DOI: 10.3901/JME.2014.04.142

基于焓耗散率最小的燃气涡轮叶片 冷却构形优化*

冯辉君^{1,2,3} 陈林根^{1,2,3} 谢志辉^{1,2,3} 孙丰瑞^{1,2,3}

(1. 海军工程大学热科学与动力工程研究室 武汉 430033;

2. 海军工程大学舰船动力工程军队重点实验室 武汉 430033;

3. 海军工程大学动力工程学院 武汉 430033)

摘要: 基于构形理论,以焓耗散率最小为优化目标,对燃气涡轮基元级叶片进行构形优化,得到量纲一当量热阻最小的基元级叶片最优构形。结果表明:在基元级叶片总横截面积和空腔占比一定的条件下,存在最佳空腔直径与叶片厚度比使得基元级叶片量纲一当量热阻取得最小值,但不存在最佳空腔边距与叶片厚度比、最佳叶片厚度与长度比使得基元级叶片量纲一当量热阻取得最小值。在叶片结构强度允许的前提下,提高空腔占比,减小空腔与叶片表面的距离,保持基元级叶片狭长均有利于提高基元级叶片的整体传热性能。焓耗散率最小和最大温差最小的基元级叶片最优构形是明显不同的,焓耗散率最小的构形优化比最大温差最小的构形优化更能有效地降低基元级叶片的平均传热温差,提高其整体传热性能。此外,通过对基元级叶片冷却空腔进行多尺度构形优化,其整体传热性能也得到明显提高。

关键词: 构形理论; 焓耗散率; 叶片冷却; 广义热力学优化

中图分类号: TK12

Constructal Entransy Dissipation Rate Minimization for Gas-turbine Blade Cooling

FENG Huijun^{1,2,3} CHEN Lingen^{1,2,3} XIE Zhihui^{1,2,3} SUN Fengrui^{1,2,3}

(1. Institute of Thermal Science and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033;

2. Military Key Laboratory for Naval Ship Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033;

3. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract: Based on constructal theory, the construct of an elemental gas-turbine blade is optimized by taking minimum entransy dissipation rate as optimization objective. The optimal construct of the elemental gas-turbine blade is obtained. The results show that for the fixed total cross-sectional area and cavity faction of the elemental gas-turbine blade, there exists an optimal ratio of the cavity diameter to the thickness of the elemental blade which leads to the minimum dimensionless equivalent thermal resistance of the elemental blade; but there do not exist the optimal ratios of the cavity edge distance to the thickness, as well as the length to the thickness of the elemental blade which lead to the minimum dimensionless equivalent thermal resistance of the elemental blade. On the premise that the structural strength of the blade is allowed, the increase of the cavity fraction, the decrease of the cavity edge distance, and the slenderness of the elemental blade will help to improve the global heat transfer performance of the elemental blade. The optimal constructs of the elemental blade based on the minimizations of entransy dissipation rate and maximum temperature difference are different. The average heat transfer temperature difference of the elemental blade based on the minimization of entransy dissipation rate can be more effectively reduced compared with that based on the minimization of maximum temperature difference, and its global heat transfer performance is obviously improved. Moreover, the global heat transfer performance of the elemental blade can also be obviously improved by using the multi-scale constructal optimization of the cooling cavity of the elemental blade.

Key words: constructal theory; entransy dissipation rate; blade cooling; generalized thermodynamic optimization

0 前言

随着燃气涡轮进口温度的不断升高,燃气涡轮

叶片的冷却问题在涡轮叶片设计过程中受到了越来越多的重视^[1-2],许多学者以极大的热情投身于涡轮叶片冷却问题的研究中。OHTOMO等^[3]对气膜冷却的涡轮叶片进行了研究,通过在整个叶片上对气膜孔的排列进行一定的布置得到了给定冷却气体量下的叶片最大冷却效率。凌长明等^[4]应用湍流模型对

* 国家自然科学基金(51176203, 51206184)和湖北省自然科学基金(2012FB06905)资助项目。20130306收到初稿,20130620收到修改稿

