

零用水、零污水 染布如何不沾水

■ 本报记者 褚晶君
共享联盟·海宁 张会

大规模进行纺织品染色，生产过程中不使用、不排放一滴水——这件过去不可能的事，已经成为现实。

近日，全国首条低压无水染色产业链正式运行。走进位于嘉兴海宁市长安镇的浙江绿宇纺织科技（下称“绿宇”）有限公司生产车间，机械臂轻巧地将纺织品送入银色密封染缸。不见蒸腾汽水，不闻刺鼻药味，300公斤素白涤纶筒子纱便在无水环境中完成了色彩的华丽蜕变。

面对这项由纺织化学与染整工程领域专家王际平带领的绿宇团队自主研发的原创染色技术，中国纺织工业联合会副会长李陵申评价：“这项技术发明是颠覆性的，后续的广泛推广，有望突破我国印染行业受污水制约的困境，助力整个行业的高质量发展和可持续发展。”

千年染艺的现代困境

在现代，人们对七彩霓裳已经习以为常，但你可曾想过，古人是如何把布染成各种颜色的呢？

早在两万五千年前，我们的祖先就开始探索从大自然中获取色彩的方法。研究者在北京周口店山顶洞遗址就发现过远古人类在装饰品上用赤铁矿石进行染色。此后，矿物颜料被广泛地应用于岩画、祭祀、墓葬等社会活动。

“随着技术的进步，古人发现某些植物的根、茎、叶、皮经过加工后，同样可用于染色，由此发展出‘草木染’工艺。”上海工程技术大学纺织服装学院副教授裴刘军说，植物染料染色相较于矿物染料染色，在环保性、健康安全性、资源可持续性及文化内涵等方面具有显著优势，逐渐成为古代主流的染色方式。

到了近现代，化学染料的出现，让染料家族越来越庞大。但不管染色技术如何更新，始终离不开水。

“染色的本质，是染料分子进入纺织纤维内部。”裴刘军解释，“水是关键的介质，帮助染料完成这一过程。这种传统工艺因此被称为‘水浴染色’。”

但为追求鲜艳牢固的色彩，染色过程需在水中添加大量化学助剂，染后需大量水洗涤去除浮色，直接导致了巨量污水的产生。传统水浴染色工艺中，每印染加工1吨纺织品需耗水100至200吨，其中80%至90%的耗水会转化为废水。染色废水含有纺织纤维上的污物、油脂、盐类，以及加工过程中添加的浆料、染料、表面活性剂、助剂、酸碱等。这些物质导致废水具有高盐度、高色度、高有机物含量等特点，对水生生物和生态环境构成严重威胁。

随着环保要求的提高和环境意识的增强，全球印染界意识到：污水将成为扼住行业咽喉的难题。“无水印染”的构想应运而生。

20世纪80年代末，德国科学家在“无水染色”技术研发上有了重大发现。当二氧化碳处于一种特殊的“超临界”状态时，它能像水一样溶解染料，把染料“送”进纤维里。染完后，让二氧化碳退出“超临界”状态，变回普通气体，染料则变成固体分离出来。整个过程完全不用水。

这项名叫超临界二氧化碳无水染色



企业低压无水印染生产示范线。

通讯员 张平 摄



企业使用非水介质少水染色技术染出来的颜色均匀、色泽靓丽的散棉。



王际平展示采用非水介质少水染色技术的衣服。

通讯员 张平 摄

的技术，在当时是个了不起的突破。然而，直到2010年，荷兰一家公司才生产出全球首台超临界二氧化碳染色生产设备，实现聚酯纤维无水染色的规模化应用。

裴刘军分析，原因是该技术适用的染料很有限：一方面，天然纤维常用的活性染料、直接染料等染料几乎不适用；另一方面，操作条件苛刻，需在高压和高温条件下运行。由于设备成本高、染料适配性较低和工艺复杂，大多数企业对这一技术望而却步。

与此同时，尽管冷轧堆染色、热转印、数码喷印、色母粒着色等其他减少用水量的新技术不断涌现，但只要染布过程中还涉及用水冲洗、去除浮色这些步骤，就一定会产生污水。区别只是水量多少。

1959年出生的王际平，从小就痴迷于化学，1985年从原中国纺织大学（现

东华大学）纺织化学系硕士毕业后，留校任教。1990年，他又赴美留学攻读有机及高分子化学博士学位。2011年，王际平放弃了在美国日化品企业的高薪工作，回国担任浙江理工大学先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室主任，专攻非水介质/无水染色技术。

当时，行业技术攻关的重点始终在产业终端，也就是治理污水方面徘徊。王际平领衔的研发团队则把目光重新聚焦在产业前端——如果一开始就不用水，自然不会有污水问题。王际平坦言，当时“初生牛犊不怕虎”的他并未料到，这是一场近二十年的技术攻关“长征”。

万种溶剂中觅“替身”

