

SPT 高等院校选用教材

工科类

化工原理 (上册)

朱家骅 叶世超 夏素兰 等 编

科学出版社

高等院校选用教材

化工原理

(上册)

朱家骅 叶世超 夏素兰等 编

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书是四川大学化工原理教研室在总结多年教学经验与资料积累的基础上,吸取多次全国“面向 21 世纪化工类人才培养方案及课程体系改革”教材建设研讨会的精神,按“厚基础、宽专业”的原则编写的。本书内容包括“传递过程理论基础”和“化工单元操作”两部分。以较少的篇幅简明扼要地阐述了传递过程的物理本质、主要规律及其表达方式。在此基础上,系统介绍各类化工单元操作的原理、特点和过程与设备的计算。本书力图体现基本理论与工程实践相结合的观点与方法。本书分上、下两册出版。上册除绪论和附录外,还有流体中的传递现象、传递过程基本方程、流体输送与流体输送机械、颗粒-流体两相流动、颗粒-流体非均相物系分离、搅拌、传热、蒸发等八章。每章末附精选的习题与思考题。

本书可作为大学本科化工及相关专业的教材,也可供相关领域科研与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理(上册)/朱家骅等编.-北京:科学出版社,2001

(高等院校选用教材)

ISBN 7-03-009411-5

I. 化… II. 朱… III. 化工原理-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 037724 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年8月第一版 开本:720×1000 1/16

2001年8月第一次印刷 印张:26

印数:1—5 000 字数:496 000

定价:32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

前 言

编写本教材之时,正值世纪交替之际,“高科技时代”已成为新世纪的代名词,化工领域正在发生深刻的变化,“化工原理”作为大学本科基础课程也面临着新的挑战。

“化工原理”的问世曾被称作是世界化学工程发展史上的一块里程碑,一个世纪以来一直是世界各国大学本科化工学科的主修课程,是学生奠定工程基础的重要教学环节。“化工原理”具有理论与实践并重的特点,而且直接反映科技进步对化工技术发展的影响。国际化工界知名学者、美国普林斯顿大学 James Wei 教授在纵观化工高等教育百年历史、展望未来发展方向的专论中指出,化学工程学科与生物、材料、能源、环境等领域交叉,其工程基础学科的重要性必将有进一步的发挥;大学要相应加强知识核心(intellectual core)课程如流体力学、传递过程和热力学、反应工程等的教学,并且要加强在相关课程中的应用。我国化工界针对培养面向 21 世纪的化工人才,在教育部支持下组织了多次全国范围的化工高等教育新模式、新体系、新教材专题研讨会,提出“厚基础、宽专业、重创新能力培养”方针。可见,注重基础理论、拓宽应用领域、加强工程实践是国际国内化工高等教育界为培养迎接 21 世纪挑战的化工类人才的共识。

本教材的编写力图体现上述教育思想。尝试以“传递过程”理论基础为开篇,以有限的篇幅和授课学时突出化工过程的物理本质和工程分析方法,注重融会贯通、举一反三;避免艰深的数学内容而力求不失“动量传递、热量传递、质量传递”基本理论体系的完整性。以此来加强“化工原理”的理论基础,进入“单元操作”教学阶段时学生应具有更大的主动性和过程分析的能力。“单元操作”各章仍保持国内大部分“化工原理”教材所采用的结构,但各章节涉及的原理性内容不再分别阐述,而直接从已经学习过的传递过程有关章节中引用。如此既可巩固理论基础,又便于使“单元操作”更加突出过程特征及应用特点。可望使学生在学习“化工原理”的过程中对化工技术发展有更深入的认识和更大的展望空间,有利于激发其创新思维。

本教材将原来分属两门课程的“传递过程”和“单元操作”的内容以新的体系合二为一,但计划中总的教学时数有所减少。毋庸讳言,教与学两个方面的难度都有所增加,但期望学生从中获得更为坚实的“化工原理”理论基础和工程分析的能力,有利于创新能力的发展。

