文章编号:1674-2869(2026)02-0201-08

热声回热器研究进展

杨 柳,鄂 青*
武汉工程大学光电信息与能源工程学院、数理学院,湖北 武汉 430205

摘 要:热声回热器作为热声装置的核心部件,其研究对于推动热声技术的发展具有重要意义。本文整理了近年来热声回热器的研究进展。首先,从结构设计的角度出发,对板叠式、丝网式、蜂窝陶瓷和分层结构回热器的设计与优化进行了分析比较,深入剖析了不同结构回热器的性能特点、适用场景与瓶颈问题。其次,总结归纳了有关回热器的声场、流场特性以及频率特性,列举了基于传输矩阵、热声软件模拟和特征时间优化等方法的优化策略,评估了其适用性与局限性。再次,结合典型热声系统案例,探讨了不同类型回热器在热声发动机、制冷机及高频微型系统等实际应用中的表现与优化路径。最后,展望了3D打印技术及声学超构材料等应用于热声回热器中的可行性,提出了多学科融合、多目标优化、实验与仿真协同的研究方向,以期为热声回热器的进一步研究提供有益的参考和指导。

关键词:回热器;热声热机;性能特点;优化设计
中图分类号:TB65 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202504002

Research progress on thermoacoustic regenerators

YANG Liu, *E Qing**
School of Optical Information and Energy Engineering, School of Mathematic and Physics, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: As the core component of thermoacoustic devices, regenerator plays a critical role in advancing thermoacoustic technology. In this paper, we reviewed recent research progress on thermoacoustic regenerators. First, from the perspective of structural design, various regenerator configurations—including plate-stacked, wire mesh, honeycomb ceramic, and layered structures—were analyzed and compared, with detailed examination of their performance characteristics, suitable application scenarios, and existing bottlenecks. Second, studies on the acoustic field, flow field, and frequency characteristics of regenerators were summarized. Optimization strategies based on the transfer matrix method, thermoacoustic software simulation, and characteristic time analysis were introduced and evaluated in terms of their applicability and limitations. Furthermore, by examining typical thermoacoustic systems, the performance and optimization pathways of different regenerators in practical applications, including thermoacoustic engines, refrigerators, and high-frequency micro-systems, were discussed. Finally, the feasibility of applying emerging technologies such as 3D printing and acoustic metamaterials to regenerator development was explored. Promising research directions involving multidisciplinary integration, multi-objective optimization, and closer collaboration between experiments and simulations were proposed, with the aim of providing valuable insights and guidance for future studies on thermoacoustic regenerators.

Keywords: regenerator; thermoacoustic engine; performance characteristic; design optimization

收稿日期:2025-04-03
基金项目:湖北省教育厅科学研究计划项目(B2023040);武汉工程大学研究生教育教学改革研究项目(2024JYXM20)
作者简介:杨 柳,硕士研究生。Email:1309358177@qq.com
***通信作者**:鄂 青,博士,副教授。Email:eqinghust@163.com
引文格式:杨柳,鄂青.热声回热器研究进展[J].武汉工程大学学报,2026,48(2):201-208.

在能源需求不断攀升且环境问题愈发突出的形势下，探寻高效、清洁、可再生的能源转换技术已成为全球科学研究的热点。随着“双碳”目标的提出与能源安全新战略的深入实施，传统化石能源系统的高污染、高排放问题日益凸显，亟需发展新型高效能量转换与热管理技术。热声系统凭借其结构简单、无污染、无机械运动部件、可靠性高、易于小型化等独特优势，逐渐受到广泛关注。尤其在中低温余热回收、空间电源、微型制冷以及特殊环境能源系统等领域，热声技术展现出良好的应用前景。

热声回热器是热声系统的核心部件，主要作用是实现工质的热能与声能之间的高效转换，通过合理设计回热器的结构和材料，有效提高回热器两端的温度梯度，增强热声效应，从而提升热声系统的整体性能。近年来，随着计算技术的发展和实验手段的进步，热声回热器的研究取得了显著进展。从早期的理论分析与简单实验到对性能的深入探索、从板式到复杂新型结构开发、从单一到复合材料应用，回热器的设计理念与制造工艺不断更新、性能稳步提升。早期的热声回热器研究多集中于传统的板叠和丝网结构，侧重基本的热声理论与实验验证。随着数值仿真技术与新材料工艺的发展，研究者逐渐将目光转向结构更为复杂、性能更为优越的蜂窝陶瓷及梯度分层等新型回热器结构。与此同时，对回热器内部声场与流场耦合机制、频率特性与系统匹配关系等关键问题的研究也日益深入。此外，热声回热器的应用已从传统制冷、发电领域拓展至航空航天、深海探测、微纳电子等新兴领域，迎来新机遇的同时也面临着更高的性能要求。

