

前 言

我国的经济在近年来得到了飞速的发展，与此同时对环境造成了一定程度的污染。为了保护生态环境，我国积极倡导节能减排，并且在污染物的处理上给予了足够的重视。在全球水资源日益紧缺的形势下，对于污水的处理就显得尤为重要，可以通过多种技术手段对污水进行净化处理，使其恢复利用价值，减少对环境的污染。污水处理技术在我国未来的发展中具有广阔的前景和重要的地位。

本书针对高等院校化工类和环境类专业的需要，结合废水处理工艺和设备进行编写，系统介绍了废水处理的工艺及设备，废水处理的典型工艺和设备的工作原理、结构特点、运行过程，以及废水处理的通用设备和非标准设备的选用方法和设计原则。全书共 11 章，分别介绍了物理法、化学法、物理化学法和生物法废水处理技术，内容主要包括过滤、沉降、气浮、混凝、中和、化学沉淀、氧化还原、吸附、离子交换、萃取、膜分离、磁分离、好氧生物处理、厌氧生物处理、生物脱氮、生物除磷、自然处理等废水处理中通用的技术及单元操作，详细介绍了各种技术的基本原理及工艺流程，各单元操作所用设备的结构、工作原理、设计参数、操作维护等，此外还列举了一些典型废水处理的实例。本书在注重课程内容完整和整体优化的同时，努力以较少的理论推导和简明的叙述，将废水处理工艺和设备的基本内容和诸多新技术、新设备、新方法、新概念一并展现在读者面前。全书基本涵盖了国内外废水处理工艺及设备方面最新的技术和发展动态。在编写方面，集内容的先进性和叙述的深入浅出为一体，以更好地满足环境工程和化工工艺类学生和技术人员学习的需要。

本书各章给出了例题与思考题，供广大师生与读者参考，以指导学生和帮助读者复习学过的相关知识，提高对学习内容的掌握度。

本书重视基本理论的阐述，力求理论与实际相结合，工艺与设备兼顾，内容丰富，实用性强。本书可作为高等院校环境工程、化学工程等相关专业的教材，也可作为广大科技人员和生产技术人员的参考书。

本书由郭勇、杨平主编，郭勇统稿。其中，第一章、第二章、第三章、第五章、第七章和第十一章由郭勇编写，第八章、第九章和第十章由杨平编写，第四章由赖波编写，第六章由兰中仁编写。参加本书编写和校对工作的还有童启邦、徐云倩、郑慈航、陈茂莲等，对他们为本书付出的辛勤劳动深表敬意。在本书的编写过程中，还得到了许多老师的帮助，在此谨向这些老师及对本书提出过宝贵意见的广大朋友表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，望广大读者给予指正并提出宝贵意见。

编 者

2019 年 8 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 废水性质与污染指标	(1)
第二节 废水的出路与排放标准	(10)
第二章 废水处理动力设备	(13)
第一节 泵	(13)
第二节 风机	(40)
第三节 潜水搅拌机	(57)
第三章 物理法废水处理工艺及设备	(66)
第一节 格栅	(66)
第二节 筛网	(73)
第三节 沉淀池	(75)
第四节 沉砂池	(92)
第五节 调节池	(96)
第六节 隔油与破乳	(98)
第七节 浮上法处理设备	(103)
第八节 快滤池	(116)
第四章 化学法处理技术及设备	(133)
第一节 化学混凝法	(133)
第二节 中和法	(141)
第三节 化学沉淀法	(144)
第四节 氧化还原法	(145)
第五章 物理化学法处理技术及设备	(148)
第一节 吸附法	(148)
第二节 离子交换法	(152)
第三节 萃取法	(156)
第四节 膜分离法	(159)
第五节 磁分离法	(161)
第六章 废水生物处理的基本概念	(166)
第一节 废水生物处理基本原理	(166)
第二节 微生物的生长规律和生长环境	(169)
第七章 活性污泥法处理工艺及设备	(173)
第一节 活性污泥法工艺简介	(173)

第二节	活性污泥法处理系统设计·····	(181)
第三节	MBR 法·····	(198)
第四节	活性污泥法处理装置的运行管理·····	(207)
第八章	生物膜法处理工艺及设备·····	(213)
第一节	生物滤池·····	(213)
第二节	生物活性滤池·····	(228)
第三节	生物转盘·····	(236)
第四节	生物接触氧化池·····	(243)
第五节	生物流化床·····	(252)
第六节	移动床生物膜反应器·····	(253)
第九章	厌氧生物处理工艺及设备·····	(258)
第一节	废水厌氧生物处理的基本原理·····	(258)
第二节	废水厌氧生物处理设备·····	(260)
第十章	生物脱氮·····	(266)
第一节	水体的氮污染及其危害·····	(266)
第二节	生物脱氮原理及工艺·····	(267)
第十一章	污水的自然处理系统·····	(273)
第一节	稳定塘·····	(273)
第二节	土地处理系统·····	(280)
第三节	人工湿地处理系统·····	(284)
参考文献	·····	(288)

第一章 绪 论

水在社会循环中，由于种种原因丧失了使用价值而外排，这种废弃外排的水称为废水。在这些原因中，最根本的原因是水中混入了各种污染物质。废水有两种概念：一种是“废水”，重点强调被废弃而外排，“废水”的污染物含量并不一定会很高，如工业生产过程中排放的冷却水；另一种是“污水”，更多地强调其中的污染物含量较高。由于约定俗成的原因，现在所称的“废水”，通常是“废水”和“污水”的统称，并更偏重于“污水”。

第一节 废水性质与污染指标

一、废水的类型和特征

废水的分类方法很多，根据废水中含有的污染物的化学特性，可将废水分为无机废水和有机废水；根据行业或产生废水的生产工艺，可将废水分为造纸废水、食品废水、化工废水、制药废水、冶金废水、采矿废水、电镀废水、制造业废水等。

