

创新陶瓷基复材制备技术体系 突破技术应用瓶颈

——访国防科技大学航天科学与工程学院副院长王军

Technology System Innovation of CMC Preparation for Technology
Application Breakthrough

本刊记者 良辰

☞: 王院长,请介绍一下您所在科研团队在陶瓷基复合材料领域开展了哪些方面的工作?

王军:国防科技大学航天科学与工程学院“陶瓷纤维与复合材料技术”研究团队,在国内开创了先驱体转化制备陶瓷以及其复合材料新方法,形成了以先驱体转化技术为特色的研究方向,并且发展了高温热结构、高温透波、高温隔热、空间光机等结构功能一体化陶瓷基复合材料的设计、制备与应用技术,取得了一系列创新性成果,在国家和军队的重大专项以及重点型号等任务中起到了关键支撑作用。

在材料体系上,开发了 C/SiOC、C/SiC、SiC/SiC、C/UHTCs (超高温陶瓷)等耐热复合材料,纳米多孔 SiO₂ 气凝胶、SiO₂-Al₂O₃ 气凝胶、C 气凝胶等隔热复合材料,石英/氮化物高温透波复合材料等;

在制备技术上,主要研究和完善了先驱体浸渍裂解(PIP)、低温液相反应熔渗(RMI)、气相反应烧结

(GSI)、超临界干燥等复合材料致密化技术,以及 CVD、喷涂、溶胶凝胶等涂层制备技术;

在应用技术上,主要开展了复杂结构的预制件成形、陶瓷基复合材料的精加工、复合材料连接与密封等关键技术研究。

☞: 您所在团队取得多项创新性成果,请介绍一下你们团队在陶瓷基复合材料原材料方面做了哪些开创性工作?

王军:(1)先驱体方面。

针对不同的应用需求,以先驱体的组成-结构-性能为导向,建立了先驱体分子设计与合成、性能与功能研究平台,而且研制出了以聚碳硅烷为代表的 30 余种陶瓷先驱体,主要用于制备陶瓷纤维、陶瓷基复合材料以及高温粘结剂等。目前,最具有代表性的先驱体是聚碳硅烷,其研发成功和中试技术的突破带动了我国陶瓷基复合材料领域快速发展与应用,已应用于某重点型号发动机。另外,设计和合成了聚硅氮烷、聚硼氮烷、


聚硼硅氮烷、含金属元素陶瓷先驱体等多种新型陶瓷先驱体,满足了国内陶瓷基复合材料研发单位的需求。

(2)高性能陶瓷纤维方面。

自从 1980 年开始研究先驱体转化法制备 SiC 陶瓷纤维以来,突破了先驱体批量制备、连续熔融纺丝、化学气相不熔化以及高温烧成等关键技术,主要开展了系列连续 SiC 纤维、连续透波陶瓷纤维和其它新型陶瓷纤维的制备技术研究。建立了具有自主知识产权的 SiC 纤维制备技术体系,开发出不同型号连续 SiC 纤维,包括第一代、第二代、第三代和吸波 SiC 纤维等,其中第一代连续 SiC 纤维已实现中试生产,累计为国内数十家科研单位提供了 1000 余 kg 纤维,有力推动了 SiC 纤维增强复合材料的研究。

目前,第二代连续 SiC 纤维制备的关键技术已经实现全面突破,在现有年产百千克试验线上制备的第二代 SiC 纤维力学性能、耐高温性能以及复合工艺性能等指标达到日本

Hi-Nicalon 纤维水平,已经向用户单位提供数十千克产品,第三代连续 SiC 纤维和吸波 SiC 纤维已实现千克级的连续化制备。另外,针对高温透波复合材料的需求,开发了氮化硅纤维和硅硼氮纤维,已突破组成结构控制关键技术,实现了连续化制备。

: 王院长,请您介绍一下您所在科研团队近年来所取得的各方面研究成果。

王军:(1)先驱体与高性能陶瓷纤维方面。

在先驱体与高性能陶瓷纤维方面形成了陶瓷先驱体合成技术体系,开发出了 30 余种陶瓷先驱体,为连续陶瓷纤维和陶瓷基复合材料的制备提供了重要保障,某规格聚碳硅烷已经成为某型导弹燃烧室研制的核心原料;掌握了具有完全自主知识产权的连续 SiC 纤维、吸波纤维和透波纤维等多品种、系列化高性能纤维制备技术,满足了一些重大专项和重点型号任务对高性能陶瓷纤维的急需。

