

新型双弯曲磁过滤阴极真空电弧沉积系统的磁场模拟计算

李洪波 孙丽丽 吴国松 代伟 周毅 汪爱英*

(中国科学院宁波材料技术与工程研究所表面工程与再制造事业部 宁波 315201)

Simulation of Magnetic Field Distribution in Doubly-Bent Filter Cathode of Vacuum Arc Film Growth Setup

Li Hongbo, Sun Lili, Wu Guosong, Dai Wei, Zhou Yi, Wang Aiying*

(Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract The magnetic field distributions around the arc source in the 45° doubly bent filtering cathode vacuum arc (FCVA) film growth system and its impacts on the plasma beam transport and stability of arc spot were modeled and simulated with ANSYS software package. The simulated results show that under optimized magnetic field distribution, all of the 111 carbon ions, shooting out in different directions, are capable of smoothly passing the doubly-bent magnetic filter, and successfully touching down on the substrate. Interesting finding is that if a permanent magnet with a coercive force of 600 kA/m, is installed behind the arc cathode, in such a way that its field opposes to that in the bent tube, the resultant magnetic field distribution improves the stability of arc spots with more benefits, such as longer arc spot lifetime, higher deposition rate, more uniform target sputtering, and better tetrahedral amorphous carbon (ta-C) films.

Keywords Double bent FCVA, Magnetic field distribution, Finite element method, ta-C film

摘要 本文用 ANSYS 软件对新型的 45° 双弯曲磁过滤阴极真空电弧沉积系统中的磁场分布进行了模拟计算,并结合等离子体传输和电弧源弧斑运行稳定性进行了分析。在建立的数学模型基础上,分别研究了磁过滤弯管磁场空间分布对拟定的不同出射方向上的 111 个碳离子束的传输行为影响,和外加永久磁体对电弧源附近磁场空间分布的影响。结果表明,在优化的磁过滤弯管磁场空间分布情况下,111 个碳离子束流可全部通过磁过滤弯管,并高效传输到基材表面。当电弧靶源后部的外加永久磁体磁化方向与弯管上的磁化方向相反,且磁矫顽力大于 600 kA/m 时,阴极靶弧源附近的磁力线空间分布更利于控制阴极弧斑长时间运行稳定性,这对延长弧斑寿命、提高等离子体的沉积效率、提高靶材表面刻蚀均匀性和获得高性能的 ta-C 薄膜生长具有重要理论意义。

关键词 双弯曲磁过滤阴极电弧 磁场分布 有限元法 ta-C 薄膜

中图分类号: 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1672-7126.2010.06.09

类金刚石(diamond-like carbon, DLC)薄膜是碳的一种非晶亚稳态固体材料,主要由 sp^3 , sp^2 , sp^1 键混合组成。根据 sp^3 键和氢的含量多少, DLC 膜可进一步细分为:非晶碳(a-C)膜、氢化非晶碳(a-C:H)膜、四面体非晶碳(ta-C)膜和氢化四面体非晶碳(ta-C:H)膜^[1]。其中, ta-C 薄膜由于有高的 sp^3 键含量

和不含氢^[2],具有诸多优异性能,如高硬度、低摩擦系数、高热导率、良好热稳定性、高红外透过性、良好生物相容性和表面光滑等^[3-5],因而在数据存储、MEMS 微机电、机械、医疗、国防等领域有着广阔的应用前景^[1,6]。

目前,制备 ta-C 膜的主要方法有脉冲激光沉积

收稿日期: 2009-12-16

基金项目: 中国科学院重大装备研制项目(YZ200833)和浙江省自然科学基金项目(Y4100312)

