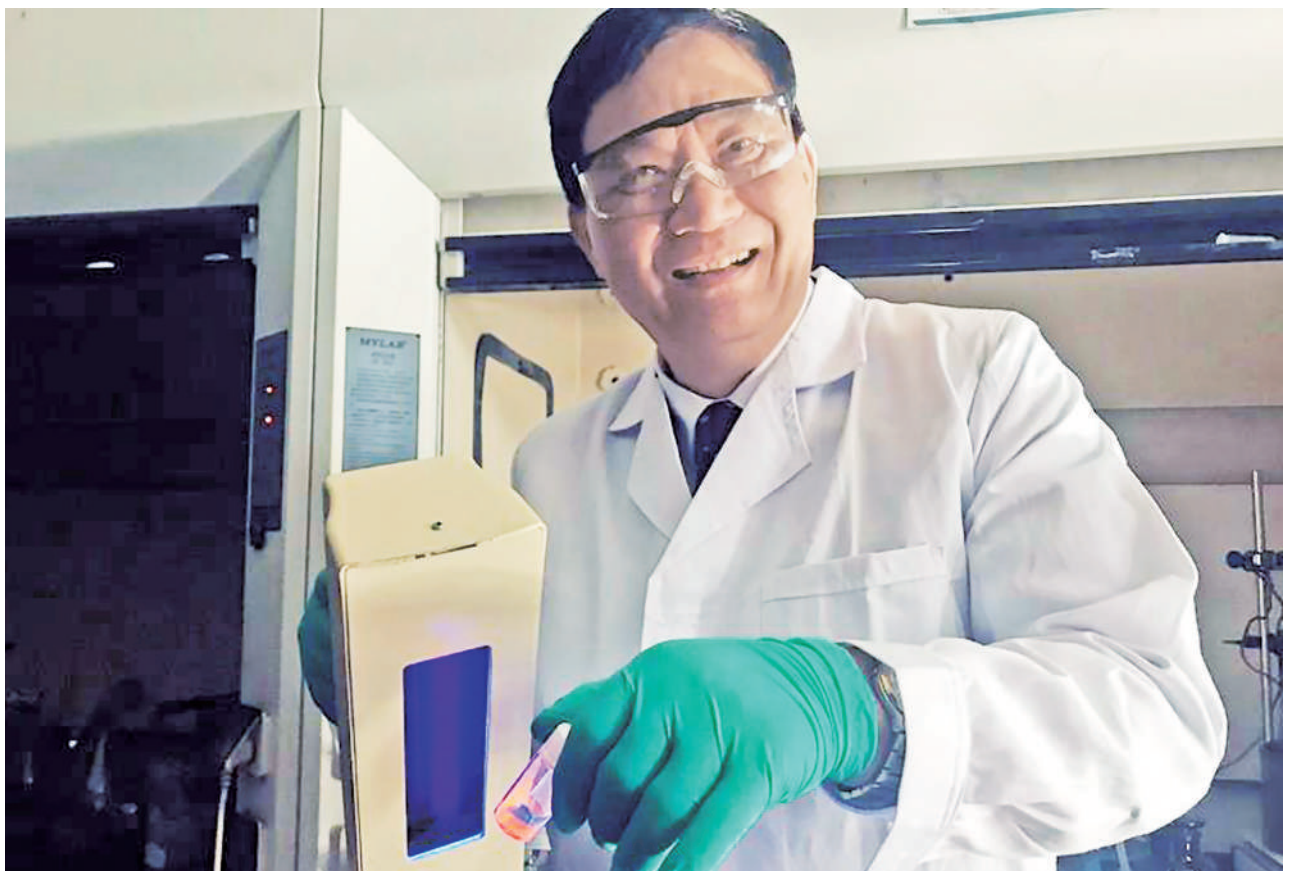
国家自然科学奖一等奖获奖项目“聚集诱导发光”解读——

聚集七彩荧光　打造“品牌分子”

