



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104289407 B

(45) 授权公告日 2016. 05. 04

(21) 申请号 201410447555. 0

US 2006/0269663 A1, 2006. 11. 30,

(22) 申请日 2014. 09. 04

审查员 贾燕

(73) 专利权人 兰州空间技术物理研究所

地址 730000 甘肃省兰州市城关区渭源路  
97 号

(72) 发明人 王佐磊 马勉军 吴先明 蒋钊  
陈焘 张宇 欧阳新艳

(74) 专利代理机构 北京理工大学专利中心  
11120

代理人 仇蕾安 李爱英

(51) Int. Cl.

B05D 7/24(2006. 01)

B05D 3/12(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 1735668 A, 2006. 02. 15,

CN 101745500 A, 2010. 06. 23,

JP 特开 2006-181492 A, 2006. 07. 13,

权利要求书1页 说明书4页

(54) 发明名称

一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层及其制备方法

(57) 摘要

本发明提供一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层及其制备方法,其中用于喷涂所述石墨涂层的材料为环氧基石墨涂料,制备的石墨涂层厚度为  $D \geq d$ ,  $d = EQ_t$ ,  $E = 1.3 \times 10^{30} \text{ m}^3/\text{atom}$ ,  $Q_t = T \times Q$ ,  $T$  为等离子体探测器在轨寿命,  $Q$  为等离子体探测器单位时间单位面积接收的氧原子个数。本发明石墨涂层充分考虑等离子体探测器的在轨寿命、使用环境等因素,使得本发明设计的石墨涂层能够保证探测器在轨工作的稳定性。

1. 一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层,其特征在于,用于喷涂所述石墨涂层的材料为环氧基石墨涂料,石墨涂层厚度为 $D \geq d$ ;

$$d = EQ_t$$

式中, $E = 1.3 \times 10^{-30} \text{m}^3/\text{atom}$ ;

$$Q_t = T \times Q$$

式中, $T$ 为等离子体探测器在轨寿命, $Q$ 为等离子体探测器单位时间单位面积接收的氧原子个数。

2. 一种如权利要求1所述空间等离子体探测器表面的石墨涂层的制备方法,其特征在于,具体过程为:

S01,根据等离子体探测器在轨寿命 $T$ 计算在轨期间接收的原子氧通量 $Q_t$ ,

$$Q_t = T \times Q$$

式中, $Q$ 为等离子体探测器单位时间单位面积接收的氧原子个数;

根据所述原子氧通量 $Q_t$ 计算制备石墨涂层的最小厚度 $d = EQ_t$ , $E = 1.3 \times 10^{-30} \text{m}^3/\text{atom}$ ;

考虑喷涂方法获得涂层的不均性 $\delta$ 及后续机械加工对石墨涂层的去除量 $\sigma$ ,确定喷涂固化后的石墨涂层厚度 $D' \geq d + \delta + \sigma$ ;

S02,喷涂时将环氧基石墨涂料的粘度控制在涂-4粘度计测定的20s左右,控制喷涂时的出料量使单层喷涂的厚度控制在 $5 \sim 7 \mu\text{m}$ ,采用多次喷涂工艺使喷涂固化后的涂层厚度为 $D'$ ;其中在两次喷涂之间进行约10分钟的空气干燥;

S03,利用精铣工艺对平面结构表面的石墨涂层进行机械加工,利用精铣工艺对曲面结构表面的石墨涂层进行机械加工,去除涂层中的不均匀部分,保证涂层的厚度不小于 $d$ ,实现石墨涂层的制备。

## 一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于空间等离子体探测技术领域,具体涉及一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 等离子体是带电粒子和中性粒子组成的表现出集体行为的一种准中性气体,是物质的第四态,宇宙中99%物质处于等离子体态。地球外部六十公里至几千公里处是由太阳辐射、粒子辐射引起地球大气电离产生的低温等离子体区,称为电离层。空间电离层对卫星通信产生重要影响,还会对卫星表面产生充电效应。对空间电离层等离子体的研究,对于空间天气预报、无线电通讯、地震研究等具有重要意义。

