玻璃破碎新鲜表面吸气特性及其诱导下 快速抽气新方法研究

叶俊锋¹ 王玉青^{1*} 王旭迪^{1*} 梅正卫¹ 毕海林¹ 吴慕遥^{2*}
 (1. 合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009)

Gas Absorption Characteristics and the New Fast Suction Method of Fresh Broken Glass Surfaces

YE Junfeng¹, WANG Yuqing^{1*}, WANG Xudi^{1*}, MEI Zhengwei¹, BI Hailin¹, WU Muyao^{2*} (1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract High vacuum acquisition and maintenance technology is crucial for scientific research and industrial applications in the fields of micro nano material preparation, microelectronic equipment manufacturing, and vacuum electronic device process optimization. Key scientific issues about the suction mechanism of getter materials and the optimizing material substitution during the acquisition and maintenance of high vacuum are emphasized in this work. It is committed to overcoming shortcomings of traditional high vacuum technology, such as high energy consumption in maintaining high vacuum state, and the dependence of traditional high vacuum acquisition methods on expensive equipment and complex operations. A new method based on the induction of high vacuum acquisition and pressure lower limit breakthrough by fresh glass crushing surface is proposed. This work first conducts experiments on the composition and partial pressure of the suction, as well as experiments on breaking through the lower limits of molecular pump pressure and ion pump pressure under open states. Fresh glass shattered surfaces are found to have suction effects. The main gas components and partial pressure changes adsorbed on the fresh glass surface are analyzed. The main adsorbed gas components are found to be H_2 and N_2 . The pumping capacity of the new method is quantitatively evaluated. The pipeline transmission probability of the pump outlet and the maximum effective pumping speed are analyzed by performing Monte-Carlo simulations. Compared with existing vacuum acquisition and maintenance technologies, the high vacuum acquisition method proposed in this work has advantages such as easy activation, high material cost performance, and observable pumping speed, which can help to provide new theoretical and technical approaches and effective application references for acquiring and maintaining high vacuum in narrow spaces.

Keywords High vacuum acquisition, Fresh surface elicitation, Fast pumping, Maximum effective pumping speed

摘要 高真空获得及维持技术对微纳材料制备、微电子设备制造、真空电子器件工艺优化等领域的科学研究及工业应用 至关重要。文章面向高真空获得及维持过程中吸气材料吸气机理解析及寻优材料替代之关键科学问题,致力于克服传统高 真空技术维持高真空状态能耗高、传统高真空获得方法依赖于昂贵设备和复杂操作等缺陷,提出了一种基于玻璃破碎新鲜表 面诱发高真空获得及压力下限突破的新方法;文章首先开展了吸气成分及分压力测试实验及最大有效抽速实验研究。实验 结果表明新鲜玻璃破碎表面具备吸气效应;解析玻璃新鲜表面吸附的主要气体成分及分压力变化,剖析出主要吸附气体组分

收稿日期:2023-11-13

基金项目:安徽省自然基金面上项目(2308085MF198);国家自然基金面上项目(62271187)

^{*}联系人: E-mail: yuqingw@hfut.edu.cn; wxudi@hfut.edu.cn; wumuyao@hfut.edu.cn

第 3 期

为氢气和氮气;定量评估了新方法的抽气能力,利用蒙特卡洛方法仿真分析了泵出口管道的传输概率,获得新方法的最大有效抽速。相比现有真空获得和维持技术,文章所提出的新方法具有易激活、材料性价比高、抽速可观等优势,有助于为狭小空间高真空获得及维持提供新型技术途径及应用有效性参考。

关键词 高真空获得 新鲜表面诱发 快速抽气 最大有效抽速 中图分类号: TB7 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202311008

高真空获得和维持技术广泛应用于半导体制 造、微纳材料制备、表面改性、生物医学等领域^[1-4]。 传统真空获得及维持技术以气体传输泵和气体捕 集泵为核心^[5-8]。然而,当前高真空技术在能源效率 方面存在高能源维持、设备昂贵、操作复杂、激活 繁琐等显著挑战,限制了高真空技术的普适使用。

