




聚焦陶瓷基复材结构研发 推进工程应用

——访中航工业复合材料技术中心技术
发展部副部长焦健

Focusing CMC Structure Development for CMC
Engineering Application


本刊记者 良辰

: 陶瓷基复合材料因其优异的综合性能具有重要的应用潜力,请介绍一下您所在团队在陶瓷基复合材料领域开展了哪些方面的科研工作。

焦健:目前,航空发动机已成为限制我国航空发展的瓶颈。国外经验证实,提高材料的耐高温能力是提升发动机性能最根本的解决途径,也是未来发动机材料发展的必然趋势。陶瓷基复合材料通常指以陶瓷为基体与纤维复合的一类材料,这类材料具有密度低、耐高温、耐磨损等特点。常见的陶瓷基复合材料体系包括纤维增强碳化硅材料和氧化物增强氧化铝材料等,特别是 SiC_f/SiC 复合材料。与陶瓷材料相比,该材料具有较高的韧性,而且与 C_f/SiC 复合材料相比,具有很好的抗氧化性好,已成为国外航空发动机材料先进性的标志。中航工业复合材料技术中心的陶瓷基复合材料专业主要面对国家对陶瓷基复合材料的需求,以陶瓷基复合材料结构件制造工艺为研

究核心,以材料高温性能、功能化设计、工况下材料失效分析为研究基础,以开发新型制备工艺、复杂结构成型、涂层制备工艺等为研究特色,开展航空领域热结构件的预先研究和工程化研究。

目前,本团队的科研工作主要包括结构陶瓷基复合材料和功能陶瓷基复合材料两个方向。在结构陶瓷基复合材料方面,团队以发动机高温结构制造技术研究为主,通过多年研究积累了 SiC_f/SiC 复合材料中温、中载件制造经验,并完成了国内首次 SiC_f/SiC 复合材料中温、中载件的试车工作,该成果正逐渐推广到工作温度更高的结构件中;在功能陶瓷基复合材料方面,主要开展陶瓷基复合材料结构功能一体化方面的研究,具有特殊功能的 SiC_f/SiC 复合材料、涂层技术和氧化物增强氧化铝材料是该方向的研究重点。


: 您所在团队一直致力于陶瓷基复合材料工程化应用,您认为应该如何平衡好基础研究与应用研究

的关系?

焦健:航空产品研制是一个复杂的系统工程,涉及多学科的科学、技术及现代化工程方法等一系列问题。其中,材料科学是装备研制的基础,而装备研制牵引材料科学发展,两者之间相互制约、相互促进。如前所述,陶瓷基复合材料因具有密度低、耐高温、耐磨损等优异特性已成为航空装备高温结构的首选材料,航空装备特殊工况需求也为陶瓷基复合材料研究指明了方向。航空产品要实现真正的应用涉及到设计、研制、生产、考核、维修等多个环节,以及原材料、制造、组装等上下游多个相关的产业。因此,无论是从我国现有体制特点角度还是航空产品研制难度角度来说,一个团队、一个企业都很难独立完成产业链中的所有环节,多单位、多团队团结协作、联合攻关才能完成国家重大型号任务,也有利于形成良性竞争。认清自身能力、利用自身资源、发挥自身特长、融入产品的全产业链是一个团队成功的

前提。我们团队作为中航工业内部唯一从事陶瓷基复合材料研究的团队,将研究重点聚焦在陶瓷基复合材料结构的研发方面。

谈到我们团队的定位及与国内其他团队的关系,主要从两个维度来考虑:一是技术成熟度维度上,本团队研究重点是陶瓷基复合材料结构件的工程化技术,也就是将结构件的成熟度由实验室研究阶段推广到小批量生产阶段,这需要紧密联系相关大学、研究所,突破推广过程中所涉及的成形、加工、检测等制造技术,研发相关设备、编撰规程、规范;二是产业链维度上,陶瓷基复合材料结构的产业链包括原材料(SiC纤维、聚碳硅烷等)制造、结构设计、结构件制造、验证、维修等,我们团队工作集中在结构件制造方面,依据结构设计单位对结构件提出具体要求,我们提出制造方案、优化工艺参数,并对原材料提出明确的要求,制造完成后通过考核结果反馈,进行下一轮的工艺改进。


: 我国陶瓷基复合材料工程应用,还有哪些方面的工作需要进一步提升?

