

全超导托卡马克第一壁石墨材料的放气特性研究

陈长琦¹ 窦仁超^{1*} 胡建生² 龚先祖² 王小明² 王厚银²
(1. 合肥工业大学 合肥 230009; 2. 中科院等离子体研究所 合肥 230031)

Out-Gassing Characteristics of Graphite Used in Experimental Advanced Superconducting Tokamak

Chen Changqi¹, Dou Renchao^{1*}, Hu Jianshen², Gong Xianzu², Wang Xiaoming², Wang Houyin²
(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract A novel Instrument has been successfully developed to evaluate the out-gassing characteristics of the SiC coated and composite materials doped GBST1308 graphite (B 1%, Si 2.5%, Ti 7.5% and C 89%), which is used as the plasma facing material (PFM) in the experimental advanced superconducting tokamak (EAST). During the continuous baking at 18°C to 350°C for 140 hours, the out gassing characteristics of the graphite, including the total out-gassing amount, and the out-gassing rate per unit area were measured, and then calculated. The desorbed H₂, H₂O, CO and CO₂ gases were evaluated with the quadrupole mass spectroscopy (QMS); and their desorption rates were easily calculated by means of the standard spectrum library. The results show that baking temperature strongly affects both the type of desorbed gas and the out-gassing rate. We also found that baking at 350°C for 18 hours significantly reduces the out-gassing rate and the partial pressures of various residual gases.

Keywords Doped graphite, Rate of outgassing, Testing method, Mass spectrographic analysis, Baking

摘要 全超导托卡马克(EAST)实验中,面向等离子体材料(PFM)的放气特性直接影响到等离子体的品质。因此采用动态流导法的实验装置,在不同温度和真空度下对表面镀有 SiC 薄膜的 GBST1308(B 1%、Si 2.5%、Ti 7.5%、C 89%)掺杂石墨材料进行放气实验研究。测试分析了石墨材料在 18°C 至 350°C 经 140h 连续烘烤下的放气特性,并考虑温度对限流小孔流导的影响,计算出石墨材料的单位表面积放气速率和总放气量。通过四极质谱仪(QMS)监测和定性分析石墨材料放出气体的各种成分,利用标准谱图计算出残余气体中 H₂、H₂O、CO 和 CO₂ 的放气速率。结果表明,温度是影响石墨材料放气成分和放气速率的最主要因素,另外当石墨材料在 350°C 的高温 18h 恒温烘烤后能有效地减小杂质气体成分和放气速率。

关键词 掺杂石墨 放气速率 测试方法 质谱分析 烘烤

中图分类号:TL631.24, TB32 文献标识码:A 文章编号:1672-7126(2009)02-198-06

全超导托卡马克热核聚变装置(EAST)利用低温超导产生的螺旋强磁场将等离子体约束、悬托在真空中,避免等离子体将器壁烧伤熔化。这种磁约束并非将等离子体与真空室器壁完全隔离,仍有大量等离子体与真空室器壁表面发生相互作用,使器壁的温度升高,将吸附在表面结合能较低的水分子、一氧化碳等杂质气体释放出来。而杂质气体会引起等离子体辐射能量损失,影响能量平衡过程,同时还会

影响等离子体的温度分布、约束性能以及聚变的功率输出^[1]。根据等离子体放电所需要的条件,第一壁材料必须要具备熔点高、抗热冲击、低放气率、腐蚀率低、无磁性、化学作用小、良好的机械特性和疲劳特性等^[2]。

经大量研究发现具备这些特性^[2-5]的掺杂石墨,是托卡马克第一壁的理想选材。目前 EAST 第一壁的安装材料选用了我国自行研制的掺少量 Si、

收稿日期:2008-04-11

基金项目:国家自然科学基金(No. 10705030)

