

发动机再生冷却多物理场耦合拓扑优化技术浅析

Analysis of Multiphysics Field Coupling Topology Optimization for Engine Regenerative Cooling

■ 高天 景婷婷 张挺 秦飞 孙星 / 西北工业大学

多物理场耦合的拓扑优化方法设计效率高，不依赖于工程经验，可打破常规并联冷却通道设计思路，实现多优化目标条件下的灵活多自由度精细化设计，可显著提升发动机主动冷却热结构冷却效能，对提高发动机冷却剂热沉利用率和结构耐温极限具有重要意义。

宽域吸气式组合发动机是天地往返空天飞行器的有效动力形式之一，但随着飞行马赫数 (Ma) 的不断提升，轻质高效的发动机热结构成为 $Ma8+$ 吸气式发动机走向工程实际应用的核心难题之一。再生冷却由于换热效率和能量利用率高，成为当前组合发动机热防护的主要冷却方案之一，但对于未来更高速的飞行器，再生冷却方案出现了冷热源不匹配和热沉严重不足的问题。原因主要体现在两个方面：一是冷却剂的理论热沉不足，无法满足热壁面的冷却要求，需要通过研究高效隔热结构、开发先进高热沉燃料或组合燃料等方式解决；二是冷却剂的热沉利用率不足，虽然当前高热沉碳氢燃料 (EHF) 的电加热管的理论热沉较高，但在发动机级别的燃料热沉利用率受限于裂解结焦、流量分配等问题，仅能达到71%左右。而多物理场耦合拓扑优化技术，通过考虑流体流动、共轭传热、结构强度等多个复杂物理过程，在设计域内自动寻优，可形成换热效率更优、流量

分配更均匀、流动阻力更小的新型再生冷却通道，从而减小或消除发动机再生冷却冷热矛盾，显著提升发动机主动冷却热结构工作上限。

多物理场耦合拓扑优化原理

应用于流体的多物理场耦合拓扑优化问题一般包括流热耦合问题、流固耦合问题、流热固耦合问题等几种类型。流热耦合问题是研究换热器的基础，即需要同时考虑流动问题和换热问题，其传热过程称为流固共轭传热，该传热过程同时考虑流体热对流和固体热传导，尤其是拓扑优化过程中流道形状变化导致的流动特性变化对温度场的影响，超燃冲压发动机主动冷却系统、芯片液冷散热器、动力电池组液冷换热系统等均属于该范畴。流固耦合问题主要关注拓扑优化过程中固体域生成对流场的影响，以及流场对固体结构强度的影响。流热固耦合拓扑优化综合考虑了流动换热与结构强度问题，同时考虑流场、温度场、结构位移场之间的强耦合关系，使优化结果既获得良好的换热特性，

又具备一定的结构强度。

多物理场耦合拓扑优化发展现状

多物理场耦合拓扑优化以流体拓扑优化为基础，耦合了温度场、应力应变场等多种物理场，是一种多约束多目标的拓扑优化方法，其拓扑设计变量表示方法与流体拓扑优化相似。主流拓扑优化方法包括变密度法、水平集法、双向渐进结构优化法等，如图1所示。变密度法设计变量为网格单元伪密度，通过设计域内伪密度值的不同来划分流固区域，并对计算单元内材料性质进行插值；水平集法的设计变量为高维水平集函数，将水平集零等值面定义为结构边界，其余区域根据水平集函数值的正负性分别表征固体或者流体材料；双向渐进结构优化法以网格单元值为优化设计变量，通过单元值变化表征单元的增加和删除，不断迭代寻找设计区域内最优结构。此外，还有相场法、移动组件法、独立连续映射法等新兴流体拓扑优化方法。多物理场耦合拓扑

