



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112063962 B

(45) 授权公告日 2021.05.14

(21) 申请号 202010964264.4

(22) 申请日 2020.09.15

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112063962 A

(43) 申请公布日 2020.12.11

(73) 专利权人 北京航空航天大学
地址 100191 北京市海淀区学院路37号

(72) 发明人 郭洪波 郭谦 何雯婷 彭徽

(74) 专利代理机构 北京航智知识产权代理事务
所(普通合伙) 11668
代理人 黄川 史继颖

(51) Int. Cl.
G23C 4/134 (2016.01)

审查员 杜艳艳

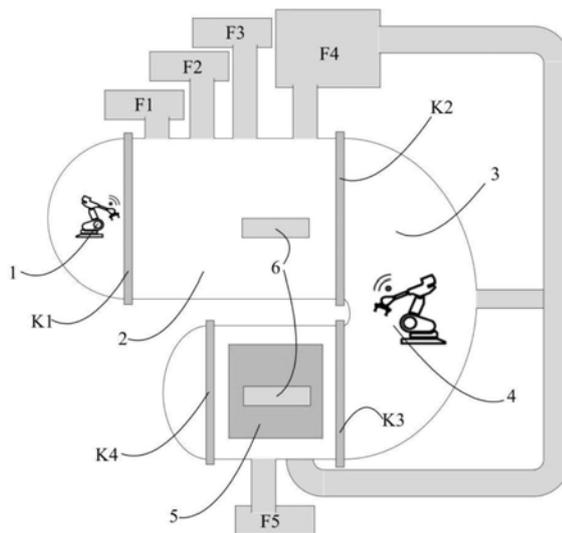
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

利用PS-PVD在复杂型面表面制备均匀涂层的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种利用等离子物理气相沉积(PS-PVD)在多个复杂型面工件表面一次制备均匀涂层的方法,通过本发明的技术方案,能够实现对待喷涂工件做到精确均匀预热,对于复杂型面各部位实现均匀加热,提高复杂型面工件表面涂层均一性;本发明能够在真空和惰性气体的保护作用下,工件基体在不发生变形和组织变化的情况下,允许较高的预热温度,既可以使涂层颗粒与基体的温差减小,减慢涂层的冷却速度,减少热应力产生,使涂层不易产生裂纹,又能使气相粒子喷射到基体表面时,充分扩散,形成排列整齐的柱状结构涂层;此外,还有利于增强涂层与基体间的结合力。



1. 一种利用PS-PVD在复杂型面表面制备均匀涂层的方法,其特征在于,在PS-PVD设备上安装多自由度工件预热系统,所述预热系统包括工件转运工作罐(3)、预热工作罐(5)、自动工件转动台(6),其中,

所述工件转运工作罐(3)为U形不锈钢罐体,与喷涂工作罐(2)通过真空法兰连接,工件转运操作臂(4)安装在所述工件转运工作罐(3)内部,用于转运工件;

所述预热工作罐(5)为不锈钢罐体,加热体为石墨加热体,与所述工件转运工作罐(3)通过真空法兰连接,用于预热待喷涂工件;

两个所述自动工件转动台(6)分别设置于所述喷涂工作罐(2)和所述预热工作罐(5)内部,用于夹持待喷涂工件;

喷枪及喷枪操作臂(1)安装在所述喷涂工作罐(2)内部,用于实现喷涂过程中喷涂工艺要求的走枪程序;

所述喷涂工作罐(2)、所述工件转运工作罐(3)和所述预热工作罐(5)为三个主体工作空间,分别通过独立的真空控制系统控制真空度;所述预热工作罐(5)为预予抽真空加热仓;

所述PS-PVD设备还包括辅助设备,其中,供电系统(F1)、供气及送粉系统(F2)和冷却系统(F3)通过真空法兰与所述喷涂工作罐(2)连接,所述供电系统(F1)为等离子喷枪提供大功率直流电;所述供气及送粉系统(F2)为喷涂系统提供产生等离子的气体 and 喷涂粉末,为预热系统提供保护气体;所述冷却系统(F3)为PS-PVD设备提供冷却水;所述真空及除尘系统(F4)通过真空法兰与所述喷涂工作罐(2)、所述工件转运工作罐(3)和所述预热工作罐(5)连接,用于抽真空和除尘;所述控制系统(F5)通过真空法兰与所述预热工作罐(5)连接,通过真空计分别控制所有罐体内的真空度,通过气体流量计分别控制所有罐体内的气体流量,通过红外温度计分别控制所有罐体内的温度;

所述PS-PVD设备还包括四个可开关真空密封门(K1、K2、K3、K4),其中,所述第一可开关真空密封门(K1)安装在所述喷涂工作罐(2)一端,用于维护等离子喷枪和所述喷枪及喷枪操作臂(1);所述第二可开关真空密封门(K2)安装在所述喷涂工作罐(2)和所述工件转运工作罐(3)之间;所述第三可开关真空密封门(K3)安装在所述工件转运工作罐(3)和所述预热工作罐(5)之间;所述第四可开关真空密封门(K4)安装在所述预热工作罐(5)的另一端;

