

# 非饱和土力学试验技术

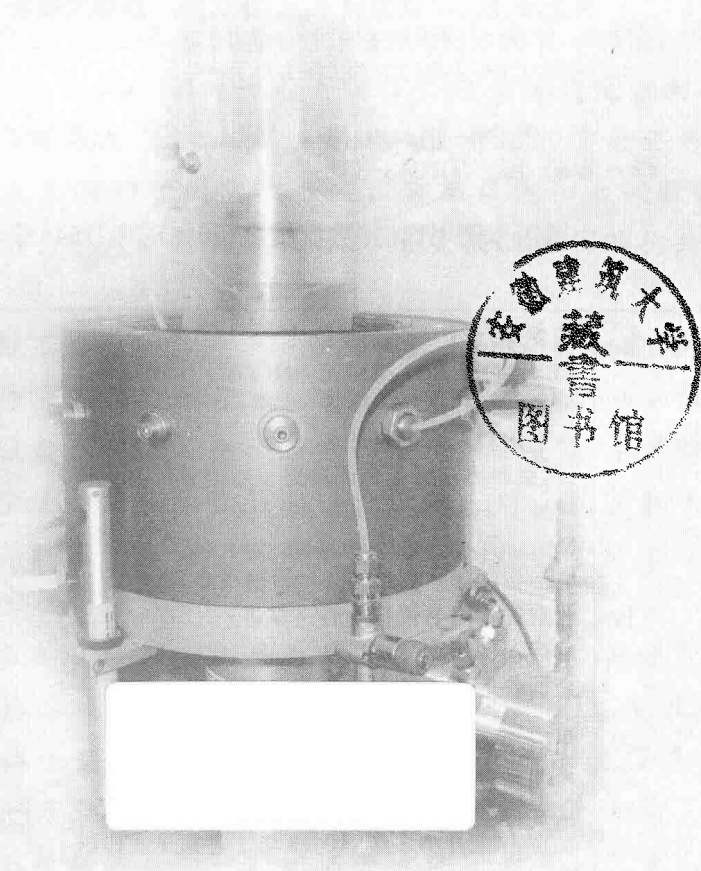
孙文静 孙德安 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 非饱和土力学试验技术

孙文静 孙德安 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书在分析非饱和土特性的基础上,详细地阐述了非饱和土力学相关试验的原理、试验仪器、试验操作步骤和关键技术问题;同时提供了丰富、详细的试验实例,对从事非饱和土力学研究的读者具有宝贵的参考价值。

本书系统介绍了非饱和土力学相关试验,全书共有4章内容,分别为吸力量测及控制技术、非饱和土渗透试验、非饱和土变形试验和非饱和土强度试验。

本书可作为高等院校和科研院所从事非饱和土力学研究的教师、科研人员和研究生教学及科研用书,也可作为岩土工程设计、施工和管理人员及仪器研发人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

非饱和土力学试验技术 / 孙文静, 孙德安编著. —  
北京: 中国水利水电出版社, 2018. 1  
ISBN 978-7-5170-6300-1

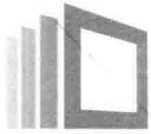
I. ①非… II. ①孙… ②孙… III. ①非饱和—土力学—实验 IV. ①TU43-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第021548号

书 名	非饱和土力学试验技术
作 者	FEIBAOHETU LIXUE SHIYAN JISHU 孙文静 孙德安 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.25印张 267千字
版 次	2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



非饱和土的分布十分广泛，与基础设施建设紧密相关的天然地表土几乎都是非饱和土，如土石坝、路基和机场跑道等压实土都处于非饱和状态，存在湿化变形、湿陷变形或胀缩变形等工程病害。此外，能源开发和环境保护领域也与非饱和土密切相关，如深层地热开发、页岩气开采、地下储油（气）库、CO<sub>2</sub>地质封存、垃圾填埋场、高放射性核废物深层地质处置等工程，也存在着热-水-力-化学耦合条件下土体的长期性能问题，都亟待非饱和土的理论 and 试验去解决。

非饱和土中，固-液-气三相之间的相互作用，使得土体的力学行为更加复杂多变。外部气候的变动亦极大地影响了非饱和土体的工程特性。通过室内试验研究并模拟非饱和土的力学行为成为该学科的主要研究方向之一。因此，发展非饱和土力学试验原理和测试方法是现代土力学的重要任务。非饱和土试验是研究非饱和土工程特性的重要手段，借助非饱和土试验仪器和装置，揭示非饱和土的变形、强度、渗透、土水特性及微观结构演化规律具有重大的意义。

本书系统地介绍了非饱和土力学试验相关原理、方法和实例，全书共有4章内容，分别为吸力量测及控制技术、非饱和土渗透试验、非饱和土变形试验和非饱和土强度试验。在深入分析非饱和土特性的基础上，详细地阐述了非饱和土的试验原理及所用试验仪器和试验步骤，对试验过程中的关键技术问题进行了归纳，并给出了丰富、详细的试验实例，其中许多实例具有较高的参考价值。

