

文章编号: 1000-8055(2000)03-0268-06

涡轮发动机高温隔热涂层内的传热研究

王平阳 谈和平 刘林华 罗剑峰

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 高温环境中的金属部件, 通常采用表面涂层技术以降低金属材料的温度和热力梯度。氧化锆、陶瓷等涂层材料对热辐射是半透明的, 因此, 高温下涡轮发动机的热分析需要考虑涂层内辐射换热的影响。本文考虑了各种界面辐射特性: 不透明界面和半透明界面, 镜反射和漫反射。采用光线追踪/节点分析法计算了吸收、各向同性散射性介质内的辐射传递系数。结合控制容积法数值模拟了涡轮叶片和燃烧室衬垫涂层内的辐射与导热瞬态耦合换热。

关键词: 隔热涂层; 传热; 数值模拟

中图分类号: TK124

文献标识码: A

1 引言

高级涡轮发动机中通常采用表面涂层技术以降低金属材料内的温度和热力梯度^[1]。目前常用的涂层材料, 如: 氧化锆、陶瓷等^[2~4], 对红外辐射是半透明的, 这使得热辐射的作用显著增加, 从而降低了绝缘材料的效率^[5]。

近年来, 一些学者相继对隔热涂层内的辐射效应进行了研究。Thomas(1992)^[6]对柴油发动机陶瓷衬垫内的辐射与导热耦合换热进行了数值模拟。Siegel^[4,5]在 1996 和 1997 年采用双热流法结合格林函数, 并选用两谱带模型, 在漫反射条件下模拟了氧化锆隔热涂层内的辐射传递; 1997 年^[7]用多谱带模型取代了两谱带模型, 并分析了光学厚度及在涂层内加入不透明的隔热挡板对温度和热流密度的影响; 1998 年^[8]针对外部无辐射热流时的氧化锆隔热涂层, 分析了涂层透明和不透明两种情况下的温度分布。

本文针对涡轮发动机叶片和燃烧室衬垫的半透明隔热涂层内辐射与导热耦合换热, 建立了物理模型、边界离散方程, 并考虑各种界面辐射特性效应。采用光线追踪/节点分析法计算了吸收、各向同性散射性介质内的辐射传递系数, 结合控制

容积法数值模拟了隔热涂层内的辐射与导热瞬态耦合换热。经与文献^[8,9]中的计算结果比较表明, 本文的物理模型、计算方法与计算程序正确, 计算精度高。在此基础上, 分析了隔热涂层内热辐射对部分暴露于燃烧室热环境下的第一级叶片和燃烧室衬垫的表面温度、内部温度场和热流密度分布的影响, 考察了界面发射率、涂层厚度和界面的反射特性等对热辐射作用大小的影响。

2 物理模型与控制方程

2.1 控制方程及离散方程

由于隔热涂层一般都非常薄, 而其它各方向的尺度远大于其本身的厚度, 因此可采用一维模型。

由于先进发动机的燃烧室内压力很高, 所以假设内部的含灰气体能够提供一个黑体环境^[7]。考虑由两层不同物性组成的平板状介质, 位于两个代表环境的黑表面 $S_{-\infty}$ 和 $S_{+\infty}$ 之间, 其温度分别为 $T_{s,-\infty}$ 和 $T_{s,+\infty}$, 如图 1 所示。第一层介质为吸收、发射、各向同性散射隔热涂层, 厚 d_c ; 第二层为不透明的基底, 厚 d_m 。沿厚度方向把两层介质分别分成 M_1 和 M_2 个控制体, 令 $M_i = M_1 + M_2$, 则结点总数为 $M_i + 3$, 统一用 i 表示; 其中: $i = 1$

收稿日期: 1999-07-20; 修订日期: 1999-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59606006); 国家杰出青年科学基金资助项目(59725617)

