

化学工程与工艺综合创新实验

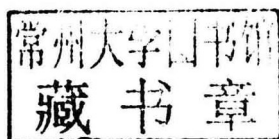
全学军 蔡永伟 主编



重庆大学出版社

化学工程与工艺综合创新实验

主 编 全学军 蔡永伟



重庆大学出版社

内容提要

本书是根据创新型工程技术人才培养的需要,进行的一种探索科研促进教学和人才培养的尝试,旨在为化学工程与工艺专业学生的创新思维和创新能力的培养提供一个开放式的实践教学模式。本书内容包括四大模块,主要涵盖分离工程、资源/环境化工、工业催化和材料化工,属于教师主持的各级科研项目的成果转化为学生实践教学的项目,具有综合性和创新性等特色。

本书适合于高等院校化学工程与工艺或相关专业作为高年级学生的综合实验教材,也可作为应用化学、材料化工、工业催化、环境工程、生物化工等相关技术人员、研究生及科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程与工艺综合创新实验/全学军,蔡永伟主

编. -- 重庆:重庆大学出版社,2017. 11

ISBN 978-7-5689-0825-2

I. ①化… II. ①全… ②蔡… III. ①化学工程—化学实验 IV. ①TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 235806 号

化学工程与工艺综合创新实验

主 编 全学军 蔡永伟

策划编辑:何 梅 范 琪

责任编辑:何 梅 范 琪 版式设计:何 梅 范 琪

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

POD:重庆书源排校有限公司

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:7.75 字数:193 千

2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-0825-2 定价:38.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

根据教育部“卓越工程师教育培育计划”对学生创新和实践能力的培养要求,探索构建工科专业综合创新实践教学体系在新时期高等工程人才培养中十分重要。另一方面,高校科研如何更好地促进教学,尤其是促进创新型人才的培养,也一直是相关各界所讨论关注的问题。为此,本书作者在长期的实践教学与创新型人才培养的实践基础上,经过较长时间的思考与讨论,结合重庆理工大学化学化工学院学科建设实践,并以“化学工程与工艺”重庆市特色专业建设为契机,决定尝试性地编写一本将教师的科研成果转化为实践教学案例的专业综合创新实践教材,以便探索科研促进教学的模式和机制。

化学工程与工艺综合创新实验是化工类专业学生在完成化工原理、化工专业核心课程,如分离工程、化工热力学、化学反应工程和化工工艺学等理论和实验课程的基础上开设的一门综合性、创新性实验课程,其目的是增强学生的综合、创新能力。为了编写好综合创新实践教材,学院采取了面向全体教师征集将科研成果转化为综合性、前沿性和创新性的实验教学项目,并由院学术委员会针对实验目的、实验内容、实验特色等方面进行遴选项目的模式。为了保证实践教学质量,优选的实验项目绝大部分都来源于教师主持的国家级或省部级科研课题,且每个实验项目都有学生人数限制。同时,为了实现教学目的,也开展了建设面向学生的开放式实践教学模式,为学生的创新思维和自主能力的充分发挥提供一个创新平台。

化学工程与工艺综合创新实验是面向化工专业大四学生公开选课,自由选择总共不少于48个学时的实验项目。在每批/次实验结束后,由学生针对实验项目的收获及任课老师的教学效果进行综合评价。

本书主要内容包括四大模块,主要涵盖分离工程、资源/环境化工、工业催化和材料化工。本教材每个实验项目都包含少量的思考题,是实验原理、实验内容的延伸,有利于培养学生灵活应用专业基础知识并提升分析和解决问题的能力。

本书由重庆理工大学全学军、赵天涛、许俊强、高焕方、徐云兰、蔡永伟、程治良、赵清华、胡学步、陈志、郭芳、肖芃颖、曹平、黄国文、高能文和唐聪明老师共同编写。全书由全学军和蔡永伟策划、组织、统稿和审核。

