



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114107906 A

(43) 申请公布日 2022.03.01

(21) 申请号 202111369051.8 *C23C 14/02* (2006.01)
(22) 申请日 2021.11.18 *B05D 7/24* (2006.01)
(71) 申请人 中国地质大学(北京) *B05D 5/00* (2006.01)
地址 100083 北京市海淀区学院路29号 *B05D 5/08* (2006.01)
申请人 中国地质大学(北京)郑州研究院
(72) 发明人 康嘉杰 林宁 岳文 李伟青
余丁顺 田斌 朱丽娜 唐云龙
付志强 孟德忠 王成彪
(74) 专利代理机构 北京兴智翔达知识产权代理
有限公司 11768
代理人 李琴
(51) Int. Cl.
C23C 14/16 (2006.01)
C23C 14/06 (2006.01)
C23C 14/35 (2006.01)

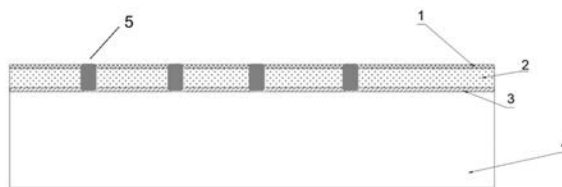
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜及其制备方法

(57) 摘要

本发明提供了一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜及其制备方法,涉及材料薄膜技术领域。低摩擦薄膜为多层结构,薄膜底层贴附于轴承内壁表面,从轴承内壁往外依次为Ti层、MoS₂-Ti/Pb层、石墨烯层以及分布在轴承内壁表面的凹槽,凹槽内填满润滑材料。本发明制备工艺简单,复合薄膜仅3层结构,厚度仅为2.5 μm,但是可以达到良好的低摩擦和高力学强度的效果,薄膜的粗糙度低于6nm,硬度高于7Gpa,在真空7×10⁻⁴Gpa环境下,摩擦系数低于0.03,可以适用于各种复杂的外部环境中,起到耐磨润滑的作用。



1. 一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,其特征在于,所述低摩擦薄膜为多层结构,薄膜底层贴附于轴承内壁表面,从轴承内壁往外依次为Ti层、MoS₂-Ti/Pb层、石墨烯层以及分布在轴承内壁表面的凹槽,凹槽内填满润滑材料;所述低摩擦薄膜在真空 7×10^{-4} Gpa环境下,摩擦系数低于0.02。

2. 如权利要求1所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,其特征在于,所述Ti层厚度为0.1-0.2 μ m,所述MoS₂-Ti/Pb层厚度为2.0-2.2 μ m,所述石墨烯层厚度为0.1-0.2 μ m。

3. 如权利要求1所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,其特征在于,所述MoS₂-Ti/Pb层成分包括:Mo:35-40at%;S:25-30at%;Ti:1-5at%;Pb:25-35at%。

4. 如权利要求1所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,其特征在于,所述石墨烯层由2-5层的石墨烯微粒堆积而成,含碳量 $\geq 98\%$ 、石墨烯粒径为7-10 μ m、堆积密度为0.08-0.13g/ml、含水率 $\leq 1.5\%$ 。

5. 如权利要求1所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,其特征在于,所述凹槽垂直于轴承内壁方向,穿透Ti层、MoS₂-Ti/Pb层和石墨烯层到达轴承内壁表面,凹槽内填满的润滑材料为石墨烯颗粒。

6. 如权利要求1所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,其特征在于,薄膜的粗糙度低于6nm,硬度高于7GPa。

7. 如权利要求1-6中任意一项所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜的制备方法,其特征在于,利用非平衡磁控溅射技术在轴承内壁依次沉积Ti层和MoS₂-Ti/Pb层薄膜,再在薄膜表面铺展石墨烯层,最后利用离子刻蚀法在轴承内壁制备凹槽,凹槽内填满润滑材料,用于补充轴承使用过程中,薄膜表面消耗的润滑物质。

8. 如权利要求7所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜的制备方法,其特征在于,具体包括以下步骤:

步骤1制备Ti层:先将轴承依次在丙酮和无水乙醇中超声清洗;