具体地,所述方法包括以下步骤:

S1:设置喷涂参数、工件预热程序和工件转运程序;

S2:预热第一批工件;

S2-1:打开第四可开关真空密封门(K4),将第一批工件装入第一夹具中,然后固定到预热工作罐(5)内的自动工件转动台(6)上;

S2-2:关闭第四可开关真空密封门(K4),抽真空,使喷涂工作罐(2)、预热工作罐(5),工件转运工作罐(3)内的压力低于~10mbar;

S2-3:打开预热工作罐(5)加热体的开关,使用红外测温探头通过所述预热工作罐(5)上的观察窗探测工件的基体温度,将第一批工件加热至设定的预热温度,后保温;

S2-4:打开第三可开关真空密封门(K3)和第二可开关真空密封门(K2),利用工件转运操作臂(4)将加热到预热温度的第一批工件连同第一夹具转运到喷涂工作罐(2),关闭第二可开关真空密封门(K2)和第三可开关真空密封门(K3);

S3: 预热第二批工件;

S3-1: 打开预热工作罐 (5) 的气体开关, 向预热工作罐 (5) 内充入保护气体, 直至气压与大气压平衡;

S3-2: 打开第四可开关真空密封门 (K4), 将第二批工件装入第二夹具中, 然后固定到预热工作罐 (5) 内的自动工件转动台 (6) 上;

S3-3: 关闭第四可开关真空密封门 (K4), 抽真空, 使预热工作罐 (5) 内的压力低于~10mbar;

S3-4: 打开预热工作罐 (5) 加热体的开关, 使用红外测温探头通过所述预热工作罐 (5) 上的观察窗探测工件的基体温度, 将第二批工件加热至设定的预热温度, 后保温;

S4: 喷涂第一批工件;

S4-1: 核查喷涂参数, 打开等离子喷枪的工作气体阀门, 引弧, 待电弧稳定后, 逐步调整气体流量到设定的气体流量;

S4-2: 打开装有热障涂层粉末的供气及送粉系统 (F2) 的送粉器, 调整送粉率 2-20g/min, 调整喷涂距离 450~1400mm, 调整工件转速 0~30rpm, 调整等离子喷枪走枪运动形式, 调整完毕后, 开始沉积陶瓷涂层;

S4-3: 陶瓷涂层沉积结束后, 停止送粉; 逐步减小气体流量, 灭弧;

S4-4: 喷涂完成后, 打开第二可开关真空密封门 (K2) 和第三可开关真空密封门 (K3), 利用工件转运操作臂 (4) 将喷涂完成后的第一批工件转运到预热工作罐 (5), 将预热后的第二批工件转运到喷涂工作罐 (2);

S5: 重复步骤 S4, 对第二批工件进行喷涂;

S6: 取出喷涂完成后的第一批工件, 预热第三批工件;

S6-1: 打开预热工作罐 (5) 的气体开关, 向预热工作罐 (5) 内充入保护气体, 直至气压与大气压平衡;

S6-2: 打开第四可开关真空密封门 (K4), 取出喷涂好的第一批工件, 并将第三批工件装入第一夹具中, 然后固定到预热工作罐 (5) 内的自动工件转动台 (6) 上;

S7: 重复步骤 S3-3、步骤 S3-4 和步骤 S4, 直到完成全部工件喷涂。

2. 根据权利要求 1 所述的一种利用 PS-PVD 在复杂型面表面制备均匀涂层的方法, 其特征在于, 所述预热工作罐 (5) 的加热体为石墨加热体, 加热温度不高于 1300°C。

3. 根据权利要求 1 或 2 所述的一种利用 PS-PVD 在复杂型面表面制备均匀涂层的方法, 其特征在于, 所述步骤 S4-1 中喷涂气体的流量为 Ar 20-40SLPM, He 40-70SLPM。

4. 根据权利要求 1 或 2 所述的一种利用 PS-PVD 在复杂型面表面制备均匀涂层的方法, 其特征在于, 所述步骤 S4-2 中的枪体运动形式为固定不动, 上下扫动, 左右扫动, 蛇形扫送或模拟叶型扫动。

5. 根据权利要求 1 或 2 所述的一种利用 PS-PVD 在复杂型面表面制备均匀涂层的方法, 其特征在于, 所述保护气体为 Ar。

利用PS-PVD在复杂型面表面制备均匀涂层的方法

技术领域

[0001] 本发明属于涂层制备技术领域,尤其涉及一种利用等离子物理气相沉积(PS-PVD)在复杂型面表面制备均匀涂层的方法。

背景技术

[0002] 近年来,航空航天技术不断快速发展,要求高性能燃气涡轮发动机具有更高的推重比。因此,对发动机内部的叶片也提出新的、更高的要求。推重比为10的航空发动机的涡轮前进口温度为1850~1988K,推重比为12-15的一级航空发动机的涡轮前设计进口温度为2000~2100K,而推重比为15-20的一级航空发动机的涡轮前设计进口温度将更高,预计可达到2100~2200K。即使采用最先进的气膜冷却技术,涡轮叶片服役时其表面的温度也将远远超过叶片所用高温合金材料的极限使用温度。此外,气膜冷却方法在技术上已经日臻完善,如果通过增大冷却气体的气流量来进一步提高冷却效果,则会牺牲发动机的部分性能、同时造成能源的浪费。在这种情况下,热障涂层技术应运而生。