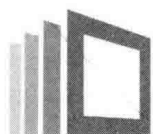
本书是作者对多年从事非饱和土力学理论和试验研究的总结，编写过程中得到法国国立路桥学校崔玉军教授的指导，也得到上海大学秦爱芳教授、蒋纯老师和王叶娇博士的鼓励和帮助，在此对他们表示衷心的感谢。同时，还要衷心感谢温州大学余闯教授，三峡大学谈云志教授，南京大学唐朝生教授，中科院武汉岩土所杨典森教授，同济大学陈永贵教授，中国矿业大学刘江峰副教授，东南大学翟钱副教授，美国密苏里科技大学张雄副教授，华北水利水电大学张俊然博士，同济大学贺勇博士、张峰博士、秦鹏举博士，浙江大学王瀚霖博士，法国国立路桥学校安妮博士等，感谢他们提出宝贵的修

改建议；感谢博士研究生李明玉、高游、硕士研究生韦广、刘珂、刘成、刘孝阳、刘仕卿、宗飞跃和陈超参与本书稿的编排和校对。书中引用了国内外有关非饱和土力学试验的一些工程实例和试验方法，文献引用如有遗漏敬请包涵。本书的出版得到了“国家自然科学基金（No.41572284）”的资助，在此表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，本书虽经多次修改和勘误，仍难免有表述不当和纰漏之处，恳请读者和同行提出建设性的意见，以便再版时修订。

作者

2017年11月



## 前言

第 1 章 吸力量测及控制技术	1
1.1 非饱和土中吸力的概念	1
1.2 基质吸力直接量测	5
1.2.1 张力计法	5
1.2.1.1 张力计的原理	6
1.2.1.2 张力计的使用方法	6
1.2.1.3 张力计存在的问题	7
1.2.1.4 高量程张力计	7
1.2.2 高含水率土体基质吸力测试	9
1.2.2.1 装样及测试步骤	10
1.2.2.2 高含水率土体基质吸力量测试验实例	11
1.3 吸力间接量测	12
1.3.1 基质吸力的间接量测	12
1.3.1.1 热传导传感器法	12
1.3.1.2 电导率传感器法	14
1.3.1.3 时域反射计法	15
1.3.1.4 介电常数计法	17
1.3.2 滤纸法	17
1.3.2.1 滤纸法率定曲线	18
1.3.2.2 实验仪器、材料	20
1.3.2.3 试验步骤	20
1.3.2.4 滤纸法量测吸力试验实例	21
1.3.2.5 滤纸法存在的问题	23
1.3.3 湿度计法	23
1.3.3.1 热电偶湿度计法	23
1.3.3.2 晶体管湿度计法	25
1.3.3.3 冷镜露点湿度计法	26
1.3.4 挤液法	29
1.4 吸力控制技术	29
1.4.1 轴平移控制技术	29

1.4.1.1	实验原理	31
1.4.1.2	仪器及操作步骤简介	33
1.4.1.3	轴平移技术的应用	36
1.4.2	半渗透控制技术	38
1.4.2.1	实验原理	39
1.4.2.2	实验仪器及材料	41
1.4.2.3	渗析法试验步骤	41
1.4.2.4	关键技术问题	43
1.4.2.5	渗析法试验实例	43
1.4.3	相对湿度控制技术	44
1.4.3.1	实验原理	44
1.4.3.2	实验仪器、材料及步骤	45
1.4.3.3	关键技术问题	46
1.4.3.4	相对湿度控制吸力试验实例	46
<b>第2章</b>	<b>非饱和土渗透试验</b>	<b>49</b>
2.1	非饱和土中水和气的运移规律	49
2.2	液体在土体中的流动及测试	50
2.2.1	水相流动定律	50
2.2.2	稳态法测定水相渗透系数	53
2.2.2.1	实验原理	53
2.2.2.2	试验装置及试验步骤	55
2.2.2.3	稳态法测定非饱和土水相渗透系数的试验实例	57
2.2.2.4	存在的问题	59
2.2.3	非稳态法测定水相渗透系数	59
2.2.3.1	瞬时截面法的实验原理	59
2.2.3.2	瞬时截面法的试验步骤	60
2.2.3.3	瞬时截面法量测非饱和土水相渗透系数的试验实例	60
2.3	气体在土体中的流动及测试	64
2.3.1	空气流动定律	64
2.3.2	非饱和土渗气特性的测定	66
2.3.2.1	侧限条件下的渗气试验	67
2.3.2.2	三轴渗气试验	69
2.3.3	渗气试验存在的问题	73
<b>第3章</b>	<b>非饱和土变形试验</b>	<b>74</b>
3.1	压缩试验	74
3.1.1	概述	74
3.1.2	非饱和土压缩仪	75

