

航天新型高性能材料的研究进展

吴凯 张铁军 姚为 韩维群

(北京航星机器制造有限公司,北京 100013)

文 摘 综合介绍了国外航天新型高性能轻质金属合金、复合材料、特种功能材料、石墨烯材料和超材料的研究与应用现状,重点介绍了我国航天新型高性能材料的研究成果,并提出了航天新型高性能材料的发展趋势。

关键词 轻质金属合金,复合材料,特种功能材料,石墨烯,超材料

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.06.001

Research Progress of New High Performance Aerospace Materials

WU Kai ZHANG Tiejun YAO Wei HAN Weiqun

(Beijing Hangxing Machinery Co., Ltd., Beijing 100013)

Abstract This paper introduces the research and application status of foreign new high performance aerospace materials in light metal alloy, composite, special functional material, graphene and metamaterials firstly. Then the research progress on China's new high performance materials in aerospace is highlighted. The trend of new high performance materials in aerospace is also pointed out.

Key words Light metal alloy, Composite, Special functional material, Grapheme, Metamaterials

0 引言

世界各国高度重视新材料发展,推出多项战略政策推进新材料技术的发展。发达国家新材料产业各具特色,侧重领域各不相同:美国注重科技领域的研发,并保持全球领先地位;日本既重视对新材料的研发,又不忘改进现有材料的性能,利用有限资源发挥最大作用;欧盟新材料科技战略目标是保持在航天材料等领域的竞争优势。

本文详细阐述了国际航天新材料的研究与应用现状,重点介绍了国内航天新型材料的研究成果,指出了航天新型材料未来的发展趋势。

1 高性能轻质金属合金

为满足导弹、火箭等航天装备平台轻量化、高可靠、高推比等发展需求,目前国外大力发展的高性能轻质金属合金主要包括第三代铝锂合金、高强镁合金、低成本钛合金、耐高温合金等。

1.1 第三代铝锂合金

20世纪20年代,德国研制出第一代铝锂合金。缺点很明显,如延展性弱、韧性差、加工困难和价格昂

贵等,没有引起足够重视^[1]。1970年后,欧美等国研制出了第二代铝锂合金产品,包括前苏联的1420铝锂合金和美国的2090铝锂合金等。第二代铝锂合金也存在问题,包括强度不高、塑形较低等^[2]。

2013年,加拿大肯联公司推出的Air Ware系列第三代铝锂合金已用于空中客车公司的A350、庞巴迪公司的C系列飞机以及F-16、F-18等军用飞机,组织模式如图1所示^[3]。美国航空界将这种新材料称为“超级合金”,被美刊评为2013年航空十三个重大事件之一。第三代铝锂合金在添加锂元素时,更加注重合金强度与疲劳裂纹扩展性能之间的平衡。通过降低锂含量(降低至1wt%~2wt%)及优化热处理制度,获得良好的综合性能。用其制造飞机结构,可使飞机结构减轻25%,耐蚀性比传统铝锂合金高出46%,抗疲劳性能提高25%,飞机降低阻力6%。此外,与复合材料比较,可加工性也得以改善,可使用传统铝合金制造工艺进而降低风险与成本,利用现有加工设备及供应链等,还可100%回收。未来应用对象锁定在A320及波音737的后继窄体客机上,也准备

收稿日期:2017-06-20

基金项目:重大科技专项资助项目(2014ZX04001-141)“高档数控机床与基础制造装备”

第一作者简介:吴凯,1984年出生,工学博士,高级工程师,主要研究方向为材料热成形及技术创新。E-mail:wk_ht239@163.com

用于军用飞机 F-35、F-16 和 F-18 的隔框、蒙皮及其他结构件。

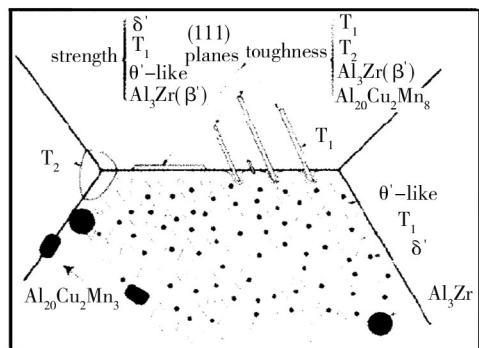


图 1 第三代铝锂合金的组织模式

Fig.1 Microstructure model of third generation Al-Li alloys

今后铝锂合金的发展还要加强以下方面的研究:

- (1) 增加铝锂合金的韧性、塑形和强度;
- (2) 降低铝锂合金的结构质量;
- (3) 改善铝锂合金的各向异性。

1.2 高强镁合金

20 世纪 40 年代,镁合金获得了飞速发展^[4]。但由于价格昂贵的原因,镁合金的研究出现停滞。

近年来,由于环境和能源问题越来越突出,以及镁合金巨大的性能潜力和优势,镁合金的研究和应用日益受到德、美、加等发达国家和地区的高度重视,均相继出台了镁合金研究计划进行技术攻关,投资金额总和达数亿美元。德国科学技术协会牵头,启动了由德国克劳斯塔大学和汉诺威大学负责组织实施、欧洲最大的镁合金与镁合金压铸项目“SFB390”,项目金额超过 5 300 万欧元,主要目标是研究镁合金在结构件中的应用^[5]。加拿大联邦政府及魁北克省与海德鲁公司共同投资 1 140 万加元成立了一个新的镁合金研究中心,其宗旨在于通过优化设计工艺及材质,获得具有优良性能的镁合金压铸零部件,从而进一步拓宽镁合金的应用领域。

镁合金通过合金化,与稀土元素形成稳定的高温相,以提高镁合金的高温性能。

采用时效强化与形变强化可以提高合金的强度和韧性,美国科学家的研究表明,通过挤压与热处理复合处理后的 ZK60 镁合金,强度及断裂韧性均得到极大的提高^[6]。当前国外变形镁合金的室温屈服强度最高达到 300 MPa,延伸率达到 5%。

