束流轰击角度与材料解吸特性关系研究

谢文君[1,2] 蒙峻[2,3*] 罗成[2,3] 杨伟顺[2,3] 焦纪强[2] 柴振[2] 刘建龙[2] 李超[1]
(1. 兰州理工大学 石油化工学院 兰州 730050; 2. 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000;
3. 中国科学院大学 北京 100049)

The Relationship between Beam Bombardment Angle and Material Desorption Characteristics

XIE Wenjun[1,2], MENG Jun[2,3*], LUO Cheng[2,3], YANG Weishun[2,3], JIAO Jiqiang[2], CHAI Zhen[2], LIU Jianlong[2], LI Chao[1]
(1. *School of Petrochemical Engineering*, *Lanzhou University of Technology*, *Lanzhou* 730050, *China*;
2. *Institute of Modern Physics*, *Chinese Academy of Science*, *Lanzhou* 730000, *China*;
3. *University of Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract Considering the vacuum degradation caused by material desorption, the correlation mechanism between bombardment angle and material desorption yield was studied. The desorption characteristics of zirconia ceramics, Au-coated ceramics and Au-coated stainless steel were tested by using a 143 KeV/u Bi^{32+} ion beam through the self-developed desorption yield test device with adjustable angles. The results show that the desorption yield increases significantly with the increase of incident angle. The proportion of H_2 increased rapidly during bombardment. The desorption yield of zirconia ceramic can be reduced by about 50% after gold plating, while the difference in desorption yield between gold plated samples on different substrates is less than 15%. It is confirmed that the desorption process is mainly dominated by the physical and chemical properties of the surface, and the substrate has little effect. Based on the theoretical model of sputtering yield and incident angle, the surface effect correction coefficient α was introduced to modify the desorption model and verified. This study provides a theoretical model and experimental basis for the engineering prediction of particle desorption yield in the vacuum system.

Keywords Desorption yield，Bombardment angle，Desorption model，Vacuum

摘要 针对材料解吸导致的真空劣化问题，重点研究了轰击角度与材料解吸率的关联机制。通过自主研发可调角度的多样靶材解吸率测试装置，采用 143 KeV/u Bi^{32+}离子束对氧化锆陶瓷、陶瓷镀金及不锈钢镀金三类材料进行解吸特性研究。结果表明：材料解吸率随入射角度增加呈现显著增长趋势，束流轰击靶材时 H_2 占比迅速增加；表面镀金处理可使氧化锆样件解吸率降低约 50%，而不同基材镀金样品间解吸率差异小于 15%，证实解吸过程主要受表层物理化学特性主导，基材影响较小。基于溅射产额与入射角度的理论模型，引入表面效应修正系数 α，给出修正后的解吸模型并进行实验验证。该研究可为真空系统粒子解吸率的工程预测提供理论模型与实验依据。

关键词 解吸率 轰击角度 解吸模型 真空
中图分类号：TB74 **文献标识码：**A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202506011

核科学作为国家战略科技力量的重要组成部分，在推动经济社会高质量发展中发挥着关键作用。粒子加速器为探索核科学前沿问题、突破关键核心技术提供了不可替代的研究平台。在重要科研目

收稿日期：2025−06−30
基金项目：强流重离子加速器装置项目（117200HIAF）；兰州重离子加速器运行维护任务（Y9HIRLL100）
* **联系人：**E-mail: mengjun@impcas.ac.cn

标和科学问题的牵引下，需要高能量、高流强、高束团功率的大型粒子加速器。各个国家都在积极建设大型重离子加速器研究装置，全球重离子加速器领域呈现“多极化”发展态势[1]。在此背景下，中国科学院近代物理研究所提出建设新一代强流重离子加速器装置(High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)。该装置是国际上首台集超导直线加速器、同步加速器和储存环于一体的重离子加速器，可提供高能量脉冲重离子束和国际上测量精度最高的原子核质量测量谱仪[2-3]。

束流寿命指带电粒子束在储存环或加速器中能够稳定存在的平均时间，它反映了束流粒子因各种物理机制而逐渐损失的速度。束流寿命与真空腔体内的压力成反比，即真空度越高束流寿命越长，因此真空度的稳定是获取高品质束流的关键因素之一。带电粒子在加速过程中，可能因电荷交换、加工误差等因素偏离轨道，撞击真空管壁。这种碰撞会从管壁表面释放出气体分子和离子，进而破坏真空环境，最终导致束流寿命缩短[4]。针对上述问题，欧洲核子中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)采用 158 GeV/u In^{49+}、4.2 MeV/u 的 Pb^{53+}和 Pb^{27+}束流研究了 316LN 不锈钢、石墨镀 TiN、石墨镀铜、不锈钢、银、钯和 TiZrV 涂层的解吸率，结果表明气体解吸率与材料表面涂层有关，镀金后解吸率产额降低明显[5-6]。德国亥姆霍兹重离子研究中心(Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, GSI)采用 4.8 MeV/u 的 Ca^{10+}和 Au^{26+}轰击不同处理工艺下的无氧铜、钨和铝等，发现金刚石铣削与抛光可部分降低解吸产额，但最显著的效果来自热退火[7](400℃、4 h、超高真空条件)。E. Hedlund 等采用 5−17.7 MeV/u 的 Ar^{8+}轰击不同形状(如平板、直棱柱和楔形)铜、蚀刻铜、镀金铜和钽等材料，测试发现形状差异可导致数倍量级的解吸产额变化[8]。中国科学院近代物理研究所对无氧铜、不锈钢、陶瓷以及不同厚度金膜的陶瓷进行了解吸率研究，定量给出了解吸率产额与电子能损之间的关系[9-11]。

