

高温燃气实验装置主被动复合热防护数值模拟

刘慧源¹, 杨 杨¹, 程吉明², 杨 斌¹

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²西北工业大学固体推进全国重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年10月16日

摘 要

为了高温燃气实验装置的可靠工作,采用主被动结合的复合热防护方案。选取典型工况设计了装置结构,开展流动与传热耦合数值模拟研究,获得了实验装置的温度分布,并研究分析了不同冷却剂及其流量的冷却效果。结果表明:采用主被动结合的复合热防护方案可以实现高温燃气实验装置的冷却,温度分布显示实验装置通过复合热防护方案有效分散热量,确保高温工况下的结构安全性和可靠性;冷却剂流量增加能够有效降低实验装置内壁面温度,同时,流量增加会导致系统压降增大,需在冷却性能和能耗间找到平衡点;与液态水相比,在相同热流密度条件下,液态甲烷可实现更低的温度分布,提升实验装置的使用寿命。

关键词

主被动复合热防护, 高温燃气, 流场与换热耦合仿真, 数值模拟

Numerical Simulation of Active-Passive Composite Thermal Protection in High-Temperature Gas Experimental Device

Huiyuan Liu¹, Yang Yang¹, Jiming Cheng², Bin Yang¹

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²National Key Laboratory of Solid Propulsion, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

Received: September 8, 2025; accepted: September 16, 2025; published: October 16, 2025

文章引用: 刘慧源, 杨杨, 程吉明, 杨斌. 高温燃气实验装置主被动复合热防护数值模拟[J]. 建模与仿真, 2025, 14(10): 182-194. DOI: 10.12677/mos.2025.1410616

Abstract

To ensure the reliable operation of the high-temperature gas experimental device, an active-passive combined composite thermal protection scheme was adopted. A cooling structure was designed for typical operating conditions, and a numerical simulation study on the coupling of flow and heat transfer in the high-temperature gas flow channel under such typical conditions was conducted. The flow field of the high-temperature gas flow channel and the temperature distribution of the active-passive combined thermal protection structure were obtained, and the cooling effects of different coolants and their flow rates were analyzed. The results show that the active-passive combined composite thermal protection scheme can realize the cooling of the high-temperature gas flow channel structure under typical operating conditions. The temperature distribution indicates that the cooling structure effectively dissipates heat through the composite thermal protection scheme, ensuring the structural safety and reliability under high-temperature conditions; An increase in coolant flow rate significantly reduces the wall temperature of the cooling structure, but at the same time, it leads to an increase in system pressure drop; Under the same heat flux density, liquid methane can achieve a lower and more uniform temperature distribution compared with water, thereby extending the service life of the cooling structure.

Keywords

Active-Passive Composite Thermal Protection, High-Temperature Gas, Coupled Flow Field and Heat Transfer Simulation, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

在能源与动力系统中, 高温燃气燃烧装置的稳定运行依赖于燃烧腔体的热防护能力[1]。在这些装置的工作过程中, 燃气燃烧所释放的热量使得内壁面临极端的热负荷, 同时还受到高温流体的冲刷影响[2]。为了确保装置在如此严酷的高温环境下的稳定性和可靠性, 必须采取高效的冷却措施, 以实现对高温壁面的有效热防护[3]。这将有助于减轻因过高热载荷引起的壁面变形和损坏, 从而延长装置的使用寿命。

航空航天技术中, 热防护系统大致可以分为三类, 分别是被动式热防护[4]、主动式热防护[5]和主被动复合式热防护[6]。被动式热防护通过材料自身的结构特性或表面涂层, 在一定的条件下保障构件的稳定运行[7]。被动式热防护具有代表性的是隔热瓦被动热防护, 其仅靠自身阻隔热发挥作用[8]。道康宁公司研发了一种抗烧蚀涂料[9], 该涂料以烯基封端的二甲基硅氧烷与苯基甲基硅氧烷共聚物为基础材料, 并添加了 SiO_2 、 SiC 等填料, 能够承受高达 1925 K 的高温。同时, 超高温陶瓷基复合材料也可用于温度高达 1875 K 的快速热环境中[10]。主动式热防护是利用冷却流体流经高温表面, 将热量带走的过程。Yin 等[11]研究了采用典型 Z 型结构再生冷却通道入口集管结构参数对冷却效果的影响。Song 等[12]研究了超音速条件下气膜冷却在不同设计马赫数下对流场结构和冷却效果的影响。主被动复合式热防护则是结合主动冷却与被动冷却各自优势的一种技术方式。以法国和德国为主导的欧洲 PHAT-SOCAR 计划[13], 重点研究了陶瓷基复合材料 C/SiC 主动冷却面板在不同构型的超燃冲压发动机中的潜在应用。该研究围绕复合材料的高温耐受性能, 成功证明了采用 C/SiC 高温复合材料结合主动冷却技术的可行性

