

流体力学

[英] J. F. Douglas J. M. Gasiorek J. A. Swaffield 著

汤全明 译 张长高 校



高等教育出版社

035
D17

流体力学

[英] J. F. Douglas J. M. Gasiorek J. A. Swaffield

汤全明 译 张长高 校

430.44

高等教育出版社

(京)112号

本书原版由 J. F. Douglas, J. M. Gasiorek, J. A. Swaffield 合著, 由英国矿工出版有限公司于 1979 年出版。

全书共 6 篇 25 章及附录 1.2。

第 1 篇为流体力学基础, 内容有: 流体及其性质, 压强与水头, 平面上的静水总压力, 浮力, 流体质点与流束运动, 动量方程及其应用, 能量方程及其应用, 二维理想流动。第 2 篇为实际流体流动的特性, 内容有: 有界系统中的层流和紊流, 边界层, 绕物体的不可压缩流动, 绕物体的可压缩流动。第 3 篇为管路及明槽恒定流动, 内容有: 管路及管网恒定不可压缩流动, 管路传输动力, 管路可压缩流动, 明槽均匀流动, 明槽非均匀流动。第 4 篇为有界系统中的非恒定流动内容有: 准恒定流动, 封闭式管路系统中的非恒定流动, 压强瞬态理论, 涌波控制。第五篇为流体机械, 内容有: 涡轮机理论, 涡轮机特性曲线, 管-机系统。第 6 篇, 量纲分析与相似, 内容有: 量纲分析, 相似。

本书取材丰富、严谨, 全书附有例题 114 道, 习题 547 道, 习题类型多样, 有运算题、概念题、推证题、工程实例计算题以及编写程序题。

本书是一本适用于土木工程, 机械工程, 化学工程及建筑设备和环保工程等多学科的教科书, 可供我国工科各专业流体力学课程教学参考, 也可供有关专业科技人员参考。

流体力学

[英] J. F. Douglas J. M. Gasiorek J. A. Swaffield 著

汤全明 译 张长高 校

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 34 字数 770 000

1992 年 5 月第 1 版 1992 年 5 月第 1 次印刷

印数 0001—1 340

ISBN7-04-002533-7/TB·151

定价 17.60 元

序

这是一本适用于各类工程技术人员的教科书。不论读者从事于土木,机械或化学工程,建筑设备或环保工程,流体力学的原理都是相同的。总结我们在所有这些专业教学的共同经验,我们设法简单而又明了地阐述这些原理,并用各种不同工程部门的实例说明其应用。

在本书的编写过程中,我们要感谢其他学院,工艺学校和大学的同事们,使我们有机会研究他们的教学大纲和试卷,这些使我们有可能把学位和职业考试的基本要求包括在内。我们也非常充分地并慎重地论述了本学科的基本方面,这样,本书将能满足那些为攻读国家的高级文凭或技术教育协会的高级文凭或高级证书的要求。

为便于查阅,本书内容分成大体上各自独立的篇,我们希望它们会给在职工程技术人员在他们的日常工作中查询资料提供一些方便。

J. F. Douglas

J. M. Gasiorek

J. A. Swaffield

符号说明

a	加速度, 面积	m	质量, 面积比, 偶极强度
A	面积, 常数	M	克分子重
b	宽, 宽度	n	多变指数值
B	宽, 宽度, 常数	N	旋转速度
c	翼长, 音速	p	压强
c_p	定压比热	P	力, 功率
c_v	定容比热	q	单宽或单位深度的流量
C	常数	Q	体积流量
C_c	收缩系数	r	半径, 径向距离
C_d	流量系数	R	半径, 反作用力
C_d	绕流阻力系数	R	气体常数
C_f	摩擦系数	s	坡度, 距离, 直角坐标内的任意坐标
C_L	升力系数	S	表面, 熵
C_v	流速系数	t	时间
d	直径	T	温度, 转矩
D	(绕流阻力) 直径, 深度	u	速度, 圆周叶片速度
e	自然对数的底	U	内能
e	误差, 单位质量内能	v	速度
E	弹性模量, 能量	V	体积
f	摩擦系数	v_f	流速
$f()$	反射压强波	v_r	相对速度
F	力	v_x	沿 x 方向的速度分量
$F()$	压强波	v_y	沿 y 方向的速度分量
g	重力加速度	v_z	沿 z 方向的速度分量
c	垂直高度	v_r	径向速度
c	水头损失	v_θ	切向速度
H	水头, 单位质量的热含量(焓)	w	容重
i	水力坡度	W	重量
I	惯性矩	x, y, z	直角坐标
k	常数, 回转半径	z	势头, 深度
l	长度	α	角, 角加速度
L	升力	β	角

