

文章编号: 1000-8055(2009)02-0324-07

基于遗传算法的双层发散冷却优化

时骏祥, 王建华
(中国科学技术大学 热科学与能源工程系, 合肥 230027)

摘 要: 描述了基于遗传算法的双层多孔介质骨架发散冷却的优化方法. 冷却剂在固定压差(Be 数)与多孔介质特征尺寸的条件下被注入固体骨架, 通过改变多孔介质的材料、孔隙率和厚度比例, 在满足固体骨架的质量和成本等约束条件下, 以最低热端表面温度为优化目标, 利用遗传算法找出可行的最优冷却结构设计. 计算结果表明, 靠近冷端的第一层多孔介质孔隙率应当尽可能的大以提高冷却剂流量, 但是其组成材料对热端表面温度影响很小, 而第二层靠近热端的多孔介质的组成材料对热端表面温度有很重要的影响, 它的孔隙率取決与其对有效导热系数、冷却剂流量和内部热交换系数三方面影响的平衡.

关 键 词: 发散冷却; 优化冷却; 遗传算法; 多孔介质

中图分类号: 231.1 文献标识码: A

Diffusion cooling optimization of two layers porous plate using genetic algorithm

SHI Jun xiang, WANG Jian-hua
(Department of Thermal Science and Energy Engineering,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: An optimization method of diffusion cooling with two layers porous matrix was presented in this paper. Coolant was injected into the solid matrix under certain differential pressures and characteristic sizes of the porous matrix. With the variation of the porous material, porosity and thickness ratio, the minimum temperature of the hot surface is ultimately subject to cooling optimization when the global constraint conditions of mass and cost, etc, are satisfied. In this paper, the genetic algorithm was used to find the feasible optimization design with the analytical solution of one-dimensional LNTE model. The results show that the porosity of the porous plate close to the coolant reservoir should be as large as possible, but this phenomenon is not correct on the porosity of the porous plate close to the hot surface, its value depends on the balance of effects on the effective thermal conductivity, heat convective coefficient and coolant mass flow rate.

Key words: diffusion cooling; cooling optimization; porous plate; genetic algorithm

符号表	h	第一层多孔介质厚度 m
y, Y	T	温度 K
H	k	导热率 W / m · K

收稿日期: 2008-01-07; 修订日期: 2008-06-20
基金项目: 国家自然科学基金(90305006; 10772175); 安徽省教育厅自然科学基金(2004kj365zd); 国家教委留学人员回国基金
作者简介: 时骏祥(1978-), 男, 四川南充人, 博士生, 从事计算流体与传热方面的研究. E-mail: shijx@mail.ustc.edu.cn
通讯作者: 王建华, 教授, 博士生导师.

h_w	孔内对流换热系数 $W/m^3 \cdot K$
m	冷却介质流量 $kg/m^2 \cdot s$
Be	Bejan 数
K	渗透率 m^2
ε	孔隙率
κ, λ	有效导热系数比
θ	无量纲温度
d_p	多孔介质特征尺寸 m
c	比热容 $J/kg \cdot K$
μ	粘性 $N/s \cdot m^2$
α	热扩散系数 m^2/s
Bi_v	孔内比奥数
Bi_c	冷却介质注入端比奥数
M	无量纲冷却剂流量
Re	雷诺数
下标	
S	固体
F	流体
C	冷却介质
G	热段
I	层号
E	有效值

发散冷却作为一种非常高效的冷却技术,已经在很多方面得到了研究和应用,如超声速飞行器、火箭喷管、燃烧与推进室等等.用最小的代价取得最佳的冷却效果是发散冷却系统设计的最终目标.从文献^[1-2]中知道影响冷却效果的因素有很多,例如冷却剂流量、多孔介质材料、孔隙率、特征尺寸、厚度等等.多孔介质的特征尺寸和孔隙率往往由于工艺原因有所限制,并且,多孔介质骨架的质量和成本是设计过程中需要考虑的,这些约束条件虽然与冷却效果无直接关联,却使得发散冷却结构的设计变得更为复杂,对于想要设计出最优的发散冷却结构,尤为如此.