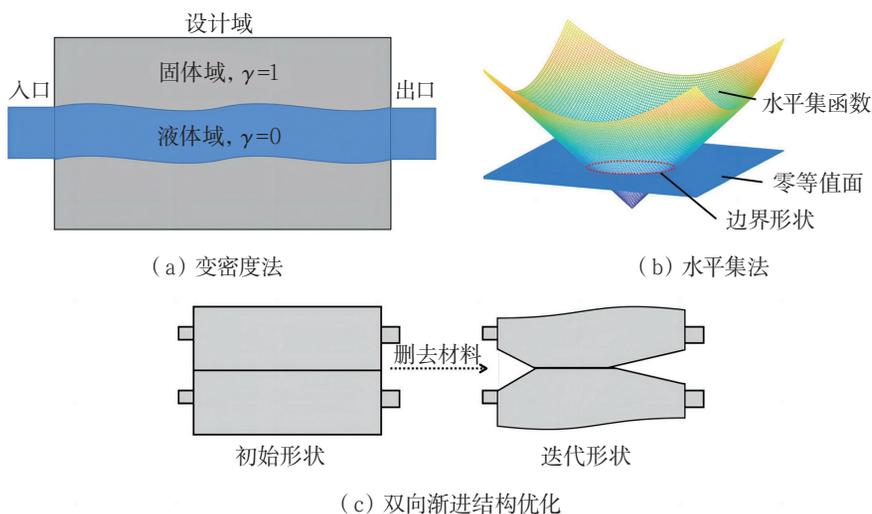


图1 主流流体拓扑优化方法示意

优化需要考虑多种物理场与流场的强耦合关系，在上述方法中，变密度法概念清晰、形式简洁、易于收敛，与优化算法结合成熟，且可以通过对导热系数、弹性模量等多种材料性质进行插值，便于表征优化过程中不同物理场的性质，是当前求解多物理场耦合拓扑优化最重要的方法之一。

目前，应用上述拓扑优化方法进行多物理场拓扑优化的研究已有许多。针对多目标的拓扑优化，当前研究主要考虑以温度相关函数作为优化目标，针对散热器冷却流道进行拓扑优化设计研究，研究结果表明，通过约束三维热结构的最大柔度，可以有效考虑结构强度对拓扑优化的影响^[1]。针对多目标优化带来的最优解问题，基于帕累托最优前沿研究了微通道散热器的拓扑优化设计方法^[2]，研究结果表明，目标函数中流动参数与传热参数之间的不同权重会影响流道拓扑结构，随着传热加权系数的增加，流道拓扑结构越来越弯曲，并出现微小分支通道^[3]。针对变物性问题，研究了温度相关流体特性，包括密度、导热

系数、热容、黏度等对共轭传热拓扑优化的影响，研究发现，与温度相关的材料热物性变化会导致拓扑优化结果的变化，其中热容和导热系数的影响最大，而黏度等物性参数的影响可以忽略^[4]。针对湍流流动对拓扑优化的影响，当前研究主要考虑了将 $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 等不同湍流模型应用于拓扑优化的可行性^[5-6]，结果表明，通过离散伴随和自动微分的方法能够很好地将湍流模型与拓扑优化结合，为解决湍流条件下的拓扑优化问题提供了研究方向。

综上所述，对于多物理耦合拓扑优化的研究从简单的流热耦合开始逐渐深入，考虑多目标、变物性、湍流等多个方面，已经形成了较为完善的流热固耦合拓扑优化的体系，进一步推动了拓扑优化技术在航空航天、电子芯片、机械制造等领域的研究与应用。

发动机再生冷却通道拓扑优化技术研究

相比于电子芯片散热器等其他换热结构，发动机冷却结构的拓扑优化

问题更加复杂。首先，发动机冷却结构物理尺度大、三维结构复杂、拓扑优化计算难度高；其次，冷却剂在通道内发生裂解反应，冷却剂热物性变化剧烈；此外，对冷却结构的强度、燃烧室内非均匀非定常热环境等因素都需要加以考虑。因此，多物理场耦合拓扑优化技术在冲压发动机上的应用成为了拓扑优化应用的研究制高点。

西北工业大学组合动力研究团队长期从事发动机热防护研究工作，针对应用于发动机燃烧室再生冷却的拓扑优化方法，从方法建立、设计应用、试验验证等方面展开了深入研究。

在拓扑优化方法建立方面，针对发动机再生冷却通道拓扑优化进行了理论研究，提出了再生冷却通道形态流热耦合拓扑优化方法，设计流程如图2所示^[7]。该方法在变密度法的基础上，引入连续伴随方法计算灵敏度，提升了拓扑优化计

