(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110098044 B
(45)授权公告日 2021.04.27

(21)申请号 201910314786.7
(22)申请日 2019.04.18
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110098044 A
(43)申请公布日 2019.08.06
(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 夏原 许亿 李光
(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
代理人 胡剑辉
(51)Int.Cl.
H01F 41/02(2006.01)
C23C 14/35(2006.01)
C23C 14/48(2006.01)
C23C 14/34(2006.01)
C23C 14/16(2006.01)
C23C 14/02(2006.01)

(56)对比文件
CN 101403093 A,2009.04.08
CN 108977781 A,2018.12.11
CN 107937875 A,2018.04.20
CN 107523790 A,2017.12.29
US 6811662 B1,2004.11.02
CN 105154838 A,2015.12.16

审查员 王光军

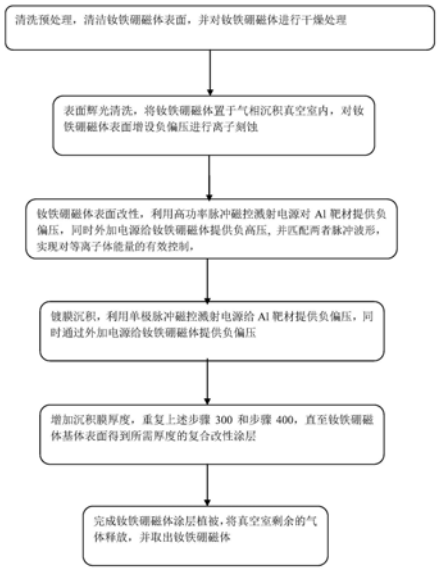
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法

(57)摘要

本发明实施例公开了本发明提供了一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，包括如下步骤：对钕铁硼磁体进行前处理；将磁体置于真空室的工件架上，抽离真空室空气；通过外加电源给工件架提供负偏压，完成对磁体的辉光清洗；通过高功率脉冲磁控溅射电源给Al靶材提供负偏压产生高密度的Al等离子体，同时通过外加电源给工件架提供负高压，并匹配两者脉冲波形，完成对工件的Al等离子体浸没离子注入沉积过程；通过单极脉冲磁控溅射电源给Al靶材提供负偏压，同时通过外加电源给工件架提供负偏压在工件表面沉积Al膜；重复上述磁控溅射和等离子体浸没离子过程，得到位于工件基体表面的复合改性涂层，提高钕铁硼磁铁表面耐腐蚀性能。



CN 110098044 B

1.一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，包括如下步骤：

步骤100、清洗预处理，清洁钕铁硼磁体表面，并对钕铁硼磁体进行干燥处理；

步骤200、表面辉光清洗，将钕铁硼磁体置于气相沉积真空室内，对钕铁硼磁体表面增设负偏压进行离子刻蚀；

步骤300、钕铁硼磁体表面改性镀膜，利用高功率脉冲磁控溅射电源对Al靶材提供负偏压，同时外加电源给钕铁硼磁体提供负高压，并匹配两者脉冲波形，实现对等离子体能量的有效控制，对钕铁硼磁体进行表面改性，高功率脉冲磁控溅射生成的高能Al离子进入钕铁硼磁体表层，并且在钕铁硼磁体表层形成磁控溅射Al薄膜；

步骤400、交替沉积镀膜，利用单极脉冲磁控溅射电源给Al靶材提供负偏压，同时通过外加电源给钕铁硼磁体提供负偏压，对钕铁硼磁体的表面镀膜，单极脉冲磁控溅射生成的高能Al离子对磁控溅射Al膜的柱状晶粒轰击以使得磁控溅射Al膜柱状晶粒的点阵破碎，磁控溅射Al膜在单极脉冲磁控溅射的轰击温度下出现再结晶进行晶粒细化形成纳米晶或非晶层；

步骤500、增加沉积膜厚度，重复上述步骤300和步骤400，直至钕铁硼磁体基体表面得到所需厚度的复合改性涂层；

步骤600、完成钕铁硼磁体涂层，将真空室剩余的气体释放，并取出钕铁硼磁体。

2.根据权利要求1所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，所述步骤200中，对钕铁硼磁体表面进行辉光清洗的具体步骤为：

