



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109682702 B

(45)授权公告日 2020.03.20

(21)申请号 201811505735.4

G01N 3/06(2006.01)

(22)申请日 2018.12.10

审查员 何孟珂

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 109682702 A

(43)申请公布日 2019.04.26

(73)专利权人 湘潭大学

地址 411100 湖南省湘潭市雨湖区羊牯塘  
27号

(72)发明人 杨丽 周益春 刘志远 罗毅  
朱旺

(74)专利代理机构 北京中政联科专利代理事务  
所(普通合伙) 11489

代理人 陈超

(51)Int.Cl.

G01N 3/56(2006.01)

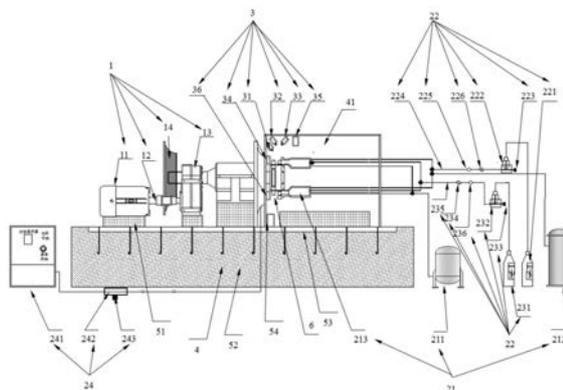
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

## (54)发明名称

一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统

## (57)摘要

一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,包括工作状态模拟设备、服役环境模拟设备和检测设备;工作状态模拟设备设置于待测涡轮叶片热障涂层一侧,与待测涡轮叶片热障涂层连接,用于模拟待测涡轮叶片热障涂层的高速旋转工作状态;服役环境模拟设备设置于待测涡轮叶片热障涂层另一侧,用于模拟待测涡轮叶片热障涂层在高速旋转工作状态下的服役环境;检测设备,用于对待测涡轮叶片热障涂层在所述服役环境中高速旋转时产生的损伤进行检测。通过本发明提供的实验测试系统对待测涡轮叶片热障涂层进行工作状态模拟和服役环境模拟,以便对涡轮叶片热障涂层失效过程中关键损伤参量进行实时检测,对实现热障涂层的工艺优化与自主设计提供技术支持。



1. 一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,包括:工作状态模拟设备(1)、服役环境模拟设备(2)、检测设备(3)和多种待测涡轮叶片热障涂层的试验模型;

所述工作状态模拟设备(1)设置于待测涡轮叶片热障涂层一侧,与所述待测涡轮叶片热障涂层连接,用于模拟所述待测涡轮叶片热障涂层的高速旋转工作状态;

所述服役环境模拟设备(2)设置于所述待测涡轮叶片热障涂层另一侧,用于模拟所述待测涡轮叶片热障涂层在高速旋转工作状态下的服役环境;

所述检测设备(3),用于对待测涡轮叶片热障涂层在所述服役环境中高速旋转时产生的损伤进行检测;

所述工作状态模拟设备(1)包括第一电机(11)、低速轴(12)、齿轮箱(13)、高速轴和负载压气机(14);

所述第一电机(11)与所述低速轴(12)一端连接,带动所述低速轴(12)做转动运动;

所述齿轮箱(13)内设置有相互啮合的第一齿轮和第二齿轮;所述第一齿轮的半径大于所述第二齿轮的半径;

所述低速轴(12)另一端与所述第一齿轮连接,带动所述第一齿轮转动,所述第一齿轮带动所述第二齿轮做转动;

所述第二齿轮与所述高速轴一端连接,带动所述高速轴转动;

所述高速轴另一端连接所述待测涡轮叶片热障涂层,带动所述待测涡轮叶片热障涂层高速旋转。

所述负载压气机(14)与所述第二齿轮连接,用于吸收所述待测涡轮叶片热障涂层高速旋转过程中产生的能量,使所述待测涡轮叶片热障涂层平稳转动;

所述试验模型包括:涡轮盘、工作叶片热障涂层(62)和扰流器(65),所述涡轮盘的边沿设置有所述工作叶片热障涂层(62);所述扰流器(65)与所述涡轮盘相互平行且间隔设置,所述扰流器(65)安装在所述第一电机(11)的输出端上。

2. 根据权利要求1所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述服役环境模拟设备(2)包括:

高温热冲击加载装置(21),用于提供高温工况服役的模拟环境;

冲蚀工况加载装置(22),用于提供冲蚀工况服役的模拟环境;

腐蚀工况加载装置(23),用于提供腐蚀工况服役的模拟环境;

冷却工况加载装置(24),用于提供对所述待测涡轮叶片热障涂层进行冷却的温度梯度工况服役的模拟环境。

3. 根据权利要求2所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述高温热冲击加载装置(21)包括可燃液体供给部件(211)、助燃气体供给部件(212)和喷射部件(213);

所述可燃液体供给部件(211)与所述喷射部件(213)的输入端连通,将可燃液体输入所述喷射部件(213);

所述助燃气体供给部件(212)与所述喷射部件(213)的输入端连通,将助燃气体输入所述喷射部件(213);

所述助燃气体为所述可燃液体助燃;

所述喷射部件(213)的输出端对准所述待测涡轮叶片热障涂层,将燃烧后的高温气体

喷射到所述待测涡轮叶片热障涂层。

4. 根据权利要求3所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述冲蚀工况加载装置(22)包括冲蚀颗粒存储器(221)、第一精密送粉机(222)和第二电机(223);

所述冲蚀颗粒存储器(221)储存冲蚀颗粒;

所述第一精密送粉机(222)分别与所述冲蚀颗粒存储器(221)和所述喷射部件(213)连通,将所述冲蚀颗粒输送至所述喷射部件(213),与所述高温气体混合;

所述第二电机(223)与所述第一精密送粉机(222)电连接,给所述第一精密送粉机(222)供电;

所述喷射部件(213)的输出端对准所述待测涡轮叶片热障涂层,将所述混合后的高温气体喷射到所述待测涡轮叶片热障涂层。

5. 根据权利要求4所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述冲蚀工况加载装置(22)还包括第一管道(224)、第一流量控制器(225)和第一调压阀(226);

