

碳基传感材料及其在称重测力传感器上的应用展望

□江苏大学机械工程学院 汤建华 徐修祝

【摘要】新型称重传感技术融合了新材料、微机电、微纳米等前沿学科，是精准农业、智慧物流、智慧零售等物联网应用的技术关键。智能化、微型化、平面化、低成本、高灵敏度、高可靠性是新型称重传感器件的发展趋势和主要研究方向。碳材料具有极其优异的力学、电学特性，在称重测力传感器件方面具有重要应用前景。近年来，碳基传感材料与传感器件的研究方兴未艾，为称重测力传感技术的深入开发与应用带来了新的机遇。本文主要简述了碳基传感材料及其在力传感器方面的研究与应用，讨论了以石墨烯、碳纳米管等碳材料为基础的传感器件结构原理和制造方法的相关进展。

【关键词】称重传感器；力传感器；石墨烯；碳纳米管；碳材料

文献标识码：B

文章编号：1003-1870（2023）11-0030-04

引言

近年来，随着物联网的快速发展，称重传感器的应用领域也在不断扩展。不断创新的行业模式为称重传感器技术的提升提出了很多新的挑战。目前，称重传感器的技术局限主要集中于提高传感器的稳定性、抗干扰以及耐腐蚀等性能，以及实现称重传感器的微型化和平面化等。在过去20年中，基于金属箔式应变片的称重传感器被广泛应用于各个行业中，且已经取得了令人瞩目的进展。但是，受制于金属应变片的自身特性（低灵敏度、低过载能力、易腐蚀等），决定了它们无法满足日益严苛的行业需求。

材料科学的进步，使人们可以设计和利用各种功能材料制造性能优异的传感器^[1]。在众多新材料中，碳材料具有优异的高温稳定性、抗腐蚀、抗干扰等特性，因此，碳基传感材料也越来越受到大家

的关注。特别是近年来科研界热捧的石墨烯材料和碳纳米管材料，由于具有显著的力学、电学和热性能，虽然仅被发现了不足30年（石墨烯2004年，碳纳米管1991年），但已经出现了多个方向的传感技术应用，有效解决了传统传感材料的诸多问题。本文将主要介绍几种常见的碳基传感新材料，并从新原理、新工艺等方面选取了一些新型传感材料在力传感器方面的主要研究进展，希望能够对新型称重传感技术的应用和未来发展为同行提供参考。

1 石墨烯（Graphene）材料与传感器件

2004年曼彻斯特大学Novoselov K.S.和Geim A.K.采用胶带从高定向石墨中剥离出石墨烯，开启了世界范围内石墨烯研究的里程^[2]。与传统体材料相比，石墨烯的独特之处在于它是由一层碳原子排列形成的稳定而连续的二维平面结构。同时，石墨烯按照一定手性卷起可形成一维的碳纳米管，石墨

烯多层堆叠则可以形成石墨（如下图所示）^[3]。石墨烯材料具有高的载流子迁移率、电导率、热导率、力学强度等优异性能，在新型传感器领域具有很好的发展潜力^[4]。石墨烯优异的力学性能与其碳原子之间的化学键和电子结构具有紧密联系。由于所有

碳原子被束缚在同一个平面内，使其具有超高的强度、刚度和韧性以及作为二维材料带来的独特变形机制。同时，石墨烯材料的高迁移率意味着只要施加较小的应力也可以使材料电阻发生急剧的变化。