步骤201、将钕铁硼磁体置于真空室内的钕铁硼磁体架上，利用机械泵和分子泵抽离空气，使真空室的腔体达到高真空水平，真空度小于或等于10^{-3}Pa；

步骤202、利用质量流量器向真空室通入惰性气体，控制真空室气压为1.5Pa；

步骤203、向工件架提供负脉冲电源，并设定电源预定的电压值和占空比；

步骤204、持续提供脉冲电源10～30min，完成对钕铁硼磁铁表面的离子刻蚀。

3.根据权利要求2所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，在步骤203中，负脉冲电源的电压值为500V～1000V，占空比50％～90％。

4.根据权利要求1所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，在所述步骤300中，钕铁硼磁体表面改性的具体步骤为：

步骤301、在离子清洗后，通过气体流量控制调整通入惰性气体，使得真空室气压保持在0.3Pa～1Pa；

步骤302、调整钕铁硼磁体工件架的位置，将铁硼磁体工件架正对Al靶；

步骤303、向Al靶材提供高功率脉冲磁控溅射电源以施加负偏压；

步骤304、在对Al靶材提供负偏压的同时，通过外加电源对工件架提供负高压，并匹配两者脉冲波形，实现对等离子体能量的有效控制；

步骤305、保持磁体表面改性的时间为10～20min。

5.根据权利要求4所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，所述高功率脉冲磁控溅射电源的电压值为600V～800V，脉冲宽度为50μs～200μs，频率为50Hz～300Hz。

6.根据权利要求4所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，对工件架提供的负高压电压值为10kV～50kV，脉冲宽度为50μs～200μs，频率为50Hz～300Hz。

7.根据权利要求1所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，在所述步骤400中，镀膜沉积的具体步骤为：

步骤401、保持工件架的位置不变，通过气体流量控制器通入惰性气体，调整真空室的气压为0.3Pa～1Pa；

步骤402、单极脉冲磁控溅射电源根据预定的电流值及占空比，向Al靶材提供负偏压；

步骤403、在向Al靶材提供负偏压的同时，外加电源根据设定的电压值及占空比，向工件架提供负偏压；

步骤404、在工件表面沉积Al膜的工作时间保持在30～60min。

8.根据权利要求7所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，所述单极脉冲磁控溅射电源的电流值2A～5A，占空比50％～90％。

9.根据权利要求7所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，对工件架提供负高压的电压值50V～150V，占空比50％～90％。

10.根据权利要求1所述的一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，其特征在于，所述步骤500所述重复改性和镀膜沉积的次数为5～10次。

一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法

技术领域

[0001] 本发明实施例涉及低温等离子体表面改性技术领域，具体涉及一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法。

背景技术

[0002] 钕铁硼(NdFeB)作为第三代稀土永磁材料，具有非常优异的磁性能和高性价比，目前中国钕铁硼产业已占全球近80％的市场份额，是全球烧结钕铁硼磁体的产业中心。因其高效节能、质量轻、体积小、控制调速性好等特点，钕铁硼磁体被广泛应用于风力发电、新能源汽车及节能家电等朝阳产业。然而，钕铁硼磁体耐蚀性差这一特性严重阻碍了其在工业领域的大规模应用。因此，提高钕铁硼磁材耐腐蚀性能对其应用和发展具有重要意义和价值。

[0003] 目前，提高钕铁硼磁体表面耐腐蚀性能的技术主要有两大类：一是在钕铁硼磁体中添加适量的Dy、Co等合金元素，虽然这可降低富Nd相的化学活性并使其电化学电位与主相相近，从而达到降低电化学腐蚀速度的目的，但同时也降低了磁体磁性能，而且对耐蚀性的改善也有限。二是在钕铁硼磁体表面制备具有耐腐蚀性能的涂层。该技术在提高钕铁硼磁体表面耐腐蚀性能的同时并不会对磁体本身的磁性能产生影响，因此该方法是目前提高钕铁硼磁体表面耐腐蚀性能的常用手段。

