



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103091170 B

(45) 授权公告日 2014. 12. 10

(21) 申请号 201310027087. 7

CN 101858872 A, 2010. 10. 13, 全文.

(22) 申请日 2013. 01. 18

审查员 鄢亚东

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁路 28 号

(72) 发明人 苏罗川 王铁军 张伟旭 许荣  
吕志超

(74) 专利代理机构 西安智大知识产权代理事务  
所 61215

代理人 何会侠

(51) Int. Cl.

G01N 3/10(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 2783316 Y, 2006. 05. 24, 全文.

CN 101398351 A, 2009. 04. 01, 全文.

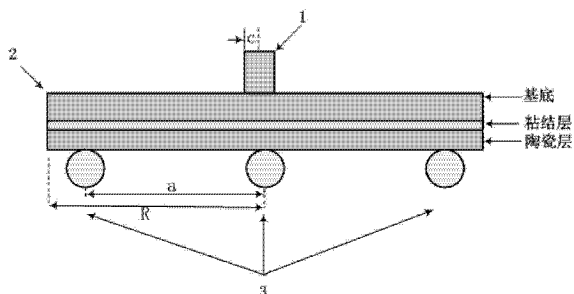
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种热障涂层双轴强度测试方法

(57) 摘要

本发明公开了一种热障涂层双轴强度测试方法,步骤为:1、首先测量热障涂层圆盘试件各层的厚度  $t$ , 半径  $R$ , 获取各层材料的弹性模量  $E$  及泊松比  $\nu$ ; 然后将三个试件支撑部件置于热障涂层圆盘试件底部陶瓷层一侧周边, 且沿着热障涂层圆盘试件的对称中心对称分布, 测量支撑点到热障涂层圆盘试件对称中心的距离  $a$ ; 2、将活塞加载装置的加载压头的加载点位于热障涂层圆盘试件上部基底一侧表面且加载压头中心与热障涂层圆盘试件中心重合, 对热障涂层圆盘试件进行加载, 直至陶瓷层表面中心区域出现初始断裂时, 记载此时的加载力  $P_{cr}$ ; 3、通过加载力  $P_{cr}$  计算热障涂层圆盘试件的双轴拉伸强度  $S$ ; 本发明能够简洁高效的测试涂层双轴强度, 为更高效的涂层系统的设计与开发奠定了基础。



1. 一种热障涂层双轴强度测试方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤 1:首先测量热障涂层圆盘试件 (2) 各层的厚度  $t$ , 半径  $R$ , 同时获取各层材料的弹性模量  $E$  以及泊松比  $\nu$ ; 然后将三个试件支撑部件 (3) 置于热障涂层圆盘试件 (2) 底部陶瓷层一侧周边, 且试件支撑部件 (3) 沿着热障涂层圆盘试件 (2) 的对称中心对称分布, 测量支承点到热障涂层圆盘试件 (2) 对称中心的距离  $a$ ;

步骤 2:将活塞加载装置 (1) 的加载压头的加载点位于热障涂层圆盘试件 (2) 上部基底一侧表面且加载压头中心与热障涂层圆盘试件 (2) 中心重合, 对热障涂层圆盘试件 (2) 进行加载, 陶瓷层的表面中心区域将出现双轴应力状态, 直至陶瓷层表面中心区域出现初始断裂时, 记载此时的加载力  $P_{cr}$ ;

步骤 3:计算热障涂层圆盘试件 (2) 的双轴拉伸强度  $S$ , 计算公式如下式 (1)

$$S = \frac{P_{cr} E_1 Z_0}{8\pi(1-\nu_1)(1+\nu_{ave})D_0} \left\{ (1+\nu_{ave}) \left[ 1 + 2 \ln\left(\frac{a}{c}\right) \right] + (1-\nu_{ave}) \left[ \left(1 - \frac{c^2}{2a^2}\right) \frac{a^2}{R^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式 (1) 中:  $P_{cr}$ ——断裂时压头的加载力

$E_1$ ——陶瓷涂层的弹性模量

$\nu_1$ ——陶瓷涂层的泊松比

$a$ ——支承点到热障涂层圆盘试件对称中心的距离

$c$ ——加载压头的半径

$R$ ——热障涂层圆盘试件的半径

$\nu_{ave}$ ——圆盘试件的平均泊松比 计算公式如式 (2)

$$\nu_{ave} = \frac{1}{t_1 + t_2 + t_3} \sum_{i=1}^3 \nu_i t_i$$

(2)

