

世界国防科技年度发展报告 (2018)

先进材料领域科技发展报告

中国兵器工业集团第二一〇研究所



国防工业出版社
National Defense Industry Press

世界国防科技年度发展报告 (2018)

先进材料领域科技发展报告

XIAN JIN CAI LIAO LING YU KE JI FA ZHAN BAO GAO

中国兵器工业集团第二一〇研究所

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

先进材料领域科技发展报告 / 中国兵器工业集团第二一〇研究所编. —北京: 国防工业出版社, 2019. 4
(世界国防科技年度发展报告. 2018)
ISBN 978-7-118-11889-6

I. ①先… II. ①中… III. ①材料科学—科技发展—
研究报告—世界—2018 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 127785 号

先进材料领域科技发展报告

编 者 中国兵器工业集团第二一〇研究所
责任编辑 欧阳黎明 王鑫
出版发行 国防工业出版社
地 址 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048
印 刷 天津嘉恒印务有限公司
开 本 710 × 1000 1/16
印 张 15½
字 数 177 千字
版 印 次 2019 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
定 价 93.00 元

前 言

先进材料技术是国防科技创新发展的重要基础领域之一，是决定武器装备战技性能、可靠性和经济可承受性的重要因素，备受世界各国重视。为帮助广大读者全面、深入地了解国外军用先进材料技术发展的最新动向和进展，我们组织中国航天系统科学与工程研究院、中国航空工业发展研究中心、中国船舶工业综合技术经济研究院、中国船舶重工集团公司第七一四研究所、工业和信息化部电子第一研究所、中国核科技信息与经济研究院等有关研究人员，共同编撰了《先进材料领域科技发展报告》。

本书由综合动向分析、重要专题分析、附录三部分构成。综合动向分析部分在评述 2018 年国外先进材料技术领域的总体发展态势之后，分领域概述了 2018 年军用或具有军用潜力的航天材料、航空材料、舰船材料、兵器材料、电子信息功能材料以及核材料的重要进展；重要专题分析部分围绕轻量化结构材料、形状记忆合金、高性能增强材料和树脂基体材料、新型隐身材料、磁流变液以及声学超材料、二维材料、石墨烯以及钼 -99 和锂 -6 核材料等重点与热点开展专项分析；附录部分记录了 2018 年先进材料领域的重大或重要事件。

由于先进材料技术涉及专业领域多、范围广，且受时间、信息来源以及分析研究能力所限，错误和疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

2019 年 3 月

目 录

综合动向分析

2018 年先进材料领域科技发展综述	3
2018 年航天材料技术发展综述	17
2018 年航空材料技术发展综述	27
2018 年舰船材料技术发展综述	33
2018 年兵器材料技术发展综述	42
2018 年电子信息功能材料技术发展综述	54
2018 年核材料技术发展综述	71

重要专题分析

形状记忆合金发展分析	81
美国不锈钢复合金属泡沫技术发展	89
氮化硼纳米管材料发展分析	93
美国新型热固性聚合物制备工艺技术分析	98
国外积极发展先进的生物基材料技术	104
3D 打印材料与工艺技术的创新发展及军事应用分析	110
舰用防污涂料发展概述	119

新型材料有望满足陆军装备红外隐身需求	128
船用雷达隐身材料最新发展研究	133
磁流变液材料技术发展及军事应用分析	137
声学超材料技术发展概述	144
超宽禁带半导体氧化镓发展分析	156
钙钛矿材料发展综述	162
二维材料转移技术发展研究	168
石墨烯材料研究进展及其军事影响分析	173
医用同位素生产技术与发展	182
美国启动军用锂-6 加工设施建设项目	191
美国特种核材料与放射源材料进出口许可与政策研究	198

附录

2018 年先进材料领域科技发展大事记	209
---------------------------	-----

ZONGHE
DONGXIANGTANJI



综合动向分析

2018 年先进材料领域科技发展综述

材料是武器装备发展的物质基础和技术先导。材料技术的不断进步为航天、航空、舰船、兵器等装备的改进改型和更新换代奠定了坚实的基础，一直备受世界各国的广泛关注。2018 年，国外军用先进材料技术的研究和开发出现新热点、新发展和新突破，在高性能复合材料和低成本制备工艺技术、轻质耐磨和耐高温金属合金材料、新型隐身材料、柔性可穿戴装备材料技术以及二维材料和自旋电子学材料技术方面取得重大进展。

