

引用格式: 张国庆, 滕超逸. 航空航天先进结构材料技术现状及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2024, 44(2): 1-12.
ZHANG Guoqing, TENG Chaoyi. Current status and development trend of advanced structural materials technology in aerospace field[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(2): 1-12.

航空航天先进结构材料技术现状及发展趋势

张国庆^{1*}, 滕超逸^{2,3*}

(1. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095; 2. 中国航发北京航空材料研究院 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095; 3. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室, 北京 100095)

摘要: 先进材料技术是航空航天高新装备的发展先导, 是支撑现代工业的关键基础技术, 渗透到国防建设、国民经济和社会生活等方方面面, 已成为世界各国争相发展的技术高地和国防重点。本文梳理分析航空航天先进结构材料近年来的技术现状及发展趋势, 在高性能高分子材料及其复合材料、高温与特种金属结构材料、轻质高强金属及其复合材料、先进结构陶瓷及其复合材料四方面进行重点阐释, 明确我国航空航天结构材料的研发与生产仍面临着跟踪研仿多、自主创新少、技术封锁严重、技术瓶颈亟待突破等困境。同时, 本文对航空航天结构材料未来研究和发展提出展望, 点明建立“产-学-研-用”完整技术体系的重要性。

关键词: 结构材料; 复合材料; 高分子材料; 高温合金; 轻质高强金属; 结构陶瓷

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000050

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2024)02-0001-12

Current status and development trend of advanced structural materials technology in aerospace field

ZHANG Guoqing^{1*}, TENG Chaoyi^{2,3*}

(1. National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China)

Abstract: Advanced materials technology is the forerunner in the development of high-tech aerospace equipment and the key foundational technology supporting the modern industry. It has penetrated into all aspects of national defense construction, national economy and social life, and has become a technological highland and national defense focus that countries all around the world are competing to develop. This article focuses on analyzing the current technological status and development trend of the advanced structural materials in the aerospace field, elaborating on the aspects of high-performance polymer and their composites, high-temperature and special metal structural materials, lightweight high-strength metals and their composites, and advanced structural ceramics and their composites. The analysis results show that the current development and production of aerospace structural materials in China still face various difficulties, such as too much follow-up research and imitation, lack of independent innovation, severe technological blockade, and technical bottlenecks need to be broken. Meanwhile, the prospects for future research and development are proposed, and the significance of establishing the complete technology system of production-learning-research-application is highlighted.

Key words: structural material; composite material; polymer material; superalloy; lightweight high-strength metal; structural ceramic

航空航天结构材料是国民经济发展和国防建设不可或缺的支柱材料,是支撑高端装备和重大工程需求的核心材料,在航空航天、武器装备等战略领域发挥着举足轻重的作用。在国家各类计划的支持下,我国已初步建成航空航天结构材料研发和生产体系,金属、非金属及其复合材料等产品不断优化,部分研究成果达到国际先进水平,材料的性能、可靠性、批次稳定性、经济性等方面都有较大幅度的提升。例如,T300级~T800级的国产碳纤维实现产业化规模生产,有力支撑了重大航空航天装备的研制和批产;研制发展了四代单晶高温合金和粉末高温合金,单晶高温合金的承温能力从第二代单晶的1050℃提高到第四代单晶的1100℃^[1],国产粉末高温合金涡轮盘、挡板等关键部件也用于多个在研在役军民航空发动机^[2];7085铝合金厚大截面材料和Ti-6Al-4V钛合金锻件国产化,解决了大飞机关键材料的若干问题^[3];自主研发的抗氧化C_f/C、SiC_f/SiC高温结构陶瓷及其复合材料有力保障了若干重大装备的研制和生产^[4]。以上典型研究进展有力支撑和促进了我国航空航天装备的快速发展。

本文综述航空航天先进结构材料近年的技术现状及发展趋势,同时明确该领域亟待突破的困境。面对当前航空航天材料技术在轻质高强、耐温耐蚀、低成本、复合化、多功能等方向的新一轮发展机遇,我国亟需打破国外技术封锁和市场垄断,形成体系化自主研制和保障能力,满足航空发动机、重载火箭、国产大飞机等航空航天重大装备对关键结构材料的需求。

1 航空航天先进结构材料战略意义

“一代材料,一代装备”是对航空航天技术发展与其关键材料间相辅相成关系的真实写照^[5]。一方面,国家战略需求加速航空航天新品种材料不断涌现,推动材料性能持续提高、研究方法不断创新、制造技术不断进步;另一方面,航空航天材料领域理论、技术、产业的纵深发展也推动其应用领域的不断拓展,加速下游高端装备的不断进步。因此,航空航天材料的研发,既牵引国家新材料的产业发展,又推动高端装备更新换代,对整个社会的技术进步和经济建设具有显著的辐射带动作用。

高性能高分子材料、高性能纤维与复合材料是高端装备制造、航空航天等领域不可或缺的关键战略材料。目前,我国高性能高分子及其复合材料进

口依赖度较高,部分关键核心技术依赖进口,对相关产业的可持续健康发展造成极大隐患。加强高性能高分子及其复合材料的关键科学和技术问题研究,建立完善的工程验证和产业体系,对于推动国内大循环健康有序发展、提高我国先进制造业的科技水平和国家竞争力具有战略意义。

高温与特种金属结构材料是航空航天发动机、重型燃气轮机、超超临界火电机组、重大科学装置等高端装备中不可或缺的关键材料。目前,我国在高温与特种金属结构材料的基础研究和技术应用方面与国际先进水平仍有差距,存在部分关键材料和特种型材依赖进口、质量稳定性差、技术成熟度低、成本高等问题,亟待发展一批高服役性高温与特种结构材料,突破我国重点型号及高端装备用高温与特种结构材料技术和应用瓶颈,实现创新链、产业链的自主可控和安全高效,为航空航天强国、能源强国建设提供关键材料支撑。

轻质高强金属及其复合材料具有密度低、高强高韧、耐温耐蚀、高导电、高导热、易加工成型、综合应用成本低等显著优势,是航空航天、军事装备、电子信息等众多领域主结构及关键系统所需的关键材料,历来受到各国政府和军方的高度重视。轻质高强金属及其复合材料性能水平和应用状况已成为衡量大飞机、航空发动机、重载火箭、高超声速飞行器等国家重点发展领域先进性的重要指标。在当前新的国际形势下,加速发展我国自主轻质高强金属材料技术体系势在必行。

先进结构陶瓷及其复合材料是高端装备的核心材料和部件,在航空航天、信息技术、先进制造和国防军工等关键领域发挥重要作用。近年来,我国在结构陶瓷与陶瓷基复合材料领域的科技创新能力不断提升,但关键材料仍然“受制于人”,瓶颈技术亟待突破。高性能结构陶瓷材料、无机纤维及其复合材料、超高温陶瓷复合材料、极端环境特殊结构陶瓷及复合材料、新型无机非金属结构材料等高端材料和产品在诸多重大应用与装备领域均受到“卡脖子”制约,供应链安全受国际关系影响巨大。亟需解决关键核心材料与部件配套及产业链整合两大问题,为国家相关领域的高质量发展提供支撑。

