

文章编号: 1000-6893(2000)S0-0S25-05

陶瓷热障涂层的隔热效果研究

宫声凯, 邓亮, 毕晓方, 徐惠彬

(北京航空航天大学 材料科学与工程系, 北京 100083)

THERMAL BARRIER EFFECT OF CERAMIC THERMAL BARRIER COATINGS

GONG Sheng-kai, DENGLiang, BIXiao-fang, XUHui-bin
(Department of Materials Science and Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 通过理论公式推导和试验测量, 得出: 热障涂层的隔热效果与环境温差成正比, 但同等环境温差下涂层在更高的温度工作时, 由于涂层材料导热系数的增大, 其隔热效果减小。涂层厚度与隔热效果在实际涂层应用的厚度范围内也接近线性关系。随着发动机叶片冷却气流换热系数增大, 热障涂层的隔热效果也越大, 但两者并不是线性关系。涂层隔热效果随导热系数的减小而增大, 并且在低导热系数区, 热障涂层隔热效果对导热系数的变化更敏感。随着涂层的厚度增大, 导热系数的改变所具有的增加涂层隔热效果的作用越大; 但涂层越厚, 单位厚度涂层导热系数改变所取得的隔热效果越低。

关键词: 热障涂层; ZrO_2 ; 隔热效果

中图分类号: V 254.2 **文献标识码:** A

Abstract: Experimental and theoretical analysis shows that the thermal barrier effect having a near-linear relation to the ceramic coating thickness is proportional to environment temperature difference. As the heat exchange coefficient of the cooling gas increases, the changes in the thickness of ceramic coating will be more efficient in terms of the thermal barrier effect, which increases with the decrease of the thermal conductive coefficient of ceramic coating. In the low thermal conductive coefficient zone this effect is more sensitive to the thermal conductive coefficient. On the other hand, lowering thermal conductivity will bring less thermal barrier effect as the ceramic coating getting thicker.

Key words: thermal barrier coatings; ZrO_2 ; thermal barrier effect

热障涂层(TBCs)在航空发动机热端部件上的应用可以使发动机工作温度进一步提高。因此, 与热障层的使用寿命(抗热震性)一样, 涂层的隔热效果(即可以提高多少工作温度)也是评价涂层性能的一项重要指标。隔热效果的大小将直接关系到叶片涂层体系工作温度的大小, 同时也间接影响涂层热循环过程中热应用的大小。因此, 通过实验模拟测试涂层的隔热情况即温度梯度, 并结合传热学理论, 根据涂层材料的导热系数、预期的隔热效果及热端部件的工作环境合理地设计涂层厚度, 对于实验室研究和实际应用都是很重要的一项工作。

1 实验材料及方法

为了排除平板试样边界条件的不固定因素,

本实验中的隔热效果模拟测试试样采用圆管。金属基体为不锈钢圆管(外径 $\varnothing 28\text{mm}$, 内径 $\varnothing 24\text{mm}$, 壁厚 2mm), 为了便于涂层的制备, 采用等离子喷涂的方法制备测试用的热障涂层。涂覆前在不锈钢管外壁开 1mm 深的槽, 预埋上 $\varnothing 1\text{mm}$ 的热电偶丝, 按正常工艺在圆管合金的表面分别涂覆NiCoCrAlY金属粘结层和厚度各为 $100\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ 的 Y_2O_3 (质量百分数7%)稳定 ZrO_2 陶瓷隔热涂层(YSZ)。热电偶分别置于涂层的表层、涂层与粘结层之间及不锈钢管中, 测试热障涂层表面温度使用了3根热电偶固定于涂层表面不同位置用于相互参照。测试时, 向空心孔中通入不同流量的氮气作为冷却气流, 由计算机实时采集数据, 研究不同涂层厚度在不同冷却气流流量下的隔热效果。冷却过程非稳态的温度梯度测试试样与稳态导热隔热效果的试样一样, 将试样置于 1000°C 的电阻炉中加热, 保温 10min 左右直至涂层内外的热电偶温度都达到 1000°C 为止, 取出试样, 用风扇吹冷, 在吹冷过程

收稿日期: 1999-06-19; 修订日期: 1999-10-19
基金项目: 国家自然科学基金(N₀ 59772028)和航空科学基金(N₀ 98H51081)资助项目
文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2000/S0/0S25/>