尽管已有研究已取得了显著成果，但当前仍存在若干尚未解决的关键问题。例如，高频工况下回热器内部流动与换热的微观机制尚不明确；复杂结构回热器的制造工艺与成本控制仍是制约其工程化的重要因素；多物理场耦合作用下的性能预测与系统集成理论仍需进一步完善。此外，新材料和新型制造技术在回热器中的应用潜力虽已初步显现，但其具体实现路径与性能增益仍需系统研究。

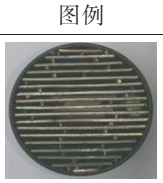
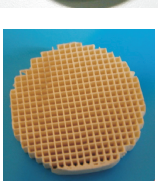
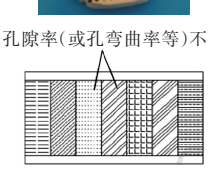
为系统梳理热声回热器的研究现状、分析现存问题并展望未来发展方向，本文从结构类型、性能特性、优化方法以及实际应用4个层面，对近年来国内外关于热声回热器的研究现状进行系统梳理，分析其可能存在的问题，并对未来的研究方向进行展望，以期为热声回热器的研究提供有益的参考和借鉴。

1 结构研究

研究者们对回热器的结构进行了广泛而深入的探索，开发出多种具有不同特点和应用场景的结构类型。这些结构各有优势与局限，在不同工况下展现出不同的性能表现，深入理解这些结构的性能特征与适用边界，是优化选择的基础。对不同类型回热器的性能对比与评述如表1所示。

表1 不同类型回热器的性能对比与评述

Table 1 Performance comparison and evaluation of various regenerators

回热器类型	核心优势	主要局限	评述	图例
板叠式回热器	制造简便且成本低廉、气体通道规则、流动阻力较小、工作效率高	孔隙率较大、高频适应性差、横向导热性能弱	中低频热声系统的优选，但异形结构需突破3D打印制造瓶颈；高频工况需优化微尺度几何参数	
丝网式回热器	成本低廉、工艺简单、易于实现且具有良好的横向导热性能，动态压降与长度、孔隙率呈线性关系，相较于板叠式回热器更易起振[1]	在高频系统中压力振幅不足	低频系统（尤其是行波机）的主力，但孔隙率优化矛盾突出；混合填充结构需解决层间匹配理论缺失问题	
蜂窝陶瓷回热器	热导率较高，热膨胀系数较低，内部的流道规整，流动阻力小，单位体积换热面积大，高温稳定性好，可适应不同工况需求	热应力易导致开裂失效	特别适用于高温、高频场景，但需开发高韧性陶瓷复合材料；孔形梯度设计提升抗热震性	
分层结构回热器	工质在不同层间可实现更有效的热量回收和释放，温度分布均匀、储热性能好、流道分布优、回热效率高、工况适应性强	分层策略依赖经验试错	通过材料/目数梯度设计优化局部热力过程，潜力巨大，但需建立层厚及材料的普适性设计准则	

1.1　板叠式回热器

板叠式回热器的几何构型与尺寸参数对整体性能具有决定性影响。在基础理论方面,刘益才等[2]将回热器气体通道看成多层矩形导管的相互叠加,并以此为基础对其进行系列研究;阚绪献等[3]运用构形理论推导出最优平板间距及平板数解析式,并分析了运行频率、温度梯度和平板厚度等变量对性能的影响规律,二者共同构建了板叠设计的底层理论框架。

辛天龙[4]针对亚毫米尺度的几何参数(如板厚与板间距)进行优化,通过改变结构刚度,几何尺度得以影响回热器的动力学频率响应,说明了微尺度精确控制对回热器性能影响的重要性。Hariharan等[5]则聚焦于宏观几何形貌差异(如回热器长度与板叠形状变化)对热声发动机性能的关联性,从宏观角度进一步探讨了几何构型对整体性能的影响。

在优化方法论方面,Zink等[6]采用有限元建模和单纯形法,量化了回热器长度与直径在平衡热损失与声功输出方面的最优解;刘益才等[7]和张明研[8]基于高次波衰减原理,明确了不同频率声源下板叠回热器的最佳纵向长度的选择依据;颜鹏[9]提出的能够有效提升热声转换效率的异形板叠设计,实现了构型上的创新突破,但异形结构制造难度较高,未来研究可探索如3D打印等高精度成形技术,以实现复杂几何构型的高效制备。