目前普遍采用的分类方法是根据来源不同，将废水分为生活污水、工业废水、初期雨水和城镇污水。

1. 生活污水

生活污水是指人们在日常生活中所产生的废水，主要包括厨房用水，洗涤用水，洗衣、沐浴以及卫生间冲洗厕所等所产生的污水。生活污水含有大量的有机物，其主要成分为纤维素、淀粉、糖类、脂肪、蛋白质等，同时含有氯化物、硫酸盐、磷酸盐、碳酸氢盐、硝酸盐以及钠、钾、钙、镁等无机盐类，以及多种微生物、病原体和寄生虫卵等。城市每人每日排出的生活污水量为 150~400 L，其产生量与人民生活水平及生活习惯有密切关系。大量生活污水如果不经处理直接排入河流、湖泊，必定会导致河流、湖泊不同程度的污染，严重的可能造成河流、湖泊水体富营养化，暴发蓝藻水华。蓝藻水华爆发会造成水体中藻毒素含量过高，降低水中溶解氧，给人们饮水和水产养殖造成重大损失。

2. 工业废水

工业废水是指在工业生产过程中的废水和废液。工业废水(industrial wastewater)包括生产废水、生产污水及冷却水，其中含有随水流失的工业生产用料、中间产物、副产品以及生产过程中产生的污染物。工业废水一般是按行业划分的，如造纸工业废水、化工行业废水、石油工业废水、纺织工业废水、钢铁工业废水、冶金工业废水、机械加工工业

废水、食品加工业废水、制药工业废水、制革工业废水等。一般而言，工业废水种类繁多，成分复杂。例如，电解盐工业废水中含有汞，重金属冶炼工业废水中含有铅、镉等各种金属，电镀工业废水中通常含有氰化物和铬等各种重金属，石油炼制工业废水中含有酚，农药制造工业废水中含有各种农药等。由于工业废水的排放量大，污染物种类繁多，常含有多种有毒物质，对人类健康有很大危害，所以要综合利用，化害为利，并根据废水中污染物的成分和浓度，采取相应的净化措施进行处置后才可排放。随着工业的迅速发展，废水的种类和数量迅猛增加，对水体的污染也日趋广泛和严重，威胁人类的健康和安全。因此，对于保护环境来说，工业废水的处理显得尤为重要。

3. 初期雨水

初期雨水是指雨雪降至地面形成的初期地表径流的雨水，一般是指地面 10~15 mm 厚已形成地表径流的降水。初期雨水的成分较复杂，且水质水量随地区环境、季节、气候等变化。在降雨初期，雨水中溶解了空气中大量的酸性气体、汽车尾气、工厂废气等污染性气体，降落地面后，又冲刷屋面、沥青混凝土道路等，使得初期雨水中含有大量的污染物质，污染程度较高，甚至超出普通城市生活污水的污染程度。初期雨水经雨水管直排入河道，给水环境造成了一定程度的污染，特别是那些工业废渣或城镇垃圾堆放场地，经雨水冲淋后产生的初期雨水更具危险性。因此，如果将初期雨水直接排入自然接纳水体，将会对水体造成非常严重的污染。必须对初期雨水进行弃流处理，可以设置初期弃流过滤装置，将初期雨水弃流至污水管道，降雨后期污染程度较轻的雨水经过截污挂篮截留水中的悬浮物、固体颗粒杂质后，排入自然接纳水体，有效地保护自然水体环境。

4. 城镇污水

城镇污水(municipal wastewater)是指城镇居民生活污水，机关、学校、医院、商业服务机构及各种公共设施排水，以及部分允许排入城镇污水收集系统的工业废水和初期雨水等。由于我国幅员辽阔，各地自然条件及经济发展水平悬殊，城镇区域特点、产业结构及主要功能也各不相同，因此，城镇污水的特性、收集方式、排放水体状况等均不相同。由于各地产业结构区域特定差异、受雨季影响及用水量时变化系数较大，城镇污水水量、水质变化大，成分、性质比较复杂，不但各城镇间不同，同一城市中的不同区域也有相当大的差异。一般来讲，城镇污水相对于城市生活污水而言，具有人口数量较少、用水量标准较低、污水排放规模较小等特点。

很多小城镇由于尚无排水系统，污水均沿道路边沟或路面就近排入接纳水体；一些城镇(特别是山区和贫困地区等)由于街道过于狭窄、两侧建筑密集、施工复杂，无条件修建分流制排水系统，采用完全合流制排水体制。我国对城镇污水的处理日益重视，并制定了相应的排放标准。现行排放标准执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)，对城镇污水处理厂排放 BOD₅、COD_{Cr}、SS、pH、总磷、总氮、氨氮、粪大肠菌群数等均限定了严格的标准。对于一些城镇化发展中的地区而言，建设及运营资金短缺，土地资源紧张，可考虑维护管理技术人员及运行管理经验严重缺乏等原因，将排放标准进行调整或适当放宽。

二、水质污染指标

废水所含污染物千差万别，可通过分析检测对废水中的污染物做出定性、定量评价，以反映废水水质。水质是指水和其中所含的污染物共同表现出来的物理、化学和生物学的综合性质。水质污染指标则是评价水质污染程度、进行污水处理工程设计的基本依据，可体现出其中污染物的种类和数量，是判断水质的具体参数。污水水质污染指标一般分为物理性指标、化学性指标和生物性指标三类。

(一)物理性指标

表示污水物理性质的污染指标主要有温度、色度、嗅和味、悬浮固体等。

1. 温度

温度(temperature)是反映水体热污染的指标。水的温度对水中化学反应的速率及水生生物的生存都有重要的影响，工业生产和生活中排放的废热直接排在水环境里，造成了对局部水域生物群落的破坏，威胁其稳定性，从而产生严重后果，这就是水体的热污染。水体热污染一般是指水温超过 60℃ 的污染现象。许多工业排出的废水都有较高的温度，这些废水排入水体使水温升高，引起水体的热污染。

水温升高影响水生生物的生存和对水资源的利用。氧气在水中的溶解度随水温的升高而减小，这样一方面水中溶解氧减少，另一方面水温升高加速耗氧反应，最终导致水体缺氧或水质恶化。还需要注意的是，当水的温度产生突变时，会引起水生生物的大量死亡。反常的高温还会导致某些对生态不利的水生植物和真菌的大量生长，加速水体富营养化的进程。温度对废水处理微生物的影响很大。除了高温厌氧微生物的最佳温度为 50℃~55℃ 外，常见的废水处理微生物的适宜生存温度为 25℃~35℃。经研究发现，好氧微生物和硝化菌在温度升高到 50℃ 时，其好氧和硝化作用就会停止。而在厌氧工艺中，若温度低于 15℃，产甲烷菌的活性就会大大降低，而到了 5℃，自养硝化菌就会停止活动，到 2℃ 时，化能异养菌就进入休眠状态。地表水的温度随季节、气候条件而有不同程度的变化，一般为 0.1℃~30℃，地下水的温度比较稳定，一般为 8℃~12℃，而工业废水的温度与生产过程有关。

