
城市生活污水 CASS 工艺设计

摘 要

随着工农业生产的迅速发展和人民生活水平的不断提高,用水紧张和污水排放的问题已越来越突出.目前,我国城镇绝大部分的生活污水采用直接排放的方式,没有采取应有的治理措施,加重了对环境的污染.在国家可持续发展的新政策下,环境保护已受到各级政府和全国人民的重视,环境污染日趋严重,加大城市生活污水治理力度势在必行。现拟建一座某城市生活污水处理厂,处理规模为 60000m³/d,设计出水水质执行《污水综合排放标准(GB8978—1996)一级处理标准》。本设计采用周期循环曝气活性污泥法(CASS)工艺,此工艺有机物的去除率预计为 90~95%,氮的去除率可以达到 70~80%,磷的去除率可达 90%。CASS 工艺技术成熟,流程简单、管理方便、运行方式灵活、处理效率高、具有良好的脱氮除磷效果、出水水质好,该工艺已经成功运用于工程实践,具有十分良好的经济效益、环境效益和社会效益。本设计包含污水处理工艺流程的确定,工艺流程中各单体的计算,施工图纸的绘制等。

关键字: 污水处理厂 CASS 工艺 脱氮除磷 去除率

CASS Process Design Of Municipal Sewage

ABSTRACT

With the rapid development of industrial and agricultural production and improve living standards, water stress and sewage disposal problems have become increasingly prominent. At present, most cities and towns direct discharge of sewage by the way, did not take proper control measures, adding to the pollution of the environment. in the country under the new policy of sustainable development, environmental protection has been the people of all levels of government and the national attention, environmental pollution is more serious. So it is both inevitable and necessary to develop the urban sewage treatment. Now, a Sewage treatment plant will be planed to build in XXX city. Treatment scale of Sewage is 60000m³/d. The effluent quality carries out primary standards from integrated wastewater discharge standard—GB8978—1996. This design uses cyclic activated sludge system(CASS). The estimated removal efficiency of organic materials is between 90 percent and 95 percent, the removal efficiency of nitrogen ranges from 70 to 80 percent., and removal efficiency of phosphorus can reach 90%.The CASS process is a ripe technology with a lot of advantages,such as being easy to manage,flexible operational ways,good disposed effect,and good nitrogen removal effect.It is suitable for small and mid-scale municipal wastewater treatment plants because of its low investment and operational cost .The processing has been successfully applied for actual engineering practice,and has good economic,environmental and social efficiency. This design contains the identification, each monomer process of calculation, construction drawings drawing etc.

Keywords: sewage treatment plant, CASS technique, Nitrogen and phosphorus removal ; removal efficiency.

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 我国城市污水处理概况.....	1
1.2 城市污水来源.....	1
1.3 设计的意义及指导思想.....	1
1.3.1 设计的意义.....	1
1.3.2 指导思想.....	2
1.4 国内外发展概况.....	2
1.4.1 AB 法.....	2
1.4.2 A ² /O 生物脱氮除磷工艺.....	2
1.4.3 氧化沟工艺.....	3
1.4.4 SBR 工艺.....	3
1.4.5 CASS 工艺.....	3
1.5 设计依据及原则.....	3
1.5.1 设计依据.....	3
1.5.2 设计原则.....	3
1.6 工程概况.....	4
1.6.1 基础资料.....	4
1.6.2 水质指标.....	4
第二章 污水处理厂工艺方案.....	5

2.1 设计方案论证	5
2.2 原污水可生化性分析	5
2.3 工艺选择及方案比选	6
2.3.1 A ² /O 工艺	6
2.3.2 氧化沟工艺及其变形	7
2.3.3 CASS 工艺	9
2.3.4 确定工艺方案	12
2.3.5 设计思路	12
2.4 处理程度计算	14
2.4.1 COD _{cr} 的处理程度	14
2.4.2 溶解性 BOD ₅ 的处理程度	14
2.4.3 SS 的处理程度	14
2.4.4 NH ₃ -N 的处理程度	14
2.4.5 TP 的处理程度	15
第三章 设计计算	16
3.1 粗格栅设计计算	16
3.1.1 设计说明	16
3.1.2 栅条的间隙数	16
3.1.3 栅槽宽度	16
3.1.4 进水渠道渐宽部分的长度	17
3.1.5 栅槽与出水渠道连接处的渐窄部分长度	17
3.1.6 过栅水头损失	17

3.1.7 栅后槽总高度	18
3.1.8 栅槽总长度	18
3.1.9 每日栅渣量计算 W	18
3.2 泵站的设计计算	18
3.2.1 水泵选型	18
3.2.2 集水池	21
3.3 细格栅设计计算	21
3.3.1 设计说明	21
3.3.2 栅条的间隙数	22
3.3.3 栅槽宽度	22
3.3.4 过栅水头损失	23
3.3.5 栅后槽总高度	23
3.3.6 栅槽总长度	24
3.3.7 每日栅渣量计算 W	24
3.4 沉砂池的选择计算	24
3.4.1 沉砂池的选择	24
3.4.2 沉砂池设计计算一般规定	25
3.4.3 设计参数	25
3.4.4 设计计算	25
3.6 配水井的设计	26
3.6.1 设计要求	26
3.6.2 设计计算	27

3.7 CASS 池的设计计算	28
3.7.1 基本设计参数	28
3.7.2 曝气时间 T_A	29
3.7.3 沉淀时间 T_S	29
3.7.4 排水时间 T_D	30
3.7.5 周期数的确定	30
3.7.6 进水时间 T_F	30
3.7.7 CASS 反应池容积计算	30
3.7.8 CASS 反应池的构造尺寸	31
3.7.9 反应池液位控制	31
3.7.10 需氧量	32
3.7.11 曝气器及空气管计算	33
3.7.12 产泥量及排泥系统	35
3.7.13 回流污泥泵房	36
3.7.14 进出水管路计算	37
3.8 加氯接触池	38
3.8.1 接触池功能	38
3.8.2 接触池设计计算	39
3.8.3 加氯量的确定	39
3.9 重力浓缩池计算	39
3.9.1 设计参数	39
3.9.2 设计与计算	40

3.10 污泥脱水设计计算	42
3.10.1 压滤机设计计算	42
3.10.2 附属设备	42
第四章 污水处理厂总体设计	44
4.1 厂区平面设计	44
4.1.1 平面布置原则	44
4.1.2 总平面布置	44
4.2 厂区高程设计	45
4.2.1 高程布置注意事项	45
4.2.2 高程计算	45
4.2.3 管道水力计算	47
第五章 技术经济及效益分析	48
5.1 经济估算	48
5.1.1 土建费用估算	48
5.1.2 材料及设备费用估算	48
5.1.3 技术费用估算	49
5.2 运行管理机制及运行费用	50
5.2.1 管理机制及人员编制	50
5.2.2 运行费用计算	50
5.3 效益分析	51
5.3.1 环境效益	51
5.3.2 社会效益	51

5.3.3 经济效益	51
第六章 结 论	53
参考文献	54
谢 辞	55

第一章 绪论

1.1 我国城市污水处理概况

国家环保总局 2005 年 6 月 2 日公布的报告说, 根据去年对中国 500 个城市的统计结果, 中国城市生活污水处理率平均仅为 32.33%, 有 193 个城市的生活污水集中处理率为零。这份题为《中国的城市环境保护》的报告指出, 中国城市环境基础设施建设相当薄弱, 尚难支撑城市的可持续发展^[1]。