可见,板叠的结构形式、位置尺寸及几何形状差异会显著影响回热器的性能,其设计和优化是一个多因素、多目标的复杂问题。通过深入理解几何参数、材料特性、声波传播特性等因素对回热器性能的影响,可以为热声系统的优化设计提供重要支持。

1.2　丝网式回热器

金属丝网式回热器因其低流动阻力和高比表面积(源于丝网填料的孔隙结构)而展现出显著优势[10]。深入研究表明,孔隙率是影响性能的关键参数:其增大虽可进一步降低流阻,但会削弱换热效率,进而影响工质的泵热能力[11-12]。因此,优化孔隙率以在流阻与换热效率之间取得最佳平衡是丝网式回热器设计的核心挑战之一。

关于丝网式回热器填料的研究表明,水力半径的优化对抑制黏性耗散具有关键作用:采用较小目数(较大水力半径)的丝网可显著提升水力半径与热渗透深度之比,降低黏性耗散并提高压比[13]。铜丝网与不锈钢丝网的性能对比实验证实,材料热导率与表面特性直接影响局部热传递效率[14],但材料组合在热循环下的长期稳定性仍需深入验证。此外,文靖等[15]的多层丝网设计虽通过目数梯度配置(高温层100目→低温层60目)使黏性耗散降低了28%,凸显了结构优化的潜力,但其层间匹配规则仍受限于经验试错法,暴露了结构参数优化的局部性缺陷。

为突破上述局限,王强等[16]提出了一种新型径轴向混合填充丝网式回热器(如图1所示),通过拓扑结构重构有效解决了径向填料流场均匀性与轴向填料低流阻之间的矛盾,并实现了二者的协同增益。该结构中,径向单元负责保障工质分布均匀性,轴向流道则将关键界面压降降低至纯径向结构的1/3,使回热效率提升了23%,轴向导热损失降低了37%。此项工作标志着丝网式回热器的研究从单参数调优向多物理场耦合设计的跃迁。

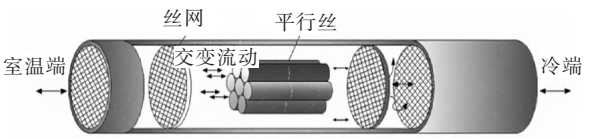


图1　新型径轴向混合填充丝网式回热器结构示意图

Fig. 1　Structure of a novel radial-axial mixed wire mesh regenerator

目前对于金属丝网式回热器的基础层研究(孔隙率/目数优化)已建立了完善的设计准则,而前沿探索(混合填充/多层梯度)仍有待攻克的瓶颈。未来突破可以考虑融合智能材料设计(如纳米涂层丝网增强传热)、拓扑优化算法(基于流场仿真的孔隙率分布设计)及多目标控制等策略。

1.3　蜂窝陶瓷回热器

蜂窝陶瓷回热器的首要功能是在两股气流之间高效传递热量,研究主要集中在传热特性的实验和数值分析上。单元尺寸及孔道几何构型(如圆形、方形、六边形等典型孔形)作为关键设计参数,不仅显著影响传热效率和流阻特性,更决定了热应力的空间分布规律[17]。Kang等[18]通过引入归一化切换时间,将蜂窝长度、直径和切换时间的影响整合到同一曲线中,为估算蜂窝陶瓷蓄热器的性能提供了有效工具。Ai等[19]采用扰动解析-数值方法优化了传热特性,确定了最大温度效率的最优切换时间。李银宾[20]通过实验研究揭示了热声耦合机制:加热功率提升可显著降低起振温度并增大压力振幅(与频率呈弱相关性)。在最大化传热的同时,最小化压降同样至关重要,等效直径、气体温度和速度、回热器长度和切换时间共同

构成多参数耦合作用体系，需在传热强化与流阻抑制间建立动态平衡[21-22]。

为实现回热器在高温交变工况下的长寿命运行，除需优化其传热与流动特性外，有效应对因交变热应力引发的热机械可靠性问题，亦是核心挑战之一。频繁热循环引发的非均匀热应力易导致陶瓷基体脆性断裂失效，Wang等[23]通过参数化热应力建模，量化了结构参数对热震抗性的影响规律，为抗损伤设计奠定理论基础。未来突破方向需聚焦材料-结构双维度创新：在材料选择层面开发高韧性陶瓷复合材料以耐受极端热载荷；在结构设计层面优化孔形梯度分布与壁厚参数，通过热-力耦合设计提升系统在高温工况下的循环耐久性。