作者简介: 王平阳(19-), 男, 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院

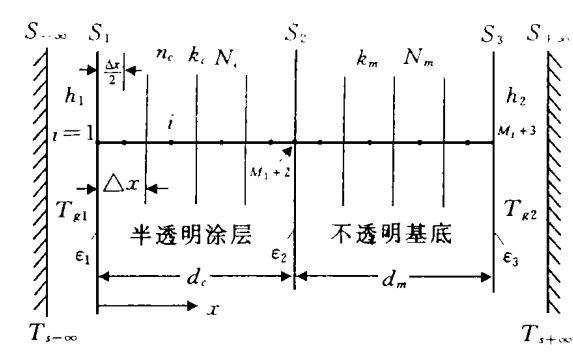


图 1 涂层和基底的区域离散模型

为表面结点 S_1 , $i = M_1 + 2$ 为分界面结点 S_2 , $i = M_1 + 3$ 为表面结点 S_3 。若 $i \leq M_1 + 2$, 则 i 为第一层内的节点, 令控制变量 $b = 1$; 否则为第二层内的节点, $b = 2$ 。时间间隔 $t = m \Delta t$ 到 $t + \Delta t = [m + 1] \Delta t$, 则控制体(内部结点)的隐式离散化方程为:

$$C_b \Delta x \frac{T_i^{m+1} - T_i^m}{\Delta t} = [k_{b,ie}^{m+1} (T_{i+1}^{m+1} - T_i^{m+1}) + k_{b,iw}^{m+1} (T_{i-1}^{m+1} - T_i^{m+1})] / \Delta x + \Phi_i^{m+1} \quad 2 \leq i \leq M_1 + 2 \quad i \neq M_1 + 2 \quad (1)$$

式中: k_{ie} , k_{iw} 分别为采用调和平均时, 交界面 ie (控制体 i 和 $i + 1$ 之间的界面), iw (控制体 $i - 1$ 和 i 之间的界面) 处的导热系数 $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$; 下标 $b = 1$ 时, $C_b = C_c$, $k_b = k_c$; $b = 2$ 时, $C_b = C_m$, $k_b = k_m$; 其中下标 c, m 分别表示隔热涂层和不透明基底(衬垫或叶片); Φ 为结点的辐射热源, 若 $i > M_1 + 2$, 则 $\Phi = 0$ 。

2.2 表面辐射特性与换热边界条件

两层平板两侧: S_3 为不透明表面, 两层分界面 S_2 为不透明界面; S_1 为半透明表面(没有积灰)或不透明表面(有积灰)。两层两侧均为辐射与对流耦合换热。则表面的离散化方程分别为:

S_1 处: 半透明表面

$$2k_c (T_2 - T_{s1}) = h_1 (T_{s1} - T_{s-\infty}) \Delta x \quad x = 0 \quad (2a)$$

不透明表面

$$\sigma \sum_{k=1}^{NB} n_{c,k}^2 \left\{ \epsilon_{c,k} [S_2 S_1]_k (A_{k,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - A_{k,T_{S_1}} T_{S_1}^4) + \sum_{j=2}^{M_1+1} [V_j S_1]_k (A_{k,T_j} T_j^4 - A_{k,T_{S_1}} T_{S_1}^4) \right\} + 2k_{c,2} (T_2 - T_{s1}) / \Delta x = \sigma \sum_{k=1}^{NB} \epsilon_{c,k} \cdot (A_{k,T_{S_1}} T_{S_1}^4 - A_{k,T_{s-\infty}} T_{s-\infty}^4) + h_1 (T_{s1} - T_{g1}) \quad x = 0 \quad (2b)$$

S_2 处: 当 S_1 为半透明表面时, S_2 与隔热涂层内所有结点, 包括代表环境的黑表面 $S_{-\infty}$ 进行辐射换热。因为此时, S_2 发出的热射线可穿透界面 S_1 , 直接与 $S_{-\infty}$ 进行辐射传递。则:

$$\sigma \sum_{k=1}^{NB} n_{c,k}^2 \left\{ \epsilon_{c,k} [S_2 S_{-\infty}]_k (A_{k,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - A_{k,T_{s-\infty}} T_{s-\infty}^4) + \sum_{j=2}^{M_1+1} \epsilon_{c,k} [S_2 V_j]_k (A_{k,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - A_{k,T_j} T_j^4) \right\} + 2k_{c,M_1+1} (T_{S_2} - T_{M_1+1}) / \Delta x = 2k_{m,M_1+3} (T_{M_1+3} - T_{S_2}) / \Delta x \quad x = d_c \quad (3a)$$