[0003] 电子密度、电子温度、离子密度、离子温度、电离度、悬浮电位等是等离子体的基本参数,需要借助等离子体分析仪、朗缪尔探针、电场探测仪等设备对其进行研究分析,如何保证此类设备测量的准确性是保证正确分析等离子体的前提。尤其是在对空间等离子体进行探测研究时,探测器的探头需要裸露在外太空对等离子体进行探测,由于其特殊的轨道环境,探头外表面要耐受原子氧的轰击,太阳辐照会引起探测表面产生光电子流发射,从而影响对等离子体悬浮电位的测量,另外某些等离子体探测器的探头(如电场探测仪)还内置电路,需要保证探测器的探头始终处在合适的工作温度范围。为此,对空间等离子体探测器探头表面进行必要处理,对于保证探测器在轨正常工作和性能目标实现具有重要意义。

### 发明内容

[0004] 有鉴于此,本发明的目的是为保证等离子体探测器在轨正常工作,保证其工作性能,提出一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层及其制备方法。

[0005] 实现本发明的技术方案如下:

[0006] 一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层,其中用于喷涂所述石墨涂层的材料为环氧基石墨涂料,制备完成的石墨涂层厚度为 $D \geq d$ ;

[0007]  $d = EQ_t$

[0008] 式中, $E = 1.3 \times 10^{-30} \text{m}^3/\text{atom}$ ,

[0009]  $Q_t = T \times Q$

[0010] 式中, $T$ 为等离子体探测器在轨寿命, $Q$ 为等离子体探测器单位时间单位面积接收的氧原子个数。

[0011] 进一步地,本发明所述环氧基石墨涂料,型号为DAG-213。

[0012] 一种空间等离子体探测器表面石墨涂层的制备方法,具体过程为:

[0013] S01,根据等离子体探测器在轨寿命 $T$ 计算在轨期间接收的原子氧通量 $Q_t$ ,

[0014]  $Q_t = T \times Q$

[0015] 式中, $Q$ 为等离子体探测器单位时间单位面积接收的氧原子个数;

[0016] 根据所述原子氧通量 $Q_t$ 计算石墨涂层的最小厚度 $d = EQ_t$ , $E = 1.3 \times 10^{-30} \text{m}^3/\text{atom}$ ;

[0017] 考虑喷涂方法获得涂层的不均性 $\delta$ 及后续机械加工对石墨涂层的去除量 $\sigma$ ,确定喷涂固化后的石墨涂层厚度 $D' \geq d + \delta + \sigma$ ;

[0018] S02,喷涂时将环氧基石墨涂料的粘度控制在涂-4粘度计测定的20s左右,控制喷涂时的出料量使单层喷涂的厚度控制在5-7 $\mu\text{m}$ ,采用多次喷涂工艺使喷涂固化后的涂层厚度 $D'$ ;其中在两次喷涂之间进行约10分钟的空气干燥;

[0019] S03,利用精铣工艺对平面结构表面的石墨涂层进行机械加工,利用精车工艺对曲面结构表面的石墨涂层进行机械加工,去除涂层中的不均匀部分,保证涂层的厚度至少等于 $d$ ,实现石墨涂层的制备。

[0020] 有益效果

[0021] 第一、本发明石墨涂层的厚度设计充分考虑探测器的在轨寿命、使用环境等因素,使得本发明设计的石墨涂层能够保证等离子体探测器在轨工作的稳定性。

[0022] 第二、本发明石墨涂层在完成喷涂固化工艺后,采用精车、精铣工艺对其进行机械加工,可提高涂层厚度的均匀性,提高涂层表面光洁度,提高表面功函数的均匀性,优化太阳吸收率与半球辐射率比值。

### 具体实施方式

[0023] 下面列举实施对本发明进行详细说明。

[0024] 本发明一种空间等离子体探测器表面的石墨涂层,其中用于喷涂所述石墨涂层的材料为环氧基石墨涂料,较佳选用型号为DAG-213的环氧基石墨涂料,石墨涂层厚度为 $D \geq d$ ;

[0025]  $d = EQ_t$

[0026] 式中, $E = 1.3 \times 10^{-30} \text{m}^3/\text{atom}$ ,为碳的原子氧剥蚀率, $Q_t$ 为卫星在轨寿命期等离子体探测器表面接收的原子氧总通量;

