

“闪蒸”废轮胎“秒变”石墨烯

■本报记者 秦志伟

废旧橡胶轮胎可以“闪”变石墨烯？一种“点石成金”的新工艺，有望让全球每年8亿条废弃轮胎转身变成“宝贝”。

近日，美国莱斯大学教授 James M. Tour 团队在《碳》上发文称，他们利用闪蒸加热工艺，可以从废旧橡胶轮胎中快速提取石墨烯，并用于加固混凝土。这项工艺可瞬间达到 3000℃ 以上高温，实现炭黑、煤炭、焦炭、咖啡等石墨化。

“利用闪蒸加热工艺制备石墨烯，是废旧橡胶再利用的新途径。但这种闪蒸石墨烯，是否能真正在多个领域应用，仍需产业界验证。”南京大学物理学院教授高力波对《中国科学报》说，“一旦验证有效，该方法还可适用于其他废旧有机及高分子、高含碳物质。”

从石墨化到“闪蒸”

“超高温环境将高碳含量材料变为石墨”，对于从事材料制备研究的人来说并不陌生，即石墨化工艺。

“该工艺利用‘碳原子的 sp² 化学键是碳材料所有化学键中最稳定的’原理。”高力波向《中国科学报》介绍，在高温环境下，所有碳原子都倾向于转变成石墨结构。如普通压强下，金刚材料高于 2500℃ 就会转变成石墨。

实际上，无论从原理还是实践中，高力波自涉足碳材料研究领域就已获悉，废旧轮胎等可变成石墨结构的材料。但难以突破的是如何实现高温环境，即新型制备工艺。

早在 2011 年，Tour 就带领团队尝试利用各种高含碳量有机物，采用传统管式炉进行石墨烯制备，炉体温度约 1000℃~1200℃。然而，这种方法制备的石墨烯，尽管晶体质量较好，但产率较低，不能满足其在结构材料方面的应用。直到 2020 年，Tour 团队终于取得重大突破，开发出闪蒸加热工艺，并在《自然》发表。

“石墨化后的产物大都是少数原子层，以 5 层内居多，也可称之为石墨烯。”高力波说，“类似于 30 年前制备纳米碳材料的电弧法。”电弧法电极材料通常是石墨，同样是通入脉冲电流，达到气化部分石墨电极的目的，一般电弧区的温度超过 3000℃。采用这种方法，早期可有效制备富勒烯、碳纳米管。

值得一提的是，作为新型制备工艺的主要开发者，Tour 曾跟随富勒烯发现者之一、诺贝尔化学奖得主 Richard Smalley 从事过相关研究。

“双碳”大家谈

科技创新助推“双碳”达标

■杨裕生

“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”（简称“双碳”），是我国提出的两个阶段碳减排奋斗目标。该目标须以科技创新为先导，广大科技人员应顺势而上、奋力攻关。

目前，我国正处于高质量发展阶段，化石能源消耗量不断增长，未来一个阶段内二氧化碳排放量将继续增长。

因此，要想在 2030 年实现“碳达峰”必须要付出艰苦努力，2060 年的任务则更为艰巨，需要将生产、生活所产生的二氧化碳全部消除，才能达到产生量和消除量的平衡。

在大量使用化石能源且能源消耗不断增长的前提下，实现“碳达峰”必须大力发展可再生能源、减少化石能源使用，实行全民总动员节能减排。而要想实现“碳中和”，还要着力开辟新的清洁能源。

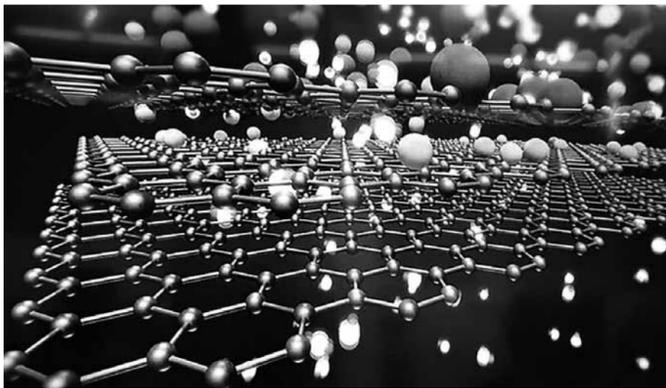
大力发展可再生能源

大力发展可再生能源是实现“碳达峰”的首要措施。我国水力资源虽潜力有限但仍要充分利用，风能、光伏发电将是未来主要能源。同时还要因地制宜建设聚变核能、地热能等清洁能源发电及潮汐能等。