γ	绝热系数(c_p/c_v)
Γ	环量
δ	差分, 增量
Δ	在……方面变化
e	绝对粗糙度, 涡流粘度
ξ	旋度
η	效率
θ	角
μ	动力粘性系数
ν	运动粘性系数
ρ	质量密度

σ	相对密度(比重), 表面张力
τ	切应力
ϕ	切应变, 角
Φ	流速(度)势
Ψ	流函数
ω	角(旋转)速度
Fr	佛汝德数
Ma	马赫数
Re	雷诺数
Str	斯特罗哈数
We	韦伯数

目 录

序

符号说明.....i

第一篇 流体力学基础

1 流体及其性质.....2	
1.1 流体.....2	
1.2 运动流体中的切应力.....2	
1.3 固体与流体间的区别.....3	
1.4 牛顿流体与非牛顿流体.....3	
1.5 液体与气体.....4	
1.6 物质的分子结构.....5	
1.7 流体的连续介质概念.....6	
1.8 密度.....7	
1.9 粘性.....8	
1.10 气体粘性的起因.....9	
1.11 液体粘性的起因.....9	
1.12 表面张力.....10	
1.13 毛细管作用.....11	
1.14 蒸汽压强.....12	
1.15 气蚀.....12	
1.16 压缩性及体积模量.....13	
1.17 理想气体状态方程.....14	
1.18 普适气体常数.....14	
1.19 气体比热.....14	
1.20 气体膨胀.....15	
2 压强与水头.....17	
2.1 流体静力学.....17	
2.2 压强.....18	
2.3 某点处压强的帕斯卡定律.....18	
2.4 重力作用下流体中压强沿铅垂方 向的变化.....20	
2.5 静止流体中同一水平面上的压强相等.....20	
2.6 静止流体中由重力引起的压强逐 点变化的一般方程.....21	

2.7 等密度流体中压强随高度的变化.....23	
2.8 等温气体中压强随高度的变化.....23	
2.9 绝热条件下气体中压强随高度的变化.....24	
2.10 温度梯度为常量时气体压强和密 度随高度的变化.....25	
2.11 大气中温度和压强的变化.....26	
2.12 大气的稳定性.....28	
2.13 压强与水头.....29	
2.14 静水奇观.....30	
2.15 用测压计量测压强.....31	
2.16 相对平衡.....35	
2.17 受水平加速度作用液体中的压强 分布.....35	
2.18 铅垂加速度的影响.....35	
2.19 相对平衡流体中压强的一般表达式.....36	
2.20 强迫涡.....38	

3 作用于表面上的静水总压力、浮力.....46

3.1 作用于表面上的流体压强.....46	
3.2 均匀压强作用下平面上的总压力及 压力中心.....46	
3.3 淹没于液体中的平面上的总压力及 压力中心.....47	
3.4 压强分布图.....51	
3.5 作用于曲面上的静水总压力.....53	
3.6 浮力.....55	
3.7 浮体的平衡.....56	
3.8 潜体的稳定.....57	
3.9 浮体的稳定.....57	
3.10 定倾中心高度的确定.....58	
3.11 相对于浮心定倾中心位置的确定.....58	
3.12 摆动的周期.....60	
3.13 舱池中装运具有自由面液体的船的 稳定性.....61	

