



固体火箭发动机复合材料技术的进展及其应用前景

刘慧 陈磊（空天知行合一（温州）航天科技有限公司）

摘要：随着空间探索和军事需求的不断增长，固体火箭发动机作为运载工具的关键组成部分，其性能要求不断提高。复合材料因具有高强度、低质量和可设计等优势，在固体火箭发动机的发展中起到了至关重要的作用。本文综述了固体火箭发动机中复合材料技术的最新进展，并探讨了其在未来航空航天领域的应用前景。

关键词：固体火箭发动机；复合材料；热防护系统；结构一体化；高性能；轻量化；未来应用

固体火箭发动机是将燃料和氧化剂混合在一起形成固态推进剂的发动机，广泛应用于导弹和运载火箭等领域。在发动机设计中，材料的选择直接关系到推进系统的性能和可靠性。复合材料因其优异的性能成为固体火箭发动机材料技术的重要发展方向。

1 复合材料在固体火箭发动机中的应用

1.1 发动机壳体材料

金属材料，长期以来，一直是构建各类机械设备，特别是火箭发动机壳体的首选材料。它们的耐用性和强度给予了工程师足够的信心，确保火箭能够在严苛的外部环境中保持完整性。然而，这些金属材料存在一个不容忽视的缺点——它们的重量。在航天领域，每一克的质量都至关重要，因为额外的重量意味着需要更多的燃料，而燃料的增加又会带来成本的提升，这成了一个限制火箭性能的瓶颈。

随着技术的进步，轻质材料逐渐进入了工程师们的视野。碳纤维增强复合材料（CFRP）与玻璃纤维增强复合材料（GFRP）便是其中的杰出代表。它们通过将微小且坚韧的纤维嵌入树脂等基体材料中，制成了不仅轻而且坚固的复合材料。这种结构设计赋予了复合材料与生俱来的高比强度和高比刚度，让它们在面对剧烈温度变化、机械冲击等极端条件时，展现出了优异的性能。

采用 CFRP 和 GFRP 作为火箭发动

机壳体的材料，能够显著减轻整体重量，这样一来，火箭就可以携带更多的有效载荷或者减少燃料消耗，从而在经济效益和发射效率上都取得显著的提升。更轻的火箭意味着更高的上升速度和更低的轨道进入成本，这对于商业发射和太空探索都具有重要意义。

不过，值得注意的是，尽管 CFRP 和 GFRP 在重量和强度上表现出众，但它们在耐热性能上可能不如传统的金属材料。这就要求工程师们必须巧妙设计热防护系统，确保复合材料能够在高温环境下保持性能不变。另外，在制造和加工方面，复合材料也提出了新的挑战，需要更精细的工艺和控制，以免损伤材料的内部结构。

1.2 热防护系统

热防护系统的作用在于确保发动机在激烈的工作条件下，尤其是在高温燃烧环境中能持续稳定工作。当一个火箭升空时，发动机内部的温度会迅速攀升到令人难以置信的高度。如果没有有效的热防护，发动机内部的结构材料很可能会迅速退化，导致性能下降甚至发生故障。

在这种背景下，传统的金属热防护方法虽然能提供一定程度的保护，但是当面对超高温环境时，它们往往难以满足要求。因此，寻找一种能够在高温环境下保持稳定性的材料成为了航天领域研究的热点。这时，碳/碳（C/C）复合材料成为了一个理想的选择。这种材料

由碳纤维和碳基体组成，它能够在超过 2000 摄氏度的高温环境中保持机械性能，而且相比于金属材料，它具有更轻的重量和更好的抗疲劳性能。

C/C 复合材料在经历高温后，不仅能够保持其形状，更重要的是能保持其结构上的完整性和功能性，这是因为其本身具有的独特的热膨胀系数非常低，这使得它在温度变化剧烈的情况下不易发生形变。此外，碳纤维不仅耐高温，而且还具有优异的抗氧化性能，这对于延长热防护系统的使用寿命至关重要。

不过，C/C 复合材料的使用并非没有挑战。首先，它们的成本相对较高，这对于预算有限的项目来说可能是一个问题。其次，尽管 C/C 复合材料在高温下表现出色，但在某些情况下，它们仍然需要额外的防护措施，例如涂覆一层保护层，来进一步阻挡氧气和其他可能引起材料退化的化学物质。

为了克服这些挑战，科学家和工程师们正在不断研究和开发新的材料以及改进现有材料的制造工艺。例如，通过控制碳纤维的排列方式和基体的成分，可以提高 C/C 复合材料的性能。此外，研究人员还在寻找更经济高效的制造方法，以降低生产成本，使这种高性能材料更加普及。

此外，与 C/C 复合材料相结合的多层复合热防护系统正在成为热点。这种系统通常包括一个内层的 C/C 复合材料，用以承受直接的高温冲击，外层则可能

是陶瓷或者其他类型的复合材料，用以提供额外的隔热和抗氧化保护。通过这种多层设计，可以将每种材料的优点结合起来，从而创造出性能更加全面的热防护解决方案。

在航天器设计中，热防护系统是一个不可或缺的组成部分，它直接关系到任务的成功与否。随着新材料和新技术的不断涌现，我们有理由相信，未来的热防护系统将更加轻巧、耐用且成本更低，从而为人类探索宇宙提供更为坚实的保障。