中实时测试涂层内外表面温度变化。

2 稳态导热法涂层隔热效果测试及结果分析

2.1 隔热效果实测结果

在自然对流情况下,从室温加热到 900 ,直到各热电偶测试的温度不再变化,温度梯度到达稳态为止。计算机采集涂层内外侧温度的实测结果如图 1 所示。由测试曲线可见,在加热过程中,厚涂层存在较大温度梯度,但各厚度涂层在 5min

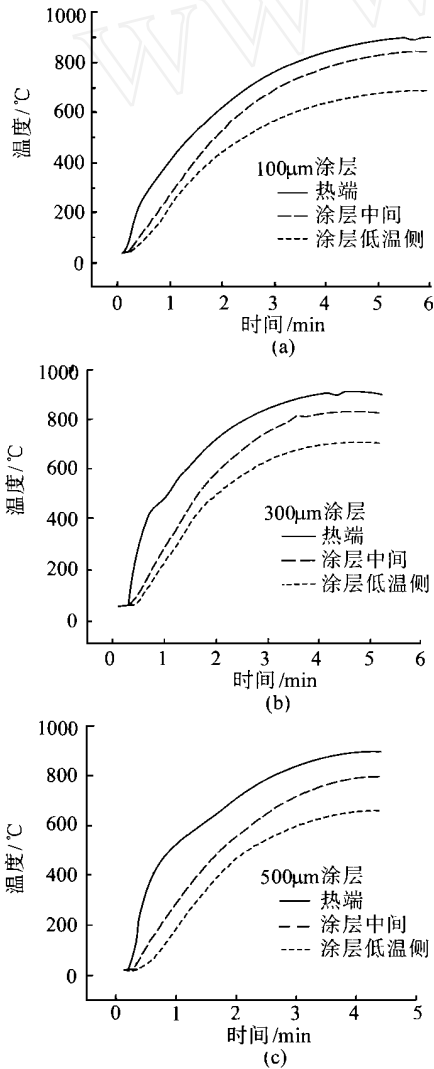


图 1 各厚度涂层隔热效果实测曲线

左右都能达到稳定热流状态。由涂层内外壁的温度差可求出在此热边界条件下的涂层隔热效果。在加上不同流量的氮气冷却气流后,测试所得隔热效果随陶瓷层厚度的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可看出,冷却气流的流量对涂层隔热效果的影响非常明显,隔热效果随冷却气流流量的增加而增加;同时,涂层越厚,气流流量的影响越显著。