[0027]  $Q_t = T \times Q$

[0028] 式中, $T$ 为等离子体探测器在轨寿命, $Q$ 为等离子体探测器单位时间单位面积接收的氧原子个数。

[0029] 本发明石墨涂层的厚度设计充分考虑探测器的在轨寿命、使用环境等因素,使得本发明设计的石墨涂层能够保证探测器在轨工作的稳定性。同时采用石墨涂层具有如下好处:(1)石墨具有密度小、高比强、高比模、高热导、热膨胀系数小的特点,化学性质稳定,具有很好的空间环境适应性;(2)石墨具有良好的导电性能,可保证涂层与探测器基体之间良好的电连接;(3)石墨涂层表面功函数均匀一致性好,可以减少由于接触电势差及由于太阳辐照引起光电子流发射不一致引起的对等离子体耦合的测量误差;(4)石墨耐空间原子氧轰击侵蚀,材料不会变性,不会改变传感器表面性能;(5)对于地球轨道卫星,石墨涂层可为等离子体探测探头表面提供合适的太阳吸收系数与半球辐射系数比,通过被动温控,使等离子体探测器处在一个适合的工作温度范围。

[0030] 本发明一种空间等离子体探测器表面石墨涂层的制备方法,具体过程为:

[0031] S01,根据等离子体探测器在轨寿命 $T$ 计算在轨期间接收的原子氧通量 $Q_t$ ,

[0032]  $Q_t = T \times Q$

[0033] 式中, $Q$ 为等离子体探测器单位时间单位面积接收的氧原子个数;

[0034] 根据所述原子氧通量 $Q_t$ 计算石墨涂层的最小厚度 $d=EQ_t$ ,  $E=1.3 \times 10^{-30} \text{m}^3/\text{atom}$ ;

[0035] 考虑喷涂方法获得涂层的不均性 $\delta$ 及后续机械加工对石墨涂层的去除量 $\sigma$ , 确定喷涂固化后的石墨涂层厚度 $D' \geq d+\delta+\sigma$ ;

[0036] S02, 喷涂时将环氧基石墨涂料的粘度控制在涂-4粘度计测定的20s左右, 控制喷涂时的出料量使单层喷涂的厚度控制在5-7 $\mu\text{m}$ , 采用多次喷涂工艺使喷涂固化完成后涂层的厚度为 $D'$ ; 其中在两次喷涂之间进行约10分钟的空气干燥, 以便让溶剂充分挥发, 防止涂层间夹气、在涂料固化过程中涂层起泡等现象的发生, 以保证涂层的足够附着强度; 同时通过控制涂料粘度、喷涂时的出料量及喷涂速度等工艺参数保证涂层均匀性。

[0037] S03, 利用精铣工艺对平面结构表面涂层进行机械加工, 利用精铣工艺对曲面结构表面涂层进行机械加工, 去除涂层中的不均匀部分, 并保证涂层的厚度至少等于 $d$ , 实现石墨涂层的制备; 将涂层厚度的不均匀性从数十微米提高到几个微米, 表面粗糙度从0.8提高到优于0.2。

[0038] 通过在等离子体探测器探头表面制备石墨涂层, 使石墨涂层直接与等离子体耦合, 用以提高探测器表面功函数的均匀性、抗原子氧腐蚀及实现被动温度控制目的。环氧基石墨涂料中石墨质量百分比在5%~10%, 在等离子体探测器表面形成的石墨涂层厚度在几十微米。根据等离子体探测设备在轨寿命期间所接收的原子氧数量计算涂层厚度, 并在设计厚度基础上预留一定的机械加工量, 通过后续的精车、精铣方法对涂层进行加工, 提高涂层厚度的均匀性, 提高涂层表面光洁度, 提高表面功函数的均匀性, 优化太阳吸收比与半球辐射率比值。