面向上述高真空获得与维持共性技术需求,解 析材料吸气机理,挖掘新型快速抽气方法已成为迫 切需要解决的关键科学问题与技术问题。Fattahzadeh 等^[9] 研究了金属 Y 对 Zr-Co 基化合物的吸气性 能影响。Luo等^{10]}进一步研究了退火等工艺对 ZrVFe 合金组织、活化性能、吸氢性能的影响。Li 等^[11] 制备了不同化学计量比下的 TiZrMnFe 吸气剂, 研究了其吸氮机理。Moghadam 等^[12] 研究了 Ce、La、 活化条件对 Zr-Co 烧结多孔材料吸附特性的影响, 优化合金化时间及活化过程,获得纳米结构吸气剂 粉末,改善吸气剂吸氢性能。Alamgir 等^[13]采用阴 极电弧沉积技术在不锈钢衬底上制备了 Ti-Al-Zr 及 Ti-Zr 的非蒸散型吸气剂(NEG)膜, 剖析了 NEG 膜吸气性能。Litvinov 等^[14] 采用二次离子质谱技术 研究了多晶 Zr₂Fe 合金样品表面化合物成分与氧相 互作用的变化及氧对合金与氢相互作用的影响。

不同于上述吸气特性传统研究, 玻璃新鲜表面 吸气现象解析已引发国内外学者高度关注。Ware 等^[15] 推测新破碎玻璃表面对 SO₂、CO₂、H₂O 的吸附 为玻璃中气泡误差的重要诱因。随后, Fenstermacher^[16] 利用超高真空质谱系统对玻璃制造过程中产 生的新鲜表面吸附气体进行了半定量分析。在此 之后, Sheen^[17] 研究了氢原子在玻璃表面的吸附及 重组。Baptist 等^[18] 理论分析 CO₂ 与玻璃新鲜表面 产生强烈反应将诱发 H₂O 的生成, 并指出 H₂O 与玻 璃表面的硅酸盐分子及表面缺陷间存在的相互作 用是实验测试中水含量不升反降的根源。Souza 等^[19] 进一步分析断裂玻璃表面与水蒸气间的相互作用, 指出玻璃断裂后断裂面立即发生了实质性重构并 形成应变硅氧烷建, 水分子与应变硅氧烷键反应形 成表面硅醇基团。Leed 等^[20]利用分子动力学模拟 玻璃断裂表面的水吸附行为,利用表面吸附位点能 量分布及按位点类型分列的位点能量,表征高能位 点在水分子最初吸附到表面时所起的作用。

最近, Lin 等^[21]研究二氧化硅和钙-硼铝硅酸盐 玻璃表面的水吸附,确定了吸附水层有效厚度和吸 附层中水分子氢键相互作用的分布。Yoshitaka 等^[22] 发现硅酸盐玻璃表面硅醇基团增强了 SiO₂ 与气态 HF 之间的反应,提出以表面硅醇基为反应中心的 SiO₂ 与 HF 链式反应模型,解析硅酸盐玻璃表面气 体吸附机制。Kalahe 等^[23]利用反应分子动力学模 拟铝硅酸钠玻璃界面反应的温度依赖性。综上所 述,前人研究侧重于微观尺度下气体在玻璃及其它 吸气材料表面吸附重组、玻璃断裂面对气体吸附的 催化效应。然而,针对玻璃破碎新鲜表面吸气特性 的系统性研究偏少,并且将玻璃破碎新鲜表面吸气