*联系人: E-mail: aywang@nimte.ac.cn

(PLD)、质量选择离子束沉积 (MSIB)、阴极电弧 (FC-VA) 等。其中, 阴极真空电弧具有离化率高、离子能量高、沉积温度低、沉积速率高、膜基结合好等一系列优点^[7], 因此, 不仅是目前制备传统 TiN, C₆N, TiAlN 等超硬膜的主要方法, 也是制备 ta-C 膜最有前途的方法之一^[8-9]。但是在薄膜沉积过程中, 阴极弧放电剧烈, 不但产生高密度的等离子体, 而且产生大量的宏观粒子, 大颗粒与等离子体的协同沉积使得制备的薄膜表面粗糙、质量下降, 目前已成为电弧方法产业化进程中的瓶颈^[10]。通常, 减少宏观大颗粒的产生有三种途径: 一种是在弧源处利用外场控制电弧斑点的运动, 延长弧斑寿命, 减少因断弧而频繁启弧过程中融滴大颗粒的产生; 其次是利用磁过滤弯管装置, 在传播过程中将宏观大颗粒在一定程度上过滤掉, 避免其沉积到基体表面; 另外, 在沉积过程中, 利用其他离子束流辅助轰击基体, 也可减少大颗粒的协同沉积并增强膜基结合力, 提高薄膜质量。其中, 采用不同结构的磁过滤弯管, 被认为是去除宏观大颗粒的最有效的方法之一。在外加磁场作用下, 宏观大颗粒由于质量较大, 在惯性作用下直接溅射到管壁上被过滤掉, 而质量小的离子束则在电子束流形成的外力牵引下, 顺利通过磁过滤弯管到达基体表面获得高质量的 ta-C 薄膜生长。根据设计结构不同, 磁过滤器种类可有直线形、90°弯管形、膝形、S 形、60°弯管形等^[11]。磁过滤装置主要是通过合理设计的弯管结构, 结合优化磁场实现对等离子体的控制, 因此弧源处和弯管中的磁场分布对弧斑的稳定和等离子体的传输有重要影响。目前, 对于磁过滤阴极电弧制备多种薄膜材料的工艺研究方面已有大量报道, 但就磁过滤装置中的磁场分布理论研究还很少且不完善^[12-13], 个别报道仅给出了弯管中的磁场强度值^[14-15], 不仅未对磁场分布进行分析, 而且不同的磁过滤装置中的磁场分析结果对其他的磁过滤装置普适性也不强。

本文主要针对新型研制开发的 45°双弯曲磁过滤阴极真空电弧装置, 利用有限元 ANSYS 软件对磁过滤弯管中的磁场空间分布, 以及带电粒子碳离子束流在弯管中的传输情况进行了模拟计算, 并在优化磁场的磁过滤弯管中, 进一步分析了阴极电弧靶附件外加永磁体 (PM) 对弧源处磁场分布的影响。

1 理论模型

1.1 磁场计算模型

45°双弯曲磁过滤阴极真空电弧装置的几何模型如图 1 所示, 主要由四个磁过滤线圈 (SM, EM, BM, OM)、不锈钢双层水冷弯管、阴极电弧石墨靶和外加 PM 组成。

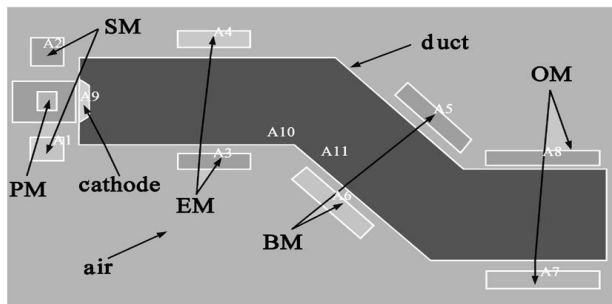


图 1 45°双弯曲的磁过滤阴极真空电弧的几何模型
Fig. 1 Schematic diagram of the 45° doubly bended FCVA system

由于磁过滤器有一对称平面, 可以将其简化为二维模型来进行模拟。电磁线圈中的电流为直流, 故所产生的磁场为稳恒磁场, 二维稳恒磁场需使用磁矢量势法。

在稳恒磁场条件下, 麦克斯韦方程组变为^[14]

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

这里 \mathbf{H} 为磁场强度矢量, \mathbf{B} 为磁感应强度矢量, \mathbf{J} 为电流密度矢量。

磁感应强度 \mathbf{B} 和磁矢量势 \mathbf{A} 之间的关系为

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3)$$

另外, 因物质的本构关系可表示为

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

此处, μ 为物质的磁导率。

将式(1)~式(4), 可得到磁矢量势 \mathbf{A} 满足的泊松方程

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (5)$$

线圈内部的磁感应强度通过磁矢量势 \mathbf{A} 的泊松方程(5)来计算。而在弯管、PM、阴极碳靶和空气区, 无传导电流, 式(5)就变为磁矢量势 \mathbf{A} 的拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0 \quad (6)$$

因为线圈、PM、不锈钢弯管、阴极碳靶和空气域均为非铁磁介质, 可在界面上施加磁矢量势的边值关系

$$\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}_2 - \nabla \times \mathbf{A}_1) = 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{n} \times \left(\frac{1}{\mu_1} \nabla \times \mathbf{A}_2 - \frac{1}{\mu_2} \nabla \times \mathbf{A}_1 \right) = \alpha \quad (8)$$