3.1.2.1	轴平移技术控制吸力的非饱和土压缩仪	75
3.1.2.2	半渗透技术控制吸力的非饱和土压缩仪	79
3.1.2.3	相对湿度技术控制吸力的非饱和土压缩仪	80
3.1.3	试验过程	81
3.1.4	关键技术问题	82
3.1.5	恒定吸力下压缩试验实例	83
3.2	浸润膨胀试验	83
3.2.1	概述	83
3.2.2	浸润膨胀试验分类	84
3.2.2.1	按吸力控制与否划分	84
3.2.2.2	按体积变化与否划分	87
3.2.3	浸润膨胀试验实例	90
3.2.3.1	不控制吸力的膨胀变形试验	90
3.2.3.2	不控制吸力的膨胀力试验	92
3.2.3.3	吸力控制的膨胀变形试验	93
3.2.3.4	吸力控制的膨胀力试验	94
3.3	干燥收缩试验	96
3.3.1	土体宏观收缩裂隙	97
3.3.1.1	收缩裂隙与土体中的水分蒸发	97
3.3.1.2	收缩裂隙与土体的吸力和抗拉强度	97
3.3.1.3	收缩裂隙与土体的干燥收缩性	98
3.3.2	均匀收缩体内部干化裂隙	100
3.3.2.1	土样的制备方法	100
3.3.2.2	含水率、孔隙比及微观孔隙的测试	100
3.3.2.3	收缩曲线	101
3.3.2.4	干化过程中微观测试结果及分析	101
3.4	干湿循环试验	105
3.4.1	概述	105
3.4.2	干湿循环试验的分类	106
3.4.3	干湿循环试验实例	107
3.4.3.1	常规的干化-湿化循环试验	107
3.4.3.2	控制吸力下的干湿循环试验	108
<b>第4章</b>	<b>非饱和土强度试验</b>	<b>113</b>
4.1	非饱和土直剪试验	114
4.1.1	概述	114
4.1.2	典型的非饱和土直剪仪	115
4.1.3	常见的非饱和土直剪试验	119



4.1.3.1	吸力控制的非饱和土直剪试验 .....	119
4.1.3.2	不控制吸力的非饱和土直剪试验 .....	122
4.1.3.3	剪切-浸水试验 .....	125
4.2	非饱和土三轴试验 .....	127
4.2.1	概述 .....	127
4.2.2	体变量测方法 .....	129
4.2.2.1	双压力室体变量测 .....	129
4.2.2.2	单压力室体变量测 .....	132
4.2.3	非饱和土三轴试验前的准备工作 .....	138
4.2.4	常见非饱和土三轴试验类型与试验结果简介 .....	140
4.2.4.1	等吸力的三轴剪切试验 .....	141
4.2.4.2	控制净应力和吸力下的湿化试验 .....	143
4.2.4.3	常含水率下等向压缩试验和三轴剪切试验 .....	146
附录 A	不规则形状土样体积量测方法——油封法 .....	148
附录 B	压汞测试方法 .....	151
参考文献	.....	157

# 第 1 章 吸力量测及控制技术

天然地表土通常处于非饱和状态，特别在干旱及半干旱地区。非饱和土材料广泛应用于路基、建筑物地基、垃圾填埋场和核废料深层地质处置等工程领域。非饱和土的工程性质研究已成为土力学的主要研究方向之一（Fredlund 和 Rahardjo, 1993）。

非饱和土材料在受外荷载、降水渗透、地下水毛细作用后，其工程性质，尤其是土-水特性均会发生变化。同时，在非饱和土应力应变关系模拟中，非饱和土土-水特性的改变也会进一步影响土体变形、渗透及强度等特性。因此，研究非饱和土的水力特性尤为重要。非饱和土的土-水特性，即保水特性，通常用土-水特征曲线 SWRC（Soil - Water Retention Curve）来表示。土-水特征曲线是描述非饱和土吸力（ $s$ ）与湿度状态，如饱和度（ $S_r$ ）、质量含水率（ $w$ ）或体积含水率（ $\theta$ ）之间的关系曲线。土-水特征曲线与土的矿物成分、颗粒粗细和孔隙结构等因素有关。对于某一特定土样，在不考虑温度影响时，孔隙结构是影响土-水特征曲线的主要因素。土-水特征曲线在非饱和土力学的应用中发挥着重要作用，与非饱和土的渗流、体变和强度特性有着密切的关系。

## 1.1 非饱和土中吸力的概念

土体吸力是由许多物理和物理化学作用产生的作用力（Lu 和 Likos, 2004）。吸力在非饱和土力学中定义为应力状态变量，它在解释非饱和土的力学性状方面具有重要意义。核废料深层地质处置（Ye 等, 2013）、轨道交通沉降分析（罗军, 2010）、边坡分析（Ng 等, 2001）以及基坑开挖变形分析（廖红建和姬建, 2008）等岩土工程问题，都应用到吸力概念。

总吸力为土中水的全部自由能，它是与组成土中水溶液平衡的部分蒸汽压及与自由纯水平衡的部分蒸汽压之比，通过量测与土中水处于平衡的部分蒸汽压（相对于与自由纯水处于平衡的部分蒸汽压）而确定的等值吸力。土中总吸力（或土中水的自由能）与孔隙水的部分蒸汽压之间的热动力学关系可用式（1.1）表示（Aitchison 和 Richards, 1965），即：

$$\phi = \frac{RT\rho_w}{\omega_v} \ln\left(\frac{1}{RH}\right) \quad (1.1)$$

式中  $\phi$ ——总吸力，MPa；

$RH$ ——相对湿度， $RH = \bar{u}_v / \bar{u}_{v0}$ ，其中  $\bar{u}_v$  为土中孔隙水的部分蒸汽压，kPa， $\bar{u}_{v0}$  为在同一温度下，纯水平面上方的饱和蒸汽压，kPa；

