

激光供能换热器概念设计及性能分析*

禹图强, 程谋森

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对换热器模式激光推进的特点, 设计了一种新颖的平板式换热器结构, 这种结构由多层异质材料复合外壳、耐高温金属框架和层流微通道组成, 具有较高的激光-热转换效率。建立了换热器出口截面二维温度场模型并进行数值分析, 其结果验证了换热器结构的热稳定性。建立了换热器内部流体一维流动模型并进行数值分析, 得出了激光辐照功率密度和流体入口速度对换热器内部流体温度分布的影响关系, 验证了换热器结构设计满足流体通道压降小的要求。

关键词: 激光推进; 换热器; 火箭发动机; 传热

中图分类号: TN 249 V 439

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0462-05

Analysis of performance and design of concept for laser-powered heat exchanger

YU Tu-qiang CHENG Mou-sen

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Based on the characteristic of laser-powered heat exchanger (HX) for rocket propulsion, a novel preliminary structure design of flat-plate HX was presented. Key component parts of the HX include outer shell of multilayer composite materials, high temperature resistant metals frame and internal laminar micro-channel structure of nickel alby. High coupling efficiency for laser energy to material heat was predicted for this structure. A two-dimensional temperature field model for the HX exit section was presented and numerical results confirmed the heat stability design. A one-dimensional flow model for inner propellant in HX was developed and numerically analyzed, which gained a influence orderliness that correlating HX outlet temperature with laser radiation power density and inlet flow velocity. Pressure drop in micro-channel was well small within the specified range.

Key words Laser Propulsion; Heat exchanger; Rocket engine; Heat transfer

1 引言

20世纪 90年代初, 美国科学家 Jordin T. Kare 提出了换热器模式激光推进的概念^[1], 其基本原理如图 1 所示。激光供能换热器式火箭发动机利用微通道换热器的外壳吸收激光能量, 转换成热能, 再将热能转换为流体工质的内能, 经拉瓦尔喷管喷出产生推力。

换热器模式激光推进方式相对其它激光推进方式有自己的优点。首先, 对激光输出频率和功率密度

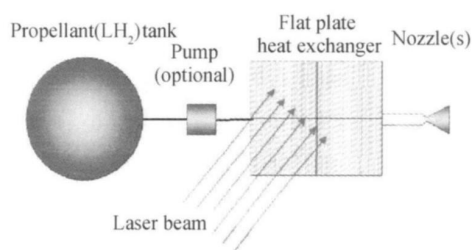


Fig 1 Heat exchanger thruster concept

要求不高, 可选的激光器种类较多; 其次, 通过选用较小分子量的工质可以降低换热器工作温度, 发动机换

* 收稿日期: 2007-04-25; 修订日期: 2007-06-15。

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 禹图强 (1983—), 男, 硕士生, 研究领域为激光推进技术。

热器壳体可用材料较广;再次,实验方法简单并且容易实现,在对微通道换热器进行实验时,可以借用常规液体火箭发动机的技术,而其能源不一定是激光,可以利用常规电热器或者太阳能转换器。

目前,在激光推进领域中,对换热器式激光推进概念的研究仍然很少,只有美国科学家 Kare Jordin T 坚持不懈地继续其研究工作^[2],他提出了利用微通道层流换热器实现激光能量向工质热能转换的思想。这种层流微通道具有很好的换热性能,但单一材质金属外壳对激光具有很高的反射率,不利于激光的吸收。本文提出了采用复合结构增强激光吸收率的思想,并具体设计了一种新型换热器壳体,同时保留内部层流微通道结构。本文还针对这种新型换热器建立流体和框架的温度场模型,分析了激光辐照功率密度、流体入口速度对换热器内部流体温度分布的影响规律和换热器结构的温度分布,考察换热器结构的热稳定性与对工质的加热能力。

2 换热器出口温度和激光辐照功率密度讨论

激光推进相对于传统化学火箭推进方式的一个重要优势在于能实现更高的比冲,从而可能实现飞行器的单级入轨。考虑理想火箭仅由贮箱壳体、推进剂和质量微不足道的有效载荷组成,若以液氢为推进剂,按照目前的液氢贮箱制造技术水平,其结构效率 $\varepsilon = 0.23$ 。据此估算,以氢为喷气工质的火箭发动机比冲需要达到 700 s 。若综合其它辅助手段,对于以氢为主要工质的火箭发动机,单级发射到地球低轨道所需喷管排气速度一般在 $6 \sim 9 \text{ km/s}$ 之间^[2]。

