

材料月报

第 4 期

太原理工大学材料学院 主办

2018 年 8 月 20 日

要 目

P3 世界首例无金属钙钛矿型铁电体

东南大学熊仁根教授团队、游雨蒙教授课题组在分子铁电领域取得又一重大突破—研制出世界首例无金属钙钛矿型铁电体。相关研究在《Science》上在线发表。

P6 光促进甲烷转化取得重大突破

上海科技大学物质科学与技术学院左智伟科研团队在光促进甲烷转化这一重要能源化工领域取得突破性进展：成功发展了一种廉价、高效的铈基催化剂和醇催化剂的协同催化体系。该研究成果发表于《Science》上。

P8 有机太阳能电池研究获突破性进展

南开大学化学学院陈永胜教授领衔的团队设计和制备的具有高效、宽光谱吸收特性的叠层有机太阳能电池材料和器件，实现了 17.3% 的光电转化效率，让有机太阳能电池距离产业化更近一步，研究成果在线发表于《Science》上。

P10 来自大自然的生物相容性 AIEgens

近日，香港科技大学唐本忠院士团队在英国皇家化学会旗舰期刊《Chemical Science》上报道了一种具有聚集诱导发光特性的天然产物黄连素，表明了天然产物作为 AIE 探针的巨大潜力。

电镜看见液体中的光催化产氢

(Self-hydrogenated shell promoting photocatalytic H₂ evolution on anatase TiO₂)

近日，北京工业大学固体微结构与性能研究所隋曼龄教授，与香港城市大学陈福荣教授和北京航空航天大学物理学院刘利民教授合作，成功将光纤引入液体环境透射电子显微镜中来原位观察光催化水裂解产氢反应过程，研究工作发表在《Nature Communications》上。

光催化水裂解产氢，是一种有效的氢能生产技术手段。近 40 年来，随着光催化科学的不断发展以及光催化机理研究的不断深入，利用各种技术手段，来直接观察水与催化剂界面的化学变化过程，成为当今界面化学研究领域的难点与热点。

尽管最近几年有些研究组探索过水与催化剂界面的相互作用，然而大多数实验和理论研究仍然局限于在单分子水层或者水蒸气环境条件下的反应过程，这与实际光催化裂解水过程中的光照以及液态水环境相差甚远。另外需要指出的是，自然界中大多数光催化产氢过程都是在固液界面进行的。因此，如何发展一种新的实验技术手段和计算方法，能够实现在液体水以及光照条件下，在纳米甚至原子尺度观察光催化裂解水过程中催化剂与水界面的化学变化过程，进而弄清真实光催化过程中的原子和电子结构，具有非常重要的科学研究价值。

该科研团队成功将光纤引入液体环境透射电子显微镜中来原位观察光催化水裂解产氢反应过程。他们在其前期研究电子束辐照对水以及氧化物损伤作用机理的基础上，通过精确地调控电子束剂量，成功地开展了可以把电子辐照损伤和光催化这两个物理现象分开来的原位观察实验。首次在实验上发现：TiO₂ 光催化水裂解过程中，氢原子 H 会优先进入到 TiO₂ 晶格内部，导致 Ti⁴⁺ 向低价态的 Ti³⁺ 转变，进而在 TiO₂ 表面形成纳米尺度的氢化层。

结合第一性原理计算进一步发现，该层氢化层会降低 H₂ 在亚表面的形成能，显著加速 H₂ 的形成；另一方面，氢化层还可以促使 TiO₂ 表面的水分子处于裂解态，进而提高光催化产氢效率。该研究结果揭示出：在真实光催化条件下，是率先形成的 TiO₂ 表面氢化层对光催化过程起到关键的作用；而并非传统理论所认为的纯 TiO₂ 表面的作用。该研究结果打破了传统认知中 TiO₂ 表面本身决定 TiO₂ 光催化效率的机理，并为理解实际光催化过程中材料表面成分和电子态结构 (Ti³⁺) 变化对光催化的作用机理，提供了全新的认识和理论支持。

—摘编自科袖网 2018-07-18

柔性钙钛矿电池最高效率达 18.40%

(Record Efficiency Stable Flexible Perovskite Solar Cell Using Effective Additive Assistant Strategy)

中国科学院大连化学物理研究所薄膜硅太阳能电池研究组研究员刘生忠和陕西师范大学研究员杨栋、博士冯江山等在柔性钙钛矿太阳能电池研究方面取得新进展，相关结果发表在《Advanced Materials》上。

柔性太阳能电池由于具有质量轻、便携带、易于运输、安装简单等优点备受关注。高性能柔性钙钛矿太阳能电池的关键部分是低温界面层和高质量钙钛矿吸光层。该团队前期通过开发低温界面层，在柔性钙钛矿电池中取得了一系列成果：2015年，利用室温磁控溅射法沉积氧化钛界面层，制备的柔性钙钛矿电池效率达到 15.07%；2016年，首次将离子液体作为界面层应用到柔性钙钛矿电池中，将柔性钙钛矿电池效率进一步提升到 16.09%。

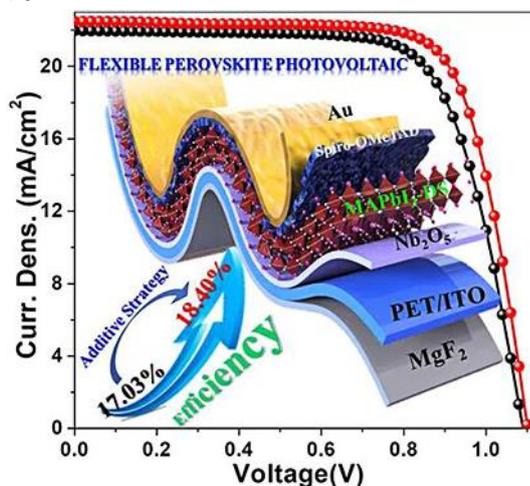


图 1 柔性钙钛矿电池结构示意图及正反扫 J-V 性能曲线

最近，该团队运用二甲硫醚作为添加剂，通过控制钙钛矿吸光层的结晶过程，得到晶粒尺寸较大、结晶性较好、以及缺陷态密度较低的钙钛矿薄膜，将柔性钙钛矿太阳能电池的效率提高到 18.40%，同时将大面积（1.2 cm²）柔性钙钛矿太阳能电池的效率提升到 13.35%。另外，利用添加剂制备的钙钛矿吸光层稳定性得到显著增加，在 35% 的湿度下放置 60 天，电池的效率仍能保持 86% 的原有效率，而无添加剂制备的钙钛矿太阳能电池效率相同条件下仅可保持原有效率的 50%。此项研究成果是目前柔性钙钛矿电池的最高效率，为柔性钙钛矿太阳能电池的发展奠定了实验和理论基础。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-07-22

世界首例无金属钙钛矿型铁电体

(Metal-Free Three-Dimensional Perovskite Ferroelectrics)

东南大学熊仁根教授团队、游雨蒙教授课题组在分子铁电领域取得又一重大突破——研制出世界首例无金属钙钛矿型铁电体。美国东部时间 7 月 13 日，相关研究被世界顶级学术期刊《Science》杂志在线发表。这是自 2013 年、2017 年以来，该团队在《Science》杂志上以东南大学为第一完成单位发表的第三篇论文。

常见的钙钛矿材料主要有两种，无机钙钛矿和有机-无机杂化型钙钛矿。这两类钙钛矿材料均带有金属元素，虽然金属元素的出现赋予了钙钛矿材料某些功能性优势，但也加大了其加工、制备的困难。除此以外，某些金属元素更是会造成严重的环境问题。因此，人们一直在寻找钙钛矿家族中的第三类——全有机钙钛矿材料。国际顶级学术期刊《Science》曾在 2002 年预言过无金属钙钛矿材料的种种新奇特性。但是，十余年过去，无金属钙钛矿材料的发展一直止步不前。

东南大学的分子铁电团队，经过刻苦攻关，利用带电分子集团取代无机离子，成功地制备出了一大类共计 23 种全有机新型钙钛矿材料。其中，共有 17 种材料显示出了良好的铁电性。更值得一提的是，团队合成了 4 种材料的左手对映体、右手对映体及外消旋化合物，并分别证明了它们的铁电性。在历史上，像这样左手性、右手性和无手性的化合物同时具有铁电性的例子从未有过报道。

今后，这类材料将在数据存储、逻辑运算、光量子通信、光学雷达、能源转换等应用中崭露头角。这一研究成果被《科学》发表，不但将十余年前的预言变成了现实，为钙钛矿这一重要的材料家族增添了新的成员，同时也为铁电材料的研究带来了新的思路 and 方向，更是标志着我国在分子材料领域又一次走在了世界前列。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-07-24