一、先进复合材料在性能、制备和应用方面取得新突破

2018 年，先进复合材料在高性能增强纤维、低成本制备技术以及高强轻质金属基复合材料、耐高温复合材料和新型自愈合复合材料技术及应用方面均有所突破。例如，美国研发的超细聚乙烯纤维的强度是当前最好的商用“迪尼玛”聚乙烯纤维的 2 倍左右；日本的自愈合复合材料完全愈合仅需 1 分钟；MBDA 公司的纤维增强陶瓷复合材料能承受 3000℃ 的高温；美国公司与英国大学合作研发的智能固化装置可将复合材料部件固化时间

缩短 40%，成本降低 50%。这些新技术可应用于航空、航天、舰船以及兵器结构和零部件，大大提高装备性能，有效减轻重量，延长使用寿命和降低成本。

(1) 新型高性能增强纤维兼顾强度和塑韧性。兼顾强度和塑韧性的高综合性能增强纤维是复合材料研发的一个重点。2018 年 1 月，在美国陆军的资助下，麻省理工学院制备出迄今为止最高综合性能的超细聚乙烯纤维。纤维直径为 0.35 ~ 0.49 微米，具有结晶度高、分子取向度好、缺陷少、分子链滑移能力强等特点，实现了其他纤维难以兼具的高强度、高韧性和高模量，其拉伸模量、拉伸强度和韧性分别为 110 ~ 120 吉帕、6.3 吉帕和 2.1 吉帕，断裂伸长率 20% ~ 40%，模量和密度与当前最好的商用“迪尼玛”聚乙烯纤维相当，强度为其 2 倍左右，韧性高一个数量级。该纤维可用于制备更轻的抗弹复合材料，满足武器装备轻量化发展需求，大幅提升装甲装备的战场生存力。2018 年 5 月，瑞典斯德哥尔摩皇家理工学院研究人员研制出人造纤维素纳米纤维，其强度是天然蜘蛛丝纤维的 8 倍，高于钢铁、其他金属或合金、玻璃纤维和大多数其他合成材料的强度。2018 年 8 月，克雷格生物技术实验室宣布向美国陆军交付采用“龙丝”（Dragon Silk™）专利技术制作的防弹板。“龙丝”是一种通过基因工程技术改进的蛛丝，它沿袭了天然蛛丝的高强度和高韧性。德国 AMSilk 公司也生产出一种被认为强度、弹性和韧性都十分突出的生物钢®纤维，轻质同时还可满足结构对弹性和抵抗冲击性能的要求，用于开发航空航天用新一代复合材料，并计划在 2019 年正式推出利用这种复合材料制造的原型件。

(2) 积极推进高性能复合材料的应用研究。2018 年，美、欧、日等国积极推进高性能金属基复合材料、轻质高温复合材料以及自愈合复合材料的研发和应用。例如，英国铝基复合材料（AMCs）部件设计和制造商 Al-

vant 被指定参与赛峰集团的大型飞机起落架项目，其目标是设计和制造铝基复合材料制动杆，使其强度与钢相当，重量比钛合金部件小 30%。在耐高温陶瓷材料方面，MBDA 公司于年初披露了适用于未来超声速和高超声速武器的高温材料研究项目细节，超高温陶瓷基复合材料以及与金属的连接技术是主要的研发方向。这种复合材料由二硼化铝和碳纤维制备而成，可抗热冲击、烧蚀和耐腐蚀，具有良好的结构性能和低密度（约为 0.3 千克/米³），能够承受 3000℃ 的高温，未来可应用于高超声速导弹的结构/隔热材料。日本横滨大学与物质和材料研究机构（NIMS）共同开发了快速自愈陶瓷复合材料。与传统自愈陶瓷复合材料相比（传统材料的裂缝只能在 1200 ~ 1300℃ 有限温度范围内愈合，完全愈合约需 1000 小时），日本新研制的这种材料愈合温度范围更广，初始自愈温度为 400℃，当温度升至 1000℃ 时，裂缝可在 1 分钟内完全愈合，可应用于航空航天结构和零部件，有助于延长其寿命，大幅缩短维护时间，从而降低成本。此外，美国通用电气航空公司为舰用燃气轮机 LM-2500 研制出一种新的复合材料罩壳，不仅能降低发动机重量、减少维护，还可减少发动机舱的噪声和磨损；挪威 Umoe Mandal 公司获得英国 26 型护卫舰的部分复合材料生产合同，将为 3 艘护卫舰提供复合材料桅杆和舷侧突出部件。

