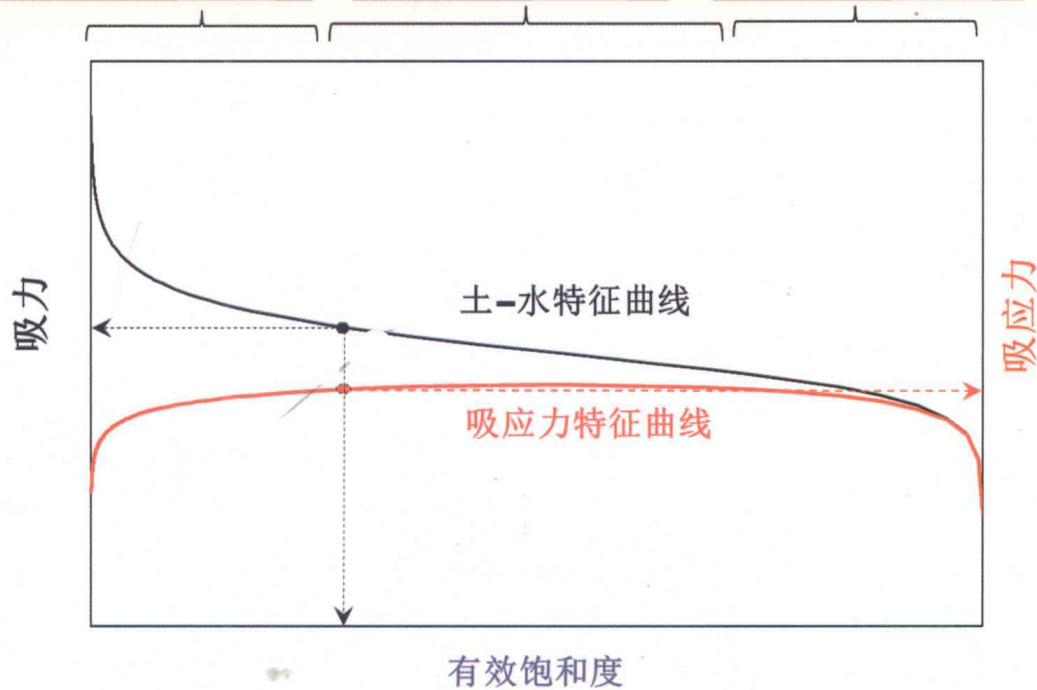
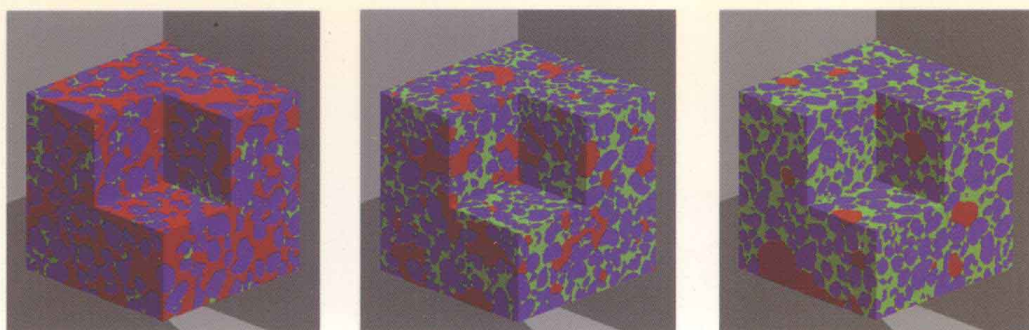


Unsaturated Soil Mechanics

非饱和土力学

[美] Ning Lu (卢宁) William J. Likos 著

韦昌富 侯龙 简文星 译




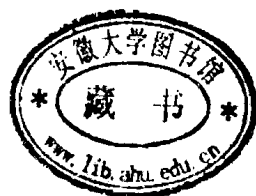
Unsaturated Soil Mechanics

非饱和土力学

[美] Ning Lu (卢宁) William J. Likos 著

韦昌富 侯龙 简文星 译

 高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING



图字：01-2011-6087号

Unsaturated Soil Mechanics

All Rights Reserved. This translation published under license.