式中, n 为界面法向矢量, A_2, A_1, μ_1, μ_2 分别为界面两侧介质的磁矢量势和磁导率。 α 为界面上的线电流密度, 当线圈中施加一定的电流密度时, 线圈边界上 α 不为零。而在本文特定条件中, 不锈钢弯管、永磁体、阴极碳靶的边界上没有电流密度, α 值为零。

在整个模型的外边界, 即空气区边界上施加 Dirichlet 边界条件

$$A=0 \quad (9)$$

给定一定的电流密度 J , 结合式(5)~式(9)就可得到磁矢量势 A 的值, 进一步通过式(3)即可得到磁过滤弯管中的磁感应强度分布。

为获得较高的计算精度, 在二维单元中选择 8 节点的四方单元 Plane53, 线圈、空气和不锈钢弯管均为非导磁材料, 故相对磁导率为 1, PM 的相对磁导率为 1.2, 并假定 PM 的磁化曲线为线性的。

1.2 碳离子模型

根据文献[17]实验检测结果, 阴极真空电弧产生的碳等离子体中 C^+ 和 C^{2+} 的比例为 90:4。根据带电粒子在磁场中的回旋运动公式 $R = mv / (qB)$, 粒子带电价越高其回旋半径越小, 当磁过滤弯管中的磁场强度能控制单价碳离子不撞到弯管管壁的同时, 依据理论结果也必将实现对高价碳粒子的控制, 即高价碳粒子不会撞击到弯管壁上而顺利到达基体表面, 因此在本文的理论计算研究中, 仅以一价碳离子为例进行主要计算讨论, 其结果也可反映高价碳粒子的运动轨迹描述。单个碳离子所带电量为单位电荷电量: $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。碳离子相对于碳原子少一个电子, 且电子质量较小, 用碳原子的质量来近似代替碳离子的质量, 碳离子的质量为 $1.9926 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。根据伯克利实验室 Anders 的研究^[18], 真空电弧中碳离子的出射速度为 $1.73 \times 10^4 \text{ m/s}$ 。因此本文用图 2 所示的 111 个不同出射位置和角度的带电粒子(相邻粒子间的出射角度差为 5°)模拟了碳离子的传输。这里忽略了重力的影响、电子与碳离子间的相互作用、碳离子之间的碰撞, 并假定只要碳离子撞到管壁或有负的速度就不能通过磁过滤弯管。

2 结果与讨论

2.1 优化的弯管中的磁场分布

为了使分析过程简化, 首先考虑没有外加 PM 时的磁场空间分布。根据带电粒子在磁场中的回旋运动半径公式和研制开发的 45° 双弯曲磁过滤弯管

的尺寸, 为控制不同出射位置和出射方向的碳离子束流顺利通过磁过滤弯管, 不会因撞到管壁上而损失掉, 磁过滤弯管中心轴线区域的磁场经计算应大于 30.4 mT, 磁过滤弯管中靠近管壁的区域上的磁场强度则应大于 71.73 mT。

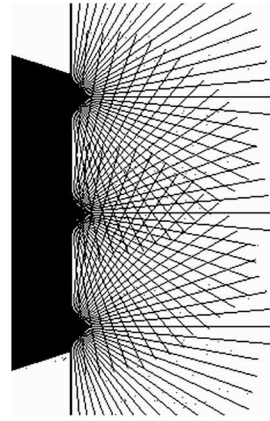


图2 模拟计算的 111 个不同出射位置和角度的碳离子束流模型示意图

Fig. 2 Schematics of the simulated 111 output carbon ions in various directions and positions in the doubly bended FCVA system

模拟计算发现, 当 Source 线圈、Extraction 线圈、Bending 线圈和 Outlet 线圈中的电流密度分别为 $18150/\text{area1} \text{ A} \cdot \square/\text{cm}^2$ 、 $15625/\text{area2} \text{ A} \cdot \square/\text{cm}^2$ 、 $15300/\text{area3} \text{ A} \cdot \square/\text{cm}^2$ 、以及 $18000/\text{area4} \text{ A} \cdot \square/\text{cm}^2$ 时, 碳离子束在弯管中的传输效率可高达 100%, 其中 area1 ~ area4 的具体值如表 1 所示。经过计算得到的优化磁过滤弯管中的磁场空间分布和等离子传输情况如图 3 所示。