本书得到了化学工程与工艺重庆市“三特行动计划”专业项目资助,编写本书是一种探索科研促进教学,培养创新型工程技术人才的尝试。由于编者自身教学、学术水平所限,书中难免有疏漏、不妥,甚至错误之处,恳请各兄弟院校师生及广大读者不吝赐教、批评指正。

编 者

2017年8月

目 录

模块 1 分离工程	1
实验 1.1 水力喷射空气旋流器吹脱处理高浓度氨氮废水	1
实验 1.2 疏水/超疏水网膜制备及油水分离性能测试	8
实验 1.3 中空纤维超滤膜分离实验	17
实验 1.4 纳滤、反渗透膜制备纯净水实验	23
模块 2 资源/环境化工	30
实验 2.1 固定化生物材料优选与氯代烃废水处理综合	30
实验 2.2 水力喷射空气旋流器处理含 Cr(VI) 废水及铬回收实验	40
实验 2.3 城市生活污水的 CANON 工艺脱氮处理及 N ₂ O 释放	46
实验 2.4 微泡加压催化 O ₃ 氧化高效体系降解酸性红 18 及其矿化实验	52
实验 2.5 退镍废渣制备硝酸镍实验	58

实验 2.6 固定床非均相 Fenton 催化剂降解有机物 ...	61
模块 3 工业催化	68
实验 3.1 处理汽车尾气 SCR 用新型高效催化剂的工艺 及应用	68
实验 3.2 二氧化碳有效利用重整制合成气的催化剂设 计制备	72
实验 3.3 碳酸二苯酯清洁生产用新型催化剂的制备及 性能评价	76
模块 4 材料化工	83
实验 4.1 锂离子电池负极材料钛酸锂的合成及其电化 学性能	83
实验 4.2 石油磺酸盐的制备及油水界面活性.....	87
实验 4.3 共沉淀法制备稀土掺杂 TiO_2 光催化剂及其用 于含酚废水的处理	92
实验 4.4 负载 TiO_2 光催化剂制备及染料废水处理 ...	97
实验 4.5 乳酸缩合反应制备 2,3-戊二酮综合实验	102
参考文献	107

模块 **1**

分离工程

实验 1.1 水力喷射空气旋流器吹脱处理高浓度氨氮废水

1.1.1 实验目的

- ①了解氨氮废水的来源、危害及主要处理技术；
- ②掌握废水中的氨氮测定方法；
- ③掌握水力喷射空气旋流静态超重力技术脱氨的原理与实验操作；
- ④确定实验方案,提高设计实验的能力。

1.1.2 实验原理

(1) 水力喷射空气旋流静态超重力技术脱氨的原理

高浓度氨氮废水法一般采取空气吹脱法进行脱氮,该处理过程主要依赖于气液传质过程和 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 的电离平衡过程,通过调节废水的 pH 值,使得吹脱过程中的 pH 值始终在 10 以上,可以消除 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 的电离平衡的影响,吹脱氨过程只与气液传质过程有关。通过研究发

现,在水力喷射空气旋流器中脱氨,气液传质过程符合双膜理论、表面更新理论和溶质渗透理论,但以表面更新机理为主。

(2) 纳氏比色法氨氮测定原理

以游离态的氨或铵离子等形式存在的氨氮与纳氏试剂反应生成淡红棕色络合物,该络合物的吸光度与氨氮含量成正比,于波长 420 nm 处测量吸光度。通过绘制标准曲线,进而得到样品中的氨氮含量。

1.1.3 实验试剂及仪器

(1) 实验试剂

实验试剂如表 1.1 所示。

表 1.1 实验试剂

名 称	化学式	纯度级别
浓氨水	NH ₃	工业级
碘化钾	KI	AR
氢氧化钾	KOH	AR
二氯化汞	HgCl ₂	AR
酒石酸钾钠	KNaC ₄ H ₆ O ₆ · 4H ₂ O	AR
氢氧化钠	NaOH	AR
氯化铵	NH ₄ Cl	GR