1.3 喷口和喷管

热防护系统在航空航天领域扮演着至关重要的角色。在火箭发射过程中，固体火箭发动机必须承受由燃料燃烧产生的极端高温。这些高温产物若直接作用在发动机结构上，将导致严重的热损伤，进而影响发动机的性能，甚至可能导致任务的失败。因此，研究和开发能够在这些极端条件下保持稳定性的热防护材料是至关重要的。

在这些材料中，碳/碳（C/C）复合材料因其能在极端高温下维持机械性能而脱颖而出。碳纤维增强的碳基复合材料不但具备高温下的结构完整性，还拥有较低的热膨胀系数，这意味着即便在温度急剧变化的环境中，也能保持形状和尺寸的稳定，避免因热膨胀引起的应力损伤。

在固体火箭发动机中，喷口和喷管是关键的热防护部件。喷口需要对流过的燃烧产物施加控制，以保证推进剂的稳定燃烧和高效推进，而喷管则负责将燃烧产物高效排放，产生推力。这些部件不仅要抵御高温，还要承受高压。使用 C/C 复合材料作为喷口衬里是因为其在高温下的卓越性能和低磨损率，能够有效延长喷口的使用寿命。

同时，陶瓷基复合材料（Ceramic Matrix Composites，简称 CMC）同样在

热防护系统中占据了一席之地。CMCs 是由陶瓷纤维和陶瓷基体组成的复合材料，它们在高温下同样展现出极佳的物理和化学稳定性，而且相比金属材料，CMCs 的重量更轻，热导率更低。这些特性使得 CMCs 成为理想的喷管材料，既能承受高温高压，又能提供良好的热隔离，减少热量传递给发动机其他部位。

热防护系统的设计不仅要考虑材料自身的耐高温性能，还要关注其在高速气流和颗粒冲击下的耐磨损性能。C/C 复合材料和 CMC 都具有较好的抗磨损能力，可以在恶劣的工作环境中保持其完整性。

为了满足这些严苛的工作条件，研发团队通常采用多学科的方法来设计和测试这些热防护材料。这包括计算流体力学（CFD）模拟高温气体流过喷口和喷管的过程，以及利用材料科学来分析和改善复合材料的微观结构和化学成分。此外，实验测试也不可或缺，因为它们能够提供实际应用中材料性能的直观证据。

然而，尽管 C/C 复合材料和 CMC 在许多方面都表现优异，它们的制造和应用过程仍面临诸多挑战。高成本是主要的限制因素之一。复合材料的生产过程往往需要精密的设备和严格的工艺控制，这使得制造成本居高不下。此外，对于 C/C 复合材料来说，其在高温下的抗氧化性虽好，但在某些情况下还需额外的涂层保护以防氧化反应。

鉴于这些挑战，航空航天领域的研究人员持续探索更经济、更有效的材料和技术。他们致力于通过改进复合材料的设计和制造过程，以及研发更先进的表面处理技术来提升材料的整体性能，降低成本，从而推动火箭发动机热防护技术的进步。随着这些技术的成熟和应用，未来的火箭发动机将会更加可靠、安全，同时在探索宇宙的旅程中发挥更

大的潜能。

2 复合材料技术的进展

2.1 材料制备技术

在深入探讨热防护系统及其所依赖的复合材料之前，首先要明确它们在现代科技特别是航空航天领域中的重要性。尤其是航天器的发动机，在运作时产生的高温燃烧产物是极具破坏性的。这些高温气体若不妥善管理，不仅会严重损坏发动机内部结构，还可能危及整个飞行任务的安全。因此，热防护系统的作用就是在这样极端的环境中，保护发动机免受高温侵蚀。

热防护系统通常由能够耐受高温的特殊材料制成，碳/碳（C/C）复合材料便是其中一种。C/C 复合材料由碳纤维和碳基体组成，能在高温环境下保持其结构完整性和功能性，同时具备优异的力学性能和轻质的特点。这些材料的性能使它们成为航空航天领域，特别是在需要在极端环境中工作部件的理想选择。

然而，C/C 复合材料的制造过程一直以来都是技术密集型的。传统的制备方法不仅耗时耗力，而且很难确保制成品的一致性和精确度。随着材料科学和制造技术的不断进步，一系列先进的制造技术相继出现，为复合材料的制造带来了革命性的变革。

预浸料技术是一种先进的复合材料制备方法，它涉及将碳纤维预先浸入树脂中，然后在热压或自动铺设过程中固化。这种技术大幅提高了复合材料的制造效率，因为它简化了碳纤维与树脂的结合步骤，并且使得复合材料的质量更加均匀。

树脂转移模塑（RTM）是另一种创新技术，它通过注射树脂到放置有纤维的模具中，并在加压和加热条件下固化树脂来制造复合材料。RTM 技术的优势在于能够生产出复杂形状的复合材料部件，并且具有很高的生产效率和成品质



