

# 圆筒式磁控溅射靶的磁场仿真与结构设计

王栋, 蔡长龙, 弥谦, 王麟博, 刘桦辰, 侯杰

(西安工业大学 兵器科学与技术学院, 西安 710021)

**摘要:** **目的** 探究一种可用于实现圆柱形工件外表面镀膜设备的可能性, 设计了一种新型的圆筒式磁控溅射靶结构, 溅射在圆筒状靶材内表面发生, 从整个圆周方向对工件外表面镀膜, 以改善传统长管工件镀膜设备体积庞大、结构复杂的不足。**方法** 首先对圆筒式磁控溅射靶进行初始结构设计, 再运用有限元分析软件 COMSOL 中静磁无电流仿真模块, 通过控制变量法对溅射靶内部冷却背板厚度  $d_1$ 、内磁环轴向高度  $h_1$ 、内磁环径向宽度  $\Delta r_1$ 、外磁环轴向高度  $h_2$ 、外磁环径向宽度  $\Delta r_2$  以及内外磁环间距  $d_2$  不同结构参数下的靶面水平磁感应强度值进行仿真与研究。在此基础上进行磁场优化并设计出溅射靶的理想磁铁结构参数。**结果** 计算结果表明, 当冷却背板厚度为 13 mm, 外磁环内径为 266 mm、外径为 310 mm、厚度为 20 mm, 内磁环内径为 270 mm、外径为 310 mm、厚度为 22 mm, 内外磁环间距为 50 mm 时, 距靶面上方 3 mm 处最大水平磁感应强度为 40 mT, 磁场分布均匀区域可达 40% 左右。**结论** 此外考虑溅射靶内部的水冷、密封以及绝缘结构, 最终设计的圆筒式磁控溅射靶整体高 384 mm, 最大直径 432 mm, 结构紧凑可靠, 为长管工件外表面金属薄膜的制备提出了一种新的磁控溅射靶结构。

**关键词:** 磁控溅射靶; 磁场仿真; 有限元分析; 优化; 结构设计; 圆筒式

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)08-0371-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.08.032

## Magnetic Field Simulation and Structure Design of Cylindrical Magnetron Sputtering Target

WANG Dong, CAI Chang-long, MI Qian, WANG Lin-bo, LIU Hua-chen, HOU Jie

(College of Ordnance Science and Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** In order to explore the possibility of a device which can be used to coat the outer surface of cylindrical workpiece, a new type of cylindrical magnetron sputtering target is designed. Sputtering takes place on the inner surface of the cylindrical target, and the outer surface of the workpiece is coated from all sides to improve the large volume and complex structure of the traditional coating device for long tube workpiece. Firstly, the initial structure of the cylindrical magnetron sputtering target was designed, and then the magnetostatic non-current simulation module in the finite element analysis software

收稿日期: 2022-06-24; 修订日期: 2022-09-14

**Received:** 2022-06-24; **Revised:** 2022-09-14

**基金项目:** 国家自然科学基金 (11975177); 西安市智能探视感知重点实验室资助项目 (201805061ZD12CG45); 西安市智能兵器重点实验室资助项目 (2019220514SYS020CG042)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (11975177); Xi'an Key Laboratory of Intelligent Visitation Perception (201805061ZD12CG45); Xi'an Key Laboratory of Intelligence (2019220514SYS020CG042)

**作者简介:** 王栋 (1998—), 男, 硕士研究生。

**Biography:** WANG Dong (1998-), Male, Postgraduate.

**通讯作者:** 蔡长龙 (1974—), 男, 博士。

**Corresponding author:** CAI Chang-long (1974-), Male, Doctor.

**引文格式:** 王栋, 蔡长龙, 弥谦, 等. 圆筒式磁控溅射靶的磁场仿真与结构设计[J]. 表面技术, 2023, 52(8): 371-379.

WANG Dong, CAI Chang-long, MI Qian, et al. Magnetic Field Simulation and Structure Design of Cylindrical Magnetron Sputtering Target[J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 371-379.

COMSOL was used and the horizontal magnetic induction of the target with different structure parameters, such as the thickness of the inner cooling backplane  $d_1$ , the axial height  $h_1$  of the inner magnetic ring, the radial width  $\Delta r_1$  of the inner magnetic ring, the axial height  $h_2$  of the outer magnetic ring, the radial width  $\Delta r_2$  of the outer magnetic ring, and the distance between the inner and outer magnetic rings  $d_2$ , was simulated and studied by the control variable approach. It was found that with the increase of the thickness of the cooling back plate, the distance between the inner magnetic ring and the outer magnetic ring, the radial width of the internal magnetic ring, the external magnetic ring and the entire magnetic steel, the horizontal magnetic induction of the target would decrease. The uniformity of magnetic field distribution could be improved by increasing the axial height of outer magnetic ring and the distance between inner and outer magnetic ring. The increase of the axial height and the radial width of the outer magnetic ring made the uniformity worse. On this basis, the magnetic field was optimized and the ideal magnet structure parameters of sputtering target were designed. When the thickness of the cooling backplane was 13 mm, the inner diameter of the outer magnetic ring was 266 mm, the outer diameter was 310 mm, the thickness was 20 mm, the inner diameter of the inner magnetic ring was 270 mm, the outer diameter was 310 mm, the thickness was 22 mm, and the distance between the inner and outer magnetic rings was 50 mm, the maximum horizontal magnetic induction at 3 mm above the target was kept at 40 mT, and the magnetic field distribution was uniform about 40%. Beside, the water-cooled, sealed and insulated structure inside the target is considered comprehensively in all aspects, the final design of the cylindrical magnetron sputtering target is 384 mm in height and 432 mm in diameter by Solidwork 3D modeling software. The designed cylindrical magnetron sputtering target has a simple and compact structure, and the cathode targets of different target materials are connected in sequence, which provides a new structure and a new idea for the simultaneous preparation of multilayer films on the outer surface of cylindrical workpiece and has a very wide application prospect in the field of coating manufacturing of long tube workpiece.

