

高温合金在航天发动机上的应用

王永建 闫文龙 康海超 王劼宸 李 童

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘要: 航天探索对飞行器性能提出了极高要求,而发动机作为核心部件,其材料的选择至关重要。本文全面阐述了高温合金在航天发动机中的应用情况。介绍了镍基、钴基、铁基高温合金的类型及其特性,如镍基高温合金的高温强度与抗氧化性等。详细论述其在燃烧室、涡轮叶片、涡轮盘、尾喷管等部件的应用,分析了面临的高温强度受限、抗氧化和腐蚀性能不足、疲劳性能考验等挑战。并从材料改进与创新、制造工艺优化、无损检测与寿命评估技术发展等方面提出改进措施,为高温合金在航天发动机中的进一步应用提供了理论与实践依据,对推动航天发动机材料技术发展具有重要意义。

关键词: 高温合金; 航天发动机; 应用

引言: 航天发动机作为航天器的核心动力装置,其性能优劣直接影响航天任务的成败。在极端高温、高压、高转速以及复杂化学腐蚀的恶劣工作环境下,对材料提出了严苛要求。高温合金凭借独特性能成为关键材料,在航天发动机各部件中广泛应用,有力支撑了发动机的高效稳定运行。深入探究高温合金在航天发动机中的应用情况,包括其类型、特性、应用场景、面临挑战及改进措施,对于提升航天发动机性能、推动航天技术发展具有至关重要的作用,这也正是本文的研究重点与价值所在。

1 高温合金的类型及特性

1.1 镍基高温合金

镍基高温合金是以镍为基体,融入多种合金元素而成。其具有出色的高温强度,在600℃至1000℃区间能维持良好力学性能,这得益于 γ' 相($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$)和 γ'' 相(Ni_3Nb)等强化相阻碍位错运动。抗氧化和抗腐蚀能力强,铬元素形成的 Cr_2O_3 氧化膜可有效抗氧化,钼、钨提升抗热腐蚀能力。热膨胀系数低,能减少热应力,且加工性能良好,可通过多种工艺制成复杂部件,广泛应用于航天发动机的关键部位,如燃烧室和涡轮叶片等,是航天高温合金领域的重要材料。

1.2 钴基高温合金

钴基高温合金以钴为基体,添加铬、镍、钨、钼等元素。高温强度和热疲劳性能优异,在高温下组织稳定性佳,熔点较高使其在更高温度下仍能保持一定力学性能。抗氧化性能虽略逊于镍基合金,但抗热腐蚀尤其是含硫环境下表现突出,其形成的氧化物和硫化物保护膜稳定性高。常采用铸造工艺制造,适用于形状复杂、对热疲劳要求高的部件,如发动机的导向叶片,为航天发

动机在复杂工况下稳定运行提供了可靠保障。

1.3 铁基高温合金

铁基高温合金以铁为基体,加入铬、镍、钼、钨、铝、钛等元素。成本相对较低,具有一定高温强度与抗氧化性能,在400℃至600℃的中温范围应用较广。通过固溶强化、沉淀强化提升力学性能,不过总体高温性能不及镍基和钴基合金。随着技术进步,新型铁基高温合金性能有所改善,在航天发动机非关键部件或对成本敏感部位,像次要管路系统和部分支撑结构件等得到应用,在保证一定性能的同时满足了成本控制需求,拓展了高温合金在航天领域的应用范围^[1]。

2 高温合金在航天发动机各部件的应用

2.1 燃烧室

燃烧室是航天发动机中燃料与氧化剂剧烈燃烧、释放能量的关键场所,工作环境极为苛刻。高温合金在燃烧室的应用形式丰富多样,其中镍基高温合金凭借其出色的综合性能占据重要地位。燃烧室壁板通常采用镍基高温合金制造,其在承受高达数千摄氏度的燃气温度以及巨大的热流密度冲击时,通过优化合金成分与微观组织结构,能够有效抵抗高温导致的软化和变形,维持燃烧室的结构完整性,确保燃烧过程稳定且高效。例如,某些先进的镍基高温合金中添加了适量的稀土元素,细化了晶粒尺寸,增强了晶界强度,显著提升了抗热疲劳性能,减少了因频繁热循环引发的裂纹萌生与扩展风险。镍基高温合金还被用于制造火焰筒,其良好的抗氧化和抗腐蚀性能可抵御燃气中氧、硫等腐蚀性介质的侵蚀,保证火焰筒在恶劣环境下长期可靠工作,为航天发动机持续稳定的动力输出提供坚实保障。