2 航空航天结构材料技术现状及发展趋势

在役的航空航天结构材料中,金属结构材料仍

为主导。美国、英国、德国、日本等发达国家在研究、制造、评价、应用等方面占据世界领先地位,通过材料计算和性能预测、数字模拟和应用评价、组织性能与多场耦合环境寿命评估等关键技术的成熟应用,已形成了完善的材料技术体系,拥有庞大系统性数据库。

为满足未来航空航天器轻量化的战略需求,轻质高强复合材料技术发展迅速,其工艺的提升对提高飞行器性能、降低研制生产成本、提高服役可靠性具有极为关键的作用^[6]。图1展示了空客与波音公司重点机型机身各类材料占机体结构总量的变化,复合材料的用量明显大幅度增加^[7]。美国、日本等发达国家在复合材料研发、工程化水平、批产能力、产品竞争力和应用等方面一直引领着世界发展方向,甚至部分高端产品仍居于垄断地位。

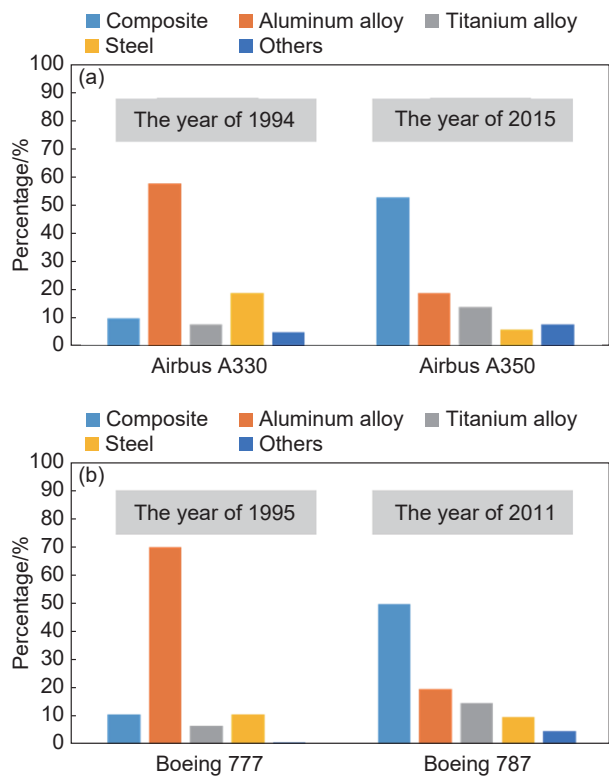


图1 民用飞机重点机型机身各类材料占机体结构总量变化^[7] (a)空客公司;(b)波音公司
Fig. 1 Changes in amount of different types of materials in total base structure in fuselage of key civil aircraft models^[7] (a)Airbus; (b)Boeing

2.1 高性能高分子材料及其复合材料

以航空航天为应用背景的高性能高分子材料及其复合材料通常是高性能纤维增强的树脂基复合材料,其原材料主要包括增强纤维和树脂基体,树脂基体中也常常会添加一些提高复合材料综合

力学性能或赋予复合材料特殊功能的添加剂材料,如增韧剂、阻燃剂、电磁波吸收剂和导热导电填料等。由波音、空客和GE等航空企业引领,树脂基复材已经走过了由次承力结构向主承力结构应用的跨越,军机应用达到结构质量的30%~40%,民机用量达到50%以上,航空发动机用量达15%。相比之下,我国C919用量仅约12%,航空发动机用量也很有限^[8]。

热固性树脂基结构复合材料体系中,高性能环氧树脂基、双马来酰亚胺树脂基和聚酰亚胺树脂基复合材料是其核心三大体系,也是其他高性能结构/功能一体化复合材料的基础。环氧树脂基复合材料在湿热环境下的最高长期使用温度通常为130~150℃,主要应用于亚音速或低超音速飞行器的机身机翼、弹体弹翼结构^[9];双马来酰亚胺树脂基复合材料在湿热环境下的最高长期使用温度为150~180℃,主要应用于超音速飞行器的机身机翼或弹体弹翼结构^[10];聚酰亚胺复合材料长期使用温度大于250℃,甚至达到500℃以上,主要应用于发动机冷端结构、飞机临近发动机结构或高超音速飞行器机身机翼等^[11]。

与热固性树脂基复合材料相比,热塑性树脂基复合材料具有抗冲击性能好、可循环使用、可修补、可焊接、预浸料可无限期室温储存等特点,目前主要应用于各类舱门和机翼前缘等需要抗频繁冲击风险的结构,并逐步推广应用到飞机整流罩、升降舵、平尾、公务机机翼、垂尾等大型结构制件上^[12-13]。目前在航空结构应用的热塑性复合材料主要以聚醚醚酮和聚苯硫醚系列为主,表1列出了

表1 热塑性树脂基复合材料应用机型^[14-15]
Table 1 Application models of thermoplastic resin matrix composite material^[14-15]

Resin matrix	Application models
Polyetheretherketone	A400M
	B787
	F-22
	A330
Polyphenylene sulfide	A330-200
	A340
	A340-500/600, A380
	A400M
	Fokker50
	Gulfstream 650

其主要应用机型^[14-15]。

碳纤维是树脂基复合材料核心原材料之一,是先进碳纤维增强树脂基结构复合材料的基础^[16]。通过长期自主攻关和发展,我国第一代碳纤维已产业化应用,例如航空航天用国产 T300 级碳纤维在“十一五”期间已实现批量稳定供货^[17]; T800 级系列碳纤维的生产技术成熟,直接推动了 M40J 级和 M50J 级碳纤维的技术突破和批量生产,基本形成了第二代碳纤维技术体系,也为第三代碳纤维制备关键技术的突破奠定了基础^[18-20]。国外预浸料和蜂窝等中间材料与纤维同步发展,目前主要由日本 Toray、美国 Hexcel 和美国 Cytec 等公司引领和垄断,占据国际航空航天领域的巨大份额。

2.2 金属结构材料

美国、英国、德国、日本等发达国家在金属结构材料研究、制造、评价、应用等方面占据世界领先地位,已形成了完整的材料体系和完善的选材技术体系,拥有庞大的系统数据库。相比之下,我国金属结构材料产业正处在上升期,迫切需要品种创新和技术进步。

2.2.1 高温合金

我国变形高温合金从引进吸收逐步形成体系化和规模化,目前已基本实现材料的自主可控,图 2 展示了我国航空发动机及燃气轮机盘锻件用变形高温合金的发展趋势^[21]。650 °C 以下使用的 GH4169 合金冶金质量和用量持续提升,成为“一材多用”的典范,支撑了三代航空发动机等装备的批产应用^[22]; 承温 700~750 °C 的 GH4169D、GH4065A、GH4096 等新一代合金研制成功并实现工程化应用,支撑了四代航空发动机以及商用涡扇发动机的研制^[23]; GH4720Li、GH7438 等合金在多种中小型发动机中得到批量应用^[24-25]; 舰用燃气轮机和火箭发动机的研制与应用带动了 GH4698、GH4742、