$R$ ——通用气体常数， $R = 8.31432 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ；

$T$ ——绝对温度，K；



$\rho_w$ ——水的密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$w_v$ ——水蒸气的克分子量， $w_v = 18.016\text{g}/\text{mol}$ 。

非饱和土的土水势一般包括温度势、压力势、重力势、基质势和溶质势。在等温、等压、等高（不计重力）的情况下，土中水的温度势、压力势、重力势保持不变，自由能的变化只有基质势（基质吸力）和溶质势（溶质吸力）的变化。基质吸力（Matric Suction）与溶质吸力（Osmotic Suction）的和即此时土中水的自由能，称为总吸力（Total Suction）。

溶质吸力为土中水自由能的溶质部分（对溶剂），来源于溶质浓度。溶质的浓度越大，溶剂平面上方的蒸汽压比纯水平面上方的蒸汽压越小，即相对湿度越小，则水从高浓度梯度向低浓度梯度的渗透作用越强，溶质吸力越大。纯水表现出从溶液中吸水补充自己的能力，称为溶质吸力或渗透吸力。渗透吸力是通过量测与溶液（具有与土中水相同成分）处于平衡的部分蒸汽压（相对于与自由纯水处于平衡的部分蒸汽压）而确定的等值吸力。当孔隙水内的溶质浓度保持不变时，任何含水率所对应的渗透吸力约为一个常量（Lu 和 Likos, 2004）。

基质吸力通常与水的表面张力引起的毛细现象联系在一起，当土体处于相对较高含水率时，孔隙水主要以毛细水的形式存在，而毛细作用主要受土颗粒、孔隙结构以及孔隙尺寸分布等因素的影响（Lu 和 Likos, 2004；汪东林等，2009）。在说明基质吸力之前，需要先理解毛细管作用现象。

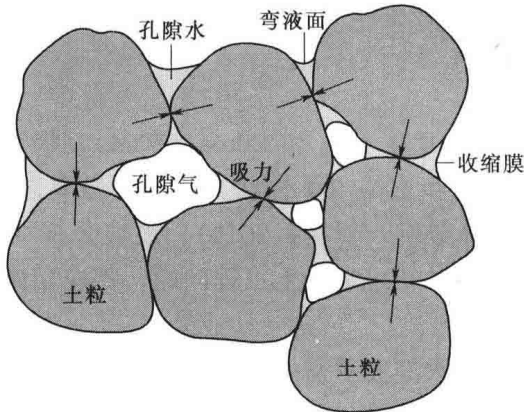


图 1.1 非饱和土中的四相组成

非饱和土是由固相（土粒）、液相（孔隙水）和气相（孔隙气）及收缩膜（水-气分界面）组成的四相体（Fredlund 和 Rahardjo, 1993），如图 1.1 所示。水和空气接触处有朝向水相弯的弯液面（Meniscus），说明水中的压力比孔隙气压力要低，如果孔隙气与大气连通，假定大气压为零，则水中的压力是负的。

非饱和土中颗粒无序排列形成了孔径不一的毛细通道。把毛细通道用半径为  $r$  的圆管代替，如图 1.2 (a) 所示。在水的表面张力作用下，水面可以上升到某一高度，产生毛细管作用（Capillary Effect）。

由表面张力  $T_s$  的垂直方向的分力与被吸引上来的水重量的平衡可得

$$h_c = \frac{2T_s \cos\theta}{\gamma_w r} \quad (1.2)$$

式中  $h_c$ ——毛细水上升高度；

$r$ ——毛细管的半径；

$\theta$ ——表面张力方向与毛细管壁的夹角；

$\gamma_w$ ——水的重度。

由式 (1.2) 可知，圆管半径  $r$  越小，水面上升高度  $h_c$  越大。

根据图 1.2 (b) 可推求出大气压力  $p_a$  与弯液面下面的水压力  $u_w$  及表面张力  $T_s$  的关系。取水膜为考察对象，根据竖直方向力的平衡可得

$$u_w = p_a - \frac{2T_s \cos\theta}{r} \quad (1.3)$$

由式 (1.3) 可知，由毛细管引起的水压  $u_w$  比大气压力  $p_a$  小。所以，若取大气压力等于零，受到毛细管作用的水，孔隙水压就为负值，在弯液面的顶部为  $-\gamma_w h_c$ ，如图 1.2 (c) 所示，毛细管水压力分布与地下水面以下的静水压力分布相连续，并呈同一直线分布。