基于此,本文提出了一种具备较大抽速、较易 激活方式、材料制备便捷的快速抽气新方法(即:样 品刺破后破碎瞬态下大量新鲜表面对气体抽气能 力),以吸气成分、分压力、最大有效抽速等吸气特 性剖析为切入点,设计高真空刺破实验装置,利用 四极质谱仪剖析残余气体成分,利用真空计监测压 力,提取气体成分及压力含时演化规律,剖析最大 有效抽速,解析玻璃破碎诱发新鲜表面吸气机理, 探讨新方法在高真空获得及维持理论解析及实际 应用中的潜在优势。

1 实验原理及方法

1.1 气体成分及分压力分析实验

首先,本文构建如图 1 所示的实验装置。该实 验系统核心为样品室、进气室、抽气装置。样品室 为四通。上端口采用 CF16 活套法兰;左右端口采 用 CF35 固定法兰;下端口选取 CF100 法兰;与 CF100 的 盲板 用螺 栓 连 接;CF100 端口 法 兰 和 CF100 盲板内部加工出深度 10 mm、直径 102 mm 的凹槽用以放置玻璃样品。真空腔体和所连接管 道均采用 304 不锈钢材质以承受适度烘烤。在吸气



1-全量程真空计(皮拉尼+冷阴极);2-四级质谱仪;3-刺破装置; 4-吸气室;5-样品;6、8-全金属角阀;7-进气室;9-分子泵;10-旋片泵

Full scale vacuum gauge (Pirani combined with cold cathode),
 Quadruple stage mass spectrometer, 3: Puncturing device,
 Aspiration chamber, 5: Samples, 6 and 8: All-metal angle valves, 7: Inlet chamber, 9: Molecular pumps. 10: Rotary vane pumps.

图1 吸气成分及分压力测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the suction composition and partial pressure test system

测试前,须对全局系统进行烘烤除气,以降低本底放气。

其次,样品室体积标定实验采用静态膨胀 法^[24-25]。样品室及周围不锈钢管道的体积 V₁ 经实测 为 0.42 L。实验使用:量程为 5×10⁻⁷~10⁵ Pa 的 MPG-400 全量程真空计测量吸气室的压力;斯坦福公司 的 RGA100 四极质谱残余气体分析仪分析吸气室 的气体成分变化;抽气系统选用旋片泵和分子泵的 串联抽气机组;刺破装置采用自行设计的基于 CF16 全金属角阀的刺穿取样装置(如图 2 所示),且 通过 CF16 法兰安装于吸气室上方。鉴于刺穿玻璃 所需行程较短,但对刺穿装置刀头硬度和力度要求 较高,本文基于 CF16 全金属角阀通过旋转开关旋 钮,控制波纹管向下位移,带动无氧铜密封件与刀



图2 玻璃刺破装置 Fig. 2 Glass piercing device

口压紧形成密封的工作原理改造全金属角阀:将密 封件替换为不锈钢杆,通过其与钨钢合金刀头形成 间隙配合,实现宽行程、高硬度、大力度、易更换刀 头功能以满足钢化玻璃刺破实验需求。

随后,实验环境设计如下:未刺破的玻璃具有 一定的吸气效果,导致样品室在关闭阀门6下的本 底压力能够长时间稳定,在稳定后的平衡压力下测 试新方法吸附的气体成分及分压力变化;测试环境 为室温25℃;相对湿度小于75%。本文的测试样品 选取厚度为8mm和6mm、直径100mm的钠钙钢 化玻璃。

实验过程具体如下:(1)实验预处理:将样品用 丙酮擦拭去除表面油污,并用酒精擦拭去除玻璃表 面水分,系统安装检漏后,开启泵组抽气到 7×10⁻⁵ Pa; (2)烘烤:由于钢化玻璃长时间烘烤温度不高于 180℃,本实验中烘烤温度控制在 170℃ 左右。烘 烤时间在 24 h以上,烘烤结束后系统压力为 2× 10⁻⁵ Pa;(3)测试:关闭阀 6,记录吸气室压力变化, 待其稳定后,标记各测试本底压力;质谱仪开启前, 开展多次除气,降低灯丝放气对系统压力的影响; 启动四极质谱仪,分析刺破前吸气室内气体成分; 利用刺破装置刺破样品,采用真空计记录总压变化; 利用 RGA 记录残余气体成分及各气体成分分压力 变化。