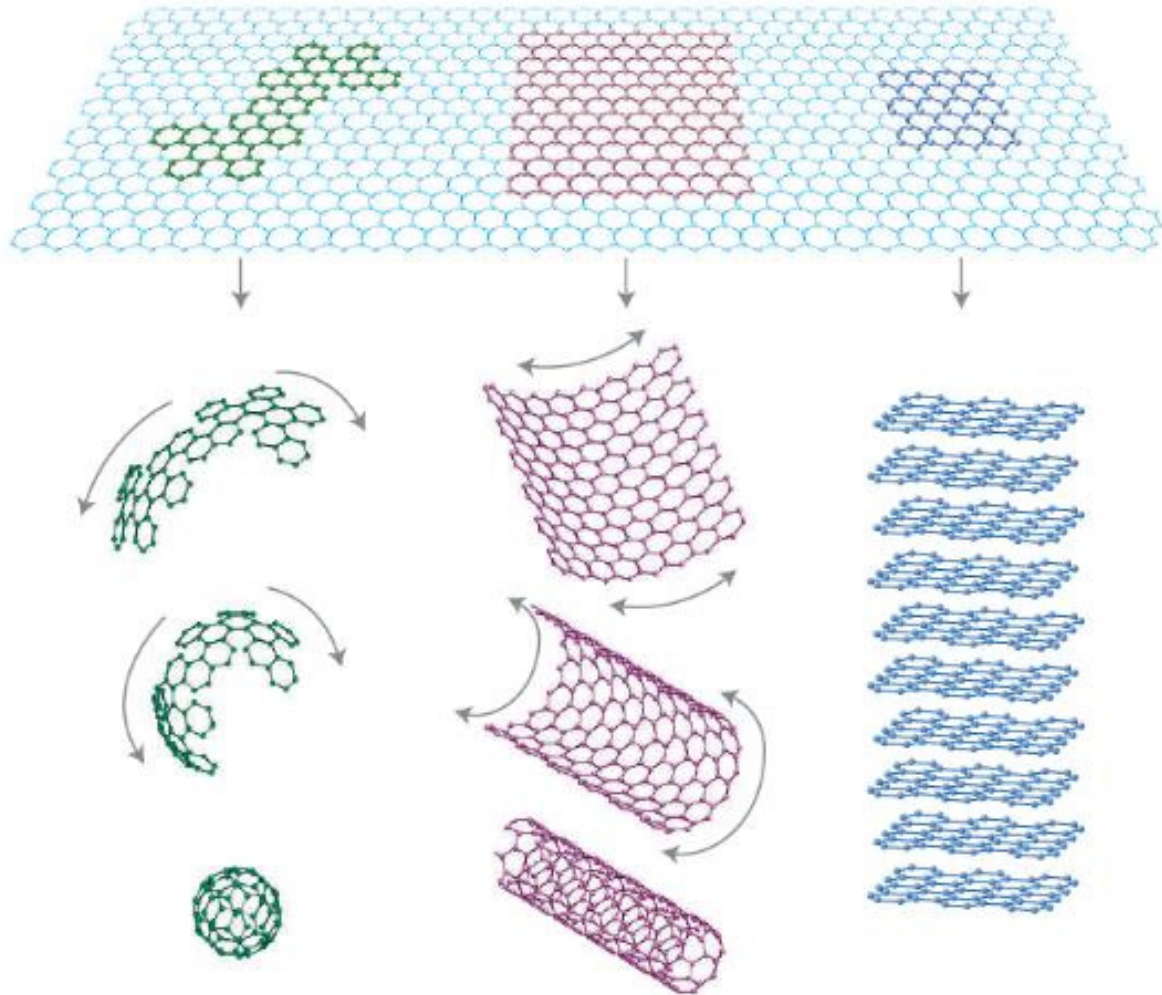


图 石墨烯是构成富勒烯（左）、碳纳米管（中）和石墨（右）的基础材料^[3]

2010年 Lee Y. 等人^[5]首先报道了基于 CVD 法制备石墨烯的应力传感器，其压阻灵敏系数为 6.1。Zhang 课题组^[6]提出了一种石墨烯波纹结构应力传感器，使应力测量范围超过30%，设计了一种基于隧穿效应的纳米石墨烯薄膜应力传感器，使灵敏系数提高到500 以上，其弯曲与拉伸过程中的重复电阻特性证明石墨烯可应用于高性能应力传感器。Yu 等人^[7]研究了单层石墨烯应力传感器的可靠性问题，结果表明，单层石墨烯只要在拉伸率低于4.5% 范围以内都

是可以恢复的。上述几种石墨烯传感器的工作原理主要是利用其压阻特性。

Dolleman 等人^[8]提出一种谐振式石墨烯薄膜压力传感器。基于多层石墨烯薄膜被挤压时内部环境气体发生变化而使薄膜的共振频率改变，当薄膜共振频率在4MHz、8 ~ 1000mbar (1mbar=102Pa) 时，可以准确测量压力。该传感器没有迟滞性，且重复性好。J.Ma 等人^[9]提出了一种高灵敏度光纤石墨烯压力传感器，该传感器的制造是通过熔融石英毛细管到