文献[3]提出了多层多孔介质与非多孔介质相互组合来优化冷却效率,文献[4]建立了双层多孔介质发散冷却的非热平衡模型,但是,双层多孔介质如何组合才能达到最优的冷却效率,即最低的热端表面温度,并没有被讨论.

遗传算法作为一种 20 世纪出现的一种高度并行、随机、自适应搜索算法,已经在许多智能优化问题中成功应用.在优化传热的研究中,遗传算法的应用也有许多成功的案例^[5-7].文献[5]基于二维热平衡假设,对多层多孔介质板换热器的优

化换热进行了研究,在各层厚度相等的前提下,通过遗传算法,寻找出最优换热的多层多孔介质结构(孔隙率和材料),并取得很好的结果.尽管如此,对于多层多孔介质发散冷却优化的问题,就作者所知,并没有被很好的解决.

本文基于一维非热平衡,将优化冷却与遗传算法相结合,寻找出给定约束条件下,双层多孔介质的最优组合方式,设计参数包括各层多孔介质的材料、孔隙率和厚度比例.同时,还将讨论压差(Be 数)与特征尺寸对优化结果的影响.本文的目的在于为发散冷却结构设计提供一种智能优化的方法.

1 物理模型及控制方程

双层多孔介质发散冷却原理如图 1 所示:冷却介质以流量 m 、储存舱温度 T_c 、与热流 q 相反的方向注入一个厚度为 H 的多孔介质骨架,形成

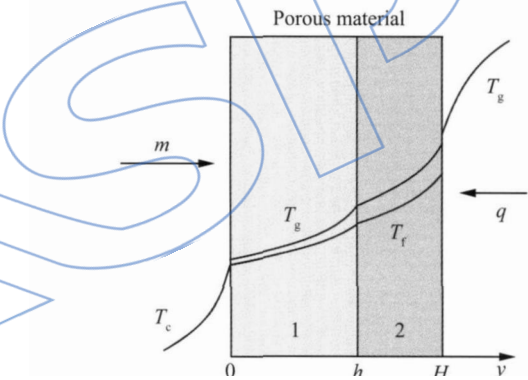


图 1 双层冷却模型

Fig. 1 Cooling model with two porous layers

一个反向热交换器.图中多孔介质骨架分为两层,两层多孔介质特征尺寸相同,但孔隙率与固体材料不同,且厚度比例也不相同.根据文献[1],发散冷却中,多孔介质内部 Re 数的数量级通常远大于 1,所以,冷却剂的惯性力不能被忽略,在一维、不可压缩、稳态、非热平衡模型中,冷却剂流体应满足动量方程

$$\Delta p = - \frac{\mu_i}{K_i} u - \frac{\rho F_i}{\sqrt{K_i}} |u| u \tag{1}$$

其中 K_i 为各层多孔介质的渗透率, F_i 为各层多孔介质的 Forchheimer 系数,它们的计算公式如下:

$$\begin{cases} K_i = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{150(1 - \varepsilon)^2} & i = 1, 2 \\ F_i = \frac{1.75}{\sqrt{150} \varepsilon^3} \end{cases} \tag{2}$$

在固定压差与特征尺寸 d_p 不变的情况下, 各层多孔介质孔隙率和厚度比例的变化会导致整个多孔介质渗透率的变化, 并将进一步的导致冷却剂注入量的变化. 文献[8]中, Bejan 提出了一个无量纲系数 Be 用来衡量可用来推动流体穿过多孔介质的压力差大小, 称为 Bejan 数. 因为多孔介质总厚度为常数, 冷却介质的热扩散系数和粘性被假设为不受温度影响, Bejan 数只随压力差的改变而变化

$$Be = \frac{H^2 \Delta p}{\alpha_f \mu_f} \quad (3)$$

根据文献[4, 9], 一维发散冷却过程中, 当冷却剂的导热系数远远小于固体骨架的导热系数, 且孔隙率不大时, 多孔介质固体骨架与冷却剂流体之间的有效导热系数比远大于 1, 在不考虑流体热弥散的情况下, 可以忽略冷却剂流体的热扩散项. 在本文中, 涉及的多孔介质材料均为导热率较高的金属, 而冷却剂为导热率很低的空气. 因此, 建立分段能量控制方程如下:

$$k_{se,i} \frac{d^2 T_s}{dy^2} = h_{v,i} (T_s - T_f) \quad (4)$$

$$mc_f \frac{dT_f}{dy} = h_{v,i} (T_s - T_f) \quad (5)$$

$k_{se,i} = k_{s,i} (1 - \varepsilon)$ 为多孔介质固体的有效导热系数, $h_{v,i}$ 为多孔介质内部单位体积的热交换系数, 需要指出的是, 热交换系数根据多孔介质内部结构的不同有不同的经验公式. 显然, 热交换系数公式不同, 热端表面温度也会不同, 冷却优化结果也随之改变. 因此在优化开始前, 需要事先知道多孔介质的内部结构. 在本文的发散冷却中, 多孔介质内部 Re 数都在 2~3 个数量级上, 因此本文采用了文献[10]提出的适用于多孔介质内部 Re 数大于 350 情况下的热交换系数

$$h_{v,i} = \frac{20.346(1 - \varepsilon) \varepsilon^2}{d_p} \left[1.064 \left(\frac{k_f}{d_p} \right) Pr^{0.33} Re^{0.59} \right] \quad (6)$$

式中的冷却介质导热率以其在注入端的导热率为准, 并假设不受温度变化影响.

根据文献[4, 9], 例如 $y = 0$ 冷端和 $y = H$ 热端的边界条件如下:

$$y = 0, \quad k_{se,1} \frac{dT_s}{dy} = h_c (T_s - T_c) \quad (7)$$

$$y = 0, \quad mc_f (T_f - T_c) = h_c (T_s - T_c) \quad (8)$$

$$y = H, \quad q = k_{se,2} \frac{dT_s}{dy} \quad (9)$$

这里的 q 是热端的热流密度, 本文中假设它不受

冷却介质注出的影响.

$y = h_2$ 两层多孔介质交界处, 根据文献[4]中的温度连续和热流连续, 确立边界条件如下:

$$y = h, \quad T_s|_{y=h^-} = T_s|_{y=h^+} \quad (10)$$

$$y = h, \quad T_f|_{y=h^-} = T_f|_{y=h^+} \quad (11)$$

$$y = h, \quad k_{se,1} \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{y=h^-} = k_{se,2} \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{y=h^+} \quad (12)$$

对热控制方程及其边界条件无量纲化

$$Y = \frac{y}{H}, \quad \theta_s = \frac{T_s - T_c}{\frac{qH}{k_f}}, \quad \theta_f = \frac{T_f - T_c}{\frac{qH}{k_f}}, \quad \kappa = \frac{k_{se,i}}{k_f}$$

$$\lambda_2 = \frac{k_{se,2}}{k_{se,1}}, \quad Bi_{v,i} = \frac{h_{v,i} H^2}{k_{se,i}}, \quad Bi_c = \frac{h_c H}{k_{s,1}}$$

$$\frac{d^2 \theta_s}{dY^2} = Bi_{v,i} (\theta_s - \theta_f) \quad (13)$$

$$M \frac{d\theta_f}{dY} = Bi_{v,i} \kappa_i (\theta_s - \theta_f) \quad (14)$$

$$Y = 0, \quad \frac{d\theta_s}{dY} = Bi_c \theta_s \quad (15)$$

$$Y = 0, \quad M\theta_f = Bi_c \kappa \theta_s \quad (16)$$

$$Y = 1, \quad \kappa_2 \frac{d\theta_s}{dY} = 1 \quad (17)$$

$$Y = h/H, \quad \theta_s|_{Y=\frac{h}{H}^-} = \theta_s|_{Y=\frac{h}{H}^+} \quad (18)$$

$$Y = h/H, \quad \theta_f|_{Y=\frac{h}{H}^-} = \theta_f|_{Y=\frac{h}{H}^+} \quad (19)$$

$$Y = h/H, \quad \frac{\partial \theta_s}{\partial Y} \Big|_{Y=\frac{h}{H}^-} = \lambda_2 \frac{\partial \theta_s}{\partial Y} \Big|_{Y=\frac{h}{H}^+} \quad (20)$$