据监测, 全国废污水排放量由 1980 年的 315 亿吨增加到 2002 年的 631 亿吨。多数城市地下水受到一定程度污染, 并且有逐年加重的趋势。日趋严重的水污染不仅降低了水体的使用功能, 进一步加剧了水资源短缺的矛盾, 而且还严重威胁到城市居民的饮水安全和健康。而建成的大量污水处理厂, 没有发挥应有的效果。有关统计资料显示, 到 2004 年底, 我国 600 多座城市已建成的 709 座污水处理厂, 设计日污水处理量约 4500 万吨, 但据国家环保总局提供的资料和全国人大常委会执法检查组的典型调查, 这些污水处理厂正常运行的只有三分之一, 低负荷运行的约有三分之一, 还有三分之一开开停停甚至根本就不运行。可以看出我国的污水量大, 但是处理率却很低, 而且建成的大量污水厂有的没有发挥应有的效果, 从而加剧了我国城市污水污染。

1.2 城市污水来源

城市污水来源可分为生活污水、工业废水和城市降水径流。

生活污水是人们日常生活排出的污水。主要来自家庭、机关、商业和城市公用设施。其中主要是粪便和洗涤废水, 其水量和水质有明显昼夜周期性和季节周期性变化的特点。

工业废水来自工业生产过程中排出的废水, 包括工艺过程用水、机器设备冷却用水、烟气洗涤水、设备和场地清洗水等。由于各种工业生产的工艺、原材料、使用设备的用水条件等的不同, 工业废水的性质相差很大。其中往往含有腐蚀性、有毒、有害、难于生物降解的污染物。因此工业废水一般经预处理后, 达到符合城市下水道水质标准后方能进入城市下水道管网系统。

城市径流污水是雨雪淋洗城市大气污染物和冲洗建筑物、地面、废渣、垃圾而形成的, 这种污染物甚至会高出生活污水数倍。另外, 城市污水根据下水道施工质量的优劣及地下水位的高低, 下水道有一定的渗入或渗出, 一般不考虑渗出量, 必要时可按具体情况考虑渗入量。

1.3 设计的意义及指导思想

1.3.1 设计的意义

毕业设计是总结在校期间学习成果，完成工程技术人才基本技能训练的一个重要环节；毕业设计是我们在毕业前的综合训练阶段，是学习、深化和拓展综合教学的重要过程；是我们对学习、研究与实践的全面总结，是培养我们综合素质和工作实践的重要方法。毕业设计是培养学生在制定设计方案、设计计算、工程绘图、实验方法、数据处理、文件编辑、文字表达、文献查阅、计算机应用、工具书使用等方面的基本工作实践能力，使学生初步掌握科学研究的基本方法；培养将所学理论运用于解决实际工程问题的独立工作能力，培养刻苦钻研及创造精神；学习和领会有关技术规定和技术规范，使学生树立具有符合生产实际的正确设计思想和观点；树立严谨、负责、实事求是、刻苦钻研、勇于探索、具有创新意识、善于与他人合作的工作作风。

1.3.2 指导思想

决定城市污水处理厂投资和运行成本的很重要因素是污水处理工艺的选择。目前，在城市污水处理领域，很多城市普遍存在着追求“新工艺”的倾向。一座城市污水厂处理工艺的选择，虽然应由污水水质、水量、排放标准及接纳水体性质等因素来确定，但是，忽略污水处理厂投资和运行成本，过分强调污水处理工艺的先进是不足取的。实际上，有些城市采取的高投资、高运行费的“新工艺”，由于水质不稳定，水量波动大等缘故，并未收到理想的处理效果。CASS（cyclic activated sludge system）工艺是在 SBR 工艺的基础上发展起来的，是与活性污泥法并列的一种污水生物处理技术，发展起步早，技术比较成熟，是近年来国际公认的生活污水及工业废水先进处理工艺。

1.4 国内外发展概况

目前，污水的生物处理方法有活性污泥法和生物膜法，城市污水处理主要采用活性污泥法。活性污泥法有多种处理工艺，城市二级污水处理厂常用的工艺方法有：传统活性污泥法及其变形(如 AB 法、A/O 脱氮工艺、A²/O 除磷脱氮工艺)，氧化沟工艺系列、SBR 工艺系列等。目前国内外生活污水二级处理方法大概分为 5 种：AB 工艺，A²/O 生物脱氮除磷工艺，氧化沟工艺，SBR 工艺，Cass 工艺。

1.4.1 AB 法

该法有德国教授 Bohuke 首先开发，该工艺对曝气池按高低负荷分二级供氧，A 级负荷高，曝气时间段，产生污泥量大，污泥负荷 2.5KgBOD/(KgMLSS.d)以上，池容负荷 6 KgBOD/(m³/d)以上，B 级负荷低，污泥龄较长。A 级 B 级间设中间沉淀池。二级池子 F/M 不同，形成不同的微生物群体。AB 法尽管有节能的优点，但不适合低浓度水质，A 级与 B 级也可分期建设。

1.4.2 A²/O 生物脱氮除磷工艺

生物脱氮除磷工艺是 20 世纪 70 年代由美国专家在厌氧—好氧 A²/O 除磷工艺的基础上开发出来的，工艺简单，水力停留时间短，能同时去除氮磷。

1.4.3 氧化沟工艺

氧化沟工艺是 1967 年由荷兰 DHV 公司开发研制的多沟串联污水生化处理系统。其可以有效去除 BOD，但脱氮除磷工艺有限。

1.4.4 SBR 工艺

SBR 是序列间歇式活性污泥法（Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process）的简称，是一种按间歇曝气方式来运行的活性污泥污水处理技术，又称序批式活性污泥法。它是近年来在国内外被引起广泛重视和研究日趋增多的一种污水生物处理新技术。

1.4.5 CASS 工艺

CASS 生物处理法是周期循环活性污泥法的简称,最早产生于美国,20 世纪 90 年代初引入中国.目前,由于该工艺的高效和经济性,应用势头迅猛,受到环保部门及用户的广泛关注和一致好评.CASS 工艺集反应、沉淀、排水、功能于一体,污染物的降解在时间上是一个推流过程,而微生物则处于好氧、缺氧、厌氧周期性变化之中,从而达到对污染物去除作用,同时还具有较好的脱氮、除磷功能.在反应器的前部设置了生物选择区,后部设置了可升降的自动滗水装置.其工作过程可分为曝气、沉淀和排水三个阶段,周期循环进行.污水连续进入预反应区,经过隔墙底部进入主反应区,在保证供氧的条件下,使有机物被池中的微生物降解。

1.5 设计依据及原则

1.5.1 设计依据

- 1) 《室外排水设计规范》 GBJ14-87
- 2) 《地表水环境质量标准》 GB3838-2002
- 3) 《声环境质量标准》 GB3096-2008
- 4) 《泵站设计规范》 GB/T 50265-97
- 5) 《城镇污水处理厂污染物排放标准》 GB18918-2002
- 6) 《室外排水设计规范》 GBJ14-97
- 7) 《城市空气标准》 GB14554-1993