经济日报·中国经济网记者　余惠敏　撰文/摄影

热点追踪

1月8日的国家科学技术奖励大会上，香港科技大学教授唐本忠团队的“聚集诱导发光”项目获得国家自然科学奖一等奖。这是一个什么样的成果？它能给我们的生活带来哪些改变？请看经济日报记者深入采写的报道



中国科学院院士、香港科技大学教授唐本忠向记者展示实验室中制备的装在玻璃小瓶中的AIE材料粉末，它们在紫光灯照射下可以发出强烈荧光。

颠覆经典的发现

HPS高颜值分子推翻光物理学常识，形成AIE现象——“聚集诱导发光”

唐本忠院士爱笑，也爱美。

17年前，他觉得一种叫做六苯基噻咯（HPS）的有机分子结构很漂亮，就安排几个学生去研究一下这种高颜值分子的性质。

学生在做实验时意外发现，HPS分子在溶液中不发光，在溶液挥发后变成干点时却可以发光。这种现象与当时已写入教科书数十年的一个光物理学常识正好相反——那个常识叫做ACQ，意思是“聚集导致发光猝灭”。

这个词组听起来很绕口，其实涵义很简单。发光分子在稀溶液里可高效发光，堪称“单打独斗”的英雄，而当它们在浓溶液中或者呈固态聚集起来时，就成了“三个和尚没水吃”，越聚集光越弱，直至完全消失。这种现象就叫做ACQ效应，是有机发光材料应用的“阿喀硫斯之踵”。因为发光材料多在聚集态下使用，比如制作一块有机发光二极管（OLED）的手机屏幕，发光材料就是在浓度最高的固体薄膜态使用。

如何降低ACQ效应的不利影响？抑制发光分子的聚集，是一种顺理成章并被大多数研究人员采用的思路，但效果并不理想。

“从焓熵角度看，分子在固态下聚集是一个不可抗拒的自发过程。分子就喜欢聚堆抱团，干嘛非得拆散它们呢？”具有逆向思维的唐本忠想到，只要找到越聚集越发光的荧光分子，就可以轻而易举解决ACQ效应的瓶颈。

因此，学生在2001年实验中发现的与ACQ效应完全相反现象，立刻引起唐本忠关注，他将这种新现象定义为AIE，意即“聚集诱导发光”。

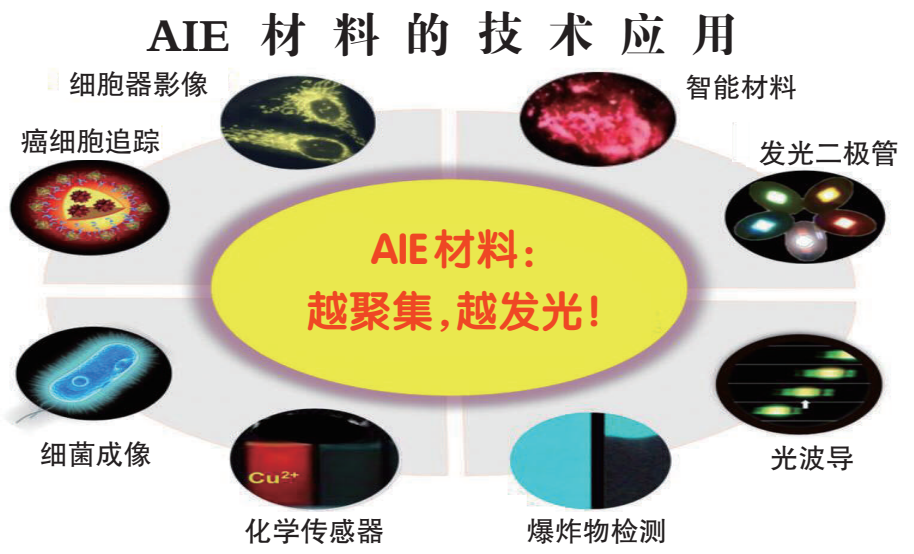
“其实HPS分子是一种研究较多的材料，在我们发现AIE现象以前，很可能也有人看到过这种现象，却因为与课本中的经典常识相反而轻轻放过了。”唐本忠笑着告诉记者，在他发表关于AIE现象的论文之后，参加国际会议时，就有同行遗憾地表示，自己做实验时也曾看到过这种现象，却未深入研究。

