

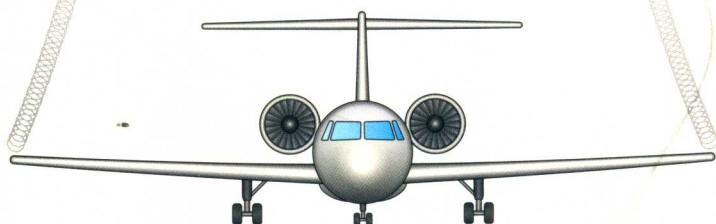
我所理解的

流体力学

(第2版)

Fluid Mechanics as I Understand It

王洪伟 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

我所理解的

流体力学

王洪伟 著

(第2版)

Fluid Mechanics

as I Understand It



国防工业出版社

•北京•

内 容 简 介

本书是站在学习者的角度来写的，目的是通过本书让读者更深入地理解流体力学的原理，使之成为自己真正掌握并可以运用的知识。和现有教材及相关图书相比，本书的一个特色是尽量使用力学基本概念并以通俗的方式表述，更易于为学习者所接受。另一个特色是作者专门绘制了大量既精美又保持了科学性的插图，增加了学习的趣味性，并有助于对流动的理解。另外，书中还对众多生活中的流动现象进行了深入的分析，比如：下落中的雨滴是什么形状的？朝天开枪，落下来的子弹会不会打死人？用橡胶管放水时，捏扁出口为什么会使流速增加？等等。通过阅读本书，读者会发现，其实这些都是可以用基本的流体力学知识解释的。

尽管不是一本传统意义上的教材，本书各章节内容仍然基本涵盖了普通高等院校流体力学教学大纲的所有内容，适合作为相关专业的专科生、本科生教材或教学辅助资料，也适合研究生和广大工程技术人员自学和参考。

图书在版编目（CIP）数据

我所理解的流体力学 / 王洪伟著. --2 版. --北京：国防工业出版社，2019.4

ISBN 978-7-118-11803-2

I. ①我… II. ①王… III. ①流体力学 IV. ①035

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 027643 号

※

国防工业出版社 出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

北京龙世杰印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20 字数 355 千字

2019 年 4 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 79.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

序言

流体运动是自然界普遍存在的现象，大至宇宙，小到细胞，无所不在。人类的生活、生产活动与流体运动密切相关，人类在这过程中逐渐积累经验、增进认识。史前时期，人类所用的武器已从简单的石头棍棒发展到流线型尖矛。大禹治水，疏而不堵。李冰分流诱导，使都江堰成为迄今所知世界留存最早的水利工程，两千多年来润泽川西平原，造就天府之国。这些事实表明，在古代人类对流体运动的认识已有一定深度，并用于解决实际问题。

16世纪，文艺复兴巨匠达·芬奇对流体运动的研究作出了诸多贡献，推导出了一维不可压粘性流动质量守恒方程，并对波动、漩涡等的形成进行了研究。文艺复兴开启了将流体运动的研究从经验到科学的转变，催生了现代流体力学。

长期以来，城市给排水系统、水利工程、船舶建造和航海业一直是流体力学研究的原动力。人类对飞向蓝天，而且飞得更快、更高，甚至太空航行的追求，催生了流体力学三个新的分支，它们是机翼理论、气体动力学和稀薄气体力学。1903年，莱特兄弟飞机的发明，第二次世界大战后超声速飞机的问世，1957年第一颗人造卫星的升空，既是这三个分支成果的体现，也进一步刺激和推动了它们的发展。

血液在血管中的流动是流体力学研究的又一重要领域。心脏搏动引起的流动非定常性，血液作为流体介质所具有的特殊性质，血管壁的特性等，涉及许多新的问题。

由于流体力学在国民经济、军事等诸多领域得到了广泛应用，并已经开展了系统深入的研究，因此除湍流的科学问题至今仍未得到解决外，其他部分已发展到很高的水平，在国内外也已出版了很多书籍。在这样的背景下，王洪伟博士出版这本书还有其立足之地吗？他是经过了深思熟虑的，理清思路，看准有别于已有其他书籍的特点，才下定了决心！归结起来，本书有如下特点。