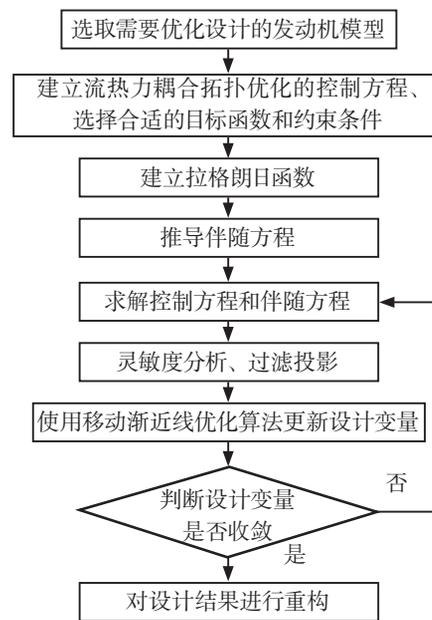


图2 冲压发动机再生冷却通道形态流热耦合拓扑优化方法设计流程

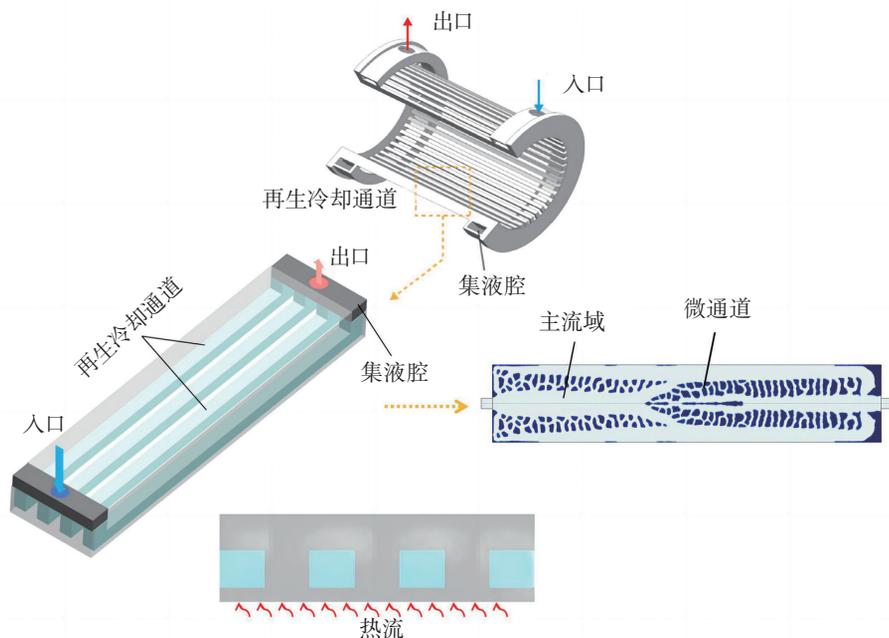


图3 冲压发动机典型燃烧室再生冷却结构与拓扑优化设计结果^[8]

算效率。同时，引入流体区域体积占比、流动通道内能量耗散、最高温度、设计区域应变能最小等约束条件，更好地贴合冲压发动机再生冷却通道的设计要求，提升了优化结果的换热效果、力学特性和可加工性。

在冷却通道设计应用方面，采用多物理场耦合优化设计方法，针对燃烧室不同冷却构件进行了优化设计和仿真研究。冲压发动机燃烧室热环境随时间空间变化剧烈，燃烧室壁面热流分布存在强不均匀性与非定常性，针对壁面再生冷却，提出将燃烧室热壁面简化为热沉平板，并对热沉平板冷却通道的拓扑优化过程进行研究^[8]，图3给出了冲压发动机典型燃烧室再生冷却结构以及热沉平板的拓扑优化结果。研究发现，设计域内生成了众多垂直于主流方向的微通道，显著改善了整体换热效率，但冷却通道内复杂的回流区导致了局部高温的出现。