2.2 涡轮叶片

涡轮叶片处于航天发动机工作条件最为恶劣的区域，不仅要经受高温燃气的直接冲刷，温度可超1000℃，还要承受高速旋转带来的巨大离心力、复杂的弯曲应力以及振动应力等。为满足这些严苛要求，先进的镍基单晶高温合金成为首选材料。单晶高温合金消除了晶界，极大程度地减少了晶界在高温下对强度的削弱作用，使合金的高温强度和蠕变性能得到飞跃式提升。通过精确控制合金元素的配比，如增加铝、钛等元素含量以稳定强化相 γ' ，进一步增强了叶片的高温力学性能。此外，涡轮叶片内部设计了精巧的冷却结构，如复杂的气冷通道，利用压气机引来的冷空气对叶片进行高效冷却，使得叶片在极端高温下仍能保持相对较低的温度水平，有效缓解了高温对材料性能的不利影响，确保涡轮叶片在高温、高应力环境下能够可靠运行，维持发动机的高效热功转换效率，是航天发动机实现高性能运转的核心部件之一。

2.3 涡轮盘

涡轮盘作为连接涡轮叶片并传递扭矩的关键部件，在航天发动机的高温高压环境下承受着巨大的机械应力和热应力，其性能的优劣直接关系到发动机的可靠性和稳定性。镍基高温合金锻件因其优异的综合性能被广泛应用于涡轮盘的制造。在锻造过程中，通过优化工艺参数，如控制锻造比、变形温度和速度等，使合金的组织结构更加致密均匀，有效提升了其强度和韧性。同时，在合金设计上，精心调整合金元素的种类和含量，增加 γ' 相的含量并提高其稳定性，显著增强了涡轮盘的高温强度和抗蠕变性能。例如，采用双重热处理工艺，先进行固溶处理使合金元素均匀分布，再进行时效处理析出强化相，进一步优化了合金的组织结构，提高了其综合力学性能，确保涡轮盘在高温、高转速的恶劣工况下能够安全稳定地运行，为涡轮叶片的稳定旋转提供坚实的支撑，保障航天发动机动力传输的高效性和连续性。

2.4 尾喷管

尾喷管是航天发动机产生推力的关键部位，其工作环境恶劣，面临着高温、高压以及高速燃气的冲刷。高温合金在尾喷管的应用对于保证发动机性能起着至关重要的作用。在尾喷管的收敛段和扩张段，高温合金被广泛使用。例如，采用镍基高温合金制造的尾喷管部件，能够承受燃气温度高达1000℃以上的热冲击和高速气流的冲刷。这是因为镍基高温合金具有良好的高温强度和热稳定性，其强化相结构在高温下能够有效阻碍位错运动，维持材料的力学性能，防止喷管在高温作用下发生变形或损坏。为了进一步提高尾喷管的耐高温和耐冲

刷能力，还会在高温合金表面采用特殊的涂层技术。如陶瓷涂层，它不仅增强材料的抗氧化性能，减少高温燃气对合金基体的侵蚀，还能提高表面的硬度和耐磨性，有效抵御高速气流中固体颗粒的冲刷，降低尾喷管的烧蚀速率，延长其使用寿命。此外，先进的制造工艺也被应用于尾喷管高温合金部件的生产。例如，通过精密铸造或增材制造技术，能够制造出具有复杂内部结构和精确外形尺寸的尾喷管，满足其在空气动力学和热性能方面的严格要求，确保燃气能够高效、稳定地排出，从而为航天发动机提供可靠的推力，保障航天器在飞行过程中的动力需求和姿态控制，使航天任务得以顺利实施^[2]。

3 高温合金在航天发动机应用中面临的挑战

3.1 高温强度的限制

随着航天发动机性能的不不断提升，对高温合金高温强度的要求愈发严苛。在发动机运行过程中，燃烧室和涡轮等部件的工作温度持续升高，传统高温合金在更高温度下，其内部的强化相如 γ' 相和 γ'' 相可能发生粗化、溶解等变化，导致位错运动阻力减小，合金强度显著下降。这使得发动机在追求更高推重比和热效率时，现有高温合金难以满足需求。例如，新一代高性能航天发动机的研发目标使工作温度远超传统高温合金的极限使用温度，高温强度不足可能引发部件变形甚至断裂，严重影响发动机的可靠性和使用寿命，进而限制了航天发动机技术的进一步发展，因此提高高温合金的高温强度成为亟待解决的关键问题之一。

3.2 抗氧化和腐蚀性能不足

航天发动机燃气中富含氧气、水蒸气、硫、氯等氧化性和腐蚀性物质，这对高温合金的抗氧化和抗腐蚀性构成了严峻挑战。在长时间高温环境下，高温合金表面的氧化膜会逐渐增厚，当膜厚达到一定程度时，由于热膨胀系数的差异，可能会发生剥落、破裂，使得新鲜的合金基体暴露于燃气中，加速氧化和腐蚀进程。特别是在发动机启动和停止阶段，温度与气氛的急剧变化会产生热应力，进一步破坏氧化膜的完整性，加剧氧化和腐蚀程度。抗氧化和腐蚀性能不足会导致合金的力学性能劣化，如强度降低、韧性变差，缩短部件的使用寿命，增加发动机故障的风险，严重威胁航天发动机的安全稳定运行，所以改善高温合金的抗氧化和腐蚀性能迫在眉睫。