新型不锈钢高温抗氧化行为及机理

(High temperature oxidation behavior of ferritic stainless steel containing W and Ce)

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室、2011 钢铁共性技术协同创新中心陈礼清教授等人开展了一项全新研究，深入探索了元素 W 和稀土 Ce 对新型中铬铁素体不锈钢高温抗氧化行为的影响及其机理。该研究结果发表在国际著名期刊《Corrosion Science》上。

研究团队设计了一系列不同 W 和 Ce 含量的 444 型铁素体不锈钢，开展了高温下抗氧化行为的研究，运用多种微观分析手段对其界面/基体处氧化产物和析出物等进行了表征。该研究发现：添加稀土元素 Ce 或同时复合添加一定量 W 能显著降低铁素体不锈钢在高温下的氧化反应速率，所形成的氧化膜更加均匀致密，并具有良好的附着性，在氧化膜/基体界面处缺陷数量明显减少。不同的 W 添加量对高温抗氧化行为起不同的作用；添加 Ce 或同时添加 Ce 和 W 元素可以降低 (Fe,Cr,Si)₂(Nb,Mo) 型 Laves 相在 1000-1050 ℃ 下的固容量，Laves 相在晶粒内或晶界处析出可有效抑制反应元素的扩散。此外，在氧化膜/基体界面处析出的 Laves 相相对氧化膜的生长行为和剥落机制产生重要影响，Laves 相的大量析出会导致氧化膜的剥落。

铁素体不锈钢成为制备固体氧化物燃料电池 (SOFC) 连接体和汽车排气歧管的最佳候选材料。目前用于制造汽车排气歧管的传统铁素体不锈钢的工作温度约为 900 ℃，但为了适应环保要求、满足日益严苛的汽车尾气排放标准，并考虑汽油充分燃烧后的温升，汽车排气歧管的局部工作温度将达到 950-1050 ℃，甚至高达 1100 ℃。为适应新一代汽车排气系统热端在如此高温环境下使用，有必要在了解合金化机理进行合金设计的基础上，进一步深入认识新型铁素体不锈钢的高温服役及其退化行为。已有研究表明，通过添加合金元素 W，铁素体不锈钢的热机械疲劳性能可得到改善，但 W 对铁素体不锈钢高温抗氧化性能的影响研究较少。

迄今为止，合金元素的合适添加量及其作用机理仍不明确，尤其是高熔点合金元素 W 和稀土 Ce 的协同作用对铁素体不锈钢高温抗氧化性能的影响机理需要进一步探索。对多元合金化耐高温铁素体不锈钢的高温抗氧化行为及机理取得深入的认识，将对新型耐高温铁素体不锈钢的设计和应用起重要关键作用。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-02

综述：无铅压电块体材料近展

(Recent Development in lead-free perovskite piezoelectric bulk materials)

近日，四川大学材料科学与工程学院吴家刚教授团队在国际材料科学领域顶尖综述期刊《Progress in Materials Science》发表了 90 页长篇综述论文。这是该团队在该期刊发表的第二篇文章，也是四川大学作为第一单位在该期刊上发表的第三篇文章。

具有钙钛矿结构的无铅压电材料以其独特的机电转换功能可广泛应用于驱动器、换能器、传感器等各种电子器件中，目前真正得到实用化的是铅基压电材料。然而，随着欧盟、中国等国家颁布的一系列禁止在电子器件中使用有毒元素铅的法律法规以来，制备具有可与铅基压电材料相媲美压电性能的无铅材料体系成为近十余年来的研究热点。鉴于此，研究者投入了大量的精力开展压电陶瓷无铅化研究，并在组分诱导的相界设计、电学性能优化、物理机理探索等方面取得了一系列重要结果，促进了无铅压电材料的研究进展和实用化进程。

为了实现无铅压电材料实用化目标，本论文结合团队已有工作系统地阐述了四类钙钛矿型无铅压电块体材料(铌酸钾钠、钛酸铋钠、钛酸钡、铁酸铋)的组分改性调控相结构和畴结构的近期研究进展，归纳总结了钙钛矿型无铅压电块体材料的结构与性能(压电、应变、温度稳定性)的关联，探讨了高压电性能起源机理，特别对无铅压电材料的器件研究进行了介绍与评价。最后提出了无铅压电材料在实现最终实用化道路上仍需解决的关键科学问题，并展望了该领域未来的发展方向。

四川大学材料科学与工程学院吴家刚教授在前期研究工作中，提出了通过组分设计来构建新型“三方-四方”相界以增强铌酸钾钠基无铅陶瓷性能的新思路，依此新思路，使其压电性能实现了突破($d_{33}\sim 570$ pC/N)，为当前国际上报道的该类非织构陶瓷最高值；通过“相界-性能关联”和“纳米铁电畴”研究，诠释了 KNN 基陶瓷高压电性起源。相关研究成果受到欧洲无铅压电材料领军人物 Rodel 院士等国际著名学者积极评价。发表在 Chem. Rev.、Prog. Mater. Sci.、J. Am. Chem. Soc.(2014)、Adv. Mater 和 Energy Environ. Sci 五篇文章入选了 ESI 高被引论文，其中两篇为热点论文。上述工作得到国家自然科学基金优秀青年基金(51722208)和重点基金(51332003)、四川大学研究生创新基金资助。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-15

光促进甲烷转化取得重大突破

(Selective functionalization of methane, ethane, and higher alkanes by cerium photocatalysis)

上海科技大学物质科学与技术学院左智伟科研团队在光促进甲烷转化这一重要能源化工领域取得突破性进展：他们成功发展了一种廉价、高效的铈基催化剂和醇催化剂的协同催化体系。这一基础研究领域的突破，解决了利用光能在室温下把甲烷一步转化为液态产品的科学难题，为甲烷转化成高附加值的化工产品（例如火箭推进剂燃料）提供了崭新和更加经济、环保的解决方案。同时，对这一高效、可持续的光促进铈催化模式的深入研究和进一步推广应用，将为我国高效利用特有的稀土金属资源提供新的思路和前景。该研究成果发表于《Science》上。

甲烷是最小的有机分子，也是有机化学中最难被活化的分子，其惰性碳氢键带来的低反应活性和在溶液中的低溶解度给催化甲烷活化带来了巨大挑战。因此，为了实现高选择性甲烷转化，目前的高效催化剂一般需要使用稀有且昂贵的贵金属（铂、钯等），同时往往需要高温来提供反应活化能，这与工业中对规模性和经济性的要求相差甚远。光促氧化还原催化通过催化剂将光能转化为化学能，促使很多化学反应在温和的室温条件下就能顺利进行。研究团队相信利用这一新兴前沿催化技术来实现甲烷活化，将开拓甲烷绿色活化的新方向。带着这一憧憬，左智伟团队专注于开发廉价、可持续的催化剂，致力于研究高效利用光能来实现甲烷在室温条件下的转化利用。

我国特有的稀土资源引起了左智伟课题组的强烈兴趣。铈在我国的稀土资源中占比接近百分之五十，其低廉的价格和独特的光物理性质吸引了他们的注意。虽然铈在光促有机反应中很少被用作催化剂，但通过对其高价态的独特电子结构的分析，研究团队比较冒险的选择了配体到金属电子跃迁途径，一个之前未受广泛关注的简称为 LMCT 的光促跃迁过程，作为研究新型光催化剂的突破点。

经过一年左右的反复实验，终于在 2016 年夏天验证了简单易得的铈化合物在 LMCT 催化中将光能转化为化学能的可行性。2017 年底，进一步在铈催化的伯醇直接活化研究中取得突破，可以利用光能直接将醇活化形成高能的氧自由基。这两项工作的完成，意味着在两年前设计的甲烷光促转化的催化循环中各项关键要素已经具备。

在光促氧化还原催化领域中没有甲烷活化的先例可供借鉴，研究团队决定循序渐进，先选择液化石油气中的主要成分，丙烷作为前期研究对象。丙烷和甲烷

同为惰性气体分子，且具有更高的反应活性，有助于尽快建立催化体系。像“拼图”一样，最关键的一条线索终于不期而至。2018年3月16号，在气相色谱仪的分析谱图中，4.705分的一个微弱信号峰尽管只代表着2.5%的产率，但这一信号峰标志着甲烷活化产物在催化体系中首次出现。经过一轮又一轮的实验参数优化和反应器的改进，通过多次谨慎的重复实验，2018年“五一”期间，研究团队最终确认了最优的催化剂。

