环境保护技术

尤彩真 编

南京航空航天大学

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第一章　环境污染简介 …… 1
第一节　环境与生态系统 …… 1
一、　环　　境 …… 1
二、　生态系统 …… 1
第二节　环境污染与污染物 …… 3
一、　环境污染 …… 3
二、　水体污染及其污染物 …… 4
三、　大气污染及其污染物 …… 6
第二章　流体流动的基本知识 …… 9
第一节　流体静力学基本方程式 …… 9
一、　流体的密度 …… 9
二、　流体的静压强 …… 10
三、　流体静力学基本方程式 …… 10
第二节　流体在管内的流动 …… 11
一、　流量与流速 …… 11
二、　稳定流动与不稳定流动 …… 13
三、　连续性方程式 …… 13
四、　柏努利方程式 …… 14
五、　流体流动过程中能量守恒与转化的实例 …… 16
第三节　流体流动的阻力 …… 19
一、　粘　　度 …… 20
二、　流动类型与雷诺准数 …… 21
三、　流体在管内流动的阻力 …… 23
四、　流体通过颗粒床层的流动阻力 …… 27
五、　球形颗粒在流体中的运动阻力 …… 29
第三章　溶解态污染物的化学处理 …… 31
第一节　中和沉淀 …… 31
一、　概　　述 …… 31
二、　废水中和 …… 31
三、　氢氧化物沉淀 …… 34
第二节　氧化还原 …… 36
一、　概　　述 …… 36
二、　药剂氧化 …… 36
三、　药剂还原 …… 42

四、 电渗析器 …… 95
第六章 气态污染物的分离 …… 97
第一节 吸收分离气态污染物 …… 97
一、 原 理 …… 97
二、 影响吸收过程的主要因素 …… 101
三、 吸收设备的构造和性能 …… 101
四、 吸收过程的物料衡算及操作线方程式 …… 104
五、 吸收设备的计算 …… 105
第二节 吸附分离气态污染物 …… 109
一、 吸附及吸附剂 …… 109
二、 原 理 …… 111
三、 吸附过程分析 …… 114
四、 吸附剂再生 …… 116
第七章 废气除尘 …… 118
第一节 机械式除尘器 …… 118
一、 重力沉降室 …… 118
二、 惯性除尘器 …… 119
三、 旋风除尘器 …… 120
第二节 电除尘器 …… 121
附 表 单位换算 …… 126

第一章　环境污染简介

第一节　环境与生态系统

一、环境

环境是人类赖以生存和发展的基础。环境一般可分为自然环境和社会环境。人类的自然环境是指环绕于人类周围的各种自然因素的总和。这些自然因素包括大气、水、土壤、生物、各种矿物资源，等等。在自然环境中，生息着的种种生物——包括所有的动物和植物，它们都直接或间接地依靠阳光、空气、水和土壤中的营养物质等生存和发展着。在自然地理学上，把这些构成自然环境总体的因素划分为大气圈、水圈、生物圈和岩石圈（包括土壤）等四个自然圈。

人类和一切生物都生活在地球的表层，这个提供生物生存的地球表层叫做生物圈。生物圈是地球表面全部有机体及与之发生相互作用的物理环境的总称。它的范围扩及大气圈、水圈和岩石圈三部分，包括从海平面以下约十一公里到海平面以上约九公里。

自然环境是一个自然的、历史的、有机的综合体，自然环境虽然被人为地划分为几个圈，但自然界各种因素总是经常地、大量地进行物质交换，因而决定了自然环境的不可分割性，在大气圈、水圈、岩石圈和生物圈之间，没有明显的界面。特别是生物圈，它交织在大气、水和岩石圈内，没有一个独立的空间位置。总之，各圈之间并没有严格的界限，而是互相渗透，互相影响并紧密相联系的。

人类的社会环境是指人类的社会制度、经济状况、职业分工、文化艺术、卫生等上层建筑和生产关系等。

环境的概念是指存在于人类周围，并对人类发生影响的一切。也就是说既包括了自然环境也包括了社会环境。本书所阐述的内容，后面所提到的环境均指自然环境。

二、生态系统

1．生态系统的概念

生态系统是生物与环境的综合体，它是自然界一定空间的生物与环境之间互相作用、互相制约、不断演变，达到动态平衡的统一整体，是一个生物与环境相互进行物质和能量交换的相对稳定的功能系统。生态系统是具有一定结构和功能的单位。这个单位是由生物及其周围环境组成的。例如一个沼泽和湖泊，一条河流，一片草原森林，一个城镇，一个村庄都可以构成一个生态系统。总之，自然界是由各种各样的生态系统组成的。

2．生态系统的组成

生态系统是由四部分组成的：

（1）　生产者

主要指能进行光合作用制造有机物的绿色植物，也包括单细胞的藻类等。生产者利用太阳能把无机物转化为有机物，把太阳能转化为化学能，不仅供自身生长发育的需要，而且它本身也是其它生物类群以及人类的食物和能源的供应者。