所述第一精密送粉机(222)与所述喷射部件(213)通过所述第一管道(224)连通;

所述第一管道(224)上设置有第一流量控制器(225)和第一调压阀(226),分别控制所述冲蚀颗粒传输的流量和压力。

6. 根据权利要求3所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述腐蚀工况加载装置(23)包括腐蚀颗粒存储器(231)、第二精密送粉机(232)和第三电机(233);

所述腐蚀颗粒存储器(231)储存腐蚀颗粒;

所述第二精密送粉机(232)分别与所述腐蚀颗粒存储器(231)和所述喷射部件(213)连通,将所述腐蚀颗粒输送至所述喷射部件(213),与所述高温气体混合;

所述第三电机(233)与所述第二精密送粉机(232)电连接,给所述第二精密送粉机(232)供电;

所述喷射部件(213)的输出端对准所述待测涡轮叶片热障涂层,将所述混合后的高温气体喷射到所述待测涡轮叶片热障涂层。

7. 根据权利要求6所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述腐蚀工况加载装置(23)还包括第二管道(234)、第二流量控制器(235)和第二调压阀(236);

所述第二精密送粉机(232)与所述喷射部件(213)通过所述第二管道(234)连通;

所述第二管道(234)上设置有第二流量控制器(235)和第二调压阀(236),分别控制所述腐蚀颗粒传输的流量和压力。

8. 根据权利要求2所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述冷却工况加载装置(24)包括空气压缩机(241)、空气加热机(242)和第四电机(243);

所述空气压缩机(241)与所述空气加热机(242)连通,将压缩后的空气输入所述空气加热机(242);

所述第四电机(243)与所述空气加热机(242)电连接,给所述空气加热机(242)供电;

所述空气加热机(242)将所述空气压缩机(241)压缩后的空气加热,并输入至包括所述待测涡轮叶片热障涂层和喷射部件(213)在内的高温部件。

9. 根据权利要求8所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,其特征在于,所述

空气压缩机 (241) 还与所述高温热冲击加载装置 (21) 连通, 为所述高温热冲击加载装置 (21) 提供助燃气体。

10. 根据权利要求8所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统, 其特征在于, 所述负载压气机 (14) 与所述空气压缩机 (241) 连通, 将吸收的能量输出给所述空气压缩机 (241)。

11. 根据权利要求8所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统, 其特征在于, 所述负载压气机 (14) 与所述高温热冲击加载装置 (21) 连通, 为所述高温热冲击加载装置 (21) 提供助燃气体。

12. 根据权利要求1所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统, 其特征在于, 所述检测设备 (3) 包括:

非接触式三维变形测试模块 (31), 用于对所述待测涡轮叶片热障涂层的应力场、应变场和位移场进行实时检测;

温度测试采集模块 (32), 用于对所述待测涡轮叶片热障涂层、所述待测涡轮叶片热障涂层所处环境和所述服役环境模拟设备 (2) 的温度进行实时测试并采集;

高速CCD摄像模块 (33), 用于对所述待测涡轮叶片热障涂层在所述服役环境中进行高速旋转的工作状态进行拍摄;

声发射检测系统模块 (34), 用于对待测涡轮叶片热障涂层在所述服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的裂纹形成与萌生进行实时检测;

红外检测系统模块 (35), 用于对待测涡轮叶片热障涂层在所述服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的界面脱层进行实时检测;

复阻抗谱测试模块 (36), 用于对待测涡轮叶片热障涂层在所述服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的界面氧化和涂层腐蚀进行实时检测。

13. 根据权利要求1-12任一项所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统, 其特征在于, 还包括试验操作台 (4);

所述工作状态模拟设备 (1)、所述服役环境模拟设备 (2)、所述检测设备 (3) 和所述待测涡轮叶片热障涂层均设置在所述试验操作台 (4) 上。

14. 根据权利要求1-12任一项所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统, 其特征在于, 还包括试验参数测试、控制与存储设备;

所述试验参数测试、控制与存储设备与所述工作状态模拟设备 (1)、所述服役环境模拟设备 (2) 和所述检测设备 (3) 连接, 用于测试、控制和存储所述工作状态模拟设备 (1)、所述服役环境模拟设备 (2) 和所述检测设备 (3) 的测试参数和测试结果。

15. 根据权利要求1-12任一项所述的涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统, 其特征在于, 还包括辅助设备, 为所述待测涡轮叶片热障涂层及试验装置提供保护、防震、安全保护、尾气与颗粒排放的辅助功能。

## 一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及航空发动机高压涡轮叶片热障涂层的测试领域,具涉及一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统。

### 背景技术

[0002] 航空发动机是体现国家核心竞争力的重要标志,高压涡轮叶片是发动机中承温和承载最为苛刻的核心部件,也是制约发动机的短板,迫切需要热防护技术。三大热防护技术中,单晶与冷却气膜技术的发展潜力已十分有限,热障涂层被公认为是提升发动机服役温度最切实可行的办法,世界各航空强国均在重大推进计划中把热障涂层列为核心关键技术,我国也已经把热障涂层列为先进航空发动机发展迫切需求的关键技术。

[0003] 应用在高压涡轮叶片的热障涂层,需面临高温、高速的燃气热冲击,颗粒冲蚀、钙镁铝硅氧化物(简称CMAS)腐蚀等极端苛刻的服役环境,尤其是高压转子工作叶片,还需面临高速旋转离心力、以及高速旋转与燃气交互作用产生的湍流、尾迹、热斑等载荷,致使涂层发生极难的剥落失效,成为制约热障涂层发展与应用的巨大瓶颈。研究服役环境下热障涂层剥落失效的机理,是改进工艺、优化设计的核心与关键。然而,这些环境依靠常规的拉伸、弯曲、热力疲劳、热冲击等实验方法是不现实的,但在实际的发动机上试车需耗费巨大的人力和财力,也失去了失效过程损伤参量演变的实验数据。因此,研制其服役工况的实验测试装置尤为重要。

