

见缝插针 莲叶上边的纳米结构

还有一种开题的方法就是“见缝插针”，在别人看不见的“光滑表面”可以发现别人看不见的“孔、隙”。就像一块干净的玻璃板，看上去很光滑、看不到什么，可是在显微镜底下，我们会看到很多缝，我们用微型的纳米针可以测到玻璃表面的粗糙度，即便粗糙度在纳米级，我们也可以看到它并不是光滑的，它是存在波峰与波谷的。我们所熟知的莲花效应¹（Lotus Effect），其科学原理就是在显微镜下细致观察，发现了莲叶的表面具有独特的微纳米结构，发现了莲叶表面具有超疏水（superhydrophobicity）以及自洁（self-cleaning）的特性，江雷把它进行了专业上的拓展：荷叶上存在的许许多多纳米孔，在水滴、油滴，乃至所有液体滴在这个界面的时候，都会形成一层气膜，使水或油都不能侵入这个表面，因此产生疏水、疏油的效果。同样，经过凹凸纳米结构处理过的织物，也表现疏水、疏油的特性。江雷和他领导的课题组成员一起，很快研究出一类纳米新型功能的材料，用它对织物处理之后，织物会不沾水，不沾油；用它对瓷砖、玻璃处理之后，具有自清洁的功能。

江雷和研究生

在研究生眼中，江雷是个“牛人”。

江雷现在的“弟子”来自于全国各地不同的院校，他们有一个令人稍感吃惊的共同点：“出身”都不太好。“我的学生中没有北大、清华的，大部分来自一些不太著名的院校，因此他们发表了国际期刊的论文后，有些人感到吃惊。”

江雷的“开山大弟子”冯琳就是一个出身不好，但是令人大吃一惊的例子。硕士期间，她就读于东北师范大学，一切按部就班，但在江雷门下读博3年间，发表论文超过10篇，影响因子总和超过30，申请专利4项，博士论文获得全国百篇优秀博士论文奖。“在江老师门下的学习，大大缩短了我的科研路程，别人需要6年、8年才能走完的路，我3年就走完了。”现年30岁，清华大学化学系副教授冯琳说。

在冯琳的记忆中，江雷老师“真行”。她印象最深刻的是，导师可能多日没有听过自己的报告，对实验的进展不了解，但在听完汇报后，常常一针见血地指出实验最关键的一点。“有一种醍醐灌顶的感觉，困扰这么久的问题一下就解决了。”夏帆认为“老板”的大脑CPU主频一定是最快的之一。对于这种“特异功能”，江雷归功于经常出席国际会议。“作为导师，必须经常出现在国际最前沿会议的现场，这样才能了解研究领域发展的动态和方向，才能对学生作出正确的指导。”他把这种学习后的状态比作站在泰山顶上，一览众山小，对正在爬山的学生自然而然能作出正确指导。

在创造科研环境方面，江雷的学生认为导师同样是个“牛人”。在他的实验室中，仪器设备的水平达到了国际标准。“实验室中，原子力显微镜之类的高级仪器往往不只一台，其他同学需要借所外仪器作的实验，我们是想做就做。”夏帆说。

在普通人眼里，江雷的人生之路似乎“走”得特别顺。江雷说：“我哪里是在‘走’啊？我一直都在‘跑’，而且是一路狂奔，丝毫不敢有所松懈怠慢。”

江雷还在大学时代，就为我国棋坛名将陈祖德自传中描述的“红绿灯现象”所触动。在每个人的生命旅途中，不时会遭遇红绿灯。望着眼前还在闪烁的红灯，有的人会加快速度抢道路；有的人却放缓脚步慢慢悠悠地等绿灯。江雷自嘲性格是属于赶绿灯、抢道路一类的，“这个绿灯不失时机地赶过来了，下个路口可能还会赶上绿灯；如果漫不经心地等着红灯变成绿灯，可能下个路口还是红灯，那就一错再错、一慢再慢，永远是落在人家后头。”

¹周敦颐在《爱莲说》中曾说：「莲花出淤泥而不染」，但是为什么呢？科学家研究发现，莲花是运用自然的纳米结构达到自洁的效果。

江雷 1987 年本科毕业就读硕士，“科学研究离不开第一手的实验数据，我读了半年硕士课程就提前一年进了实验室。这样，当我的后来一些同学拖拉着进实验室时，我已经有了自己的实验数据，准备着手写论文了。”3 年硕士读下来，江雷共发表了 10 余篇论文。这些论文总的水平不低，其中一篇还与博士研究生的论文比肩，获得了吉林大学“青春杯”科技论文大奖赛特别奖。

“这或许就是我在人生道路上抢得的第一个‘绿灯’吧，紧接着，国家教委下达了吉林大学与东京大学联合培养博士生的名额，自然非我莫属，留学东瀛的门户为我敞开了。”

硕士刚毕业的江雷转眼间成了东京大学藤岛昭先生的博士生，走进了藤岛实验室，“我还是丝毫不敢懈怠，还得接着抢前方路口的绿灯。”江雷说，“那年我们公派去日本的留学生 100 多名，分散在东京的各个大学，有的想着打工贴补生活，有的想先提高语言能力，我还是坚信‘天道酬勤’，必须‘闻鸡起舞’。”

江雷第二天就一头扎进了实验室。有人对江雷说：“那么玩命干啥？不就是给‘日本鬼子’打工吗？”

“我其实是给自己‘打工’。我要走自己的路。一开始路就走得慢了，今后想赶也赶不过来。”江雷对记者说：我们换个现象比喻“红绿灯现象”，比如两个同样的物体，重力加速度一样，但其中有个物体提前落下来一秒，结果自然也就大不一样；用兵家的说法，则是“兵贵神速”。

就这样，江雷一路紧追不舍地又抢了一个“绿灯”：在藤岛实验室的研究工作令人刮目，博士毕业后，江雷被导师藤岛先生推荐到日本科技厅神奈川科学技术研究院，先是担任高年薪的专任研究员，后来则是主管“光电界面相变控制”的课题组组长，一干就是 5 年。

当江雷进入日本藤岛实验室时，国际上的纳米界面材料研究几乎刚刚起步。

各国科学家相信，不同结构的物质可以形成各种各样的东西，借助异质材料的接触与融合所产生的纳米级界面的奇异功能特性，可以创造出无数功能特殊、性状奇异的新型材料，并使之实现产业化。但是，在物质的二维表面上形成特殊的纳米界面结构的二元协同的表面相，以及它所显示出来的超常的客观物性，对其中的微观机制研究毕竟是一个世界性的全新课题，它涉及到界面物理、界面化学、甚至包括界面生物学等领域，研究的难度可想而知。

“兵者，国之大事，不可不察。”高中时就曾熟读兵书的江雷这样认为。由于命运的原因，他最终没有选择军旅作为自己的职业，但已经留学东瀛的他非常敏感地意识到：纳米界面材料是世界科学研究的前沿阵地，国家战略需求的关键堡垒，今后将在国际科技和经济发展中扮演着举足轻重的角色。

江雷认为；与“有所为，有所不为”的兵家之言一脉相承，以自己有限的青春年华和时间精力，未来科研方向的把握，也应该如兵家所言，“途有所不由，军有所不击，城有所不攻，地有所不争，君命有所不受。”自己学有所成肯定要回国，拿什么东西报效祖国？“纳米界面材料”的最新研究成果就是最好的奉献！

江雷义无反顾地一头扑进了实验室。在整整 6 年多的时间里夜以继日，江雷几乎都是在电子显微镜和激光脉冲仪前度过的。他进行一次又一次的实验，睁大一双清澈明亮的眼眸，寻找并发现光电界面新材料新结构的蛛丝马迹。难以抗拒的渴望科学新发现的冲动，在他年青的胸膛里激情澎湃，提供着他彻夜不眠工作的旺盛精力。

“我是以科研第一线的具体实践，在给自己写可以挑战生理极限、超越自我的‘说明书’。”江雷说；“只有这样，通常人们认为枯燥乏味的那些基础研究工作，也会因此而变得愉快而有趣起来。”在日本留学的 6 年多时间里，江雷仅研究论文就发表了 60 多篇，其中作为第一作者的有 30 多篇。

早在 20 世纪初年，科学家就已经利用物质的二元协同原子材料，将铁与铬这两类在空气中极易氧化的合金相合成为不锈钢，同时，也将铁和铬这两类普通硬度的合金相结合为超硬钢。到了 20 世纪 30 年代，又在物质的分子水平上开发出了二元分子协同材料，如电子受体与电子结构相结合成为有机超导体以及有机强磁体。到 20 世纪 80 年代后，比原子、分子级的开发更加深入了一个层次，那就是物质的纳米级的研究开发。

以纳米为单位度量的物质，在一定条件作用下，具有常规粗晶粒材料所不具备的奇异特性和反常特性，因而应用前景备受各国科学家瞩目。读兵书其实也是在读哲学。自然界的各种物质材料千变万化，九九归一，总可以寻找到其中内在的统一规律。根据纳米材料的结构特性，把看似对立的一些矛盾进行调和，就会产生种种新的效应，这实际上是辩证法中对立的统一。

1998年3月的一天，江雷正在准备日本化学学会年会的发言材料，突然，创新的思维如电光石火般在江雷的脑海里闪过：既然现代科学已经证实物质都是由各种协同互补的二元性基本粒子所组成，而且人类已经开始有意识利用二元协同性研制新材料，那么为什么不能把这种二元协同性推广到纳米尺度界面呢？

根据江雷过去已有的研究成果，当对某物质采取某种特殊的表面加工后，在介观尺度能形成交错混杂的两种不同性质的二维表面相区，这种具有不同、甚至完全相反理化性质的纳米相区，在某种条件下具有协同的相互作用，以致在宏观表面上形成超常规的界面物质的材料。在这一刹那间，江雷对“二元协同纳米界面材料”的研究，有了种醍醐灌顶、茅塞顿开的感觉。

科学实验数据表明，两种性质相反的材料作到纳米时，在特定的条件下具有协同的相互作用，在宏观上会表现出奇特的性能；二元协同纳米界面材料就是在材料的宏观表面建立一个这样的结构。

江雷和他的同事在实验中观察到，在紫外光的照射下，二氧化钛表面表现出亲水的效果，即水滴在这个表面上很自然的铺展开，不会产生雾滴。这实在是个奇妙无比的现象。江雷不由地联想到：中国古代哲学中就有“阴阳合一”等朴素的真理；早在2000多年前，深谙哲理的中华民族祖先就以其聪睿的智慧，指出了“万物负阴抱阳，冲气以为和”，也就是说，物质可以分为阴阳两个方面，阴阳变化交合，就能产生出万物。

