

下沉式污水处理厂（再生水厂）发展概况与设计研究

李勇伯 赵利宽

（北京张家湾信通水务科技有限责任公司，北京 101113）

【摘要】对国内下沉式污水处理厂（再生水厂）在排放标准、技术路线、结构形式、地面空间利用等方面的技术演变过程进行了系统的梳理，对每一代下沉式污水处理厂（再生水厂）的技术进步进行了总结。

对下沉式污水处理厂（再生水厂）在竖向布置形式、封闭形式、结构形式等方面的特点进行了介绍，并对其总体特点进行了总结。

结合已建和在建的下沉式污水处理厂（再生水厂）在设计过程中面临的问题与挑战，对其工艺选择、设计参数、消防、除臭、结构设计及地面空间利用形式等进行了有针对性地分析和设计研究。

最后，提出了下沉式污水处理厂（再生水厂）的总体发展方向，明确了下沉式污水处理厂（再生水厂）的技术发展和创新思路，明确了未来市政污水处理厂（再生水厂）的建设目标，即成为构建城市生态综合体的载体，承担起城市服务功能，实现市政污水处理厂（再生水厂）从城市负资产向生态正资产的转变。

【关键词】下沉式；再生水厂；消防；除臭；地面空间利用

一、国内下沉式污水处理厂（再生水厂）概况

建造一个污水处理厂，选址向来是个难题。传统污水处理厂除了需要巨大的占地面积外，法规还要求污水处理厂需要有半径约200~300米的卫生防护距离。即使设置了如此大的缓冲区，但由于传统污水处理厂丑陋、污秽、恶臭等因素的影响，污水处理厂周边区域的土地价值往往受到牵连而遭到严重贬值。为了在不受公众欢迎的污水处理模式、紧缺的土地资源和环境保护三者间找到平衡，下沉

近年来，国内的地下空间施工及开发利用技术取得了很大进步，城市的大型地下排水系统也获得了快速的发展。在此期间，北京、上海、广州、深圳、昆明、青岛、太原、合肥等城市，已有几十座下沉式污水处理厂（再生水厂）投入运行或正在施工。这些下沉式污水处理厂在排放标准、技术路线、结构形式、地面空间利用等方面，有着较为清晰的技术演变过程。

（一）第一代下沉式污水处理厂

严格意义而言，第一代下沉式污水处理厂并非真正意义上的下沉式污水处理厂。其只是在传统地面污水处理厂的基础上，对生化池等构筑物进行加盖封闭并进行臭气收集，以减小厂区恶臭影响，其恶臭污染物排放标准仅能达到二级标准。其占地面积与传统污水处理厂没有差别，池顶上部空间也无法得到有效开发，其典型代表项目为成都沙河污水处理厂、杭州七格污水处理厂。

（二）第二代下沉式污水处理厂

深圳布吉污水处理厂是国内大规模、全地下、具有标志性意义的下沉式污水处理厂。其实现了预处理、生化池及二沉池的完全下沉，其紧凑的设计使得其占

地面积相对传统污水处理厂大幅减小，而部分处理构筑物完全下沉的结构特点，也使得其上部空间被成功开发为景观公园。此外，广州京溪污水处理厂也是第二代下沉式污水处理厂的典型代表。

（三）第三代下沉式污水处理厂

下沉式污水处理厂发展到第三代，实现了污水处理及污泥处理全过程构筑物的下沉设计。由于MBR、高负荷折流沉淀池等新技术的应用，其地下箱体投影面积和体积大幅减小，污水处理厂上部空间基本得到完全利用，其典型代表为昆明第十、十一污水处理厂。

（四）第四代下沉式再生水厂

第四代下沉式污水处理厂对设计出水水质提出了更高的要求，其尾水品质不仅超越一级A，达到了娱乐性景观环境用水的品质，主要水质指标（如COD、NH₄-N）更是达到了地表水Ⅳ类水体水质标准，使市政污水处理厂具备了向城市水体提供景观补水、向城市提供再生水的能力，从而将传统意义的污水处理厂变为了城市的第二水源——再生水厂。其典型代表为贵阳麻堤河下沉式再生水厂、北京稻香湖下沉式再生水厂。