2. 色度

色度是反映感官污染的指标。纯净的天然水是无色透明的，但含有金属化合物或有机化合物等有色污染物的废水会呈现不同的颜色，造成感官上的不悦。水的颜色分为表观颜色和真实颜色。水的表观颜色是由溶解物质及不溶性悬浮物产生的颜色，而水的真实颜色是指仅由溶解物质产生的颜色。水质色度的测定是用铂钴标准比色法，即用氯铂酸钾(K_2PtCl_6)和氯化钴($CoCl_2 \cdot 6H_2O$)配制成测色度的标准溶液，与被测样品进行目视比较，以测定样品的色度。规定每升溶液中含有 2.419 mg 的氯铂酸钾和 2.00 mg 的氯化钴时，将铂(Pt)的浓度为每升 1 mg[以六氯铂(IV)酸的形式]时所产生的颜色深浅定为 1 度。饮用水的色度大于 15 度时多数人即可察觉，大于 30 度时人会感到厌恶。标准中规定饮用水的色度不应超过 15 度。

3. 嗅和味

嗅和味也是感官性指标。天然水是无臭无味的，而废水往往会产生异样的气味，水中臭味主要来源于生活污水和工业废水中的污染物、天然物质的分解或与之有关的微生物活动，其中主要是还原性硫和氮的化合物、挥发性有机物等。研究表明，嗅和味产生的原因主要有三类：一是排入水体的无机物、化学制品及溶解性的矿物盐，如氯化钠带咸味，硫酸镁带苦味，铁盐带涩味，硫酸钙略带甜味；二是腐殖质等有机物、藻类放线菌和真菌的分泌物以及残体产生的 *Geosmin* (地霉菌)、MIB(2-甲基异茨醇)；三是过量投氯引起的。

目前，国内对水体异味的检测方法主要有嗅觉法、气相色谱法、气质联用法、比色法、化学发光法、蒸馏萃取法(SDE)、液-液萃取法(LLD)、吹扫捕集法(PT)、固相微萃取法(SPME)、酶联免疫法等。其中气相色谱法最为常用，多采用火焰离子化检测器和质谱检测器。而近几年发展起来的固相微萃取法因不需要有机溶剂，无须浓缩，简便易行而广泛应用于食品、环境安全等领域。

4. 悬浮固体

在国家标准和规范中，悬浮固体又称为悬浮物，用 SS(Suspended Solids)表示，是指滤渣脱水烘干后的固体。国家标准定义为：水质中的悬浮物是指水样通过孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜，截留在滤膜上并于 $103^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$ 烘干至恒重的物质。悬浮固体表示水中不溶解的固态物质，如淤泥、黏土、无机沉淀、有机沉淀、污垢、微生物等。悬浮固体是重要的水质指标，排入水体后会在很大程度上影响水体外观，除了会增加水体的浑浊度，妨碍水中植物的光合作用，对水生生物生长不利外，还会造成管渠和抽水设备的堵塞、淤积和磨损等。此外，悬浮固体还有吸附和凝聚重金属及有毒物质的能力，因此，饮用水、工业用水等对悬浮固体都有严格的要求。悬浮固体含量也是污水处理厂设计的一个重要参数。

(二) 化学性指标

表示污水化学性质的污染指标可分为有机物指标和无机物指标。

1. 有机物指标

污水中有机污染物种类繁多，组成也较为复杂，现有技术很难分别测定各类有机物的含量，通常也没有必要性。有机物的主要危害是消耗水中溶解氧(DO)，因此，在工作中一般采用间接指标来反映水中有机物的含量。常用指标如下：

(1) 生化需氧量(Biochemical Oxygen Demand, BOD)。水中有机污染物被好氧微生物分解时所需的氧量称为生化需氧量(以 mg/L 为单位)。它反映了在有氧条件下，微生物分解水中的某些可氧化的物质，特别是分解有机物的生物化学过程消耗的溶解氧，其值表示了可生物降解的有机物的量。BOD 值越大，表示水中耗氧有机污染物越多，污染越严重。有机污染物被好氧微生物氧化分解的过程，一般可分为两个阶段：第一阶段主要是有机物被转化成二氧化碳、水和氨；第二阶段主要是氨被转化为亚硝酸盐和硝酸盐。废水的生化需氧量通常只指第一阶段有机物生物氧化所需的氧量。有机物被微生物降解消耗氧的过程主要有：一部分有机物被氧化成最终产物，以获得维持细胞活动和合成新的细胞组织所需要的能量；一部分有机物被转化为新的细胞组织，实现微生物的增殖；当有机物耗尽时，新生的细胞就进入“内源呼吸期”，即微生物消耗其自身的组织来获得维持其活性的能量。这三个过程可以用下述化学反应方程式来表示：

氧化过程：有机物 + O₂ + 微生物 → CO₂ + H₂O + NH₃ + 最终产物 + 能量

合成过程：有机物 + O₂ + 微生物 + 能量 → 新细胞组织

内源呼吸：细胞组织 + 5O₂ → 5CO₂ + 2H₂O + NH₃

微生物的活动与温度有关，测定生化需氧量时以 20℃ 作为测定的标准温度。生活污水中的有机物一般需 20 天左右才能基本上完成第一阶段的分解氧化过程，即测定第一阶段的生化需氧量至少需要 20 天，这在实际工作中是比较困难的。目前以 5 天作为测定生化需氧量的标准时间，简称 5 日生化需氧量(用 BOD₅ 表示)。据试验研究，生活污水 5 日生化需氧量约为第一阶段生化需氧量的 70% 左右。通常情况下，将水样充满完全密闭的溶解氧瓶中，在 (20±1)℃ 的暗处培养 5 d±4 h 或 (2+5)d±4 h [先在 0℃~4℃ 的暗处培养 2 d，接着在 (20±1)℃ 的暗处培养 5 d]，分别测定培养前后水样中溶解氧的质量浓度，由培养前后溶解氧的质量浓度之差，计算每升水样消耗的溶解氧量，以 BOD₅ 形式表示。

