

终成奇迹

(国家纳米科学中心 张勇 编译自 James McKenzie. *Physics World*, 2024, (6): 29)

除非直接投身于石墨烯的研发，否则对于这种所谓“神奇材料”的故事可能只是一知半解。人们对2004年安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫首次剥离出石墨烯以及2010年他们共同荣获诺贝尔物理学奖记忆犹新，然而“石墨烯只是媒体炒作”这种声音未曾间断。

不过，我最近看到发表于英国物理学会期刊 *2D Materials* (11: 022002) 上的路线图，其预测石墨烯应用市场规模在2027年将达到55亿美元(图1)。从我的自身经验来讲，

材料市场的报告不能轻信。例如，人们在预测硅市场规模时往往包罗万象，涉及光纤、电子、太阳能电池、玻璃、建筑用沙以及太阳眼镜等，让人困惑。

但这篇关于石墨烯的报告非常出色，它附带了超过200篇详细文献。事实上，它对于石墨烯市场规模的估计建立在130项不同分析的基础上，我认为比较可信。当然，应用市场的产品使用不像在亚马逊上购买商品，这种使用远超人们想象的不易察觉并且无处不在。

来自德国弗劳恩霍夫系统与创新研究所的 Henning Döscher 及其同事撰写的这篇报告源于欧盟耗资10亿欧元的石墨烯旗舰计划。该计划于2013年启动，致力于解决从石墨烯健康监测到石墨烯应用开发以及市场开拓等各种问题。

从材料到市场

让我们回到2011年看一下石墨烯的市场潜力，那时我正经营一家发光二极管照明公司，受邀参加一场关于石墨烯对照明市场影响的研

讨论。那段时期，发光二极管的背后发热比前面发光更加突出。人们不禁要问，既然石墨烯具有类金刚石的热导率而且容易制备，那么它是否能够在其中起到应有作用。

不过，它没能成为石墨烯的杀手锏应用。2010年美国能源部发布的具有重要影响力的发光二极管效率技术路线图曾经预测：到2015年企业能够常规制作能耗小于10瓦的塑料灯泡。但是到2020年发光二极管灯泡性能卓越，仅需5瓦就能达到同样亮度而热损耗仅为2瓦。换句话说，热管理已经不再是照明领域的麻烦了。

2011年的研讨会让我能够一探石墨烯的迷人特性。我们知道，石墨烯是一种碳原子强烈键合成六角排列蜂窝晶格的单层结构，它只有0.345 nm厚。这些特性使得石墨烯能够创造诸多性能纪录，如力学强度、导电、传热等。

自从海姆和诺沃肖洛夫在曼彻斯特大学采用著名的“透明胶带方法”首次创造出石墨烯以来，石墨烯及其炒作就齐头并进。这种简单又便宜的剥离过程涉及使用胶带将碳原子层从石墨块体表面剥离出来，此后发展出了更复杂、更昂贵的其他方法来制造更大片、更均一的石墨烯材料以满足不同应用需求。

石墨烯是优异的导体而且强度超过钢铁200倍，这是人们对它如此痴迷的原因。不过，如果熟悉“高德纳技术成熟度曲线(Gartner hype cycle)”，在人们失去兴趣和热情致使石墨烯很快落入“低谷区”时，就不会奇怪了。然而，鉴于高德纳曲线对高新技术的完美预测，目前石墨烯正在到达“生产高峰期”，这预示着开始出现真正的应用和产品。

市场划分

在过去的20年间，不计其数的科学家和工程师致力于石墨烯的应用开发，申请了数千项专利，建立了数百家公司(图2)。这篇2D Materials报告将石墨烯应用市场分成三类(图3)。它们分别为：石墨烯电子(开发其独特的电性能)、石墨烯复合材料(聚焦其硬度和强度)和石墨烯电池(有望超越任何其他材料)(图4)。