（2）消费者

指绿色植物以外的其它生物，主要指动物。又分为一级消费者、二级消费者……等。食动物直接以植物为食，是一级消费者；以草食动物为食的肉食动物，是二级消费者；二级消费者为食的动物，是三级消费者。消费者虽然不是有机物的最初生产者，但在态系统的物质与能量的转化过程中，也是一个极为重要的环节。

（3）分解者

指各种具有分解能力的微生物，包括各种细菌、真菌和一些微型动物。分解者在生态系统中的作用是把动物、植物尸体分解为简单的无机物，重新供给生产者使用。

（4）无生命物质

指生态系统中的各种无生命的无机物、有机物和各种自然因素包括水体、大气、矿物质等。

3．食物链

按照食物关系，在系统中居于同样地位，起着同样作用的一群生物，属于一个营养级，营养级彼此相联系，构成锁链形式，称为食物链。对于环境保护来说，与食物链有关的一个主要现象是有害物沿食物链浓集。当有害物被生产者摄取后，从生产者转移到草食动物，再由草食动物转移到肉食动物，其浓度成百成千倍地增加。环境中有害物浓度本来很低，经过食物链的这种浓集，到达较高营养级时，其危害程度大大增加。人类常常居于食物链的顶端，浓集现象对于人类的威胁是十分明显的。

4．生态系统中的能量流动和物质循环

每一个生态系统都是一个能量流动和物质循环的系统，地球表面无数的生态系统的能量流动和物质循环汇合成地表大自然的能量流动和物质循环系统。整个自然界就是在能量流动和物质循环中不断地变化和发展的。

生态系统的能量转移是通过食物关系由一种生物转移到另一种生物的。绿色植物利用日光的辐射能进行光合作用，把光能变成化学能贮存在所创造的有机物质中。绿色植物在生态系统中居于重要地位。因为动物不能直接利用太阳能制作食物，太阳能只有被绿色植物的叶绿素作用并转化成食物分子的化学能以后，才能被动物吸收利用。

能量通过绿色植物的光合作用进入生态系统，然后从绿色植物转移到草食动物，又由草食动物转移到肉食动物，生产者也好，消费者也好，它们死后都被细菌和真菌分解，把复杂的有机分子转变成简单的无机化合物，分解者最后将它们所分解的有机化合物中的能量分散返回环境中，这一能量单向流动的现象叫做能量流动。

在一个生态系统中，没有一种组分是持久不变的。能量通过组分在不断地流动，物质处在不停的循环之中。任何时候，任何元素都处在循环的某个阶段，每一种元素在生态系统中的循环都有自己的特点，但对于整个系统的重要性不同，自然界中最基本的元素是氢、氧、碳、氮和磷等，一切生物（包括人类）主要也都是由这些基本元素构成的。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

因此，生态系统中最基本的物质循环也就是水的循环、碳循环、氮循环、磷循环等，例如水循环，它是水分子从地球表面通过蒸发，进入大气，然后通过雨、雪或其它降水形式又回到地球表面的运动。这是地球上太阳能所推动的各种循环中的一个中心循环。

由于水是最好的溶剂，其它物质的循环，都结合水循环进行，水循环和其它物质的循环密切地交织在一起，对水循环的任何干预，都会影响到其它循环，甚至造成其它循环的瓦解，至少在局部范围如此。所以，保护水循环的整体性，是环境保护的一个中心问题。

5．生态平衡

任何一个正常的生态系统，能量流动和物质循环总是不断地进行着，但在一定的时期内，在生产者，消费者和分解者之间保持着一定的和相对的平衡状态，也就是说系统的能量流动和物质循环，较长期地保持稳定，这种平衡状态称为生态平衡。

生态系统之所以能够保持相对的平衡状态，主要是由于其内部具有自动调节的能力。当系统的某一部分出现机能的异常，就可能被其它部分的调节所抵消。系统的组成成分越多样，能量流动和物质循环的途径就越复杂，其调节能力也就越强。但是，一个生态系统的调节能力再强，也是有一定限度的，超出这一限度，生态平衡就会遭到破坏。

第二节　环境污染与污染物

一、环境污染

生态系统有内在的调节作用或反馈现象，以保持生态平衡。但是这种调节是有限度的，在界限范围以内，生态系统具有某种限度的自行调节能力，超出这些界限，调节就不再起作用，因而使系统受到改变、伤害以致破坏。当有害物进入生态系统时，生态系统有一定的自净能力。进入生态系统的有害物数量少时，生态系统能通过物理的、化学的和生物的净化作用，降低其浓度或使之完全消除，不致造成危害。当这些有害物的数量增加到一定程度，超过生态系统的净化能力时，就会造成对生态系统结构和机能的破坏。生态系统净化能力的界限叫做忍耐力极限。所谓环境污染是指有害物质进入生态系统的数量超过生态系统能够降解它们的能力，因而打破了生态平衡，使人类赖以生存的环境发生恶化。

生态系统的破坏，有属于自然原因引起的，也有属于人为的原因造成的。故生态系统受破坏而引起的环境问题可分为以下两类：

第一类问题叫原生环境问题或第一环境问题。这是指自然界发生的变异造成的生态系统的破坏，是自然环境中本来就存在着对人类和其它生物生存有害的因素。如火山爆发、地震、台风、海啸、洪水、旱灾、虫灾等自然灾害。