本书的第一个特点是力求用自己的感悟点燃读者心中对流体力学求知的火焰。科学是严谨的，公式是死板的，然而对规律的数学描写却能最深刻地反映科学的内在本质。本书没有刻意回避公式，而是力求用自己对流体力学及其公式的理解，揭示出公式与生活（广义的）的紧密联系，生动活泼，生趣盎然，兴趣油然而生，足以点燃读者内心的火焰。

流体力学是一门科学，因而是美的。之所以美，是因为它揭示的科学规律及



其数学表达是激动人心的，是和谐的，甚至有些展示流体运动的照片本身就是造诣极高的艺术作品。俄罗斯科学家就曾以此做成图册赠送国外同行。本书的第二个特点是力求揭示流体力学内在的美。他不仅用文字，而且用大量的彩图启示读者对美的领悟，为此他精心绘制了书中所有的插图。不仅如此，排版也都是他自己完成，以保证能充分体现本书的宗旨，著者本人是很看重这一点的。

华罗庚曾说，读书要由厚到薄，再由薄到厚。由厚到薄，就是从大量材料中提炼领悟其精华。本书的第三个特点就是对流体力学知识的“再加工”。著者根据他对流体力学的透彻理解，用自己简洁生动的语言，勾划出流体力学的基础和精华，非常有助于读者深入理解流体力学的内核、本质。

本书将科学的严谨性与文字的易读性结合，用流体力学的美点燃读者内心的火焰，应该会是一本广受读者欢迎的好书。

陈懋章

2014年9月

第2版前言

本书在2014年出版后，得到了广大学生和技术人员的认可，印刷了6次共12000册。经过几年的读者反馈，结合作者近几年教学中的一些新的体会，对原书进行了一些修订形成了第2版。本书相较第1版主要增加了一些内容，并对全文语言进行了局部改动。现把主要改动列出如下：

(1) 在各章后面增加了扩展知识和思考题两部分内容。扩展知识部分在深度和相关工程应用方面进行了一些扩展，让读者能对本学科的发展现状有更深入的认识。每一章给出几个思考题，有些涉及容易混淆的基本概念，有些尝试从应用方面加深流体力学理论的理解。

(2) 第9章的流动实例分析从21个增加到25个。其中的列车进站和机翼升力原理两个实例是科普中经常举例的流动现象，属于身边的流体力学知识，但很多科普的解释存在问题。另两个实例中的热机和压气机是使用流体为工质的流体机械。通常在相关专业书籍中讲述这类机械时使用专门的理论，本书则尝试从基本流体力学原理出发来理解它们的工作原理。

(3) 部分正文增加了一些内容，比如第4章能量方程部分增加了焓方程和熵方程，并讨论了引起流体总焓变化的因素，以及轴功在具体流动中的表现形式。在第4章最后还增加了一节介绍流动方程的几个解析解。

(4) 改正了几处错误。比如第3.2节原来讲脉线的部分叙述有错误，而脉线在讲述流体力学原理上并不是十分有用，所以这一版删去了这里的脉线部分，而在该章末尾的扩展知识中对脉线做了一点补充。

(5) 对一些图进行了重新绘制，希望表述更清晰。

(6) 对全书进行了重新编辑和排版，希望能更方便读者阅读学习。

另外，在这一版中，页脚的翻页动画仍然保留，左侧是随雷诺数增大时圆柱绕流的流场脉线变化，右侧是随马赫数增大时圆柱绕流的压力分布变化。

最后，作者要借此机会感谢陈懋章老师在百忙之中为本书精彩作序。

王洪伟

2018年8月于北京航空航天大学



第1版前言

本书是站在学习者的角度来写的，所以书名取为“我所理解的流体力学”。全书的核心就是“理解”，没有例题，更没有习题，目的是能让读者在相对轻松的阅读中领会流体力学的原理，欣赏流体运动的美妙。

苏格拉底说：“教育的本质是点燃火焰。”近来还流行一句话：“你永远无法叫醒一个装睡的人。”学习实在是一件很私人的事，只有学习者才能决定学习的效果。教师在讲台上唾沫横飞，学生在下面埋头大睡的现象司空见惯。课本对知识的涵盖再广泛，论述再深入，逻辑再缜密，但如果没人愿意读，也就体现不了它的价值。事实上，好奇是人类的本能，而学习则是生活的本质，专门进行学习活动的教学怎么会成了磨灭学习兴趣的凶手了呢？