式 (2) 中:  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别表示陶瓷涂层, 粘结层和基底的厚度

式 (1) 中:  $Z_0$ ——圆盘试件的中性面位置 计算公式如式 (3)

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 (E_i t_i / (1-\nu_i^2))(h_{i-1} + t_i / 2)}{\sum_{i=1}^3 E_i t_i / (1-\nu_i^2)} \quad (3)$$

式 (1) 中:  $D_0$ ——圆盘试件的抗弯刚度 计算公式如式 (4)

$$D_0 = \sum_{i=1}^3 \frac{E_i t_i}{1-\nu_i^2} \left[ h_{i-1}^2 + h_{i-1} t_i + \frac{t_i^2}{3} - (h_{i-1} + \frac{t_i}{2}) Z_0 \right] \quad (4)$$

式 (3) 和式 (4) 中:  $h_{i-1}$ ——圆盘试件内层间界面位置 计算公式如式 (5)

$$h_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} t_j \quad (5)$$

式 (2), (3) 和式 (4) 中:  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  和  $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$  分别表示陶瓷涂层, 粘结层和基底的弹性模量和泊松比。

2. 根据权利要求 1 所述的热障涂层双轴强度测试方法, 其特征在于: 所述活塞加载装置 (1) 为活塞式压头。

3. 根据权利要求 2 所述的热障涂层双轴强度测试方法,其特征在于:所述活塞式压头的大小能够调换。

4. 根据权利要求 1 所述的热障涂层双轴强度测试方法,其特征在于:所述三个试件支撑部件 (3) 为刚性小球。

5. 根据权利要求 4 所述的热障涂层双轴强度测试方法,其特征在于:所述刚性小球的大小能够调换。

6. 根据权利要求 1 所述的热障涂层双轴强度测试方法,其特征在于:所述试件支撑部件 (3) 的支承点能够调节。

## 一种热障涂层双轴强度测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及热障涂层强度测试领域,特别涉及一种热障涂层双轴强度测试方法。

### 背景技术

[0002] 燃汽轮机、航空发动机是国防及国家生产建设的重要装备,提高其工作效率对于节约能源,保护环境等具有十分现实的意义。提高内部燃气温度成为目前提高其工作效率的最有效办法。热障涂层系统作为一个有效的热防护装置,其在涡轮叶片等热端部件上的使用可以大幅提高这些部件的承温幅值。由于该系统中的表层陶瓷的脆性很高,其抗拉强度是工程设计中重点关注的参数。在实际的服役环境中,涂层主要承受温度变化带来的热应力,该应力为双轴状态,因此测试其双轴强度能更好的反应出其实际性质。而在目前的强度测试中,基本采用单轴拉伸和三(四)点弯曲测试,这些测试只能模拟单轴应力状态,因而也只能测出单轴强度。因此,一套完备的涂层双轴强度测试方法对确定涂层的材料参数,设计性能更加优良的涂层结构具有十分重要的意义。

### 发明内容

[0003] 为了解决上述现有技术存在的问题,本发明的目的在于提供一种热障涂层双轴强度测试方法,该方法能够模拟涂层系统实际所受的双轴应力状态,测试其双轴强度。

[0004] 为了达到上述目的,本发明采用以下技术方案予以实现。

[0005] 一种热障涂层双轴强度测试方法,其特征在于:包括如下步骤:

[0006] 步骤1:首先测量热障涂层圆盘试件2各层的厚度 $t$ ,半径 $R$ ,同时获取各层材料的弹性模量 $E$ 以及泊松比 $\nu$ ;然后将三个试件支撑部件3置于热障涂层圆盘试件2底部陶瓷层一侧周边,且试件支撑部件3沿着热障涂层圆盘试件2的对称中心对称分布,测量支承点到热障涂层圆盘试件2对称中心的距离 $a$ ;

[0007] 步骤2:将活塞加载装置1的加载压头的加载点位于热障涂层圆盘试件2上部基底一侧表面且加载压头中心与热障涂层圆盘试件2中心重合,对热障涂层圆盘试件2进行加载,陶瓷层的表面中心区域将出现双轴应力状态,直至陶瓷层表面中心区域出现初始断裂时,记载此时的加载力 $P_{cr}$ ;

[0008] 步骤3:计算热障涂层圆盘试件2的双轴拉伸强度 $S$ ,计算公式如下式(1)