第二类问题叫次生环境问题或第二环境问题。这是指人类所造成的生态系统的破坏。例如不合理地利用自然资源引起的环境退化，以及工业发展带来的环境污染等等。这类环境污染问题，可用以下公式表示：

〔人类各种活动的冲击〕－〔自然界生态系统恢复平衡的能力〕＝〔环境污染〕

目前所谈的环境污染主要是指人为因素所造成的。由于人类生产和生活活动产生的大量有害物质排入环境，破坏了环境的结构和状态，使环境的素质不断恶化，从而干扰了人类的正常生活条件，对人体的健康产生了直接或间接，甚至是潜在的不利影响，这便是环境污染。更具体地说，环境污染是指有害物质，特别是工业三废对大气、水体、土壤等环境因素的污染，并达到致害的程度。当然，环境污染的实际情况是比较复杂的，例如放射性物质产生的电离辐射，工业生产与交通运输产生的噪声等对于环境和人体都有不利的影响，因而也属环境污染之列。通常把产生物理的（声、光、热、辐射等）、化学的（无机物、有机物）、生物的（霉菌、细菌、病毒等）有害物质及因素的设备、装置、场所等，都称为污染源。而把人们在生产生活中，排入水体、大气、土壤中，并引起环境污染或导致环境恶化的物质，叫做环境污染物。

二、水体污染及其污染物

1．水体污染

水体有两个含意：一般是指河流、湖泊、沼泽、水库、地下水、海洋的总称；在环境学领域中则把水体当作包括水中的悬浮物、溶解物质、底泥和水生生物等完整的生态系统或完整的综合自然体来看。在环境污染的研究中，区分“水”与“水体”的概念十分重要。例如重金属污染物易于从水中转移到底泥中，水中重金属的含量一般都不高，若着眼于水似乎未受到污染，但从水体看，可能受到较严重的污染，使该水体成为长期的次生污染源。

研究水体污染主要研究水污染，同时也研究底质（底泥）和水生生物体污染。所谓水污染是指外来的物质进入水体的数量达到了破坏水体原有用途的程度。

2．水体污染源

水体污染源有二种形式：

① 点源 主要指工业污染源。工业废水是水体最重要的污染源。它量大、面广、含污染物多，成分复杂，在水中不易净化，处理也比较困难。生活污水主要是日常生活中各种洗涤水，９９.９％以上为水，固体物质小于１％，而且多为无毒物质。

② 面源 农村污水和灌溉水是水体污染的主要面源。由于农田施用化肥和农药，灌溉后排出的水或雨后径流中，常含有农药和化肥对水体影响很大，如农药污染、富营养化。

3．水体中的主要污染物

① 需氧污染物（需氧有机物） 生活污水和某些工业废水中所含的碳水化合物、蛋白质、脂肪和木质素等有机化合物可在微生物作用下最终分解为简单的无机物质，这些有机物在分解过程中需要消耗大量的氧气，故被称为需氧污染物。需氧有机物是水体中最普遍和最经常存在的一种污染物。

由于水体中有机污染物的组成比较复杂，各类有机物的含量难以分别测定，又因为需氧有机污染物的主要危害是消耗水中溶解氧，实际工作中一般采用下列指标来表示水中需氧有机物的含量：

生化需氧量（ＢＯＤ） 表示水中有机污染物经微生物分解所需的氧量。

化学需氧量（COD） 指用化学氧化剂氧化水中有机污染物时所需的氧量。

总有机碳（TOC） 包括水体中所有有机污染物的含碳量。

总需氧量（TOD） 有机物中除含碳外，尚含有氢、氮、硫等元素，当有机物全部被氧化时的需氧量。

在被需氧有机物严重污染的水体，溶解氧急骤下降，甚至产生无氧层。当溶解氧降低到1PPm时，大部分鱼类就要发生窒息死亡。当水中溶解氧消失时，将出现水质腐败现象。

② 植物营养物 主要是指氮、磷、钾、硫及其化合物。从农作物生长的角度看，植物营养物是宝贵的物质，但过多的营养物质进入天然水体，将恶化水体质量，影响渔业的发展和危害人体健康。水体中植物营养物质含量的增加，导致水生生物，主要是各种藻类大量繁殖。藻类过度旺盛的生长繁殖，将造成水中的溶解氧急剧变化，使水体处于严重缺氧，而造成鱼类大量死亡。硝酸盐超过一定量时有毒性，亚硝酸盐又能在人体内与仲胺合成亚硝胺，会使人患癌症、生畸胎的危险。

③ 重金属 主要指汞、镉、铅、铬以及类金属砷等生物毒性显著的重金属，也包括具有毒性的重金属锌、铜、镍、锡等。重金属污染物最主要的特征是：在水体中不能被微生物降解，而只能发生各种形态之间的相互转化，以及分散和富集的过程。这些过程统称为金属的迁移。重金属在水体中的迁移主要是沉淀作用和吸附作用以及氧化还原作用，络合作用等。从毒性和对生物体、人体的危害方面看，重金属的污染有三个特点：

