一种高性能非蒸散型吸气剂的性能分析

王国栋¹ 刘霄¹ 王姣龙¹ 蔡洋洋¹ 张峰¹ 陈长琦¹ 谢远来^{2*} (1. 合肥工业大学 机械工程学院 合肥 230009; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所 合肥 230031)

Performance Analysis of a High-Performance Non-Evaporable Getter

WANG Guodong¹, LIU Xiao¹, WANG Jiaolong¹, CAI Yangyang¹, ZHANG Feng¹, CHEN Changqi¹, XIE Yuanlai^{2*}

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institute of Physical Science, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract Non evaporable getters (NEGs) are important materials for maintaining vacuum in high and ultrahigh vacuum systems, with high stability and gas adsorption. This article uses the powder metallurgy method to prepare $Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}$, and builds a high vacuum system for testing based on the small hole flow conductivity method. The effects of gas type and working temperature on the performance are tested. Through experiments, it is known that $Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}$ has good suction performance for H_2 , CO₂, and N₂, and has the best performance for H_2 , but it does not absorb inert gases such as He. At the same time, it indicates that the working temperature has a significant impact and the optimal working temperature is 200°C. The crystal phase, morphology, and composition of the adsorbent were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results showed that the surface of the alloy exhibited a porous structure, mainly composed of α -Zr, C15 Laves phase, and some Zr_xAl_y compound. The structures and phase components are conducive to the adsorption of gases.

Keywords Non-evaporable getter (NEG), Powder metallurgy, Performance testing, Morphological analysis, Crystalline structure

摘要 非蒸散型吸气剂(NEG)是高真空和超高真空系统维持真空度的重要材料,具有高稳定性和高气体吸附性能,文章 采用粉末冶金的方法制备出 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂,并基于小孔流导法搭建了一套吸气剂性能测试的高真空系统,分别测试 了气体种类及工作温度对吸气剂性能的影响,实验结果表明: Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂对 H₂、CO₂、N₂都有很好的吸气性能,其 对 H₂ 的吸气性能远超 N₂ 和 CO₂,但它不吸收 He 等惰性气体,不同工作温度对吸气性能有很大差异,其最佳工作温度为 200℃。利用 X 射线衍射图谱(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)及能量色散图谱(EDS)对吸气剂进行晶相、形貌和成分分析, 结果表明 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂表面呈现多孔状结构,其主要由α-Zr基固溶体、C15 Laves 相及少量 Zr_xAl_y 化合物组成,多 孔的结构及α-Zr基固溶体、C15 Laves 相的高比例有利于吸气剂对活性气体的吸附,因此 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂展现出较好 的性能。

关键词 非蒸散型吸气剂 粉末冶金 性能测试 形貌分析 晶相结构 中图分类号:TB741 文献标识码: A doi:10.13922/j.cnki.cjvst.202402006

随着科学技术的发展,许多科研和生产领域对 真空度的要求越来越高,如半导体行业、粒子加速 器、高纯度气体制备和提纯、核聚变等领域,而非蒸 散型吸气剂(NEG)具有体积小、抽速大并且在常温 和高温条件下能正常工作的优点而被广泛应用于 在上述领域之中^[1-5]。非蒸散型吸气剂通常由过渡 族 IVB 族、VB 族的 Ti、Zr、V、Hf 等元素及其合金 组成,同时也可掺入 Fe、Al、Ni 等元素用以提高其

收稿日期:2024-02-23

基金项目:国家重大科技基础设施项目(2018-000052-73-01-001228)

^{*}联系人: E-mail: Laurrence@ipp.ac.cn

性能^[68],根据基体金属元素的不同可分为 Ti 基和 Zr 基非蒸散型吸气剂。其中由于具有大抽速、大吸 气量的特点,Zr 基吸气剂合金的应用更为广泛,目前 已经发展出针对不同真空度需求的多种类、多用途 的合金,如ZrAl₁₆、ZrVFe、ZrCo、ZrFe等^[9-12]。ZrVAl 吸气剂作为一种高性能的非蒸散型吸气剂,对氢、 氮、氧等活性气体有着很强的吸附能力,可以应用 在对真空度要求高的场合,然而当前这种材料的研 究资料甚少,限制了其应用范围,因此有必要对其 进行研究。