当 S_1 为不透明表面时, S_2 与隔热涂层内所有结点, 包括表面 S_1 进行辐射换热。则:

$$\sigma \sum_{k=1}^{NB} n_{c,k}^2 \left\{ \epsilon_{c,k} [S_2 S_1]_k (A_{k,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - A_{k,T_{S_1}} T_{S_1}^4) + \sum_{j=2}^{M_1+1} \epsilon_{c,k} [S_2 V_j]_k (A_{k,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - A_{k,T_j} T_j^4) \right\} + 2k_{c,M_1+1} (T_{S_2} - T_{M_1+1}) / \Delta x = 2k_{m,M_1+3} (T_{M_1+3} - T_{S_2}) / \Delta x \quad x = d_c \quad (3b)$$

S_3 处:

$$2k_{m,M_1+2} (T_{S_3} - T_{M_1+1}) / \Delta x = \sigma \sum_{k=1}^{NB} \epsilon_{s,k} (A_{k,T_{S_3}} T_{S_3}^4 - A_{k,T_{s+\infty}} T_{s+\infty}^4) + h_2 (T_{s+\infty} - T_{g2}) \quad x = d_m \quad (4)$$

上述各式中: h_1, h_2, T_{g1}, T_{g2} 分别为平板两侧的对流换热系数 $[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ 和流体的温度 $[K]$; n_c 为隔热涂层的折射率; ϵ 为界面发射率(参见图 1); 上标 NB 为谱带模型的谱带数; 下标 k 表示谱

带模型 k 区域: $A_{k,T_i} = \frac{\int_{\Delta\lambda} I_{b,\lambda}(T_i) d\lambda}{\int I_{b,\lambda}(T_i) d\lambda}$ 为结点温度

T_i 下谱带模型 k 区域内黑体辐射能占总辐射能的份额; $[S_2 S_j]_k, [S_2 V_j]_k$ 为辐射传递系数。

2.3 辐射热源项与辐射传递系数

控制体 i 的辐射热源项等于该控制体两侧界面上的辐射热流密度之差^[10]:

$$\Phi_i = q_{ie}^r(T) - q_{iw}^r(T) = q_{ie}^r(T) - q_{(i-1)e}^r(T) \quad 2 \leq i \leq M_1 + 1 \quad (5)$$

式中: q_{ie}^r, q_{iw}^r 分别为穿过界面 ie 及 iw 的辐射热流密度。 S_1 为半透明界面, S_2 为不透明界面的 q_{ie}^r 可表示为:

$$q_{ie}^r = \sigma \sum_{k=1}^{NB} n_{c,k}^2 \left\{ \epsilon_{2,k} [S_{2S-\infty}]_k \cdot (A_{k,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - A_{k,T_{S_{-\infty}}}} T_{S_{-\infty}}^4) + \sum_{j=2}^i \epsilon_{2,k} [S_{2V_j}]_k (A_{k,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - A_{k,T_j} T_j^4) + \sum_{j=i+1}^{M_1+1} \sum_{l=2}^i [V_j V_l]_k (A_{k,T_j} T_j^4 - A_{k,T_l} T_l^4) + \sum_{j=i+1}^{M_1+1} [V_j S_{-\infty}]_k (A_{k,T_j} T_j^4 - A_{k,T_{S_{-\infty}}}} T_{S_{-\infty}}^4) \right\}$$
$$2 \leq i \leq M_1 \tag{6}$$

辐射与导热耦合换热时, 穿过界面“ie”的总热流密度为 q_{ie}^{tot} 。除与文献比较时采用文献中的无量纲热流密度的定义外, 本文均采用下式定义的无量纲热流密度 $\tilde{q}_{ie}^{tot}$:

$$\tilde{q}_{ie}^{tot} = \frac{\tilde{q}_{ie}^{tot}}{\sigma T_{rf}^4} = \frac{q_{ie}^r + k_{c,ie} \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta x}}{\sigma T_{rf}^4} \tag{7}$$

式(2b), (3a), (3b), (6)中 $[S_{S_j}]_k$, $[S_{iV_j}]_k$, $[V_j V_l]_k$ ($S_i, S_j = S_1, S_2, S_{-\infty}$) 分别为吸收、发射、各向同性散射性介质的表面与表面, 表面与控制体, 控制体与控制体间的辐射传递系数。辐射传递系数的推导采用光线踪迹/节点分析法。考虑各向同性散射时, 单层介质镜反射半透明和不透明界面, 单层介质漫反射不透明界面下辐射传递系数的推导见文献[11]; 两层复合层介质镜反射和漫反射半透明界面下辐射传递系数的推导见文献[12]; 两层复合层介质漫反射不透明界面下辐射传递系数的推导见文献[13]。

