

微纳技术著作丛书

# 毛细力学

高世桥 刘海鹏 著



科学出版社  
www.sciencep.com

7.6  
5

微纳技术著作丛书

# 毛细力学

高世桥 刘海鹏 著

科学出版社

北京

0647.6  
G175

## 内 容 简 介

本书是在微/纳机电系统技术(MEMS/NEMS)飞速发展的时代对毛细现象及其作用的重新认识和思考,并按由浅入深、由概念到理论、由基础到应用、由传统到现代的思路和原则进行编写。全书共分十一章,主要内容包括:传统毛细现象和作用的认识历程;表面张力及液体弹性的概念及测量方法;接触角、润湿的概念及其特性;Young-Laplace 方程及应用;Kelvin 方程及应用;表面张力梯度的概念及 Marangoni 效应;毛细流动;液桥的概念及其作用;毛细力学在微机电系统中的应用;毛细波等。

本书可供高等学校机械、机械电子工程、力学、物理等专业的师生阅读,也可供科研机构从事相关研究的科技人员参阅。

### 图书在版编目(CIP)数据

毛细力学 / 高世桥, 刘海鹏著. —北京: 科学出版社, 2010

(微纳技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-026061-1

I. 毛… II. ①高…②刘… III. 毛细现象-研究 IV. O647.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 212029 号

责任编辑: 耿建业 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 赵 博 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—2 500 字数: 220 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

# 前 言

近年来,微/纳米科学不断发展,微/纳米技术不断进步,不论在材料、结构上,还是在系统上都相继涌现了众多高科技的概念和实体成果。它们有的已经应用于工业化和信息化的商品生产中,有的已具有极大的应用前景和潜力。

由于微/纳米科学的尺度量级在微米( $10^{-6}$  m)和纳米( $10^{-9}$  m)量级。既不同于传统的毫米以上肉眼可见的宏观尺度,也不同于传统的物理化学层面的肉眼不可见的分子原子尺度。因此长期以来,从微观上忽略了它的作用,从宏观上又忽视了它的存在。这被 Wolfgang Ostwald 称为“被忽视的尺寸世界”。然而这个尺寸却是宏微过渡的尺寸、宏微联系的尺寸,也是界面和表面作用的尺寸。在这个尺寸量级,涉及许多生产和生活中的问题。界面的连接,表面的吸附,界面的黏附,机械的润滑、摩擦、磨损,表面的污染和清洗,表面的腐蚀等,都与这个尺度的作用有关。特别是当机械、结构本身的尺寸都微小化到这个量级的时候,其不同物质的“相”或“态”的相互作用就更加显著了。因此,这个尺度的问题是值得研究并深入认识的问题。

毛细作用由于源于微观分子间力的作用,而又表现为宏观肉眼可见的现象,因此其跨越的尺度很大。传统的毛细理论多是基于宏观唯象学的研究,如热力学理论、能量理论、流体力学理论等,即使涉及微观也仅是从定性的角度探索一些很微观的分子力对毛细现象机理的影响,很少涉及微纳米尺度的量级。然而由于毛细作用本身涉及气、液、固三种“相”和“态”,同时又是以表面、界面作用为主,因此其作用对微纳米尺度而言是很强的。从这个角度讲,毛细现象及毛细作用既有重新认识的需要,也有深入研究的必要。本书正是从这个角度出发来撰写的。

全书共分十一章。按照由浅入深,由基础到应用,由概念到模型,由理论到实践,由传统到现代来编排各部分内容。第一章概述了一般的毛细现象及其作用,以及对微机电系统的作用和影响,并简单回顾了毛细力学的发展历程。第二章介绍了一些最基本的概念。第三章重点介绍了有关表面张力和界面张力的基本概念、影响因素、测量方法等。第四章主要介绍了润湿及接

触角的一些概念、特性及测量方法。第五章给出了 Young-Laplace 方程的推导及其在几个方面的应用。第六章集中介绍了 Kelvin 方程的由来及其在人工降雨及毛细孔凝结中的应用。第七章介绍了表面张力梯度的概念及其作用,并重点介绍了 Marangoni 效应的机理及其若干方面的应用。第八章以 Hagen-Poiseuille 方程为基础,介绍了有关毛细流动的一些规律和分析方法。第九章集中描述了液桥的概念及其作用。第十章给出了毛细力学在微机电系统中几个具有代表性的应用方面。第十一章介绍了毛细波的概念和初步分析。

