

(12) 发明专利



(10) 授权公告号 CN 112945875 B (45) 授权公告日 2023.04.04

(21)申请号 202110109203.4

审查员 孙勐

- (22)申请日 2021.01.27
- (65) 同一申请的已公布的文献号 申请公布号 CN 112945875 A
- (43) 申请公布日 2021.06.11
- (73) 专利权人 中国科学院力学研究所
 地址 100190 北京市海淀区北四环西路15
 号
- (72)发明人 林鑫 方思晗 李飞 余西龙
- (74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理 事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 胡剑辉

(51) Int.CI.

GO1N 21/31 (2006.01)

GO1M 9/02 (2006.01)

(54) 发明名称

一种防热材料催化复合系数测量系统

(57)摘要

本发明提供一种防热材料催化复合系数测 量系统,包括:待测模型;高焓风洞;激光器,在信 号发生器的控制下输出激光,单个扫描周期波长 范围覆盖目标吸收线对应的波长,且输出的激光 经分束器分成两路,其中一路经光束整形系统调 整为片光后紧贴待测模型的端面由另一侧阵列 探测器接收;干涉仪,接收激光器的另一路激光 并进行信号波长的标定;处理系统,利用数据分 析模块接收信号进行综合处理,计算出待测模型 材料表面的催化复合系数。本发明基于原子吸收 光谱技术,通过定量测量材料表面原子浓度梯度 分布,实现材料表面催化复合系数的定量评估; 从微观原子角度表征催化复合过程,为深入探究 防热材料表面催化复合机理提供了新的技术手 段。 权利要求书3页 说明书6页 附图2页



CN 112945875

1.一种防热材料催化复合系数测量系统,其特征在于,包括:

待测模型,为平头圆柱形;

高焓风洞,通过内部加热器对输入的气体进行加热,使气体达到预定总温和热流,出口 处的喷管将加热后气体加速到相应马赫数后喷至位于喷管出口轴线方向的待测模型上;

激光器,在信号发生器的控制下以特定扫描频率输出激光,单个扫描周期波长范围覆 盖目标吸收线对应的波长,且输出的激光经分束器分成两路,其中一路由准直器发出,经光 束整形系统调整为片光后紧贴待测模型的端面由另一侧的阵列探测器接收后转化为电信 号;

干涉仪,接收激光器的另一路激光并进行信号波长的标定,然后进行时域-频域转换;

处理系统,利用数据分析模块分别接收经过待测模型端面和干涉仪的信号并进行对比 分析,定量获得待测模型表面沿光程平均的原子浓度,再结合待测模型表面温度和气流静 压,计算出待测模型表面的催化复合系数;

所述高焓风洞内安装有对气体进行加热的加热器,所述加热器为电弧加热器、高频感 应加热器或激波管中的一种;

在所述高焓风洞的出口处设置有使加热气体膨胀加速的拉法尔喷管,拉法尔喷管使喷 出的气体形成高温高速离解气体;

所述光束整形系统包括位于激光入射端一侧将准直器聚焦后的点状激光整形成片光的石英平凹柱面透镜和石英平凸柱面透镜,对穿过待测模型端面的片光进行再次整形的两块并列间隔设置的石英平凸柱面透镜;

在所述高焓风洞的两侧边上分别设置有供激光通过的孔洞,在孔洞内安装有光学窗口,所述准直器和所述聚焦透镜分别位于所述光学窗口的一侧;

所述干涉仪为法布里-珀罗干涉仪,法布里-珀罗干涉仪的信号输出一端连接有收集信 号并传输至所述处理系统的阵列探测器;

所述处理系统还包括远程终端,远程终端控制所述激光信号的采集和所述处理系统的 工作,并同步调整所述高焓风洞的运行状态;

所述信号发生器与所述激光器之间连接有激光控制器,所述信号发生器产生周期性锯齿波信号,激光控制器以该周期性锯齿波信号调制所述激光器的电流,使所述激光器在扫描周期内覆盖目标吸收线;

所述处理系统计算催化复合系数的过程如下:

经所述加热器加热的气体在喷出过程中,气体分子离解为原子,以分解后的氧原子作 为参考,其中的氧原子在所述待测模型表面发生催化复合反应,使表面附近氧原子浓度发 生改变;

