因此臭气收集、输送和处理的全过程控制要求进一步提高^[6-8]。如何解决以上问题直接影响地下厂建设的可行性、设计细节、工程造价和运维管理,是工程技术需要重点解决的问题^[9-10]。

为深入打好碧水蓝天保卫战,建设环境友好、低碳节约型社会,推动国内地下厂建设的健康可持续发展,规范地下污水处理设施的设计、建设和运维,2017年10月中国工程建设标准化协会下达了《城镇地下式污水处理厂技术规程》的编制任务。上海市工程设计研究总院(集团)有限公司和中国水环境集团有限公司作为联合主编单位承担了该规程的编制工作,参编单位有中国市政工程西南设计研究总院有限公司、广州市市政工程设计研究总院有限公司、应急管理部天津消防研究所和同济大学。经过近三年的调查研究和梳理总结,2020年7月28日中国工程建设标准化协会标准——《城镇地下式污水处理厂技术规程》(T/CECS 729—2020,以下简称《规程》)正式发布,2021年1月1日正式实施。

1 标准编制思路

鉴于我国地域辽阔,地区差异大,各地关于“地下厂”的称谓较多,易混淆,不利于建设标准、投资、运行成本等指标的量化考核评判,因此《规程》针对全地下和半地下厂、地下箱体、操作层等专有名词和概念进行了释义,规范了专业术语。该《规程》首次提出并定义了地下厂“占地利用率”“地下空间利用率”“设计冗余度”等新术语。地下厂不仅应做到平面布置紧凑,提高“占地利用率”,还应充分利用地下箱体的竖向空间,有效提高“地下空间利用率”,引导地下厂建设向土地集约利用、投资经济和资源节约方向健康发展。同时,在符合成熟可靠、流程简短、清洁低碳、耐冲击负荷的原则下留有“设计冗余度”。

2 要点简析

2.1 总体设计

《规程》规定:“地下厂设计应以批准的城镇总体规划和排水工程专业规划等相关规划为主要依据,根据所在区域功能定位、周边的环境影响敏感程度、用地面积、卫生防护距离、上部空间利用等因素综合论证设计方案。”《规程》并没有一味推崇地下厂建设,《规程》3.0.1条文说明指出:“由于地下厂建设投资大、运行成本高、安全风险高,条件许可时应优先在地面建设,慎用地下式,并以批准的城镇总体规划和排水专业规划等为依据,确保设计方案符合要求。”

2.2 建设型式

我国各地的地下厂建设大多遇到过建设型式的疑惑,到底采用全地下式还是半地下式,《规程》指出“应根据地块开发要求、地面使用功能、经济能力、水文及工程地质条件、排水管网进水高程和排放水位等统筹规划”。条件许可时,宜优先采用半地下式污水处理厂设计,因为半地下式便于人员和设备进出、通风设计,能够大幅降低投资和运行费用;对环境影响敏感程度高、经济条件许可、地面开发要求高时可采用全地下式。

2.3 建设规模

由于地下厂建设难度大,建成后难以扩建,确定建设规模时应充分考虑各种不确定因素,留有设计冗余度。因此,《规程》规定:地下厂的建设规模应根据服务范围内规划年限的人口规模、用水量和管网收集率等通过水量预测确定,并应留有余量;地下厂的设计流量应按最高日最高时流量确定;建设用地应按项目总规模和工艺设计要求控制;地下箱体土建工程宜按远期规模一次建成,设备可分期安装。

2.4 安全保障技术规定

2.4.1 防淹

根据地下厂易受淹的特点,应采取“以防为主,以排为辅,截堵结合,因地制宜,综合治理”的原则。为保证地下厂的运行安全,提高防淹防洪应对能力,根据工程实际,《规程》首次在以下八个方面制定了防淹保障条文:

