

航空发动机材料及工艺发展浅析

Analysis to Development of Aero Engine Materials and Processes

■ 刘巧沐 / 中国航发涡轮院 李园春 / 中国航发

航空发动机对材料、工艺有着极其严苛的要求。材料、工艺在某种程度上决定了发动机的性能和特性。发动机推重比的提高将更加依赖轻质、高强韧、耐高温的战略型、革命性先进材料及工艺。

航空发动机是人类有史以来最复杂、最精密的工业产品之一，集成了空气动力学、结构强度、材料、工艺等相关专业的最高成就。经过几代人的努力，我国已具备自主研发先进军用航空发动机的能力^[1]。为进一步提高发动机推重比以满足作战平台的需求，必须大量采用轻质、高强韧、耐高温的先进材料、工艺和结构布局^[1-3]。

新材料和工艺需求对体系发展带来挑战与机遇

随着先进航空发动机性能参数的提升，对新型高强钛合金/钛铝(TiAl)系合金/变形高温合金及其复合材料、新型镍基/镍铝(Ni₃Al)系单晶合金和粉末合金、铌-硅(Nb-Si)系合金、高熵合金、碳化硅陶瓷基复合材料(CMC-SiC)、树脂基复合材料(PMC)等新型结构材料的需求愈发迫切，也对我国材料及工艺体系提出了更高要求。

新型高强韧钛合金/钛铝系合金/变形高温合金及复合材料

钛合金、钛铝(TiAl)系合金伴随着发动机轻质化需求而不断发展。钛合金目前的最高使用温度为600~650℃，TiAl系合金的使用温度范围为650~950℃^[4]，但其突出的

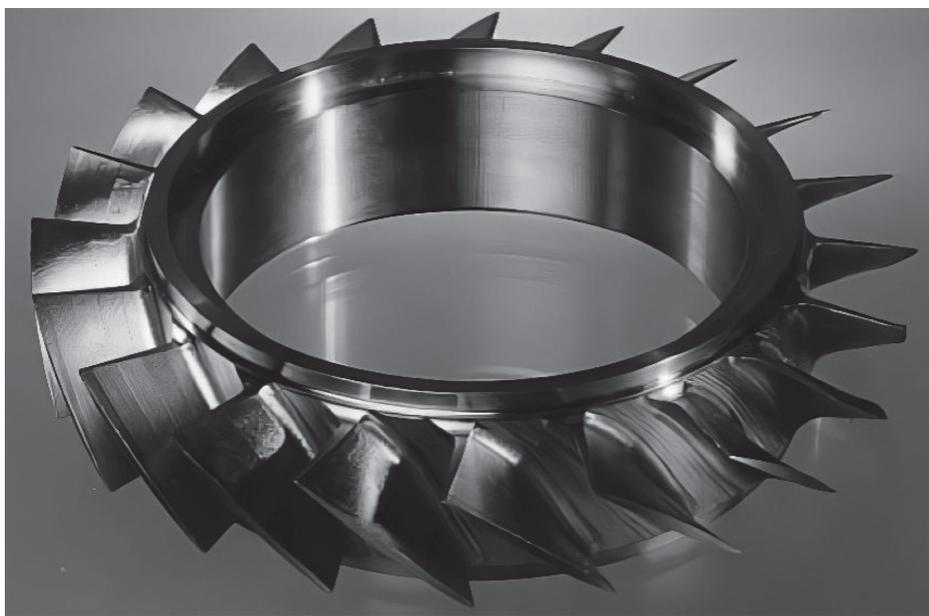


图1 罗罗公司研制的Ti-MMC整体叶环^[5]

室温脆性、缺口敏感等问题，使其只能部分替代高温合金或单晶合金。另外，随着发动机各截面工作温度的提高，还需发展更耐温、更高强韧的新型变形高温合金。

我国自20世纪80年代开始自主研发高温钛合金，目前已掌握了合金成分、组织、性能匹配控制及优化等关键技术，研制及应用水平基本实现了与国际先进水平同步，但仍需要进一步提高组织性能均匀性，挖掘合金潜力。针对TiAl系合金，重点突破了材料设计、制备工艺、组织优化与控制、塑韧性提高等关