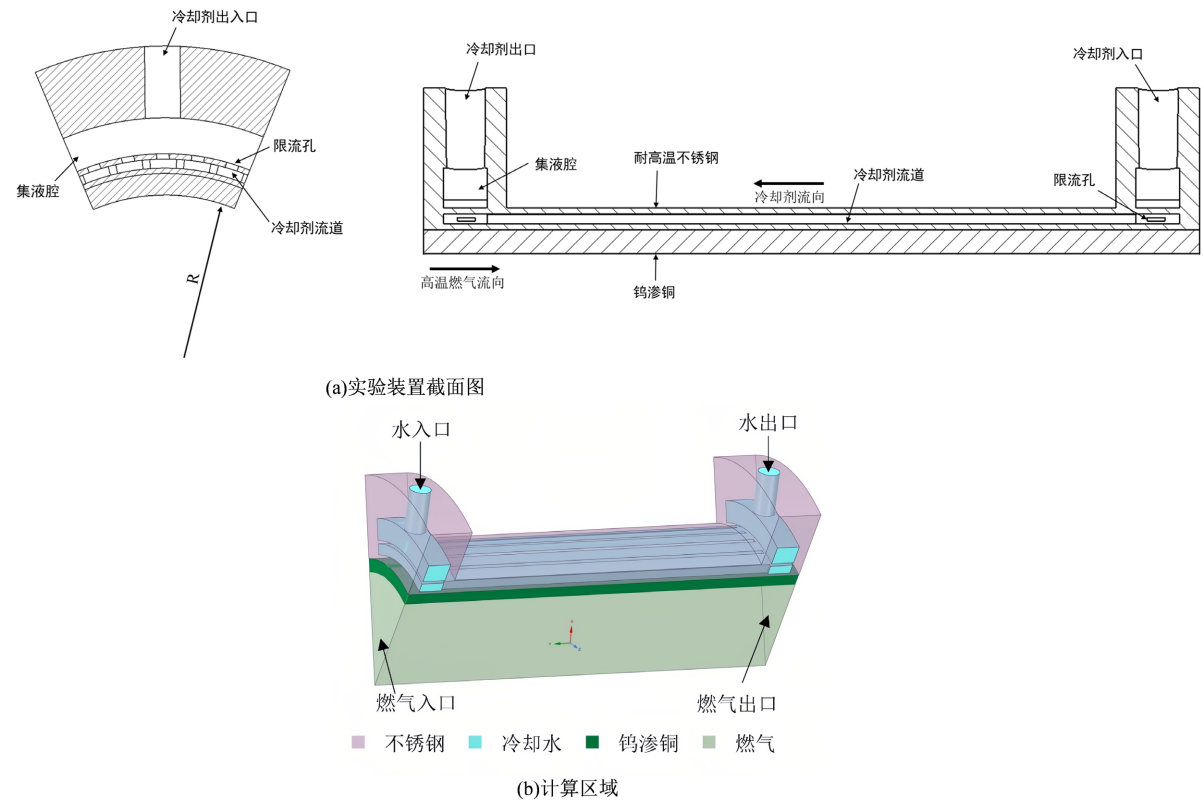
及有效性。哈尔滨工业大学鲍文等[14]提出了一种主被动复合热防护技术,通过碳氢燃料与非金属材料共同分担燃烧室壁面的热载荷,理论分析表明该技术具有显著优势。西北工业大学王浩泽等[15]研究 RBCC 发动机的热防护,提出了一种主被动结合的复合热防护方案,有效解决了冷却剂流量不足的问题,满足了 RBCC 发动机长时间工作的热防护需求。哈尔滨工业大学韦鼎元[16]提出并评估了碳氢燃料气膜与耐高温非金属材料(如 C/SiC)结合的主被动热防护方案,该方案在 $Ma = 6\sim 8$ 条件下可以有效降低燃烧室壁面温度。

虽然关于热防护方面的文献较多,然而鲜有研究将主被动复合式热防护、耐高温金属材料及冷却剂的耦合传热考虑在内。因此,本文基于主被动复合热防护技术,提出了一种具有双重热防护的燃气实验装置,并在典型工况下开展了该装置结构的流热耦合数值模拟研究,探究该方案设计下高温流场与热环境的影响,分析冷却剂流量和冷却剂类型对耦合传热的影响规律。

2. 计算方法

2.1. 计算模型

本文针对高温燃气实验装置进行三维稳态数值模拟。实验装置采用双层金属结构;外层为冷却壳体(主动冷却),采用耐高温不锈钢;内层为烧蚀层(烧蚀冷却),采用钨渗铜,其耐高温骨架 + 高效导热/相变冷却的复合效应,是高温环境的理想选择。逆流冷却通道总共 40 条,冷却通道为铣槽式,每条通道宽约 15 mm,高 5 mm,相邻流道间壁厚约 5 mm。考虑到实验装置的结构对称性,为提高数值计算效率,本文取原装置的八分之一为分析对象,如图 1 所示。



2.2. 数值方法

由于试验环境恶劣且冷却现象较为复杂,既有燃气区域高温燃气的超声速流动,又有冷却剂通道中冷却剂的流动。计算中需要考虑燃气与烧蚀层内壁的对流换热、通过烧蚀层内壁和冷却壳体内壁的热传导、冷却壳体内壁与冷却剂的对流换热、冷却剂与冷却壳体外壁的对流换热以及冷却壳体外壁的热传导;模拟中用到的材料有:高温燃气、钨渗铜、耐高温不锈钢和冷却剂,计算过程中高温燃气密度按 ideal gas 模型描述。采用流热耦合方法将流体、固体置于统一的计算域内求解,体现换热计算过程中固体与流体之间的相互影响,确保真实模拟燃气实验装置的冷却换热过程。本文采用 Fluent 商用软件进行求解计算冷却通道内冷却剂的流动换热,使用压力基求解器进行数值模拟,用 Coupled 算法来处理压力和速度的耦合关系,其中,采用二阶迎风格式离散耦合方程组对流项。利用 k-ε 湍流模型通过求解湍动能和湍动能耗散率来闭合所有控制方程,对冷却通道进行流动与传热耦合换热计算。

2.3. 控制方程

本文为了预测燃气实验装置稳定运行阶段的温度分布,只考虑稳态流动和传热。高温燃气通道和冷却剂通道内部定常流动,所有流体控制方程为三维稳态的时均 N-S 方程,包括连续性方程、动量方程和能量方程,如式(1)~(5)所示。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\eta \text{gradu}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\eta \text{grad}v) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\eta \text{grad}w) \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wT)}{\partial z} = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad}T\right) + S_T \quad (5)$$

式中, u 、 v 、 w 为流体在 x 、 y 、 z 三个方向上的速度分量, m/s ; ρ 为理想气体和水的密度, kg/m^3 ; P 为静压, Pa ; η_t 为湍流黏性系数; S_T 为流体的内热源和由于黏性作用机械能转换为热能的部分。

而金属固壁区域内部的热传导由无内热源项的导热微分方程来控制。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

式中, c 是金属材料的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.4. 网格划分与边界条件

本文应用 Fluent Meshing 进行网格划分,网格类型为多面体网格,在流动壁面处划分边界层网格。由于实验装置是旋转对称的,本文取最小周期 45° (八分之一全模型)为整个计算域,计算网格数量为 114,134,