① 在地下厂进、出通道设计方面,考虑到近年来,全国各地极端天气频发,特大暴雨引起的洪

涝事件对地下空间的影响较大,为防止外水进入地下厂,《规程》规定:进出地下箱体的通道应设置驼峰,驼峰高度应不小于0.5 m,驼峰后在通道的中部和末端均应设置横截沟。

② 在地下厂吊装口、通风井设计方面,《规程》规定:吊装口及其他地下生产车间通向地面的开口部位,其开口处标高应高出厂区地面标高不小于300 mm;与地下箱体相连的通风井底部应有排水设施,通风井开口处标高应高出厂区地面标高不小于500 mm。

③ 在地下厂进、出水设计方面,根据工程实际,采用进水速闭闸的设置方式可以有效防止各种极端条件下地下箱体的受淹,包括失电或其他事故工况,因为速闭闸关闭不需要电力供应。因此,《规程》规定:宜在进入地下箱体前的进水管上设置闸门井,闸门井内宜设置正向受压速闭闸。应在进入地下箱体内的总进水口设置速闭闸,速闭闸应在30 s内全关闭,速闭闸启闭机及现场按钮箱应高于最高设计水位1 m;并建议有条件时设置进水流量电动调节阀,以防事故工况下因处理构筑物水位上涨而发生的污水冒溢。

④ 在地下厂构筑物设计和设备防护方面,《规程》指出,应通过构筑物设计、设备防护等措施防止外水进入地下箱体。为防止水量增大时污水冒溢,《规程》规定:重力流后续处理构筑物池顶标高不得低于前续处理构筑物的最高水位标高。同时考虑到地下构筑物或设备若运行不当造成溢水或漏水,需在低处设排水泵房,通过放空泵将积水及时迅速地提升至地下厂进水端。《规程》规定:地下厂构筑物应设置放空设施,当采用重力放空管直接接入放空泵房,且受场地限制无法满足要求时,应在放空总管上设置紧急关闭阀。放空泵房的集水池顶标高应高于所服务处理构筑物的最高水位,以免局部积水对运维人员的人身安全和健康造成伤害,或者损坏设备设施而造成经济损失。

⑤ 在地下厂构筑物过流能力核算方面,考虑到地下厂一旦受淹,会造成设备设施失灵,影响区域环境及居民正常排水,因此应保证流程中各构筑物在极端不利工况下的过流能力能够满足要求。《规程》规定:地下厂工艺流程下游构筑物和管道的过流能力不应小于上游过流能力,并应留有余量。对于水质和(或)水量变化较大的地下厂,可采用流

量控制措施,或适当增加构筑物超高用于缓冲和调蓄。

⑥ 在电气仪表设计方面,《规程》规定:地下厂的防淹用电设备应配备应急电源。由于地下厂地势低,在外电源失电时连续进水可能淹没厂区,因此,非常有必要配备应急电源为进水阀门及相关设备设施提供电源保证。同时《规程》指出,35 kV及以上变配电设施宜设置在地下厂的地面;为主要进水泵、出水泵、中间提升泵供电的变配电系统应至少设2台变压器,当一台变压器事故停运时,另一台变压器宜承担重要水泵及一、二级负荷的运行,事故保证率应不低于60%。排水泵、放空泵等重要用电设备应采用二路电源供电,二路应引自不同变压器供电母排,且应末端自切;地下厂进水端及各级泵房出水处应设置液位检测仪表和报警装置,并与泵组自控制系统联动,确保防淹的可靠性。

⑦ 在施工与验收方面,《规程》规定:地下箱体结构变形缝的止水带应按设计要求选用;施工过程中应注意保护止水带,防止漏水;地下箱体防水工程施工完成后,应开展蓄水试验,不得渗漏;进水速闭闸安装完成后应在手动及电动模式下调试,启闭试验应大于3次。设备安装后应在单机调试、功能性试验完成并验收合格的基础上开展联动调试,确保设备安全可靠运行。