上述研究主要集中在束流与靶材垂直作用的情况，缺乏束流入射角度与解吸率之间的关系研究。本工作基于近代物理研究所直线注入器 SSC-Linac 设计并搭建了变角度多样靶材解吸率测试系统。针对陶瓷内衬薄壁真空室稳定动态真空的需求[12]，重点测量了陶瓷、陶瓷镀金以及不锈钢镀金在不同束流轰击角度下的解吸率以及解吸的气体成分，结合测试数据给出了解吸率与轰击角度之间的数学模型，为真空系统中解吸率的工程化预测提供了理论框架。

1 解吸率测试原理

重离子加速器中解吸率指材料在单个离子轰击下从表面释放出分子或离子个数。由于循环束流与残余气体的电离作用而产生的离子，其能量通常在电子伏特(eV)至千电子伏特(KeV)范围内。根据二元碰撞理论，可以考虑以下三种不同的机制来解释解吸过程，如图 1 所示，图中红色代表入射离子，蓝色代表吸附原子/分子，黄色代表靶材原子。

(1)入射离子撞击最外侧的吸附层时直接被反射，或在能量足够高时，直接撞击并剥离外表面吸附的原子/分子，如图 1(a)和 1(b)。

(2)入射离子穿透基底，最终被反射。在其反射路径中，可能会撞击并剥离最外层的吸附原子/分子，如图 1(c)。

(3)入射离子引发基底原子向外表面流动。部分基底原子在向外运动时，可能撞击并剥离外表面吸附原子/分子，如图 1(d)和 1(e)。

解吸率无法直接测量得到，通过建立理想气体状态方程与解吸动力学的理论关联，推导出束流持续轰击靶材时解吸率定量计算公式[13]：

$$\eta_{\mathrm{eff}} = \frac{\Delta N}{\dot{N}} = \frac{\Delta p \cdot S}{\dot{N} \cdot k \cdot T} \tag{1}$$

式中：η_{eff}为材料解吸率，molecules/ion；ΔN为腔体内增加的离子数；k 为玻尔兹曼常数，1.3806488×10^{-23}

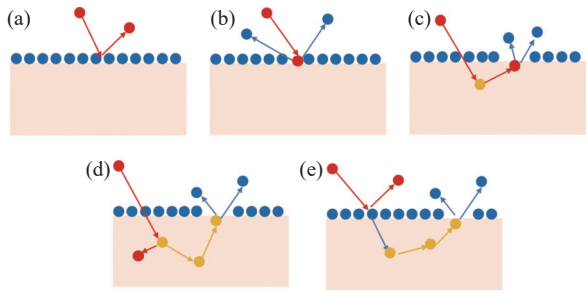

图1 解吸机制示意图。(a)直接反射，(b) 剥离表面原子/分子，(c)穿透基底后反射，(d)和(e)引发基底原子向外流动

Fig. 1 Schematic diagram of desorption mechanism. (a) Direct reflection, (b) strip off the atoms/molecule on the surface (c) reflection after penetrating the substrate, (d) and (e) induce the outward flow of substrate atoms

J/K; T 腔体热力学温度, 300 K; S 测试腔体配置的真空泵有效抽速, m^3/s; Δp为腔体内压力的变化量, Pa; $\dot{N}$为每秒钟轰击靶材的离子个数, 可由下式确定:

$$\dot{N} = \frac{I}{1.602\times10^{-19}\times q} \tag{2}$$

式中: I 束流流强, 法拉第筒测量, A; q 为单个离子所带的电荷数。因此, 求解吸率最主要的参数为束流流强和离子轰击材料时的压力变化。

2　不同轰击角度下解吸率测量

2.1　测试装置

解吸率测试在中国科学院近代物理研究所直线注入器进行。该注入器包括回旋共振离子源(Electron Cyclotron Resonance, ECR)、低能束线(Low Energy Beam Transport, LEBT)、一台射频四极场加速器(Radio Frequency Quadrupole, RFQ)、中能束线(Medium Energy Beam Transport, MEBT)、漂移管直线加速器(Drift Tube Linac, DTL)以及高能束线(High Energy Beam Transport, HEBT), 可提供 143 KeV/u~580 KeV/u 能量范围的$^{12}C^{4+}$、$^{40}Ar^{8+}$、$^{209}Bi^{32+}$、$^{129}Xe^{23+}$等束流。为了与现有的回旋加速器匹配, RFQ 频率为 53.667 MHz, 可加速质荷比 3~7 的重离子[14-15]。将测试样件放置在 HEBT 段解吸率测试泵室中, 采用连续束模式进行轰击。泵室上安装测量流强的水冷法拉第筒、测量真空度变化的真空规(Leybold MPG400)、测量腔体气体成分的质谱计(QMG220)以及维持真空的分子泵(有效抽速 0.48 m^3/s)和离子泵(有效抽速 0.41 m^3/s), 如图 2 所示。

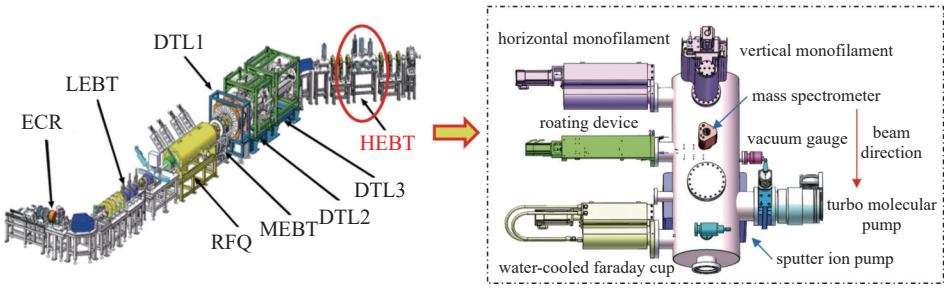

图2　测试装置

Fig. 2　Schematic drawing of the experimental device

为了提高测试效率, 满足不同角度轰击的测试需求, 自主研发了多种靶材旋转测试装置, 如图 3 所示[16]。该装置通过旋转驱动转接将旋转驱动电机与靶材架连接可实现 360°旋转, 旋转驱动转接可采用磁流体密封结构、旋转差分结构或非接触磁力密封结构。此外通过波纹管、联轴器、高精度滚珠丝杠等将径向移动电机与靶材架连接可实现其径向移动。所有真空连接都采用金属密封形式, 耐高温烘烤, 可用于 10^{-9} Pa 极高真空测试环境。靶材架可同时放置 12 块不同的测试靶材, 在不破坏极高真空的条件下可更换靶材或调节靶材与束流之间的夹角。

2.2　样品制备

根据陶瓷内衬薄壁真空室使用背景[12], 选择氧化锆陶瓷、氧化锆陶瓷表面镀金及不锈钢镀金为测试靶材。氧化锆陶瓷选择热稳定性更好的铈稳定氧化锆陶瓷。不锈钢镀金以低导磁率 316L 为基底, 采用磁控溅射镀膜方式实现 1 μm 金膜沉积。陶瓷表面镀金时选用铈稳定氧化锆陶瓷作为基底材料, 同样采用磁控溅射技术在其表面构建梯度化金属镀层体系[17]。镀层结构设计遵循"结合层−导电层−阻挡层−功能层"的复合架构: 首先在陶瓷表面沉积 0.2 μm 钛膜作为金属−陶瓷界面结合层; 继而沉积 2 μm 铜层以建立导电通路; 考虑到极高真空获取需进行 300℃在线烘烤工艺, 高温会引发 Cu-Au 互扩散效应, 特别在铜层表面增设 0.2 μm 钛膜作为扩散阻挡层; 最终沉积 1 μm 的金膜作为表面功能层。靶材尺寸为 25 mm×25 mm×5 mm, 通过工装固定在旋转靶材架上。

2.3　测试步骤

带束测试前首先采用比对法对真空计读数进行校准。真空计比对装置如图 4 所示, 在球形规管校准装置上同时安装测量标准规和被校规。将球形比对装置抽空、检漏后获取极限真空, 打开微调送气阀, 将高纯 N_2 送入系统, 压力逐渐升高。每个量级测量 4 点, 每点至少稳定 15 min, 分别记录标准规和被校规的真空度读数, 其校准系数为 0.986, 示数稳定, 满足测试要求。