再对轴承内壁进行轰击刻蚀预处理,设定非平衡磁控溅射沉积镀膜系统偏压为450-500V,通高纯氩气15-20sccm;Ti靶电流0.2-0.3A,对轴承内壁进行10-15分钟轰击刻蚀预处理;

在预处理后的轴承内壁沉积Ti层薄膜,沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为90-100V,通高纯氩气15-20sccm;Ti靶电流2-4A,沉积时间为10-15min;

步骤2制备MoS₂-Ti/Pb层:在Ti薄膜表面沉积MoS₂-Ti/Pb,沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为40-60V,通高纯氩气10-15sccm,MoS₂靶电流0.7-1A,Ti靶电流0.1-0.3A,Pb靶电流0.1-0.3A,薄膜制备时间为125-130min;

步骤3制备石墨烯层:用无水乙醇配置石墨烯悬浮液,超声使其分散均匀;将石墨烯悬浮液均匀铺展在MoS₂-Ti/Pb层表面,待无水乙醇挥发后,即得石墨烯层;

步骤4采用离子刻蚀法在轴承内壁制备凹槽,所述凹槽内填充的润滑材料选自步骤3制备的石墨烯悬浮液。

9. 如权利要求7所述的用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜的制备方法,其特征在于,所述步骤3中,用无水乙醇溶液配置石墨烯悬浮液的浓度90-110mg/L;超声时间25-35min;采用水滴法,按照2-3滴/cm²将石墨烯悬浮液均匀铺展在MoS₂-Ti/Pb层表面,铺展率

为14.5%-19.4%。

一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明属于材料薄膜技术领域,具体涉及一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜及其制备方法。

背景技术

[0002] 空间飞行器不仅要遭受复杂空间环境,还有着低摩擦、低磨损、长寿命、高真空等要求。在宇宙空间苛刻的环境因素作用下,传统的油脂润滑易发生蒸发、分解或交联,很难胜任空间飞行器的润滑。而固体润滑薄膜具有低的蒸发率、较宽的工作温度区间、抗辐照、耐腐蚀等优点,其中 MoS_2 在空间飞行器润滑中得到了广泛的应用。

[0003] 空间飞行器太阳帆板驱动轴承要同时满足真空及潮湿环境下的润滑要求。

[0004] 因此,制备出一种在真空及潮湿环境下,依然能保持低摩擦系数和高硬度的轴承薄膜成为本领域技术人员亟待解决的问题。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,该低摩擦薄膜为多层结构,薄膜底层贴附于轴承内壁表面,从轴承内壁往外依次为Ti层、 MoS_2 -Ti/Pb层、石墨烯层以及分布在轴承内壁表面的凹槽,凹槽内填满润滑材料。

[0006] 在常规Ti层薄膜基础上,通过多金属共掺增加 MoS_2 -Ti/Pb层薄膜,增加薄膜结合强度,减少摩擦阻力,再复合一层石墨烯层进一步起到润滑作用,而凹槽内填满润滑材料则可以在轴承转动消耗薄膜的时候,随时补充润滑材料,增强低摩擦力效果,延长材料使用寿命。实际制备出的低摩擦薄膜粗糙度低于6nm,硬度高于7Gpa,在真空 7×10^{-4} Gpa环境下,摩擦系数低于0.02,具有摩擦系数低、硬度高和耐磨损的优异效果,尤其适用于真空潮湿环境下的空间飞行器中。

[0007] 为实现上述目的,本发明提供一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜,轴承内壁表面贴附Ti层,往外依次 MoS_2 -Ti/Pb层、石墨烯层以及分布在轴承内壁表面的凹槽,凹槽内填满润滑材料。

[0008] 在一优选的实施方式中,所述Ti层厚度为0.1-0.2 μm ,所述 MoS_2 -Ti/Pb层厚度为2.0-2.2 μm ,所述石墨烯层厚度为0.1-0.2 μm 。

[0009] 在一优选的实施方式中,所述 MoS_2 -Ti/Pb层成分包括:Mo:35-40at%; S:25-30at%;Ti:1-5at%;Pb:25-35at%;优选的成分为,Mo:37-40at%; S:26-28at%;Ti:2-4at%;Pb:28-32at%;更优选的成分为,Mo:38.66at%;S: 26.65at%;Ti:3.78at%;Pb:30.91at%。