本书上册由朱家骅统稿,下册由叶世超统稿。四川大学将本书列为重点教材建设给予资助。本书的编写汲取了我校化工原理教研室编写、张洪沅先生主审并数度修订再版的《化工原理》教材的精华并广泛参考了国内外现行多种版本的同类教材,还与化工原理教研室同事们多次讨论、集思广益,编者在此一并致谢。

特别要感谢马克承教授细致地审读全书,他以多年化工原理教学中积累的渊博学识和丰富经验提出了许多宝贵的修改意见而使本书增色不少。

由于编者学识和经验所限,疏漏之处在所难免,恳望使用这本新教材的师生不吝赐教,将教与学的宝贵经验、心得体会和对本书的指正意见馈寄编者或科学出版社,以作为本书再版时的重要参考资料。

编者

2001年5月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 流体中的传递现象	5
1.1 流体与流体流动的基本概念	5
1.1.1 固体、液体和气体	5
1.1.2 连续介质假定	6
1.1.3 流体的受力	6
1.1.4 流动体系与流型	7
1.1.5 流动边界层	9
1.2 扩散现象与扩散定律	11
1.2.1 扩散现象与现象方程	11
1.2.2 动量扩散与牛顿黏性定律	11
1.2.3 热量扩散与傅里叶热传导定律	14
1.2.4 质量扩散与菲克定律	15
1.3 流场及其数学表达	16
1.3.1 流场的一般概念	16
1.3.2 随体导数与梯度	17
第二章 传递过程基本方程	20
2.1 衡算体系	20
2.2 质量守恒与连续性方程	21
2.2.1 质量守恒定律	21
2.2.2 连续性方程	22
2.3 动量守恒与流体运动微分方程	24
2.3.1 动量守恒定律	24
2.3.2 流体运动微分方程	26
2.3.3 流体运动微分方程的应用	30
2.4 能量守恒与传热微分方程	48
2.4.1 能量守恒定律	48
2.4.2 能量微分方程	49
2.4.3 传热微分方程的应用	53

2.5	多组分体系的质量守恒与传质微分方程	64
2.5.1	传质微分方程	65
2.5.2	传质微分方程的应用	68
2.6	扩散系数	79
2.6.1	分子质量扩散系数	79
2.6.2	涡流扩散系数	84
第三章	流体输送与流体输送机械	93
3.1	流体输送管路计算的基本方程	93
3.1.1	基本方程	93
3.1.2	管路计算的一般原则	94
3.2	管路阻力损失	97
3.2.1	直管阻力损失计算	97
3.2.2	局部阻力损失计算	99
3.3	流体输送管路计算	106
3.3.1	简单管路计算	106
3.3.2	并联管路计算	106
3.3.3	分支管路计算	107
3.3.4	可压缩流体的管路计算	114
3.3.5	非牛顿流体流动与阻力计算	117
3.3.6	管路特性曲线	119
3.4	流速与流量的测量	120
3.4.1	测速管	121
3.4.2	孔板流量计与文丘里流量计	122
3.4.3	转子流量计	124
3.5	流体输送机械	127
3.5.1	离心泵	127
3.5.2	往复泵	143
3.5.3	其他化工用泵	146
3.5.4	气体输送机械	148
第四章	颗粒-流体两相流动	168
4.1	流体与颗粒的相对运动	168
4.1.1	曳力与曳力系数	168
4.1.2	自由沉降与沉降速度	172
4.1.3	非球形颗粒的几何特征与曳力系数	174