（五）第五代下沉式再生水厂

在技术工程师的不懈努力下，第五代再生水厂在“环境友好、土地集约、资源利用”方面实现了更进一步的突破。首先，其恶臭污染物排放标准达到了规范要求最严格的一级标准；同时，由于多段A₀、IFAS、ASBF等新工艺的研究和开发，使得下沉式再生水厂地下箱体的投影面积和体积进一步减小；此外，在实现再生水资源回用的基础上，在地下箱体内将污泥含水率进一步干化至30%~50%，实现了污泥的深度脱水，为进一步资源化

利用奠定了良好的基础；污水能量回收系统、光导照明、太阳能等绿色低碳技术的应用，为下沉式再生水厂实现碳中和做出了重要的努力；上部空间利用方面，不仅将普通的地面景观公园变为了融入海绵城市设计理念的生态活水运动公园，更配套建设了以水环境保护为主题的科普教育中心。这些措施和努力，让公众对污水处理设施的态度从“邻避”转变为“拥抱”和“体验”。传统污水处理厂在完成其污水净化任务的同时，开始承担起城市综合基础服务的功能，为城市提供再生水及能源供应、雨水滞蓄、城市绿岛、休闲公园及运动场所、科普教育等公众服务，再生水厂已成了传承城市水文化、展示水科技的生态正资产及城市名片。其典型代表为北京通州碧水再生水厂、上海嘉定南翔再生水厂及贵阳青山再生水厂。

二、下沉式污水处理厂（再生水厂）的特点

（一）竖向布置形式

下沉式污水处理厂（再生水厂）竖向布置由上至下一般分为四层，分别为地面层（公园、停车场等）、覆土层、操作检修层、池体层。

（二）封闭形式

下沉式污水处理厂（再生水厂）的建设形式主要有半地下式（全封闭）及全地下式两种。

半地下式污水处理厂的操作层一般位于地面上，通过加盖的形式实现箱体封闭，如图 2-2 所示。由于其箱体位于地面上较多，因此其通风换气条件较好，消防设计要求相对较低，但其箱体顶部空间可利用形式较少。

全地下式污水处理厂分为双层加盖及单层加盖两种封闭形式。双层加盖的形式由于密闭性较好，箱体顶部空间可利用形式灵活，可将生产管理区与公共开放区分开，是下沉式污水处理厂（再生水厂）建设的主流形式。但其由于整个箱体完全下沉，因此对通风换气及消防的设计要求较高。

（三）结构形式

地下箱体底板通常采用无梁楼盖结构体系，负一层底板通常采用主次梁结构体系，地下箱体顶板通常采用井字梁大板结构体系。

（四）总体特点

1. 环境友好。下沉式污水处理厂（再生水厂）封闭性好，有利于臭气的收集，结合完善的生物除臭系统，可确保对周边环境无影响。下沉式污水处理厂（再生水厂）上方配套建设的生态活水运动公园，能够极大地改善区域生态环境条件，提高区域生态居住环境质量，在城市中创建人与自然和谐相处的生态空间。

2. 土地集约。下沉式污水处理厂（再生水厂）地下箱体布局分区明确、合理、紧凑，占用土地资源少；整体环境友好，对卫生防护距离几乎没有严格要求，有效节省土地资源；上部空间被有效利用，土地利用

效率进一步提高。

3. 资源利用。下沉式污水处理厂（再生水厂）提供的高品质尾水，不仅能够作为城市水体的景观补水，还能作为城市的再生回用水，同时还能从中提取热能为周边建筑提供集中供暖与制冷，可充分实现水资源的循环利用。同时，污泥可进行资源化处置，以充分利用其营养分和热值。