单模光纤的末端，在内部施加气压后毛细管逐渐变细，然后熔融毛细管形成气腔。石墨烯薄膜覆盖在圆柱形空腔上，不但可以检测外部压力变化，而且可以对空腔起密封作用。该传感器温度敏感性低，并具有应用于恶劣环境的潜力，但是上述两类传感器的共同缺点是密封空腔内气体长期使用会有轻微泄漏。

2 碳纳米管 (CNT) 材料与传感器件

CNT 的性质与其结构密切相关，根据直径和管壁的螺旋角不同，CNT 既可表现出金属的导电特性，也可出现半导体特性，同时具有良好的导热特性，可应用于多种传感器件^[10]。CNT 具有优异的导电和电荷存储能力，良好的机械性能，在拉伸时不容易断裂，由于其网络结构随应力发生密度变化从而导致电阻的变化，因此可通过检测器件电阻或者电容变化获取施加力的大小。将一维的 CNT 和零维的金属纳米颗粒复合，能提高器件的灵敏度、恢复性和稳定性^[4]。Zhang 等人通过 CNT 和银纳米颗粒复合，制备出拉伸度大且灵敏度高的拉力传感器^[11]。Cai 等人^[12]将Ti₃C₂T_xMXene 与 CNTs 复合制备出用于应变传感器的新型材料，该应变传感器具有超低检测极限 (0.1% 应变)，高拉伸性 (达 130%)，高灵敏度 (灵敏度系数~772.6)，可调节的应变检测范围 (30~130%)，超薄器件尺寸 (< 2 μm) 及优异的耐久性和稳定性 (>5000 次循环)。

3 其他碳基材料与传感器件

石墨产品具有良好的耐高温性、电学性能、化学稳定性、可塑性，以及抗热震等特殊性能，是工业生产中不可或缺的高性能廉价材料。石墨、炭黑等碳基材料已被广泛应用于柔性测力传感器。具有低电阻率的碳系微米级材料，如炭黑、石墨被填充到绝缘的高分子聚合物基体中，可形成半导体或导体材料^[13]。WANG 等^[14]研究了炭黑/硅橡胶复合材料的力敏性质并制备了阵列式柔性力敏传感器，在 0 ~ 2MPa 范围内实现了较高的测量精度。YI 等^[15]采用二甲基硅油作为稀释剂和增塑剂，将导电炭黑纳米颗粒填充到有机硅弹性体复合材料中，制造具有应用潜能的应变传感器。He 等^[16]基于改性石墨/PU 复合薄膜制备了低成本、高灵敏度、重复性好并工艺简单的柔性测力传感器。

碳纤维复合材料(CFRP) 具有强度高、质量轻、耐腐蚀和抗疲劳等优点，因此在工程承载上已被广泛应用。同时，研究和实验表明，CFRP 还具有良好电阻应变效应，因此也是新型的传感材料。黄俊捷等^[17]利用CFRP 的力阻效应设计了一种应变传感器用于复杂受力状况下的结构状态监测，取得了很好的效果，CFRP 传感材料能够较为直观地反映以上结构信息。

4 现状讨论

评价称重传感器好坏的性能指标主要有非线性、滞后、重复性、蠕变、零点温度特性和灵敏度温度特性等。另外，在很多物联网应用场合中，还需要考虑传感材料应具有灵敏度高、测量范围宽和响应时间快等关键特性。因此，为了开发出具有实际应用价值的新型称重测力传感器件，研究时应考虑上述几个重要指标。

基于碳基传感材料的力传感器有压阻式、电容式、压电式、谐振式以及光纤式等。其中，压阻式测力传感器是基于敏感材料的电阻率变化，将力学量转化为电信号。由于压阻式传感器工艺简单，成本低廉，在许多领域有着广泛的应用。电容式测力传感器可以看作是可变参数的电容器，例如两个平行电极间以空气为介质，在压力的作用下，平行电极间的距离变化会导致电容信号改变，从而得到相应的受力信息。电容式传感器的优势在于灵敏度高，能够在低耗能情况下检测微小静态力。因此，基于上述两种敏感机理的碳基力传感器是目前主要的研究方向，相关研究成果最多。