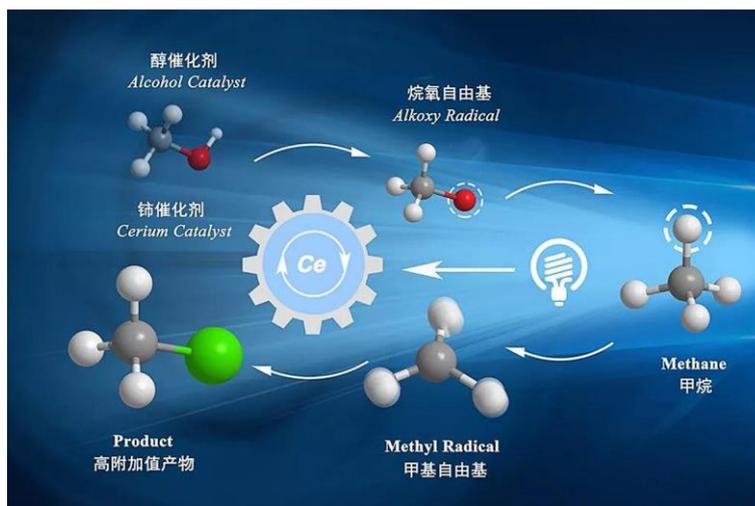


图1 光促铈催化甲烷碳氢键官能团化反应示意图

就这样，经过两年的前期工作积累，148天冲刺，2202次尝试和优化，左智伟课题组最终寻找到一个非常廉价、高效的催化剂组合。在极其普通的三氯乙醇的协同作用下，廉价稀土金属铈能发挥出与稀有的贵金属相媲美的甲烷催化效果。他们成功地使用商品化LED光源作为反应能量来源，在室温条件下，顺利实现了高选择性的甲烷到高附加值产物的转化。

这一体系的特色在于，突破均相催化中依赖贵金属的碳氢键插入实现甲烷活化的范式，高效利用铈催化剂将光能转化为化学能，采用氢转移模式来直接将甲烷活化为高反应性的甲基自由基，结合自由基偶联策略，从而能够实现一系列光促进的官能团化反应，给甲烷活化提供了条件温和、多样性转化的新平台。

值得一提的是，左智伟课题组开发出的这一独特的铈催化体系，催化剂的廉价实用性已经引起了工业界的关注。2017年底，国内制药龙头企业之一——浙江九洲药业股份有限公司，已和上科大签订了一个关于铈催化氧化反应的合作转让协议。在最近的中试放大中，研发人员在很短的时间内就在工艺放大上取得了很大进展，目前已经具备百公斤级别生产的条件。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-07-28

有机太阳能电池研究获突破性进展

(Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency)

南开大学化学学院陈永胜教授领衔的团队在有机太阳能电池领域研究中获突破性进展。他们设计和制备的具有高效、宽光谱吸收特性的叠层有机太阳能电池材料和器件，实现了 17.3% 的光电转化效率，刷新了目前文献报道的有机/高分子太阳能电池光电转化效率的世界最高纪录。这一最新成果让有机太阳能电池距离产业化更近一步。研究成果在线发表于国际顶级学术期刊《Science》上。

实现高效率的太阳能电能转化是有机太阳能电池研究的核心难题。而这一难题能否解决也决定着有机太阳能电池能否走出实验室、走进人类的实际生产生活。

近年来，虽然有机太阳能电池研究获得了迅猛发展，实现了 14%~15% 的光电转化效率，但仍远远落后于其它主要以无机材料（如硅）为主的太阳能电池转化效率。“主要原因在于，有机高分子材料本身较低的载流子迁移率限制了活性层厚度，因此太阳光不能够获得充分和有效的利用。”陈永胜说。

据介绍，叠层太阳能电池不仅可以克服上述难题，还可以充分发挥有机和高分子材料结构和性质优良的可调性特征，通过叠层电池中前后电池中活性材料互补的光吸收，更有效地利用太阳光，从而实现更高的能量转换效率。

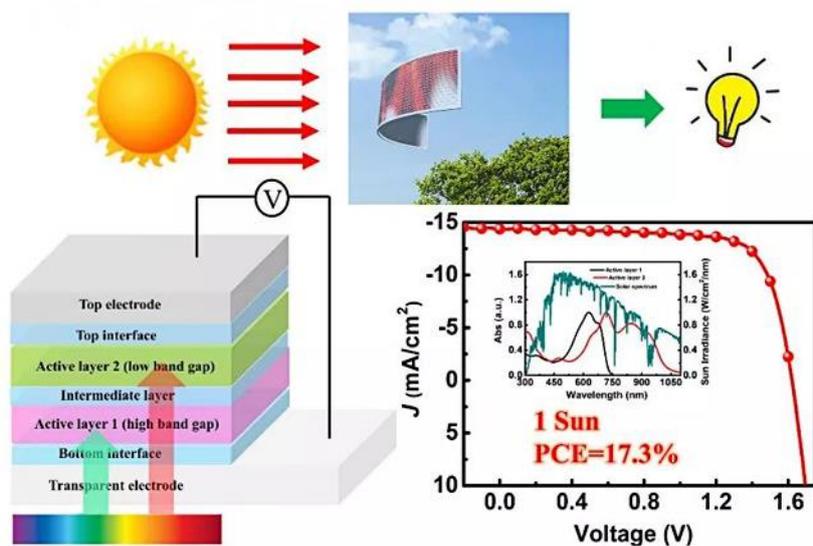


图 1 有机太阳能电池的柔性特征和本工作主要结果。

陈永胜教授团队与中科院国家纳米科学中心丁黎明教授、华南理工大学叶轩立教授研究团队合作，首先利用半经验模型，从理论上预测了有机太阳能电池实际可以达到的最高效率和理想活性层材料的参数要求。在此基础上，他们以在可见光区域和近红外区域具有良好互补吸收的 **PBDB-T:F-M** 和 **PTB7-Th:O6T-4F:PC71BM** 分别作为前电池和后电池的活性层材料，采用成本低廉与工业化生产兼容的溶液加工方法制备得到了高效的有机太阳能垫层器件，获得了 17.3% 的验证效率。

该团队研究人员介绍，依据该工作提出的模型和设计原理，结合有机高分子材料结构的多样性和可调性，通过对材料和器件的进一步优化，非常有望获得和无机材料类似的能量转化效率，从而为有机太阳能电池的产业化提供有力技术支撑。

“依据我们提出的半经验模型预测，有机太阳能电池（垫层）的最高转化效率理论上可以达到 20% 以上。本次工作中，我们同时也对电池的寿命进行了初步试验，发现 166 天实验后电池效率仅降低 4%。未来，我们将继续设计新的材料，在进一步提高能量转化效率的同时，针对电池寿命问题进行系统的实验，争取让有机太阳能电池早日从实验室走向实际应用。”陈永胜说。

据了解，该研究得到了科技部、国家自然科学基金委、天津市科委和南开大学的项目支持。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-11

来自大自然的生物相容性 AIEgens

(Exploration of biocompatible AIEgens from natural resources)

近日，香港科技大学唐本忠院士团队在英国皇家化学会旗舰期刊《Chemical Science》上发表前沿论文，报道了一种具有聚集诱导发光（AIE）特性的天然产物（黄连素），该分子在结构上不同于传统 AIE 分子—没有转子部分（rotor-free），通过单晶结构分析和光学性质、粘度和主客体相互作用研究表明，分子内振动和分子内扭转电荷转移是该分子具有 AIE 效应的原因。同时，黄连素分子具有水溶性和生物相容性，可以特异性地靶向标记细胞和活体组织中的脂滴，表明了天然产物作为 AIE 探针的巨大潜力。

聚集诱导发光（aggregation-induced emission, AIE）概念由唐本忠院士课题组于 2001 年首次提出，基于此原理已经设计合成了大量的 AIE 荧光生色团（AIEgens），并在生物成像、化学传感器和光电子学领域进行了大量应用。

但目前报道的 AIEgens 几乎都是通过有机合成制得，虽然这些人工发光剂具有多样性和颜色可调性，但复杂的合成过程、高成本、环境有害和不可降解等缺点，限制了此类化合物的实际应用。此外，考虑到生物研究通常在水介质中进行，水溶性 AIEgens 具有得天独厚的优势。因此，探索可以大规模获取的、有生物相容性、水溶性和可降解 AIEgens 的新来源极为重要。