涡轮叶片尾缘空腔内针肋进行了研究, 分析了三种不同针肋对叶片空腔内换热和流动的影响, 并比较了各种排列的传热和阻力特性。安柏涛等^[5]采用有限体积法对气膜冷却的涡轮静叶进行了数值模拟, 并分析了叶片前缘气膜冷却复杂三维流动和整个叶片的气膜冷却特性。JAEYONG 等^[6]应用压力敏感漆技术研究了旋转速度对涡轮前缘叶片气膜冷却效率的影响, 结果表明转速对叶片气膜冷却效率影响十分明显, 平均气膜冷却效率随着吹风比的增大而增大。GAO 等^[7]应用压力敏感漆技术研究了高压涡轮叶片表面气膜冷却效率, 结果表明当不受二次涡流影响时叶片吸力面的气膜冷却效率总是高于压力面的气膜冷却效率, 上游尾迹的存在使得叶片表面气膜冷却效率降低。AMARAL 等^[8]对高压涡轮第一级动叶片进行了分析和优化, 采用遗传算法在给定冷却气体量的情况下对叶片的最大寿命进行了分析, 结果表明通过对叶片冷却空腔位置和直径进行优化能够在不增加冷却气体量和空腔几何复杂度的情况下延长叶片的寿命。王文三等^[9]用三维数值方法对具有尾缘开槽冷却形式的涡轮静叶栅冷却特性进行了研究, 并分析了不同吹风比对叶片流场气动性能的影响。特别是 BEJAN 等^[10]将燃气涡轮局部叶片横截面简化成矩形, 应用构形理论^[11-20]采用最小长度法对燃气涡轮局部叶片进行了构形优化, 并讨论了存在单尺度和多尺度空腔的涡轮叶片最大温差性能, 这一工作极大地丰富了燃气涡轮叶片优化设计理论。

以上涡轮叶片冷却问题的研究侧重于基于局部温度特性对叶片的传热特性进行分析, 这并不能反映涡轮叶片整体传热特性。GUO 等^[21-22]提出了新的物理量“焐”(文献[23]曾称之为热量传递势容)和“焐耗散极值原理”, 基于焐耗散定义的多维导热问题中的反映平均散热性能的当量热阻, 并从导热机理、电热模拟试验等角度^[24-26]对焐的物理意义作了进一步阐述。此后, 许多学者将焐理论^[27]应用到对流和辐射换热优化^[28-32]、换热器优化^[33-37]、蒸发冷却系统优化^[38-39]、化学热泵优化^[40-41]、热功转化^[42-43]、导热^[44-48]和对流换热^[49-52]构形设计等问题的研究中。这些工作拓展了传热优化的思路 and 理论, 进一步说明了焐耗散极值原理本质上是传热优化过程的基本原理, 展现了其在传热优化方面的科学性和优势。本文将在文献[10]的基础上, 基于构形理论, 以焐耗散率最小为优化目标, 对文献[10]的燃气涡轮叶片基元级冷却模型重新进行构形优化, 得到整体传热性能最优的涡轮叶片最优构形, 并对焐耗散率最小和最大温差最小、单尺度和多尺度冷却空腔的涡轮基元级叶片最优构形进行比较。

1 焐耗散率的定义

文献[21]中定义了一物体所具有的热量传递的总能力, 物理量焐(E_{vh})

$$E_{vh} = \frac{1}{2} Q_{vh} U_h = \frac{1}{2} Q_{vh} T \quad (1)$$

式中, U_h 或 T 是温度, 即热势; Q_{vh} 为物体的定容热容量, 且 $Q_{vh} = Mc_v T$ (M 为物体的质量, c_v 为物体的定容比热容)。由此可得到单位时间、单位体积内焐的耗散, 称为焐耗散函数 $\dot{E}_{h\phi}$ ^[21]

$$\dot{E}_{h\phi} = |\dot{\mathbf{q}} \cdot \nabla T| = k(\nabla T)^2 \quad (2)$$

式中, $\dot{\mathbf{q}}$ 为热流密度矢量, ∇T 是温度梯度。

在导热问题中, 整个体积中的焐耗散率^[21]

$$\dot{E}_{vh\phi} = \int_V \dot{E}_{h\phi} dv \quad (3)$$

在此基础之上, 可得到给定热流边界条件的多维导热问题, 物体的当量热阻^[21]

$$R_h = \dot{E}_{vh\phi} / \dot{Q}_h^2 \quad (4)$$

式中, $\dot{Q}_h$ 为热流率。则多维导热问题的平均温差^[21]

$$\Delta \bar{T} = R_h \dot{Q}_h \quad (5)$$

在热流率 $\dot{Q}_h$ 一定的条件下, 平均温差 $\Delta \bar{T}$ 与当量热阻 R_h 成正比。因此, 本文将在燃气涡轮叶片表面总热流率给定的条件下, 以当量热阻最小为优化目标对燃气涡轮叶片进行构形优化。