[0010] 在一优选的实施方式中,所述石墨烯层由2-5层的石墨烯微粒堆积而成,含碳量 $\geq 98\%$ 、石墨烯粒径为7-10 μm 、堆积密度为0.08-0.13g/ml、含水率 $\leq 1.5\%$ 。

[0011] 在一优选的实施方式中,所述凹槽垂直于轴承内壁方向,穿透Ti层、 MoS_2 -Ti/Pb层和石墨烯层到达轴承内壁表面,凹槽内填满的润滑材料为石墨烯颗粒。

[0012] 本发明的另一目的在于提供一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜的制备方法,为了增强 MoS_2 -Ti/Pb薄膜和轴承的结合强度,在对轴承预处理后,利用非平衡磁控溅射技术在轴承表面预先制备Ti薄膜作为过渡层,再利用非平衡磁控溅射技术在轴承/Ti薄膜表面制备 MoS_2 -Ti/Pb薄膜,进一步的,为了降低摩擦系数,在 MoS_2 -Ti/Pb薄膜表面均匀铺展一层石墨烯层,最后,在三层薄膜内部布设凹槽,在凹槽内存储润滑材料。

[0013] 本发明的制备方法简单,结构合理,同时满足增强力学强度和降低摩擦系数的需求,而布设的凹槽可以随时补充轴承使用时对薄膜润滑材料的消耗,增强润滑和耐磨损的效果,延长薄膜使用寿命。

[0014] 为实现上述目的,本发明提供一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜的制备方法,利用非平衡磁控溅射技术在轴承内壁依次沉积Ti层和 MoS_2 -Ti/Pb层薄膜,再在薄膜表面铺展石墨烯层,最后利用离子刻蚀法在轴承内壁制备凹槽,凹槽内填满润滑材料,用于补充轴承使用过程中,薄膜表面消耗的润滑物质;

[0015] 具体包括以下步骤:

[0016] 步骤1制备Ti层:先将轴承依次在丙酮和无水乙醇中超声清洗;

[0017] 再对轴承内壁进行轰击刻蚀预处理,设定非平衡磁控溅射沉积镀膜系统偏压为450-500V,通高纯氩气15-20sccm;Ti靶电流0.2-0.3A,对轴承内壁进行10-15分钟轰击刻蚀预处理;

[0018] 在预处理后的轴承内壁沉积Ti层薄膜,沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为90-100V,通高纯氩气15-20sccm;Ti靶电流2-4A,沉积时间为10-15min;

[0019] 步骤2制备 MoS_2 -Ti/Pb层:在Ti薄膜表面沉积 MoS_2 -Ti/Pb,沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为40-60V,通高纯氩气10-15sccm, MoS_2 靶电流0.7-1A,Ti靶电流0.1-0.3A,Pb靶电流0.1-0.3A,薄膜制备时间为125-130min;

[0020] 步骤3制备石墨烯层:用无水乙醇配置石墨烯悬浮液,超声使其分散均匀;将石墨烯悬浮液均匀铺展在 MoS_2 -Ti/Pb层表面,待无水乙醇挥发后,即得石墨烯层;

[0021] 步骤4采用离子刻蚀法在轴承内壁制备凹槽;所述凹槽内填充的润滑材料选自步骤3制备的石墨烯悬浮液。

[0022] 其中,太阳帆板驱动轴承基体材料无具体限制,可以选用本领域常规的深沟球轴承;所述高纯氩气纯度大于99.999%。

[0023] 在一优选的实施方式中,太阳帆板驱动轴承所用的材质为GCr15,优选的尺寸为 $30 \times 30 \times 3\text{mm}$ 的GCr15钢片。

[0024] 在一优选的实施方式中,所述步骤1中,丙酮浓度 $\geq 95\%$,单次超声清洗时间为10-15min,优选的,单次超声清洗15min。

[0025] 在一优选的实施方式中,所述步骤1中,预处理的条件为:非平衡磁控溅射沉积镀膜系统偏压为480-500V,通高纯氩气18-20sccm;Ti靶电流0.2-0.3A,对轴承内壁进行10-12分钟轰击刻蚀预处理。

[0026] 在一优选的实施方式中,所述步骤1中,沉积Ti层薄膜的条件为:沉积镀膜系统偏压为90-95V,通高纯氩气15-18sccm;Ti靶电流2-3A,沉积时间为10-12min。