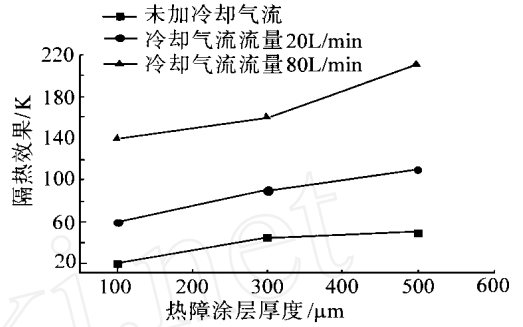


图 2 不同流量冷却气流下涂层隔热效果变化

2.2 热障涂层隔热效果讨论

以圆管的一维稳态导热为模型(如图 3 所示),可以从理论上分析热障涂层的隔热效果。为了简化,在讨论时略去了热辐射效应。

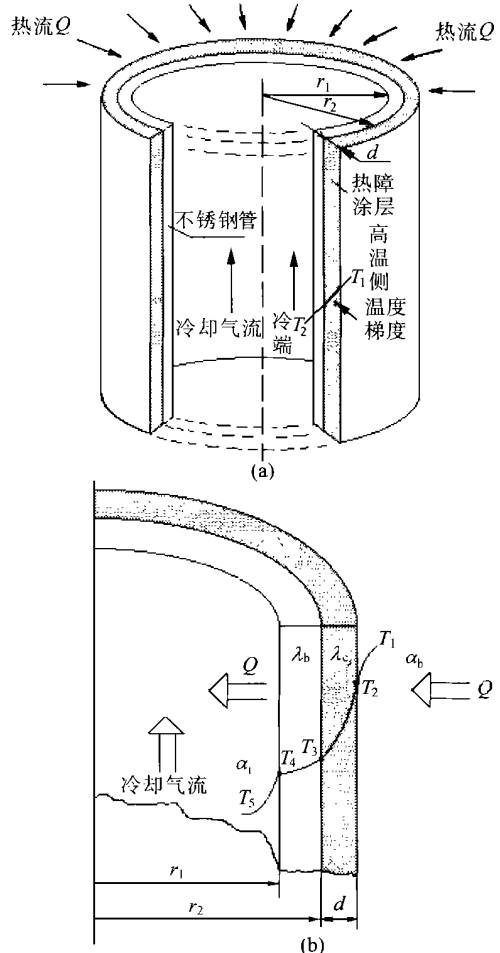


图 3 圆管稳态导热模型

这种一维圆管的稳态导热中,传热达到稳态时热流 Q 是一个常量。由傅立叶定律来求解,通过积分后代入边界条件可以得出这种圆管式一维稳态导热的热流量 $Q (W)$ 的计算公式为^[1]

$Q =$

$$\frac{2\pi l}{\frac{1}{\alpha_h(r_2 + d)} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2 + d}{r_2} + \frac{1}{\lambda_b} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_c r_1}} \times (T_1 - T_5) \quad (1)$$

式中: λ 为 YSZ 的导热系数; λ_b 为基体不锈钢的导热系数(由于粘结层导热系数与不锈钢相近且厚度太薄, 忽略不计); d 为陶瓷层厚度; r_2 为不锈钢管外径; r_1 为不锈钢管内径; T_1 为陶瓷表层高温侧炉气温度; T_5 为不锈钢管内低温侧气流温度; l 为不锈钢管长度; α_h 为高温侧气流换热系数; α_c 为管内冷却气流换热系数。

由上式可以导出热障涂层的隔热效果 ΔT 为

$$\Delta T = T_2 - T_3 = \frac{(T_1 - T_5) \ln \frac{r_2 + d}{r_2}}{\frac{\lambda}{\alpha_h(r_2 + d)} + \ln \frac{r_2 + d}{r_2} + \frac{\lambda}{\lambda_b} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\lambda}{\alpha_c r_1}} \quad (2)$$

叶片所应用的发动机高温环境中, 燃气的换热系数通常很高(约 $10\,000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$), 涂层厚度 d 相对 r_2 较小, 因此上式中涂层厚度 d 对 $1/[\alpha_h(r_2 + d)]$ 的改变可略去不计, 高温侧换热系数的这种简化对于估算在炉管中加热的试样 ($T_2 = T_1$) 也可以适用。因此, 上式简化为

$$\Delta T = T_2 - T_3 = \frac{(T_1 - T_5) \ln \frac{r_2 + d}{r_2}}{\ln \frac{r_2 + d}{r_2} + \left(\frac{1}{\lambda_b} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_c r_1} + \frac{1}{\alpha_h r_1} \right) \lambda} \quad (3)$$

由上面的传热分析式(3)可知, 涂层的隔热效果与涂层所应用的冷热端环境温度 ($T_1 - T_5$) 呈正比关系。其它影响热障涂层所取得的隔热效果的因素还包括: 热障涂层的厚度 d ; 涂层材料体系的导热系数 λ (λ_b , λ_c); 冷却气流的换热系数 α_c 等。其中涉及涂层材料物理性能的是导热系数 λ 涉及制备时涂层设计的是涂层厚度 d ; 其余的则涉及涂层所应用的环境参数。

2.2.1 涂层厚度的影响

由隔热效果公式可以预期, 随着陶瓷隔热涂层厚度的增加, 隔热效果应该增大。在式(3)中如果取环境温度差 ($T_1 - T_5$) 为 870K , 热障涂层的导热系数 λ 取等离子喷涂 YSZ 的导热系数, 其值为 $0.5\text{W}/(\text{mK})$, 基体导热系数 λ_b 取不锈钢的导热系数 $20\text{W}/(\text{mK})$, 可作出涂层的隔热效果随厚度增加的曲线, 如图 4 所示。