由此，江雷提出大胆的设想：是否在这个表面上存在着亲水和疏水的纳米结构，促使了这个表面具有亲水的效果呢？如果这种界面存在，它还会有一个宏观的现象，它必定还会亲油。

10分钟后试验结果出来了：这个界面又亲水又亲油。随后，江雷和他的同事很快复制出了亲水和疏水相间的纳米结构；对玻璃的表面进行处理，也再次证实玻璃的表面具有亲水和亲油的特性。

既然能做出了亲水、亲油的材料，举一反三，必然也能做出疏水与疏油的材料。

在大自然中我们不难发现，荷叶“出淤泥而不染”，具有极强的疏水、疏油的性能。是否荷叶的表面具有特殊的结构呢？

在荷叶的扫描电镜的照片上，江雷看到其表面的结构清晰可见，那些凹凸不平的纳米结构，正是他所要寻找的正确答案。

江雷为自己的发现而激动万分。他不由赞叹东方古国传统文化的灿烂与伟大。怀着对老子阴阳学说的崇敬心情，江雷把这种具有阴阳二元的物质在纳米界面上呈现出的超常规的界面物质材料，命名为二元协同纳米界面材料。

江雷在吉林大学的博士导师是李铁津教授。江雷立即打国际长途电话告诉他自己的最新发现，在我国化学界享有盛名的李铁津教授回答的第一句话是：“这下可真有的干了，根据这个理论我们国家可以干很多事！”

将研究的材料置于一个纳米级的界面上，从中发现新规律、寻找新材料，藤岛实验室作为世界纳米界面材料研究领域的先驱者，多年来在该领域进行了资金的巨大投入，可谓“众里寻她千百度”，由一位来自中国的博士后的“蓦然回首”，却发现一位艳丽的“美人”已经站在“灯火阑珊处”了。

集多项研究成果之大成，江雷提出的“二元协同纳米界面结构”理论，发表于1998年春季的日本化学学会。

1998年5月，江雷以他纳米材料研究的骄人成就，荣获了日本文部省颁发的青年特别奖励基金。

壮士断腕，破釜沉舟

1994年中国科学院实施“百人计划”。根据这一计划，中国科学院拟向海内外招聘100人左右的学科带头人，为中国科技造就一支堪当领军重任的“将帅之才”。对从事科研的优秀人才来说，能够入选“百人计划”不仅对他是种科研和生活上的基本保障，更重要的是种学术水平的充分肯定。仿佛冥冥之中要圆江雷一个高中时就向往带兵打仗的美梦，1998年江雷入选中国科学院“百人计划”，成为一名科技战线的将领，也可以“沙场秋点兵”了。

故事还得从1998年2月说起。那时，江雷知道中国科学院化学研究所所长、中国化学界颇富盛誉的朱道本院士要到日本，他直接和朱道本院士取得联系后，不久就在朱道本下榻的宾馆里见了面，两人一见如故，交流得十分投机，竟很快成了忘年交。

江雷和朱道本院士谈起了他的科研思路不为自己在日本的助教授所理解、缺乏被充分重视的一些苦恼和困惑。朱道本院士在对江雷“心有灵犀一点通”的同时，谈起中国科学院的“百人计划”诱人之处。回国后不到一星期之后，朱道本所长就给江雷发来了关于申请“百人计划”的电子邮件。

是年5月，江雷自费回到祖国北京，参加了一个海外青年科学家研讨会，同时也顺便“侦察”了一下国内人才需求的“火力”。这期间，江雷见到了时任国家科技部基础研究司的邵立勤副司长，只简单介绍了20分钟，学物理出身的邵立勤就对江雷的研究工作表示了理解和极大兴趣，提出他如果准备回国，可以考虑就课题的进一步研究申请国家“973”计划项目。江雷前进的前方道路，再次闪现出一盏催他提速急行绿灯。

中国科学院副院长白春礼到江雷下榻的招待所看望，这位在中国科学院负责“百人计划”实施的科技少帅，和江雷同样有海外留学的经历，同样对纳米科学研究有着深刻理解的科学家，和江雷敞开心扉谈到：从纳米界面结构课题入手，要一方面搞应用基础研究，一方面搞企业化运作，实现纳米技术的产业化辐射。

作为一位科研人员，最痛苦的，莫过于原始创新的思路无人理解，最兴奋的，则在于标新立异有知音。破釜沉舟，是需要江雷壮士断腕的时候了。

江雷在学术上无疑是成功的。无论在东京大学藤岛实验室，也无无论是在神奈川科技研究院，他在有关光电界面材料的制备与理化性质研究取得的诸多成果，使得日本及美国的许多大学和跨国大公司向他敞开了大门。凭他的丰厚的科研资历和能力，导师早就答应给他一份酬薪丰厚的教职；他还可以去跨国大公司任职，那些从事纳米材料开发的日本一流企业，开给他的年薪都在千万日元之上。退而言之，这一年的夏天，母校吉林大学的兼职教授的聘书和申请“长江学者”的邀请函也已送到江雷手上。

1998年8月，江雷再度来到北京，出席了世界青年纳米科学研讨会，中国科学院及化学研究所专门邀请他前往化学研究所参观讲学。江雷的讲学引起了轰动不说，研究所仅用一个星期时间，就通过了江雷的研究员职称评审，特批了三室一厅的住房，并为江雷申请了科研经费。同年12月，化学研究所通过了江雷的“百人计划”答辩，并很快为他配置了专门的助手，负责二元纳米界面材料实验室的筹备事宜。

江雷选择了中国科学院，是看好了“百人计划”的舞台，并为化学研究所的情真意切所深深打动：研究所的6位领导曾全部出动和他座谈，在短短的一个半小时里，就把他来研究所工作的具体事宜敲定谈妥，其工作效率让在号称“奔走一族”的日本已习以为常的江雷也惊讶不已。

中国科学院选择江雷，不仅在于他是一些重要纳米材料研究的亲身参与者，更重要的是意识到他潜在的创新能力将进一步厚积薄发，他所提出的“二元协同纳米界面结构”这一全新概念，也将给我国带来广阔的产业化前景。

“文武之道，一张一弛”

一位研究生走进江雷的办公室，向他要正在抽的香烟烟灰，让正在采访的记者大惑不解。江雷解释说：学生要用烟灰做纺织品防静电的测试，因为经过燃烧的烟灰比较纯正，没有杂质。采访的话题也就由此转入他如何带“兵”。

“对学生我是‘无为而治’。”江雷说，“我在面试和招收研究生时线条很粗，因为我一向认为，只有无能的导师，没有差劲的学生，也可以说是‘强将手下无弱兵’。实际上，我现在带的几位研究生写出了比较好的论文，他们过去也不是从名牌高校毕业的，那些没考成‘托福’出国留学的学生中，潜在科技创新能力的也大有人在。”

“什么叫‘文武之道，一张一弛’？弓上弦叫张，卸下弦叫弛，打仗用兵是如此，带领和指导学生也是如此。我安排的研究生的学习和工作，就是要让他们感到有紧也有松，能够真正体验到科研的乐趣。”江雷说：“当然，还有句兵书上的话叫‘士不亲不罚’，对那些自己已经比较熟悉的学生才‘罚’，对他们有时可能会比较严厉，对刚招收进来、实验室情况还不太了解的那些学生，则更多的是表现一种温情。”

2000年12月1日，日本东京大学教授藤岛昭先生，专程来中国看望他的得意门生。得知江雷在较短的时间里已取得了令人瞩目的成绩，他在惊讶不已的同时发出了由衷的赞叹。就是江雷的这位恩师，他和东京大学的桥本教授一起，当年在江雷回国筹建新实验室时提供并赠送了价值上千万日元的仪器，“藤岛昭先生当年对我的培养也是‘文武之道，一张一弛’，如今，我正是像他那样培养自己的学生。”

结缘纳米技术的聪明人“难得糊涂”

1992年，江雷作为中日联合培养的博士生进入日本东京大学藤岛实验室深造，师从国际著名光化学科学家、有着“光触媒之父”之称的藤岛昭教授。

临行，江雷的姐夫、北京大学东方学系教授陈玉龙铺纸研墨，挥毫泼墨，遒劲秀逸的“天道酬勤”4字跃然纸上。随后，陈玉龙赠送给江雷，拍着江雷的肩膀说：“一分耕耘，一分收获，这是古今中外所称道的多劳多得。上天会实现勤劳的人的志愿，有耕耘就会有收获，我希望你在异国他乡不懈努力，最大限度地完善充实自己，成就自己的梦想。”

于是，书法条幅“天道酬勤”随江雷远渡东瀛。“那年公派去日本的留学生100多名，分散在东京各个大学，有的想打工贴补生活，有的想提高语言能力，我还是坚信‘天道酬勤’，必须‘闻鸡起舞’。”江雷回忆说：“姑父送给我的这幅书法，伴随我度过了7年的海外求学生涯，后来我又把它带回了国内，鞭策我在科研道路上奋发前行。”

博士毕业后，江雷被藤岛昭教授推荐到日本科技厅神奈川科学技术研究院，先担任高年薪的专任研究员，后出任为“光电控制界面结构相变”课题组组长。

每每回忆起恩师藤岛昭教授，江雷言语之中充满了敬重，也充满了对自己那段经历的留恋。一次，藤岛昭到中国访问，看到清代书画家、文学家郑板桥题过的匾额“难得糊涂”，很欣赏其处世哲学，认为这与自己的教育思想或学术追求相吻合，于是制作成拓片装裱好，安置在居室醒目的地方。一天，江雷拜访藤岛昭，藤岛昭指着墙上的拓片说：“一个人一生只能做一件事，就像你们中国文人郑板桥所说的——‘难得糊涂’。搞科学研究，要学学这种人生哲学，一辈子认认真真做好一件事就够了，对其他的事该糊涂的要糊涂。”

谈到仿生材料或者聊到超疏水材料，江雷教授一定是必聊的话题。

荷叶上的纳米孔 - 仿生材料或者聊到超疏水材料

荷叶上存在的许许多多纳米孔，在水滴、油滴，乃至所有液体滴在这个界面的时候，都会形成一层气膜，使水或油都不能侵入这个表面，因此产生疏水、疏油的效果。

同样，经过凹凸纳米结构处理过的织物，也表现疏水、疏油的特性。把氧化剂和还原剂作成纳米结构，形成二元协同纳米界面材料，可高效地分解有毒气体和有机物，还具有杀菌的作用，同时可用于净化空气，提高人们的生活质量。