由于科研工作的需要,近年来作者在毛细作用方面做了许多探索,特别是在微机电系统中的毛细作用更是作者致力并试图解决的问题。本书的撰写结合了许多自身的研究。但由于毛细现象和作用的研究历史很长,人们日常生活中又都很熟悉,可时至今日又没有一本关于毛细力学的专门书籍,因此作者查阅了许多的文献,历经近两年多的努力来撰写这部书籍。然而由于作者所了解和熟悉的专业范围毕竟有限,对问题的认识可能并不深入,总结和描述的也不一定很准确,疏漏之处在所难免,在此恳请广大读者不吝赐教。

除本书作者外,参加本书编写的还有金磊副研究员、史继涛博士、梁新建博士、杜井庆博士、王栋博士、肖星硕士、卢秀娟硕士、宁展硕士、赵弘硕士、罗创硕士、付德义硕士、牛少华博士等,他们不仅仅提供了不少的资料,还参与了相关章节的修改,特别是史继涛博士自始至终一直参与书稿的整理和修改工作。在此一并表示感谢。

本书的出版有赖于相关项目的支持,作者感谢相关领导和专家们的鼎力支持。

作者参考了许多相关的文献和资料,除列举的参考文献外,作者还参考了诸如 Wikipedia、baidu 等数据库的资料,对这些文献和资料的作者也表示感谢。

作者

2009年11月

## 主要符号说明

### 物理常量

$c$	光速
$k$	Eötvös 常数
$N_A$	阿伏伽德罗常量
$Ma$	Marangoni 数

### 本书中的通用变量

$R/r$	半径
$A$	润湿表面面积
$l$	板的宽度
$D$	球体直径
$h$	高度
$C$	为固体板和液体接触的线的长度
$d$	板间距
$\zeta$	液桥深宽比
$\gamma$	表面张力
$\lambda$	波长
$g$	重力加速度
$m$	质量

### 热力学变量

$T$	系统的热力学温度
$U$	系统的内能
$S$	系统的熵
$G$	Gibbs 自由能
$H$	系统的焓
$p$	系统的压力

$V$	系统的体积
$M$	摩尔质量
$\rho$	密度
$T_c$	临界温度
$\rho_l$	液体的液相密度
$\rho_0$	气相密度
$S_m$	单组分体系的摩尔熵
$\mu$	化学势
$V_m$	单组分理想气体体积
$C_{vdw}$	van der Waals 分子对作用势系数
$C_{orient}$	Keesom 分子对取向作用势系数
$C_{ind}$	Debye 分子对诱导作用势系数
$C_{disp}$	London 分子对色散作用势系数
$A$	Helmholtz 自由能
$W_c$	内聚功(能)
$W_a$	黏附功(能)
$G_m$	摩尔 Gibbs 自由能

### 毛细动力学变量

$f_s$	表面张力合力
$\theta$	接触角
$F_b$	固体板的浮力
$\gamma_c$	固体的临界表面张力
$\theta^*$	表观接触角
$\gamma_i$	表面粗糙度比
$\theta_a$	前进接触角
$\theta_r$	后退接触角

$\varepsilon$ 滑动系数	$\bar{v}$ 平均流速
$\delta\xi$ 虚位移	$r_k$ Kelvin 半径
$\delta W$ 虚功	$F_{\text{cap}}$ 毛细驱动压力
$V_g$ 重力引起的重力势能	$F_{\text{visco}}$ 毛细管侧壁的黏性阻力
$V_{\text{st}}$ 表面张力引起的表面自由能	$F_{\text{grav}}$ 流体自身的重力
$M$ 摩尔质量	$R^*$ 弯曲液面的曲率半径
	$F$ 毛细驱动力
<b>流体力学变量</b>	$F_{\text{vis}}$ 线黏弹性力
$\eta$ 液体黏度	
$v$ 流体的速度	<b>微分算子</b>
$P$ 流体的压力	$\nabla$ 哈密尔顿算子
$\tau$ 黏性流体内摩擦剪力	$\nabla^2$ 拉普拉斯算子
$F_{\text{visco}}$ 毛细管侧壁总的黏性阻力	