2 燃气涡轮叶片冷却模型

考虑图 1 所示燃气涡轮局部叶片冷却模型^[10], 为简化模型, 将燃气涡轮局部叶片横截面简化成矩形, 涡轮叶片高度方向垂直于纸面。叶片表面接收来自高温燃气的热流, 在叶片内部依次布置着大小不一的冷却空腔, 通过空腔内冷却气体的对流换热达到冷却叶片的目的。

由于图 1 模型具有对称性, 仅考虑如图 2a 所示的燃气涡轮叶片基元级冷却模型即可。如图 2a 所示, 在叶片高度 W 方向上不考虑参数的变化, 则叶片基元级冷却模型简化为二维情形^[10]。基元级叶片(厚度为 $2H$, 长度为 $2L$)各向同性, 热导率 κ 为常数, 假设其前、后表面均匀受热, 单位面积的加热率为 $\dot{q}''$ 。在基元级叶片内, 一个冷却空腔的直径为 D_1 , 另外二个冷却空腔的直径均为 D_2 , 其中 D_1 与叶片表面的距离为 H_0 , D_2 与叶片表面的距离为

H_1 。 D_1 和 D_2 空腔内表面均假设为等温壁面, 温度为 $T_{\min}$ 。除空腔内表面外, 由于图 1^[10]模型的对称性, 基元级叶片侧面均假设是绝热的。

图 1 燃气涡轮局部叶片冷却模型

由于涡轮基元级叶片具有对称性, 考虑 $x > 0$ 和 $y > 0$ 部分 ($A = H \times L$) 即可, 如图 2b 所示^[10]。假设高温燃气对图 2b 中叶片的总加热率 q (图 2a^[10]中叶片基元级的总加热率为 $4q$) 一定, 有

$$q = q'' LW \quad (6)$$

式中, 单位面积的加热率 q'' 随基元级叶片长度的变化而变化。

图 2 燃气涡轮叶片基元级冷却模型及边界条件

基元级叶片的二维热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

图 2b 中叶片和空腔表面的边界条件为

$$\begin{aligned} x=0 \quad 0 \leq y \leq H-H_1-D_2 \\ H-H_1 \leq y \leq H : \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

叶片表面

$$\begin{aligned} x=L \quad H-\frac{D_1}{2} \leq y \leq H : \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ y=0 \quad 0 \leq x \leq L-\frac{D_1}{2} : \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ y=H : \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{q''}{k} \end{aligned}$$

空腔表面

$$T = T_{\min} \quad (9)$$

D_1 和 D_2 空腔总体积 V_p 占叶片总体积 V 的比例

$$\phi = V_p / V = \left(\frac{1}{4} \pi \frac{D_1^2}{4} + \frac{1}{2} \pi \frac{D_2^2}{4} \right) / A \quad (10)$$

由式(2)~(4)可得基元级叶片的当量热阻为

$$R_h = \frac{4W \int \int k (\nabla T)^2 dx dy}{(4q)^2} \quad (11)$$

温度和尺寸参数可分别量纲一化为

$$\tilde{T} = \frac{T - T_{\min}}{q / (kW)} \quad (12)$$

$$(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{H}, \tilde{L}, \tilde{H}_0, \tilde{H}_1, \tilde{D}_1, \tilde{D}_2) = \frac{(x, y, H, L, H_0, H_1, D_1, D_2)}{A^{1/2}} \quad (13)$$

由式(12)和(13)可得基元级叶片的量纲一导热方程为

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2} = 0 \quad (14)$$

对应的边界条件为

$$\begin{aligned} \tilde{x}=0 \quad 0 \leq \tilde{y} \leq \tilde{H} - \tilde{H}_1 - \tilde{D}_2 \\ \tilde{H} - \tilde{H}_1 \leq \tilde{y} \leq \tilde{H} : \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

叶片表面

$$\begin{aligned} \tilde{x}=\tilde{L} \quad \tilde{H} - \frac{\tilde{D}_1}{2} \leq \tilde{y} \leq \tilde{H} : \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} = 0 \\ \tilde{y}=0 \quad 0 \leq \tilde{x} \leq \tilde{L} - \frac{\tilde{D}_1}{2} : \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = 0 \\ \tilde{y}=\tilde{H} : \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = \frac{q''}{k} \end{aligned}$$

空腔表面

$$\tilde{T} = 0 \quad (16)$$

对应的空腔占比

$$\phi = \frac{\pi}{16} (\tilde{D}_1^2 + 2\tilde{D}_2^2) \quad (17)$$

对应的基元级叶片量纲一当量热阻为

$$\tilde{R}_h = R_h (kW) = \frac{1}{4} \int_{\tilde{H}} \int_{\tilde{L}} \left[\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} \right)^2 \right] d\tilde{x} d\tilde{y} \quad (18)$$