三、下沉式污水处理厂（再生水厂）的设计研究

（一）工艺选择

目前下沉式污水处理厂（再生水厂）在选择工艺路线时，把控制箱体容积和深度作为主要考虑因素，因此成熟稳定、简单可靠的高效率、低水头损失的处理工艺受到青睐，以使处理工艺在尽可能减小箱体池容和深度的同时，兼顾运行维护的简便和可靠。

生化处理工艺方面，应尽可能提高生化池的污泥浓度或微生物总量，以减小池容；同时应尽可能提高系统在生化段的脱氮效率，以节省碳源，尽可能避免在深度处理段设置反硝化滤池而增加水头损失。因此多段 A₀、IFAS 等工艺在下沉式污水处理厂（再生水厂）应用较多。

二沉池工艺方面，应尽可能提高单位面积的水力负荷，以减小池容。因此矩形折流式沉淀池、双层平流沉淀池等工艺在下沉式污水处理厂（再生水厂）应用较多。

深度处理方面，由于高密度沉淀池具有去除 SS、非溶解性有机物、化学除磷等功能，出水 SS 指标较为理想，且水力负荷较高，水头损失小，因此在下沉式污水处理厂（再生水厂）中得到了广泛的应用。

消毒工艺方面，由于下沉式污水处理厂（再生水厂）位于地下，箱体封闭等特点，因此消防要求较为严格。为降低火灾风险，下沉式污水处理厂（再生水厂）多采用紫外线消毒工艺，以尽量减少盐酸、氯酸钠等化学品在地下箱体的堆积。

碳源选择方面，污水处理厂常用的外加碳源主要有甲醇、乙酸钠、葡萄糖。为降低火灾风险，并控制运行成本，下沉式污水处理厂（再生水厂）多采用乙酸钠作为外加碳源。

（二）设计水温

传统地面污水处理厂的池体是完全敞开的，污水从下水道进入污水处理厂后，水温下降很快。而在鼓风机房被压缩的热空气，经较长距离的埋的空气管输送到生化池后，空气温度也已大幅下降，热空气对提高或保持生化池水温的贡献有限。

下沉式污水处理厂（再生水厂）由于其全地下、全封闭的特点，保温效果较好。同时，由于其紧凑的布局，鼓风机房往往布置于生化池上方，空气管道很短，且不再被土壤覆盖，被压缩的热空气降温有限。因此，下沉式污水处理厂（再生水厂）的最低设计水温可适

当提高,以减小池容。

(三) 消防

1. 适用规范。目前可指导下沉式污水处理厂(再生水厂)的设计规范主要有:GB50016-2014《建筑设计防火规范》、GB50974-2014《消防给水及消火栓系统技术规范》、GB50140-2005《建筑灭火器配置设计规范》。

2. 火灾危险性分析。下沉式污水处理厂(再生水厂)内主要有各类化学药剂、电缆、设备、药剂、钢筋砼池体,以及池内盛满的污水或再生水。除化学药剂和电缆类型外,其余均属于不燃材料,此处不再进行分析。

化学药剂方面,下沉式污水处理厂(再生水厂)常用的PAC、PAM、乙酸钠等均为不可燃性物质,没有燃爆危险,火灾危险性等级戊类。

电缆方面,为最大限度地减小火灾危险性,地下箱体消防用电设备可采用阻燃耐火电缆,其余采用阻燃电缆。阻燃电缆难以着火,并具有阻止或延缓火焰蔓延的作用,而耐火电缆可在规定温度和时间内保持线路的完整性。采用阻燃及耐火电缆可大大降低火灾危险性,同时减轻了火灾发生后产生的烟气对人可能造成的伤害。

3. 有害气体消防隐患分析及控制。污水处理厂产生的臭气(可燃性气体)的浓度远远低于该气体的爆炸燃烧极限几百、上千、万倍以上,并且在除臭系统以及污水处理厂内通风系统的作用下,污水处理厂内可燃性气体将维持在一个相当低的浓度水平甚至趋近于零,因此在通风及生物除臭系统稳定运行的情况下,没有消防安全方面的隐患。