1.4 分层结构回热器

适当的分层填充可以提高性能系数（coefficient of performance，COP）[24]，不同分层形式的回热器在不同驱动声压幅值下，声场分布、热流分布、相位差分布以及制冷量和COP特性规律也不尽相同[25]。当采用回热器的孔隙率随温度降低而增大的R模型时，制冷温度最低，流动损失最小，制冷效率最高，且其热流量小、相位差变化小。这种分层方式进一步证明了分层回热器在优化热声制冷机性能方面的优势。

分层结构回热器的核心价值在于通过空间异质性设计匹配温度场梯度，优化局部热力过程。全永超[26]的研究初步验证了泡沫陶瓷与金属丝网复合分层的可行性。然而，当前研究存在明显局限：分层策略（如材料选择、层厚、梯度函数）多基于试错或特定工况优化，缺乏普适性设计准则；层间界面处的热-流-声耦合效应及其对整体性能的影响机制尚不清晰。未来需结合多尺度模拟与精确实验测量，建立分层结构与系统性能的定量映射关系，并探索智能响应材料在分层设计中的应用潜力。

2 特性研究

热声回热器的性能不仅取决于其结构设计，还与声场、流场特性和频率特性密切相关。深入解析这些特性及其相互作用，是理解能量转换微观机制和指导优化设计的关键。

2.1 声场、流场特性研究

热声回热器的声场、流场特性研究呈现多维度递进特征。在数值方法基础层面，毛伊依等[27]建立的二维可压缩湍流高精度模型，系统揭示了典型工况下回热器内部压力-流速的相位分布规律，为性能预测提供了基础工具。

在环形管行波热声发动机中，回热器在环形管直线段的特定位置被证实可最大化声能转换效率[28]；Sharify等[29]通过多级行波热声制冷机实验发现，湿式回热器因强化了工质相变过程中的热质传递，其声场特性显著优于传统干式结构。这两类研究分别从宏观布局（位置优化）和微观界面（工质相态）维度诠释了声场调控路径。

在声阻抗特性领域，较小相对水力半径与特定行波阻抗相角及无量纲阻抗幅值的匹配可提升声功传输效率[30]。该理论在交变流动动力学层面获得了佐证，孙生生等[31]的数值模拟揭示出回热器内压力/速度场呈现准线性分布特征，且阻力系数具有显著周期性振荡特征。此外，涡旋动力学研究揭示了更深层的作用机制：赵殿鹏[32]在Rijke管中发现端口涡旋周期性生成-破碎主导泵热过程；颜鹏[9]则通过异形板叠与平行板叠的对比实验，证实异形结构通过增强局部涡旋强度（较平行结构提升37%），显著促进流固能量传递。此现象与张宁模型形成机理呼应——异形结构本质上通过改变局部水力半径优化了声阻抗匹配。

综合表明，当前声流场研究大致可分为3个层面：基础层（毛伊依模型）解决计算精度问题，系统层（位置/工质优化）实现声场重构，而前沿层（异形结构/涡旋控制）则深入到能量转换的本征机制。然而，现有技术仍存在一些局限性。例如，数值模拟在复杂工况下的精度仍有待提高，优化设计的复杂性较高，实际应用中需要平衡性能优化与成本、制造难度等因素。此外，多工况适应性也是热声回热器在实际应用中的重要特性。通过综合考虑声场、流场、声阻抗特性和漩涡结构的影响，可以为热声回热器的设计提供更全面的理论支持，推动热声技术的进一步发展。

2.2 频率特性研究

热声回热器的频率特性研究呈现出基础理论探索与高频应用拓展的双轨演进路径。在基础理论层面，赵爽等[33]通过对热声热机中连续结构回热器的频率特性进行综合参数法和分布参数法的深入分析，证明了频率特性是回热器本身的固有属性。黄谦等[34]引入结构声理论，对回热器中薄板的振动模态进行建模分析，发现薄板振动受弯曲波影响，且固有频率与厚度、长度相关。相较而言，康慧芳等[35]的创新性在于构建跨尺度关联模型——通过热声学线性公式分解提炼的操作因子，首次量化了工作频率与几何参数（长度、水力

半径)的映射规律,这使得在不同工作频率下优化热声转换效率成为可能。

在高频领域研究中,张富珍等[36]构建了高频下热声学元件的热声学特征研究框架,通过实验获取了高频热声谐振系统内部的声场分布特征,并精确测量了热声元件的关键声学参数,包括声吸收系数等。李姗姗等[37]针对超高频微型脉冲管制冷机回热器进行了优化研究,总结了在不降低效率的前提下减小回热器尺寸的设计方法,从而为超高频回热器的设计提供了理论指导,显著减少了设计计算量。