表 1 各线圈的横截面面积

Tab. 1 Cross sectional area of the coils

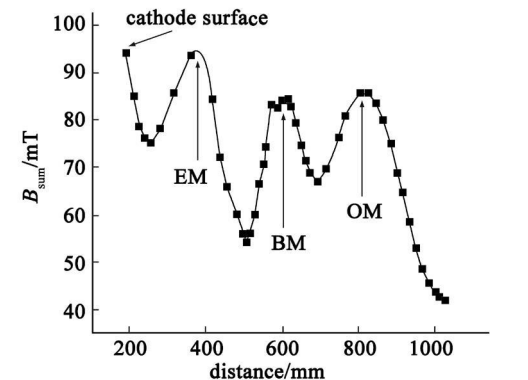
coils	1-SM	2-EM	3-BM	4-OM
cross-sectional area / 10^{-3} m^2	1.95	3.04	4.10	4.77

由图 3(a), (b)可知, 此条件下弯管中磁场分布在 43 ~ 108 mT 之间, 弯管轴线上的磁感应强度主要分布在 53 ~ 94 mT 之间。图 3(c)的碳离子传输效果示意图是由 111 个不同方向上的模拟计算的碳离子传输轨迹叠加在一起形成的, 示意图中颜色的深浅变化定性地表明了碳离子的密度变化, 颜色深代表碳离子的密度较大, 颜色浅代表碳离子的密度较小。

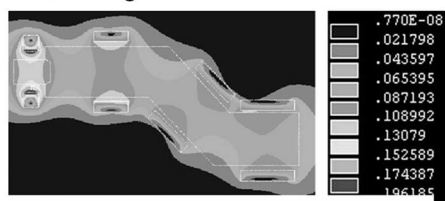
从图中可知, 在磁过滤弯管的中轴线附近碳离子的密度较大, 而在边缘区域碳离子的密度趋向减小。另外, 从图中可以看出, 在优化的磁场分布条件下, 模拟计算的 111 个不同方向上的碳离子束流均可顺利通过磁过滤弯管, 到达沉积基体表面。结果表明, 研制的该新型磁过滤阴极沉积弧源在优化磁场分布情况下, 不仅可有效实现宏观大颗粒的过滤, 同时也可实现高能等离子体的高效传输, 获得高的薄膜沉积速率。

极靶背后加入外加可控的 PM, 考虑了当外加 PM 的磁矫顽力为 1100 kA/m 时, PM 的磁化方向对阴极电弧源处磁场分布的影响。

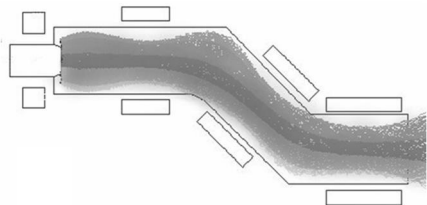
当 Source 线圈、Extraction 线圈、Bending 线圈和 Outlet 线圈中的电流密度分别设定为优化值 18150/area1 A·匝/cm²、15625/area2 A·匝/cm²、15300/area3 A·匝/cm²、18000/area4 A·匝/cm² 时, PM 的磁化方向与线圈的磁化方向相同和相反情况下的阴极表面磁力线空间分布情况与磁感应强度的分布分别如图 4 和图 5 所示。在做磁感应强度 Y 方向的分量图时, 规定指向阴极中心的方向为正方向。



(a) typical magnetic field distribution in the center axial of the filtering duct



(b) space distribution of the magnetic field in the developed double bend filtering duct



(c) transportation of the charged carbon ions in filtering duct

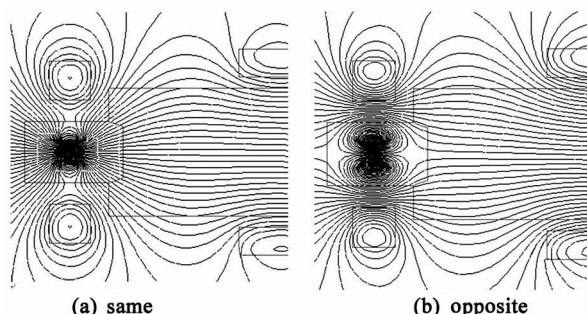
图 3 优化的磁场分布情况和碳离子传输情况

Fig. 3 Optimized magnetic field distribution and transportation of the charged carbon ions