1) 纳氏试剂,可选择下列方法的一种配制

①二氯化汞-碘化钾-氢氧化钾(HgCl₂-KI-KOH)溶液配制。称取 15.0 g 氢氧化钾(KOH),溶于 50 mL 水中,冷至室温。称取 5.0 g 碘化钾(KI),溶于 10 mL 水中,在搅拌下,将 2.50 g 二氯化汞(HgCl₂)粉末分多次加入碘化钾溶液中,直到溶液呈深黄色或出现淡红色沉淀溶解缓慢时,充分搅拌混和,并改为滴加二氯化汞饱和溶液,当出现少量朱红色沉淀不再溶解时,停止滴加。在搅拌下,将冷却的氢氧化钾溶液缓慢地加入到上述二氯化汞和碘化钾的混合液中,并稀释至 100 mL,于暗处静置 24 h,倾出上清液,贮于聚乙烯瓶内,用橡皮塞或聚乙烯盖子盖紧,存放暗处,可稳定一个月。

②碘化汞-碘化钾-氢氧化钠($\text{HgI}_2\text{-KI-NaOH}$)溶液。称取 16.0 g 氢氧化钠(NaOH),溶于 50 mL 水中,冷至室温。称取 7.0 g 碘化钾(KI)和 10.0 g 碘化汞(HgI_2),溶于水中,然后将此溶液在搅拌下,缓慢加入到上述 50 mL 氢氧化钠溶液中,用水稀释至 100 mL。贮于聚乙烯瓶内,用橡皮塞或聚乙烯盖子盖紧,于暗处存放,有效期一年。

2) 酒石酸钾钠溶液($\rho = 500 \text{ g/L}$)

称取 50.0 g 酒石酸钾钠($\text{KNaC}_4\text{H}_6\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)溶于 100 mL 水中,加热煮沸以驱除氨,充分冷却后稀释至 100 mL。

3) 氢氧化钠溶液($\rho = 250 \text{ g/L}$)

称取 25 g 氢氧化钠溶于水中,稀释至 100 mL。

4) 氨氮标准溶液

①氨氮标准储备溶液($\rho_{\text{N}} = 1\,000 \text{ }\mu\text{g/mL}$)。称取 3.819 0 g 氯化铵(GR , $100 \sim 105 \text{ }^\circ\text{C}$ 干燥 2 h),溶于水中,移至 1 000 mL 容量瓶中,稀释至标线,冰箱冷藏,可放置 1 个月。

②氨氮标准储备溶液($\rho_{\text{N}} = 10 \text{ }\mu\text{g/mL}$)。移取 5.00 mL 氨氮标准储备液于 500 mL 容量瓶中,稀释至刻度线,临用前配制该溶液。

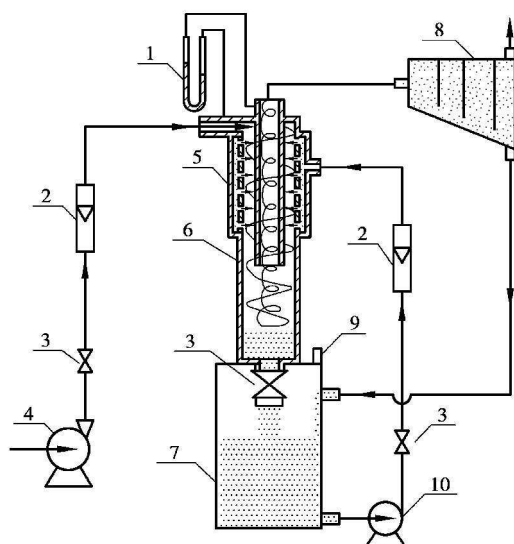
(2) 仪器

1) 水力喷射空气旋流器(WSA)