利用获取的氧原子吸收光谱信息,优选出多普勒展宽 Δv_{p} ,在气体热平衡状态下计算出 气流静温T(y),结合积分吸收率A(y)得到低能级氧原子浓度 $n_{1,0}$ (y),基于准平衡条件下原 子数目的玻尔兹曼分布,计算出基态氧原子总浓度 $n_{0,0}$ (y)、氧原子总浓度 $n_{total,0}$ (y),并由 此推出待测模型表面氧原子摩尔分数的法相分布 x_{0} (y);

进而基于Goulard理论结合待测模型表面温度T_w和气流静温T,获得待测模型表面催化 复合系数k_w和催化复合效率γ;

所述催化复合系数推导过程如下:

频率v,单位cm⁻¹处的入射光强I₀与透射光强I₁满足Beer-Lambert定律:

 $(I_{\star}/I_{0})_{v} = \exp(-k_{v} \bullet L)$

式中为k,吸收系数,L为吸收光程,其中表示为:

 $k_{v}(y) = S_{1u}n_{1}(y) \Phi_{v}$

其中y表示待测模型表面法向坐标,下标1表示原子的低能级状态,n₁,单位cm⁻³为低能级原子浓度,φ(v),单位cm为线型函数,满足归一化条件:

 $\int \phi (v) dv \equiv 1$

S₁₀(cm/molecule)为吸收线线强度,是温度的函数:

$$S_{lu} = \frac{\lambda_0^2}{8\pi c} A_{ul} \frac{g_u}{g_l} \left[1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_0 k_B T}\right) \right]$$

对吸收谱线进行Gauss拟合,通过寻优的方法提取出多普勒展宽Δv_D,气体热平衡状态下,气体热运动速度符合Maxwel 1-Boltzmann分布,表达式如下:

$$\Delta v_D = 2 \frac{v_0}{c} \left(\frac{2kT \ln 2}{m}\right)^{1/2} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \left(\frac{T}{M}\right)^{1/2}$$

根据提取出的多普勒展宽Δv_p得到气体温度T,单位K,其中,m,单位kg为单个原子的质量,M,单位g/mol为相对原子质量;吸收系数k_v与吸收光程L的乘积为吸收率α_v:

 $a_{v}(y) = k_{v}(y) L = n_{1}(y) S_{1v} \Phi(v) L$

积分吸收率A为a_w对频率的积分:

$$A(y) = \int \alpha_{y}(y) dy$$

结合气流温度T(y)和积分吸收率A(y)计算出低能级氧原子浓度 $n_{1,0}(y)$:

$$n_{l,0}(y) = \frac{A(y)}{S_{lu}L} = \frac{\int \alpha_v(y)dv}{S_{lu}L}$$

准平衡条件下,原子能级的分布符合玻尔兹曼分布,由下述公式得到基态氧原子浓度 n_{0.0}(y):

$$\frac{n_{l,0}(y)}{n_{0,0}(y)} = \frac{g_l}{g_0} \cdot e^{-(E_l - E_0)/k_B T(y)}$$

其中为g₁为低能级简并度,g₀为基态简并度,E₁为低能级能量,E₀为基态能量;氧原子总 浓度n_{total 0}表示为:

$$n_{\text{total},0}(y) = \frac{n_{0,0}(y)}{g_0} Q_{\text{el}}(T(y))$$

其中 Q_{e1} (T)为氧原子电子配分函数;气流中总的分子数由理想气体状态方程决定:

$$n_{\text{total}} = \frac{P_{\text{static}}}{k_B T(y)}$$

其中,气流静压 P_{static} 由压力传感器测量;氧原子摩尔分数 $x_0(y)$:

$$x_{\rm O}(y) = \frac{n_{0,\rm O}(y)}{n_{\rm total}(y)}$$

根据Goulard提出的催化壁表面质量守恒理论,得到待测模型表面氧原子催化系数kwo

3/3 页

的表达式:

$$k_{\rm w,O} = \frac{D_{\rm O,w}}{x_{\rm O,w}} \left(\frac{\partial x_{\rm O}(y)}{\partial y}\right)_{\rm w}$$