本文通过粉末冶金的工艺制备出直径 10 mm, 厚度约 2-3 mm 的 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 合金非蒸散型吸 气剂块状样品。根据 GB/T 25497-2010^[13] 以及美国 材料与实验协会 ASTM F798-97(2002)^[14] 中关于非 蒸散型吸气剂性能测试方法的介绍,采用定压法来 测量 Zr-V-Al 合金的吸气性能,据此设计一套基于 小孔流导法的吸气剂性能测试的超高真空装置,并 通过装置测得 Zr-V-Al 吸气剂的吸气性能参数。最 后采用 X 射线衍射(XRD)及扫描电子显微镜(SEM) 和能量色散能谱(EDS)对吸气剂材料进行晶相、形 貌、元素组成表征分析,从微观角度去理解和分析 吸气剂材料的吸气特性。

1 实验

1.1 吸气样品制备

实验所需要的 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 合金吸气剂样品 由 *m*(Zr):*m*(V):*m*(Al)=75:21:4(质量百分比)制备而 成,其中 Zr、V、Al的纯度分别为 99.95%、99.99%、 99.99%。制备前按比例称量适当重量的金属粉末, 利用无水乙醇、丙酮等对原料进行超声清洗,并放 置在真空干燥箱中烘干备用。随后将烘干的金属 粉末混合经过一系列的熔炼(温度 2000℃)、破碎、 分筛(选取粒径小于 300 目的合金粉末,即尺寸小 于 48 µm)、压制(压力 0.1 MPa)、真空烧结(温度 800℃)等操作,得到直径 10 mm,厚度约 2 mm 的圆 片状吸气剂样品。最后将制备好的样品真空封装 保存,防止其接触空气被过度氧化从而影响其吸气 性能,以待后续测试时使用。

1.2 实验测试装置介绍

1.2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,其主要由四大部分组成: 真空获得系统、进气系统、吸气系统及加热系统组 成。真空获得系统采用复合分子泵 TMP 与旋片泵 RVP 串联的泵组进行抽气。进气系统主要包括气 源以及进气室 VC1,气源部分为含各种测试气体的 气瓶、减压阀 RV,并通过气体质量流量计 MFC 和 针型泄露阀 VLV 共同精确控制进气量,进气室 VC1 的目的是获得稳定的气体压力,并通过全量程 真空规 G1 测量进气压力 *p*_m以及四极质谱仪 RGA 检测气体分压。吸气系统包括吸气室 VC2 和样品 室 VC3,吸气室通过全量程规 G2 测量吸气压力 *p*_g, 样品室则采用放气率低的石英玻璃管,并放有 NEG 材料。加热系统包括两类,一类是用于给整个 装置烘烤,提高真空度的玻璃纤维带,另外一类则



Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the suction agent testing device

是采用感应加热的方法,用以激活 NEG 材料并维持工作温度,通过在样品室外缠绕线圈,通电后发热将热量传递给材料,这种方法属于无接触加热方式,在装置结构上得以简化,其次操作方便,满足实验室用电安全的要求。

整个装置管道及腔室均由 304 L 不锈钢制备而 成(除样品室外),且内部经过机械抛光处理,腔室 与管道之间采用焊接或 CF 法兰方式连接起来,管 道之间则多采用 Swagelock 连接法,以保证密封性 良好。在进气室与吸气室之间装有固定流导装置 C 及截止阀 V2,用于使进入吸气室的测试气体形成 分子流,该流导装置是通过电火花加工技术在双面 刀口法兰中间加工一个直径 D=1.004 mm,厚 L=2.01 mm 的小孔作为固定流导孔,经测试其对 H₂、N₂、 CO₂ 的流导分别为 1.261×10⁻⁴ m³/s、3.371×10⁻⁵ m³/s 及 2.688×10⁻⁵ m³/s(在室温 25℃下)。