3 燃气涡轮叶片冷却构形优化

式(14)为二维偏微分方程, 可基于有限元法采用 Matlab 的 PDE 工具箱求解。对图 2 所示的基元级叶片进行建模, 在式(15)和(16)所确定的边界条件下, 可求得基元级叶片的量纲一温度和温度梯度分布, 从而由式(18)可求得基元级叶片的量纲一当量热阻 $\tilde{R}_h$ 。对基元级叶片求解区域网格依次加密, 直到第 j 次加密获得的量纲一当量热阻 $\tilde{R}_h^j$ 与第 $j-1$ 次加密获得的量纲一当量热阻 $\tilde{R}_h^{j-1}$ 满足式(19)的控制精度

$$|\tilde{R}_h^j - \tilde{R}_h^{j-1} / \tilde{R}_h^{j-1}| < 0.005 \quad (19)$$

由式(14)~(18)可知, 基元级叶片量纲一当量热阻 $\tilde{R}_h$ 函数有量纲一基元级叶片厚度 $\tilde{H}$ 、长度 $\tilde{L}$ 、叶片表面空腔边距 $\tilde{H}_1$ 、空腔直径 $\tilde{D}_1$ 和 $\tilde{D}_2$ 五个独立变量, 在基元级叶片总横截面积 $4A$ 和空腔占比 ϕ 一定的约束条件下, 以 D_1/H 、 H_1/H 和 H/L 为优化变量可对基元级叶片进行构形优化。

图 3 给出了 $H_1/H=0.2$ 和 $H/L=1$ 时不同空腔占比 ϕ 下基元级叶片量纲一当量热阻 $\tilde{R}_h$ 与空腔直径与叶片厚度比 D_1/H 的关系。从图 3 可以看出, 给定 ϕ 时存在最佳 $(D_1/H)_{\text{opt}}$ 使 $\tilde{R}_h$ 取得最小值 $\tilde{R}_{h,m}$; 给定 D_1/H 时, $\tilde{R}_h$ 随着 ϕ 的增大而减小。

图 3 不同空腔占比下量纲一当量热阻与空腔直径与叶片厚度比的关系

图 4 给出了 $H_1/H=0.2$ 和 $H/L=1$ 时基元级叶片最小量纲一当量热阻 $\tilde{R}_{h,m}$ 及其相应的最优构形 $(D_1/H)_{\text{opt}}$ 和 $(D_2/H)_{\text{opt}}$ 与空腔占比 ϕ 的关系。从图 4 可以看出, 随着 ϕ 的增大, $\tilde{R}_{h,m}$ 减小, 即提高空腔占比有助于提高叶片的整体传热性能; $(D_1/H)_{\text{opt}}$ 增大, 而 $(D_2/H)_{\text{opt}}$ 先增大后减小。这是由于当 ϕ 较小时, D_2 空腔直径大于 D_1 空腔直径, 此时 D_2 空腔对叶片冷却起主要作用; 当 ϕ 较大时, D_1 空腔直径大

于 D_2 空腔直径, 此时 D_1 空腔对叶片冷却起主要作用。

图 4 最小量纲一当量热阻、最佳空腔直径与叶片厚度比与空腔占比的关系

图 5 给出了 $H/L=1$ 时不同空腔占比 ϕ 下基元级叶片最小量纲一当量热阻 $\tilde{R}_{h,m}$ 与 D_2 空腔边距与叶片厚度比 H_1/H 的关系。从图 5 可以看出, $\tilde{R}_{h,m}$ 随着 H_1/H 的增大而增大, 不存在最佳 $(H_1/H)_{\text{opt}}$ 使得 $\tilde{R}_{h,m}$ 取得最小值。此时 D_2 空腔与叶片表面距离越小, 叶片的整体传热性能越好。但考虑到叶片的结构强度等因素, D_2 空腔与叶片表面必须保持一定的距离。

图 5 不同空腔占比下最小量纲一当量热阻与空腔边距与叶片厚度比的关系

图 6 给出了 $H_1/H=0.2$ 时不同空腔占比 ϕ 下基元级叶片最小量纲一当量热阻 $\tilde{R}_{h,m}$ 与叶片厚度与长度比 H/L 的关系。从图 6 可以看出, $\tilde{R}_{h,m}$ 随着 H/L 的增大而增大, 不存在最佳 $(H/L)_{\text{opt}}$ 使得 $\tilde{R}_{h,m}$ 取得最小值。此时基元级叶片外形保持狭长有利于提高叶片的整体传热性能, 但 D_1 和 D_2 空腔与叶片表面距离也越来越小, 因此基元级叶片外形不能无限狭长。