（3）注重新型制备工艺和设备的开发。制备工艺是提高复合材料性能、降低其成本的关键技术，一直备受国内外关注。麻省理工学院超细聚乙烯纤维的高性能就主要得益于其特有的新型凝胶静电纺丝工艺，该工艺拉伸速率比传统的凝胶纺丝提高约 1000 倍，不仅有利于制得高性能亚微米和纳米级直径的纤维，而且能实现一步拉伸，省去了传统凝胶纺丝的预拉伸步骤，简化工艺流程，降低了成本。美国公司与英国大学合作研制出新型复合材料智能固化技术和固化装置，以替代传统的热压罐固化工艺制造复合

材料，可将复合材料部件的固化时间缩短 40%，成本降低 50%，适用于风机叶片、新一代飞行器等诸多复合材料应用领域。德国公司与意大利公司合作开发出长丝缠绕机，是世界上同类产品最大的机器之一，可为“阿里安”-6 运载火箭制造火箭助推器复合材料壳体。据称，采用这种长丝缠绕工艺可使助推器减重 35%。此外，美国空军研究实验室采用 3D 打印技术成功制造出耐高温的纤维增强树脂基复合材料部件，纤维为碳纤维长丝，树脂为高温热固性树脂。3D 打印在复合材料领域的成功应用是增材制造技术的一个非常重要的突破，它为满足下一代低成本的空军制造需求奠定了坚实的基础。

二、金属合金注重轻量化和改善耐用性

2018 年，国外军用金属合金材料领域在改善平台轻量化和金属结构耐用性方面取得了一定进展，包括高强轻质铝合金和泡沫钢材料、新型高耐磨性铂金合金和非晶态铁合金以及发动机和火箭推进系统用高温合金。

(1) 轻质高强铝合金和泡沫金属材料仍是关注重点。为适应武器装备减重的需求，轻质高强金属合金材料的开发一直受国外重视。2018 年，美国普渡大学制备出高强度纳米孪晶铝铁合金，其流动应力与高强度马氏体钢相当，可用于航空航天发动机部件等领域。当前，高强度轻质铝合金具有广泛的应用前景，但要使铝合金的流动应力达到 1 吉帕仍面临巨大挑战。迄今为止，包括 7000 系列铝合金在内的最优质商用铝合金的流动应力只能达到 700 兆帕。普渡大学研究团队开发的纳米孪晶铝铁合金的硬度与流动应力分别达到 5.5 吉帕和 1.5 吉帕，大大提高了铝合金的应用潜力，对航空航天装备减重意义重大。

金属泡沫材料也是近年来军用轻质合金材料的一个研发热点，其质轻如铝、强度如钢，并具有热屏蔽性以及抗弹和辐射防护性能，可用于制造车辆装甲、防弹衣、飞机和月球空间站等装备，在不影响装备性能的情况下，可大大减小装备重量。2018 年，北卡罗莱纳州立大学利用不锈钢空心微球和不锈钢粉末基体材料通过粉末冶金技术制得的轻质高防护性不锈钢复合金属泡沫，可抵御在其附近 46 厘米处起爆的榴弹所产生的速度为 1524 米/秒的破片冲击，重量仅为同等防护性能的轧制均质装甲钢的 1/3，厚度 10 毫米的板材就可抵御尺寸为 15 ~ 150 毫米²的破片冲击，在与现有装甲钢防护性能相同的情况下能够减重 60% 以上。

(2) 先进高温合金助力发动机部件性能提升和轻量化发展。高温材料的研发对提升发动机性能至关重要，其研发方向一是开发性能更优的新材料，二是通过合金化、细化晶粒等途径改进现有材料的性能。2018 年，日本东北大学研制出一种新型钼硅硼基合金 MoSiBTiC，该合金可承受 1400 ~ 1600℃ 的高温（传统镍钴基高温合金的使用温度约为 1100℃），而且在超高温和 100 ~ 300 兆帕应力范围内具有良好的抗破坏能力，不易变形，适用于飞机发动机和运载火箭推进系统等。俄罗斯全俄轻合金研究院则通过在镍合金中加入铪、钽等元素，将镍合金的碳含量提高至 0.12%，开发出一种粉末镍合金 VV725P，显著提升了合金强度、耐久性和耐高温性能。新型镍合金 VV725P 可使直升机的发动机部件强度提高 8%，显著增强发动机部件的可靠性。美国凯斯西储大学和铝钛合金与工程化产品公司联合完成了 TNM 和 4822 两种钛铝合金的疲劳裂纹扩展与断裂行为的对比研究。这两种钛合金有望取代镍基高温合金，用于低油耗喷气发动机的低压涡轮叶片等领域，推动发动机部件的轻量化发展。