1.2.2 测试原理

定压法测试吸气剂吸气性能的基本原理是:利用分子流状态下,固定小孔的流导保持不变,流经小孔的气体量与小孔两端压差之比,可获得材料的吸气速率。对于非蒸散型吸气剂,保持吸气室压力恒定不变,调节进气室压力,控制吸气量从而实现测量。定压法测量的性能参数一般包括吸气速率*S*及吸气容量*Q*,其计算公式如下^[13-14]:

$$S = \frac{C(p_{\rm m} - p_{\rm g})}{m \cdot p_{\rm g}} \tag{1}$$

$$Q = \frac{C}{m} \int_0^t (p_{\rm m} - p_{\rm g}) \mathrm{d}t \qquad (2)$$

式中: S为吸气剂吸气速率, cm³·s⁻¹·g⁻¹; C为固定小 孔的流导, cm³·s⁻¹; p_m 为进气室的压力, Pa; p_g 为吸 气室的压力, Pa; m为吸气剂材料的质量, g; Q为t时 间内的吸气量, cm³·Pa·g⁻¹; t为吸气时间, s_o

在实际测试时, NEG样品被固定在样品室 VC3 中, 根据 ASTM F798-97(2002)^[12] 中关于 p_g 值 的要求, 可选择 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ Pa 之间, 为减少装置 本底放气对材料吸气性能的影响, 这里选择较高值 8×10^{-4} Pa。

1.2.3 激活实验

非蒸散型吸气剂的激活温度是其最重要的参数,为确定 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 合金吸气剂的激活条件, 分别以 200℃ 30 min、250℃ 30 min、300℃ 30 min 激活吸气剂,并在室温(25℃)下测试。测试条件为: 当吸气剂激活并冷却至室温后,往吸气室内充入 H₂ 至 10^{-1} Pa, 至真空度下降到 10^{-4} Pa 为止, 记录真空 下降的时间, 得到图 2。



Fig. 2 Test result chart of the activation conditions for the vacuum cleaner

由图 2 可知, 当 200 ℃ 30 min 激活时, 吸气剂并 不能将真空抽至 10^{-4} Pa, 且 1000 s 以后真空保持稳 定, 稳定在 7×10⁻³ Pa, 说明该激活条件并不能使吸 气剂完全激活; 250 ℃、300 ℃ 的激活温度都可以使 真空度降至 10^{-4} Pa, 说明此时吸气剂已大部分或完 全激活; 300 ℃ 激活温度下, 吸气室真空度降至 10^{-4} Pa 的时间只需要 70 s, 而 250 ℃ 激活温度下的时间为 300 s 左右, 说明吸气剂在 300 ℃ 激活温度下相较 于 250 ℃ 出现了进一步的激活。

因此,为确保 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 合金吸气剂完全 激活且避免温度过高而导致材料结构的破坏,采用 350℃ 30 min 的激活条件。

1.3 实验步骤

根据图 1 将吸气剂性能测试装置安装好后,即可开始进行 NEG 材料的性能测试,其具体流程如下:

(1)采用精度达 1 mg 的电子天平称量样品重量,并将吸气剂样品放入样品室中,打开除 V1 阀之外所有的截止阀,启动分子泵机组对装置进行抽真空,并接入最小漏率达 1×10⁻¹³ Pa·m³/s的氦质谱检漏仪对装置进行检漏,经检测系统的整体漏率小于1×10⁻¹¹ Pa·m³/s。

(2)待分子泵机组将装置的真空度抽至低于 1×10⁻⁵ Pa时,即可使用玻璃纤维带将装置缠绕包裹, 并覆上铝箔纸保温,在150℃下烘烤除气24h以上, 烘烤结束后降至室温测得真空度低于1×10⁻⁶ Pa。

(3)采用感应线圈对吸气剂材料进行 350℃下

加热 30 min 激活处理,并降温至所设置的工作温度, 期间需要使用分子泵机组维持高真空。

(4)待真空度低于 2×10⁻⁶ Pa 时,关闭截止阀 V4、 V5,打开截止阀 V1,并缓慢调节微调阀 VLV 进气, 在此期间可调节阀 V4, 控制吸气室内压力 p。恒定 为 8×10^{-4} Pa, 记录进气室压力 p_m 随时间变化的值, 通过公式(1)计算出吸气剂的吸气性能。