[0003] 热障涂层,也称TBCs,将具有耐高温、低热导、抗腐蚀等性能的陶瓷材料以涂层的形式沉积在金属基体表面,以此提高其使用温度及高温抗氧化能力,延长涡轮发动机叶片的使用寿命,提高发动机效率的一种表面防护技术,也是先进燃气涡轮发动机核心热端部件的关键技术。目前热障涂层的制备方法主要有三种:大气等离子喷涂(APS)、电子束物理气相沉积(EB-PVD)、等离子物理气相沉积技术(PS-PVD)。

[0004] 等离子物理气相沉积技术(Plasma Spray-Physical Vapor Deposition,PS-PVD)是近些年逐渐发展起来的先进涂层制备技术。PS-PVD使用了大功率(~180kW)的等离子喷枪,在超低的工作压力(0.5~2mbar)下进行喷涂。等离子射流形态和特性均发生了很大变化。等离子气体在电极枪内被电弧加热分解成高能高压的等离子体,当其通过喷嘴进入真空室后剧烈膨胀形成超音速等离子射流。等离子射流变粗加长,长度能够超过2m,直径可以增加至200~400mm。

[0005] 等离子物理气相沉积技术采用大功率等离子喷枪产生的高能等离子射流不仅仅可以熔化被喷涂颗粒,还可以将其气化,被熔化/气化的粒子随着等离子射流以高速到达基体表面并沉积,从而实现了气液固多相复合沉积,也实现了涂层微观组织结构的控制。等离子物理气相沉积技术结合了等离子喷涂(PS)和气相沉积(PVD)的技术优势,既有PS技术沉积速度快等优点,又可以实现气相沉积。最主要的是,PS-PVD可以实现非视线区域涂层的沉积。等离子射流可以绕射到几何形状复杂工件的阴影区域并完成涂层的均匀沉积。

[0006] PS-PVD涂层制备技术中基体温度对涂层结构有重要影响。纯气相沉积时涂层组织受基体温度影响最大,随着基体温度的变化,涂层呈现出不同的组织特征。温度较低(小于500℃)时,涂层沉积效率很低,涂层和基体的结合强度很低。温度在700℃-900℃时阴影效应起主要作用,生长成为粗大的锥状晶,锥形组织顶部呈现圆拱形;温度较高(大于1200℃)时,表面扩散起主要作用,形成具择优取向的柱状晶,柱与柱之间存在一定的间隙,柱间孔隙可以沿基体表面一直贯穿到涂层表面。

[0007] 现有涂层制备技术EB-PVD,APS,LPPS,HVOF等在制备涂层时主要采用高能束射流对工件进行预热,以达到喷涂要求的基体温度,并在预热过程中生成一层热生成物保护层。但是PS-PVD设备等离子焰流对大工件的预热很难做到均匀。在工件夹持端温度较低,达不到喷涂要求,在射流中间工件容易局部过热导致工件局部熔化,另外利用等离子焰流预热很难实现多工件同时预热并喷涂,生产效率低下。这主要有两方面原因一方面是焰流有效加热范围有限,PS-PVD等离子射流在喷嘴出口附近的温度最高,可以达到~1550K,但随喷涂距离增加,等离子射流温度不断降低,另外在等离子焰流的径向方向温度分布不均匀,等离子射流中心温度很高,射流边缘温度较低。另一方面是PS-PVD虽然有绕镀优势,但是由于复杂型面工件不同部位的遮挡,导致等离子射流是对非视线区域加热能力有限。

[0008] 因此,按照现有技术的PS-PVD工艺,在多个复杂型面工件一次沉积涂层时由于预热不均匀导致不同部位的涂层的均匀性很差。为提高PS-PVD在复杂型面上制备涂层的厚度均匀性、微观结构统一性和使用寿命一致性,亟需一种适合PS-PVD设备的在多个复杂型面工件表面一次制备均匀涂层的方法。

发明内容

[0009] 为了解决上述已有技术存在的不足,本发明提出一种利用等离子物理气相沉积(PS-PVD)在多个复杂型面工件表面一次制备均匀涂层的方法,本发明的具体技术方案如下:

[0010] 一种利用PS-PVD在复杂型面表面制备均匀涂层的方法,在PS-PVD设备上安装多自由度工件预热系统,所述预热系统包括工件转运工作罐、预热工作罐、自动工件转动台,其中,

[0011] 所述工件转运工作罐为不锈钢罐体,与喷涂工作罐通过真空法兰连接,工件转运操作臂安装在所述工件转运工作罐内部,用于转运工件;