GH4202 等牌号的发展^[26-28]; 为了满足更高代次发动机的应用需求,近期正在研制承温能力 800 °C 以上的 GH4151、GH4975 等合金,形成服役温度在 600~900 °C 之间较完整的时效强化型变形高温合金体系^[29]。

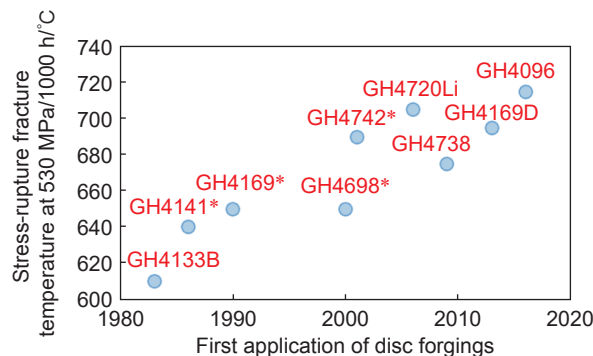


图 2 航空发动机及燃气轮机盘锻件用变形高温合金的发展趋势(*航天兼用)^[21]

Fig. 2 Development trend of deformed superalloys for aviation engines and gas turbine disk forgings (*both for aerospace use)^[21]

随着制造工艺的创新,铸造高温合金由等轴晶、定向铸晶发展到单晶,通过一步步消除晶界使铸造高温合金承温能力逐渐提高^[30]。作为航空发动机叶片的主要材料,铸造高温合金的发展也成就了航空发动机推重比的不断提高,表 2 列出了各代航空发动机涡轮叶片选用材料的发展历程^[31-33]。随着对高温合金性能要求的不断提高,合金的成分设计空间变得越来越小,基于材料计算、高通量实验、机器学习等手段开展合金成分设计成为未来的发展趋势,通过模拟仿真优化工艺参数已经逐渐成为通用的高温合金零部件生产制备方法^[34-36]。

粉末高温合金在军、民用先进航空发动机涡轮盘中得到了广泛应用^[37]。综合来看,镍基粉末高温合金的发展趋势具有“三高一低”的特点:高强

表 2 航空发动机涡轮叶片选用材料的发展历程^[31-33]

Table 2 Development history of materials selection for aero-engine turbine blades^[31-33]

Generation	Performance indicator		Turbine blade	
	Thrust-weight ratio	Turbine front temperature/K	Structure	Material
1	4-6	1300-1500	Solid blade	Directional superalloy
2	7-8	1680-1750	Hollow blade cooled with firm-cooling	1 st single-crystal superalloy, directional superalloy
3	9-10	1850-1980	Hollow blade cooled with composite cooling	2 nd single-crystal superalloy
4	12-15	2100-2200	Cast-cool dual-wall blade	Intermetallic compound, 3 rd single-crystal superalloy

度、高工作温度、高组织稳定性和低疲劳裂纹扩展速率。欧美国家率先研制成功第一代 650 °C 高强度粉末高温合金,如 René95 等^[38];第二代 750 °C 损伤容限型粉末高温合金,如 René88DT 等^[39],以及第三代高强损伤容限型粉末高温合金,如 ME3 等^[40]。第四代粉末高温合金是在第三代的基础上,通过成分调整和工艺优化来获得更高的工作温度,使其具有高强度、高损伤容限和高工作温度的特点,如 ME501 等^[41]。我国目前已研制出以 FGH4095 为代表的第一代、FGH4096 为代表的第二代粉末高温合金,第三代及第四代仍在研制探索中^[42-44]。

近年来,我国高温合金体系以需求牵引为主、技术推动为辅,在研制与应用领域取得显著进展。然而,高温合金涉及学科众多,部件制造要求高,容错空间小,其成熟应用是建立在对研发和制造体系全面深入理解和长期积累的基础之上,因此未来需持续加强。

2.2.2 超高强度钢

超高强度钢是指屈服强度超过 1380 MPa 的高比强度结构钢^[45],在航空航天、国防军工等领域扮演着越来越重要的角色,航天航空领域的主要应用场景有飞机起落架、发动机轴、齿轮轴承、框、梁、火箭发动机壳体等。飞机起落架典型材料主要有 300M 和 Aermet 100 钢,两者均具有 1930 MPa 以上的超高强度。300M 为低合金超高强度钢,广泛应用于客机、大型军用运输机和歼击机起落架;AerMet 100 钢为已成熟应用的强韧性匹配最佳的超高强度钢,因其兼具优良的抗应力腐蚀开裂和疲劳抗力,已应用于 F22、F18E/F 等军机起落架。此外,Fe-Ni 基马氏体时效钢,因在时效过程中析出纳米级金属间化合物而拥有优越的强韧性能,其典型钢种为 18Ni 型 C250 和 C300 钢,多应用于发动机主轴和火箭发动机壳体等部件^[46]。装备性能提升和高承载、低成本、减重设计的要求,将飞机起落架和主轴材料推向 2200 MPa 以上强度水平,GE 和 Leap 发动机主轴采用 2100~2300 MPa 的 GE1014 和 ML340 钢,国内开发出强度级别达到 2400 MPa 的 GC-24 钢。航空轴承齿轮钢代表高强度渗碳不锈钢 CSS-42L,最高使用温度达 430 °C。在研的超强耐热渗碳钢 CH2000 属第四代航空轴承齿轮钢,渗碳及热处理后表层硬度达 65~68HRC,心部抗拉强度在 2000 MPa 以上,使用温度可达 450 °C,适用于新一代航空发动机和直升机高功率密度传动系统的齿轮、轴承和传动轴等传动构件。

超高强度钢的抗应力腐蚀性能也是各国研究

关注的重点。美国 Ques Tek 公司通过材料基因工程研发出新型二次硬化超高强度不锈钢 FerriumS53,该钢兼具良好的断裂韧性,已成功应用于美国空军 A-10 攻击机的起落架部件^[47]。我国自主研发的 10Cr13Co13Mo5Ni3W1VE 超高强度不锈钢,已成功应用在直升机起落架结构件,该钢的强度、韧性均优于 FerriumS53 钢,为现今强度级别最高的超高强度不锈钢,在航空航天装备制造领域具有广泛的应用前景^[48]。

低密度高强度钢是近年来提出的新概念,其成分设计的特点是高 Al 含量,同时添加奥氏体化元素,使其具有良好的塑性,例如最常见的 Fe-Mn-Al-C 四元体系^[49]。为了达到飞行器减重增程的目标并兼顾经济性,我国研发了 DT510 低密度钢,在降低材料密度的同时具有良好的强韧性,与传统超高强度钢 30CrMnSiNi2A 相比,DT510 密度降低 13.4%,屈服强度提高 19.3%。