文献[9]给出了单层多孔介质板发散冷却的简化模型的解析解. 本文中虽然是双层多孔介质, 但是解析解的表达形式并没有改变, 通过推导, 得到解析解表达式如下:

$$\begin{cases} \theta_{s,i} = K_{i,1} C_{i,1} e^{k_{i,1} Y} + K_{i,2} C_{i,2} e^{k_{i,2} Y} + C_{i,3} \\ \theta_{f,i} = C_{i,1} e^{k_{i,1} Y} + C_{i,2} e^{k_{i,2} Y} + C_{i,3} \end{cases} \quad (21)$$

$$k_{i,(1,2)} = \frac{-\frac{Bi_{v,i} \kappa_i}{M} \pm \sqrt{\left(\frac{Bi_{v,i} \kappa_i}{M}\right)^2 + 4Bi_{v,i}}}{2} \quad (22)$$

$$K_{i,(1,2)} = 1 + \frac{M}{Bi_{v,i} \kappa_i} k_{i,(1,2)} \quad (23)$$

$C_{i,j} (i = 1, 2, j = 1, 2, 3)$ 可以通过 6 个边界条件(式(15)~(20))来确定. 从解析解可以看出, 多孔骨架的热表面温度受到冷却剂流量、孔隙率、特征尺寸、厚度比例和固体材料这些参数的影响. 本文将以最低热端表面温度为优化目标, 以孔隙率、固体材料和厚度比例为优化参数, 在求解最佳冷却结构的同时, 分析讨论压差和特征尺寸对优

化结果的影响.

2 遗传算法

遗传算法(Genetic algorithm) 是一类借鉴生物界适者生存、优胜劣汰的进化规律演化而来的随机化搜索方法. 它将问题的可行解编码为由基因组成的染色体, 通过模拟染色体群的选择、交叉和变异等操作, 不断迭代, 最终收敛到高适应度值的染色体, 从而求得问题的最优解或满意解. GA 对问题参数编码后, 操作不再针对参数本身, 使得 GA 不受优化函数约束条件的限制, 诸如连续性、可导性等.

本文中, 优化输入参数包括孔隙率, 材料, 厚度比例. 将这三种参数进行编码, 如下:

00111001|11001011|00111|00111101

前两段 7 位二进制编码表示各层多孔介质的孔隙率, 将 7 位编码换算成十进制数后为 p_r , 计算孔隙率的公式如下:

$$\varepsilon = (p_r/127)(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) + \varepsilon_{\min}$$

公式中 p_r 是 7 位二进制编码转换为十进制后得到的一个介于 0 到 127 的数, $\varepsilon_{\max}$ 与 $\varepsilon_{\min}$ 为孔隙率最大值和最小值的条件约束. 需要说明的是, 选取 7 位编码是由于 7 位编码可以保证孔隙率达到 8×10^{-3} 的精度要求, 在实际应用中, 根据需要还可以减少或者增加位数, 以减少计算量或提高精度. 第 3、4 段 2 位二进制编码表示各层多孔介质的材料, 00- Al(铝), 01- Cu(纯铜), 10- Fe(铁), 11- Br(黄铜). 第 5 段 7 位二进制编码可以换算成第 1 层多孔介质对整个冷却结构的厚度比例, 即 h/H .

本文中采用的是传统的遗传算法流程, 交叉概率与变异概率分别为 0.8 与 0.1, 选择操作时采用没有重复的稳态繁殖以避免早熟现象的发

生, 迭代次数 500.

3 结果及分析

表 1 中提供了 4 种待选材料在 300 K 时的导热率, 相对密度(以 Al 为基准), 相对成本(以 Fe 为基准)以及综合成本(密度 $\times$ 单位成本), 其中成本来自文献[5]. 在成本约束条件中, 考虑的是综合成本.