[0004] 目前国际国内针对热障涂层服役工况的实验装置开展了大量的工作,主要的进展包括以下几个方面:一是用于模拟高温氧化、热疲劳等工况的装置,包括高温炉、自动热循环炉等;二是以燃气热冲击为主的工况实验装置,如NASA的高压燃气模拟与测试装置能模拟燃气流速和工作压力,又如德国国家能源研究中心研制的热障涂层冲蚀装置可以模拟高温冲蚀、热冲击、温度梯度等服役环境,湘潭大学前期研制的服役环境模拟与测试装置,可以实现高温、冲蚀、CMAS腐蚀服役环境的一体化模拟。三是高速旋转离心力的模拟实验装置,如北京航空航天大学采用材料试验机与电加热的方式,模拟热障涂层高速旋转的离心拉应力与高温载荷的共同作用。荷兰的NLR和加拿大的NRC航空研究中心的LCS-4B、LCS-4C高速燃气装置、美国Cincinnati大学研制的动态模拟装置可以实现初步实现旋转状态的模拟,但因核心保密尚无工作原理示意图及具体结构报道。但截至目前,还没有继实现高温、冲蚀、CMAS腐蚀服役环境与高速旋转工作状态的同时模拟,更没有实现在这一模拟实验过程中热障涂层失效过程的检测。

[0005] 本发明拟研制一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试装置,可实现高温、冲蚀、CMAS腐蚀服役环境与高速旋转工作状态的同时模拟;实现导向叶片热障涂层与工作叶片热障涂层的同时检测;同时实现涡轮叶片热障涂层失效过程的实时检测。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种能够模拟涡轮叶片热障涂层服役环境并对涡轮叶片热

障涂层关键损伤进行实时检测的装置。

[0007] 为实现上述目的,本发明的提供了一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,包括:工作状态模拟设备、服役环境模拟设备和检测设备;工作状态模拟设备设置于待测涡轮叶片热障涂层一侧,与待测涡轮叶片热障涂层连接,用于模拟待测涡轮叶片热障涂层的高速旋转工作状态;服役环境模拟设备设置于待测涡轮叶片热障涂层另一侧,用于模拟待测涡轮叶片热障涂层在高速旋转工作状态下的服役环境;检测设备,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中高速旋转时产生的损伤进行检测。

[0008] 进一步地,工作状态模拟设备包括第一电机、低速轴、齿轮箱、高速轴;第一电机与低速轴一端连接,带动低速轴做转动运动;齿轮箱内设置有相互啮合的第一齿轮和第二齿轮;第一齿轮的半径大于第二齿轮的半径;低速轴另一端与第一齿轮连接,带动第一齿轮转动,第一齿轮带动第二齿轮做转动;第二齿轮与高速轴一端连接,带动高速轴转动;高速轴另一端连接待测涡轮叶片热障涂层,带动待测涡轮叶片热障涂层高速旋转。

[0009] 进一步地,工作状态模拟设备包括负载压气机;负载压气机与第二齿轮连接,用于吸收待测涡轮叶片热障涂层高速旋转过程中产生的能量,使待测涡轮叶片热障涂层平稳转动。

[0010] 进一步地,服役环境模拟设备包括:高温热冲击加载装置,用于提供高温工况服役的模拟环境;冲蚀工况加载装置,用于提供冲蚀工况服役的模拟环境;腐蚀工况加载装置,用于提供腐蚀工况服役的模拟环境;冷却工况加载装置,用于提供对待测涡轮叶片热障涂层进行冷却的温度梯度工况服役的模拟环境。

[0011] 进一步地,高温热冲击加载装置包括可燃液体供给部件、助燃气体供给部件和喷射部件;可燃液体供给部件与喷射部件的输入端连通,将可燃液体输入喷射部件;助燃气体供给部件与喷射部件的输入端连通,将助燃气体输入喷射部件;助燃气体为可燃液体助燃;喷射部件的输出端对准待测涡轮叶片热障涂层,将燃烧后的高温气体喷射到待测涡轮叶片热障涂层。

[0012] 进一步地,冲蚀工况加载装置包括冲蚀颗粒存储器、第一精密送粉机和第二电机;冲蚀颗粒存储器储存冲蚀颗粒;第一精密送粉机分别与冲蚀颗粒存储器和喷射部件连通,将冲蚀颗粒输送至喷射部件,与高温气体混合;第二电机与第一精密送粉机电连接,给精密送粉机供电;喷射部件的输出端对准待测涡轮叶片热障涂层,将混合后的高温气体喷射到待测涡轮叶片热障涂层。

[0013] 进一步地,冲蚀工况加载装置还包括第一管道、第一流量控制器和第一调压阀;第一精密送粉机与喷射部件通过第一管道连通;第一管道上设置有第一流量控制器和第一调压阀,分别控制冲蚀颗粒传输的流量和压力。

[0014] 进一步地,腐蚀工况加载装置包括腐蚀颗粒存储器、第二精密送粉机和第三电机;腐蚀颗粒存储器储存腐蚀颗粒;第二精密送粉机分别与腐蚀颗粒存储器和喷射部件连通,将腐蚀颗粒输送至喷射部件,与高温气体混合;第三电机与第二精密送粉机电连接,给第二精密送粉机供电;喷射部件的输出端对准待测涡轮叶片热障涂层,将混合后的高温气体喷射到待测涡轮叶片热障涂层。

[0015] 进一步地,腐蚀工况加载装置还包括第二管道、第二流量控制器和第二调压阀;第二精密送粉机与喷射部件通过第二管道连通;第二管道上设置有第二流量控制器和第二调

压阀,分别控制腐蚀颗粒传输的流量和压力。

[0016] 进一步地,冷却工况加载装置包括空气压缩机、空气加热机和第四电机;空气压缩机与空气加热机连通,将压缩后的空气输入空气加热机;第四电机与空气加热机电连接,给空气加热机供电;空气加热机将空气压缩机压缩后的空气加热,并输入至包括待测涡轮叶片热障涂层和喷射部件在内的高温部件。