⑧ 在运维与维护方面,《规程》规定:地下厂应设置针对不同季节、不同进水量水质的运行方案;进水速闭闸每个月应进行1次加注润滑油等方面的维护保养以及启闭检验,每次启闭应至少带电启闭和不带电速闭各1次。泵房每年应至少清洗1次,应检修集水池水位标尺或液位计及转换装置并按时记录集水井内水位。

2.4.2 防潮防腐

地下厂内部空间的湿度显著高于地上厂,水泵、格栅、各类仪表等设备设施更易发生腐蚀,其主要原因有三方面:①地下厂通风换气时内外部温差大。地下厂都需要通风换气,地下和室外地表温度温差较大,造成地下箱体操作层空气湿度大,容易形成冷凝水汽挂在墙壁表面或缝隙,引起潮湿发霉,南方梅雨季节现象尤为突出。如果不采取特殊除潮设计,地下箱体潮湿将会给后续的维护管理带来较大麻烦。②处理构筑物释放的本底水汽高。污水处理构筑物采用地下型式建设释放的本底水

蒸气会加大地下箱体内部的湿度,尤其是生物反应池曝气、局部构筑物设计不当而导致过多跌水都会增加空间湿度。③地下厂内的设备及管道“跑冒滴漏”难以避免。地下厂设计使用寿命长,由于设备和管道繁多,很难做到滴水不漏,尤其螺旋输送机、砂水分离器、水泵、脱水机等进出料口都是常见的渗漏点,部分水池缝隙渗水也会增加空气湿度。

对照以上原因,《规程》从以下四方面制定了防潮防腐条文:①针对通风换气引起的湿度,《规程》规定“通风系统设计应满足排除余热、余湿的要求”。②针对污水处理本底释放的水汽控制,《规程》规定“水池的敞开水面宜加盖,经常检修的区域应设置移动盖”。③针对设备的防潮防腐,《规程》9.4节单列了设备“防潮防腐”的具体技术要求,指出地下厂操作层和设施层内的电气设备外壳柜体宜采用不锈钢材质,防护等级不宜低于IP55,防腐等级宜为WF1/WF2级。全地下厂内部的电气设备宜装设自动加热器,以避免潮气影响。④针对建(构)筑物的防潮抗渗,《规程》中明确“箱体顶板防水等级为一级,防水层中至少一道为耐根穿刺防水层”。同时,地下箱体底板和侧壁防水等级不应低于二级。结构设计应采用防水混凝土,设计抗渗等级不应低于P8。除了防水和抗渗等级规定外,《规程》还规定“施工缝宜设置在受力较小的截面处,并采取措施保证先后浇筑的混凝土间的良好固结,必要时加设止水措施”。通过增加耐根穿刺防水层,采取变形缝止水带等措施,有效提高池体的抗渗性能,从而满足防潮防腐需求。

地下厂的防潮防腐工作十分重要,一直贯穿其投运前后的全生命周期,需要建(构)筑物设计、设备设施选型、施工安装、运行维护各阶段主动预防、科学防治,保证污水厂的正常运行。

2.4.3 防毒防爆

污水污泥处理不可避免地存在有毒有害气体释放,地下厂更需要重视防毒防爆问题。《规程》指出,地下厂的污水及污泥处理工艺选择应充分论证,禁止采用生产过程中存在连续或周期性大量泄漏或释放有毒有害物质、无法有效密闭收集臭气的工艺及设备。

《规程》规定:地下厂的综合办公楼、总变电室、中心控制室等运行和管理人员集中的建筑物宜设置于地面上;有爆炸危险的设施和处理单元不宜设

置在地下箱体内部。

对于有可能使用危险化学品的地下厂,《规程》要求药剂制备或储存设施应设置在地下箱体外部,可采用地面槽罐车重力转输或通过泵加压输送补充药剂储罐,且所有药剂储罐应设置围堰防止外溢。