4 流体质点的运动和流束.....70

9.5 普朗特混合长度理论.....	210	12.9 管网的水头平衡法.....	281
9.6 边界层几种厚度的定义.....	212	12.10 管网的流量平衡法.....	284
9.7 对边界层的一般流段动量方程的应用.....	213		
9.8 沿流动方向无压强梯度时平板上 层流边界层的性质.....	214	13 管路传输动力.....	293
9.9 沿流动方向无压强梯度时平板上 紊流边界层的性质.....	218	13.1 管路传输动力.....	293
9.10 表面粗糙度对紊流边界层发展的 影响及表面摩擦系数.....	221	13.2 对给定的管路传输最大动力的条件.....	295
9.11 压强梯度对边界层发展的影响.....	221	13.3 当传输最大动力时管嘴直径与管径 的关系.....	296
10 绕物体的不可压缩流动.....	224	14 管路可压缩流动.....	299
10.1 绕流的分区.....	224	14.1 可压缩流动: 基本方程式.....	299
10.2 绕流阻力.....	225	14.2 不计摩擦无平行边的管道中的恒 定等熵流动.....	299
10.3 绕流阻力系数与相似条件.....	227	14.3 文透里管中的质量流量.....	301
10.4 船舶阻力.....	229	14.4 自容器经孔口或收敛-扩散管嘴的质 量流.....	302
10.5 圆柱绕流.....	231	14.5 自水池经收敛-扩散管或孔口最大 流量的条件.....	303
10.6 圆球绕流.....	235	14.6 拉伐尔管嘴.....	304
10.7 无限翼展的翼型绕流.....	241	14.7 扩散管中的法向冲击波.....	307
10.8 有限翼展的翼型绕流.....	246	14.8 绝热状态下具有摩擦的管道中可 压缩流动: 范诺流动.....	310
11 绕物体的可压缩流动.....	251	14.9 管路中可压缩流体的等温流动.....	314
11.1 压缩性的影响.....	251	15 明槽均匀流动.....	319
11.2 冲击波.....	255	15.1 明槽及管道中有自由面的流动.....	319
11.3 斜冲击波.....	262	15.2 明槽恒定均匀流动阻力公式.....	321
11.4 超声波的膨胀与压缩.....	264	15.3 明槽均匀流动过水断面的最佳形状.....	324
		15.4 在覆盖的渠槽中有自由面流动的最 佳深度.....	327
第三篇 管路与明槽恒定流动		16 明槽非均匀流动.....	331
12 管路及管网的恒定不可压缩流动.....	267	16.1 水流比能与两择一水深.....	331
12.1 概述.....	268	16.2 非矩形明槽中的临界水深.....	333
12.2 管路不可压缩流动.....	269	16.3 无量纲断面比能曲线.....	335
12.3 串联管路不可压缩流动.....	271	16.4 出现临界流动的条件.....	335
12.4 并联管路中的不可压缩流动.....	273	16.5 宽顶堰溢流.....	336
12.5 分支管路中的不可压缩流动: 三水 池问题.....	275		
12.6 串联和并联管路的阻力系数.....	277		
12.7 均匀泄流管路中的不可压缩流动.....	280		
12.8 管网中的不可压缩流动.....	280		

16.6	明槽横向收缩的影响	337
16.7	明槽恒定非均匀流动	339
16.8	渐变流方程	340
16.9	水面曲线的分类	342
16.10	水跃	344
16.11	水跃位置	345

第四篇 有界系统中的非恒定流动

17	准恒定流动	353
18	周界封闭的管路系统中的非恒定流动	357
18.1	刚性液柱理论	358
18.2	调压室与调压井	360
19	压强瞬态理论	366
19.1	说明瞬态传播的微分方程	370
19.2	管路弹性和游离气体对波传播速度的影响	372
19.3	基本压强瞬态方程的简化	376
19.4	施纳特-贝热朗图解法	380
19.5	特征线法	385
19.6	明槽非恒定流动	392
20	涌波控制	399
20.1	泵运转,同时阀门关闭后的涌波控制	400
20.2	泵停转后的涌波控制	404

第五篇 流体机械

21	涡轮机理论	409
21.1	绪言	409
21.2	一维理论	411
21.3	单个叶片和叶栅的研究	417
21.4	偏离欧拉理论与损失	424
21.5	涡轮机可压缩流动	428
22	涡轮机特性曲线	434

22.1	特性曲线的概念	434
22.2	损失与效率	435
22.3	无量纲系数与相似定律	440
22.4	比尺效应	445
22.5	型号数	445
22.6	离心泵与离心风机	447
22.7	轴流泵与轴流风机	450
22.8	混流泵与混流风机	452
22.9	水轮机	452
22.10	冲击式水轮机	454
22.11	法兰西斯式水轮机	457
22.12	轴流式水轮机	460
22.13	液压传动	462

23 管-机系统

23.1	泵与管系	472
23.2	并联泵及串联泵的运行	476
23.3	泵转速和系统的变换	478
23.4	泵尺寸和系统的变换	480
23.5	泵与水轮机中的气蚀	481
23.6	泵的选择	485