镁合金质量轻是其在航空航天中应用的最主要因素,随着镁合金的研究继续开展,在航空航天中的应用将会越来越普遍。

1.3 低成本钛合金

图 2 是飞机结构中钛用量随年代的变化^[7]。由于其价格昂贵,常用于承力大的关键部位。为扩大钛合金的使用量,国外积极研制新型低成本钛合金。美

国 Allegheny 技术公司也采用铁元素代替钒元素和富氧技术,研制了新配方 Ti-4Al-2.5V-1.5Fe-0.250 钛合金,其性能类似于 Ti-6Al-4V 合金,具有优良的冷成形和热加工性能,但价格比航空航天用的 Ti-6Al-4V 合金约低 20%。

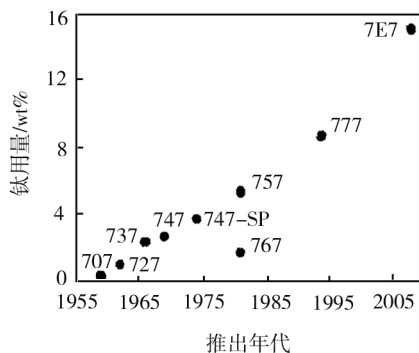


图 2 飞机结构中钛用量的变化

Fig.2 Variation of titanium used for structure material in airplane

钛合金作为发动机材料虽有巨大优势,也同样面临极大挑战^[8]:

- (1) 钛合金的性能在高温条件下还不达标;
- (2) 钛合金的价格过高。

1.4 耐高温合金

高温合金是指以铁、镍、钴为基体材料,能在高温和应力作用下长期工作的特定金属材料^[9]。高温合金在 600℃ 以上具有良好的强度、塑性、韧性和疲劳性能等。经过数十年的发展,高温合金已较为成熟,并在武器装备动力装置上获得广泛应用。随着材料的更新换代,发动机的涡轮进口温度也从第一代的 777~1 027℃ 跃升至第四代的 1 577~1 715℃。

与纯金属及合金材料相比,金属间化合物具有极好的耐高温和耐磨性能。为此,近年来国外针对金属间化合物的基础性研究、成分设计、工艺流程的开发以及应用开展了大量工作,用于替代传统的镍基高温合金、镍基单晶合金等。其中 Ti-Al 合金发展最为迅速,富铌 γ -TiAl 合金已发展到第三代,塑性和韧性都有很大提高,已在航空发动机叶片中得到大量应用,铸造 γ -TiAl 低压涡轮叶片在 PW1000G、Leap-1B、Leap-1C 的用量预计达到 120 万片,至 2014 年 PCC 公司制造的 Ti-Al 叶片年产量已达到 4 万片^[10]。

2 复合材料

复合材料具有比强度高、加工成形方便、抗腐蚀能力强等特点,利用其取代传统的钢、铝合金等材料制造武器装备结构件,可以在保证武器装备性能的同时,大大减轻装备的质量。目前国外大力发展的航天高性能复合材料主要包括树脂基复合材料、铝基复合材料和陶瓷基复合材料等。

2.1 树脂基复合材料

树脂基复合材料是以聚合物为基体,纤维为增强宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 6 期

体复合而成^[11]。因此,树脂基复合材料的用量已经成为衡量航空航天技术发展的重要标志。图3为树脂基复合材料和轻质金属材料的比强度和比模量。

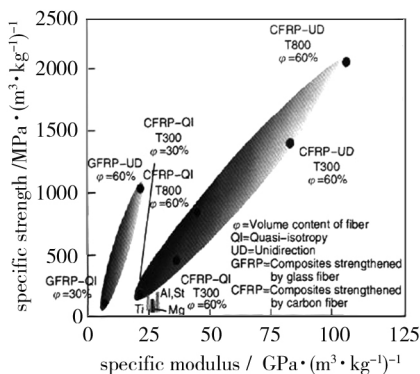


图3 树脂基复合材料和轻质金属材料的比强度和比模量

Fig.3 Specific strength and modulus of polymer matrix composites and aluminum alloy, titanium alloy

美国战斧巡航导弹大量采用了复合材料,如头锥采用了 Kevlar/聚酰亚胺,雷达天线罩、进气道采用了玻璃纤维/环氧树脂,进气道整流罩采用了碳纤维/聚酰亚胺,尾翼采用了玻璃纤维/环氧树脂、Kevlar/环氧树脂,尾锥使用了玻璃粗纱/环氧树脂等。美国“侏儒”小型地对地洲际弹道导弹三级发动机燃烧室壳体由碳纤维/环氧树脂缠绕制作;三叉戟(D-5)第一、二级固体发动机壳体采用碳/环氧制作,其性能较 Kevlar/环氧提高 30%^[12]。

热塑性树脂用作复合材料基体,在断裂韧性、冲击强度和吸湿等方面都优于热固性树脂基体,在耐高温、抗湿热、抗冲击、热稳定性、损伤容限等方面都大大优于环氧树脂系统,已成为复合材料树脂基体的发展趋势。近些年,由于纤维增强热塑性复合材料在生产方面取得了显著进步,极大降低了材料成本,提高了可用性,已在导弹弹体和发动机壳体设计和应用方面得到重视。美国陆军提出了要开发纤维增强热塑性复合材料导弹圆筒形接缝结构的熔接工艺、材料和分析技术,用于导弹发动机和弹体圆筒形接缝处的圆筒形接缝处的熔接。美国圣地亚哥复合材料公司设计了一种熔接机,可用于加工热塑性复合材料圆筒,应用于导弹结构件。

2.2 铝基复合材料

碳化硅/铝基复合材料的强度在碳化硅纤维含量较低时也远比超硬铝高。由于成本较铍材低得多,还可以替代铍材用作惯性器件,已被用于美国某导弹惯性制导系统和惯性测量单元。

美国哈勃太空望远镜的高增益天线杆结构采用 P100 超高模量碳纤维(40vol%)增韧的 6061 铝基复合材料^[13],采用扩散粘接工艺制造,确保了太空机动飞行时天线的方位,它还由于具有良好的导电性能,从而提高了波导功能,保障了航天器和天线反射器之宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 6 期

间的电信号传输,整个部件比碳/环氧材料轻 63%。

2.3 陶瓷基复合材料

陶瓷基复合材料以其优异的耐高温性能、高温力学性能等成为热结构材料的候选,在导弹领域有着极为重要的应用前景。美国、法国等国家开展了深入研究,针对长期飞行和工作的导弹设计了带有冷却结构的 C/SiC 复合材料夹层结构,并研制出带主动冷却结构的超燃冲压发动机燃烧室^[14]。