**KEY WORDS:** magnetron sputtering target; magnetic field simulation; finite element analysis; optimization; structural design; cylindrical type

磁控溅射镀膜技术因具有“高速低温”的特点<sup>[1]</sup>, 现如今已大量应用在工业镀膜的各个领域<sup>[2-15]</sup>。现有典型的磁控溅射靶结构以平面靶、圆柱形旋转靶和多靶组合为主<sup>[16-20]</sup>, 平面圆形靶和平面矩形靶多应用于平面工件的镀膜, 圆柱形旋转靶采用的是圆柱形靶材外表面溅射, 一般应用于圆柱形工件的内表面镀膜或平面工件镀膜<sup>[21]</sup>, 多靶结构常用于复杂基体的镀膜, 结构复杂成本高<sup>[22]</sup>。目前圆柱形工件外表面溅射镀膜一般采用星型旋转镀膜方式, 如四靶、六靶组合结构的非平衡磁控溅射系统结构, 或采用靶材竖置, 工件横置, 直线运行的镀膜方式; 但上述两种方式在结构上复杂笨重、工件装配拆卸不便, 且镀膜沉积速率低, 均匀性不好<sup>[23]</sup>。本文拟在现有平面靶结构基础上采用有限元分析软件 COMSOL 对圆筒式磁控溅射靶不同结构参数下的水平磁感应强度值进行仿真, 对圆筒式磁控溅射靶结构进行全新设计, 以克服圆柱形工件外表面镀膜设备体积庞大的缺点。将不同靶材材料的阴极靶组合连接还可实现多层薄膜的同时制备, 在长管工件镀膜制造领域有非常广泛的应用前景。

## 1 圆筒式磁控溅射靶初始结构设计 与磁场仿真

### 1.1 COMOL 磁场仿真原理

COMSOL 磁场无电流仿真模块是基于磁场的等

效磁荷模型<sup>[24]</sup>, 利用有限元法先求解磁标量势  $V_m$ , 再求解磁场强度  $\mathbf{H}$  和磁感应强度  $\mathbf{B}$ 。因此从麦克斯韦方程组的电磁场基本定律出发, 由于永磁体形成恒定磁场, 无电流产生, 得到简化后的麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

引入标量  $V_m$ , 可得:

$$\mathbf{H} = -\nabla \cdot V_m \quad (2)$$

磁化的本构关系为:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (3)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率, 大小等于  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)。

把式 (2) — (3) 代入式 (1) 可得:

$$\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}) = 0 \quad (4)$$

所以永磁体磁场计算稳态方程为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{H} = -\nabla \cdot V_m \\ \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \end{cases} \quad (5)$$

对于稳态磁场, 2 种不同介质的边界条件为:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0 \\ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{n}$  为由媒质二指向媒质一的垂直单位向量。

在满足边界条件时, 对模型采用有限元法进行网格划分, 对应上述稳态方程求解, 便可计算出空间中各点的磁场大小。

1.2 圆筒式磁控溅射靶初始结构设计

依据不同类型和大小的磁控溅射靶, 一般要求在距靶面上方 3~5 mm 位置处的水平磁感应强度大小为 0.03~0.08 T; 在大型平面磁控溅射镀膜机中一般设计的靶基距为 90~250 mm; 在小型圆平面磁控溅射靶设计中靶基距一般选择在 50~70 mm 之间<sup>[25]</sup>。为了实现直径为 70 mm 的圆柱形工件外表面镀膜的需求, 根据前期查阅的相关资料, 设计了如图 1 所示的圆筒式磁控溅射靶初始结构, 具体结构由内向外依次为靶材、冷却背板、内外磁环和磁轭。靶基距选择 80 mm, 磁钢排布为: 外磁环设计在阴极靶上下外端, 磁铁内侧为 S 极, 外侧为 N 极, 内磁环设计在中间, 磁铁内侧为 N 极, 外侧为 S 极, 这样磁力线就可以在靶材上形成 2 个跑道环, 增加靶材溅射区域, 提高靶材利用率; 磁轭的存在能有效增加靶面磁感应强度。具体结构参数如表 1 所示。

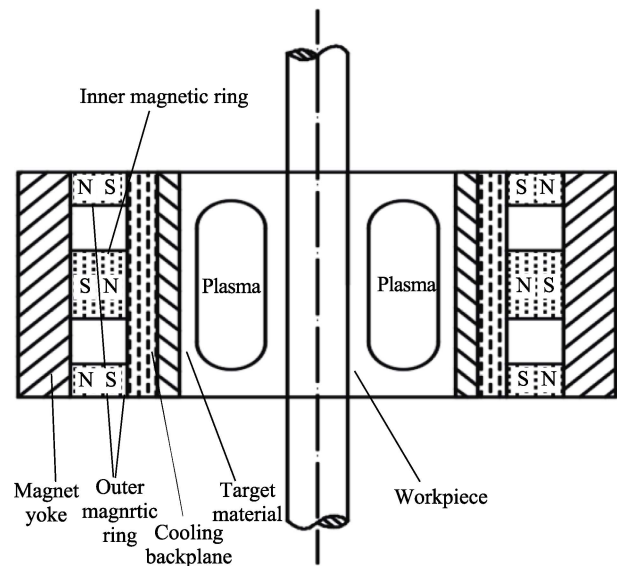


图 1 圆筒式磁控溅射靶初始结构剖面示意图  
Fig.1 Schematic diagram of initial structure section of cylindrical magnetron sputtering target

表 1 圆筒式磁控溅射靶初始结构参数  
Tab.1 Initial structure parameters of cylindrical magnetron sputtering target

Component	Internal diameter/mm	Outside diameter/mm	Height/mm
Target material	230	240	136
Inner magnetic ring	250	290	30
Outer magnetic ring	250	290	15
Magnet yoke	290	310	136

1.3 磁场仿真一般过程

研究中主要利用 COMSOL 软件中磁场、无电流模块对圆筒式磁控溅射靶初始结构的磁感应强度和分布进行模拟。基于 COMSOL 的磁场仿真分为以下

- 几个步骤。
- 1) 添加仿真接口: “静磁无电流”, 选择“稳态”研究类型。
  - 2) 建立物理模型: 由于背板材料对应的相对磁导率等于 1, 约等于空气的相对磁导率, 因此在建模时可以不画出背板的结构, 用空气来代替, 物理简化截面模型如图 2 所示, 其中  $d_1$  为冷却背板厚度,  $h_1$  为内磁环的轴向高度,  $\Delta r_1$  为内磁环的径向宽度,  $h_2$  为外磁环的轴向高度,  $\Delta r_2$  为外磁环的径向宽度,  $d_2$  为内磁环与外磁环间距; 三维物理模型如图 3 所示。

