

高温热管传热特性及在动力设备中的应用技术

张语盈

沈阳化工大学 辽宁沈阳 110142

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18533

[摘要] 高温热管属于高效传热元件, 依靠其良好的导热性能, 等温性以及热响应速度, 在动力设备热管理方面有着广阔的运用前景。本文主要研究高温热管传热特性及动力设备应用技术, 明确高温热管的核心内涵和传热机理, 系统分析目前应用过程中材料适配性不足、传热稳定性不佳、集成设计不合理等主要问题。根据以上问题提出材料体系优化、传热调控强化、集成方案创新、智能监测赋能、多场协同设计等针对性措施, 为高温热管在动力设备中的高效、稳定使用提供理论支撑和技术参考, 推动动力设备热管理水平的提高和节能降耗目标的实现。

[关键词] 高温热管; 传热特性; 动力设备; 应用技术; 热管理

引言:

能源转型和工业升级促使动力设备朝着高参数、高功率、小型化方向发展, 内部热流密度急剧增大, 热管理问题成了制约设备性能和安全运行的关键瓶颈。高温热管依靠相变传热, 传热效率比传统金属元件较高, 可以迅速转移并均匀分布热量, 为解决动力设备极端工况热管理问题提供了有效途径。目前已经在航空发动机等设备上初步应用, 但是存在多工况适配性差等问题。因此研究传热特性, 梳理应用难题并提出创新策略, 对推动动力设备产业高质量发展有重大意义。

一、高温热管的核心内涵

高温热管指工作温度超过 500℃, 依靠工质相变传热的元件, 核心内涵就是相变驱动、定向传热、高效适配的协同机制。它由管壳、工质、吸液芯组成, 依靠工质蒸发、冷凝、回流的循环来实现热量高效传递。相比中低温热管, 需要适应极端高温环境, 对材料耐高温性、工质稳定性、吸液芯毛细性能要求更高, 核心优势为高温区间等温性好、传热功率密度高, 是动力设备热产生和热消散的核心连接载体, 精准匹配高温余热回收等需求。

二、高温热管在动力设备应用中的关键问题

2.1 极端工况材料适配弱

动力设备运行时会遇到高温、高压、振动、腐蚀等恶劣的工作环境, 目前的高温热管材料体系不能满足所有的工况。一方面, 管壳材料在长期高温环境下容易发生氧化、蠕变、晶粒长大, 造成材料力学性能下降, 出现渗漏、破裂等安全隐患, 部分镍基合金在 800℃ 以上长期使用时, 抗氧化性能明显下降, 不能满足航空发动机燃烧室周边的应用要求; 另

一方面, 工质和管壳材料存在相容性问题, 高温下部分工质容易分解产生不凝性气体, 或者与管壳发生化学反应生成杂质, 堵塞吸液芯毛细通道, 破坏传热循环。另外吸液芯材料在高温下毛细性能下降, 工质回流不畅, 进一步降低高温热管的传热效率和使用寿命, 成为制约其在高端动力设备中应用的主要障碍。

2.2 变负荷传热稳定性差

动力设备经常处在启动、停机、负荷突然变化等变工况运行状态, 造成高温热管的热流密度、工作温度剧烈波动, 传热稳定性得不到保证。低温状态下工质粘度大、蒸发速率慢, 易出现启动滞后现象, 不能快速响应设备的热管理需求; 负荷突变时, 热流密度急剧升高容易造成吸热端局部过热, 引起工质“烧干”, 破坏传热连续性, 热流密度骤降容易造成放热端冷凝不充分, 气态工质回流受阻, 产生传热停滞问题。动力设备运行时产生的振动会破坏吸液芯结构的完整性, 影响工质毛细回流的效果, 加大传热波动。目前高温热管的设计大多以额定工况为基础, 缺少对变负荷工况的针对性优化, 造成其在实际应用中传热性能波动较大, 不能为动力设备提供稳定的热保障, 限制了其在变工况需求明显的动力设备中的推广应用。

2.3 设备集成设计不合理

高温热管与动力设备的集成匹配性影响着高温热管的应用效果, 但是目前集成设计存在着诸多不合理的地方。一是空间适配性差, 动力设备内部结构紧凑、空间有限, 传统的高温热管外形结构固定, 不能精准匹配设备内部复杂的空间布局, 造成安装困难, 甚至与其它部件发生干涉, 影响设备

原有的功能;二是接口设计不合理,高温热管与设备热端、冷端的连接接口存在热阻过大问题,热量传递过程中存在明显的损耗,降低了整体热管理效率;三是系统协同性差,高温热管没有与动力设备的冷却系统、控制系统形成有效的协同,不能根据设备运行状态动态调整传热模式,造成热管理资源浪费或者不足。在集成过程中没有考虑到设备的振动、热膨胀等,长时间工作容易造成接口松动、热管变形等问题,影响集成的可靠性和传热效果,限制了高温热管应用价值的发挥。

