

# 基于石墨烯功能材料的高温钛合金多流体换热器研究

## Study on High Temperature Titanium Alloy Multi-Fluid Heat Exchanger Based on Graphene Functional Materials

冯博洋 于霄 吴小军 李毅 / 中国航发沈阳发动机研究所 凌子夜 / 华南理工大学

目前，航空发动机通过换热器对高温空气和航空滑油进行冷却，从而实现高温零部件的冷却需求。随着发动机性能的提升，对换热器的换热性能提出了更高的要求，于是诞生了冷却冷却空气（CCA）技术，综合应用外涵道冷气和航空燃油对高温空气进行组合冷却，但燃油的高温结焦是应用该技术过程中必须考虑的问题。

随着航空发动机技术的不断发展和性能的不断提升，涡轮前温度正朝着 2200K 的目标发展，而高温合金材料的耐热温度为 1420 ~ 1620 K。因此，需要对涡轮等高温零部件进行冷却，以保证发动机的正常运行。目前，航空发动机涡轮叶片气膜冷却的冷却气来源为压气机出口的压缩空气。随着压气机的压缩比不断提高，排气温度也不断提高，为了满足不断提升的涡轮冷却需求，需要引入更多的压气机排气来进行冷却。然而，引入更多的压气机排气将降低发动机的推力。为了解决高压比带来的性能提升和不断增加的冷却需求的矛盾，CCA 的方法被提出（见图 1）。CCA 方法将外涵道空气或航空燃料作为冷源，使高温压缩空气进入涡轮之前被预冷，被冷却后的压缩空气再用于冷却涡轮叶片，该方法的核心为轻质高效的换热器。

### 航空发动机换热器特点及要求

由于航空发动机内部环境具有高温、

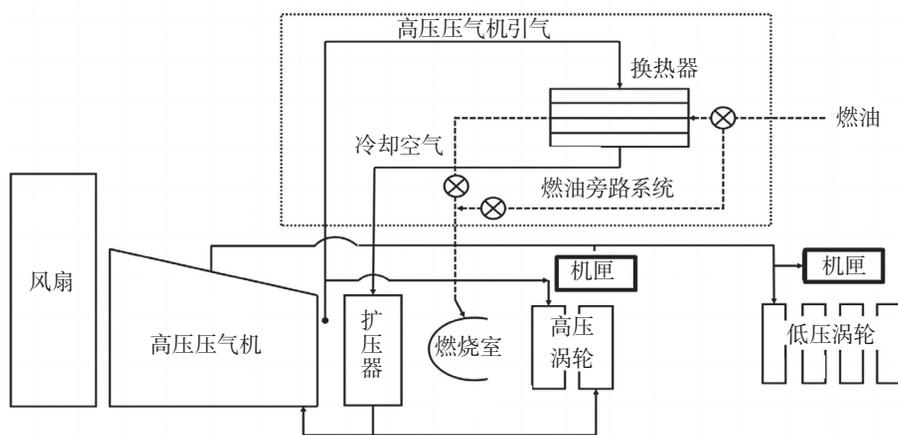


图1 CCA系统

高压、高转速的特点，与传统换热器相比，航空发动机用换热器的结构和性能要求更高。一是需要换热器具有结构紧凑、体积小、质量轻的特点；二是对换热器结构和材料的选择有特别要求，由于航空发动机是高速工作部件，有一定的振动强度，微小的绕流元件在这种工作环境下结构可能会发生变化，所以要设计优化其结构，保证结构强度，此外，考虑到发动机的高温特性，换热器需要选择耐高温、导热性好的材料；三是需要考虑流体的压力损失，航空发动机用换热器结构通

常较小，流体在较小的通道内流动阻力较大，需要控制压力损失在合理范围内。根据以上内容，航空发动机换热器的设计具有很大难度和挑战。

### 航空发动机换热器研究现状

目前，航空发动机内高温冷却空气预冷技术主要分为空气预冷和航空煤油预冷两种。空气预冷技术相对较早，该技术所需的换热器为空气—空气换热器，具有结构简单、易加工、可灵活布置的特点。其作用是以外涵道空气作为冷源，冷却作为