# 目 录

## 前言

## 主要符号说明

绪论 .....	1
<b>第一章 毛细现象与毛细作用 .....</b>	<b>4</b>
1.1 毛细现象与作用 .....	4
1.2 微/纳机电系统中的毛细作用 .....	6
1.3 毛细力学的发展历程 .....	9
<b>第二章 基本概念 .....</b>	<b>15</b>
2.1 物态与相 .....	15
2.1.1 物态 .....	15
2.1.2 相 .....	16
2.2 表面、界面与本体 .....	17
2.2.1 表面、界面及本体 .....	17
2.2.2 界面的特性 .....	17
2.3 表面自由能 .....	18
2.4 界面自由能和界面张力 .....	21
2.5 内聚与黏附 .....	22
2.6 界面层及表面力 .....	23
2.7 化学势 .....	24
2.7.1 化学势的概念 .....	24
2.7.2 化学势与温度压力的关系 .....	27
2.7.3 化学势在相变中的应用 .....	28
2.7.4 理想气体化学势 .....	29
<b>第三章 表面张力及界面张力 .....</b>	<b>30</b>
3.1 表面张力的概念 .....	30
3.2 表面(界面)自由能(表(界)面张力)的分子论含义 .....	32
3.3 界面张力的概念 .....	34
3.4 影响张力的因素 .....	35



3.4.1	物质种类对表面张力的影响 .....	35
3.4.2	界面的影响 .....	36
3.4.3	温度对表面张力的影响 .....	37
3.4.4	密度对表面张力的影响 .....	39
3.4.5	压力对表面张力的影响 .....	39
3.5	液体的表面、界面张力的测量方法 .....	39
3.5.1	毛细管上升法 .....	40
3.5.2	Du Noüy 环法 .....	40
3.5.3	气泡最大压力法 .....	43
3.5.4	Wilhelmy 板法 .....	44
3.5.5	用滴重计法测量液体的表面张力 .....	45
3.6	测定固体表面张力的方法 .....	47
3.6.1	临界表面张力测定法 .....	47
3.6.2	利用高聚物液体或熔体的表面张力与温度的关系求固体表面 张力 .....	48
3.6.3	估算法 .....	49
3.7	基于 ZYW-200B 微控全自动界面张力仪测表面张力实例 .....	49
3.7.1	结构和工作原理 .....	49
3.7.2	试验前的准备工作 .....	50
3.7.3	仪器的校验 .....	51
3.7.4	液体的表面张力和界面张力的测量 .....	51
3.7.5	对实际张力的校正 .....	53
3.7.6	注意事项 .....	53
3.8	液体的弹性——液体拉伸虎克定律 .....	54
3.8.1	拉伸过程的线性特征 .....	54
3.8.2	拉伸过程的可恢复性 .....	55
3.8.3	液体单位面积的最大拉力与面积无关 .....	57
3.8.4	液体拉伸的虎克定律 .....	58
<b>第四章</b>	<b>接触角与润湿 .....</b>	<b>60</b>
4.1	基本概念 .....	60
4.1.1	接触角 .....	60
4.1.2	润湿的概念 .....	61