风能、光伏、潮汐等间歇发电和恒定功率的核能，必须以储能来调节。未来 10 年我国要发展 12 亿千瓦可再生能源，如果以 10% 储能功率、储能 6 小时相配合，则需建设 7.2 亿千瓦·时容量储能电站，或 720 座 1 吉瓦时储能电站。其建设费用若以平均 1400 元/千瓦·时计，则需投资 1 万亿元。分布式储能费用或许还要更高。可见，储能机遇很大，担子也很重。

储能技术路线百舛争流、各有所长，应允许在竞争中发展。储能是商业行为，必须讲究经济效益，决定因素有建设投资、使用寿命、能量转换效率、设备利用深度、电进价、电出价和运行费用等，其中与储能技术设备相关的是前四项。

对于建设投资，抽水蓄能电站不断涨价至每千瓦 7000-8000 元；化学电源不断降价至每千瓦·时千元上下，以 6 小



闪蒸加热工艺可以从废旧橡胶轮胎中快速提取出石墨烯。

“也报道过电弧法制备石墨烯，只是产率较低。”高力波说，相比于电弧法所需的真空环境，闪蒸加热工艺简化了反应环境，采用更简便的大气压环境，电极采用铜电极，反应原料放置在电极中央。

这种工艺也不难理解。“如果使用过熨斗，那么就会看到焦耳加热的作用。”中国科学院山西煤炭化学研究所研究员陈成猛向《中国科学报》介绍说，当电流通过导电材料如铁金属时，会迅速产生热量。研究人员将这种工艺获得的石墨烯命名为闪蒸石墨烯，层层堆叠的闪蒸石墨烯表现出涡轮层堆叠。

不过，高力波同时强调，该工艺不适用于芯片级高品质石墨烯薄膜样品的制备。

变废为宝的另一途径

Tour 团队此前在《自然》中发布的研究成果，原料以粉体居多，意味着这些原料很容易在两个电极之间放置，且电极之间产生的火花可有效渗透粉体，达到均匀加热的目的。此次《碳》发布的研究成果使用的原料则是废旧轮胎。

“虽然废旧轮胎含碳量足够，但它们是块体，不易于变成粉体，电火花不容易穿透轮胎。”高力波分析道，对于碳化废旧轮胎，Tour 团队优化的工艺主要延长了电火花的脉冲时间。对于粉体原料，脉冲时间一般在毫秒级，而对于废旧轮胎，则接近秒级。

Tour 表示，全球每年丢弃的 8 亿条轮胎，大多被用作燃料或被磨碎用于其

他用途，其中 16% 的轮胎被填埋。“如果用于生产石墨烯，可使数百万轮胎得以有效利用。”

就我国而言，根据公安部统计，2020 年机动车保有量达 3.72 亿辆，其中汽车 2.81 亿辆。随着汽车产业快速发展，我国每年产生废旧轮胎约 3 亿多条，折合重量已突破 1000 万吨。由废旧轮胎导致的环境污染、资源浪费、安全隐患等问题愈发突出。

山东省工业和信息化研究院高级工程师潘劲松介绍，废旧轮胎综合利用方式包括旧轮胎翻新、生产再生橡胶、生产橡胶粉、热裂解等。

对于废旧轮胎变石墨烯的研究此前也有报道。如在 2019 年，华中科技大学教授李会巧课题组与浙江农林大学教授孙庆丰课题组等合作，利用碱辅助诱导碳化将废旧轮胎转化为 3D 石墨烯，使用的方法是将传统的碱热处理温度从 800℃ 提升到 1000℃。

“利用闪蒸加热工艺制备石墨烯，是将废旧橡胶轮胎再利用的另一条途径。”高力波说。

然而碳化废旧轮胎时，为延长火花脉冲时间，在生产设备的改良、安全性的升级等方面，都需要作较大改进。而 Tour 团队最新研究成果，“只是报道了如果要石墨化橡胶轮胎，需要更长的电火花脉冲时间”。

陈成猛关注的另一个问题是每年废旧轮胎量巨大，能否实现低成本、高收率、大批量的转化，真正实现再生利用，

“双碳”大家谈

科技创新助推“双碳”达标

■杨裕生

“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”（简称“双碳”），是我国提出的两个阶段碳减排奋斗目标。该目标须以科技创新为先导，广大科技人员应顺势而上、奋力攻关。