Copyright © 2004 by John Wiley & Sons, Inc.

图书在版编目 (C I P) 数据

非饱和土力学 / (美)卢宁, (美)力科思
(Likos, W. J.) 著; 韦昌富, 侯龙, 简文星译. — 北京:
高等教育出版社, 2012. 6

书名原文: Unsaturated Soil Mechanics

ISBN 978-7-04-034346-5

I. ①非… II. ①卢… ②力… ③韦… ④侯… ⑤简
… III. ①非饱和—土力学 IV. ①TU43

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第088154号

策划编辑 陈正雄
责任校对 陈旭颖

责任编辑 陈正雄
责任印制 朱学忠

封面设计 张楠

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司
开 本 787 mm × 1092 mm 1/16
印 张 26.75
字 数 570 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2012年6月第1版
印 次 2012年6月第1次印刷
定 价 59.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 34346-00

献给

Vivian, Connie, Benton, Jonas, Holly 和 Shemin

尽管在岩土工程实践中遇到的很多情况(即使不是绝大多数)都与非饱和土有关,但传统的分析和设计方法建立在两个具有代表性的、极端的假设条件上,即土体处于完全饱和或完全干燥状态。做出这样假定的主要动机在于测定仅包含单相流体(即气体或水)的土体参数要比测定包含两相流体(即气体和水均有)的土体参数容易得多,从而可以大大地简化理论和设计工作。做出这样假定的主要理由在于上述方法偏于保守(安全)。例如,对具有相同孔隙比的同一种土体来说,饱和状态时的抗剪强度低于非饱和状态时的抗剪强度。然而,在过去的十来年里,一些反省和深思促使人们必须重新评价上述方法。

首先,土体饱和的假定显然与一些工程应用条件不一致,比如用饱和土力学评价膨胀土体地基的隆起是不符合实际的。其次,科学技术的进步提高了人们在测量、描绘和预测非饱和土特征、行为与性能等方面的能力。再者,日益上升的土建成本使偏于保守的设计方式逐渐失去其经济方面的吸引力。因此,近年来把非饱和土力学原理应用到解决与非饱和土条件相关的岩土工程问题的方法论得到了越来越多的认同。

遗憾的是,当前针对从事非饱和土力学的工作者的教学与培训十分有限。一方面缺乏从事非饱和土力学教学工作的教师;另一方面是因为无法提供系统的非饱和土力学课程,尤其缺乏系统论述非饱和土力学基础原理的教材。

《非饱和土力学》的诞生,是为了满足当前的两大需求:岩土工程师需要越来越多的非饱和土力学知识,以及目前在非饱和土力学教学、科研工作中尚存在一些局限性。在撰写该书的过程中,作者着重阐述基本原理。这是因为建立在基本原理之上的知识不但可以经受时间的考验,而且可以从广度和深度上提供有效的途径去解决实际问题。该书讲述了非饱和土的应力和强度理论方面的新进展,涵盖了非饱和土含水量和应力状态的微观物理学原理和宏观热力学理论。作者系统、详细地论述了非饱和土参数的测量技术和模拟方法,为与此相关的研究工作提供了重要的理论基础。总之,《非饱和土力学》的撰写十分清晰和简练,全面、综合地体现了本学科所涉及的相关知识。该书在未来很多年里,一定会成为从事非饱和土力学科研、教学与工程实践等工作人员的有价值的教材与参考资料。

Charles D. Shackelford 教授
科罗拉多州立大学土木工程系
美国科罗拉多州 Fort Collins

撰写本书的主要目的是为非饱和土力学原理提供全面性的基础。为此,作者从三个基本观点入手展开讲解,即:热力学、力学与水文学。本书可作为本学科的入门教材,其主要使用对象是高年级本科生、研究生以及具有岩土工程、土壤学、环境工程与地下水水文学等专业理论背景的研究人员。