Ⅰ．在天然水体中只要有微量浓度即可产生毒性效应，一般重金属产生毒性的范围大致在1～10PPm，毒性较强的金属如汞、镉产生毒性的浓度在0.01～0.001PPm。

Ⅱ．通过食物链的生物放大作用，重金属可以在较高级生物体内成千上万倍地富集，然后通过食物进入人体，在人体某些器官中积累造成慢性中毒。

Ⅲ．水体中的某些重金属可在微生物的作用下转化为毒性更强的金属化合物，如汞的甲基化。

④ 氰化物 水体中氰化物主要来自化学、电镀、煤气、炼焦等工业排放的废水，氰化物是剧毒物质，一般人只要服0.1克左右的氰化钾或氰化钠便立即死亡。含氰废水对鱼有很大的毒性，当水中CN^-含量达0.3～0.5PPm时，鱼可死亡。世界卫生组织订出了鱼的中毒限量为游离氰0.03PPm；生活饮水中氰化物不许超过0.05PPm地面水中最高许浓度0.1PPm。

水体对氰化物有较强的自净作用，天然水体中氰化物的净化过程主要有两个途径：一个是挥发排出，即通过下述反应转变为可挥发性的氰化氢：

$$CN^- + H_2O + CO_2 = HCN\uparrow + HCO_3^-$$

这一过程的净化量可以占水体对氰化物总净量的90%左右；另一过程是氧化分解（即生物化学分解）。

$$2CN^- + O_2 \xrightarrow{\text{微生物}} 2CNO^-$$

$$CNO^- + 2H_2O \longrightarrow NH_4^+ + CO_3^{2-}$$

在一般天然水条件下，微生物氧化过程所造成氰的自净量只占水体对氰化物总净量的10%左右。

⑤ 酸碱及一般无机盐类　酸性废水主要来自矿山排水和冶金及金属加工酸洗废水。碱性废水主要来自碱法造纸、人造纤维、制碱等工业废水。酸污染的危害主要表现在对金属及混凝土结构材料的腐蚀上。碱污染使土壤盐碱化。各种动植物及微生物都有各自适应的PH值范围，PH值变化或超过适应范围，都能抑制生化反应造成危害，严重时导致死亡。

⑥ 酚类化合物　水体中酚的来源主要是冶金、煤气、石油化工、塑料等工业废水，城市生活污水也是酚污染物的来源。酚有毒性，但人体有一定解毒能力，如经常摄入的酚量超过解毒能力时，人会慢性中毒。

⑦ 石油　随着石油事业的发展，油类物质对水体的污染愈来愈严重。主要来自船舶和工业的油污染，海底石油开采也是油污染的来源。石油污染在短期内对于鱼的危害不明显，但对水域的慢性污染会使渔业受到较大的危害。

⑧ 放射性物质　大多数水体在自然状态下，都有极微量的放射性，由于原子能工业，特别是核电站的发展，水体的放射性日益增高。污染水体的最危险放射性物质有锶—90，铯—137等。这些物质经水和食物进入人体后，能在一定部位积累，增加对人体的放射性辐照，可引起遗传变异或癌症。

⑨ 病原微生物　主要来自生活污水和医院废水、制革、屠宰、洗毛等工业废水等。病原微生物有病菌、病毒和寄生虫。

⑩ 其他

三、大气污染及其污染物

1．大气污染

大气或空气是多种气体的混合物，就其组成可以分为恒定的、可变的和不定的三种组分。其中氮、氧、氩三者共占空气总体积的99.97%，加上微量的氖、氦、氪、氙、氡等稀有气体，就是空气中的恒定组分，这一组分的比例，在地球表面上任何地方几乎

正常（干燥）空气的气体成分　　表1－1

气　体	浓度（PPm）*	气　体	浓度（PPm）*
氮	780，900		1.0
氧	209，400	一氧化氮	0.5
氩	9，300	氢	0.5
二氧化碳	315	氙	0.08
氖	18	二氧化氮	0.02
氦	5.2	臭　氧	0.01～0.04
氪	1.0～1.5		

* 指体积百万分率

是可以看作不变的。可变的组分系指空气中二氧化碳和水蒸汽，这组分在空气中的含量是随季节和气象的变化以及人们的生产和生活活动的影响而发生变化的。含有上述恒定组分和可变组分的空气，我们认为是纯洁净的空气。表 1－1 列出正常情况下，干燥空气（大气）的组成情况。

大气中不定组分的来源有二：①自然界暂时性的灾难所引起的，由此形成的污染物有尘埃、硫、硫化氢、硫氧化物、氮氧化物、盐类及恶臭气体。一般说来，这些不定组分进入大气中，可造成局部和暂时性的污染。②由于人类社会发展的人为因素，使得大气增加或增多了某些不定组分，如煤烟、尘、硫氧化物、氮氧化物等，这是空气中不定组分的最主要来源，也是造成空气污染的主要根源。