物质世界的二元性无穷无尽，二元协同纳米界面材料的排列组合也将是无穷无尽，回到祖国的江雷坚信；随着科技的不断发展，我们迎接的将是一个丰富多彩的功能材料新世界。“一种材料在不同的环境作用下，将表现出其迥然不同的特性，同样，一个人在不同的创新文化氛围里，发挥的作用也不尽相同。”江雷对记者说。

江雷和他领导的课题组成员一起，很快研究出一类纳米新型功能的材料，用它对织物处理之后，织物会不沾水，不沾油；用它对瓷砖、玻璃处理之后，具有自清洁的功能。

根据中国科学院和化学研究所的产业化思路，积极进行纳米技术的转移和传递，迅速在相关企业开展广泛的合作，形成了战略伙伴关系。“兵家说‘因粮与敌’，我们这里讲的‘敌’，不是‘敌对’，而是要充分‘借力’，像诸葛亮那样懂得‘草船借箭’，发展高科技，实现产业化，就要整和并优化社会各方的资源，争取资源的最佳配置。哪怕是竞争对手，也可以谈判与合作。”

江雷说：我合作的目标就是要让合作的对方“赢”，哪怕对方“赢”了90%，我们只“赢”10%；但如果我们合作10个项目的话，最终的结果就是100%。纳米界面材料实验室的基础应用研究，很多都与化学研究所其他课题组，以及吉林大学、北京理工大学等科研单位开展交叉学科的合作，取得了“双赢”。产业化方面的合作也是这样。

化学研究所和中国商品交易中心共同组建了北京中商世纪纳米技术有限公司，奇异的“纳米自洁领带”、“纳米自洁丝巾”应运而生：它和普通领带、丝巾没什么两样，但经过纳米技术处理，产生了特殊功能。污水像落在荷叶之上，一点粘不上，用手搓搓，净水一冲，污迹和油垢就没有了，根本不用洗涤用品。

1999 年底，由江雷担任首席科学家的中商世纪公司举行新闻发布会，首次隆重推出超双亲性二元协同界面材料技术（既亲水又亲油）和超双疏性界面材料（既疏水又疏油），向社会各界展示了漂亮的“纳米自洁领带”。如魔术便幻一般，经过纳米技术处理过的各类纺织材料不仅可以防水、防油，还具有了杀菌、防辐射、防霉等特殊效果，原有织物的各种性能保持不变，包括纤维强度、染料亲和性、耐洗涤性、免烫性等。

人们清楚地记得那一幕：2000 年春天，国家纳米科技指导协调委员会首席科学家白春礼院士在中南海为国务院领导讲纳米科技，朱镕基总理对他现场演示的防污领带表示极大兴趣的情景。如今，由化学研究所提供双疏纳米技术，中商世纪公司和宁波艾力特公司合作推出的纳米领带，不仅已批量投入市场，标有“中国科学院”字样的领带还成为赠送国外贵宾的礼品，成为了“领带大使”。

浙江嵊州是著名的“领带之乡”，当地企业慕名与化学研究所合作，推出的“纳米自洁领带”亦远销海内外。

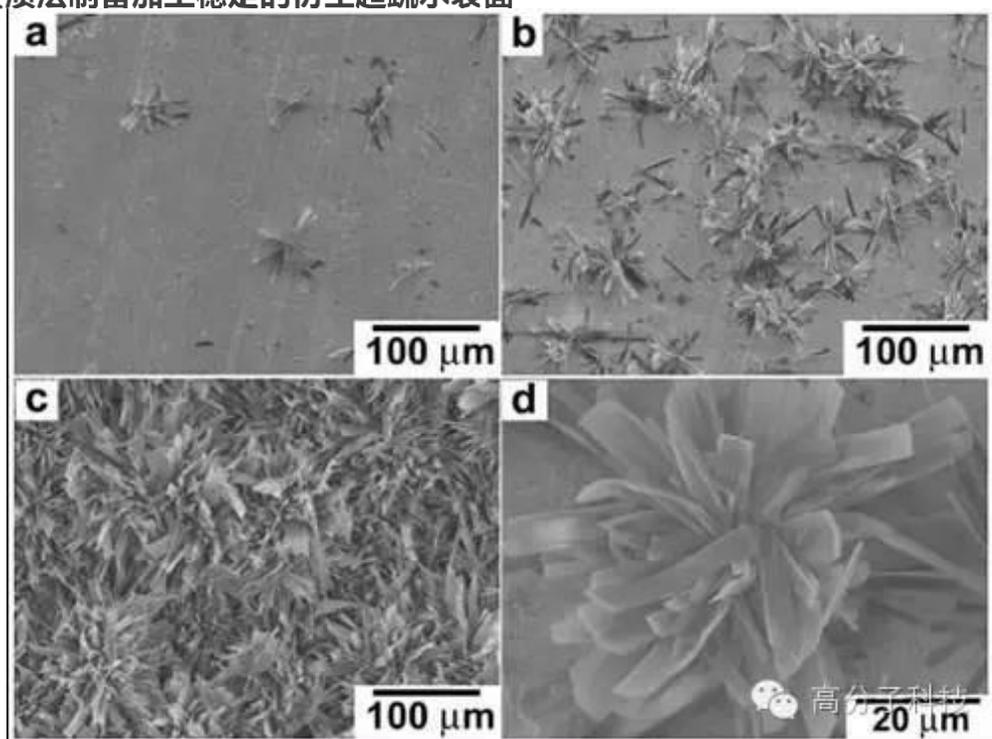
作为外墙用的玻璃、陶瓷等建筑材料也能像荷花一样“出淤泥而不染”：在玻璃、瓷砖等建筑材料表面采用超双亲界面材料技术后，水滴或油滴与表面的接触角接近零度，实现自清洁及防雾效果。江雷预言，这种超双亲界面材料技术今后必将在城市幕墙玻璃、浴室的镜子、各种眼镜、汽车玻璃等得到广泛应用。

江雷研究员带领的研究小组还成功的研制出了超双疏阵列碳纳米管膜，2001 年 5 月出版的德国《应用化学》对这一研究成果进行了详细报道。紧接着，他们再接再厉，在该杂志上连中三元，分别利用普通疏水高分子、甚至双亲高分子实现了超疏水特性。正是这些系列性的成果，赢得了国际材料领域权威杂志《先进材料》主编的青睐，邀请他们为杂志撰写了系统的综述文章。

江雷院士十年关于仿生材料、超疏水材料经典文献盘点

江雷教授在仿生功能界面材料的制备及物理化学性质研究等领域是绝对是名副其实的大牛，在 2009 年当选中科院院士时，年仅 44 岁。这不，今年 2 月份，江雷教授因在超疏水性和亲水性涂层方面的贡献当选为美国国家工程院外籍院士。本文利用 Web of Science 核心合集为检索平台，以超疏水为主题检索词，对江雷教授近十年（2006-2016）的 SCI 论文进行了检索，除去综述文章后，挑选了被引次数 ≥ 100 ，或者年平均被引次数 ≥ 20 的文章进行了整理和汇总，希望能给对超疏水感兴趣的亲们提供一些便利！

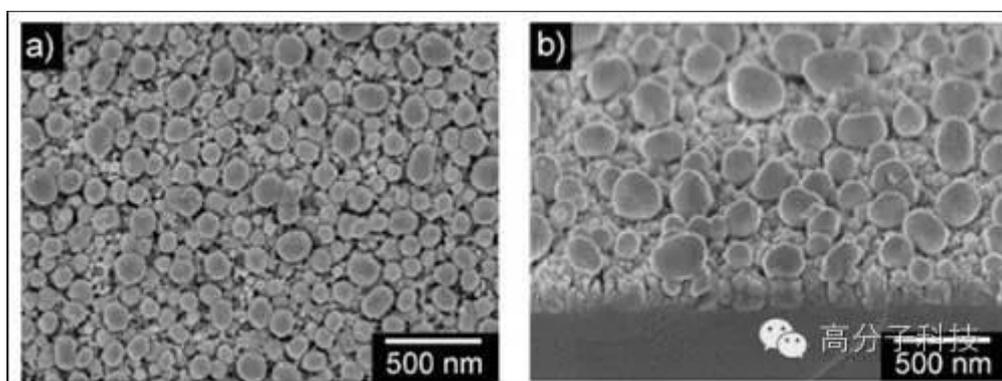
1，一步溶液浸渍法制备加工稳定的仿生超疏水表面



仿生形态发生技术对合成纳米、微米尺度的无机晶体和有机/无机复合材料十分流行，能够精确控制材料的尺寸、形态、取向、组织和复杂形态。众所周知，形态发生过程已经被用来制造独特的功能性表面，诸如具有自清洁功能的超疏水表面等。超疏水表面的制备方法多样，大多数是对莲花叶片表面的仿生，但都有一定的局限性，如工作环境受限、材料价格昂贵、耐候性持久性差等。

