

Adaptability and Challenge of Heat-tube Phase Change Technology in Thermal Control of Space Environment

Wenfeng Jiang

Shenzhen Boshang Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This paper discusses the adaptability and challenge of heat pipe phase change technology in the thermal control of space environment. As an efficient thermal control method, heat pipe phase change technology is widely used in aerospace, electronics, energy and other industries, especially in the extreme environment. By comparing the performance parameters of aerospace and industrial heat pipes, the advantages and technical problems in space environment are analyzed. This paper also discusses how to overcome these challenges and achieve efficient and reliable thermal control. Through this study, it provides a reference for the future development of thermal control technology in the space environment.

Keywords

heat pipe phase change technology; space environment; thermal control; technical challenges; performance comparison

热管相变技术在空间环境热控制中的适应性与挑战

江文峰

深圳博熵科技有限公司, 中国 · 广东 深圳 518000

摘要

论文探讨了热管相变技术在空间环境热控制中的适应性与挑战。热管相变技术作为一种高效热控方法, 广泛应用于航空航天、电子、能源等行业, 尤其在极端环境中的应用显得尤为重要。通过对比宇航级和工业级热管的性能参数, 分析其在空间环境中的热控优势与面临的技术难题。论文还结合博熵科技的技术创新与应用实例, 探讨了如何克服这些挑战, 实现高效、可靠的热控制。通过本研究, 为未来空间环境热控制技术的发展提供参考。

关键词

热管相变技术; 空间环境; 热控制; 技术挑战; 性能对比

1 引言

随着航天技术的迅猛发展和空间探索任务的不断增加, 热控系统在空间环境中的重要性愈发凸显。在太空中, 温度变化剧烈, 热流密度高, 如何有效地管理和控制热量成为各类航天器设计中的关键问题。热管相变技术作为一种高效的热管理方法, 因其卓越的导热性能和稳定性, 逐渐成为解决空间环境热控问题的首选技术之一。

热管相变技术利用了相变材料在固液或液气相变过程中吸收或释放大潜热的特性, 从而实现高效的热传导和温度控制。该技术不仅在航天领域有广泛应用, 还被广泛应用于电子设备散热、能源系统、建筑供暖等多个领域, 展现出极大的应用潜力。

论文结合深圳博熵科技有限公司在热能领域技术研发的经验积累, 详细探讨热管相变技术在空间环境热控制中的

适应性与挑战。通过对比宇航级和工业级热管的性能参数, 分析其在空间环境中的优势与不足, 并结合博熵科技的实际应用案例, 探讨如何克服现有的技术挑战, 实现高效、可靠的空间热控系统。希望通过本研究, 为未来空间热控技术的发展提供有价值的参考。

2 热管相变技术的基本原理

2.1 热管的结构与工作原理

热管结构通常由管壳、毛细结构和工作液组成。其结构包括几个关键部分。管壳是热管的外壳, 通常由高导热材料如铜或铝制成, 以减少管壳的热阻。毛细结构是热管内部的一层多孔材料, 如烧结粉末、金属网或沟槽结构, 能够通过毛细作用将工作液输送到蒸发段和冷凝段之间。工作液是在热管内部循环的液体, 常见的有水、氨、乙醇等。工作液的选择依赖于热管的工作温度范围和具体应用需求^[1]。

工作原理如下: 蒸发段通过一端吸收热量, 使工作液蒸发为气体。在此过程中, 吸收了大量潜热, 从而降低了蒸发段的温度。蒸发生成的气体在热管内的压力差推动下, 迅

【作者简介】江文峰 (1989-), 男, 中国广东深圳人, 本科, 从事传热与空间热管理研究。

速流向热管的另一端，即冷凝段。在冷凝段，气体释放热量并凝结成液体，热量被传递到冷凝段的外界环境中。凝结后的液体通过毛细结构返回蒸发段，完成一个循环。通过这一循环过程，热管实现了高效的热传导和温度控制，具备优异的均温性和导热能力^[2]。

2.2 相变材料的选择与应用

相变材料在热管中的选择至关重要，因为它直接影响热管的性能和适用性。选择相变材料时，需考虑其相变温度、潜热、导热系数以及化学稳定性等特性。

相变材料的相变温度应与热管的工作温度范围相匹配。例如，水作为工作液时，其相变温度（100℃）适用于电子设备散热，而氨（-33℃）适用于低温环境下的热管理。相变材料的潜热越大，其吸收或释放的热量越多，从而提高热管的热传导效率。常用的相变材料如水、氨和乙醇都具有较高的潜热。相变材料的导热系数影响其热传导效率。高导热系数的材料能更快地传递热量，有助于提高热管的性能。相变材料在长期使用中应具有良好的化学稳定性，不会与管壳或毛细结构发生化学反应，从而保证热管的使用寿命和可靠性^[3]。