表 1 本文的计算结果与文献[9]的比较(本文计算中采用的无量纲时间步长 $\Delta \tilde{t} \approx 10^{-5}$)

		无量纲温度($\tilde{T}_9$)			无量纲热流密度($\tilde{q}_9$)		
		$\zeta = -0.5$	$\zeta = 0$	$\zeta = 0.5$	$\zeta = -1$	$\zeta = 0$	$\zeta = 1$
文献[9]	4 阶近似	0.4996	0.1797	0.0504	1.9355	1.3025	0.8339
	8 阶近似	0.4893	0.1773	0.0587	1.9342	1.3289	0.8319
本 文	$M_1 = 100$	0.48930	0.17729	0.05869	1.93436	1.32881	0.83188
	$M_1 = 200$	0.48934	0.17731	0.05869	1.93422	1.32883	0.83190

表 2 无量纲热流密度与文献[8]的比较

	涂层不透明				涂层半透明			
	无外热源		有外热源		无外热源		有外热源	
	文献[8]	本文	文献[8]	本文	文献[8]	本文	文献[8]	本文
$N_c = 0.1 \quad N_m = 1$	0.039	0.0390	0.041	0.0414	0.124	0.1207	0.215	0.2130
$N_c = 1 \quad N_m = 10$	0.171	0.1715	0.235	0.2356	0.209	0.2030	0.396	0.3904

注意: 表中 N_c 和 N_m 分别为隔热涂层和基底的辐射—导热参数。

3 物理模型与计算程序的检验

3.1 单层半透明介质, 两侧均不透明

Frankel(1995)^[9]计算了一维各向同性散射灰介质、不透明黑表面、给定边界温度条件下的瞬态辐射与导热耦合换热。本文采用文献[9]中表1和表2的计算参数进行了验证。光学厚度 $\tau_0 = 1$; 散射反照率 $\omega = 0.5$; 导热—辐射参数 $N_9 = k_c \kappa / (4n_c^2 \sigma T_{rf}^3) = 0.1$, 其中 κ 为衰减系数, T_{rf} 为参考温度; 无量纲空间坐标 $\zeta = (\tau - \tau_0/2) - 1$, 其中 τ 为光学距离; 无量纲时间 $\tilde{t} = (k_c/C_c) \kappa^2 t = 0.05$; 无量纲温度 $\tilde{T}_9 = T/T_{rf}$; 无量纲辐射热流密度 $\tilde{q}_9 = q^r / (4n_c^2 \sigma T_{rf}^4)$, 其中下标“9”指文献[9]。初始温度 T_i ($t = 0$) = 0, $T_{S_2} = 0$ 。计算结果见表1, 表中列出了 ζ 分别为-0.5, 0, 0.5处的无因次温度; ζ 分别为-1, 0, 1处的辐射热流密度。由表1可见, 本文的计算结果与Frankel的8阶近似的计算结果几乎完全一致。

3.2 两层介质, 界面漫反射

文献[8](1998)采用双热流法计算了在 S_1 面没有辐射热流和有辐射热流两种情况下的涡轮叶片涂层内的稳态温度场和热流密度, 隔热涂层半透明, 基层不透明, S_3 面外部为辐射—对流换热边界条件。 S_1 面半透明, 其反射率由Fresnel反射定律计算得出, S_2 面和 S_3 面的发射率 $\epsilon = \epsilon_s = 0.3$, 其它计算条件为: $\tilde{T}_{g1} = 1$; $\tilde{T}_{g2} = \tilde{T}_{s+\infty} = 0.5$;



$H_1 = H_2 = 1$, 其中: $H = h/\sigma T_f^4$ 为无量纲对流—辐射参数; $n_c = 1.55$; $\omega = 0$; 当 S_1 面 ($x = 0$) 处有辐射热流时, $\tilde{T}_{s,\infty} = 1$, 没有辐射热流时 $q^r(0) = 0$ 。为了说明隔热涂层半透明时对基底温度分布和热流密度的影响, 文献[8]同时给出了涂层不透明时的计算结果。本文采用文献[8]中物性参数和边界条件, 将涂层分成 $M_1 = 200$ 个控制体, 计算了涂层及基底内的热流密度, 比较结果见表 2, 二者吻合较好。

