

理工交叉与融合 突破空天复合材料关键力学问题

——走进特种环境复合材料技术国家重点实验室

Breaking Through Aeronautics and Astronautics Composite Key Mechanical Problems by
Crossover and Integration of Science and Engineering

[编者按] 特种环境复合材料技术国家重点实验室以“轻是基础,热是关键,结构/功能一体化是重点,智能化是发展趋势”这一特种环境下使用的先进材料技术发展态势为定位,专注于热防护材料与结构、轻质材料与结构、多功能材料与结构、柔性材料与结构、智能材料与结构研究,通过多学科交叉和一体化的研究手段,开展模拟表征与性能评价、特种材料的复合与组织性能控制、特种性能测试与分析方法等关键基础性、创新性和应用研究,致力于解决国家发展过程中的“卡脖子”问题,实现相关研究领域从“跟跑”到“并跑”,再到“领跑”的发展目标,使我国在相关领域的研究始终处于国际领先地位。

总体定位和研究方向

特种环境复合材料技术国家重点实验室是哈尔滨工业大学材料科学与工程、力学两个国家双一流建设重点学科的主要组成部分,在学校“2511计划”的支持下目标达到世界一流学科前列。实验室团队以杜善义院士为首席科学家,以韩杰才院士为学术带头人,现任实验室主任赫晓东教授。

围绕国家重大需求,实验室形成特色鲜明的三大研究方向:(1)特种环境复合材料模拟表征与优化设计技术。包括极端环境与材料耦合模拟理论和方法;极端环境下材料损伤、破坏规律与性能表征;材料的优化设计理论与方法。实验室提出了开展超常服役条件下特种材料的“模拟-表征-优化”研究思路;具备烧

蚀型耐热复合材料损伤/破坏规律与性能表征研究能力;提出了非烧蚀超高温耐热材料的概念,并在高超声速与非烧蚀材料耦合响应机理上开展了研究工作。(2)特种材料的复合与组织性能控制技术。包括新型热防护复合材料和复合结构技术;超轻复合材料及结构性能匹配性实现技术;特种功能复合材料及薄膜组织性能控制技术;特种材料及结构的快速成型与高效加工技术。实验室在超高温非烧蚀复合材料、新型金属热防护、超轻/柔性复合材料结构、大尺寸高性能光电材料等方面取得了重要进展。(3)特种材料性能测试与分析技术。包括特种环境下材料宏观性能测试技术;特种环境下材料微观组织及其演化分析技术;极端环境下材料响应信息获取技术;材料高温性能测试技术;常温复合材料结

构健康监测技术;特殊环境材料响应在线获取技术。

关键技术突破

(1)极端环境材料与结构的力学行为。

材料与结构在超高温等极端环境下的力学行为是关系航天器成败的核心问题之一。实验室提出了解决热防护问题的若干新理论和新方法,在细观烧蚀理论、非烧蚀热防护等方面发挥技术引领作用。

高超声速飞行器最大挑战之一是高速飞行“热障”带来的高温材料本身和复杂高焓/非平衡流动环境与材料的耦合问题。实验室专注高焓、高温等极端服役环境下复合材料的热致损伤/失效机理与破坏理论、热/力/氧化与热/力/电等多场耦合分析方法研究,为高超声速飞行器

用高温复合材料性能表征、预报和优化设计提供了理论基础。

在组合式超高温陶瓷端头的研制中,实验室建立了超高温陶瓷材料强韧化机制及实现途径,大幅度提高了超高温陶瓷材料的损伤容限和抗热冲击性能,揭示了超高温陶瓷材料在极端服役环境下的热响应和长时间氧化机理,攻克了大尺寸超高温陶瓷材料的制备和三维复杂异型热结构件的精密成型技术瓶颈,解决了空天飞行器头锥等关键热端部件在极端环境下的长时间抗氧化和高温维型的技术难题。

基于高超声速飞行器大面积防热的可重复使用、耐高温、轻质、易安装维护、安全可靠等诸多“瓶颈”问题,实验室提出了多孔防隔热材料力-热-微结构连续调控的多目标设计方法,突破了耐高温刚性陶瓷隔热瓦的微结构连续调控技术,以材料微结构按需设计为指导思想,基于陶瓷隔热瓦纤维基元,纤维分布、孔结构与宏观密度间的内在规律,揭示了素坯成型及过热蒸汽干燥环境调控机理,突破了微量助剂、均匀环境控制的烧结技术难题,成功制备出耐高温高强韧刚性陶瓷隔热瓦,实现了防隔热材料微结构与宏观性能的综合调控;发明了多孔陶瓷基防隔热材料表面多功能梯度层的制造技术,解决了关键粉体材料合成与陶瓷纤维高温腐蚀的难题,突破了基体与涂层的界面匹配关键技术,研制出可用于多孔陶瓷基防隔热材料表面的多功能复合梯度层,满足多次可重用需求,为我国高性能多孔纤维防隔热材料的发展奠定了坚实的理论基础,并提供技术储备。