由表面张力引起的大气压力  $p_a$  与孔隙水压  $u_w$  的差  $p_a - u_w = 2T_s \cos\theta / r$ ，结合式 (1.2) 可得

$$p_a - u_w = \frac{2T_s \cos\theta}{r} = \gamma_w h_c \quad (1.4)$$

根据式 (1.4) 得

$$u_w = p_a - \gamma_w h_c \quad (1.5)$$

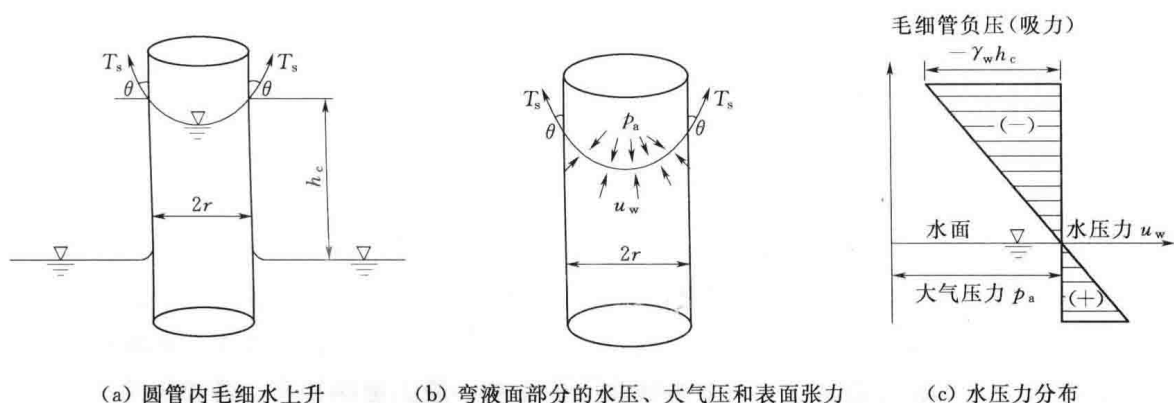


图 1.2 毛细管中毛细水上升和水压力分布 (松岗元, 2001)

在非饱和土内部，孔隙水积聚在土颗粒接触点附近的缝隙中，形成水的弯液面。与毛细管的机理相似，由于水表面张力的作用，水的内部压力（孔隙水压） $u_w$  比空气压力（孔隙中空气压力） $u_a$  要小。孔隙中空气压力  $u_a$  与孔隙水压  $u_w$  的差值即为基质吸力 (Matrix Suction)，用  $s$  表示。

基质吸力为土中水自由能的毛细部分（对纯水），来源于表面张力，它是由收缩膜分子之间的作用力而引起。表面张力越大，弯液面越小。为了维持弯曲型收缩膜的平衡，收缩膜气一侧的应力为正压力，收缩膜水一侧的应力为负压力，两种压力的差值即为基质吸力。基质吸力是通过量测与土中水处于平衡的部分蒸汽压（相对于具有与土中水相同成分的溶液处于平衡的部分蒸汽压）而确定的等值吸力。将基质吸力引入到非饱和土作为表示非饱和程度的变量，是当前非饱和土力学研究的基本思路。

综上所述，总吸力、基质吸力和渗透吸力三者之间的关系为

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1.6)$$

式中  $\psi$ ——总吸力；

$u_a - u_w$ ——基质吸力；

$u_a$ ——孔隙气压；



$u_w$ ——孔隙水压；

$\pi$ ——渗透吸力。

总吸力与相对湿度有关 (Aitchison 和 Richards, 1965), 故由蒸汽压力可量测总吸力。蒸汽压力越大, 相对湿度越大, 则总吸力越小。如果在测定土的基质吸力时, 土中的水已经是含有一定溶质的自然条件下的水, 则测得的吸力已非常接近总吸力。

吸力的变化范围非常广, 因此 Schofield (1935) 建议用 pF 表达土体土水势, 即用吸力除以水的重度  $\gamma_w$ , 然后取常用对数, 即  $pF = \lg(s/\gamma_w)$ ,  $s/\gamma_w$  的单位是 cm, 恰好是毛细管中水位上升的高度  $h_c$ 。比如,  $s = 98\text{kPa}$ ,  $\gamma_w = 9.8\text{kN/m}^3$ ,  $s/\gamma_w = 1000\text{cm}$ ,  $pF = 3.0$ 。这与化学中氢离子的浓度用 pH 表示相似。pF 和厘米水柱高度的对应关系见表 1.1。

表 1.1 pF 与厘米水柱高度的对应关系

pF	水柱高度/cm	pF	水柱高度/cm
7	10000000	3	1000
6	1000000	2	100
5	100000	1	10
4	10000	0	1

环境及外部荷载的改变会引起土体含水率发生变化, 基质吸力与含水率是相对应的, 而渗透吸力随含水率变化不敏感。因此, 由含水率改变引起的总吸力变化主要反映为基质吸力的变化。含水率相对较低的非饱和土具有较高的吸力, 其内部孔隙水主要以薄膜形式附着于土颗粒表面, 此时吸力主要由吸附作用引起 (Lu 和 Likos, 2004)。准确地测量或控制非饱和土体的吸力是非饱和土力学试验中最基本、最关键的技术, 需要借助工具和适当的方法。表 1.2 详细列出了直接量测和间接量测基质吸力、渗透吸力及总吸力的方法, 以及常用的吸力控制技术, 并在下面的章节中将按顺序分别展开介绍。

表 1.2 非饱和土中吸力量测及控制方法

分类	量测方法		量测的吸力	吸力范围 /kPa	特点
基质吸力 直接量测	普通张力计		负孔隙水压 或基质吸力 ( $u_a = p_a$ )	0~90	存在气蚀现象、空气通过 陶瓷头的扩散问题 (实验室或现场)
	高量程张力计			0~2500	
基质吸力 间接量测	热传导传感器法		基质吸力	10~1500	受环境影响较大, 平衡时间 较长 (实验室或现场)
	电导率传感器法			0~200	
	时域反射计法			整个范围	
	介电常数法			0~300	
总吸力 间接量测	滤纸法 (实验室或现场)		基质吸力	10~10000	接触法
	湿度计法	热电偶湿度计法	总吸力	100~8000	恒温环境 (实验室)
		晶体管湿度计法		100~10000	
冷镜湿度计法		0~300000			