2.3 轻质高强金属及其复合材料

轻质高强金属及其复合材料总体上处于并跑或跟跑阶段,部分高端产品仍然存在“依赖进口、受制于人”的局面。美国、俄罗斯等国家在轻质高强金属及其复合材料研发、工程化水平、批产能力、产品竞争力和应用领域等方面一直引领着世界发展方向,部分高端产品居于垄断地位。在国家各类计划的支持下,国内轻质高强金属及其复合材料取得了众多的科技成果,部分研究成果达到了国际先进水平,材料的性能、可靠性、批次稳定性、经济性等方面都有较大幅度的提升。

2.3.1 铝合金

航空方面,铝合金主要用于飞机机身、机翼、尾翼的主承力框、梁、壁板、接头及蒙皮等部位,图 3 展示了铝合金在飞机上各部件的应用情况;航天方面,大型运载火箭贮箱、舱段主结构、连接及过渡环等主承力部位采用了大量的先进铝合金。随着计算材料学技术的进步,第一性原理、热力学计算、动力学计算等方法逐渐应用到航空铝合金的成分设计中,并逐渐转向采用机器学习的方法预测组织演变规律、相稳定性及综合性能等。例如,通过计算机辅助模拟计算和实验验证相结合的方式,我国成功研发出 800 MPa 级超高强铝合金^[50]。

依托国家大飞机等项目的支撑,国内在高质量大规格铝合金铸锭成型控制方面取得了很大的进步,相继开展了铸造工艺参数的设计和迭代优化,实现了设备升级换代和关键技术攻关,特别在高纯净化熔体的净化处理与均质低应力铸造成型控制

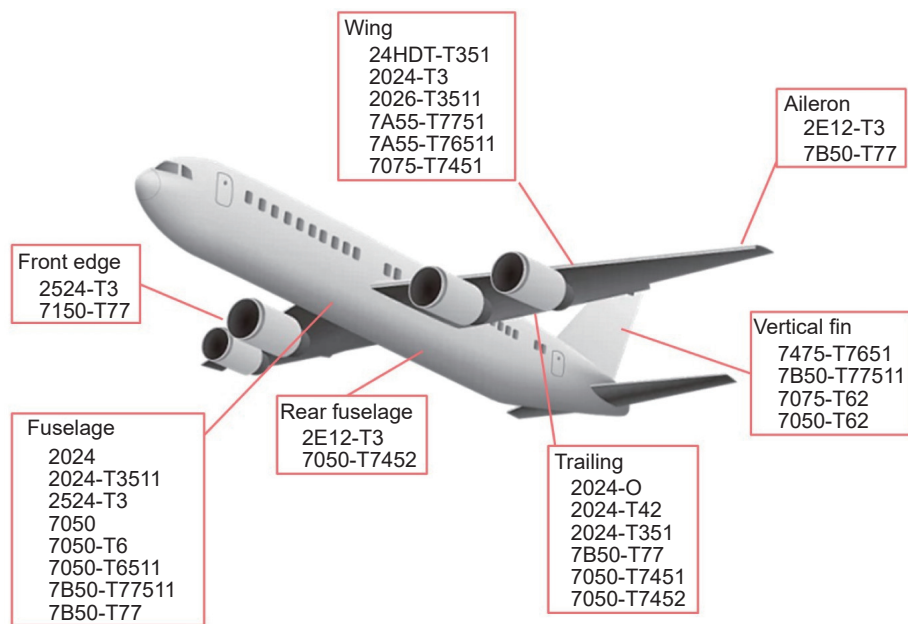


图3 航空主干铝合金在飞机上的应用部位

Fig. 3 Application parts of the backbone aluminum alloys on aircraft

两个方面^[51-53], 开发出分级间歇停顿式起铸方法等新工艺^[54], 为高性能铝合金板材、锻件、型材的制备提供了保障。面对铝合金锻件、厚板淬火内应力的棘手难题, 国内基本突破了铝合金厚大截面厚板/自由锻件残余应力控制技术, 实现超大规格自由锻件均匀变形, 有效消除残余应力^[55-58]。

随着航空航天装备向更快、更高、更远的方向发展, 对铝合金耐热性能及高强高韧综合性能提出了更高的要求, 迫切需要开展第四代航空铝合金的研究工作。此外, 随着航空航天器对低成本、高可靠性的需求日益迫切, 大型构件的整体制造已经成为航空航天制造领域的一个重要方向。时效成形技术已成为欧美等国制造机翼翼面等重要部件的新型制造技术, 例如空客 A380 选用的 7449-T7951 厚板, 即通过时效成形技术实现整体机翼翼板制造, 大幅缩短生产周期^[59]。国内针对超大规格铝合金构件一体化成形技术的研究仍处于起步阶段, 未实现工业化应用, 这是未来先进铝合金发展的一个重要方向。

2.3.2 钛合金

以美国的 Ti-62222S 和 Ti-6Al-4V ELI 为代表的损伤容限钛合金, 已成功应用于其四代战机 F22, 我国的 TC21、TC4-DT 已在航空新型飞机上作为关键承力部件获得应用^[60]。在钛合金领域, 我国已开发出了抗拉强度 $\geq 1500 \text{ MPa}$ 、伸长率 $\geq 5\%$ 、断裂韧性 $\geq 45 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 的超高强钛合金^[61-62], 以及在 1200 MPa 级强度水平下断裂韧性

优于 $80 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 的新型高强钛合金 Ti-5321^[63]。

高温钛合金在 $500 \sim 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间具有优异的热强性和疲劳性能, 是目前先进航空发动机使用的关键材料之一^[64]。阻燃钛合金是高温钛合金中为了预防钛火而研制的一类结构功能一体化材料。美国、俄罗斯、英国、中国相继都开展了阻燃钛合金研究: 美国研制的 Ti-V-Cr 系 Alloy C 合金已在 F119 和 F135 发动机上获得应用; 俄罗斯与我国已研制出 Ti-Cu-Al 系阻燃钛合金, 但由于使用温度偏低尚未获得工程应用; 我国以 Ti-V-Cr 系为基础, 研制的 500°C TB12 合金已经接近工程化应用^[65]。低温钛合金主要用于航天工程中, 我国仿制的低温钛合金主要有 Ti-5Al-2.5Sn、Ti-2Al-1.5Mn、Ti-3Al-2.5V 等, 创新研制的有 CT20^[66]。

2.3.3 金属基复合材料

金属基复合材料由金属基体、增强相和基体/增强相界面三个重要部分组成, 在实际应用中根据合金的特点和复合材料的用途对基体材料进行选择。例如, 航空航天领域的飞机、卫星、火箭等壳体和内部结构要求材料质量轻、比强度和比刚度, 因此多选择镁合金和铝合金等轻合金作为基体^[67-68]; 在同时要求轻质、高强、耐热的条件下, 则选择钛合金和金属间化合物作为基体^[69-70]。

我国在中小尺寸规格铝基复材构件制备、成形、加工方面已经趋于成熟, 但随着新一代航天装备精密构件向大型化、轻量化、产品系列化方向不断发展, 亟须开发大尺寸轻质高模量及超高模量系