* 联系人: Tel: 15955176517, E-mail: dourenchao@126.com

B 和 Ti 元素的 GBST1308 型石墨材料。虽然在安装 EAST 装置前已经对参杂石墨的抗溅射^[6]、抗热冲击^[7-8]等性能进行实验测试并达到理想的效果,但仍需要对石墨材料进行多温区放气实验测试。因为等离子体在放电时要求杂质气体的含量不能高于 0.1%,而且对一些气体如 O、H₂O、CO、CO₂、油以及其它有机分子等特别敏感^[1,9]。如果这些杂质气体的含量过高会影响放电性能,严重时会导致放电失败,所以研究参杂石墨在各个温区内的放气特性,可以为 EAST 第一壁石墨的安装面积,掌握运行过程中杂质气体的来源,及其放气量、放气速率以及如何降低杂质气体提供实验依据。

1 实验

1.1 测试装置

通过对国内外材料放气装置的研究比较后^[9-13],设计的测试装置如图 1 所示:

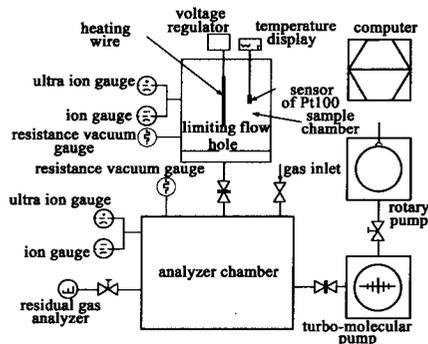


图 1 测试装置系统

Fig.1 Schematic diagram of the testing device system

整个测试系统由样品室、分析室、分子泵机组、高真空阀门、限流孔、四极质谱仪(SRS-200)、真空计(ZJ-10、ZJ-27、PKR251)和工控计算机等构成,其中分析室和样品室的体积分别为 76L、2.7L,两者之间由直径为 5mm 的限流小孔和插板阀相连,器壁由不锈钢材料构成。实验测得分子泵机组的有效抽速为 231L·s⁻¹。真空计和温度计的数据由计算机实时(次·秒⁻¹)采集,四极质谱仪通过串口 RS-232 与计算机连接。

1.2 测试方法

1.2.1 放气速率的测试方法

根据经典动态流导抽气理论^[3,14-15],样品材料的放气速率(Pa·L·s⁻¹)方程可描述为:

$$q = C_m(P_s - P_c) + V \frac{dP_s}{dt} + q_f - q_0 \quad (1)$$

式中, V 为样品室体积; P_s 为样品室压强; P_c 为分析室压强; C_m 为限流孔在分子流状态下的流导; q_f 为样品室器壁的放气速率; q_0 为样品室器壁的吸气速率。在本测试实验装置中, q_f 、 $V(dP_s/dt)$ 和 q_0 的值都比较小,可以忽略不计。所以样品材料的放气速率 q (Pa·L·s⁻¹) 简化方程可描述为:

$$q = C_m(P_s - P_c) \quad (2)$$

对于样品材料的总出气量 Q_{total} (Pa·L) 为:

$$Q_{\text{total}} = \int_0^t q dt = \int_0^t C_m(P_s - P_c) dt \quad (3)$$

其中 t 是抽气时间。在分子流状态下限流小孔的流导值会随温度的改变而改变^[16],其 C_m (L·s⁻¹) 计算公式为:

$$C_m = 3.638 A_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (4)$$

式中 A_0 、 T 和 M 分别表示小孔的面积(cm²)、气体温度(°C)和分子量。对于直径为 5mm 的限流孔,其不同温度下不同分子量 M 的流导值如表 1。

表 1 不同温度下的流导值(L·s⁻¹)

Tab.1 The conductance at the different temperatures						
M	2	18	28	29	44	55
18°C	8.61	2.87	2.30	2.26	1.84	1.64
100°C	9.75	3.25	2.61	2.56	2.08	1.86
200°C	10.98	3.66	2.93	2.88	2.34	2.09
300°C	12.08	4.03	3.23	3.17	2.58	2.30
350°C	12.60	4.20	3.37	3.30	2.69	2.40