[0009]

$$S = \frac{P_{cr} E_1 Z_0}{8\pi(1-\nu_1)(1+\nu_{ave})D_0} \left\{ (1+\nu_{ave}) \left[ 1 + 2 \ln\left(\frac{a}{c}\right) \right] + (1-\nu_{ave}) \left[ \left(1 - \frac{c^2}{2a^2}\right) \frac{a^2}{R^2} \right] \right\} \quad (1)$$

[0010] 式(1)中: $P_{cr}$ ——断裂时压头的加载力

[0011]  $E_1$ ——陶瓷涂层的弹性模量

[0012]  $\nu_1$ ——陶瓷涂层的泊松比

[0013]  $a$ ——支承点到热障涂层圆盘试件对称中心的距离

[0014]  $c$ ——加载压头的半径

[0015] R——热障涂层圆盘试件的半径

[0016]  $v_{ave}$ ——圆盘试件的平均泊松比 计算公式如式(2)

$$[0017] \quad v_{ave} = \frac{1}{t_1 + t_2 + t_3} \sum_{i=1}^3 v_i t_i \quad (2)$$

[0018] 式(2)中： $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别表示陶瓷涂层，粘结层和基底的厚度式(1)中： $Z_0$ ——圆盘试件的中性面位置计算公式如式(3)

$$[0019] \quad Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 (E_i t_i / (1 - v_i^2)) (h_{i-1} + t_i / 2)}{\sum_{i=1}^3 E_i t_i / (1 - v_i^2)} \quad (3)$$

[0020] 式(1)中： $D_0$ ——圆盘试件的抗弯刚度计算公式如式(4)

$$[0021] \quad D_0 = \sum_{i=1}^3 \frac{E_i t_i}{1 - v_i^2} \left[ h_{i-1}^2 + h_{i-1} t_i + \frac{t_i^2}{3} - (h_{i-1} + \frac{t_i}{2}) Z_0 \right] \quad (4)$$

[0022] 式(3)和式(4)中： $h_i$ ——圆盘试件内层间界面位置计算公式如式(5)

$$[0023] \quad h_i = \sum_{j=1}^i t_j \quad (5)$$

[0024] 式(2)，(3)和式(4)中： $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  和  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$  分别表示陶瓷涂层，粘结层和基底的弹性模量和泊松比。

[0025] 所述活塞加载装置 1 为活塞式压头。

[0026] 所述活塞式压头的大小能够调换。

[0027] 所述三个试件支撑部件 3 为刚性小球。

[0028] 所述刚性小球的大小能够调换。

[0029] 所述试件支撑部件 3 的支承点能够调节。

[0030] 与现有的单轴拉伸或者三(四)点弯曲测试方法相比，本发明的热障涂层双轴强度测试方法中，通过活塞压头在测试件的基底一侧表面加载，可以在试件的陶瓷涂层一侧中心区域产生双轴应力状态，该状态与涂层系统实际所受的应力状态一致，从而可以测试出涂层的双轴强度，为工程设计提供更加可靠的设计参数。另一方面，该测试办法相比于单轴测试及弯曲测试，还有其他很多优点，比如测试件的加工更简便(圆形试件方便加工)，测试结果对测试件边缘区域的加工缺陷不敏感(圆形试件的独特优点)。因此，本发明的热障涂层双轴强度测试方法，可以简洁高效的测试涂层双轴强度，为更高效的涂层系统的设计与开发奠定了基础。

## 附图说明

[0031] 图 1 是本发明的一种热障涂层双轴强度测试方法的测试装置剖面示意图。

[0032] 图 2 是本发明的一种热障涂层双轴强度测试方法的测试装置俯视示意图。

## 具体实施方式

[0033] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步详细的描述。

[0034] 如图 1 和图 2 所示，本发明一种热障涂层双轴强度测试方法，包括如下步骤：

[0035] 步骤 1:首先测量热障涂层圆盘试件 2 各层的厚度  $t$ , 半径  $R$ , 同时获取各层材料的弹性模量  $E$  以及泊松比  $\nu$ ; 然后将三个试件支撑部件 3 置于热障涂层圆盘试件 2 底部陶瓷层一侧周边, 且试件支撑部件 3 沿着热障涂层圆盘试件 2 的对称中心对称分布, 测量支承点到热障涂层圆盘试件 2 对称中心的距离  $a$ ; 本实施例三个试件支撑部件 3 为三个相同的刚性小球。