说一个不太沾边的，我从小到大最喜欢的书是《红楼梦》，到现在已经读了几十遍，可以说是百看不厌。但是，初中的时候，我们的语文课本是有《红楼梦》选段的，而且是很精彩的“林黛玉进贾府”。可是，无论在当时，还是现在回想起来，那个课文就根本没给我带来一丝好感，而是沉浸在段落大意和中心思想的分析之中，文字的精彩已经完全消失不见了。

说一个沾边的，现代物理中最为老百姓津津乐道的人物和理论莫过于爱因斯坦和他的相对论了。作为一个理工科大学生，按理来说应该理解并掌握这一理论。然而，除了少数物理专业的学生，绝大多数的大学生对这个一百多年前建立的理论却完全不能理解，这其中也曾包括我自己，而我还是力学方面的大学教师！本来上大学物理的时候，有关相对论的教学内容并不少，但不是考试重点，于是也就没当回事。可是，在课外读的一些科普文章却让我理解了相对论的原理，而且发现它其实根本不像宣传的那么深奥难懂。再回去看教材，就可以在理解的基础上用相对论理论解决一些问题了。

可见，作为一本介绍科学知识的读物，无论是教材，还是专著，亦或是科普读物，能让读者感兴趣，并且能用通俗易懂的方式让读者理解那些所谓的高深理论，是非常重要的。我们的教材，真的应该放下身段，从学习者的角度去考虑问题，让更多的人可以在教材中领略科学之美，而不是非要去科普中热爱科学。严谨和通俗并不是对立的两面，为什么不能既保持论述的科学性，又能让读者更易懂一些呢？

对知识深入理解后再以他人更易懂的方式叙述出来，应该是科学工作者，尤



其是教师们的责任和义务。这其实也是个创造的过程，可称为对知识的“再加工”。实际上我们所学的知识都是或多或少地被“再加工”后写出来的。作为科学书籍的编著者，更应该努力对知识进行深入的“再加工”，而不是照本宣科。原创的发现和发明固然重要，对知识的“再加工”和传播才是让其发挥作用的关键。我本人也曾本着瞻仰名著、附庸风雅的思想，买了欧几里德的《几何原本》和牛顿的《自然哲学之数学原理》，几经努力，至今也只翻过几页而已，先前还放在书架上撑门面，现在早已收入床底下了。可是，我还是对经典几何和经典力学有不错的掌握啊，这都要感谢众多理解了这些知识的前辈编写的相关书籍。可见好的教材不只是知识的简单重述，而是一个非常有贡献的创造过程。

作者本人在还是学生的时候，在课堂上学习知识之余，还有个爱好就是研究老师的讲解方式。通过对比我和老师对知识的理解，分析为什么老师这样讲就能听懂，那样讲就不容易听懂。就这样研究来研究去，最后我就也当了老师，而且很自然我热爱教学工作，也能得到学生的认可。在十多年的教学工作中，从一开始的注重备课和教学方法，到后来的注重知识的理解和学生的反应，我完成了从教育者到学习者的一个反向转化过程。现在我把每一次上课都当成自己的一次新的学习机会，在讲课过程中，我的心中不断涌起新的疑问，经常可以对知识有新的感悟，这就是一个学生在上课时应该有的状态吧。我想，既然我对所教的知识有自己独到的理解，就应该把它写出来，让更多的人能看到，说不定可以对大家有帮助呢，于是我就开始写这本书了。

但是，把自己的理解公开出版是有风险的，一不小心就可能理解错误，而且写在教科书上，误导了学生就不好了，也会很没面子。我想这也可能是很多老师虽然上课时眉飞色舞、鲜活生动，写出教材来却又晦涩难懂、生硬刻板的原因吧。可是，如果完全遵循原著，像流体力学这样的经典知识真的还需要再写一本书吗？于是我决定冒天下之大不韪，就要写这样一本书，而且书名就叫《我所理解的流体力学》。