图2 AL-31F发动机的空气—空气换热器

冷却气的压气机排气。图2为俄罗斯AL-31F发动机的外涵道中装备的空气—空气换热器，用于冷却冷却空气。该换热器为盘管式换热器，管内为高温的压缩空气，管外为外涵道的低温空气，其结构巧妙，可在发动机外涵道内灵活布置，在质量增加低于20kg的情况下将冷却空气的温度降低150~170K。但该换热器的换热效率相对较低，AL-31F发动机共采用了64组换热单元绕外涵道环形布置，占用了发动机内大量的空间体积。

随着航空发动机技术的不断发展，冷却气的冷却负荷也不断增加，以外涵道空气作为冷源的换热技术逐渐难以满足不断增加的换热需求。由于航空煤油的热容远高于空气，其作为热沉具有更强的吸热能力，利用航空煤油预冷压气机出口的高温空气，不仅能大幅度降低热端部件的温度，还能节省冷却空气的用气量。而且加热后气化和裂解的燃料喷入燃烧室，点火延迟时间将大大缩短，提高燃烧效率。但与此同时，航空煤油预冷技术难度较高：一是对于空气—煤油换热器来说，热阻主要在空气侧，常规的强化换热手段（如在空气侧增加翅片等）加工难度较大、结构强度较低；二是由于航空煤油的特殊物性，在

与高温空气换热过程中，航空煤油会存在由亚临界到超临界状态的转变，其物性参数、流动传热特性均会发生巨大变化；三是航空煤油在换热过程中会出现热裂解现象，裂解过程中存在吸放热过程，会对换热器的传热产生影响，同时，裂解过程会结焦析碳，且析碳的存在会增加管壁和流体间的流阻，降低传热效率。

### 多流体换热器技术原理

为了解决上述航空发动机换热器中存在的技术问题，本文提出了一种基于石墨烯功能材料的高温钛合金多流体换热器。首先通过研究石墨烯对相变材料功能化方法，掌握具有高热导/高相变焓复合相变材料制备方法；其次将具有不同物性的相变材料应用于多流体换热器中，通过研究直管/蛇形管多层嵌套管内高温冷却空气/航空煤油以及管外低温空气的传热特性，考察相变材料的热物性对控制航空煤油温升、抑制煤油结焦，以及促进换热器传热性能提升的作用；最终建立基于高温钛合金基超轻超高效能多流体换热器结构设计优化方法。

根据使用环境的不同，该换热器结构可设计为直管、蛇形管两种形式。换热管为多层套管结构，同时利用低温外涵道空气、航空煤油作为冷源预冷高温空气，将常规的空气—空气、空气—燃油换热器集中在一起，换热结构高效紧凑（见图3）。而且该换热器使用轻质高温钛合金材料，具有强度高、耐高温、质量轻的特点。为了解决高温空气与航空煤油直接换热所导致的航空煤油结焦的问题，在航空煤油与高温空气之间添加相变材料夹层。相变材料是一种能够在相态转变过程中吸收大量热的材料，具有储热密度大、相变过程温度恒定的特性，具有极高的热沉值。将相变材料应用于航空煤油—空气换热过程，其极高的热沉将有效降低航空煤油温升，抑制煤油结焦，提高换热功率。因此，将相变材料纳入航空煤油—空气换热器中，对于提升换热器可靠性及性能都具有重要作用。