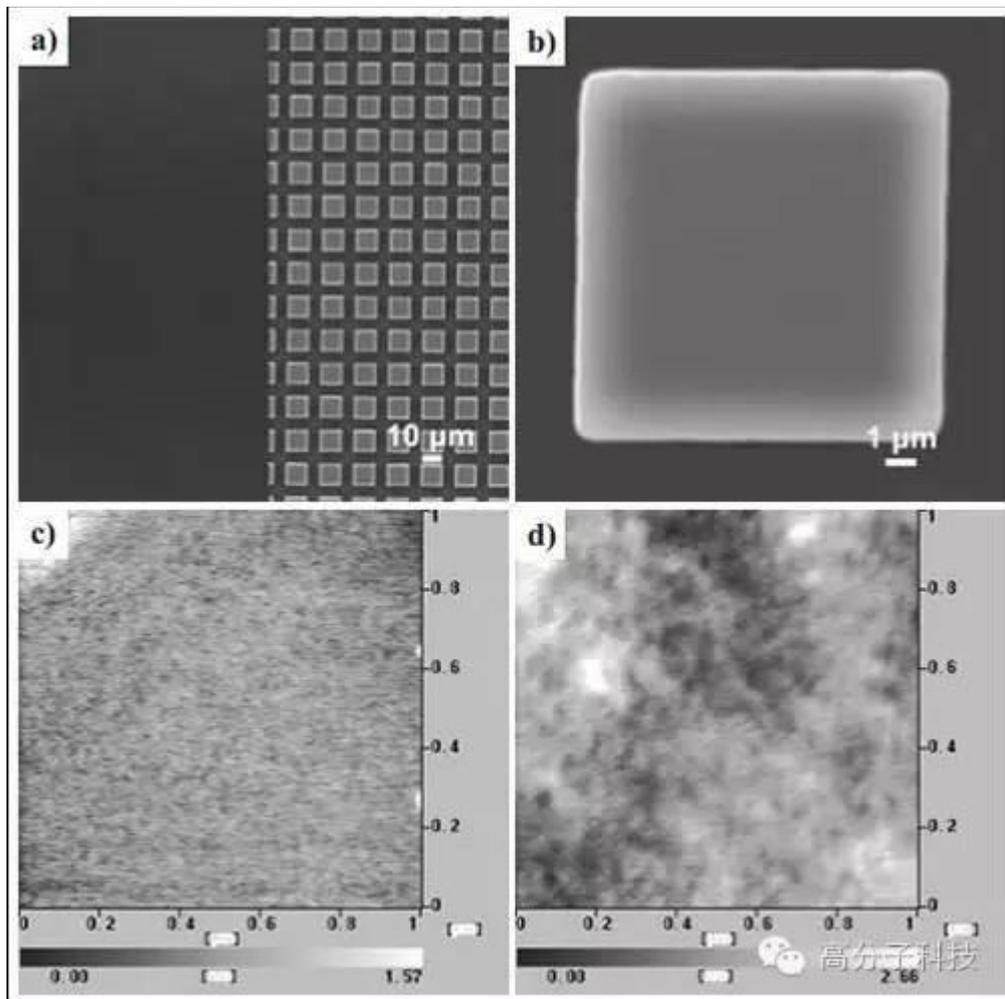
本文，作者介绍了一种非常简易可行的方法，构造了一种环境稳定性强的脂肪酸金属羧酸盐超疏水表面。这种超疏水表面对工业应用十分重要，对长期以来困扰人们的金属或合金材料的环境污染和锈蚀问题提供了解决方法。作者以铜板为例，只需将铜板或者任何表面覆盖铜的基板，在室温下浸渍在一种多碳脂肪酸溶液中，便可成功在铜板表面生成十分稳定的仿生超疏水表面，其本质上是生成了形似花朵的群簇涂层 $\text{Cu}(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COO})_2$ ，与水的接触角约为 162° 。这为工业化生产超疏水表面开拓了一条宽广的道路。

2，可控润湿性和光致变色性的双重响应氧化物薄膜



作者通过灵活的电化学沉积法制备了一种性能良好的双表面的功能化的氧化钨薄膜。这种薄膜可以通过交替的UV光照射和黑暗中保存的方法来实现超疏水和超亲水的可逆性转变。这一现象往往伴随着光致变色现象。

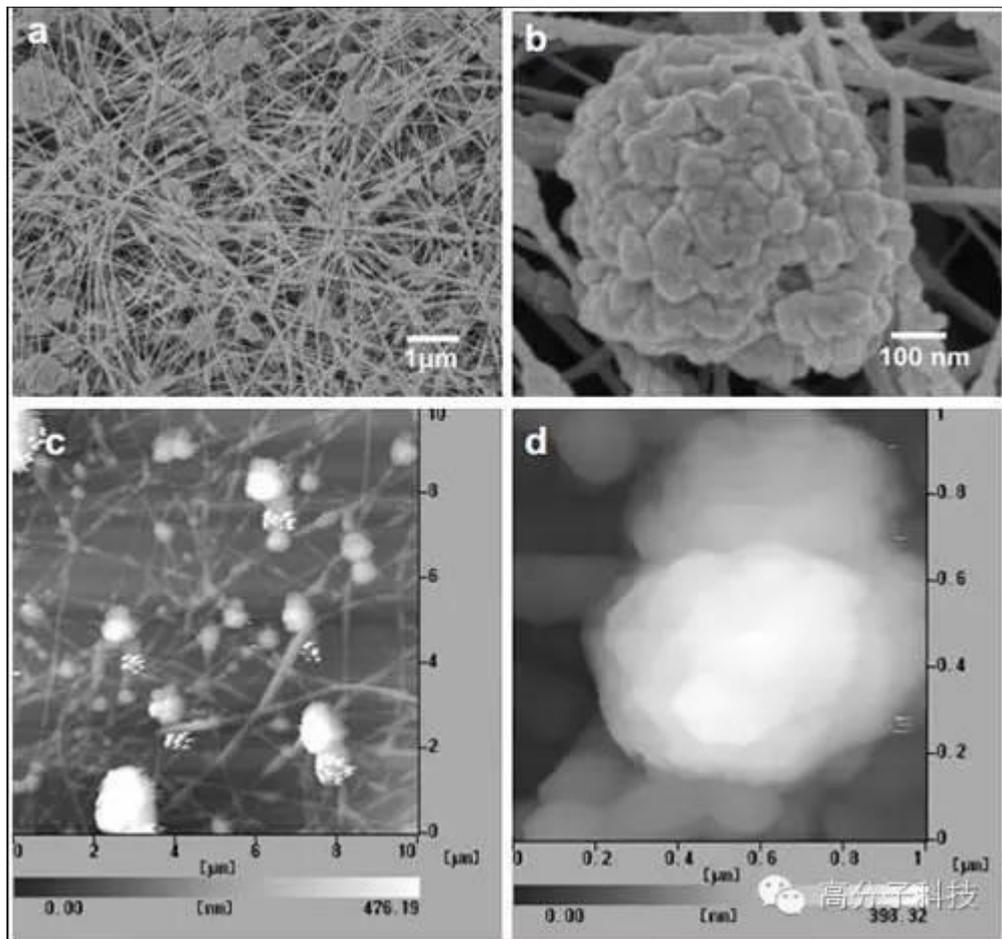
3，双响应表面——超亲水和超疏水性的转换



通常，超疏水表面的接触角（CA）大于150度，能够通过调控疏水表面的拓扑形貌；而超亲水表面CA约为0度，能够通过三维或二维毛细效应来实现。文献中有报道过在诸如温度、pH值、光等单一的外界条件作用下，表面的亲疏水性能发生转变的单一响应性，但还没有能够在超疏水和超亲水性之间转变的双响应型表面的报道。

本文中，作者报导了一种具有可调的润湿性的双应激响应型表面，在超疏水和超亲水性之间发生可逆的转变，并同时对温度和pH值具有响应性。作者在平整和粗糙的硅基片表面制备P（NIPAAm-co-AAc）薄膜（即N-异丙基丙烯酰胺-丙烯酸共聚物薄膜）。超亲水性和超疏水性之间的可逆转变，能够在很窄的温度变化范围（约10℃）和很宽的pH值变化范围（约10）中发生。这种双应激响应行为是基于表面化学变化和表面粗糙度变化的结合。在单一的PNIPAAm薄膜只对温度响应性的基础之上，双应激性的P（NIPAAm-co-AAc）薄膜，由于加入了对pH敏感的丙烯酸组分，而对pH值产生了响应性。此外，这种共聚物的低临界共融温度（LCST）随pH的增加时可调的。

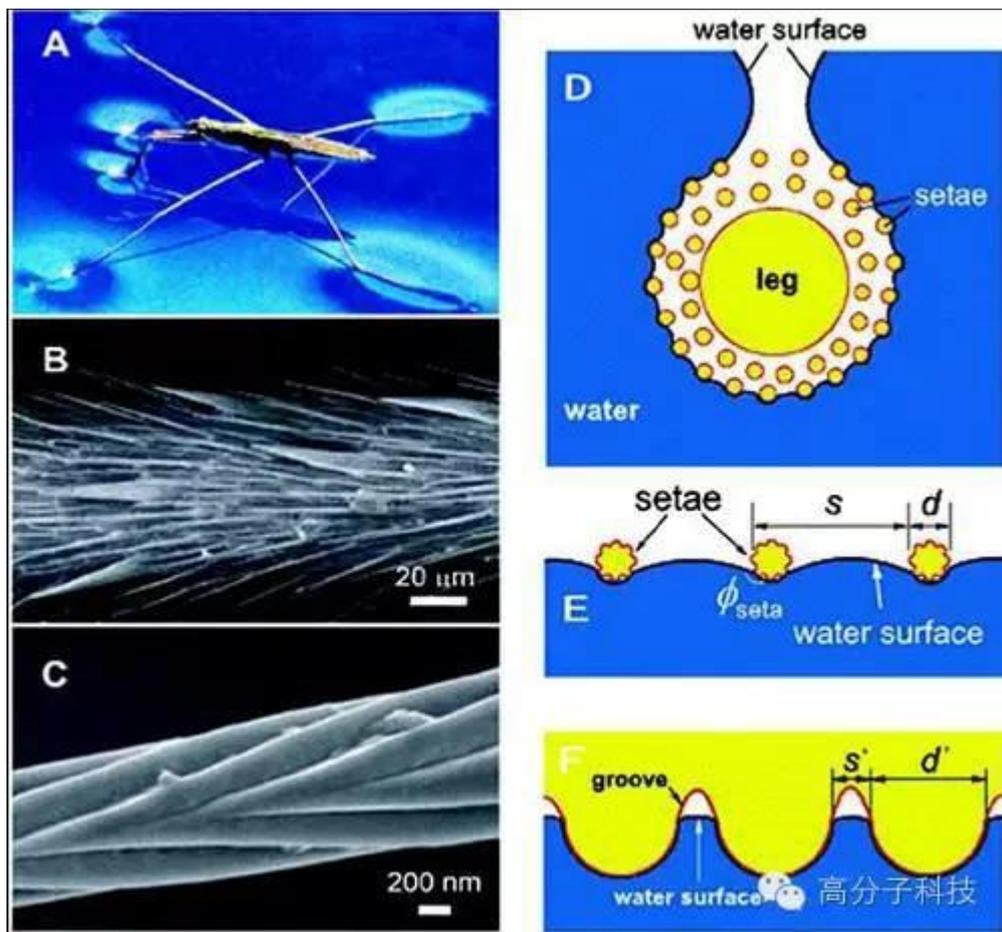
4，腐蚀性环境中的稳定超疏水导电聚苯胺/聚苯乙烯薄膜



作者通过简单的静电纺丝的方法制备了具有莲花叶片结构的聚苯胺 (PANI) /聚苯乙烯 (PS) 复合薄膜。在宽pH范围中的酸、碱溶液和氧化性溶液中，这种薄膜能够表现出稳定的超疏水性和导电性。特殊的表面成分和表面形貌是产生这种不同寻常性质的重要因素。苯乙烯组分能够强烈地影响复合薄膜的形貌，而表现出不同的超疏水性和导电性。（注：聚苯胺经掺杂后具有导电性，是一种导电高分子。）