列的铝基复合材料。目前,我国采用无压浸渗技术可实现大尺寸铸锭稳定生产,利用等温自由锻技术可实现高模量(≥ 110 GPa)铝基复材塑性成形^[71]。然而现有高模量及超高模量铝基复材仍存在品种单一,综合性能偏低,铸锭的尺寸规格、组织均匀性及制备工艺不稳定,大规格构件塑性成形过程中形性控制难以兼顾等问题^[72]。

非连续纤维/颗粒增强钛基复合材料具有可加工、各向同性和成本低等优点,在战术导弹零部件、火箭发动机零部件和卫星、载人航天器、空间站等航空航天领域具有广阔的应用潜力^[73]。原位自生的TiB晶须(TiB_w)和TiC颗粒(TiC_p)被认为是非连续纤维/颗粒增强钛基复材中最为优异的增强相,在国内外航空航天领域得到了广泛应用^[74]。例如,美国Dynamet公司采用TiC_p/TC4复合材料制造半球形火箭壳、导弹尾翼和飞机发动机零件^[75];我国已研制出了TiB_w/TC4系列薄壁管材和螺丝紧固件、TiB_w/TA15系列气动格栅和空气舵构件^[76-77]。

航空航天器等精密仪器系统对具有可设计性、易于实现结构/功能一体化的金属基复合材料的需求日益迫切,但其产业链在我国尚处于雏形阶段,产品系列化及大型化尚未真正实现^[78-81]。

2.4 先进结构陶瓷及其复合材料

先进结构陶瓷及其复合材料正向着高性能、大尺寸、长寿命、超精密、集成化等方向发展。国外先进结构陶瓷及其复合材料发展较早,因此在原材料处理、组分与性能调控、制备与加工技术等方面均有较大优势。近年,国外结构陶瓷及其复合材料主要向航空航天、集成电路、精密机械、核能等高端应用发展。

赛峰、罗罗、普惠、GE等多家欧美公司均开展了针对SiC_f/SiC的应用研究工作^[82-83]。法国赛峰是最早开展陶瓷基复合材料研究的航空公司之一,最早在M88发动机喷管外调节片设计应用陶瓷基复合材料,并于2015年开展SiC_f/SiC复合材料混气锥飞行验证。罗罗和普惠公司在SiC_f/SiC复合材料方面以少量试车工作为主,尚未达到批产水平。GE公司是迄今为止真正实现SiC_f/SiC复合材料在航空发动机上商业化应用的公司,这与其选择了具有短周期、低成本、产业化适用性好等特点的预浸料-熔渗工艺路线密切相关。国内目前在众多航空发动机的不同部位进行了SiC_f/SiC复合材料构件的考核验证,完成涡轮外环试验件1000次高温燃气抗性实验,通过了导向叶片、火焰筒头部

等构件的考核,验证了SiC_f/SiC构件在发动机上应用的可行性。

其次,在氧化物陶瓷(O_x/O_x)复合材料构件方面,国外已完成在多型号发动机上的应用或验证考核,主要集中在发动机的尾喷部位^[84-86]。GE公司在Passport 20发动机上采用O_x/O_x整流罩、排气混合器及中心锥,减少8%的单位燃油消耗量;在军机F414发动机尾喷管安装O_x/O_x复合材料封严片,改善了发动机尾喷管高温部件的耐久性。罗罗公司针对Trent 1000发动机设计研制了O_x/O_x复合材料排气喷嘴及中心锥,并在波音787客机上成功完成飞行测试,是迄今为止通过验证的尺寸最大的O_x/O_x复合材料构件。美国军方在阿帕奇轻型直升机的排气部件上验证了O_x/O_x复合材料尾喷部件,成本节约45%以上。

近年来,我国在先进结构陶瓷及其复合材料的性能研究与应用验证方面取得重要进展,但在材料体系建设、制备加工技术等方面与发达国家存在较大差距,与重大装备典型应用领域的衔接仍不够畅通,产业本身仍然面临关键原材料不足、制造水平落后、生产成本高等问题。

3 结束语

我国航空航天领域正处在快速发展期,对结构材料的需求将更加旺盛,迫切需要品种创新和技术进步,未来几年材料领域将着力开展“产-学-研-用”创新链和产业链协同创新,以期大幅提升我国航空航天结构材料科技和应用水平。

航空航天结构材料的发展,应以国家重大需求为导向,以解决材料设计与结构调控的重大科学问题、突破结构材料制备与应用技术瓶颈、获取自主知识产权和工程应用为目标,提高先进结构材料领域的原始创新能力,完善关键结构材料设计、制备、制造、应用、评价及全寿命维护的完整技术体系,建立“产-学-研-用”紧密结合的先进结构材料技术,实现航空航天及高端装备领域关键核心材料的创新研制和自主保障。

参考文献:

- [1] 冯强, ROWLAND L J, POLLOCK T M. 先进高温合金单晶材料[C]//中国材料研讨会. 北京: [出版者不详], 2004.
- [2] 张国庆, 张义文, 郑亮, 等. 航空发动机用粉末高温合金及制备技术研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9):