(3) 新型铂金合金和非晶态铁合金用于耐磨防护。金属材料在与其他

金属或高硬度材料的反复摩擦过程中（如用于发动机），或者在极端环境中服役时，会逐渐磨损、变形和腐蚀。开发耐磨耐腐蚀的金属材料一直是提高武器装备耐用性的一个重点。2018年，美国桑迪亚国家实验室采用90%的铂和10%的金开发出一种新型铂金合金，其耐磨性是高强度钢的100倍，与金刚石和蓝宝石具有相同的数量级，被认为是迄今为止世界上最耐磨的金属材料。美国北卡罗来纳州立大学验证了利用3D打印技术制造非晶态金属的能力。利用该技术可制备出更耐磨、强度更高和重量更小的非晶态铁合金，其厚度比临界铸造厚度大15倍，克服了非晶态铁合金只能通过浇铸形成，厚度不超过几毫米的制造极限。这些材料可用于发动机、军用车辆轮胎以及电子器件等的耐磨防护，大大提高其耐用性和可靠性。

三、隐身材料技术取得多方面进展

2018年，国外隐身材料研究活跃，在多频段声隐身、雷达吸波以及红外隐身材料方面取得较大进展。

（1）超材料实现多频段声隐身和声波控制。超材料隐身近年来受到广泛关注，密集开展研究，各种功能和性能的超材料也不断涌现。2018年，美国在声学超材料的研究上进展迅速，声学超材料可通过控制声波的重定向和反射等实现声隐身。美国南加州大学研制出一种磁性主动声学超材料，首次发现利用磁场（小于0.4特）可控制其晶格变形，使其等效弹性模量和等效质量密度在特定频段发生正/负变化，实现特定频段下的单/双负等效参数的状态切换，将促进声学超材料在多工作频段声隐身以及噪声消除和振动控制的应用。杜克大学在海军研究办公室的资助下，设计并演示了一种能以接近完美的效率控制声波重定向和反射的超薄材料。研究使用的

超材料通过 3D 打印制备，由一系列空心柱体（方形主体，4 个一列）构成，每个柱体的一侧中间有切开的窄开口。通过每列柱体间的通道宽度和每个单独柱体内的空腔尺寸可以操纵声波的传播和反射。

（2）石墨烯和黑硅用于制备全光谱红外隐身材料。红外伪装隐身通过改变目标的红外辐射特征，使目标与环境融合，从而降低被红外探测器探测的概率。2018 年，英国和土耳其分别利用石墨烯制备出红外伪装与隐身材料。其中，英国曼彻斯特大学研制的热伪装材料可在数秒内与背景温度融合。土耳其毕尔坎特大学通过在多层石墨烯中可逆掺入非挥发性离子液体，调制石墨烯的红外吸收与发射，制成一种主动热表面，可在全红外光谱范围内控制热辐射。美国威斯康星大学开发出一种称为“黑硅”的新型红外隐身材料，其在厚度小于 1 毫米时，可吸收约 94% 的红外光，几乎可以实现对红外探测器的完美隐身。

（3）复合雷达吸波材料吸收能力增加 1 倍。2018 年，俄罗斯国家技术集团披露了用于装备隐身的一种复合雷达隐身涂层。该复合隐身涂层是由金属和金属氧化物组成的极薄多层薄膜，可使涂覆该涂层的飞机座舱雷达波吸收能力增加 1 倍，即雷达波吸收率从 40% 增至 80%。美国陆军也在小企业技术转让研究计划中提出，利用雷达吸波材料改进军服面料，减少士兵信号特征，降低其被地面监视雷达探测到的危险。

四、柔性可穿戴装备材料技术开发成果丰硕

2018 年，国外先进柔性织物、薄膜材料、3D 打印材料技术开发取得丰硕成果。其中，柔性织物不仅能过滤有害物质，还能用于柔性电池为士兵提供动力，基于石墨烯的柔性电子织物即将进入商业化发展阶段，这些都