激光供能换热器式火箭发动机的喷管采用拉瓦尔喷管,出口排气速度表达式为

$$V_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{R}{M} T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + V_1^2 \quad (1)$$

海拔 25 km 处的大气压强为海平面大气压强的 $1/40$ 以此处作为激光供能换热器式火箭发动机工作的起始点,所需流体的最终温度应该在 $1500 \sim 3300 \text{ K}$ 之间。

换热器出口温度主要受换热器材料和辐射损失的限制。出口温度不能高于结构的容许温度上限,温度过高也会使辐射损失增大。另外,一般金属表面的激光辐照功率密度为 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时就会发生熔化,综合考虑目前激光器的水平^[3],选择换热器外壳的激光辐照功率密度为 500 W/cm^2 。

3 换热器结构设计

换热器是激光供能换热器式火箭发动机的能量转换部件,包括光热转换和热量转移。高性能的发动机就应该使换热器具备高的光热转换能力和热量转移能力。下面侧重阐述采用复合结构增强激光吸收率的思想方法和外壳结构设计。

根据 Hagen-Rubens 关系式可以知道,自由电子少将大大降低激光的反射率,提高其对激光的吸收率。而金属氧化物表层无自由电子,比纯金属吸收激光的能力强。另一方面,微纳米材料具有量子尺寸效应、体积效应、表面效应和吸收效应^[4],这些效应都能提高材料对激光的吸收率。结合材料的两种状态制成金属纳米氧化物,其对激光的吸收率高达 90% 以上^[5],目前,这种材料已经应用于金属表面激光热处理工艺。由此得到启示,提出用金属纳米氧化物作为换热器外壳材料。微通道相对于大通道具有更好的换热均匀性,所以换热器内部流体通道仍采用微通道。另外,镍金属具有高的强度、熔点和传热性能,容易切割、制作费用低等特点,选择镍制作微通道框架。

根据传热性能和结构强度要求设计如图 2 所示结构的换热器。

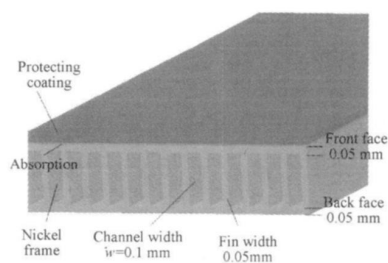


Fig 2 Heat exchanger core dimensions

换热器的前面板(激光辐照面)外裹保护层(由吸收层材料的性质决定是否需要),厚度为 0.04 mm ;吸收层厚度为 0.01 mm ;前、后面板的厚度为 $f = 0.05 \text{ mm}$;微通道的高和宽分别为 $h = 0.9 \text{ mm}$, $w = 0.1 \text{ mm}$;微通道肋片宽 $s' = 0.05 \text{ mm}$ 。

4 换热器结构稳定性分析

换热器结构的稳定性包括结构应力和温度方面的稳定性,即结构应力要在材料允许的范围之内;温度低于安全裕量限制的上限。

4.1 结构强度分析

图 2 所示换热器的吸收层和保护层材料具有较

小的弹性模量, 许用应变相对较大, 韧性较强。只要金属框架不发生断裂现象, 吸收层和保护层结构就不会发生断裂。因此下面仅对金属框架的应力进行分析。

金属框架的结构应力分析分为两部分: 前后面板和肋片。由于微通道内部的压强不大, 正应力较小, 主要考虑切应力的影响。换热器中微通道是相互对称的, 微通道肋片两边受到的压力相等, 即受力为零, 不受切应力影响。前、后面板的剪切应力通过公式计算可得:

$$\tau = \frac{p \cdot w \cdot l}{f \cdot l} = \frac{p \cdot w}{f} = 2p \quad (2)$$

式中 τ 为剪切应力, w, f 分别为微通道的宽、前后面板的厚度, l 为微通道的长度, p 为作用在内表面的压强。

由公式 (2) 可知, 剪切应力 (单位面积的平均应力) 为内部流体压强的两倍, 对于压强为 $1 \sim 10 \text{ MPa}$ 的系统来说, 前、后面板受到的剪切应力不超过 20 MPa 。一般强度较大的金属许用应力为几百兆帕, 20 MPa 的剪切应力不足以破坏框架结构, 引起的形变也非常小。由此可以断定, 换热器在内部压强小于 50 MPa 的情况下不发生断裂, 换热器能保持稳定工作状态。