1.2 最大有效抽速实验

进一步,搭建抽速测试系统(如图 3 所示)开展 最大有效抽速实验测试。系统由全量程真空计(皮 拉尼+冷阴极)、刺破装置、样品室、样品、超高真空 插板阀、三通腔室、溅射离子泵、全量程真空计(皮 拉尼+热阴极)、进气室、全金属角阀、分子泵、旋片 泵构建完成。其中,样品室为四通;上端口为 CF100固定法兰;四周端口为 CF35 活套法兰。实 验利用静态膨胀法,样品室及周围不锈钢管道的体 积 V₂实测为 1.48 L。同时,实验放置两块 6 mm 厚 度的玻璃片样品,以获得尽可能多新鲜表面积。

随后,分别开展分子泵单独开启及离子泵单独 开启时的高真空极限压力下刺破实验,分析真空度 变化以测试新方法抽气速率:分别开展安装检漏、 烘烤(关闭阀 9,对分子泵组及样品室进行烘烤 24 h)、分子泵单独开启测试(抽至分子泵极限压力 且压力稳定两个小时后开展测试,记录样品室压力 变化)、离子泵单独开启测试(更换样品,重新检漏



1-全量程真空计(皮拉尼+冷阴极); 2-刺破装置; 3-样品室;
4-样品; 5、9-超高真空插板阀; 6-三通腔室; 7-溅射离子泵;
8-全量程真空计(皮拉尼+热阴极); 10进气室; 11-全金属角阀;
12-分子泵; 13-旋片泵

1: Full scale vacuum gauge (Pirani combined with cold cathode), 2: Puncturing device, 3: Sample chamber, 4: Samples, 5 and 9: Ultra-high vacuum cartridge valves, 6: Tee chamber, 7: Sputtering ion pump, 8: Full scale vacuum gauge (Pirani combined with hot cathode), 10: Intake chamber, 11: All-metal angle valves, 12: Molecular pumps, 13: Rotary vane pumps

图3 抽速测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the suction composition and partial pressure test system

烘烤,依次打开分子泵和离子泵进行抽气,关闭阀5, 由离子泵单独抽气至极限压力且压力稳定2h后进 行测试)。

然后,利用方程(1)进行有效抽速评估分析^[26], 得到刺破后的最大抽速 *S*(L/s):

$$S = \frac{p_1 - p_2}{p_1} S_{\text{eff}},$$
 (1)

其中: p_1 为刺破前的压力(Pa); p_2 为刺破后的压力 (Pa); S_{eff} 为样品室抽气口处泵的有效抽速(L/s); S为刺破后的最大抽速(L/s)。泵及连接管道对样品 室的有效抽速如下:

$$S_{\rm eff} = \frac{S_{\rm p}C_{\rm f}}{S_{\rm p} + C_{\rm f}},\tag{2}$$

其中: S_p 为真空泵的抽速(L/s); C_f 为分子流结构元 件的流导(L/s)。

为了精准表征泵及出口管道对样品室的抽速, 利用 COMSOL 软件中的自由分子流模块和粒子追 踪模块计算复杂管道的传输概率,利用方程(3)结合 传输概率得到泵出口管道的流导^[27]:

$$C_{\rm f} = P_{\rm c} C_0, \qquad (3)$$

其中: C₀为分子流结构元件入口孔的流导(L/s); P_c为结构元件的传输概率。这里入口孔的流导 C₀满 足下列约束:

$$C_0 = 0.9 \sqrt{\frac{T}{M}} d^2,$$
 (4)