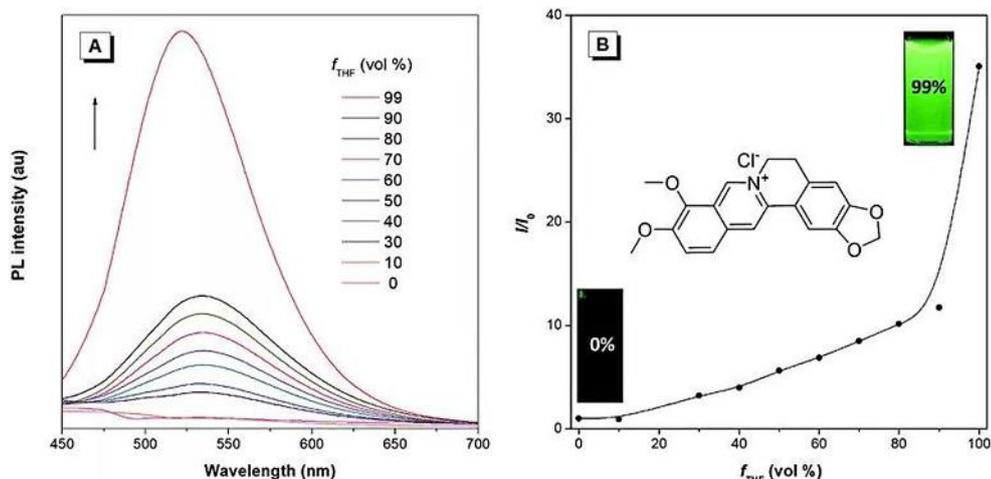


图 1 (A) 黄连素在纯水以及不同组分纯水/THF 混合物中的光致发光光谱和 (B) 光谱强度比 (I/I_0) 与 THF 组分 (f_{THF}) 之间的关系

黄连素分子是一种从草药中提取的天然异喹啉生物碱，具有给体-受体

(donor-acceptor) 结构，可溶于水而且易于购得。作者们通过研究该分子在纯水以及纯水/四氢呋喃混合液中的光致发光行为以及动态光散射 (DLS) 分析，不同状态的光致发光量子产率 (PLQYs)、发射寿命以及其辐射和非辐射衰变过程等，证实了黄连素具有 AIE 特性。

作者们还考察了黄连素在活体细胞成像中的应用。黄连素大致位于细胞的脂滴 (LDs) 中，用油酸对 HeLa 细胞进行处理使其中产生大量的中性磷脂，将黄连素加入 HeLa 细胞培养。从下图可以发现，黄连素会选择性地对 LDs 进行染色。为了进一步证明黄连素的特异性，作者们还利用商品化的 MeOTTMN 染料进行了对照试验。优秀的重叠率 (皮尔逊相关系数: 0.99) 也证明了黄连素优越的选择性。

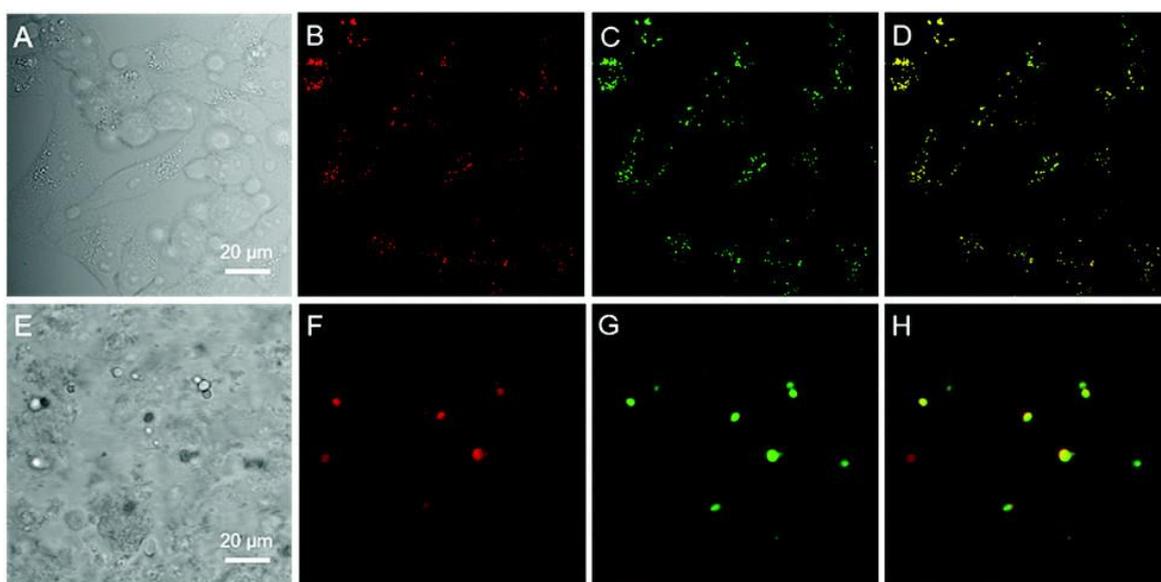


图 2 (A-D) HeLa 细胞和 (E-H) 肝组织活体分别用 MeOTTMN (第二列) 和黄连素 (第三列) 染色的共聚焦荧光成像: 明场 (第一列) 及合并图像 (第四列)

值得注意的是，黄连素也能够对其他类型细胞中的脂滴进行选择性的染色，例如 A549 细胞和 MCF-10A 细胞，皮尔逊相关系数分别为 0.89 和 0.90。表明黄连素将来可以作为特异性标记脂滴的荧光探针。对小鼠活体肝脏切片同样使用黄连素进行染色，细胞脂滴同样产生了强的绿色荧光。黄连素有望作为细胞和组织切片中脂滴成像的标记物，成为疾病诊断的有用工具。

与其他报道的 AIEgen 相比，黄连素具有水溶性、生物相容性、无需合成等优点。作为荧光探针，黄连素能够选择性地靶向标记细胞和活体肝组织中的脂滴，表明其在细胞和组织成像中的潜在价值。本文更为获取相较于人工发光剂更加优越的天然 AIEgens 提供了新的来源。

—摘编自 RSC 英国皇家化学会公众号 2018-08-01

石墨烯表皮电子皮肤获重要进展

(Multilayer Graphene Epidermal Electronic Skin)

7月24日清华大学微纳电子系任天令教授团队在纳米领域著名期刊《ACS Nano》上发表了题为《多层石墨烯表皮电子皮肤》的研究论文。该器件实现了可定制的石墨烯电子纹身，具有极高的灵敏度，可以直接贴覆在皮肤上用于探测呼吸、心率、发声等多重功能，未来在运动监测、睡眠监测、生物医疗等方面具有重大应用前景。

电子皮肤是一种重要的生物医学传感器，要求器件拥有好的柔韧性和可伸缩性、高灵敏度、好的贴合度和舒适度。石墨烯由于其出色的导电性和柔韧性，是电子皮肤的理想材料。但是将石墨烯更加舒适、美观、稳定、可靠地贴合在皮肤表面，从而采集各种生理信号仍然是一个亟待解决的问题。

任天令教授团队基于激光还原石墨烯，将石墨烯与纹身相结合，模仿了电子皮肤的功能。可以通过电阻变化对皮肤表面的微小形变进行监测。在图形化的过程中，团队在国际上首创了湿法剥离氧化石墨烯的新工艺，去除石墨烯氧化物，只留存石墨烯，使得器件更加美观，灵敏度更高，耐受更高的温度。该项技术采用水转工艺，衬底超薄，没有穿戴不适感。



图 1. 贴覆于人体与物体表面的定制化石墨烯纹身

此外，由于激光直写可编程的优势，石墨烯的图案可以进行个性化设计。除了测量皮肤表面的拉伸与压缩，这种石墨烯的纹身还可以利用牺牲层工艺转移到多种衬底上，例如树叶，丝绸等等。通过贴附在口罩、手腕、喉咙、人中等多个位置分别实现对呼吸，心跳，语音等人体信号的测量。测试者佩戴时并不会影响正常活动。器件在睡眠呼吸、语音等多方面的应用潜力，未来如果普及可以让人

们随时随地了解自己身体状况。

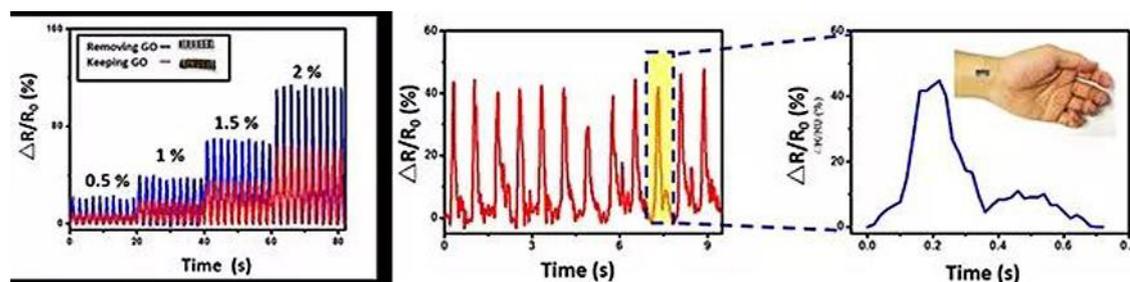


图 2. 剥离工艺可以大幅度提高传感器灵敏度以便于测量各种生理学信号

通过对于激光直写石墨烯围观纹路的观察与分析，任天令教授团队建立了以石墨烯条带为基元的裂痕理论模型，较好地模拟了应力引起的阻值变化过程。近年来，任天令教授致力于石墨烯器件的基础研究和实用化应用的探索，尤其关注研究突破传统器件限制的新型微纳电子器件，在新型石墨烯声学器件和各类传感器件方面已获得了多项创新成果，如柔性石墨烯发声器件、新型石墨烯阻变存储器、光谱可调的石墨烯发光器件、石墨烯仿生突触器件、可调石墨烯应力传感器、仿生石墨烯压力传感器、极低功耗石墨烯钙钛矿阻变存储器等相关成果，有多篇论文发表于《Nature Communications》、《Advanced Materials》、《Nano Letters》、《ACS Nano》等国际著名期刊。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-14