[0012] 所述预热工作罐为不锈钢罐体,加热体为石墨加热体,与所述工件转运工作罐通过真空法兰连接,用于预热待喷涂工件;

[0013] 两个所述自动工件转动台分别设置于所述喷涂工作罐和所述预热工作罐内部,用于夹持待喷涂工件;

[0014] 喷枪及喷枪操作臂安装在所述喷涂工作罐内部,用于实现喷涂过程中喷涂工艺要求的走枪程序;

[0015] 所述喷涂工作罐、所述工件转运工作罐和所述预热工作罐为三个主体工作空间,分别通过独立的真空控制系统控制真空度;所述预热工作罐为预予抽真空加热仓;

[0016] 所述PS-PVD设备还包括辅助设备,其中,供电系统、供气及送粉系统和冷却系统通过真空法兰与所述喷涂工作罐连接,所述供电系统为等离子喷枪提供大功率直流电;所述供气及送粉系统为喷涂系统提供产生等离子的气体 and 喷涂粉末,为预热系统提供保护气体;所述冷却系统为PS-PVD设备提供冷却水;所述真空及除尘系统通过真空法兰与所述喷涂工作罐、所述工件转运工作罐和所述预热工作罐连接,用于抽真空和除尘;所述控制系统通过真空法兰与所述预热工作罐连接,通过真空计分别控制所有罐体内的真空度,通过气体流量计分别控制所有罐体内的气体流量,通过红外温度计分别控制所有罐体内的温度;

[0017] 所述PS-PVD设备还包括四个可开关真空密封门,其中,所述第一可开关真空密封

门安装在所述喷涂工作罐一端,用于维护等离子喷枪和所述喷枪及喷枪操作臂;所述第二可开关真空密封门安装在所述喷涂工作罐和所述工件转运工作罐之间;所述第三可开关真空密封门安装在所述工件转运工作罐和所述预热工作罐之间;所述第四可开关真空密封门安装在所述预热工作罐的另一端;

[0018] 具体地,所述方法包括以下步骤:

[0019] S1:设置喷涂参数、工件预热程序和工件转运程序;

[0020] S2:预热第一批工件;

[0021] S2-1:打开第四可开关真空密封门,将第一批工件装入第一夹具中,然后固定到预热工作罐内的自动工件转动台上;

[0022] S2-2:关闭第四可开关真空密封门,抽真空,使喷涂工作罐、预热工作罐,工件转运工作罐内的压力低于 $\sim 10\text{mbar}$;

[0023] S2-3:打开预热工作罐加热体的开关,使用红外测温探头通过所述预热工作罐上的观察窗探测工件的基体温度,将第一批工件加热至设定的预热温度,后保温;

[0024] S2-4:打开第三可开关真空密封门和第二可开关真空密封门,利用工件转运操作臂将加热到预热温度的第一批工件连同第一夹具转运到喷涂工作罐,关闭第二可开关真空密封门和第三可开关真空密封门;

[0025] S3:预热第二批工件;

[0026] S3-1:打开预热工作罐的气体开关,向预热工作罐内充入保护气体,直至气压与大气压平衡;

[0027] S3-2:打开第四可开关真空密封门,将第二批工件装入第二夹具中,然后固定到预热工作罐内的自动工件转动台上;

[0028] S3-3:关闭第四可开关真空密封门,抽真空,使预热工作罐内的压力低于 $\sim 10\text{mbar}$;

[0029] S3-4:打开预热工作罐加热体的开关,使用红外测温探头通过所述预热工作罐上的观察窗探测工件的基体温度,将第二批工件加热至设定的预热温度,后保温;

[0030] S4:喷涂第一批工件;

[0031] S4-1:核查喷涂参数,打开等离子喷枪的工作气体阀门,引弧,待电弧稳定后,逐步调整气体流量到设定的气体流量;

[0032] S4-2:打开装有热障涂层粉末的供气及送粉系统的送粉器,调整送粉率 $2-20\text{g}/\text{min}$,调整喷涂距离 $450\sim 1400\text{mm}$,调整工件转速 $0\sim 30\text{rpm}$,调整等离子喷枪走枪运动形式,调整完毕后,开始沉积陶瓷涂层;

[0033] S4-3:陶瓷涂层沉积结束后,停止送粉;逐步减小气体流量,灭弧;

[0034] S4-4:喷涂完成后,打开第二可开关真空密封门和第三可开关真空密封门,利用工件转运操作臂将喷涂完成后的第一批工件转运到预热工作罐,将预热后的第二批工件转运到喷涂工作罐;

[0035] S5:重复步骤S4,对第二批工件进行喷涂;

[0036] S6:取出喷涂完成后的第一批工件,预热第三批工件;

[0037] S6-1:打开预热工作罐的气体开关,向预热工作罐内充入保护气体,直至气压与大气压平衡;