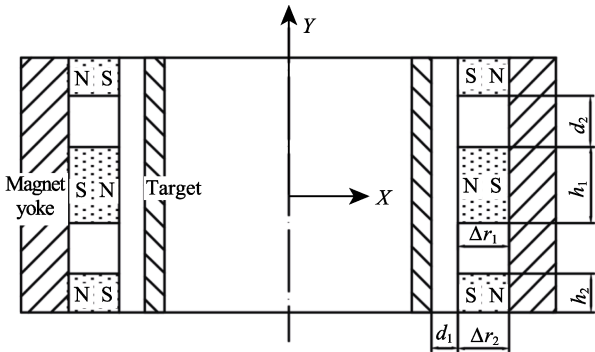


图 2 物理简化截面模型  
Fig.2 Physical simplified section model

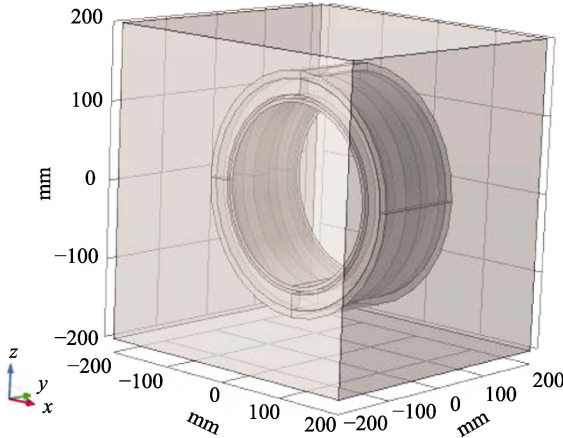


图 3 三维物理模型  
Fig.3 Three-dimensional physical model

- 3) 设置材料属性: 材料属性设置主要是设置相对磁导率, 包括对靶材、背板、外磁环、内磁环、磁轭和空气各个结构的设置, 相关材料属性明细参照表 2。
- 4) 施加边界条件: 磁通量守恒设置外磁环和内磁环的矫顽磁力为相反的数值, 磁钢极化方向选择  $x$  轴方向, 矫顽磁力大小为 400 kA/m。
- 5) 网格划分: 首先对长方体空气包围区域进行网格粗划分, 再对整个圆筒式磁控溅射靶的各个结构进行精细的有限元网格划分, 最终有限元网格划分结果如图 4 所示。
- 6) 计算磁场与后处理: 由于此前就已经选择了磁场无电流物理接口, 研究类型为稳态, 所以软件会自动根据所选物理接口对应的数学模型来求解计算。

表2 圆筒式磁控溅射靶各部分材料和参数  
Tab.2 Material and parameters of cylindrical magnetron sputtering target

Component	Material	Parameter
Target material	Al	Relative permeability: 1
Cooling back plate	Non-magnetic aluminum alloy	Relative permeability: 1
Outer magnetic ring	NdFeB	Relative permeability: 1.05; Coercive force: 400 kA/m
Inner magnetic ring	NdFeB	Relative permeability: 1.05; Coercive force: 400 kA/m
Magnet yoke	Fe	Relative permeability: 4 000
Air		Relative permeability: 1

得到靶面上方 3 mm 处不同位置水平磁通密度  $B_y$  分量、磁场分布云图、密度矢量以及磁力线分布,如图 5 所示。图 5 的仿真结果均符合圆筒式磁控溅射靶的对称结构,与理想的靶面磁场分布相一致。从图 5a 可以看出,靶面上方的  $B_y$  虽然强度大小符合设计要

求,但是磁感应强度分布的均匀性却比较差,这会降低靶材的利用率,增加镀膜成本,因此还需进一步优化设计。

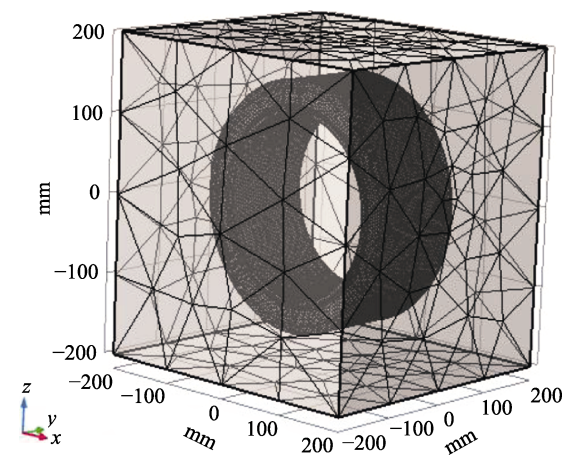


图4 有限元网格划分  
Fig.4 Finite element mesh generation

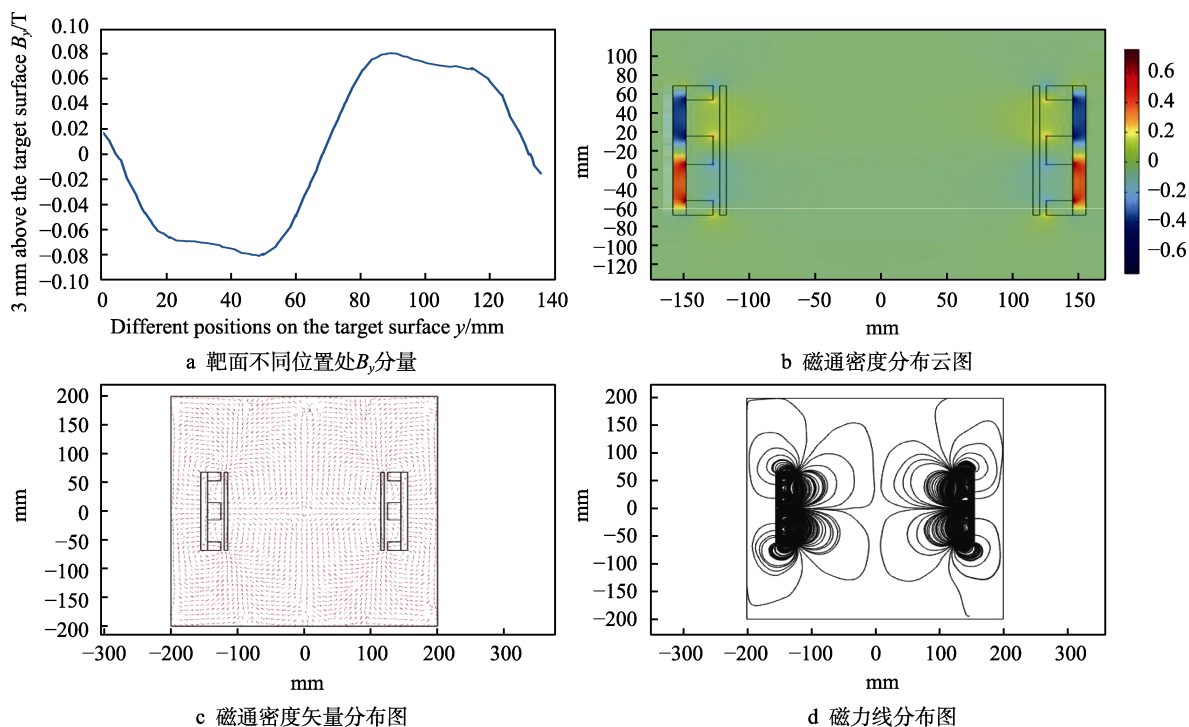


图5 磁场仿真结果

Fig.5 Magnetic field simulation results: a)  $B_y$  component at different positions of target surface; b) distribution cloud map of magnetic flux density; c) vector distribution of magnetic flux density; d) magnetic field line distribution