石墨双炔薄膜获重要进展

(Ultrathin graphdiyne film on graphene through solution-phase van der Waals epitaxy)

北京大学张锦课题组、刘忠范课题组以原子级平整的二维石墨烯为基底，采用极低的单体浓度（0.04 mM），在室温下进行偶联反应，通过溶液相范德华外延的方法，成功制备得到了大面积均匀连续的高质量、少层石墨双炔薄膜。这项研究成果发表在《Science Advances》上。

新型低维碳材料的探索与制备是纳米碳材料领域的重要挑战。石墨炔（Graphyne）是一种二维（2D）碳的同素异形体材料，由 sp 和 sp^2 两种杂化态的碳原子共同构成，在二维平面内具有均一分布的孔洞结构，因此具有与富勒烯（0D），碳纳米管（1D）和石墨烯（2D）完全不同的骨架结构，同时，炔键的存在也赋予了石墨炔与仅由 sp^2 碳原子构成的碳材料不同的物理和化学性质。例如，科学家们预测石墨双炔为具有潜力的纳米电子学材料，其带隙为 0.44 eV - 1.47 eV，同时在室温下可以保持 10^4 - 10^5 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 的高载流子迁移率。此外，大的 π -共轭体系和有序多孔的拓扑结构，使其在催化、能源和气体分离等领域展现出巨大的应用前景。

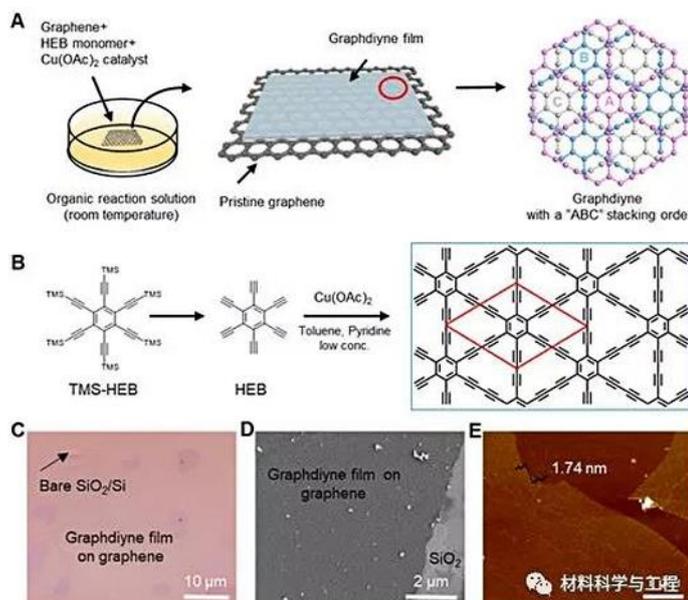


图 1 石墨烯上少层石墨双炔薄膜的合成过程及相应的表征结果，薄膜厚度为 1.74 nm

单层或少层石墨双炔薄膜的控制合成是获取其本征结构和物性的前提，也是石墨双炔材料发展的核心问题。自从 2010 年中科院化学所的李玉良院士团队利用

湿法化学的方法首次合成石墨双炔薄膜（厚度约为 $1\ \mu\text{m}$ ）以来，人们相继发展了一系列基于湿法化学的方法，尝试进一步提高石墨双炔薄膜的质量，但其合成过程中的关键科学问题仍函待解决：如何抑制单体中连接苯环和炔键的单键的自由旋转；如何满足基底表面与石墨炔的晶格匹配；如何控制单体分子在基底表面的聚集和成核。

针对以上问题，北京大学张锦课题组、刘忠范课题组提出了以石墨烯为模板的少层石墨双炔薄膜的液相范德华外延生长法。以原子级平整的二维石墨烯为基底，采用极低的单体浓度（ $0.04\ \text{mM}$ ），在室温下进行偶联反应，通过溶液相范德华外延的方法，成功制备得到了大面积均匀连续的高质量、少层石墨双炔薄膜，高分辨透射电镜和光谱表征证实了其高质量单晶结构。结合理论分析，确认了该石墨双炔薄膜为 ABC 堆垛的三层结构。电子衍射显示石墨双炔/石墨烯薄膜具有两套单晶衍射点，分别对应于石墨双炔和石墨烯的单晶衍射图案，结果表明生长在石墨烯上的石墨双炔与下层石墨烯的晶格取向夹角为 14° 。

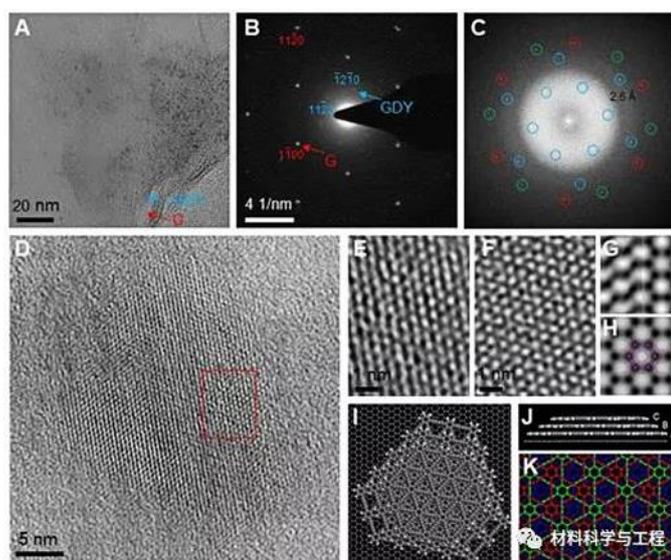


图 2 石墨烯上少层石墨双炔薄膜的高分辨透射电镜表征结果

石墨烯上范德华外延生长石墨双炔薄膜的方法可以被扩展到其他二维材料基底。为了研究石墨双炔薄膜的电学性质，他们在六方氮化硼基底上进行了石墨双炔薄膜的合成尝试，并对得到的少层石墨双炔薄膜的电学性质进行了初步测定。实验结果表明，石墨双炔薄膜具有良好的导电性（计算其电导率为 $3180\ \text{S m}^{-1}$ ），并表现出一定的半导体性质。

这一工作为石墨双炔结构的稳定存在提供了强有力的证据，同时为石墨双炔的基本性质研究以及石墨双炔薄膜的应用探索提供了合成基础。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-14

轻质高强、防腐防火人工木材

(Bioinspired polymeric woods)

近日，中国科学技术大学教授俞书宏带领的科研团队，发展了一种冰晶诱导自组装和热固化相结合的新技术，以传统的酚醛树脂和密胺树脂为基体材料，研制出一系列具有类似天然木材取向孔道结构的新型仿生人工木材。该材料具有轻质高强、耐腐蚀和隔热防火等优点，研究工作发表于《Science Advances》上。

天然木材的独特取向孔道结构赋予其轻质高强的特点，有关仿木头结构的研究是国际上仿生材料研究领域的热点之一。然而，传统的仿木头结构材料是“徒有其型”，以往研究实现取向孔道结构的模仿，但其力学性能远不能令人满意。例如，目前开发的陶瓷基仿木头结构材料，密度高、强度低、缺陷多，且制备过程需要高温烧结（通常 $>1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）。因此，如何制备真正具有轻质高强特点的仿木材结构材料是仿生材料研究领域面临的挑战。

研究人员研制的一系列树脂基仿生人工木材，具有类似天然木材的取向孔道结构，并且壁厚和孔尺寸具有很好的可调控性。这种方法可以复合多种纳米材料以制备多功能复合人工木材，而且简单高效，容易放大生产。这种取向孔道结构的人工木材具有突出的机械性能，压缩屈服强度优于已开发的多种仿木结构的陶瓷材料，且与天然木材性能相当（图1）。