化学世界溶剂万千，筛选出能高效促染、结合纤维且可循环回收的“替身”，

如同大海捞针。18年前，生活中的一件小事，给王际平带来了灵感。

他在美国日化品企业负责环保型技术开发时发现，纯干洗溶剂不串色，加入微量水后就会严重串色。他敏锐意识到：这种“串色”现象，本质就是染色。

要把这个灵感变成真正的技术，挑战巨大。研发团队从清洗剂、干洗剂等常用的有机溶剂入手，开始了漫长的筛选和开发。染色不均、介质难回收、如何做到污水零排放……失败的次数难以计数。

2014年，王际平来到海宁创立绿宇。这是一个关键转折点——从纯理论研究转向产业化探索。

5年后，技术攻关首次迎来重大突破。

团队从日用化学品类别的溶剂中，

为棉、麻、丝、毛等天然纤维找到了一种合适介质。“染布过程不使用盐类化合物，不产生废水，而且染料利用率特别高。”王际平将该技术命名为非水介质少

水染色技术。

怎么把技术真正用到生产线上？王际平继续思考。在他的带领下，企业在新疆投建了一条非水介质少水染色示范线，用于散棉和筒子纱的染色生产，以此到检验技术在大规模生产中的可行性。

实践证明：该生产线在保持色牢度等产品质量标准不降低的前提下，整个生产过程实现了废水零排放。

经中国纺织工业联合会鉴定，该技术达到国际领先水平，后又入选工信部《国家鼓励的工业节水工艺、技术和装备目录（2023年）》。这期间，团队不断改进技术，又开发出了针对棉梭织布、针织布的非水介质连续轧染技术，同样实现了污水零排放。

但是，王际平心里始终惦记着那个最终目标：从源头开始，全然实现“无水印染”。

有了前面的基础，团队转换思路，从

化妆品级有机溶剂中，成功找到了一种性能优异的新型染色介质。

王际平给记者展示了这种介质，这是一种透明无色的液体。“它能和染料很好地作用在一起，在接近常压的条件下，高质量完成针对涤纶纺织品的染色。”王际平告诉记者，测试显示，其上染率可接近100%，固着率达90%以上，匀染性、色牢度以及染色效率等各项指标均比肩传统水染，而且色彩艳度大幅提高。

2023年年中，低压无水染色技术的示范线终于组装调试完成，然而第一次试产结果让人失望：涤纶上染率和匀染性、色牢度等达不到产品设计要求，比实验室数据差了不少。又经过半年左右时间对设备和工艺的不断改进，2023年11月底，全国首条低压无水染色产业化示范线诞生。

一场行业绿色革命

比照超临界二氧化碳无水染色技术，低压无水印染技术可以接近常压的条件下，高质量完成针对涤纶纺织物类的染色。

此外，该技术还有生态和经济成本优势。以一个中小规模印染厂为例：传统工艺染1吨合格布约产生100吨废水，处理成本按10元/吨计。若该厂日产量10吨，采用新技术后，仅污水处理费一项，每天就能省下约1万元。王际平补充道，“这还未计算节水、节能和介质循环带来的综合效益。”

“这不只是技术突破，也是中国印染业实现绿色转型的重要跨越的新尝试。”东华大学化学化工与生物工程学院教授蔡再生强调，纺织服装产业是关乎国计民生的重要产业，尤其在浙江，它已成为规模超万亿元的传统优势产业。作为该产业的关键支撑环节，印染行业的绿色化升级至关重要。无水印染技术的成熟与推广，正为整个纺织服装领域注入崭新的活力与发展动能，推动产业向更加清洁、高效、可持续的方向迈进。

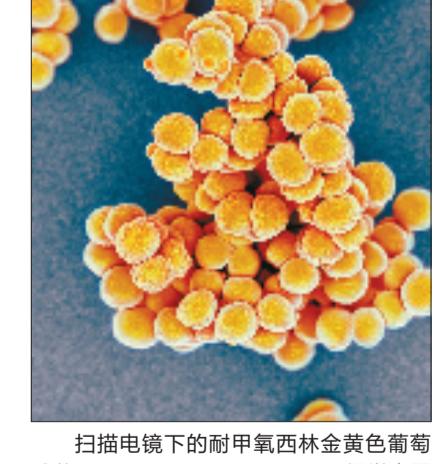
新技术的诞生，总需要有人勇尝“第一个螃蟹”。浙江省纺织品进出口集团有限公司董事长施闻雷对“无水印染”的概念早有耳闻，但实际落地的案例极少。当得知绿宇在非水介质染色技术取得进展时，他带领团队骨干，多次赴绿宇实地考察，并与王际平团队深入交流。

“它不是一个遥不可及的噱头，而是可验证、可实施的技术方案。”考察打消了施闻雷的顾虑。基于此，2021年，浙江省纺织品进出口集团与绿宇决定携手，共同推进无水染色技术的产业化进程。

在绿宇的展厅内，色彩艳丽的袜子、素雅的男士衬衫、弹性舒适的紧身裤……这些服饰均由企业运用低压无水印染技术染色的散棉、棉梭织布、针织布以及涤纶纱线等原材料制作而成。