## 2 圆筒式磁控溅射靶的磁场研究与设计

结合圆筒式磁控溅射靶物理模型,磁环的解析计算模型如图 6 所示,取内磁环一块足够小的闭区域,根据磁场等效磁荷法<sup>[26]</sup>,永磁体沿  $x$  轴磁化方向均匀极化后只在表面存在面磁荷,空间中一场点  $P$  的标量

磁位  $V_{mi}$  与面磁荷密度  $\rho_{mi}$  的关系为:

$$V_{mi} = \oint_S \frac{1}{4\pi R} \rho_{mi} dS \quad (7)$$

式中:  $S$  是永磁体闭区域的边界面,  $R$  是从源点到场点的距离。进而可得磁感应强度为:

$$B_i = \mu H_i = \oint_S \frac{\mu \rho_{mi}}{4\pi} \left( -\nabla \frac{1}{R} \right) dS = \oint_S \frac{\mu \rho_{mi}}{4\pi} \frac{R}{R^3} dS \quad (8)$$



对于整个内磁环, 根据叠加原理有:

$$B_2 = \sum_{i=1}^n \left( \oint_S \frac{\mu \rho_{mi}}{4\pi} \frac{R}{R^3} dS \right) \quad (9)$$

同理可得 2 个外磁环在  $P$  点处的磁感应强度分别为  $B_1$ 、 $B_3$ , 则溅射靶在空间某一点  $P$  位置的总磁感应强度为  $B = B_1 + B_2 + B_3$ ,  $B$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量记为  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ , 则可得:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (10)$$

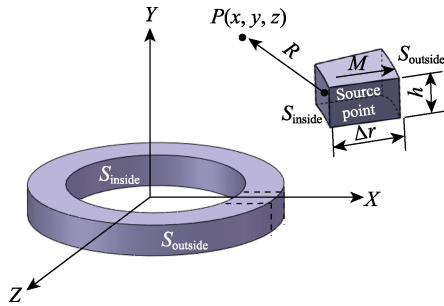


图 6 永磁体磁场积分几何示意图  
Fig.6 Schematic diagram for magnetic field integral geometry of permanent magnet

由于靶面上方的水平磁感应强度大小和分布情况与  $R$ 、 $S$  有关, 受靶的结构参数影响, 故本文将利用控制变量法结合前面所提及的圆筒式磁控溅射靶的物理简化截面模型详细研究靶的结构参数影响情况。在靶初始结构中,  $d_1=5$  mm,  $h_1=30$  mm,  $\Delta r_1=20$  mm,  $h_2=15$  mm,  $\Delta r_2=20$  mm,  $d_2=38$  mm, 本节均以靶面上方 3 mm 处的水平磁感应强度  $B_y$  分布为研究对象。

## 2.1 背板厚度对磁场的影响

控制  $h_1$ 、 $\Delta r_1$ 、 $h_2$ 、 $\Delta r_2$ 、 $d_2$  不变, 研究背板厚度  $d_1$  的变化对水平磁感应强度的影响。 $d_1$  分别取 5、9、13、17 mm 时, 结果如图 7 所示。从图中可以看出, 随着  $d_1$  的增加, 磁铁源点与场点之间的距离  $R$  整体增大, 从而造成靶面上方  $B_y$  不断减小,  $d_1$  为 5~9 mm 时均匀性由差变好,  $d_1=13$  mm 时, 水平磁感应强度  $B_y$  大约是 0.05 T, 再增加  $d_1$  则又变差。这是由于刚开始场点靠近磁铁, 内磁环周围场点的  $B_y$  大于外磁环,

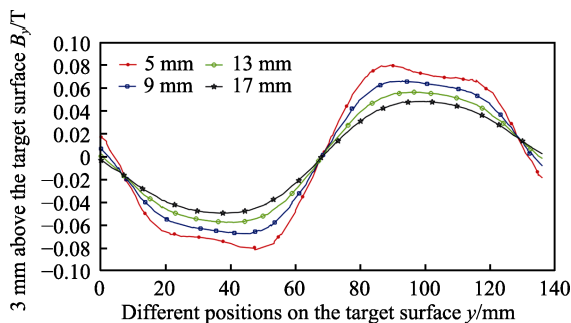


图 7 背板不同厚度下的水平磁感应强度分布  
Fig.7 Horizontal magnetic induction distribution under different thickness of backplane

受其影响作用较大而分布不均; 当  $d_1$  增加时, 场点处于均匀真空介质, 磁铁的磁场作用减弱, 从而使磁场分布变得均匀; 再增加  $d_1$ , 由于  $R^3$  的作用更加明显, 导致内外磁环磁场中间区域大于边缘区域, 均匀性变差。

## 2.2 内磁环轴向高度对磁场的影响

控制  $d_1$ 、 $\Delta r_1$ 、 $h_2$ 、 $\Delta r_2$ 、 $d_2$  不变, 只改变内磁环轴向高度  $h_1$ , 在 18~34 mm 内以 4 mm 的间隔取 22、26、30 mm, 模拟结果如图 8 所示。增加  $h_1$ , 产生磁荷的源面积  $S$  增加, 从而使水平磁感应强度  $B_y$  增大, 大约从 0.05 T 增加到 0.08 T; 当  $h_1$  增加到  $h_2$  2 倍及以上时, 由于沿  $y$  轴方向场点到内磁环的距离  $R$  逐渐增大, 靠近内磁环区域的  $B_y$  增加幅度大于外端, 即图中靶面 40~60 mm、80~100 mm 比 20~40 mm、100~120 mm 范围内  $B_y$  增加的幅度大, 导致磁感应强度分布不均匀。另外,  $h_1$  的增加会使靶面维持在较大磁感应强度的区域向外端延伸, 当  $h_1$  在 18~22 mm 的范围内时, 磁感应强度的均匀性较为理想。