在撰写本书的过程中,作者始终保持一种观点,即任何力学分支的入门教材都应着重对控制现象的基础原理进行论述。一个立足于基本原理的学习方法会让普通读者受益匪浅,并且特别适合于新兴的、充满活力的、很快能融入科研和实践中的非饱和土力学。我们对求知的观点可以用 Thomas Henry Huxley 的一句名言来表达:“已知是有限的,而未知却是无限的;明智地说,我们如同站在一个漫无边际的未知海洋中的一个 small 岛上。我们每一代人的事业就是多开拓一点陆地。”作者希望本书能为那些渴望在非饱和土力学的知识海洋中探索和开拓的人们提供必要的知识和动力,解决自然与社会中出现的非饱和土力学问题。

为使读者对本书的编排结构有所了解,第 1 章对非饱和土力学进行了综合性的介绍。其内容包括:非饱和土现象的一般性介绍(1.1 节);本书内容的编排规划(1.2 节);初步讨论了非饱和土力学在自然与工程实践中所起的作用(1.3 节);概述了非饱和土力学与经典(饱和)土力学的基本差异(1.4 节);介绍了状态变量和材料变量以及由本构理论组成的非饱和土力学的术语(1.5 节),概述了非饱和土基质吸力、吸应力与孔隙水势能的概念(1.6 节)。

本书的主要内容四个循序渐进而又相互关联的部分组成。第 I 部分主要审视了应用于非饱和土力学中的**基本原理**。第 II 部分与第 III 部分分别阐述这些基本原理在非饱和土**应力现象**与**流动现象**中的应用。第 IV 部分系统描述与评价了非饱和土力学中与应力现象和流动现象相关的状态变量和材料变量的主要**测试技术与模拟方法**。

在撰写本书前三部分的过程中,作者提出将微观物理学原理与宏观热力学理论相结合,对非饱和土的孔隙持水与应力状态进行解释。为了描述非饱和流动现象必须用到两个本构关系:即**土-水特征曲线**与**渗透系数特征曲线**;为了描述非饱和应力现象必须引入**吸应力特征曲线**。

本书所包含的知识内容,是过去四年里在美国科罗拉多矿业大学与密苏里大学哥伦比亚主校面向高年级本科生、研究生讲授非饱和土力学课程的成果积累。书中包含的内容可供**岩土力学**或**环境岩土工程**专业教学、试验使用一学期。每一章后面提供

了与该章主要内容相关的习题,读者可以在本书出版商网站 www.wiley.com 上下载或向作者(ninglu@mines.edu 或 likosw@missouri.edu)索取习题解答。

尽管本书得到了众多同事的大力帮助,但作者深知:书中的错误、偏见以及不足之处在所难免。作者十分感谢以下同事对本书提出了宝贵意见:Jiny Carrera, Mandar M. Dewoolkar, Susan Eustes, Shemin Ge, Jonathan W. Godt, D. Vaughan Griffiths, Laureano R. Hoyos, Jr., Nasser Khalili, K. K. (Muralee) Muraleetharan, Harold W. Olsen, Paul M. Santi, Charles D. Shackelford, Radhey S. Sharma, Alexandra Wayllace, 韦昌富。

Ning Lu(卢宁)

William J. Likos(威廉·力科思)

相关符号及单位

符号	描述	单位
A	Hamaker 常数	$\text{N} \cdot \text{m}$
A	面积、横截面面积	m^2
A'	横截面投影面积	m^2
A_n	气压变幅常数	—
a	土 - 水特征曲线模型常数	—
a	抗剪强度参数	kPa
B	基础宽度	m
B_2, B_3	渗透压的位力系数	—
C	溶质的摩尔浓度	mol/L 或 mol/m^3
$C(h)$	与水头成函数关系的比水容量	l/m
C_n	气压变动幅度	kPa
C_r	土 - 水特征曲线模型常数	无量纲
$C(\psi)$	与吸力成函数关系的比水容量	l/kPa
$C(\psi)$	土 - 水特征曲线模型修正函数	无量纲
c	黏聚力	kPa
c'	有效黏聚力	kPa
c''	毛细黏聚力	kPa
D	球体直径	m
D	基础埋深	m
D	电位移	C/m^2
D	扩散系数	m^2/s
D_v	水蒸气扩散系数	m^2/s
D_0	自由气体扩散系数	m^2/s
D_{10}	占总质量 10% 的细颗粒直径	m