键技术，研发出多个代表性合金，但还需要深化研究高强韧性组织匹配、低塑韧性材料应用设计等技术，拓展其应用。随着合金设计方法的进步、铸-锻设备及工艺的发展，多种新型变形高温合金成功获得应用，但随着合金化程度的提高，合金熔铸与热加工工艺难度大增，需突破大尺寸锭重熔精炼、均匀变形等技术瓶颈，实现组织性能均匀稳定，实现性能、效率与成本的综合平衡，加速研发和应用，为未来更高性能变形高温合金的自主研发奠定基础。

目前，冷端转子采用整体叶盘

结构的应用已趋设计极限，而整体叶环集先进结构、材料于一体，综合性能优异且可实现轻量化，是下一代发动机轻质化转子的标志性选择。SiC纤维增强钛基（Ti-MMC）、TiAl基（TiAl-MMC）和镍基复合材料（Ni-MMC）应用趋势急速上升，MTU公司与罗罗公司等已造出Ti-MMC整体叶环（如图1所示）、涡轮轴等试验件，并进行了考核，轻质效果显著^[5]。据预测，未来发动机用材中Ti-MMC约占30%，TiAl-MMC约占15%。

我国自20世纪90年代开始Ti-MMC及其构件研制，迄今先后突破了高性能单丝SiC纤维批产、高品质先驱丝制备、构件成形等关键技术，打通了Ti-MMC整体叶环一体化制造技术路线，但还需强化增强环芯形性控制、残余应力调控等技术研究，充分发挥Ti-MMC的优势。

新型单晶合金与粉末合金

随着涡轮前温度的提高，涡轮叶片材料从变形、铸造高温合金发展到定向、单晶高温合金，涡轮盘材料由合金钢、变形高温合金发展为粉末高温合金。过去五六十年间，涡轮前温度提高了约600K，材料与铸造工艺贡献了30%~40%。自普惠公司发明世界上第一个单晶合金PW1480至今，业界成功开发了多代镍基、镍铝（Ni₃Al）系单晶合金。中国是世界上较早研究单晶合金的国家之一，至今多个牌号已逐步获得应用^[6]。但随着发动机发展，现用单晶合金受耐温能力及铸造工艺性限制，应用已趋于极限，急需发展初熔温度更高、组织性能更优、铸造及焊接工艺性良好、成本可接受的新型单晶合金。

20世纪60年代初，美国率先研制粉末高温合金并在涡轮盘上成功应用以来，粉末合金涡轮盘已在多型发动机上累计安全工作数千万小时，粉末合金已成为先进航空发动机涡轮盘的首选材料。业界已开发出服役温度更高、综合性能更优的高代次粉末合金，并根据涡轮盘不同部位对性能的侧重，发展出双性能/双合金、双辐板涡轮盘。我国已成功研制出第一代、第二代粉末合金，目前正在开发第三代、第四代粉末合金，但随着发动机发展，还需在高品质粉末、双性能/双合金/双辐板涡轮盘制备及低成本工艺等方面深入开展研究。

碳化硅陶瓷基复合材料

CMC-SiC兼具金属材料、陶瓷材料和碳材料的优点，具有材料结构一体化和多尺度特征，综合性能优异，是目前应用最成功的轻质高温结构复合材料^[7-9]，可用于发动机燃烧、涡轮和喷管等热端部件（如图2所示），

被普遍视为发动机高温结构材料的技术制高点。从20世纪90年代至今，欧美以第三代和第四代航空发动机为演示验证平台，逐步暴露材料、工艺和制造问题，建立对CMC-SiC构件的应用信心及极限寿命的认知，逐渐将CMC-SiC应用于先进发动机。喷管调节片/密封片、燃烧室火焰筒及内/外环等已完成全生命周期验证并进入应用或批产阶段，涡轮叶片等尚处于验证阶段^[9]。