作图所用的计算公式为

$$\Delta T = \frac{870}{1 + [0.015 + 1/(0.014\alpha_c)] / \ln(1 + d/14)}$$

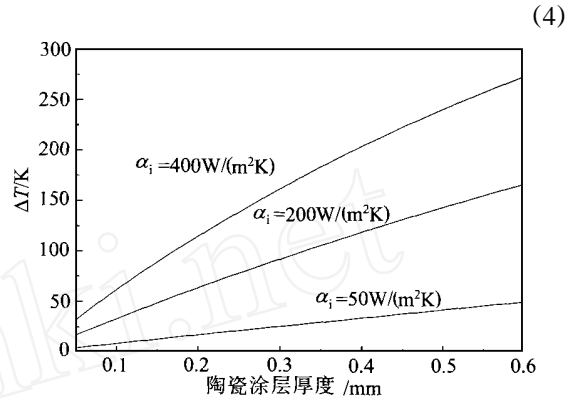


图 4 厚度与隔热效果(ΔT)的关系图

虽然从公式上分析, 涂层的隔热效果与涂层厚度并不呈直线关系, 但由图 4 可见, 在实际应用的涂层厚度范围内 ($100 \sim 500\mu\text{m}$), 隔热效果与陶瓷涂层厚度可以近似认为是符合直线关系的, 并且, 随着冷却气流换热系数的增大, 涂层厚度的改变对隔热效果的改变也越大。这与实验测得的结果是一致的(图 2)。

2.2.2 冷端气流换热系数对隔热效果的影响

实际冷却气流的换热系数大小与流体的压力、换热面的几何形状、流体本身的物理性质等有关, 通常给出的都是平均换热系数, 确定其具体值非常困难。在本实验中主要通过改变冷却气流的流量来模拟冷却气流换热系数的改变。实际发动机冷却气流换热系数可以在较大的范围内变化, 工作时的冷却气流换热系数在 $5000 \sim 10000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 左右^[2]。根据式(3)的圆管稳态隔热模型计算的涂层隔热效果随冷却气流换热系数变化的曲线如图 5 所示。计算中涂层厚度取 0.3mm , 其余参数与 2.2.1 节相同。

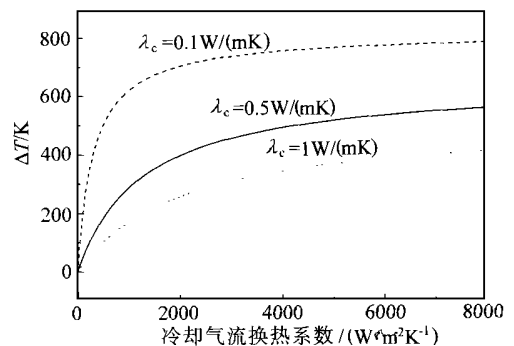


图 5 隔热效果与冷却气流换热系数关系

由图 5 可见, 随着发动机叶片冷却气流换热系数增大, 热障涂层的隔热效果也越大, 两者并不是线性关系; 在冷却气流较小时, 冷却气流的改变显著影响隔热效果, 尤其是对于导热系数较低的

隔热涂层这一趋势更明显。在发动机工作的冷却气流换热系数范围内($\sim 5000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$),当热障涂层导热系数 λ 增大后,虽然涂层总体的隔热效果下降了,但冷却气流的改变所带来的影响反而略有增大。由式(3)可知,高温燃气端换热系数的改变与冷却气流的改变对涂层的隔热效果具有相同的影响。另外还可以看出,当无气流冷却时,从稳态分析的角度热障涂层不具备隔热效果,仅在动态上能延缓基体金属表面受高温侵袭的时间。因此,对于应用于受热时间较长的热障涂层必须与冷却技术协同才能达到降低叶片金属基体表面温度的目的。

2.2.3 涂层导热系数对隔热效果的影响

由式(3)在冷却气流的换热系数取为 $1000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$,其它参数的取值同2.2.1节的情况下,求得导热系数对隔热效果的影响如图6所示。由图6(a)可见,涂层隔热效果随导热系数的减小而增大,并且在低导热系数区,涂层导热系数的减小会获得更大的隔热效果。随着涂层的厚度增大,导热系数对涂层隔热效果的影响越大;但是从单位厚度涂层导热系数改变所取得的隔热效果(图6(b))来看,涂层越厚,通过改变涂层导热系数所取得的隔热效果就越低。