三、高温热管在动力设备中高效应用的策略

3.1 优化材料适配工况

为解决材料适配性不够的问题,就要创建起“耐高温、抗腐蚀、高相容”的多元材料体系。管壳材料采用陶瓷基复合材料、难熔金属合金等高性能材料,碳化硅陶瓷基复合材料耐高温性能好,可以长期在1200℃以上工作,同时具有良好的抗腐蚀、抗振动性能,适合极端工况;表面涂层技术对管壳内壁进行改性,制备 Al_2O_3 、 Y_2O_3 等抗氧化涂层,提高材料高温抗氧化能力。工质选择上优先选用高温稳定性好、传热性能优的工质,如液态金属钠、钾及其合金,结合分子模拟技术优化工质成分,提高工质与管壳材料的相容性。吸液芯的设计采用多孔陶瓷、金属纤维编织等新型吸液芯结构,通过改变孔隙率、孔径分布等参数来加强毛细性能,选择耐高温金属基复合材料制备吸液芯,提高其在高温环境下的结构稳定性和使用寿命,从材料角度上实现高温热管和动力设备极端工况的精准匹配。

3.2 强化传热稳定调控

为了提高变负荷工况下传热的稳定性,可以从结构设计和主动调节两个方面来构建传热调节系统。在结构上采用变截面管壳,在吸热端加大传热面积,提高热流密度承载能力,防止局部过热,优化吸液芯结构,设计梯度孔隙率吸液芯,在工质回流关键处增大孔隙率,提高回流效率,解决变工况下回流不畅的问题,增设启动辅助结构,在管壳内壁设置微型加热单元,缩短启动滞后时间,快速响应设备启动阶段的热需求。在主动调控上,研发热流密度反馈自适应调控技术,在吸热端、放热端安装温度传感器和压力传感器,对热管运行状况实施实时监测,一旦出现热流密度突然变化的情形,便借助调节放热端冷却介质流量或者控制吸热端热接触面积

等手段,实现传热功率的即时调整,防止“烧干”、“传热停滞”等情况的发生。同时引入振动阻尼设计,在热管和设备连接处设置弹性缓冲结构,减少设备振动对吸液芯结构、工质回流的影响,保证变工况下传热过程的稳定性、连续性。

3.3 创新集成协同方案

对于集成设计不合理的问题,以“空间适配、低阻连接、系统协同”为原则,提出集成匹配方案。空间适配设计使用定制化的外形设计技术,按照动力设备内部空间参数用3D打印异形高温热管,精准匹配设备内部复杂布局,防止部件干涉;优化热管排布方式,采用阵列排布的方式来提高单位空间内传热功率,在有限空间内实现高效热管理。低阻连接设计上,研发高温密封连接技术,用金属密封环和陶瓷密封垫组合密封方式,提高接口密封性、耐高温性;通过表面抛光、钎焊等技术改善接口接触界面,降低接触热阻,提高热量传递效率。在系统协同设计方面,创建高温热管同动力设备冷却系统、控制系统之间的协同调控平台,把热管运行状态参数加入到设备整体控制系统当中,依照设备负荷变动来调节热管传热模式以及冷却系统运行参数,从而达成热管理资源的精准匹配,还要顾及设备热膨胀和振动状况,采取柔性连接和热补偿结构,改善集成可靠性,促使高温热管同动力设备高效协同运作。

3.4 智能监测保障可靠

3.4.1 构建多参数智能监测体系

利用光纤传感、无线传感等先进技术,建立高温热管温度、压力、振动、泄漏等多参数智能监测系统。采用耐高温光纤传感器嵌入热管内部,实时监测吸热端、放热端以及管壳关键部位的温度分布,准确捕捉温度波动异常,可以实现 $\pm 0.5^\circ C$ 的测温精度,满足动力设备极端工况下精准测温的需求,在管壳上设置传感安装槽,内置微型无线压力传感器,实时监测管内工质压力变化,利用压力阈值预警模型预判工质分解、泄漏等潜在故障,采用振动传感器采集热管运行过程中振动信号,利用频谱分析技术解析振动频率、振幅对热管结构完整性、工质回流效率的影响。同时搭建起边缘计算加云端协同的数据传输与处理平台,用5G、物联网等技术把监测数据低延迟实时传输出来,通过大数据分析技术对多维度数据进行筛选、融合分析和趋势建模,从而达到精准评价热管运行状况并预判异常的效果,为运维决策提供数据支持。