若样品中的有机物含量较多，BOD₅ 大于 6 mg/L，样品需适当稀释后测定；对水样中不含或含微生物量少的工业废水，在测定 BOD₅ 时应进行接种，以引进能分解废水中有有机物的微生物。当废水存在难以被一般生活污水中的微生物以正常速度降解的有机物或含有剧毒物质时，应将驯化后的微生物引入水样中进行接种。

(2) 化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD)。化学需氧量是指用化学强氧化剂氧化水中有机污染物时所消耗的氧化剂量折合成的氧量，以 mg/L 为单位。COD 值越高，表示水中有机污染物越多。常用的强氧化剂主要是重铬酸钾和高锰酸钾。以高锰酸钾作氧化剂时，测得的值称为 COD_{Mn} 或 OC；以重铬酸钾作氧化剂时，测得的值称为 COD_{Cr}。在废水处理中，通常采用重铬酸钾法测定废水的化学需氧量。

COD_{Cr} 的定义是：在一定条件下，经重铬酸钾氧化处理时，水样中的溶解性物质和悬浮物所消耗的重铬酸钾相对应的氧的质量浓度。国标法的测量原理是：在水样中加入已知量的重铬酸钾溶液，并在强酸性介质下以银盐作催化剂，经沸腾回流后，以试亚铁灵为指示剂，用硫酸亚铁铵滴定水样中未被还原的重铬酸钾，由消耗的硫酸亚铁铵的量换算成消耗氧的质量浓度。在酸性重铬酸钾条件下，芳烃及吡啶难以被氧化，其氧化率较低，在硫酸银的催化作用下，直链脂肪族化合物可有效地被氧化。

COD 能够较为精确地反映废水中有机物的含量，测定时间较短，且不受水质的限制。但它不能像 BOD 那样反映出水中可以被微生物降解的有机物的量。例如，当废水中含有还原性无机物(如硫化物)时，加入强氧化剂后这类物质也会被氧化，因此，COD 值也存在一定的误差。

如果污水中有机物的组成相对稳定，则 BOD 和 COD 之间应有一定的比例关系，生活污水通常在 0.4~0.5 之间。一般而言，COD_{Cr} 与 BOD 之差，可以粗略地表示不能被微生物氧化分解的有机物量，差值越大，难以被微生物降解的有机物含量越多，越不宜采用生物处理法。因此，BOD₅ 与 COD 的比值(B/C 值，称为可生化性指标)可作为废水是否宜于采用生物处理的判别标准，比值越大，越容易被生物处理。一般认为 B/C 值大于 0.3 的废水才适合采用生物处理法。

(3) 总有机碳(TOC)与总需氧量(TOD)。总有机碳(TOC)是指水样中所有有机物的含碳量，并以此来间接表示水样中所含有机物的总量，它反映了水被有机物质污染的程度。它是把水样中所有有机碳转化为 CO₂ 后，测定 CO₂ 的量来确定水样中碳的含量。有机物

中含有 C、H、N、S 等元素，当有机物全都被氧化时，C 被氧化为 CO_2 ，H、N 及 S 则被氧化为 H_2O 、 NO 、 SO_2 等，此时的需氧量称为总需氧量(TOD)。TOC 和 TOD 的测定仅需几分钟。

现行检测标准为《水质 总有机碳的测定 燃烧氧化—非分散红外吸收法》(HJ 501—2009)，适用于地表水、地下水、生活污水和工业废水中总有机碳(TOC)的测定，检出限为 0.1 mg/L，测定下限为 0.5 mg/L。该标准测定 TOC 分为差减法 and 直接法。当水中苯、甲苯、环己烷和三氯甲烷等挥发性有机物含量较高时，宜用差减法测定；当水中挥发性有机物含量较少而无机碳含量相对较高时，宜用直接法测定。

差减法测定总有机碳的方法是：将试样连同净化气体分别导入高温燃烧管和低温反应管中，经高温燃烧管的试样被高温催化氧化，其中的有机碳和无机碳均转化为二氧化碳，经低温反应管的试样被酸化后，其中的无机碳分解成二氧化碳，两种反应管中生成的二氧化碳分别被导入非分散红外检测器。在特定波长下，一定浓度范围内二氧化碳的红外线吸收强度与其浓度成正比，由此可对试样总碳(TC)和无机碳(IC)进行定量测定。总碳与无机碳的差值，即为总有机碳。

直接法测定总有机碳的方法是：试样经酸化曝气，其中的无机碳转化为二氧化碳被去除，再将试样注入高温燃烧管中，可直接测定总有机碳。由于酸化曝气会损失可吹扫有机碳(POC)，故测得的总有机碳值为不可吹扫有机碳(NPOC)。

(4)油类污染物。油类通过不同途径进入水体环境形成含油污水，油类污染物有石油类和动植物油脂两种。油类污染物是一种量大、面广且危害严重的污染物。全世界每年有 500 万~1000 万吨石油通过各种途径进入水体。油类污染物的来源可分为自然来源(约占 8%)和人类活动来源(约占 92%)。自然来源主要有海底、大陆架渗漏，含油沉积岩缺损等。人类活动来源主要有油轮事故和海上石油开采的泄漏与井喷事故，港口和船舶的作业含油污水排放，石油工业的废水，餐饮业、食品加工业、洗车业排放的含油废水等。

油类污染物在水体中通常以四种状态存在，即悬浮油、乳化油、溶解油和凝聚态的残余物(包括海面漂浮的焦油球以及在沉积物中的残余物)。油品在水中分散颗粒较大，粒径大于 $100\ \mu\text{m}$ 的称为悬浮油。这种油占水中总含油量的 60%~80%，是水中油类污染物的主要部分，易于从水中分离出来。油品在水中分散的粒径很小，呈乳化状态的，称为乳化油。乳化油比较稳定，不易从水中分离出来。小部分油品在水中呈溶解状态，称为溶解油，溶解度为 5~15 mg/L。石油产品不同于其他溶解性物质，它的黏滞性大于水，密度小于水，在水中的溶解度较小。因此，工业废水中的矿物油基本上是由两大部分组成：一部分以油膜状态浮于水面，油膜厚度与水中油的含量有关；另一部分呈乳化状态溶于水中或吸附于悬浮微粒上。