其中: *d* 为圆孔直径(m); *T* 为气体温度(K); *M* 为气体摩尔质量(g/mol)。新方法的最大抽速算法流程 图如图 4 所示。



图4 最大抽速算法流程图

Fig. 4 Flowchart of the maximum pumping speed algorithm

2 结果与分析

2.1 样品破碎面积分析

选取并分析破碎后的6mm厚度和8mm厚度 样品。玻璃初始样品及破碎后的样品实物图如图5 所示。实测图像验证了玻璃初始样品的完整性及 本文样品刺破装置有效性。利用图像处理软件 ImageJ识别的平面裂缝图如图6所示。由图6可 知:样品被刺破后瞬间碎裂,且产生大量小碎块, 6mm厚度样品产生的碎块数量明显多余8mm厚 度样品。

利用全自动比表面积及孔隙分析仪(即:麦克



图5 玻璃样品实物图。(a)初始样品图,(b)破碎后样品图

Fig. 5 Physical picture of glass samples. (a) Initial sample, (b) sample after crushing

ASAP2020), 通过比表面积测试得到的两种样品破碎后产生的新鲜表面面积如表1所示。



图6 平面裂缝图像识别图。(a) 8 mm 厚度样品,(b) 6 mm 厚度样品

Fig. 6 Plane crack image recognition map. (a) Crack map of 8 mm thickness sample, (b) crack map of 6 mm thickness sample

表1 玻璃破碎样品诱发的新鲜表面面积

Tab. 1 Fresh surface area induced by glass breakage samples

样品尺寸	新鲜破碎表面 总面积/m ²	平均孔径	测量仪器
厚度 6 mm、 直径 100 mm	4824.32	12.0579	全自动比表面积及 孔隙分析仪 (麦克 ASAP2020)
厚度 8 mm 、 直径 100 mm	4250.97	12.0579	

由表1可知,6mm厚度样品破碎产生的新鲜 表面面积大于8mm厚度样品。同时,新鲜表面的 孔径分布如图7所示,玻璃破碎后产生的新鲜表面的 中存在大量的微孔,孔的数量与产生的新鲜表面面 积正相关,表面孔越多,则破碎后产生的新鲜表面面 面积越多,验证了新方法中玻璃样品破碎后能产生 大量新鲜表面原理的可行性。

2.2 气体成分及分压力分析实验结果

图 8 和图 9 分别表示两种不同样品测试后的气体成分及压力变化图。由图 8~9可知:系统抽至极限压力后关闭阀 6,压力逐渐上升并趋于平缓,当压力稳定后进行刺破,压力瞬间下降,变化趋势明显。新方法对 H₂、CO、N₂的抽气速率较高,对 CO₂和H₂O 也有一定的抽气效果,且抽气效果和新鲜表面面积正相关(即:新鲜表面积越多,抽气能力越强),实测实验中 6 mm 厚度样品的抽气效果被发现优于 8 mm 厚度样品。

2.3 最大有效抽速测试实验

图 10 和图 11 分别表征两种不同实验条件下压 力含时演化规律,在分别使用分子泵和离子泵的情



图7 新鲜破碎表面的孔径分布

Fig. 7 Pore size distribution on freshly crushed surfaces



图8 厚度 8 mm 样品数据。(a)刺破前后压力变化图,(b)刺 破前后不同气体分压力变化图

Fig. 8 Data of samples with thickness of 8 mm. (a) Pressure change before and after puncture, (b) pressure change of different gas fractions before and after puncture

况下,泵压下降曲线呈指数衰减,当泵压稳定后,在 真空室内刺破样品,观察到压力随着时间呈指数衰减。 图 10~11 表征了分子泵极限真空度 2.53×10⁻⁵ Pa 和离子泵极限真空度 2.21×10⁻⁷ Pa下刺破前后的真 空度变化。由图 10~11 可知:压力的两次陡升发生 在依次刺破两块样品期间,压力剧烈变化原因推测



图9 厚度 6 mm 样品数据。(a)刺破前后压力变化图,(b)刺 破前后不同气体分压力变化图

Fig. 9 Data of sample with thickness of 6 mm. (a) Pressure change before and after puncture, (b) pressure change of different gas fractions before and after puncture