迄今，我国CMC-SiC构件的研制与应用可分为3个阶段。前两个阶段，初步验证了可行性和可用性，形成了一定的技术储备；现阶段主要针对发动机多类构件需求进行典型件研制与应用研究。总体而言，国内基本突破了SiC纤维及其复合材料制备技术，初步完成了典型件设计、制备与考核，但针对不同部位CMC-SiC构件的制备技术路径尚无定论，还需打破现有按原金属结构设计和试制的模式，从全技术链路

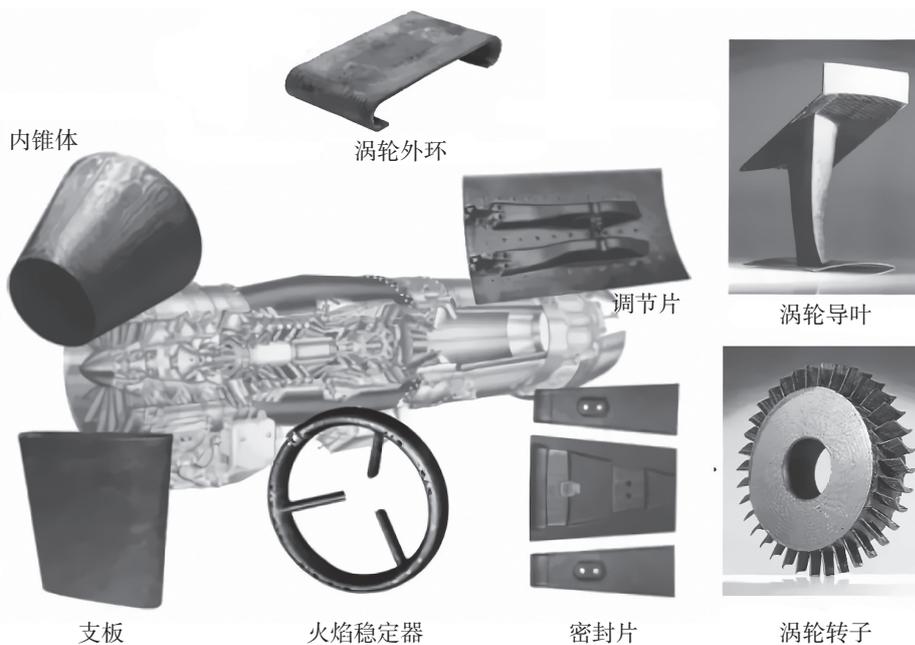


图2 CMC-SiC在航空发动机中的应用^[8-9]

表1 涡扇发动机典型材料和工艺

代别	第二代	第三代	第四代	未来先进发动机
主要结构特征及材料和工艺	压气机 结构：盘片分离 材料：铝合金、不锈钢 工艺：模锻	结构：盘片分离 材料：钛合金、高温合金 工艺：模锻、电子束焊接	结构：整体叶盘 材料：高温钛合金、阻燃钛合金、粉末合金 工艺：等温模锻、摩擦焊	结构：整体叶环、整体转子 材料：TiAl系合金、新型高温合金 工艺：特种加工、扩散焊/摩擦焊
	燃烧室 结构：单管燃烧室 材料：镍基高温合金 工艺：钣金+氩弧焊	结构：短环燃烧室 材料：镍基和钴基高温合金 工艺：环轧件+电子束焊	结构：高温升短环浮壁燃烧室 材料：钴基和氧化物弥散强化高温合金 工艺：多斜孔电火花加工	结构：CMC全环火焰筒 材料：CMC-SiC 工艺：一体化成形、超快激光制孔
	涡轮 结构：实心叶片 材料：高温合金 工艺：模锻或等轴晶精铸	结构：简单空心叶片 材料：第一代单晶和粉末合金 工艺：模锻、定向无余量精铸	结构：复合冷却空心叶片 材料：第二代单晶和粉末合金 工艺：热等静压+热挤压+等温模锻	结构：超冷叶片、CMC多联导叶、双辐板涡轮盘 材料：高代次单晶、CMC-SiC、高代次粉末合金 工艺：整体成形、超快激光制孔、真空等温锻