结构网格划分如图 2 所示。图 3 为网格无关解验证, 不同网格数量下冷却通道出口温度的变化情况, 当网格量达到约 11×10^4 时, 监视参数随网格量的变化小于 1%, 达到网格无关解。

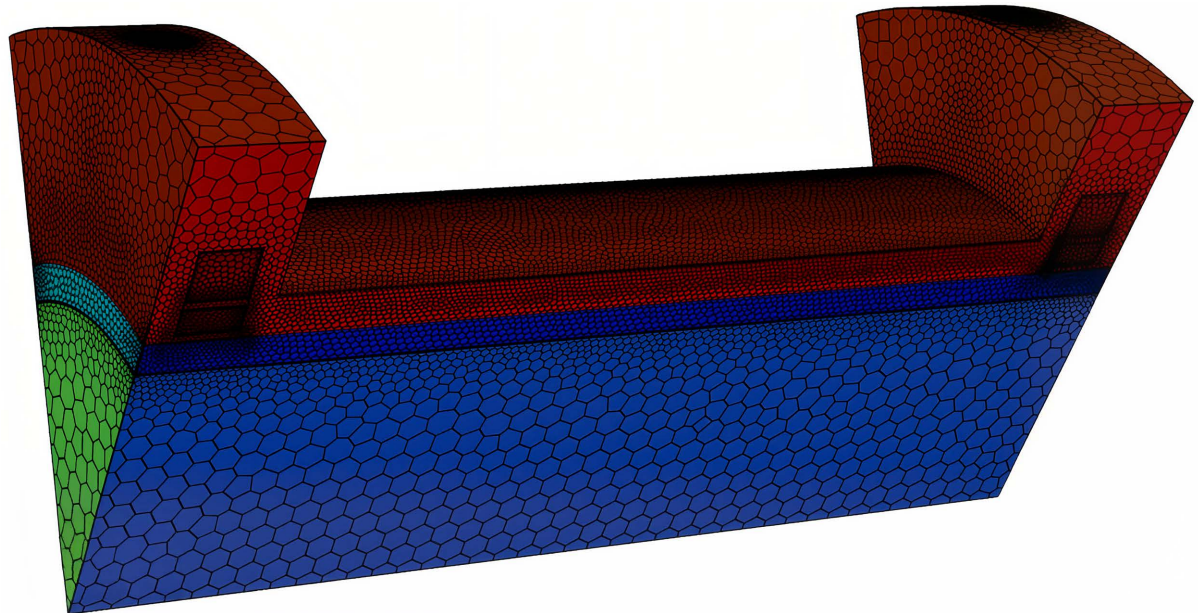


Figure 2. Mesh structure
图 2. 网格结构

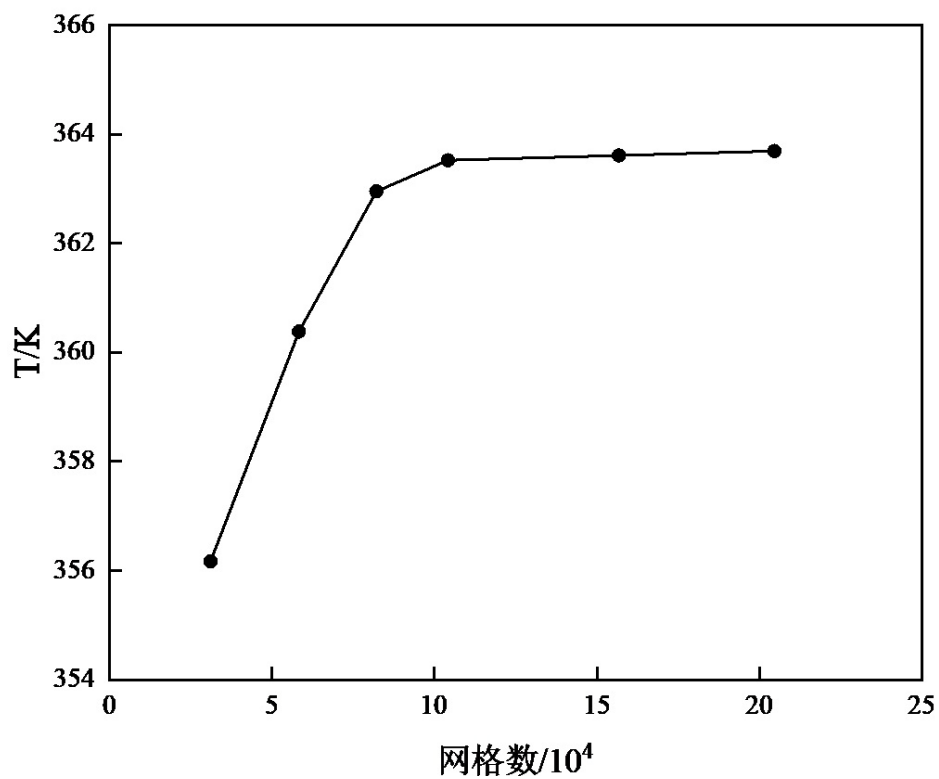


Figure 3. Grid-independent solution verification
图 3. 网格无关解验证

在三维数值模拟过程中，高温燃气和冷却剂入口均采用质量流量入口，高温燃气入口温度由热力计算获得；高温燃气及冷却剂出口均采用压力出口；不同区域之间的交界面耦合采用 **Fluent** 软件自带的 **coupled** 热边界自动处理，耦合壁面取无滑移条件，外壁面采用对流换热边界；在壁面处，温度连续，径向和法向速度为零。

高温燃气入口及冷却剂入口参数见表 1、表 2。入口温度说明如下：一般生活场景下，常温水通常指室内自然温度下的水，温度范围多在 20℃~25℃。所以冷却水的入口温度选取 20℃ (293.15 K)；在实际应用中，液态甲烷的储存和运输通常满足的典型条件是常压下温度为-160℃ (113.15 K)至-162℃ (111.15 K)，所以液态甲烷的入口温度选取-160℃ (113.15 K)。