人类在生活和从事各种生产活动时，将某些有毒害物质和能量带入环境，当其超过环境所能允许的极限时，会使大气的质量发生恶化，对人们的生活、工作，人体健康和精神状态、建筑物及设备财产等方面直接地或间接地产生恶劣影响，这种现象称为大气（空气）污染。

2．大气污染源

① 燃料的燃烧　例如火力发电厂，工业和民用炉窑的燃料燃烧。在我国，这方面排放的污染物约占总污染物的 70％以上，其中煤碳燃烧产生的占 95％以上。所以煤的直接燃烧所排放的烟尘是我国大气污染的主要特征。

② 工业生产　各种类型的工矿企业的生产过程中产生的污染物，约占总污染物的 20％。

以上两种污染源的设备是固定不动的，所以也称为固定污染源。

③ 交通运输　是指各类交通工具所排出的污染物。我国车辆虽然不多，但车辆利用率高，排污量大，约占总污染物的 10％，由于交通运输污染源是流动的，也称为流动污染源。

3．大气污染物

大气污染物的种类繁多，按其存在的状态可分为两类：

① 气溶胶污染物　指悬浮于气态介质中的固体或液体粒子所组成的空气分散系统。包括粉尘、烟和雾，气溶胶污染物，当粒径大于 10μm 时，由于本身重力作用，迅速沉降于地面，称为降尘。粒径小于 10μm 时，能在大气中长期飘浮，称为飘尘。烟尘的化学性质是对人体危害的主要因素。有毒金属粉尘和非金属粉尘进入人体后，会引起中毒性死亡。无毒粉尘对人体也有危害。

② 气体状态污染物　目前受人们关注的有害气体是：硫氧化物（SO_X）、氮氧化物（NO_X）、碳氧化物（CO_X）、臭氧（O_3）、碳氢化合物（C_nH_m）等。

硫氧化物主要指 SO_2 和 SO_3，大多来源于燃烧和冶炼过程，若烟尘中含有 M_nO、F_eO 等金属氧化物时，SO_2 会更多地催化转为 SO_3，它与大气中水蒸结合在一起，便形成硫酸烟雾。后者的毒性比 SO_2 大 10 倍。

氮氧化物主要指 NO 和 NO_2，大多来源于燃烧过程，NO 经过一系列化学反应后，

形成十分有毒的物质。当NO_2与其它污染物共存时，如与SO_2、O_3进行光化学反应时，其毒性更大。

臭氧是强氧化剂，它和原子氧O、O_2、NO等一起能与空气中各种碳氢化合物进行一系列复杂的光化学反应，在太阳光照射下产生浅兰色烟雾，称为光化学烟雾。

碳氧化物是指CO和CO_2，燃料在空气不足时燃烧产生CO，CO与血红蛋白的结合能力比氧大200倍，当浓度高时，会引起煤气中毒。

碳氢化合物主要指烷烃、烯烃和芳烃，苯及其同系物是一种常见的污染物。多环芳烃则是毒性更强的污染物。

4．一次污染物和二次污染物

上述几种比较重要的污染物，排放到大气中以后，与正常空气成分相混合，在一定条件下会发生各种物理和化学变化，并可能生成一些新的污染物。大气中的污染物可分为一次污染物和二次污染物两类。一次污染物是指从各类污染源排出的物质。一次污染物又可分为非反应性污染物和反应性污染物。非反应性污染物性质比较稳定，它不发生化学反应，或者反应速度很慢。反应性污染物性质不稳定，在大气中常与某些其它物质产生化学反应，或者作为催化剂促使其它污染物发生化学反应。反应结果所生成的一系列新的污染物，称为二次污染物。例如，二次污染物硫酸酸雾（又称硫酸气溶胶）是通过下述变化过程而形成的：

$$SO_2 \xrightarrow[\text{光化学氧化}]{\text{催化或}} SO_3 \xrightarrow{H_2O} H_2SO_4 \xrightarrow{H_2O} (H_2SO_4)_m(H_2O)_n$$

生成物$(H_2SO_4)_m(H_2O)_n$就是气溶胶核，它继续吸附大量的SO_2、SO_3、H_2SO_4、H_2O，长成较大的粒子，这些小微粒分散在空气中，即形成硫酸气溶胶。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第二章　流体流动的基本知识

在控制水体污染与大气污染的研究中，十分需要流体流动的知识作为基础，也需要传热，传质方面的基本知识。本章着重介绍流体流动的基本知识，而传热、传质方面则将在以后的有关章节中加以介绍。

第一节　流体静力学基本方程式

流体静力学是研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系，而这些力的大小是与流体的密度、压强等性质有关。

一、流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度，ρ〔$kg \cdot m^{-3}$〕*。不同单位制，密度的单位和数值都不同。