纵观研究演进,频率特性认知经历了从静态固有属性到动态振动机制,再到主动设计因子的深化过程;高频研究则完成从现象观测向微型化设计的应用跨越。当前技术在低频段(<0.5 kHz)已形成成熟的设计理论体系,而高频段(>1 kHz)仍面临微型化导致的声阻抗失配问题。通过不同角度对回热器特性进行探索,深入理解回热器的固有频率特性、振动行为及声学参数,可更精准地设计和优化回热器,以满足不同应用场景的需求。

3　优化方法研究

为了提高热声回热器的性能,优化方法的研究尤为重要。目前,学者们已经提出并研究了通过数值模拟和理论分析相结合的多种结构优化策略。除结构优化外,材料优化同样是提升热声回热器性能的关键途径之一。Al-Nimr等[38]用相变材料取代传统的不锈钢丝网,显著提高了回热器的效率。Zahi等[39]进一步发现泡沫材料能够显著增强回热器壁面的传热效果,从而改善传热速率。表2列举了基于分析方法改进的多种优化方法。

在数学基础层,辛矩阵法与散射矩阵为声热耦合分析提供了理论基石,二者分别服务于网络级能量损耗诊断与微结构声学优化。在数字工具层,可视化仿真软件的开发与多模型对比研究标志着数字工具从单一平台应用向多模型协同验证升级。而系统集成优化领域呈现学科融合特征,有限时间热力学的生态学优化和多级配置优化,分别从时间维度与空间维度拓展系统优化的边界。

未来热声回热器的优化设计需要在理论研究和工程应用之间找到更好的平衡。一方面需进一步发展和完善理论分析方法,提高优化结果的精度和可靠性;另一方面,需要开发更高效、更实用的数值模拟工具,降低优化成本,提高工程应用的效率。同时,结合多种优化方法的优势,开发综合性的优化策略,将是未来热声回热器优化设计的

表2　热声回热器优化方法对比分析表

Table 2　Comparison of thermoacoustic regenerator optimization methods

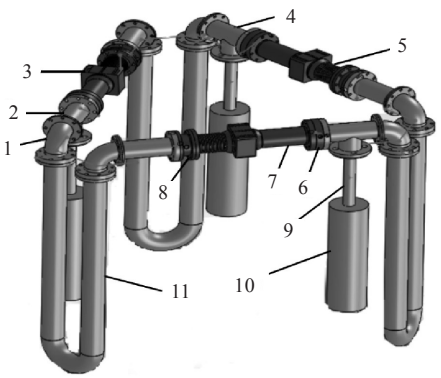
优化方法	核心机制	优势	局限性	适用场景	创新性评价
辛矩阵分析[40]	传输矩阵→阻抗矩阵转换,利用辛对称性分析本征阻抗	网络级能量损耗精确定位;揭示部件间耦合机制;数学框架严谨	依赖复杂数学推导;对模型简化要求高;工程实操性较弱	理论机理研究;多部件耦合系统诊断	数学基础层创新
散射矩阵优化[41]	声学多端口散射矩阵建模,谱范数分析最优声学状态	微观结构-声学性能直接关联;明确孔形频段适应性(圆形/方形→低频,平行板→高频)	高频模型简化假设多;未考虑热-声强耦合效应	回热器微结构设计;声学阻抗匹配	声学基础层创新
软件模拟优化[42]	可视化仿真平台实现参数交互式调整	设计效率显著提升;直观展示参数影响;降低理论分析门槛	软件可靠性需实验验证;适用范围受模型准确性限制	快速原型设计;教学与工程预研	数字工具层突破
多模型对比优化[43]	三维/二维Fluent等效拓扑/Sage一维模型协同验证	验证等效模型可靠性;大幅提升计算效率(替代三维模型);孔隙法精准量化阻力系数	模型简化引入误差;跨软件数据交互复杂	工程快速迭代设计;多物理场耦合仿真	数字工具协同范式升级
生态学优化[44]	引入有限时间热力学的生态学目标函数E,关联热弛豫特征时间和黏性弛豫特征时间	兼顾效率与综合性能;揭示时间尺度对系统的影响规律;跨学科理论融合	物理意义抽象;实际工程参数关联性需深化验证	系统级多目标优化;动态性能分析	时间维度创新
多级配置优化[45]	低温差驱动下的多级回热器结构实验与数值优化	实现低温高效运行;系统级性能提升显著	实验与计算复杂度高;普适性差;工程推广难度大	低温热声发动机;特种能源系统	空间维度优化

重要发展方向。

4 实践应用研究

各类热声回热器在热声系统中的实际应用也十分广泛，这些研究不仅丰富了热声回热器的应用实例，也为进一步优化回热器性能提供了宝贵的参考和借鉴，推动了热声热机技术在制冷等领域的不断发展和应用。

