

面向增材制造的复杂流道冷却结构优化设计

黄家宁

天津蓝巢电力检修有限公司 天津

【摘要】增材制造技术的迅速发展为复杂流道冷却结构的设计提供了新的机遇。本研究旨在探索基于增材制造的复杂流道冷却结构的优化设计方法，旨在提高热管理效率。通过对冷却通道形态的灵活设计和优化，能够有效提高冷却系统的热传递性能，同时降低传统冷却结构中常见的能量损失。本文探讨了采用多种优化算法，如拓扑优化和参数优化，来设计复杂流道冷却结构，并结合增材制造工艺的特点，优化了设计的可制造性和性能。优化后的复杂流道结构能够显著提升冷却效率，并且在实际应用中具有较大的潜力。

【关键词】增材制造；复杂流道；冷却结构；优化设计；热管理

【收稿日期】2025 年 4 月 13 日

【出刊日期】2025 年 5 月 23 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250226

Optimized design of complex flow channel cooling structure for additive manufacturing

Jianing Huang

Tianjin Launch Electric Power Maintenance Co., Ltd., Tianjin

【Abstract】The rapid development of additive manufacturing technology provides new opportunities for the design of complex flow channel cooling structures. This study aims to explore the optimized design method of complex flow channel cooling structures based on additive manufacturing, with the goal of improving the efficiency of thermal management. Through the flexible design and optimization of the morphology of the cooling channels, the heat transfer performance of the cooling system can be effectively enhanced, while reducing the energy losses that are common in traditional cooling structures. This paper discusses the use of various optimization algorithms, such as topological optimization and parametric optimization, to design complex flow channel cooling structures. Combining with the characteristics of the additive manufacturing process, the manufacturability and performance of the design are optimized. The optimized complex flow channel structure can significantly improve the cooling efficiency and has great potential in practical applications.

【Keywords】Additive manufacturing; Complex flow channel; Cooling structure; Optimized design; Thermal management

引言

随着高性能电子设备和热管理系统需求的增加，冷却效率成为设计的关键因素。传统冷却方法多依赖简单的冷却通道和有限的结构设计，存在较大的热传导和流动损失，无法满足现代复杂系统的需求。增材制造技术的出现，突破了传统制造方式的局限，使得设计人员能够自由创造复杂的冷却通道结构，从而大幅提升热管理能力。本研究探讨了如何利用增材制造对复杂流道冷却结构进行优化设计，通过精细化设计满足更高效的冷却需求。本研究不仅关注冷却性能的提升，还考虑制造过程中的可行性和结构稳定性，力求在设计中找到最佳平衡点，推动冷却技术的进一步发展。

1 增材制造技术与复杂流道冷却结构的优势

增材制造技术，因其独特的设计灵活性和精密制造能力，已逐渐成为优化复杂流道冷却结构的重要手段。在传统制造方法中，冷却通道的形状和布局通常受到加工工艺的限制，这使得热管理系统的设计和制造存在较大的局限性。相比之下，增材制造能够在三维空间内自由构建复杂的内部结构，特别是流道的设计更加灵活，能够在设计中充分考虑到热流的分布和冷却效果。这一优势使得在优化冷却系统时，增材制造不仅能够实现传统工艺无法加工的形状，还能在结构上提高整体的热交换效率。

增材制造通过逐层堆积材料，能够在部件内形成

复杂的内部流道结构,从而显著提升冷却效果。这些流道可以精确地适应特定的冷却需求,并根据热源的位置进行优化。传统冷却结构多为直线型通道,其内部流体流动容易受到死角和急剧转弯的影响,导致局部热量堆积和冷却效果不均匀^[1]。而通过增材制造,设计师可以根据需要在冷却通道中设计出曲线、分叉等多样化的几何形态,使得冷却液流动路径更为高效,进而提高热交换能力,减少能量浪费。增材制造也能在制造过程中优化流道的尺寸和布局,最大化地提高冷却系统的散热性能。