当我有一次把这个想法说给一起教课的老师的时候，他说我的名字起得有点大了。我才意识到，书名字里面带“我”字的貌似都是名人。尤其是我上网一查，韩寒还出版过一个作品集叫《我所理解的生活》。真是冤枉，我之前可真没看过他的这个书名啊（不过我还真买来一本看了，还挺好看的）。不管怎么说，我的本意是：既然是自己的理解，就可能会有问题甚至错误，所以要实事求是地加上一个“我所理解的……”字样。这样还有一个好处，一旦出现错误，我可以说：“由于本人水平有限，书中不可避免地存在漏洞和错误……”。

好了，言归正传，介绍一下本书的内容和特点。



本书当然不是科普书，事实上完全可以当作教材来用，只需要辅以另外的例题和习题就可以了。书中存在着大量的公式和推导，甚至比起多数《工程流体力学》教材还要多。有人说，每多一个公式就会吓跑一个读者，我承认这可能是对的。不过，吓跑读者其实不一定需要公式，之前提到的牛顿的《自然哲学之数学原理》里面的公式其实很少，但其易读性比起相同内容的，使用众多公式的现代教材可要差多了。毕竟数学是科学的语言，作者完全没打算弱化数学的作用。相反，作者还希望通过本书对数学公式的解释，让读者更深入地理解一些数学知识。

和现有教材及相关图书相比，本书是具有鲜明特色的。其中最直观的就是书中有大量精美的彩图。这些图都是作者自己绘制的，当然参考了相关的图书，但体现在本书中时，作者力图在科学性和美观性之间达到平衡。可以保证，所有曲线图形都可以直接作为工程应用的参考，所有的流动图像都符合实际的流动图画。在本书的最后一章，作者还精选了 21 个有趣又有用的流动实例，进行了较为深入的分析，让读者体会学以致用乐趣。比如：下落中的雨滴是什么形状的？为什么给草地浇水时捏扁出口射流速度会增大？只要勤于思考，每一个学过了流体力学基本知识的人都应该可以解释这些生活中的现象。

尽管不是一本传统意义上的教材，本书的章节和内容仍然基本涵盖了普通高等教育要求的流体力学教学的所有内容，适合作为辅助教材和学生的自学资料，也适合研究生和相关工程技术人员自学。对于初次接触流体力学的读者，采用本书作为教材或者自学资料，会发现书中大量使用了经典物理、理论力学和固体力学中的概念，因此并不需要特别地把流体力学当做一门全新的知识来学，这样学习起来会更加轻松。对于以前已经学过流体力学，现在想复习的人来说，本书以理解为核心的方式也很适合复习之用，大可把本书当作教材 + 笔记来读。

最后提一下，本书的页码中隐藏着一个彩蛋，献给亲爱的读者们。用一句话提示就是：雷诺向左，马赫向右。

王洪伟

2014 年 8 月于北京航空航天大学



目 录

第 1 章 流体与流体力学	1
1.1 流体的概念	2
1.2 流体的一些性质	5
1.2.1 流体的粘性	5
1.2.2 液体的表面张力	11
1.2.3 气体的状态方程	12
1.2.4 气体的压缩性	14
1.2.5 气体的导热性	15
1.3 连续介质的概念	16
1.4 流体中的作用力	16
扩展知识	17
思考题	18
第 2 章 流体静止时的力	19
2.1 流体静止时的受力分析	20
2.2 重力作用下流体内部的压力分布	23
2.3 惯性力作用下流体内部的压力分布	26
2.4 流体与固体对力的传递的异同	28
扩展知识	30
思考题	32
第 3 章 流体运动的描述	33
3.1 流体力学中描述运动的方法	34
3.2 迹线和流线	35
3.3 流体质点的速度、加速度和物质导数	37
3.4 雷诺输运定理	41
3.5 雷诺输运定理和物质导数之间的关系	43
3.6 不可压缩假设	46



3.7 流体微团的运动与变形	47
3.7.1 流体微团的线变形	51
3.7.2 流体微团的整体旋转	52
3.7.3 流体微团的角变形	53
扩展知识	54
思考题	56