实验中采取的 WSA 装置,如图 1.1 所示,主要由带喷孔的主筒体、废水夹套、中心排气管以及空气螺旋封头组成,主筒体和封头之间通过法兰连接。本节主要优化 WSA 的喷孔结构,其他部分尺寸为设计定值,包括 WSA 主筒体内径 D 设计为 70 mm,筒体长 $H = 4D$,为 280 mm, WSA 的中心排气管直径 d 设计为 40 mm,其插入 WSA 筒体长度 $h = 2D$,为 140 mm。封头采用常规旋风分离器螺旋进口封头,其进口尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。吹脱氨的实验装置由 WSA 、循环液泵、废水贮槽、气泵、筛板式气液分离器、U 形压差计、气体/液体转子流量计等组成。其中, WSA 、贮液槽和气液分离器均采用透明的有机玻璃制成,便于观察实验现象。

2) 其他仪器

TU-1901 双光束紫外可见分光光度计(用于测定氨氮吸光度);PH-3S 型精密 pH 计(用于调解溶液 pH 值);U 形压差计(用于测量 WSA 空气进出口压差);其他实验室常用的玻璃器皿。



(a)

(b)

图 1.1 水力喷射空气旋流器装置与吹脱氨实验流程图

1—U 形压差计;2—转子流量计;3—阀门;4—风机;5—喷孔区域;

6—水力喷射空气旋流器;7—贮液槽;8—气液分离器;9—取样口;10—循环液泵

1.1.4 实验内容及步骤

(1) 实验内容

- ①水力喷射空气旋流器实验装置的准备和调试;
- ②模拟氨氮废水的配制及 pH 调节剂的加入;
- ③不同进口风速下进行水力喷射空气旋流器吹脱处理氨氮废水实验及实验取样;
- ④不同射流流速下进行水力喷射空气旋流器吹脱处理氨氮废水实验及实验取样;
- ⑤纳氏试剂比色法测定氨氮的浓度。

(2) 实验步骤

1) 水力喷射空气旋流静态超重力技术脱氨

实验时,先配制 5.2 L 初始氨氮浓度约为 3 000 mg/L 的氨水溶液,加入过量的 NaOH 溶液,确保在整个实验过程中 pH 保持在 11 以上。将含氨废水倒入水力喷射空气旋流器贮液槽中,先开启循环液泵,调节液体流速到设定值,稳定 10 min 后取初始样。然后再打开气泵开始吹脱氨实验,并调节 WSA 液相出口底阀,保持实验中 WSA 底部具有同样的液位高度,以实现

液封,保证旋流气体主要通过反向涡旋从中心排气管排出。实验过程中每隔 5 min 取样一次,样品 $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂比色法测定。实验采用间歇批式操作,相同条件实验重复两次,结果为三次测量的平均值,实验误差为三次测量数据的标准偏差。实验过程中严格控制空气环境温度为 25 ℃,实验考查进口气速、循环液速等操作参数对脱氨传质系数的影响。

2) 氨氮含量的测定

① 标准曲线的绘制。

取 8 支 50 mL 比色管,分别加入 0.00、0.50、1.00、2.00、4.00、6.00、8.00 和 10.00 mL 氨氮标准工作液,其所对应的氨氮含量分别为 0.0、5.0、10.0、20.0、40.0、60.0、80.0 和 100.0 μg ,加水至刻度线。加入 1.0 mL 酒石酸钾钠溶液,摇匀,再加入纳氏试剂 1.5 mL 二氯化汞-碘化钾-氢氧化钾 ($\text{HgCl}_2\text{-KI-KOH}$) 溶液或 1.0 mL 碘化汞-碘化钾-氢氧化钠 ($\text{HgI}_2\text{-KI-NaOH}$) 溶液,摇匀。放置 10 min 后,在 420 nm 波长下,以水作参比,测定吸光度值。以空白校正后的吸光度值为纵坐标,对应的氨氮含量为横坐标,绘制标准曲线。空白样品的处理和测定同待测样品的操作过程。