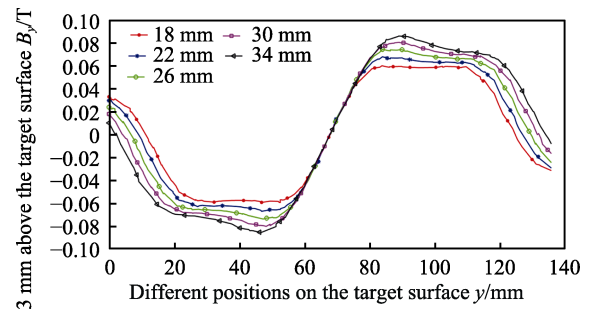


图 8 内磁环轴向不同高度的水平磁感应强度分布  
Fig.8 Horizontal magnetic induction at different heights in the axial direction of the inner magnetic ring

## 2.3 内磁环径向宽度对磁场的影响

当只改变内磁环径向宽度  $\Delta r_1$  时, 磁感应强度分布如图 9 所示。随着  $\Delta r_1$  依次以 4 mm 的间距增加时, 内磁环径向宽度明显大于外磁环, 形成中间宽、上下窄的“凸”字形结构, 造成存在磁荷的外磁环边界面远离场点, 即  $R$  增大, 使在 10~40 mm、100~130 mm

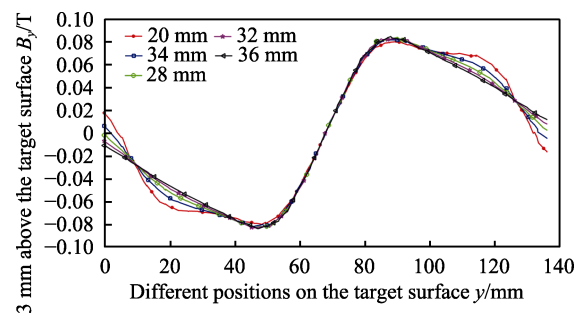


图 9 内磁环不同径向宽度的水平磁感应强度分布  
Fig.9 Horizontal magnetic field intensity distribution at different radial width of inner magnetic ring

区域处的  $B_y$  不断减小, 而且随着内外磁环径向宽度差增大,  $R^3$  的影响作用增大, 线型将变得陡峭和锋利, 这样会使靶材局部刻蚀速度增加, 减少靶材使用寿命。在 50~90 mm 的区域内改变  $\Delta r_1$  对  $B_y$  的大小和均匀分布没有显著影响。

## 2.4 外磁环轴向高度对磁场的影响

在只改变外磁环轴向高度  $h_2$  的情况下磁场模拟结果如图 10 所示, 由图可知, 随着  $h_2$  从 10、12、15、18 mm 增加到 22 mm 时, 外磁环边界曲面  $S$  同时增加, 则  $B_1$ 、 $B_3$  也增大, 使靶面上 0~45 mm 和 85~136 mm 区域内的  $B_y$  不断增大。由于外磁环附近的场点到外磁环各源点的距离比内磁环附近的场点到外磁环各源点的距离  $R$  小, 所以外磁环附近区域  $B_y$  增加的速度快于内磁环, 磁感应强度分布的均匀性逐渐变好。当  $h_2$  为 22 mm 时, 外磁环附近的  $B_y$  曲线会出现较小的峰值, 继续增加  $h_2$  会影响水平磁感应强度在这一区域的均匀性, 使靶材两边的刻蚀速度比中间区域的刻蚀速度快, 降低靶材的利用率。

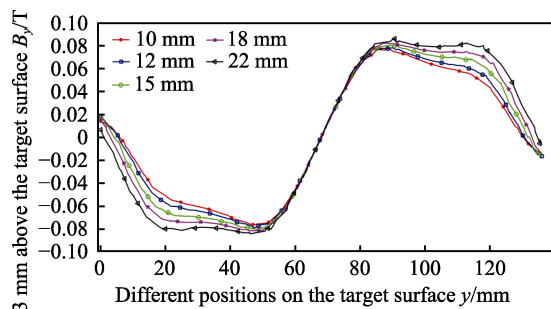


图 10 外磁环轴向不同高度的水平磁感应强度分布  
Fig.10 Horizontal magnetic induction distribution at different axial heights of the outer magnetic ring

## 2.5 外磁环径向宽度对磁场的影响

只改变外磁环径向宽度  $\Delta r_2$  的磁场模拟结果分布如图 11 所示, 随着  $\Delta r_2$  从 20 mm 增加到 36 mm 时, 外磁环的径向宽度大于内磁环径向宽度, 形成上下宽、中间窄的“凹”字形结构。由于内磁环源面上各源点到场点的距离  $R$  增大, 使靶面上 15~68 mm 和

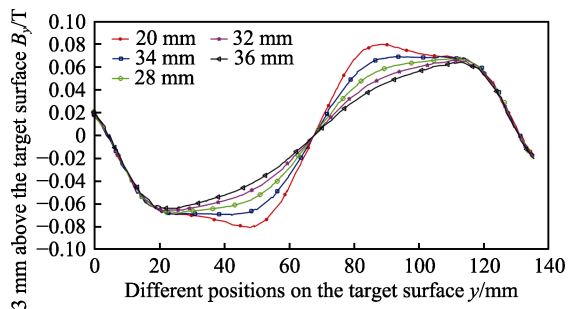


图 11 外磁环不同径向宽度的水平磁感应强度分布  
Fig.11 Horizontal magnetic induction distribution at different radial width of the outer magnetic ring

68~115 mm 区域内的  $B_y$  逐渐减小。当内外磁环径向宽度差逐渐增加时, 靠近内磁环区域的  $B_y$  下降速度加快, 导致曲线逐渐变得较为锋利,  $B_y$  的最大值由靠近靶中心向靶面两端转移。当外磁环径向宽度取 24 mm 时, 靶面的水平磁感应强度分布较为理想。

## 2.6 内外磁环间距对磁场的影响

只改变内外磁环的间距  $d_2$ , 分析  $d_2$  的变化对靶面  $B_y$  的影响, 如图 12 所示。随着  $d_2$  从 20 mm 增加至 60 mm, 内外磁环源面内源点到场点的距离  $R$  增大, 使  $B_y$  值减小, 大约从 0.1 T 减小到 0.04 T; 由于  $d_2$  增加引起靶面磁场分布区域在轴向上向靶材外端延伸拓宽, 均匀性在一定程度上有所变好, 有利于改善靶面磁场分布均匀性。但当  $d_2$  增加至 50 mm 以后, 由于中间区域至内外磁环的距离  $R$  增大, 导致此区域内  $B_y$  值减小, 低于靠近磁环端区域  $B_y$ , 曲线出现“波谷”, 此时靶材两边的刻蚀深度比中间刻蚀深度大, 不利于溅射过程中均匀刻蚀。