焦健: 陶瓷基复合材料属于新型材料,国外仅在部分军用发动机上实现了真正的应用,而在商用发动机上的应用仍处于测试阶段,尚未形成标准,因此,陶瓷基复合材料的工程应用可借鉴的国外经验也不多。前些年,我国陶瓷基复合材料的研究主要集中在原材料(SiC纤维)突破和制备工艺研究两方面,特别是国防科技大学和西北工业大学在这些方面做出了突出的贡献,而且也是整个行业的先行者。随着关键技术的不断突破和技术成熟度的不断提高,该领域的研究重心已经逐步拓展到了工程化研究阶段。这个阶段的研究重点是促进制造工艺的进一步成熟,完成在发动机上的考核,通过多次的设计-制造-考核迭代,确定各环节的

工艺规程、固化生产设备以及完成人员培训。

在陶瓷基复合材料工程化阶段,还存在一些问题:技术层面上,国产SiC纤维稳定性不高、陶瓷基复合材料结构设计能力偏弱、现有工艺制造周期过长、长寿命考核经验不足等问题,是限制我国该领域进一步发展的技术难题,需要各研发团队共同协作突破各环节的关键技术;质量体系层面上,从原材料到结构件考核,整个流程研制周期长、涉及质量控制点多,要实现对产品的质量控制,制造过程需要工艺规程来保障,检验过程需要统一的检测方法,因此,工程化过程中最重要的一项研究内容就是建立相关质量文件,这需要工程化研究团队牵头,产业链上、下游多团队共同协作,促进产品技术成熟度的提高。


最后值得一提,也是容易忽略的问题,就是设备研制问题,国外工艺研究与设备研制通常是密切相关的,工艺改进大多通过设备改进来实现,而我国对该方面研究的重视程度不够,关键设备的国产化、自动化进程需进一步推进。

: 随着我国商用航空发动机研制进程的推进,陶瓷基复合材料预期会在哪些部件发挥哪些重要作用?

焦健: 对商用飞机而言,经济性是其重要的技术指标。波音787梦想号飞机宣布航空结构进入树脂基复合材料时代,也带来了20%以上油耗降低。据英国权威航空专家预测,截至2020年商业飞机的油耗还可降低29%~31%,而发动机性能的提高贡献了其中的17%~19%。除了发动机设计需进一步优化,发动机油耗降低的主要来源是使用耐温能力更高的新材料,即陶瓷基复合材料。

GE公司认为反应熔融渗透(RMI)工艺因具备快速成形的特点,是未来实现陶瓷基复合材料结构件

商业化生产最有潜力的工艺。因此,该公司已围绕RMI工艺制备的各种发动机结构件展开了考核工作,并拟将该工艺制造的陶瓷基复合材料结构件应用于最新的LEAP-X发动机上。我国商用航空发动机计划也在不断向前推进,新材料、新技术是占据未来国内外商用航空发动机市场的重要筹码。陶瓷基复合材料燃烧室、涡轮等热端结构件,例如涡轮导向叶片、涡轮外环、燃烧室浮动壁等结构件将有效提高商用发动机效率、降低油耗,是我国未来商用航空发动机研发重点。

: 您所在团队在构建陶瓷基复合材料完整的研发应用体系方面有哪些规划?

焦健: 中航工业复合材料技术中心陶瓷基复合材料研究团队主要承担了陶瓷基复合材料航空产品的研发任务。团队在应用体系研发方面有如下的规划构想:

(1) 结合重点型号任务,以型号攻关项目为牵引,重点突破陶瓷基复合材料构件工程化研究过程中原材料稳定性评价、陶瓷基复合材料结构设计、复杂结构成型、低损伤加工、无损检测等技术难点,建立起陶瓷基复合材料设计准则、制造工艺规范、检测标准、评估方法等,培养具有实践经验的工程技术人员;

(2) 与大学、其他科研院所合作,系统的研究陶瓷基复合材料高温力学性能的演变规律,建立不同温度下材料本构模型,在分子水平上理解制备过程/工况环境下陶瓷基复合材料化学、物理变化过程,开发新型复合工艺,探索具有结构功能一体化的复合材料体系,进一步拓宽陶瓷基复合材料应用范围。

最后,我非常感谢《航空制造技术》杂志,能为国内陶瓷基复合材料技术搭建这个平台,为宣扬该技术做的努力。

(责编 良辰)