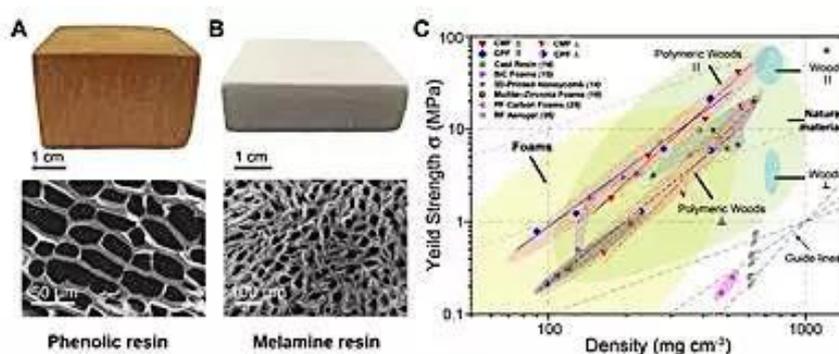


图 12. 仿生人工木材的照片、结构和力学性能。(A) 酚醛树脂基人工木材与微观结构；(B) 密胺树脂基人工木材与微观结构；(C) 人工木材的力学性能与其他工程材料对比图。

与天然木材相比，仿生人工木材最大的优势在于其耐腐蚀性、隔热和防火性能。研究中，由于选用热固树脂材料作为基体材料，所制备的仿生人工木材具有很好的

防水、耐酸腐蚀的特点，在水和硫酸溶液中浸泡 30 天，其力学强度均没有衰减。得益于其取向孔道结构和孔壁中复合的纳米材料，与石墨烯复合的人工木材具有很好的径向（垂直于孔道方向）隔热效果，最低热导率可达 20.8 mW/mK （毫瓦每米每开尔文）。考虑到人工木材的高比强度（压缩强度/密度），这种人工木材比其他工程材料和气凝胶材料具有更好的实用性。

易燃性是天然木材在实际应用中面临的最大问题，而防火阻燃则是人工木材最大的优点，通过复合不同的纳米材料可以进一步提高其防火隔热性能。这种人工木材具有很好的防火性能，在火焰引燃后能够迅速自熄灭，这正是天然木材无法克服的缺点（图 2）。

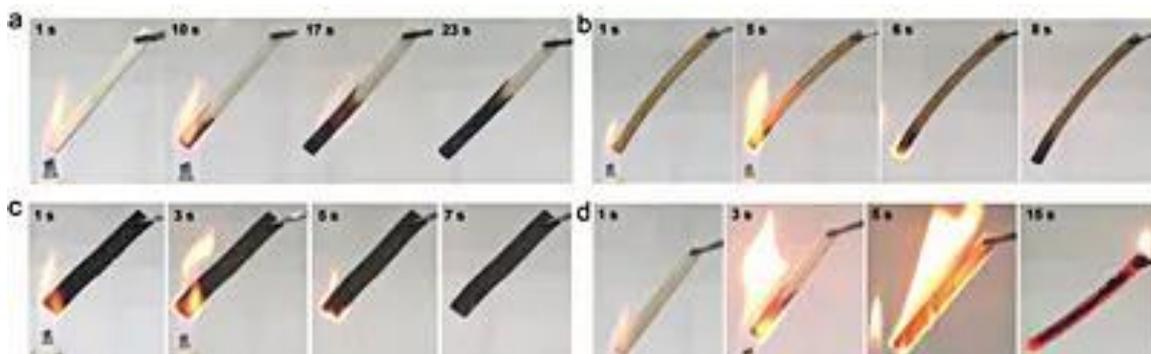


图 2.人工木材的防火性能和巴尔杉木的易燃性对比。（a）CMF 人工木材；（b）CPF 人工木材；（c）CPF/GO 复合木材；（d）巴尔杉木。

作为新型的仿生工程材料，其多功能性优于传统的工程材料，这类人工木材有望代替天然木材，实现在苛刻或极端条件下的应用。此外，这种合成方法为制备和加工一系列高性能仿生工程材料提供了新思路，其功能的可设计性等优点将有助于拓宽该方法和制备的材料在多种技术领域中的应用。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-13

综述：基于石墨烯的智能响应平台用于癌症综合治疗

(Graphene-Based Smart Platforms for Combined Cancer Therapy)

近日，来自中国科学院高能物理研究所和国家纳米科学中心的谷战军研究员和赵宇亮研究员团队在《Advanced Materials》杂志上系统地概述了石墨烯基纳米材料用于癌症综合治疗的设计原理并总结了相关的最新研究进展、挑战和前景。

近年来，石墨烯基纳米材料因具有较大的比表面积、独特的物理化学性能和良好的生物相容性，在生物医学领域的应用受到了广泛的研究兴趣，特别是在纳米医学领域。石墨烯基纳米材料生物医学应用方向众多，从作为简单的药物输送体系到用于构建多功能癌症诊疗平台，包括光热治疗、光动力治疗、磁热治疗和声动力治疗等。除了这些单一的治疗模式，石墨烯基纳米材料还被广泛用于癌症综合治疗，以达到进一步提高抗肿瘤效果并降低副作用的目的。例如，石墨烯基纳米材料可以被设计成具有多种刺激响应能力的智能纳米载药平台（如图 1 所示），既可以响应内源性的酸性肿瘤微环境，又可以被外源性的光、磁、超声等物理作用触发，促进药物的定时、定点、定量可控释放，进而实现良好的治疗效果。

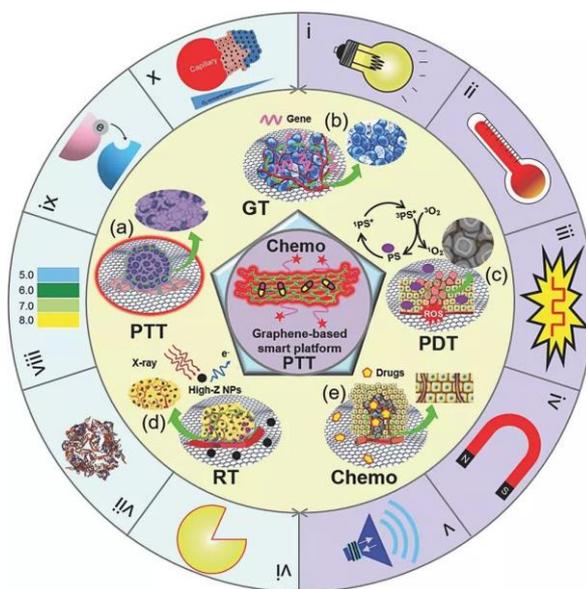


图 1 石墨烯基纳米材料用于多种刺激响应的癌症综合治疗。

基于石墨烯的癌症综合治疗平台的设计思路主要是将石墨烯及其衍生物与其他

具有诊疗功能的组分通过物理或化学的方法整合为一体以实现多功能性。例如，石墨烯具有独特的 sp^2 杂化晶体结构，使得石墨烯基纳米材料的吸光度从紫外区域延伸到红外区域，从而赋予它们优异的近红外光热转化能力。这种性质不仅可以使石墨烯基纳米材料直接作为高效的光热剂用于肿瘤热消融，还可以用来构建能够响应外源性光、电场等物理刺激的癌症综合治疗平台。此外，石墨烯基纳米材料具有完美的二维层状结构，大的比表面积有利于石墨烯基纳米材料负载其他具有诊疗功能的组分，例如化疗药物、基因、光敏剂分子、造影剂、生物相容性高分子等，还有利于材料与细胞或生物分子的相互作用。另外，石墨烯及其衍生物具有高反应活性的边缘，易于被其他基团功能化。因此，通过利用石墨烯边缘的可修饰性，可以将诸如肽和靶向分子等多种组分缀合至石墨烯上，制备成能够响应肿瘤微环境或细胞内信号的材料体系。

基于不同的物理化学特性和诊疗用途，石墨烯及其衍生物可以被设计制备成为响应外源性和内源性刺激的智能药物控释体系，以用于药物输送和肿瘤综合治疗。一般认为，内源性的刺激作用主要包括 pH、 H_2O_2 、谷胱甘肽、酶、蛋白受体、乏氧环境等；外源性的刺激作用主要有光、热、磁场、超声等。一方面，这些刺激作用可以直接促进治疗效果。例如，在光热治疗中，外源性的光刺激可以使得肿瘤区域形成过高温环境，促进肿瘤细胞的凋亡。另一方面，这些刺激作用还可以起到协同促进杀伤肿瘤细胞的效果。例如，负载有化疗药物的石墨烯复合物进入肿瘤区域后，内源性的酸性肿瘤微环境可以促进药物的靶向输运，同时外源性的光照产生的热效应可以进一步促进药物释放，实现光热治疗和化疗的协同。