符号	描述	单位
D_{50}	占总质量 50% 的细颗粒直径	m
d	气 - 水交界面处边界层的厚度	m
d	毛细管直径	m
d	典型孔径、孔隙直径	m
d_{sc}	简单立方体排列时的最大孔隙直径	m
d_{th}	紧凑四面体排列时的最大孔隙直径	m
E	每单位质量的自由能	$N \cdot m/kg$
E	杨氏模量	kPa
e	孔隙比	无量纲
e_{max}	最松散状态时的孔隙比	无量纲
e_{min}	最密实状态时的孔隙比	无量纲
F	合力、反作用力	N
f	范德华力的潜在影响因子	无量纲
G	土压力的无量纲变形变量	无量纲
G_s	土中固体物质的比重	无量纲
g	重力加速度	m/s^2
H_i	气态物质 i 的质量溶解系数	kg/kg
H_v	溶液的绝对湿度	kg/m^3
$H_{v, sat}$	自由水的绝对湿度	kg/m^3
h	吸力水头(基质吸力水头的绝对值)	m
h_a	进气水头	m
h_{avg}	平均吸力水头	m
h_c	最大毛细上升高度	m
h_e	位置水头	m
h_i	湿润峰上的吸力水头	m
h_i	气态物质 i 的体积溶解系数	L/L
h_m	基质吸力水头(负的吸力水头)	m
h_o	渗透吸力水头	m
h_p	压力水头	m
h_t	总水头	m
h_0	湿润峰后的吸力水头	m

符号	描述	单位
i	水力梯度	无量纲
i, j, m, s	系列指数	无量纲
K	固有渗透系数	m^2
K	标准化的非饱和渗透系数	无量纲
K_a	主动土压力系数	无量纲
K_{au}	非饱和主动土压力系数	无量纲
K_{H_i}	气态物质 i 的亨利定律常数	$mol/(L \cdot bar)$
K_p	被动土压力系数	无量纲
K_{pu}	非饱和被动土压力系数	无量纲
K_0	静止土压力系数	无量纲
k	渗透系数	m/s
k_a	气体传导率	m/s
k_{ra}	气体相对传导率	m/s
k_{rw}	水的相对渗透系数	m/s
k_a, k_{aw}	饱和渗透系数	m/s
k_{sa}	饱和气体传导率	m/s
k_w	水的渗透系数	m/s
k_x, k_y, k_z	x, y 和 z 三个方向上的渗透系数	m/s
k_ψ	非饱和渗透系数	m/s
L	毛细隔离带的导流宽度	m
L	土样的长度	m
M	抗剪强度参数	无量纲
M	溶质的摩尔质量	mol/L
M_i	物质 i 的质量	kg
m	系列指数	无量纲
N	指数变量	无量纲
N_A	阿伏伽德罗常数, 6.02×10^{23}	mol^{-1}
N_c, N_q, N_γ	承载力系数	无量纲
n	孔隙率	%
n	土-水特征曲线模型常数	无量纲
n	系列指数	无量纲

符号	描述	单位
n_a	气体充填孔隙率	%
n_i	气态物质 i 的摩尔数	mol
p	气压平方	kPa^2
p	平均应力	kPa
pF	以厘米水头对数值表示的吸力单位	无量纲
p'	平均有效应力	kPa
Q	无量纲的流动变量	无量纲
Q	毛细隔离带的导流能力	m^2/s
Q	入渗位移	m
Q	体积流速	m^3/s
q	总的液体流速	m^3/s
q	液体排出速度	m/s
R	通用气体常数	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
R	弯月面曲率半径	m
R	土颗粒半径	m
R_d	干燥大气常数	m/K
R_m	弯月面平均曲率	m
R_v	潮湿大气常数	m/K
R_1, R_2	气 - 水界面主半径	m
r	毛细管半径	m
r	等效孔隙半径	m
r_k	开尔文孔隙半径	m
r_p	孔隙半径	m
r_1, r_2	环形透镜形水气 - 水界面的半径	m
S	饱和度	%
S	比表面积	m^2/kg
S_e	有效饱和度	%
S_r	残余饱和度	%
S_s	单位储水量	l/m
s	吸水系数	$\text{m}/\text{s}^{1/2}$
T	热力学温度	K

