

NASA 在纳米技术领域的研究和应用进展

高鸿, 邢焰, 刘泊天, 张静静, 蒋晋东

(中国航天宇航元器件工程中心, 北京 100094)

摘要: NASA 一直致力于先进航天技术探索与应用, 其中, 为推动纳米技术的发展与应用, 规划了 20 年的研究发展计划。相关纳米技术被认为能够精确实现材料的预想性能, 并可制备出更小、更具环境稳定性的航天器。文章跟踪介绍 NASA 在纳米技术领域的研究和应用进展, 包括: 1) 先进结构材料及其应用; 2) 能量的生成与储存; 3) 热控制材料及其应用; 4) 纳米传感器的发展; 5) 推进剂及推进器的革新等。

关键词: 纳米材料; 纳米技术; 能源; 温度控制; 传感器; 推进剂; NASA

中图分类号: TB383

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2016)05-0562-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2016.05.019

Progress of nanotechnology research in NASA

GAO Hong, XING Yan, LIU Botian, ZHANG Jingjing, JIANG Jindong

(China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100094, China)

Abstract: NASA drafted a 20yr+ roadmap for the development of nanotechnology and injected the related nanotechnologies into its launch missions. Those nanotechnologies are considered to enable a precise control of desired material properties, and after being fully utilized, could lead to the manufacture of smaller spacecrafts with better environmental applicability in the future. This paper follows the important projects concerned, include: 1) Advanced structural materials and their applications; 2) Energy generation and storage; 3) Thermal control materials and their applications; 4) Sensors, electronics and devices; 5) New patterns of propellant and propulsion.

Key words: nano materials; nanotechnology; energy source; thermal control; sensors; propellant; NASA

0 引言

新材料与新技术的发展, 赋予科学家们丰富的设想空间。对于运载系统而言, 利用这些新材料和新技术可以实现减重、减少燃料的消耗与排放、飞行器的反复使用、降低发射成本等目的。对于探测器, 可实现功能与性能的增强, 提升系统的安全性、可靠性、可修复性等^[1]。

围绕上述研究目的, 航天科技人员一直在致力于研发新的材料与技术。近 10 年, 纳米技术取得了长足的发展, 在航天材料与技术的研究领域具有广阔前景。在我国, 与航天用纳米材料与技术相关的报道较少, 且主要集中在几个传统领域。NASA 在纳米技术领域进行了大量的、原创性的探索工作,

相关报道也十分广泛与细致。NASA 的研究发现: 纳米技术通过离散控制方法赋予材料所期望的优异特性, 包括机械性能、热性能、电性能、光学性能等^[2-3]。本文通过对 NASA 在纳米技术领域研究的跟踪, 介绍纳米材料的新发展、新应用, 并希望能够为我国航天用纳米材料与技术领域的研究人员提供借鉴。

1 纳米材料的主要研究方向^[4-5]

1.1 机械性能研究方向

1) 致力于纳米材料的尺寸与形貌控制, 获取超大的长径比或表面积, 以期提升复合材料的综合性能。

收稿日期: 2016-05-06; 修回日期: 2016-09-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号: 2014CB931804)

2) 利用化学方式或者增加粗糙度的方式提升界面黏结力等。

3) 研究分子尺度的、高度有序的、无缺陷的组装结构来实现材料的极限特性。

1.2 热性能研究方向

1) 研究颗粒尺寸以及界面增强方式对材料辐射性能的影响。

2) 研究通过纳米尺寸效应或者纳米空穴控制热导率, 包括振子耦合效应、量子效应等。

1.3 电性能研究方向

1) 研究纳米结构或缺陷对材料的电导率、能量带隙等性能(包括电导率、电流强度、热电效应等)影响。

2) 利用高的长径比开展增强场致发射效应和逾渗阈的研究。

3) 利用纳米尺度特性提高材料的抗辐射性能。

1.4 光性能研究方向

1) 利用纳米尺寸效应操控材料的透过率以及颜色。

2) 利用纳米尺寸和结构特点控制光子带隙。

2 NASA 纳米技术及在航天器上的应用

纳米技术不断提升航天材料性能的同时, 因纳米材料在航天器上的应用, 使航天器功能不断得到扩展与增强。下文将从 4 个方面阐述 NASA 对纳米材料的研究及其在航天领域的应用。

2.1 先进结构材料及其应用

NASA 设定了利用纳米复合材料减重 50%, 同时实现同性能或更高性能的结构件制造的目标^[6]。其技术途径主要是采用低密度纳米材料替代现有的材料, 如: 采用低密度碳纳米管纤维、纳米孔基体材料(如聚合物基体、金属基体或者杂化材料基体)以及新型纳米级纤维等取代传统的航天材料, 不仅可使材料的强度和刚度得到增强, 还可以达到减重的目的。