4.1.3	润湿现象的微观解释 .....	63
4.2	影响接触角的因素 .....	64
4.2.1	表面粗糙度对接触角的影响 .....	65
4.2.2	表面材料组成对接触角的影响 .....	65
4.2.3	接触角随温度的变化 .....	66
4.3	接触角滞后现象及影响因素 .....	66
4.3.1	表面粗糙度的影响 .....	66
4.3.2	表面污染的影响 .....	67
4.3.3	固体表面上淀积物的影响 .....	67
4.4	三相线的力学平衡关系及 Young 方程 .....	67
4.5	润湿的类型 .....	69
4.5.1	沾湿 .....	69
4.5.2	浸湿 .....	70
4.5.3	铺展 .....	71
4.6	接触角的测量原理或方法 .....	73
4.6.1	测高法测量接触角原理 .....	73
4.6.2	量角法测量接触角的原理 .....	74
4.6.3	镜面反射法 .....	75
4.6.4	平行光束法 .....	76
4.6.5	毛细管上升下降法来推算接触角 .....	76
4.6.6	测力法测量接触角的原理 .....	77
4.7	基于量角法原理的接触角测定仪测量方法 .....	78
4.7.1	JYSP—180 接触角测定仪结构组成 .....	78
4.7.2	仪器的安装和使用 .....	78
<b>第五章</b>	<b>Young-Laplace 方程及应用</b> .....	<b>82</b>
5.1	Young-Laplace 方程 .....	82
5.2	毛细管中的液体高度的 Jurin 准则 .....	87
5.3	两板间的液桥力 .....	88
5.4	水流散落成水珠 .....	88
<b>第六章</b>	<b>Kelvin 方程及应用</b> .....	<b>91</b>
6.1	Kelvin 方程 .....	91
6.2	Kelvin 方程的应用 .....	95

6.2.1	毛细孔凝结	95
6.2.2	人工降雨	96
6.2.3	弯月形半径的计算	96
6.3	亚稳定状态和新相的生成	97
6.3.1	过饱和蒸气	97
6.3.2	过热液体	97
6.3.3	过冷液体	98
6.3.4	过饱和溶液	98
<b>第七章</b>	<b>表面张力梯度与 Marangoni 效应</b>	<b>99</b>
7.1	表面张力梯度	99
7.2	Marangoni 效应	100
7.3	Marangoni 效应对几种现象的解释	101
7.3.1	肥皂泡	101
7.3.2	Tears of wine(酒泪)	102
7.3.3	湿法工艺中的硅片干燥	103
7.4	Marangoni 对流	104
7.5	Marangoni 对流的流态	106
7.5.1	层流流态	106
7.5.2	振荡流态	107
7.6	Marangoni 效应研究方法	108
7.6.1	线性分析方法	109
7.6.2	非线性分析方法	110
7.6.3	数值计算	111
7.6.4	Marangoni 对流流场的显示	111
7.6.5	间接测量方法	112
7.7	Marangoni 对流的理论分析综述	114
<b>第八章</b>	<b>毛细动力学</b>	<b>115</b>
8.1	Hagen-Poiseuille 方程	115
8.2	毛细流动的速率	116
8.3	毛细动力学方程	121
8.4	毛细流动过程及阶段划分	123
8.4.1	毛细流动过程的不同阶段	123

---

8.4.2 不同作用阶段的划分 .....	125
<b>第九章 液桥的概念及其作用 .....</b>	<b>128</b>
9.1 液桥概念 .....	128
9.2 液桥的形成 .....	128
9.3 液桥力 .....	130
9.3.1 液桥力的概念 .....	130
9.3.2 液桥力的形成机理 .....	131
9.3.3 液桥力的分析模型 .....	132
9.3.4 液桥系统的总自由能 .....	136
9.4 液桥气液分界面的解——Young-Laplace 方程 .....	138
9.5 液桥系统中上层固体的液桥作用力 .....	138
9.5.1 固定湿面的求解 .....	138
9.5.2 恒量液体近似解 .....	140
9.5.3 大间距的精确解 .....	141
9.5.4 大间距球面液桥系统的精确求解 .....	144
9.5.5 液桥的边缘效应 .....	148
<b>第十章 微机电系统与毛细作用 .....</b>	<b>151</b>
10.1 微机械加工中的毛细作用 .....	151
10.1.1 MEMS 中的毛细黏附 .....	152
10.1.2 毛细黏附的控制 .....	154
10.2 毛细作用驱动的 MEMS 流体自组装 .....	156
10.3 平行板结构在毛细力作用下的动态特性 .....	159
<b>第十一章 毛细波 .....</b>	<b>164</b>
11.1 毛细波现象 .....	164
11.2 自由表面波的色散关系 .....	165
11.3 自由表面波的特性分析及毛细波的概念 .....	169
<b>参考文献 .....</b>	<b>172</b>