- [0038] S6-2:打开第四可开关真空密封门,取出喷涂好的第一批工件,并将第三批工件装入第一夹具中,然后固定到预热工作罐内的自动工件转动台上;
- [0039] S7:重复步骤S3-3、步骤S3-4和步骤S4,直到完成全部工件喷涂。
- [0040] 进一步地,所述预热工作罐的加热体为石墨加热体,加热温度不高于1300℃。
- [0041] 进一步地,所述步骤S4-1中喷涂气体的流量为Ar 20-40SLPM,He 40-70SLPM;
- [0042] 进一步地,所述步骤S4-2中送粉率为2-20g/min,喷涂距离为450~1400mm,工件转速为0~30rpm。
- [0043] 进一步地,所述步骤S4-2中的枪体运动形式为固定不动,上下扫动,左右扫动,蛇形扫送或模拟叶型扫动。
- [0044] 进一步地,所述保护气体为Ar。
- [0045] 本发明的有益效果在于:
- [0046] 1.本发明能够实现对待喷涂工件做到精确均匀预热,对于复杂型面各部位实现均匀加热,提高复杂型面工件表面涂层均一性。
- [0047] 2.本发明能够在真空和惰性气体的保护作用下,在工件基体在不发生变形和组织变化的情况下,允许较高的预热温度,既可以使涂层颗粒与基体的温差减小,减慢涂层的冷却速度,减少热应力产生,使涂层不易产生裂纹,又能使气相粒子喷射到基体表面时,充分扩散,形成排列整齐的柱状结构涂层;此外,还有利于增强涂层与基体间的结合力。
- [0048] 3.本发明中的预热系统能够与传统低压等离子喷涂技术协同使用,实现预热工件和喷涂工件同时进行,可实现流水化作业喷涂和多工件同时喷涂,可以提高生产效率,缩短生产周期。
- [0049] 4.本发明中的预热系统能够实现在真空环境下转运喷涂好或预热好的工件,避免重复充气开仓,降低生产成本。

附图说明

[0050] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,通过参考附图会更加清楚的理解本发明的特征和优点,附图是示意性的而不应该理解为对本发明进行任何限制,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,可以根据这些附图获得其他的附图。其中:

[0051] 图1为本发明的包含多自由度工件预热系统的PS-PVD示意图;

[0052] 图2(a)为本发明实施案例1中工件使用焰流预热后的局部图;

[0053] 图2(b)为本发明实施案例1中工件使用多自由度工件预热系统后的局部图。

[0054] 图3(a)为本发明实施案例2中工件涂层厚度分布截面位置;

[0055] 图3(b)为本发明实施案例2中各型面测厚位置示意图;

[0056] 图4(a)-图4(g)为本发明实施案例3中与图4(h)中位置1-7相对应的工件截面涂层微观照片。

[0057] 附图标号说明:

[0058] 1-喷枪及喷枪操作臂;2-喷涂工作罐;3-工件转运工作罐;4-工件转运操作臂;5-预热工作罐;6-自动工件转动台;F1-供电系统;F2-供气及送粉系统;F3-冷却系统;F4-真空及除尘系统;F5-控制系统;K1-第一可开关真空密封门;K2-第二可开关真空密封门;K3-第

三可开关真空密封门;K4-第四可开关真空密封门。

具体实施方式

[0059] 为了能够更清楚地理解本发明的上述目的、特征和优点,下面结合附图和具体实施方式对本发明进行进一步的详细描述。需要说明的是,在不冲突的情况下,本发明的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0060] 在下面的描述中阐述了很多具体细节以便于充分理解本发明,但是,本发明还可以采用其他不同于在此描述的方式来实施,因此,本发明的保护范围并不受下面公开的具体实施例的限制。

[0061] 如图1所示,在PS-PVD设备上安装多自由度工件预热系统,预热系统包括工件转运工作罐3、预热工作罐5、自动工件转动台6,其中,

[0062] 工件转运工作罐3为不锈钢罐体,与喷涂工作罐2通过真空法兰连接,工件转运操作臂4安装在工件转运工作罐3内部,用于转运工件;

[0063] 预热工作罐5为不锈钢罐体,加热体为石墨加热体,与工件转运工作罐3通过真空法兰连接,用于预热待喷涂工件;

[0064] 两个自动工件转动台6分别设置于喷涂工作罐2和预热工作罐5内部,用于夹持待喷涂工件;

[0065] 喷枪及喷枪操作臂1安装在喷涂工作罐2内部,用于实现喷涂过程中喷涂工艺要求的走枪程序;

[0066] 喷涂工作罐2、工件转运工作罐3和预热工作罐5为三个主体工作空间,分别通过独立的真空控制系统控制真空度;预热工作罐5为预予抽真空加热仓;

[0067] PS-PVD设备还包括辅助设备,其中,供电系统F1、供气及送粉系统F2和冷却系统F3通过真空法兰与喷涂工作罐2连接,供电系统F1为等离子喷枪提供大功率直流电;供气及送粉系统F2为喷涂系统提供产生等离子的气体 and 喷涂粉末,为预热系统提供保护气体;冷却系统F3为PS-PVD设备提供冷却水;真空及除尘系统F4通过真空法兰与喷涂工作罐2、工件转运工作罐3和预热工作罐5连接,用于抽真空和除尘;控制系统F5通过真空法兰与预热工作罐5连接,通过真空计分别控制所有罐体内的真空度,通过气体流量计分别控制所有罐体内的气体流量,通过红外温度计分别控制所有罐体内的温度;