气体是可压缩的流体，其密度随压强和温度而变化。因此气体的密度必须标明其状态。当压强不太高、温度不太低时，可按理想气体处理。某状态下理想气体的密度可按下式计算：

$$\rho = \frac{PM}{RT}$$

或

$$\rho = \frac{MT_0 P}{22.4 T P_0}$$

式中P为气体的绝对压强〔$KN \cdot m^{-2}$〕；V为气体体积〔m^3〕；T为气体热力学温度；M为气体分子的摩尔质量；R为气体常数〔$8.315\ kJ \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$〕；下标"0"表示标准状态。

对于液体混合物，各组分的浓度常用质量分率表示。现以1〔kg〕混合液体为基准，若各组分在混合前后其体积不变，则1〔kg〕混合物的体积等于各组分单独存在时的体积之和，即：

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{X_{WA}}{\rho_A} + \frac{X_{WB}}{\rho_B} + \cdots\cdots + \frac{X_{Wn}}{\rho_n}$$

式中：ρ_A、ρ_B …ρ_n 为液体混合物中各纯组分的密度〔$kg \cdot m^{-3}$〕，X_{WA}、X_{WB} ……

* 纯水在277K时比重为1，它的密度以国际制单位表示时为1000〔$kg \cdot m^{-3}$〕，所以任一流体物料的密度在数值上等于它的比重的1000倍。

X_{Wn} 为液体混合物中各组分的质量分率。

对于气体混合物，各组分的浓度常用体积分率表示。现以 *1*〔m^3〕混合气体为基准，若各组分在混合前后其质量不变，则 *1*〔m^3〕混合气体的质量等于各组分的质量之和，即：

$$\rho_m = \rho_A X_{VA} + \rho_B X_{VB} + \cdots\cdots + \rho_n X_{Vn}$$

式中：X_{VA} 、X_{VB} $\cdots X_{Vn}$ 为气体混合物中各组分的体积分率。

气体混合物中平均密度 ρ_m 也可按下两式计算。

$$\rho_m = \frac{P M_m}{R T}$$

或

$$\rho_m = \frac{M_m T_0 P}{22.4 T P_0}$$

式中：M_m 为气体混合物的平均摩尔质量。

$$M_m = M_A Y_A + M_B Y_B + \cdots\cdots + M_n Y_n$$

式中：M_A 、M_B $\cdots\cdots M_n$ 为气体混合物中各组分的摩尔质量；Y_A 、Y_B $\cdots Y_n$ 为气体混合物中各组分的摩尔分率。

二、流体的静压强

流体垂直作用于单位面积上的压力，称为流体的静压强，简称压强。在 SI 中，压强的单位是〔$N \cdot m^{-2}$〕，称为帕斯卡，以〔P_a〕表示。流体的压强可用不同的单位来计量，可以用不同的方法来表示，以绝对零压作起点计算的压强，称为绝对压强，是流体的真实压强，流体的压强可用测压仪表来测量。当被测流体的绝对压强大于外界大气压强时，所用的测压仪表称为压强表。压强表上的读数表示被测流体的绝对压强比大气压强高出的数值，称为表压强，即

表压强 = 绝对压强 − 大气压强

三、流体静力学基本方程式

现讨论流体在重力和压力作用下的平衡规律，这时流体处于相对静止状态。由于重力可以看作是不变的，起变化的是压力。以图 *2 − 1* 所示的容器中盛有密度为 ρ 的静止液体为例，于液体内部任意划出一底面积为 A 的垂直液柱，若以容器底为基准水平面，则液柱的上、下底面与基准水平面的垂直距离分别为 Z_1 和 Z_2，在垂直方向上作用于液柱上的力有：

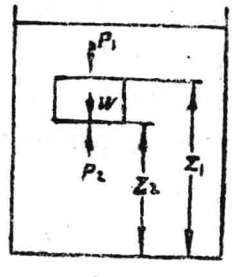


图 *2 − 1* 流体静力学基本方程式的推导

① 作用于上底面的力 P_1 ；

② 作用于下底面的力 P_2 ；

③ 作用于整个液柱的重力 $W = \rho g A(Z_1 - Z_2)$

由于流体静压力的方向总是和作用面相垂直且指向该作用面，所以 P_1 的方向必然是垂直向下，P_2 是垂直向上，而重力的方向自然是垂直向下。取向上的作用力为正值。

液柱处于静止状态时，在垂直方向上各力的代数和应为零，即：

$$P_2 - P_1 - \rho g A(Z_1 - Z_2) = 0$$

把上式各项除以A，又据压强定义：

$$\frac{P_1}{A} = P_1 \qquad 及 \qquad \frac{P_2}{A} = P_2$$

于是上式便整理为：$P_2 = P_1 + \rho g(Z_1 - Z_2)$

为讨论方便，将液柱的上底面取在容器的液面上，设液面上方的压强为P_0，下底面取在距液面任意距离h处，作用于其上的压强为P 则

$P_1 = P_0$　　$P_2 = P$，　$Z_1 - Z_2 = h$，因此得

$$P = P_0 + \rho g h$$

这就是流体静力学基本方程式，说明在重力作用下，静止液体内部压强的变化规律。由此可见：①当容器液面上方的压强P_0一定时，静止液体内部任一点压强P的大小与液体本身的密度ρ和该点距液面的深度h有关。在静止的，连续的同一液体内，处于同一平面上各点的压强都相等。