② 样品测定。

清洁水样:直接取水样 50 mL,按照与标准曲线相同的方法进行。

有悬浮物或色度干扰的水样:移取经预处理水样 50 mL(若水样中氨氮浓度超过 2 mg/L,可适当少取),按照与标准曲线相同的方法进行。

③ 结果计算。

水中氨氮的浓度 ρ_{N} 按式(1-1)计算:

$$\rho_{\text{N}} = \frac{A_s - A_b - a}{b \times V} \quad (1-1)$$

式中 ρ_{N} ——水样中氨氮的质量浓度,mg/L,以氮计;

A_s ——水样的吸光度;

A_b ——空白样品的吸光度;

a ——校准曲线的截距;

b ——校准曲线的斜率;

V ——试样体积,mL。

1.1.5 实验数据分析与处理

(1) 吹脱氨过程中体积传质系数 $K_L\alpha$ 的计算

高浓度氨氮废水法一般采取空气吹脱法进行脱氮,该处理过程主要依赖于气液传质过程和 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 的电离平衡过程,而游离氨和总氨氮之比 η 一般可以表示为:

$$\eta = \frac{c(\text{NH}_3)}{c(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)} = \frac{1}{1 + 10^{(pK_a - pH)}} \quad (1-2)$$

式中 pK_a ——氨的电离平衡常数,一般为温度的函数,可通过式(1-3)进行计算:

$$pK_a = 4 \times 10^{-8} T^3 + 9 \times 10^{-5} T^2 - 0.0356 T + 10.072 \quad (1-3)$$

由式(1-2)、(1-3)可做出 pH 和温度的关系曲线。可知当加入过量的碱液,以保证吹脱过程中 $\text{pH} \geq 11$,游离氨含量可达 99% 以上,并且液相温度 T 对氨电离的影响极小,甚至可以忽略,从而达到消除 $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ 之间的电离平衡对氨氮空气吹脱处理过程影响的目的。因此,氨氮吹脱效果就主要取决于气液传质过程速率。

Matter-Müller C 等人研究表明采用空气吹脱法去除挥发性的物质,处理过程中的体积传质系数 $K_L\alpha$ 可按式(1-4)计算:

$$-\ln \frac{c_1(\text{NH}_3)}{c_0(\text{NH}_3)} = K_L\alpha t \quad (1-4)$$

当保持吹脱过程中溶液的 $\text{pH} \geq 11$ 时,则有 $c(\text{NH}_3) \approx c(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)$,因此式(1-4)可转化为:

$$-\ln \frac{c_1(\text{NH}_3)}{c_0(\text{NH}_3)} = -\ln \frac{\eta_1 c_1(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)}{\eta_0 c_0(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)} \approx -\ln \frac{c_1(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)}{c_0(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)} = K_L\alpha t \quad (1-5)$$

令 $R_f = \frac{c_1(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)}{c_0(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)}$,式(1-5)可以简写为:

$$-\ln R_f = K_L\alpha t \quad (1-6)$$

式中 $c_0(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)$ ——氨氮废水中采用纳氏试剂分光光度法测定的初始总氨氮浓度, mg/L;

$c_1(\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+)$ ——氨氮废水中采用纳氏试剂分光光度法测定的 t 时刻的总氨氮浓度, mg/L;

$K_L\alpha$ ——吹脱处理过程中的体积传质系数, min^{-1} ;

t ——吹脱时间,min。

(2) 实验数据记录表格

1) 进口气速对脱氨传质系数的影响(见表 1.2)

表 1.2 进口气速对脱氨传质系数的影响

进口气速	脱氨传质系数

2) 循环液速对脱氨传质系数的影响(见表 1.3)

表 1.3 循环液速对脱氨传质系数的影响

循环液速	脱氨传质系数

1.1.6 思考与讨论

- ①水体中氨氮的主要来源是什么,有什么危害,目前脱氨主要有哪些技术,优缺点是什么?
- ②采用水力喷射空气旋流器脱氨过程中保持 pH 值在 10 以上的原因是什么?
- ③采用纳氏试剂比色法测废水中氨氮的主要影响因素有哪些?