这篇报告估计2022年石墨烯市场规模大约为1亿美元，并且以20—30%的复合年均增长率不断扩大。

根据作者估算，最大的潜在应用市场为石墨烯电子，其在未来几年中市值可能达到10亿美元，预期增长率高达40%，长远来看可能更高。

位于曼彻斯特市的英国国家石墨烯研究所的研究人员透露，石墨烯可能用于制造新一代的电子元件，包括更快的晶体管、更强的半导体以及可弯曲的手机。而即将进入商业化的石墨烯应用领域是光电子，特别是触摸屏、液晶显示器以及有机发光二极管。

由于石墨烯几乎完全透明而且高度导电，因

此有望替代在智能手机和其他触屏显示器中广泛应用的氧化锡锡涂层。沉积在二氧化硅等衬底上的大片石墨烯具有高拉伸强度，其柔性能够满足可卷曲电子纸的5—10 mm要求，这就意味着石墨烯进入这些应用领域是不可避免的。

2008年，来自曼彻斯特的研究人员利用半导体石墨烯制造出了世界上最小的晶体管，仅为单原子厚，10个原子宽。由田禾和任天令领导的清华大学团队最近研制出了切实可行的石墨烯晶体管栅极，长度仅为0.34 nm，与单个碳原子尺寸相

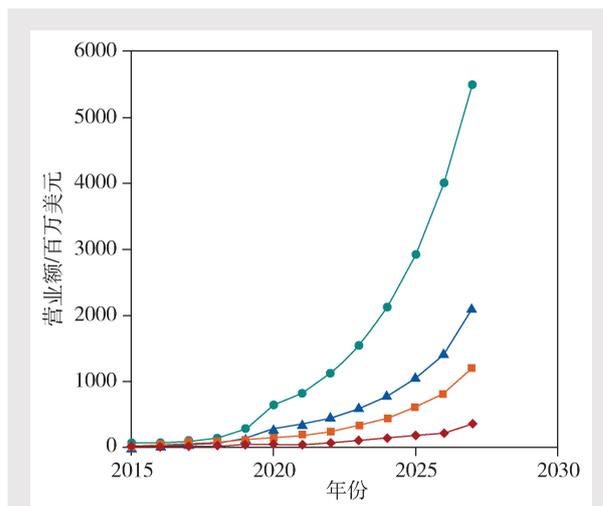


图1 增长态势。2D Materials (11: 022002)综合分析了103份独立的市场报告，预估了2015—2027年间的石墨烯全球市场规模。实际的市场规模可能位于最小和最大的预期之间，很可能接近平均或中值曲线

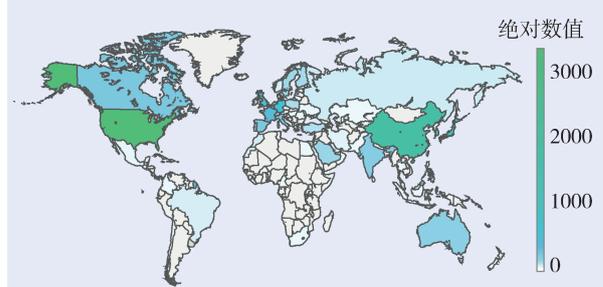


图2 超级用户。从2000年至2020年期间获得专利优先权的发明人国籍来看，中国和美国是石墨烯专利申请量最多的两个国家。在专利题目和摘要中搜索关键词“石墨烯”，所示信息包括了从石墨烯实际应用到的石墨烯制备方法的方方面面

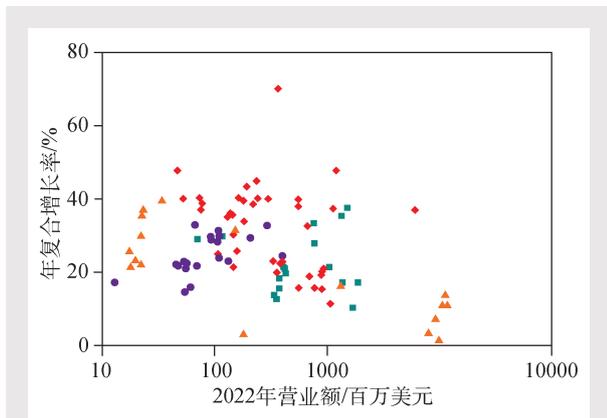


图3 巨额资金。基于2021—2022年间的市场报告，该图展示了石墨烯市场的年度营业额和年均复合增长率。其中红色标识代表全部市场，橙色标识代表复合材料市场，深青色标识代表电子市场，紫色标识代表电池市场