研究表明，碳基传感材料具有高灵敏度，在动态测量、小力值测量等方面具有显著优势。目前主要存在的问题在于，碳基传感器件或其原材料的制备很多涉及蒸镀、光刻等微纳加工方式，目前成本还比较高，工序复杂，不利于在称重测力传感器中的应用推广。另外，碳基称重测力传感器的性能影响因素还缺乏系统研究，特别是对于如何构建具有灵敏度高、稳定性好的高精度称重传感元件仍有必要进一步分析研究。因此，开发一种低成本、适合大批量生产的制备与封装方法，系统研究测力传感器的性能影响因素，具有重要的科研和实际应用价值。

5 结语

当前,新一轮技术革命和产业变革正蓄势待发,学科之间相互交叉融合、互相渗透,新型传感器件将进入一个重要的发展时期。碳基传感材料具有一系列适合于测力传感器应用的优异性质,研究人员已经做了很多相关研究,并取得了不错的进展。虽然目前高性能碳基传感材料与器件的研究与开发仍然存在许多挑战,但是我们相信未来必将有更多的新型材料应用于称重传感技术,推动称重技术的前进和发展。

参考文献

- [1] Moseley P T, and Crocker J. Sensor materials [M]. CRC Press, 1996.
- [2] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666–669.
- [3] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials, 2007, 6(3): 183–191.
- [4] 屠海令, 赵鸿滨, 魏峰, et al. 新型传感材料与器件研究进展[J]. 稀有金属, 2018, Nov.
- [5] Lee Y, Bae S, Jang H, Jang S, et al. Wafer-scale synthesis and transfer of graphene films[J]. Nano Letters, 2010, 10(2): 490.
- [6] Wang Y, Yang R, Shi Z W, et al. Super-elastic graphene ripples for flexible strain sensors [J]. ACS Nano, 2011, 5(5): 3645.
- [7] Fu X W, Liao Z M, Zhou J X, et al. Strain dependent resistance in chemical vapor deposition grown graphene [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(21): 213107.
- [8] Dolleman R J, Davidovikj D, CARTAMIL-BUENO S J, et al. Graphene squeeze-film pressure sensors[J]. Nano Letters, 2015, 16 (1) : 568–571.
- [9] Ma J, Jin W, Ho H L, et al. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm[J]. Optics letters, 2012, 37(13):2493–2495.

[10] Chandrasekhar P. CNT Applications in Sensors and Actuators [M]. Conducting Polymers, Fundamentals and Applications. Springer, Cham, 2018, 53–60.

[11] Zhang S, Zhang H, Yao G, et al. Highly stretchable, sensitive, and flexible strain sensors based on silver nanoparticles/carbon nanotubes composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 652: 48.

[12] Cai Y, Shen J, Ge G, Zhang Y, et al. Stretchable Ti₃C₂T_x MXene/Carbon nanotube composite based strain sensor with ultrahigh sensitivity and tunable sensing range [J]. ACS Nano, 2018, 12(1): 56.

[13] 何崧, 周艺颖, 刘皓, et al. 基于碳材料的柔性压力传感器研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(7):215–222.

[14] Wang L, Ding T, Wang P. Thin flexible pressure sensor array based on carbon black/silicone rubber nanocomposite[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9 (9) : 1130–1135.

[15] YI W, Wang Y, Wang G, et al. Investigation of carbon black/silicone elastomer / dimethyl silicone oil composites for flexible strain sensors[J]. Polymer Testing, 2012, 31 (5) : 677–684.

[16] He Y, Li W, Yang G L, et al. A novel method for fabricating wearable, piezoresistive, and pressure sensors based on modified-graphite/polyurethane composite films[J]. Materials, 2017, 10(7).

[17] 黄俊捷, 刘荣桂, 许兆辉, et al. 基于碳纤维材料力阻效应的传感器工程应用初探[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(9).

作者简介

汤建华, 男, 江苏昆山人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事力传感器方面的研究与应用工作。