★ <2007年> ★

5, 仿生研究：分层结构是如何造就水黾腿的超疏水特性



水黾是典型的具有“水上漂”技能的昆虫，能够轻松地在水面上站立或快速行走。本文研究了水黾腿具有疏水性的机理。SEM照片显示，水黾腿上的独特的层状结构，包含着许多的取向的针状微型刚毛，刚毛上具有精细的纳米凹槽结构。一条腿在水面上的最大支撑力可高达152 dynes（达因，施力单位，使质量是1克的物体产生1厘米/秒²的加速度的力，叫做1达因），这是水黾身体重量的15倍。作者从理论上证明了，取向的微型刚毛上的纳米凹槽结构，与腿上的蜡质物之间的协同作用下表现出疏水性。这一发现有助于微型水上器件和不润湿性材料的革新和设计。

6， 蚊虫复眼仿生：通过软光刻制备具有干式防雾性能的人造“复眼”



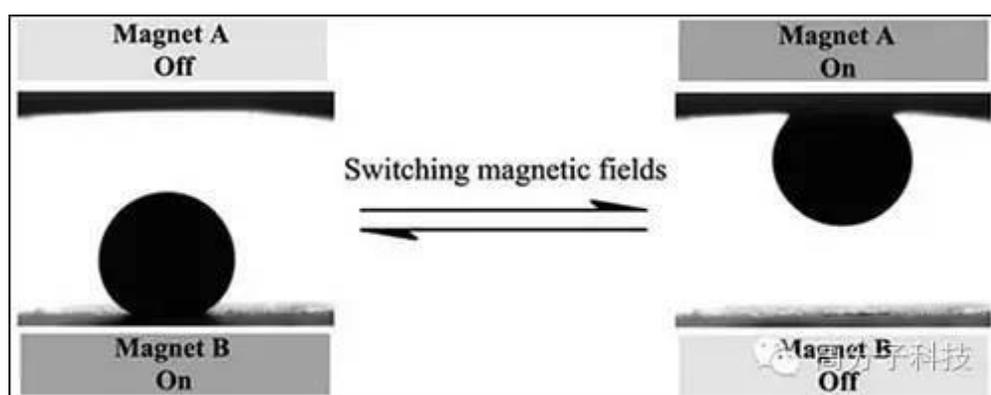
雾，是在当湿气浓缩、液滴积累成为直径大于190nm或者说大于可见光波长（380nm）的一半时产生的。解决这一问题，可以通过两个途径：1.超亲水途径（接触角CA小于5度）；2.超疏水途径（CA大于150度），以及极低的CA滞后性。目前为止，几乎所有的报道都集中在前一种方法上，例如光学透明涂层等，最著名的例子是光催化的TiO₂纳米颗粒涂层在UV光照照射下变为超亲水性。

最近，利用毛细效应，通过从逐层组装的纳米粒子构造3D纳米多孔结构实现超亲水性。防雾的关键，是利用这种“湿”的策略，使得微米尺寸的雾滴迅速的铺展成均一的薄膜，从而避免了成核的雾滴对光的散射和反射。

大多数的防雾涂层是透明的，但也有很地方的应用并不需要透明性，例如油漆的溶胀和脱落问题，和金属的表面防锈蚀等。这些问题是由于水分的吸附造成的，超亲水涂层很难在这些领域应用。因此，就需要“干”的防雾策略，也就是利用超疏水技术使得水分或者雾滴无法在表面成核。在仿生学领域，对于莲花叶片的自清洁能力和能在水面行走的水黾腿微观结构的研究对超疏水表面的设计具有启示作用。基于这种仿生而研发的超疏水材料应用在很多方面，也一直被认为能够作为防雾涂层使用，但根据General Motors的研究表明，莲花叶片能够被雾滴变“湿”，因为雾滴为微米大小，能够掉落在叶片微乳凸之间的空隙中。这也就表明，同类型的超疏水材料不适合用来解决这种防雾的问题，人需要新的解决思路。

本文，作者报道了一种新颖的生物型超疏水防雾策略。库蚊的复眼具有理想的超疏水性能，使其能够在潮湿的环境中保持视觉清晰。作者的研究表明，这种超疏水性来自于巧妙的精细的微米和纳米结构：六方非密堆积（ncp）的纳米尺度的乳突结构，能够防止微米大小的雾滴在小眼的表面凝结；而每个小眼之间为六方密堆积（hcp）能够防止雾滴进入小眼之间的空隙中。利用软光刻技术，以及对微米和纳米结构表面疏水性的研究，作者制造出了人工的“复眼”。这一成果将有望应用在超疏水防雾涂层中。

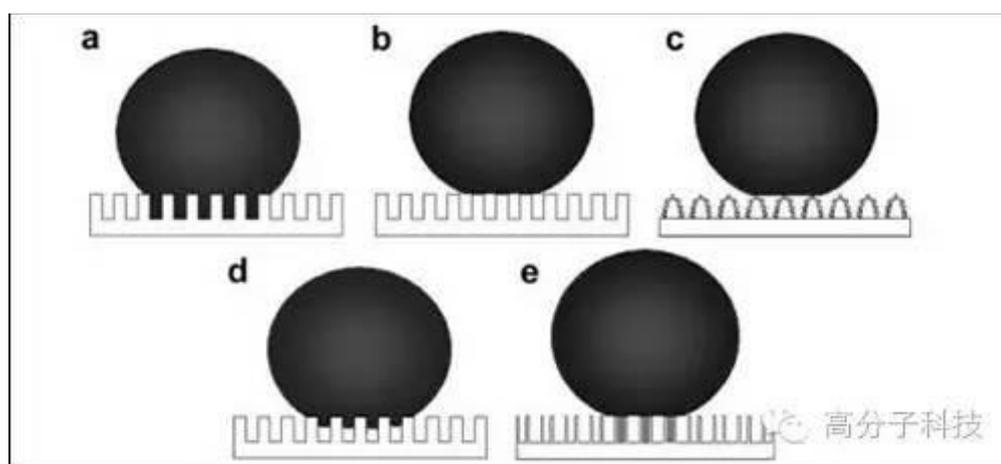
7，具有高粘附力的超疏水表面在超顺磁性微液滴运输中的应用



磁性纳米材料与生物分子的结合，在诸如生化分离、药物靶向传递、免疫分析等诸多领域有着广泛的应用，这就对这些小体积液体的可控运输提出了更高的要求。然而难题是：运输材料往往容易在自然接触中吸附在物体壁上，造成通道的污染和堵塞。这样就对永久微通道的液体的运输造成了限制，也就限制了可操作性和容错性；而生硬的转向容易造成湍流和剪切。目前有很多报道通过光、点、磁等多种途径实现了对微液滴的悬停。然而，这些方法操作困难且无法避免疏漏。

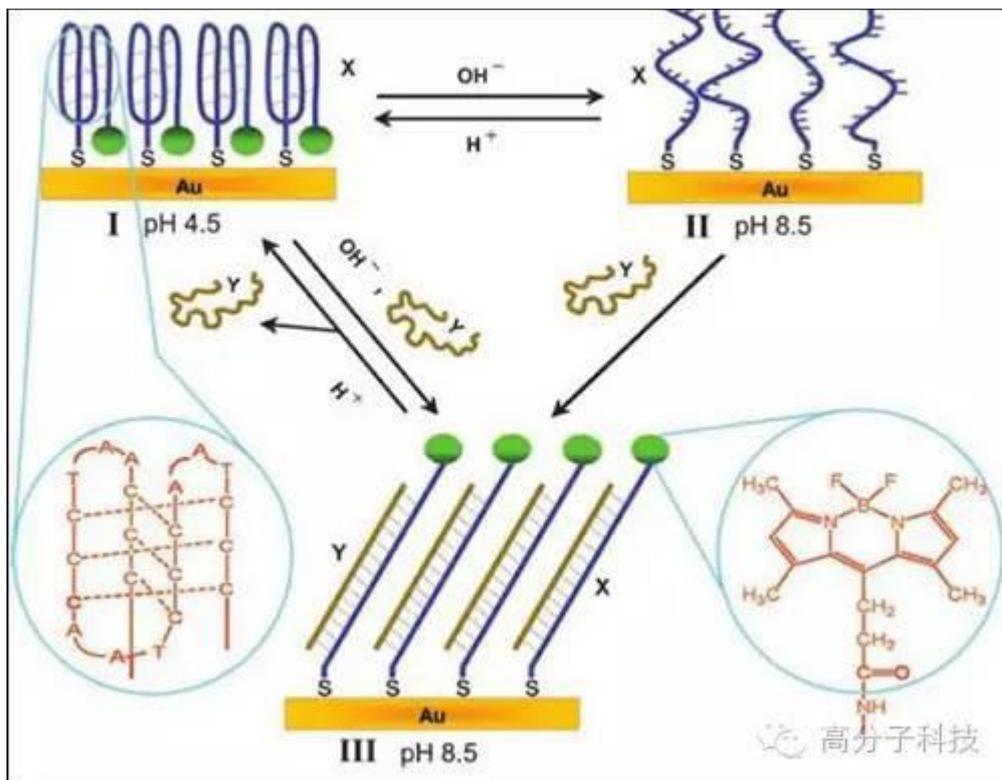
作者在多孔氧化铝薄膜模板上制备了成排的PS纳米管层。这种具有强粘附力的超疏水表面恰好有能够完全运输微液滴的优势。超疏水表面与水的接触角大于150度，能够避免润湿问题。液滴在这类表面往往保持准球形，从而减少了与固体表面的接触面积，有效避免了液滴的沉积。此外，强粘附力能够使得液滴精准的保持在应有的位置，没有滑动和旋转。作者利用超疏水表面实现了对超顺磁性微升级液体液滴的可逆性定向运输，并且在交变磁场中没有体积损失。

