

热障涂层的热-力耦合破坏机制

周益春^{*+**} 桥田俊之^{*} 段祝平^{**}

^{*}(日本东北大学破坏力学研究所, 日本, 仙台市 980-8579)

⁺(湘潭大学基础力学与材料工程研究所, 湘潭 411105)

^{**}(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 热障涂层(TBC)是一层陶瓷涂层, 它沉积在耐高温金属或超合金的表面, 用于保护基底材料在高温下工作。设计了一套实验方案模拟热涂层的运行状态, 从实验和理论两个方面研究了这种涂层的破坏机制。

关键词 热障涂层, 热-力耦合破坏, 热疲劳, 剥落

引言

热障涂层(TBC)是一层陶瓷涂层, 它沉积在耐高温金属或超合金的表面, 热障涂层是用于保护基底材料, 使得用其制成的发动机涡轮转子的叶片能在如 1500℃的高温下运行, 以提高发动机的热效率达到 46%甚至更高^[1]。叶片通常是一壳体, 壳体里面用冷却剂冷却, 叶片外表面的热障涂层的温度可达到 1100℃~1200℃, 而基底合金材料的内表面的温度也可达到 700℃或更高, 当这样的叶片在运行时将有多种运行因素影响其寿命: 过渡层的氧化(TGO), 热疲劳, 高温蠕变, 腐蚀。本文设计了一套实验方案模拟了热障涂层材料的运行状态并考虑了上述因素的综合影响, 用声发射(AE)和复电阻谱(IS)法观测了热障涂层材料的损伤和破坏的演化过程, 并且提出了材料系统运行时诸多因素影响下热应力场和热障涂层剥落机制的理论模型。实验和理论都得到了一些关于热障涂层的热力耦合作用下破坏机制的一些有意义的结果。

1 实验研究^[2]

1.1 模拟系统

用 CO₂激光器作为模拟热源, 激光的波长为 10.6μm, 激光器的最大输出的功率为 500W, 辐射时间为 100s 左右, 且多次辐照来模拟 TBC 涂层系统的热疲劳。激光辐照到圆柱壳形试件的外表面 TBC 涂层上, 圆柱壳内表面用水冷却, 圆柱壳的直径为 6mm 和 8mm 两种, 圆柱壳内外表面的温度分别为 500℃~700℃和 900℃~1200℃。外表面 TBC 涂层上的温度由红外探测器测试, 内表面基底的温度由热电偶测定, 并用声发射(AE)的方法测定裂纹的形成过程和扩展情况, 用复阻抗(IS) 测定中间过渡层的氧化。

1.2 材料

涂层是用等离子体喷涂的方法沉积到不锈钢和定向凝固的超合金镍两种基底上, 在基底材料上先喷涂一层厚为 0.15mm 的过渡层 NiCrAlY, 再镀上一层厚为 0.35mm 的陶瓷涂层, 陶瓷涂层有两种, 一种是只一层 PSZ 涂层, 即 ZrO₂-8wt%Y₂O₃的普通涂层(Non-FGM), 另一种是称为功能梯度材料(FGM)的多层陶瓷涂层, 即 PSZ 与 NiCrAlY 按成分作梯度变化。

1.3 主要结果

AE 信号和 SEM 观察都表明，在 Non-FGM 涂层和 FGM 涂层中，存在着两种破坏形式，即表面裂纹（或称为垂直裂纹）和界面裂纹，并且发生在厚度方向温度梯度大的区域，而界面裂纹主要发生在厚度方向温度梯度较小的区域。而且是先出现表面裂纹，再出现界面裂纹。界面裂纹是最终也是最严重的破坏形式。且 FGM 涂层明显比 Non-FGM 涂层能承受更高的温度梯度。

另一方面。加热或冷却速度对涂层的破坏也有一定的影响，快速加热/快速冷却是最易于造成 TBC 涂层破坏的一种热载荷方式。TBC 涂层系统处于加热状态一定时间以后，在 TBC 涂层和中间层之间会形成一氧化层，该氧化层又分成为两层，即比较纯的 Al_2O_3 层和由 Al_2O_3 及 NiCrAlY 组合成的混合层，且在混合层中存在较多的微裂纹或者微孔洞。

2 理论研究^[3]

2.1 TBC 涂层运行状态的应力场模型

提出了一个考虑 TBC 材料在运行状态时的应力场模型，这个模型考虑了温度梯度，界面的氧化（TGO），涂层的蠕变，基底和中间层的塑性变形，而且获得了一维圆柱壳形状态下的解析表达式。计算结果表明，在涂层和基底的温度梯度最大时，其周向应力是拉应力，且最大，这说明了实验结果是在相对较大的温度梯度区内形成表面裂纹。在经历一定的运行时间后，在界面则出现径向方向的较小的拉伸残余应力和压缩的周向残余应力。而实验结果表明，在形成一定深度的表面裂纹后，就产生界面的脱胶问题，这也是造成 TBC 材料破坏的一种严重后果。利用这个模型还分析了结构曲率，氧化层厚度，加热或冷却速度以及热疲劳下的涂层系统的可能破坏机制。理论分析的结果和实验结果比较一致。

2.2 TBC 涂层运行状态下的脱胶模型

提出了一个考虑 TBC 运行状态下的脱胶模型，这个模型考虑了 TBC 涂层运行状态下的可能出现的温度梯度，周向方向的压应力以及径向方向的拉应力造成涂层的脱胶现象，得到了能量释放率的解析表达式。以 TBC 涂层运行状态下的应力场为基础，用这个模型具体分析了 TBC 材料的脱胶问题，发现脱胶可能出现在冷却过程中，第二次或者以后的加热中，即脱胶不会出现首次加热或保温的运行过程中，这和实验结果也比较一致。由这个模型还分析了影响 TBC 材料运行寿命的各种影响因素。

参 考 文 献

- 1 Yuri I, Hisamatsu T, Watanabe K and Etori Y. Structural design and high pressure test of a ceramic combustor for 1500°C class industrial gas turbine. *Trans ASME J Engng Gas Turbines Power*, 1997, 119(3): 506~511
- 2 Zhou YC, Hashida T. Coupled effects of temperature gradient and oxidation on the thermal barrier coating failure. In: Life Assessment of Hot Section Gas Turbine Components, Edinburgh, UK, 1999-10-4~7 (in press)
- 3 Zhou YC, Hashida T. Coupled effects of temperature gradient and oxidation on thermal stress in thermal barrier coating system, Submitted to *Int J Solids Structures*