《规程》首次对地下厂的有毒有害气体仪表检测位置及检测项目进行了具体规定,如表1所示。

表1 有毒有害气体仪表检测位置及检测项目

Tab.1 Detection positions and items of toxic and harmful gas meters

仪表检测位置	检测项目
操作层预处理段、生物处理段、污泥处理段	H_2S 、 NH_3 、 CH_4
设施层	H_2S 、 NH_3 、 CH_4 、 CO_2
除臭设施进、出口	H_2S 、 NH_3
其他易产生有毒有害气体的密闭房间或空间	H_2S 、 CH_4

2.4.4 消防安全

国家现行消防规范缺乏对地下厂建(构)筑物的定性,一般参照《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014,2018年版)丁戊类地下厂房消防设计要求,所以各地消防审批要求有明显不同,“一事一议”,缺乏统一共识,易出现过度设计,造成地下厂防火分区划分数量过多,消防排烟系统复杂,过多的逃生楼梯会限制地上空间的开发利用,影响地面景观^[4]。为此,《规程》首次在以下两方面制定了消防安全保障条文:

① 关于防火分区划分。结合主参编单位在全国各地的地下厂设计、建设和管理经验,《规程》指出地下厂附属建筑物如鼓风机房、通风机房、加药间、除臭设备间等宜在操作层集中布置,减少防火分区数量。根据文献报道的地下厂可燃物性质和各建(构)筑物火灾危险性分类,结合上海、深圳、北京、郑州、昆明等地的地下厂建设实际和消防审批要求^[2],《规程》将地下厂操作层空间划分为设备用房区、处理区2类区域,指出:“1 操作层设备用房的消防设计应符合现行国家标准《建筑设计防火规范》GB 50016的规定。2 操作层生物池、二沉池等处理区的防火分区面积可按工艺要求确定,其中的水面面积可不计入相应防火分区的允许建筑面积。”操作层处理区主要为加盖水池上部空间,该区域一般布置与构筑物本身直接相关的设备,无可燃物,

除故障检修外工人几乎不到达该区域,无火灾安全隐患,可将处理区整体视为一个防火分区。这样能够有效控制防火分区数量,减少非必要的防火隔断和消防冗余设计。

② 关于疏散通道和安全出口。考虑到地下厂操作层一般比较空旷,工作人员密度低且人员对地下厂内部疏散通道和安全出口比较熟悉,当局部发生火灾时,人员疏散较地下商场等其他地下空间相对容易,《规程》在疏散通道和安全出口设计要求方面较现行《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014,2018年版)有一定突破,规定“操作层处理区每个防火分区内任一点至最近安全出口的直线距离不宜大于60 m,可利用通向相邻防火分区的甲级防火门作为第二安全出口”。与2018年版的GB 50016—2014规定的一、二级耐火等级的戊类“地下或半地下厂房”的疏散距离相比,将“应”改为“宜”,更贴合地下厂的工程实际。考虑到火灾时地下厂可能出现正常供电中断,《规程》强化了消防照明要求,规定“楼梯间、前室或合用前室的疏散照明地面照度标准不应低于5 lx,其他疏散通道照度不应低于1 lx;疏散照明连续供电时间不应少于60 min”,并指出疏散指示和疏散照明等应自备应急电源,确保局部火灾时人员的安全疏散。

2.4.5 通风除臭

污水厂从地上转入地下后,由于处于相对封闭的空间,恶臭气体的控制条件优于地上厂,但自然通风条件比地上厂差,常采用机械通风来保证地下箱体的空气质量。通风和除臭系统密切相关,合理的通风系统有助于臭气的控制,《规程》指出,地下箱体的粗细格栅、曝气沉砂池、初次沉淀池、储泥池等处理区和污泥浓缩脱水机房、除臭间、加药间等建筑物,应单独设置机械通风系统,并满足事故通风要求。对于恶臭污染物难以完全封闭的地下空间,应统筹兼顾通风系统和除臭系统的流速场,合理组织气流,以满足臭气浓度控制的要求。