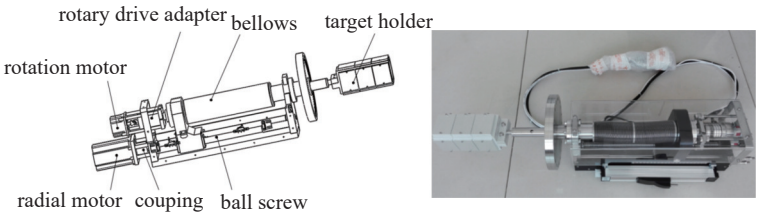

图3 多样靶材旋转测试装置

Fig. 3 Rotating test device for multiple materials

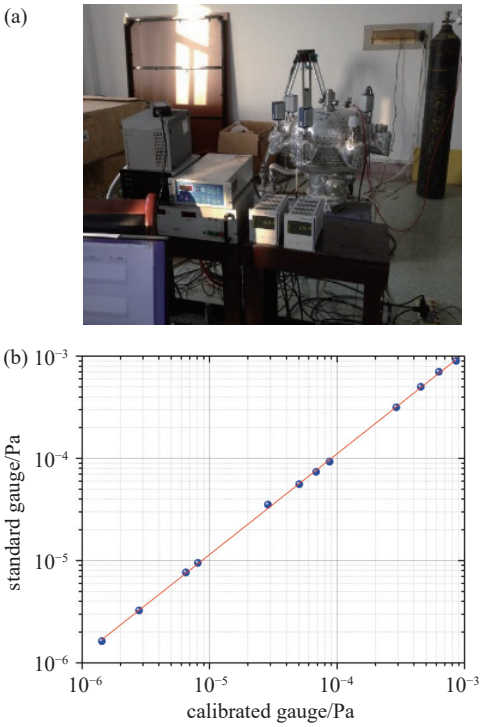

图4 真空规管校准曲线。(a) 校准装置, (b) 校准曲线

Fig. 4 The calibration curve of vacuum gauge. (a) Calibration device, (b) calibration curve

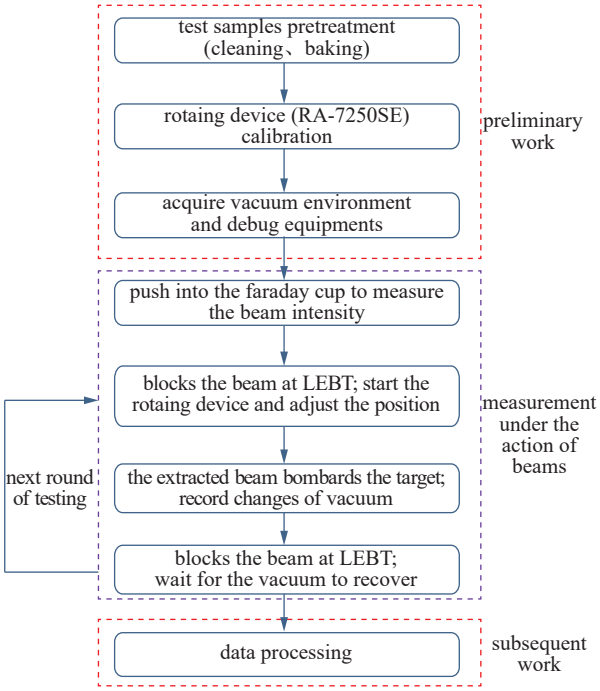

图5 测试流程图

Fig. 5 Test process

如图 5 所示, 整个测试流程分为三个阶段, 前期工作: 首先以酒精为清洗液, 超声波清洗 30 min, 然后在真空烘干箱中 200℃ 烘干。为了精确控制靶材架移动距离与旋转角度, 采用机械臂(型号: RA-7250SE)对其进行线下标定, 并与控制系统进行联调复核。最后将多样靶材架安装到测试系统, 获取极限真空。

带束测试: 靶材未推入系统前利用 HEBT 泵室法拉第筒测量束流流强, 测量 1 min, 确定束流稳定后。然后将 LEBT 处法拉第筒推入系统, 将束流挡在 LEBT 段。通过之前标定的参数将相应的靶材推入系统, 拉出 LEBT 法拉第筒, 让束流轰击到测试样件表面, 同时通过真空度采集系统记录真空度变化。测试结束再次将束流阻挡在 LEBT, 更换靶材或角度开始下一轮测试。

3 结果分析及讨论

3.1 解吸率测试结果

采用能量为 143 KeV/u、流强为 8.3×10^{-6} A 的 Bi^{32+}轰击不同角度下的靶材, 通过公式(2)计算每秒钟轰击靶材的离子个数为 1.62×10^{12} 个, 图 6 为不同入射角度下轰击靶材引起的压力变化及初始压力。随着束流的不断轰击, 靶材会有一定温升, 同时与环境温度的变化影响叠加, 使得测试过程中本底真空略有差异, 初始真空度介于 5.10×10^{-6} Pa 与 5.34×10^{-6} Pa 之间。当束流以 45°轰击氧化锆靶材时引起的压力变化最大, 即解吸出的粒子数最多。