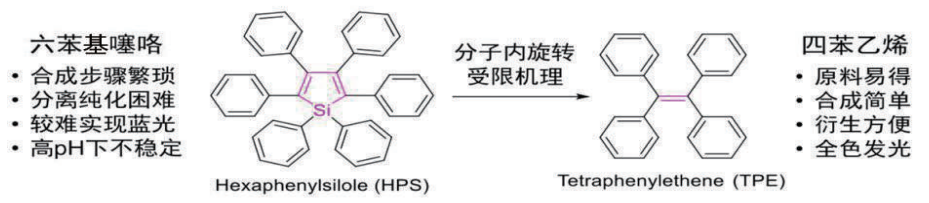
同样是发光分子，为何有的是ACQ式孤胆英雄，有的则具备AIE式团队精神？唐本忠决定剖析其发光机理。

发光是怎么产生的？发光，是物质把吸收的能量转化为光辐射的过程。光照、外加电场或电子轰击都可能让分子吸收能量，从基态跃迁到激发态；而从激发态跃迁回基态时，分子则将吸收的能量辐射出来而发光。如果材料受到光照激发后在10纳秒内能马上发出光，这种材料就叫做荧光材料。

实验室里，ACQ材料和AIE材料都能在紫光灯照射下发光，只是前者越分散越发光，后者越聚集越发光。从分子式结构来分析，ACQ分子多是具有平面结构的稠环化合物，非常稳定，就像一张大光盘。而让唐本忠发现AIE现象的HPS分子，它的中心噻咯环上，有6个用单键连起来的苯环，每个苯环都可以自由转动，就像螺旋桨一样。

基于上述结构特征，唐本忠提出了分子内旋转受限（RIR）机制：HPS分子在分散状态下，激发态的能量可以通过分子内苯环转动的机械运动方式消耗掉，无需通过辐射方式消耗，因此不发光。但当这些分子聚集起来时，分子间错落堆架，螺旋桨得不到足够空间，运动受限，能量就需要通过辐射途径消耗了，因此越聚集越发光。





他还推断：ACQ分子的环状结构稳定，分散状态下很难像HPS分子那样进行分子内运动，能量需要通过荧光辐射途径消耗，因此在分散时产生很强的荧光。但当ACQ分子聚集到一起时，“悲剧”发生了——它们太平整了，就像一张张光盘叠到一起，未被激发的低能量分子“盘”和被激发的高能量分子“盘”，因为亲密接触发生了能量转移，无需辐射跃迁就把能量耗散掉了，从而使发光减弱直至消失。

集齐七彩的荧光

通过RIM模型成功设计合成出各种颜色的AIE荧光材料，打造出中国的“品牌分子”

唐本忠对于ACQ和AIE现象的原理推测简单而直观，但它对不对呢？

为验证RIR工作机制，唐本忠团队开展了各种实验，通过改变外部环境或者对分子结构本身进行修饰，使分子内旋转不容易进行。在这些条件下，AIE分子发光增强，从而证实分子内旋转受限的确是导致发光增强的原因。

除了旋转，分子也可震动。震动也可消耗能量，减弱发光。而分子聚集之后，分子内震动受限也可使聚集体发光增强，从而产生AIE效应。旋转和震动都属于分子内运动，唐本忠因此将AIE机理从分子内旋转受限（RIR）扩展至更通用的分子内运动受限（RIM）模型。

RIM模型是否正确，决定了AIE现象是否可以转为实用。HPS分子颜值虽高，却有合成步骤繁琐、分离纯化困难、蓝光很难实现、高pH（氢离子浓度指数）环境下不稳定等缺点。如果唐本忠推断的RIM模型正确，那么实验团队可以依据模型设计合成更便宜好用的AIE材料分子。