[0039] 以球形双探针空间电场探测器为例, 介绍其球形传感器表面涂层的设计。

[0040] 空间电场探测器主要由球形传感器和信号处理单元组成, 主要包括球形外壳、短杆、内壳、套筒、绝缘组件、接口组件、内置电路等组成。电场探测器的测量原理是通过两个相距一定距离的球形传感器浸入等离子体中, 球形传感器与等离子体耦合并感应一定的相对电动势, 两个球形传感器的耦合电势之差除以两者之间距离即可获得两个传感器连线方向上的电场信号。球形传感器是电场探测器与等离子体耦合的关键部件, 其与等离子体耦合的电势不仅与等离子体自身参数相关, 而且还与球形传感器表面功函数的分布情况(影响传感器表面在太阳光辐照情况下的光电子流发射)相关。球形传感器外壳组件采用铝、钛合金等材料组成, 球体裸露在空间中, 受原子氧腐蚀, 表面会产生氧化层从而会影响球体表面功函数, 进而影响球形传感器与等离子体的耦合电势。另外, 球形传感器内部有电路, 为了保证电路正常工作, 必须保证传感器处在一个合适的温度范围内。本发明在球形传感器表面涂覆一层环氧基石墨材料, 可以有效解决上述问题。

[0041] 如果卫星轨道高度500km, 在轨寿命为五年, 为了保证在五年寿命期内电场探测器球形传感器表面的石墨涂层能够耐受原子氧的侵蚀, 涂层厚度要足够。

[0042] 球形传感器单位时间单位面积接收的原子氧个数为:

$$[0043] \quad Q = \rho V = 1 \times 10^{13} \times 8 \times 10^3 = 8 \times 10^{16} \text{atom}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \quad (1)$$

[0044] 式(1)中,  $\rho = 1 \times 10^{13}/\text{m}^3$ , 500km轨道高度原子氧密度,  $V = 8 \times 10^3 \text{m}^3/\text{s}$ , 为卫星在轨速度。按照5年的卫星寿命, 则在此期间球形传感器表面单位面积接收的总原子氧通量:

$$[0045] \quad Q_t = 5 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 8 \times 10^{16} = 1.26 \times 10^{25} \text{atom}/\text{m}^2 \quad (2)$$

[0046] 原子氧对石墨涂层的剥蚀深度可以用下列公式计算:

[0047]  $d = EQ_t$  (3)

[0048] 式(3)中, $E = 1.3 \times 10^{-30} \text{m}^3/\text{atom}$ ,为碳的原子氧剥蚀率。从而可以计算在五年的规定器寿命内,原子氧对电场探测仪球形传感器表面石墨涂层的剥蚀深度约为 $16.4 \mu\text{m}$ 。如果适当考虑裕量,则对于 $500 \text{km}$ 轨道高度运行的卫星,电场探测仪球形传感器表面涂层厚度需要达到 $30 \mu\text{m}$ 。

[0049] 一次喷涂成形的电场探测仪球形传感器表面环氧基石墨涂层后不均匀性约 $\pm 10 \mu\text{m}$ ,为了实现对传感器表面涂层精车后的厚度仍然满足至少 $30 \mu\text{m}$ 的要求,需要将传感器表面的涂层厚度至少控制在 $40 \sim 60 \mu\text{m}$ ,这样通过精车工艺将传感器表面涂层整体去除 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ ,仍可以保证传感器加工后的涂层厚度满足设计要求。

[0050] 电场探测仪球形传感器表面制备环氧基石墨涂层并进行精车加工后,涂层厚度均匀性可以控制在几个微米,可以保证传感器的球度及对称性,有利于减少电场测量误差。同时,传感器表面涂层的太阳吸收比与半球发射率比值相比从加工前的 $1.22$ 降低到 $1.16$ ,对球形结构探测器表面其在太阳辐照下的表面平衡温度从加工前的 $55^\circ\text{C}$ 降低 $52^\circ\text{C}$ 。传感器表面涂层的表面功函数不均性的标准偏差从加工前的 $8 \text{meV}$ 降低到 $7.7 \text{meV}$ ,说明机械加工对表面功函数的分布均匀性没有破坏,甚至有所改善,相比铝合金基底材料表面功函数分布 $38 \text{meV}$ 的标准偏差值更是具有明显改善,这将有助于提高双探针空间电场探测仪探头在太阳辐照情况下表面光电子流发射的一致性,提高对于空间等离子体电场测量的准确性。