4.2 结构热稳定性分析

理想状态下, 换热器平板的温度分布很规则: 各平行微通道是相互对称的, 即每个微通道的温度分布都相同; 换热器平板中, 微通道沿流体流动方向, 温度单调递增, 在出口截面处温度最高。因此选择一个微通道, 对其出口截面进行分析, 就可以确定材料温度是否在允许范围之内。

换热器采用层流微通道结构的一个显要优点就是在同一个截面上, 靠近前、后面板流体的各项参数相差不大, 可以认为是相同的。平均换热系数由下式计算^[6]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (3)$$

式中 α 为对流换热系数; 努谢尔数 $Nu = 8$ (微通道深宽比为 $5 \sim 10$ 时^[2]); D 为水力直径, 值为 0.18 mm ; λ 为流体的导热系数。换热器微通道出口处流体的温度为 1500 K , 理想推进剂工质氢在此温度下的导热系数为 $0.62 \text{ kg/m} \cdot \text{K}$ 。由此计算可得换热器微通道出口截面的平均换热系数为 $2.76 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

建立换热器微通道出口处微小段结构模型如图

3 利用 Ansys 进行分析, 边界条件为: 热流密度为 500 W/cm^2 ; 流体温度为 1500 K ; 平均换热系数为 $2.76 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

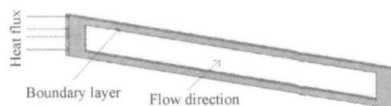


Fig 3 Mini-segment in the exit of micro channel

Ansys 热分析获得的截面上温度场云图如图 4。从图中可以看出, 前面板上下表面的温度差非常小, 大约 10 K 左右, 热积累效应明显, 有利于温度的扩散。镍金属的热扩散系数较大, 将使换热器稳定工作后, 整个前面板的温度相差不大, 整个平板表面温度趋于一致。

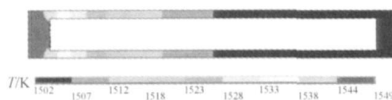


Fig 4 Temperature distributing in the exit section

在图 3 所示模型中, 表面温度为 1549 K 。熔点比这个温度高的纳米氧化物材料很多, 例如: 纳米氧化铜、纳米三氧化二铝等; 镍金属材料的熔点为 1726 K , 也远大于 1549 K 。因此换热器材料不会熔化, 虽然在高温下换热性能有所下降 (高温下, 金属的热导率减少, 导致流体和壁面的温差增大), 但纳米效应不会发生变化, 金属的激光吸收性能不会退化, 所以换热器整体的性能 (光热转换和热量转移能力) 基本保持不变。

保护层材料的要求主要是强度高, 能够把吸收层固定在保护层和金属框架之间; 熔点高, 熔点值至少要大于 1549 K (保护层可能会吸收激光, 本身具有一定的温差), 同时对激光的反射率很小, 保证足够的激光进入换热器内部被吸收层吸收。二氧化硅 (玻璃) 的熔点 1880 K , 强度高, 对激光具有高的透射率, 是一种作为保护层比较理想的材料。

5 微通道内部流体状态参数分布

根据能量守恒方程, 在单个换热器微通道内部, 流体的温度与热流密度之间的关系为

$$\dot{m} \int_{T_{in}}^{T_{out}} c_p(T) dT + Q = \phi l s \quad (4)$$

式中 $\dot{m}$ 为质量流量, $\dot{m} = \rho A V$ 。在微通道尺寸确定的情况下, 流量只与密度 ρ 和流速 v 有关; 而在定压流

动的情况下,流体的密度和温度成反比, $\rho \propto 1/T$ 。 T_{ex} 和 T_{in} 分别为微通道出口和入口处的温度; $c_p(T)$ 为比热; ϕ 为热流密度; l 为长度, s 为微通道占的空间宽度; Q 为损失的热量, 在这里主要是辐射损失, $Q = \varepsilon \sigma T_{face}^4$, T_{face} 是换热器的表面温度, ε 是表面黑度。换热器表面温度等于内部流体的温度 T_{ex} 和总的温差 δT 之和。