4.2 流体通过固定床的流动	175
4.2.1 颗粒床层的几何特性	175
4.2.2 流体通过固定床的压降	180
4.3 固体颗粒流态化	183
4.3.1 流态化过程及流化床操作范围	184
4.3.2 流化床主要特性及流化类型	187
4.3.3 流化床床层高度及分离高度	190
4.4 气力输送	191
4.4.1 气力输送颗粒-流体两相流流动特性与流型图	192
4.4.2 气流输送管内两相流动压降的理论分析与计算	195
4.4.3 气力输送的类型及装置	198
第五章 颗粒-流体非均相物系分离	205
5.1 过 滤	205
5.1.1 过滤操作的基本概念	205
5.1.2 过滤设备	207
5.1.3 过滤计算	212
5.1.4 过滤机的生产能力	220
5.2 沉 降	224
5.2.1 重力沉降	224
5.2.2 离心沉降	229
5.2.3 电沉降	239
第六章 搅 拌	245
6.1 搅拌装置	245
6.1.1 常见搅拌器类型	245
6.1.2 挡板、导流筒	248
6.1.3 搅拌槽内流体的流动状态	250
6.2 混合机理	250
6.2.1 均相物系的混合机理	251
6.2.2 非均相物系的混合机理	251
6.2.3 搅拌混合效果	252
6.3 搅拌功率	253
6.3.1 搅拌槽内叶轮的泵出流量、压头及功率	253
6.3.2 功率关联式及功率曲线	254
6.4 搅拌装置的设计	258

第七章 传热	263
7.1 概述	263
7.1.1 化工生产的传热问题	263
7.1.2 典型的换热设备	263
7.2 传热过程的计算	266
7.2.1 传热负荷	266
7.2.2 传热温差	268
7.2.3 总传热系数	274
7.2.4 污垢热阻	277
7.2.5 换热器计算的变量分析	279
7.2.6 设计型计算	279
7.2.7 校核型计算	280
7.2.8 换热器调节	280
7.2.9 传热单元数法	283
7.3 固体中的热传导	287
7.3.1 平壁的热传导	287
7.3.2 圆筒壁的热传导	289
7.4 对流给热系数的实验关系式	290
7.4.1 概述	290
7.4.2 对流传热过程的分类及准数关联	291
7.4.3 流体无相变的给热系数	293
7.4.4 有相变的传热过程	299
7.5 辐射传热	307
7.5.1 基本概念	307
7.5.2 基本定律	308
7.5.3 两固体间的辐射传热	311
7.5.4 高温设备的热损失	312
7.6 壁温的估算	312
7.7 传热的强化与削弱	313
7.7.1 传热强化	313
7.7.2 保温隔热技术	315
7.8 换热器	316
7.8.1 间壁式换热器的类型和结构型式	317
7.8.2 列管式换热器的选用和设计	320

7.8.3 其他类型的换热器	327
第八章 蒸 发	337
8.1 蒸发过程的基本概念	337
8.2 蒸发设备	338
8.2.1 蒸发器的结构及特点	338
8.2.2 除沫器、冷凝器和真空装置	344
8.3 单效蒸发	345
8.3.1 物料衡算和热量衡算	346
8.3.2 溶液的沸点及温度差损失	350
8.3.3 蒸发器的生产能力和生产强度	354
8.3.4 管内沸腾给热系数关联式	354
8.4 多效蒸发	356
8.4.1 多效蒸发流程	357
8.4.2 多效蒸发计算	359
8.5 蒸发的其他问题	367
8.5.1 多效蒸发和单效蒸发的比较	367
8.5.2 降低蒸汽耗用量的措施	369
附录	373
附录一 常用物理量单位和因次	373
附录二 SI制与其他单位制的换算关系	373
附录三 某些液体的重要物理性质	374
附录四 某些气体的重要物理性质	375
附录五 水的物理性质	376
附录六 干空气的物理性质	377
附录七 I 饱和水蒸气表(按温度排列)	377
II 饱和水蒸气表(按压强排列)	379
附录八 有机液体相对密度共线图	381
附录九 液体黏度共线图	383
附录十 气体黏度共线图	385
附录十一 气体比热共线图	386
附录十二 液体比热共线图	388
附录十三 液体汽化潜热共线图	390
附录十四 某些液体的表面张力及常压下的沸点	391
附录十五 某些气体和蒸汽的导热系数	392