[0068] PS-PVD设备还包括四个可开关真空密封门K1、K2、K3、K4,其中,第一可开关真空密封门K1安装在喷涂工作罐2一端,用于维护等离子喷枪和喷枪及喷枪操作臂1;第二可开关真空密封门K2安装在喷涂工作罐2和工件转运工作罐3之间;第三可开关真空密封门K3安装在工件转运工作罐3和预热工作罐5之间;第四可开关真空密封门K4安装在预热工作罐5的另一端。

[0069] 为了方便理解本发明的上述技术方案,以下通过具体实施例对本发明的上述技术方案进行详细说明。

[0070] 实施例1

[0071] 某型号地面燃机双联体叶片使用PS-PVD表面YSZ陶瓷层喷涂,分别使用焰流加热和本发明的多自由度工件预热系统对叶片进行喷涂前预热。如图2(a)和图2(b)所示,使用焰流预热15min后,叶片上下缘板与叶身中间位置温度相差较大,温度差达到50-100℃,预

热后叶身排气边出现局部过热的情况;使用多自由度工件预热系统喷涂后叶片排气边缘完好,排气孔未变形。

[0072] 由此可见,本发明能够实现对待喷涂工件做到精确均匀预热,对于复杂型面各部位实现均匀加热。

[0073] 实施例2

[0074] 某型号航空发动机双联体叶片使用PS-PVD表面YSZ陶瓷层喷涂,分别使用焰流加热和多自由度工件预热系统对叶片进行喷涂前预热。如图3(a)和图3(b)所示,在叶身位置取3个截面,M截面为叶片中间截面,P截面为距M截面向上14mm处的截面,N截面为距N截面向下14mm处截面,每个截面位置选取7个点,使用涡流测厚仪测量各点的的涂层厚度,每个点测3次取平均值,分析各截面的不同型面处涂层厚度。

[0075] 表1为使用焰流加热叶片不同型面处热障涂层厚度,由表中数据可知双联体第一个叶片P截面陶瓷层厚度均值约为80 μm ,M截面陶瓷层厚度均值约为114 μm ,N截面陶瓷层厚度均值约为78 μm ,双联体第二个叶片P截面陶瓷层厚度均值约为78 μm ,M截面陶瓷层厚度均值约为117 μm ,N截面陶瓷层厚度均值约为79 μm 。使用焰流加热进行预热的叶片喷涂后叶片上涂层厚度不均匀,叶片中间涂层厚,靠近上下缘板的地方涂层厚度薄,厚度相差30-40 μm 。

[0076] 表2为使用多自由度工件预热系统叶片不同型面处热障涂层厚度,由表中数据可知使用多自由度工件预热系统进行预热的叶片喷涂后叶片上涂层厚度不均匀情况明显改善,涂层厚度均匀性提高。

[0077] 表1使用焰流加热叶片不同型面处热障涂层厚度

	P1	P1-1	P1-2	P1-3	P1-4	P1-5	P1-6	P1-7 遮蔽区	均值
	陶瓷层 (μm)	86	79	84	90	82	75	61	80
	M1	M1-1	M1-2	M1-3	M1-4	M1-5	M1-6	M1-7	均值
	陶瓷层 (μm)	125	110	109	103	123	127	104	114
	N1	N1-1	N1-2	N1-3	N1-4	N1-5	N1-6	N1-7	均值
	陶瓷层 (μm)	76	82	80	93	85	70	60	78
[0078]	P2	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4 遮蔽区	P2-5	P2-6	P2-7	均值
	陶瓷层 (μm)	90	76	74	56	80	84	86	78
	M2	M2-1	M2-2	M2-3	M2-4	M2-5	M2-6	M2-7	均值
	陶瓷层 (μm)	130	118	113	96	120	115	128	117
	N2	N2-1	N2-2	N2-3	N2-4	N2-5	N2-6	N2-7	均值
	陶瓷层 (μm)	89	74	72	60	82	84	90	79

[0079] 表2使用多自由度工件预热系统叶片不同型面处热障涂层厚度

	P1	P1-1	P1-2	P1-3	P1-4	P1-5	P1-6	P1-7 遮蔽区	均值
	陶瓷层 (μm)	107	100	98	105	98	97	80	98
	M1	M1-1	M1-2	M1-3	M1-4	M1-5	M1-6	M1-7	均值
	陶瓷层 (μm)	128	111	109	103	123	127	114	116
	N1	N1-1	N1-2	N1-3	N1-4	N1-5	N1-6	N1-7	均值
	陶瓷层 (μm)	110	110	109	100	92	94	84	100
[0080]	P2	P2-1	P2-2	P2-3	P2-4 遮蔽区	P2-5	P2-6	P2-7	均值
	陶瓷层 (μm)	106	100	97	90	100	107	110	101
	M2	M2-1	M2-2	M2-3	M2-4	M2-5	M2-6	M2-7	均值
	陶瓷层 (μm)	121	108	113	116	129	123	127	120
	N2	N2-1	N2-2	N2-3	N2-4	N2-5	N2-6	N2-7	均值
	陶瓷层 (μm)	103	94	92	81	108	107	110	99