## 绪 论

毛细力学很古老。早在 13 世纪人们就提出了毛细血管的概念,并从血液循环的角度试图认识毛细作用的规律。

毛细力学也很现代。直到当今的 21 世纪,人们还在不断地探索不同领域中的毛细作用,如微/纳米领域的毛细作用、表面科学中的毛细作用等。

毛细力学很传统。该门科学几乎是和传统的牛顿力学同时代诞生,并随传统的牛顿力学一同发展起来的,许多规律也都是以牛顿力学为基础的。

毛细力学也很时尚。当代的许多新型交叉学科或者从毛细力学衍生而出,或者与毛细力学紧密关联,如纳米科学、微机电系统科学、材料科学、界面化学等,都是与毛细力学紧密关联的。

毛细力学的最基本原理很简单也很浅显。毛细力学的最基础的概念就是表面张力,或表面自由能;毛细现象的解释也多是表面张力或表面自由能为基础的。

毛细力学的规律却又极其复杂深奥。由于决定表面张力或表面自由能特性的是分子层面的作用力。由于一对分子之间的作用规律就已经很复杂,而需要探讨一群分子间的相互作用,无论是从非矢量的能量角度还是从矢量的力的角度,都极其复杂。不仅物理作用上极为复杂,而且数学形式上也极为复杂。即使从唯象学的角度看,一个一般形态的物质的作用,其规律也很复杂。

毛细现象很普通也很寻常。将一个较细的玻璃管插到诸如水的液体中,就会看到液体在玻璃管中上升;用吸管蘸上肥皂液就会吹出色彩斑斓的气泡。孩子们都可以做这样的实验。

毛细现象却又蕴含着极其丰富的科学道理。小到灯芯吸油的燃烧、海绵的吸水,大到农作物植物的生长、水土的保持、天文气象中的人工降雨,无一不涉及基本的毛细作用。

毛细作用很微观。其作用机理属分子间力的作用,而分子仅在 0.1nm 的尺寸量级,分子间距也仅在 0.1nm 量级,因此其作用的起源均属微观的作用。

毛细作用却又很宏观。毛细的微观作用所引起的毛细现象是很宏观的,

有的虽然速度缓慢,但累积的效果是宏观肉眼可见的;而有的毛细现象,其宏观速度本身就是挺快的,护士扎指血时,可用肉眼清晰地看到血液在细试管中以较快的速度运动。

毛细作用很微小。液体只有在很细的管中才能呈现出毛细上升的现象,而且一般情况下其上升的速度也很缓慢。

毛细作用却也很宏大。所谓山有多高水有多深,靠的就是毛细力的作用。大地滋润万物生长靠的也是毛细的作用,山云蒸气、化云为雨借助的也是毛细作用。

毛细现象常被日常人们所利用。擦汗的纸巾、吸汗的灯芯绒运动衫、擦地的海绵,无不利用的是毛细作用。

毛细现象也更受到古今大科学家所关注。文艺复兴时期的达·芬奇(Leonardo da Vinci)关注过毛细现象,牛顿(Sir Isaac Newton)研究过毛细现象,杨(Thomas Young)和拉普拉斯(Pierre Simon Laplace)更是推动了毛细力学的发展。除此以外,高斯(C. F. Gauss)、伯努利(Johann Bernoulli)、泊松(Simeon Denis Poisson)也为毛细力学的发展作过许多贡献。汤姆森(James Thomson)、马拉高尼(Marangoni)等更是进一步发展了毛细力学。而开尔文(Lord Kelvin)等对毛细力学的发展更具有划时代的推动作用。不仅如此,就连近代最伟大的物理学家爱因斯坦(Albert Einstein)的第一篇论文也是通过研究并利用毛细现象来探讨物理问题的。

毛细现象及作用之所以备受古今中外科学家的关注,其理由有很多种。上述的特点也是其理由的一部分,但以下的四种理由是最根本的。理由之一,它是物理宏微作用的纽带和桥梁。毛细现象是微观作用及宏观表征的统一体。由于前几个世纪科技水平的有限,人们还无法直接观测到微观的现象,特别是分子级的作用还无法从物理的角度测量出来。但由于毛细的宏观现象是可以肉眼观察的,因此通过毛细现象的宏观观察和测量,可以间接认识到微观物质世界的规律。理由之二,它同时涉及物质的不同形态,无论是从“相”的角度或是“态”的角度,物质世界的气、液、固,它都会同时涉及,因此它既具有典型性和代表性,同时也具有反映世界物质,特别是物体构成的一般性。理由之三,毛细作用的核心是界面的作用。界面相对本体来讲,既具有阶跃性和突变性,同时也是具有过渡性和连续性。因此其作用规律相对比较复杂。有稳定的趋势,也有不稳定的趋势,有物理层面的作用,也有化学层面的作用。因此毛细现象的研究直接催生了近代的界面科学和表面科学,它