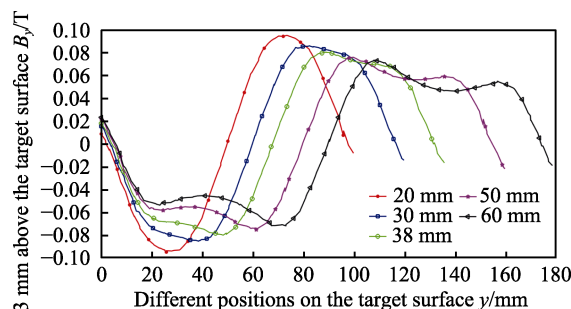


图 12 内外磁环不同间距的水平磁感应强度分布  
Fig.12 Horizontal magnetic induction distribution at different spacing between inner and outer magnetic rings

## 2.7 圆筒式磁控溅射靶的磁场优化设计

圆筒式磁控溅射靶结构设计中, 最重要的参数是水平磁感应强度  $B_y$  的设计, 水平磁感应强度值增大, 溅射速率也会增加, 但溅射速率太大会使刻蚀深度加深, 降低靶材的使用寿命; 水平磁感应强度值太小会引起溅射功率变低, 薄膜的沉积速率下降。因此, 优化出理想的水平磁感应强度大小及其分布, 有利于提高靶材利用率, 保证磁控溅射靶正常工作<sup>[27]</sup>。通过研究与分析靶结构参数变化对磁场分布的影响规律, 发现当背板厚度  $d_1$  取 13 mm 时, 水平磁感应强度  $B_y$  大小约为 0.05 T; 外磁环轴向高度  $h_2$  取 20 mm、 $\Delta r_2$  径向宽度取 22 mm、内磁环轴向高度  $h_1$  取 22 mm、径向宽度  $\Delta r_1$  取 20 mm 时, 水平磁感应强度分布比较均匀。 $\Delta r_2$  不取上文结论中的 24 mm 是因为在最大  $B_y$  处曲线存在一定斜度, 还需进一步优化。内外磁环间距  $d_2$  取 50 mm 时, 磁场仿真优化结果如图 13 所示, 靶面最大  $B_y$  为 0.04 T, 在 30~55 mm 和 100~125 mm 区域内均匀分布, 靶材利用率达 40%, 符合磁控溅射磁场设计要求。

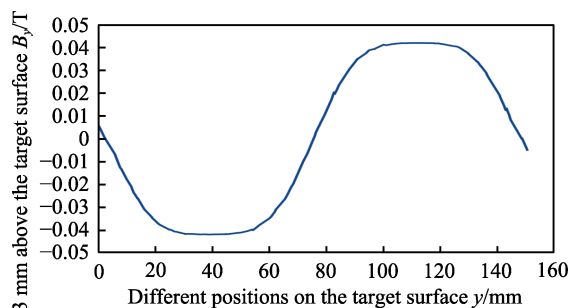
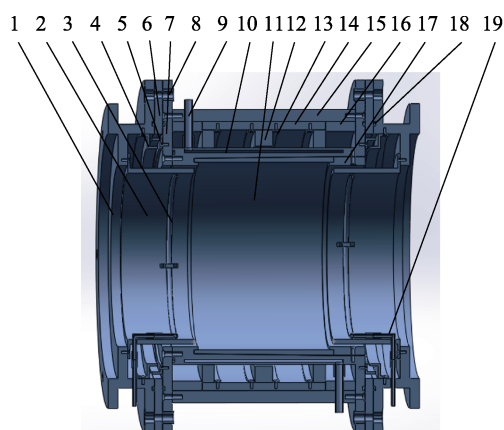


图 13 圆筒式磁控溅射靶磁场最终优化结果  
Fig.13 Magnetic field optimization of cylindrical magnetron sputtering target

### 3 总体机械结构设计

在圆筒式磁控溅射靶初始结构设计基础上,通过磁场仿真研究,依据优化出的理想磁场结构模型,设计的圆筒式磁控溅射靶总体机械结构如图 14 所示。采用间接水冷的方式,在背板内部设计一个 3 mm 厚的水箱作为冷却结构,避免磁铁长时间与水直接接触而被腐蚀。采用非导磁铝合金材料,其强度高、耐腐蚀。为使靶材与冷却背板拆卸方便,背板内壁与靶材外壁采用  $C$  为 1/43 的锥度设计。由于靶外壳与阴极相接,连接法兰与阳极相接,因此靶外壳与连接法兰之间必须通过绝缘片绝缘。绝缘片采用聚四氟材料。上下档圈是防止镀膜过程中靶材原子溅射到绝缘结构上而使阴极与阳极相接;为保证镀膜的纯度,在靶材上方设计屏蔽罩以防止靶材以外的其他零件材料溅射到基片上。进气环的作用是在镀膜过程中将氩气充入镀膜室,为保证磁控溅射正常工作,整个靶需要密封元件进行密封,使圆筒内部保持真空状态。密封部位包括靶壳的左端盖与水冷背板的接触部分,绝缘片与左端盖、水冷背板和左右连接法兰之间密封。



1—连接法兰; 2—屏蔽罩; 3—进气环; 4—上挡圈; 5—下挡圈;  
6—绝缘片; 7—端盖; 8—绝缘套; 9—进水管; 10—水冷背板;  
11—靶材; 12—磁环; 13—磁钢定位环; 14—磁轭; 15—靶壳  
16—支撑块; 17—限位环; 18—密封圈; 19—进气软管

图 14 圆筒式磁控溅射靶机械结构剖面图  
Fig.14 Section of mechanical structure of cylindrical magnetron sputtering target

整个靶高 384 mm, 最大直径为 432 mm, 结构为圆筒形状, 结构简单可靠、拆装方便。

### 4 结论

1) 通过对靶面磁场的仿真研究, 发现随着冷却背板厚度  $d_1$ 、内磁环的径向宽度  $\Delta r_1$ 、外磁环的径向宽度  $\Delta r_2$ 、内外磁环间距  $d_2$  的增加, 导致  $R$  增大, 使靶面水平磁感应强度减小; 而内磁环轴向高度  $h_1$  和外磁环轴向高度  $h_2$  的增加, 导致  $S$  增加, 使靶面水平磁感应强度增加; 改变外磁环轴向高度  $h_2$  与内外磁环间距  $d_2$  能改善靶面磁场均匀分布的范围。