为了比较焓耗散率最小和最大温差最小的基元级叶片最优构形, 图 7 给出了 $H/L=1$ 和 $\phi=0.2$ 时不同 D_2 空腔边距与叶片厚度比 H_1/H 对最小量

纲一当量热阻和最小量纲一最大热阻的基元级叶片最优构形的影响。从图 7 可以看出, 随着 H_1/H 的增大, 最小量纲一当量热阻对应的最佳空腔直径与叶片厚度比 $(D_1/H)_{\text{opt}}$ 增大, $(D_2/H)_{\text{opt}}$ 减小; 而最小量纲一最大热阻对应的最佳空腔直径与叶片厚度比 $(D_1/H)_{\text{opt}}$ 和 $(D_2/H)_{\text{opt}}$ 变化不大。当 D_2 空腔与叶片表面距离较小时, D_2 空腔直径大于 D_1 空腔直径, 此时 D_2 空腔的冷却表面积增大, 有利于提高基元级叶片的整体传热性能; 当 D_2 空腔与叶片表面距离较大时, D_1 和 D_2 空腔直径的关系则相反, 此时最小量纲一当量热阻对应的最佳空腔直径与叶片厚度比 $(D_1/H)_{\text{opt}}$ 和 $(D_2/H)_{\text{opt}}$ 分别趋近于最小量纲一最大热阻对应的最佳空腔直径与叶片厚度比。

图 6 不同空腔占比下最小量纲一当量热阻与叶片厚度与长度比的关系

图 7 空腔边距与叶片厚度比对不同目标下叶片最优构形的影响

此外, 不同的 H_1/H 下, 焓耗散率最小和最大温差最小的量纲一当量热阻的差别也是不同的: 当 $H_1/H = 0.02$ 时, 焓耗散率最小的量纲一当量热阻比最大温差最小对应的量纲一当量热阻降低了 13.58%, 当 $H_1/H = 0.1$ 时, 焓耗散率最小的量纲一当量热阻比最大温差最小对应的量纲一当量热阻降低了 8.41%, 当 $H_1/H = 0.2$ 时, 焓耗散率最小的量纲一当量热阻比最大温差最小对应的量纲一当量热阻降低了 3.18%。由此可见, 在较小的 D_2 空腔边距

与叶片厚度比的条件下, 焓耗散率最小的基元级叶片最优构形与最大温差最小的基元级叶片最优构形相比, 基元级叶片的整体传热性能得到明显改善。图 8 给出了 $H_1/H = 0.2$ 、 $H/L = 1$ 和 $\phi = 0.2$ 时焓耗散率最小和最大温差最小的基元级叶片最优构形比较。从图 8 可以看出, 焓耗散率最小的基元级叶片 D_1 空腔直径比最大温差最小的 D_1 空腔直径小, 而焓耗散率最小的 D_2 空腔直径比最大温差最小的 D_2 空腔直径大。此时, 基元级叶片的平均传热温差得到有效降低, 整体传热性能得到明显提高, 其实质在于焓耗散率最小的基元级叶片温度梯度场比最大温差最小的基元级叶片温度梯度场更均匀。

(a) 焓耗散率最小

(b) 最大温差最小

图 8 焓耗散率最小和最大温差最小的基元级叶片最优构形比较

本文采用不同直径的 D_1 和 D_2 空腔对基元级叶片进行冷却, 体现了多尺度构形优化的思想^[10]。为分析多尺度和单尺度空腔对基元级叶片整体传热性能的影响, 图 9 给出了 $H_1/H = 0.2$ 、 $H/L = 1$ 和 $\phi = 0.3$ 时基元级叶片内布置一个 D_1 空腔、两个 D_2 空腔和仅布置一个 D_1 空腔的基元级叶片最优构形。从图 9 可以看出, 由于采用了多尺度叶片构形优化设计, 三冷却空腔的基元级叶片与单冷却空腔的基元级叶片相比, 其量纲一当量热阻降低了 28.86%, 整体传热性能得到明显提高, 此时三冷却空腔的基

元级叶片温度梯度场更均匀。

图 9 多尺度冷却腔的基元级叶片最优构形比较

4 结论

基于构形理论, 在文献[10]提出的燃气涡轮叶片冷却模型的基础上, 以焓耗散率最小为优化目标, 对燃气涡轮基元级叶片进行了构形优化, 得到了量纲一当量热阻最小的基元级叶片最优构形。