主要的纳米材料包括: 铝合金、钛合金碳纤维增强聚合物复合材料, 陶瓷基纳米孔材料, 金属基纳米孔材料等。NASA 预测, 这些纳米材料将在未来 5~10 年内实现在航天领域的应用, 可实现: 飞

行器 30% 以上的减重; 有效地提高材料的损伤容限和飞行器的安全性; 利用纳米材料的可设计性来实现调控材料性能; 制造出环境友好的飞行器; 提升飞行器在极为苛刻环境中的生存能力。下面简要介绍目前正在研究中的几类材料:

1) 金属材料及金属基复合材料

金属纳米材料普遍具有细晶强化效应, 即纳米材料的硬度和强度随着颗粒尺寸的减小而增大。如果把超微细陶瓷粉末加入到金属基体中, 例如向铝合金中加入 SiC、Si₃N₄ 陶瓷粉末, 则能够制造出强度高、耐热性好、重量轻的高性能复合材料。如果在金属基体中加入碳纳米管(CNT)材料, 则可大幅度提高金属的耐磨性能、陶瓷的韧性及聚合物的机械性能, 尤其是纳米技术在提高硬质合金的强度和韧性等方面有着显著效果。

2) 聚合物基复合材料

纳米聚合物基复合材料可谓近期的研究热点。随着纳米级填料(包括复合纳米晶须、碳纳米管^[7-12]、石墨烯等)的不断出现, 使得聚合物基复合材料得到空前的发展。尤其是碳纳米管材料, 因其具有极高的强度、模量和较低的密度, 使得碳纳米管复合材料的研究得以大量开展。同时, 纳米管的结构也在不断改进中, 例如高长径比的碳纳米管(见图 1)^[13-15]、纤维上生长碳纳米管(见图 2^[16])均可使复合材料的界面黏结强度大大提升。为了提高传感器等器件性能, 科学家们探索着碳纳米管阵列材料的制备与应用^[16-19]。NASA 初步探索了碳纳米管阵列材料在复合材料领域中的应用, 研究结果见图 3^[20]。图 4 总结了碳纳米管基材料拉伸强度表现^[21-23]。

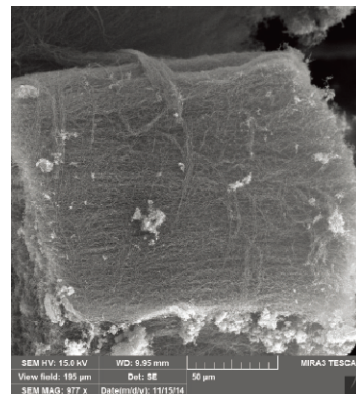


图 1 高长径比碳纳米管材料扫描电镜照片
Fig. 1 SEM photo of high aspect ratio CNT

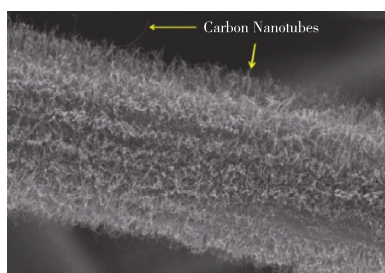


图2 纤维上生长碳纳米管扫描电镜照片

Fig. 2 SEM photo of CNT with whisker morphology

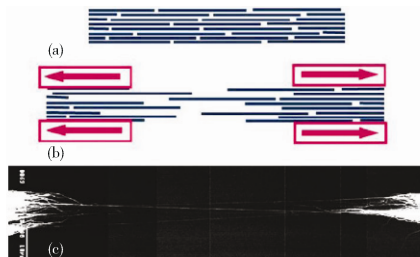


图3 碳纳米管阵列的控制

Fig. 3 Production of CNT with alignment methods

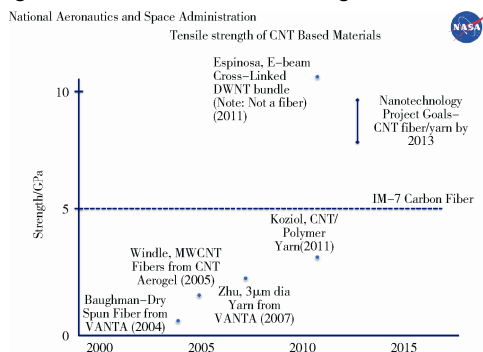


图4 碳纳米管基材料拉伸强度

Fig. 4 Tensile strength of CNT-based materials

2.2 能量的生成与储存

现有航天器能量的来源主要是太阳能以及携带的燃料。从未来发展趋势来看, NASA 认为多元化的能量来源、高的功率密度是提升航天器性能的关键技术。

美国佐治亚理工学院利用纳米材料与技术研发出一种高性能的太阳电池。该电池的原型样机边长只有 2 英寸, 每 cm^2 内有 4 万个纳米管“塔”, 这些纳米管塔犹如城市的高层建筑。这种构造的目的是可采集各个角度的光线, 并借此提高太阳电池的光电转换效率。相关研究人员希望该技术可用于未来航天飞机和卫星的太阳电池, 不再需要通过机械机构跟踪太阳的方位, 可以降低结构的复杂性, 减轻重量。