是连接、润滑、摩擦、清洗、磨损、黏附、吸附等科学技术的基础。理由之四,毛细现象广泛存在于自然界和人们日常生产生活的实际中,而其深层次的原理又很复杂和深奥。普遍性决定了人们的关注,复杂性和深奥性吸引了科学家们的眼球。

综上所述,毛细现象一直受到人们的关注,毛细作用也一直受到科学家的关注,可是很遗憾,毛细力学却一直未形成一门独立的学科,近代只是热力学和流体力学的一个分支,现代也只是表面科学中的部分内容。

然而,在新的 21 世纪,微/纳米科技异军突起,受到全世界的关注,世界各主要国家均把微/纳米科技当作在未来最有可能取得突破的科学和工程领域。微/纳米科技的兴起,空前提高了人类对微/纳米世界的认知兴趣、认知水平和操纵欲望。微/纳机电技术不断的发展,微/纳机械结构不断的微小化,促使人们不断地探索深层次的问题,毛细力学也因此焕发了新的生机。

随着制造技术水平的提高,研究对象尺度不断缩小,材料或结构的表面积与体积之比相对增加,表面力(或界面力)相对于体积力的重要性大大增强,从而使毛细作用的重要性也大大增加。毛细作用在微米尺度下的重要性已是不争的事实,在纳米尺度下的重要性当然更不待言。

在微/纳米尺度下,毛细作用是一把双刃剑。一方面它具有极大的可利用性,例如人们可利用毛细作用进行“毛细浇注”,制作“分子吸管”、“纳米试管”,还可进行微器件的自组装等。毛细作用已成功用于微流体操作器中流体流动的导引和控制,人们自然期望它在纳米尺度流体操作器中也发挥更强的作用。但另一方面,在微/纳米尺度下,毛细作用又会带来很多不得不面对的不利难题,如毛细黏附作用会导致微机电系统(MEMS)活动部分之间“黏着”甚至“失效”,对纳机电系统(NEMS)活动部分之间“黏着”甚至“失效”会更严重。

正是在不断的探索过程中,人们发现毛细力学对微/纳机械结构的性能影响格外突出,于是微/纳米尺度毛细作用研究受到极大重视。然而,人们对毛细力学的认知水平还很有限,对很多重要的问题尚缺乏足够的认识,不少深层次的问题并没有得到很好的解决。为了更好地促进对毛细作用的研究,毛细力学有必要也应该成为一门相对独立的科学,并与微纳技术与科学的发展相结合,形成现代意义上的一个研究领域,焕发新的生机。

# 第一章 毛细现象与毛细作用

毛细现象是自然界中一种常见的物理现象。古语云：“山云蒸，柱础润”，“础润而雨”，说的就是自然界中的毛细现象。础石是多孔性材料，当空气湿度很大时，空气中含有大量水分，由于毛细凝结会使础石潮湿，从而可以作为将要下雨的预示。

## 1.1 毛细现象与作用

为了更好地认识和了解毛细现象，我们先看两种有意思的现象。

在洁净的玻璃板上放一滴水银，它能够滚来滚去而不附着在玻璃板上。把一块洁净的玻璃板浸入水银里再取出来，玻璃上也不附着水银。这种液体不附着在固体表面上的现象叫做不润湿。对玻璃来说，水银是不润湿液体。

在洁净的玻璃上放一滴水，它会附着在玻璃板上形成薄层。把一块洁净的玻璃片浸入水中再取出来，玻璃的表面会沾上一层水。这种液体附着在固体表面上的现象叫做润湿。对玻璃来说，水是润湿液体。