4 数值模拟与分析

典型隔热涂层材料—氧化锆的光谱特性: 吸收系数 $\alpha_k [m^{-1}]$, 散射系数 $\alpha_{s,k} [m^{-1}]$, 随波长 $\lambda [\mu m]$ 的变化用两波段谱带模型^[5]或四波段谱带模型^[7]近似(见表 3)。

表 3 典型隔热涂层材料—氧化锆的光谱特性

k	2 波段谱带模型 ^[5]		
	$\lambda/\mu m$	$\alpha_k/(m^{-1})$	$\alpha_{s,k}/(m^{-1})$
1	0~5	30	10000
2	5~∞	不透明	

k	4 波段谱带模型 ^[7]		
	$\lambda/\mu m$	$\alpha_k/(m^{-1})$	$\alpha_{s,k}/(m^{-1})$
1	0~1	60	30000
2	1~4	20	7500
3	4~5	110	4500
4	5~∞	不透明	

4.1 隔热涂层外表面发射率对稳态温度场的影响

先进航空发动机燃烧室内压力很高, 因此燃气和燃烧产物为衬垫和第一级涡轮叶片提供了一个近似的黑体环境, 令 $T_{s,\infty}$ 为等效黑体温度, T_{g1} 为燃烧室内气体温度, 稳态时 $T_{s,\infty} = T_{g1} = 2000$ K。实际运行中, 燃烧室衬垫涂层表面 S_1 经常附着烟灰, 类似于表面涂有发射率(ϵ_1)较高的不透明薄层; 分界面发射率 $\epsilon_2 = 0.3$; S_3 外表面也可能附有烟灰, 因此其发射率较大, 设 $\epsilon_3 = 0.7$; 并认为所有界面均为漫反射。其它参数: $n_c = 1.58$; $k_c = 0.8$; $k_m = 33.0$; $d_c = 1$ mm; $d_m = 0.8$ mm, $h_1 = 250$, $T_{s+\infty} = T_{g2} = 800$ K, $h_2 = 110$ 。采用表 3 中的两波段谱带模型近似隔热涂层的光谱特性。图 2 给出了 ϵ_1 分别为 0, 0.2, 1.0 三种情况下涂层和衬垫

内的稳态温度分布, 作为比较, 图中也给出了相应情况下隔热涂层不透明时的温度分布。由图可见:

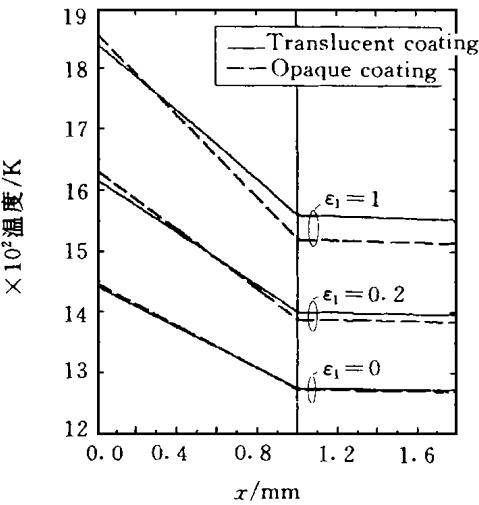


图 2 涂层表面发射率对温度场的影响

- (1) 设涂层不透明, 即忽略了涂层内热辐射的传递作用, 此时基底内的温度总是低于考虑涂层内热辐射时的温度;
- (2) 基底内的温度随着表面发射率的增加而增加;
- (3) 涂层内部辐射对基底温度分布的影响随发射率的增加而增加, 当涂层表面的发射率较小时, 可忽略内部辐射的影响。

4.2 涂层厚度对温度场的影响

边界漫反射, S_1 面(涂层表面)不透明时, 考察涂层厚度 d_c 从 0 到 2 mm 连续变化对涂层和基底表面温度的影响。除了 d_c 变化及 $\epsilon_1 = 0.95$ 外, 其它计算条件均与图 2 的相同, 数值模拟结果见图 3。图中实线考虑了涂层内热辐射的影响(辐射与导热耦合换热); 虚线则忽略涂层内的热辐射(纯导热), 只在界面外有表面辐射。由图 3 可见,