(5)测试结束后,关闭分子泵机组,向内部充入 氮气清洗装置,并更换吸气剂材料。

1.4 样品微观表征

使用 X 射线衍射仪(XRD)检测合金样品的晶 体结构,分析其晶相结构,衍射扫描区间 10°-90°, 速度为1°/min:利用扫描电子显微镜(SEM)观察其 表面的微观形貌,并采用背散射电子能谱(EDS)研 究表面不同区域的元素组成。

实验结果 2

2.1 形貌及相成分

2.1.1 合金相结构分析

本文利用 X 射线衍射方法对 Zr₅₉₄₆V₂₉₈₁Al₁₀₇₃ 的相结构进行分析,测得其 XRD 图谱如图 3 所示。 由图可知, Zr₅₉₄₆V₂₉₈₁Al₁₀₇₃吸气剂的相成分包含 α -Zr基固溶体, C15 Laves 相以及多种 Zr, Al, 化合 物,通过计算衍射峰的面积,可知它们的含量分别 为24%、60.5%和15.5%。

C15 Laves 相是吸气剂中吸气性能最好的吸气 相,这是因为它是一种典型的 MgCu, 面心立方结构, 更能容纳活性气体,因此吸气性能最好⁹⁹。该吸气 剂中 C15 Laves 相的主要成分是 ZrV2, 与正常的 ZrV₂的特征峰相比,图 3中展示出来的 C15 Laves 相衍射峰发生了左移,这很可能是因为 AI 进入



Fig. 3 XRD pattern of Zr_{59,46}V_{29,81}Al_{10,73} NEG

ZrV,中扩大了其晶格常数,衍射角变小,峰发生左 移现象。α-Zr基固溶体也是吸气剂中最主要的吸 气相,呈现密排六方结构,虽有较好的吸气能力,但 比不上 C15 Laves 相。Zr_xAl_y成分众多,其中既有 Al 单质、ZrAl,等不具备吸气剂能力的相,也含有少 量能吸气的 Zr₅Al₃相^[15]。

2.1.2 合金微观形貌及成分分析

图 4 为 Zr_{59 46}V_{29 81}Al_{10 73} 合金吸气剂显微组织的 背散射照片,可以看出吸气剂表面呈现多孔的结构, 存在着大小不一的颗粒状物质,可看出其尺寸均小 于 48 μm, 同时颗粒之间存在着较为明显的界限, 大 型颗粒表面有着颜色较深的白色团状或枝状组织, 这很可能是制备过程中,由于 Zr 的熔点最高,熔炼 后在冷却凝固过程中首先析出而形成^[16]。

为进一步确定合金中各相的化学成分,使用 EDS 对材料进行点扫描, 对图 4(b)中标注的 3 处位 置进行成分分析,结果如图 5 和表 1 所示。从分析 结果来看,位置1深色区域Zr含量超过了50%且 Al 含量较高,可认定为 α -Zr基固溶体和一些锆铝 化合物,由于 Al 的原子序数较小,因此在 SEM 上呈



图4 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}吸气剂的背散射 SEM 形貌。(a)×1000, (b)×500 Fig. 4 Backscatter SEM image of Zr_{59,46}V_{29,81}Al_{10.73} NEG. (a) ×1000, (b) ×500



图5 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}吸气剂不同位置的 EDS 分析图。(a)位 置 1, (b)位置 2, (c)位置 3

Fig. 5 EDS analysis of $Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}$ absorbent. (a) Position 1, (b) position 2, (c) position 3

1 do: 1 EDS dialysis data of 2159.46 v 29.817 H10.73 IVEO					
选点	成分/%				
	Zr	V	Al		
1	50.9	25.0	24.1		
2	54.2	36.5	9.3		
3	47.1	46.7	6.2		

表 1 $Zr_{5946}V_{7}$	9 81 Al 10 73	吸气剂的	EDS	分析数据
----------------------	---------------	------	-----	------