尽管石墨烯基纳米材料在肿瘤综合治疗中的应用已有许多报道并取得了一些令人兴奋的结果，但在动物模型中仅评估了少数纳米复合材料，并且到目前为止它们都没有在临床中得到应用。因此，我们仍然需要做出更多的努力来解决那些阻碍石墨烯临床转化的关键问题。例如需要对这些石墨烯基纳米材料的生物安全性进行系统性评估，提高其生物相容性；另外，应开发出更绿色、更简便的标准化合成方法来生产这些多功能性石墨烯基纳米材料，以满足临床应用的需要。总之，合理设计和构建基于石墨烯的综合治疗体系需要来自癌症生物学、化学、纳米技术、材料科学和药学等不同领域的研究人员合作，共同推动石墨烯基纳米材料的临床转化。

—摘编自高分子科学前沿公众号 2018-08-16

太钢笔头不锈钢迭代升级

7月1日，由太钢牵头起草的《YB/T 4642-2018 笔头用易切削不锈钢丝》行业标准正式实施，同时，太钢研发的新一代环保型笔头用不锈钢顺利通过测试。定“标准”，添新品，太钢笔头用不锈钢产品实现迭代升级。

“制笔行业关键材料制备技术研发与产业化”是国家“十二五”科技支撑计划，太钢作为主要参与企业，在大量基础性研究的基础上，于2016年研发成功国产笔头用不锈钢材料，填补了国内空白。以此为契机，太钢产销研团队紧紧围绕用户需求，不断超越自我，在工艺控制上持续加力，产品质量和保障能力快速提升，实现了稳定批量供货，合作用户涵盖80%以上国内不锈钢笔尖专业生产企业。

随着供给侧结构性改革的深入推进，钢铁产品升级换代进一步加速。太钢与中科院金属所及制笔龙头企业承担了“十三五”国家重点研发计划——“新型环保笔头金属材料制造技术研发与产业化”的新一代环保型笔头用不锈钢的研发与产业化工作。在已有笔头用不锈钢研发经验的基础上，太钢围绕化学元素和热、冷加工工艺等，对笔头切削性、加工性能的影响展开深入研究，突破了多项关键技术，改进了成分体系，成功研制出性能更加优异的新一代环保型笔头用不锈钢材料，并已申报3项国家专利。目前，太钢新一代环保型笔头用不锈钢已陆续投放市场。

从填补产品空白到制定相关标准，再到成功研发新品，太钢笔尖钢研发生产不断提速。太钢人将继续坚持创新驱动，发扬工匠精神，为关键材料的国产化，为加快建设制造强国不懈努力。

—摘编自中国特钢企业协会不锈钢分会公众号 2018-07-31

新纪录：中通 12 米镁合金公交成功下线

近日，从中通客车获得消息，公司一款 12 米镁合金公交 LCK6120EVQG 成功下线，并通过了科技部专家组的评审鉴定。



图 1 镁合金公交车

这款搭载了更高效电驱动桥总成、高度集成化高压控制系统、智能电池系统、能量回收系统、以及智能空调等系统的新型电动客车，集行业最先进纯电动客车技术于一身，除镁合金外，还多处应用了碳纤维等轻质材料，车身骨架为 0.85 吨，整车总重 9.7 吨，整车降重 26%，创造了行业镁合金纯电动客车的新纪录。

据悉，该产品是科技部“十三五”重点研发计划——新能源汽车专项“高效纯电动客车动力平台及整车集成关键技术”项目的重要成果之一。中通客车作为项目牵头单位，联合了清华大学、苏州绿控、精进电动、山东省科学院新材料研究所等 16 家单位进行联合项目攻关，以突破超高效、高安全、低成本的整车轻量化纯电动大客车动力平台关键技术为研究目标，打造了 LCK6120EVQG 镁合金车型。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-11

突破性进展：南钢研发出低温钢焊接材料

日前，南钢研究院成功研发出 25Mn 低温钢焊接材料，填补了我国 25Mn 钢焊接材料的技术空白，打破了韩国相关企业对该技术的封锁，将对南钢 25Mn 低温钢的推广应用起到重要的推动作用。

在能源发展战略和海洋战略的引领下，科技部在“重点基础材料技术提升与产业化”重点专项钢铁材料方向“先进能源用钢”任务中，设立了“超低温及严苛腐蚀条件下低成本容器用钢”的研究项目。

近年来，南钢发挥先进冶炼装备及工艺的优势，在国内率先开始 25Mn 低温钢的研究，与武汉科技大学合作开展了 25Mn 低温钢的焊接材料的理论研究和产品试制工作，并于近期取得突破性进展。南钢研发的 25Mn 钢药芯焊丝，采用电弧焊接方法，其焊缝金属的屈服强度、抗拉强度、塑性、低温冲击韧性等完全达到液化天然气工程使用要求。依托该项技术，南钢申报发明专利 3 项。



图 1 液化天然气储罐

高锰低温钢具有高性能、低成本的优势，是今后极具竞争力的液化天然气储罐首选材料，其应用前景广阔，已成为世界各国的研究热点。20 世纪六七十年代，美国和日本的相关机构已开展了中高锰系低温钢的冶金理论研究，并掌握了 25Mn 钢冶金特点，但没有实际的工程应用，其技术瓶颈之一是没有匹配的焊接材料。2010 年 11 月份，韩国大宇造船海洋与浦项制铁，以及国际五大主要船级社共同成立了“极低温用高锰钢材与焊接材料共同开发”项目组，在研发钢铁材料的同时，进行匹配的焊接材料的开发。2017 年 5 月份，25Mn 钢及其焊接技术开始应用于韩国液化天然气工程的建造中。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-11

用稻壳制备出铅炭电池：充电速度提高 8 倍

吉林大学化学学院林海波团队在国际上率先用稻壳制备成高性能的电池级碳材料，并用这种材料开发出高性价比的铅炭电池，其性能达到国际先进水平。日前，该科研成果已建成百吨级超级电容炭和千吨级电池碳生产线。

铅酸电池是应用最为广泛的蓄电池之一。2005 年，科学家将铅酸电池和超级电容器结合，发明了超级电池（铅炭电池），相较于传统铅酸电池，其性能指标显著提高。铅炭电池被称为新一代铅酸电池，是当前国际铅酸电池领域的研究热点。

林海波介绍，稻壳中含有二氧化硅与碳元素，将二氧化硅除去后可以形成多孔炭，再经进一步活化，就变成极有应用价值的活性炭材料。“这种活性炭拥有大孔、介孔、微孔的多级孔道结构，具有优异的电化学性能”。他说，只有稻壳能带来这样奇妙的效果，其他比如椰壳、棕榈壳等经过处理后获得的碳材料就没有这种多级孔道结构。

经过 10 余年努力，团队攻克了生物质稻壳基电容炭的绿色制备工艺、稻壳基电池碳添加剂以及铅炭电池负极等关键技术，开发出高性价比的铅炭电池。相较于普通铅酸电池，铅炭电池的循环寿命提高 6 倍、充电速度提高 8 倍、放电功率提高 3 倍，同时具有成本低的优势。

该铅炭电池已经通过国家化学电源产品质量监督检验中心第三方权威机构的测试。该成果已经在国际核心期刊上发表论文 50 多篇，申请发明专利 20 多项。

该项成果实现了稻壳基电池碳材料、铅炭电池以及产品应用的完整产业链，主要用于汽车启停电源、汽车混合动力以及储能领域。

—摘编自材料科学与工程公众号 2018-08-11

新工科来了，这些专业将会成为未来热门

日前，教育部正式公示了新工科研究与实践项目认定结果，来自全国高校的 612 个项目入选。教育部新工科项目的正式认定，意味着备受高教界关注的高校新工科建设开始进入实施阶段。也就是说，新工科里面的一些专业将会成为未来最火、最有“钱”途的大学专业。

“新工科”到底是什么？

“新工科”到底是什么？目前虽然没有明确的定义。但专家表示，尽管还没有准确定义，但大家对“新工科”的基本范畴已经达成了共识。“新工科”对应的是新兴产业，首先是指针对新兴产业的专业，如人工智能、智能制造、机器人、云计算等，也包括传统工科专业的升级改造。

“新工科”为啥这么火？

科学技术是立国之本。我国多年来积累的实践人才不足、高技能人才缺乏、中国制造 2025 等面临重大挑战，新工科应用而生。到 2025 年，新一代信息技术产业人才缺口更是达到 950 万人。高速发展的行业和巨大的人才缺口，让新工科专业变得异常火热。

新工科与传统工科的区别

相对于传统的工科人才，未来新兴产业和新经济需要的是实践能力强、创新能力强、具备国际竞争力的高素质复合型“新工科”人才，他们不仅在某一学科专业上学业精深，而且还应具有“学科交叉融合”的特征；他们不仅能运用所掌握的知识去解决现有的问题，还有能力学习新知识、新技术去解决未来发展出现的问题，对未来技术和产业起到引领作用；他们不仅在技术上优秀，还懂得经济、社会和管理，兼具良好的人文素养。