目前,法国航空航天研究院已用纤维缠绕法生产出直径 150 mm、长度 100 mm 的筒形件及其他复杂形状构件。据称这种新材料制造成熟度已达到 4 级。试验件的初步试验表明,此材料能耐 1 000℃ 高温,可满足“高超声速飞行器”计划试飞的第一阶段要求;第二阶段将把材料的耐热温度提高到 2 000℃ 以上,达到飞行速度超过 8 马赫的要求。新型陶瓷基复合材料的问世,为导弹及航天飞行器材料提高高温强度、韧性、抗氧化性和显著降低成本提供了新的可能。

复合材料历经多年发展,配套技术已经趋于成熟,现还需加强以下方面研究:

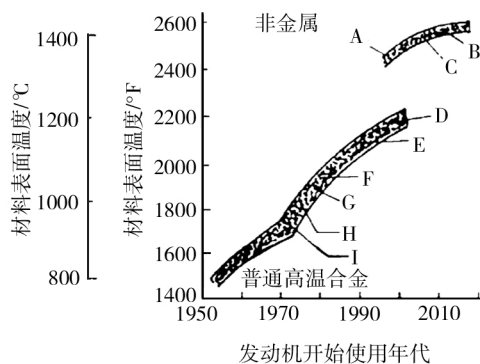
- (1) 研发新型低成本轻量化复合材料;
- (2) 开展智能化复合材料制备技术;
- (3) 增强微纳米复合材料技术的发展。

3 特种功能材料

为满足载人飞船的返回舱、重复使用的运载器(如航天飞机)、洲际导弹等再入大气层时对防热与隔热的要求,以及保障低轨道航天器的空间防护,国外航天领域积极研发和应用特种功能材料。

3.1 高温合金材料

高温合金是航空航天发动机部件的重要材料^[15]。传统高温合金已经接近其使用温度上限,无法通过调整成分比例来进一步提高使用温度,只能求助于新型工艺途径,如定向凝固高温合金等(图4)。



- A-陶瓷; B-碳/碳; C-陶瓷基复合材料; D-金属间化合物;
E-纤维强化高温合金; F-快速凝固高温合金; G-氧化物弥散
强化高温合金; H-单晶高温合金; I-定向凝固高温合金。

图4 各类高温材料的工作温度

Fig.4 Working temperature of various high temperature materials
美国 NASA 马歇尔空间飞行中心研发出弥散强化的钼-铌合金,采用真空等离子喷涂制造耐高温部

件。与其他同等的非弥散强化的铝-铌合金相比,研发出的合金高温性能得到提高。

美国 DARPA 授予奎斯塔克公司“小企业创新研究计划”项目,应用该公司的材料设计技术,研发具有更大延展性、抗氧化性和 1 300℃ 以上蠕变性能优异的钼基合金。公司计划开发基于传统多组分热力学和灵活性数据库的程序结构和结构性能模型,并利用这些工具和模型来设计可通过传统工艺制造的先进钼基合金。改进的钼基合金可望用于下一代运载火箭部件。

3.2 多层隔热材料

多层隔热材料是通过减少热辐射的传递来隔热,其原理见图 5^[16]。

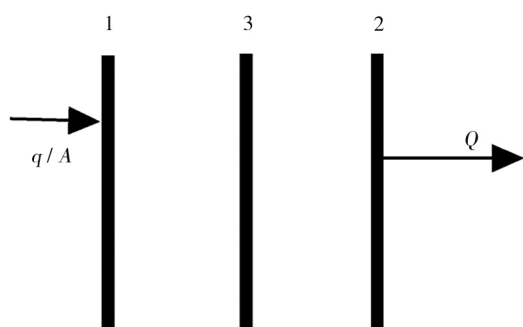


图 5 多层隔热材料原理图

Fig.5 Schematic of multi-layer insulation material

美国 NASA 戈达德航天中心开发出用于微流星体防护的气凝胶基多层隔热材料^[17]。这种材料是将超低密度、高疏水性、纤维增强气凝胶材料(2.5~3.8 cm 厚的气凝胶层)集成到多层隔热材料上,形成一体化的隔热材料。气凝胶层具有高的抗压强度,可抵抗高速冲击;多层隔热材料具有非常有效的隔热性能,二者集合在一起,使得这种一体化的隔热材料具有卓越的热性能和显著的坚固性,从而实现真正的微流星体防护。

多层隔热材料的缺点就是成本过高,还需要降低其成本进行推广应用。

3.3 热防护材料

热防护材料是保护飞行器免受高速飞行时热环境伤害的重要组成部分。

1960 年开始,美国研制出了一系列陶瓷隔热瓦。这是美国高超声速飞行器的隔热结构设计过程中重要的候选材料。欧洲的超高速飞行器也采用了类似隔热瓦的技术,如德国采用多孔纳米材料作为隔热层,俄罗斯采用玻璃纤维作为巡航导弹的热防护材料。

近年来,法国空客防务与航天公司(ADS)完成了欧洲 Exo Mars 任务所需的两个热防护罩的建造^[18]。该舱拥有前后两个热防护罩,其中前热防护罩直径为 2.4 m,质量为 80 kg,由覆盖 90 片隔热瓦的碳夹层结

构组成,在进入大气层阶段将承受 1 850℃ 以上的高温;后热防护罩质量仅为 20 kg,由固定在碳结构上的 12 种不同型号的 93 片隔热瓦构成,并包含一个下降阶段展开的降落伞。探测器的科学仪器集成在前热防护罩中,在发射准备的最终组装前完成后热防护罩的装配。公司曾成功研制“惠更斯”探测器所用的热防护罩,目前正在研究下一代热防护材料和系统,用于外星球或空间站的样品返回。

超高速飞行器需要承受进入大气层时超过 2 000℃ 的高温,而超高温陶瓷的熔点在 3 000℃ 以上,是理想的候选材料。英国伦敦帝国理工学院先进结构陶瓷中心研究人员不但对超高温陶瓷进行了航天领域的适用性试验,还探索了不同添加剂对材料性能提高的可行性,发现 HfC 可作为保护超高速飞行器的热防护材料。