[0081] 实施例3

[0082] 某型号航空发动机单联体叶片使用PS-PVD表面YSZ陶瓷层喷涂。具体步骤为：

[0083] S1：设置喷涂参数，具体为喷枪电流2000A、喷枪工作气体流量 (Ar：30SLPM；He：60SLPM)、送粉速度 (5g/min)、送粉载气 (10SLPM)、喷涂距离 (1200mm)、走枪程序)；设置工件预热程序 (预热温度800℃，预热时间5min)，设置工件转运程序；

[0084] S2：打开第四可开关真空密封门K4，将叶片装入夹具中，然后固定到预热工作罐5内的自动工件转动台6上；

[0085] S3：关闭第四可开关真空密封门K4，抽真空，使喷涂工作罐2内的压力为2mbar、预热工作罐5内的压力1mbar，工件转运工作罐3内的压力为0.08mbar；

[0086] S4：打开预热工作罐5的加热体的开关，使用红外测温探头通过预热工作罐5上的观察窗探测工件基体温度，将第一批工件加热至指定预热温度800℃，后保温5min；

[0087] S5：打开第二可开关真空密封门K2和第三可开关真空密封门K3，利用工件转运操作臂4将加热到预热温度的第一批工件转运到喷涂工作罐2，关闭第二可开关真空密封门K2和第三可开关真空密封门K3；

[0088] S6：核查喷涂参数，打开工作气体阀门，引弧，待电弧稳定后，逐步调整气体流量到指定气体流量，Ar：30SLPM，He：60SLPM；

[0089] 打开装有热障涂层粉末的供气及送粉系统F2的送粉器，调整送粉率5g/min，调整喷涂距离1200mm，调整等离子喷枪走枪运动形式，本实施例中枪体固定在叶片中央位置不

动,调整完毕后,开始沉积陶瓷涂层15min;

[0090] S7:陶瓷涂层沉积结束后,停止送粉;逐步减小气体流量,灭弧;

[0091] S8:喷涂完成后,打开K2和K3门,利用工件转运操作臂4将喷涂完成后的叶片转运到预热工作罐5。

[0092] S9:打开预热工作罐5的气体开关,向罐内充入保护气体Ar,直至气压与大气压平衡,打开K4门,取出叶片。

[0093] 由图4(a)-图4(g)所示的叶片截面不同型面处的涂层微观结构可知,喷涂后叶片不同型面处陶瓷层均为典型准柱状晶结构,陶瓷层厚度相近,陶瓷层与粘结层结合完好,可在复杂型面工件表面制备出结构均匀的涂层。喷涂后叶片不同型面处陶瓷层与粘结层结合较好,结合强度大于60Mpa。喷涂后涂层寿命较好,1100℃热震寿命大于2000次(5min加热,5min冷却)。

[0094] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

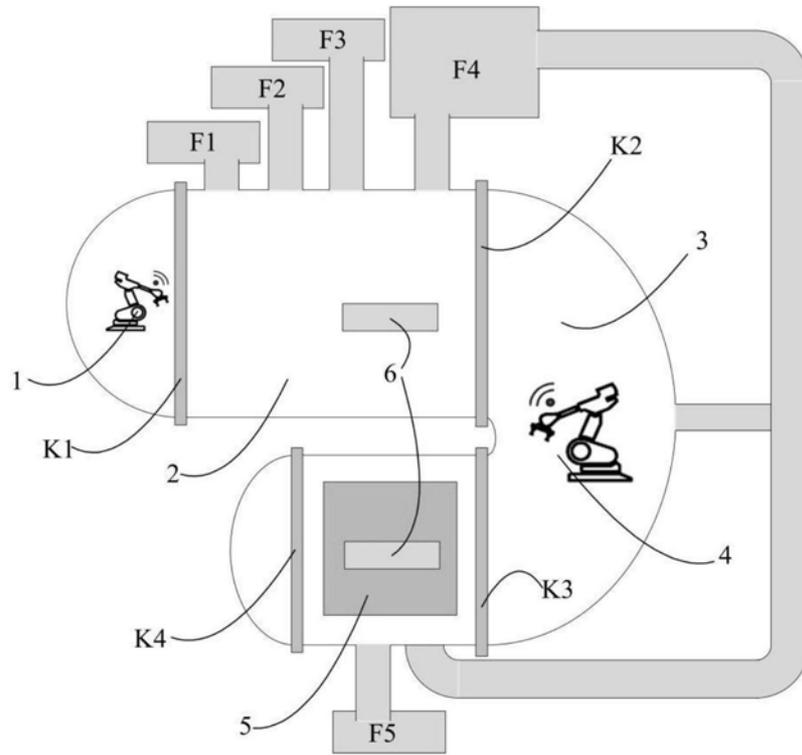
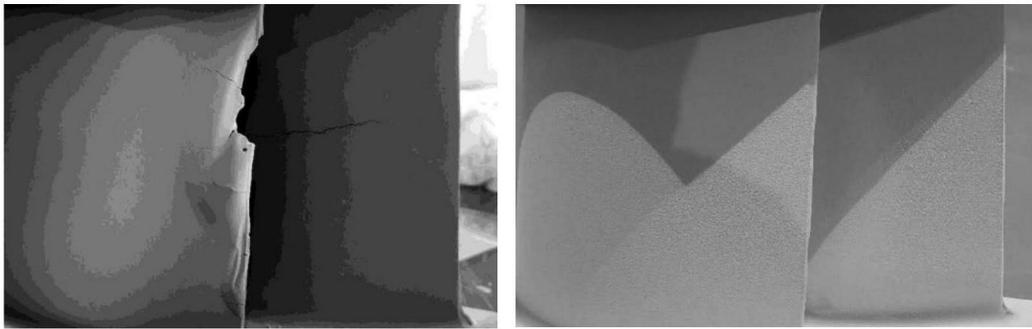