表 1 4 种金属材料的导热率、密度(无量纲)与成本(无量纲)

Table 1 Thermal conductivity, density and cost of four metals

材料	导热率 W/m·K	密度/Al	成本/Fe	综合成本
Al	203.5	1	18.9	18.9
Cu	386.4	3.305	12.8	42.3
Fe	46.52	2.911	1	2.911
Br	108.9	3.292	13	42.8

首先, 不考虑多孔介质骨架的重量和成本, 仅以最低热端表面温度为优化冷却的目标, 结果如表 2 所示.

多孔骨架质量计算公式
质量 =

$$(1 - \varepsilon_1) \times \rho_1 \times h + (1 - \varepsilon_2) \times \rho_2 \times (H - h)$$

多孔骨架综合成本计算公式

$$\text{综合成本} = (1 - \varepsilon_1) \times \rho_1 \times c_1 \times h + (1 - \varepsilon_2) \times \rho_2 \times c_2 \times (H - h)$$

从表 2 中可以看出, 导热性能最好的 Cu 成为了多孔骨架的唯一材料. 我们已经知道高导热系数的固体可以将热量传递的更远, 同时增强固体与冷却剂之间的热交换, 因此表 2 的结果在意

表 2 无约束条件的优化结果 $Be = 10^{11}$, $d_p = 2 \times 10^{-3}$ m, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

Table 2 Optimal solution without constraints, at $Be = 10^{11}$, $d_p = 2 \times 10^{-3}$ m, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

次数	第 1 层	第 2 层	热表面温度/ 10^{-4}	质量	综合成本
1	Cu/ 0.8/ 0.7925	Cu/0.6819/ 0.2075	0.3479	0.7428	9.51
2	Cu/ 0.8/ 0.7975	Cu/0.6819/ 0.2025	0.3473	0.7409	9.48
3	Cu/ 0.8/ 0.8025	Cu/0.6819/ 0.1975	0.3466	0.7391	9.46
4	Cu/ 0.8/ 0.8025	Cu/0.6488/ 0.1975	0.3488	0.7609	9.74
5	Cu/ 0.8/ 0.7350	Cu/0.6961/ 0.2650	0.3548	0.7524	9.63

提示: Cu/ 0.6/ 0.7975 依次表示材料/孔隙率/无量纲厚度; 表面温度, 质量, 综合成本均为无量纲

料之中. 影响固体有效导热系数的除了固体材料外, 还有孔隙率. 从式(1)~(2)中得知, 大的孔隙率会增加冷却剂的注入量, 同时还会导致固体有效导热系数的降低, 图2展示了孔隙率对多孔介质内部热交换系数的影响, 因此, 孔隙率是一个具有三方面影响因素的参数, 它的大小取决于它所造成影响的均衡化. 表2中第1层靠近冷端的多孔介质孔隙率均为最大值, 这说明了增加冷却剂流量的影响超过了降低固体有效导热系数和内部热交换系数的影响, 而第2层靠近热端的多孔介质孔隙率显然是三者的平衡. 需要注意的是, 厚度比例与孔隙率产生的影响是很相似的, 所以两层的厚度不相同也在情理之中了.

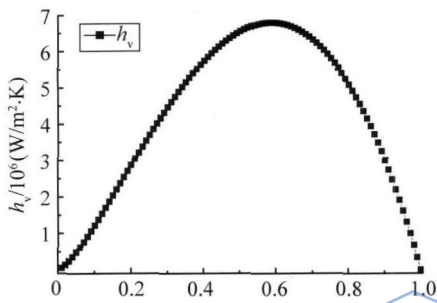


图2 孔隙率对多孔介质内部热交换系数的影响

Fig. 2 Effect of the porosity on the heat transfer coefficient in the porous media

在发散冷却结构的优化中, 成本是一个必须考虑到的问题, 表2中的Cu导热性能最好, 同时它的综合成本也最高. 表3以整个多孔骨架的综合成本为约束, 取值为表2综合成本的一半, 进行结构优化.

表4在对成本约束的同时, 还对质量进行了约束, 这是因为在航空航天中, 冷却结构的质量对飞行器的设计有着重要的影响.