1.5.2 设计原则

污水处理工程设计过程当中应遵循下列原则：

- 1) 污水处理工艺技术方案，达到治理要求的前提下应优先选择投资和运行费用少、运行管理简便的工艺；
- 2) 所用污水、污泥处理技术和其他技术不仅要求先进，更要求成熟可靠；
- 3) 和污水处理厂配套的厂外工程应同时建设，以使污水处理厂尽快完全发挥效益；
- 4) 污水处理厂出水应尽可能回用，以缓解城市严重缺水问题；

- 5) 污泥及浮渣处理应尽量完善，消除二次污染；
- 6) 尽量减少工程用地。

1.6 工程概况

1.6.1 基础资料

本工程为中部某城市的城市排水工程，该市位于平原地区，整个城市起伏不大，平均坡度为 0.03%~0.05%，地势较平缓。城市等高线自西北向东南递减。并有铁路、公路与省外各地相通，交通便利，具有良好的发展前景。

该市位于中部，具有明显的温带气候。气候特点是：年降水量适中，气温较高，夏季炎热，冬季寒冷而干燥。年平均降水量1500~2000毫米，年蒸发量1210毫米，常年地下水位-4~6米。全市最冷日平均气温-3℃，最热日平均气温27.5℃，历史最高气温40.5℃，最低气温-8.8℃。平均冻土深度为0.12米。常年主导风向为东南风。

为了工业生产的发展和人民生活水平的提高，对水污染进行有效控制，该市政府与有关部门就该市污水处理厂的设计建造进行论证，并形成了该市排水工程的初步设计和工艺设计方案，拟在该市市郊建一污水厂，采用较先进的水处理方法。

正常日处理量：60000吨/日 即0.69m³/s,变化系数K=1.3

1.6.2 水质指标

1) 进水水质

本设计针对城市生活污水设计，所有工厂生产废水必须经处理后达到《污水排入城市下水道水质标准》CJ3082-99 后才能排入本项目污水收集系统。进水水质见下表 1.1。

表 1.1 设计进水水质

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	pH
进水水质/(mg/L)	400	200	192.7	41	5.0	6~9

2) 出水水质

根据接纳水体类别或者是否回用选择排放标准，根据项目所在地的实际情况，确定该污水处理厂设计出水水质执行污水综合排放标准(GB8978—1996)一级处理标准。污水排放标准见表 1.2。

表 1.2 设计出水水质

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP	pH
出水水质/(mg/L)	≤100	≤30	≤20	≤15	≤0.5	≤6~9

第二章 污水处理厂工艺方案

2.1 设计方案论证

污水生物处理技术主要是利用自然界中广泛分布的个体微小、代谢营养类型多、适应能力强的微生物的新陈代谢作用,将污水中的污染物质转化为微生物细胞及 CO_2 、 H_2O 、 H_2S 、 N_2 、 CH_4 等多种物质,从而使污水得到净化的过程。污水生物处理技术分为好氧生物处理、缺氧生物处理和厌氧生物处理。影响微生物生长的环境因素有:

1) 温度

温度是影响微生物正常生理活动的重要因素之一。温度适宜,能够促进、强化微生物的生理活动,温度不适宜,能够减弱甚至破坏微生物的生理活动。可能使微生物死亡。一般好氧生物处理中的微生物多属于中温微生物,其生长繁殖的最适温度范围为 $20\sim 37^\circ\text{C}$ 。

2) 营养物质

微生物为合成自生的细胞物质,必须不断地从其周围环境中摄取自身生存所必需的营养物质,主要的营养物质是碳、氮、磷等,微生物还需要硫、钠、钾、钙、镁、铁等元素作为营养,但需要量甚微。对微生物来讲,碳、氮、磷营养有一定的比例,一般为 BOD_5 : N : $\text{P}=100: 5: 1$ 。

3) 溶解氧

溶解氧是影响生物处理效果的重要因素。在好氧生物处理中,如果溶解氧不足,其活性将受到影响,新陈代谢能力降低,同时对溶解氧要求较低的微生物将逐步成为优势种属,影响正常的生化反应过程,造成处理效果下降。

4) pH 值

微生物的生理活动与环境的酸碱度密切相关,只有在适宜的酸碱度条件下,微生物才能进行正常的生理活动。PH 值对微生物的影响主要作用于:引起细胞膜电荷的变化,从而影响了微生物对营养物质的吸收,改变生长环境中营养物质的可给性。PH 值的变化还能改变有害物质的毒性。高浓度的氢离子还可导致菌体表面蛋白质和核酸水解而变性。

2.2 原污水可生化性分析

污水处理厂进水营养物比值见下表 2.1。

表 2.1 进水营养物比表

项目	比值
$\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$	0.5
$\text{BOD}_5/\text{NH}_3\text{-N}$	4.87
BOD_5/TP	40

污水生物处理是以污水中所含污染物质作为营养物质，利用微生物代谢作用使污染物被降解，污水得到净化。因此，对污水营养成分的分析以及判断污水能否采用生物处理是设计污水生物处理工程的前提。

BOD_5 和 COD 是污水处理过程中常见的两个水质指标，一般情况下， BOD_5/COD_{Cr} 的比值越大，说明污水可生物处理性越好。综合国内外的研究成果，一般认为 BOD_5/COD_{Cr} 的比值 >0.45 可生化性较好， BOD_5/COD_{Cr} 的比值 <0.3 较难生化， BOD_5/COD_{Cr} 的比值 <0.25 不易生化。

BOD_5/NH_3-N 是鉴别能否采用生物脱氮的重要指标，由于反硝化细菌是在分解有机物的过程当中进行消化脱氮的，在不投加外来碳源的情况下，污水中必须有足够的有机物，才能保证反硝化的顺利进行。一般认为， $C/N \geq 3$ ，即可认为污水有足够的碳源供反硝化菌利用，才能进行有效脱氮。

BOD_5/TP （即 C/P ）是鉴别能否采用生物除磷的重要指标，生物除磷是活性污泥中除磷菌在厌氧条件下分解细胞内的聚磷酸盐同时放出 H_3PO_4 和 ATP ，并利用 ATP 将废水中的脂肪酸等有机物摄入细胞，以 PHB （聚- β -羟基丁酸）及糖原等有机颗粒的形式贮存于细胞内，同时随着聚磷酸盐的分解，释放磷；一旦进入好氧环境，除磷菌又可以利用聚- β -羟基丁酸氧化分解所释放的能量来超量摄取废水中的磷，并把所摄取的磷合成聚磷酸盐而贮存于细胞内，经沉淀分离，把富含磷的剩余污泥排除污泥，达到生物除磷的目的。进水中的 BOD_5 是作为营养物质供除磷菌活动的基质， BOD_5/TP 是衡量能否达到除磷的重要指标，一般认为该值要大于 20，比值越大，生物除磷效果越好。

综上所述，该城市污水处理厂进水水质不仅适宜于采用二级生物工艺，而且还适宜于采用生物脱氮除磷工艺。

2.3 工艺选择及方案比选

城市污水处理厂设计处理方案时，既要考虑有效去除 BOD_5 又要考虑适当去除 N 、 P 。从表 2.1 原污水可生化性分析结果可以知道可采用的工艺有很多，而相对来说处理效果好而且技术成熟的工艺有以下几种。

- 1) A^2/O 工艺
- 2) 奥贝尔（Orbal）氧化沟工艺
- 3) 周期循环曝气活性污泥法（CASS）工艺

2.3.1 A^2/O 工艺

$A-A-O$ 工艺，亦称 A^2/O 工艺，按实质意义来说，本工艺称为厌氧—缺氧—好氧法。本法是在 70 年代，由美国的一些专家在厌氧—好氧（ $An-O$ ）法脱氮工艺的基础上开发的，其宗旨是开发一项能够同步脱氮除磷的污水处理工艺。 A^2