8，超疏水状态的定义



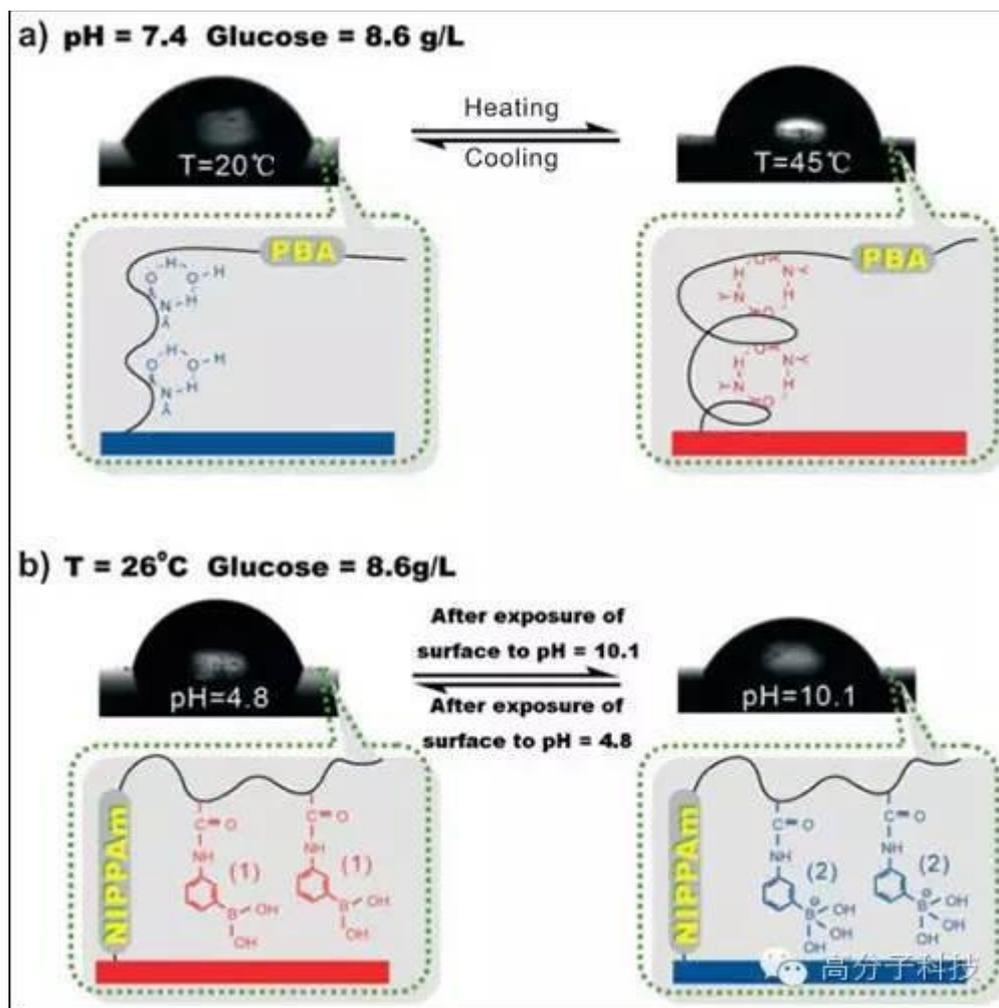
本文是作者对超疏水现象的科学定义和说明，是在超疏水PS纳米管薄膜工作的基础上，对一些学术争论问题的理解和解释。是研究人员之间学术观点的交流以及碰撞出火花的产物。

9，焓驱动的超亲水/超疏水表面的三态转变



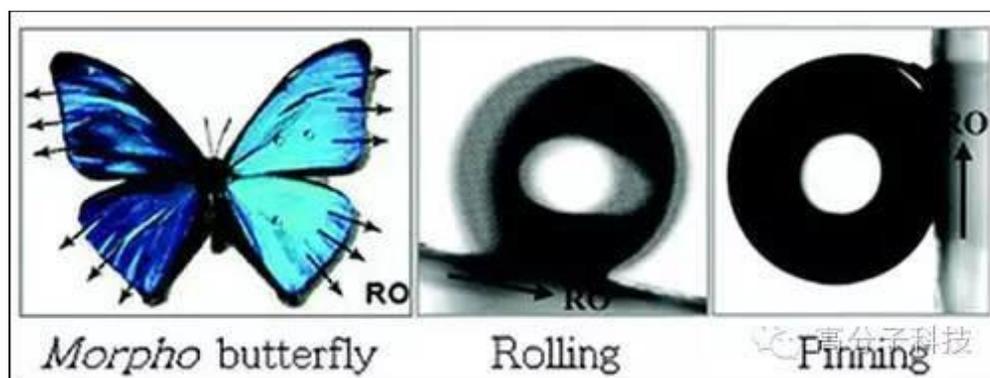
受到自然的启示，作者报道了智能表面，能够在热、光等外界刺激下产生超疏水和超亲水之间的转变。然而，几乎所有的表面转变都限制在熵驱动过程；焓驱动的转变没有被很好的探索和研究。本文，作者介绍了一种通过焓驱动过程实现在稳态超亲水，亚稳态超疏水，稳态超亲水三种状态之间进行转变。这种宏观的表面现象起源于DNA纳米器件的集团运动。这种转变行为能够为理解生物行为提供模型，也为智能表面的设计提供帮助。

10，多重响应性表面超亲水性和超疏水性的转变



具有超亲水性和超疏水性的表面的制备是通过表面粗糙度和表面化学变化的结合。目前有许多智能表面的报道，这些表面能够在温度、pH、光等外界刺激下实现超疏水和超亲水之间的转变。但是在诸如表面活性剂、智能微流体开关、药物输运等应用方面，多响应性材料是必不可少的，也就是要求材料对多重外界刺激均具有响应性。本文，作者报道了一种具有多重刺激响应性的表面，能够在随着葡萄糖、pH、温度的转变而在超亲水性和超疏水性之间转变。

11, 超疏水蝴蝶翅膀的定向粘附性



作者研究发现，大闪蝶翅膀具有定向粘附性，液滴在身体中轴线径向向外（RO）的方向容易滚动；而在逆RO方向则被紧紧钉扎在原位。有趣的是，这两种不同的状态能够通过调整蝴蝶翅膀的“姿势”（朝上或朝下）来转变，也可以通过改变气流经过翅膀的方向（沿RO或逆RO方向）而调整。作者对这种性质的成因进行了深入的研究和分析。

12，导电的超疏水红毛丹状聚苯胺空心微球



近期，微纳尺度的导电高分子空心球十分引人注目。通常，空心球往往通过球形粒子作为模板，例如二氧化硅胶体，PS珠，无机粒子等，随后通过煅烧、溶剂刻蚀等方法移除球心。由于总要移除球心物，因此再现性较差，并且在移除后难以保持原本的有序结构。

本文，作者介绍了能够通过自组装方法制备掺杂的聚苯胺（PANI）空心微球。通常，导电空心微球容易受到湿气、灰尘等环境因素的影响，而超疏水表面与水的接触角大于150度，具有很强的水排斥性，在实际应用中，能防冰雪粘附、交通工具的自清洁等。作者认为，给具有微纳结构的导电高分子赋予超疏水特性，将十分有趣。

★ <2008年> ★

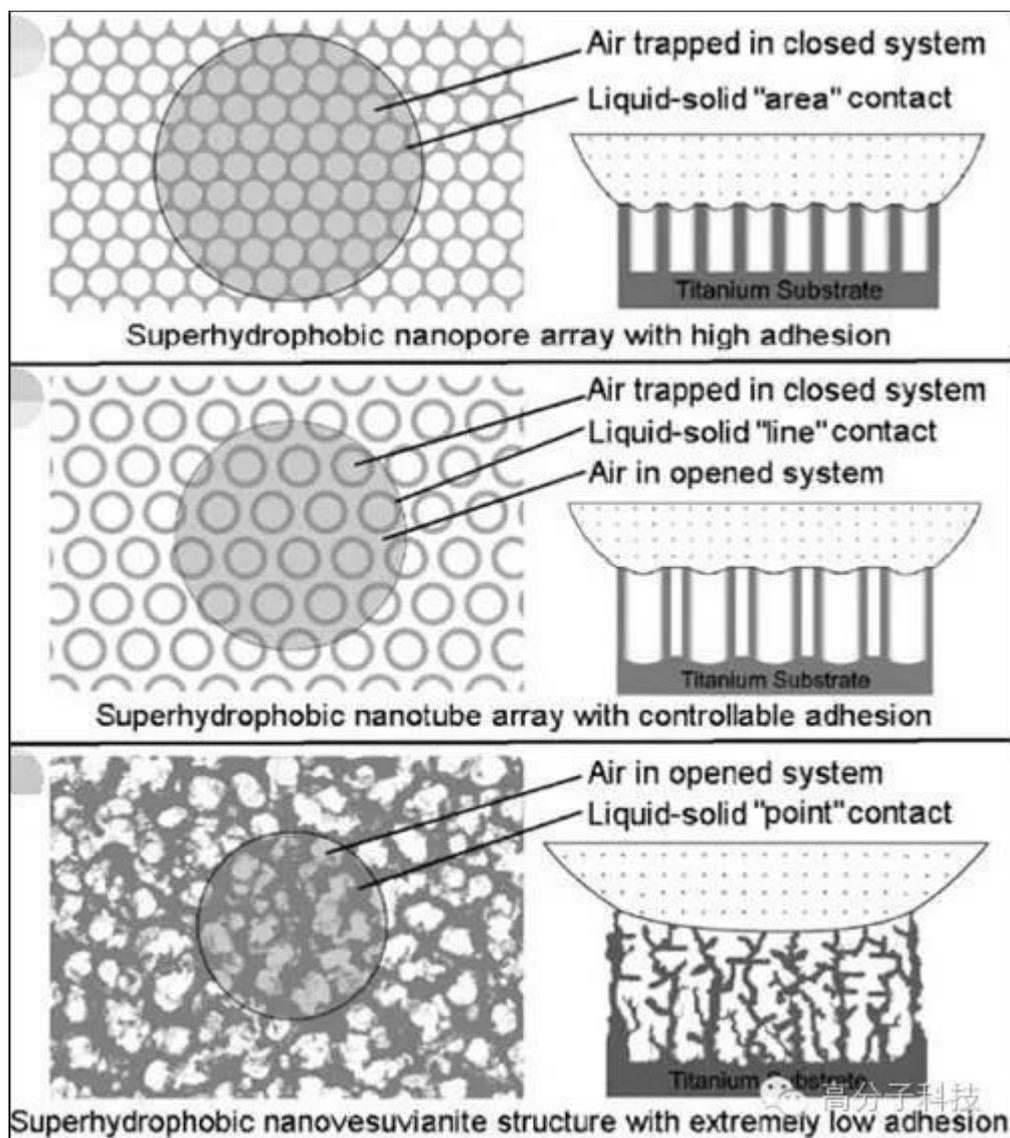
13，花瓣效应-具有高粘附力的超疏水状态



红玫瑰花瓣表面具有层状的微乳突和纳米褶皱，这些微纳结构为超疏水性提供了足够的粗糙度，同时也产生了对水的高粘附力。花瓣上的水滴呈现出球形，但将花瓣颠倒后却不易滚落。作者把这种现象称为“花瓣”效应，可与著名的“莲花”效应类比。作者通过对花瓣表面的模仿，使人工生产的仿生聚合物薄膜表面也具有了清晰的纳米压花结构。