3 热管相变技术在不同领域的应用

3.1 航空航天

在航空航天领域，热管相变技术被广泛应用于航天器的热控制系统，以应对太空中极端的温度环境。这项技术能够有效管理和控制热量，确保航天器在白天高达数百摄氏度和夜晚降至零下数百摄氏度的温度下正常运行。具体应用包括卫星内部电子设备的温控、深空探测器的系统热管理，以及载人航天器的生命支持系统温度调节，保障宇航员的生命安全。

3.2 电子行业

随着电子设备性能的不不断提升，热管相变技术因其高效散热性能在电子行业中应用广泛。它可以快速将 CPU 和 GPU 产生的热量传导至散热器，确保高性能计算机和游戏机的稳定运行。在数据中心，热管技术提高了服务器的散热效率，降低设备温度，确保可靠性。此外，智能手机和平板电脑等移动设备在高性能运行时产生的热量也通过热管技术得到有效管理，提升用户体验和设备寿命。

3.3 能源行业

在能源行业，热管相变技术用于提高发电和储能系统的效率和可靠性。它在太阳能集热系统中帮助高效收集和传导太阳能热量，提高系统热效率。在核能发电中，热管技术有效管理核反应堆产生的高温热量，确保其安全运行。同时，在大规模储能设备如蓄电池和超级电容器中，热管技术管理充放电过程中产生的热量，延长设备寿命并提高安全性。

3.4 其他领域

除了上述主要领域，热管相变技术在其他建筑、医疗、汽车、工业制造等行业中也得到了应用，起到了降低能耗、维持稳定运行、提高安全性能、提高生产效率等效果。

4 宇航级与工业级热管性能对比

4.1 启动温度

宇航级热管需要在极端低温环境下工作，其启动温度通常低于 -100℃。这种低启动温度确保热管在太空中的极寒环境下能够迅速启动，保证航天器内部设备的正常运行。

工业级热管的启动温度通常在 30℃左右，适用于常规工业环境中的热管理需求。这类热管主要应用于常温或高温环境，如电子设备散热、工业设备热控等。

4.2 传热能力

宇航级热管的轴向传热能力通常超过 25W/CM²，而径向传热能力则高于 684W/M。高传热能力使得宇航级热管能够高效地管理航天器内部的热量，确保设备在极端温度环境下稳定运行。

工业级热管的轴向传热能力一般小于 5W/CM²，径向传热能力低于 80W/M。尽管传热能力相对较低，但对于常规工业应用已经足够，能够满足电子设备、工业机器等的散热需求。

4.3 均温性

宇航级热管的均温性通常小于 1℃，这意味着热管内部温度分布非常均匀，能够在极端环境下维持设备的稳定温度。

工业级热管的均温性一般小于 5℃，适用于常规工业环境中的热管理需求。尽管温度分布稍微不如宇航级热管均匀，但在多数工业应用中已经足够。

4.4 使用寿命

宇航级热管的使用寿命通常超过 10 年。长寿命的设计能够满足航天器长期任务的需求，确保在整个任务周期内提供稳定的热管理性能。

工业级热管的使用寿命一般为 3 年左右。尽管寿命相对较短，但在多数工业应用中，这样的寿命已经能够满足日常使用需求，并且相对较低的成本使其在商业应用中具备优势。

通过以上对比可以看出，宇航级热管和工业级热管在启动温度、传热能力、均温性和使用寿命等方面存在显著差异。这些差异反映了两种热管在不同应用领域中的技术要求和性能标准，帮助我们更好地理解和选择适合具体应用场景的热管技术。

5 空间环境热控制的技术挑战

5.1 极端温度与热流密度

在太空中，航天器处于阳光直射和地球阴影之间的温差可以高达数百摄氏度。例如，太阳光照射下的温度可能超过 100℃，而在阴影中温度可能降至 -100℃以下。这种极端温度变化要求热控系统具备极强的适应能力，以确保航天器内部设备在不同温度下均能正常工作。

航天器内部的电子设备和电力系统会产生高热流密度，导致局部过热。如果不能及时有效地散热，可能导致设备损坏甚至系统失效。因此，热控系统必须能够快速传导和散发热量，保持设备在安全温度范围内。

5.2 长时间稳定性与可靠性

热控系统需要在长时间运行中保持稳定性能，不能因材料老化或其他因素导致性能下降。热管相变技术在长时间运行中可能面临工作液蒸发、毛细结构堵塞等问题，影响其传热能力和均温性。

在太空中，任何热控系统的失效都会对任务产生严重影响，甚至危及航天器的安全。因此，热控系统必须具备高可靠性，确保在各种极端条件下均能正常工作。这需要通过严格的设计、制造和测试过程来保证。