油类污染物进入河流、湖泊或地下水后，其含量超过了水体的自净能力，使水质和底质的物理、化学性质或生物群落组成发生变化，从而降低水体的使用价值和使用功能。石油类污染物在进入水体后，会在水面上形成厚度不一的油膜。据测定，每吨石油能覆盖 $5 \times 10^6\ \text{m}^2$ 的水面。油膜使水面与大气隔绝，使水中溶解氧减少，从而影响水体的自净作用，致使水底质变黑发臭。油膜、油滴还可贴在水体中的微粒上或水生生物上，不断扩散和下沉，会向水体表面和深处扩展，污染范围越扩越大，破坏水体正常生态环境。另外，水面浮油还可萃取分散于水体中的氯烃，如狄氏剂、毒杀芬等农

药和聚氯联苯等，并把这些毒物浓集到水体表层，毒害水生生物。

油类污染物还会对渔业产生严重的影响。首先是石油污染会破坏渔场，玷污渔网、养殖器材和渔获物，水体污染可直接引起鱼类死亡，造成渔获量的直接减产。其次表现为产值损失，油污染能使鱼虾类生物产生特殊的气味和味道，且不易消除，因此会降低水产品的食用价值，严重影响其经济利用价值。最后，对水上旅游和娱乐业产生不良的影响。

油类污染物对水生动物也有不良影响。水体中的石油类污染物主要通过动物呼吸、取食、体表渗透和食物链传输等方式富集于动物体内。水体中石油类污染物含量为 0.01~0.10 mg/L 时，会对水生动物产生有害影响，导致其中毒。石油中有些烃类与一些海洋动物的化学信息(外激素)相同，或是化学结构类似，从而影响这些海洋动物的行为。

石油一般可以通过呼吸、皮肤接触、食用含污染物的食物等途径进入人体，影响人体多种器官的正常功能，引发多种疾病。石油的浓度是考察其毒性的关键因子。不同组分的石油其毒性效果不一样，随着石油浓度的升高和暴露时间的延长，其毒性增强。研究表明，人们在食用受石油烃衍生出的致癌物质特别是多环芳烃污染的水产品时，这些致癌物质可通过食物链的传递危及人体的健康和安全。

油类污染物现行检测标准为《水质 石油类和动植物油类的测定 红外分光光度法》(HJ 637—2012)。该标准规定了测定水中石油类和动植物油类的红外分光光度法，适用于地表水、地下水、工业废水和生活污水中石油类和动植物油类的测定。

当样品体积为 1000 mL，萃取液体积为 25 mL，使用 4 cm 比色皿时，检出限为 0.01 mg/L，测定下限为 0.04 mg/L；当样品体积为 500 mL，萃取液体积为 50 mL，使用 4 cm 比色皿时，检出限为 0.04 mg/L，测定下限为 0.16 mg/L。

测量原理：用四氯化碳萃取样品中的油类物质，测定总油，然后将萃取液用硅酸镁吸附，除去动植物油类等极性物质后，测定石油类。总油和石油类的含量均由波数分别为 2930 cm^{-1} (CH_3 基团中 C—H 键的伸缩振动)、 2960 cm^{-1} (CH_3 基团中 C—H 键的伸缩振动)和 3030 cm^{-1} (芳香环中 C—H 键的伸缩振动)谱带处的吸光度 A_{2930} 、 A_{2960} 、 A_{3030} 进行计算，其差值为动植物油类浓度。

(5)有机性有毒有害物质。主要有酚、有机农药、苯类化合物等。有毒有机污染物是指在水中通常只以微克级(10^{-6} g/L)或更低级水平存在，常规的 BOD、COD 等有机物监测指标不能对它们实施有效监测的有机污染物，主要包括以下几类：

多氯联苯(PCBs)：多氯联苯是联苯上的氢被氯取代后生成物的总称。一般以 4 氯或 5 氯化物为主，若 10 个氢皆被置换，则可形成 210 种化合物。多氯联苯被广泛用作电器绝缘材料和塑料增塑剂等，是一种稳定性极高的合成化学物质。该类污染物在环境中不易分解，一般极难溶于水，但易溶于有机溶剂和脂肪，其进入生物体内也相当稳定，故一旦侵入肌体就不易排泄，而易聚集于脂肪组织、肝和脑中，引起皮肤和肝脏损坏。随着水体水分循环，PCBs 已成为环境污染最具代表性的物质之一。

多环芳烃(PAHs)：多环芳烃是含碳化合物在温度高于 400°C 时，经热解环化和聚合作用而成的产物，多为石油、煤等燃料以及木材和可燃性气体等在不完全燃烧或高温处理条件下所产生，排入大气后经沉降和雨洗等途径到达地表，引起地表水和地下水的污染。生物毒性实验表明，许多 PAHs 具有致癌作用，是公认的有毒有机污染物。PAHs 的种类多达数百种，它们的基本结构是芳香烃的多环同系物，具有相似的物理化学性质。美国

环保局公布的 129 种优先污染物中有 16 种多环芳烃。

有机氯农药：有机氯农药是一类对环境具有严重威胁的人工合成有毒有机化合物，在各国优先控制污染物黑名单中均有公布。引起水体污染的有机氯农药主要包括 DDT、DDD、艾氏剂、六六六等，都属于持久性农药。有机氯农药易溶于脂肪和有机溶剂而不易溶于水，它们的光学性质稳定，在环境中的残留时间长。

酚类化合物：酚类化合物广泛存在于自然界中，煤气、焦化、石油化工、制药、油漆等行业大量排放的工业废水中主要含有苯酚。苯酚是产生臭味的物质，溶于水，毒性较大，能使细胞蛋白质发生变性和沉淀。当水中酚浓度达 0.1~0.2 mg/L 时，鱼肉产生酚味，浓度更高时可使鱼类大量死亡。人长期饮用含酚水，可引起头昏、贫血及各种神经系统症状，甚至中毒死亡。

有毒有机污染物在水体中虽然含量甚微，但生态毒理学研究的结果证明，它们中有些极难为生物分解，对化学氧化和吸附也有阻抗作用，在急性及慢性毒性实验中往往并不表现出毒性效应，但却可以在水生生物、农作物和其他生物体中迁移、转化和富集，并具有“三致”（致癌、致畸、致突变）作用，在长周期、低剂量条件下，往往可以对生态环境和人体健康造成严重的甚至是不可逆的影响。