(2) 智能与多功能材料的微结构调控及其力学行为。

实验室基于具有自主知识产权的形状记忆聚合物复合材料,通过精细力学理论分析和巧妙智能结构设计,解决了低温、辐照等极端恶

劣服役环境下,长时间锁定、低冲击可靠展开的关键技术难题,使我国成为世界上首个将形状记忆聚合物智能结构应用于深空探测工程的国家。

实验室构建了形状记忆聚合物及其复合材料的力-热耦合非线性本构理论;阐明形状记忆聚合物复合材料结构弯曲变形的微观屈曲机理;开展基于形状记忆聚合物的4D打印智能制造技术研究;构建了非线性介电性能和超弹性性能耦合条件下的介电弹性体智能聚合物的本构模型,设计了爬行、抓取等多种电驱动仿生柔性机器人;优化设计多种智能可变形结构,并将其用于变体飞行器结构;提出基于多种光纤传感器的复合材料结构力学性能演变过程及损伤状态的在线监测与评价方法,对运行过程中的大型复合材料结构进行实时监测;发明碳纳米纸多功能纳米复合材料,具有良好的导电性、与树脂浸润性,提高飞机复合材料结构的防雷击和防除冰性能。

实验室石墨烯基结构隐身一体化复合材料团队以具有极低体密度以及优异电磁性能的石墨烯连续体为核心,结合传统的蜂窝夹层结构,在国际上提出了基于石墨烯的承载隐身一体化复合材料概念。针对复合材料的微观设计,创新性地发展了一种先进的电磁隐身材料微结构设计和调控理论,通过优化微结构单元的电磁参数及空间分布,设计出具有特殊周期微结构单元的石墨烯吸波连续体结构,突破了电磁隐身材料微结构的设计与调控技术难题。

► 科研项目成果 ◀

超高温陶瓷材料本征脆性和可靠性差,长期制约其工程化应用。实验室提出了碳纤维增韧超高温陶瓷复合材料强韧化设计和制备新方法,通过低温补给的理念,将烧结温度降低35%,制备的复合材料断裂韧性等关键性能得到了量级提升,同时,其

室温和高温抗弯强度表现优异,可靠性获得了大幅提升,真正意义上实现了超高温陶瓷复合材料的强韧化与抗氧化协同。

航空和航天等前沿技术发展对结构和载荷轻量化的追求更加极致,复合化是提高结构效率、实现结构/功能一体化最为重要的技术途径。实验室瞄准典型可重复使用高马赫数飞行器结构轻量化需求,针对机身典型结构部位,开展了基于仿生结构组合设计的不同材料方案、不同结构形式的多方案研究,探明了不同方案的应用可行性。

实验室在国内首次开展了大尺寸超薄金属内衬轻量化复合材料贮箱的研制工作。发明了缠绕纤维与芯模表面间滑线系数的表征方法,提出了基于工艺可实现的精密缠绕理论;建立了仿壁虎脚结构的界面层设计理论模型,制备出了超薄金属内衬与复合材料层间的超强界面层;掌握了复合材料结构的损伤自修复方法,提高了复合材料压力容器的可重复使用次数,相比同容积、同压力的金属容器减重70%,达到国际先进水平。

针对高热流、大剪切力、短时间使用环境下轻质复合材料翼舵结构,实验室开展了耐高温树脂配方研制,攻克了碳纤维增强耐高温复合材料热熔预浸料的制备技术及大尺寸复杂构型复合材料翼舵结构研制,交付产品与传统方案相比减重显著且构件不需要额外隔热涂层。

实验室在蓝宝石单晶大尺寸生长、高稳定、高精度测控、高生产率和晶体质量生长方面取得了重大研究成果,成功掌握了 $\phi 250\sim 320\text{mm}$ 高质量蓝宝石单晶生长技术,研制了 $\phi 320\text{mm}$ 高质量蓝宝石晶体生长的专用设备及其高稳定高精度测控装置,完成了蓝宝石整流罩近尺寸成型(捞球)加工技术研究,突破了高效近成型精密加工技术。(采访 大漠)