2) 通过对内外磁环结构参数仿真研究, 优化出了符合理想靶面的水平磁感应强度值, 大小为 0.04 T, 分布均匀区域约为 40%, 主要结构参数有: 外磁环内径 266 mm, 外径 310 mm, 厚度 20 mm; 内磁环内径 270 mm, 外径 310 mm, 厚度 22 mm; 内外磁环间距 50 mm; 冷却背板厚度 13 mm。

3) 设计了一款用于实现圆柱形工件外表面镀膜的新型圆筒式磁控溅射靶结构装置, 整个靶高 384 mm, 最大直径为 432 mm, 为后续此类结构溅射靶的研究提供了参考依据。

### 参考文献:

- [1] 王俊, 郝赛. 磁控溅射技术的原理与发展[J]. 科技创新与应用, 2015(2): 35.  
WANG Jun, HAO Sai. Principle and Development of Magnetron Sputtering Technology[J]. Technology Innovation and Application, 2015(2): 35.
- [2] 余东海, 王成勇, 成晓玲, 等. 磁控溅射镀膜技术的发展[J]. 真空, 2009, 46(2): 19-25.  
YU Dong-hai, WANG Cheng-yong, CHENG Xiao-ling, et al. Recent Development of Magnetron Sputtering Processes[J]. Vacuum, 2009, 46(2): 19-25.
- [3] 张恒, 严由春, 姜文, 等. 磁控溅射镀膜技术在铝合金制品装饰镀中的应用[J]. 现代制造工程, 2018(6): 86-90.  
ZHANG Heng, YAN You-chun, JIANG Wen, et al. Application of Magnetron Sputtering Technology on Aluminum Alloy Decoration Coating[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(6): 86-90.
- [4] 龙慧荣. 直流磁控溅射镀膜在不锈钢刀片涂层技术中的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(32): 40.  
LONG Hui-rong. Application of DC Magnetron Sputtering Coating in Coating Technology of Stainless Steel Blade [J]. Technology Innovation and Application, 2013(32): 40.
- [5] 黄琼俭, 周永福. 非平衡磁控溅射技术在薄膜制备中的应用[J]. 生物技术世界, 2013, 10(11): 129.  
HUANG Qiong-jian, ZHOU Yong-fu. Application of Unbalanced Magnetron Sputtering Technology in Thin

- Film Preparation[J]. Biotech World, 2013, 10(11): 129.
- [6] 白力静, 李玉庆, 肖继明, 等. 闭合场非平衡磁控溅射离子镀技术在切削刀具上的应用[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(1): 20-23.  
BAI Li-jing, LI Yu-qing, XIAO Ji-ming, et al. Closed Field Unbalanced Magnetron Sputter Iron Plating Technique and It's Application to Cutting Tools[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(1): 20-23.
- [7] 张燕梁, 戈超, 张俊秋, 等. 磁控溅射法制备耐冲蚀钛合金复合涂层研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2012, 24(2): 16-19, 26.  
ZHANG Yan-liang, GE Chao, ZHANG Jun-qiu, et al. Recent Studies on Erosion Resistance Titanium Alloy Composite Coatings by Magnetron Sputtering Method[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012, 24(2): 16-19, 26.
- [8] 黄琥, 栾伟玲, 涂善东. 不同磁场分布在磁控溅射制膜技术中的应用[J]. 材料导报, 2007, 21(7): 48-51.  
HUANG Hu, LUAN Wei-ling, TU Shan-dong. Applications of Different Magnetic Field Distributions in Magnetron Sputtering Technology[J]. Materials Review, 2007, 21(7): 48-51.
- [9] 李云奇, 徐成海, 关奎之, 等. 磁控溅射镀膜技术在建材及民用工业中的应用[J]. 真空, 1994, 31(2): 37-42.  
LI Yun-qi, XU Cheng-hai, GUAN Kui-zhi, et al. Application of Magnetron Sputtering Technology in Architecture and Civil Industry[J]. Vacuum, 1994, 31(2): 37-42.
- [10] 李峰, 陈峥. 脉冲直流磁控溅射技术在光盘生产中的应用研究[J]. 记录媒体技术, 2009, 7(1): 38-41.  
LI Feng, CHEN Zheng. Application of Pulsed DC Magnetron Sputtering in Optical Disc Production[J]. China Mediatech, 2009, 7(1): 38-41.
- [11] 钱文富, 曹兴进, 卢龙, 等. 表面处理和涂层技术在齿轮上的应用初探[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(2): 1-4, 15.  
QIAN Wen-fu, CAO Xing-jin, LU Long, et al. Surface Treatment and Coating Technologies on Gears[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005, 28(2): 1-4, 15.
- [12] 杨武保, 范松华, 张谷令, 等. 非平衡磁控溅射法类金刚石薄膜的制备及分析[J]. 物理学报, 2005, 54(10): 4944-4948.  
YANG Wu-bao, FAN Song-hua, ZHANG Gu-ling, et al. Investigation of Diamond-Like-Carbon Films Prepared by Unbalanced Magnetron Sputtering[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(10): 4944-4948.
- [13] 寇生中, 程艳玲, 郭燕. 磁控溅射法在生物材料表面制备羟基磷灰石涂层的研究现状[J]. 材料导报, 2006, 20(6): 107-110.  
KOU Sheng-zhong, CHENG Yan-ling, GUO Yan. The Present Situation of Hydroxyapatite (HA) Coatings on Biomaterial Substrate by Magnetron Sputtering[J]. Materials Review, 2006, 20(6): 107-110.
- [14] 朱建明, 戴晋福. 电磁屏蔽膜设备的开发及应用[J]. 真空电子技术, 2007(3): 73-74.  
ZHU Jian-ming, DAI Jin-fu. Development and Application of the Equipment for Electromagnetic Shielding Films[J]. Vacuum Electronics, 2007(3): 73-74.
- [15] 杨武保. 磁控溅射镀膜技术最新进展及发展趋势预测[J]. 石油机械, 2005, 33(6): 73-76.  
YANG Wu-bao. Latest Progress and Development Trend Prediction of Magnetron Sputtering Coating Technology[J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(6): 73-76.
- [16] ISEKI T. Target Utilization of Planar Magnetron Sputtering Using a Rotating Tilted Unbalanced Yoke Magnet[J]. Vacuum, 2009, 84(2): 339-347.
- [17] BERISHVILI Z V, GADAKHABADZE I I, KORDZAKHIA I I, et al. Planar Magnetron Sputtering Device: A New Generation of Magnetron Sputtering Design and Technology[J]. Journal of Physical Science and Application, 2017, 7(5): 28-39.
- [18] BARTZSCH H, FRACH P, GOEDICKE K, et al. Different Pulse Techniques for Stationary Reactive Sputtering with Double Ring Magnetron[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120-121: 723-727.
- [19] 乔宏, 李灿伦, 倪俊, 等. 具有自调节磁场结构的磁控溅射靶、镀制薄膜装置及方法: CN112048705A[P]. 2020-12-08.  
QIAO Hong, LI Can-lun, NI Jun, et al. Magnetron Sputtering Target with Self-Adjusting Magnetic Field Structure, and Film Plating Device and Method: CN112048705A[P]. 2020-12-08.
- [20] 关奎之. 旋转式圆柱形磁控溅射靶的磁场计算[J]. 真空, 1997, 34(3): 5-11.  
GUAN Kui-zhi. Magnetic Field Calculation of Revolving Cylindric Magnetron Sputtering Target[J]. Vacuum, 1997, 34(3): 5-11.
- [21] 张以忱. 第十九讲 真空溅射镀膜[J]. 真空, 2016, 53(6): 78-80.  
ZHANG Yi-chen. Lecture 19 Vacuum Sputtering Coating[J]. Vacuum, 2016, 53(6): 78-80.
- [22] 李芬, 朱颖, 李刘合, 等. 磁控溅射技术及其发展[J]. 真空电子技术, 2011(3): 49-54.  
LI Fen, ZHU Ying, LI Liu-he, et al. Review on Magnetron Sputtering Technology and Its Development[J]. Vacuum Electronics, 2011(3): 49-54.
- [23] 韩成明, 薛道荣, 李峰, 等. 内腔式磁控溅射设备与方法: CN110205595A[P]. 2019-09-06.  
HAN Cheng-ming, XUE Dao-rong, LI Feng, et al. Inner Cavity Type Continuous Magnetron Sputtering Equipment and Method: CN110205595A[P]. 2019-09-06..
- [24] 宋浩, 黄彦, 邓志扬, 等. 几组特殊形状永磁体的磁场及梯度 COMSOL 分析[J]. 大学物理实验, 2013, 26(4): 3-7.  
SONG Hao, HUANG Yan, DENG Zhi-yang, et al. Magnetic Field and Gradient Analysis by COMSOL Multiphysics for Several Groups of Special Shape Permanent Magnet[J]. Physical Experiment of College,