(1) 在基元级叶片总横截面积和空腔占比一定的条件下, 存在最佳空腔直径与叶片厚度比 $(D_1/H)_{\text{opt}}$ 使得基元级叶片量纲一当量热阻取得最小值, 但不存在最佳空腔边距与叶片厚度比 $(H_1/H)_{\text{opt}}$ 和最佳叶片厚度与长度比 $(H/L)_{\text{opt}}$ 使得基元级叶片量纲一当量热阻取得最小值。

(2) 随着 ϕ 的增大, 最小量纲一当量热阻 $\tilde{R}_{h,m}$ 减小。当 ϕ 较小时, D_2 空腔直径大于 D_1 空腔直径, 此时 D_2 空腔对叶片冷却起主要作用; 当 ϕ 较大时, D_1 空腔直径大于 D_2 空腔直径, 此时 D_1 空腔对叶片冷却起主要作用。 $\tilde{R}_{h,m}$ 随着 H_1/H 和 H/L 的增大而增大, 但考虑到叶片的结构强度等因素, D_1 和 D_2 空腔与叶片表面必须保持一定的距离, 此时基元级叶片外形不能无限狭长。

(3) 当 $H_1/H = 0.02$ 时, 焓耗散率最小的量纲一

当量热阻比最大温差最小对应的量纲一当量热阻降低了 13.58%; 当 $H_1/H = 0.1$ 时, 焓耗散率最小的量纲一当量热阻比最大温差最小对应的量纲一当量热阻降低了 8.41%; 三冷却空腔的基元级叶片与单冷却空腔的基元级叶片相比, 其量纲一当量热阻降低了 28.86%。由此可见, 焓耗散率最小的构形优化与最大温差最小的构形优化相比, 多尺度的构形优化与单尺度的构形优化相比, 两者都能使基元级叶片整体传热性能得到明显提高, 其本质在于基于焓耗散率最小目标所得到的基元级叶片温度梯度场更均匀, 平均传热温差更小。

(4) 基于焓耗散率这个物理量定义的当量热阻反映了传热过程中的导热性能, 即当量热阻越小, 则散热性能越好, 结构体内的平均温度越低, 导热效率越高。因此, 工程上对燃气涡轮叶片进行热优化设计时, 在综合考虑最大温差等性能指标和结构强度等因素的前提下, 可选择燃气涡轮叶片当量热阻最小时的构形设计方案。

本文将燃气涡轮局部叶片横截面简化成矩形, 但实际叶片外形并非矩形; 实际叶片外表面受热并不均匀, 且叶片高度方向(叶根和叶顶)和各叶片基元级(叶片前缘和后缘、压力面和吸力面)之间热流边界条件并不一致; 实际叶片内冷却空腔还存在其他形状的不规则空腔, 叶片内部存在带肋的 U 形或蛇形通道; 实际叶片冷却过程不仅存在对流冷却, 还存在气膜冷却、冲击冷却等其他冷却方式。本文仅考虑了叶片的热性能, 实际叶片设计中必须同时综合考虑叶片的气动和强度等因素。因此, 可综合考虑以上因素以建立更加符合实际的涡轮叶片模型, 进一步将焓耗散极值原理应用到涡轮叶片的构形优化设计中。

参 考 文 献

- [1] HAN J, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. New York: Taylor & Francis, 2000.
- [2] 戴萍, 林枫. 旋转状态下燃气涡轮叶片内部冷却的研究进展[J]. 热能动力工程, 2010, 25(4): 363-368.
DAI Ping, LIN Feng. Recent advances in the study of inner cooling of gas turbine blades in a rotating state[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(4): 363-368.
- [3] OHTOMO F, FUKUYAMA Y, NAKATA Y, et al. Cooled turbine blade for a gas turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(1): 10.
- [4] 凌长明, 田丽亭, 赵冬梅, 等. 叶片尾缘内冷通道中最佳强化传热的针肋排列结构研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 637-639.