目前，我国正处于高质量发展阶段，化石能源消耗量不断增长，未来一个阶段内二氧化碳排放量将继续增长。

因此，要想在 2030 年实现“碳达峰”必须要付出艰苦努力，2060 年的任务则更为艰巨，需要将生产、生活所产生的二氧化碳全部消除，才能达到产生量和消除量的平衡。

在大量使用化石能源且能源消耗不断增长的前提下，实现“碳达峰”必须大力发展可再生能源、减少化石能源使用，实行全民总动员节能减排。而要想实现“碳中和”，还要着力开辟新的清洁能源。

大力发展可再生能源

大力发展可再生能源是实现“碳达峰”的首要措施。我国水力资源虽潜力有限但仍要充分利用，风能、光伏发电将是未来主要能源。同时还要因地制宜建设聚变核能、地热能等清洁能源发电及潮汐能等。

风能、光伏、潮汐等间歇发电和恒定功率的核能，必须以储能来调节。未来 10 年我国要发展 12 亿千瓦可再生能源，如果以 10% 储能功率、储能 6 小时相配合，则需建设 7.2 亿千瓦·时容量储能电站，或 720 座 1 吉瓦时储能电站。其建设费用若以平均 1400 元/千瓦·时计，则需投资 1 万亿元。分布式储能费用或许还要更高。可见，储能机遇很大，担子也很重。

储能技术路线百舛争流、各有所长，应允许在竞争中发展。储能是商业行为，必须讲究经济效益，决定因素有建设投资、使用寿命、能量转换效率、设备利用深度、电进价、电出价和运行费用等，其中与储能技术设备相关的是前四项。

对于建设投资，抽水蓄能电站不断涨价至每千瓦 7000-8000 元；化学电源不断降价至每千瓦·时千元上下，以 6 小

这也是实验室技术走向产业应用必须要面对的问题。

应用前景看好

无论原料是煤炭还是废旧橡胶轮胎，利用闪蒸加热工艺获得的石墨烯都是具有较高石墨结晶度的粉体石墨烯。“这种石墨烯在导热、导电等方面，能够接近于本征石墨烯。其应用与目前采用化学剥离方法获得的石墨烯，具有相似的前景。”高力波说。

他进一步解释道，目前制备石墨烯的方法即传统生产方法，主要针对储能、导热等方面，应用的都是化学剥离法，石墨烯产物以粉体形式存在；对标未来芯片领域应用的石墨烯，主要采用化学气相沉积法生长，碳化硅外延法也在同时推进。

研究证实，闪蒸石墨烯具有更优的导电性、导热性及力学增强效果，且工艺更加环保和低能耗。

“如果通过这种方法制备的石墨烯具有新的品质特性，有更合适的应用场景，那么基于废旧橡胶轮胎生产的石墨烯将会展现出巨大的发展潜力。”陈成猛告诉《中国科学报》。

他向记者粗略估算，1 度电 = 1 千瓦时 = 1000W × 3600S = 3600 千焦耳，1 度电可合成 500g 石墨烯，按 1 度电 0.53 元计算，1 公斤石墨烯电力成本低至 1.06 元，未来石墨烯可能比白菜还便宜。

“因此，该方法获得的石墨烯成本低到可以和塑料、金属、胶合板、混凝土和其他建筑材料进行复合，广泛用于复合材料。”陈成猛说。

最新论文还提到，废旧轮胎转化成的石墨烯可用于增强混凝土力学性能。全世界每年生产约 260 亿吨混凝土，其排放的二氧化碳占全球排放总量的 9% 左右。“如果在道路、建筑物和桥梁中使用较少的混凝土，那么就可以从一开始消除一部分排放物。”Tour 表示。

早在石墨烯之前，就已报道碳纤维和碳纳米管可以添加到混凝土中增加韧性，并可增强耐久性。“利用闪蒸加热工艺获得的石墨烯能够进一步增加混凝土的抗压性。”高力波同时强调，最终效果或许还需要更多研究或工业界的标准化。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.03.020>

<https://www.nature.com/articles/s41586-020-1938-0>

聚合，氘可自水中提取，氘可用锂-6 在堆中子作用下产生，将天然锂中锂-6 分离后的大量锂-7 用于锂离子电池，不会影响电池性能，锂-6、锂-7 “各尽所能”。为此，要发展廉价、低耗能的水中提锂技术和锂同位素分离技术。