[0004] 目前实现涂层制备的主要方法有：电镀、化学镀和物理气相沉积等。电镀和化学镀膜因其较高的工艺成熟度和较低的成本使其成为目前国内主流的工业规模的钕铁硼磁体表面防护处理方法，但这类技术本身存在一定的缺陷。首先，无论是电镀液和化学镀液对环境都会造成污染。其次，由于钕铁硼磁体结构疏松多孔，电镀和化学镀的镀液可能会残留在钕铁硼磁体内部并在使用过程中逐渐释放从而破坏表面的涂层。作为一种低成本、无废弃物、绿色、无污染的物理气相沉积技术，磁控溅射技术广泛的应用于各类的基体的表面性能的提高。相比较于传统方法，磁控溅射技术具有其独特的优势：第一、制备的过程中并不会产生任何污染物，是一种绿色环保的表面改性技术；第二、沉积的涂层表面平整且较为致密，第三、涂层沉积速率较快且可较为精准控制；第四、涂层与基体具有较强的结合强度。

[0005] 然而，在传统的磁控溅射技术中靶材溅射原子离化率较低，使得达到基体附近的等离子体具有较低的能量，从而降低其在基体表面的迁移能力。因此，磁控溅射所制备的涂层往往以柱状晶的结构生长，且晶界的走向垂直于表面，成为腐蚀液体的快速通道，加速涂层防护性能的失效。

发明内容

[0006] 为此，本发明实施例提供一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，结合常规磁控溅射镀膜技术、高功率脉冲磁控溅射和等离子体浸没离子注入与沉积的复合表面改性方法，解决现有常规磁控溅射镀膜技术对钕铁硼磁体表面耐蚀性提高不足的问题。

[0007] 为了实现上述目的，本发明的实施方式提供如下技术方案：一种钕铁硼磁体表面

防护的复合改性方法，包括如下步骤：

[0008] 步骤100、清洗预处理，清洁钕铁硼磁体表面，并对钕铁硼磁体进行干燥处理；

[0009] 步骤200、表面辉光清洗，将钕铁硼磁体置于气相沉积真空室内，对钕铁硼磁体表面增设负偏压进行离子刻蚀；

[0010] 步骤300、钕铁硼磁体表面改性，利用高功率脉冲磁控溅射电源对Al靶材提供负偏压，同时外加电源给钕铁硼磁体提供负高压，并匹配两者脉冲波形，实现对等离子体能量的有效控制，对钕铁硼磁体表面改性；

[0011] 步骤400、镀膜沉积，利用单极脉冲磁控溅射电源给Al靶材提供负偏压，同时通过外加电源给钕铁硼磁体提供负偏压，实现对钕铁硼磁体的表面镀膜。

[0012] 步骤500、增加沉积膜厚度，重复上述步骤300和步骤400，直至钕铁硼磁体基体表面得到所需厚度的复合改性涂层；

[0013] 步骤600、完成钕铁硼磁体涂层，将真空室剩余的气体释放，并取出钕铁硼磁体。

[0014] 作为本发明的一种优选方案，所述步骤200中，对钕铁硼磁体表面进行辉光清洗的具体步骤为：

[0015] 步骤201、将钕铁硼磁体置于真空室内的钕铁硼磁体架上，利用机械泵和分子泵抽离空气，使真空室的腔体达到高真空水平，真空度小于或等于10^{-3}Pa；