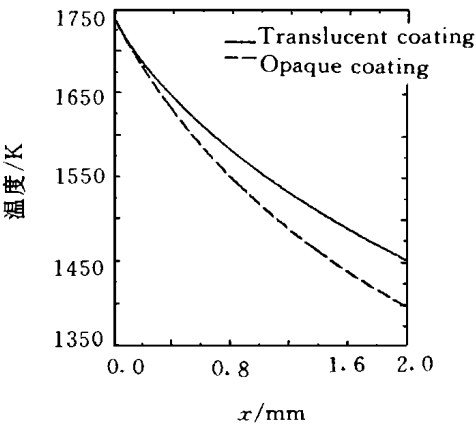


图 3 涂层厚度对基底表面(S_2 面)温度的影响
随着涂层厚度的增加, 辐射对温度分布的影响越

来越大,当 $d_c=2.0\text{ mm}$ 时,考虑涂层内辐射换热时基底表面温度比忽略热辐射时高出约 55 K 。

4 3 表面反射特性对温度分布的影响

由于第一级叶片部分暴露于燃烧室的高温环境,因此辐射对该级叶片内温度分布的影响大于对其它各级叶片的影响。分析这一典型情况,考虑燃烧室的高速来流使得涂层表面没有烟灰沉积,即 S_1 面半透明,其反射率由 Fresnel 反射定律计

算得出,并考虑表面为镜反射和漫反射两种情况。计算参数: $\epsilon_s=0.3$, $\epsilon_b=0.3$, $n_c=1.58$, $k_c=0.8$, $k_m=33.0$, $d_c=0.25\text{ mm}$, $d_m=0.75\text{ mm}$, $h_1=3000$, $h_2=3750$, $T_{s_{-}\infty}=T_{g1}=2000\text{ K}$, $T_{s_{+}\infty}=T_{g2}=1000\text{ K}$ 。采用四谱带模型模拟涂层的光谱特性,其中: 3 个为半透明谱带、1 个为不透明谱带(见表 3)。数值模拟给出了半透明涂层和不透明基底内一些位置处的稳态温度分布和热流密度(见表 4)。

表 4 涂层表面半透明时、表面镜反射与漫反射下的温度和热流密度

涂层内的 换热方式	界面反射 特 性	温度/K					热流密度 (W/m^2)
		$x=0\text{ mm}$	$x=0.1\text{ mm}$	$x=0.25\text{ mm}$	$x=0.5\text{ mm}$	$x=1.0\text{ mm}$	
辐射与导热 耦合换热	漫反射	1671.54	1545.81	1355.57	1346.01	1326.90	1261576.7
	镜反射	1672.44	1547.05	1357.29	1347.69	1328.48	1267768.9
忽略辐射		1723.06	1569.82	1339.94	1330.66	1312.08	1225975.0

由表 4 可见,在强各向同性散射性介质中,镜反射和漫反射的计算结果非常相近,因此,对于强各向同性散射性隔热涂层,可忽略界面反射特性对温度场的影响。在上述计算条件下,考虑辐射时基底内的温度比不考虑辐射时约高 15 K 左右。

5 结 论

本文针对涡轮发动机叶片和燃烧室衬垫的半透明隔热涂层内辐射与导热耦合换热,考虑各种界面辐射特性:不透明界面和半透明界面,镜反射和漫反射,建立了物理模型、边界离散方程。采用光线追踪/节点分析法计算了各向同性散射性介质内的辐射传递系数,结合控制容积法数值模拟了两层平板介质内辐射与导热瞬态耦合换热。经与文献[8,9]比较表明,本文的物理模型、计算方法正确、计算精度高。

在此基础上,分析了辐射影响最大的两种典型情况:燃气轮机的第一级叶片和燃烧室衬垫的实际工作情况。计算了半透明涂层内部热辐射对基底表面温度、基底内温度分布的影响,考察了涂层表面发射率、半透明涂层厚度、界面反射特性等对热辐射作用大小的影响。数值模拟得出以下几点结论。

(1) 在不透明界面下,半透明涂层内的辐射换热对温度场的影响随 S_1 面发射率的增加而增加,随涂层厚度的增加而增加。

(2) 涂层的表面(S_1 面)发射率对介质内的温度场有较大的影响;在本文的计算条件下($\epsilon_s=$

1.0 和 0):考虑涂层内的热辐射时,基底内的温差达 280 多度;忽略涂层内的热辐射时,达 230 多度。

(3) 忽略了涂层内的辐射换热将导致基底表面(叶片和燃烧室衬垫金属表面)的计算温度低于燃气轮机工作时的实际温度。

(4) 对高散射性隔热涂层(如氧化锆和陶瓷材料),表面的反射特性对温度场的影响可忽略。

参 考 文 献

1 胡晓煜 航空发动机的先进涡轮技术(下)[J]. 国际航空, 1998, (5): 49- 51

2 Wahiduzzaman S, Morel T. Effect of Translucence of Engineering Ceramics on Heat Transfer in Diesel Engines [R]. Oak Ridge National Lab. REPT., ORNL/Sub/88-22042/2, Oak Ridge, TN, April, 1992