当汽车发动机全部使用生物柴油或生物乙醇时，在行驶阶段就可以基本实现“碳中和”。因此，要大力发展各种生物乙醇、生物柴油生产技术和产业。秸秆规模转化和甜高粱种植利用等工程技术问题应列入发展计划，还要培育高产油料作物。

消除或转化二氧化碳

森林能够大量吸收二氧化碳。我国西北地域辽阔，碳汇价值巨大，但是缺水。如从西藏每年引水 200 亿立方米到新疆植树造林，不仅对“碳中和”作出巨大贡献，还能改变西北气候。这是一项十分艰巨的工程，涉及许多科学技术问题，因此要及早开展前期研究。

从横断山脉大江引水的南水北调西线工程要加快建设，除缓解黄河流域工业、生活用水紧张外，还可适当加大调水量，为造林（特别是内蒙古地区）供水。在全国各地普遍加强植树绿化，对提升生态系统碳汇能力也有贡献。

向地下埋藏二氧化碳已有相关研究。这不仅是一项很耗能的技术，还要解决二氧化碳“地下固定化”问题，并不是简单的物理性储存，还要谨防地质变化造成“打开潘多拉魔盒”式的灾难。

用化学法将二氧化碳转化为能源材料或其他有机物已有研究。转化需要能量，应该追求高效（即低能耗、低排放）转化技术，在开闸时就应认真论证、比较。例如，用光化学法将二氧化碳转化为甲醇，是一个 6 电子还原反应，直接转化的效率极低，而产物以甲酸、甲醛为主，总效率也只有百分之几。现在使用的光伏发电转换效率已达 20%（还将进一步提高），发展其他电转化技术路线（如电解还原二氧化碳、电解水制氢—氢与二氧化碳化合等）可能会有更高的转换效率。总之，要充分论证和比较这些技术路线的能量转换效率和可行性。

二氧化碳埋藏或转化，都涉及其回收和浓集。要发展适用于大规模浓集二氧化碳的低排放、低成本技术，吸附—解吸等物化原理可以加以利用。

（作者系中国工程院院士）

百叶窗

作为一种“负碳”的光合细胞工厂，工业微藻能将阳光、海水和二氧化碳规模化转化为油脂与氢，服务于洁净能源供给。但是藻类基因组的大片段操作通常极为困难，长期阻碍着藻类底盘细胞的开发。

针对这一瓶颈问题，中国科学院青岛生物能源与过程研究所单细胞中心建立了精确可控的藻类染色体大片段 DNA 切除技术，首次示范了 >100 Kb DNA 片段的单重与连续删减，从而为“最小藻类基因组”的设计和“最简植物底盘细胞”的构建打开一扇大门。该工作由该中心研究员徐健主持完成，相关成果日前发表于《植物学期刊》。

徐健告诉《中国科学报》，除了光合作用、碳浓缩、油脂合成等关键功能模块以外，藻类基因组通常还包括很多由可移动元件、重复序列等组成的“功能冗余”区域。这些大片段染色体 DNA 既是一种额外的代谢负担，也会影响基因组的可控性与稳定性。因此，“大刀阔斧”式精确切除这些大片段“染色体手术刀”，是构建光驱固碳底盘细胞的必备工具。但是，由于缺乏这样的“染色体手术刀”，从未有大片段藻类基因组 DNA 切除的报道。

作为一种可规模化室外培养的工业产油微藻，微拟球藻已成为光驱合成生物技术研究和产业的重要模式体系之一。为了开发大刀阔斧式的“染色体手术刀”，单细胞中心助理研究员王勤涛带领课题组，根据微拟球藻设计与合成数据库中大量转录组和蛋白组数据，定义了海洋微拟球藻基因组上的一系列不表达或低表达区域（LERSs），作为切除的目标区域。

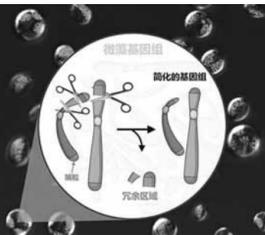
据王勤涛介绍，他们设计了一个基于 CRISPR/Cas 的“染色体手术刀”，通过两条用于定义剪切位置的向导 RNA（gRNA）的共表达，实现了位于 30 号染色体 5' 端基因簇中最大 LER 目标片段（81 Kb）的精确删除。