NASA 正在设想采用量子结构(量子点或量子

棒)来增强太阳能的吸收, 利用碳纳米管来改进电荷的传输能力。NASA 同时还希望发展新一代透明电极, 以推进柔性太阳电池技术以及电池抗空间辐射等性能的提升。应用先进的太阳电池和锂离子电池, 以提高航天器供电能力, 减轻载荷重量。NASA 设计了一种新型生物电池, 即利用微生物中的芽孢杆菌来处理航天员的尿液, 将尿液转化成氨气, 并以氨气作为微生物电池的电极活性物质, 既处理了尿液, 又获得了电能。正常情况下, 每名航天员的尿液平均每天可产生 47W 的电能^[24]。另外, 目前在医疗界, 针对植入型电子医疗设备需要开发出长寿命的电池, 因此基于人体体温的生物热能电池应运而生。生物热能电池是一种用最新纳米工艺制备出的微型异质结, 其工作原理是吸收热量转化为电能。该项技术的研发公司为 NASA 提供了相应的技术支持, 并为航天应用研发出特殊装置。NASA 早在 1977 年就开始持续研究热电装置, 希望研发出可植入航天员身体的微型传感器。NASA 还计划将这种生物热能电池应用于一些大型设备, 吸收设备排放的热量转化为电能。生物热能电池的结构示意图见图 5^[24]。

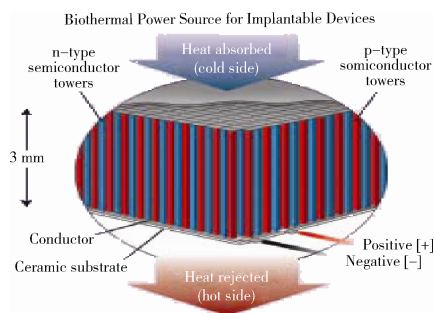


图5 生物热能电池结构示意图

Fig. 5 Structure of biothermal battery

NASA 基金还资助了一个将纳米材料应用于锂离子电池的科研项目。先进的锂离子电池具有较高的储能以及功率密度, 并且能够在低温下使用, 是航天器必备的电池设备。加州大学圣地亚哥分校雅各布工程学院的 Shirley Meng 教授研发出一种纳米复合材料电极, 可应用于锂离子电池中^[25]。

纳米复合材料还能够促进超级电容器的发展。使用超级电容器可将航天器储能设备的功率密度提高 5 倍以上, 进而有效地减轻航天器重量, 提高器件安全性。

2.3 航天器热控制材料及应用

航天器的热控系统 是航天器的重要组成部分。目前,正积极将纳米技术引入热控系统,旨在提高系统的隔热或热控能力。

气凝胶作为轻质固体,在航空航天领域有着非常广阔的应用前景。其密度仅为空气的 2.75 倍,是干燥松木密度的 1/140^[26]。NASA 喷气推进实验室琼斯博士研制出的纯二氧化硅气凝胶中的空气比例达到了 99.8%,最高能承受 1400 °C 的高温。

传统的气凝胶(如二氧化硅)很脆,极大地限制了其实际应用。NASA 的格林研究中心研发出了一种新型高强度气凝胶材料,又对其进行了改进,极大地促进气凝胶的实际工程应用。其改进方法主要为:1)利用聚合物增强改性二氧化硅气凝胶;2)制备纯聚合物基气凝胶^[27]。