量控制。

除此之外,3D打印技术的出现更是在复合材料制造领域掀起了一场革命。通过逐层累加的方式构建复杂的三维结构,3D打印不仅使得复杂部件的制造成为可能,而且极大地缩短了从设计到成品的时间周期。更为重要的是,3D打印技术能够在设计阶段实现极高的自由度,使得热防护系统的设计更为优化,从而在提升性能的同时,减轻重量。

2.2 界面优化

在工程学和材料科学领域,热防护系统(Thermal Protection System, TPS)的研发和优化一直是一个至关重要的课题。这一系统的设计宗旨是保护航天器、发动机和其他高温环境中工作的设备免受灼热的燃烧产物和外部热源的侵袭。当我们探讨这一技术时,必须提及复合材料在其中扮演的重要角色,尤其是碳/碳(C/C)复合材料,它由于其优异的耐高温性能,成为了热防护系统中的重要材料之一。

C/C复合材料是一种由碳纤维和碳基体组成的先进材料,它能够承受超过2000℃的高温而不失去结构完整性。这使得C/C复合材料成为制造航天飞机热防护系统、火箭喷管和高温工业炉的理想选择。这些应用场合要求材料不仅要有良好的机械性能,还要有出色的热稳定性和热震稳定性。

然而,尽管C/C复合材料本身具备了耐高温的特性,其性能表现却在很大程度上受到材料界面的影响。界面简单来说,就是不同材料或材料的不同部分之间的交界面,这在复合材料中尤为关键。因为界面的好坏直接决定了纤维和基体之间的结合强度,进而影响到整个复合材料的力学性能、热性能以及耐久性。

为了提高C/C复合材料在热防护系

统中的性能,科学家和工程师们在材料界面处理上做了大量的研究和实验。这些处理方法包括但不限于表面处理、涂层技术和界面剂的使用。表面处理可以增强纤维与基体之间的化学键合,涂层技术可以在复合材料表面形成一层保护屏障,防止高温和氧化环境对材料造成损害。界面剂的使用则能在纤维与基体之间形成一个过渡层,强化它们之间的结合效果。

例如,通过化学气相沉积(CVD)和物理气相沉积(PVD)等方法,可以在C/C复合材料上形成如碳化硅(SiC)这样的陶瓷涂层,这种涂层不仅能增强材料的抗氧化能力,还能在一定程度上提高其抗热震性能。此外,通过采用硅和其它元素的预浸液来处理碳纤维,也能显著提高纤维与基体的结合强度。

值得注意的是,虽然这些方法能够提升复合材料的界面质量,进而提高热防护系统的整体性能,但它们各自也有局限性和特定的适用场景。在实际应用中,需要根据具体的使用条件、成本预算以及性能需求来选择最合适的界面处理技术。

2.3 多功能一体化

热防护系统是保护发动机免受高温燃烧产物侵蚀的关键组件。复合材料如碳/碳(C/C)复合材料,能够在极端高温环境下保持结构完整性和功能性。实现结构与功能一体化的复合材料,如自修复复合材料、智能传感复合材料等,不仅降低了重量,还提高了系统的综合性能。

2.4 应用前景

热防护系统是保护发动机免受高温燃烧产物侵蚀的关键组件。复合材料如碳/碳(C/C)复合材料,能够在极端高温环境下保持结构完整性和功能性。未来,固体火箭发动机复合材料技术将向

着更高性能、更轻质量和更多功能一体化的方向发展。这些材料将在新一代运载火箭、可回收火箭以及军事导弹等领域得到更广泛的应用。

3 结论

热防护系统是保护发动机免受高温燃烧产物侵蚀的关键组件。复合材料如碳/碳(C/C)复合材料,能够在极端高温环境下保持结构完整性和功能性。固体火箭发动机复合材料技术的进展显著提高了发动机的性能和可靠性,并为未来的航空航天任务提供了更多可能性。随着技术的不断创新和完善,复合材料将在固体火箭发动机领域扮演更加重要的角色。

参考文献

- [1] 高勇,查柏林,王金金等.固体火箭发动机C/C复合材料烧蚀试验技术研究[J].高科技纤维与应用,2020,45(4):1-7.
- [2] 徐丹丹,丁小云.先进复合材料制造前沿技术突破及对我国固体火箭发动机的发展启示[C]//中国航天第三专业信息网,中国科协航空发动机产学研联合体(筹).中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议论文集——S06材料、工艺与制造相关技术.西安航天信息研究所,2019:7.
- [3] 李俊,大型固体火箭发动机全复合材料燃烧室的关键技术研发及应用.江苏省,江苏新扬新材料股份有限公司,2019-08-01.
- [4] 徐丹丹,闫大庆.国外固体火箭发动机技术新动向[J].中国航天,2017(5):18-21.
- [5] 高伟,陈小平,韩建平.固体火箭发动机复合材料及其连接裙成型技术进展[J].玻璃钢/复合材料,2016(7):92-95.