[0027] 在一优选的实施方式中,所述步骤2中,在Ti薄膜表面沉积 MoS_2 -Ti/Pb,优选的沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为40-50V,通高纯氩气12-15 sccm, MoS_2 靶电流0.8-

0.9A, Ti靶电流0.1-0.3A, Pb靶电流0.1-0.3A, 薄膜制备时间为126-128min。

[0028] 在一优选的实施方式中, 所述步骤3中, 用无水乙醇溶液配置石墨烯悬浮液的浓度90-110mg/L, 更优选的浓度为100mg/L; 超声时间25-35min。

[0029] 关于石墨烯铺展可以采用现有技术中任意的的方法, 只要能将石墨烯悬浮液均匀铺展到薄膜表面即可, 优选的实施方法为水滴法, 采用一次性滴管吸取石墨烯悬浮液, 垂直于薄膜表面, 按照2-3滴/cm²将石墨烯悬浮液间隔3-5s 匀速滴下, 保证石墨烯悬浮液均匀铺展, 铺展率为14.5%-19.4%, 即可获得均匀的石墨烯层。

[0030] 在一优选的实施方式中, 所述步骤4中, 在轴承内壁制备凹槽对工艺和条件无限制, 只要能制备得到直径为2-3 μ m, 深度为2.5 μ m的凹槽即可; 在凹槽内填充步骤3制备的石墨烯悬浮液可以采用现有技术中任意的的方法, 只要能将石墨烯悬浮液填满凹槽即可, 优选的方法为用滴管吸取石墨烯填充液垂直滴入凹槽内。

[0031] 在一优选的实施方式中, 所述凹槽为圆柱形, 凹槽也可以选用任意形状, 只要能达到补给薄膜表面润滑物质的作用即可。

[0032] 与现有技术相比, 根据本发明的一种用于太阳帆板驱动轴承内壁的低摩擦薄膜及其制备方法, 具有如下优点:

[0033] 1、本发明中, 在现有技术常规的Ti层表面, 通过多金属共掺的方法, 共掺杂Ti及Pb金属元素, 使两种元素协同增效, 可以降低轴承的摩擦系数, 有效延长轴承的使用寿命, 相比于单一Ti或Pb掺杂的技术方案, 还可以减少薄膜层数, 降低成本。

[0034] 2、本发明中, 在MoS₂-Ti/Pb薄膜表面利用水滴法制备的石墨烯层, 铺展率为14.5%-19.4%, 经实验验证, 铺展率在此范围内, 石墨烯层摩擦性最低, 高于19.4%石墨烯原子覆盖率过大, 摩擦性能反而降低。由于石墨烯的低摩擦性, 在摩擦过程当中石墨烯可以镶嵌到对磨球表面, 并且在MoS₂-Ti/Pb 薄膜持续起到润滑作用, 进一步的降低了轴承件的摩擦系数且制备方法简便, 制备成本低, 有效的提高了太阳帆驱动轴承的使用寿命。

[0035] 3、本发明中, MoS₂-Ti/Pb薄膜表面的石墨烯层, 采用的石墨烯层数为 2-5层, 经实验验证, 石墨烯为4层的低摩擦性能最好。另外, 在摩擦过程中石墨烯会受压隆起至四周, 为维持石墨烯的低摩擦性能, 在薄膜内布设了均匀分布的凹槽, 可以随时补充摩擦过程中损失的石墨烯, 使轴承运转过程中始终保持低摩擦。

[0036] 4、本发明的复合薄膜仅3层结构, 厚度仅为2.5 μ m, 但是可以达到良好的低摩擦和高力学强度的效果, 薄膜的粗糙度低于6nm, 硬度高于7Gpa, 在真空 7×10^{-4} Gpa环境下, 摩擦系数低于0.03, 可以适用于各种复杂的外部环境中, 起到耐磨润滑的作用。

附图说明

[0037] 从下面结合附图对本发明实施例的详细描述中, 本发明的这些和/或其它方面和优点将变得更加清楚并更容易理解, 其中:

[0038] 图1为本发明太阳帆板驱动轴承内壁用低摩擦薄膜各层示意图;