NASA 早期的研究是用化学沉积法将传统的二氧化硅气凝胶沉积在聚合物薄膜上。但是能够用于二氧化硅气凝胶制备的聚合物几乎都为低熔点材料,不适于航天应用之较高的耐热等级需求。因此 NASA 又设计了一个完全的聚合物体系,以一种耐热等级比较高的聚酰亚胺基体(如 Kapton)替代了二氧化硅/聚合物体系。然而传统制备气凝胶的方法又不适用于聚酰亚胺,当反应物在稀溶液中凝胶化再利用超临界干燥技术处理后,气凝胶塌陷率超过 40%。从降低密度的角度出发,这个结果很难被接受。研究人员尝试了不同的制备方法,但都无法得到满意的结果。因此,NASA 的科学家尝试引入一种交联的方法,即利用线性聚酰亚胺材料与交联试剂发生交联化学反应,进而构成三维共价键聚合物。此类聚合物比线性高分子具有明显更高的坚韧度,更像是构成了一个钢架(见图 6^[28]),而不是一个圆形的、类似泡沫的框架。此类三维结构在超临界干燥过程中不会塌陷,使聚酰亚胺体系气凝胶具有 0.14 g/mL 的密度以及超过 90% 的孔隙率。最终证实该材料能够满足航天器应用对于耐热性、热导率、强度、韧性等方面的需求。

NASA 在纯聚合物基气凝胶制备方法的研究中获得了较大的突破,Meador 和他的研究团队研发出的聚合物气凝胶具有高强度,突出的柔韧性,以及

强大的抗弯折、抗压缩、抗冲击特性。此类气凝胶的强度是二氧化硅气凝胶的 500 倍,一个很小的垫块就可以支撑起一辆汽车的重量(见图 7^[28]),而其薄片制品则体现出优异的可弯曲性(见图 8^[28])。NASA 同时期待能将此类材料应用到航天器的热控系统中^[27]。格林研究中心利用气凝胶结合柔性热控系统来实现结构-热控一体化设计,并赋予气凝胶新的功能,比如用于超级隔热服、特殊过滤器、薄壁的冷藏装置和超隔热的建筑外墙等。

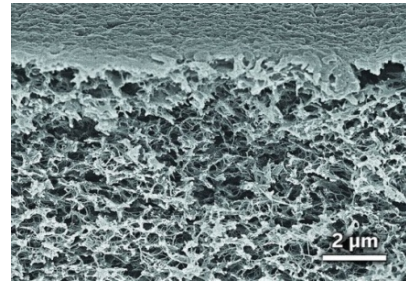


图 6 聚合物气凝胶的扫描电镜照片
Fig. 6 SEM photo of polymeric aerogel



图 7 聚合物气凝胶对抗汽车压力的情况
Fig. 7 Smart car parked on top of a thick piece of polymer aerogel



图 8 薄片聚合物气凝胶的实物照片
Fig. 8 Flexible sheets of NASA's new polymer aerogel

此外,气凝胶在航天领域还有很多潜在的应用。NASA 的“星尘号”探测器正利用气凝胶进行彗星尘埃收集。科学家认为,彗星尘埃中可能包含太阳系最古老、最原始的物质,研究它有助于人类更清晰地了解太阳和行星的历史。彗星尘埃的速度可达到步枪子弹的 6 倍以上,而其体积比沙粒还要小。当它以如此高的速度接触其他物质时,其自身的化学组成和物理特性都有可能发生改变,甚至完

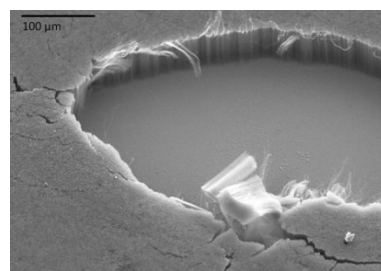
全被蒸发。而气凝胶就像一个极其柔软的棒球手套，可以轻松地消减彗星尘埃的速度，让它在气凝胶内滑行一段距离后停下来，并留下一段胡萝卜状的轨迹。而气凝胶几乎是透明的，研究人员可以按照轨迹轻松地找到这些尘埃微粒。

2.4 纳米传感器的发展

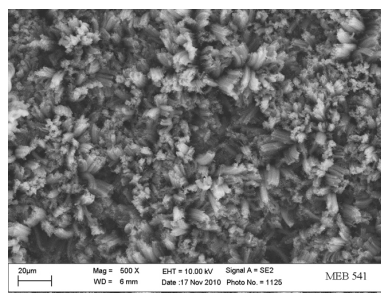
纳米传感器或电子设备的发展将给航天器带来重大的变革与推进。为了确保航天员的安全或监控人类空间栖息环境，NASA 长期致力于可植入人体内的纳米级别生物化学传感器的研究。NASA 于 1998 年开始与莱斯大学进行合作，共投入 500 万美元用于开发基于碳纳米管的化学传感器。2001 年，NASA 在纳米技术领域的投资预算超过了 2000 万美元，重点支持生物传感器和化学传感器的研究。其中，综合利用生物传感器、纳米电子学、人工神经网络等技术制造机器人成为重点资助项目。2002 年，NASA 又将预算提升到了 4600 万美元，仍然重点支持纳米传感器及其组成系统的研究。同时，还与美国国立卫生研究院开展合作，共同研发非植入性的、用于人体健康监测的生物传感器。2006 年，NASA 制定了纳米传感器与微型太空船、微纳机器人等研发方向。2008 年，NASA 特别关注能够在空间极端环境下作业的纳米结构与器件，重点研究利用碳纳米管复合物制备低电压电活性传感器和执行器。2011 年，NASA 以发现并解决碳纳米管在结构材料、传感器、能源以及存储系统中如何应用的技术壁垒作为研究重点。2012 年，NASA 启动了一项新的研究计划，期望利用高强度的碳纳米管纤维来开发持久耐用、多功能化且质量更小的新型航空航天复合材料，并将其应用于运载火箭、飞机机身、飞行器发动机等众多领域^[29-30]。