★ <2009年> ★

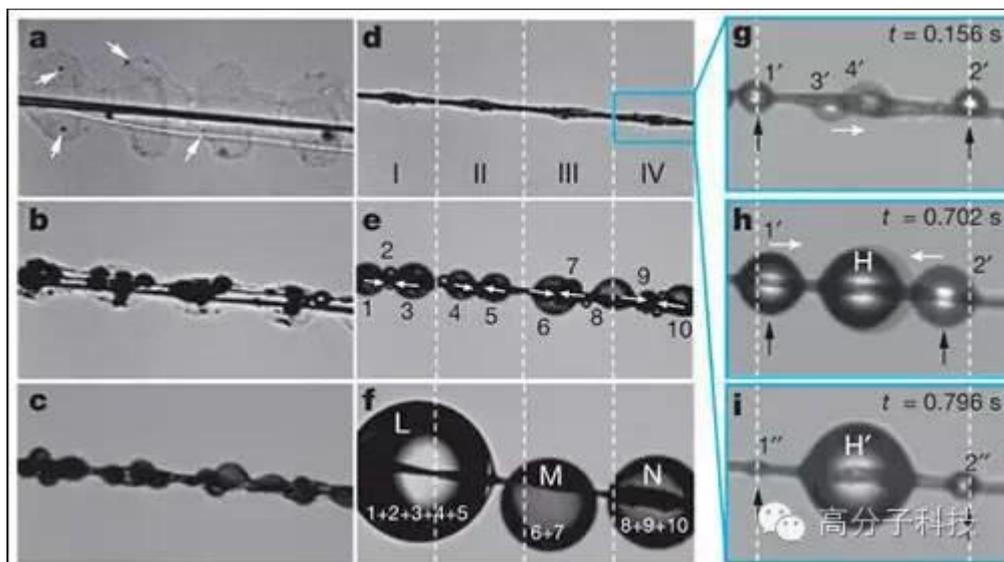
14，设计可调控水粘附性超疏水多空纳米结构



很多研究正致力利用多孔纳米结构来制造具有可调控的水粘附性超疏水表面。本文作者设计了三种超疏水纳米结构模型，包含有纳米孔阵列（NPA）、纳米管阵列（NTA）和纳米符山石结构（NVS）。基于粗糙度增强超疏水性和毛细作用诱导粘附性的基本原则，这些不同的多孔结构需要创造出具有低粘附力的表面。

★ <2010年> ★

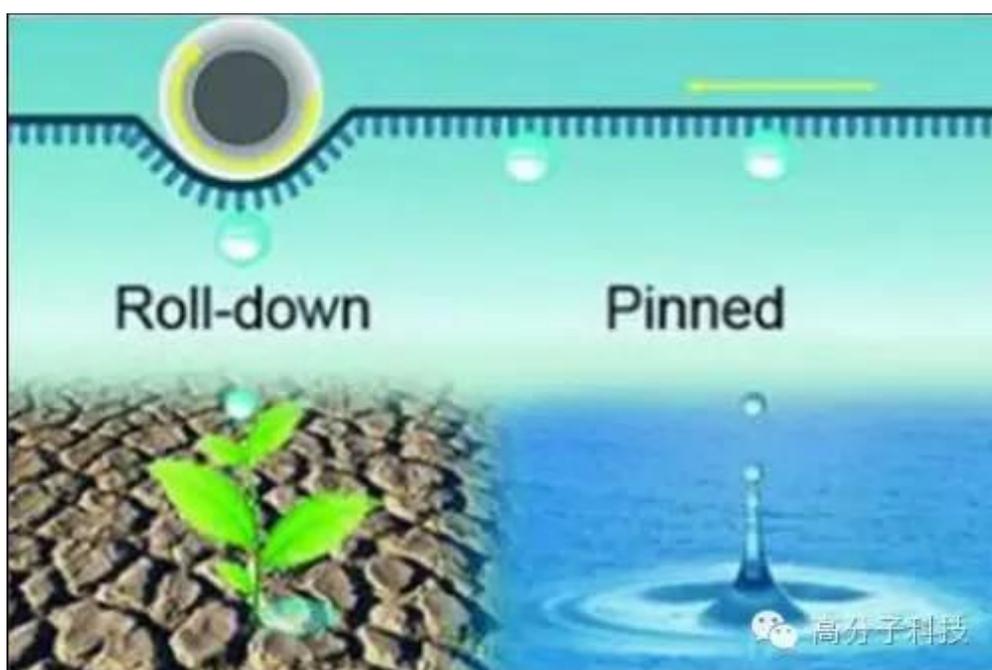
15, 润湿蜘蛛丝上水滴的定向收集



不论是植物还是动物，其生物膜表面的微、纳尺度的结构特性往往控制着表面与水的相互作用，也即润湿性。自然界中有一个有趣的例子，沙漠中的甲壳虫利用背部微米尺度的图案化的亲水和疏水区域来收集空气中的水分。作者对草间蜘蛛的蛛丝结构及性质进行了详细的研究，作者发现蛛丝具有的特殊结构使其在轴节和节点之间具有表面能梯度以及不同的Laplace压力降，两种因素共同导致了在蛛丝的轴节附近能够持续不断地定向的进行水滴的凝聚和收集。基于对蜘蛛丝研究的启发，作者设计了人工纤维，模仿了蛛丝的结构特点，使其具有定向的水收集性能。

★ <2011年> ★

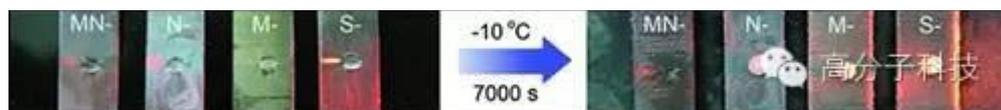
16，曲率驱动下水滴在超疏水表面运输的“钉扎”（Pinned）和“滚落”（Roll-Down）的原位可逆转换



本文作者首次报导了一种新颖的由曲率驱动的原位转变，实现了超疏水表面的钉扎（pinned）和滚落（roll-down）状态的可逆转变。作者利用具有高粘附力的超疏水的PDMS柱形阵列薄膜作为pinned态，而当其曲率增加到特定范围时，粘附力和滑移角开始明显下降，呈现出典型的Cassie超疏水状态。基于这种独特的转换，一个原位的水滴运输“机械手”成为可能。由于多数高分子薄膜柔性大，容易改变曲率，这就为润湿性的控制，提供了一种曲率驱动新途径。

★ <2012年> ★

17, 微米/纳米结构表面的抗冰性能



人们基于仿生明白了生物润湿性的机理，从而制备出了多种多样的超疏水表面。技术的提升，也使得基于仿生的材料结构的制备越来越精细。但很多室温下稳定的超疏水性能在低于零度时就失效了。疏水性和抗冰性对于诸如机翼、发电塔、雷达等长久处于低温的器件十分重要，一旦结冰将难以工作甚至损坏。

近期，一种ZnO纳米毛发组成的表面实现了超疏水和抗冰性统一结合，这主要基于这种材料的纳米结构和低表面能。作者受到蝴蝶翅膀微-纳结构特性的启发，并结合机械加工和晶体生长，对同时具有稳定的超疏水性和抗冰性的表面微观结构进行了研究，研究了微米尺度结构和纳米尺度结构对表面性能的影响。

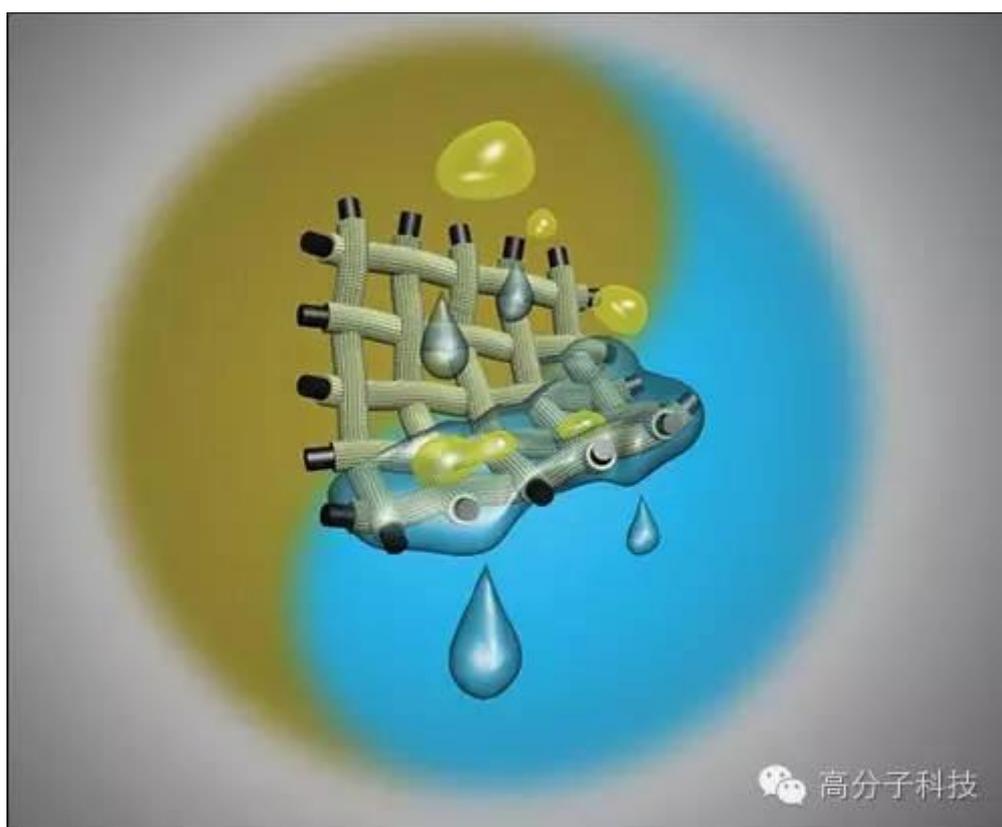
18, 静电纺丝法制备具有高油吸附能力多孔结构的纤维薄膜



通过静电纺丝法制备一种低成本的高油吸附性的PS薄膜。不同的纤维直径和多孔纤维表面拓扑结构在油吸附性能和油水分离中起到重要作用。作者分别用柴油、硅油、花生油、机油对这种PS薄膜的吸油性能进行了测试，结果表明吸油性能高于普通的没有多孔结构的纤维吸附剂。即使是很薄的多孔PS薄膜吸附剂同样具有出色的油水分离能力。