②当液面上方的压强P_0改变时，液体内部各点的压强P也发生同样大小的改变。

③由$\frac{P - P_0}{\rho g} = h$，说明压强差大小可以用一定高度的液柱来表示。由此可以引伸出压强的大小也可用一定高度的液柱表示。

第二节　流体在管内的流动

一、流量与流速

单位时间内流过管道任一截面的流体量，称为流量，若流量用体积来计量，则称为体积流量，以V_s表示，单位为〔$m^3 \cdot s^{-1}$〕。若流量用质量来计量，则称为质量流量，以W_s表示，单位为〔$kg \cdot s^{-1}$〕体积流量和质量流量的关系式为：

$$W_s = V_s \cdot \rho$$

单位时间内流体在流动方向上所流过的距离，称为流速，以u表示，单位为〔$m \cdot s^{-1}$〕。实验证明，流体流经管道任一截面上各点的流速沿管径而变化，即在管截面中心处为最大，越靠近管壁流速越小，在管壁处的流速为零。流体在管截面上的速度分布规律较复杂，在工程计算上为方便起见，流体流速通常是指整个管截面上的平均流速，其表达式为：

$$u = V_s / A$$

式中：A为与流动方向垂直的管道截面积〔m^2〕。

由于气体的体积流量随温度和压强而变化，显然气体的流速也随之而变。因此，采用质量流速较为方便。质量流速的定义是单位时间内流体流过管道单位截面积的质量，也称为质量通量，以G表示，单位为〔$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$〕。

$$G=\frac{W_s}{A}=\frac{V_s\rho}{A}=u\rho$$

一般管道的截面均为圆形，若以d表示管道的内径，输送流体的管路直径，可由流量和流速算出：

$$u=\frac{V_s}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

$$d=\sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}}$$

流量一般为生产任务所决定，所以关键在于选择合适的流速，若流速选得太大，管径虽然可以减少，但流体流过管道的阻力增大，消耗的动力就大，操作费随之增加。反之，流速选得太小，操作费可以相应减小，但管径增大，管路的基建费随之增加。所以当流体以大流量在长距离的管路中输送时，需根据具体情况在操作费与基建费之间通过经济权衡来确定适宜的流速。车间内部的工艺管线，通常较短，管内流速可选用经验数据，某些流体在管道中的常用流速范围列于表2－1中。

某些流体在管道中的常用流速范围　　表2－1

流体的类别及情况	流速范围，〔m·s^{-1}〕
自来水（3 atm左右）	1～1.5
水及低粘度液体（1～10 atm）	1.5～3.0
高粘度液体	0.5～1.0
工业供水（8 atm以下）	1.5～3.0
锅炉供水（8 atm以下）	＞3.0
饱和蒸汽	20～40
过热蒸汽	30～50
蛇管、螺旋管内的冷却水	＜1.0
低压空气	12～15
高压空气	15～25
一般气体（常压）	10～20
鼓风机吸入管	10～15
鼓风机排出管	15～20
离心泵吸入管（水一类液体）	1.5～2.0
离心泵排出管（水一类液体）	2.5～3.0
往复泵吸入管（水一类液体）	0.75～1.0
往复泵排出管（水一类液体）	1.0～2.0
液体自流速度（冷凝水等）	0.5
真空操作下气体流速	＜10

二、稳定流动与不稳定流动

流体流动的系统中，若任一截面上流体的性质（如密度、粘度等）和流动参数（如流速、压强等）不随时间而变，则此流动称为稳定流动。若流动过程中任一截面上的这些物理量随时间而改变，则这种流动属于不稳定流动。

如图 2－2所示，水箱 3上部不断地有水从进水管 1注入，而从下部排水管 4不断地排出，且在单位时间内，进水量总是大于排水量，多余的水由水箱上方溢流管 2溢出，以维持箱内水位恒定不变。若在流动系统中，任意取两个截面 1－1′及 2－2′，经测定发现，该两截面上的流速和压强虽然不相等，即 $u_1 \neq u_2$ 和 $P_1 \neq P_2$，但每一截面上的流速和压强并不随时间而变化，这种流动情况属于稳定流动。若将图中进水管的阀门关闭，箱内的水仍由排水管不断排出，由于箱内无水补充，则水位逐渐下降，各截面上的流速与压强也随之而降低，此时各截面上水的流速与压强不但随位置而变，还随时间而改变，这种流动情况，属于不稳定流动。