- 2013, 26(4): 3-7.
- [25] 张以忱. 第十九讲 真空溅射镀膜[J]. 真空, 2018, 55(1): 68-72.
- ZHANG Yi-chen. Lecture 19 Vacuum Sputtering Coating[J]. Vacuum, 2018, 55(1): 68-72.
- [26] 李景天, 宋一得, 郑勤红, 等. 用等效磁荷法计算永磁体磁场[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 1999, 19(2): 33-36.
- LI Jing-tian, SONG Yi-de, ZHENG Qin-hong, et al. Computation of the Magnetic Field of Permanent Magnet with Equivalent Magnetic Charge Method[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 1999, 19(2): 33-36.
- [27] 王维. 圆平面磁控溅射靶的磁场优化及刻蚀模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2009: 26-35.
- WANG Wei. Magnetic Field Optimization and Erosion Simulation of Circle Planar Magnetron Sputtering Target [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009: 26-35.

责任编辑: 万长清

(上接第 362 页)

- [14] YU Zhi-hua, ZHU Tian-xue, ZHANG Ji-chao, et al. Fog Harvesting Devices Inspired from Single to Multiple Creatures: Current Progress and Future Perspective[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(26): 2200359.
- [15] BAI Hao, WANG Lin, JU Jie, et al. Efficient Water Collection on Integrative Bioinspired Surfaces with Star-Shaped Wettability Patterns[J]. Advanced Materials, 2014, 26(29): 5025-5030.
- [16] YANG Xiao-long, SONG Jin-long, LIU Jun-kai, et al. A Twice Electrochemical-Etching Method to Fabricate Superhydrophobic-Superhydrophilic Patterns for Biomimetic Fog Harvest[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 8816.
- [17] LI Bei, LI Kai-xuan. Droplet Wettability and Repellency on Fluorinated Lubricant-Infused Surfaces: A Molecular Dynamics Study[J]. Applied Surface Science, 2022, 598: 153782.
- [18] DAI Xian-ming, SUN Nan, NIELSEN S O, et al. Hydrophilic Directional Slippery Rough Surfaces for Water Harvesting[J]. Science Advances, 2018, 4(3): eaaq0919.
- [19] MAHMOOD A, CHEN Shuai, CHEN Lei, et al. Unidirectional Transport of Water Nanodroplets Entrapped Inside a Nonparallel Smooth Surface: A Molecular Dynamics Simulation Study[J]. RSC Advances, 2019, 9(72): 41984-41992.
- [20] XU Bo, CHEN Zhen-qian. Molecular Dynamics Study of Water Vapor Condensation on a Composite Wedge-Shaped Surface with Multi Wettability Gradients[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2019, 105: 65-72.
- [21] GAO Shan, LIU Wei, LIU Zhi-chun. Tuning Nanostructured Surfaces with Hybrid Wettability Areas to Enhance Condensation[J]. Nanoscale, 2019, 11(2): 459-466.
- [22] GUO Lin, TANG G H, KUMAR S. Dynamic Wettability on the Lubricant-Impregnated Surface: From Nucleation to Growth and Coalescence[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(23): 26555-26565.
- [23] XU W, LAN Z, PENG B L, et al. Effect of Surface Free Energies on the Heterogeneous Nucleation of Water Droplet: A Molecular Dynamics Simulation Approach[J]. The Journal of Chemical Physics, 2015, 142(5): 054701.
- [24] LI Wen, MA Xiao-jing, XU Jin-liang, et al. Effects of Base Angle and Wettability of Nanostructures on Droplet Wetting Behaviors[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(12): 126101.
- [25] ZHANG Fu-jian, CHEN Yue, GAO Xiang, et al. Unidirectional Self-Driving of Water Droplets on Monolayer Graphene-Covered Wedge-Shaped Copper Substrate[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(20): 200202.
- [26] GUO Lin, TANG G H, KUMAR S. Droplet Morphology and Mobility on Lubricant-Impregnated Surfaces: A Molecular Dynamics Study[J]. Langmuir, 2019, 35(49): 16377-16387.
- [27] CHOO S, CHOI H J, LEE H. Water-Collecting Behavior of Nanostructured Surfaces with Special Wettability[J]. Applied Surface Science, 2015, 324: 563-568.
- [28] HOU You-min, YU Miao, CHEN Xue-mei, et al. Recurrent Filmwise and Dropwise Condensation on a Beetle Mimetic Surface[J]. ACS Nano, 2015, 9(1): 71-81.

责任编辑: 马梦瑶