第 4 章 流体动力学基本方程

57

4.1 积分方法和微分方法	58
4.2 连续方程	59
4.2.1 积分形式的连续方程	59
4.2.2 从积分方程得到微分方程	61
4.2.3 对微控制体分析得到微分方程	62
4.3 动量方程	66
4.3.1 积分形式的动量方程	66
4.3.2 微分形式的动量方程	67
4.4 伯努利方程	75
4.5 角动量方程	81
4.5.1 积分形式的角动量方程	81
4.5.2 微分形式的角动量方程	82
4.6 能量方程	83
4.6.1 积分形式的能量方程	83
4.6.2 微分形式的能量方程	88
4.6.3 焓方程、熵方程、总焓方程和轴功	96
4.7 方程的求解	99
4.7.1 定解条件	99
4.7.2 流动方程的几个解析解	102
扩展知识	105
思考题	108

第 5 章 无粘流动和势流方法

109



5.1 无粘流动的特点	110
5.2 无粘旋涡运动	111
5.2.1 粘性力产生涡量	115
5.2.2 斜压流体中涡量的产生	117
5.2.3 体积力无势时涡量的产生	118
5.3 无旋流动和速度势	118
5.4 平面势流简介	120
5.4.1 均匀流动	121
5.4.2 点源和点汇	121
5.4.3 点涡	122
5.4.4 偶极子	122
5.4.5 均匀流绕圆柱流动	123
5.5 平面势流的复势解法	125
5.5.1 表达式更加简洁	125
5.5.2 可以应用保角变换	126
5.5.3 可以使用镜像法	126
5.6 势流法的工程应用及现阶段的地位	127
扩展知识	128
思考题	128

第 6 章 粘性剪切流动

129

6.1 粘性流体的剪切运动与流态	130
6.2 层流边界层	132
6.2.1 普朗特层流边界层方程	134
6.2.2 边界层的几种厚度	138
6.2.3 求解边界层问题的积分方法	143
6.3 湍流边界层	148
6.4 管道流动	154
6.4.1 进口段	155
6.4.2 完全发展段	157
6.5 射流与尾迹	162



6.5.1 射流	162
6.5.2 尾迹	164
6.6 边界层分离现象	165
6.7 流动阻力和流动损失	171
6.7.1 流动阻力	171
6.7.2 流动损失	180
扩展知识	188
思考题	192

第 7 章 可压缩流动基础

193

7.1 声速和马赫数	194
7.1.1 声速	194
7.1.2 马赫数	196
7.2 定常绝能等熵流动关系式	198
7.2.1 静参数与总参数	198
7.2.2 临界状态和速度系数	202
7.2.3 气动函数	206
7.3 膨胀波、压缩波和激波	209
7.3.1 流体中的压力波	209
7.3.2 正激波	213
7.3.3 斜激波	215
7.4 等熵变截面管流分析	219
7.4.1 收缩喷管	219
7.4.2 拉瓦尔喷管	223
扩展知识	228
思考题	230

第 8 章 流动相似与无量纲数

231

8.1 流动相似的概念	232
8.2 无量纲数	233
8.2.1 雷诺数	233



8.2.2 马赫数	236
8.2.3 斯特劳哈尔数	237
8.2.4 弗劳德数	237
8.2.5 欧拉数	238
8.2.6 韦伯数	239
8.3 控制方程的无量纲化	239
8.4 流动建模与分析	241
8.4.1 低速不可压缩流动	242
8.4.2 高速可压缩流动	243
8.4.3 生活中的例子——水花	244
扩展知识	245
思考题	246

第 9 章 一些流动现象的分析

247

9.1 物体在外太空的形状——流体的特性	248
9.2 覆杯实验的原理——与液体的不易压缩性有关	249
9.3 气塞现象——气体的易压缩性	252
9.4 气球放气时的推力——动量定理与力	253
9.5 水火箭的推力——推力与介质无关	255
9.6 涡轮喷气发动机的推力——作用在什么部件上?	256
9.7 总压的意义和测量——总压不是流体的性质	257
9.8 收缩为何加速? —— 定常流动是平衡状态	260
9.9 冲力与滞止压力——动量方程与伯努利方程的关系	264
9.10 射流的压力——压力主导流动	266
9.11 水龙头对流速的控制——管内总压决定射流速度	268
9.12 捏扁胶管出口增加流速——总压决定射流速度	269
9.13 吸气与吹气——压力主导流动	272
9.14 建筑与风——复杂的三维非定常流动	273
9.15 科恩达效应——粘性作用必不可少	275
9.16 雨滴的形状——由表面张力和大气压力决定	277
9.17 赛车中的真空效应——主要与来流速度相关	279