Table 1. Inlet parameters for high-temperature gas
表 1. 高温燃气入口参数

参数	数值
燃气总温(K)	3200
燃气总压(Mpa)	0.3
流量(kg/s)	0.625

Table 2. Coolant inlet parameters
表 2. 冷却剂入口参数

工况编号	冷却剂类型	入口温度(K)	流量(kg/s)
1	液态水	293.15	1.04
2		293.15	1.54
3		293.15	2.04
4	液态甲烷	113.15	1.04

2.5. 方法验证

建立了三层平板模型对热流耦合数值模拟方法进行验证。建立的三层平板模型如图 4 所示，内层板和外层板厚度为 30 mm，中层板厚度为 20 mm，板长 300 mm，板宽 60 mm。其中 y 方向的面为对称面。内层区域在计算过程中会设置为流体区域或固体区域，中层和外层在计算过程中为固体区域，图 5 为三层平板模型网格示意图，网格采用 **Fluent meshing** 进行划分，网格类型为多面体网格，在内层平板的壁面附近添加了边界层。

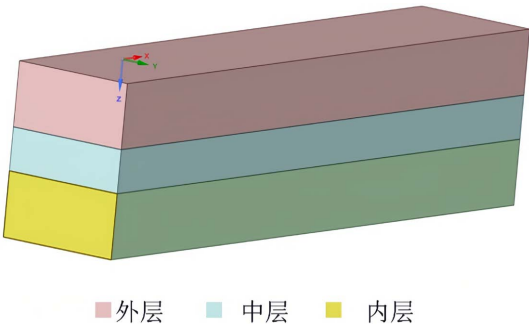


Figure 4. Schematic diagram of the three-layer slab geometric model
图 4. 三层平板几何模型示意

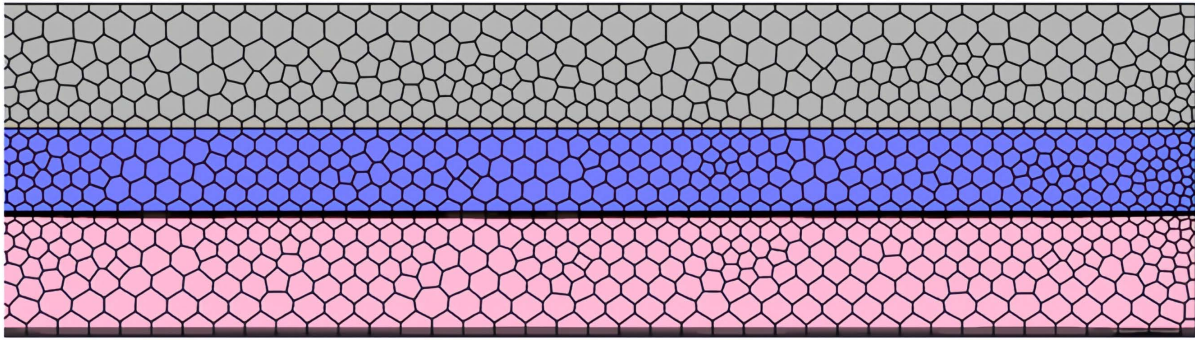


Figure 5. Schematic diagram of the three-layer slab model grid

图 5. 三层平板模型网格示意

为了模拟不同情形下的热流耦合，设计了 4 种工况，各工况详细参数如表 3 所示。各工况中不同区域交界面用 Fluent 内置的 coupled 热边界自动处理，外层板外壁面为温度边界，温度设置为 293.15 K。

Table 3. Three-layer plate model calculation conditions parameter table

表 3. 三层平板模型计算工况参数表

工况编号	内层区域材料	中层区域材料	外层区域材料	内层区域内壁面温度(K)	内层区域流体流速(m/s)	内层区域流体温度(K)	外层区域外壁面温度(K)
a	不锈钢	不锈钢	不锈钢	343.15	-	-	293.15
b	水	不锈钢	不锈钢	-	5	343.15	293.15
c	水	铜	铜	-	5	343.15	293.15
d	水	铜	不锈钢	-	5	343.15	293.15

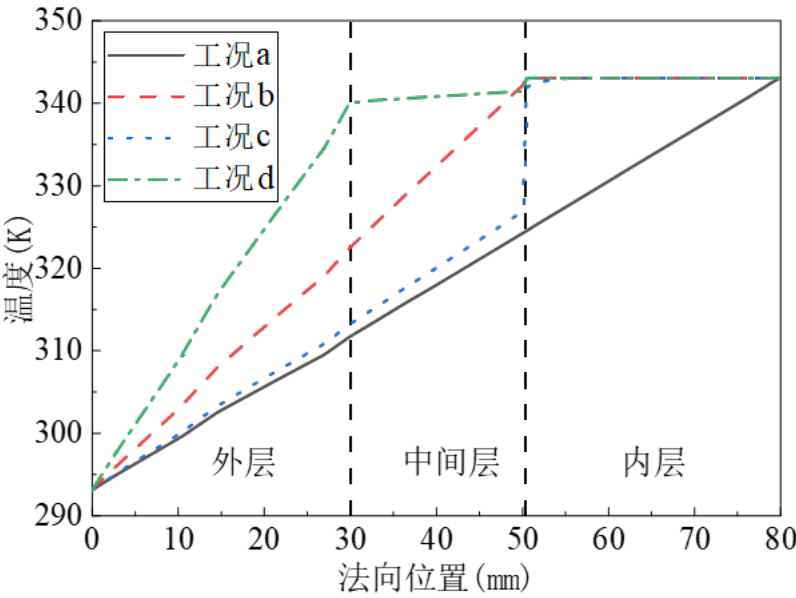


Figure 6. Temperature distribution along the normal direction for each working condition of the three-layer slab model