[0017] 进一步地,空气压缩机还与高温热冲击加载装置连通,为高温热冲击加载装置提供助燃气体。

[0018] 进一步地,负载压气机与空气压缩机连通,将吸收的能量输出给空气压缩机。

[0019] 进一步地,负载压气机与高温热冲击加载装置连通,为高温热冲击加载装置提供助燃气体。

[0020] 进一步地,检测设备包括:非接触式三维变形测试模块,用于对待测试涡轮叶片热障涂层的应力场、应变场和位移场进行实时检测;温度测试采集模块,用于对待测试涡轮叶片热障涂层、待测试涡轮叶片热障涂层所处环境和服役环境模拟设备的温度进行实时测试并采集;高速CCD摄像模块,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态进行拍摄;声发射检测系统模块,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的裂纹形成与萌生进行实时检测;红外检测系统模块,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的界面脱层进行实时检测;复阻抗谱测试模块,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的界面氧化和涂层腐蚀进行实时检测。

[0021] 进一步地,上述涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统还包括多种待测涡轮叶片热障涂层的试验模型。

[0022] 进一步地,上述涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统还包括试验操作台;工作状态模拟设备、服役环境模拟设备、检测设备和待测涡轮叶片热障涂层均设置在试验操作台上。

[0023] 进一步地,上述涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统还包括试验参数测试、控制与存储设备;试验参数测试、控制与存储设备与工作状态模拟设备、服役环境模拟设备和检测设备连接,用于测试、控制和存储工作状态模拟设备、服役环境模拟设备和检测设备的测试参数和测试结果。

[0024] 进一步地,上述涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统还包括辅助设备,为待测涡轮叶片热障涂层及试验装置提供保护、防震、安全保护、尾气与颗粒排放的辅助功能。

[0025] 本发明的上述技术方案具有如下有益的技术效果:

[0026] (1) 服役环境模拟设备能够同时模拟高速旋转状态下的涡轮叶片热障涂层的包括高温、冲蚀和腐蚀在内的多种服役环境,使载荷更加接近涡轮叶片热障涂层的实际服役工况,所述测数值更加准确;

[0027] (2) 检测设备能够对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中高速旋转时产生的损伤进行实时无损检测,能够实时掌握涡轮叶片热障涂层的工作状态,为涡轮叶片热障涂层破坏机制的理解与性能考核提供直接的实验数据,对实现热障涂层的工艺优化与自主设计提供技术支持;

[0028] (3) 负载压气机吸收待测涡轮叶片热障涂层高速旋转产生的能量,使待测涡轮叶

片热障涂层平稳旋转,并可将吸收的能量传递给空气压缩机,或与高温热冲击加载装置连通,为高温热冲击加载装置提供助燃气体。

### 附图说明

[0029] 图1是本发明涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统的结构示意图;

[0030] 图2是本发明中第一试验模型的结构示意图;

[0031] 图3是本发明中第二试验模型的结构示意图。

[0032] 附图标记:

[0033] 1:工作状态模拟设备、11:第一电机、12:低速轴、13:齿轮箱、14:负载压气机;

[0034] 2:服役环境模拟设备、21:高温热冲击加载装置、211:可燃液体供给部件、212:助燃气体供给部件、213:喷射部件、22:冲蚀工况加载装置、221:冲蚀颗粒存储器、222:第一精密送粉机、223:第二电机、224:第一管道、225:第一流量控制器、226:第一调压阀、23:腐蚀工况加载装置、231:腐蚀颗粒存储器、232:第二精密送粉机、233:第三电机、234:第二管道、235:第二流量控制器、236:第二调压阀、24:冷却工况加载装置、241:空气压缩机、242:空气加热机、243:第四电机;

[0035] 3:检测设备、31:非接触式三维变形测试模块、32:温度测试采集模块、33:高速CCD摄像模块、34:声发射检测系统模块、35:红外检测系统模块、36:复阻抗谱测试模块;

[0036] 4:试验操作台、41:测试间室;

[0037] 51:硬件保护装置,52:防震装置,53:水冷装置,54:尾气与颗粒排放装置;

[0038] 6:试验模型、61:涡轮盘、62:工作叶片热障涂层、63:轮毂、64:导向叶片热障涂层、65:扰流器。

### 具体实施方式

[0039] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明了,下面结合具体实施方式并参照附图,对本发明进一步详细说明。应该理解,这些描述只是示例性的,而并非要限制本发明的范围。此外,在以下说明中,省略了对公知结构和技术的描述,以避免不必要地混淆本发明的概念。

[0040] 以下描述中,涡轮叶片热障涂层为外部涂有热障涂层的涡轮叶片,工作叶片热障涂层为外部涂有热障涂层的工作叶片,导向叶片热障涂层为外部涂有热障涂层的导向叶片。

[0041] 图1是本发明涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统的结构示意图。

[0042] 如图1所示,本发明提供了一种涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统,包括:工作状态模拟设备1、服役环境模拟设备2和检测设备3;工作状态模拟设备1设置于待测涡轮叶片热障涂层一侧,与待测涡轮叶片热障涂层连接,用于模拟待测涡轮叶片热障涂层的高速旋转工作状态;服役环境模拟设备2设置于待测涡轮叶片热障涂层另一侧,用于模拟待测涡轮叶片热障涂层在高速旋转工作状态下的服役环境;检测设备3,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中高速旋转时产生的损伤进行检测。通过本发明提供的工作状态模拟设备1、服役环境模拟设备2和检测设备3对待测涡轮叶片热障涂层进行工作状态模拟和服役环境模拟,并且进行实时检测,以便于对涡轮叶片热障涂层失效过程中关键损伤参量进