与老工科相比，“新工科”更强调学科的实用性、交叉性与综合性，尤其注重信息通讯、电子控制、软件设计等新技术与传统工业技术的紧密结合。

哪些“新工科”专业有“钱”途

我们搜集了一些比较有前景的专业供大家参考，其中很多专业对数学、计算机编程能力都有要求。

1. 大数据类

大数据是众多学科与统计学交叉产生的一门新兴学科，涉及数据挖掘、云计算等数学、计算机、统计学等学科知识。2017 年雇主发布的职位说明中，编程语言 Python 凭借在数据分析领域的独特优势，需求增速达到 174%。

2. 人工智能类

人工智能作为模拟、延伸和扩展人的智能的一门新技术科学，BAT 等早已布局人工智能。另外，语音识别、NLP、机器学习、图像算法、推荐算法、深度学习等都属于人工智能的具体应用岗位。

Boss 直聘的《2017 互联网人才趋势白皮书》显示：2017 年薪资最高的十个职位中，过半为 AI 类岗位。在薪资涨幅方面，AI 类岗位、大数据类等新兴技术岗位也普遍排在前列，AI 人才的需求趋势呈直线上升趋势。

3. 云计算类

云计算，是指“超级计算集群”通过网络输送各种计算机服务及数据。云计算的专业基础与计算机科学与技术、软件工程、网络工程、机械自动化等学科相关。

4. 智能科学与技术类

智能科学与技术专业面向前沿高新技术的基础性本科专业，覆盖面很广。专业涉及机器人技术、以新一代网络计算为基础的智能系统、与国民经济、工业生产及日常生活密切相关的各类智能技术与系统，新一代的人机系统技术等。孩子毕业后可以从事智能技术与工程的科研、开发、管理工作。

5. 光电信息科学与工程类

该专业主要学习光学、机械学、电子学及计算机科学基础理论及专业知识。孩子毕业后可以在科研院所、企业从事产品研发、质量管理工作的光电子和光信息专业的工程技术人员。

6. 智能电网信息工程类

这个专业要求孩子掌握信息采集和处理的基本理论和电力系统通信技术，掌握电力系统生产、运行的规律和特点，并对智能电网体系结构和关键技术有一定认识。

可以肯定的是“新工科”将是大势所趋，很多开展“新工科”专业的高校都属于 985 或者 211 序列，不乏北清人复、上海交大、浙大这些名牌大学。孩子如果能够考上任意一个专业，就业不再是问题。

—摘编自机工教育公众号 2018-04-09

心似双丝网，中有千千结

北宋张先《千秋岁》曾这样写道“天不老，情难绝。心似双丝网，中有千千结”。蜘蛛丝承载着古时候迁客骚人很多情感寄托。现代美国好莱坞电影大片里的蜘蛛侠想必大家很多人也特别熟悉，靠着一根蜘蛛丝在空中飞来飞去。



图1 蜘蛛丝

通常说来，高强度材料延伸率低，高延伸率材料强度低，似乎是材料力学性质的普遍规律。蜘蛛丝却打破了这个规律。蜘蛛丝的强度和韧性是很高的，比一般的钢铁强度都要高，主要原因是蜘蛛丝是一种多级次的复合材料。

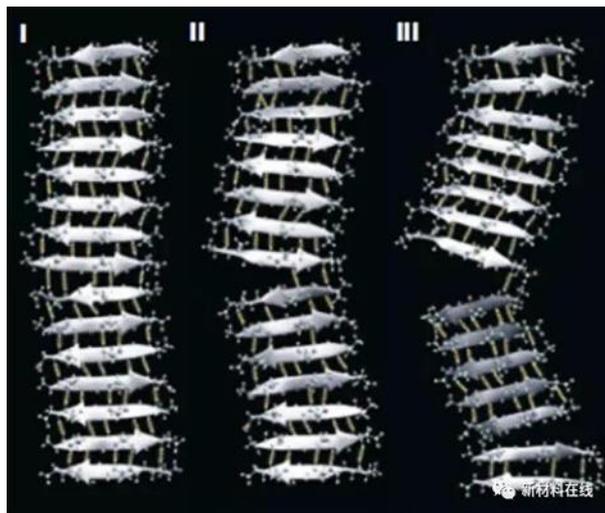


图2 蜘蛛丝分级结构力学模型

虽然人们关于蜘蛛丝力学材料的仿生已经持续了多年。但是，蜘蛛丝还有一个性质却容易被人们忽略，那就是蜘蛛丝可以在雾气中收集水分。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收集。

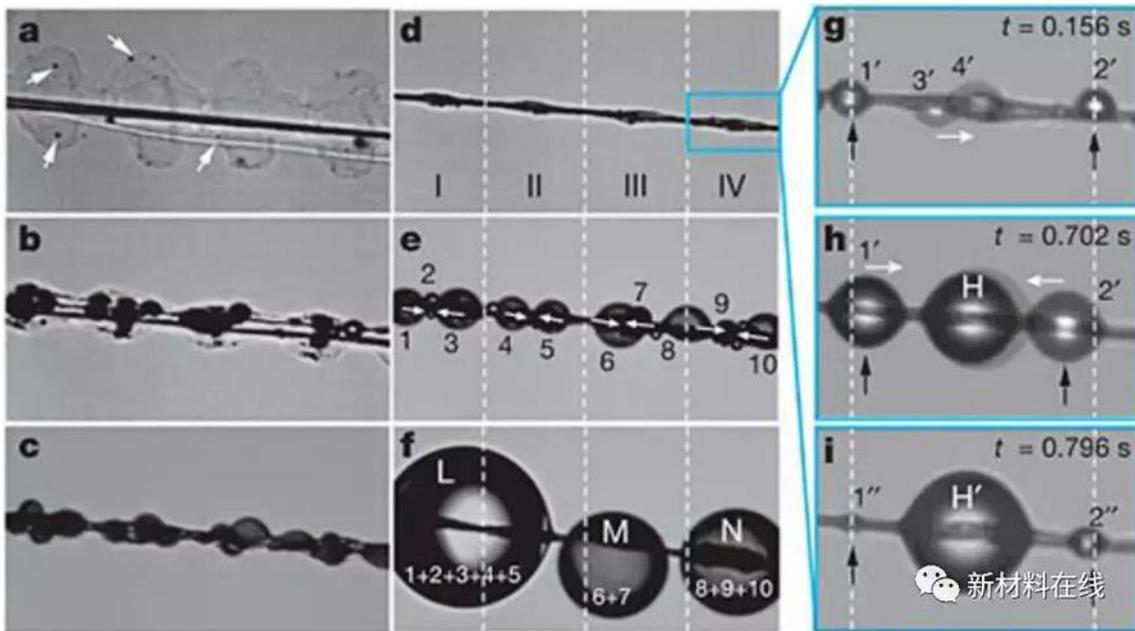


图 3 湿润蜘蛛丝上水滴的定向收集

此外，考虑到蜘蛛丝都是纳米纤维，人们又为此研发出了静电纺丝技术，通过电场力的作用将聚合物溶液加工成纳米纤维，来模仿蜘蛛丝。

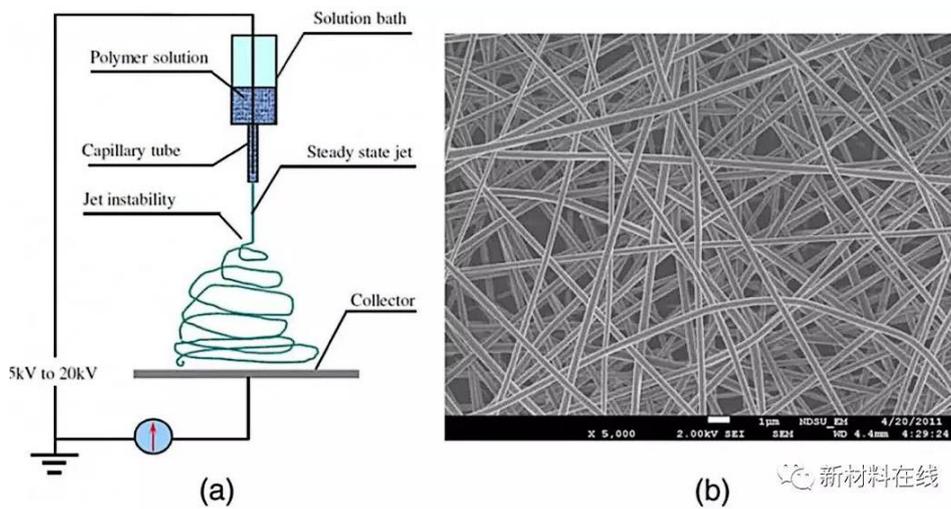


图 4 静电纺丝机理及其微观结构

—摘编自新材料在线公众号 2018-03-18