9.18 质量越大射程越远——尺度效应	279
9.19 河流倾向于走弯路——压力主导的通道涡	282
9.20 旋转茶水中的茶叶向中心汇聚——也是通道涡	283
9.21 河底的铁牛逆流而上——压力主导的马蹄涡	284
9.22 列车通过引起的压力变化——不只是伯努利方程	286
9.23 机翼升力原理——科恩达效应是关键	289
9.24 热机的原理——利用工质的压缩性	294
9.25 压气机的增压原理——非定常压力做功	298

参考文献 302

Tips

泰勒展开的意义	22
小心表面张力!	25
看懂张量表示法	50
流体中的高斯定理	62
非牛顿流体	74
气体被压缩时温度为什么会升高?	80
推动功、流动功和体积功	86
正压流体	111
科氏力	119
布拉修斯解	139
关于雷诺应力	153
进口段与完全发展段之间存在过渡段	159
有趣的空气阻力问题	178
理想气体的熵和过程参数变化	199
激波管	212

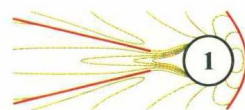


第1章

流体与流体力学



风鼓起帆，船破水前行，海鸟在天空飞翔，
流体的力在我们的生活中无处不在。





1.1 流体的概念

所谓的流体指液体和气体，和流体对应的是固体。一般认为固体指不容易变形的物质，而流体指容易变形的物质。然而，物体受力才会变形，是否容易变形实际上取决于受力的情况。作为固体的尼龙绳的抗拉能力很强，但受压的时候则几乎完全没有抵抗力，用剪刀还可以轻易将其剪断。可见，需要一种更为严谨的定义来区分流体与固体。

固体、液体和气体的区别显然是由它们的微观结构决定的。图 1-1 显示了水的三种状态的微观结构示意图，图中用小球来表示氧原子和氢原子。固体的分子紧密地挤在一起，并努力保持固定的排列形式；液体的分子也紧密地挤在一起，但没有意愿保持固定的排列形式；气体的分子则既不挤在一起，也没有意愿保持固定的排列形式。

这样，我们就可以理解物质这三种状态的特点了。固体和液体的分子紧密地挤在一起，因此它们的体积基本是固定的，只要不受到巨大的压力就不会有明显的改变。气体与它们不同，受到外界压力后分子之间的间距会缩小，整体的体积也因此而改变。

液体和气体的共同特点是分子没有任何意愿要保持固定的排列形式，这种特点决定了它们易于流动的特性。对于液体，一个分子和哪些分子挨着都无所谓，只要挨着就行。这种随遇而安的特性使液体在宏观上虽然体积固定，但不会保持固定的形状。对于气体，分子基本上是完全自由的，各自独立地做着热运动。分子之间只有在相互碰撞时才发生力的作用。

我们知道，如果一个刚体所受的合外力和力矩都为零，这个物体就会保持静

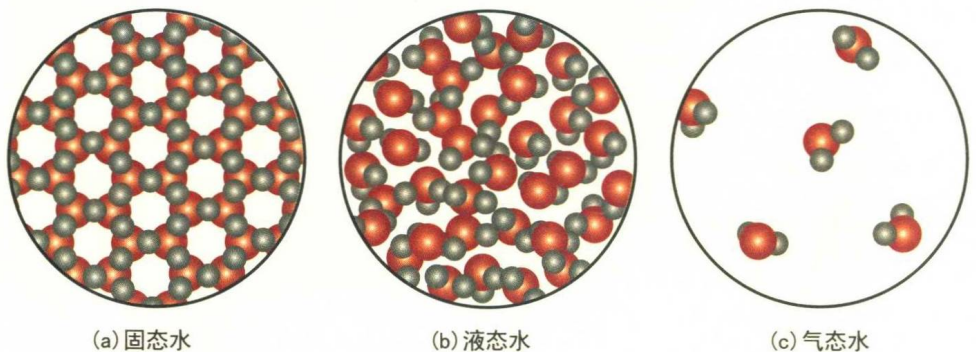


图 1-1 水在三种状态下的分子排列