[0016] 步骤202、利用质量流量器向真空室通入惰性气体，控制真空室气压为1.5Pa；

[0017] 步骤203、向工件架提供负脉冲电源，并设定电源预定的电压值和占空比；

[0018] 步骤204、持续提供脉冲电源10～30min，完成对钕铁硼磁铁表面的离子刻蚀。

[0019] 作为本发明的一种优选方案，在步骤203中，负脉冲电源的电压值为500V～1000V，占空比50％～90％。

[0020] 作为本发明的一种优选方案，在所述步骤300中，钕铁硼磁体表面改性的具体步骤为：

[0021] 步骤301、在离子清洗后，通过气体流量控制调整通入惰性气体，使得真空室气压保持在0.3Pa～1Pa；

[0022] 步骤302、调整钕铁硼磁体工件架的位置，将铁硼磁体工件架正对Al靶；

[0023] 步骤303、向Al靶材提供高功率脉冲磁控溅射电源以施加负偏压；

[0024] 步骤304、在对Al靶材提供负偏压的同时，通过外加电源对工件架提供负高压，并匹配两者脉冲波形，实现对等离子体能量的有效控制；

[0025] 步骤305、保持磁体表面改性的时间为10～20min。

[0026] 作为本发明的一种优选方案，所述高功率脉冲磁控溅射电源的电压值为600V～800V，脉冲宽度为50μs～200μs，频率为50Hz～300Hz。

[0027] 作为本发明的一种优选方案，对工件架提供的负高压电压值为10kV～50kV，脉冲宽度为50μs～200μs，频率为50Hz～300Hz。

[0028] 作为本发明的一种优选方案，在所述步骤400中，镀膜沉积的具体步骤为：

[0029] 步骤401、保持工件架的位置不变，通过气体流量控制器通入惰性气体，调整真空室的气压为0.3Pa～1Pa；

[0030] 步骤402、单极脉冲磁控溅射电源根据预定的电流值及占空比，向Al靶材提供负偏压；

[0031] 步骤403、在向Al靶材提供负偏压的同时，外加电源根据设定的电压值及占空比，向工件架提供负偏压；

[0032] 步骤404、在工件表面沉积Al膜的工作时间保持在30～60min。

[0033] 作为本发明的一种优选方案，所述单极脉冲磁控溅射电源的电流值2A～5A，占空比50％～90％；

[0034] 作为本发明的一种优选方案，对工件架提供负高压的电压值50V～150V，占空比50％～90％。

[0035] 作为本发明的一种优选方案，所述步骤500所述重复改性和镀膜沉积的次数为5～10次。

[0036] 本发明的实施方式具有如下优点：

[0037] (1)本发明包含了常规磁控溅射、高功率脉冲磁控溅射和等离子体浸没离子注入沉积这三种技术。其中常规磁控溅射技术来保证涂层的整体沉积速率；高功率脉冲磁控溅射技术技术用以产生高密度的Al等离子体，同时对基体加载脉冲高压实现实现Al离子的等离子体浸没离子注入沉积过程。

[0038] (2)在薄膜沉积之前采用等离子体浸没离子注入沉积技术，可使基体与涂层形成混合界面，提高结合力；在随后的交替沉积过程中，等离子体浸没离子注入沉积技术中高能离子可以打破Al膜表面的原子排列，形成纳米晶或非晶层，打断Al膜柱状晶结构。

[0039] (3)高功率脉冲磁控溅射技术和等离子体浸没离子注入沉积技术两者的结合为结合力和涂层的致密性保障。此外，不同技术交替沉积形成多层涂层结构，减少涂层的缺陷，阻断贯穿涂层的晶界，实现汝铁硼(NdFeB)磁体耐腐蚀性能的显著提高。

附图说明

[0040] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案，下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地，下面描述中的附图仅仅是示例性的，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，还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0041] 本说明书所绘示的结构、比例、大小等，均仅用以配合说明书所揭示的内容，以供熟悉此技术的人士了解与阅读，并非用以限定本发明可实施的限定条件，故不具技术上的实质意义，任何结构的修饰、比例关系的改变或大小的调整，在不影响本发明所能产生的功效及所能达成的目的下，均应仍落在本发明所揭示的技术内容得能涵盖的范围内。

[0042] 图1为本发明的磁体表面改性流程示意图；

具体实施方式

[0043] 以下由特定的具体实施例说明本发明的实施方式，熟悉此技术的人士可由本说明书所揭露的内容轻易地了解本发明的其他优点及功效，显然，所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0044] 实施例1

[0045] 如图1所示，本发明提供了一种钕铁硼磁体表面防护的复合改性方法，本方法包含

了常规磁控溅射、高功率脉冲磁控溅射和等离子体浸没离子注入沉积这三种技术。其中常规磁控溅射技术来保证涂层的整体沉积速率;高功率脉冲磁控溅射技术技术用以产生高密度的Al等离子体,同时对基体加载脉冲高压实现实现Al离子的等离子体浸没离子注入沉积过程。

[0046] 包括如下步骤:

[0047] 步骤100、清洗预处理,清洁钕铁硼磁体表面,并对钕铁硼磁体进行干燥处理。

[0048] 预处理包括磁体的表面氧化层处理、除油处理、除锈处理和污垢处理,首先对钕铁硼磁铁进行机械抛光处理,然后依次放置于丙酮、酒精中超声清洗,清洗表面的机械残渣和锈蚀,随后采用空气泵吹干磁铁表面。

[0049] 步骤200、表面辉光清洗,将钕铁硼磁体置于气相沉积真空室内,对钕铁硼磁体表面增设负偏压进行离子刻蚀。

[0050] 对钕铁硼磁体表面进行辉光清洗的具体步骤为:

[0051] 步骤201、将钕铁硼磁体置于真空室内的钕铁硼磁体架上,利用机械泵和分子泵抽离空气,使真空室的腔体达到高真空水平,真空度小于或等于10^{-3}Pa;

[0052] 步骤202、利用质量流量器向真空室通入惰性气体,控制真空室气压为1.5Pa;

[0053] 步骤203、向工件架提供负脉冲电源,并设定电源预定的电压值和占空比,脉冲电源的电压值为500V～1000V,占空比50％～90％;

[0054] 步骤204、持续提供脉冲电源10～30min,完成对钕铁硼磁铁表面的离子刻蚀。

[0055] 离子刻蚀是干法刻蚀中最常见的一种形式,其原理是暴露在电子区域的气体形成等离子体,由此产生的电离气体和释放高能电子组成的气体,从而形成了等离子或离子,电离气体原子通过电场加速时,会释放足够的力量与表面驱逐力紧紧粘合材料或蚀刻表面。

[0056] 步骤300、钕铁硼磁体表面改性,利用高功率脉冲磁控溅射电源对Al(铝)靶材提供负偏压,同时外加电源给钕铁硼磁体提供负高压,对钕铁硼磁体表面进行改性。

[0057] 钕铁硼磁体表面改性的具体步骤为:

[0058] 步骤301、在离子清洗后,通过气体流量器控制通入惰性气体的流量,使得真空室气压保持在0.3Pa～1Pa,本实施方式中使用的惰性气体为氩气;

[0059] 步骤302、调整工件架的位置,将工件架正对Al靶;

[0060] 步骤303、向Al靶材提供高功率脉冲磁控溅射电源以施加负偏压,保证高功率脉冲电源的电压值为600V～800V,脉冲宽度为50μs～200μs,频率为50Hz～300Hz;

[0061] 步骤304、在对Al靶材提供负偏压的同时,通过外加电源对工件架提供负高压,负高压电压值为10kV～50kV,脉冲宽度为50μs～200μs,频率为50Hz～300Hz,

[0062] 步骤305、保持磁体表面改性的时间为10～20min。

[0063] 在本实施方式中,通过高功率脉冲磁控溅射电源给Al靶材提供负偏压产生高密度的Al等离子体,利用较高的脉冲峰值功率和较低的脉冲占空比,提高等离子体的密度,同时通过外加电源给工件架提供负高压,并匹配两者脉冲波形,完成对工件的Al等离子体浸没,实现离子注入沉积。

[0064] 步骤400、镀膜沉积,利用单极脉冲磁控溅射电源给Al靶材提供负偏压,同时通过外加电源给钕铁硼磁体提供负偏压,实现对钕铁硼磁体的表面镀膜改性。

[0065] 镀膜沉积的具体步骤为:

[0066] 步骤401、保持工件架的位置不变，通过气体流量控制器通入惰性气体，调整真空室的气压为0.3Pa～1Pa；

[0067] 步骤402、单极脉冲磁控溅射电源根据预定的电流值及占空比，向Al靶材提供负偏压，单极脉冲磁控溅射电源的电流值2A～5A，占空比50％～90％；

[0068] 步骤403、在向Al靶材提供负偏压的同时，外加电源根据设定的电压值及占空比，向工件架提供负偏压，单极脉冲磁控溅射电源的电流值2A～5A，占空比50％～90％；

[0069] 步骤404、在工件表面沉积Al膜的工作时间保持在30～60min。

[0070] 步骤300具体为等离子预注入，等离子体浸没离子注入沉积中其注入对象是磁铁，其目的是提高薄膜与基体的结合力，高能Al离子可以进入钕铁硼磁体表层，并且在钕铁硼磁体表层形成Al薄膜，改善了基体对涂层的亲和性，提高涂层与基体的结合强度。

[0071] 步骤400具体为薄膜的交替沉积，在交替沉积薄膜的过程中，高能Al离子可以对磁控溅射Al膜的柱状晶粒轰击，使得磁控溅射Al膜柱状晶粒的点阵破碎，在轰击温度下出现再结晶，晶粒细化，形成纳米晶或非晶层，有效抑制了贯穿磁控溅射Al膜柱状晶结构间的空隙，堵塞腐蚀通道。因此，该方法可明显提高涂层的致密度和膜基结合强度，改善钕铁硼磁体表面耐腐蚀性能。