本研究技术难点主要包以下几点。一是将空气—空气换热器、空气—煤油换热器集中在一个多流体换热器中，换热器的结构复杂度大大增加，耦合了多参数的多流体

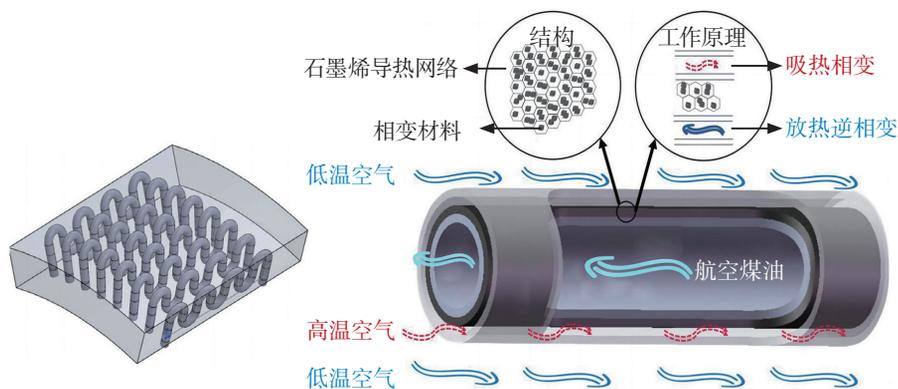


图3 基于高温钛合金基超轻超高效能多流体换热器结构及原理

换热器结构优化设计具有较高的难度；二是将相变材料引入多流体换热器中，目前的相变材料导热率较低，为了提高换热器的传热性能，需要对相变材料进行改性，提升其导热率，获得高导热、高相变焓的相变材料，此外相变材料与多流体换热器耦合也至关重要，随着换热过程的进行，高温空气的温度不断降低，因此需在不同的位置放置不同的相变材料，保证相变材料的相变温度处于换热温度区间范围内；三是在换热器加工方面，相变材料的制备对技术要求和设备要求较高，同时引入相变材料增加了换热器的复杂度，增加了管路加工的难度，且在微小通道中对相变材料进行封装也涉及复杂的工艺问题，对系统的承压能力和稳定性提出了较高的要求。

### 高导热/高相变焓相变材料制备技术

为了抑制航空煤油在管内结焦，控制煤油温度是关键因素之一，而相变储热控温技术是一种有效的控温手段。相变储热又称潜热储热，是利用相变材料(PCM)的相态变化过程中热量的吸收和释放来储存热量。相比传统的金属热沉，相变热沉单位质量的储热量可以提升数百倍，而且吸热过程温度恒定不变，质量更轻、控温效果更好。

相变过程中相变材料的焓值随温度的变化如图4所示，在温度上升至相变温度 $T_p$ 之前，材料以显热的形式储存热量，总焓值为材料的显热储热量，与比定压热容成正比。当温度上升至相变温度 $T_p$ 时，此时相变材料开始熔化，材料开始以潜

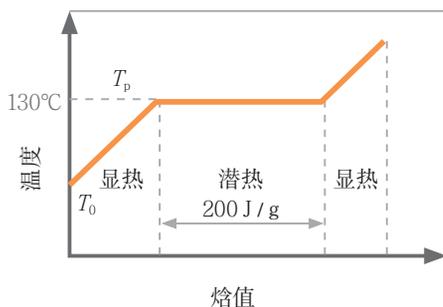


图4 相变储热过程的温度与焓值对应关系

热的形式存储热量。其总焓值等于 $T_0$ 到 $T_p$ 之间的显热值与已熔化相变材料的潜热值之和。材料的焓值随着熔化过程的进行持续增大。但是在完全相变之前，材料的温度几乎维持不变。当相变材料完全熔化后，相变储热过程完毕，材料又以显热的形式继续储热，总焓值为显热值与相变焓之和。