图 7 揭示了靶材解吸率对离子轰击角度的依存特性, 数据显示当轰击角度增加时, 解吸率呈现单调递增趋势。此外, 表面改性处理对解吸行为产

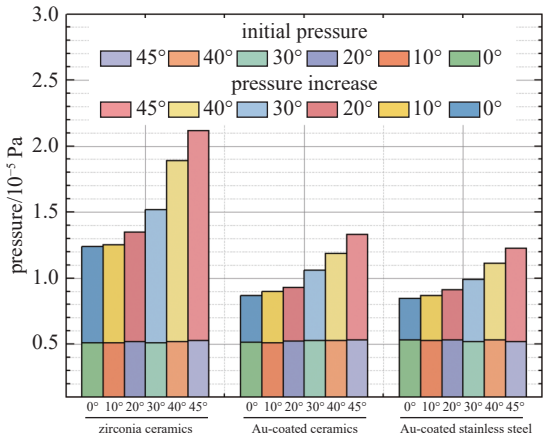

图6　初始压力及束流轰击时压差

Fig. 6　Initial pressure and pressure increase during beam bombardment

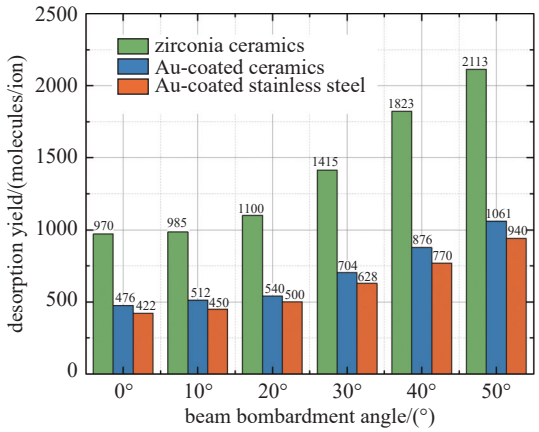

图7　不同轰击角度下解吸率结果

Fig. 7　Desorption yield under different bombardment angle

生显著影响。氧化锆基体经 1 μm 金膜镀覆后，各角度下的解吸率均下降约 50%，这说明金膜能够降低表面结合能及抑制化学吸附作用来降低解吸特性。

对比实验表明，不锈钢基体镀金样品与氧化锆镀金样品的解吸率测量差异小于 15%，说明解吸过程主要受最外层表面的物理化学特性支配，而基底材料的影响较小。

3.2　气体组分的动态演变特征

图 8 所示为束流垂直轰击氧化锆陶瓷镀金(1 μm)及氧化锆陶瓷靶材的气体成分变化，这种气体解吸行为的动态变化揭示了在不同轰击阶段的解吸特性。由于测试系统属于非烘烤真空系统，未进行高温在线烘烤除气，所以真空腔体初始气体组分中，水蒸气(H_2O)占比约 51%，其余主要成分为氢气(H_2, 37%)、甲烷(CH_4, 6%)、氮气/一氧化碳(N_2/CO, 3%)、氧气(O_2, 2%)和极少部分氩气。轰击氧化锆镀金靶材时氢气占比从 37% 快速攀升至 52%。氮气/一氧化碳占比从 3% 提高到 12% 左右。随着束流的持续轰击两者占比逐渐降低，说明解吸出的气体分子逐渐减少，即出现束流清洗效应；轰击氧化锆靶材时氢气占比从辐照初期的 37% 升至 54%。氮气/一氧化碳占比从 3% 提高到 10% 左右。在轰击过程中氢气和氮气的占比未发生明显变化，即轰击氧化锆时无束流清洗效应。束流轰击时氢气的占比显著增加。

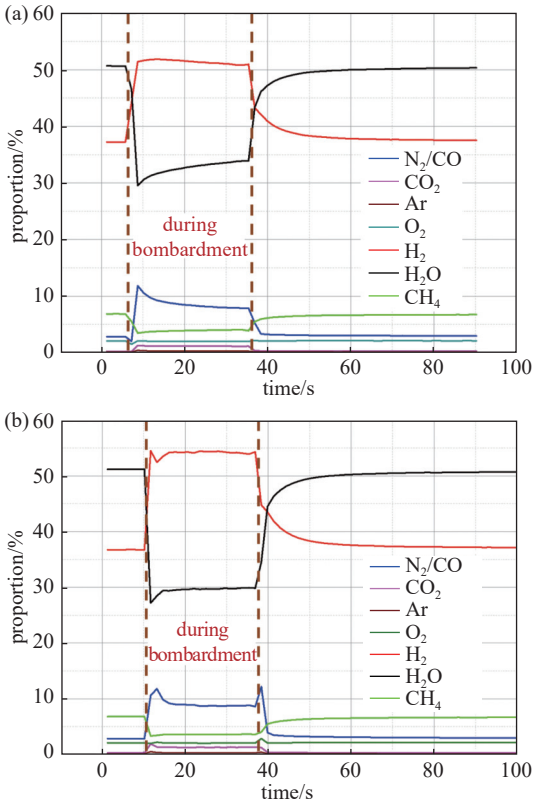

图8　Bi^{32+}轰击靶材时气体成分变化。(a)陶瓷镀金，(b)氧化锆陶瓷

Fig. 8　Changes of gas proportion during Bi^{32+} bombardment. (a) Au-coated ceramics, (b) Zirconia ceramics