4. 除臭。(1) 填料材质及配方。优秀的填料具有比表面积大,吸附能力强,微生物相容性好,除臭效率高,保湿性能好等特点,其通透性及结构稳定性较好,长期运行通气阻力小,压力损失小,使用寿命较长。(2) 填料组合及配比。目前生物除臭技术已将轻质惰性填料与吸附性填料相结合,针对不同的臭气成分采用不同的菌种、填料种类和填料级配,效果良好。(3) 滴滤技术。采用滴滤技术的生物除臭系统,克服了传统生物滤池填料运行时间短、易短流、易堵塞等缺点,具有缓解填料板结、可控制pH值、能投加营养物等一系列优点。(4) 轻质滤池。轻质滤池设计已成为国内外生物除臭技术的结构优化重点和方向。采用轻质滤池设计,可减小对滤池的支撑和侧向压力,简化滤池结构,从而使装置底部和侧壁的受力减小,使装置主体壁厚更薄,减少材料消耗,节省工程投资。

5. 结构。为保证构筑物内水流顺畅,避免对水流形成阻碍,避免形成死角导致污泥沉积等现象,应尽量减少布置在构筑物的内部的柱子。同时,柱网布置在满足工艺需要的前提下,应保证结构安全,并避免

形成“肥梁胖柱”的现象,浪费投资。此外,柱网布置,特别是柱距,会直接影响梁的高度,进而影响空间层高。因此,合适的柱距在满足污水处理厂内设备、物资运输、起吊要求前提下,可以有效减小层高,节省工程建设投资。

6. 地面空间利用形式。目前国内下沉式污水处理厂(再生水厂)地面空间的利用形式主要有:景观园林设施、停车场、市政基础设施(如公交停保场)、商场等。

地点	项目名称	设计规模	上部空间利用
北京通州	北京通州碧水再生水厂	18万m ³ /d	生态活水公园 水环境科普教育中心
云南大理	双廊下沉式再生水厂	1万m ³ /d	生态停车场
贵州贵阳	三桥下沉式再生水厂	4万m ³ /d	公交停保场
贵州贵阳	彭家湾下沉式再生水厂	5万m ³ /d	商场

景观园林利用是下沉式污水处理厂(再生水厂)最常见的利用形式。考虑到不同植株必要的种植土厚度及排水层厚度,覆土厚度一般介于0.5~1.5m。对于水体景观而言,其水深随不同水体用途而不同。对于人工湖而言,水生植物所需要的水体深度一般介于0.4~1.5m,而鱼类活动则最少需要0.8m。

运动设施在下沉式污水处理厂(再生水厂)地面空间利用形式中也较为常见,主要有慢跑道、自行车道、各类球场(篮球场、羽毛球场、排球场、网球场等)、游泳池等。

公共建筑方面,常见的利用形式主要有停车场以及图书馆、水环境保护科普教育中心、商业设施等低层建筑物(一般不超过两层)。

结论:

下沉式污水处理厂(再生水厂)经过几十年的发展和完善,其领先的设计理念、技术优势和综合效益,已在众多项目中得到应用和验证。“环境友好型、土地集约型、资源利用型、绿色低碳型、城市服务型”的下沉式再生水厂,势必将成为下沉式再生水厂的发展方向。

当然,下沉式污水处理厂(再生水厂)仍然需要针对存在的问题,不断地进行优化和创新,减小地下箱体池容和占地,提高能源自给率,进一步丰富下沉式污水处理厂(再生水厂)上部空间的利用形式,使其能够成为构建城市生态综合体的载体,承担起城市综合服务的功能,实现市政污水处理厂(再生水厂)从城市负资产向生态正资产的转变。

参考文献:

[1] 包太,朱可善,刘新荣.国内外城市地下污水处理厂概况浅析[J].地下空间,2003,(3):335~340.