[0072] 综上高功率脉冲磁控溅射技术和等离子体浸没离子注入沉积技术两者的结合，为磁体与薄膜之间的结合力，以及薄膜涂层提供了致密性保障。此外，不同技术交替沉积形成多层涂层结构，减少涂层的缺陷，阻断贯穿涂层的晶界，实现汝铁硼(NdFeB)磁体耐腐蚀性能的显著提高。

[0073] 步骤500、增加沉积膜厚度，重复上述步骤300和步骤400，重复次数为5～10次，直至钕铁硼磁体基体表面得到所需厚度的复合改性涂层。

[0074] 步骤600、完成钕铁硼磁体涂层植被，将真空室剩余的气体释放，并取出钕铁硼磁体。

[0075] 实施例2

[0076] 以下结合附图与实际案例对本发明的做进一步的详细介绍。以钕铁硼磁铁表面沉积Al涂层为例，选用尺寸为25mm*25mm*12mm的钕铁硼磁铁，具体步骤如下：

[0077] 步骤一：钕铁硼磁铁涂层前处理：对钕铁硼磁铁进行机械抛光处理，并依次放置于丙酮、酒精中超声清洗，随后采用空气泵吹干磁铁表面。

[0078] 步骤二：将钕铁硼磁铁置于真空室内的工件架上，利用机械泵和分子泵进行抽真空，使腔体达到高真空水平，真空度小于或等于10～3Pa。

[0079] 步骤三：通过质量流量器控制通入真空室中的氩气，真空室气体为1.5Pa。

[0080] 步骤四：通过外加电源给给工件架提供负脉冲电压，并设定预定的电压值和占空比，电压值为900V，占空比为90％，处理时间为20min，完成对钕铁硼磁铁表面的清洗。

[0081] 步骤五：保持工件正对Al靶，通过气体流量控制调整通入氩气，使得真空室气压为0.5Pa。通过高功率脉冲磁控溅射电源(高功率脉冲磁控溅射技术)给Al靶材提供负偏压，并设定预定的电压值、脉冲宽度及频率，电压值为750V，脉冲宽度为100μs，频率为100Hz，此同时，通过外加电源给工件架提供负高压，并设定预定的电压值及占空比，电压值为12kV，脉冲宽度为100μs，频率为100Hz，随后开始对钕铁硼磁铁表面的改性过程，处理时间为10min。

[0082] 步骤六：保持工件正对Al靶，通过气体流量控制调整通入氩气，使得真空室气压为

0.5Pa。通过单极脉冲磁控溅射给Al靶材提供负偏压，并设定预定的电流值、占空比及频率，电流值为5A，占空比90％，频率为40kHz，与此同时，通过外加电源给工件架提供负偏压，并设定预定的电压值、占空比及频率，电压值为75V，占空比为90％，频率为40kHz，随后开始对钕铁硼磁铁表面沉积Al涂层，处理时间为30min。

[0083] 步骤七：重复上述过程中的步骤五与六，重复次数5次，得到位于工件基体表面的复合改性涂层。

[0084] 步骤八：完成对真空室的放气，取出式样，完成工件表面的涂层制备。

[0085] 对上述所制备的钕铁硼磁铁磁体进行中性盐雾试验，发现经过复合表面改性方法制备的钕铁硼磁铁磁体可耐中性盐雾试验200h，而相同条件下通过常规磁控溅射制备的钕铁硼磁铁磁体可耐中性盐雾试验100h，因此本发明所提出的磁控溅射技术和等离子体浸没离子注入与沉积(等离子体浸没离子注入沉积)技术复合表面改性技术显著提高了钕铁硼磁铁磁体耐蚀性能。

[0086] 虽然，上文中已经用一般性说明及具体实施例对本发明作了详尽的描述，但在本发明基础上，可以对之作一些修改或改进，这对本领域技术人员而言是显而易见的。因此，在不偏离本发明精神的基础上所做的这些修改或改进，均属于本发明要求保护的范围。