- 1133-1144.
- ZHANG G Q, ZHANG Y W, ZHENG L, et al. Research progress in powder metallurgy superalloys and manufacturing technologies for aero-engine application[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(9): 1133-1144.
- [3] 王运锋, 何蕾, 郭薇. C919 大型客机总装下线助推我国材料产业发展 [J]. *新材料产业*, 2016(1): 25-31.
- [4] 焦健, 孙世杰, 焦春荣, 等. SiC_f/SiC 复合材料涡轮导向叶片研究进展 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(8): 4342-4354.
- JIAO J, SUN S J, JIAO C R, et al. Research progress of SiC_f/SiC turbine guide vanes: a review[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2023, 40(8): 4342-4354.
- [5] 李晓红. 一代材料、一代装备——浅谈航空新材料与飞机、发动机的发展 [J]. *中国军转民*, 2008(10): 4-11.
- [6] 吴全兴. 复合材料在航空航天领域的扩大应用 [J]. *稀有金属快报*, 2002(9): 13-14.
- [7] 李红英, 汪冰峰. 航空航天用先进材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [8] 黄高, 熊正时. 航空航天先进复合材料研究现状及发展趋势 [J]. *中文科技期刊数据库工程技术*, 2023(2): 5-8.
- [9] 祖磊, 陆金虎, 张骞, 等. 高超音速弹用承载/烧蚀一体化复合材料弹翼研究 [J]. *复合材料科学与工程*, 2021(8): 60-65.
- ZU L, LU J H, ZHANG Q, et al. Research on bearing/ablation integrated composite wing of hypersonic speed missile[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(8): 60-65.
- [10] 艾涛, 张海师, 吴锋, 等. 双马来酰亚胺树脂基复合材料研究进展 [J]. *中国胶粘剂*, 2014, 23(5): 50-56.
- AI T, ZHANG H S, WU F, et al. Research progresses of bismaleimide resin-composites[J]. *China Adhesives*, 2014, 23(5): 50-56.
- [11] 包建文, 陈祥宝. 发动机用耐高温聚酰亚胺树脂基复合材料的研究进展 [J]. *航空材料学报*, 2012, 32(6): 1-13.
- BAO J W, CHEN X B. Advance in high temperature polyimide resin matrix composites for aeroengine[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(6): 1-13.
- [12] 郑洁, 杨卫平, 张磊. 热塑性复合材料在航空领域的发展及应用 [C]//第三届中国国际复合材料科技大会. 杭州: [出版者不详], 2017: 239-246.
- [13] VAIDYA U, 李进松, 管佳明. 热塑性复合材料在航空航天中的应用 [J]. *航空制造技术*, 2015(14): 69-71.
- VAIDYA U, LI J S, GUAN J M. Thermoplastic composites for aerospace applications[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(14): 69-71.
- [14] 张辉, 方良超, 陈奇海, 等. 聚醚醚酮在航空航天领域的应用 [J]. *新技术新工艺*, 2018(10): 5-8.
- ZHANG H, FANG L C, CHEN Q H, et al. Application of PEEK in aerospace industry[J]. *New Technology & New Process*, 2018(10): 5-8.
- [15] 曹硕, 黄鑫林, 朱姝, 等. 碳纤维增强聚苯硫醚 (CF/PPS) 航空复合材料的结晶行为及力学性能 [J]. *材料科学与工程学报*, 2019, 37(4): 571-577.
- CAO S, HUANG X L, ZHU S, et al. Crystallization behavior and mechanical properties of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide (CF/PPS) aeronautical composites[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2019, 37(4): 571-577.
- [16] 许丽丹, 王澜. 碳纤维增强树脂基复合材料的应用研究 [J]. *塑料制造*, 2007(1): 81-85.
- XU L D, WANG L. Study of resin matrix composites reinforced by carbon fiber[J]. *Plastics Manufacture*, 2007(1): 81-85.
- [17] 俞波. T300 碳纤维及原丝实现自主生产 [J]. *合成纤维工业*, 2005, 28(1): 8-8.
- [18] 井敏, 谭婷婷, 王成国, 等. 东丽 T800h 与 T800s 碳纤维的微观结构比较 [J]. *材料科学与工艺*, 2015, 23(2): 45-52.
- JING M, TAN T T, WANG C G, et al. Comparison on the micro-structure of Toray T800H and T800S carbon fiber[J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 23(2): 45-52.
- [19] 叶春波. 中国成功研制 M40J 高性能碳纤维 [J]. *石油化工腐蚀与防护*, 2017, 34(4): 27-27.
- [20] 李阳, 蔡长春, 余欢, 等. 国产 M50J 级碳纤维/铝基复合材料的微观特征及拉伸性能研究 [J]. *材料导报*, 2022, 36(21): 126-131.
- LI Y, CAN C C, YU H, et al. Investigation on microstructure and tensile properties of domestic M50J carbon fiber/aluminum matrix composites[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(21): 126-131.
- [21] 杜金辉, 赵光普, 邓群, 等. 中国变形高温合金研制进展 [J]. *航空材料学报*, 2016, 36(3): 27-39.
- DU J H, ZHAO G P, DENG Q, et al. Development of wrought superalloy in China[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016, 36(3): 27-39.
- [22] 杜金辉, 邓群, 曲敬龙, 等. 我国航空发动机用 GH4169 合金现状与发展 [C]//第八届中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [23] 张瑞, 刘鹏, 崔传勇, 等. 国内航空发动机涡轮盘用铸锻难变形高温合金热加工研究现状与展望 [J]. *金属学报*, 2021, 57(10): 1215-1228.
- ZHANG R, LIU P, CUI C Y, et al. Present research situation and prospect of hot working of cast & wrought superalloys for aero-engine turbine disk in China[J]. *Acta*

- Metallurgica Sinica, 2021, 57(10): 1215-1228.
- [24] 曲敬龙, 徐飞, 张麦仓, 等. 燃机用 GH4720Li 合金组织与性能关联性研究 [C]//第十三届中国高温合金年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 52.
- [25] 曲敬龙, 毕中南, 唐超, 等. 航空发动机用优质 GH4738 合金盘锻件研制进展 [C]//第十三届中国高温合金年会摘要文集. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 61.
- [26] 秦鹤勇, 焦兰英, 张北江, 等. GH4698 合金的热处理制度 [J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(2): 39-42.
- QIN H Y, JIAO L Y, ZHANG B J, et al. Heat treatment of superalloy GH4698[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(2): 39-42.
- [27] 王玲, 董建新, 郭磊, 等. 几种高温合金铸锭中偏析和均匀化研究 [C]//第十一届中国高温合金年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 14-18.
- [28] 杨玉军, 王磊, 刘杨, 等. 固溶温度对 gh4202 合金组织及拉伸性能的影响 [J]. 材料与冶金学报, 2017, 16(2): 147-153.
- YANG X J, WANG L, LIU Y, et al. Effect of solution temperature on microstructure and tensile properties of GH4202 superalloy[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2017, 16(2): 147-153.
- [29] 江河, 董建新, 张麦仓, 等. 800 ℃ 以上服役涡轮盘用难变形镍基高温合金研究进展 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(1): 62-73.
- JIANG H, DONG J X, ZHANG M C, et al. Development of typical hard-to-deform nickel-base superalloy for turbine disk served above 800 ℃ [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(1): 62-73.
- [30] 张龙飞, 江亮, 周科朝, 等. 航空发动机用单晶高温合金成分设计研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(3): 630-644.
- ZHANG L F, JIANG L, ZHOU K C, et al. Research progress of compositional design in nickel-based single crystal superalloys for aero-engine applications[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(3): 630-644.
- [31] 刘丽荣, 金涛, 孙晓峰, 等. Al、Ti 和 Ta 含量对镍基单晶高温合金时效组织的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008(7): 1253-1256.
- LIU L R, JIN T, SUN X F, et al. Effect of Al, Ti and Ta contents on the microstructure in Ni-base single crystal superalloy during aging[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008(7): 1253-1256.
- [32] 岳全召, 刘林, 杨文超, 等. 先进镍基单晶高温合金蠕变行为的研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(3): 479-489.
- YUE Q Z, LIU L, YANG W C, et al. Research progress of creep behaviors in advanced Ni-based single crystal superalloys[J]. Materials Reports, 2019, 33(3): 479-489.
- [33] 董志国, 王鸣, 李晓欣, 等. 航空发动机涡轮叶片材料的应用与发展 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(增刊 2): 455-457.
- DONG Z G, WANG M, LI X X, et al. Application and progress of materials for turbine blade of aeroengine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(Suppl 2): 455-457.
- [34] 汪东红, 孙锋, 疏达, 等. 数据驱动镍基铸造高温合金设计及复杂铸件精确成形 [J]. 金属学报, 2022, 58(1): 89-102.
- WANG D H, SUN F, SHU D, et al. Data-driven design of cast nickel-based superalloy and precision forming of complex castings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(1): 89-102.
- [35] 郭钊, 周建新, 沈旭, 等. 改进元胞自动机法数值模拟高温合金凝固过程枝晶生长行为 [J]. 机械工程材料, 2020, 44(2): 65-72.
- GUO Z, ZHOU J X, SHEN X, et al. Numerical simulation of dendritic growth behavior in solidification of superalloy by an improved cellular automaton method[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(2): 65-72.
- [36] 许庆彦, 潘冬, 于靖, 等. 数值模拟技术在航空发动机高温合金单晶叶片制造中的应用 [J]. 航空制造技术, 2011(4): 26-31.
- XU Q Y, PAN D, YU J, et al. Application of numerical simulation technology in superalloy single crystal blade of aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(4): 26-31.
- [37] 曲选辉, 张国庆, 章林, 粉末冶金技术在航空发动机中的应用 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(1): 1-10.
- QU X H, ZHAN G Q, ZHANG L. Applications of powder metallurgy technologies in aero-engines [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(1): 1-10.
- [38] SHAMBLEN C E, ALLEN R E, WALKER F E. Effect of processing and microstructure on René 95[J]. Metallurgical Transactions A, 1975, 6(11): 2073-2082.
- [39] MIAO J, POLLOCK T M, JONES J W. Crystallographic fatigue crack initiation in nickel-based superalloy René 88DT at elevated temperature[J]. Acta Materialia, 2009, 57(20): 5964-5974.
- [40] GAO Y, STÖLKEN J S, KUMAR M, et al. High-cycle fatigue of nickel-base superalloy René 104 (ME3): interaction of microstructurally small cracks with grain boundaries of known character[J]. Acta Materialia, 2007, 55(9): 3155-3167.
- [41] 张义文, 刘建涛, 贾建, 等. 欧美第四代粉末高温合金研