第六篇 量纲分析与相似

24	量纲分析	495
24.1	量纲分析	495
24.2	量纲	495
24.3	单位	495
24.4	量纲论证	495
24.5	无量纲量	496
24.6	基本单位与导出单位及基本量纲与导出量纲	496
24.7	微分及积分的量纲	500
24.8	量纲论证用于检查计算	501
24.9	导出量的单位	501
24.10	单位制换算	503
24.11	量纲常数的换算	504
24.12	用指数法进行量纲分析组成关系式	504
24.13	用组合法进行量纲分析	506
24.14	无量纲组的重要性	509
24.15	试验研究中无量纲组的应用	509

25 相似律.....	512	A1.2 水的弹性模量随温度和压强的变化.....	526
25.1 几何相似.....	512	A1.3 大气压强下空气的某些性质随温 度的变化.....	527
25.2 动力相似.....	512	A1.4 常见液体的某些性质.....	527
25.3 无自由面流动的模型研究.....	514	A1.5 常见气体的某些性质 ($p=1$ 大气 压, $T=273\text{K}$).....	527
25.4 雷诺数和马赫数 的相关区.....	516	A1.6 国际标准大气.....	528
25.5 有自由面流动的模型研究.....	516	A1.7 不同温度下纯水中空气的溶解度.....	528
25.6 相似律应用于涡轮机.....	517	A1.8 某些常见流体的绝对粘度.....	528
25.7 河流与港湾模型.....	518	附录 2 各种物体形状的阻力系数 C_D 值.....	529
附录1 常见流体的某些性质.....	526		
A1.1 水的某些性质随温度的变化.....	526		

第一篇 流体力学基础

顾名思义，流体力学是关于液体和气体的静力学和动力学的一门应用力学。流体运动的分析是以应用力学的基本定律为基础的，这些基本定律涉及质量-能量的守恒和力-动量方程以及学生学了固体力学已经熟悉的其他概念和方程。然而，流体力学在两个主要方面与固体力学有区别。首先是流体本身的状态与性质和固体的非常不同，其次，我们处理的不是已知质量的个体或微元，我们经常涉及到的是无始无终的流体连续流束的流动。

另一个问题是要确定流体流束或其中各个质点的精确的运动是非常困难的。所以，为了理论分析的目的，常须假定是理想流体，并简化其条件和流型。这样获得的结果可以引入适当的由实验确定的系数和因子进行修正，为流体系统的设计提供依据。其中理论分析通常是建立变量之间的关系式，而试验研究则修正理论模型中被忽略的因素，并建立定量关系式。

1 流体及其性质

1.1 流 体

在日常生活中,我们认出三种物态:固体、液体和气体。虽然液体和气体在许多方面是不同的,却有一个共同的特性有别于固体:它们是流体,缺乏固体的持久抵抗变形力的能力。流体的流动是在此力的作用下,此力作用多久,变形就持续多久。流体不能保持任何未加支承的形状;流体在自身重量的作用下流动,并取决于与其接触的任何固体的形状。

变形是由切力引起的,即如力 F (图 1.1), 切向作用于它们所作用的表面并引起物质从最初所占的空间 $ABCD$ 变形为 $AB'C'D$ 。这就得出定义:

流体是在切力的作用下连续变形的物质,即使这个切力可能很小。

反之,亦可得出:

若流体处于静止,就没有切力作用,因此,在流体内的所有力必须垂直作用于它们所作用的面。

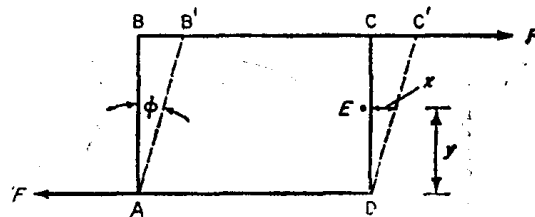


图 1.1 切力引起的变形

1.2 运动流体中的切应力

尽管处于静止的流体中不存在切应力,当流体在运动时,若流体质点之间作相对运动因此它们具有不同的速度,引起流体原来形状的变形,就产生切应力。另一方面,若流体的所有质点有相同的速度,则因流体质点之间处于相对静止,将不产生切应力。

通常,我们涉及流经固体边界的问题。流体与边界接触并附着于边界,因此将具有与边界相同的速度。研究平行边界的各层(图 1.2),逐层的流体速度随着 y 的增大将是变化的。