续表

分类	量测方法		量测的吸力	吸力范围 /kPa	特点
渗透吸力间接量测	挤液法	孔隙水电导率量测法	渗透吸力	整个范围	孔隙水渗透压与导电率间的率定曲线（实验室或现场）
吸力控制技术	轴平移技术	压力板法	基质吸力	0~1500	量测范围取决于陶土板进气值（实验室）
		吸力探针法	基质吸力	0~1500	
	半渗透技术	渗析法（实验室）	基质吸力	0~12600	土更接近自然状态，PEG溶液和半透膜的合理选择
	相对湿度控制技术	蒸汽平衡法（实验室）	总吸力	>3000	控制相对湿度，环境温度严格控制

## 1.2 基质吸力直接量测

### 1.2.1 张力计法

张力计法是一种直接量测土体负孔隙水压的方法，孔隙气压通常等于现场大气压力，由孔隙气压减去负孔隙水压即得到基质吸力。张力计法采用的仪器为张力计（Tensiometer）或负压计，既可用于室外土体吸力测量，也可在实验室内进行量测。

常见的有真空表型负压计和压电式负压计。图 1.3 为真空表型负压计的照片及示意图，它是由陶瓷头、硬塑料管、集气管、真空表计量指示器等部件组成。测量范围为 0~90kPa；精度为 2.5kPa；按入土深度分为 3 种，分别为 30cm、50cm 和 70cm。陶瓷头与压力量测系统之间有一段硬塑料管，导热性低且耐腐蚀。通过张力计的真空表读数可以大致反应出土体的含水率状况（王钊等，2004）。

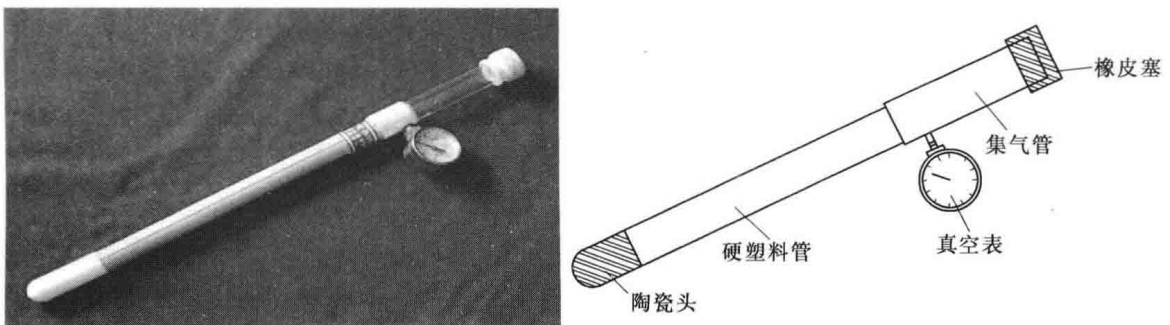


图 1.3 真空表型负压计

影响张力计法测定平衡时间的主要因素有仪器灵敏度、仪器除气程度、土体湿度状况及土体脱湿-吸湿过程等。其中，仪器的灵敏度是直接影响因素，取决于陶瓷头的透水速度以及负压表的代换容量，即单位水量变化引起负压值的变化。



### 1.2.1.1 张力计的原理

陶瓷头是仪器的感应部件，具有许多微小孔隙，陶瓷头被水浸润饱和后，孔隙内全部充满水，在孔隙水张力的作用下，空气不能通过陶瓷头进入张力计内部，而水可在一定压力下通过陶瓷头。

当充满脱气水且密封的张力计与土体充分接触后，陶瓷头将张力计内部脱气水与土体内孔隙水连接起来。土体中吸力使得水由陶瓷头向土体迁移，即由土水势高处通过陶瓷头向水势低处流动，直至内外水势达到平衡为止。此时，张力计中的水同土中的孔隙水具有相同的负压。张力计内部水压降低，通过硬塑料管内脱气水传到上端。张力计在测试过程中处于真空状态，张力计内部水压的变化可由真空表直接读出，平衡时的读数即为土体的负孔隙水压。因土体的孔隙气压等于大气压，测得的负孔隙水压在数值上与基质吸力相等。

由于塑料管中水的重量增加了下端的水压力，当张力计竖直使用时，测头处的水压力要比真空表量测到的水压力高  $\gamma_w h$ ，其中  $h$  为真空表与陶瓷头的高差。若真空表量测到的水压力为  $u_{w0}$ ，则陶瓷头处水压力为  $u_w = u_{w0} + \gamma_w h$ 。土体孔隙中的空气通常与地面大气相通，气压可认为是零，故土体中的实际基质吸力  $s = -u_w = -u_{w0} - \gamma_w h$ 。