- LING Changming, TIAN Liting, ZHAO Dongmei, et al. Investigation of the best augmented heat transfer of pin-fin arrays passage for trailing edge of turbine blade[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(4): 637-639.
- [5] 安柏涛, 刘建军, 蒋洪德. 空冷透平静叶气膜冷却数值研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 405-408.
AN Baitao, LIU Jianjun, JIANG Hongde. Numerical investigation of film cooling in an air cooled turbine stator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 405-408.
- [6] JAEYONG A, SCHOEIRI M, HAN J, et al. Effect of rotation on leading edge region film cooling of a gas turbine blade with three rows of film cooling holes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(1-2): 15-25.
- [7] GAO Z, NARZARY D, HAN J. Film cooling on a gas turbine blade pressure side or suction side with axial shaped holes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(9-10): 2139-2152.
- [8] AMARAL S, VERSTRAETE T, VAN DEN BRAEMBUSSCHE R, et al. Design and optimization of the internal cooling channels of a high pressure turbine blade-Part I: Methodology[J]. Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, 2010, 132(2): 021013.
- [9] 王文三, 唐菲, 秦立森, 等. 涡轮静叶尾缘开槽冷却特性的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 835-838.
WANG Wensan, TANG Fei, QIN Lisen, et al. Numerical study of slot film cooling performance at the trailing edge of a turbine vane[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(5): 835-838.
- [10] BEJAN A, LORENTE S. Design with constructal theory[M]. New Jersey: Wiley, 2008.
- [11] BEJAN A. Shape and structure, from engineering to nature[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [12] BEJAN A, LORENTE S. Thermodynamic optimization of flow geometry in mechanical and civil engineering[J]. Journal of Non-equilibrium Thermodynamics, 2001, 26(4): 305-354.
- [13] BEJAN A, LORENTE S. Constructal multi-scale and multi-objective structures[J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29(7): 689-710.
- [14] BEJAN A, MERKX G W. Constructal theory of social dynamics[M]. New York: Springer, 2007.
- [15] 伍文君, 陈林根, 孙丰瑞. 基于构形理论的体点问题[J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 55-58.
WU Wenjun, CHEN Lingen, SUN Fengrui. Volume-point flow problem based on constructal theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 55-58.
- [16] 周圣兵, 陈林根, 孙丰瑞. 基于构形理论的变截面导热通道“体点”导热优化[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 46-50.
ZHOU Shengbing, CHEN Lingen, SUN Fengrui. “Volume-point” conduction optimization of variable cross-section conducting path based on constructal theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 46-50.
- [17] BEJAN A, LORENTE S, MIGUEL A F, et al. Constructal human dynamics, security & sustainability[M]. Amsterdam: IOS Press, 2009.
- [18] BEJAN A, LORENTE S. The constructal law and the evolution of design in nature[J]. Physics of Life Reviews, 2011, 8(3): 209-240.
- [19] CHEN Lingen. Progress in study on constructal theory and its application[J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 55(3): 802-820.
- [20] BEJAN A. Convective heat transfer [M]. New York: Wiley, 2013.
- [21] GUO Z, ZHU H, LIANG X. Entransy: A physical quantity describing heat transfer ability[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(13-14): 2545-2556.
- [22] 李志信. 过增元. 对流传热优化的场协同理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
LI Zhixin, GUO Zengyuan. Field synergy principle of heat convection optimization[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [23] GUO Zengyuan, CHENG Xinguang, XIA Zaizhong. Least dissipation of heat transport potential capacity and its application in heat conduction optimization[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(4): 406-410.
- [24] 韩光泽, 朱宏晔, 程新广, 等. 导热与弹性系统及导电的相似性[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(6): 1022-1024.
HAN Guangze, ZHU Hongye, CHENG Xinguang, et al. Transfer similarity among heat conduction, elastic motion and electric conduction[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(6): 1022-1024.
- [25] 韩光泽, 过增元. 导热能力损耗的机理及其数学表述[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 98-102.
HAN Guangze, GUO Zengyuan. Physical mechanism of heat conduction ability dissipation and its analytical expression[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineers, 2007, 27(17): 98-102.
- [26] 朱宏晔, 陈泽敬, 过增元. 焓耗散极值原理的电热模拟实验研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(12): 1692-1698.
ZHU Hongye, CHEN Zejing, GUO Zengyuan. Electricity and thermal analogous experimental study for entransy dissipation extreme principle[J]. Progress in Natural Sciences, 2007, 17(12): 1692-1698.
- [27] CHEN Lingen. Progress in entransy theory and its application[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(34): 4404-4426.
- [28] CHEN Qun, REN Jianxun. Generalized thermal resistance for convective heat transfer and its relation to entransy dissipation[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(23): 3753-3761.
- [29] WANG Songping, CHEN Qinglin, ZHANG Binjian. An equation of entransy and its application[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19): 3572-3578.