根据道尔顿分压定理，结合真空规读数及轰击前后各组分的占比计算主要气体的绝对分压，如图 9 所示。束流轰击时，无论是氧化锆陶瓷还是陶瓷镀金样件，各主要气体分压都有所增加，其中氢气分压增加最明显，经分析讨论考虑如下两个释氢途径：(1)由于氢的高渗透性，束流轰击时不仅解吸了吸附在靶材表面的氢气分子，还将渗透到靶材内部的氢气分子解吸出来；(2)高能粒子轰击水分子导致其分解出氢分子。

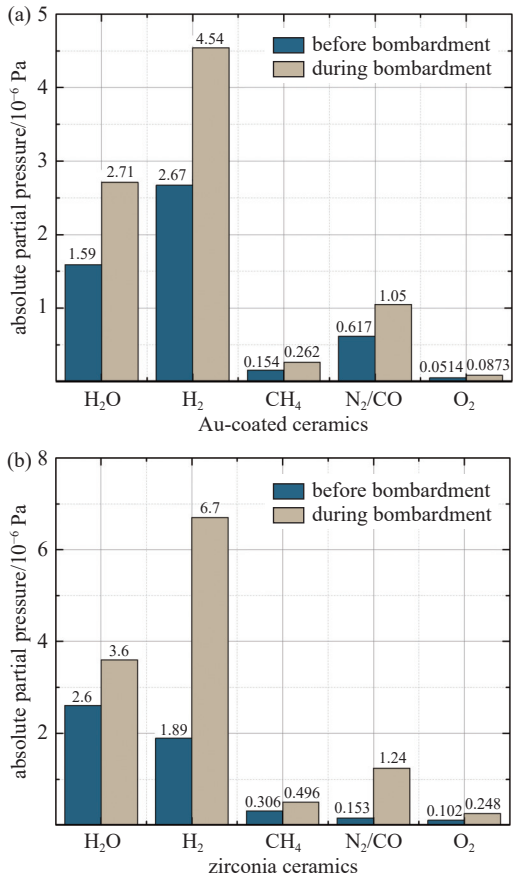

图9 气体分压变化。(a)陶瓷镀金,(b)氧化锆陶瓷

Fig. 9 Change in partial pressure of gas. (a) Au-coated ceramics, (b) Zirconia ceramics

3.3 解吸率与角度依赖关系

参考 Sigmund 模型溅射离子产额与入射离子角度的关系如下式[18]:

$$\eta(\theta)=\frac{\eta(0)}{\cos\theta} \tag{3}$$

由上式可看出解吸产额的角度依赖性由几何投影效应主导,即$(\cos\theta)^{-1}$。图 10 中虚线为预测模型(3)与实际测量(0°、10°、20°、30°、40°、45°)的对比图,从图中看出在小角度范围内($\theta\leqslant 20°$)实测值和模型(3)预测值符合程度较好,随着轰击角度不断增加,实测点与预测值的偏离程度也逐渐增加。测试前对靶材的清洁、烘烤去除了大部分灰尘杂质,但是由于有大量气体分子被吸附在靶材表面,束流轰击后不仅溅射出原子,而且还将吸附的气体分子轰击到真空腔体中。因此需要对预测模型(3)进行修正,以更加符合实际气体解吸状态。

对预测模型做进一步的修正:

当$\theta\to 0$,通过$\cos\theta$的泰勒展开式进行二阶近似:

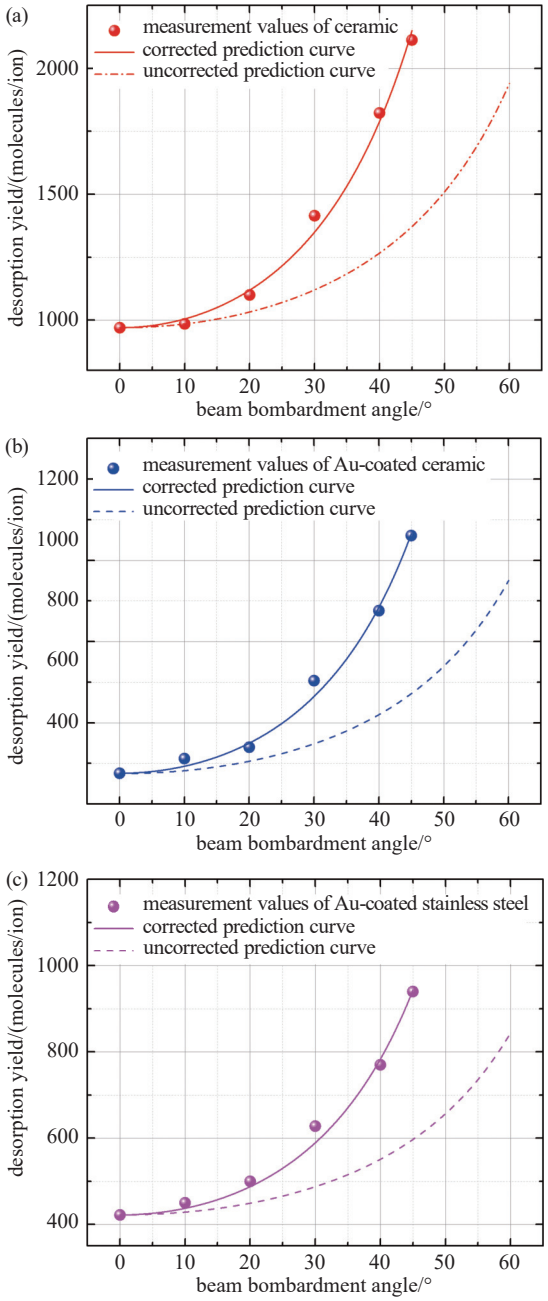

图10 修正前后预测曲线与实测值对比。(a)氧化锆陶瓷,(b)陶瓷镀金,(c)316L 不锈钢镀金

Fig. 10 Comparison between corrected and uncorrected predicted curves and measured values. (a) Zirconia ceramics, (b) Au-coated ceramics, (c) Au-coated 316L stainless steel

$$\cos\theta=1-\frac{\theta^2}{2!}+\frac{\theta^4}{4!}-\ldots\frac{(-1)^n\theta^{2n}}{(2n)!}\approx 1-\frac{\theta^2}{2} \tag{4}$$

定义小量:

$$x=\frac{1}{\cos\theta}-1\approx\frac{\theta^2}{2}\ll 1 \tag{5}$$

公式(3)可转化为:

$$\eta(\theta)=\frac{\eta(0)}{\cos\theta}\left[1+\alpha x+o\left(x^2\alpha^2\right)\right]x\alpha\ll 1 \tag{6}$$

根据泰勒展开式进行一阶近似:

$$(1+x)^{\alpha} \approx 1+\alpha x+o(x^2) \tag{7}$$

所以上式可进一步简化为:

$$\eta(\theta)=\frac{\eta(0)}{\cos\theta}(1+x)^{\alpha}=\frac{\eta(0)}{\cos\theta}\left(\frac{1}{\cos\theta}\right)^{\alpha}=\frac{\eta(0)}{(\cos\theta)^{1+\alpha}} \tag{8}$$

为进一步研究离子轰击靶材表面气体解吸的物理机制, 引入表面效应修正系数 α, 其物理意义表征表面缺陷态密度、吸附层覆盖率及能量输运效率等综合因素对解吸产额的调制作用。对不同轰击角度下解吸率测试数据进行拟合, 通过逆向拟合得到三类靶材的修正系数 α, 如表 1 所示, 回归系数 R^2 接近 1, 说明自变量和因变量之间的相关性较好, 拟合结果和实验结果较吻合。不锈钢镀金表面和氧化锆镀金表面修正系数相同, 说明不同轰击角度下解吸率的区别主要与外部表面的状态相关, 与基体材料关系较小。

表 1　修正系数 α

Tab. 1　Correction coefficient α

靶材	氧化锆陶瓷	陶瓷镀金	不锈钢镀金
α	1.30±0.04	1.32±0.05	1.32±0.05
回归系数 R^2	0.99	0.99	0.99

通过引入修正系数对解吸动力学模型进行优化, 构建了解吸率与入射角度的定量关系模型。实验测试结果表明, 修正后理论预测值与实测数据的相对偏差在 20% 以内, 证明了该修正模型的可靠性与工程适用性。如图 10 所示, 在 0°−20°的低角度范围内, 由于曲线斜率平缓, 解吸率对角度的敏感性较低, 工程应用中可直接采用未修正模型进行快速估算;

当角度增至 20°−40°区间时, 修正后曲线斜率呈现快速上升趋势, 解吸率增速完成从缓慢到中等的显著过渡; 而在 40°−60°的高角度区间, 斜率急剧增大使得解吸率表现出对角度变化的高度敏感性。该模型通过表面效应修正系数, 揭示了不同材料表面状态对解吸过程的影响机制, 为束流轰击诱导气体解吸的工程预测建立了具有普适性的理论框架, 为相关工艺参数的优化设计提供了重要依据。

4　结论

本文依托中国科学院近代物理研究所 SSC-Linac 直线注入器, 对氧化锆、氧化锆镀金及不锈钢镀金靶材在不同轰击角度下的解吸率进行了实验及理论研究, 主要内容如下:

(1)设计并研制了多样靶材解吸率测试装置, 可实现多种靶材在不同角度下的解吸率测试, 可用于 10^{-9} Pa 超高真空系统。

(2)分析轰击角度对材料气体解吸率的影响机制, 并通过引入表面效应修正系数 α 优化了解吸模型。实验表明, 随着入射角 θ 从 0°增至 45°, 解吸率呈现单调递增趋势, 几何投影效应主导了这一角度依赖性。氧化锆镀金靶材较未镀金基材解吸率降低约 50%, 表明陶瓷表面镀金能有效降低解吸率。对比分析发现, 不锈钢镀金与氧化锆镀金靶材解吸率差异小于 15%, 证实解吸行为主要受表层物理化学特性影响, 基底材料贡献有限。两者表面修正系数相同, 说明表面修正系数主要与靶材表层特性相关。

(3)对不同轰击角度下解吸率测试数据进行拟合, 得到三类靶材的修正系数 α 以及解吸率随轰击角度的变化曲线。验证了修正模型的可靠性与工程适用性, 为真空系统中解吸率的工程化预测提供了理论框架。

参　考　文　献

[1] Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. High intensity heavy ion accelerator facility (HIAF) in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2013, 317(1): 263−265

[2] Zhou X H, Yang J C, the HIAF project team. Status of the high-intensity heavy-ion accelerator facility in China[J]. AAPPS Bull, 2022, 32(35): 1−20

[3] Ma X, Wen W Q, Zhang S F, et al. HIAF: New opportunities for atomic physics with highly charged heavy ions[J]. Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 408: 169−173

[4] Li P, Bozykb L, Dong Z Q, et al. Dynamic vacuum simulation for the Booster Ring in the high-intensity heavy ion accelerator facility[J]. Vacuum, 2019, 163: 15−25

[5] Mahner E, Efthymiopoulos I, Hansen J, et al. Beam-loss induced pressure rise of Large Hadron Collider collimator materials irradiated with 158 GeV/u In^{49+} ions at the CERN Super Proton Synchrotron[J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2004, 7(10): 357−363

[6] Mahner E, Hansen J, Laurent J M, et al. Molecular desorption of stainless-steel vacuum chambers irradiated with

4.2 MeV/u lead ions[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2003, 6: 013201

[7] Velthaus V, Trautmann C, Bender M. Mitigation of ion induced desorption for accelerator components by surface treatment and annealing[J]. Vacuum, 2023, 211: 111965

[8] Hedlund E, Westerberg L, Malyshev O B. Ar ion induced desorption yields at the energies 5–17.7 MeV/u[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009, 599: 1−8

[9] Xie W J, Meng J, Li C C, et al. Measurement on the desorption yields of ceramic and Au-coated ceramic irradiated with Bi^{32+} and Xe^{23+}[J]. Vacuum, 2021, 194: 110636

[10] Dong Z Q, Li P, Yang J C, et al. Measurements on the gas desorption yield of the oxygen-free copper irradiated with low-energy Xe^{10+} and O^{+}[J]. Nuclear Inst and Methods in Physics Research A, 2017, 870: 73−78

[11] Xie W J, Meng J, Li P, et al. Surface desorption induced by heavy ion bombardment: A Simulation and experimental study[J]. Chinese Journal of vacuum science and technology, 2018, 38(2): 157−162 (谢文君, 蒙峻, 李朋, 等. 重离子激发解吸测试装置设计与调试 [J]. 真空科学与技术学报, 2018, 38(2): 157−162 (in Chinese))

[12] Luo C, Yang W S, Xie W J, et al. Development of thin-wall vacuum chamber for heavy ion medical accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(11): 2245−2251 (罗成, 杨伟顺, 谢文君, 等. 医用重离子加速器薄壁真空室研制 [J]. 原子能科学技术, 2020, 54(11): 2245−2251 (in Chinese))

[13] Mahner E. Review of heavy-ion induced desorption studies for particle accelerators[J]. Physical review special topics – accelerators and beams, 2008, 11(10): 320−325

[14] Yin X J, Yuan Y J, Xia J W, et al. Design, fabrication, and beam commissioning of a continuous wave four-rod RF quadrupole[J]. Physical review accelerators and beams, 2016, 19: 010402

[15] Zhang X H, Yuan Y J, Xia J W, et al. Saw tooth-wave prebuncher with dual-gaps in Linac injector for HIRFL-SSC[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2018, 879: 39−46

[16] Luo C, Xie W J, Meng J, et al. Device for determining desorption yields of multiple targets: CN201710340324.3 [P]. 2023-04-11 (罗成, 谢文君, 蒙峻, 等. 一种多样靶材解吸率测试装置: CN201710340324.3[P]. 2023-04-11 (in Chinese))

[17] Li C C, Luo C, Liu J L, et al. Study on Au coating of ceramic-lined thin-wall vacuum chamber for HIAF[J]. Vacuum, 2021, 184: 109898

[18] Molvik A W, Kollmus H, Mahner E, et al. Heavy-ion-induced electronic desorption of gas from metals[J]. Physical review letters, 2007, 98: 064801