5.3 其他技术难题

太空中的高能辐射可能对热控系统的材料和元件造成损伤，影响其性能和寿命。因此，热控系统需要具备抗辐射能力，以保证在高辐射环境中的可靠性。在微重力环境下，热控系统的工作液循环和相变过程会受到影响，可能导致传热效率下降。因此，需要专门设计的热管和相变材料，以适应微重力条件下的传热需求。航天器的设计要求热控系统必须具有轻量化和紧凑化的特点，以减少对航天器整体重量和体积的影响。这要求热控系统在保持高效传热能力的同时，尽可能降低其重量和体积。

总之，空间环境的独特性和复杂性对热控系统提出了诸多技术挑战。只有通过不断地技术创新和优化设计，才能克服这些挑战，确保航天器在极端环境下的正常运行。

6 解决方案与未来发展

6.1 创新解决方案

6.1.1 高效热管技术

微型热管具有更高的导热性能和灵活性，适用于空间有限的航天器内部。通过优化热管内部的毛细结构和工作液，进一步提升传热效率。在传统工作液中加入纳米颗粒形成纳米流体，就形成了纳米流体热管。这显著提高了热管的传热能力和均温性。纳米流体的高比表面积和高导热性使其成为高效热管的理想选择。

6.1.2 相变材料优化

具有高潜热、高导热性和化学稳定性的新型相变材料，可以适应空间环境的极端温度变化。这些材料不仅提高了热管的传热效率，还延长了其使用寿命。此外，将不同性质的相变材料复合在一起，结合其各自的优点，也可以提高热控系统的整体性能。例如，将有机相变材料与无机相变材料结合，既提高了传热能力，又增强了材料的稳定性。

6.1.3 先进制造技术

利用3D打印技术制造热管和散热器，不仅可以优化其内部结构，提高传热效率，还能减少制造成本和时间。3D打印还允许设计更加复杂和高效的毛细结构，进一步提升热管性能。

开发能够响应环境变化的智能材料，如温度敏感材料或形状记忆合金，用于热控系统。这些材料能够根据环境温度的变化自动调整其性能，提高热控系统的适应能力。

6.1.4 主动热控系统

利用热电效应实现主动冷却，通过电流控制冷却效果，

提供更精确的温度调节。热电冷却器具有无移动部件、响应速度快等优点，适用于需要精密温控的空间设备。

微流体系统通过控制微小液体通道中的流体流动，实现高效的热传导和散热。该系统体积小、重量轻，非常适合用于空间受限的航天器内部。

6.2 未来技术发展趋势

6.2.1 智能化与自适应性

未来的热控系统将更加智能化，能够根据环境变化自动调整工作状态，实现自适应热管理。通过结合传感器技术和人工智能算法，热控系统可以实时监测和分析温度变化，做出最优的热控决策。

6.2.2 轻量化与高效化

航天器对重量和能耗的严格限制要求热控系统必须轻量化和高效化。未来的发展将致力于开发新材料和新结构，进一步降低系统重量，提高传热效率。例如，采用超轻量材料和高导热结构，实现更高的性能比。

6.2.3 综合热管理系统

随着航天任务的复杂化，未来的热控系统将更加综合和多功能。除了热控，还将集成其他环境控制功能，如辐射防护、微重力适应等，提供全面的环境控制解决方案。

6.2.4 多功能相变材料

开发具有多功能的相变材料，如同时具备导热、储能和防辐射功能的复合材料。这些材料能够在单一系统中实现多种功能，提高系统的集成度和可靠性。

6.2.5 国际合作与标准化

热控技术的发展需要全球范围内的合作与交流。通过国际合作，共享最新研究成果和技术，推动热控技术的标准化和规范化，促进航天器热管理系统的统一和优化。

未来，随着创新解决方案的不断涌现和技术发展的不断推进，热管相变技术在空间环境热控制中的应用将更加广泛和高效，为人类的太空探索和航天事业提供坚实的技术保障。

7 结语

热管相变技术在空间环境热控制中非常重要，通过深入研究其结构、工作原理和相变材料，并广泛应用于航空航天、电子和能源行业，我们能更好地优化这一技术。面对极端温度和长时间稳定性等挑战，创新解决方案如微型热管、纳米流体和智能材料不断涌现，推动了热控系统的发展。随着智能化和高效化等趋势的发展，热管相变技术将在未来航天任务中发挥更关键的作用，确保更高效、更可靠的空间热控制系统。

参考文献

- [1] 江浩文,刘起汉.高温热管应用研究进展与展望[J].甘肃科技, 2024,40(1):66-69+73.
- [2] 满学鹏,顾炜莉,易小芳,等.热管真空管太阳能集热器研究进展及应用[J].真空科学与技术学报,2021,41(4):318-325.
- [3] 陈久林,段洋,王志雄.相变储热技术的研究现状及应用[J].广东化工,2020,47(2):101-104+110.