- [30] LIU Wei, LIU Zhichun, JIA Hui, et al. Entropy expression of the second law of thermodynamics and its application to optimization in heat transfer process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(13-14): 3049-3059.
- [31] CHENG Xuetao, LIANG Xingang. Entropy flux of thermal radiation and its application to enclosures with opaque surfaces[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(1-3): 269-278.
- [32] WU Jing, CHENG Xuetao. Generalized thermal resistance and its application to thermal radiation based on entransy theory[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 58(1-2): 374-381.
- [33] LIU Xiongbin, MENG Jian, GUO Zengyuan. Entropy generation extremum and entransy dissipation extremum for heat exchanger optimization[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(6): 943-947.
- [34] XIA Shaojun, CHEN Lingen, SUN Fengrui. Optimization for entransy dissipation minimization in heat exchanger [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19): 3587-3595.
- [35] GUO Z, LIU X B, TAO W Q, et al. Effectiveness-thermal resistance method for heat exchanger design and analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(13-14): 2877-2884.
- [36] GUO Jiangfeng, XU Mingtian, CHENG Lin. Effect of temperature-dependent viscosity on the entransy of both fluids in heat exchangers[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(23): 1934-1939.
- [37] XU Mingtian. The thermodynamic basis of entransy and entransy dissipation[J]. Energy, 2011, 36(7): 4272-4277.
- [38] CHEN Qun, YANG Kangding, WANG Moran, et al. A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: Theory[J]. Energy, 2010, 35(6): 2448-2454.
- [39] CHEN Qun, PAN Ning, GUO Zengyuan. A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system II: Applications[J]. Energy, 2011, 36(5): 2890-2898.
- [40] GUO Jiangfeng, HUAI Xiulan. Optimization design of recuperator in a chemical heat pump system based on entransy dissipation theory[J]. Energy, 2012, 41: 335-343.
- [41] GUO Jiangfeng, HUAI Xiulan. The application of entransy theory in optimization design of Isopropanol-Acetone-Hydrogen chemical heat pump[J]. Energy, 2012, 43: 355-360.
- [42] ZHOU Bing, CHENG Xuetao, LIANG Xingang. Power output analyses and optimizations of the Stirling cycle[J]. Science China: Technological Sciences, 2013, 56(1): 228-236.
- [43] CHENG Xuetao, CHEN Qun, HU Guojie, et al. Entropy balance for the closed system undergoing thermodynamic processes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60: 180-187.
- [44] WEI Shuhuan, CHEN Lingen, SUN Fengrui. "Volume-point" heat conduction constructal optimization with entransy dissipation minimization objective based on rectangular element[J]. Science in China Series E: Technological Science, 2008, 51(8): 1283-1295.
- [45] XIAO Qinghua, CHEN Lingen, SUN Fengrui. Constructal entransy dissipation rate minimization for heat conduction based on a tapered element[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(22): 2400-2410.
- [46] CHEN Lingen, WEI Shuhuan, SUN Fengrui. Constructal entransy dissipation rate minimization of a disc[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(1-3): 210-216.
- [47] FENG Huijun, CHEN Lingen, SUN Fengrui. "Volume-point" heat conduction constructal optimization based on entransy dissipation rate minimization with three-dimensional cylindrical element and rectangular and triangular elements at micro and nanoscales[J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 55(3): 779-794.
- [48] FENG Huijun, CHEN Lingen, XIE Zhihui, et al. Thermal insulation constructal optimization for steel rolling reheating furnace wall based on entransy dissipation extremum principle[J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 55(12): 3322-3333.
- [49] XIE Zhihui, CHEN Lingen, SUN Fengrui. Constructal optimization on T-shaped cavity based on entransy dissipation minimization[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(23): 4418-4427.
- [50] XIAO Qinghua, CHEN Lingen, SUN Fengrui. Constructal entransy dissipation rate minimization for a heat generating volume cooled by forced convection[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(27): 2966-2973.
- [51] CHEN Lingen, XIAO Qinghua, XIE Zhihui, et al. T-shaped assembly of fins with constructal entransy dissipation rate minimization[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39(10): 1556-1562.
- [52] FENG Huijun, CHEN Lingen, SUN Fengrui. Constructal entransy dissipation rate minimization for leaf-like fins[J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 55(2): 515-526.

作者简介: 冯辉君, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为工程热力学和构形理论。

E-mail: uciqplvtkd@sina.com

陈林根(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为工程热力学和构形理论。

E-mail: lgchenna@yahoo.com, lingchen@hotmail.com

谢志辉, 男, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为工程热力学和构形理论。

E-mail: zhihui-xie@163.com

孙丰瑞, 男, 1939 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为工程热力学与动力装置。

E-mail: hj9b@yahoo.com.cn