图 6. 三层平板模型各工况温度沿法向的分布

工况 a 为同种材料内的热传导问题,提取中间对称面上的温度沿法向的分布,如图 6 所示。工况 a 为同一固体材料内的稳态导热问题,温度在三层板内呈线性变化。工况 b 为热流耦合传热,在流体域内温度为 343.15 K,在流体域固体与边界处温度开始下降,由于中层和外层材料均设置为不锈钢,因此温度呈线性变化。工况 c 与工况 b 的区别在于固体域材料由不锈钢变为铜,由于铜的导热系数较不锈钢大,因此在流体域与固体域的交界面温度有一个突变,由 343.15 K 下降到 330 K,在固体域内温度线性下降。工况 d 中两层固体的材料不同,中层为铜,外层为不锈钢,由于铜的导热系数较高,因此在铜内部的温度梯度较小,不锈钢的导热系数较小,在热通量一定的情况下温度梯度比铜区域的温度梯度大。以上四个工况的计算结果符合物理实际,说明本文所采用的耦合传热方法是合理的。

3. 结果与分析

3.1. 温度分布分析

以工况 1 为例,开展流动与传热耦合数值模拟,获得温度分布。图 7 显示的是实验装置出口处截面固体和冷却剂温度分布,从图中可以得知出口处冷却水的平均温度为 363.52 K,低于 373.15 K,冷却水保持液态,保证了冷却系统内部压力稳定。图 8 为实验装置的温度云图,可以看到,冷却剂沿与高温燃气相反的方向流动,二者逆向对流,实现热交换。红色高温区域集中在内层钨渗铜部分。钨渗铜自身温度升高时,会产生发汗冷却效应,带走热量,从而降低部件温度;同时,钨渗铜凭借良好的热导性,快速传导并均匀分散了热量,减小了热应力集中。对于外层,不锈钢壳体作为容纳冷却水的容器,通过水的循环流动带走大量热量,壳体外壁面温度低至 314.57 K,内壁面最高温度仅为 669.69 K。实验装置的温度分布显示了主被动复合式热防护在高温环境下的有效性,实验装置可以通过复合热防护方案有效分散热量,确保高温工况下的结构安全性和可靠性。

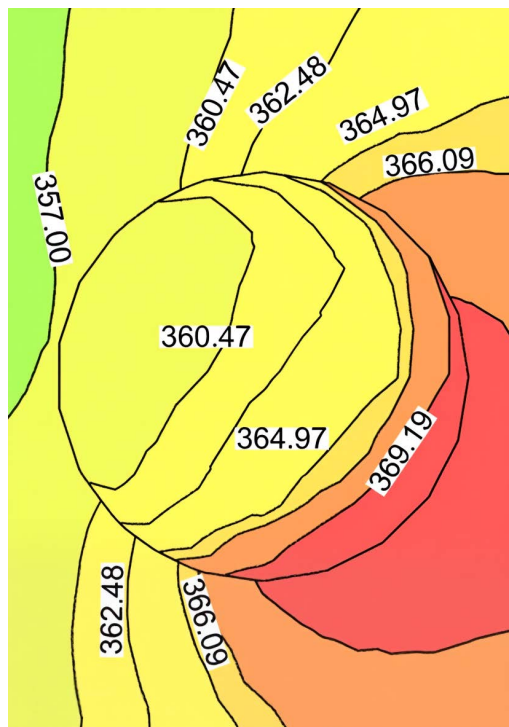


Figure 7. Outlet cross-section solids and coolant temperature distribution
图 7. 出口处截面固体和冷却剂温度分布

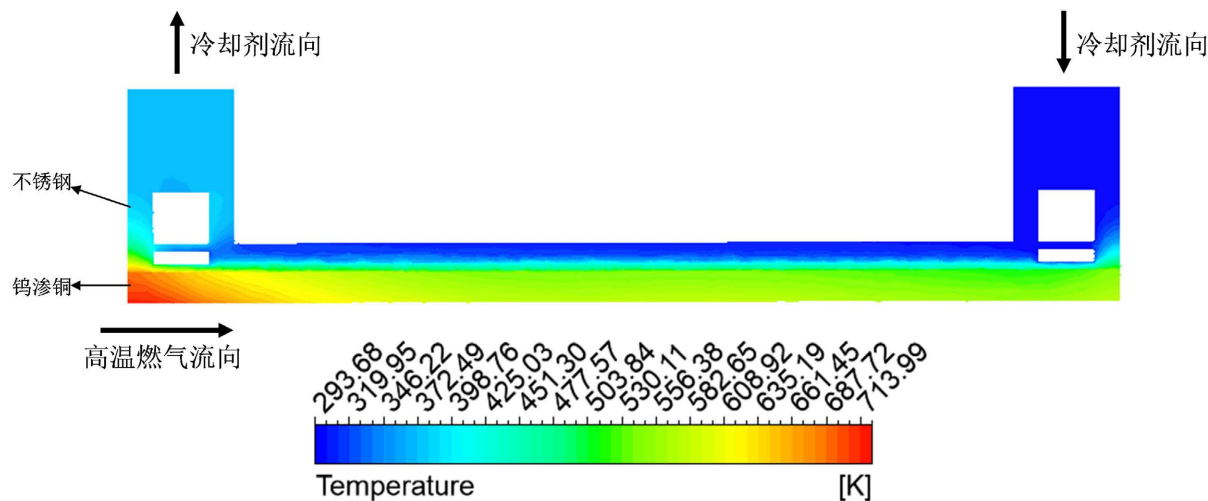


Figure 8. Experimental device temperature contour map
图 8. 实验装置温度云图

3.2. 流量对壁面温度的影响

图 9 显示的是工况 1 到工况 3 下壁面沿程温度的分布规律。工况 1、工况 2 和工况 3 的主要区别在于冷却剂的流量逐渐递增。从图中可以看出：在工况 1 下，冷却剂流量较低，起始温度约为 700 K。随着轴向距离的增加，温度逐渐降低，但降幅有限。当流量增加到工况 2 时，起始温度显著低于工况 1，且温度曲线的下降幅度明显增大，说明流量的增加显著提高了冷却剂的热交换能力。工况 3 流量进一步增大，壁面沿程温度进一步降低。通过对比这三种工况下的温度曲线，可以清晰地看出流量的变化对不锈钢壁面的温度有显著影响，冷却剂流量增加，提高了冷却剂的热交换能力，使得壁面沿程温度显著降低。