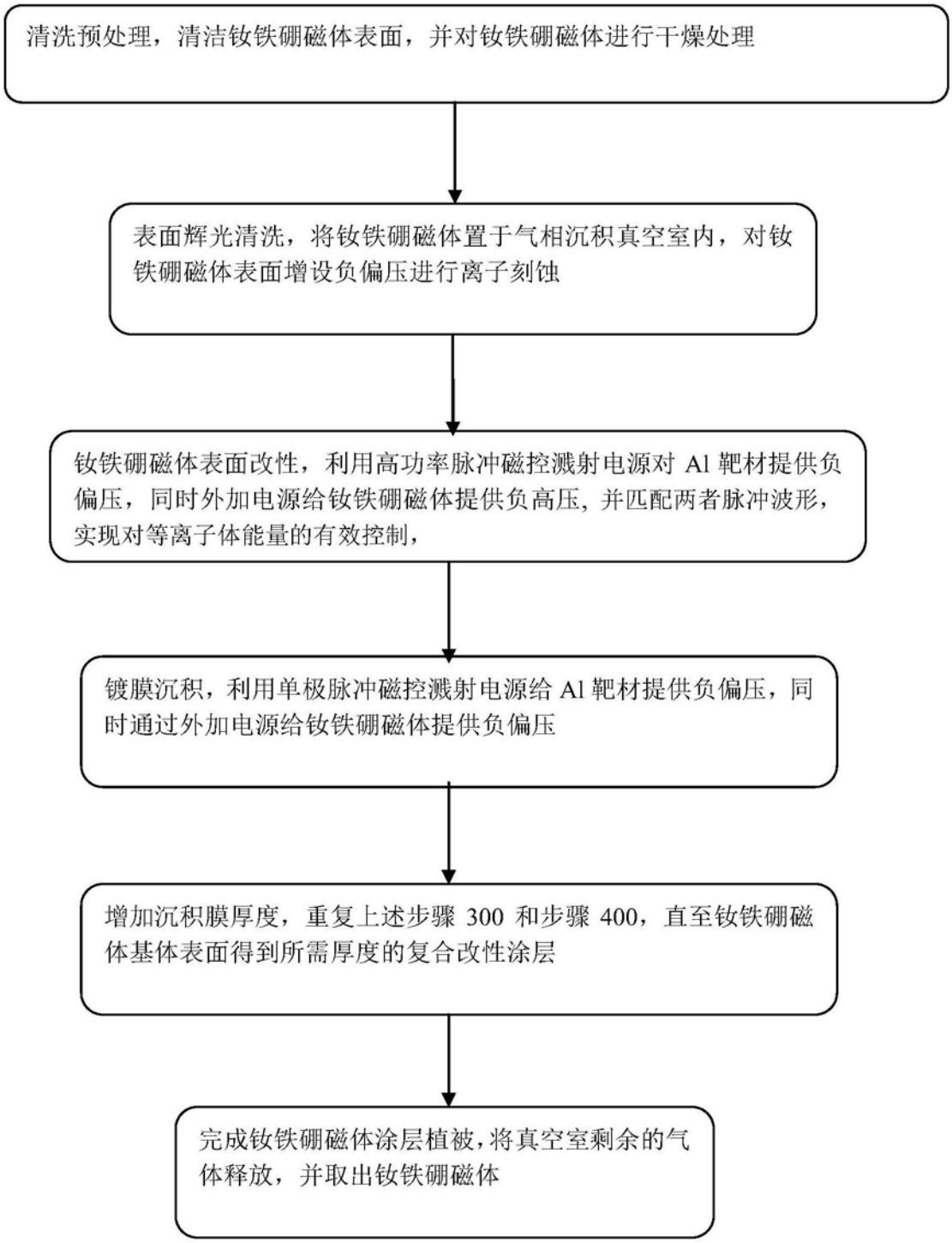

清洗预处理，清洁钕铁硼磁体表面，并对钕铁硼磁体进行干燥处理
表面辉光清洗，将钕铁硼磁体置于气相沉积真空室内，对钕铁硼磁体表面增设负偏压进行离子刻蚀
钕铁硼磁体表面改性，利用高功率脉冲磁控溅射电源对 Al 靶材提供负偏压，同时外加电源给钕铁硼磁体提供负高压，并匹配两者脉冲波形，实现对等离子体能量的有效控制，
镀膜沉积，利用单极脉冲磁控溅射电源给 Al 靶材提供负偏压，同时通过外加电源给钕铁硼磁体提供负偏压
增加沉积膜厚度，重复上述步骤 300 和步骤 400，直至钕铁硼磁体基体表面得到所需厚度的复合改性涂层
完成钕铁硼磁体涂层植被，将真空室剩余的气体释放，并取出钕铁硼磁体

图1