实验 1.2 疏水/超疏水网膜制备及油水分离性能测试实验

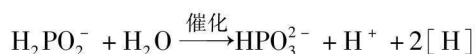
1.2.1 实验目的

- ①了解工业和餐饮业含油废水的现状 & 现代处理工艺;
- ②掌握表面工程技术应用于金属表面涂层的制备工艺;
- ③掌握疏水和超疏水涂层/薄膜制备方法和工艺;
- ④掌握超声波清洗器、马弗炉、XRD、接触角测量仪等仪器和设备的使用方法。

1.2.2 实验原理

(1) 化学镀 Ni-P 涂层的原理

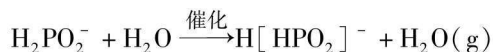
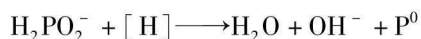
化学镀 Ni-P 涂层是一种在不加外电流的情况下利用还原剂在金属表面上发生自催化作用沉积得到 Ni-P 镀层的方法。当 Ni-P 镀层沉积到不锈钢网的表面上时,因为镍具有自催化的能力,还原过程还会持续进行下去,直至把不锈钢网拿出渡槽,反应才停止。目前被普遍接受的化学沉积 Ni-P 镀层理论为 Cutzeit C 提出的催化理论。该理论主要内容如下:在加热的条件下化学沉积 Ni-P 镀层不会发生反应,而是通过金属的自身催化作用,使次亚磷酸根在水溶液脱氢形成亚磷酸根,同时放出初生态原子氢。



初生态原子氢在催化金属表面被吸附而使其活化,加快镀液中的镍阳离子还原,在催化金属表面上沉积金属镍。



在催化金属表面上的初生态原子氢使次亚磷酸根还原成磷;另外,由于催化作用使次亚磷酸根分解为亚磷酸根和分子态氢。



因此最终导致镍盐被还原和次亚磷酸盐被氧化,总反应式为:



镍原子和磷原子共沉积,并最终形成镍磷合金层。



从上面的化学反应原理可以得知,化学镀镍磷涂层与电镀的不同在于:电镀是在外加电流的条件下,在阴极将镍氧原子还原成金属镍并发生沉积。化学镀则是在无外加电流的条件下,用化学还原的方法使镍阳离子还原成金属镍并沉积在金属表面上。因为铬、镍、铁、钯等金属及其合金本身都具有催化作用。因此,上述合金材料都可以直接用于沉积 Ni-P 涂层,并且由于镍自身就可以作为催化剂,只要反应发生,氧化还原反应就会持续进行下去,并在不锈钢网膜的各处均匀反应,从而获得具有一定厚度的 Ni-P 涂层。

(2) 疏水/超疏水网膜进行油水分离的原理

疏水/超疏水滤网是多孔结构。滤网的网孔一般很小,可以近似为毛细管状结构。水和油在疏水/超疏水滤网上的不同湿润性可以用毛细管作用来解释。毛细管作用是指细管内受液体在管壁表面湿润性的影响而产生的液面升、降的现象。

滤网的网丝通过构建微观粗糙结构和沉积低表面能物质之后具备了一定的疏水性能和亲油性能。当水接触滤网表面时,水不能润湿滤网表面。在忽略液体重力的前提下,水滴在超疏水滤网表面上可以看作疏水的毛细管插入到水中。此时,网孔中水面在附加压强和表面张力的共同作用下,呈现凸液面,但液体不会穿过网孔。当油接触疏水滤网表面时,油可以润湿滤网表面,这样即使没有重力作用,网孔中的油在毛细管作用力的影响下也会自动地穿过网孔,流到网的另一面。因此,油水混合液中的油可以穿过超疏水滤网,而水不可以通过。这样就实现了油和水分离的目的。