A²/O 工艺由厌氧段和好氧段组成，两段可以分别建也可以合建，合建时两段应该以隔板隔开。厌氧池中必须严格控制厌氧条件，使其既无分子态氧，也无 NO³⁻等化合态氧，厌氧段水力停留时间为 1~2h。好氧段结构型式与普通活性污泥法相同，且要保证溶解氧不低于 2mg/L，水力停留时间 2~4 小时。

A²/O 工艺流程图如图 2.1 所示。

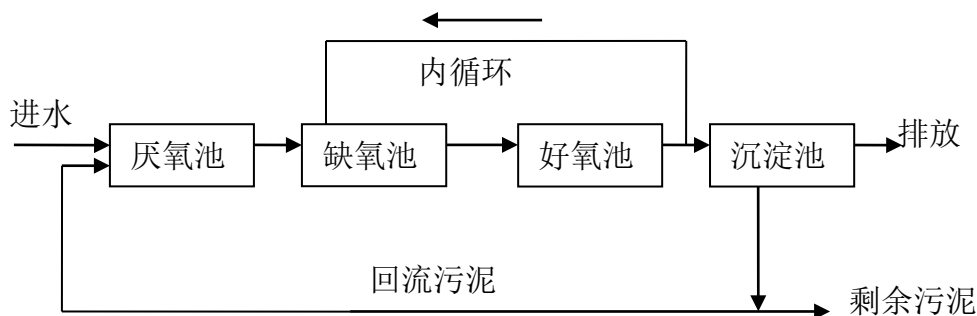


图 2-1 A²/O 工艺流程图

A²/O 工艺优点：

- 1) 在厌氧的好氧交替运行条件下，丝状菌得不到大量增殖，污泥不易膨胀。
- 2) 脱氮效果难于进一步提高，内循环量一般以 2Q 为限，不宜太高，否则增加运行费用。
- 3) 基建费用低，具有较好的脱氮、除磷功能。
- 4) 具有改善污泥沉降性能，减少污泥排放量。
- 5) 具有提高对难降解生物有机物去除效果，运转效果稳定。
- 6) 技术先进成熟，运行稳妥可靠。
- 7) 管理维护简单，运行费用低。
- 8) 国内工程实例多，工艺成熟，易获得工程管理经验。
- 9) 出水水质好，易于深度处理，出水水质稳定，对外界条件变化有一定的适应性。

A²/O 工艺缺点：

- 1) 处理构筑物较多，施工较难。
- 2) 需增加内循环系统。

2.3.2 氧化沟工艺及其变形

1) 工艺概述

氧化沟是活性污泥法的发展，一般不设初沉池，并且通常采用延时曝气。在氧化沟中，通道转刷(或转盘和其他机械曝气设备)，使污水和混合液在环状的渠道内循环流动以及进行曝气，典型氧化沟工艺的流程简图见图 1-3，混合液通过转刷后，溶解氧浓度提高，随后在渠内流动过程中又逐渐降低。通过设置进水、出水位置及污泥回流位置、曝气设备位置，可以使氧化沟内形成好氧、缺氧、厌氧的环境，完成硝化和反硝化功能。

传统的氧化沟工艺成熟，对水质适应性强、抗冲击负荷性能好；处理构筑物少，基建投资少、管理简单，剩余污泥产量小，但是脱氮除磷效果不是很理想。根据脱氮除磷理论，产生了具有脱氮除磷效果的氧化沟变形工艺，主要有卡鲁塞尔氧化沟，交替式氧化沟（双沟式氧化沟，三沟式氧化沟），奥贝尔氧化沟，一体化氧化沟。一体化氧化沟还省去了二沉池，节省了占地面积。

奥贝尔氧化沟是使用比较广泛的一种氧化沟工艺，现在以奥贝尔氧化沟为例来阐述氧化沟工艺的特点。

2) 奥贝尔（Orbal）氧化沟工艺流程图

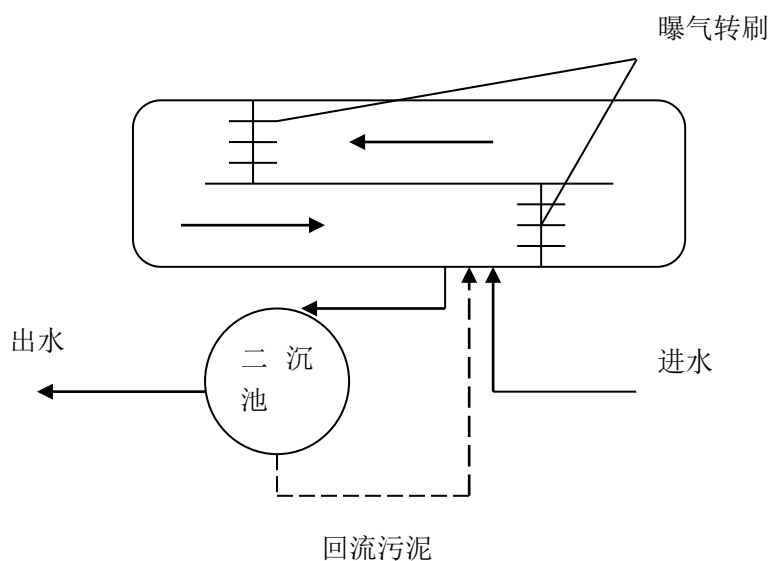


图 2-2 奥贝尔氧化沟工艺图

3) 奥贝尔（Orbal）氧化沟的工艺特点

① 总投资省。一般来说，进氧化沟不需设初沉池，对于城市污水，只需要设置格栅和沉砂池，对于没有砂和大块杂物的工业废水，可以直接进入氧化沟。此外，氧化沟的缓冲能力较强，污水可以不设调节池。

② 污泥量少。奥贝尔氧化沟一般为延时曝气，由于污泥龄较长，污泥量少，因此污泥处理费用较低。

③ 处理效果好，有较稳定的脱氮除磷功能。奥贝尔氧化沟的出水有机物比其他的活性污泥法都低，在外沟道形成交替的耗氧和大区域的缺氧环境，较高程度地发生“同时消化反硝化”，即使在不设内回流的条件下，也能获得较好的脱氮效果。

④ 有抗冲击负荷的能力，对高浓度废水有很大的稀释能力。

⑤ 污水厂规模大于 150000~200000m³/d 以上时，氧化沟的基建投资将超过传统活性污泥工艺。

⑥ 处理构筑物较多，回流污泥溶解氧较高，对除磷有一定的影响。

⑦ 容积及设备利用率不高。

⑧ 转盘曝气的充氧效率低。这是奥贝尔氧化沟的缺点，其转盘动力效率不超过 $2.0\text{kgO}_2/(\text{kWh})$ 。

2.3.3 CASS 工艺

1) CASS 工艺工作原理

CASS 工艺是将序批式活性污泥，SBR 反应池沿长度方向分为两部分，前部为生物选择区也称预反应区，后部为主反应区，在主反应区后部安装了可升降的滗水装置，间歇进水间歇排水的周期循环运行，集曝气、沉淀、排水于一体。CASS 工艺是一个好氧、缺氧、厌氧交替运行的，具有一定脱氮除磷效果。废水以推流方式运行，而各反应区则以完全混合的形式运行以实现同步硝化、反硝化和生物除磷。对于一般城市污水 CASS 工艺并不需很高程度的预处理，只需设置粗格栅、细格栅和沉砂池，无需初沉池和二沉池，也不需要庞大的污泥回流系统（只在 CASS 反应器内部有约 40%的污泥回流）。