[0036] 步骤 2:将活塞加载装置 1 的加载压头的加载点位于热障涂层圆盘试件 2 上部基底一侧表面且加载压头中心与热障涂层圆盘试件 2 中心重合, 对热障涂层圆盘试件 2 进行加载, 陶瓷层的表面中心区域将出现双轴应力状态, 直至陶瓷层表面中心区域出现初始断裂时, 记载此时的加载力  $P_{cr}$ ; 本实施例活塞加载装置 1 为活塞式压头。

[0037] 步骤 3:计算热障涂层圆盘试件 2 的双轴拉伸强度  $S$ , 计算公式如下式(1)

[0038]

$$S = \frac{P_{cr} E_1 Z_0}{8\pi(1-\nu_1)(1+\nu_{ave})D_0} \left\{ (1+\nu_{ave}) \left[ 1 + 2 \ln\left(\frac{a}{c}\right) \right] + (1-\nu_{ave}) \left[ \left(1 - \frac{c^2}{2a^2}\right) \frac{a^2}{R^2} \right] \right\} \quad (1)$$

[0039] 式(1)中: $P_{cr}$ ——断裂时压头的加载力

[0040]  $E_1$ ——陶瓷涂层的弹性模量

[0041]  $\nu_1$ ——陶瓷涂层的泊松比

[0042]  $a$ ——支承点到热障涂层圆盘试件对称中心的距离

[0043]  $c$ ——加载压头的半径

[0044]  $R$ ——热障涂层圆盘试件的半径

[0045]  $\nu_{ave}$ ——圆盘试件的平均泊松比计算公式如式(2)

$$\nu_{ave} = \frac{1}{t_1 + t_2 + t_3} \sum_{i=1}^3 \nu_i t_i \quad (2)$$

[0047] 式(2)中: $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别表示陶瓷涂层, 粘结层和基底的厚度

[0048] 式(1)中: $Z_0$ ——圆盘试件的中性面位置计算公式如式(3)

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 (E_i t_i / (1-\nu_i^2))(h_{i-1} + t_i / 2)}{\sum_{i=1}^3 E_i t_i / (1-\nu_i^2)} \quad (3)$$

[0050] 式(1)中: $D_0$ ——圆盘试件的抗弯刚度计算公式如式(4)

$$D_0 = \sum_{i=1}^3 \frac{E_i t_i}{1-\nu_i^2} \left[ h_{i-1}^2 + h_{i-1} t_i + \frac{t_i^2}{3} - (h_{i-1} + \frac{t_i}{2}) Z_0 \right] \quad (4)$$

[0052] 式(3)和式(4)中: $h_i$ ——圆盘试件内层间界面位置计算公式如式(5)

$$h_i = \sum_{j=1}^i t_j \quad (5)$$

[0054] 式(2), (3)和(4)中: $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  和  $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$  分别表示陶瓷涂层, 粘结层和基底的弹性模量和泊松比。

[0055] 下面结合一具体实例来说明本发明测试方法:

[0056] 在该测试实例中, 选取的各参数如下表所示(弹性模量单位为 GPa, 其他量单位为 mm):

[0057]

$E_1$	$E_2$	$E_3$	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	a	c	R
80	200	220	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	2.5	13	1.5	15

[0058] 如果在实验中所测的涂层破坏时压头所加载荷  $P_{cr}$  为 1413N, 则带入以上各参数值到公式(1), (2), (3), (4) 和(5), 可以换算出相应的强度值为 105MPa。该值即为所测得的涂层双轴强度值。

[0059] 尽管上面结合附图对本发明的优选实例进行了详细描述, 但本发明并不局限于上述的具体实施方式, 上述的实施方式仅仅是示意性的, 而不是限制性的。本领域的普通技术人员在本发明的启示下, 在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围内, 还可以做出很多形式的测试试件, 包括方形, 菱形等, 也可改变支承置装和加载装置类型。这些均在本发明的保护之内。