图4 市场优势。石墨烯如此强劲、轻质，而且是优良导体，因此应用甚广，不过最大的应用市场是复合材料、电子设备和电池

当。我们知道摩尔定律(即芯片中元器件密度两年翻一番)现在已经越来越难维持。而未来20年，新型器件将帮助电子工业继续遵循摩尔定律。

由于只有单原子层厚，其每个原子均暴露于环境之中，因此对环境变化高度敏感，故石墨烯有望在传感器领域大显身手。化学传感器的目标是实现单分子探测。剑桥大学一家公司声称是世界上第一家采用标准半导体流程来规模生产石墨烯电子的公司。这家公司最初制造生物传感器和磁场传感器，不过按照其网站的说法，涉及领域要广泛得多。

磁场传感器利用霍尔效应来测量微弱磁场产生的电压。这家公司的磁场传感器能够在低温至350 K区间以及磁场强度 $10 \mu\text{T}$ —30 T范围工作，这些参数远远超过

利用其他半导体(如砷化镓)的传统霍尔效应传感器。

甚至有人说石墨烯可以用于量子计算机。一个颇有前途的进展是使用双层石墨烯，利用所谓“能谷态”来产生长寿命、可电控的量子比特。苏黎世联邦理工学院的研究人员最近取得了令人兴奋的进展，尽管只是早期成果，不过仍具有规模制造量子比特的潜力。

在复合材料领域，石墨烯的优势归结为强度、

刚度和轻质的独特组合。其高达130 GPa的最大拉伸强度，差不多是“A36”结构钢或者防弹衣中凯夫拉纤维(二者的拉伸强度均为0.4 GPa)的300倍。另外，一平米的石墨烯只有0.77 mg，也就是说，石墨烯比普通通用纸要轻上千倍。

石墨烯不但能够阻挡电波，而且抗冲击方面比钢材或凯夫拉纤维优越10倍，因此被认为是制作21世纪防弹衣的理想材料。航空航天工程师也看中了石墨烯的这些特性，他们一直尝试制造更轻更强的航空飞行器，方法就是将碳纤维添加到飞机的钢架结构中。不过，既然石墨烯更强更轻，那么它有可能在复合材料中完全替代钢材，从而提高航空飞行器的燃油效率。

这篇报告提及的第三个应用领域是电池，由石墨烯制成的电极有

望极大提升充电速率。少数公司，包括电子业界巨头三星和华为，正在研发基于石墨烯和其他材料的全电池化学，从而充分挖掘其独特性质。

这些公司声称石墨烯电池比锂离子电池充电更快，而且单位体积储能更高。这对电动汽车可能是莫大的喜讯，就销量来说电动汽车是最大的潜在市场。最终决定这些应用能否成功的关键在于“公斤成本”，因此，仍然需要做大量工作才能将石墨烯电池推向市场。这终将实现，不过本世纪30年代之前可能无望。

石墨烯电池的近期应用目标为移动设备，三星和华为都已经发布了相关研发计划。这方面的需求更可能存在：手机用户愿意为一款能量密度更高、5倍超长待机时间以及60倍超快充电速率的设备额外付费。

展望未来

石墨烯潜力无限，不过这篇2D Materials文章中的路线图提醒我们：新技术取代现有技术并非易事，而且欲速则不达。相对于现有市场来说，石墨烯产品一定要变得更加完善、成本更低才能胜出。需要重申，石墨烯想要成功，完全是一个经济学问题。

一味强调石墨烯的优势并不能保证胜出，石墨烯必须拿出能够使消费者受益的实际应用。石墨烯若有胜算，只需要在价格和特定性能方面打败现有技术。考虑到不计其数的应用需求，其中一些定能胜出。就像所有成功的新技术一样，石墨烯有朝一日也会成为我们日常生活的核心部分，甚至没有人注意到它的存在。