从表3和表4可以看出, 约束条件不同, 优化结果也不同. 表3中第1层材料为Fe, 第2层材料为Cu; 表4中两层材料均为Al. 表3的热端表面温度与表2相差很小, 而表4的热端表面温度则明显上升. 这个差别可以从图3中看出, 图3展示了多孔介质内部的温度分布, 数据来自表3与表4的第三次优化结果, 两个结果的厚度比例相同, 孔隙率也非常近似, 唯有材料各不相同. 从图3可以看出, 靠近热端的第2层多孔介质中, 固体与冷却剂的温度降低的很快, 同时第2层的温度梯度也要远远大于第1层, 所以, 无论是热扩散和对流热交换, 第2层都远远超过了第1层. 所以可以得到这样的结论, 在孔隙率与厚度比例确定的条件下, 第2层对冷却起到的作用要大于第1层, 这就是为什么表4中第1层的导热系数大于表3, 第1层的导热系数小于表3, 而热端表面温度要远远大于表3.

表3 有成本约束条件的优化结果: 成本< 5.0, at Be = 10¹¹, ε ∈ [0.2, 0.8]

Table 3 Optimal solution with mass constraint cost< 5.0, at Be = 10¹¹, ε ∈ [0.2, 0.8]

次数	第1层	第2层	热表面温度/10 ⁻⁴	质量	综合成本
1	Fe/0.8/0.7450	Cu/0.6819/0.255	0.3544	0.7029	3.89
2	Fe/0.8/0.8025	Cu/0.6819/0.1975	0.3478	0.6760	3.16
3	Fe/0.8/0.7925	Cu/0.6791/0.2075	0.3488	0.6827	3.31
4	Fe/0.8/0.8025	Cu/0.6830/0.1975	0.3480	0.6752	3.15
5	Fe/0.8/0.8	Cu/0.6819/0.2	0.3480	0.6771	3.19

表4 有成本质量同时约束条件的优化结果: 质量< 0.25, 成本< 5.0, at Be = 10¹¹, ε ∈ [0.2, 0.8]

Table 4 Optimal solution with mass and cost constraints weight< 0.25, cost< 5.0, at Be = 10¹¹, ε ∈ [0.2, 0.8]

次数	第1层	第2层	热表面温度/10 ⁻⁴	质量	综合成本
1	Al/0.8/0.795	Al/0.6813/0.2050	0.4132	0.2246	4.25
2	Al/0.8/0.8025	Al/0.6801/0.1975	0.4119	0.2240	4.23
3	Al/0.8/0.7925	Al/0.6789/0.2075	0.4132	0.2254	4.26
4	Al/0.8/0.7875	Al/0.6796/0.2125	0.4140	0.2259	4.27
5	Al/0.8/0.79	Al/0.6801/0.21	0.4137	0.2255	4.26

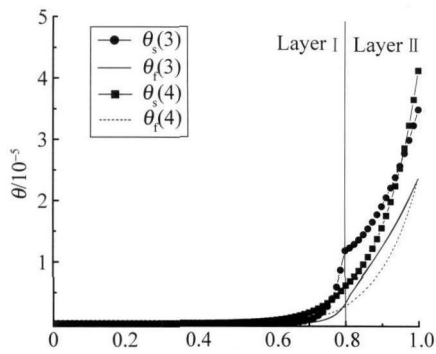


图 3 多孔骨架中的内部温度分布
(表 3 与表 4 的第三次优化结果)

Fig. 3 Temperature distributions of the third data in table 3 and 4

1) 压差对冷却结果的影响

表 5 与表 6 分别展示了 Be 数为 10^{10} 和 10^{12} , 其他条件不变时的优化结果.

从表 5 和表 6 的结果可以看出, Be 数降低, 表面温度明显升高, 这是因为 Be 数降低意味着压差降低, 冷却剂流量也随之减少. 将表 5、表 6 优化结果与表 2 中比较, 可以看出, Be 数降低后, 第 2 层靠近热端的多孔介质层的孔隙率进一步提高, 这表明大孔隙率提高冷却剂流量的影响进一步扩大.

2) 特征尺寸对冷却结果的影响

表 7、表 8 分别展示了特征尺寸为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 和 $8 \times 10^{-4} \text{ m}$, 其他条件不变时的优化结果.