行实时检测,对实现热障涂层的工艺优化与自主设计提供技术支持。

[0043] 具体地,工作状态模拟设备1包括第一电机11、低速轴12、齿轮箱13、高速轴;第一电机11与低速轴12一端连接,带动低速轴12做转动运动;齿轮箱13内设置有相互啮合的第一齿轮和第二齿轮;第一齿轮的半径大于第二齿轮的半径;低速轴12另一端与第一齿轮连接,带动第一齿轮转动,第一齿轮带动第二齿轮做转动;第二齿轮与高速轴一端连接,带动高速轴转动;高速轴另一端连接待测涡轮叶片热障涂层,带动待测涡轮叶片热障涂层高速旋转。第一电机11为工作状态模拟设备1和待测涡轮叶片热障涂层的转动提供动力,并且在通过低速轴12、齿轮箱13和高速轴传递扭矩的过程中,对待测涡轮叶片热障涂层进行加速,使待测涡轮叶片热障涂层高速旋转,符合转速要求。

[0044] 优选地,工作状态模拟设备1包括负载压气机14;负载压气机14与第二齿轮连接,用于吸收待测涡轮叶片热障涂层高速旋转过程中产生的能量,使待测涡轮叶片热障涂层平稳转动。

[0045] 具体地,服役环境模拟设备2包括:高温热冲击加载装置,用于提供高温工况服役的模拟环境;冲蚀工况加载装置22,用于提供冲蚀工况服役的模拟环境;腐蚀工况加载装置,用于提供腐蚀工况服役的模拟环境;冷却工况加载装置24,用于提供对待测涡轮叶片热障涂层进行冷却的温度梯度工况服役的模拟环境。服役环境模拟设备2可同时模拟涡轮叶片热障涂层在高速旋转时的包括高温、冲蚀和腐蚀在内的服役环境,还可以模拟温度梯度工况服役环境,检测涡轮叶片热障涂层在不同温度下的失效机制,对实现热障涂层的工艺优化与自主设计提供技术支持。

[0046] 具体地,高温热冲击加载装置包括可燃液体供给部件211、助燃气体供给部件212和喷射部件213;可燃液体供给部件211与喷射部件213的输入端连通,将可燃液体输入喷射部件213;助燃气体供给部件212与喷射部件213的输入端连通,将助燃气体输入喷射部件213;助燃气体为可燃液体助燃;喷射部件213的输出端对准待测涡轮叶片热障涂层,将燃烧后的高温气体喷射到待测涡轮叶片热障涂层。为待测涡轮叶片热障涂层提供高温的服役环境。

[0047] 具体地,冲蚀工况加载装置22包括冲蚀颗粒存储器221、第一精密送粉机222和第二电机;冲蚀颗粒存储器221储存冲蚀颗粒;第一精密送粉机222分别与冲蚀颗粒存储器221和喷射部件213连通,将冲蚀颗粒输送至喷射部件213,与高温气体混合;第二电机与第一精密送粉机222电连接,给精密送粉机供电;喷射部件213的输出端对准待测涡轮叶片热障涂层,将混合后的高温气体喷射到待测涡轮叶片热障涂层。

[0048] 优选地,冲蚀工况加载装置22还包括第一管道224、第一流量控制器和第一调压阀;第一精密送粉机222与喷射部件213通过第一管道224连通;第一管道224上设置有第一流量控制器和第一调压阀,分别控制冲蚀颗粒传输的流量和压力。可检测不同程度的冲蚀服役环境下的失效机制,对实现热障涂层的工艺优化与自主设计提供技术支持。

[0049] 具体地,腐蚀工况加载装置包括腐蚀颗粒存储器、第二精密送粉机232和第三电机;腐蚀颗粒存储器储存腐蚀颗粒;第二精密送粉机232分别与腐蚀颗粒存储器和喷射部件213连通,将腐蚀颗粒输送至喷射部件213,与高温气体混合;第三电机与第二精密送粉机232电连接,给第二精密送粉机232供电;喷射部件213的输出端对准待测涡轮叶片热障涂层,将混合后的高温气体喷射到待测涡轮叶片热障涂层。

[0050] 优选地,腐蚀工况加载装置还包括第二管道234、第二流量控制器235和第二调压阀236;第二精密送粉机232与喷射部件213通过第二管道234连通;第二管道234上设置有第二流量控制器235和第二调压阀236,分别控制腐蚀颗粒传输的流量和压力。可检测不同程度的腐蚀服役环境下的失效机制,对实现热障涂层的工艺优化与自主设计提供技术支持。

[0051] 具体地,冷却工况加载装置24包括空气压缩机241、空气加热机242和第四电机243;空气压缩机241与空气加热机242连通,将压缩后的空气输入空气加热机242;第四电机243与空气加热机242电连接,给空气加热机242供电;空气加热机242将空气压缩机241压缩后的空气加热,并输入至包括待测涡轮叶片热障涂层和喷射部件213在内的高温部件。

[0052] 优选地,空气压缩机241还与高温热冲击加载装置连通,具体是与可燃液体供给部件211连通,空气压缩机241所产生的压缩空气为可燃液体助燃,或是与助燃气体供给部件212混合后为可燃液体助燃。

[0053] 优选地,负载压气机14与空气压缩机241连通,将吸收的能量输出给空气压缩机241,带动空气压缩机241工作。

[0054] 具体地,检测设备3包括:非接触式三维变形测试模块31,用于对待测试涡轮叶片热障涂层的应力场、应变场和位移场进行实时检测;温度测试采集模块32,用于对待测试涡轮叶片热障涂层、待测试涡轮叶片热障涂层所处环境和服役环境模拟设备2的温度进行实时测试并采集;高速CCD摄像模块33,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态进行拍摄;声发射检测系统模块34,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的裂纹形成与萌生进行实时检测;声发射检测系统模块35,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的界面脱层进行实时检测;复阻抗谱测试模块36,用于对待测涡轮叶片热障涂层在服役环境中进行高速旋转的工作状态下产生的界面氧化和涂层腐蚀进行实时检测。上述检测模块可设置于待测试涡轮叶片热障涂层附近处,使待测试涡轮叶片热障涂层置于检测设备3的检测范围内。