优化的磁过滤弯管中磁场强度值偏高, 原因是在建立碳离子束模型时, 忽略了电子对碳离子的影响。电子在磁场中的回旋运动半径远小于碳离子的回旋运动半径, 电子对碳离子有静电吸引作用, 而使碳离子的运动半径变小, 使控制碳离子在磁过滤弯管中的传输所需的磁感应强度降低。

2.2 外加 PM 磁场方向对弧源处磁场分布的影响

为了稳定控制石墨阴极靶表面的电弧斑, 在阴



(a) same (b) opposite
图 4 永磁体的磁化方向与线圈的磁化方向相同和相反情况下阴极表面磁力线的空间分布

Fig. 4 Distributions of the magnetic flux lines on the surface of cathode in the case of the magnetization direction of permanent magnet and coils are in same and opposite direction

一般情况下, 在外加横向磁场条件下, 阴极电弧弧斑的运动主要有三种模式: 无规则运动、逆向运动和 Robson 漂移^[19-21]。无规则运动是指弧斑在阴极表面向外运动轨迹为无规则的树枝状, 仅仅与阴极材料的性质相关。逆向运动是指弧斑在外磁场的作用下的运动方向与用安培左手定则判断所受的安培力的方向是相反的。Robson 漂移则指当磁力线和阴极表面有一定张角时, 弧斑会向磁力线和阴极表面所形成的张角较大的方向运动。

从图 4 和图 5 中可以看出, 当 PM 的磁化方向与线圈的磁化方向相同时, 阴极表面的磁力线与阴极所成的张角方向向外。阴极表面上总的磁的感应强度 B_{sum} 分布是中间强边缘弱, 磁感应强度值分布在 130 ~ 150 mT 之间。y 方向的磁场强度 B_y 值均为负值, 大小在 -6.6 ~ 55 mT 之间, 即 B_y 均指向阴极边缘。根据 Robson 漂移理论可知, 在这样的磁场分布条件下, 弧斑会向阴极边缘运动, 不仅容易引起断弧, 而且也容易导致电弧侧移过程中对电弧源处硬件的短路, 表明这样的磁场分布不利于弧斑稳定。

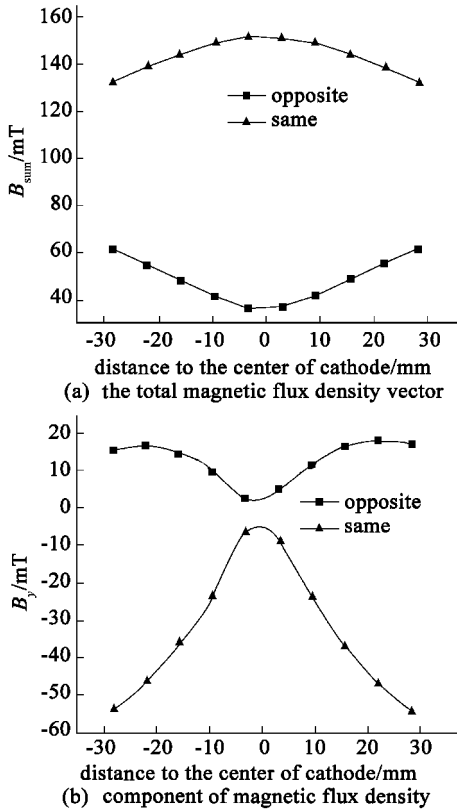


图5 PM的磁化方向与线圈的磁化方向相同和相反情况下, 阴极表面不同位置上的磁场强度空间分布情况
 Fig. 5 Distributions of the magnetic flux on the surface of cathode in case of the magnetization direction of permanent magnet and coils are in the same and opposite direction, respectively

当PM的磁化方向与线圈的磁化方向相反时, 阴极表面和磁力线所成的张角方向指向阴极中心, B_{sum} 呈边缘强中间弱, 磁感应强度值在35~65 mT之间。阴极表面 B_y 均为正直, 大小在2.5~18 mT之间, 即均指向阴极中心。 B_{sum} 分布呈杯状的中间小边缘大的磁场分布。这样的磁场分布有利于控制阴极电弧弧斑在阴极表面上运动, 提高弧斑的稳定性。此结果也与Kim等^[22]的实验结果相一致。