2. 无机物指标

常用的无机物指标如下：

(1)pH 值。氢离子浓度(hydrogenion concentration)是指溶液中氢离子的总数和总物质的量的比。pH 是 1909 年由丹麦生物化学家 Soren Peter Lauritz Sorensen 提出的。p 来自德语 potenz，意思是浓度、力量，H(hydrogenion)代表氢离子。

在标准温度(25℃)和压力下，pH=7 的水溶液(如纯水)为中性，这是因为水在标准温度和压力下自然电离出的氢离子和氢氧根离子浓度的乘积(水的离子积常数)始终是 1×10^{-14} ，且两种离子的浓度都为 1×10^{-7} mol/L。pH 值小说明 H^+ 的浓度大于 OH^- 的浓度，故溶液酸性强；而 pH 值大则说明 H^+ 的浓度小于 OH^- 的浓度，故溶液碱性强。所以 pH 值越小，溶液的酸性越强；pH 值越大，溶液的碱性越强。

通常 pH 值是一个介于 0 和 14 之间的数(浓硫酸 pH 值约为 2)。在 25℃ 的温度下，当 pH<7 时，溶液呈酸性；当 pH>7 时，溶液呈碱性；当 pH=7 时，溶液呈中性。但在非水溶液或非标准温度和压力的条件下，pH=7 可能并不代表溶液呈中性，这需要通过计算该溶剂在这种条件下的电离常数来决定 pH 为中性的值。

在水质指标中，pH 值主要指示水样的酸碱性。天然水的 pH 值主要取决于水中二氧化碳、重碳酸根离子、碳酸根、氢氧根离子的平衡含量；受工业废水污染的水，引起 pH 值变化的因素比较复杂。一般要求处理后污水的 pH 值在 6~9 之间。

(2)氮、磷含量。氮、磷含量表示水体中含氮化合物和含磷化合物在水中存在的形式和浓度，是重要的水质指标。污水中氮的形式有四种：有机氮(主要是蛋白质和尿素)、氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮。这四种氮的总和(以 N 计量)称为总氮(TN)，有机氮和氨氮之和(以 N 计量)称为凯氏氮(TKN)。含磷化合物包括有机磷和无机磷，二者之和(以 P 计量)称为总磷(TP)。

氮、磷污染物来源分为外源性污染和内源性污染。外源性污染又分为点源污染和面源污染。其中点源污染主要来源于生活污水和工业废水，面源污染主要来源于农业和渔牧

业。内源性污染是指水底沉积物中氮和磷的释放、水生动植物新陈代谢分解等产生的氮磷污染。

据估算，我国人均体内排出的磷为 1.8 g/d 左右。生活污水中含有有机氮和氨态氮，其来自食物中蛋白质代谢产物，一般人均产生 11 g/d 氮态废物。新鲜生活污水中有机氮约占 40%，氨氮约占 60%。

食品加工企业，特别是乳制品行业和豆制品行业，以及化肥生产企业等排放的工业废水中含有大量高浓度的氮污染物。磷污染主要来源于磷化工，其排放的污水中含有大量的磷酸盐。

面源性的农业污染物，包括化肥、农药和动物粪便等。化肥和农药通过雨水冲淋、农业退水和地表径流进入河道和水体。畜禽养殖业废物和水环境中野生动物的排泄物，氮、磷含量相当高，也会给水体带来大量氮、磷污染物。

沉积物是湖泊的主要污染内源，是污染物的蓄积库。各种途径的营养盐经湖泊物理、化学和生物化学的作用沉积于湖底，成为湖泊营养盐的内负荷。在湖泊环境发生变化时，如入湖营养盐负荷减小或者完全被截污后，沉积物中的营养盐会逐步释放出来，补充湖水中的营养盐。

污水中的氮、磷为植物营养元素。从农作物生长角度看，植物营养元素是宝贵的养分，但过多的氮、磷进入天然水体会导致富营养化，引起水生植物和藻类的大量繁殖，严重影响鱼类生存。氮污染物对水体环境和人类都具有很大的危害，主要表现在以下几方面：①氨氮会通过氨化作用和硝化作用消耗水体中的溶解氧；②含氮化合物对人体和其他生物具有毒害作用，氨氮对鱼类有一定的毒害作用， NO_3^- 和 NO_2^- 可被转化为一种“三致”物质——亚硝胺；③加速水体的富营养化。水体富营养化是指在人类活动的影响下，生物所需的氮、磷等营养物质大量进入湖泊、河口、海湾等缓流水体，引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖，水体溶解氧量急剧下降，水质恶化，鱼类及其他水生生物大量死亡的现象。

(3)重金属。重金属指密度大于 4.5 g/cm^3 的金属，约有 45 种，如铜、铅、锌、铁、钴、镍、锰、镉、汞、钨、钼、金、银等。尽管锰、铜、锌等重金属是生命活动所需要的微量元素，但是大部分重金属如汞、铅、镉等并非生命活动所必需，而且所有重金属超过一定浓度都对人体有毒。水质指标中重金属主要指汞、镉、铅、铬、镍等生物毒性显著的元素，也包括具有一定毒害性的一般重金属，如锌、铜、钴、锡等。其中，汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)和砷(As)俗称“五毒”。

由于重金属在生物体内会累积，并且很难自行代谢，所以生物在受到重金属危害后会造造成很多健康问题，毒理作用会表现为生殖障碍、影响胎儿发育、降低生物体机能。重金属对人体的危害十分巨大，日本发生的“水俣病”和“骨痛病”就是典型的重金属威胁人体健康的例子。而我国很多省份也出现过“血铅病”，血铅中毒的儿童会出现多动、注意力不集中、反应迟钝的现象，甚至会发生攻击性行为，严重者会出现颅神经瘫痪等症状。

(4)无机性非金属有毒有害物质。主要有硫化物、氰化物和挥发酚等。

炼油、纺织、印染、焦炭、煤气、纸浆、制革等多种化工原料的生产过程中会排放含有硫化物的工业废水，含有硫酸盐的污水在厌氧条件下会还原产生硫化物，成为含有硫化物的污水。水中含有高浓度硫化物时一般会带有令人厌恶的臭蛋气味，且具有腐蚀性。有机硫化物种类繁多，同样具有难闻的臭味，容易使人觉察。含硫污水在一定条件下可以释