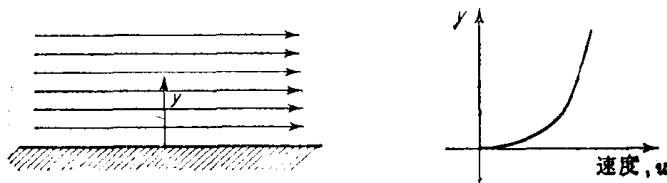


图 1.2 速度随离固体边界距离的变化

若 $ABCD$ (图 1.1) 表示流体中一个微元,垂直于图面的厚度为 S , 则力 F 就作用于面积 $A = BC \times S$ 上。单位面积上的力 F/A 即为切应力 τ , 其变形用角 ϕ (切应变) 表示, 将与切应力成比例。在固体中,对给定的 τ 值 ϕ 是定值, 因为固体能持久地承受切应力。而在流体中,切应变 ϕ

将随着时间而连续增加,于是流体将流动。由试验可知,在真实流体中,剪切变形率(或单位时间内的切应变)与切应力成正比。

设在时间 t 内位于 E 处的质点(图 1.1)运动经过距离 x , 若 E 距 AD 的距离为 y , 则对微小的角度,

$$\text{切应变 } \phi = x/y$$

$$\text{剪切变形率} = x/yt = (x/t)/y = u/y,$$

式中 $u = x/t$ 为质点在 E 处的速度。假定其试验结果为切应力 $\propto$ 切应变, 那么

$$\tau = \text{常数} \times u/y \quad (1.1)$$

u/y 项为速度随 y 的变化, 且可写成微分的形式 du/dy 。称比例常数为流体的动力粘性系数 μ 。代入(1.1),

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.2)$$

式(1.2)即为牛顿粘性定律。 μ 值取决于所研究的流体。

1.3 固体与流体的区别

在作用力的作用下, 固体和流体在反应上的区别概述如下:

(i) 对于固体, 只要不超过其弹性极限, 应变为作用应力的函数。对于流体, 则应变率与作用应力成比例。

(ii) 固体中的应变与力的作用时间无关, 若不超过其弹性极限, 当除去此作用力时, 变形消失。而流体, 只要有力的作用, 就连续流动, 一旦除去此力, 亦不能恢复流体的原来形态。

在多数情况下, 物质是容易区分的, 不是固体就是流体。然而, 某些情况(例如沥青、玻璃)看来好像是固体, 因为在其自重作用下, 其变形率是很小的。沥青实际上为流体, 在其自重的作用下能在表面上流动和延伸开来。但这需要几天才能做到, 而不是千分之几秒! 同样, 当固体承受足够大的力, 在材料内所引起的应力超过其弹性极限时, 固体将塑变为塑性体。在持续荷载作用下, 它们亦将“徐变”, 因此, 变形将随时间而增加。塑性体不符合真实流体的定义, 因为在塑变开始前, 切应力必须超过某一极小值。

1.4 牛顿流体与非牛顿流体

即使是当作流体的物质, 在应力作用下, 反应也是非常不同的。遵循牛顿粘性定律(式 1.2), 且式中的 μ 为常数的称为牛顿流体。大多数常见的流体均属于这一类, 其切应力与速度梯度成直线关系(图 1.3)。不遵循牛顿粘性定律的称为非牛顿流体, 并可归入下列各种之一:

(i) 塑性流体, 在塑变开始前, 其切应力必须达到某一极小值。据此, 切应力随剪切变形率而增加按照关系式

$$\tau = A + B \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

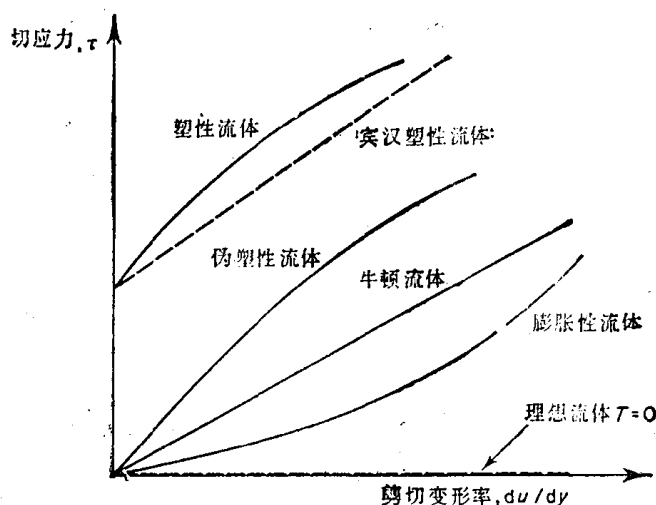


图 1.3 切应力随速度梯度的变化

式中 A, B 和 n 均为常数。若 $n=1$, 则称此流体为宾汉塑性流体(例如污泥)。

(ii) 伪塑性流体, 这种流体, 当剪切变形率增加时, 其动力粘性减小(例如胶状溶液, 粘土, 乳状物, 水泥)。

(iii) 膨胀性物质, 这种物质, 当剪切变形率增加时, 其动力粘性亦增加(例如流砂)。

(iv) 摇溶性物质, 这种物质, 随切力作用时间的增加而其动力粘性减小(例如摇溶性胶状油漆)。

(v) 震凝性物质, 这种物质, 随切力作用时间的增加而其动力粘性增加。

(vi) 粘弹性物质, 如果条件不随时间而变, 此类物质的表现类似于牛顿流体, 但是, 如果切应力突然变化, 则其表现似塑性物质。

以上为实际流体的分类。在流体力学中分析某些问题, 我们有理由假定流体为无粘性的理想流体的特性。对于这种流体得到理论解, 往往对所涉及的问题给出有价值的见解, 并能在需要时通过试验研究去联系实际情况。

1.5 液体与气体

尽管液体与气体两者均具有流体的一般特性, 它们自己还有许多不同的性质。液体很难压缩并在许多实际应用上可以当作不可压缩的。给定质量的液体占有固定的体积, 与其容器的大小或形状无关, 且若容器的体积大于液体的体积, 则形成自由面(图 1.4 a)。

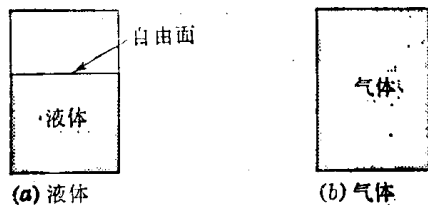


图 1.4 容器中流体的特性

气体则比较易于压缩。体积随压强的变化大,一般不能忽略,且与温度变化有关。给定质量的气体不具有固定的体积并将连续不断地扩展除非用一容器遏制它。它将完全充满所在的任何容器,因此,不能形成自由面(图 1.4b)。

1.6 物质的分子结构

固体,液体与气体全由不断运动着的分子所组成。然而,这些分子的排列及它们之间的间隔不同,可引起三种不同物质状态的特有性质。固体中,分子是紧密而有规则地排列且分子运动很微弱,每一个分子都要受到其相邻分子的约束。液体中,其分子结构比之于固体要松散些;各个分子具有较大的运动自由度,尽管受到周围分子某种程度的约束,但能摆脱这个约束,导致结构的变化。气体中,没有正规的分子结构,分子之间的间隔很大,分子能自由运动。

物质的分子相互作用着力并随分子间的距离而变。为简单起见,研究某个单原子物质,在单原子物质中,每个分子由一个单原子组成。宏观地观察这样一种物质的反应,可对作用力的性质形成一个概念。