[0039] 图2为本发明太阳帆板驱动轴承内壁用低摩擦薄膜摩擦系数曲线;

[0040] 图3为本发明太阳帆板驱动轴承内壁用低摩擦薄膜断面微观形貌;

[0041] 图4为本发明太阳帆板驱动轴承内壁用低摩擦薄膜表面微观形貌;

[0042] 主要附图标记说明:

[0043] 1-石墨烯层,2-MoS₂-Ti/Pb层,3-Ti层,4-轴承内壁,5-凹槽。

具体实施方式

[0044] 若未特别指明,实施例中所用技术手段为本领域技术人员所熟知的常规手段,所用原料均为市售商品。

[0045] 除非另有特别说明,本发明中用到的各种原材料、试剂、仪器和设备等均可通过市场购买得到或者可通过现有方法制备得到。

[0046] 在本发明中,重量份可以是 μg 、 mg 、 g 、 kg 等本领域公知的重量单位,也可以是其倍数,如1/10、1/100、10倍、100倍等。

[0047] 在本发明中,测定方法为:

[0048] 测定纳米硬度:采用纳米压痕仪,设定的压入深度为200nm,约为膜厚的10%,通过六次测量取平均值。

[0049] 测定摩擦磨损性能:设定测试系统参数分别为旋转半径:4mm,旋转速度:200r/min;时间:30min;载荷:5N;对磨球:GCr15。

[0050] 实施例1:

[0051] 步骤1制备Ti层:将GCr15钢片作为深沟球轴承基体,将其依次放入丙酮和酒精中超声清洗30分钟,超声清洗结束后用无尘布擦干。设定沉积镀膜系统偏压为500V,通高纯氩气20sccm;Ti靶电流0.2A,对深沟球轴承内壁进行10分钟轰击刻蚀预处理;在预处理后的轴承内壁沉积Ti层薄膜,沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为95V,通高纯氩气18sccm;Ti靶电流 3A,沉积时间为12min。

[0052] 步骤2制备MoS₂-Ti/Pb层:在Ti薄膜表面沉积MoS₂-Ti/Pb,MoS₂-Ti/Pb 薄膜非平衡磁控溅射过程中的工艺参数分别为气体:高纯氩气;流量:13sccm;偏压:45V;MoS₂靶电流:0.8A;Ti靶电流0.2A;Pb靶电流0.2A;时间:128分钟。薄膜断面SEM如图3所示,厚度约为2 μm 。

[0053] 步骤3制备石墨烯层:通过水滴法采用一次性滴管吸取石墨烯悬浮液,垂直于薄膜表面间隔5s均匀滴下,按照2-3滴/cm²石墨烯悬浮液在 MoS₂-Ti/Pb层表面制备石墨烯层,保证石墨烯表面覆盖率为14.5%。

[0054] MoS₂-Ti/Pb薄膜非平衡磁控溅射过程中的工艺参数分别为气体:高纯氩气;流量:16sccm;偏压:50V;MoS₂靶电流:0.8A;Ti靶电流0.2A;Pb靶电流0.2A;时间:128分钟。

[0055] 步骤4采用离子刻蚀法在轴承内壁制备凹槽,并填充石墨烯悬浮液。

[0056] 经检测,实施例1制备的太阳帆板驱动轴承内壁用低摩擦薄膜厚度为2.5 μm ,薄膜Mo质量分数大约为38.66%、S质量分数为26.65%、Ti质量分数为3.78%、Pb质量分数为30.91%。性能指标中,纳米硬度为7.68GPa,摩擦系数为0.02,具有优异的力学强度和低摩擦性能。

[0057] 实施例2

[0058] 步骤1制备Ti层:将GCr15钢片作为深沟球轴承基体,将其依次放入丙酮和酒精中超声清洗30分钟,超声清洗结束后用无尘布擦干。设定沉积镀膜系统偏压为500V,通高纯氩气20sccm;Ti靶电流0.2A,对深沟球轴承内壁进行10分钟轰击刻蚀预处理;在预处理后的轴承内壁沉积Ti层薄膜,沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为90V,通高纯氩气16sccm;Ti靶