2) CASS 反应池的组成

CASS 是一种具有脱氮除磷功能的循环间歇废水生物处理技术，每个 CASS 反应器由 3 个区组成，即生物选择区，兼氧区和好氧区。其最大的特点就是设置了生物选择区。

①生物选择区是设置在 CASS 前端的容积约为反应器总容积的 10%水力停留时间为 0.5h~1.0h，通常在厌氧或兼氧条件下运行。通过主反应区污泥的回流并与进水混合，不仅充分利用了活性污泥的快速吸附作用而加速对溶解性底物的去除并对难降解有机物也起到良好的水解作用，同时可使污泥中的磷在厌氧条件下得到有效的释放。设置选择器，还有利于改善污泥的沉降性能，防止污泥膨胀问题的发生。

②兼氧区不仅具有辅助厌氧或兼氧条件下运行的生物选择区对进水水质、水量变化的缓冲作用，同时还具有促进磷的进一步释放和强化反硝化的作用。

③好氧区，是去除营养物质的主要场所，通常控制 ORP 在 100mv~150mv 溶解氧 DO 在 0mg/L~2.5mg/L，运行过程中，通常将主反应区的曝气强度加以控制使反应区内主体溶液处于好氧状态，完成降解有机物的过程，而活性污泥内部则基本处于缺氧状态，溶解氧向污泥絮体内的传递受到限制而硝态氮由污泥内向主体溶液的传递不受限制，使主反应区中同时发生污染物的降解及同步硝化和硝化作用。

3) CASS 工艺主要技术特征

① 连续进水，间歇排水

传统 SBR 工艺为间断进水，间歇排水，而实际污水排放大都是连续或半连续的，CASS 工艺可连续进水，克服了 SBR 工艺的不足，比较适合实际排水的特点，拓宽了 SBR 工艺的应用领域。虽然 CASS 工艺设计时均考虑为连续进水，但在设计运行中即使有间断进水，也不影响处理系统的运行。

② 运行上的时序性

CASS 反应池通常按曝气、沉淀、排水和闲置四个阶段根据时间依次进行。

1、曝气阶段:由曝气装置向反应池内充氧，此时有机污染物被微生物氧化分解，同时污水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 通过微生物的硝化作用转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。

2、沉淀阶段:此时停止曝气,微生物利用水中剩余的 DO 进行氧化分解。反应池逐渐由好氧状态向缺氧状态转化,开始进行反硝化反应。活性污泥逐渐沉到池底,上层水变清。

3、滗水阶段:沉淀结束后,置于反应池末端的滗水器开始工作,自上而下逐渐排出上清液。此时反应池逐渐过渡到厌氧状态继续反硝化。

4、闲置阶段:闲置阶段即是滗水器上升到原始位置阶段。

③ 运行过程的非稳态性

每个工作周期内排水开始时 CASS 池内液位最高,排水结束时,液位最低,液位的变化幅度取决于排水比,而排水比与处理废水的浓度、排水标准及生物降解的难易程度有关。反应池内混合液体积和基质浓度均是变化的,基质降解是非稳态的。

④ 溶解氧周期性变化,浓度梯度高

CASS 在反应阶段是曝气的,微生物处于好氧状态,在沉淀和排水阶段不曝气,微生物处于缺氧甚至厌氧状态。因此,反应池中溶解氧是周期性变化的,氧浓度梯度大、转移效率高,这对提高脱氮除磷效率、防止污泥膨胀及节约能耗是有利的。实践证实对同样的曝气设备而言,CASS 工艺与传统活性污泥法相比有较高的氧利用率。

3) CASS 工艺流程

CASS 工艺流程图如图 2.3 所示。

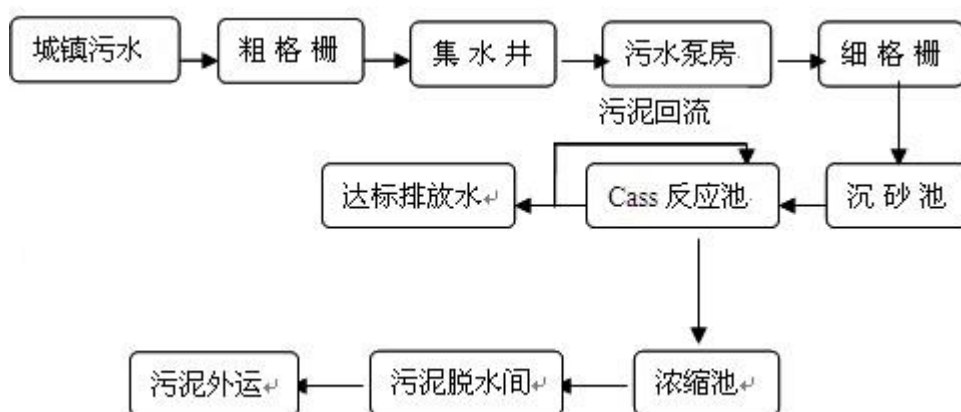


图 2-3 Cass 工艺流程图

4) CASS 工艺主要优点

① 工艺流程简单,占地面积小,投资较低。CASS 工艺的核心构筑物为 CASS 池,没有二沉池,一般情况不设调节池及初沉池。

② 生化反应推动力大。在完全混合式连续流曝气池中的底物浓度等于二沉池底物浓度,底物流入曝气池的速率即为底物降解速率。

③ 沉淀效果好。CASS 工艺在沉淀阶段几乎整个反应池均起沉淀作用,沉淀阶段的表面负荷比普通二次沉淀池小得多,虽然有进水的干扰,但其影响很小,沉淀效果较好。

④ 运行灵活，抗冲击能力强，可实现不同的处理目标。CASS 工艺在设计时已考虑流量变化的因素，能确保污水在系统内停留预定的时间后经沉淀排放，特别是 CASS 工艺可以通过调节运行周期来适应进水量和水质的变化。

⑤ 生物选择器的作用，是集中接纳含有高浓度有机物的来水和处于“饥饿”状态的回流活性污泥。具有抑制专性好氧丝状菌生长的作用，可有效的防止污泥膨胀。

⑥ 适用范围广，适合分期建设。CASS 工艺可以应用于大型、中型及小型污水处理工程，比 SBR 工艺适用范围更广泛。

⑦ 剩余污泥量小，性质稳定。传统活性污泥法的泥龄仅 2~7 天，而 CASS 法泥龄为 25~30 天，所以污泥稳定性好，脱水性能佳，产生的剩余污泥少。去除 1kgBOD 产生 0.2~0.3kg 剩余污泥，仅为传统法的 60% 左右。

⑧ 生化池分为生物选择器、厌氧区和主曝气区，利用生物选择器及厌氧区对磷的释放、反硝化作用以及对进水中有机底物的快速吸附及吸收作用，增强了系统的稳定性；同时，曝气区和静止沉淀的过程中都同时进行着消化和反硝化反应，因而具有脱氮除磷的作用。