2.3 PM的磁矫顽力大小对阴极附近磁力线分布的影响

当PM的磁化方向与线圈的磁化方向相反情况下, PM的磁矫顽力分别为400, 600, 800, 1000 kA/m时, 阴极靶表面的磁力线空间分布和不同位置处的磁场空间分布如图6和图7所示。可见, B_{sum} 均呈边缘高中间低的V形式分布。 B_y 均是从中心向外增大到最大值后又逐渐降低。随着永磁体磁矫顽力的增大, 阴极表面上的磁力线分布逐渐变稀疏, 说明

阴极表面上的磁感应强度逐渐变弱, 与 B_{sum} 分布图一致。另外, 随着PM的磁矫顽力的增加, 阴极表面上 B_{sum} 最大值和最小值之间的差值、 B_y 的最大值和最小值的差值均变大, 说明阴极表面上的磁场分布的均匀性变差。

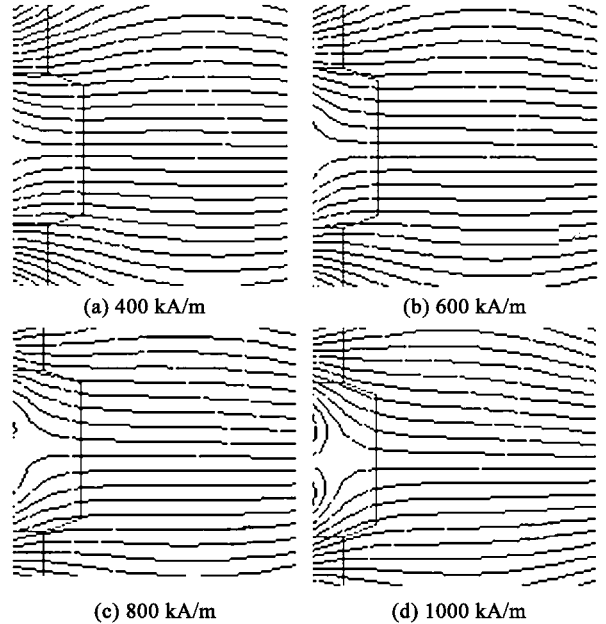


图6 PM的磁矫顽力为400 600 800和1000 kA/m时, 阴极附近的磁力线空间分布情况

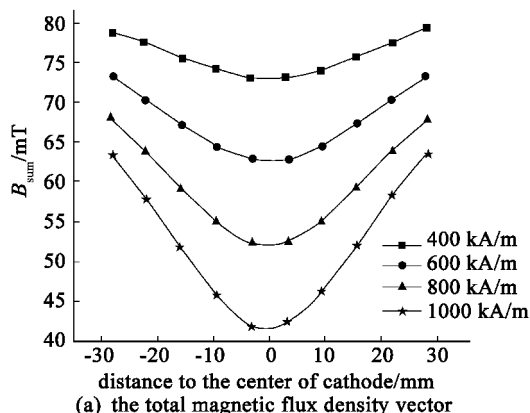
Fig. 6 Distributions of the magnetic flux lines on the surface of cathode at the coercive force of permanent magnet with 400 600 800, 1000 kA/m, respectively

当PM的磁矫顽力为400 kA/m时, 阴极表面处的磁力线与阴极所形成张角是向外的, B_{sum} 在73~79 mT之间, 但 B_y 均为负值, 在-0.8~7.6 mT之间, 即 B_y 是指向阴极外侧的。根据Robson漂移理论, 虽然 B_{sum} 是成V型分布的, 但磁力线和阴极表面的夹角指向阴极外侧, 且 B_y 也均指向阴极外侧, 弧斑在这样的磁场分布下易向阴极边缘运动, 不利于弧斑的稳定。

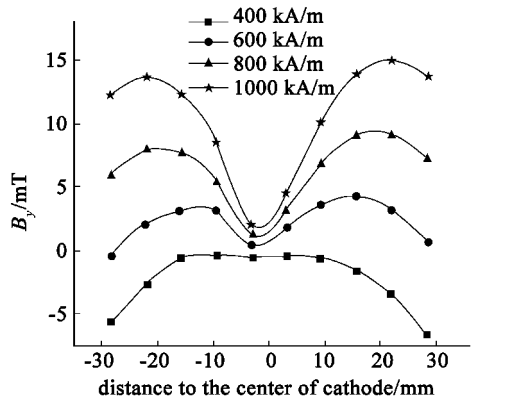
当 B_y 的磁矫顽力为600 kA/m时, 阴极大部分区域的磁力线与阴极表面的张角指向阴极中心, B_y 在阴极大部分区域为正, 只在下边缘处的值为-0.386 mT, B_y 的值在控制碳离子传输的要求。在这种条件下即使可以使弧斑稳定, 又可以实现碳离子的较高传输效率。