相变温度 $T_p$ 、相变焓、比热容与导热系数是固液相变材料最为重要的特性参数。相变温度决定了相变材料的工作温度区间，不同相变温度的材料适用的范围不同，因此，选择具有合适相变温度的相变材料是第一步。相变焓是指单位质量的相变材料完全发生相变需要吸收或释放的热量，相变焓越大，相变材料的储热密度越高，可以使用较少的相变材料满足较大的储热量的要求。比热容则是衡量相变材料显热储热密度的一个指标。如果温度跨度较大时，显热储热量也能在总储热量中占据一定的比例。导热系数是物质导热能力的量度，决定了相变材料热量传递的速率。导热系数高的相变材料，能够在储热过程中快速从热源中收集热量，缩短储热时间，在放热过程中快速将储存的热量传递出去，加快放热过程。

在本研究中，所需的相变材

料需具有合适的相变温度，通常为 $130^{\circ}\text{C}$ ，以匹配换热器的最佳工作温度；高相变焓，即单位质量相变材料能够吸收的热量多，以减小换热器的质量；高导热率，以减少热阻、降低器件节点温度。癸二酸是一种二羧酸，熔点在 $130^{\circ}\text{C}$ 左右，相变潜热超过 $200\text{J/g}$ ，具有中温蓄热潜力，本研究选取其作为相变材料。然而，此材料的导热系数较低，仅为 $0.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。通过超声浸渍的方法，将表面基团功能化石墨烯在相变材料中分散，通过大量试验考察石墨烯尺寸、含量，以及表面基团的功能化对其在相变材料中分散稳定性、相变材料热导率、相变温度和相变焓的影响，将高导热系数的石墨烯膜填充在膨胀石墨基复合相变材料粉体中，构建导热骨架网络，并将复合相变材料压缩成块体。最终得到热导率大于 $16\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，相变焓大于 $220\text{MJ}/\text{m}^3$ ，连续冷热循环500次石墨烯不团聚，热导率与相变焓变化小于5%的相变材料。

### 多流体换热器性能研究

将上述研究中制备的石墨烯增强复合相变材料添加至多流体换热器中，探究相变材料对于换热器换热性能的提升效果。两个典型的发动机在实际工况下，含相变材料的多流体换热器与常规空气—空气换热器的换热能力如图5所示。在工况一下，含相变材料的多流体换热器的单位质量换热功率为 $76.82\text{kW}/\text{kg}$ ，相较于空气—空气换热器的 $61.66\text{kW}/\text{kg}$ 提高了 $15.16\text{kW}/\text{kg}$ ，提升了24.6%；在工况二下含相变材料的多流体换热器的单位质量换热功率为 $58.54\text{kW}/\text{kg}$ ，相较于空气—空气换热器的 $44.03\text{kW}/\text{kg}$