⑨ 自动化程度高，保证出水水质。

CASS 工艺主要缺点为：设备闲置率高，因采用降堰排水，水头损失大；由于自动化程度高，故对操作人员的素质要求也高。

三种污水处理工艺方案具体比较如下表：

表 2.2 三种工艺方案比较如下表

工艺内容		A ² /O	奥贝尔（Orbal）氧化沟	CASS 工艺
技术可行性		先进、成熟、应用广	先进、成熟、应用广	先进、成熟、应用广
水质指标		出水水质好、稳定易于深度处理，对外界条件变化有一定的适应性	出水水质好、稳定易于深度处理，对外界条件变化的适应性较好	出水水质好、稳定易于深度处理，对外界条件变化的适应性较好
基础建设费用		较高	高	高
运行费用		较高	高	较高
运行管理	运转	操作单元较多复杂	操作单元较少方便	操作单元较少方便
	维修	设备多、维修量大	设备少、维修量低	设备少、维修量低
占地		较大	较大	较小
要求管理水平		高	高	较高
环境影响		噪音较大、臭味较小	噪音小、臭味较小	噪音较大、臭味较小

2.3.4 确定工艺方案

综上所述，三种方法都能达到除磷脱氮的效果，但综合比较，采用 Cass 工艺较好，原因如下：

1) 规模要求。本设计是 6 万吨城市污水处理厂工艺设计，可以看出本设计的污水处理厂是中小型污水处理厂。CASS 工艺有着 SBR 工艺系列用于中小型污水处理厂比较经济的优点，而传统的活性污泥法及其变形工艺都不适用于中小型污水处理厂。

2) 出水水质要求。由表 1.1 和表 1.2 可以看出，要求脱氮除磷，CASS 工艺脱氮除磷效果很好，而且不用像 SBR 其他变形工艺和氧化沟工艺在有除磷要求的情况下需要增加厌氧池。奥贝尔氧化沟虽不用增加厌氧池，但是需要增大池容，调整运行参数，这样增加了基建投资和运行费用。

3) CASS 工艺一次性投资较少，占地面积较小，运行灵活，抗冲击能力强，可实现不同的处理目标，不易发生污泥膨，剩余污泥量小，性质稳定。出水水质良好，但相对而言，A/A/O 法除磷效果难于再行提高，污泥增长有一定的限度，不易提高，特别是当 P/BOD 值高时更是如此。脱氮效果也难于进一步提高，运行费用高。

4) 此外 CASS 工艺有如下优点：

① 进水水量水质的波动可用改变曝气时间的简单方法予以缓冲,具有较强的适应性。

② 半静止状态沉淀，表面水力和固体负荷低,沉淀效果好。

③ 生化池分生物选择器、厌氧区和主曝气区,利用生物选择器及厌氧区对磷的释放、反硝化作用以及对进水中有机底物的快速吸附及吸收作用,增强了系统的稳定性;同时,曝气区和静止沉淀的过程中都同时进行着硝化和反硝化反应,因而具有除磷脱氮的作用。

④生化池中由于曝气和静止沉淀间歇运行，使基质 BOD_5 和生物体 MLVSS 浓度随时间的变化梯度加大，保持较高的活性污泥浓度,增加了生化反应推动力，提高了处理效率。静止沉淀时,活性污泥处于缺氧状态,氧化合成大为减弱，但生物体内源呼吸在进行，保证了出水水质。

⑤ 工艺流程简单，运行方式灵活，无二次沉淀池，取消了大型贵重的刮泥机械和污泥设备，扩建方便。

2.3.5 设计思路

根据综述的分析，采用 CASS 工艺设计的工艺流程图如图 2-4 所示。

工艺说明：

1) 格栅的目的是去除可能堵塞水泵机组及管道阀门的较粗粒悬浮物及杂质，以保证后续处理设施的正常进行。一般需在城市污水厂设置一道或两道格栅。

2) 提升泵房

提升泵房的作用是提升污水以满足后续污水处理流程竖向衔接的要求，实现重力流动顺序处理污水。

3) 沉砂池

污水在提升泵的作用下进入沉砂池。沉砂池的作用是从污水中分离出密度较大的无机颗粒，如砂子、煤渣等。沉砂池一般设在沉淀池之前，以保护机件和管道，保证后续作业的正常进行，本设计选用钟式沉砂池。

4) 配水井

污水进入配水井，其作用是保证污水均匀分配进入 CASS 池。

5) CASS 池

污水进入 CASS 池进行生化反应，有机物得以降解，氨氮和磷得以去除。

6) 消毒池

消毒池的作用是加氯消毒，杀灭污水中的病原菌，消毒后的水直接排放。

7) 污泥处理系统

Cass 池的剩余污泥进入污泥浓缩池，通过加药可以增加污泥的絮凝性，经重力浓缩之后进入污泥脱水机房，污泥脱水后外运。污泥浓缩池的上清液和污泥脱水后的滤液进入污水提升泵房，与原水汇合后处理。

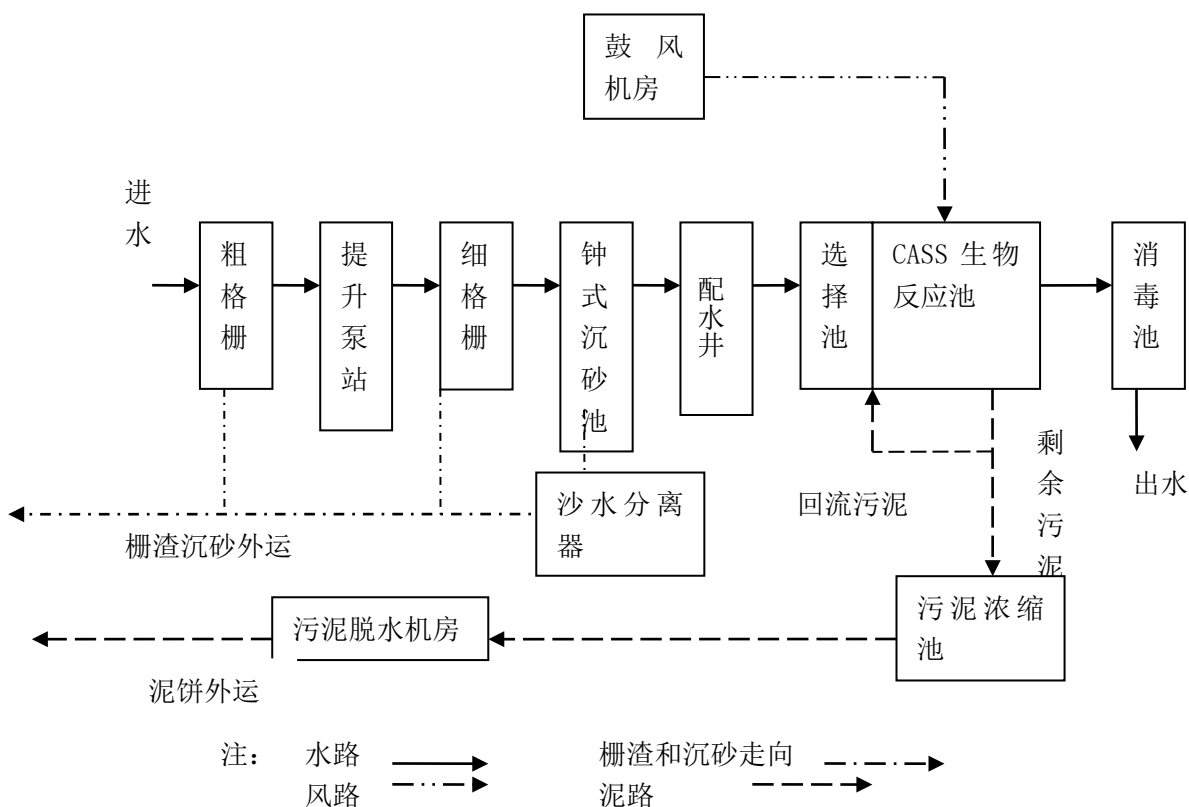


图 2-4 设计污水处理工艺流程图

2.4 处理程度计算

2.4.1 COD_{cr} 的处理程度

$$E = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad (2.1)$$

式中 E —COD_{cr} 的处理程度, (%)