另外, 虽然根据文献[23-24]的结论, B_{sum} 呈中间低边缘高的分布有利于控制弧斑的稳定。但是,

根据本文的计算结果, 为了稳定阴极靶表面的电弧弧斑, 仅有 B_{sum} 满足中间低边缘高的分布是不充分的, 还必需进一步考虑 B_y 分布情况。



(a) the total magnetic flux density vector



(b) the magnetic flux density distribution along Y direction

图 7 PM 的磁矫顽力分别为 400, 600 800 和 1000 kA/m 时阴极面不同位置上的 B_{sum} 分布和 B_y 分布

Fig 7 Distributions of the magnetic field on the surface of cathode with the various coercive force of permanent magnet

当 PM 的磁矫顽力 800 kA/m 时, 阴极表面与磁力线所成的张角均指向阴极中心, B_{sum} 在 52.3 ~ 68.05 mT 之间。 B_y 均为正值, 分布在 1.27 ~ 9.0 mT 之间。当 PM 的磁矫顽力在 1000 kA/m 时, 磁力线和阴极表面所成的张角均指向阴极中心, B_{sum} 分布在 42.35 mT ~ 63.4 mT 之间, B_y 分布在 2 ~ 15 mT 之间。

根据 Robson 漂移理论, PM 的磁矫顽力为 800 和 1000 kA/m 时的磁场分布虽有利于控制弧斑在阴极表面上运动, 但阴极表面 B_{sum} 值较小, 一方面在阴极边缘处小于 70 mT, 不利于控制从阴极边缘射出的部分碳离子的传输, 会使其撞击到磁过滤弯管壁上损失掉; 另一方面则会由于磁镜效应而使碳离子在 EM 或 BM 处有负的运动速度而反弹回。而且由于 B_y 的差值较大, 会使靶材表面弧斑在中心区

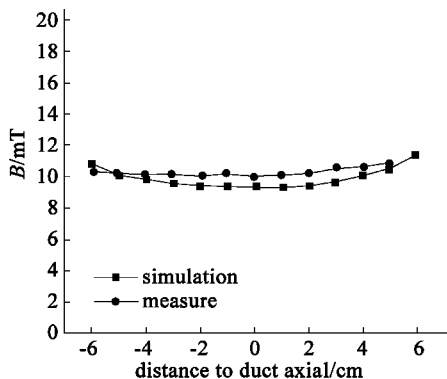
域刻蚀较深, 不利于靶材的均匀利用。

综上, 当磁过滤弯管中的磁场空间分布一定时, 在阴极背后外加的 PM 的磁矫顽力和方向都有一最佳优化值。在此最佳值条件下, 阴极表面的磁场分布即可有利于弧斑的稳定运动和靶材的均匀刻蚀, 又有利于碳离子的高效传输和大颗粒的宏观过滤。

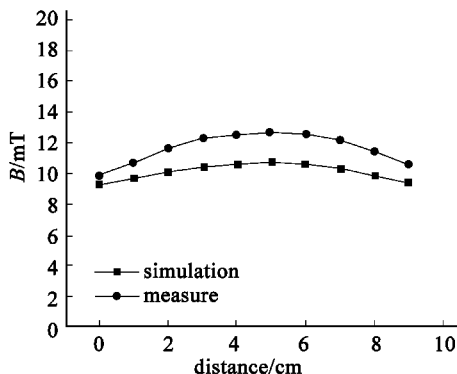
2.4 模型计算结果与实验测量结果的对比

为了验证所建立的磁过滤弯管的理论模型的准确性, 以 EM 部分磁场分布为例, 我们用亨通 HT201 数字高斯计测量了 EM 线圈中的电流为 2 A 时, 其边缘位置处的横截面上的径向磁场强度和其中轴线上的径向磁场强度, 并将测量结果与模拟计算的结果进行对比。

如图 8 中所示, 理论计算的结果与实际测量的结果有相同的变化规律, 在 EM 的边缘处模拟计算的结果与实际测量结果有好的一致性。模拟计算结果的具体数值与测量结果的数值之间有一定误差, 分析其原因可能是在建立模型时假定了不锈钢弯管的磁导率为 1, 而实际上不锈钢的磁导率 $\mu \geq 1$, 这样