增材制造不仅能够提升冷却结构的性能,还能在制造过程中提高生产效率和降低成本。由于增材制造的精度较高,能够在一体化的制造过程中完成复杂结构的生成,这不仅减少了传统冷却系统所需的多次加工和组装步骤,还能够设计阶段快速验证和迭代。通过数字化设计和快速制造的优势,增材制造大大缩短了从设计到生产的周期,降低了原材料的浪费,并且通过智能化的生产方式,提高了设计的可控性和制造的一致性。这一特点使得增材制造在实际应用中具有较大的市场潜力,尤其是在需要高效冷却的领域,如电子设备、高性能发动机和激光冷却系统等。

2 优化方法在复杂流道冷却结构设计中的应用

在复杂流道冷却结构的设计中,优化方法起着至关重要的作用,它能够显著提升冷却效率并改善热管理性能。传统的冷却通道设计往往依赖于经验和试错方法,设计周期长且效果不一定理想。而在增材制造技术的支持下,优化算法的应用使得设计过程更加精准和高效。通过引入拓扑优化、形状优化等先进优化方法,能够在保证结构强度和稳定性的前提下,精准调整流道的形状、布局和尺寸,提升冷却效果。这些优化方法不仅在宏观设计上进行调整,还能够深入到微观层面,细化每一条流道的设计,确保热流在冷却系统中的分布更加均匀,减少热积聚区域,优化热传递效率。

在具体应用中,拓扑优化是当前广泛采用的一种方法,它能够通过算法自动寻找结构中最有效的物质分布,最大程度地减少不必要的材料消耗并提高结构的功能性。对于冷却结构而言,拓扑优化能帮助设计师在复杂的热负载区域内,通过改变流道的几何形状,确保冷却液能够均匀流过关键部位,增强热交换效率。参数优化也是优化设计中不可或缺的一部分。通过对冷却结构的多个设计变量进行系统化调整,参数优化能够确保每个冷却通道在不同工作条件下的最佳表现。这种方法通过考虑流动阻力、热传导和流体动力学等

因素,进一步提升了冷却系统的整体性能。

优化方法的应用不仅限于流道设计本身,它还包括对制造过程的优化。增材制造所具备的自由度和灵活性使得优化设计能够更好地与制造工艺相结合,确保设计方案不仅在理论上具有优势,同时在实际生产中也具备可行性^[2]。在这一过程中,优化算法考虑到材料的特性、打印方向以及精度要求等多个因素,使得设计的冷却结构既能满足热管理需求,又能确保在增材制造过程中实现高质量的生产。随着优化方法与增材制造技术的不断发展,复杂流道冷却结构的设计将朝着更加高效、精确和经济的方向迈进,推动先进热管理技术在工业和科研中的广泛应用。

3 增材制造对冷却效率的提升与挑战

增材制造技术通过提供更高的设计自由度,使得冷却结构的效率得到了显著提升。在传统冷却系统中,流道的设计受限于加工工艺,往往存在无法有效覆盖热源的死角以及流动不均的情况。而增材制造能够根据冷却需求自由设计复杂的流道形状,甚至实现多分支、螺旋等结构,这些创新设计能够显著改善冷却液的流动路径,从而提高整体热交换效率。复杂的内部通道和更细致的结构设计能够确保热量在各个区域均匀分布,减少局部过热问题,进而提升了设备的散热效果,尤其在高性能电子设备和工业系统中具有显著的应用价值。

尽管增材制造在提高冷却效率方面表现出色,实际应用中仍面临一定的挑战。增材制造技术的精度、材料选择和生产速度是影响冷却效率提升的关键因素之一。虽然增材制造能够构建复杂的冷却通道,但其表面质量和尺寸精度常常受限于打印过程中的微小误差,可能会影响流体的流动特性和热交换效果。当前增材制造所使用的材料种类较为有限,尤其是在高温环境下,材料的导热性和耐高温性能是决定冷却效率的重要因素。如何选择和研发适合的高导热性材料,仍然是提升冷却效率的一大挑战。

在增材制造过程中,还需要面对结构的可靠性和制造过程中的可控性问题。尽管增材制造能够实现高度自由的设计,但其制造过程中的热梯度、材料沉积方式和打印方向等因素,可能导致冷却结构的内应力分布不均,影响结构的长期稳定性和耐用性^[3-7]。在设计和生产过程中,必须综合考虑这些潜在问题,采用合适的后处理方法,确保冷却结构不仅能有效提升热管理效率,还能满足长期运行中的机械强度和可靠性要求。解决这些挑战,将有助于增材制造在高效冷却系统中