将有效促进士兵柔性可穿戴装备发展。

(1) 新型柔性织物促进可穿戴装备智能化发展。2018 年,国外柔性可穿戴装备用织物研究活跃,美国、英国、俄罗斯等国开发出具有防护功能的电子织物、可伸缩电池用电子织物以及基于聚合物—石墨烯纳米材料的智能电子织物。其中,美国达特茅斯学院在陆军研究办公室资助下,制造出一种名为 **SOFT** 的新型智能织物,首次验证了将导电多孔材料集成到柔软织物上可制成服装,使服装能同时探测、捕获、预浓缩和过滤有害气体。美国纽约州立大学宾汉姆顿分校开发出以织物为基础、利用细菌发电的生物电池。这种生物电池所能产生的最大功率与纸基微生物燃料电池类似,在反复拉伸和扭曲下仍具有稳定的供电能力,能够用于可穿戴电子设备。俄罗斯托木斯克理工大学发现一种在不破坏石墨烯的情况下改进和使用石墨烯的方法。利用该方法可在单层石墨烯上合成出具有强共价键的名为“聚合物地毯”的织物材料。该材料具有高度结构稳定性,不会随着时间改变而性能退化,这为开发柔性有机电子产品带来希望。新型织物不仅能感知、过滤有害物质,监测身体运动与健康状态,还能用于制备柔性电池、柔性超级电容器,为士兵提供动力,有效促进士兵柔性可穿戴装备智能化发展。

(2) 先进薄膜材料可满足柔性器件应用要求。当前大多数透明氧化铟锡(**ITO**)电极都存在明显的脆性问题,不能用于柔性电子设备或显示器。南丹麦大学开发出基于纳米图案化银的新型透明导电电极薄膜大规模制造工艺。该工艺是先采用大小均匀、紧密堆积的单层塑料纳米颗粒涂覆 10 厘米的晶片并经烘干制出掩模板,然后在掩模板上沉积银薄膜,随后溶解颗粒实现图案化,最终得到透明导电薄膜。该薄膜通过改变厚度可实现高透明度和低导电率,电极性能明显优于当前柔性显示器和触摸屏用电极,可

满足多种柔性器件需求。日本东京大学基于“几何阻挫”概念,采用低成本标准液体溶液工艺制备出厚度仅为4.4纳米的大面积半导体薄膜。这种超薄半导体薄膜中的分子通过分子间作用力首尾连接构成有序的、重复排列的人字形结构,表面积大且结构十分稳定,在薄膜晶体管和柔性电子器件中具有应用潜力。

(3) 基于石墨烯的可穿戴电子织物将进入商业化。石墨烯是能够用于可穿戴电子织物的性能最为卓越的材料之一,但迄今为止还没有能以工业规模生产基于石墨烯的电子织物的有效方法。英国曼彻斯特大学牵头的小组开发出一种可升级的制备工艺,该工艺能够以150米/分钟的商业化生产速率生产基于石墨烯的可穿戴电子织物,达到了工业化生产规模,这对于快速增长的可穿戴装备发展而言是重大的技术突破,将使多功能石墨烯织物扩大应用于士兵军服与医用领域。

曼彻斯特大学开发的新工艺改变了传统的利用石墨烯材料涂覆织物的工艺过程。传统工艺首先用氧化石墨烯涂覆织物,然后将氧化石墨烯还原。新工艺首先在溶液中还原氧化石墨烯,然后利用还原的氧化石墨烯涂覆织物。由于织物涂覆是工艺的最后一步,因此可采用浸轧涂覆技术进行织物生产,这是当前纺织工业中将功能性表面涂层应用于纺织品的最常用方法。商用浸轧干燥装置可在1分钟内处理大约150米的织物,这相对于利用石墨烯涂覆织物的实验室工艺来说是一个巨大飞跃,将是电子织物转向实际应用的重要一步。

(4) 新型3D打印材料推动柔性设备制造技术发展。3D打印材料及相关工艺的迅速发展使其应用扩大到柔性设备,成为柔性可穿戴装备发展的重要推动技术。美国俄勒冈州立大学通过将镍纳米颗粒加入镓铟锡合金中得到一种新型3D打印材料。金属镓铟锡合金已被用作柔性电子产品中的导