由张力计测试原理可知，陶瓷头的饱和质量与张力计的正常使用密切相关。饱和质量越高，吸力测量值就会越准确。同时，张力计内部需确保处于真空状态，除陶瓷头需用脱气水充分饱和以外，硬塑料管中也需充满脱气水。另外，因土中可溶盐能够自由通过陶瓷头，溶质势为零，也就是说，张力计不能量测土中的渗透吸力。

### 1.2.1.2 张力计的使用方法

确保张力计管中的水始终无空气至关重要。使用前，必须确保陶瓷头无堵塞、无裂缝，然后将陶瓷头用脱气水浸润饱和，用脱气水充满硬塑料管和陶瓷头，并尽可能地除去张力计中的空气，使内部处于高真空状态。具体操作步骤如下：

(1) 采用真空泵抽气法及煮沸法最大限度排除蒸馏水中溶解的空气，制备脱气蒸馏水。

(2) 打开集气管盖子，将脱气蒸馏水注满张力计，直立 15min，让水湿润陶瓷头，并有水从陶瓷头表面滴出。

(3) 再次将张力计注满脱气水，将注水处用中间开有小孔的塞子塞紧，用手持抽气机进行抽气，真空表中会有气泡出现并逐渐聚集在集气管中。缓缓拔去塞子，让真空表指针缓慢退回零位。继续将仪器注满脱气水，重复上述抽气方法 3~4 次，即可除去真空表内大部分空气。

(4) 将仪器注满脱气水，盖上橡皮塞密封，然后使张力计直立，让陶瓷头在空气中蒸发，约 2h 后，即可见真空表的指针指向 40kPa 左右或更高。此时从陶瓷头、真空表、硬塑料管及集气管中会有埋藏的气泡逸出，轻轻将张力计上下倒置，使气泡集中到集气管中。将陶土管浸入脱气蒸馏水中，真空表指针回零，打开橡皮塞，重新注满脱气水，重复陶瓷头在空气中蒸发的步骤 2~3 次，直到真空表指针达到 80kPa 时将陶土管浸入脱气水中，真空表指针回零（徐嘉璐，2014）。





(5) 再次将张力计注满脱气水，盖紧橡皮塞，将陶瓷头浸在脱气水中备用。

(6) 现场安装。在需要量测土体处钻孔至待测深度（以陶瓷头中心计算），钻孔器直径与陶瓷头的直径相等。倒入少许泥浆，垂直插入张力计，使陶瓷头与土体紧密接触，将周围填土捣实，以免雨水沿张力计管壁周围松土渗到测点。

(7) 数据采集。仪器安装好并经历适当时间的平衡之后，便可进行数据采集。

(8) 定期检查。定期检查集气管中的空气量，若超过集气管容积的  $1/2$ ，需缓缓打开橡皮塞重新补满脱气蒸馏水。如埋设前张力计中的空气基本除净，且土体的湿度在仪器的测量范围内，可以连续维持 10~25 天，不必重新加水。

### 1.2.1.3 张力计存在的问题

张力计具有许多优点，如体形小、易携带，测读方便；灵敏度较高、反应较迅速；可直接测量，无须事先率定；不受外界环境限制，在室内及野外均可使用。但同时也存在以下缺点：

(1) 陶瓷头较脆弱、易开裂，一旦开裂便不能再用。

(2) 张力计在试验过程中需要定期进行重新饱和，测定现场土体吸力时十分不便。

(3) 在埋置张力计时，张力计的陶瓷头必须与土体接触良好，以确保土中水与张力计中水连续，但在实际操作中很难做到，尤其是在野外。张力计埋置深度不能太深，否则不易在埋设时观察到张力计与土体的接触情况。

(4) 测量范围会受“气蚀”现象（Cavitation）的限制，张力计能够量测到的负孔隙水压限值约为负 90kPa。当孔隙水压接近负 1 个大气压（真空）时，水会汽化，张力计连接管中将会出现气泡，无法正确读取数值。因张力计本身测量限值的缘故，随测点深度的增加，量测到的吸力范围将会减小。

### 1.2.1.4 高量程张力计

普通张力计量程范围均在 0~90kPa，腔体内水体在高张力作用下容易发生汽化，导致其不能测量高吸力。量测较干燥现场土体的吸力时，需要研制高量程张力计。许多学者研制出了多种不同形式的高量程张力计（Ridley 和 Burland, 1993, 1995; Guan 和 Fredlund, 1997; Meilani 等, 2002; Cui 等, 2008a; 陈中奎, 2011; 陈锐等, 2013）。

渗透张力计（Osmotic Tensiometer）可克服常规张力计的气蚀现象，采用聚乙二醇（PEG）水溶液向张力计提供“初始压力”。因为有初始压力，该张力计可测较高的基质吸力，吸力测定范围由溶液的饱和浓度控制，最高可达 12.6MPa。然而，该溶液的浓度随时间和周围湿度的变化而变化，使渗透张力计的应用受到限制。