电流 2A,沉积时间为10min。

[0059] 步骤2制备MoS₂-Ti/Pb层:在Ti薄膜表面沉积MoS₂-Ti/Pb,MoS₂-Ti/Pb 薄膜非平衡磁控溅射过程中的工艺参数分别为气体:高纯氩气;流量:13sccm;偏压:40V;MoS₂靶电流:0.7A;Ti靶电流0.1A;Pb靶电流0.1A;时间:128分钟。

[0060] 步骤3制备石墨烯层:通过水滴法采用一次性滴管吸取石墨烯悬浮液,垂直于薄膜表面间隔3s均匀滴下石墨烯悬浮液,保证石墨烯悬浮液均匀铺展。按照2-3滴/cm²石墨烯悬浮液在MoS₂-Ti/Pb层表面制备石墨烯层,保证石墨烯表面覆盖率为16.5%。

[0061] MoS₂-Ti/Pb薄膜非平衡磁控溅射过程中的工艺参数分别为气体:高纯氩气;流量:16sccm;偏压:50V;MoS₂靶电流:0.8A;Ti靶电流0.2A;Pb靶电流0.2A;时间:128分钟。

[0062] 步骤4采用离子刻蚀法在轴承内壁制备凹槽,并填充石墨烯悬浮液。

[0063] 经检测,实施例2制备的太阳帆板驱动轴承内壁用低摩擦薄膜厚度为2.5 μm,薄膜Mo质量分数大约为39.26%、S质量分数为25.45%、Ti质量分数为3.18%、Pb质量分数为32.11%。性能指标中,纳米硬度为7.5GPa,摩擦系数为0.03,具有优异的力学强度和低摩擦性能。

[0064] 实施例3

[0065] 步骤1制备Ti层:将GCr15钢片作为深沟球轴承基体,将其依次放入丙酮和酒精中超声清洗30分钟,超声清洗结束后用无尘布擦干。设定沉积镀膜系统偏压为500V,通高纯氩气20sccm;Ti靶电流0.2A,对深沟球轴承内壁进行10分钟轰击刻蚀预处理;在预处理后的轴承内壁沉积Ti层薄膜,沉积镀膜条件为:沉积镀膜系统偏压为100V,通高纯氩气20sccm;Ti靶电流 4A,沉积时间为14min。

[0066] 步骤2制备MoS₂-Ti/Pb层:在Ti薄膜表面沉积MoS₂-Ti/Pb,MoS₂-Ti/Pb 薄膜非平衡磁控溅射过程中的工艺参数分别为气体:高纯氩气;流量:13sccm;偏压:50V;MoS₂靶电流:0.9A;Ti靶电流0.3A;Pb靶电流0.3A;时间:128分钟。

[0067] 步骤3制备石墨烯层:通过水滴法,采用一次性滴管吸取石墨烯悬浮液,垂直于薄膜表面间隔3-5s均匀滴下石墨烯悬浮液,保证石墨烯悬浮液均匀铺展。按照2-3滴/cm²石墨烯悬浮液在MoS₂-Ti/Pb层表面制备石墨烯层,保证石墨烯表面覆盖率为19.4%。

[0068] MoS₂-Ti/Pb薄膜非平衡磁控溅射过程中的工艺参数分别为气体:高纯氩气;流量:16sccm;偏压:50V;MoS₂靶电流:0.8A;Ti靶电流0.2A;Pb靶电流0.2A;时间:128分钟。

[0069] 步骤4采用离子刻蚀法在轴承内壁制备凹槽,并填充石墨烯悬浮液。

[0070] 经检测,实施例2制备的太阳帆板驱动轴承内壁用低摩擦薄膜厚度为2.5 μm,薄膜Mo质量分数大约为37.16%、S质量分数为26.75%、Ti质量分数为2.38%、Pb质量分数为33.71%。性能指标中,纳米硬度为7.32GPa,摩擦系数为0.05,具有优异的力学强度和低摩擦性能。

[0071] 前述对本发明的具体示例性实施方案的描述是为了说明和例证的目的。这些描述并非想将本发明限定为所公开的精确形式,并且很显然,根据上述教导,可以进行很多改变和变化。对示例性实施例进行选择 and 描述的目的在于解释本发明的特定原理及其实际应用,从而使得本领域的技术人员能够实现并利用本发明的各种不同的示例性实施方案以及各种不同的选择和改变。本发明的范围意在由权利要求书及其等同形式所限定。