其中x_{0,w}是壁面处氧原子的摩尔分数,D_{0,w}为二元扩散系数,气流温度T、气压P下的二元 扩散系数表示为:

$$D_{O,w} = D_0 (\frac{T}{T_0})^{\frac{3}{2}} (\frac{P_0}{P})$$

其中 D_0 为参考条件 T_0 =298K, P_0 =760torr下的二元扩散系数。

一种防热材料催化复合系数测量系统

技术领域

[0001] 本发明涉及高超声速飞行器气动热防护研究领域,特别是涉及一种在高温高速气体环境中对防热材料的催化复合系数进行测量的测量系统。

背景技术

[0002] 临近空间内高超声速飞行被认为是最复杂的飞行任务,气动热防护技术是保证安 全飞行的基石。高超声速飞行器在临近空间内飞行时,高速气流被剧烈压缩形成激波层,大 量动能转换为内能,气体发生振动激发、离解、电离等物理化学过程,对飞行器表面产生严 重的气动加热,高焓离解气体在机体表面发生催化复合反应所释放的催化反应热是气动热 载荷的主要来源,准确测试与评估防热材料表面催化特性对催化反应加热机制的探究具有 重要意义。催化复合系数是评价材料催化特性的重要指标,实现催化复合系数的精准评估 是深入探究防热材料表面催化复合机理的关键,也是催化反应热预测和防热系统优化设计 的重要切入点。

[0003] 目前,材料表面催化特性的测试方法主要有两种,分别是"风洞测试法"和"光能强度对比法"。"风洞测试法"利用高焓地面风洞复现临近空间或大气层内高超声速飞行器周围的高焓离解气体环境,通过测试该流场环境下待测材料表面的驻点热流和驻点压力,根据Fay和Goulard理论公式计算催化反应速率常数。然而该方法无法直接测量材料表面原子浓度的法向分布,另外该方法对于实验中表面形貌变化较大的防热材料研究难度较大。"光能强度对比法"通过引入与目标气体具有相同受激能量的惰性参考气体获得相对光强比值,利用光强比值与原子浓度之间的联系间接推算材料表面目标原子浓度的梯度分布,进而根据扩散反应方程获得材料表面催化系数。该方法通过相对光强来表征原子相对浓度的梯度分布,而并不是直接对原子浓度进行测量,无法获得催化特性与原子浓度之间的定量关系。此外,该方法所依据的扩散反应方程成立的条件与真实气动加热环境存在本质差别, 难以直接应用于高焓非平衡流的测量。

[0004] 上述测量方法均无法定量测量防热材料表面原子浓度,进而难以准确测量材料表面催化系数。针对当前测量方法的局限性,建立基于原子浓度定量测量的催化特性评估方法和系统显得尤为重要。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种在高温高速气体环境中对防热材料的催化复合系数进行测量的测量系统。

[0006] 具体地,本发明提供一种防热材料催化复合系数测量系统,包括:

[0007] 待测模型,为平头圆柱形;

[0008] 高焓风洞,通过内部加热器对输入的气体进行加热,使气体达到预定总温和热流, 出口处的喷管将加热后气体加速到相应马赫数后喷至位于喷管出口轴线方向的待测模型 上;

[0009] 激光器,在信号发生器的控制下以特定扫描频率输出激光,单个扫描周期波长范围覆盖目标吸收线对应的波长,且输出的激光经分束器分成两路,其中一路准直器发出,经 光束整形系统调整为片光后紧贴待测模型的端面由另一侧的阵列探测器接收后转化为电 信号;

[0010] 干涉仪,接收激光器的另一路激光并进行信号波长的标定,然后进行时域-频域转换;

[0011] 处理系统,利用数据分析模块分别接收经过待测模型端面和干涉仪的信号并进行 对比分析,定量获得待测模型表面沿光程平均的原子浓度,再结合待测模型材料表面温度 和气流静压,计算出待测模型材料表面的催化复合系数。

[0012] 本发明基于原子吸收光谱技术,通过定量测量材料表面原子浓度梯度分布,实现 材料表面催化复合系数的定量评估;从微观原子角度表征催化复合过程,弥补了现有"风洞 测试法"和"光能强度对比法"无法定量测量原子浓度的空白,为深入探究防热材料表面催 化复合机理提供了新的技术手段。

[0013] 本发明的空间分辨率高、时间响应快、可靠性高、对流场无干扰,具有在真实气动 热条件下进行长时、连续诊断的能力。通过同时定量测量防热材料表面多原子浓度分布,还 可以实现不同原子催化系数的同步定量表征,进而实现不同原子对材料表面催化特性影响 权重的定量评估。

附图说明

[0014] 图1是本发明一个实施方式的测量系统连接示意图;