(3) 超疏水表面材料的发展

超疏水材料是一种对水具有排斥性的材料,水滴在其表面无法滑动铺展而保持球型滚动状,从而达到滚动自清洁的效果。润湿性是固体材料表面的重要性质之一。决定材料表面润湿性能的关键因素主要包括材料表面的化学组成和表面的微观几何结构。因此将静态水接

触角大于 150° , 滚动角小于 10° 的表面称为超疏水表面。超疏水材料同时需具有微纳米复合结构和低表面能的化学物质, 这也是成为超疏水材料的前提。超疏水表面因其具备自清洁、油水分离、抗腐蚀、防结冰以及防雾等优良特性, 近几年来备受材料学家的青睐, 吸引了大批科学家投入超疏水材料的研究中去。

远在 2000 多年前, 人们就发现有些植物虽然生长在污泥里, 但是它的叶子却几乎永远保持清洁。一个最为典型的例子就是荷叶。荷花通常生长在沼泽和浅水区域, 但却具有“出淤泥而不染”的特性。荷叶上的灰尘和污垢会很容易被露珠和雨水带走, 从而保持表面的清洁。科学家将这样的自清洁现象称之为“荷叶效应”。

然而荷叶始终保持清洁的机理却一直不为人们所知。直到 20 世纪 60 年代中期由于扫描电子显微镜(SEM)的发展, 人们才逐渐揭开了荷叶“出淤泥而不染”的秘密。1977 年, 德国伯恩大学的 Barthlott 和 Neinhuis 通过扫描电镜研究了荷叶的表面结构形态, 如图 1.2 所示。

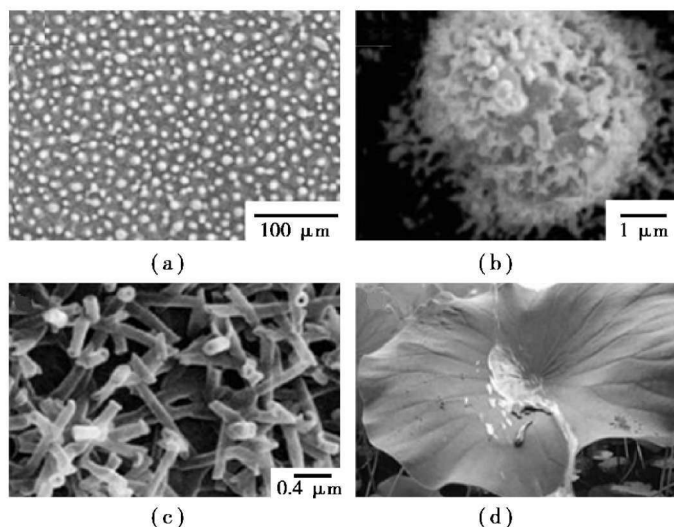


图 1.2 荷叶的 SEM 图像

图 1.2 揭示了荷叶表面的微米乳突结构以及蜡物质是其拥有自清洁功能的关键。他们认为产生的“荷叶效应”是由蜡状物质这种低表面能的材料以及乳突这种具有微米粗糙结构共同引起的。研究表明, 荷叶表面分布着大量微米级的蜡质微乳突结构, 每一个乳突上又分布着大量纳米级的细枝状结构, 而且荷叶的表皮上存在许多蜡质三维细管, 这样的微纳米复合结构, 致使水滴与荷叶表面具有很低的接触面积。因此, 荷叶表面蜡质组分和微/纳米复合结构的共同作用, 赋予了荷叶独特的超疏水和低黏附性。经测量, 荷叶上水的接触角和滚动角分