Tab. 1EDS analysis data of Zr_{59.46}VV29.81AlNEG

现较暗的颜色; 位置 2、3 灰白色区域 Zr、V 的含量 都很高, 判定为 ZrV₂-C15 Laves 相, 由于 Zr 含量太 多可能还存在一定的 α -Zr基固溶体。

2.2 活化后 NEG 的吸气性能

2.2.1 工作温度对性能的影响 吸气剂的吸气过程主要是表面吸附-体内扩散 过程,容易受到温度的影响,为测试不同温度下 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}合金吸气剂的吸气性能,分别在室 温(25℃)、50℃、100℃、150℃、200℃、250℃下进 行吸氢测试,由于吸气剂吸附容量大,为减少实 验周期,测试时间维持在3h内,测试结果如图6 所示。





据图可知, Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂对 H₂的抽速 受到温度的影响, 室温下其初始抽速为 2.8 L·s⁻¹·g⁻¹, 随着工作温度的升高, 其初始抽速也上升, 200℃ 达 最高值 13.1 L·s⁻¹·g⁻¹, 3 h 内的吸气容量也由 19.47 Pa·L·g⁻¹提高到 40.3 Pa·L·g⁻¹。其最佳工作温度为 200℃, 低于 200℃ 时, 温度越高, 吸气剂对 H₂ 的吸 气性能越好, 这是由于温度越高, 材料吸附和向内 部扩散 H₂ 所需的能量越小, 有助于材料吸氢; 温度 高于 200℃ 时, 其吸气性能反而下降, 是因为吸收 H₂ 是可逆的, H₂ 在材料内部是以固溶体形式存在的, 当温度过高时材料内部的 H₂ 会脱附出来, 这与熊玉 华等^[15] 研究发现 200℃ 时 H₂ 会从 Zr-V-Fe 吸气剂 中脱附出来的现象类似。

为进一步验证温度是否也会对 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂吸收其它活性气体的性能有所影响,分别在 25℃及 200℃下测试对 N₂及 CO₂的吸气性能,测 试结果如图 7、图 8 所示。据图可知,温度对 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂吸附活性气体有较大的影响, 与室温下相比,200℃下吸气剂对 N₂及 CO₂的初始 抽速无明显变化,但饱和吸气容量却分别从 1.51 Pa·L·g⁻¹、1.62 Pa·L·g⁻¹提升至 4.67 Pa·L·g⁻¹、2.95 Pa·L·g⁻¹,提升了 209% 和 82%。从吸气原理上分 析,室温下随着吸气剂不断吸附气体分子,吸气剂



图7 Zr-V-Al 吸气剂在不同温度下对 N, 的吸附性能曲线







表面会被氧化或氮化,氧化/氮化层阻止了吸气剂与 气体分子的进一步反应;而随着工作温度的升高, 促进表面吸附气体向体相扩散,表面层会部分还原 而露出新鲜的表面,从而提高了吸气剂的吸气性能。 2.2.2 气体种类对性能的影响

吸气剂吸收 N₂、CO₂等活性气体是一种化学吸 附,受到反应物的限制,而 H₂则是大多以固溶体形 式存在于材料内部,很大程度上取决于吸气剂材料 的内外压差,只有在吸附大量的 H₂才有可能与材料 发生化学反应^[17]。根据图 9,Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂 对不同的气体具有选择性吸收的特性,无论是室温 还是高温下,对 H₂ 的吸气性能都远超过 N₂和 CO₂。 在室温下,Zr-V-Al 对 N₂和 CO₂ 抽速只有 H₂ 的 15% 和 20%,且随着吸气量的增加,这个数值还在不断 下降;而在 200℃下,Zr-V-Al 吸气剂对 H₂无论是吸 气速率还是吸气容量更是其余两种气体的数十倍 乃至上百倍。