随着飞行器飞行速度的提高,对热防护材料性能的需求也日益提高,热防护材料需要在以下方向加强研究。

(1) 可重复使用的耐高温热防护材料

热防护材料除了耐高温之外,还需要增加反复承受高速飞行时环境伤害的能力,进而降低成本。

(2) 超高温热防护材料

飞行器在高速飞行中,局部温度非常高,此处使用的热防护材料应具有耐超高温、高效隔热等特点。

3.4 微流星体轨道碎片防护材料

流星体是指存在于太阳系内高速运转的固体颗粒。而碎片是指宇宙空间中除正在工作的飞行器以外的人造物体。航天飞行器在这样的环境中运行,损伤难以忽视,如图 6 所示^[19]。因此,碎片问题不仅是设计和发射航天器时必须考虑的一个因素,也是维护空间环境安全的一个重要方面^[20]。

美国 NASA 喷气推进实验室研制出可用于航天器微流星体轨道碎片防护的新型金属合金如块状玻璃合金(BMG,也称非晶态合金)及其复合材料^[21]。BMG 不但具有极高的强度和硬度、较低的密度,还易于成形。用柔性结晶相增强的 BMG 基复合材料,不仅保留了 BMG 的高硬度(比铝合金硬 6 倍)、较低密度(是铝合金密度的 1/2 倍)、低熔化温度(与铝合金相同)等性能,使得采用 BMG 作为航天器的防护屏,可有效地气化撞击进来的碎片,同时确保被撞击的局部防护屏易熔化或气化,从而阻止固体碎片撞击到航天器外壁。利用速度达 7 km/s 的铝弹丸对新防护屏和国际空间站现役防护屏(Kevlar 纤维制造)进行比较,测试结果表明,新防护屏比传统防护屏能更有效减缓来自铝弹丸的冲击力。BMG 及其复合材料能支撑大型薄板和面板,且具有极好的力学性能,有望成为未来航天器微流星体轨道碎片防护的优选材料。

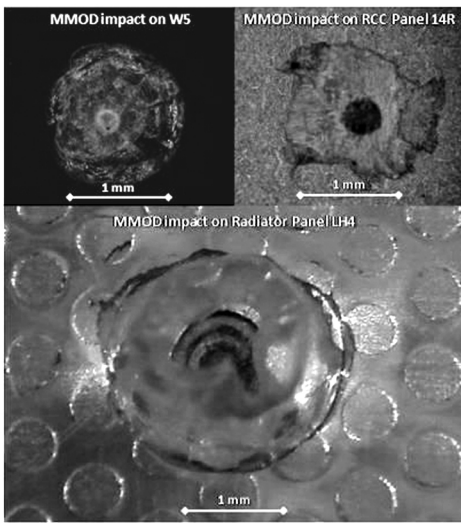


图6 飞行器返回后检测的部件损伤情况

Fig.6 Detected damage of aircraft during mission

4 石墨烯材料

石墨烯微观结构是碳原子组成的二维蜂窝网格(图7)^[22],单层石墨烯材料只有一个碳原子直径厚(0.335 nm)兼具半导体和金属属性。

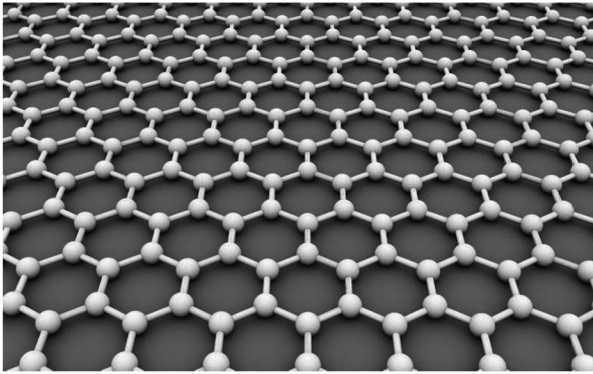


图7 石墨烯的单层结构

Fig.7 Single layer structure of graphene

主要特性有:良好的电学性能,室温下电子迁移率是硅的100倍,比表面积可达 $2\ 630\ \text{m}^2/\text{g}$;较好的力学性能,材料结构稳定,抗拉强度125 GPa,是钢的100倍以上;突出的热学性能,热导率达 $5.3\ \text{kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$;优异的光学性能,单层石墨烯的可见光透光率达97.7%。石墨烯材料可应用于军用电子系统、能源、防护、后勤保障、隐身系统等领域,推动航天武器装备发展实现重大创新。

4.1 军用电子系统用石墨烯

石墨烯电路具有更高的工作频率,可以替代现有的半导体电路。2012年,IBM公司研制出截止工作频率300 GHz的石墨烯场效应晶体管^[22],比同尺寸硅场效应晶体管高7.5倍,改进后有望突破1 THz。波兰DCD公司2012年开发出世界首款石墨烯处理器,电子在处理器中的运动速度接近光速,功耗比同类硅产品降低90%。这两项新突破将对高速集成电路、高性能计算机、军用雷达等发展产生重要推动作用

用。

2013年,美国西北大学研发出高导电性石墨烯柔性电极^[23],可用于生产大幅面、可折叠精密显示设备。应用该技术制造的军用电子地图等显示设备将更加轻质、便携。2015年,美国莱斯大学的研究人员采用一种“激光诱导石墨烯”(LIG)的方法诱导石墨烯生产,用于柔性电容器的生产。上述材料可望用于航天电子系统中。

4.2 高功率武器装备用石墨烯

石墨烯巨大的比表面积使其成为高功率激光器的核心材料,也可用于制造容量大、充放电迅速的超级电容和电池,解决电磁导轨炮、定向能武器等储能需求高、充放电速度快的技术难题。2013年,美国莱斯大学制造高比容微型石墨烯锂电池^[22],比容达到 $204\ \text{mA}\cdot\text{h}/\text{g}$,厚度仅 $0.01\ \mu\text{m}$,充放电时间20 s,试验表明充放电1 000次后,电容量仅损耗10%。2014年11月,美国莱斯大学科学家发明了一种新型的石墨烯/纳米管复合阴极,可使廉价柔性的染料敏化太阳能电池更实用化,光电转换能力提高了20%。2015年6月,韩国三星公司通过将高结晶石墨烯的合成新方法应用到高容量硅阴极,发明了新型“高度结晶石墨烯编码的”硅阴极材料,大幅提升了锂离子电池的电容量。上述材料可望用于航天武器装备的超级电容和电池中。