附录十六	某些液体的导热系数·····	393
附录十七	某些固体材料的导热系数·····	394
附录十八	无机水溶液在大气压下的沸点·····	395
附录十九	常用固体材料的密度和比热容·····	396
附录二十	壁面污垢的热阻($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) ·····	396
附录二十一	管子规格(摘录) ·····	397
附录二十二	国内常用筛筛目·····	398
附录二十三	基本常数与单位·····	398
附录二十四	泵规格(摘录) ·····	399
附录二十五	9-19型离心通风机规格(摘录) ·····	401
附录二十六	管壳式热交换器系列标准(摘录) ·····	403

绪 论

1. “化工原理”课程的任务

以化学工业为代表，通过大规模改变物质的化学性质而获得产品的各种加工工业，其共同的特点是必须使加工对象在分子、原子层次上发生化学反应从而转变为新物质。实际的加工体系与生产方法千变万化，但需要解决的共同问题总是有两个方面。一方面：在什么条件下所期望的化学反应才能发生？反应的速率将会是多大？不期望的反应（副反应）速率又会多大？另一方面：通过什么样的工程方法和设备来实现其工艺过程？如反应物如何供给、产物又如何分离？如何提供反应所需的热量、如何使用反应放出的热量？怎样才能从工业规模生产中获得最佳的经济效益？概括地说化学工程学科的基本任务就是要解决这两个方面的问题，前者的主要理论基础是热力学和反应工程，后者即是“化工原理”课程主要的学习和研究内容。

化工生产工艺中，除了化学反应核心环节而外，要使加工对象（反应物，气体、液体、固体）达到规定的形态、相态、纯度、温度、压力并以特定的接触方式进行反应，要从反应物与产物混合体系中分离提纯目标产品使之满足往往很苛刻的质量要求，一系列动量传递、质量传递和能量传递的物理加工过程是必不可少的，其重要性并不亚于化学反应本身。工业上，对应每一种化工产品都有一种加工工艺，其化学反应步骤当然是不同的，但应该认识到，许多物理性操作从原理和设备类型上来说是一致的。

以两种重要的无机酸和有机酸的生产工艺为例。图 1 所示为从磷矿石出发的湿法磷酸工艺，其特征性化学反应是磷矿粉与硫酸在带搅拌的反应槽中于 75 ~ 85℃ 的温度下酸解，而从反应前的矿石粉碎、制浆到酸解后的固-液分离、稀酸蒸发浓缩、精制等物理加工过程则与从白薯干出发的柠檬酸生产工艺（图 2）中包含的许多物理加工过程类似。两种工艺从产品到原料都不同，在发酵罐中进行的柠檬酸发酵的生物化学反应与搅拌槽中进行的磷矿粉酸解无机反应完全不一样，就具体的加工对象而言，前者是粮食、菌体、有机酸和有机物结晶体系，后者是矿石、无机酸和无机物结晶体系，性质也不一样。尽管如此，两种工艺所包含的物流输送、混合、加热、冷却、过滤、浓缩等物理过程的操作原理并无本质不同，采用的设备类型也相似。类似的情况在化学工业中普遍存在。