为玻璃样品内部存在微小裂纹以及气泡,随着样品 破碎,部分气体从破碎表面释放诱发压力上升。

随后,本文利用 COMSOL 软件中的"分子流" 模块(Molecular Flow)和"粒子追踪"模块(particle tracking)模拟管道传输概率。其余计算参数如表 2 所示。



图11 10⁻⁷ Pa 量级压力下限突破实验结果图



表 2 抽速计算参数列表

Tab. 2 List of parameters for pumping speed calculation

物理量	初值	物理含义及量纲	
Т	293	温度/K	
M	0.029	气体摩尔质量/(kg/mol)	
d	0.05	分子泵出口圆孔直径/m	
	0.07	离子泵出口圆孔直径/m	
P _c	0.11	分子泵出口管道的传输概率	
	0.13	离子泵出口管道的传输概率	
$S_{ m p}$	80	分子泵的名义抽速/(L/s)	
	100	离子泵的名义抽速/(L/s)	

因此,基于方程(1)~(4)计算得到分子泵及其 连接管道的流导为14.1 L/s,并且离子泵及其连接管 道的流导为16.8 L/s。此外,图10表征样品刺破后 可将分子泵达到的极限压力从2.5×10⁻⁵ Pa 降低至5× 10⁻⁶ Pa。相比于基准压力,此时压力水平提高了80%, 并且分子泵组的抽速为80 L/s,因此,在分子泵极限 压力下,新方法所获得的最大抽速可达11.1 L/s。同 理,图11表征离子泵达到的极限压力从2.21×10⁻⁷ Pa 降低至7.49×10⁻⁸ Pa。此时相比于基准压力,压力水 平提高了66.1%,并且离子泵的抽速为100 L/s。因 此,在离子泵极限压力下,新方法所获得的最大抽 速可达11.3 L/s。

3 结论

本文聚焦于不同行业解决高真空获得及维持 共性技术需求,利用玻璃破碎产生大量新鲜表面吸 气的原理,提出一种新型的高真空获得方法。通过 实验设计对新方法进行了一系列测试,涵盖:刺破 前后的气体成分、分压力的变化、最大有效抽速等, 进一步明晰了新鲜表面吸气效应。实验验证了玻 璃新鲜表面具有吸附多种气体的能力,尤其是对 H₂、 CO、N₂的抽气速率较高,对 CO₂和 H₂O 亦具备一 定的吸气能力。同时,新方法的最大有效抽速能达 到 11.3 L/s。

本研究发现:(1)基于该新型方法的高真空获 得及维持成本较低、便捷性较强、可重复性较高,有 助于狭小空间高真空获得及维持提供实验有效性 参考,可为后续玻璃吸气材料研发提供借鉴。(2)后 续研究可拓展玻璃基材,侧重于不同新鲜基底诱发 下面向小型化高真空维持的廉价多体吸气材料制 备策略及其多体吸气机制解析与实验工艺验证。

参考文献

- Zheng W, Jia L, Huang F. Vacuum-ultraviolet photon detections[J]. Iscience, 2020, 23(6): 101145
- [2] Lee H B R, Kim S. Borderless Collaboration in Materials Chemistry for an Industrial Ecosystem in the Semiconductor Industry[J]. Chemistry of Materials, 2023, 35(11): 4117–4119
- [3] Jamal M S, Chowdhury M S, Bajgai S, et al. Comparative studies on the morphological, structural and optical properties of NiO thin films grown by vacuum and nonvacuum deposition techniques[J]. Materials Research Express, 2021, 8(12): 126404
- [4] Stöttinger T, Rebhan B, Hingerl K. AlGe wafer bonding in ultra-high vacuum environment[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2023, 41(4): 042802
- [5] 杨乃恒. 真空获得设备(第2版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987
- [6] Zhang Y, Tang J, Xu X, et al. Optimal design of magnetically suspended high-speed rotor in turbo-molecular pump[J]. Vacuum, 2021, 193: 110510
- [7] Verma R, Nagendra H N, Vivek G A, et al. Studies on activated carbons towards the performance improvement of cryosorption pump[J]. Cryogenics, 2020, 108: 103089
- [8] Geng J, Wang X, Guo M, et al. Research on measuring method of pumping speed for miniature sputter ion pump[J]. Measurement, 2022, 190: 110736
- [9] Fattahzade M, Kaflou A, Dashtizad V. Effect of milling and adding yttrium on sorption characteristics of Zr-Co based nanostructure chemical getter[J]. Journal of Alloys