4.3 军用防护材料用石墨烯

利用石墨烯超薄、超轻、超抗压特点制出的新型材料,可用于替换防弹衣中的芳纶等材料,在减轻质量的同时还能提高防护能力。实验证明,石墨烯承受子弹冲击的性能胜过钢铁和防弹衣材料。澳大利亚2012年研发的石墨烯壳体材料较普通钢壳体减轻83%,而屈服强度提升12倍。另外,石墨烯可用于制作超强耐腐蚀层。美国布法罗大学同年研发出石墨烯涂料,钢材涂覆该材料后可浸泡在浓盐水中一个月不锈。上述材料可望用于航天武器装备的防护材料中。

4.4 战场后勤保障用石墨烯

石墨烯水净化设备具有低耗、高效的特点。2012年,美国MIT通过采用石墨烯净化海水,实现了海水的快速净化。2013年,美国洛马公司大力推进石墨烯海水净化系统研究,并计划年底完成样机测试。该系统的水净化速度比当前反渗透薄膜快数百倍。该技术一旦发展成熟并应用于航母、潜艇等大型海上作战平台,将可大幅减少平台淡水携带量,增加燃油及武器装备装载量,增强平台海上持续作战能力。

4.5 军事隐身系统用石墨烯

石墨烯材料良好的微波吸收特性使其在航天装备隐身方面也有巨大的潜力。2011年,意大利萨皮恩扎大学通过试验证明石墨烯材料比传统吸波材料

吸波频带更宽、吸收能力更强。此外,近年国外重点关注石墨烯复合材料热传导特性方面的应用,美国防先期研究计划局 2012 年已完成石墨烯高分子聚合物为集成电路处理器芯片散热的试验,散热性能(热导率)提升 22 倍。

5 超材料

目前,公认的超材料定义是:对内部结构人工合理设计的,从而具有常规材料不具备的超常物理性能的材料。超材料是继高分子材料、纳米材料之后材料领域又一重大突破,将对世界科技发展产生重要影响,并有可能成为一种前途不可限量的新型材料。

发达国家高度重视超材料的研究并给予长期支持。美国军方确定超材料技术率先应用于最先进的军事装备。2012 年,美国国防部长办公室将超材料列为六大颠覆性基础研究领域之一,美国军方支持超过 90 家企业进入超材料研究应用领域。日本政府也将超材料列入学术研究的重点,成立了各种超材料研究所,并表示在下一代战斗机中将使用超材料技术。俄罗斯也将超材料技术列为下一代隐形战斗机的核心关键技术。在航天领域上逐步应用也是美国、日本、俄罗斯等国家开展超材料应用研究的拓展方向。

5.1 表面隐身用超材料

目前,超材料在可见光隐身、红外隐身和声波隐身方面均取得重大进展。在光隐身方面,2008 年美国加利福尼亚大学在美国国防部和能源部资助下,利用银和镁的氟化物以及纳米银线复合交替堆叠制造出一种“隐身斗篷”^[24],可使自然界中的可见光和近红外光发生逆转。2012 年,俄罗斯和丹麦研究人员使用掺杂铝的氧化锌制备了在近红外波段隐身的新型铝:氧化锌/氧化铝材料。在声波隐身方面,2014 年,美国杜克大学研制出世界首个三维“隐身斗篷”^[25],可以让声波轻易的绕过,这必将对隐身飞行器的开发产生巨大的推动作用。

5.2 雷达罩用超材料

军用飞机的天线罩除保护天线免受环境影响之外,还需要为天线提供隐身防护功能,免受敌方雷达的探测。传统透波材料制成的天线罩在增加厚度以满足耐压性能的同时,往往会因为热损耗和反射损耗等因素使天线的辐射方向图变差,降低天线的性能。在雷达罩中引入超材料覆层,可以不改变雷达罩外形,促使电磁波只能在垂直方向附近的小角度内传播,其他方向的传播被限制。2008 年,法国科学家设计了一种开口环共振器结构的超材料雷达罩,操作频率为 2.17 MHz,增益提高了 3.4 dB,方向性提高了 2.9 dB。2012 年,美国国防部通过中小企业技术转移项目资助纳米声学有限公司开展有关 E-2 预警机大型雷达罩材料的研究,目的是利用超材料技术解决 E-2 原天线罩存在的结构肋条导致天线图产生偏差的问

题,取得了较好的效果^[26]。

5.3 平板天线用超材料

采用超材料制作的平面天线替代传统抛物面天线的反射面,一方面带来的是形状更流线化、尺寸小型化、设备减重;另一方面可对参数进行调整,使电磁波可以多向、多个频率的传播。2011 年,美国洛马公司开发了一种可用于卫星等航天器的新型三维超材料天线,具有低能耗、质量轻、宽带大、能量利用率高和价格便宜等优点,对降低航天器的发射费用和结构质量具有重要作用。2012 年,印度国家技术研究所采用左手和右手结合的传输线型超材料设计了椭圆形零阶谐振天线,目的是解决零阶谐振天线工作频带宽比较窄的问题^[27]。2014 年 4 月,BAE 系统公司和伦敦大学玛丽女王学院联合研制出一种可用于新型天线透镜的新型复合材料,可使电磁波通过平面天线透镜聚焦,并具有良好的带宽性能。该突破解决了传统材料工作波段窄的问题,可以用于制造嵌入蒙皮的天线,从而提高隐身能力,甚至使飞机、舰艇、无线电和卫星等天线设计产生变革。

5.4 超薄透镜用超材料

一直以来,显微镜、眼镜和放大镜的制造都被一条光学规律所限制,即任何小于光波长度的物质都无法观察到。而超材料制成的“理想透镜”可以极大地提高分辨率,突破普通镜片的极限。2012 年,美国密歇根大学完成了一种新型超材料超级透镜研究,突破了普通光学透镜的衍射极限,可用于观察尺寸小于 0.1 μm 的物体,且在从红外光到可见光和紫外光的范围内工作性能良好。2013 年,美国国家标准与技术研究院展示了由一种能使光回流的银和二氧化钛纳米交替覆盖制作成型的超材料平板透镜^[28]。