在系统构型领域，杨卓等[46]参考气-液双作用行波热声发动机（图2）开发的双作用行波热声制冷机，通过气液耦合设计实现声场相位匹配，在环境温度300 K、制冷温度250 K时COP达2.74，相对卡诺效率达60%，其核心突破在于发动机与制冷机的声阻抗协同优化，使制冷量提升至1 464.9 W，较传统斯特林制冷机效率提高35%，体现出其侧重于单元内热声效率最大化的设计理念，适用于中温区大冷量应用场景。Sharify等[29]的多级行波热声系统采用“三发动机驱动单制冷机”拓扑（图3），通过蚀刻不锈钢丝网式回热器在最佳声场节点（声压波腹处）的精准布局，将起振温度降低至临界点以下，实现了降低热声振荡的起始温度并达到−100 ℃的制冷温度。该系统凭借多级声功传输的空间协同显著放大低温区声能量密度，展现出在高稳定性深冷温区应用中的优势。



注：1-连接管；2-直管；3-加热器；4-三通；5-回热器；6-次室温换热器；7-热缓冲管；8-主室温换热器；9-针阀；10-气库；11-U型谐振管。

图2 气-液双作用行波热声发动机示意图

Fig. 2 Gas-liquid double-acting traveling-wave thermoacoustic engine

在高频微型化方向，胡鹏[47]的研究直面微型化导致的黏性耗散激增与声场失配问题，创新性引入锥形谐振管结构，通过声阻抗渐变设计抑制边界层分离，并结合高声压振幅PZT驱动器（输出声压>140 dB），使冷热端温差提升至31 ℃、冷端温降达15.2 ℃。梁惊涛等[48]通过集成复合填料回热器（活性炭/不锈钢丝网梯度填充）与紧凑型惯性管相位调节器，同时提升了回热效能与调节精度，从而显著改善了超导器件的冷却温控性能，将高频脉冲管制冷机进一步推向工程实用化。高频微型系统的共性挑战在于尺度效应引发的声功损耗，而胡鹏与梁惊涛的研究分别从声学结构优化与热力部件创新切入，形成互补性解决方案。



图3 三发动机驱动单制冷机实验装置示意图

Fig. 3 Three-engine-driven single refrigerator experimental setup

为应对在液氦温度下，回热器热交换效率低、真实气体效应显著、有限比热容、压力损失大以及相移器性能不足等挑战，Wang等[49]提出了优化工作频率、采用如活性炭和碳纳米材料等的高比热容材料、改进移相器设计及应用有限时间热力学方法等优化手段，为提升液氦温度下高频脉管制冷机的效率和可靠性提供了重要指导。

未来微型制冷机回热器的研究方向应聚焦于开发新型回热材料、优化回热器结构和级间耦合方式，以进一步提高制冷机的效率和可靠性，推动其在空间探测等领域的广泛应用。微型热声制冷机作为高频微型制冷机的一种，其回热器的研究也应沿此思路发展。

5 总结与展望

本文总结了近年来热声回热器的研究进展。首先，系统评析了板叠式、丝网式、蜂窝陶瓷、分层结构回热器的设计优化、性能特点与应用现状，揭示了各自的核心优势、技术瓶颈与发展方向。其次，探讨了有关回热器的声场、流场特性及频率特性的内在机制与研究进展，分析评述了基于传输矩阵、热声软件模拟和特征时间优化等方法的优化策略。最后，结合典型案例探讨了各类热声回热器在热声系统中的实际应用。

尽管热声回热器的研究已取得了显著成果，但仍面临诸多挑战。首先，热声回热器内部复杂的流动和传热现象尚未完全被理解，尤其在高频

和高功率密度条件下。未来的研究需进一步加强多学科交叉合作，深入探索其内部的物理机制，开发更为高效的优化设计方法。其次，新型材料和制造技术的应用将为热声回热器的性能提升带来新的机遇。例如，3D打印技术可以实现复杂结构的高精度制造[50]，在回热器复杂结构和定制化设计制造方面或许能有出色表现；而纳米材料的应用则可能进一步提高回热器的热交换效率；声学超构材料独特的热管理能力和多功能性使其能够精确调控热传导并优化热传递效率[51-53]，其在热声回热器中的应用也具有重要的研究价值和潜在的工程意义。未来的相关研究可以聚焦于提高材料的热稳定性、降低制造成本以及增强其在复杂环境中的性能表现等方面。最后，热声回热器的实验研究和数值模拟之间的结合仍需加强。通过建立更精确的数值模型并结合实验验证，可以更全面地评估回热器的性能，为优化设计提供更可靠的依据。

综上所述，热声回热器的研究在结构设计、特性分析和优化方法等方面取得了重要进展，但仍需进一步深入探索。未来的研究应聚焦于多学科交叉合作、应用场景的定制化设计、新型材料和制造技术的应用以及实验与数值模拟的紧密结合，以推动热声技术未来的发展和应用。

参考文献

[1] 廖宜利. 交变振荡流回热器的实验研究[D]. 武汉：华中科技大学，2011.