[0055] 优选地,非接触式三维变形测试模块31为德国GOM公司生产的ARAMIS非接触式三维变形在线测量模块;用来测量热障涂层试样的三维变形。温度测试采集模块32有两总方案,一种是采用热电偶采集;一种是采用红外测温仪。热电偶采用B型1600℃的铂铑热电偶。说明书附图1中采用设置热电偶的方式。高速CCD摄像模块33为德国AVT公司生产的AVT Manta G-504高速摄像系统,来测量热障涂层试样的表面形貌摄像。声发射检测模块为美国PAC公司生产的PCI-II型声发射仪,用于测试热障涂层的裂纹形成与萌生过程。红外检测模块为美国Flier公司生产的FLIR GF309型红外检测系统,用于检测热障涂层的界面脱层。复阻抗谱测试模块36为英国输力强公司生产的1260+1287测试系统,用于测试涡轮叶片热障涂层的界面氧化与涂层腐蚀。

[0056] 具体地,上述涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统还包括试验操作台4;工作状态模拟设备1、服役环境模拟设备2、检测设备3和待测涡轮叶片热障涂层均设置在试验操作台4上。

[0057] 优选地,上述涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统还包括试验参数测试、控制与存储设备;试验参数测试、控制与存储设备与工作状态模拟设备1、服役环境模拟设备2和检测设备3连接,用于测试、控制和存储工作状态模拟设备1、服役环境模拟设备2和检测

设备3的测试参数和测试结果。

[0058] 优选地,上述涡轮叶片热障涂层工况模拟实验测试系统还包括辅助设备,为待测涡轮叶片热障涂层及试验装置提供保护、防震、安全保护、尾气与颗粒排放的辅助功能。

[0059] 优选地,辅助系统包括硬件保护装置51,用于保护实验装置;防震装置52,用于防止意外震动对试验测试的影响;水冷装置53,用于对装置进行冷却;尾气与颗粒排放装置54,用于将试验后的尾气和颗粒排出。

[0060] 具体地,涡轮叶片热障涂层包括工作叶片热障涂层62和导向叶片热障涂层64,故将上述涡轮叶片热障涂层分为两种待测涡轮叶片热障涂层的试验模型,以便分别对工作叶片热障涂层62和导向叶片热障涂层64进行检测,以下将分别说明。

[0061] 试验模型两种结构分别如下:

[0062] 如图2所示,第一试验模型包括:涡轮盘、工作叶片热障涂层62、轮毂63和导向叶片热障涂层64;第一电机11的输出端上安装有涡轮盘,涡轮盘的边沿设置有工作叶片热障涂层62;轮毂63设置在涡轮盘远离第一电机11的一侧,并与涡轮盘平行,轮毂63为环形,在轮毂63的内沿设置有导向叶片热障涂层64。

[0063] 喷射部件213的高温火焰出口设置在导向叶片热障涂层64远离工作叶片热障涂层62一侧,并朝向导向叶片热障涂层64和工作叶片热障涂层62。

[0064] 在使用时,启动第一电机11,带动涡轮盘以及其上的工作叶片热障涂层62高速旋转;同时启动喷射部件213,向导向叶片热障涂层64和工作叶片热障涂层62喷射高温火焰。此时,可以通过测试装置对静止不动的导向叶片热障涂层64进行测试,分析导向叶片热障涂层64的性能。

[0065] 如图3所示,第二试验模型包括:涡轮盘、工作叶片热障涂层62和扰流器65,涡轮盘的边沿设置有工作叶片热障涂层62;扰流器65与涡轮盘相互平行且间隔设置,扰流器65安装在第一电机11的输出端上。

[0066] 喷射部件213的高温火焰出口设置在工作叶片热障涂层62远离扰流器65一侧,并朝向工作叶片热障涂层62和扰流器65。

[0067] 在使用时,启动第一电机11,带动扰流器65高速旋转;同时启动喷射部件213,扰流器65和工作叶片热障涂层62喷射高温火焰。通过扰流器65的旋转带动气流的运动,模拟服役环境中的工作叶片热障涂层62旋转产生的气流。此时,可以通过测试装置对静止不动的工作叶片热障涂层62进行测试,分析工作叶片热障涂层62的性能。解决了对高速旋转的工作叶片热障涂层62测试难的问题。

[0068] 由于在服役时,工作叶片热障涂层62是高速旋转的,会产生离心力;为了模拟工作叶片热障涂层62的离心力,设置了拉伸机。

[0069] 具体的,拉伸机固定安装,并与工作叶片热障涂层62的外延连接,也就是工作叶片热障涂层62的边沿,对工作叶片热障涂层62施加拉力。通过拉伸机对工作叶片热障涂层62施加拉力模拟服役环境中的离心力,使实验测试装置更加接近工作叶片热障涂层62的服役环境,进而保证测试结果的准确性和有效性。

[0070] 模拟热障涂层工作叶片热障涂层62和导向叶片热障涂层64工作状态中,由大功率的第一电机11带动以齿轮箱1312及配套的多级旋转轴组成的传动系统带动试验模型进行高速旋转,并用以负载压气机14保证旋转装置的平衡,转速范围0-30000r/min。

[0071] 还包括超载保护装置,超载保护装置与工作状态模拟设备1连接,并在超载状态下控制工作状态模拟设备1的停机。

[0072] 具体的,超转保护系统由过载保护器及其配件电磁阀组成,当涡轮盘或者扰流器65的转速超过设置值时会强行关闭第一电机11,并发出报警。

[0073] 使用本试验测试系统对第一试验模型进行模拟实验及实时检测的步骤为:

[0074] 第一步,制备试样:采用等离子喷涂工艺,在某型号空心导向叶片表面喷涂热障涂层隔热材料。采用EB-PVD喷涂工艺对某型号空心工作叶片表面喷涂热障涂层隔热材料,其系统组成是:过渡层材料为NiCrAlY合金,其厚度约为100;陶瓷粉末材料为含8(wt.)%Y2O3的二氧化锆,陶瓷层厚度约为300。最后在试样表面喷洒一层黑色耐超高温漆,使试样表面形成有较高反光性能的散斑场,以作为ARAMIS非接触式三维变形在线测量系统的特征散斑场。