唐本忠说：“一个正确的机理或者模型应有双重作用，可以帮助理解以前观察到的现象，更重要的是指导将来的分子结构设计。如果RIM机理正确，任何一个分子只要在单分子态易于分子内旋转或震动，就有可能显示AIE效应。我们因此设计并合成了一系列易于旋转或震动的分子，并高兴地发现它们都具有AIE特性。”

这一方面确认了他们提出的RIM机制正确性，另一方面使得科学家们可以容易地开发覆盖整个可见波光范围的AIE材料体系。由此，他们成功创立了四苯乙烯（TPE）AIE体系。TPE分子结构比HPS简单得多，它有4个单键连接的苯环“螺旋桨”，中心没有噻咯环，而是简单的乙烯键。TPE同样具备越聚集越发光的AIE特性，同时原料易得、合成简单、衍生方便，所得衍生物可全色发光。现在，TPE已经成为一个由中国科学家打造的“品牌分子”。

不仅如此，他们还依据RIM模型成功地发展出把原本的ACQ材料改造成AIE材料的通用策略：通过在ACQ分子“光盘”上添加AIE分子“螺旋桨”结构，新的分子再也不能盘盘相贴，聚集起来照样可以发光增强！

在十几年的潜心研究中，唐本忠团队开发出各种颜色的AIE荧光材料：“我们集齐了从蓝光到红光，覆盖整个可见光波长范围的聚集诱导发光材料体系。”

在一个著名漫画里，集齐七颗龙珠可以召唤神龙。集齐了七彩AIE荧光材料的唐本忠，又打算做什么呢？不同颜色具有不同的作用。用于指示癌症病灶位置的AIE生物探针就是红光更显眼。如果想用AIE材料做出发光二极管（OLED）显示屏，全彩色显示自然必不可少。

开拓全新的领域

AIE概念提出至今，全球已有1100多个单位从事相关研究，正从多方面为人类造福

越聚集越发光的AIE材料，在光电器件、化学传感、生物检测和成像诊疗等领域都具备极其优异的性能，其巨大潜力吸引了全球科研人员的参与。

从2001年唐本忠团队提出AIE概念至今，全球已有60多个国家和地区的科学家从事AIE相关研究，发表论文数和引文数均呈指数增长。仅2017年，该领域发表论文就超过1200篇，引用超过36500次。AIE已被纳入国内外本科生的实验教学，并被认为是核心概念的重点实验。2016年，《自然》一篇新闻深度分析文章将AIE列为支撑未来纳米光革命的四大纳米材料之一，且是其中唯一一个由我国科学家原创的新材料体系。

正如加拿大卡尔加里大学化学系教授贝琳达·海涅所说：“今天，我们讨论聚集不能不提聚集诱导发光。自从唐本忠团队的原始工作发表以来，毫不夸张地说，这个研究领域经历了爆炸式发展。”

开拓了一个全新领域的唐本忠，目前正从多方面推进AIE造福人类。

在应用方面，唐本忠最关注AIE在精准医疗中的推广。例如，给癌症病人动手术时，犬牙交错的肿瘤边缘对医生技术形成严峻考验，切除不净会埋下复发隐患，切除过多又会让病人遭遇不必要的伤害。对此，使用AIE材料进行细胞器成像，一毫米大小的肿瘤也可以通过荧光精准呈现。唐本忠与国内外同行合作，已经在大动物身上开展了AIE用于手术荧光导航的初步实验，取得了很好效果。他的博士后还开了一家公司制备和销售AIE生物探针。

他们还发现，有一种AIE材料可以精准追踪四处逃窜的癌细胞，在癌细胞中聚集发光，却对正常细胞视而不见。这有可能成为未来早期诊断癌细胞的新手段。

目前，全球大部分商业化生物荧光探针都是传统的ACQ材料，其知识产权由国外企业把控，价格昂贵且效率远不如AIE材料。“AIE材料具有中国自主知识产权，且性能优异，将其成果产业化，切实为改善人民的医疗条件贡献力量，是我们的愿望。”唐本忠说。