[2] 刘益才，谢海波，李照龙，等. 异型回热器热声热机结构动力学分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2013，40(4)：55-60.

[3] 阚绪献，吴锋，张晓青，等. 热声制冷机回热器的构形优化[J]. 工程热物理学报，2010，31(1)：11-14.

[4] 辛天龙. 热声热机回热器特性研究[D]. 长沙：中南大学，2011.

[5] HARIHARAN N M, SIVASHANMUGAM P, KASTHURIRENGAN S. Influence of stack geometry and resonator length on the performance of thermoacoustic engine[J]. Applied Acoustics, 2012, 73(10)：1052-1058.

[6] ZINK F, WATERER H, ARCHER R, et al. Geometric optimization of a thermoacoustic regenerator [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(12)：2309-2322.

[7] 刘益才，张明研，黄谦，等. 热声热机板叠式回热器结构数值计算[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2010，41(3)：1186-1189.

[8] 张明研. 热驱动热声热机特性实验研究[D]. 长沙：中南大学，2010.

[9] 颜鹏. 热声脉管制冷机板叠结构及调相机理数值研究[D]. 长沙：中南大学，2013.

[10] 王少恒. 网格式回热器的传热特性分析与实验研究[D]. 北京：华北电力大学，2011.

[11] 杨卓，陈燕燕，吴张华，等. 超低环温行波热声热泵中的回热器研究[J]. 工程热物理学报，2013，34(5)：808-811.

[12] 韩春生，王峰，韩蓬磊，等. 回热器丝网参数对斯特林制冷机性能的影响[J]. 红外，2024，45(8)：24-32.

[13] 谭靖麒，罗嘉奇，黄迦乐，等. 近室温热源驱动的气液相变热声发动机[J]. 科学通报，2020，65(32)：3644-3650.

[14] 伍堃，吴锋，王仕仙，等. 不同填料对丝网回热器性能的影响[J]. 武汉工程大学学报，2017，39(1)：74-77.

[15] 文靖，康慧芳，张凌霄. 环路热声制冷机的多层丝网回热器数值模拟研究[J]. 真空与低温，2024，30(5)：556-565.

[16] 王强，陈曦，郭永飞，等. 新型回热器内工质流动数值模拟分析[J]. 低温与超导，2011，39(8)：64-67，80.

[17] 吕志超. 蜂窝陶瓷蓄热体传热及气体流动特性的实验和数值模拟研究[D]. 鞍山：辽宁科技大学，2018.

[18] KANG K, HONG S K, NOH D S, et al. Heat transfer characteristics of a ceramic honeycomb regenerator for an oxy-fuel combustion furnace [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1)：494-500.

[19] AI Y F, MEI C, JIANG S J, et al. Optimization on temperature efficiency and switch time of thin-walled regenerator with perturbation analysis[J]. Journal of Central South University of Technology, 2006, 13(5)：506-510.

[20] 李银宾. 不同结构回热器频率及输出特性研究[D]. 长沙：中南大学，2014.

[21] LIU Y Q, CHEN X C. Simulation research on the resistance characteristic of honeycomb ceramic regenerator[C]//2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Piscataway, NJ：IEEE，2010：5515374.

[22] YOU Y H, WU Z D, LI B, et al. 3D numerical simulation and optimization of honeycomb regenerators with parallel or crosswise arrangement of circular holes [J]. Chemical Engineering and Processing：Process Intensification，2019，137：22-27.

[23] WANG Y X, DONG M, LI H Y, et al. Study on thermal stress of honeycomb ceramic regenerators with different parameters[J]. Strength of Materials, 2014，46(2)：256-261.