图1



(a)

(b)

图2

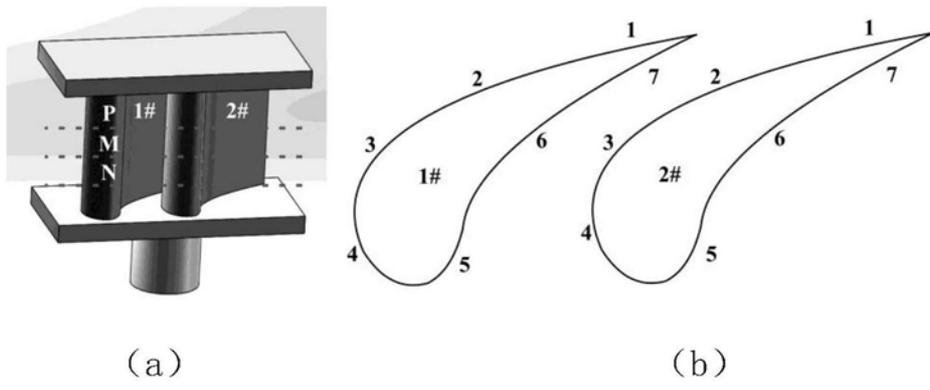


图3

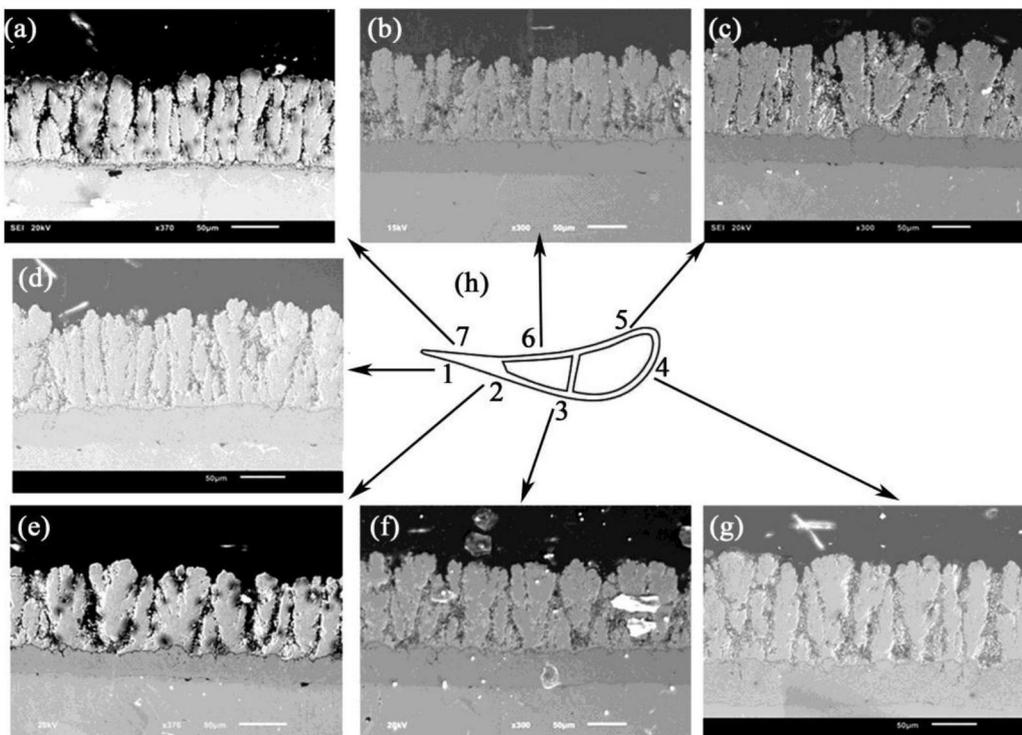


图4