符号	描述	单位
T	毛细上升现象的无量纲时间	无量纲
T_d	露点温度	K
T_s	表面张力	N/m
T_v	虚温	K
T_0	参考温度	K
t	时间	s
t	水膜厚度	m
u	孔隙水压力	kPa
u_a	孔隙气压力、气压	kPa
u_b	进气(气泡)压力值	kPa
u_d	干燥气体压力	kPa
u_e	饱和与非饱和状态的过渡吸力	kPa
u_g	计示压力	kPa
u_i	气态物质 i 的分压力	kPa
u_{sat}	饱和蒸汽压	kPa
u_v	蒸汽分压力	kPa
$u_{v,sat}$	饱和蒸汽压	kPa
u_{v0}	饱和蒸汽压	kPa
u_w	孔隙水压力、水压力	kPa
u_x	物质 x 相的绝对压力	kPa
u_y	物质 y 相的绝对压力	kPa
$(u_a - u_w)$	基质吸力	kPa
$(u_a - u_w)_b$	进气吸力	kPa
V_i	物质 i 的体积	m^3
V_t	总体积	m^3
V_v	孔隙体积	m^3
v	运动黏度	m^2/s
v	排水速度	m/s
v_i	气态物质 i 的分体积	L
w	质量含水量	%
w	孔隙水的重量	kg

符号	描述	单位
w_{sat}	100% 饱和时的质量含水量	%
w_{sc}	简单立方体排列时的质量含水量	%
w_{th}	紧凑四面体排列时的质量含水量	%
w_{fp}	滤纸的含水量	%
X	水中气体溶解系数的修正因子	无量纲
x, y, z	笛卡儿直角坐标系的三个方向	m
Z	无量纲的距离	无量纲
Z_c	裂缝深度	m
α	主应力方向	度
α	接触角	度
α	孔径分布参数、土 - 水特征曲线模拟参数	1/kPa
α_d	脱湿过程时的接触角	度
α_s	土的体积压缩性系数	m^2/N
α_w	吸湿过程时的接触角	度
β	孔径分布参数、土 - 水特征曲线模拟参数	1/m
β	气体扩散系数	无量纲
β_w	水的压缩系数	m^2/N
Γ	范德华吸引力的形函数	无量纲
γ	(总)容重	kN/m^3
γ_w	水的容重	kN/m^3
δ	增量或改变量	无量纲
ε	偏介电常数	无量纲
ε	初始相位角	rad
ε	应变	无量纲
ε	孔隙率	%
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	x, y, z 方向上的应变分量	无量纲
η	土 - 水特征曲线模拟参数	无量纲
η	蒸汽扩散增强因子	无量纲
θ	标准化的体积含水量	%
θ	填充角	度
θ	体积含水量	%

符号	描述	单位
θ_r	残余体积含水量	%
θ_s	饱和体积含水量	%
θ_w	体积含水量	%
κ	有效应力的拟合参数	无量纲
λ	蒸发的潜热	J/kg
λ	大气标准垂直梯度	K/km
λ	Boltzmann 曼转换变量	无量纲
λ	土 - 水特征曲线模拟参数	无量纲
μ	动力黏度	kg/m · s
μ	化学势能	J/kg 或 J/mol
μ	泊松比	无量纲
μ_c	界面曲率产生的化学势能	J/kg 或 J/mol
μ_{da}	干燥气体的化学势能	J/kg
μ_f	范德华吸力产生的化学势能	J/kg 或 J/mol
μ_i	物质 i 的化学势能	J/kg 或 J/mol
μ_o	溶质浓度产生的化学势能	J/kg 或 J/mol
μ_t	总的化学势能	J/kg 或 J/mol
μ_v	水蒸气的化学势能	J/kg
μ_0	参考状态的化学势能	J/kg
ν_{da}	干燥空气的偏摩尔体积	m ³ /mol
ν_v	水蒸气的偏摩尔体积	m ³ /mol
ν_w	水的偏摩尔体积	m ³ /mol
π	渗透压	kPa
ρ	气 - 水交界面半径	m
ρ_a	气体密度	kg/m ³
$\rho_{a, moist}$	湿润气体密度	kg/m ³
ρ_{a0}	初始气体密度	kg/m ³
ρ_d	干燥气体密度	kg/m ³
ρ_s	土体固体物质密度	kg/m ³
ρ_v	水蒸气密度(绝对湿度)	kg/m ³
ρ_w	水的密度	kg/m ³