NASA 宣布由纳米材料制备的气体传感器在 midSTAR-1 卫星上的在轨试验取得了圆满成功。该试验结果表明，纳米气体传感器能够用于飞船内部气体的监视，及时发现对航天员有害的化学物质和污染物，并且还能承受发射剧烈振动环境以及空间环境^[31]。相对于传统的传感器，利用纳米技术制备出的传感器体积更小，环境监测能力更强，非常有望用于未来的载人航天器。

英国 Surrey NanoSystems 公司报道了超黑材料的研究成果后，美国也开始探索超黑材料在航天领域中的应用^[32-33]，尤其应用于空间传感装置的光抑制剂。超黑材料吸收率超过 99%，在从紫外线到远红外线的多个波段都获得了几近完美的吸光效果。该材料是由中空且多壁的碳纳米管所组成的一层纤薄涂层（见图 9^[32]），即由多壁碳纳米管以阵列的形式排列而成。其工作原理是排列的碳纳米管阵列可阻止光子在其中穿行，即经过阵列的多次反射直到被完全吸收。由于能够穿透阵列的光极少，故其被称为超黑材料。该材料可用在空间科学仪器（尤其是微弱背景的深空探测仪）上的硅、氮化硅、钛、不锈钢等材料表面上，能显著减少各种光的干扰。该类深空探测设备必须在超冷环境中工作，以收集宇宙深处物体发出的非常微弱的远红外信号。因此，超黑材料最适合用作空间传感装置的光抑制剂或者叫“冷却剂”。



(a) 薄膜



(b) 放大图

图 9 超黑材料的电镜照片

Fig. 9 SEM photo of super black materials

NASA 还在研发基于碳纳米管微电极的超灵敏无标记电子芯片（见图 10^[34]），有望实现快速的、分子级别的分析。该种芯片的体积小、重量轻，非常适用于航天员健康状态的监测传感器。目前研究主要采用的材料是多壁碳纳米管，已经基本能够实现超敏感和无标记物检测，并在 1000DNA 或 mRNA 目标分子中识别出信号差异。

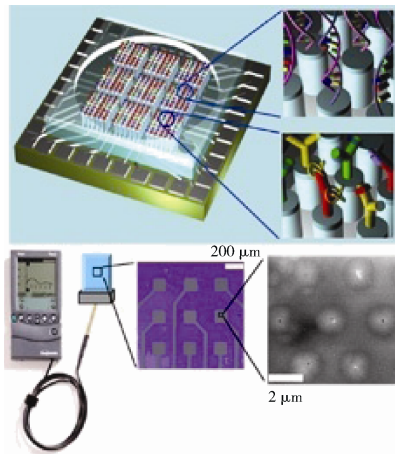


图 10 微电子芯片结构图

Fig. 10 Structure of microelectronic biochips

2.5 推进剂及推进器的革新

纳米材料因其极大的表面积, 能够有效地提升表面反应活性以及吸收更大量液体或气体。这种特点可以帮助航天器提升推进剂性能或者储存更多高效的推进剂。研究发现: 将纳米金属或金属氧化物材料掺入固体推进剂, 可有效地提高推进剂的能量和燃烧稳定性, 改善点火性能, 降低临界压力^[35-36]; 利用纳米材料储氢, 将提升氢燃料在航天器推进领域中应用的可能性^[37]。