(a) the radial magnetic flux density on transversal surface on the border of EM



(b) the radial magnetic flux density along the axis of EM

图 8 EM 中电流为 2 A 时弯管中磁场强度的测量结果与模拟计算结果对比

Fig 8 Magnetic field distribution with measured results and calculated ones when the current of EM is 2 A

就会使模拟计算值偏低。

3 结论

通过对新型研制开发的 45° 双弯曲 FCVA 系统磁场空间分布和碳离子传输的模拟的计算, 得到了弯管中优化的磁场分布。即当磁过滤弯管轴线上的磁感应强度均匀分布在 $53 \sim 94$ mT 之间时, 碳离子的传输效率可以优化达到 100%。进一步在优化的磁过滤弯管中的磁场强度分布条件下, 通过阴极表面的磁力线分布和磁感应强度分布情况分析, 研究了靶背面外加 PM 的磁化方向和磁矫顽力大小对阴极附近磁场分布的影响。发现当 PM 的磁化方向与线圈的磁化方向相反、PM 的磁矫顽力为 600 kA/m 时, 能够形成有利于靶材表面电弧弧斑可控稳定、靶材均匀刻蚀和碳离子高效传输的磁场空间分布。但是, 当阴极表面上总的磁场强度形成中间低边缘高的 V 形分布时, 要分析电弧弧斑的稳定运行, 还必需进一步综合 Y 方向的磁感应强度矢量方向和大小分布。结合该理论计算的优化值, 进一步采用双弯曲 FCVA 设备进行超高性能 ta-C 薄膜的动力学生长实验研究正在开展中。

参 考 文 献

- [1] Robertson J. Mater Sci Eng[J], 2002, 37: 129—281
- [2] Xu S, Tay B K, Tan H S, et al. J Appl Phys[J], 1996, 79(9): 7234—7240
- [3] Friedmann T A, Sullivan J P, Knapp J A, et al. Appl Phys Lett [J], 199, 71 (26): 3820—3822
- [4] Ferrari A C, Robertson J, Beghi M G, et al. Appl Phys Lett [J], 1999, 75(13): 1893—1895.
- [5] Wei A X, Chen D H, Peng S Q, et al. Diamond Relat Mater [J], 1997, 6: 983—986
- [6] 丁万昱, 高鹏, 邓新绿, 等. 真空科学与技术学报[J], 2005, 25(1): 41—46
- [7] Zhitomirsky V N, Kaplan L, Boxman R L, et al. Surf Coat Technol[J], 1995, 76—77: 190—196
- [8] Takikawa H, Tanoue H. IEEE Trans Plasma Sci[J], 2007, 35 (4): 992—999
- [9] 任 瑛, 张贵锋, 董 闯, 等. 真空科学与技术学报[J], 2009, 29(3): 255—263
- [10] Martin P J, Bendavid A. Thin Solid Films[J], 2001, 394: 1—15
- [11] Aksenov I I, Strel' nitskiy V E, Vasilyev V V, et al. Surf Coat Technol[J], 2003, 163—164: 118—127
- [12] Kim J K, Byon E, Lee S H, et al. Surf Coat Technol[J], 2003, 169—170: 32—35
- [13] Bilek M M M. J Appl Phys[J], 1999, 85(9): 6385—6391
- [14] Oliveira Jr M H, Silva D S, Cortes A D S, et al. Diam Relat Mater[J], 2009, 18(5—8): 1028—1030
- [15] Panwar et O S. Thin Solid Films[J], 2008, 516: 2331—2140
- [16] 郭硕鸿, 电动力学[M]. 第 2 版, 北京: 高等教育出版社, 2005: 98—103
- [17] Davis W D, Miller H C. J Appl Phys[J], 1969, 40(4): 2212—2221
- [18] Anders A, Yu G, Yushkov. J Appl Phys[J], 2002, 91(8): 4824—4832
- [19] Anders A. IEEE Trans Plasma Sci[J], 2005, 33(5): 1456—1464
- [20] Juttner K, Kleberg I. J Phys D: Appl Phys[J], 2000, 33: 2025—2036
- [21] Zimmer O, Vetter J, Rackwitz N, et al. Surf Coat Technol [J], 2001, 146-147: 195—200
- [22] Kim J K. Surf Coat Technol[J], 2000, 124: 135—141.
- [23] Shi Z Q, Jia S L. IEEE Trans Plasma Sci[J], 2003, 31(2): 289—294
- [24] Fu J, Jia S L, Lan T. IEEE Trans Plasma Sci[J], 2001, 29 (5): 734—737