① 通风系统设计关键技术要求。由于地下厂不同功能区域产生的有毒有害气体或热量体积不同,通风换气量需按照生产工艺确定。《规程》首次对不同生产区域的换气次数进行了明确规定,具体见表2。

鉴于地下厂通风能耗在全厂能耗中的占比较大^[8],《规程》指出,半地下污水厂的操作层处理区应

充分利用建筑外围护结构,采用自然通风方式;全地下厂的操作层处理区,条件许可时可采用自然进风方式。当自然通风不能满足卫生、环保或生产工艺要求时,应采用机械通风或自然与机械相结合的联合通风方式^[11]。

表2 机械通风系统换气次数
Tab.2 Number of air changes in the mechanical ventilation system 次·h⁻¹

生产区域名称		换气次数	
		正常状态	事故状态
操作层处理区	粗细格栅、曝气沉砂池、初次沉淀池、储泥池等区域	≥6	≥12
	生物反应池、二沉池、高效沉淀池等上部大空间区域	≥6	
操作层设备用房	污泥浓缩脱水机房、除臭间、加药间等建筑物	≥6	≥12
	鼓风机房、变配电室等电气用房类建筑物	按排除设备工作时产生的余热量设计	
机动车行道		≥6	

② 除臭系统设计关键技术要求。《规程》首次提出地下厂除臭设计应贯彻全过程控制理念,不应新增二次污染和风险源。除臭设计应综合分析臭气产生的原因、特征、部位和散逸方式,采取预防和控制措施,从源头减少臭气量。《规程》从臭气收集、臭气输送、臭气处理和达标排放等方面规定了除臭设计的关键技术要点。

在臭气收集方面,《规程》规定:散发臭气的池体和设备,应采用小空间单独封闭分区负压收集、就近处理方式,宜利用与水池一体的钢筋混凝土结构,外加的集气罩应采用一体成型的轻质耐腐蚀材料,并应具有足够的强度、密封性能,宜紧临池面布置。《规程》首次提出了臭气收集口的布置宜通过空气动力学模拟后确定;操作和巡视人员不应直接暴露在密闭的臭气散发源内,操作和巡视频繁的空间应加强通风并维持正压。该规定可保证臭气被低净空单独负压收集,大幅提高收集效率,减少除臭风量,避免无效收集空气,从源头上提高臭气收集浓度,降低末端处理难度和风机能耗,同时与通风系统互不干扰,还能实现相互协同,有效控制地下箱体内的空气质量。

在臭气输送方面,《规程》规定:收集的臭气应负压均匀抽吸输送至净化装置。应进行阻力平衡

计算,并联管路压力损失的相对差额不应超过5%。风管的分支立管上宜安装风量指示装置^[12];风管的主干管和主要支管上应安装可精密调节开度的风阀。

在臭气处理方面,《规程》规定:地下厂宜采用生物除臭工艺,应注重臭气量和臭气组分大幅波动对除臭效率的影响。采用化学法除臭工艺时,应采用安全稳定的化学药剂,宜设置废液pH调节装置妥善处置废液;当采用组合除臭处理工艺时应注重不同工艺之间的匹配与衔接,宜设置事故时的应急处理,部分工艺段检修时,不应影响到其他除臭工艺段的运行;与高浓度臭气和其他燃爆气体直接接触的风机应采用防爆电机,确保安全。

在达标排放方面,《规程》规定:高空排放的排气筒布置宜与地面景观相结合;排气筒应设置永久性采样孔和采样平台;排气筒应采取防腐措施,排气筒顶部应设置防雷装置,底部应设有排水管道。