流体与换热器内壁的温度差 $\mathcal{T}_{wg}$ 可以表示为^[2]

$$\mathcal{T}_{wg} = \Phi_w H = \Phi_w D Nu k \quad (5)$$

式中 Φ_w 为传给流体的热流密度, $\Phi_w = \Phi_s / (2h + 2v)$, $\Phi_s = \phi - Q$; D 为水利直径; $Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$, H 为换热系数, k 为工质热传导系数。

换热器平板外表面与流体之间的温差分布在保护层、吸收层和框架中。三层的温度差都可以用统一的表达式

$$\mathcal{T}_{face} = \Phi_s t_{face} / k_{face} \quad (6)$$

式中 t_{face} 为各部分的厚度, k_{face} 为各部分的导热率。

肋片的温度表示为

$$\mathcal{T}_{fin} = \Phi_{fin} h / k_{fin} \quad (7)$$

式中 Φ_{fin} 为进入肋片的热流密度。

总的温差为

$$\mathcal{T} = \mathcal{T}_{face1} + \mathcal{T}_{face2} + \mathcal{T}_{face3} + \mathcal{T}_{fin} \quad (8)$$

综上所述,换热器外表面的温度表示为

$$T_{face} = T_{ex} + \mathcal{T} \quad (9)$$

激光辐照功率密度为 500 W/cm^2 , 初始温度为 120 K 时, 根据公式 (4) ~ (9) 可以得出激光辐照功率密度和流体的入口速度对流体温度的影响规律, 下面对这种规律进行分析。

流体的入口速度变化, 温度与微通道长度的变化关系如图 5

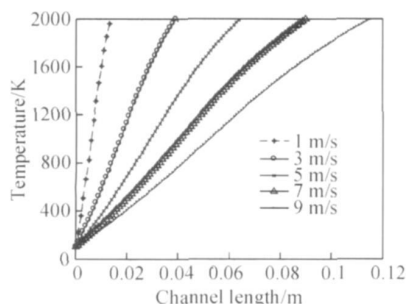


Fig 5 Temperature and length with various velocity at the inlet of micro-channel

在分析换热器内部流体温度随速度的变化规律时, 取图 5 中的平均速度 5 m/s 。当激光辐照功率密

度变化时, 温度与微通道长度的变化关系如图 6

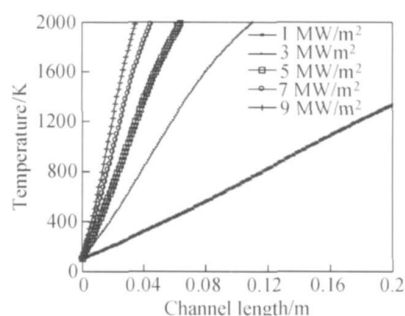


Fig 6 Temperature and length with various intensity of the laser radiation in the front face of micro-channel

从图 5 中可以看出, 单个微通道中, 随着入口速度的增加, 流体温度升高缓慢。这是由于在微通道截面积不变的情况下, 随着入口速度的增加, 推进剂工质的质量流量增大, 要升高同样的温度就需要更多地热量。在同样的热流密度条件下就只有增大表面积, 所以升高同样的温度, 高流速的流体需要更长的微通道。但在达到同样推力的情况下, 换热器总的质量流量不变, 高流速将会使微通道的数量减少, 从而使平板换热器整体结构面积并不一定比低流速的大。

从图 6 可以看出, 激光的辐照功率密度直接影响内部流体的热流密度和温度的提升。随着热流密度的增大, 在流体入口速度不变的情况下, 所需要的微通道长度更短, 这将会使换热器结构更小。

所以, 要得到高效的换热器结构需要高的热流密度, 同时高的流速也可以使换热器的性能提高。但总体上讲入口速度不是越大越好, 必须在层流微通道综合性能允许的情况下越大越好。另外, 在理论上讲, 激光辐照功率密度越大, 热流密度越大, 能量越多, 换热器效果越好。但辐照功率密度受换热器材料的约束, 激光辐照功率密度必须在保证材料的可承受的范围之内。