表 5 无约束条件的优化结果 $Be = 10^{10}$, $d_p = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

Table 5 Optimal solution without constraints, at $Be = 10^{10}$, $d_p = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

次数	第 1 层	第 2 层	热表面温度/ 10^{-4}	质量	综合成本
1	Cu/ 0. 8/ 0. 777 5	Cu/0. 767 0/ 0. 222 5	0. 818 7	0. 6854	8. 77
2	Cu/ 0. 8/ 0. 745 0	Cu/0. 771 7/ 0. 255 0	0. 821 7	0. 6850	8. 76
3	Cu/ 0. 8/ 0. 777 5	Cu/0. 767 0/ 0. 222 5	0. 818 7	0. 6854	8. 77
4	Cu/ 0. 8/ 0. 777 5	Cu/0. 767 0/ 0. 222 5	0. 818 7	0. 6854	8. 77
5	Cu/ 0. 8/ 0. 777 5	Cu/0. 767 0/ 0. 222 5	0. 818 7	0. 6854	8. 77

表 6 无约束条件的优化结果 $Be = 10^{12}$, $d_p = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

Table 6 Optimal solution without constraints, at $Be = 10^{12}$, $d_p = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

次数	第 1 层	第 2 层	热表面温度/ 10^{-4}	质量	综合成本
1	Cu/ 0. 8/ 0. 782 5	Cu/0. 620 5/ 0. 217 5	0. 177 8	0. 7909	10. 12
2	Cu/ 0. 8/ 0. 792 5	Cu/0. 621 3/ 0. 207 5	0. 177 0	0. 7850	10. 05
3	Cu/ / 0. 8/ 0. 792 5	Cu/0. 620 5/ 0. 207 5	0. 177 0	0. 7855	10. 06
4	Cu/0. 8/ 0. 8	Cu/ 0. 615 7/ 0. 2	0. 176 4	0. 7833	10. 02
5	Cu/ 0. 8/ 0. 797 5	Cu/0. 619 2/ 0. 202 5	0. 176 6	0. 7834	10. 03

表 7 无约束条件的优化结果 $Be = 10^{11}$, $d_p = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

Table 7 Optimal solution without constraints, at $Be = 10^{11}$, $d_p = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

次数	第 1 层	第 2 层	热表面温度/ 10^{-4}	质量	综合成本
1	Cu/ 0. 8/ 0. 74	Cu/0. 767 0/ 0. 26	0. 376 0	0. 6896	8. 83
2	Cu/ 0. 8/ 0. 712 5	Cu/0. 771 7/ 0. 287 5	0. 377 2	0. 6881	8. 81
3	Cu/ 0. 8/ 0. 74	Cu/0. 767 0/ 0. 26	0. 376 0	0. 6896	8. 83
4	Cu/ 0. 8/ 0. 73	Cu/0. 767 0/ 0. 27	0. 376 5	0. 6906	8. 84
5	Cu/ 0. 8/ 0. 777 5	Cu/0. 757 4/ 0. 222 5	0. 374 1	0. 6854	8. 86

表 8 无约束条件的优化结果 $Be = 10^{11}$, $d_p = 8 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

Table 8 Optimal solution without constraints, at $Be = 10^{11}$, $d_p = 8 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\varepsilon \in [0.2, 0.8]$

次数	第 1 层	第 2 层	热表面温度/ 10^{-4}	质量	综合成本
1	Cu/ 0. 8/ 0. 792 5	Cu/0. 776 4/ 0. 207 5	0. 393 2	0. 6773	8. 67
2	Cu/ 0. 8/ 0. 755	Cu/0. 7858/0. 245	0. 394 3	0. 6726	8. 61
3	Cu/ 0. 8/ 0. 772 5	Cu/0. 781 1/ 0. 227 5	0. 393 9	0. 6752	8. 64
4	Cu/ 0. 8/ 0. 792 5	Cu/0. 776 4/ 0. 207 5	0. 393 2	0. 6773	8. 67
5	Cu/ 0. 8/ 0. 792 5	Cu/0. 781 1/ 0. 207 5	0. 393 7	0. 6126	8. 64

从表 7 和表 8 的优化结果可以看出,特征尺寸的减少使得热端表面温度上升,同时第 2 层的孔隙率增加.虽然特征尺寸减小,多孔介质的内部热交换系数增大,但同时多孔介质的渗透率降低,相同 Be 数的条件下,冷却剂流量减少.热端表面温度的上升说明了减少冷却剂流量的影响占据了主导地位,同时第 2 层孔隙率的上升也说明了在三方面影响中,孔隙率对冷却剂影响的地位得到了提高.