在新材料体系方面，唐本忠团队还将AIE体系从荧光扩展到磷光，实现了纯有机晶体的高效室温磷光。

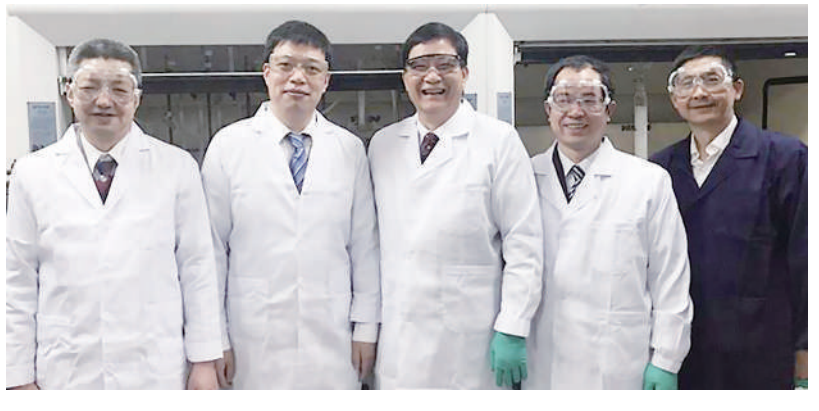
在新理论原理方面，唐本忠团队将目光投向了非芳香环分子。有机分子发光，一般需要共轭电子结构，因此传统发光材料是含芳香环的化合物。没有芳香环的分子会发光吗？

唐本忠团队发现，很多不含芳香环的合成高分子和天然产物都可发荧光和磷光。这些分子的结构特点是富含杂原子，可以形成发光的簇结构。氧、氮、磷、硫等杂原子都可形成簇结构，因此理论上都可发光。自然界的很多东西都富含这几类杂原子，都存在簇发光现象，比如，大米、淀粉、纤维素、蛋白、DNA等在紫外光照射下都可发光。

“簇发光为我们寻找天然发光材料开辟了一条新路。”唐本忠说，传统发光材料多为人工合成的含芳香环有机分子，通常具有生物毒性，会造成环境污染。而基于AIE，我们有望从自然界寻找到廉价、无毒、环保的非凡发光材料。“这是一条走向未来的新路、一片充满无限可能性的新天地。”唐本忠说，“我们已经是科技大国，但从大国变强国还需要跳过一个大门槛，需要有更多原创性和引领性的研究。原创科研就像刨一口井，越往下刨泉眼越多，源源不竭”。

越聚集越明亮的AIE材料，让我们看到了团结的力量。我们期待着，步入新时代的中国科技，能出现更多像AIE一样的原创研究，从局部亮点走向全面发光。

聚起来，发光吧！



AIE研发团队主要成员合影。

我国率先攻克虚拟同步机技术——

不听话的新能源被「驯服」

本报记者　王轶辰

由于可有效破解光伏、风电等新能源大规模友好并网难题，20年来，发达国家一直在努力攻关虚拟同步机技术，但始终未有实质突破。近日，世界首个具备虚拟同步机功能的新能源电站在国家风光储输示范电站建成投运——新能源并网的最大技术难题就此被一举攻克。这对我国推动能源转型，构建清洁低碳、安全高效的能源体系具有重大而深远的意义。

近年来，光伏、风电等新能源因清洁环保得到快速发展，但在不断优化能源结构的同时，也为我国电网的安全运行带来了一定挑战。在电力系统里，发电和用电是同时完成的，即用户需要多少电，电厂就要发多少电，如果发电端无法与大电网的节奏保持一致，就会出现问题。

在我国大力发展新能源之前，煤电占据了绝对主力电源的位置。虽然污染较大，但是煤电的“纪律性”非常强，可以始终服从命令：电力需求大时，电厂就多发电；需求小时，就少发电，始终与大电网系统“配合默契”。反观新能源，它虽然清洁，但最大的毛病就是不“听话”。比如光伏发电，需要光照足够充足；风电发电，又需要风力达到足够要求。新能源的步调很难与大电网保持一致，导致其大规模安全并网成为长期难题。