6 微通道内部压降分析

在换热器微通道中, 雷诺数表示为

$$Re = \frac{\rho_{gas} u D}{\mu} = \frac{m D}{\mu A_{flow}} \quad (10)$$

在热流密度为 5 MW/m^2 , 入口速度为 5 m/s 的条件下, 雷诺数的最大值不超过 800, 在充分发展的微通道中, 流体处于层流状态。

在充分发展的层流微通道中, 管道的压降可以表示为^[7]

$$\Delta p = \frac{C_f \dot{m}}{2 A_{\text{flow}} D_2} \frac{1}{\rho_{\text{gas}}(x)} \int_0^l \mu(x) dx \quad (11)$$

式中粘性系数 $\mu(x) \propto T^{1/2}$, C_f 为几何常数, 跟通道尺寸有关。

把管道长度分为 n 等分, 每段长 Δl , 每一段中流体被认为是均匀的, 各参数 (压强、密度、速度和粘性系数) 在这一微小段处处相等, 每一段压降为

$$\Delta p_i = \frac{C_f \dot{m}}{2 A_{\text{flow}} D^2} \int_{l_i}^{l_i+\Delta l} \frac{\mu(x)}{\rho_{\text{gas}}(x)} dx = \frac{C_f}{2} \frac{1}{D^2} v_i(x) \mu_i(x) \Delta l \quad (12)$$

式中 $v_i(x)$ 为在微通道流管方向位移为 l_i 处的速度, 跟此处的温度成反比。考虑粘性系数的变化, 每一位小段中的压降和温度的开方成反比。在单一微通道中, 随着温度的升高, 相同长度产生的压降 Δp_i 减少。

利用迭代法求解公式 (4), 算出每一段的温度, 通过温度算出这一段的速度和粘性系数, 代入式 (12), 求出每一段的压降, n 段相加得出总的压降, 总的压降为

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \quad (13)$$

从式 (12) 和 (13) 可以看出, 压降主要与流体的速度、粘性系数和微通道的结构尺寸有关, 其中流速和粘性系数受到微通道结构尺寸的影响。在确定发动机的质量流量的情况下, 流体的速度与微通道总的截面积成反比, 保持稳定的流速不变就要使微通道总的截面积不变。当单个微通道的尺寸变细时, 可以通过微通道个数增加来保持总的截面积不变。在微通道中, 尺寸越细, 惯性力与粘性力之比越来越小, 粘性系数越小。目前对于粘性系数与微通道尺寸之间的关系还只是在实验中得出的结论, 没有成型的理论。大体上讲, 微通道越细越短, 粘性系数越小, 在流速确定的情况下, 微通道内部的压降减少。另外, 微通道长度越短, 压降累积效应减弱, 总的压降减少。

对于图 2 所示的高效换热器, 通过图 5 和图 6 可以看出, 换热器出口温度达到 1 500 K 时, 微通道的长度为 5 μm 左右, 利用式 (12) 和 (13), 计算求得整

个微通道的压降大约为 15 kPa 左右, 微通道内部流体的压强高达几十个大气压, 15 kPa 的压降在数值计算中可以忽略不计, 换热器微通道内部流体做等压流动。

7 结 论

(1) 本文提出的新型复合结构外壳激光供能换热器具有较高激光吸收率, 使 Kare Jordin T 提出的换热器模式激光推进火箭更具有现实价值。

(2) 在高效吸收入射激光能量的换热器中, 单个微通道越细越短, 压降越小。对于几个兆帕的压强来说, 内部的压降非常小, 可以忽略不计, 换热器内部流体做等压流动。

(3) 高的激光辐照功率密度和低的入口速度可以减少单个微通道的长度, 快速提高换热器内部流体的温度。在目前激光器功率较低和材料的制约下, 可以降低流体的入口速度和延长单个微通道的长度来提高流体的温度达到理想值。

参考文献:

- [1] Kare Jordin T. Laser-powered heat exchanger rocket for ground-to-orbit launch [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(3).
- [2] Kare Jordin T. High performance heat exchanger for laser propulsion [C]. 36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Toronto, Ontario Canada, 2005.
- [3] 徐啟阳, 王新兵. 高功率连续 CO₂ 激光器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [4] 王中林. 纳米材料表征 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 张光钧, 陈振耀. 激光热处理中的纳米氧化物吸收涂层 [J]. *金属热物理*, 2004, 29(8).
- [6] 茹卡乌斯卡斯 A A. 换热器内的对流传热 [M]. 马昌文, 译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [7] 俞 坚, 马重芳, John Lawer. 陶瓷微通道内的传热和压降特性 [J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(1).

(编辑: 郭振伶)