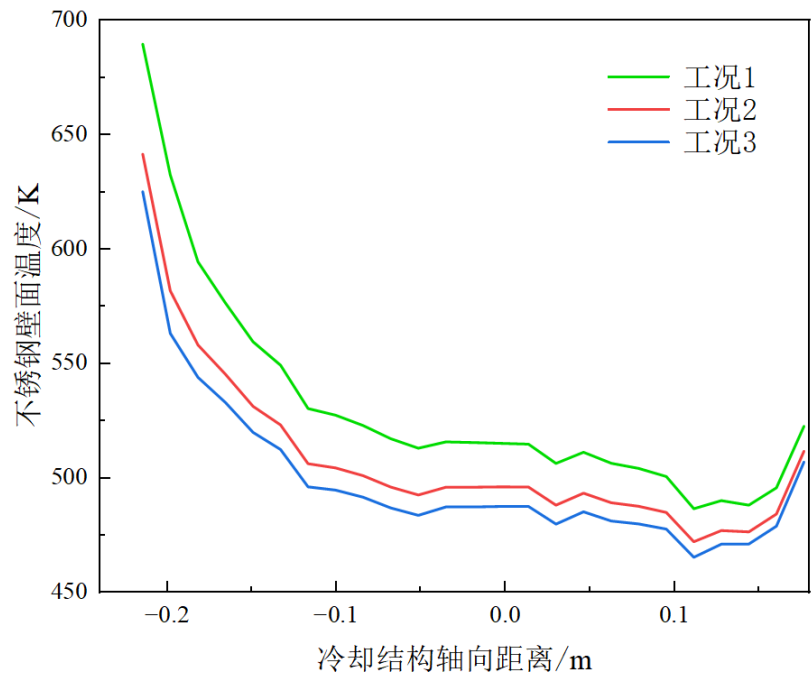


Figure 9. Wall temperature variation along the flow path under different flow rates
图 9. 不同流量下壁面沿程温度变化

图 10 显示的是冷却水流量对系统压降和冷却水自身温升的影响。从图中可以看出：随着冷却水流量从 1.04 kg/s 增加到 2.04 kg/s，压降持续增加，而温升则显著减小。当流量较小时，冷却效果有限，温升高达 71.82℃；当流量增加到 1.54 kg/s 时，冷却效果大幅改善，温升降低至 8.28℃，降幅为 63.54℃；继续增加流量到 2.04 kg/s，温升进一步下降至 4.11℃，此时降幅仅为 4.17℃，说明冷却剂流量的增加使得温升的降幅明显改善。由于提高冷却水流量会导致系统压降显著增大，可能需要更大的泵功率，增加能耗，因此需要在冷却效果(低 ΔT)和运行成本(低 ΔP)之间进行权衡，找到一个合适的冷却水流量。

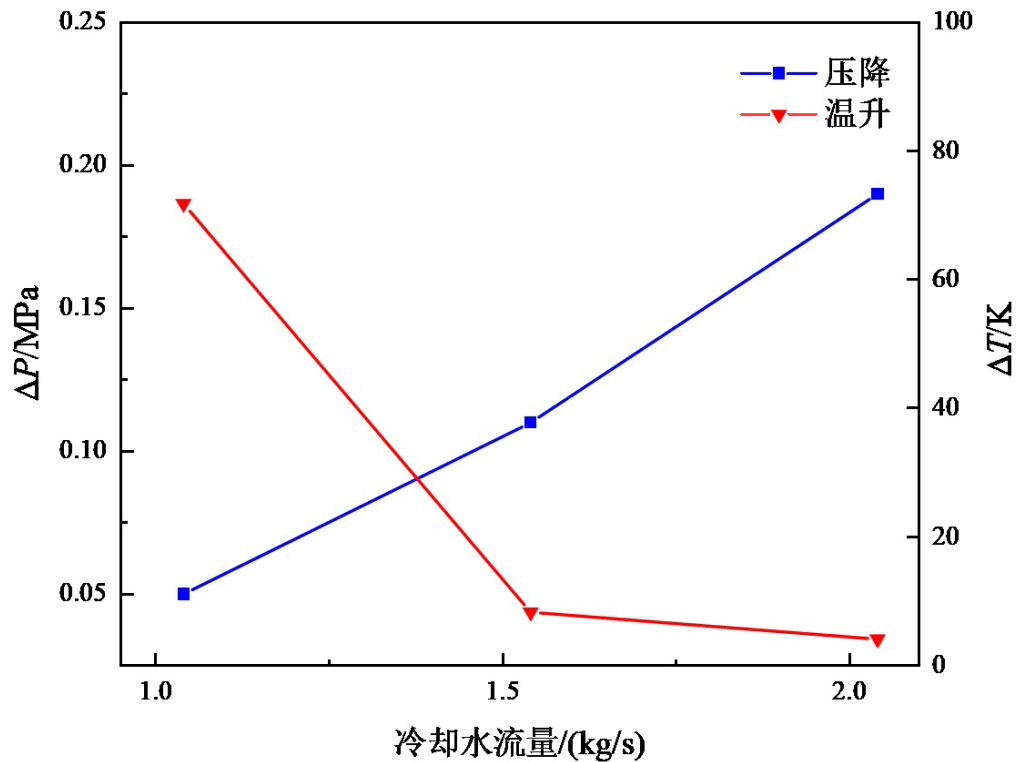


Figure 10. Variation of pressure drop and temperature rise of cooling water at different flow rates
图 10. 不同流量下冷却水的压降和温升变化

3.3. 不同冷却剂对壁面温度的影响

在航空航天中高效冷却剂类型有很多，针对耐高温不锈钢的高效冷却剂类型有：航空煤油、液态甲烷、乙二醇水溶液和氦气，对以上冷却剂进行适用性分析，如表 4 所示。由于液态甲烷无腐蚀性，且与不锈钢相容性极佳，所以选定液态甲烷作为新冷却剂，开展流动与传热耦合数值模拟。

Table 4. Coolant candidates and evaluation

表 4. 冷却剂候选方案及评估

冷却剂类型	适用性分析
航空煤油	高温(>300℃)可能引发硫化物应力腐蚀开裂
液态甲烷	无腐蚀性，与不锈钢相容性极佳
乙二醇水溶液	低温防冻，但高温(>120℃)易氧化生成酸性物质腐蚀不锈钢
氦气	完全惰性，需高压系统，成本高