- 究进展[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(1): 1-14.
- ZHANG Y W, LIU J T, JIA J, et al. Recent development of fourth generation powder metallurgy superalloys in America and Europe[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(1): 1-14.
- [42] 邹金文, 汪武祥. 粉末高温合金研究进展与应用[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 244-250
- ZOU J W, WANG W X. Development and application of P/M superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 244-250.
- [43] 吴超杰, 陶宇, 贾建. 第四代粉末高温合金成分选取范围研究[J]. 粉末冶金工业, 2014, 24(1): 20-25.
- WU C J, TAO Y, JIA J. Study on composition variation range of the fourth generation PM superalloys[J]. Powder Metallurgy Industry, 2014, 24(1): 20-25.
- [44] 张义文, 陶宇, 张莹, 等. 粉末冶金高温合金的组织 and 性能研究[C]. //第十一届中国高温合金年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 501-506.
- [45] 万翥如, 许昌淦. 高强度及超高强度钢[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [46] 罗海文, 沈国慧. 超高强度高韧化钢的研究进展和展望[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 494-512.
- LUO H W, SHEN G H. Progress and perspective of ultra-high strength steels having high toughness[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 494-512.
- [47] MILLER J. Technical spotlight: ferrum C64: a 21st century steel takes flight[J]. Advanced Materials Processes, 2021(7): 19-22.
- [48] 白若昕, 刘振宝, 曹建春, 等. 正火温度对 USS122g 超高强度不锈钢组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(11): 73-78.
- BAI R X, LIU Z B, CAN J C, et al. Effect of normalizing temperature on microstructure and properties of USS122G ultra-high strength stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(11): 73-78.
- [49] 林方敏, 邢梅, 唐立志, 等. Fe-Mn-Al-C 系低密度钢及其强韧化机制研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(5): 158-165.
- LIN F M, XING M, TANG L Z, et al. Research progress of Fe-Mn-Al-C low-density steels and their strengthening mechanisms[J]. Materials Reports, 2023, 37(5): 158-165.
- [50] 臧金鑫, 邢清源, 陈军洲, 等. 800 MPa 级超高强度铝合金的时效析出行为[J]. 材料工程, 2021, 49(4): 71-77.
- ZANG J X, XING Q Y, CHEN J Z, et al. Aging precipitation behavior of 800 MPa grade ultra high strength aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(4): 71-77.
- [51] 伊琳娜, 陈高红, 戴圣龙, 等. 一种精炼剂及其与氩气联合在线铸造铝合金精炼净化方法: CN 202210627343.5 [P]. 2022-07-05.
- [52] 何维维, 臧金鑫, 戴圣龙, 等. 一种改善大规格 2000 系铝合金铸锭冶金质量的方法: CN202110428466.1 [P]. 2021-06-18.
- [53] 孙宝德, 崔华清, 赵巍, 等. 一种高均匀细晶铝合金铸锭的生产装置及方法: CN202110974848.4 [P]. 2023-02-28.
- [54] 邢清源, 臧金鑫, 于海军, 等. 7000 系铝合金直冷半连续铸锭的分级间歇停顿式起铸方法: CN202011074314.8 [P]. 2022-11-01.
- [55] 王秋成, 柯映林, 航空高强度铝合金残余应力的抑制与消除[J]. 航空材料学报, 2002, 22(3): 59-62.
- WANG X C, KE Y L. Control and relief of residual stresses in high-strength aluminum alloy parts for aerospace industry [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(3): 59-62.
- [56] 陈树梁, 徐雷, 胡元昊, 等. 铝合金预拉伸板残余应力数值模拟方法研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(2): 292-296.
- CHEN S L, XU L, HU Y H, et al. Study on numerical simulation method of residual stress of aluminum alloy pre-stretching board based on change of material parameters[J]. Computer Simulation, 2023, 40(2): 292-296.
- [57] 范宁, 熊柏青, 李志辉, 等. 预拉伸变形量对 7055 铝合金厚板表面残余应力的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(2): 301-307.
- FAN N, XIONG B Q, LI Z H, et al. Influence of pre-stretched ratio on surface residual stress of 7055 aluminum alloy thick plate[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2020, 30(2): 301-307.
- [58] 翟瑞志, 尹慧, 滕树满. 大型 7050 铝合金自由锻件淬火残余应力消减研究[J]. 大型铸锻件, 2022(4): 56-58.
- ZHAI R Z, YIN H, TENG M S. Study on quenching residual stress reduction of large free forgings of aluminum alloy 7050[J]. Heavy Casting and Forging, 2022(4): 56-58.
- [59] 曾元松, 黄遐. 大型整体壁板成形技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 721-727.
- ZENG Y S, HUANG X. Forming technologies of large integral panel[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 721-727.
- [60] 陈联国, 王文盛, 朱知寿, 等. 大规格损伤容限钛合金 TC4-DT 的研制及应用[J]. 航空学报, 2020(6): 374-382.
- CHEN L G, WANG W S, ZHU Z S, et al. Development and application of large-scale damage tolerance titanium alloy TC4-DT[J]. Acta Aeronautica et Astronautica