3.3 疲劳性能的考验

航天发动机在运行时，各部件承受着复杂多变的交变应力，包括热循环应力、机械振动应力等，这使高温合金面临严峻的疲劳损伤问题。高温下，原子扩散速

率加快,位错运动更加活跃,疲劳裂纹更容易萌生和扩展。在高温合金的微观组织不均匀处、存在缺陷或应力集中区域,疲劳裂纹的产生和发展更为迅速。发动机频繁的启动和停止以及不同工况下的载荷变化,会加剧这种疲劳损伤。一旦疲劳裂纹扩展到一定程度,部件将发生突然失效,严重影响发动机的可靠性和耐久性,甚至引发灾难性后果。因此,深入研究高温合金的高温疲劳性能,准确预测疲劳寿命并采取有效防护措施,对于保障航天发动机的安全运行具有至关重要的意义^[3]。

4 高温合金在航天发动机应用中的改进措施

4.1 材料改进与创新

为应对高温合金在航天发动机应用中的挑战,材料改进与创新是关键路径。在合金成分设计上,通过精准调控元素比例和引入新元素来提升性能。如在镍基高温合金中增加铼(Re)、钌(Ru)等难熔金属元素,可显著提高其高温强度与组织稳定性,使合金在更高温度下保持良好力学性能,满足发动机对推重比提升的需求。研发新型抗氧化和耐腐蚀合金体系,如高熵合金,其多元合金化的特点有助于形成更稳定的保护性氧化膜,增强抗环境侵蚀能力。此外,表面涂层技术也至关重要。利用物理气相沉积(PVD)或化学气相沉积(CVD)在合金表面沉积陶瓷涂层,像 Al_2O_3 、 ZrO_2 涂层,能有效阻挡氧气和腐蚀性介质,进一步提升抗氧化和抗腐蚀性能,为高温合金在恶劣发动机工况下长期稳定服役提供保障,推动航天发动机材料技术迈向新高度。

4.2 制造工艺优化

先进制造工艺对提高高温合金在航天发动机中的应用效能不可或缺。在铸造方面,定向凝固和单晶铸造技术可制备具有特定晶体取向和组织结构的部件,如涡轮叶片。精确控制凝固速度、温度梯度等参数,能减少缺陷,优化组织形态,显著增强高温力学性能与抗疲劳性能。锻造工艺中,等温锻造、粉末锻造等技术可使合金组织致密均匀,提升强度与韧性。对于加工工艺,高速切削、精密磨削等技术能减少加工损伤,确保高精度和高质量表面。增材制造(3D打印)技术更是突破传统制造局限,可制造复杂轻量化结构部件,减少材料浪费和重量,同时提高性能与可靠性。通过这些工艺优化,不仅提升了高温合金部件的质量和性能,还为航天发动机

的高效、可靠运行奠定坚实基础。

4.3 无损检测与寿命评估技术的发展

无损检测与寿命评估技术的进步对于保障高温合金部件在航天发动机中的可靠性至关重要。无损检测方法多样,超声波检测可利用高频声波探测材料内部缺陷,如气孔、裂纹等;射线检测通过X射线或 γ 射线穿透部件,成像显示内部结构和缺陷情况;涡流检测则基于电磁感应原理检测表面和近表面缺陷。这些技术能在不破坏部件的前提下,精准识别潜在质量问题,确保投入使用的部件质量合格。寿命评估技术方面,通过建立疲劳寿命预测模型和蠕变寿命预测模型,综合考虑工作温度、应力水平、材料性能等因素,结合实际运行数据,可准确预测部件的使用寿命。这为发动机的维护、检修和部件更换提供科学依据,实现预防性维护,避免突发故障,提高发动机的使用效率和安全性,降低运营成本,有力推动航天发动机的维护保养技术向智能化、精准化方向发展^[4]。

结束语

综上所述,高温合金在航天发动机领域的应用至关重要且前景广阔。从燃烧室到尾喷管,其凭借独特性能支撑着发动机的高效运行,虽面临高温强度、抗氧化腐蚀、疲劳性能等挑战,但通过材料创新、工艺优化及检测评估技术发展,不断突破瓶颈。未来,随着科技的持续进步,高温合金必将朝着更高性能、更轻量化、智能化方向迈进,为航天发动机乃至整个航天事业的发展注入源源不断的动力,助力人类探索宇宙的步伐迈向新的征程,开创更为辉煌的航天新纪元。

参考文献

- [1]金宏,殷银行,刘乐,刘丹.航天用超大规格GH4169高温合金螺栓热锻工艺[J].锻压技术,2022,47(06):55-60.
- [2]朱宝辉,吴向东,万敏,赵刚,曹艳飞,罗文,李树荣,何季麟.航天用高温铌基合金进展[J].中国有色金属学报:2023,02131-132
- [3].高温合金为航空、航天、能源事业保驾护航[J].材料保护,2022,55(03):32-33
- [4].高温合金为航空、航天、能源事业保驾护航[J].材料保护,2021,54(06):92-93