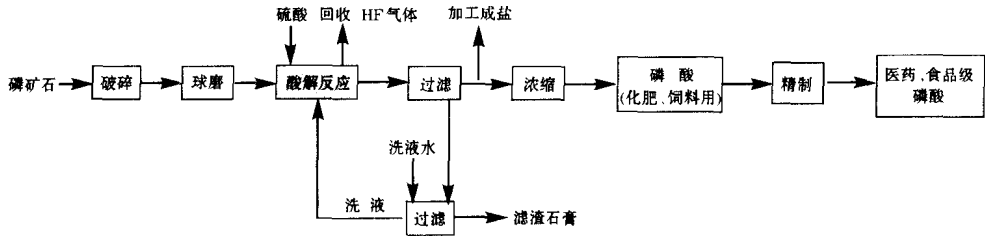


图1 湿法磷酸生产工艺流程

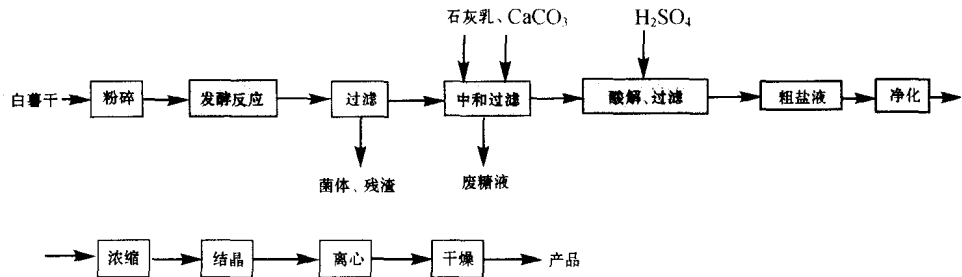


图2 柠檬酸生产工艺流程

“化工原理”把遵循同一基本规律的同类物理加工过程归纳为一种单元操作。若按过程的目的和外部特征来划分，则有：流体输送、过滤、沉降、搅拌、颗粒流态化、气力输送、加热、冷却、蒸发、蒸馏、吸收、吸附、萃取、干燥、结晶等。“化工原理”课程的主要任务就是要研究这些化工单元操作的基本原理，合理地选择和设计各种单元操作过程和设备，通过原理分析和定量计算指出强化过程的途径和提高设备生产能力的措施。从生产系统的角度，不仅希望每一步单元操作过程的速率要高，而且需要使所有过程的速率及每一台设备的生产强度都与系统的生产能力相匹配。这直接关系到生产装置的投资、操作费用、能耗物耗和生产效率，这些都是化工过程开发、工程设计和生产装置运行管理中十分重要的问题。

2. “化工原理”课程的特点

——理论与经验相结合的工程研究方法

“化工原理”将具有共性的物理操作过程归纳成为数不多的若干种单元操作，从而使单元操作在一定程度上具有“通用”的性质，因此在化学工程史上被称为第一块里程碑。经过长期的积累和发展，“化工原理”建立了一套独具特色的工程

研究方法——半经验半理论方法。半经验半理论方法反映了人们对单元操作过程本质的认识方式、认识水平和模型化表达的局限程度的客观实际，自 20 世纪 20 年代以来，在解决化学工程实际问题中一直发挥着重要的作用。采用这套方法（或者说，主要是在相似准则和因次分析的指导下），几乎对每一种单元操作都进行了大量的实验研究，将实验测取的各变量之间的关系表达成无因次准数方程、即经验方程或实验曲线的形式，用以进行设计计算和工程放大，在满足相似准则的前提和实验条件范围内，其可靠程度一般是较高的。这种“唯象”的方法着眼于过程参数的整体变化，而并不究其微观机理，得到的结果带有局限性。因此使用经验方程不可任意推而广之。

随着对单元操作物理本质更深入的认识，人们希望能够从中得出更为一般性的规律来指导实践，由此推动了“传递过程”理论的发展。“传递过程”理论建立在质量守恒、动量守恒、能量守恒三大定律基础上，按单元操作的物理本质将其归纳成为动量传递、热量传递和质量传递三大类传递过程（“三传”），并且以物理学中普遍遵循的“唯象方程”

$$\text{物理量的传输速率} \propto \frac{\text{传输过程的推动力}}{\text{阻力}}$$

来统一描述传递过程机理，从而成为一门以数学模型方法为主的技术基础科学，或可称之为“化工原理的原理”，因而被看作化学工程发展史上的又一块里程碑。“传递过程”理论不仅阐明了、并且从方法论上把单元操作统一到了“三传”的物理内核，各种具体的单元操作则是这三种基本过程的不同方式的组合。图 3 示意地表达了这种关系。