- Sinica, 2020(6): 374-382.
- [61] 辛社伟, 周伟, 李倩, 等. 一种 1500MPa 级超高强, 中韧钛合金: CN201910348823.6 [P]. 2019-07-07.
- [62] 商国强, 朱知寿, 常辉, 等. 超高强度钛合金研究进展 [J]. 稀有金属快报, 2011, 35(2): 286-291.
- SHANG G Q, ZHU Z S, CHANG H, et al. Development of ultra-high strength titanium alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35(2): 286-291.
- [63] 赵永庆, 马朝利, 常辉, 等. 1200 MPa 级新型高强韧钛合金 [J]. 中国材料进展, 2016(12): 914-918.
- ZHAN Y Q, MA C L, CHANG H, et al. New high strength and high toughness titanium alloy with 1200 MPa [J]. Materials China, 2016(12): 914-918.
- [64] 蔡建明, 李臻熙, 马济民, 等. 航空发动机用 600℃ 高温钛合金的研究与发展 [J]. 材料导报, 2005, 19(1): 50-53.
- CAI J M, LI Z X, MA J M, et al. Research and development of 600 °C high temperature titanium alloys for aero-engine [J]. Materials Review, 2005, 19(1): 50-53.
- [65] 弭光宝, 黄旭, 曹京霞, 等. 航空发动机钛火试验技术研究新进展 [J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 20-26.
- MI G B, HUANG X, CAO J X, et al. Experimental technique of titanium fire in aero-engine [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 20-26.
- [66] 朱乐乐, 贾祥亚, 周洪强. 航空航天用低温钛合金研究现状 [C]. //第十六届全国钛及钛合金学术交流会论文集. 西安: [出版者不详], 2016: 854-858.
- [67] 李荣华, 黄继华, 殷声. 镁基复合材料研究现状与展望 [J]. 材料导报, 2002, 16(8): 17-19.
- LI R H, HUANG J H, YIN S. Research and development of magnesium matrix composites [J]. Materials Review, 2002, 16(8): 17-19.
- [68] 侯丽丽, 尹志新, 樊新波. 铝基复合材料的研究现状及发展 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(10): 84-88.
- HOU L L, YIN Z X, FAN X B. Study status and progress of aluminum matrix composite [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(10): 84-88.
- [69] 赵永庆, 奚正平, 曲恒磊. 我国航空用钛合金材料研究现状 [J]. 航空材料学报, 2003(增刊1): 215-219.
- ZHAO Y Q, XI Z P, QU H L. Current situation of titanium alloy materials used for national aviation [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003(Suppl 1): 215-219.
- [70] 张玉军, 尹衍升. 金属间化合物陶瓷复合材料研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2000, 23(1): 8-11.
- ZHANG Y J, YIN Y S. Development of intermetallics ceramics composites [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2000, 23(1): 8-11.
- [71] 崔岩, 陈续东. 低膨胀、超高模量铝基复合材料及其无压浸渗制备加工技术 [C]//中国科协第五届青年学术年会文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 33-36.
- [72] 马宗义, 肖伯律, 张峻凡, 等. 航天装备牵引下的铝基复合材料研究进展与展望 [J]. 金属学报, 2023, 59(4): 457-466.
- MA Z Y, XIAO B L, ZHANG J F, et al. Overview of research and development for aluminum matrix composites driven by aerospace equipment demand [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(4): 457-466.
- [73] 苗润, 刘兵亮, 任思雨, 等. 颗粒增强钛基复合材料制备方法 with 组织性能研究进展 [J]. 精密成形工程, 2021, 13(3): 25-39.
- MIAO R, LIU B L, REN S Y, et al. Research progress on preparation methods, microstructure and properties of particle reinforced titanium matrix composites [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(3): 25-39.
- [74] 倪丁瑞, 耿林, 郑镇洙. 原位混杂增强钛基复合材料的制备与组织分析 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(2): 107-111.
- NI D R, GENG L, ZHENG Z Z. Microstructure and fabrication of hybrid *in situ* titanium matrix composites [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(2): 107-111.
- [75] 黄陆军, 段天博, 耿林, 等. 网状结构钛基复合材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- HUANG L J, DUAN T B, GENG L, et al. Titanium matrix composites with network microstructure [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [76] 黄陆军, 张煜梓, 董芸松, 等. 增强体含量对网状结构 TiBw/TC4 复合材料组织与拉伸性能的影响 [C]//第 5 届海内外中华青年材料科学技术研讨会暨第 13 届全国青年材料科学技术研讨会论文集. 西安: [出版者不详], 2011: 982-989.
- [77] JIAO X, CHEN W, YANG J, et al. Microstructure evolution and high-temperature tensile behavior of the powder extruded 2.5 vol% TiB_w/TA15 composites [J]. Materials Science and Engineering, 2019, 745: 353-359.
- [78] 韩桂泉, 周品. 结构/功能一体化铝基复合材料的应用 [J]. 航天制造技术, 2005(2): 1-4.
- [79] 朱海红, 廖海龙. 高强铝合金的激光选区熔化成形研究现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 16-22.
- ZHU H H, LIAO H L. Research status of selective laser melting of high strength aluminum alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 16-22.
- [80] 单忠德, 宋文哲, 范聪泽, 等. 面向 2035 年复合材料构件精确制造发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 113-120.
- SHAN Z D, SONG W Z, FAN C Z, et al. Development

- strategy for precision manufacturing of composite components facing 2035[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(1): 113-120.
- [81] 盛磊. 空间光学遥感器发展对新材料的需求[J]. 新材料产业, 2011(10): 44-47.
- [82] KISER J D, BANSAL N P, URSIC J, et al. Oxide/oxide ceramic matrix composite (CMC) exhaust mixer development in the nasa environmentally responsible aviation (ERA) project [C]//ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. New York: ASME, 2015.
- [83] 杜昆, 陈麒好, 孟宪龙, 等. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件应用及热分析研究进展[J]. 推进技术, 2022(2): 107-125.
- DU K, CHEN Q H, MENG X L, et al. Advancement in application and thermal analysis of ceramic matrix composites in aeroengine hot components[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022(2): 107-125.
- [84] 杨瑞, 齐哲, 杨金华, 等. 氧化物/氧化物陶瓷基复合材料及其制备工艺研究进展[J]. *材料工程*, 2018, 46(12): 1-9.
- YANG R, QI Z, YANG J H, et al. Research progress in oxide/oxide ceramic matrix composites and processing technologies[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(12): 1-9.
- [85] WATANABE F, NAKAMURA T, MIZOKAMI Y. Design and testing for ceramic matrix composite turbine vane[C]//ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exposition. New York: ASME, 2017.
- [86] 杨金华, 董禹飞, 杨瑞, 等. 航空发动机用陶瓷基复合材料研究进展[J]. 航空动力, 2021(5): 56-59.
- YANG J H, DONG Y F, YANG R, et al. Progress of ceramic matrix composites for aero engine[J]. *Aerospace Power*, 2021(5): 56-59.

收稿日期: 2024-01-01; 修订日期: 2024-02-15

通讯作者: 张国庆(1962—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为金属结构材料及其制备加工技术, 联系地址: 北京市海淀区温泉镇环山村 8 号(100095), E-mail: g.zhang@126.com; 滕超逸(1991—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为金属结构材料及其表征评价技术, 联系地址: 北京市海淀区温泉镇环山村 8 号(100095), E-mail: tengcy621@126.com

(责任编辑: 徐永祥)