[0015] 图2是本发明一个实施方式的典型氧原子吸收原始信号的状态示意图;

[0016] 图3是本发明一个实施方式的测量系统工作过程流程图。

具体实施方式

[0017] 以下通过具体实施例和附图对本方案的具体结构和实施过程进行详细说明。

[0018] 如图1所示,在本发明的一个实施方式中,公开一种防热材料催化复合系数测量系统,主要包括:包含加热器1和喷管2的高焓风洞,待测模型3,激光器4,干涉仪8,光束整形系统12、13、14、15,探测器9、15,处理系统16,远程终端17和高温计18。

[0019] 该待测模型3用于模拟再入飞行器高超声速飞行器钝头体部分,由待测量催化复 合系数的材料制成,外形可根据测量时的马赫速度进行调整,本实施方式中的待测模型3形 状为平头圆柱形。

[0020] 高焓风洞中的加热器1用于对输入的气体进行加热,气体可以是空气、氧气、氮气、 二氧化碳或甲烷中的一种或几种的混合,气体达到预定总温和热流后被喷管2以相应马赫 数喷至位于喷管出口轴线方向的待测模型3上;加热器1安装在高焓风洞内对经过的气体进 行加热,具体的加热器1可以采用电弧加热器、高频感应加热器或激波管中的一种。为提高 高焓风洞出口处的气体喷出速度,位于高焓风洞出口处的喷管2采用轴对称的拉法尔喷管 或矩形喷管。在加热器1的外表面可安装冷却系统,如循环冷却水,以对加热器1进行降温或 散热。

[0021] 该激光器4在信号发生器6的控制下输出可被待测模型3上特定扫描频率输出目标

吸收的线波长,且输出的激光经分束器7分成两路,其中一路紧贴待测模型3端部的端面穿 过待测流场,该过程中经光束整形系统调整为片光后紧贴待测模型3的端面由另一侧的阵 列探测器15接收后转化为电信号。这里的端部是指待测模型3朝向气体来流的一面,激光可 最大限度的接近待测模型3,但不能对待测模型3表面产生烧蚀。

[0022] 该干涉仪8用于接收激光器4被分束器7分出的另一路激光,对该路激光进行信号 波长的标定,然后进行时域-频域转换。

[0023] 该处理系统16利用数据分析模块对经过模型3端面和干涉仪8的信号进行综合分析,定量获得待测模型表面沿光程平均的原子浓度,再结合待测模型材料表面温度和气流静压,计算出待测模型材料表面的催化复合系数。

[0024] 本实施方式的测量系统测量过程如下:

[0025] 首先利用高焓风洞模拟高超声速飞行器周围的高焓离解气体环境,高焓风洞的气体经加热器1加热并由喷管2加速后吹出,待测模型3在高焓风洞运行稳定后送入,且保持在离喷管2出口一定距离的喷管2中心轴线处,需要保证待测模型3被喷出的高温气体均匀区完全覆盖,待测模型3所处的位置为进行实验的实验段,待测模型3的外形尺寸可根据高焓风洞的来流均匀区确定。喷管2为轴对称拉法尔喷管或矩形拉法尔喷管,既可以是超声速喷管,也可以是亚声速喷管,进气方式为切向进气。经过待测模型3后的高温气体经另一侧的真空系统收集后排出高焓风洞外。

[0026] 激光器4可以是分布布拉格反射式 (DBR) 激光器、分布反馈式 (DFB) 激光器或外腔 式激光器中的一种,输出线宽小于10MHz,中心波长与待测模型3的原子吸收谱线一致。信号 发生器6用于产生周期性锯齿波信号,使激光控制器5以该周期信号调制激光器4电流,使激 光器4以特定扫描频率输出目标吸收线波长,激光器4输出的激光在扫描周期内覆盖目标原 子吸收线。这里的吸收线波长可为氧原子吸收线λ₀=777.19nm,图2给出了一典型氧原子原 始吸收信号,从图2中可以看出有明显的吸收峰,说明材料表面氧原子吸收信号可实现有效 探测。

[0027] 分束器7将激光器4发出的激光分成两路,其中一路穿过待测模型3端面处的待测流场,另一路经过干涉仪8用于波长标定,干涉仪8采用法布里-珀罗干涉仪,自由光谱区为FSR=1.5GHz,波长覆盖目标原子吸收线,其产生的干涉信号可以实现采样时间向绝对波长的转换。汇聚后的激光经过干涉仪8被探测器9接收,阵列探测器9再将收集的信号传递给处理系统16,实现光谱信号的时域-频域转换。