3 Matthews L K, Viskanta R, Incropera F P. Combined Conduction and Radiation Heat Transfer in Porous Materials Heated by Intense Solar Radiation [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1985, 107(1): 29- 34

4 Siegel R. Internal Radiation Effects in Zirconia Thermal Barrier Coatings [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1996, 10(4): 707- 709

5 Siegel R. Temperature Distribution in a Composite of Opaque and Semitransparent Spectral Layers [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11(4): 533- 539

6 Thomas J R Jr. Coupled Radiation/Conduction Heat Transfer in Ceramic Liners for Diesel Engines [J]. Numerical Heat Transfer, Part A, 1992, 21: 109- 122

7 Siegel R. Green's Function to Determine Temperature Distribution in a Semitransparent Thermal Barrier Coating

- [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1997, 11 (2): 315- 318
- 8 Siegel R. Temperature Distributions in Channel Walls with Translucent Thermal Barrier Coatings [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, 12(3): 289- 296
- 9 Frankel J I Cumulative Variable Formulation for Transient Conductive and Radiative Transport in Participating Medium [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1995, 9 (2): 210- 218
- 10 Tan H P, Lallemand M. Transient Radiative-Conductive Heat Transfer in Flat Glasses Submitted to Temperature, Flux and Mixed Boundary Conditions[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1989, 32(5): 795- 810
- 11 Tan H P, Ruan L M, Xia X L, Yu Q Z, Tong T W. Transient Coupled Radiative and Conductive Heat Transfer in an Absorbing, Emitting and Scattering Medium [J]. Int. J. Heat and Mass Transfer, 1999, 42: 2967- 2980
- 12 Tan H P, Wang P Y, Xia X L. Transient Coupled Radiation and Conduction in an Absorbing and Scattering Composite Layer[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2000, 14(1): (已录用)
- 13 王平等, 谈和平, 夏新林. 不透明表面漫反射下两层散射性介质内的瞬态耦合换热[R]. 中国工程热物理学会, 传热传质学学术会议论文集(No. 993015, IX- 41- 10), 合肥: 1999

(责任编辑 杨再荣)

Heat Transfer in Translucent Thermal Barrier Coatings of Turbine Engine

Wang Pingyang, Tan Heping, Liu Linhua, Luo Jianfeng

(School of Energy Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Some of thermal barrier materials for coating in aeroengine, such as zirconia and ceramic, are partially transparent to thermal radiation. So it is necessary to estimate quantitatively the radiation effect in the thermal analysis of turbine engine under high temperature. In this paper, various surface radiative characteristics are considered including opaque (with soot) and semitransparent (without soot) coating surfaces, specular and diffuse reflections. The radiative transfer coefficients of the absorbing and isotropic scattering coatings are derived by the ray tracing/node analysis method. The transient coupled radiative and conductive heat transfer in the coatings are numerically simulated by the radiative transfer coefficients in combination with the full implicit control-volume method. The radiative properties of the coatings are modelled by two or four spectral bands. The analysis includes the effects of the opaque surface emissivity, the coating thickness, and the surface radiative characteristics on the temperature distributions and heat flux densities.

Key words: thermal barrier coatings; numerical simulation; heat transfer

(The Chinese text of the following abstract is printed in P263- 267)

A Two-Dimensional Model of Thermal Energy Storage (TES) Container for Space Power System

Xing Yuming, Hou Xinbin, Li Weifang, Yang Chunxin, Yuan Xiugan

(5th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: High temperature phase change heat storage using molten fluoride salts is one of the key techniques for space solar thermal dynamic power system. On the basis of heat conduction governing differential equation under micro-gravity (micro-g), a two-dimensional numerical analysis of PCM container has been completed using the enthalpy method. A novel void model has been developed and the previous simulation has been improved.

Key words: solar electrical energy generation; models; numerical analysis