C_i —未处理污水中 COD_{cr} 的平均浓度, (mg/L)

C_e —允许排入水体的已处理污水中 COD_{cr} 的平均浓度, (mg/L)

$$E = \frac{400 - 100}{400} \times 100\% = 75\%$$

2.4.2 溶解性 BOD₅ 的处理程度

$$E = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad (2.2)$$

式中 E —BOD₅ 的处理程度, (%)

C_i —未处理污水中 BOD₅ 的平均浓度, (mg/L)

C_e —允许排入水体的已处理污水中 BOD₅ 的平均浓度, (mg/L)

$$E = \frac{200 - 30}{200} \times 100\% = 85\%$$

2.4.3 SS 的处理程度

$$E = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad (2.3)$$

式中 E —SS 的处理程度, (%)

C_i —未处理污水中 SS 的平均浓度, (mg/L)

C_e —允许排入水体的已处理污水中 SS 的平均浓度, (mg/L)

$$E = \frac{192.7 - 20}{192.7} \times 100\% = 89.6\%$$

2.4.4 NH₃-N 的处理程度

$$E = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad (2.5)$$

式中 E —NH₃-N 的处理程度, (%)

C_i —未处理污水中 NH₃-N 的平均浓度, (mg/L)

C_e —允许排入水体的已处理污水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均浓度，（mg/L）

$$E = \frac{41 - 15}{41} \times 100\% = 63.4\%$$

2.4.5 TP 的处理程度

$$E = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100\% \quad (2.6)$$

式中 E —TP 的处理程度，（%）

C_i —未处理污水中 TP 的平均浓度，（mg/L）

C_e —允许排入水体的已处理污水中 TP 的平均浓度，（mg/L）

$$E = \frac{5 - 0.5}{5} \times 100\% = 90\%$$

表 2.3 处理前后各污染物的值

项目	CODcr	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TP
处理前/ mg/L	400	200	192.7	41	5
处理后/ mg/L	100	30	20	15	0.5
去除率/%	75	85	89.6	63.4	90

第三章 设计计算

3.1 粗格栅设计计算

3.1.1 设计说明

处理规模：60000 m³/d，总变化系数：1.3

$$Q_{\max} = Q \times K = 6.0 \times 10^4 \times 1.3 \text{ m}^3/\text{d} = 3250 \text{ m}^3/\text{h} = 0.90 \text{ m}^3/\text{s}$$

功能：去除废水中较大的悬浮物、漂浮物、纤维物质和固体颗粒物，以保证后续处理单元和水泵的正常运行，减轻后续处理单元的处理负荷，防止堵塞排泥管道。

数量：两座

3.1.2 栅条的间隙数

$$n = \frac{Q_{\max} \sqrt{\sin \alpha}}{bhv} \quad (3.1)$$

式中 Q_{\max} 最大设计流量， $Q_{\max} = 0.9 \text{ m}^3/\text{s}$

α 格栅倾角，取 $\alpha = 60^\circ$

b 栅条间隙，m，50-100mm，取 $b = 50 \text{ mm}$

n 栅条间隙数，个

h 栅前水深，m，取 $h = 0.6 \text{ m}$

v 过栅流速，m/s，0.6-1.0m/s，取 $v = 0.8 \text{ m/s}$ 。

$$\text{则 } n = \frac{0.9 \times \sqrt{\sin 60}}{0.05 \times 0.6 \times 0.8} = 34.9 \text{ 取 } 35 \text{ 个}$$

3.1.3 栅槽宽度

设栅条宽度 $S = 10 \text{ mm} (0.01 \text{ m})$

$$\begin{aligned} \text{则栅槽宽度 } B &= S(n-1) + bn \\ &= 0.01 \times (35-1) + 0.05 \times 35 = 2.09 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.2)$$

由栅槽宽度 B 可以知道，栅槽宽度较宽，为了便于检修，可以设置两套粗格栅，则每套粗格栅栅条间隙数为 $35/2 \approx 18$ 个。

则单个栅槽宽度 $B = S(n-1) + bn$

$$= 0.01 \times (18-1) + 0.05 \times 18 = 1.07 \text{ m 取 } 1.2 \text{ m}$$

选用 GSHZ1100 型旋转式机械格栅除污机，具体参数见表 3.1。

表 3.1 GSHZ1100 型型旋转式格栅除污机参数

型号	格栅宽度 /mm	栅隙/mm	适用槽宽/mm	电机功率 /KW	格栅倾角	耙行速度/ (m/min)
GSHZ110 0	1100	30	1200	1.5	70°	2

数量：两台

粗格栅图如下图 3.1 所示：

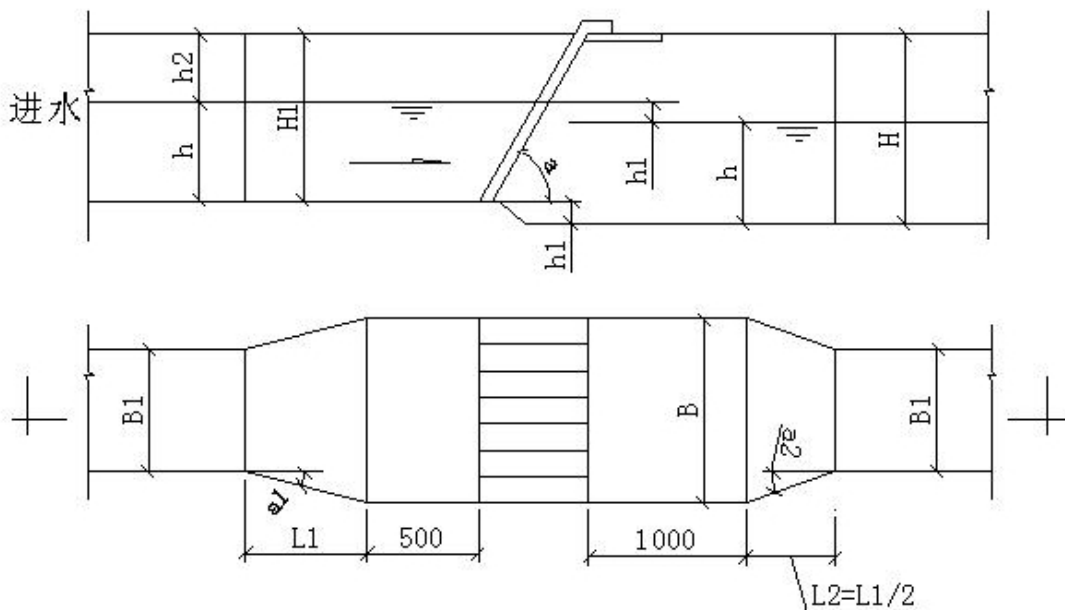


图 3.1 粗格栅设计计算示意图

3.1.4 进水渠道渐宽部分的长度

设进水渠宽 $B_1=0.9\text{m}$ ，其渐宽部分开角度 $\alpha_1=20^\circ$ 。

$$L_1 = \frac{B - B_1}{2 \operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{1.2 - 0.9}{2 \operatorname{tg} 20^\circ} = 0.42 \text{ m} \quad (3.3)$$