3 结语

目前,我国地下式污水处理厂工程具有地域差异大、建设标准不一、设计经验缺乏、验收无规可依等情况,每逢报建审批,耗费大量时间沟通协调,对参建各方造成了很多困扰。

《城镇地下式污水处理厂技术规程》(T/CECS 729—2020)从精细设计、科学建造、规范验收、安全运维等层面,系统地提出了地下厂建设的关键技术要点,汲取了国内外地下厂的设计、建设和运行经验,纳入创新的技术和理念,体现了标准的专业性、安全性、可操作性和先进性。《规程》的发布和实施将减少因设计建设不当导致的风险和隐患,引导我国的地下厂健康有序建设,促进行业发展和技术进步。

参考文献:

[1] 邱维. 我国地下污水处理厂建设现状及展望[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 18-26.
QIU Wei. The current status and prospect of underground wastewater treatment plant in China [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 18-26 (in Chinese).
[2] SUN S C, LIN H H, LIN J H, et al. Underground sewage treatment plant: a summary and discussion on the current status and development prospects[J]. Water

- Science & Technology, 2019, 80(9): 1601-1611.
- [3] SHIN E, KIM H J, RHEE D S, *et al.* Spatiotemporal flood risk assessment of underground space considering flood intensity and escape route [J]. Natural Hazards, 2021, 109(2): 1539-1555.
- [4] 肖艳. 上海首座全地下式污水处理厂消防设计研究 [J]. 给水排水, 2020, 46(12): 30-35.
- XIAO Yan. Study of fire protection design for the first underground wastewater treatment plant in Shanghai [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(12): 30-35 (in Chinese).
- [5] 杨一烽, 杜炯, 张欣. 国内地下式污水处理厂的发展现状和关键技术分析 [J]. 净水技术, 2021, 40(10): 101-106, 117.
- YANG Yifeng, DU Jiong, ZHANG Xin. Development status and key technology analysis of underground wastewater treatment plants (UWWTPs) at home [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 101-106, 117 (in Chinese).
- [6] DONG L, ZHANG X, XIAO Y, *et al.* Investigation on re-independence of air flow and pollutant concentration field in the basement space of an underground sewage treatment plant [J]. Building and Environment, 2019, 163: 106327.
- [7] ZHANG X, DONG L, XIAO Y, *et al.* Performance evaluation of ductless ventilation system in basement space of an underground sewage treatment plant: a scaled model case study [J]. Building and Environment, 2019, 160: 106211.
- [8] 陈秀成. 地下式污水处理厂能耗指标分析及节能方向 [J]. 给水排水, 2022, 48(3): 35-39.
- CHEN Xiucheng. Energy consumption index analysis and energy saving direction of underground sewage treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(3): 35-39 (in Chinese).
- [9] HUH S Y, SHIN J, RYU J. Expand, relocate, or underground? Social acceptance of upgrading wastewater treatment plants [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(8): 45618-45628.
- [10] QU J H, WANG H C, WANG K J, *et al.* Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(6): 3-9.
- [11] 张欣, 董磊, 高乃平, 等. 一种适用于地下式水处理构筑物的无风管送风装置: 202010723741.8 [P]. 2021-06-04.
- ZHANG Xin, DONG Lei, GAO Naiping, *et al.* A Ductless Air Supply Device Suitable for Underground Water Treatment Structures: 202010723741.8 [P]. 2021-06-04 (in Chinese).
- [12] 张欣, 杜炯, 戴小平, 等. 一种可视空气流量指示器: 201820119850.7 [P]. 2018-11-06.
- ZHANG Xin, DU Jiong, DAI Xiaoping, *et al.* A Visual Air Flow Indicator: 201820119850.7 [P]. 2018-11-06 (in Chinese).

作者简介: 董磊(1986-), 男, 山东泰安人, 博士, 高级工程师, 研究方向为水污染及恶臭污染控制。

E-mail: donglei@smedi.com

收稿日期: 2022-03-29

修回日期: 2022-05-11

(编辑: 丁彩娟)

深入实施乡村振兴战略, 促进人水和谐