关于纳米材料与技术推进器领域应用的报道相对较少。洛桑联邦理工学院成功制造出了一种用于卫星推进的微型离子推力器^[38-45], 包含推进剂的总质量仅为 200 g。其工作原理为: 利用毛细效应从推力器一侧密集细孔(如图 11^[39])中吸出相应的推进剂, 外面的一层电荷板向推进剂加载电荷, 将推进剂加速至 40 000 km/h 并喷射出, 依靠反作用力产生有效的推力(见图 12^[39])。为了使得推力器电荷达到平衡, 电荷板的极性每秒钟进行 1 次切换, 以确保自身保持电中性。不携带其他系统时, 该离子推力器的加速度可达 0.1 mm/s^2 , 即该推力器自身从 0 速度加速到 100 km/h 需要 77 h。这个加速度的数值看起来虽小, 但持续累加起来将非常可观, 利用它可以把卫星从环绕地球轨道的速度 (24 000 km/h) 逐渐加速到 42 000 km/h, 加速、变轨, 还可以在 6 个月内飞到月球^[37-44]。在未来, 随着纳米级加工工艺的日益成熟, 如果能够制备出更为密集的纳米级喷口, 则有可能进一步降低推进器的整体重量, 或者获得更大的推力。

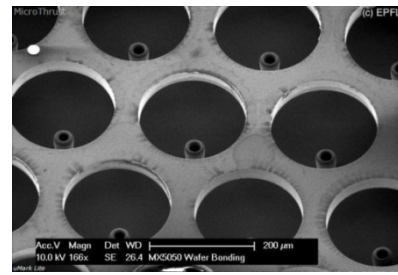


图 11 微型离子推力器喷口处的电子显微镜照片

Fig. 11 SEM photo of spout of micro ion thruster

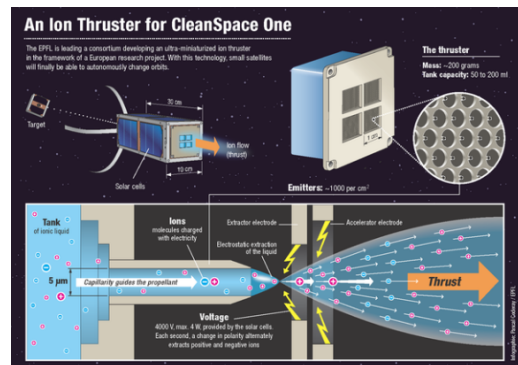
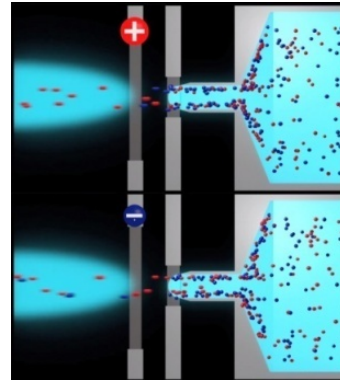


图 12 微型离子推力器工作原理示意

Fig. 12 Working principle of micro ion thruster

3 结束语

未来, 纳米材料与技术必将在航天事业发展中扮演重要角色, 包括在降低成本、提高航天器综合性能、降低航天任务风险和实现航天器多功能性等方面发挥重要作用。NASA 在纳米材料与技术领域中取得了众多的重要成果和实践经验, 其他航天大国也纷纷在纳米材料与技术领域内开始布局。我国应该给予更多的重视, 以实际的航天需求为牵引, 推进宇航用纳米材料与技术领域的发展。目前, 国内的这类研究在多个重要领域尚属起步阶段, 但已经得到国家重点基础研究发展计划的重视。宇航用纳米材料与技术领域的进步还将带动纳米材料产业的整体提升, 对军民产品与技术相互转化也将起到重要作用。随着航天器向微小卫星、皮纳卫星

方向的发展, 纳米材料及功能化器件的发展将成为推动卫星小型化的关键技术。我国需要加强宇航用纳米材料研究, 实现纳米材料性能研究与宇航产品设计需求的紧密对接, 力求在材料的工程应用可行性、空间环境适应性、功能和性能稳定性等方面取得更大的突破。

参考文献 (References)