[0028] 由于高焓风洞内部为高温气体,因此,发送和接收激光的设备分别安装在高焓风 洞外,在高焓风洞两侧边与待测模型3对应的位置上分别开有通孔,在通孔内封闭安装有透 明光学窗口19、20。

[0029] 用于穿过待测模型3的一路激光,先穿过这一侧的光学窗口19后进入高焓风洞内, 紧贴待测模型3的前端端面(垂直于待测流场方向)后进入另一侧的光学窗口20;光束整形 系统包括安装在光学窗口19一侧将准直器10聚焦后的激光调整为长度20mm左右片光的石 英平凹柱面透镜11、石英平凸柱面透镜12,对透过光学窗口20的激光再次整形的同轴放置 的石英平凸柱面透镜13和石英平凸柱面透镜14,阵列探测器15接收上述整形后的片光后, 转化为电信号后传输至处理系统16。;双色高温计18用于测量待测模型3的表面温度。

[0030] 这里使用的阵列探测器15为16通道阵列探测器,探测芯片呈线性排列,芯片阵列

总长约为10mm。为了获得明显吸收信号并保证测量系统高集成度,根据实验工况,光束整形 系统采用尺寸为9mm×14mm、焦距为-10mm的石英平凹柱面透镜11,和尺寸为30mm×20mm、焦 距为100mm的石英平凸柱面透镜12,将点光源整形为长约20mm的片光,在接收端选用尺寸为 20mm×20mm、焦距为50mm的平凸柱面透镜13和尺寸为30mm×20mm、焦距为25mm的平凸柱面 透镜14对透射片光的厚度和长度再次整形,减小光束发散带来的光强损失,提高探测信噪 比。

[0031] 在本实施方式中双色高温计18采用光学窗口21作为光线入射窗口。

[0032] 如图3所示,处理系统16利用数据分析模块综合接收的两路探测信号并进行处理, 由于经加热器1加热的气体在喷出过程中,气体分子离解为原子,以其中的氧原子作为参 考,氧原子在待测模型表面发生催化复合反应,使表面附近氧原子浓度发生改变。因此,利 用获取的氧原子光谱信息,优选出多普勒展宽Δv_p,在气体热平衡状态下计算出气流静温T (y),结合积分吸收率A(y)得到低能级氧原子浓度n_{1,0}(y),基于准平衡条件下原子数目的玻 尔兹曼分布,计算出基态氧原子总浓度n_{0,0}(y)、氧原子总浓度n_{total,0}(y),并由此推出材料 表面氧原子摩尔分数的法相分布x₀(y);进而基于Goulard理论结合材料表面温度T_w和气流 静温T,获得材料表面催化复合系数k_w和催化复合效率γ。

[0033] 在本实施方式中,为实现同步精确调整入射激光及阵列探测器15与待测模型3表面之间的位置,该准直器10、光束整形系统11、12、13、14和阵列探测器15同时安装在一个位移台上,位移台可在待测模型3轴向方向上移动,调整由准直器10及石英平凹柱面透镜11、石英平凸柱面透镜12输出的激光相对待测模型3表面之间的距离。

[0034] 进一步的,处理系统16还包括远程终端17,远程终端17可作为整个实验过程中的 控制中心,其接收数据分析模块的原子浓度结果,同时控制信号发生器6产生的信号,并同 步调整高焓风洞1的运行状态。

[0035] 本实施方式基于原子吸收光谱技术,通过定量测量材料表面原子浓度梯度分布, 实现材料表面催化复合系数的定量评估;从微观原子角度表征催化复合过程,弥补了现有 "风洞测试法"和"光能强度对比法"无法定量测量原子浓度的空白,为深入探究防热材料表 面催化复合机理提供了新的技术手段。

[0036] 本实施方式的空间分辨率高、时间响应快、可靠性高、对流场无干扰,具有在真实 气动热条件下进行长时、连续诊断的能力。通过同时定量测量防热材料表面多原子浓度分 布,还可以实现不同原子催化系数的同步定量表征,进而实现不同原子对材料表面催化特 性影响权重的定量评估。

[0037] 具体催化复合系数推导过程如下:

[0038] 频率 $v(cm^{-1})$ 处的入射光强 I_0 与透射光强 I_t 满足Beer-Lambert定律:

[0039] $(I_{t}/I_{0})_{v} = \exp(-k_{v} \bullet L)$

[0040] 式中为吸收系数,L为吸收光程,其中表示为:

[0041] $k_{y}(y) = S_{1y}n_{1}(y) \Phi_{y}$

[0042] 其中y表示材料表面法向坐标,下标1表示原子的低能级状态, n_1 (cm⁻³)为低能级原子浓度, ϕ (v) (cm)为线型函数,;满足归一化条件:

 $[0043] \quad \int \varphi (v) \, dv \equiv 1$

[0044] S₁₀ (cm/molecule) 为吸收线线强度,是温度的函数:

$$[0045] \qquad S_{lu} = \frac{\lambda_0^2}{8\pi c} A_{ul} \frac{g_u}{g_l} \left[1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda_0 k_B T}\right) \right]$$

[0046] 对吸收谱线进行Gauss拟合,通过寻优的方法提取出多普勒展宽 Δ v_D,气体热平衡 状态下,气体热运动速度符合Maxwell-Boltzmann分布,的表达式如下:

$$[0047] \qquad \Delta v_D = 2 \frac{v_0}{c} \left(\frac{2kT\ln 2}{m}\right)^{1/2} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \left(\frac{T}{M}\right)^{1/2}$$

[0048] 根据提取出的多普勒展宽 Δv_{D} 可以得到气体温度(平动温度)T(K),其中,m(kg)为单个原子的质量,M(g/mol)为相对原子质量;吸收系数k_v与吸收光程L的乘积为吸收率 α_{v} :

[0049]
$$a_{v}(y) = k_{v}(y) L = n_{1}(y) S_{1u} \Phi(v) L$$

$$\begin{bmatrix} 0051 \end{bmatrix} \quad A(y) = \int a_{y}(y) \, dy$$

[0052] 结合气流温度T(y)和积分吸收率A(y)可以计算出低能级氧原子浓度n_{1,0}(y):

[0053]
$$n_{l,0}(y) = \frac{A(y)}{S_{lu}L} = \frac{\int \alpha_v(y) dv}{S_{lu}L}$$

[0054] 准平衡条件下,原子能级的分布符合玻尔兹曼分布,由前述公式可以得到基态氧原子浓度n_{0.0}(y):

$$[0055] \qquad \frac{n_{l,O}(y)}{n_{0,O}(y)} = \frac{g_l}{g_0} \cdot e^{-(E_l - E_0)/k_B T(y)}$$

[0056] 其中为 g_1 为低能级简并度, g_0 为基态简并度, E_1 为低能级能量, E_0 为基态能量;氧原 子总浓度 $n_{total,0}$ 可以表示为:

[0057]
$$n_{\text{total},0}(y) = \frac{n_{0,0}(y)}{g_0} Q_{\text{el}}(T(y))$$

[0058] 其中 Q_{el} (T)为氧原子电子配分函数;气流中总的分子数由理想气体状态方程决定: [0059] $n_{r} = \frac{P_{static}}{r}$

$$\begin{bmatrix} 0009 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{c} n_{\text{total}} \\ k_B T(y) \end{bmatrix}$$

[0060] 其中,气流静压 P_{static} 由压力传感器测量;氧原子摩尔分数 $x_0(y)$:

[0061]
$$x_0(y) = \frac{n_{0,0}(y)}{n_{\text{total}}(y)}$$

[0062] 根据Goulard提出的催化壁表面质量守恒理论,得到材料表面氧原子催化系数k_{w,0}的表达式:

 $[0063] \qquad k_{\rm w,O} = \frac{D_{\rm O,w}}{x_{\rm O,w}} \left(\frac{\partial x_{\rm O}(y)}{\partial y}\right)_{\rm w}$

[0064] 其中x_{0,w}是壁面处氧原子的摩尔分数,D_{0,w}为二元扩散系数,气流温度T、气压P下的二元扩散系数表示为:

 $[0065] \qquad D_{O,w} = D_0 (\frac{T}{T_0})^{\frac{3}{2}} (\frac{P_0}{P})$

[0066] 其中 D_0 为参考条件(T_0 =298K, P_0 =760torr)下的二元扩散系数。

[0067] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。



图1



图2



图3