必须认识到，解决工程实际中的复杂问题，与单纯依靠实验一样，单纯依靠从基本规律出发建立的数学模型及其解也是相当有限的。一个有用的数学模型一般只能是抓住并正确刻画过程的物理本质，而对次要影响因素的作用作出合理的假设。因此模型求解结果的正确性必须通过实验或工程实践的检验；或者将不可能考虑周全的因素归结在为数不多的待定模型参数中，通过实验数据回归确定之。“传递过程”理论能够通过数学物理方程和动力学相似准则指明化工过程实验规划的策略、预测过程的结果或进行计算机模拟并且确定推广应用和放大设计的规则。

“化工原理”半理论、半经验的方法特点与以计算机通讯和数据库为基础的当代技术发展正相吻合。越来越多的产品设计、过程开发、流程模拟和自动控制以及信息管理都需要对化工过程模型化、软件化，因此也更加离不开数据库的支撑。理论与经验是一个化工工程技术人员迈向成功的两条腿。

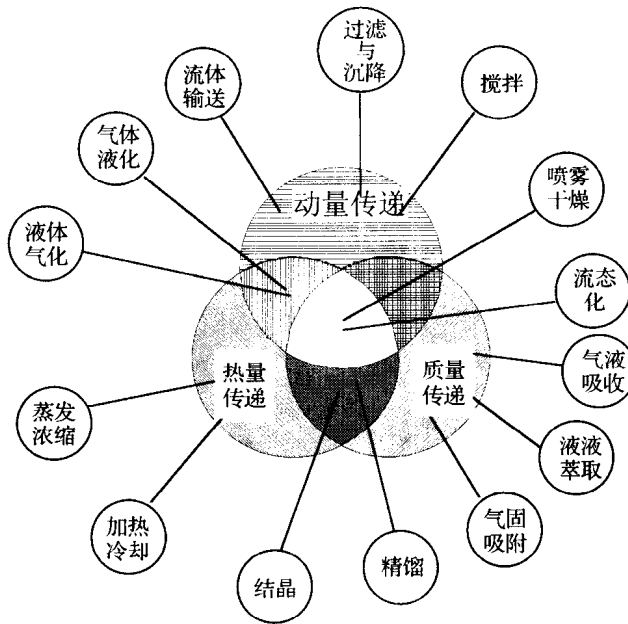


图3 以“三传”为物理内核的单元操作

参考文献

- [1] Howell, J.A., Changing the Culture, A report to the EPSRC on the Strategy and Structure of Chemical Engineering Research in the USA, <http://www.bath.ac.uk/~cesjah/report/html/titlepage2.html>:1999
- [2] Colton, C.K.(ed.), Advances in Chemical Engineering, V16, Perspectives in Chemical Engineering-Research and Education, Academic Press, New York:1991
- [3] McCabe, W.L., Smith, J.C. and Harriott, P., Unit operations of chemical engineering, 6th ed., McGraw-Hill, New York:2001
- [4] Garrett, D.E., Chemical engineering economics, Van Nostrand Reinhold, New York: 1989
- [5] Mowery, D.C. and Rosenberg, N., Paths of innovation : technological change in 20th century America, Cambridge University Press, New York : 1998

第一章 流体中的传递现象

1.1 流体与流体流动的基本概念

流体在生产与科技发展中的作用，有如空气与水对人类生存一样重要。从大气环流到原子分子束，流体在航空、航天、航海，石油、化工、能源、环境、材料、医学和生命科学等几乎现代科学技术的每一个领域、不同的层次上扮演着重要的角色。尤其是化工、石油、制药、生物、食品、轻工、材料等许多生产领域以及环境保护和市政工程等，涉及的对象多为流体。这些工业部门的特征是在流体流动之中进行化学或物理加工，因此有“流程工业”之称。相应把加工流体的机器与设备称之为过程装备。动量传递、热量传递和质量传递是上述领域的共同基础，作为大学相关专业技术基础课的重要内容，称为“传递现象”。