同一种液体，对一种固体来说是润湿的，对另一种固体来说可能是不润湿的。水能润湿玻璃，但不能润湿石蜡。水银不能润湿玻璃，但能润湿锌。

将极细的玻璃管插入水中时，可以看到，管子里的水面会升高，管子的内径越小，水面升得越高(图 1.1(a)，其中，字符  $s$  代表固体， $l$  代表液体， $v$  代表气体，下文同)。如果将这些玻璃管插入水银中，情形正好相反，管子里的水银会降低，而且管的内径越小，水银面降得越低(图 1.1(b))。这种润湿管壁的液体在细管里升高，而不润湿管壁的液体在细管里降低的现象，称为毛细现象。能够产生明显毛细现象的管叫做毛细管，如纸张、灯芯、纱布、土壤以及植物的根茎等都有毛细管。毛细管内的液面将呈凹形或凸形的弯月面。当液体与构成毛细管的固体材料润湿时，管中液面升高并呈凹状；当液体与毛细管材料不润湿时，管中液面下降并呈凸状。

在生产和日常生活中也有许多毛细现象的例子。含有许多毛细管的“上水石”，可以作为盆景的假山，正是靠毛细上升的现象，可使假山上的植物得



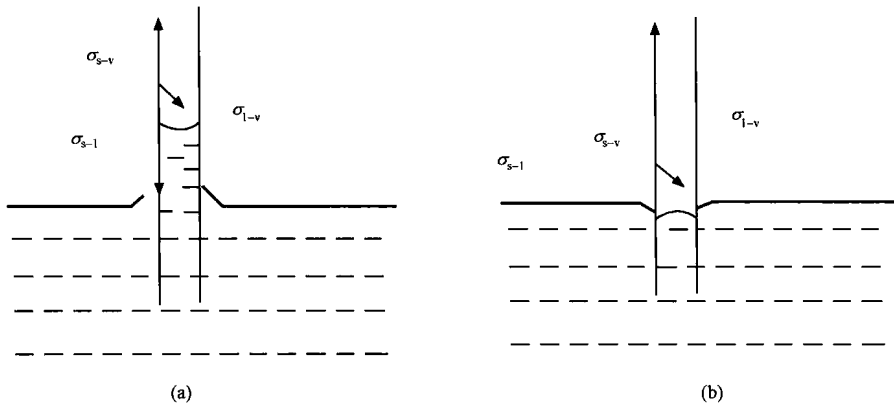


图 1.1 毛细管插入液体中

到水分。植物根茎内的导管就是植物体内极细的毛细管，植物之所以能够通过根茎把土壤中的水和养分吸收到机体中来，很重要的原因就是凭借机体中的毛细管和毛细作用。润滑油通过空隙进入机器部件中去润滑机器，靠的也是毛细作用。大量多孔性的固体材料，如砖块、纸张、纺织品、粉笔等能够吸水，也是因为在这些物体中有许多细小的孔道，起着毛细管的作用，从而产生毛细现象。

在水利领域，由于毛细作用，地下水可从湿的区域向干燥的区域流动，从而为作物的生长提供有力的水源。纸巾通过毛细作用吸收液体，从而把物体表面上的液体擦干。海绵的每一个小孔都相当于一个毛细管，从而可以吸收大量的液体。老式的灯芯绒运动衫利用毛细作用，把运动员皮肤上的汗吸干，所利用的正是灯芯绒毛细作用的原理。

有些情况下毛细作用是有害的。例如，建筑房屋的时候，在夯实的地基中毛细管又多又细，它们会把土壤中的水分引上来，使得室内潮湿。建房时在地基上面铺油毡，就是为了防止毛细现象造成的潮湿。水沿毛细管上升的现象，对农业生产的不利影响也很大。土壤里有很多毛细管，地下的水分经常沿着这些毛细管上升到地面而蒸发掉。如果要保存地下的水分，就应当疏松地面的土壤，破坏土壤表层的毛细管，以减少水分的蒸发。

然而任何事物都是相对的和一分为二的，有人就试图将这种有害的作用化为有益的工具。一个由巴黎大学、ESPCI 大学和 École 综合理工大学组成的团队合作小组，就试图利用毛细现象来弯曲微型平板并形成三维形状。其过程是将很薄的硅树脂切割成花朵、三角、方形等不同的形状，然后把一滴水