- [1] Nanotechnology at Ames[EB/OL]. [2012-02-20]. http://www.nasa.gov/centers/ames/research/technology-onepaggers/ames_nanotech.html
- [2] BERGER M. NASA and nanotechnology[EB/OL]. (2012-10-23)[2012-12-01]. <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=27065.php#ixzz38CDvHTag>
- [3] NASA technology roadmaps TA 10: nanotechnology[EB/OL]. [2012-04-01]. http://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2015_nasa_technology_roadmaps_ta_10_nanotechnology.pdf
- [4] 林志东. 纳米材料基础与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010: 165-167; 234-237; 274-279
- [5] LOGOTHE S. 纳米结构材料及其应用[M]. 北京: 科学出版社有限责任公司, 2014: 29-32; 42; 47-57
- [6] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12
DU S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Mater Compos Sin, 2007, 24(1): 1-12
- [7] VILATELA J J, ELLIOTT J A, WINDLE A H. A model for the strength of yarn-like carbon nanotube fibers[J]. ACS Nano, 2011, 5(3): 1921-1927
- [8] KIM B S, KIM D, KIM K W, et al. Dispersion of non-covalently functionalized single-walled carbon nanotubes with high aspect ratios using poly(2-dimethylaminoethyl methacrylate-co-styrene)[J]. Carbon, 2014, 72: 57-65
- [9] BAUGHMAN R H, ZAKHIDOV A A, DE HEER W A. Carbon nanotubes: the route toward applications[J]. Science, 2002, 297: 787-792
- [10] BOCKRATH M, COBDEN D H, MCEUEN P L, et al. Single-electron transport in ropes of carbon nanotubes[J]. Science, 1997, 275: 1922-1925
- [11] WONG E W, SHEEHAN P E, LIEBER C M. Nanobeam mechanics: elasticity, strength and toughness of nanorods and nanotubes[J]. Science, 1997, 277: 1971-1975
- [12] COLLINS P G, ZETTL A, BANDO H, et al. Nanotube nanodevice[J]. Science, 1997, 278: 100-103
- [13] MARR K M, CHEN B L, MOOTZ E J, et al. High aspect ratio carbon nanotube membranes decorated with Pt nanoparticle urchins for micro underwater vehicle propulsion via H₂O₂ decomposition[J]. ACS Nano, 2015, 9(8): 7791-7803
- [14] RABBANI F A, MALAIBARI Z O, ATIEH M A, et al. Catalytic synthesis of substrate-free, aligned and tailored high aspect ratio multiwall carbon nanotubes in an ultrasonic atomization head CVD reactor[J]. J Nanomater, 2016: 4189456
- [15] TERMEHYOUSEFI A, BAGHERI S, SHAHNAZAR S, et al. Computational local stiffness analysis of biological cell: high aspect ratio single wall carbon nanotube tip[J]. Mater Sci Eng C: Mater Biolog Appl, 2016, 59: 636-642
- [16] MO Z J, LIANG C Y, LIN J, et al. Synthesis of uniform BN-coated aluminum borate nanowhiskers and their applications in reinforced magnesium matrix composites[J]. Mater Chem Phys, 2012, 132(2/3): 347-353
- [17] ZHANG J, ZHANG X L, CHEN S M, et al. Surface-enhanced Raman scattering properties of multi-walled carbon nanotubes arrays-Ag nanoparticles[J]. Carbon, 2016, 100: 395-407
- [18] WARREN S B, VERNICK S, ROMANO E, et al. Complementary metal-oxide-semiconductor integrated carbon nanotube arrays: toward wide-bandwidth single-molecule sensing systems[J]. Nano Lett, 2016, 16(4): 2674-2679
- [19] LU Y J, MEYYAPPAN M, LI J. A carbon-nanotube-based sensor array for formaldehyde detection[J]. Nanotechnology, 2011, 22(5): 055502
- [20] TONG T, ZHAO Y, DELZEIT L, et al. Height independent compressive modulus of vertically aligned carbon nanotube arrays[J]. Nano Lett, 2008, 8(2): 511-515
- [21] ZHAO M H, MING B, KIM J W, et al. New insights into subsurface imaging of carbon nanotubes in polymer composites via scanning electron microscopy[J]. Nanotechnology, 2015, 26(8): 085703
- [22] JENSEN B D, WISE K E, ODEGARD G M. Simulation of mechanical performance limits and failure of carbon nanotube composites[J]. Model Simul Mater Sci Eng, 2016, 24(2): 025012
- [23] JACKSON E M, LAIBINIS P E, COLLINS W E, et al. Development and thermal properties of carbon nanotube-polymer composites[J]. Compos B: Eng, 2016, 89: 362-373
- [24] RANDALL J P, MEADOR M A B, JANA S C. Tailoring mechanical properties of aerogels for aerospace applications[J]. ACS Appl Mater Inter, 2011, 3(3): 613-626