“传递现象”是在多学科交叉的基础上发展起来的一门以流体为对象的工程科学，其任务是研究发生在流体中(或表面、界面上)的动量传递、热量传递和质量传递规律。流体种类繁多，性质各异，因此首先需要对流体的性质进行研究与表征。

1.1.1 固体、液体和气体

人们熟知物质的三种常规聚集状态是气、液、固三态。气态和液态物质合称为流体(包括超临界流体、等离子体等特殊流体)。流体与固体的表观差别是无定形且易于流动、改变压力和温度气体还会表现出明显的体积变化。

外在宏观性质乃由物质内部微观结构和分子间力所决定。构成物质的分子处于永不停息的随机热运动和相互碰撞之中，同时又受着分子间相互作用力的约束。前者给分子以动能使之趋于飞散，后者以势能的作用使之趋于团聚。两者的相对大小决定了物质的气、液、固三态。分子间的距离越大，分子动能的主导地位就越突出。常温常压下的气体，每 1cm^3 体积中约含有 2.7×10^{19} 个分子，分子间的距离约为 $3.3\times 10^{-7}\text{cm}$ (为分子尺度的10倍)。这种情况下分子平均动能远远大于分子间相互作用势能，分子近似作自由的无规则运动，因此气体表现出典型的易流动、可压缩的宏观性质。

当分子彼此靠近到某一个平衡距离时(约为 $1\times 10^{-8}\text{cm}$ ，即分子本身线尺度的量级)，分子间相互作用势能出现一个极值，称为“势阱”，也就是分子的结合能，

其值远远大于分子平均动能。此时分子力占主导地位，分子呈固定排列而成为固体，分子热运动仅呈现为平衡位置附近的振荡。所以固体表现出有一定形状且不易变形的性质。

当分子热运动动能与分子间相互作用势能的竞争势均力敌时物质便呈现液态。液体分子间距离仅比固体稍大(约 1/3 左右)，其分子排列类似于固体中的非晶体，但其分子热振荡的振幅比固体大且平衡位置频繁改变，宏观上即表现为液体易流动但不可压缩的性质。

理想气体中分子运动占绝对优势，是完全无序的模型；理想固体或晶体中分子力占主导地位，是完全有序的模型。这两个模型分别作为气体和固体物性的理论基础都很成熟。液体的情况则介于这两个极端之间，目前通常采取两头逼近的观点看待液体，或视其为非常稠密的实际气体、或视其为热运动非常剧烈的破损晶格，物性理论至今尚不完善。

1.1.2 连续介质假定

流体是由离散的分子构成的，对其物理性质和运动参数的表征是基于大量分子统计平均的宏观物理量。以流体的密度 ρ 为例，其物理意义是流体中空间某点上单位体积的平均质量，即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V_0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1.1)$$

式中 ΔV_0 宏观上要足够小，以反映流体中不同“点”的密度变化，微观上又要足够大，以致包含的分子数量足以代表统计平均性质。这样的 ΔV_0 称为流体质点或微团，其尺度远小于液体所在空间的特征尺度，而又远大于分子平均自由程。因此可以认为流体微团连续布满整个流体空间，从而流体的物理性质和运动参数成为空间连续函数。这就是连续介质假定，实践证明它对绝大多数流体都适用。但是当流动体系的特征尺度与分子平均自由程相当时，例如高真空稀薄气体的流动，连续介质假定受到限制。

1.1.3 流体的受力

处于重力场中的流体，无论运动与否都受到力的作用。流体作为连续介质其受力服从于牛顿力学定律。

场力或体积力 场力或体积力是非接触力。以重力为例，重力场中任何物质都受重力的作用，重力的大小与物质的质量 m 成正比，因此也称为质量力。密度为 ρ 的流体，其质量与体积 V 成正比，故质量力又称体积力。场力的一般表达形式为