图 11 显示的是两种冷却剂(液态甲烷和液态水)在不同工况(工况 4 和工况 1)下的温度分布。从图中可以看出：在工况 4 (液态甲烷冷却剂)下，壁面温度整体较低，温度范围在 114.15 K~662.83 K 之间，液态甲烷的冷却效果显著，说明液态甲烷的低温特性对壁面降温起到了核心作用。与工况 4 相比，在工况 1 (液态水冷却剂)下，壳体壁面温度明显高于液态甲烷冷却下的壁面温度，温度范围在 251.32 K~800 K 之间，相比之下液态水的冷却效果相对较弱。为了更加直观地显示出各工况的冷却性能，所以引入冷却液进出口温差(ΔT_{in_out})作为指标。除了上述指标外，结合实际需求，避免仅看 ΔT 而忽略局部过热，所以也引入关键部位温度(内壁面最高温度)作为指标，该指标可验证冷却性能的实际效果。工况 1 与工况 4 冷却剂进出口温差和关键部位温度如表 5 所示，由表可知，液态甲烷的冷却效果优于液态水，其关键部位最高温度表现更低，更加有助于提升实验装置的使用寿命。

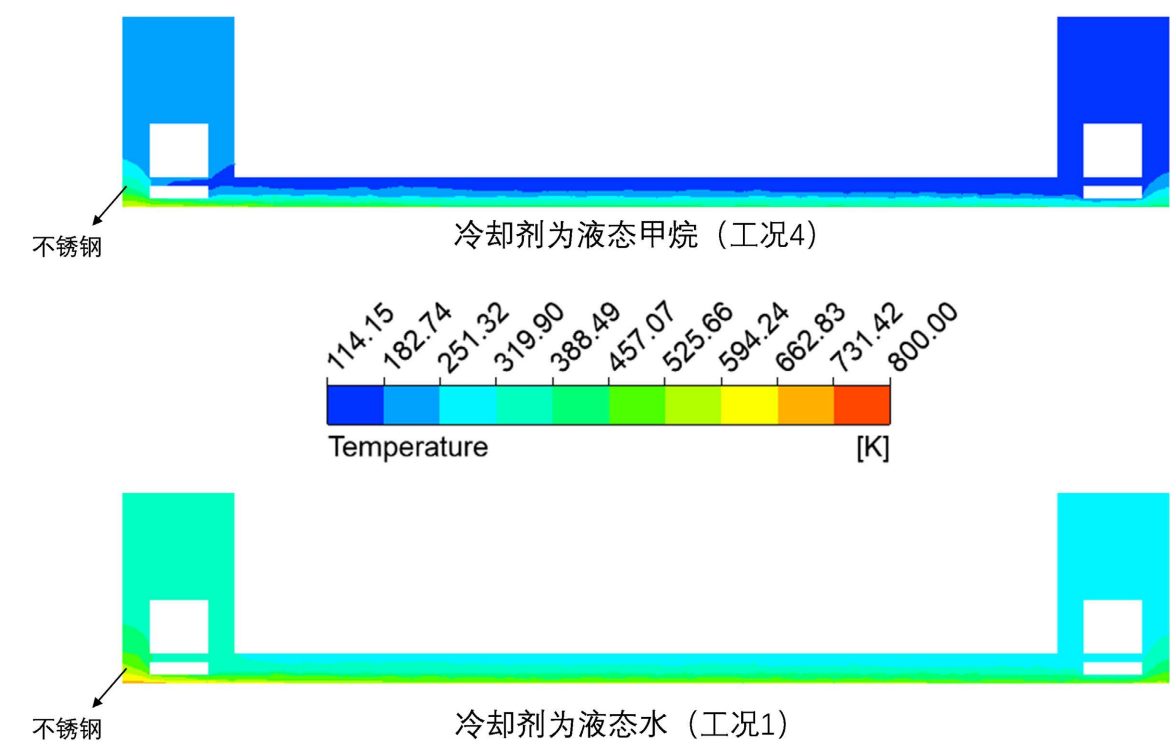


Figure 11. Comparison of temperature distributions under different coolants

图 11. 不同冷却剂下温度分布对比

Table 5. Comparison of cooling performance indicators

表 5. 冷却性能指标对比

工况	ΔT_{in_out} (K)	关键部位最高温度(K)
工况 1	70.52	689
工况 4	87.93	603

图 12 显示的是不同冷却剂下冷却结构壳体壁面沿程温度变化规律。从图中可以清楚地看到，工况 1 和工况 4 在不锈钢壁面的温度分布上存在显著差异。这种差异主要来源于冷却剂的类型不同。工况 1 使用液态冷却水作为冷却剂，而工况 4 则使用液态甲烷。在流量相同的情况下，使用液态甲烷冷却的壁面温度明显低于使用液态水的壁面温度，尤其是在靠近冷却剂入口的区域，这种温差更为显著。工况 1 和