(2)防热材料方面。

在防热材料方面攻克了超高温复合材料制备、大尺寸复杂结构成形、复合材料连接件制备等难题,研制出某飞行器整体结构 C/SiC 机身襟翼,研制的全 C/SiC 空气舵成功通过某导弹 5 次全程飞行试验考核,为某工程研制的热结构舱体已通过总体组织的热防护、热振动等考核,面向高超声速飞行器需求研制的复合材料机翼前缘和端头帽达到了工作条件下微烧蚀的要求。

(3)透波材料方面。

在透波材料方面发明了聚硼硅氮烷等透波陶瓷先驱体,开发出耐高温氮化物透波复合材料体系,攻克了透波、防热、承载一体化关键技术,研制出系列规格的天线罩,通过了某飞行器飞行试验考核和若干新型导弹的地面考核,解决了一些重大专项和重点型号任务的技术瓶颈。

(4)隔热材料方面。

在隔热材料方面发明了系列高强度、超低热导率纳米气凝胶隔热复合材料,突破纳米孔原位形成技术和大尺寸超轻质隔热组件成型技术,解决了长期以来制约新型导弹和飞行器研制的高性能隔热材料技术瓶颈,成功支撑了某导弹和某飞行器的飞行试验,有力推动了某些型号的研制任务。

(5)空间光机材料方面。


在空间光机材料方面提出了三明治结构卫星反射镜设计方案,攻克了无收缩低应力坯体、Si/SiC 梯度过渡层、CVD 致密 SiC 涂层等关键制备技术,满足了高轻量化和高面形精度要求;突破近零膨胀 C/SiC 空间相机前镜筒制备技术,解决了某重大工程中相机高精度、高稳定、轻量化的难题。

(6)发动机热结构材料方面。

在发动机热结构材料方面突破了高强韧、耐高温、抗冲刷以及高气密等关键技术,解决了高精度型面控制技术和无损检测技术,研制出的 SiC/SiC 复合材料调节片已经通过航空发动机数百小时的热环境考核,同时研制出多品种 C/SiC 复合材料推力室,保障了“快舟一号”、“高空科学探测试验”等重大飞行任务的圆满成功,通过若干重点型号任务的环境考核,为其顺利推进提供了重要技术支撑。

(7)高温吸波结构方面。

在高温吸波结构方面掌握了 SiC 纤维电阻率调节技术以及基于 SiC/SiC 复合材料的高温吸波结构的设计、制备与电性能高温稳定化技术,研制的某发动机隐身喷管通过发动机热试车考核,考核后喷管完整,隐身性能无明显变化。

: 请您介绍一下陶瓷基复合材料在空天飞行器上的发展趋势与应用前景。

王军:空天安全已成为国家安

全新的战略前沿领域,世界各国竞相发展空天军事力量与手段,抢占空天战略制高点。在空天领域科技发展呈现创新驱动、空天融合的大环境中,基于组合循环动力的可水平起降、覆盖全速域、可重复使用的空天飞行器成为航空航天领域共同的发展趋势与技术前沿。

空天飞行器的表面热防护系统、推进系统对防热材料与结构提出了严峻挑战,除了要求在全工作温域范围内具备零烧蚀特性,还要具备可重复使用特性与高可靠性。以 C/SiC、SiC/SiC 为代表的陶瓷基复合材料(CMCs)因具有高比强度与比模量、耐高温、高损伤容限、耐腐蚀、性能可设计等优势,是飞行器热防护材料的发展方向,而基于 CMCs 的防热结构则是满足空天飞行器全速域、可重复使用热防护要求的理想方案,具有很好的应用前景。

美国、法国、德国、俄罗斯、日本等世界航空航天和军事强国都竞相发展 CMCs 及其防热结构技术,近 30 年来在材料体系与制备技术、材料性能优化、结构制备与考核等方面都取得了重大突破,有的技术已经在飞行器热防护结构中获得应用。但是目前的技术状态离未来空天飞行器的要求还有很大的差距,这主要体现在:可靠性需要明显提高;复合材料性能(包含服役寿命)还有很大提升空间;耐 1700℃ 以上超高温复合材料技术还不成熟;复杂结构的制备手段(成形、加工、连接、密封等)还不够完善;对服役环境下的失效机制认识还不够深入;复合材料关键原材料价格与工艺成本偏高等。今后需要研究的主要内容包括以下方面:新型热防护材料的研发、材料性能极限化技术、复合材料可控制备技术与低成本化技术、复杂结构精密成形与加工技术、高温连接与密封技术、多场耦合极端环境的测试技术与失效评价等。 (责编 良辰)