6 我国航天新型高性能材料的研究成果

6.1 高性能轻质金属合金

兰州物理所模拟微重力环境下铝锂合金的制备,质量得到减轻,强度得到提高,在航天上的应用更加有优势^[29]。

中国科学院长春应用化学研究所与多家公司合作,在高性能镁合金的研发和应用方面取得巨大进展,通过添加一定配比的钇和钆,解决了传统镁合金强度不高、耐热性差、抗蠕变差的关键问题。该成果已实现了产业化,为国内外 50 多个单位提供高性能镁合金用于科研和产品研发,不仅显著推进高性能镁合金基础研究的发展,也为高性能镁合金在航天、汽车和轨道交通的应用奠定了基础。

在 TiAl 合金板材研制方面,哈尔滨工业大学在国内率先研制出最大尺寸达 700 mm×200 mm×(2~3) mm 的薄板材^[30]。北京科技大学系统研究了高 Nb 合金的 Nb 的作用机制,获得了在 900℃ 左右具有较高抗氧化性的 TiAl 合金材料^[31]。中南大学采用粉末冶金宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 6 期

等方法制备了 TiAl 合金试样^[32],并研究了各种成分对合金性能的影响。北京钢铁研究总院系统研究了 Ni 元素的影响,获得性能较理想的 TiAl 合金成分,并铸造出坦克发动机增压涡轮,还开发了 Ti3Al 和 Ti2AlNb 合金板材,在航天领域进行了初步应用研究^[33]。

6.2 复合材料

陈祥宝院士及其团队历经多年的潜心研究,通过制备新型固化剂和控制其在环氧树脂的溶解,解决了复合材料成本过高的问题^[34],极大地促进了高性能复合材料应用领域的扩大。目前低温固化高性能复合材料已在航空、航天领域获得了广泛应用。

对高端碳纤维复合材料构件,我国早期主要靠引进国外碳纤维预浸料进行加工。由于加工工艺复杂,我国大多时候只能加工结构简单的复合材料组件。黑龙江科技大学研究出高性能碳纤维预浸料的生产配方和加工工艺,其性能已达世界一流水准,也填补国内高端碳纤维复合材料自主生产的空白^[35]。

6.3 特种功能材料

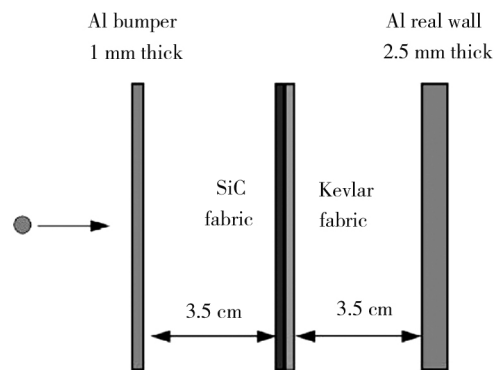
中国科学院金属所高温合金 GH4169 盘件在主要成分不变的情况下,锭型直径从 406 mm 增大到 610 mm,质量也得到一定改善,性能提升显著^[36]。

中南大学研制一种高性能钨铜电子封装材料^[37]。该产品既有钨的低膨胀特征,又有铜的高导热性能。产品主要应用于新型的高性能电子器件中,与 Si 等电子材料相匹配,起到散热和保护的作用。目前该材料已开始应用于航天大功率脉冲微波管、激光二极管、集成电路模块、电力电子器件等元器件中。

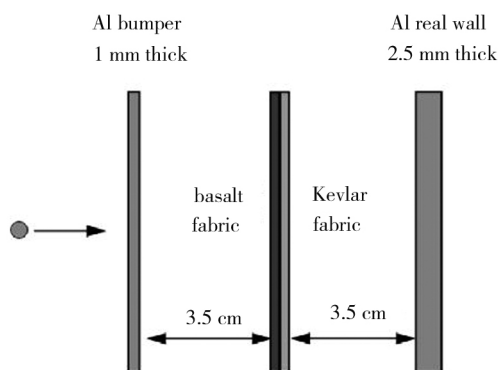
中国科学院电工研究所成功研制出国际首根 10 m 量级的高性能 122 型铁基超导长线^[38],被称为“铁基超导材料实用化进程中的里程碑”。随后,研究组对制备过程中涉及的相组分与微结构控制、界面复合体均匀加工等关键技术进行研究,成功研制出长度达 11 m 的高性能 122 型铁基超导长线,其传输电流性能在 10 T 的磁场下超过 18 400 A/cm²。研究组开发出采用纯铜作为包套材料的高性能 122 型超导带材,在相同横截面积内,超导带材的截流能力是传统铜导线的数百倍。

光致形变材料是在特定波长光照下,材料本体发生形变的智能材料,可望在光动能转换领域获得应用。中国科学院苏州纳米所在纳米级有机染料分子晶体复合光机械响应体系研究取得重要进展,开创性地将 N- α -萘基-2-羟基-1-萘醛亚胺分子的纳米级棒状分子晶体以梯度分布和选择性取向的方式原位组装在聚偏二氟乙烯基质内,获得了一种新型光致形变薄膜材料。这种薄膜在弱光照下就会出现形变,脱离光照又可以恢复,这也为光致变形材料的发展提供帮助。我国近年自主研发了填充式 Whipple 防护结构^[39]。研究表明:在填充的纤维层总面密度为 0.135 g/cm² 的情况

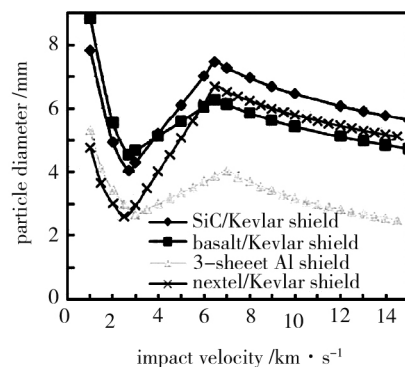
下,Whipple 防护结构的防护性能明显优于等面密度的三层铝合金板防护屏[图 8(a)和(b)],丝毫不弱于国外相应防护屏的防护能力[图 8(c)]。