[0075] 第二步,将准备好的导向叶片热障涂层64和工作叶片热障涂层62正确组装成试验模型,把试验模型安装到测试间室41内。

[0076] 第三步,将喷射部件213固定在测试间室41内,由伺服电机通过移动导轨控制喷枪的移动,在固定好涡轮模型后可将喷射部件213的输出端朝向试验模型,且喷射部件213内设置有冷却通道。

[0077] 第四步,调节红外测温仪或者将热电偶分别固定在导向叶片热障涂层64表面、导向叶片热障涂层64冷却通道的冷却底部入口、导向叶片热障涂层64冷却通道的冷却顶部出口。每支热电偶分别连接到温度测试采集模块32,并判断各仪器是否正常工作。

[0078] 第五步,启动ARAMIS非接触式三维变形测试系统。调节好CCD摄像头,确定所关注待测试样的区域,并做好前期标定工作。打开应变测试软件,设定ARAMIS测试软件拍摄频率为1张/5秒,在线测试自动保存数据模式;启动AVT Manta G-504高速摄像系统。调节好CCD摄像头,确定所关注待测试样的区域。打开测试软件,设定AVT Manta G-504测试软件拍摄频率为1张/5秒,在线测试自动保存数据模式。

[0079] 第七步,打开试验模型和喷射部件213冷却水开关。打开试验模型及高速旋转部件内部通道的冷却气体控制开关,使冷却气体从涡轮叶片热障涂层底部冷却通道进入叶片内,由顶部通孔排出,使陶瓷涂层表面至金属基底内表面形成高温度梯度。

[0080] 第八步,启动大功率电机,带动以齿轮箱13及配套的多级旋转轴组成的传动系统带动涡轮模型件进行高速旋转,启动负载压气机14。

[0081] 第九步,启动喷射部件213、冲蚀工况加载装置22和腐蚀工况加载装置;调节煤油流量和氧气流量,自动点火8~10秒后燃气温度稳定在1000℃。升温速率约100℃/s,使表面涂层温度稳定在1000℃左右,并保持5分钟。在该具体实施例中,每一个热循环方式是加热时间10s,保温时间为300s,冷却时间200s。设定热循环次数。

[0082] 第十步,实时测试和记录导向叶片热障涂层64试样的温度场变化、应变场与位移场变化、裂纹萌生与扩展的声发射信号、界面脱层的红外检测信号、界面氧化与陶瓷层微结构演变的复阻抗谱信号、CCD拍摄的表面形貌与涂层脱落情况等。

[0083] 第十一步,待模拟实验完成后,分析和整理实验数据,判断导向叶片热障涂层64的失效机理和危险区域。

[0084] 使用本试验测试系统对第二试验模型进行模拟实验及实时检测的步骤为:

[0085] 第一步,制备试样:采用EB-PVD喷涂工艺对某型号空心工作叶片表面喷涂热障涂层隔热材料,其系统组成是:过渡层材料为NiCrAlY合金,其厚度约为100 $\mu\text{m}$ ;陶瓷粉末材料为含8(wt.)%Y2O3的二氧化锆,陶瓷层厚度约为200 $\mu\text{m}$ 。最后在试样表面喷洒一层黑色耐超高温漆,使试样表面形成有较高反光性能的散斑场,以作为ARAMIS非接触式三维变形在线测量系统的特征散斑场。。

[0086] 第二步,将准备好的扰流器65和工作叶片热障涂层62与涡轮盘61、轮毂63等部件,正确组装成涡轮模型,把涡轮模型安装到试验操作台4上。

[0087] 第三步,将没有喷射部件213固定在测试间室41内,由伺服电机通过移动导轨控制喷射部件213的移动,在固定好试验模型后可将喷射部件213的输出端朝向涡轮模型,且喷射部件213内设置有冷却通道。

[0088] 第四步:将工作叶片热障涂层62放置在拉伸机的合适位置并进行固定;

[0089] 第五步,调节红外测温仪或者将热电偶安装就位。每支热电偶分别连接到温度测试采集模块32,并判断各仪器是否正常工作。

[0090] 第六步,安装和调整好无损检测系统的信号采集传感器或镜头,确定所关注待测试样的区域;设置好各种无损检测系统的测试参数与数据保存模式;启动各个无损检测系统。

[0091] 第八步,打开试验模型和喷射部件213冷却水开关。打开试验模型件及高速旋转部件内部通道的冷却气体控制开关,使冷却气体从涡轮叶片底部冷却通道进入叶片内,由顶部通孔排出,使陶瓷涂层表面至金属基底内表面形成高温梯度。

[0092] 第九步,启动大功率电机,带动以齿轮箱13及配套的多级旋转轴组成的传动系统带动涡轮模型件中的扰流器65高速旋转,启动负载压气机14。

[0093] 第十步,启动喷射部件213、冲蚀工况加载装置22和腐蚀工况加载装置;调节煤油流量和氧气流量,自动点火8~10秒后燃气温度稳定在1000 $^{\circ}\text{C}$ 。升温速率约100 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,使表面涂层温度稳定在1000 $^{\circ}\text{C}$ 左右,并保持5分钟。在该具体实施例中,每一个热循环方式是加热时间10s,保温时间为300s,冷却时间200s。设定热循环次数。

[0094] 第十一步,启动拉伸机,对工作叶片热障涂层62进行等效载荷的加载;

[0095] 第十二步,实时测试和记录带工作叶片热障涂层62试样的温度场变化、应变场与位移场变化、裂纹萌生与扩展的声发射信号、界面脱层的红外检测信号、界面氧化与陶瓷层微结构演变的复阻抗谱信号、CCD拍摄的表面形貌与涂层脱落情况等。

[0096] 第十三步,待模拟实验完成后,分析和整理实验数据,判断带工作叶片热障涂层62的失效机理和危险区域。

[0097] 通过上述两种试验模型分别完成对涡轮叶片热障涂层中的导向叶片热障涂层64和工作叶片热障涂层62的失效机理和危险区域测试,测试方法简单准确,易于实施,并且测试结果精确,对实现热障涂层的工艺优化与自主设计提供技术支持。