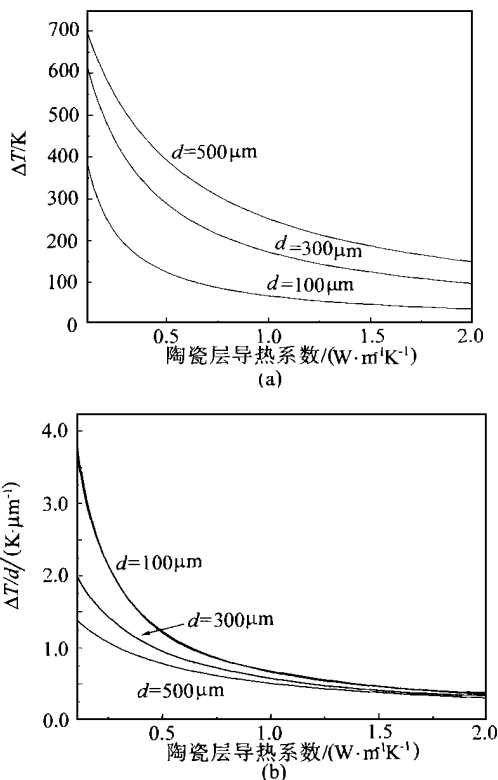


图6 导热系数对涂层隔热效果的影响
(a) $\Delta T \sim \lambda$ 关系; (b) 单位厚度的隔热效益

涂层材料的导热系数与材料结构、比重和温度等有密切的关系。通常导热系数随温度上升而呈线性升高。因此,在同样的环境温差($T_1 \sim T_5$)下,工作在高温区时涂层的隔热效果会有所下降。

从材料制备的角度考虑,改变材料导热系数的方法就是改变涂层的微观结构。从而获得隔热效果更佳的热障涂层。因此,深入研究热障涂层微观结构与涂层的导热系数关系对于涂层设计也是非常有意义的。

致密的 YSZ 块材的导热系数通常为 $2 \sim 2.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,但随着涂层内部微观结构的改变,涂层的导热系数也有较大的变化。等离子喷涂与电子束物理气相沉积制备的热障涂层中的孔隙结构及分布情况有较大不同,因此 EB-PVD 热障涂层的导热系数较高为 $1.8 \sim 2.0\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,而典型的等离子喷涂 YSZ 涂层导热系数为 $0.7 \sim 0.9\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [13]。

D. P. H. Hasselman 分析了材料内部裂纹对导热系数的影响规律 [14]。指出涂层中微裂纹垂直于热流方向的材料导热系数变化为

$$\lambda = \lambda_0 (1 + 8N r^3/9)^{-1} \quad (5)$$

式中: λ_0 为块材的本征导热系数; λ 表示裂纹存在时的导热系数; N 为裂纹密度; r 为裂纹尺寸(裂纹简化为圆盘状)。而裂纹平行于热流方向的材料导热系数则几乎没有变化。这一规律也可以较好地解释等离子喷涂热障涂层及电子束物理气相沉积热障涂层导热系数的变化情况。

等离子喷涂热障涂层其 YSZ 是以熔化或半熔化状态碰撞基体并冷凝形成涂层的,因此,陶瓷涂层以片条状结构为主。由于陶瓷顶层喷涂工艺多采用大气等离子喷涂,因此,其密度相应较小 ($5.0\text{g}/\text{cm}^3$ 左右)。涂层片条晶粒间的空隙,依据其结构特点可简化为圆片状,适用于上面的垂直于热流微裂纹的情况。因此,等离子喷涂 YSZ 的导热系数要小于块材 YSZ 的导热系数,并且随着孔隙密度及孔隙尺寸的增大而减小。

电子束物理气相沉积热障涂层的典型结构为陶瓷层呈垂直于表面的柱状晶结构,涂层中的空隙主要沿柱状晶晶界存在。仍以简化的圆片(r)空隙分析,则其结构特点适用于微裂纹方向平行于热流方向的情况,即有: $\lambda < \lambda_0$, 导热系数相对块材变化不大。因此,EB-PVD 涂层在提高了涂层热循环寿命的同时,涂层的隔热性能相对下降。

梯度热障涂层由于其金属-陶瓷的连续过渡,消除了力学性能上的跃迁界面,使得涂层内的

热不匹配性大大减小,可显著改善涂层的热循环寿命,是未来先进热障涂层的发展方向。由于其梯度过渡区域的导热系数不为定值,对于典型双层结构热障涂层的分析模型不能适用。根据估算两种完全不互熔机械混合物导热系数的线性混合法则^[5],梯度过渡区材料的导热系数可近似认为是由陶瓷材料的 $0.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 线性过渡到基体金属材料 $20\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。这无疑会使涂层单位厚度的隔热能力下降,因此,为了进一步提高涂层寿命而进行的将金属、陶瓷混合沉积以形成梯度涂层,将使得涂层的导热系数升高,降低涂层的隔热效果。