尽管取得了突破性进展，但王际平坦言这项技术目前尚未尽善尽美，他还有进一步的目标：技术的介质回收率目前可达到98%以上，今后团队将持续优化介质回收环节，力争实现完全回收。

在一个个低压染缸内，这场静水流深的变革正持续涌动。王际平和他的团队，正用科技的力量，为中国印染工业描绘一个碧水蓝天的未来。印染业“高污染”的旧标签，正被这项中国原创技术悄然撕下。



扫描电镜下的耐甲氧西林金黄色葡萄球菌。

视觉中国

创新性的方法，为治疗慢性耐多药葡萄球菌感染提供了新策略。

但它的价值远不止于对抗MRSA这一种“超级细菌”。其真正开创了一种全新的抗菌范式：用生物分子实现精准靶向，靠物理机制杀灭病菌，再联动免疫系统巩固战果。这种“三位一体”的策略，为其他“超级细菌”的防治提供了可复制、可借鉴的框架。

浙大二院团队发文国际顶刊 “超级细菌”有望被攻克

细胞壁上的“专属身份证”—— β -O-乙酰葡萄糖胺结构。这种结构为MRSA独有，并不存在于人体正常细胞，所以抗体不会认错目标。

实验数据显示，这种抗体对MRSA的识别率高达98.8%，不管是从病人身上分离的临床致病菌，还是实验室里的“实验品”，都能被精准锁定，彻底避免了对正常细胞的误伤。

导弹的另一部分——多聚唾液酸(PSA)则承担了“引钙筑壳”的关键任务。它自带大量负电荷，像一块磁石，把周围环境里的钙离子吸过来，为后续的钙化工程储备好原料。

当APC与MRSA牢牢结合后，一场精准的“筑壳”行动就正式启动了。PSA会持续吸附环境中的钙离子和磷酸根离子，在细菌表面一层层沉积，最后形成一个坚硬的钙化外壳，原本活蹦乱跳的细菌被这个粗糙的“水晶层”裹得严

严实，内部结构彻底崩解。更关键的是，这种物理禁锢不只是让细菌动弹不得，还会从根源上切断它的生存可能——钙化外壳会阻断细菌的能量代谢、阻止蛋白质合成、干扰氨基酸代谢，并且切断营养物质交换路径。这相当于同时断了细菌的“水电粮”，让它在“水晶层”里慢慢饿死和憋死。

更让人惊喜的是，这场“钙化作战”不只是完成对细菌的物理消灭，还巧妙激活了人体自身的免疫系统。研究者通过单细胞测序发现，钙化后的细菌会刺激巨噬细胞（其功能相当于人体免疫系统里的“清道夫”），大量分泌钙结合蛋白S100A8或S100A9——两种蛋白就像免疫系统的“警报器”——能快速召集更多免疫细胞聚集到感染部位。实验结果显示，被激活的巨噬细胞吞噬病菌能力显著增强，同时还会释放炎症因子召唤“援军”，把那些可能漏网的残余病菌

底清剿干净。这种“物理杀菌+免疫激活”的组合，要比传统抗生素孤军奋战的效率高得多。

研究团队在感染了MRSA的动物身上展开测试。得了慢性肺炎的小鼠在接受治疗后，肺部能清晰看到钙化灶，活体MRSA数量大幅减少，小鼠28天生存率显著提升，体重和体温也都恢复到了正常水平；患有慢性骨髓炎的小鼠在治疗后，胫骨里的感染被彻底清除，骨头的形态基本恢复，甚至骨密度还有所回升。更关键的是，在安全性方面，高浓度的APC对人体正常细胞没有毒性。给健康小鼠连续注射28天后，检查发现它们的肝肾功能、血钙水平等指标都没有异常。测试进一步证实了这种策略的疗效与安全性。

这项研究的突破意义很快得到了国际学界的认可，德国吉森大学教授以《钙沉积治愈耐药菌感染》为题撰写评论文章，他评价这是一种“前所未有的、极具

新发现

■ 本报记者 朱平 通讯员 鲁青

“超级细菌”泛指那些对多种抗生素具有耐药性的细菌。对付它，是世界性医疗临床难题。不过，浙江大学医学院附属第二医院王本、徐峰教授课题组最近在国际顶刊《自然·生物技术》上发表了一项突破性研究，给这场“耐药菌之战”带来了新希望。

他们没有用抗生素“硬碰硬”，而是通过诱导“超级细菌”长出“钙化外壳”，把它变成动弹不得的“结石”，从而激活人体免疫系统，完成对病菌的彻底清剿。这一创新思路为解决耐药细菌难题开辟了全新路径。

传统抗生素在人的身体中发挥作用时，往往“不分敌友”，既能杀死细菌，也会损伤人体正常细胞。浙大二院团队的核心突破避开了这一短板，构建出一种能精准瞄准“超级细菌”的纳米级“细菌