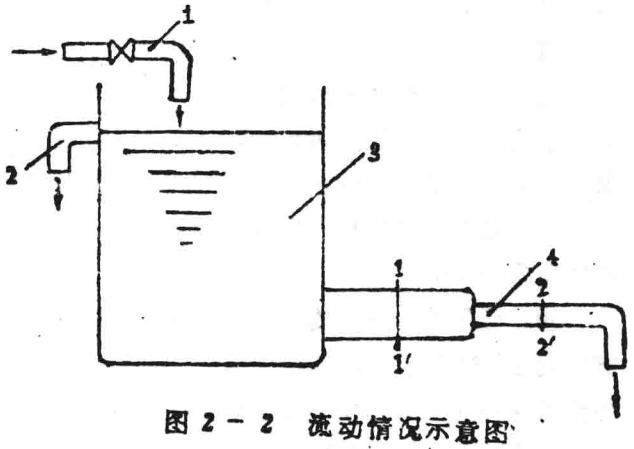


图 2－2　流动情况示意图

1－进水管　2－溢流管　3－水箱　4－排水管

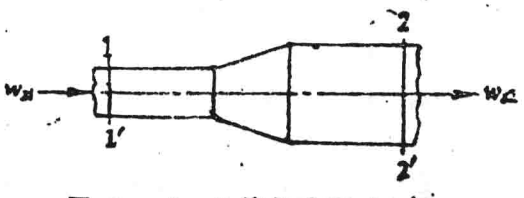


图 2－3　连续性方程式的推导

三、连续性方程式

当流体充满导管作稳定流动时，根据质量守恒定律，在导管系统没有吸入或泄失的情况下，单位时间通过导管各截面的流体质量应相等，即如图 2－3所示。

$$W_{s1} = W_{s2}$$

因为 $W_s = uA\rho$，故上式可写成：

$$W_s = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2$$

若上式推广到管路上任何一个截面，即：

$$W_s = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = uA\rho = 常数$$

此式表示在稳定流动系统中，流体流经各截面的质量流量不变，而流速 u随管道截面积 A及流体的密度 ρ而变化。

若流体可视为不可压缩的流体，即 ρ＝常数，上式可改写为：

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = uA = 常数$$

此式表明不可压缩流体不仅流经各截面的质量流量相等，它们的体积流量也相等。

以上两式称为管内稳定流动的连续性方程式。它反映了在稳定流动系统中，流量一定时，管路各截面上流速的变化规律。

四、柏努利方程式

流体得以流动的必要条件是系统两端有压强差或位差，如高位槽的水输出时，部分位能转化为动能而使水流动。又如位置低的液体经泵输入能量后才能向高处排出。因此，流体流动过程实质上是能量的转化过程。

流体本身所具有的机械能量有以下三种形式：

① 位能　是指流体因和所选的基准面有一定距离，由于重力作用而具有的能量。距基准面Z高处质量为m的流体所具有的位能为 mgZ 等于将m流体提高到Z所需的能量，换言之，该流体因处于Z高度而能向基准面作功，向基准面作功的数量为 mgZ 。

② 动能　流体以一定的速度运动时，便具有一定的动能，质量为m的流体所具有的动能为 $\frac{1}{2}mu^2$ 。

③ 静压能（压强能）　静止流体内部任一处都有一定的静压强，流动着的流体内部任何位置也都有一定的静压强。如果在内部有液体流动的管壁上开孔，并与一根垂直的玻璃管相接，液体便会在玻璃管内上升，上升的液柱高度便是运动着流体在该截面处的静压强的表[illegible]于是通过该截面的流体必定要带着与所需的功相当的能量进入系统。流体所具有的这种能量称静压能或流动功。设质量为m，体积为V的流体通过该截面，把该流体推进此截面所需要的作用力为 $P \cdot A$，而流体通过此截面所走的距离为 V/A，则流体带入系统的静压能为 PV，m流体的体积为 m/ρ，在P压强下，它所具有的静压能 mP/ρ。

流体流动过程中，流体所具有的能量在不同形式间相互转化。

以图 2－4 为例，在 1、2 两截面，质量为m的理想流体* 所具有的机械能E为当时条件下该流体的位能、动能和静压能的总和，即

$$E_1 = mgZ_1 + \frac{1}{2}mu_1^2 + m\frac{P_1}{\rho}$$

$$E_2 = mgZ_2 + \frac{1}{2}mu_2^2 + m\frac{P_2}{\rho}$$

1、2两截面间没有外界能量输入，流体也没有向外界作功，根据能量守恒定律，得：

$E_1 = E_2$ ，两边除以m，得：

$$gZ_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + \frac{P_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \frac{P_2}{\rho}$$

此式为理想流体流动的能量衡算方程式，称为柏努利方程式，也称流体动力学方程式。

柏努利方程式表示理想流体在管道内作

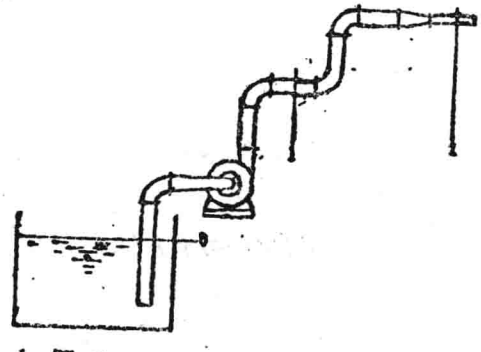


图 2－4　流体流动的能量衡算

* 若流体流动时不产生流动阻力，则流体的能量损失为零，这种流体称为理想流体，实际上并不存在真正的理想流体，而是一种设想。

需要全本请访问 www.ertongbook.com