建立面向材料、工艺和制造的协同设计方法，突破结构、强度、冷却、连接设计，以及低成本构件成形与加工、全生命周期检测、评估与验证等关键技术。

树脂基复合材料

树脂基复合材料（PMC）密度低，比强度和比模量高，可设计性强，用于发动机进气机匣、外涵道机匣、风扇叶片/机匣等冷端部件可减质20%~40%，是发动机冷端部件先进性的重要实现手段。国际领先公司目前已将PMC广泛用于发动机冷端和外部部件，并大规模实现了第一代和第二代碳纤维增强PMC的应用，尤其是PMC外涵机匣大多已进入工程生产阶段，技术成熟度达到9级。目前，正在开展耐温400℃及以上材料研究。

我国已开展了大量PMC构件的验证工作，技术成熟度高于CMC-SiC构件，但较领先水平仍存在差距，需突破耐温或/和耐湿型PMC开发、高温模具、构件设计与制造一体化、大型复杂构件成形、缺陷检测与评估等关键技术，还需提高国产化关

键生产装备工艺能力及配套软件技术，解决成本过高等问题。

航空发动机材料及工艺体系存在的问题与不足

航空发动机材料工艺体系是一个以材料、工艺技术为核心，遵循技术发展规律，围绕技术发展和产品应用，按照基础研究、应用研究、工程应用等展开，由基础、制备、应用、分析、保障等技术要素构成的系统有机整体。从航空发动机材料体系的历史沿革来看，主体材料已由第一代发动机的钢，发展到第三代发动机的钛、高温合金和复合材料，辅以各种新工艺、新结构又演进出第四代发动机的主体材料、工艺（见表1）。世界领先的航空发动机公司持续推出了各具特色的品牌材料或工艺，并建立了各自的发动机材料及工艺体系。

我国航空工业自20世纪50年代建立以来，便开始引进苏联航空产品，70年代又开始引进英、法、美等国航空产品，共生产了60余种型号、数万架飞机和30余种型号、数

万台发动机，发动机材料、工艺技术历经引进、仿制、研仿到自主研制的发展历程。迄今，我国基本建立起完备的材料工艺体系，建成多个发动机材料、工艺研制与生产基地，也成为具有完整高温合金体系的四个国家之一。然而，大量的引进和仿制导致我国同代次、同水平发动机材料多国牌号并存，使有限的支持碎片化，限制了材料的研制和发展，制约了选材的标准化、通用化、继承性及经济性。

我国虽已能生产航空发动机用全部门类材料，但要实现未来先进航空发动机研制的自主保障，还需对我国航空发动机材料、工艺现状进行梳理、分析和归纳，为应对新材料、新工艺需求提出的挑战，还需解决以下几个方面的问题和不足：未完全建立起科学统筹的基础预研科技管理体系；未完全构建起我国特色的航空发动机主干材料体系；未真正实现设计与材料、制造的协同；无统一的性能数据库，缺乏高可靠统计许用值；无统一、适用、通用的标准体系；不注重全供应链

管理,产品稳定性、可靠性差;缺乏新材料、新工艺技术快速迭代机制;未明显突破返回料利用,全流程成本偏高。

关于材料及工艺发展的思考与建议

针对上述材料及工艺发展中存在的问题与不足,从理念、布局、机制和标准体系的角度提出如下思考和建议。

建立面向材料—制造一体化设计的“新理念”

构建设计、材料、制造协同融合的研发流程,发展面向材料、制造的设计。充分利用预研形成的先进集成平台,将其提升改造为新材料、新工艺专用验证平台,解决验证资源问题。加强材料的“积木式”验证和递进式评价^[9],结合高精度与高置信度仿真技术^[11],面向全生命周期开展迭代与改进。