符号	描述	单位
σ	总应力	kPa
σ'	有效应力	kPa
σ_c	毛细黏聚力产生的应力	kPa
σ_h	总的水平应力	kPa
σ_n	总的法向应力	kPa
σ'_n	有效法向应力	kPa
σ_v	总的垂直应力	kPa
σ_1	最大主应力	kPa
σ_2	中间主应力	kPa
σ_3	最小主应力	kPa
$\sigma - u_a$	净法向应力	kPa
$(\sigma_f - u_a)_f$	破坏面上的净法向应力	kPa
τ	剪应力	kPa
τ	扭曲系数	无量纲
τ	吸附水分子的直径	m
τ_f	破坏时的剪应力	kPa
ϕ	毛细隔离带倾角	度
ϕ^b	与基质吸力相关的内摩擦角	度
ϕ'	有效内摩擦角	度
χ	有效应力参数	无量纲
$\chi(u_a - u_w)$	吸应力	kPa
χ_f	破坏时的有效应力参数	无量纲
ψ	吸力压力	kPa
ψ_{aev}	进气压力值	kPa
ψ_b	进气(气泡)压力值	kPa
ψ_m	基质吸力	kPa
ψ_o	渗透吸力	kPa
ψ_t	总吸力	kPa
ψ_0	湿润峰前的基质吸力	kPa
ω_i	物质 i 的摩尔质量	kg/mol
ω_a	气体的摩尔质量	kg/mol

符号	描述	单位
ω_d	干燥气体的摩尔质量	kg/mol
ω_{da}	干燥气体的摩尔质量	kg/mol
ω_w, ω_v	水或水蒸气的摩尔质量	kg/mol
ω	毛细隔离带的效率	无量纲
ω	角速度	rad/s
IPM	瞬时剖面法	
LL	液限	%
PL	塑限	%
PI	塑性指数	%
Re	雷诺数	无量纲
RH	相对湿度	%
SWCC	土 - 水特征曲线	
SC	简单立方体排列	
TH	紧凑四面体排列	
USCS	统一的土体分类系统	

相关符号及单位

绪 论

第 1 章 非饱和土状态 3

- 1.1 非饱和土现象 3
 - 1.1.1 非饱和土力学的定义 3
 - 1.1.2 非饱和土力学的跨学科属性 ... 4
 - 1.1.3 非饱和土现象的分类 5
- 1.2 本书内容与撰写结构 7
 - 1.2.1 章节结构 7
 - 1.2.2 “岩土力学”与“环境岩土工程”课程内容选学建议 8
- 1.3 大自然与工程中的非饱和土 9
 - 1.3.1 水循环中的非饱和土 9
 - 1.3.2 全球化的气候因素 9
 - 1.3.3 非饱和带与土的形成 12
 - 1.3.4 工程实践中的非饱和土 15
- 1.4 含水量、孔隙压力与应力的垂直分布 16
 - 1.4.1 非饱和状态下的应力 16

- 1.4.2 饱和土含水量与应力的垂直分布:概念性图示 16
- 1.4.3 非饱和土含水量与应力的垂直分布:概念性图示 17
- 1.4.4 应力分析方法 18
- 1.5 状态变量、材料变量与本构定律 20
 - 1.5.1 现象预测 20
 - 1.5.2 状态变量——水头 22
 - 1.5.3 状态变量——有效应力 24
 - 1.5.4 状态变量——净法向应力 25
- 1.6 土中水的吸力与势能 26
 - 1.6.1 土体总吸力 26
 - 1.6.2 孔隙水势能 26
 - 1.6.3 土体吸力单位 29
 - 1.6.4 吸力形式与土-水特征曲线 30
- 本章习题 33

第 I 部分 基本 原理

第 2 章 材料变量 37

- 2.1 气体和水的物理性质 37

- 2.1.1 非饱和土的多相体系 37
- 2.1.2 干燥空气的密度 37
- 2.1.3 水的密度 39