工况 4 的比较表明, 液态甲烷作为冷却剂表现出更强的冷却能力。

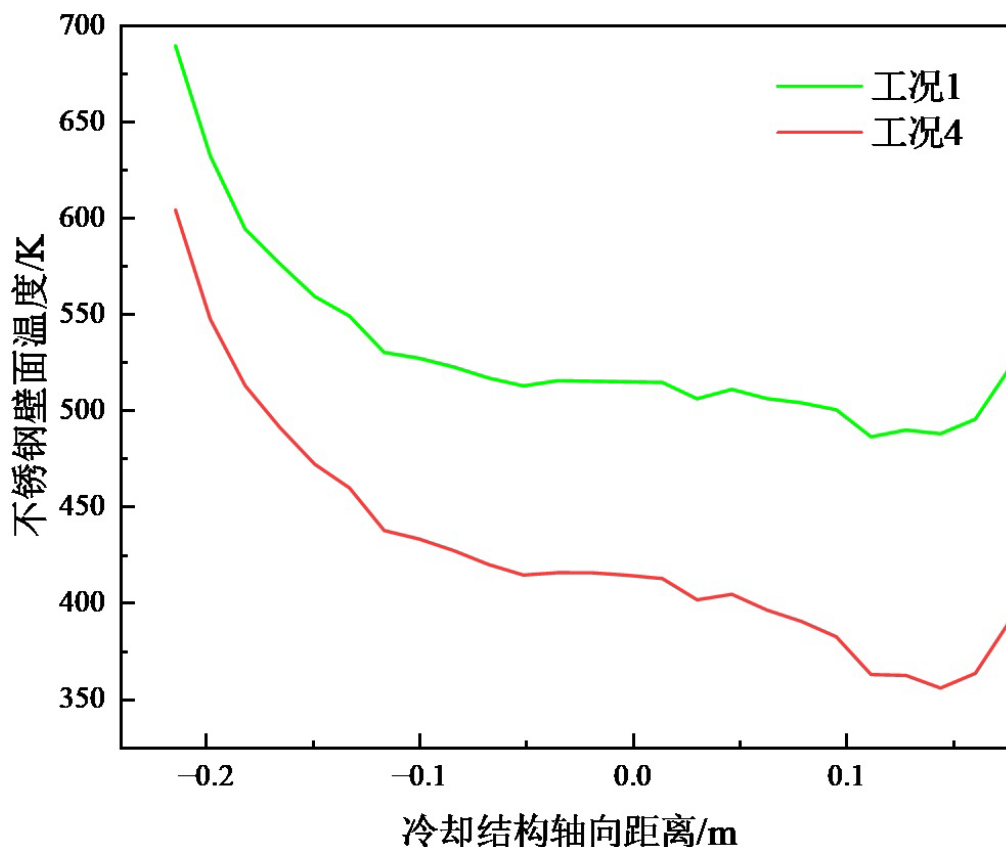


Figure 12. Wall temperature variation along the flow path under different coolants
图 12. 不同冷却剂下壁面沿程温度变化

4. 结论

本文开展了主被动复合式高温燃气实验装置的流热耦合数值模拟研究, 通过采用三维数值模拟的方法, 分析了装置结构温度分布、冷却剂流量的大小和不同冷却剂对装置冷却的效果, 得到如下结论:

- 1) 采用主被动结合的复合热防护方案可以实现高温燃气实验装置的冷却。温度云图显示实验装置通过复合热防护方案有效分散热量, 确保高温工况下的结构安全性和可靠性。
- 2) 冷却剂流量增加能够有效降低实验装置内壁面温度, 且随着流量从工况 1 到工况 3 逐渐增大, 温升的降幅明显改善。同时, 流量增加会导致系统压降增大, 需在冷却性能和能耗间找到平衡点。
- 3) 不同类型的冷却剂会影响实验装置的冷却效果。与液态水相比, 在相同热流密度条件下, 液态甲烷可实现更低的温度分布, 提升实验装置的使用寿命。

参考文献

- [1] 李小龙, 陈鹏飞, 杨华, 等. 温度畸变氢燃气发生器的燃烧及热扩散特性数值研究[J]. 热能动力工程, 2025, 40(2): 32-42.
- [2] 刘占南, 周元甲, 葛冰, 等. 重型燃机中心分级燃烧器天然气掺氢振荡特性实验研究[J/OL]. 推进技术: 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1813.V.20250429.1749.004.html>, 2025-05-11.
- [3] 林丽冰. 地面燃气轮机燃烧室壁面换热与流动特性数值研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学,

- 2021.
- [4] Harsha, P., Keel, L., Castrogiovanni, A. and Sherrill, R. (2005) X-43A Vehicle Design and Manufacture. *AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies Conference*, Capua, 16-20 May 2005, 3334. <https://doi.org/10.2514/6.2005-3334>
 - [5] Glass, D. (2008) Ceramic Matrix Composite (CMC) Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles. *15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, 28 April-1 May 2008, Dayton. <https://doi.org/10.2514/6.2008-2682>
 - [6] Moses, P.L., Rausch, V.L., Nguyen, L.T. and Hill, J.R. (2004) NASA Hypersonic Flight Demonstrators—Overview, Status, and Future Plans. *Acta Astronautica*, **55**, 619-630. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2004.05.045>
 - [7] Uyanna, O. and Najafi, H. (2020) Thermal Protection Systems for Space Vehicles: A Review on Technology Development, Current Challenges and Future Prospects. *Acta Astronautica*, **176**, 341-356. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.047>
 - [8] 姜洁宇. 主/被动结合热防护系统设计与试验验证[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
 - [9] 曹碧雯, 刘宁, 杨杰. 环氧有机硅类烧蚀涂料研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(3): 106-109.
 - [10] Binner, J., Porter, M., Baker, B., Zou, J., Venkatachalam, V., Diaz, V.R., *et al.* (2020) Selection, Processing, Properties and Applications of Ultra-High Temperature Ceramic Matrix Composites, UHTCMCS—A Review. *International Materials Reviews*, **65**, 389-444. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1652006>
 - [11] Yin, L., E, J. and Ding, J. (2022) Effect of Cooling Header on the Hydrocarbon Fuel Flow Distribution in a Regenerative Cooling Channel. *International Journal of Aerospace Engineering*, **2022**, Article ID: 3471421. <https://doi.org/10.1155/2022/3471421>
 - [12] Song, C. and Shen, C. (2019) Effects of Feeding Mach Numbers on the Flowfield Structures of Supersonic Film Cooling. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **33**, 264-270. <https://doi.org/10.2514/1.t5475>
 - [13] PTAH-SOCAR (2011) Fuel-Cooled Composite Materials Structure-2011 Status. AIAA.
 - [14] 鲍文, 张聪, 秦江, 等. 超燃冲压发动机主被动复合热防护系统方案设计思考[J]. 推进技术, 2013, 34(12): 1659-1663.
 - [15] 王浩泽, 李江, 秦飞, 等. RBCC 发动机主被动复合热防护方案研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2): 185-191.
 - [16] 韦鼎元. 高马赫数主/被动复合冷却燃烧室油气膜冷却/减阻特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.