(a) SiC/Kevlar 填充防护



(b) Basalt/Kevlar 填充防护



(c) 等面密度的各种防护屏性能对比
图 8 填充式 Whipple 防护结构

Fig.8 Stuffed Whipple protection structure

6.4 石墨烯材料

北京航空材料研究院的一组年轻科研人员在国际石墨烯研究领域首创“烯合金”材料,这一具有里程碑意义的重大自主创新,不但发明了一类具有优异性能的新型高端合金材料,也使我国成为石墨烯这一材料科学前沿基础和应用研究的领跑者^[40]。

中国科学院电工研究所马衍伟课题组采用金属镁热还原二氧化碳,成功制备出多孔结构的石墨烯电极材料^[41]。此次研制的石墨烯基超级电容器,在电解液中表现出优异的特性,在功率密度为 1 W/g(比功率)时,能量密度高达 80 Wh/kg(比能量),大大超

出目前商业化的活性碳基超级电容器。

泰州巨纳新能源有限公司研制出世界首台商用石墨烯飞秒光纤激光器 Fiphene,性能指标均高于其他同类产品,具备极强竞争力,未来将重点在航空航天等领域进行推广应用。

6.5 超材料

相比于国外相对分散的发展模式,我国在超材料领域的发展模式更加集中和有力。已分别在 863 计划、973 计划、国家自然科学基金、新材料重大专项等项目中对超材料研究予以立项支持。在电磁黑洞、超材料隐身技术、介质基超材料以及声波负折射等基础研究方面,我国企业取得了多项原创性成果,并在世界超材料产业化竞争中占到先机。曾在美国留学并在《科学》杂志发表关于新型超材料宽频带隐身衣论文的刘若鹏无疑是其中代表^[42]。

刘若鹏及其团队创办的公司已经申请超过 3 000 件专利,在航空航天产业化等方面也位于世界前茅。借助他们设计的电磁超材料天线,人们就可以在移动网络鞭长莫及的偏远地方连接卫星宽带上网。

美国类似产品的商业销售计划今年才开始,深圳光启公司早在 3 年前便在我国多个省份进行了试用。而这仅是中美之间近年来在超材料核心领域展开的激烈竞争之一。此外,为了打破欧美对超材料技术标准的垄断,全国电磁超材料技术及制品标准化技术委员会审查和报批了国家标准《电磁超材料术语》。这意味着我国在全球率先制定出超材料领域的国家标准,将对我国在超材料技术的研究和标准转化起到重要作用。后续重点是将超材料在航天等领域进行推广应用。

7 航天新型高性能材料的发展趋势

7.1 高性能轻质金属合金

随着材料技术的发展,各类航天金属材料向着更高韧性、更好的高温性能、更好的工艺性能等方向发展。采用的研发思路包括如下两种:一是对现有材料在保持现有性能的同时,用创新的概念(工艺、成分、微结构)去克服现有材料的缺陷或应用上的限制,重视传统材料的持续改进,“一材多用”成为未来的发展趋势;二是随着纳米技术和智能制造技术的进步,可以开发更多的新型高性能材料。

7.2 复合材料

未来航天复合材料技术将朝着高性能化、多功能化、低成本化方向发展,以其推动武器装备的更新换代,满足当前和未来新型航天武器装备的发展需求。其中,树脂基复合材料在第二代先进复合材料成熟应用的基础上,开始进入扩大应用与改进提高并行推进的发展阶段,尤其纤维增强热塑性树脂基复合材料在生产技术方面取得突破性进展,将为其在导弹弹体和发动机壳体等大型构件上的应用开辟广阔的空间,未

来有望达到或超过热固性树脂基复合材料的性能水平,改善导弹战斗部抗冲击、抗气动加热、抗疲劳等性能;耐高温陶瓷基复合材料将在导弹发动机、燃烧室、喉衬和喷管等部件上扩大应用范围,未来将主要解决其脆性大、抗热冲击能力较差、密度较大等问题。

7.3 特种功能材料

为满足未来新一代航天器超高速、机动飞行、重复使用等高性能指标要求,需要对现有功能材料进行改进。纳米隔热材料、功能梯度材料都是未来隔热材料发展的热点。热防护材料将向以下四个方向发展:(1)降低密度、减轻质量;(2)更高温度、更大应用范围;(3)不断改进工艺、提高性能和降低成本;(4)由短时高温超高温向长时高温有氧等方向发展。开发满足新型航天器性能要求且对环境适应性好的星体/碎片防护材料同样是热点。

7.4 石墨烯材料

目前,石墨烯材料在实验室内的制备已可实现,但因为成本昂贵,大多数研究还处于实验室理论研究阶段,还有大量研究工作需要做。因此,石墨烯材料技术领域总体发展趋势是:继续寻找最佳石墨烯制作方法和改进已有的制作工艺;进一步制作出尺寸更大、质量更高的石墨烯材料;并不断降低石墨烯的制作成本。另外,石墨烯材料还将是超越和取代硅基 CMOS 的新一代半导体材料。石墨烯薄膜形态与当前的硅平面工艺兼容且能够大规模集成,在微纳电子方面将可能代替硅基 CMOS,有望在芯片和集成电路领域引发一场革命。据专家预测,未来 5 到 10 年,石墨烯将成为“后硅时代”的新潜力材料,并将引导价值数万亿美元的新兴产品。

7.5 超材料

超材料技术目前还处于实验室到产品的中试阶段,距离大规模产业化还有一定距离,有许多的难题有待解决,这也是未来超材料研究的方向。

(1)超材料频段和方向的控制。从工作频段来说,超材料的频段目前还只能达到红外。为了更好地实现隐身功能,波段起码应该覆盖完整的可见光范围;同时也需要克服其各向异性的特点,来实现更大范围内对光的控制。

(2)超材料的产业化发展。目前实验室仅掌握了二维平面上超材料的制造工艺,而三维空间中的立体超材料还未实现;表面工艺也仅局限在极小的区域上,距大规模的应用还有很长的路要走。