Ridley 和 Burland (1993) 研制了一款高量程张力计（High-capacity Tensiometer, HCT），可测高达 1200kPa 的吸力值。该张力计在 Entran EPX-500 (35bar) 孔隙水压传感器上安装有 15bar 高进气值陶土板，陶瓷头和高精度压力传感器之间的水室中有很薄一层脱气水，水室厚度为毫米水平，如图 1.4 所示。该张力计灵敏度高、反应时间快，然而不能长时间监测吸力变化。之后，Ridley 和 Burland (1995) 又对其进行了改进，改进后的张力计设计了集成型应变量测隔膜（Integral Strain-gauged Diaphragm），替换之前的商用孔隙水压传感器。此张力计可测吸力达到 1800kPa，并可维持 4 个多小时未发生汽



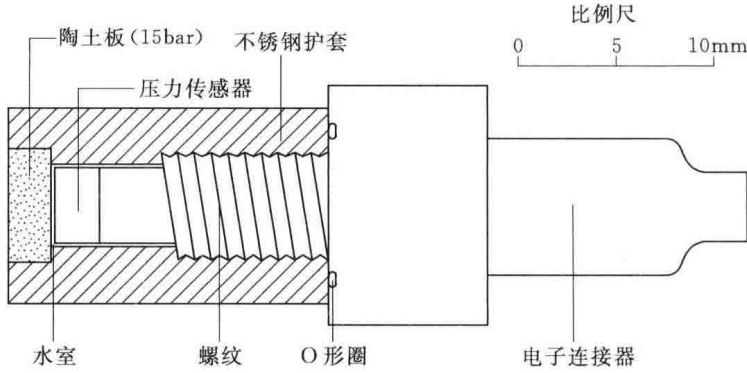


图 1.4 高量程张力计 (Ridley 和 Burland, 1993)

化。Ridley 和 Burland (1995) 设计的张力计中水室体积小于  $4\text{mm}^3$ ，厚度约  $0.1\text{mm}$ ，只需几分钟就可直接测量高达  $1500\text{kPa}$  的吸力。其主要原理是通过进一步减小水室厚度使得水体积减小，从而加快了反应时间。同时，又可抑制气泡产生，减小汽化的概率。测量时在陶瓷头上敷一薄层饱和泥浆，确保陶瓷头与土体接触良好。但该张力计不适合长期监测，且钻孔后需立即测量。

Meilani 等 (2002) 介绍了新加坡南洋理工大学 (Nanyang Technological University) 研发的微型张力计探头 (Mini Suction Probe)，使用由英国 Leicester 的 Druck Ltd 生产的  $15\text{bar}$  微型孔隙水压传感器 (Miniature Pore-water Pressure Transducer, PDCR 81)，如图 1.5 所示。PDCR 81 孔隙水压传感器连接在高进气值陶土板上。微型张力计探头内设置  $0.09\text{mm}$  厚的硅胶隔膜 (Silicon Diaphragm)。隔膜与不锈钢管外边缘的距离为  $1.2\text{mm}$ 。该吸力探头所用陶土板是在 Soilmoisture Equipment Corporation 生产的标准  $5\text{bar}$  高进气值陶土板切割下来，水在其中的渗透系数约为  $1.21 \times 10^{-9}\text{m/s}$ 。为克服低渗透性陶土板量测孔隙水压过程中反应慢的问题，将高进气值陶土板打磨成厚度为  $1\text{mm}$  的薄板。陶土板和隔膜的间隙要尽量的小 (约为  $0.4\text{mm}$ )，从而量测孔隙水压时可获得较高的精度和灵敏度。陶土板制作成 T 形，使用环氧树脂 (Araldite 2021 Epoxy) 将其黏结在不锈钢管上。探头很轻，如连接  $20\text{cm}$  长 Teflon 导线的探头质量仅为  $3\text{g}$ 。试验结果表明，使用该吸力探头可测量  $400\text{kPa}$  的基质吸力，并可持续  $15\text{h}$ ；在量测  $200\text{kPa}$  基质吸力时，持续了  $155\text{h}$ 。

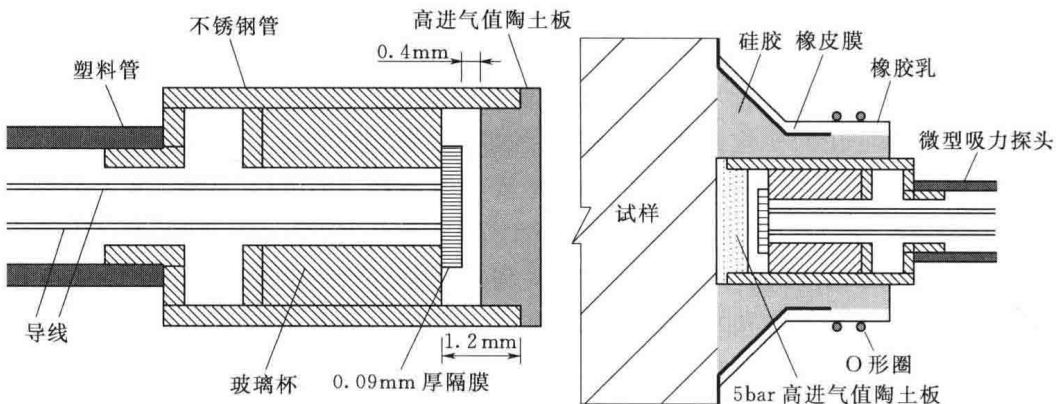


图 1.5 微型张力计探头 (Meilani 等, 2002)