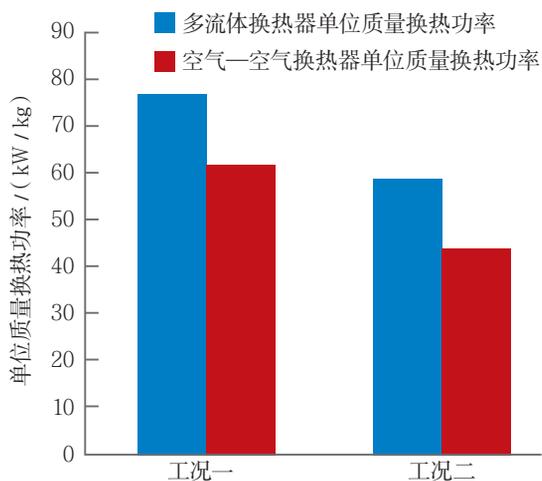


图5 多流体换热器与空气—空气换热器换热性能对比

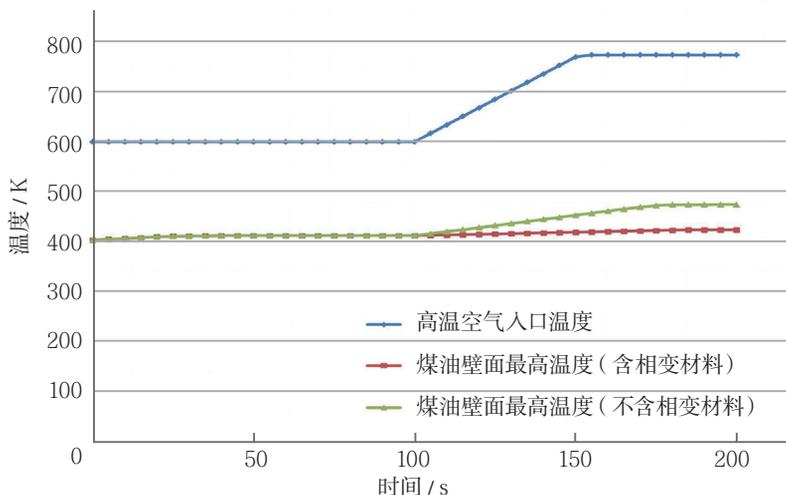


图6 相变材料对煤油壁面温度的影响

提高了14.51kW/kg，提升了33%。实现了换热器单位质量换热功率较空气—空气换热器提升10%的技术指标。此外，高温空气的出口温度也从工况一的738K和工况二的666K降低至724K和649K，冷却质量得到了提升。

在煤油与高温空气的夹层中引入相变材料，可以有效缓解在波动工况下由于高温空气温度突然升高而对航空煤油所产生的温度冲击。当遭受到温度的突然升高或降低时，相变材料能吸收或释放大量的热量，从而缓冲由快速温度波动引起的热冲击。本文研究了典型历程下，发动机由低状态切换到高状态下，含相变材料的多流体换热器对高温冲击所导致的煤油结焦的抑制作用。

在该历程下，高温空气的入口温度如图6所示。在第100s时，从低工况在50s内拉升至高工况。此时高温空气入口温度从600K增加至774K，高温空气的入口流量为85g/s，外涵道空气的流速为150m/s，外涵道空气的温度为360K，航空煤油的流量为10g/s，进口温度为298K，研

究100s内煤油壁面温度的变化情况。由图6可知，随着高温空气的温度快速提升，煤油壁面的温度也随之上升。但是，含有相变材料的多流体换热器煤油壁面温度上升速率比不含相变材料的多流体换热器煤油壁面温度上升速率慢。这是因为高温空气的温度突然升高，达到相变材料的相变温度，相变材料开始吸热并逐渐熔化，相变材料的高潜热有效地缓冲了高温空气的热冲击。由于相变材料具有高热沉的特性，在这个过程中能有效吸收高温空气的热量，防止由于工况急剧变化导致煤油壁面高温而发生结焦的现象。在不含相变材料的多流体换热器中，煤油的壁面温度在空气温度上升的第15s后最高温度上升至424K，超过了煤油的结焦温度；而含相变材料的多流体换热器中，煤油壁面的最高温度在空气温度上升后的100s内始终保持在423K以下，且在温度波动的情况下，煤油的出口温度一直维持在低于414K的水平。证明了引入相变材料能够有效缓解高温空气的热冲击，对抑制煤油结焦有显

著效果。

## 结束语

通过结构优化，将空气—空气换热和空气—煤油换热两个过程集成在同一根换热管内，不仅简化了整个换热器的复杂性，而且有效地减小了系统的体积和质量，更加适用于航空发动机。这样的集成设计还有助于减少系统中的热阻，提升换热器的性能。同时，在研究中引入了石墨烯功能材料，不仅可以实现快速的热传导和热储存，还能够高温环境下保持良好的性能，实现高温冷却气与低温空气以及航空煤油之间的高效换热，有效解决了航空煤油结焦的问题。在高速飞行时，高温冷却气的迅速散热以及低温空气和航空煤油的高效换热，将有效地维持航空发动机的稳定工作温度。这对于航空发动机的性能和安全性都具有重要意义，有望为未来高速飞行技术的发展做出积极贡献。 **航空动力**

(冯博洋，中国航发沈阳发动机研究所，工程师，主要从事航空发动机传热设计研究)