室温下, Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂对 N₂ 的吸气性 能不如 CO₂, 而在高温 200℃下却超过了 CO₂ 的吸 气性能, 这可能是由于室温下 CO₂ 有 3 种吸附形态 结构, 有利于 CO₂ 在吸附剂表面的吸附。但随着温 度升高, 吸附剂表面形成的氧化物结构比氮化物结 构更为稳定^[18], 不利于 CO₂ 在表面还原向体相扩散, 从而降低吸气剂对 CO₂ 的吸气能力。

为验证 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂是否吸收惰性气体, 对其还进行 He 气吸气测试, 测试过程中无法通过控制进气室压力 *p*m来维持吸气室端压力 *p*g的稳定, 因此可以说明该吸气剂不吸收惰性气体,这进一步验证了先前文献资料结果^[19]。

2.3 材料的自燃现象

在对 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂进行测试时发现一 些特殊的现象, 在测试吸气性能结束后, 对 150℃ 工 作温度的吸气剂材料进行更换时, 当接触空气后吸 气材料发出明亮的光, 随后变成暗红色, 最终材料 由灰黑色变成黄褐色, 如图 10 所示。查阅资料可知, 氮化锆、氧化锆以及五氧化二钒呈现出黄色, 因此可 推测吸气剂在真空中暴露空气后发生了自燃, 与空 气中的 N₂、O₂等发生反应。自燃后的 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂重新激活后测试其吸 H₂ 性能, 发现其基本不 吸收气体, 已完全丧失吸气能力。

进一步分析工作温度是否影响 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 吸气剂的自燃,激活吸气剂后在室温、50℃、100℃ 工作温度下分别在真空中暴露空气,均未发生自燃, 由此可知,该材料真空中暴露空气只有在 150℃ 以 上才出现自燃, Zr、V 等元素的氮化或氧化反应与 温度有关。



图10 Zr-V-Al吸气剂自燃前后外观对比。(a)自燃前样品,(b)自燃后样品

Fig. 10 Comparison of Zr-V-Al gas absorbent before and after self-ignition. (a) Samples before self-ignition, (b) sample after spontaneous combustion

3 结论

(1)本文采用熔炼-破碎-分筛-压制-真空烧结 的方式制备出块状的 Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 合金吸气剂样 品,并基于定压法搭建出吸气剂性能测试平台。

(2)对 $Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}$ 合金进行表面形貌、晶 相、成分分析,发现其由 60.5%的 C15 Laves 相、24% 的 α -Zr基固溶体及 15.5%的锆铝化合物组成,且表 面呈多孔结构。C15 Laves 相含量高,且为面心立方 结构,有助于吸附气体,而表面的多孔结构提供了 大量吸附位点,因此 $Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73}$ 吸气剂呈现很 好的吸气性能。

(3)通过对样品吸附 H_2 、 N_2 、 CO_2 、He 等气体性 能测试,发现该吸气剂对 H_2 有着优良的吸气性能, 可少量吸收 N_2 、 CO_2 等活性气体,但不吸收 He 等惰 性气体;同时温度对吸气剂的吸气性能有很大影响, 其吸氢的最佳工作温度为 200°C,初始吸气速率可 达 13.1 L·s⁻¹·g⁻¹, 3 h 的吸氢容量更是达到 40.3 Pa·L·g⁻¹。

(4)Zr_{59.46}V_{29.81}Al_{10.73} 合金吸气剂在温度 150℃ 以上从真空中暴露在大气时会发生自燃,材料从灰 黑色变成黄褐色且彻底丧失吸气能力,因此在使用 该吸气剂时要避免高温情况下接触空气而导致自 燃,以免造成吸气剂或设备的损坏。

参考文献

- [1] Baquero-Ruiz M, Coda S, Dolizy F, et al. Non-evaporable getter pump operations in the TCV tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, 165: 112267
- [2] Shan R, Qi T T, Li B Z, et al. Research status and application progress of non-evaporable film getter[J]. Journal of

Functional Materials, 2018, 49(5): 5049-5055 (单睿, 齐 通通, 黎秉哲, 等. 非蒸散型薄膜吸气剂的研究现状及 应用进展 [J]. 功能材料, 2018, 49(5): 5049-5055(in Chinese))