保持用电量和发电量的动态平衡是电网安全运行的关键。为保障新能源大规模安全并网，就需要用到新能源虚拟同步机——这一“驯服”新能源的好帮手。

“新能源虚拟同步机科技示范工程历时两年，是国家电网公司十大科技创新示范工程之一。”国网冀北电力有限公司科技信通部主任王葆洁介绍说，这一技术能够使新能源机组由“我行我素”的“自转”转变为“协调统一”的“公转”，主动支撑电网频率、电压波动，有力保障电网安全稳定运行。

王葆洁介绍，虚拟同步发电机技术是一种通过模拟同步发电机组的机电暂态特性，使采用变流器的电源具有同步发电机组的惯量、阻尼、一次调频、无功调压等并网运行外特性的技术。更为重要的是，虚拟同步机并不需要对电网大规模改造，不仅实用性强，还经济实惠。

为攻克这一世界级难题，国网冀北电力协同中国电科院、南瑞集团等单位开展了关键技术攻关和装备研制，最终全面掌握了虚拟同步机核心技术，为大规模新能源友好并网提供了新技术手段，巩固了我国在相关领域的技术引领地位。

记者了解到，示范工程取得了多个成果：相继在虚拟同步机抑制系统振荡、大容量变流器低电压穿越等方面取得12项关键技术突破，建成投运风电、光伏和电站式三类虚拟同步机；完成了世界首次基于虚拟同步机的新能源电站黑启动试验，验证了三类虚拟同步机的性能指标，以及在大规模新能源汇集地区应用的可行性，填补了相关技术研究和示范应用空白；此外，基于技术经济对比分析，首次提出储能优化配置方案和风机转速综合恢复策略，解决了实际运行难题，形成了风储配合的应用模式。

据悉，该工程建成投运后，提升了电网安全稳定运行水平，为新能源友好并网提供了标准典范，这对于建设国家张家口可再生能源示范区和我国清洁能源大规模开发利用具有重要意义。

心脏衰老能逆转吗？

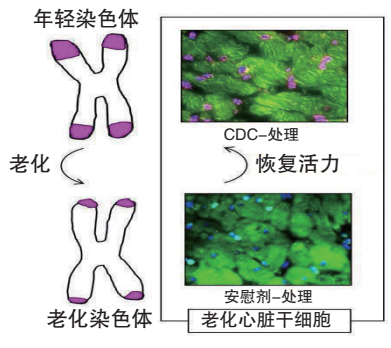
心脏干细胞化身“青春之泉”

本报讯　记者陈颐报道：逆转心脏衰老的梦想，能实现吗？美国西达赛奈心脏中心最新一项研究振奋人心：心脏干细胞注射或将帮助逆转人类心脏衰老进程。

这项研究发表于知名期刊《欧洲心脏杂志》，项目主要研究者、西达赛奈心脏中心主任马尔班表示，“我们发现了特定心脏干细胞可以逆转因心脏衰老带来的健康问题”。

研究人员先将一组新生实验鼠的心肌球源性干细胞注入老年实验鼠的心脏中，而在另一组同龄老年实验鼠身上仅注入盐水。1个月后，接受了心肌球源性干细胞注射的老年实验鼠心脏功能有所提升，心肌细胞端粒变长，运动能力平均提升了近20%，毛发生长速度加快。“这些干细胞逆转衰老的方式十分神奇，来自年轻细胞的囊泡似乎包含了所有能够逆转时间必要的指令。它就像一个青春之泉。”马尔班说。

不过，研究者也表示，这项实验并未监测接受心肌球源性干细胞注射是否会延长寿命。因此，他们还有更多后续工作要做。



实验鼠接受年轻的心脏干细胞注射后，保护染色体不受损伤的端粒逆向生产变长。

本版编辑　郎　冰
联系邮箱　jjrbxzh@163.com