开展统筹全技术体系的“新布局”

系统梳理发动机材料、工艺技术树,建立完整的技术体系,贯彻技术与产品开发异步、规划互锁的理念,科学全面、统筹精准制订中长期发展专项规划,制定技术地图,集中投入,梯次发展,有序衔接。对标国际领先水平,梳理形成“卡脖子”技术清单,精准识别和瞄准当前技术短板、堵点和痛点,突破一批长期未有效解决的关键核心技术。

构建举国协同、融合创新的科技管理“新机制”

面向发展重大需求,通过部委协同,加强政策供给的继承性、联动性、集成性;发挥行业主体作用,强化需求牵引,加强产学研用协同和军民深度融合。兼顾不同利益诉

求,形成各主体、各环节高效协同、深度融合的创新体系和利益共同体。由小团队研发向产学研用多学科交叉团队转变,强化从规划论证、项目生成、攻关研究、考核评价、成果应用的“一条龙”高效项目模式,促进成果集成开发和转化应用,打通管理链路和创新链路。变革科技管理思想,既要“放”“管”“服”,也要“精”“细”“控”,建立切实有效的知识产权特别是国防知识产权的转移、转让、交易机制,创新科技激励机制,合理解决从研发到产业发展各环节的投入、贡献和利益分配问题,充分调动各方积极性。

完善性能数据与标准的“新体系”

开展材料、工艺性能数据设计许用值统一管理,从全技术链、全产业链角度严控生产过程和质量细节,确保性能数据真实、可靠,尽快打造完成中国版标准化数据手册。以研发流程为牵引,从使用者角度,统一标准架构,丰富技术要素,整合、建立、完善全行业标准体系。构建行业统一的考核评价和数据管理平台。

结束语

轻质、高强韧、耐高温的战略型、革命性先进材料及工艺是未来先进航空发动机的标志性选择。应进一步聚焦基础瓶颈、聚焦工程应用、聚焦资源投入、聚焦双链完整,强化需求牵引、强化行业抓总、强化体系布局、强化协同融合、强化集中投入,走出中国特色的发动机材料及工艺自主、自立、自强之路。

航空动力

(刘巧沐,中国航发涡轮院,研究员,主要从事航空发动机材料、工艺应用研究)

参考文献

- [1] 刘大响.高性能航空发动机的发展对材料技术的要求[J].燃气涡轮试验与研究,1998,11(3):1-5.
- [2] 江义军.推重比12~15发动机技术途径分析[J].航空动力学报,2001,16(2):103-107.
- [3] 刘大响.一代新材料,一代新型发动机:航空发动机的发展趋势及其对材料的需求[J].材料工程,2017,45(10):1-5.
- [4] Chen G, Peng Y B, Zheng G, et al. Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications[J]. Nature materials, 15(8):876-881.
- [5] Hooker J A, Doorbar P J. Metal matrix composites for aeroengines[J]. Materials science and technology, 2000, 16(8): 725-731.
- [6] 官声凯,尚勇,张继,等.我国典型金属间化合物基高温结构材料的研究进展与应用[J].金属学报,2019,55(9):1067-1076.
- [7] 张立同,成来飞.连续纤维增韧陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J].复合材料学报,2007,24(2):1-6.
- [8] 刘巧沐,黄顺洲,何爱杰.碳化硅陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用及挑战[J].材料工程,2019,47(2):1-10.
- [9] Katoh Y, Snead L L, Henager Jr C H, et al. Current status and recent research achievements in SiC/SiC composites[J]. Journal of nuclear materials, 2014, 455(3): 387-397.
- [10] 李兴无.航空发动机关键材料服役性能“积木式”评价技术浅析[J].航空动力,2020(4):31-34.
- [11] 曹建国.航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J].推进技术,2018,39(5):961-970.