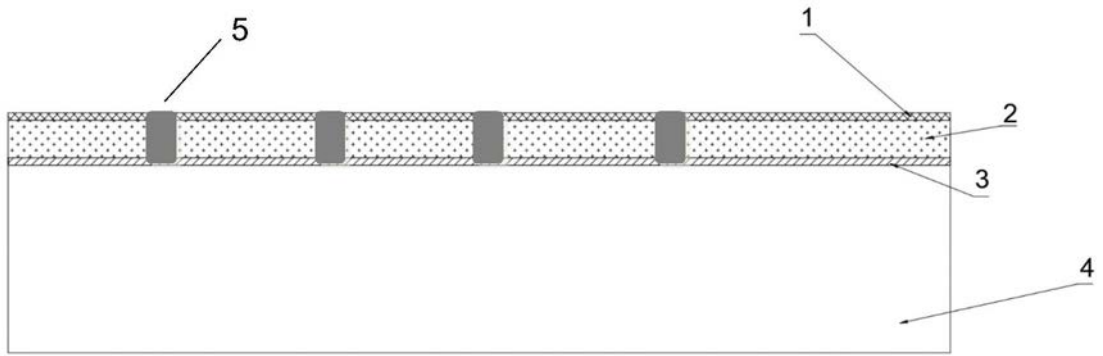


图1

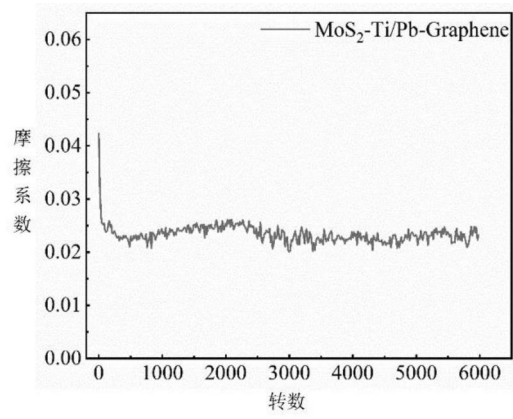


图2

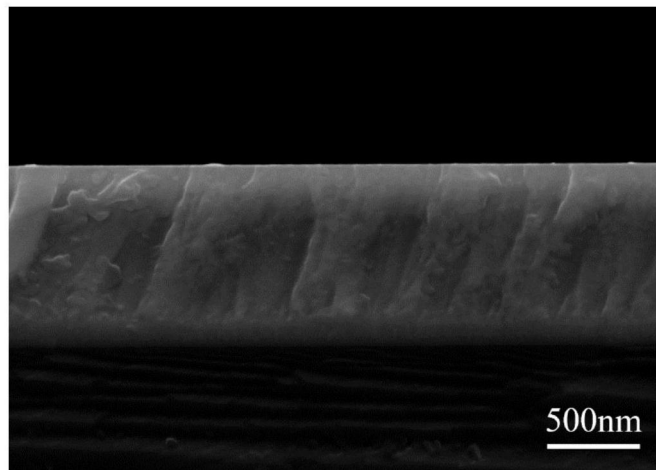


图3

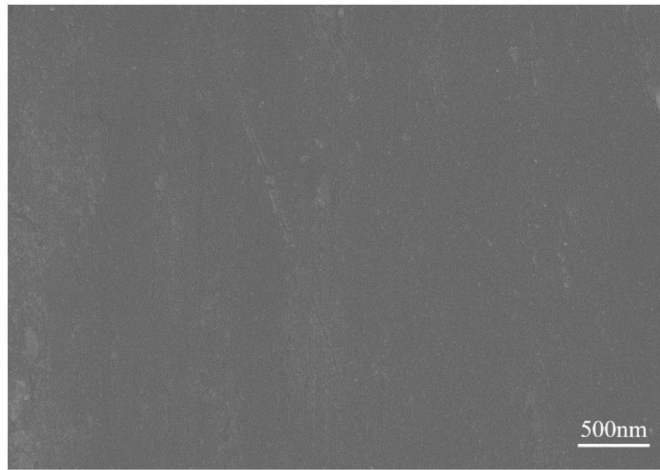


图4