3.4.2 研发故障预警修复技术

根据智能监测数据,研发高温热管故障预警和自修复技术。收集各种工况下热管故障的案例,建立包含渗漏、工质损耗、吸液芯失效等10多种典型故障的特征数据库,用机器学习算法建立故障识别模型,把实时监测数据和故障特征数据进行对比,实现故障类型的精准识别和早期预警,预警响应时间 ≤ 3 秒,给设备维护提供准确的依据;对轻微泄漏故障,研发内置自修复密封材料技术,在管壳内壁涂覆温敏型陶瓷基修复涂层,当出现宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ 的微小裂纹时,涂层材料在高温($\geq 600^\circ\text{C}$)作用下快速软化流动并填充裂纹,冷却后形成致密密封层,实现泄漏的快速自修复;对严重故障,建立远程诊断与维护指导系统,集成AR可视化技术,将故障定位信息和设备三维模型叠加,给运维人员提供直观的故障定位和分步维护方案,降低现场维护难度和成本,保证高温热管在航空发动机、燃气轮机等相关动力设备中的长期稳定运行可靠性。

3.5 多场协同拓展场景

3.5.1 构建多场耦合仿真模型

考虑到动力设备运行过程中高温热管处在温度场、压力场、振动场、电磁场等多场耦合的环境中,进行多场协同设计。通过有限元分析软件(ANSYS、ABAQUS)和计算流体力学软件(Fluent)的联合仿真技术,建立高温热管多场耦合仿真模型,模型包括管壳、工质、吸液芯的多相流与热传导耦合过程,可以准确模拟多场作用下热管的传热特性、结构应力分布和工质流动状态,模拟误差控制在5%以内;用正交试验设计方法进行多参数仿真分析,确定温度梯度、压力波动、振动频率等多场参数对热管传热功率、等温性及结构寿命的影响规律,识别关键影响因素的主次关系,为热管结构优化和性能提高提供量化的理论依据。搭建高温热管多场耦合试验平台,用红外热成像仪、高速摄像机等精密设备采集试验数据,和仿真结果进行对比校验,对仿真模型的边界条件、材料参数进行修正和优化,大大提高模型的准确性、可靠性,实现多场耦合的精准设计和性能预判。

3.5.2 研发多场适配强化技术

针对多场耦合环境研发多场适配强化技术。在温度场和压力场的适配上,采用拓扑优化技术对管壳壁厚及内部支撑结构进行优化,在保证结构强度的基础上减少材料用量,提

高温管对高温高压环境的承载能力,可耐受 1500°C 高温、 10MPa 压力的极端工况;在振动场适配上,采用金属橡胶阻尼减振结构和钛合金抗疲劳材料组合方案,在热管两端连接部位设置弹性缓冲组件,可以衰减80%以上的设备振动传递,显著降低振动对热管结构的损伤;在电磁场适配上,采用氧化锆陶瓷、无氧铜等非磁性材料制备管壳和吸液芯,避免电磁场对液态金属工质流动和传热过程的电磁干扰,保证传热效率稳定。按照多场协同设计的理念,拓展高温热管在新能源动力设备、极端环境动力设备等新领域的应用,如氢燃料电池电堆热管理、深空探测核动力设备温控系统等应用,利用多场适配强化技术来提高热管在低温真空、强辐射等特殊环境下的适应性,突破传统应用场景的限制,拓宽应用场景边界和产业价值。

四、结论

高温热管在动力设备热管理方面有着不可替代的作用,但是其应用过程中存在着材料适配性差、传热稳定性差、集成设计不合理等主要问题。本文所提出的一系列优化、传热调节、集成创新、智能监控、多场协同策略,可以对上述问题给出相应的解决方法,使高温热管在极端环境下具备更好的适应性、稳定性、可靠性,进而推进高温热管与动力设备的高效协同。未来要以高性能材料研发等为重点,不断改进应用技术水平,为动力设备高效安全运行和节能降耗赋予更强的技术支撑。

[参考文献]

- [1]杨鑫,纪玉龙. 高温脉动热管的传热特性及传热极限可视化实验研究[J]. 原子能科学技术, 2025, 59(03): 558-565.
- [2]白玉潭. 高温钠平板热管的制备及其传热特性研究[D]. 桂林电子科技大学, 2024.
- [3]王恩培. 海洋条件下高温碱金属热管传热特性数值研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2024.
- [4]马莎莎,丁圣洁,刘利民,等. 高温热管碱金属工质的蒸发弯月面区域微观传热特性[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(05): 617-627.
- [5]杨义博,许辉,郑义,等. 大长径比高温热管传热性能试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(10): 280-286.