4 结论与展望

本文通过一维、非热平衡的解析解与遗传算法相结合,以多孔介质固体骨架的质量和成本为约束条件,以最低热端表面温度为目标,提出了一个发散冷却最优化的设计思路.计算结果表明,这样的冷却优化算法是有效的,在满足约束条件的同时,保证了发散冷却结构的冷却效率.

本文中的优化输入参数包括多孔介质的材料、孔隙率和厚度比,通过对优化结果的分析,我们得到了以下三点结论:

- 1) 在本文给出的条件下,第 1 层多孔介质对热端表面温度的影响主要体现在大孔隙率增加冷却剂流量上,同时,第 1 层的材料对热端表面温度影响很小.
- 2) 第 2 层多孔介质的材料对于热端表面温度有着很重要的影响,而它的孔隙率则要兼顾对有效导热系数、冷却剂流量和内部热交换系数这三方面的影响.
- 3) Be 数越大,热端表面温度越低是显然意见的结论,需要注意的是 Be 数的减小会同时增加孔隙率对冷却剂流量的影响.多孔介质特征尺寸的减小在降低冷却剂流量的同时,还会提高内部热交换系数,因此它对优化结果的影响很难有一般性结论,在本文给出的条件下,特征尺寸越小,

热端表面温度越高,第 2 层孔隙率也越大,说明特征尺寸对冷却剂流量的影响占据主导.

在进一步的研究中,可选材料将包括以陶瓷为代表的抗高温、低导热率材料.在本文中,最低的热端表面温度是优化目标,但是并没有充分考虑到多孔介质固体自身抗高温特性,在进一步的研究中,温度同样需要约束条件,即不要过高,例如不能超过材料的烧蚀温度;也不要过低,要充分发挥多孔材料的抗高温特性.

参考文献:

[1] Greuel D, Herbertz A, Haidn O J, et al. Diffusion cooling applied to C/C liners of cryogenic liquid rocket engines [R]. Fort Lauderdale, Florida: AIAA / ASME / SEA/ AS-EE/ JPC Conference and Exhibit, 2004- 3682, 2004.

[2] Landis J A, Bowman J W. Numerical study of a diffusion cooled rocket nozzle [R]. AIAA Paper 96- 2580, 1996.

[3] Lee C P, Schafrik R E, Darolia R. Multilayer thermal barrier coating with diffusion cooling: US patent, 6511762B1[S]. 2000.

[4] Wolfersdorf J V. Effect of coolant side heat transfer on diffusion cooling [J]. J. of Heat and Mass Transfer, 2005, 41: 327- 337.

[5] Wildt Tremblay P, Gosselin L. Layered porous media architecture for maximal cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50: 464- 478.

[6] Ozkol I. Determination of the optimum geometry of the heat exchanger body via a genetic algorithm [J]. Numerical Heat Transfer Part A - Applications, 2005, 48: 283- 296.

[7] Younes M. A genetic algorithm for the shape optimization of parts subjected to thermal loading [J]. Numerical Heat Transfer Part A- Applications, 2001, 39: 449- 470.

[8] Bejan A. Convection heat transfer [M]. 3rd ed. New York: Wiley, Chapter 12, 2004.

[9] WANG J H, WANG H N. A discussion of diffusion cooling problems through an analytical solution of local thermal non equilibrium model [J]. ASME J. of Heat Transfer, 2006, 128: 1093- 1098.

[10] Hwang G J, Wu C C, Chao C H. Investigation of non-darcian forced convection in an asymmetrically heated sintered porous channel [J]. ASME J. Heat Transfer, 1995, 117: 725- 732.