- [25] ULVESTAD A, SINGER A, CLARK J N, et al. Topological defect dynamics in operando battery nanoparticles[J]. *Science*, 2015, 348: 1344-1437
- [26] JOHN H, MICHAEL F. Synthetic biology and microbial fuel cells: towards self-sustaining life support systems[EB/OL]. [2012-03-15]. http://www.nasa.gov/centers/ames/cct/office/cif/2011/microbial_fuel_cells.html
- [27] WOODS T. Aerogels: thinner, lighter, stronger[EB/OL]. (2011-07-28)[2012-03-24]. <http://www.nasa.gov/topics/technology/features/aerogels.html>
- [28] DODSON B. Flexible, high-strength polymer aerogels deliver "super-insulation" properties[EB/OL]. (2012-09-27)[2012-12-01]. [http://www.gizmag.com/polymer-aerogel-stronger-flexible-nasa/23955/September 27, 2012](http://www.gizmag.com/polymer-aerogel-stronger-flexible-nasa/23955/September%2027,%202012)
- [29] OLIVA-AVILES A I, AVILES F, SOSA V. Electrical and piezoresistive properties of multi-walled carbon nanotube/polymer composite films aligned by an electric field[J]. *Carbon*, 2011, 49(9): 2989-2997
- [30] ALAMUSI H N, FUKUNAGA H, ATOBE S, et al. Piezoresistive strain sensors made from carbon nanotubes based polymer nanocomposites[J]. *Sensors*, 2011, 11(11): 10691-10723
- [31] DICKEY B, MATHEWS M, BLUCK J. NASA nanotechnology space sensor test successful in orbit[EB/OL]. (2007-06-18)[2012-12-01]. http://www.nasa.gov/home/hqnews/2007/jun/HQ_07140_Nanotech_Sensor_Test.html
- [32] NASA develops super-black material that absorbs light across multiple wavelength bands[EB/OL]. [2012-04-28]. <http://www.nasa.gov/topics/technology/features/super-black-material.html>
- [33] PANAGIOTOPOULOS N T, DIAMANTI E K, KOUTSOKERAS L E, et al. Nanocomposite catalysts producing durable, super-black carbon nanotube systems: applications in solar thermal harvesting[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(12): 10475-10485
- [34] NAJARI A, HO H A, GRAVEL J F, et al. Reagentless ultrasensitive specific DNA array detection based on responsive polymeric biochips[J]. *Anal Chem*, 2006, 78(22): 7896-7899
- [35] 郝晶晶. 纳米金属粉用于固体推进剂的研究进展[J]. *舰船科学技术*, 2010, 32(12): 28; 29; 50
HAO J J. Progress in the application of nano metal powder in solid propellants[J]. *Ship Sci Technol*, 2010, 32(12): 28; 29; 50
- [36] 齐晓飞, 张晓宏, 严启龙, 等. 纳米金属及其复合物在固体推进剂中的应用研究进展[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2012, 10(1): 60-66
QI X F, ZHANG X H, YAN Q L, et al. Research progress in applications of nano metals and their composites in solid propellants[J]. *Chem Propell Polym Mater*, 2012, 10(1): 60-66
- [37] 杨燕京, 赵凤起, 仪建华, 等. 纳米储氢材料在推进剂中应用研究进展[J]. *含能材料*, 2016, 24(2): 194-201
YANG Y J, ZHAO F Q, YI J H, et al. Nanoscale hydrogen storage materials: recent progresses and perspectives for application in propellants[J]. *Chin J Energ Mater*, 2016, 24(2): 194-201
- [38] DANDAVINO S, ATAMAN C, RYAN C N, et al. Microfabricated electrospray emitter arrays with integrated extractor and accelerator electrodes for the propulsion of small spacecraft[J]. *J Micromech Microeng*, 2014, 24(7): 075011
- [39] SHEA H. Micromachined propulsion systems for very small satellites[EB/OL]. [2013-03-15]. <http://lmts.epfl.ch/microthrust>
- [40] COURTNEY D G, DANDAVINO S, SHEA H. Comparing direct and indirect thrust measurements from passively fed and highly ionic electrospray thrusters[J]. *J Propul Power*, 2016, 32(2): 392
- [41] CHAKRABORTY S, COURTNEY D G, SHEA H. A 10 nN resolution thrust-stand for micro-propulsion devices[J]. *Rev Sci Instrum*, 2015, 86(11): 115109
- [42] COURTNEY D G, DANDAVINO S, SHEA H. Performance and applications of ionic electrospray micro-propulsion prototypes[C]//AIAA SPACE 2015. Pasadena, CA, USA, 2015-08
- [43] DANDAVINO S, ATAMAN C, RYAN C N, et al. Microfabricated electrospray emitter arrays with integrated extractor and accelerator electrodes for the propulsion of small spacecraft[J]. *J Micromech Microeng*, 2014, 24(7): 075011
- [44] KRPOUN R, SMITH K, STARK J, et al. Tailoring the hydraulic impedance of out-of-plane micromachined electrospray sources with integrated electrodes[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 163502
- [45] KRPOUN R, SHEA H. Integrated out-of-plane nanoelectrospray thruster arrays for spacecraft propulsion[J]. *J Micromech Microeng*, 2009, 19: 045019-045029

(编辑: 张艳艳)

作者简介: 高鸿(1980—), 女, 博士学位, 高级工程师, 主要从事宇航级高分子材料、纳米材料等新材料在空间环境中服役性能的研究。E-mail: gaohong_cast@sina.com。