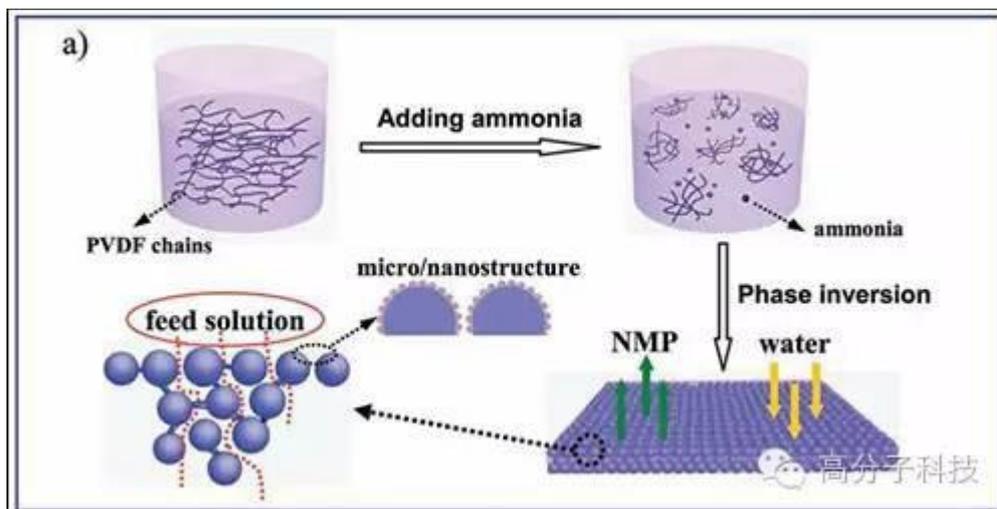
★ <2013年> ★

19，沸石涂覆的网片薄膜用于高效油水分离



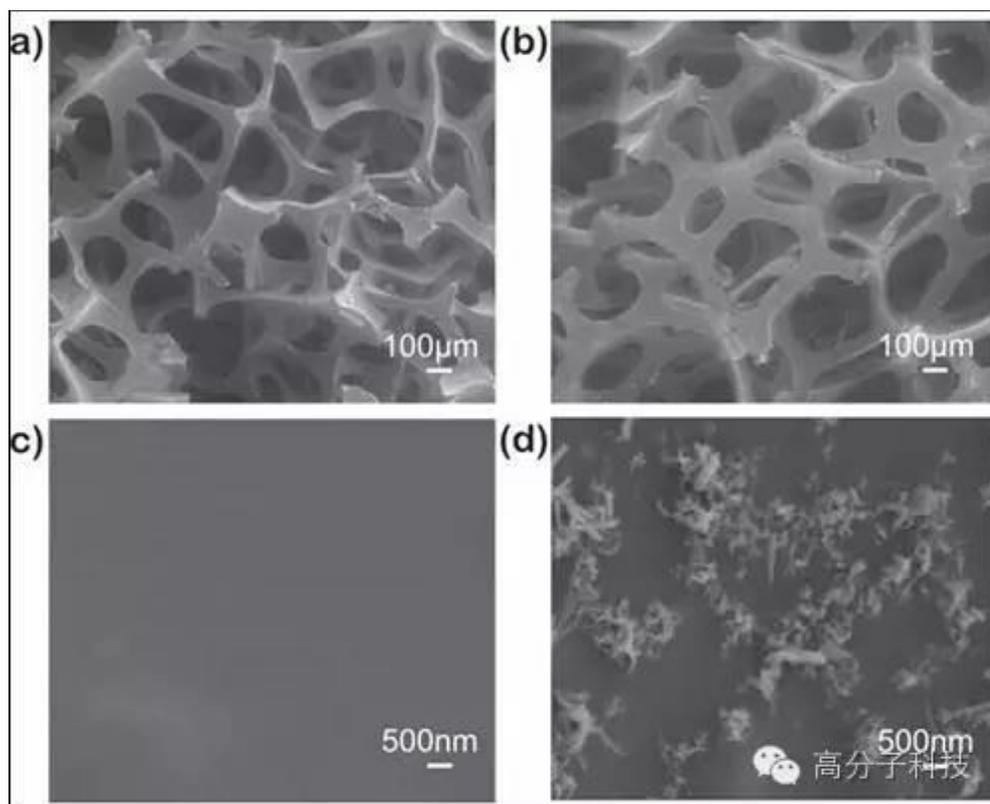
油水分离对于越来越多的工业含油废水泄露和原油泄露等紧急事件十分重要。具有特殊润湿性的薄膜材料常用于油水的分离。然而，制备高能效和稳定的适合特定油水分离的薄膜仍然是一个挑战。沸石薄膜独特的气孔性，出色的化学稳定性、热稳定性以及机械稳定性等都十分引人注目。本文中，作者首次展示了沸石涂覆的网片薄膜在重力驱动下的油水分离，实现了对多种不同类型油的高效分离，这是基于沸石表面出色的超亲水性和水下的超疏水性。

20，超疏水和超亲水的PVDF薄膜用于水油乳剂的高通量高效分离



本文，作者介绍了一种简易的方法来制备超疏水-超亲水的聚偏氟乙烯（PVDF）薄膜，主要利用了惰性溶剂诱导下发生的相反转现象。这种薄膜可有效分离没有表面活性剂和表面活性剂存在的水油乳剂，仅需通过重力驱动即可，并且有很高的分离效率。更值得一提的是，该膜具有很高的通量，是商用的高压驱动的滤膜的数倍，且易于循环利用。

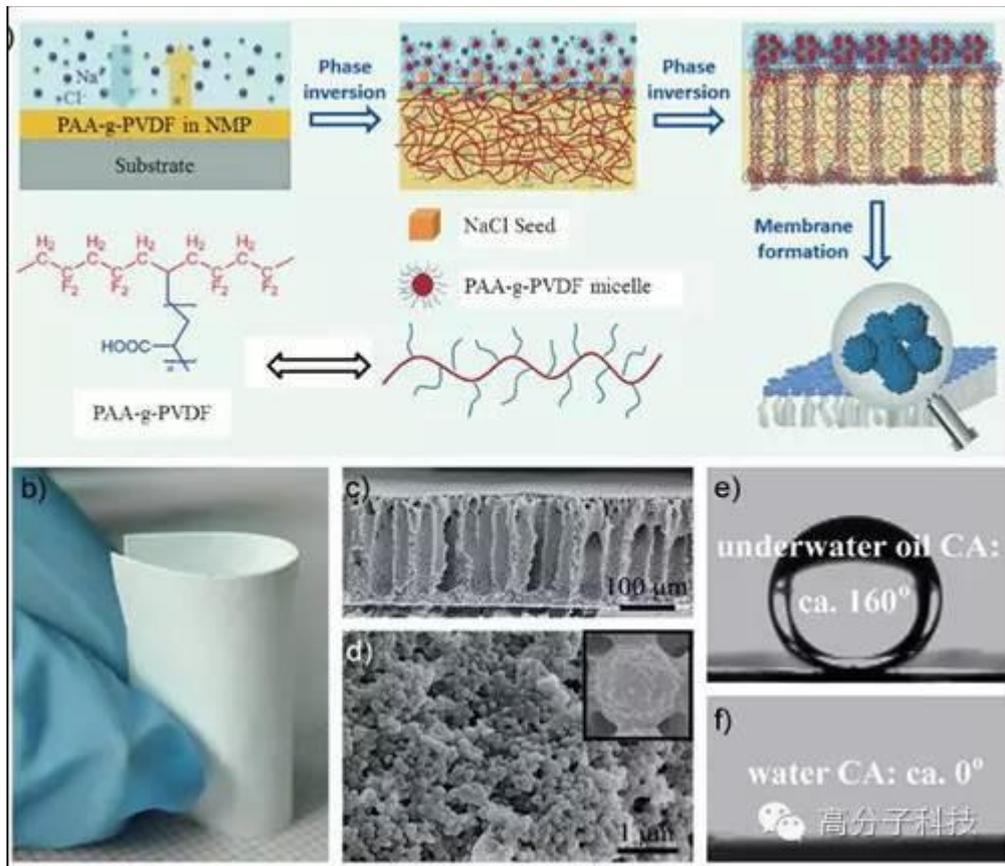
21，仿生多功能泡沫具有自清洁和油水分离功能



油水分离是一个世界性的挑战。受到自然界中具有自清洁性的莲花也和多孔生物材料的启示，作者设计制备出了同时具有超疏水性和超亲水性的聚氨酯（PU）泡沫，它密度低、质轻并且超疏水，因此能轻松的漂浮在水上。此外，这种泡沫材料对腐蚀性液体有强排斥性，具有清洁功能和油水分离功能，集多功能为一体。作者希望，这种低成本的制造工艺能够广泛地应用在多用途泡沫的生产中，以便在大面积油品泄露的清理中加以应用。

★ <2014> ★

22，盐诱导制备超亲水性和水下超亲疏水性的PAA-g-PVDF薄膜用于油水乳剂的分离



传统的用于乳化的水油混合物分离的聚合物薄膜往往受到低通量和一系列污染的制约。本文，作者利用盐诱导相反转的方法，设计制备了一种新颖的超亲水性和水下超疏水性的丙烯酸-偏氟乙烯接枝共聚物（PAA-g-PVDF）滤膜。膜表面分层的微/纳结构赋予了它超亲水性/水下超疏水性的性质。这种薄膜能够在施加很小压力（ $< 0.3\text{bar}$ ）的情况下分离油水乳剂，不论是否有表面活性剂的存在，都具有很高的分离效率和高通量，高于类似商用滤膜两个数量级。这种滤膜还能够很好地防阻塞并且易于长期的循环使用。

以上便是近年来江雷教授在超疏水领域影响力较高的文献简介。不知道大家对超疏水表面是否有了新的认识呢？