[0098] 应当理解的是,本发明的上述具体实施方式仅仅用于示例性说明或解释本发明的原理,而不构成对本发明的限制。因此,在不偏离本发明的精神和范围的情况下所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。此外,本发明所附权利要求旨在涵盖落入所附权利要求范围和边界、或者这种范围和边界的等同形式内的全部变化和修改例。

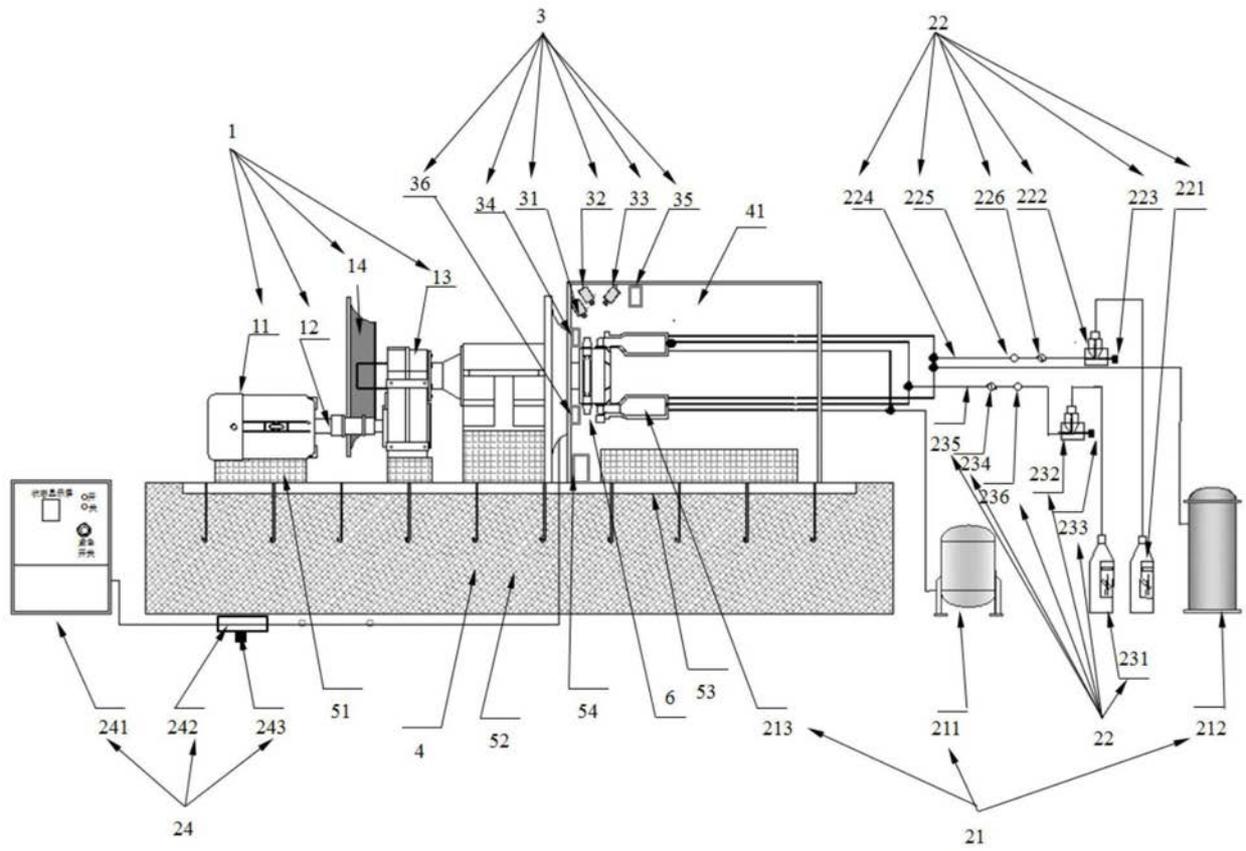


图1

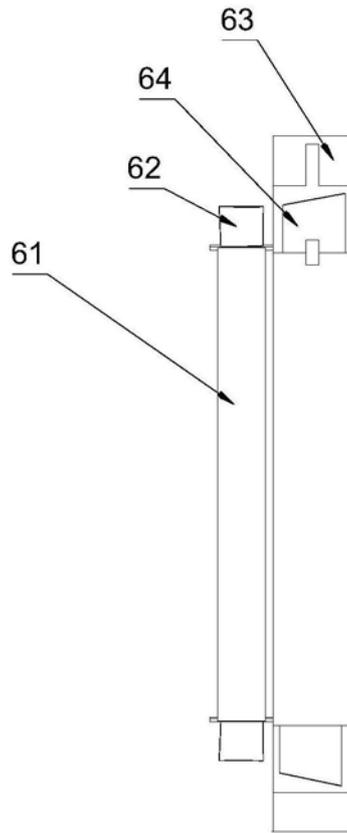


图2

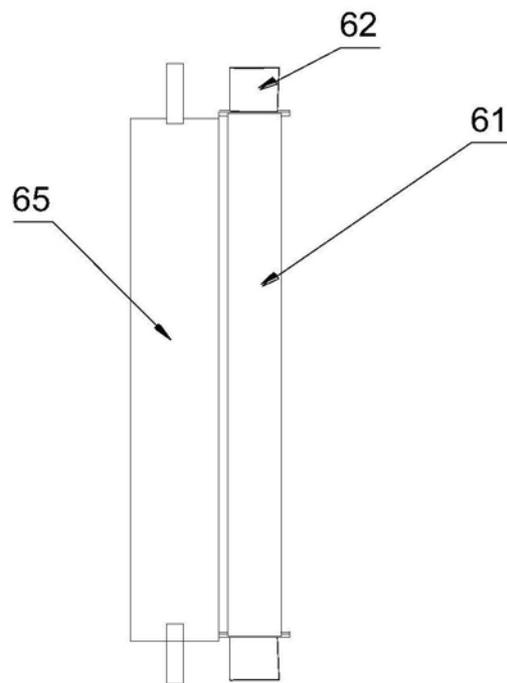


图3