[24] 罗兰，陈曦，夏宇栋. 基于Regen3.3的45 K斯特林制冷机分层结构回热器的优化[J]. 真空与低温，2015，

21(4):226-229.
[25] 古小玲,肖星,张晓青.驻波热声制冷机分层回热器的特性研究[J].低温工程,2020(1):13-18.
[26] 全永超.斯特林发动机新型分层回热器结构优化与性能研究[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2024.
[27] 毛伊依,谢秀娟,杨少柒,等.热声回热器内声场数值模拟研究[J].低温工程,2014(5):34-39.
[28] TOURKOV K, SCHAEFER L. Effect of regenerator positioning on thermoacoustic effect in a looped tube traveling wave thermoacoustic engine [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 95: 94-100.
[29] SHARIFY E M, HASEGAWA S. Traveling-wave thermoacoustic refrigerator driven by a multistage traveling-wave thermoacoustic engine [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 791-795.
[30] 张宁,胡忠军,李青.回热器参数耦合对热声发动机声功增益率的影响[J].热能动力工程,2011,26(6):639-644,768.
[31] 孙生生,韩跃峰,苑飞,等.回热器板叠流动特性研究[J].低温工程,2010(3):42-45.
[32] 赵殿鹏.Rijke管热声效应及热声制冷机的数值模拟[D].杭州:杭州电子科技大学,2010.
[33] 赵爽,李正宇,李青,等.热声回热器的频率特性研究[J].低温工程,2011(3):20-23.
[34] 黄谦,刘益才,张明研,等.热声回热器结构频率的数值研究[J].低温与超导,2008,36(11):1-5.
[35] 康慧芳,江钒,薛晓迪,等.热声发动机回热器操作因子的优化研究[J].北京理工大学学报,2011,31(7):781-784.
[36] 张富珍,李青,李正宇,等.高频声场下热声回热器的实验辨识[C]//第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网2007年度学术交流会论文集.北京:低温工程,2007:58-62.
[37] 李姗姗,昂雪野,王钊,等.超高频微型脉冲管制冷机回热器优化设计[J].大连民族大学学报,2017,19(5):487-490,494.
[38] AL-NIMR M, KHASHAN S A, AL-OQLA H. Novel techniques to enhance the performance of Stirling engines integrated with solar systems[J]. Renewable Energy, 2023, 202: 894-906.
[39] ZAHI N, ALKABSH A, BOUHJAR F, et al. Numerical study of an oscillatory piston-driven flow through open cell metal foam like Stirling engine regenerator [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 213: 124196.
[40] 吴锋,汪拓,费锦华,等.热声网络的辛矩阵分析[J].热科学与技术,2013,12(4):283-289.
[41] HOLZINGER T, EMMERT T, POLIFKE W. Optimizing thermoacoustic regenerators for maximum amplification of acoustic power.[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 136(5): 2432-2440.
[42] 康慧芳.高频行驻波型热驱动热声制冷机的理论及实验研究[D].北京:中国科学院研究生院(理化技术研究所),2009.
[43] 刘贤贤,陈燕燕,胡剑英,等.热声发动机整机核心部件模拟研究[J].工程热物理学报,2025,46(3):945-953.
[44] 陈浩,吴锋,汪拓,等.双声源驱动热声制冷机特征时间的生态学优化[C]//高等学校工程热物理第二十届全国学术会议论文集——工程热力学专辑.天津:中国高等教育学会工程热物理专业委员会,2014:148-157.
[45] 長谷川真也,山口剛史,押野谷康雄.C11熱音響エンジンの音響インピーダンス分布とスタック位置に関する研究[C]//スターリングサイクルシンポジウム講演論文集.東京,日本:日本機械学会,2010,13:125-126.
[46] 杨卓,罗二仓,陈燕燕.新型热声制冷-双作用行波热声制冷机热力特性的数值模拟研究[J].制冷学报,2012,33(5):20-25,31.
[47] 胡鹏.高频微型声驱动热声制冷机的理论探索与实验研究[D].北京:中国科学院研究生院(理化技术研究所),2007.
[48] 梁惊涛,闫令文,周远,等.高频微型脉冲管制冷机的实用化研究[J].低温与特气,2003,21(3):1-3.
[49] WANG B, GAN Z H. A critical review of liquid helium temperature high frequency pulse tube cryocoolers for space applications [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 61: 43-70.
[50] ZHAO Y M, GUO Z C, YE J, et al. 3D Printed multilayer overlapping resonators for low-frequency broadband sound absorption: mechanism analysis and corresponding modified theoretical method [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2025, 20 (1): e2455540.
[51] DAI H J, ZHANG X T, ZHENG Y J, et al. Review and prospects of metamaterials used to control elastic waves and vibrations[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 1069454.
[52] SONG H, DING X D, CUI Z X, et al. Research progress and development trends of acoustic metamaterials[J]. Molecules, 2021, 26(13): 4018.
[53] 杨睿.声学超构材料的声波调控机理及其在声功能器件中的应用研究[D].长沙:湖南大学,2023.

本文编辑:霍淑利