(3)新型超材料及其功能的设计、性能优化及相关模拟仿真方法。

(4)不同超材料之间相互作用的研究。对其规律性的研究不断提出新的理论和方法,从而推动与此相关的新理论概念、分析方法和实验测量技术的发展。

参考文献

- [1] FRIDLANDER I N. Aluminum alloys in aircraft in the periods of 1970—2000 and 2001—2015 [J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2001, 43(1): 6-10.
- [2] 李劲风, 郑子樵, 陈永来, 等. 铝锂合金及其在航天工业上的应用[J]. *宇航材料工艺*, 2012, 42(1): 13-19.
- [3] GIUMMARRA C, THOMAS B, RIOJA R J. New aluminum-lithium alloys for aerospace applications [J]. 2007.
- [4] 钟皓, 刘培英, 周铁涛. 镁及镁合金在航空航天中的应用及前景[J]. *航空工程与维修*, 2002(4): 41-42.
- [5] KAINER K U. Magnesium alloys and their applications [M]. Wiley-VCH, 2000.
- [6] GALIYEV A, KAIBYSHEV R. Microstructural evolution in ZK60 magnesium alloy during severe plastic deformation [J]. *Materials Transactions*, 2001, 42(7): 1190-1199.
- [7] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况 [J]. *航空科学技术*, 2005(4): 3-6.
- [8] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 等. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. *材料导报*, 2011, 25(1): 102-107.
- [9] 徐强, 张幸红, 韩杰才, 等. 先进高温材料的研究现状和展望[J]. *固体火箭技术*, 2002, 25(3): 51-55.
- [10] APPEL H F, PAUL J D H, OEHRING M. Gamma titanium aluminide alloys: science and technology [M]. Wiley-VCH, 2011.
- [11] 陈祥宝, 张宝艳, 邢丽英. 先进树脂基复合材料技术发展及应用现状[J]. *中国材料进展*, 2009, 28(6): 2-12.
- [12] 赵稼祥. 碳纤维在美国国防军工上的应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2003, 28(1): 6-9.
- [13] 帅甜田. 真空热压扩散法制备层压编织 C_f/Al 复合材料工艺及组织研究[D]. 南昌航空大学, 2015.
- [14] BOUQUET C, LACOMBE A, HAUBER B, et al. Ceramic matrix composites cooled panel development for advanced propulsion systems [C]// *Aiaa/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*. 2013.
- [15] 邱惠中, 吴志红. 国外航天材料的新进展[J]. *宇航材料工艺*, 1997, 27(4): 5-13.
- [16] 闫长海, 孟松鹤, 陈贵清, 等. 金属热防护系统隔热材料的发展与现状[J]. *导弹与航天运载技术*, 2006(4): 48-52.
- [17] JONES S M, SAKAMOTO J. Applications of aerogels in space exploration [M]// *Aerogels Handbook*. Springer New York, 2011: 721-746.
- [18] 邹军锋, 李文静, 刘斌, 等. 飞行器用热防护材料发展趋势[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(4): 10-15.
- [19] 韩增尧, 庞宝君. 空间碎片防护研究最新进展[J]. *航天器环境工程*, 2012, 29(4): 369-378.
- [20] 刘静, 都亨. 流星体和碎片——航天器的微粒环境综述[J]. *航天器环境工程*, 1999(1): 33-38.
- [21] 佚名. 2014年度十大国防材料技术突破 [C]// 2015.
- [22] 吴勤. 颠覆未来作战的前沿技术系列之石墨烯[J]. *军事文摘*, 2015(8): 42-45.
- [23] 国林. 含石墨烯薄片油墨打印出高导电柔性电极[J]. *印刷杂志*, 2013(7): 76-76.
- [24] LEONHARDT U, TYC T. Broadband invisibility by non-Euclidean cloaking [J]. *Science*, 2009, 323(5910): 110-112.
- [25] ZIGONEANU L, POPA B I, CUMMER S A. Three-dimensional broadband omnidirectional acoustic ground cloak [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(4): 352.
- [26] MUNK B A. *Metamaterials: critique and alternatives* [M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [27] LI L, HUO F, JIA Z, et al. Dual zeroth-order resonance antennas with low mutual coupling for mimo communications [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2013, 12(1): 1692-1695.
- [28] 隗硕, 李莉萍. 创纪录的超材料平面透镜能看得更清楚[J]. *计测技术*, 2013(5): 52-52.
- [29] 耿桂宏, 达道安, 郝维新, 等. 微重力电磁模拟制备高锂含量铝锂合金[J]. *特种铸造及有色合金*, 2003(2): 11-13.
- [30] 陈玉勇, 孔凡涛. TiAl合金熔模精密铸造及精密热成形技术 [C]// 2014中国铸造活动周会议, 2014.
- [31] 赵丽利, 林均品, 张来启, 等. Al和Nb元素对高Nb-TiAl合金高温氧化行为的影响[J]. *材料工程*, 2009(s1): 126-130.
- [32] 刘峰晓, 贺跃辉, 刘咏, 等. 粉末冶金制备TiAl基合金板材的研究现状及趋势[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(2): 169-173.
- [33] 张继. 变形钛铝合金的关键技术和研究进展[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(4): 119-125.
- [34] 陈祥宝, 张宝艳, 李斌太. 低温固化高性能复合材料技术[J]. *材料工程*, 2011(1): 1-6.
- [35] 刘明昌. 碳纤维增强环氧树脂预浸料及其复合材料的制备与性能研究[D]. 华东理工大学, 2012.
- [36] 师昌绪, 仲增墉. 我国高温合金的发展与创新[J]. *金属学报*, 2010, 46(11): 1281-1288.
- [37] 陈德欣. 钨铜电子封装材料的工程化研究[D]. 中南大学, 2005.
- [38] MA Y. Development of high-performance iron-based superconducting wires and tapes [J]. *Physica C Superconductivity & Its Applications*, 2015, 516(3): 17-26.
- [39] 韩增尧, 庞宝君. 空间碎片防护研究最新进展[J]. *航天器环境工程*, 2012, 29(4): 369-378.
- [40] 沈英甲. “烯合金”的发明是合金材料发展史上划时代的革命——访中航工业董事长、党组书记林左鸣[J]. *环球飞行*, 2014(6): 40-41.
- [41] 新型. 电工所高性能石墨烯基超级电容器研究中取得进展[J]. *化工新型材料*, 2014(1): 182-182.
- [42] LIU R, JI C, MOCK J J, et al. Broadband ground-plane cloak. *Science* [J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.