(i) 若两块同样材料间隔很远,它们之间所产生的力是探测不到的。因而,当间距很大时,分子之间的力可以忽略,而当间距趋于无穷大时,则分子之间的力趋于零。

(ii) 如果强使两块同样材料非常靠近地接触,能使它们紧贴在一起。在此情况下,当间距很小时,分子之间的力是吸引力。

(iii) 为压缩固体或液体需很大的力,说明为减少分子间的间隔必须克服分子间的相互排斥力。

从以上这些观察可发现,单原子间的力随间距而变(图 1.5a)且有两种力,一种是吸引力而另一

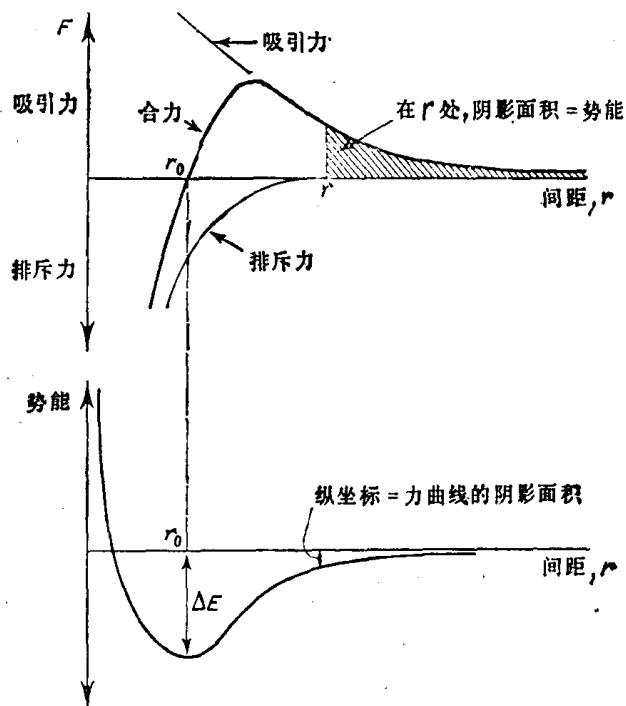


图 1.5 (a) 力随间距的变化 (b) 势能随间距的变化

种是排斥力。间距小的情况下,排斥力是主要的;间距较大的情况下,与吸引力相比较,排斥力变成不重要了。

这些结论亦可用势能的观点说明,此处所讲势能的定义为将一个原子从无穷远处移到离第二个原子 r 距离所需的能量。若原子相隔无穷远,势能为零,若使第一个原子朝第二个原子运动而需外部能量,则势能为正。因图 1.5a 为原子间的力 F 对间距的关系图,势能曲线(图 1.5b)将是这条曲线从 $\infty \rightarrow r$ 的积分,即为图 1.5a 中的阴影面积。

在 r_0 处,满足最小能量的条件,相应于 $F=0$ 并表示是稳定平衡位置,说明固体和液体内在的稳定性,具备了这一条件,在固体和液体中,其分子是十分紧密排列的。图 1.5b 还说明利用有限的能量 ΔE 能把一对原子完全分离,即把间距 $r=\infty$ 称 ΔE 为分离能或结合能。

研究物质的大量粒子,每一粒子将具有动能 $\frac{1}{2}mu^2$,式中 m 为粒子的质量及 u 为粒子的速度。若一个粒子与一对粒子相撞,而只有转换给对偶能量使它超过 ΔE ,才能引起它们分离。于是,形成一对稳定对偶的可能性取决于 $\frac{1}{2}mu^2$ 的平均值与 ΔE 的关系。

(i) 若 $\frac{1}{2}mu^2$ 的平均值 $\gg \Delta E$,不能形成稳定对偶。该系统相当于气体,由快速运动的各个粒子组成,无明显的集聚或占据固定空间的倾向。

(ii) 若 $\frac{1}{2}mu^2$ 的平均值 $\ll \Delta E$,对偶不可能分离,而来撞的粒子可能被对偶所俘获。该系统具有固体的性质,形成粒子的稳定密集。而这种粒子密集只有靠外部提供能量才能分离(例如加热到产生熔解且接着沸腾)。

(iii) 若 $\frac{1}{2}mu^2$ 的平均值 $\approx \Delta E$,我们有一种系统介于(i)和(ii)之间,相当于液体状态,由于某些粒子具有 $\frac{1}{2}mu^2$ 值 $> \Delta E$,引起分离,而其他的粒子具有的 $\frac{1}{2}mu^2$ 值 $< \Delta E$ 而将集聚。

总结以上所述,在固体中,各个分子是紧密排列而它们的运动局限于小幅度振动。动能比之于分离能为小,这样,分子不能分离,但保持同样的相对状态。

在液体中,分子排列依然十分紧密,但其运动要大得多。某些分子将具有足够的动能足以穿过周围的分子,这样分子的相对位置能随时改变。物质将不再是刚性的且能在作用力的作用下流动。然而,分子间的吸引力仍足以确保给定的液体质量具有固定的体积并确保将形成自由面。

在气体中,分子之间的间隔比之于液体约大十倍。其动能远大于分离能。分子之间的吸引力就显得很小,分子间的效应可忽略不计,因此分子可以自由运动,甚至碰到液体或固体边界才被制止。所以,气体将扩展到完全充满容器,与容器体积无关。

1.7 流体的连续介质概念

虽然流体的性质起因于流体的分子结构,工程问题通常涉及的都是大体积流体的行为,所含有分子是大量的,分子间的间距比之所研究的实际情况中的距离通常可以忽略不计。在这些