研究团队重点考察了拓扑优化冷却通道在不同非均匀热环境下的鲁棒性，研究表明，拓扑优化模型的换热能力对不同的加热边界条件下，具有相当强的鲁棒性，相同热流边界条件下，拓扑优化通道的加热壁面平均温度比等直通道低5.8%，压降降低20.6%。另外，以量纲-温度分布非均匀度为参考，拓扑优化冷却通道的温度分布均匀程度是等直

通道的2倍，体现出明显优势，这对于拓扑优化技术在发动机上的应用具有重要的意义。

发动机燃烧室中包括了支板、点火器、助燃火箭等侵入式结构，需要将冷却流道中间截断，形成特殊的绕流结构。由于传统的再生冷却通道设计手段难以实现对该绕流结构的设计，提出使用拓扑优化的方法进行设计。以设计域内平均温度最小为目标函数，约束流体区域体积占比为70%，最终设计结果如图4所示。研究结果指出，三维拓扑优化方法能得到稳定有效的优化结果，其结果受流体体积占比分数影响，流体体积占比越大，设计域内最高温度越低，而温度均匀度先降低，然后再逐渐升高。

在试验验证方面，研究团队针对发动机不同部件的拓扑优化结果，开展了发动机条件下的长时间热考核试验验证工作，将绕流结构优化设计结果进行三维重构得到拓扑优化绕流平板，并依托西北工业大学航天学院固体火箭发动机重点实验室火箭冲压组合动力试验台，对拓扑优化扰流平板进行了100s量级长

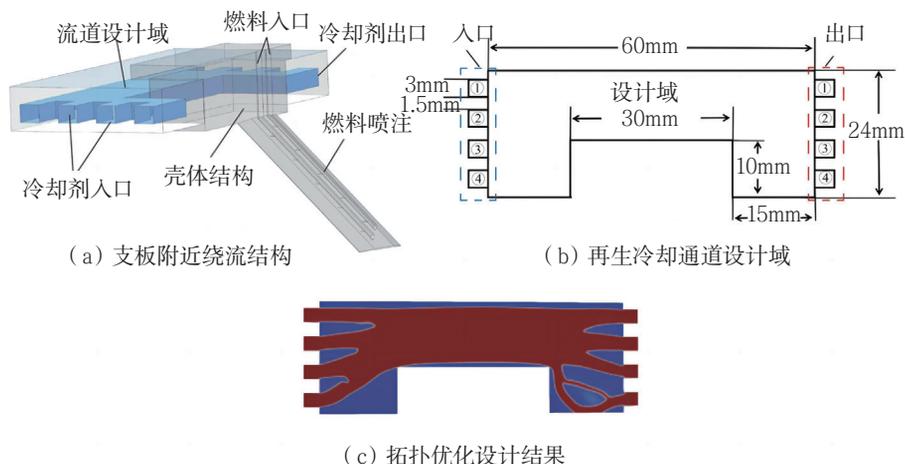


图4 典型的支板和冷却结构拓扑优化设计

表1 平板出入口温度与压力

	入口油温/K	出口油温/K	温升/K	入口压力/MPa	出口压力/MPa	压降/kPa
拓扑平板	301.25	377.63	76.39	3.211	3.2104	0.8171
等直平板	300.45	378.93	78.47	3.203	3.1965	7.0003

时间热考核（见图5），验证了拓扑优化冷却通道在冲压发动机上应用的可行性。试验台发动机工作在Ma6工况下，空气流量和燃烧室EHF流量分别为2.5kg/s和120g/s。使用EHF作为试验件冷却剂，由于平板与燃气接触面积较小，设计冷却EHF总流量70g/s、单路35g、温升约80K。试验对比了拓扑优化平板与等直平板在发动机工作条件下对非均匀热环境的防护能力，试验结果如表1所示。结果表明，拓扑优化平板与等直平板相比，两个试验件之间的温升相同，根据能量守恒原理，两个试验件的加热量也相等，具有比较意义。相比于等直平板，拓扑优化平板出入口压降降低了88%，其主