放出硫化氢气体，硫化氢不仅可以直接腐蚀金属管道，而且在污水管壁上能被微生物氧化成 H_2SO_4 ，从而严重地腐蚀金属管道或水泥管道，所以硫化物含量较高的工业废水的排放都应采用耐腐蚀的塑料或玻璃钢材质的管道。

自然水体中一般不含氰化物，水中氰化物是人类活动所引起的。采矿提炼、摄影冲印、电镀、金属表面处理、焦炉、煤气、染料、制革、塑料、合成纤维及工业气体洗涤等行业都排放含氰污水。含氰污水的处理原理是将氰化物氧化成毒性较低的氰酸盐，或完全氧化成二氧化碳和氮。常用的处理方法是氯氧化法、臭氧氧化法和电解氧化法，过量的氰化物对活性污泥的毒害作用很大，但在不超过一定浓度时，只要保证 pH 值大于 7、水温低于 35°C 和合理的曝气量，活性污泥中的微生物就可以将氰化物氧化生成铵离子和碳酸根。

炼油、化工、炸药、树脂、焦化等行业会排放含酚污水，其中以土法炼焦排放的污水中含酚浓度最高。另外，机械维修、铸造、造纸、纺织、陶瓷、煤制气等行业也排放大量的含酚污水。水质标准中的挥发酚是指在蒸馏时，能与水蒸气一起挥发的酚类化合物。常用的挥发量测定方法是 4-氨基安替比林分光光度法和溴化容量法。4-氨基安替比林分光光度法干扰因素少、灵敏度较高，适用于测定挥发酚含量小于 5 mg/L 的水样。

(三) 生物性指标

表示污水生物性质的污染指标主要有细菌总数和大肠菌群。

1. 细菌总数

水中细菌总数反映了水体受细菌污染的程度。通常，细菌总数越多，表示病原菌存在的可能性越大。但细菌总数不能说明污染的来源，必须结合大肠菌群数来判断水体的污染来源和安全程度。

2. 大肠菌群

大肠菌群被视为最基本的粪便污染指示菌群。大肠菌群数可以反映水体被粪便污染的程度，间接表明有肠道病菌(如痢疾、霍乱等)存在的可能性。

第二节 废水的出路与排放标准

一、污水出路

污水经过处理后的最终出路是排入水体，或者经过适当处理后回用。

排入水体是污水净化后的传统出路，是目前最常用的方法。污水排入水体的前提是不破坏水体的原有功能，因此，污水必须经过适当处理，达到相应的排放标准后才能排放。

水资源短缺已成为全球面临的严重问题，污水经过适当的处理后回用已成为全世界的共识。污水的回用领域主要包括市政用水(如道路清洗、绿地浇灌等)，工业用水(如冷却用水、锅炉用水等)，农业、林业、渔业和畜牧业用水，地下水回灌等。随着废水处理技术的不断进步，水质净化手段日益增多，经过处理后的废水回用率正在不断提高，有些企业(如冶金矿山的磁选厂)的污水回用率已超过 95%。

二、污水排放标准

污水直接排放会造成水体的污染，破坏水体的环境功能，因此，污水必须经处理达标后才能排放。根据排放途径和排放要求，可以确定污水经过处理后排放所执行的排放标准。例如，处理后的水排入地表，须达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)和《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)；处理后的水排入城市下水道，须达到《污水排入城市下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)；处理后的水要进行回用，须达到有关污水回用的标准。对于污水处理厂，处理后的出水必须达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)。为控制流域污染物排放量，一些地区还制定了更为严格的地方性标准，如四川省为控制和治理岷江、沱江流域水污染，改善水环境质量，四川省环境保护厅、四川省质量技术监督局组织编制了《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》(DB 51/2311—2016)。

污水排放标准根据控制形式，可分为浓度标准和总量控制标准；根据地域管理权限，可分为国家排放标准、行业排放标准和地方排放标准。我国现有的国家标准和地方标准基本上都是浓度标准，规定了排放污染物的浓度限值，其单位一般为 mg/L。在进行废水处理工程设计时，要根据具体情况选择参考和设计标准。

表 1-1 和表 1-2 列出了常用标准中部分常见污染物的排放标准。

表 1-1 《地表水环境质量标准》中常见污染物排放标准

单位：mg/L

序号	标准值 项目	分类				
		I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
1	pH 值(无量纲)	6~9				
2	溶解氧	饱和度 $\geq 90\%$ (或 ≥ 7.5)	≥ 6	≥ 5	≥ 3	≥ 2
3	COD _{Cr}	≤ 15	≤ 15	≤ 20	≤ 30	≤ 40
4	BOD ₅	≤ 3	≤ 3	≤ 4	≤ 6	≤ 10
5	氨氮	≤ 0.15	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 2.0
6	TP	≤ 0.02 (湖、库 ≤ 0.01)	≤ 0.1 (湖、库 ≤ 0.025)	≤ 0.2 (湖、库 ≤ 0.05)	≤ 0.3 (湖、库 ≤ 0.1)	≤ 0.4 (湖、库 ≤ 0.2)
7	TN(湖、库)	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 2.0

表 1-2 《城镇污水处理厂污染物排放标准》中常见污染物排放标准 单位: mg/L

序号	控制项目		一级标准		二级标准	三级标准
			A 标准	B 标准		
1	COD _{Cr}		50	60	100	120 ^①
2	BOD ₅		10	20	30	60 ^①
3	SS		10	20	30	50
4	TN		15	20	—	—
5	氨氮		5(8) ^②	8(15) ^②	25(30) ^②	—
6	TP	2005 年 12 月 31 日前建设的	1	1.5	3	5
		2006 年 1 月 1 日起建设的	0.5	1	3	5
7	粪大肠菌群数(个/L)		10 ³	10 ⁴	10 ⁴	—

注: ①下列情况按去除率指标执行: 当进水 COD 大于 350 mg/L 时, 去除率应大于 60%; 当 BOD 大于 160 mg/L 时, 去除率应大于 50%。

②括号外数值为水温大于 12℃时的控制指标, 括号内数值为水温小于等于 12℃时的控制指标。

思考题

1. 废水有哪几种类型? 各有什么特征?
2. 水质污染指标主要有哪些? 它们在水体污染控制和污水处理工程设计中有何作用?
3. 生化需氧量和化学需氧量的含义是什么? 二者有何区别?
4. 废水处理中, 关于氮的指标有哪些? 它们之间有何关系?
5. 污水的出路有哪些?
6. 污水的排放标准如何分类?