3.1.5 栅槽与出水渠道连接处的渐窄部分长度

$$L_2 = \frac{L_1}{2} = \frac{0.42}{2} = 0.21 \text{ m} \quad (3.4)$$

3.1.6 过栅水头损失

$$h_1 = kh_0$$

$$h_0 = \xi \frac{v^2}{2g} \sin \alpha \quad (3.5)$$

式中 h_1 —过栅水头损失，m；

H_0 —计算水头损失，m；

g —重力加速度， 9.81m/s^2 ；

k —系数，格栅受污物堵塞后，水头损失增大的倍数，一般 $k=3$ ；

ξ —阻力系数，与栅条断面形状有关， $\xi = \beta \left(\frac{S}{b} \right)^{4/3}$ ，当为矩形断面时，

$\beta=2.42$ 。为了避免造成栅前涌水，故将栅后槽底下降 h_1 作为补偿见图 4。

$$h_1 = \beta \left(\frac{S}{b} \right)^{4/3} \frac{v^2}{2g} \sin \alpha k \quad (3.6)$$

$$h_1 = 2.42 \times \left(\frac{0.01}{0.05} \right)^{4/3} \frac{0.8^2}{2 \times 9.18} \sin 60^\circ \times 3 = 0.03 \text{ m}$$

3.1.7 栅后槽总高度

设栅前渠道超高 $h_2=1.0\text{m}$

$$H = h + h_1 + h_2 \quad (3.7)$$

$$= 0.6 + 0.03 + 1.0 = 1.63 \text{ m}$$

式中 H —栅后槽总高度，m

h —栅前水深，m

3.1.8 栅槽总长度

$$L = L_1 + L_2 + 0.5 + 1.0 + \frac{H_1}{\text{tg } \alpha} \quad (3.8)$$

$$= 0.42 + 0.21 + 0.5 + 1.0 + \frac{1.33}{\text{tg } 60^\circ}$$

$$= 2.92 \text{ m}$$

3.1.9 每日栅渣量计算 W

在格栅间隙 50mm 的情况下，设栅渣量为每 1000 m^3 污水产 0.05 m^3 。

$$W = \frac{Q_{\max} W_1 \times 86400}{K_z \times 1000} \quad (3.9)$$

$$= \frac{0.9 \times 0.05 \times 86400}{1.3 \times 1000}$$

$$= 3 \text{ m}^3/\text{d}$$

$W > 0.2 \text{ m}^3/\text{d}$ ，所以宜采用机械清渣。

3.2 泵站的设计计算

3.2.1 水泵选型

1) 水泵的选择

考虑用 4 台离心式水泵，三用一备，最小水量时运行 2 台泵。

最大流量时，每台水泵的流量 $Q_{1i}=Q_{max}/3=3250/3=1084\text{m}^3/\text{h}$

最小水量时，每台水泵流量 $Q_{2i}=Q_{min}/2=1924/2=962\text{m}^3/\text{h}$

2) 进水管

$$DN = \sqrt{\frac{4 \times Q_{\max}}{3 \times \pi \times v}} \quad (3.10)$$

式中 DN—管径（m）；

v —流速（m/s），一般采用 $0.8 \text{ m/s} \sim 1.5 \text{ m/s}$ ^[13]。设计中取流速取 $v=1.3\text{m/s}$

则进水管管径

$$DN = \sqrt{\frac{4 \times Q_{\max}}{3 \times \pi \times v}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.9}{3 \times 3.14 \times 1.3}} = 0.54 \text{ m}$$

取 $DN=550\text{mm}$ 。

校核管内流速：

最大流量时

$$v = \frac{Q_{\max} \times 4}{3 \times \pi \times DN^2} = \frac{0.9 \times 4}{3 \times 3.14 \times 0.55^2} = 1.26 \text{ m/s}$$

满足要求（ $0.8 \sim 1.5\text{m/s}$ ）

最小水量时考虑 2 台水泵工作，

$$v = \frac{Q_{\min} \times 4}{2 \times \pi \times DN^2} = \frac{0.54 \times 4}{2 \times 3.14 \times 0.55^2} = 1.13 \text{ m/s}$$

满足要求。

3) 出水管

流速选取 $v=1.6\text{m/s}$

则出水管管径

$$DN = \sqrt{\frac{Q_{\max} \times 4}{3 \times \pi \times v}} = \sqrt{\frac{0.9 \times 4}{3 \times 3.14 \times 1.6}} = 0.49 \text{ m}$$

取 $DN=500\text{mm}$ 。

校核流速：

最大流量时

$$v = \frac{Q_{\max} \times 4}{3 \times \pi \times DN^2} = \frac{0.9 \times 4}{3 \times 3.14 \times 0.5^2} = 1.53 \text{ m/s}$$

满足要求（ $1.2 \sim 1.8\text{m/s}$ ）

最小流量时

$$v = \frac{Q_{\min} \times 4}{2 \times \pi \times DN^2} = \frac{0.54 \times 4}{2 \times 3.14 \times 0.5^2} = 1.38 \text{ m/s}$$

满足要求

4) 总出水管管径

取速为 $v=1.6\text{m/s}$

则总出水管管径为

$$DN = \sqrt{\frac{4 \times Q_{\max}}{\pi \times v}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.9}{3.14 \times 1.6}} = 0.72 \text{ m}$$

取 $DN=750\text{mm}$

5) 扬程计算

$$H \geq h_1 + h_2 + h_3 + h_4$$

式中 h_1 —吸水管水头损失 (m), $h_1 = \varepsilon_1 \times \frac{v_1^2}{2 \times g} + h_1'$;

h_2 —出水管水头损失 (m), $h_2 = \varepsilon_2 \times \frac{v_2^2}{2 \times g} + h_2'$;

h_3 —水位差 (m), 取 10m;

h_4 —自由水头 (m), 取 1m。

(1) 计算 h_1

沿程损失 h_1' :

直管部分长 12m, 选用 550mm 管径, $v=1.3\text{m/s}$, $1000i=4.21\text{m}^2$

$$h_1' = \frac{4.21}{1000} \times 12 = 0.05 \text{ m}$$

局部损失:

拦污网一个 $\varepsilon=1.0$, 喇叭口一个 $\varepsilon=0.1$, 电动蝶阀一个 $\varepsilon=0.1$, 渐缩管一个 $\varepsilon=0.2$,
DN550mm90°弯头一个 $\varepsilon=0.5$

$$\varepsilon_1 \times \frac{v_1^2}{2 \times g} = (1.0 + 0.1 + 0.1 + 0.2 + 0.5) \times \frac{1.3^2}{2 \times 9.8} = 0.16 \text{ m}$$

所以

$$h_1 = 0.05 + 0.16 = 0.21 \text{ m}$$

(2) 计算 h_2

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/486015011150010114>

(3)