and Compounds, 2020, 846: 155329

- [10] Luo Z, Leng H, Han X, et al. Influence of preparation methods on the hydrogen absorption properties of Zr7V5Fe getter alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 926: 166739
- [11] Li L, Zeng F, Li W, et al. Nitrogen absorption behavior and mechanism of TiZrMnFe getter alloy[J]. Vacuum, 2021, 183: 109814
- [12] Moghadam A H, Dashtizad V, Kaflou A, et al. Effect of rare earth elements on sorption characteristics of nanostructured Zr–Co sintered porous getters[J]. Vacuum, 2015, 111: 9–14
- [13] Alamgir M K, Ikram M, Mughal G H, et al. Analysis of a non-evaporable getter of Ti-Al-Zr thin film with enhanced performance used for ultra-high vacuum generation[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2019, 75: 373–379
- [14] Litvinov V A, Okseniuk I I, Shevchenko D I, et al. Study of Secondary-Ion Emission during the Interaction of Zr2Fe Getter Alloy with Oxygen[J]. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2022, 16(5): 789–796
- [15] Ware R K, Pirooz P P. Gas adsorption on freshly broken glass surfaces-a source of error in analysis of bubbles in glass[J]. Glass Technology, 1967, 8(3): 86–94
- [16] Fenstermacher J E. Analysis of gases entrapped in glass using a mass spectrometer–ultrahigh vacuum system[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1971, 8(1): 380–384
- [17] Sheen D B. Adsorption and recombination of hydrogen atoms on glass surfaces. Part 1. -Method of study and the mechanism of recombination at 77 and 273 K[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases, 1979, 75: 2439–2453
- [18] Baptist R, Levy F. Carbon dioxide adsorption on glass[J]. Vacuum, 1992, 43(3): 213–214
- [19] Souza A S, Pantano C G. Mechanisms for silanol formation on amorphous silica fracture surfaces[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 82(5): 1289–1293
- [20] Leed E A, Pantano C G. Computer modeling of water adsorption on silica and silicate glass fracture surfaces[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2003, 325(1-3): 48–60
- [21] Lin Y T, Smith N J, Banerjee J, et al. Water adsorption on silica and calcium-boroaluminosilicate glass surfacesthickness and hydrogen bonding of water layer[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(3):

1568-1580

- [22] Ono Y, Nagai S, Hayashi Y, et al. The role of silanol groups on the reaction of SiO₂ and anhydrous hydrogen fluoride gas[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2023, 106(7): 4052–4060
- [23] Kalahe J, Mahadevan T S, Ono M, et al. Temperature dependence of interfacial reactions of sodium aluminosilicate glasses from reactive molecular dynamics simulations[J]. Applied Surface Science, 2023, 619: 156780
- [24] Li D, Wang Y, Zhang H, et al. applications of vacuum

measurement technology in China's space programs[J]. Science & Technology, 2021, 2021,001: 7592858

- [25] Wang L, Sun L, Zhang H, et al. Spacecraft hatch leak testing[J]. Vacuum, 2021, 189: 110233
- [26] Vinayakumar K B, Gund V, Lal A. Pyroelectric lithium niobate electron emission-based ion-pump[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2021, 39: 024202
- [27] 达道安. 真空设计手册(第 3 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004