的应用进一步推广。

4 基于增材制造的冷却结构设计优化案例分析

在基于增材制造的冷却结构设计优化过程中,许多实际案例展示了其在提高热管理性能方面的巨大潜力。在高性能电子设备中,传统的冷却系统通常依赖于简单的空气散热或液体冷却通道,而这些系统的局限性主要体现在流体的流动路径不够优化,导致热量无法均匀地散发。通过增材制造技术,设计师可以设计出复杂的冷却通道结构,如螺旋形或分叉型流道,以确保冷却液能够更高效地流经热源区域。这种设计不仅能够改善冷却效率,还能避免局部过热和能量浪费,提高了设备的稳定性和使用寿命。在一些电子组件的优化设计中,通过拓扑优化和流体动力学分析,进一步优化了流道的布局,最大程度地提高了热交换效率。

另一个典型的应用案例是在汽车发动机的冷却系统设计中。在传统的发动机冷却系统中,冷却通道的设计往往较为简单,难以应对高负荷和高温环境下的冷却需求。通过增材制造技术,设计师能够根据发动机内部温度分布的具体情况,优化冷却系统的结构,实现更为精细的冷却设计^[8]。某些发动机冷却系统的优化过程中,采用了通过增材制造技术构建的复杂流道,这些流道能够在发动机的热源周围形成一个多维度、立体的冷却网络,保证冷却液能够在各个位置均匀分布。这一设计显著提高了发动机的热管理效率,降低了温度过高导致的性能衰退,同时减少了能量消耗,提升了发动机的整体效能。

增材制造还被广泛应用于航空航天领域的冷却系统设计中。航天器和飞行器的电子设备及其关键部件通常面临极端的热负荷,因此在冷却结构的设计中需要极为复杂且精确的优化方案。通过增材制造技术,设计师可以在冷却系统中实现更为复杂的几何形状,优化流道的路径和布局,以应对高速气流或高热负荷环境下的冷却需求。某航天器的冷却系统在增材制造优化设计后,采用了复杂的内部冷却通道,能够有效地分散热量,避免高温区域的形成,确保电子元件在极端环境下的正常运行。这些案例展示了增材制造技术在冷却结构设计中的实际应用,不仅提升了系统的冷却性能,还大幅缩短了设计和制造周期,使得创新型冷却技术能够更快地投入使用。

5 结语

基于增材制造的冷却结构设计优化,不仅为提升热管理效率提供了新的解决方案,还有效克服了传统冷却系统在复杂应用中的局限性。通过灵活的设计优化和精确的流道控制,增材制造技术显著提升了各类设备的散热性能,推动了电子、汽车、航空航天等领域的技术进步。尽管取得了显著成果,制造精度、材料选择和结构稳定性等挑战仍需持续攻克。未来,随着技术的不断发展,增材制造将在冷却系统设计中展现出更广阔的应用前景,推动更多高效能设备的创新与发展。

参考文献

- [1] 郑楠.面向增材制造的隐式表示结构的自支撑优化[D].中国科学技术大学,2024.
- [2] 赵冬华,张国权,阮凯程,等.面向航空航天轻量化结构的机器人化增材制造技术研究进展[J].航空制造技术,2024,67(19):71-91.
- [3] 王森林.场驱动多信息增材制造建模与数据处理方法研究[D].华中科技大学,2024.
- [4] 时光辉,武文华,陶然,等.增材制造技术在飞行器结构上的应用需求分析[J].机械工程学报,2024,60(11):74-84.
- [5] 孟德状,杨伟东,蔡子行,等.面向增材制造的数字孪生实施方法综述[J].计算机集成制造系统,2024,30(04):1171-1188.
- [6] 柯文超.NiTi 形状记忆合金电弧增材制造及成形性机理研究[D].电子科技大学,2023.
- [7] 赵志斌,王晨希,张兴武,等.激光粉末床熔融增材制造过程智能监控研究进展与挑战[J].机械工程学报,2023,59(19):253-276.
- [8] 蒋周明矩,熊异,王柏村.面向工业 5.0 的人机协作增材制造[J].机械工程学报,2024,60(03):238-253.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