2.2.4 涂层厚度、导热系数、冷却气流换热系数对涂层隔热效果的综合影响

由式(3),代入其余参数后,化简得计算公式如下

$$\Delta T = \frac{870}{1 + \left(0.015 + \frac{1}{0.012\alpha} \right) \frac{\lambda}{\ln(14+d) - 2.64}} \quad (6)$$

通过上式分析涂层厚度 d 、导热系数 λ 及冷却气流换热系数 α 对涂层隔热效果的综合影响, d 和 λ 是涉及涂层设计制备的参数,冷却气流换热系数 α 是涉及涂层使用环境的参数。

由前面对各单个因素的分析可见,涂层厚度增加,导热系数减小,换热系数增加是提高涂层隔热效果的3条主要途径。涂层厚度在目前的热障涂层常用的厚度范围内基本上与隔热效果呈线性关系,其余2项则不是。在不同条件下,涂层厚度的增加所取得的隔热效益是不同的。涂层导热系数减小对涂层隔热效果的影响较大,由于涂层导热系数与涂层微观结构有直接的联系,因此,在考虑涂层隔热效果而改变涂层微观结构时必然会影响到涂层的抗热震性能;在涂层厚度较大时,这种改变取得的隔热效果较大。但单位厚度涂层的隔热效益反而下降,在尽可能减小导热系数的情况下选择合适的厚度可以获得更大的隔热效益。因此,对于涂层设计需要根据涂层应用的不同场合,对隔热效果及抗热震性的不同要求,以及技术的经济性等各方面进行权衡,寻找到最佳点,从而更好地确定合适的热障涂层材料体系及工艺。

3 结论

(1) 热障涂层的隔热效果与环境温差 ($T_1 \sim T_5$) 成正比。但同等环境温差下涂层在更高的温度工作时,由于涂层材料导热系数的增大,其隔热

效果减小。涂层厚度与隔热效果在实际涂层应用的厚度范围内也接近线性关系,随着冷却气流换热系数的增大,涂层厚度的改变对隔热效果的影响也越大。

(2) 随着发动机叶片冷却气流换热系数增大,热障涂层的隔热效果也越大,两者并不是线性关系;在冷却气流较小时,冷却气流的改变将显著影响隔热效果,尤其是对于导热系数较低的隔热涂层这一趋势更明显。当热障涂层导热系数 λ 增大后,在发动机工作的冷却气流换热系数范围内(约 $5000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$),虽然涂层总体的隔热效果下降了,但冷却气流的改变所带来的影响反而略有增大。

(3) 涂层隔热效果随导热系数的减小而增大,并且在低导热系数区,热障涂层隔热效果对导热系数的变化更敏感,涂层单位导热系数的减小会获得更大的隔热效果。随着涂层的厚度增大,导热系数的改变所具有的增加涂层隔热效果的作用越大;但涂层越厚,单位厚度涂层导热系数改变所取得的隔热效益越低。

(4) 涂层越厚,冷却过程中涂层内的最大温度梯度也越大。由热应力的分析可知,热循环实验中,在温度动态变化阶段,涂层内存在的温度梯度将加剧陶瓷/粘结层界面位置的应力情况。

参 考 文 献

- [1] 杨世铭. 传热学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 38
- [2] Liebert C H, Stepka F S. Potential use of ceramic coating as a thermal insulation on cooled turbine hardware [R]. NASA TM X-3352, 1976. 24
- [3] Law son K J, Nicholls J R, Rickerby D S. Thermal Conductivity and Ceramic Microstructure [R]. Rolls-Royce papers, 1996
- [4] HasseInan D P H. Effect of cracks on thermal conductivity [J]. J Compos Mater, 1978, 12: 403
- [5] 陈洪荪. 金属材料物理性能手册: 第一册(金属物理性能及测试方法)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987. 109

作者简介:



宫声凯 男, 43岁, 教授, 博士生导师。1982年毕业于沈阳东北工学院(现东北大学), 同年由国家教委派赴日本东京工业大学留学, 1988年获工学博士学位, 1988年回国在清华大学材料科学与工程系博士后流动站工作。1991年至1994年在日本公司工作, 1994年回国至今在北航材料科学与工程系工作。