研究人员还发现，“染色体手术刀”后，染色体末端端粒能够自动重生，这导致长达 110 Kb 的 30 号染色体 5' 端臂（占该染色体长度的 22%，含 24 个基因）得以一次性切除。在此基础上，研究人员通过同时表达 4 条 gRNA，分别实现了位于 30 号与 9 号染色体上的两个最长和次长 LER（最大删除合计 214 Kb，含 52 个基因）在同一细胞中的并行切除。

利用“拉曼组”等单细胞精度的代谢表型分析手段，研究人员惊奇地发现，尽管经历了这些染色体大

片段切除，微藻细胞的生长速度、生物量、潜在最大光合速率、叶绿素荧光非光化学淬灭、油脂含量和脂肪酸饱和度等关键性状却几乎没有受到影响。在生长速度和生物量累积速率上，一些工程株甚至有小幅却显著的加快。这些发现表明，通过这种染色体手术构建“最小藻类基因组”，具有相当可行性。

针对微拟球藻，单细胞中心已发表了基于 CRISPR/Cas 的基因敲除技术、基于 RNAi 的基因敲低技术等高效遗传操作工具与工程株，并通过组织微拟球藻设计与合成数据库，推动国内外工业微藻研究与产业群体资源共享。此次染色体大片段切除技术的发表，将进一步推动微拟



工业微藻染色体大片段精确切除技术原理图。

球藻为光驱合成生物技术研究和产业做出贡献，同时也为设计“最简植物底盘细胞”、支撑“负碳生物制造”奠定重要方法学基础。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1111/tpj.15227>

资讯

2025 年前北京拟推广 1 万辆氢燃料汽车

本报讯 4 月 7 日，《北京市氢能产业发展实施方案（2021 年~2025 年）》（征求意见稿）向社会公开征求意见。该征求意见稿提出，2025 年前，北京将打造“区域协同、辐射发展、国内领先、世界一流”的氢能和燃料电池产业创新高地。

2025 年前，北京将培育 10 至 15 家具有国际影响力的氢能产业链龙头企业，形成氢能产业关键部件与装备制造产业集群，建成 3 至 4 家国际一流的氢能产业研发

全球首座全智能换电站落户中国石化

本报讯 近日，中国石化与蔚来公司合作建设的全球首座全智能换电站——中石化朝英站正式投运，这对我国汽车电动化发展具有里程碑意义。投运仪式上，中国石化董事长、党组书记张玉卓宣布，“十四五”期间，中国石化将规划布局 5000 座充换电站。

当日，中国石化副总经理凌逸群、蔚来联合总裁秦力洪代表双方签署战略合作协议，将在充换电布局、新材料及智能载具等领域展开全方位合作，共同推动我国新能源汽车发展。

据介绍，中石化朝英换电站占地面积 60 平方米，具有自动停泊、自动换电、便捷高效等特点，用户无需下车，在车内一键即可完成泊车换电业务。该换电站采用蔚来自主研发的第二代换电专利技术，拥有电池储量 13 块，最多单日

可提供换电服务 312 次，有效提升用户换电体验。

张玉卓表示，中国石化正加快向“油气电气非”综合能源服务商转型，规划到 2025 年换电站达到 5000 座，巩固交通能源市场主体地位。双方合作将有助于发挥各自优势，在更宽领域深化合作。

（计红梅）

「染色体手术刀」让工业微藻更「负碳」

■本报记者 廖洋 通讯员 刘佳

2025 年前北京拟推广 1 万辆氢燃料汽车

创新平台，京津冀区域累计实现氢能产业链产业规模 1000 亿元以上，减少碳排放 200 万吨。交通运输领域，探索更大规模加氢站建设的商业模式。

2022 年冬奥会为氢能汽车示范应用提供了重要场景。征求意见稿提出，北京将依托 2022 年冬奥会及冬残奥会，建设氢能燃料电池汽车示范工程；应用北汽福田燃料电池汽车，在延庆等山地赛区承担观众或工作人员人员的运送服务。北京还将打造公共交通示范车队，建设连接大兴国际机场与市区的交通枢纽，大兴机场至首都机场、天津机场的燃料电池车辆机场示范快线。

（郑金玉）

全球首座全智能换电站落户中国石化



车友 Frank 创意制作的中石化蔚来换电站模型。

可提供换电服务 312 次，有效提升用户换电体验。

张玉卓表示，中国石化正加快向“油气电气非”综合能源服务商转型，规划到 2025 年换电站达到 5000 座，巩固交通能源市场主体地位。双方合作将有助于发挥各自优势，在更宽领域深化合作。

（计红梅）