要原因是在拓扑优化通道内强回流区更少，避免了通道内部的流动停滞。试验前数值模拟也表明，换热效果相似的情况下，拓扑优化通道的温度分布均匀度提升了3.5%，通道内最高温度下降了10%，有效提升了再生冷却性能。试验后拓扑优化平板与等直平板底面均有明显烧蚀痕迹，从烧蚀位置看，靠近火焰出口则烧蚀更严重，烧蚀整体呈放射状。其中，孤立的低烧蚀点烧蚀量较低，是因为此处换热效率更高、温度更低，这与试验前数值仿真的入口段湍动能分布对应。

研究重点和未来发展方向

拓扑优化方法设计再生冷却流道在

改善流量分配特性，提高温度分布均匀度，降低压力损失等多方面都具备优势，是未来再生冷却流道设计的理想设计方法。但是面向未来工程应用，仍需要进一步研究攻关。

建立考虑超临界裂解反应的拓扑优化方法

碳氢燃料在再生冷却通道内的超临界裂解反应是发动机再生冷却过程的重要特性之一，由于当前涉及流体的拓扑优化大都基于常物性不可压缩流体假设进行，无法考虑超临界裂解反应带来的变物性和流体可压缩性，而超临界物性变化在很大程度上影响了EHF的理论热沉，尤其是部分燃料组分的化学热沉远大于物理热沉。因此，从变物性和流体可压缩性出发，考虑流固共轭换热和超临界裂解反应耦合的拓扑优化方法，将成为未来面向发动机再生冷却拓扑优化的研究重点。

建立多目标、多约束的再生冷却通道拓扑优化方法

选取合理的优化目标是获得符合工程应用需求的换热结构的关键因素。流固热耦合拓扑优化的目标函数包含最小化平均温度、最小化结构柔度、最大化换热量、最小化流体耗散功等。在发动机冷却流道设计过程中，主要目标是达到最佳换热特性，需要选取温度相关的目标函数，如最小化平均温度、最大化换热量等。同时，冷却通道结构强度也需要加以考虑，避免承力结构强度不足导致发动机结构损坏，需要考虑加入最小化结构柔度的目标函数和最大应变能约束。此外，为了避免局部超温，优化过程中需要对最大温度进行约束。综上所述，在再生冷却通道设计过程中，需要

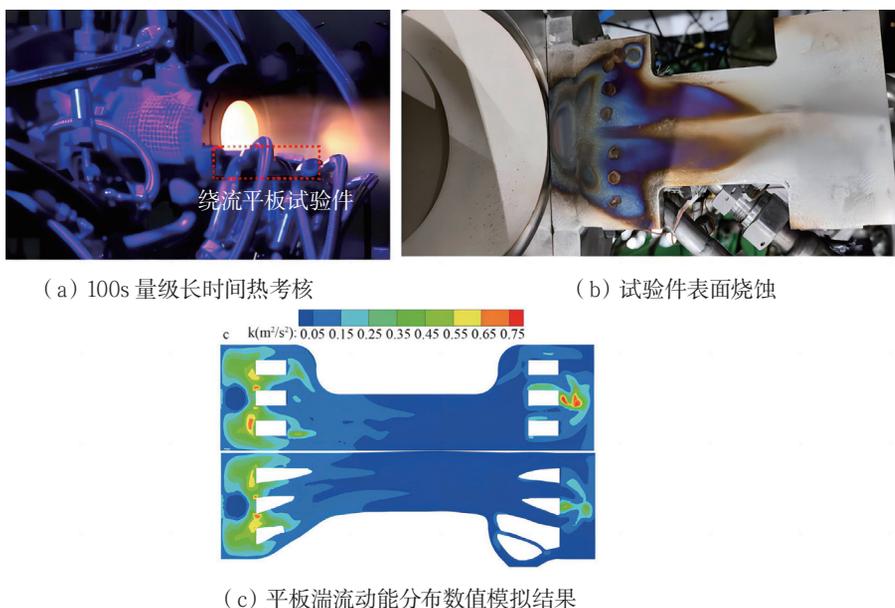


图5 拓扑优化扰流平板100s量级长时间热考核与试验件表面烧蚀情况

对换热能力、结构承载能力、流体流动特性等因素综合考虑，是一个典型的多目标优化问题，且需要加入流体区域占比、最大温度、最大应变能等多个约束。如何确定合适的优化目标与矛盾目标值之间的合理权重系数，并结合最新的优化设计算法，得到多目标多约束的再生冷却通道拓扑优化方案，是当前的研究重点之一。