- [3] Kondrashev S, Beebe E, Coe B, et al. Development of highly efficient NEG pumping system for EBIS[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(11): 113307
- [4] Maccallini E, Siviero F, Bonucci A, et al. Non evaporable getter (NEG) technology: a powerful tool for UHV-XHV systems[J]. AIP Conference Proceedings, 2012, 1451(1): 24–27
- [5] Ferrario B. Chemical pumping in vacuum technology[J].Vacuum, 1996, 47(4): 363–370
- [6] Zhang Y L, Li J S, Zhang T B, et al. Hydrogenation thermokinetics and activation behavior of non-stoichiometric Zr-based Laves alloys with enhanced hydrogen storage capacity[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 694: 300–308
- [7] 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
- [8] Cekić B, Ćirić K, Iordoc M, et al. Kinetics of hydrogen absorption in Zr-based alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 559: 162–166
- [9] Peng S M, Zhao P J, Xu Z L, et al. Preparation and phase analysis of ZrV₂[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2002, 36(4-5): 436–438,461 (彭述明, 赵鹏骥, 徐志 磊, 等. ZrV₂ 金属间化合物的制备与物相分析 [J]. 原子 能科学技术, 2002, 36(4-5): 436–438,461(in Chinese))
- [10] Hariyadi A, Suwarno S, Denys R V, et al. Modeling of the hydrogen sorption kinetics in an AB₂ laves type metal

hydride alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 893: 162135

- [11] Tengfei L, Yan Z, Xiuying W, et al. Sorption properties of titanium getter with addition of Zr-V-Fe[C]//Proceedings of the 10(th) China-Russia Symposium on Advanced Materials and Technologies. Ed. Editorial Office of Rare Metals. Editorial Office of RareMetals, 2009, 4: 417-420
- [12] Cui H, Cui J D, Xu Y H, et al. Synthesis and CO absorption behavior of Zr_xV_yFe_z getter alloys[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(3): 278–283 (崔航, 崔建东, 徐瑶华, 等. Zr_xV_yFe_z 低温激活 吸气剂的 CO 吸气动力学研究 [J]. 真空科学与技术学 报, 2016, 36(3): 278–283 (in Chinese))
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 25497-2010 Test methods for gas absorbency and release of getters[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 25497-2010 吸气剂气体吸放性能测试方法 [S]. 北京:中国标准出版社, 2011(in Chinese))
- [14] ASTM F 798-97 Standard practice for determining gettering rate, sorption capacity, and gas content of nonevaporable getters in the molecular flow region[S]. West Con-

shohocken: American Society for Testing and Materials, 2008.

- [15] Hu Z F, Yin Y X, Jiang H L, et al. Preparation and microstructure of the ZrV_xFe_(2-x) alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(8): 765–767 (胡志方, 尹延西, 江洪林, 等. ZrV_xFe_(2-x)合金的制备及其显微组织 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(8): 765–767(in Chinese))
- [16] Xiong Y H, Gu W, Wei X Y, et al. Activation process and mechanism of ZrVFe getter[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(7): 1358–1363 (熊玉华, 顾 为, 尉秀英, 等. ZrVFe 吸气剂激活过程及其机理 [J]. 中 国有色金属学报, 2008, 18(7): 1358–1363 (in Chinese))
- [17] Feng T Y, Chen L, Zhu J B, et al. Research status and development of ZrVFe getter[J]. Vacuum & Cryogenics, 2017, 23(1): 7–12 (冯天佑, 陈联, 朱建炳, 等. 锆钒铁吸 气剂的研究现状及进展 [J]. 真空与低温, 2017, 23(1): 7–12(in Chinese))
- [18] Zhang S. Gas selective absorption performance of Ti/Zrbased non evaporable getter[D]. Beijing: Beijing Nonferrous Metals Research Institute, 2021 (张烁. 钛/锆基非蒸 散型吸气剂选择性吸气性能研究 [D]. 北京: 北京有色 金属研究总院, 2021(in Chinese))
- [19] Welch K. Chapter 4 Nonevaporable getters[M]//Welch K. Capture pumping technology (2nd edition). Amsterdam: Elsevier, 2001: 229–253