第二章 废水处理动力设备

第一节 泵

泵是一种把原动机的机械能转换成输送液体的能量，用来增压输送液体的机械。其作用主要是输送水、油、酸碱液、乳化液、悬乳液等液体，在废水处理中泵是必不可少的通用设备，例如用泵进行废水的提升、污泥的抽送、药剂的添加等。在废水处理运行过程中，泵一旦出现故障，往往会使整个处理系统停止工作，因此，泵常被比作废水处理工艺流程中的“心脏”。

一、泵的分类及工作原理简介

(一) 泵的分类

泵的种类繁多，其分类方法也很多。根据泵的工作原理，可将泵简单分为叶轮式泵、容积式泵和其他类型的泵，如图 2-1 所示。

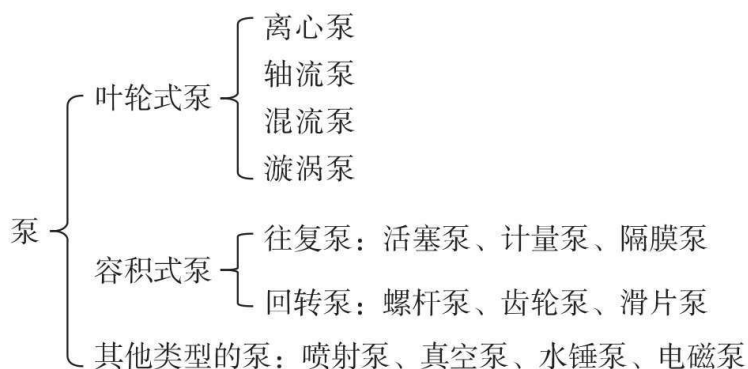


图 2-1 泵的分类

(1) 叶轮式泵：又称动力式泵或叶片式泵，依靠旋转的叶轮对液体的动力作用，把能量连续地传递给液体，使液体的动能(为主)和静压能增加，达到输送液体的目的。叶轮式泵主要有离心泵、轴流泵、混流泵和漩涡泵。

(2) 容积式泵：依靠包容液体的密封工作空间容积的周期性变化，把能量周期性地传递给液体，使液体的压力增加至将液体强行排出。根据工作元件的运动形式，可分为往复泵和回转泵。

(3)其他类型的泵：以其他形式传递能量。如喷射泵是依靠高速喷射的工作流体的形式传递能量的泵；气体升液泵(气提装置)是依靠导管通入气体以降低液体的密度，通过外压实现液体的输送。

按输送介质，可分为清水泵、污水泵、油泵、泥浆泵和砂泵等。

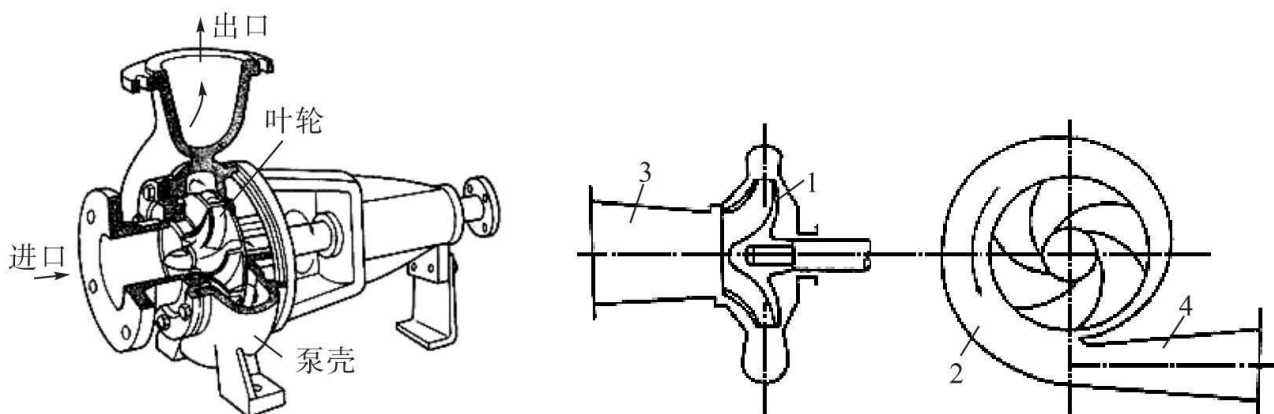
按吸口数目，可分为单吸泵、双吸泵等。

此外，泵也常按其形成的流体压力分为低压泵、中压泵和高压泵三类，常把压力低于 2 MPa 的泵称为低压泵，压力为 2~6 MPa 的泵称为中压泵，压力高于 6 MPa 的泵称为高压泵。

(二)泵的工作原理

1. 离心泵

离心泵的主要结构部件是叶轮和泵壳。泵壳内的叶轮固定安装于由电动机拖动的转轴上，由电动机带动叶轮旋转，利用叶轮旋转时产生的离心力使流体自叶轮中心向外周做径向运动，当液体自叶轮中心甩向外周时，叶轮中心形成低压区，液体被吸进叶轮中心。依靠叶轮的不断运转，液体便连续地被吸入和排出。离心泵的结构如图 2-2 所示。



1—叶轮；2—压水室；3—吸入室；4—扩散管

图 2-2 离心泵的结构

离心式泵具有效率高、性能可靠、流量均匀、易于调节流量等优点，特别是可以制成各种流量和扬程的泵以满足不同的需要，所以应用最为广泛。离心泵在废水处理过程中用于输送污水、腐蚀性液体及悬浮液，不适合输送黏度较大的液体。

2. 轴流泵

轴流泵的结构如图 2-3 所示。它的工作原理是当叶轮 1 旋转时，流体轴向流入，在叶片叶道内获得能量后，再经导流器 2 轴向流出。当原动机驱动浸在液体中的叶轮旋转时，叶轮内的流体相对叶片做旋流运动。根据升力定理和牛顿第三定律可知，旋流流体会对叶片产生一个升力，而叶片也会同时给流体一个与升力大小相等且反向的作用，成为“推力”。这个推力对流体做功，使流体的动能增加，并沿轴向流出叶轮，经过导流器 2，进入出口管路。与此同时，叶轮进口处产生负压，使流体被吸入。只要叶轮不断地旋转，流体就会源源不断地被吸入和压出。