建立考虑湍流效应的拓扑优化方法

流动控制方程是流体拓扑优化计算的关键，采用不同流动模型进行模拟，影响优化结果的精确度。当前的拓扑优化是将流动简化为层流进行的，控制方程相对简单。然而，再生冷却通道中同时存在层流流动和湍流流动，热边界附近的湍流流动对对流换热过程的影响不可忽略。考虑湍流流动的流体控制方程复杂、数值求解过程非线性，且引入湍流模型会导致使用伴随法计算灵敏度时伴随方程变量增多，规模增大。因此，考虑湍流模型的拓扑优化计算量明显增大。当前研究表明，虽然已有不少湍流拓扑优化的理论与数值研究，但是当前基于离散伴随的湍流拓扑优化计算量仍然巨大，40万网格的算例需要消耗约3.8万核时，难以在普通工作站上实现，需要探索加速计算方法、简化湍流模型等方式降低湍流模拟计算量，实现发动机尺度下的湍流拓扑优化计算。

建立发动机级大尺度拓扑优化方案

当前多物理场耦合拓扑优化的研究，大多针对小型换热器设计或发动机典型零部件简化模型，设计

域物理尺度小、结构简单、计算量小。在未来超燃冲压发动机研制过程中，为了形成高效、可靠的冷却结构，需要在发动机整体范围内进行三维多物理场耦合拓扑优化，设计域为三维复杂结构、物理尺度大、计算单元数量多，采用连续伴随方法进行优化工作量巨大、耗时长。如何建立适用于发动机级结构的高速拓扑优化方案，是将来拓扑优化走向工程应用的关键问题。

结束语

多物理场耦合拓扑优化方法的再生冷却通道与传统再生冷却通道相比，在换热效率、温度均匀性、通道流量分配等方面均具有明显的性能优势，是超燃冲压发动机再生冷却通道设计的理想方案。目前，通过拓扑优化设计再生冷却通道的方法已得到初步试验验证。未来，依靠更强的鲁棒性，更优的流动换热特性，拓扑优化冷却通道有望进一步走向工程应用，实现更高效的燃烧室再生冷却，助推空天飞行器实现更高效更宽域的飞行。

航空动力

(高天，西北工业大学，硕士研究生，主要从事组合动力发动机技术研究)

参考文献

- [1] YU M, RUAN S, GU J, et al. Three-dimensional topology optimization of thermal-fluid-structural problems for cooling system design[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(6): 3347-3366.
- [2] SATO Y, YAJI K, IZUI K, et al. An optimum design method for a

- thermal-fluid device incorporating multiobjective topology optimization with an adaptive weighting scheme[J]. Journal of Mechanical Design, 2018, 140(3): 031402.
- [3] YAO Q Y. Topology optimization for heat transfer enhancement in latent heat storage[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021: 13.
- [4] QIAN S, LOU S, GE C, et al. The influence of temperature dependent fluid properties on topology optimization of conjugate heat transfer[J/OL]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 173: 107424.
- [5] YOON G H. Topology optimization method with finite elements based on the k- ϵ turbulence model[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 361: 112784.
- [6] DILGEN C B, DILGEN S B, FUHRMAN D R, et al. Topology optimization of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018, 331: 363-393.
- [7] 景婷婷, 张挺, 秦飞, 等. 冲压发动机再生冷却通道形态流热力耦合拓扑优化方法: CN116011145A[P]. 2023-04-25.
- [8] ZHANG T, JING T, QIN F, et al. Topology optimization of regenerative cooling channel in non-uniform thermal environment of hypersonic engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119384.