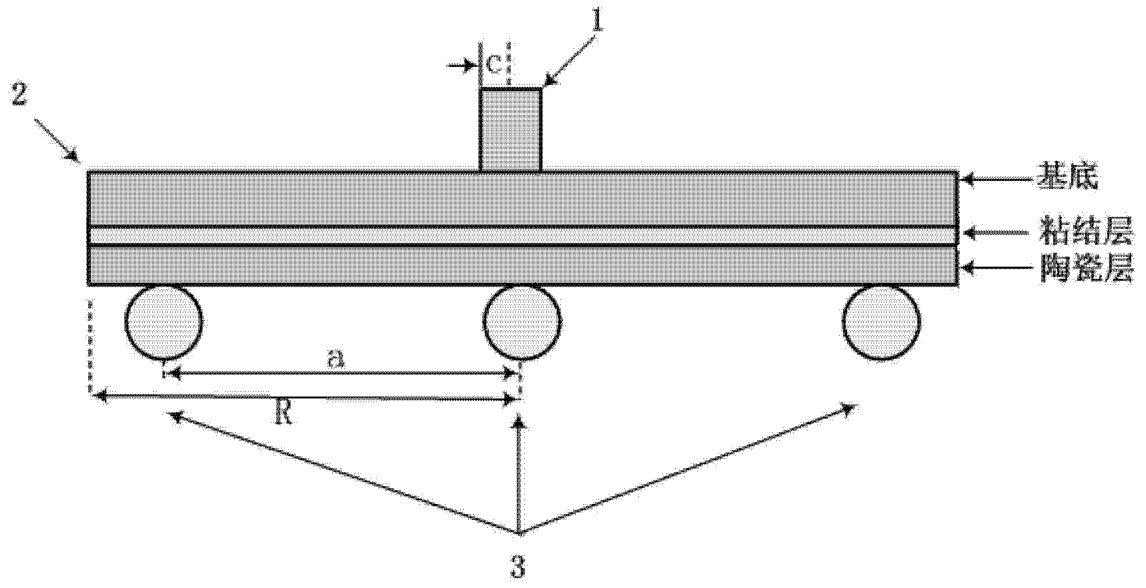


图 1

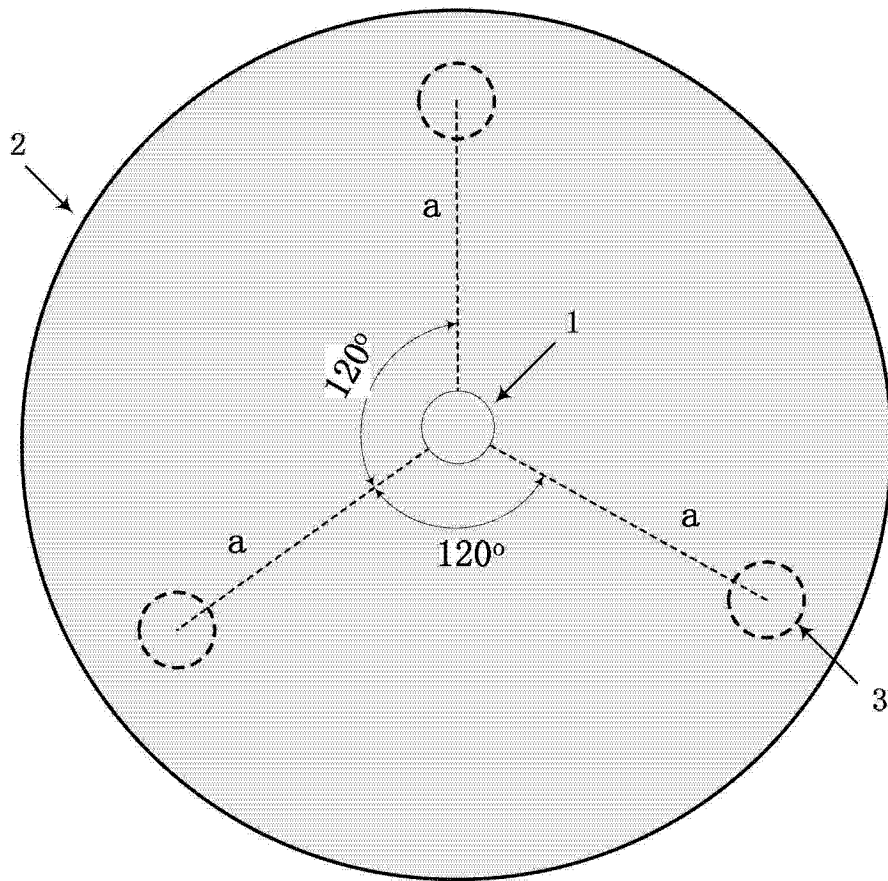


图 2