1.2.2 放气成分的质谱分析方法

四极质谱仪是采用电子碰撞电离型的离子源,被分析的气体分子电离后会产生单荷和多荷离子、分子离子和碎片离子。因此一种气体在质谱图上会出现几个不同荷质比的峰,分子结构越复杂,碎片峰也越多^[17]。 K_m 为基峰与所有峰值之和的比值即比例系数。如果要定量分析某种气体,就必须依据碎片种类及其成分比,即依据标准谱图。先读出质谱扫描图中此气体质荷比为 M_e 的基峰值 P_k ,再减去其它气体电离时产生此质荷比 M_e 的峰值 P_{other} ,然后乘以标准谱图的 $1/K_m$ 即是此气体的准确量值。用公式表示为:

$$P_m = (P_k - P_{\text{other}}) / K_m \quad (5)$$

式中 P_m 为质谱图中质量数为 m 的气体的标准压

强,单位为 Pa。

为了进一步消除测量过程中的误差,准确求出各种气体成份的放气速率($\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$),则采用如下计算公式:

$$q_m = \frac{C_m}{A} \left(\frac{P_m - P_{m\text{本}}}{P_{\text{total}} - P_{i\text{本}}} P_{\text{gauge}} - P_m \right) \quad (6)$$

式中 q_m 是质量数为 m 的气体放气速率; $P_{i\text{本}}$ 、 $P_{m\text{本}}$ 分别为分析室在样品室空载时 T_i 温度下的本底总压强和本底质谱图中质量数为 m 的分压强; P_{total} 为质谱仪测得分析室的总压强; P_{gauge} 为真空规管测得样品室的总压强; A 为样品表面积。

1.3 实验过程

石墨材料样品先浸泡在丙酮中进行超声清洗,而后浸泡于无水酒精中进行超声清洗,超声清洗后用电风吹干,再在大气环境里放置 10 天,以保证样品气体的原样性^[14]。实验前,首先对空载样品室和分析室进行 5h 100℃ 烘烤除气。烘烤除气后做本底测试实验。实验测得样品室在 18℃、100℃、200℃、300℃ 和 350℃ 时,分析室的本底压强基本都保持在 7.0×10^{-6} Pa 左右。在做完本底测试并确认系统无漏后^[18],对真空系统充入 N_2 (防止真空室暴大气时,器壁吸附大气分子,主要是水分子),然后关闭样品室与分析室之间的插板阀,在样品室里装入五块总重为 1102g,总表面积为 979.8906cm^2 的石墨材料。然后打开被关闭的插板阀开始进行抽气,当分析室的压强低于 1.0×10^{-2} Pa 时,启动四极质谱仪进行质谱扫描。先保持在室温(18℃)下进行放气实验,室温实验完成后开始让石墨材料以 $3^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的温速上升至 100℃,然后保持恒温烘烤 25h。100℃ 恒温烘烤放气实验完成后,依次做 200℃、300℃ 和 350℃ 的放气实验。由于温度上升速率对石墨材料放气有很大的影响,所以用计算机对温度进行实时负反馈控制调压器的电压^[10-11,19],保证石墨材料温度以 $3^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率上升,并在恒温时保持温度波动范围控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内。

2 实验结果处理与分析

2.1 石墨材料放气的数据处理

在通过 140 多个小时的烘烤试验后,对测得的样品室、分析室压强和温度数据经式(2)、式(4)进行处理,得到石墨材料放气速率的分布,如图 2 所示。从图中可以看出,石墨材料在不同加热时间段都出现了比较高的放气峰值,其中温度和烘烤时间是决定放气速率的关键因素,相同烘烤时间下温度越高

石墨材料的放气速率就越大,同一温度时石墨材料放气速率随烘烤时间的增加而减小。

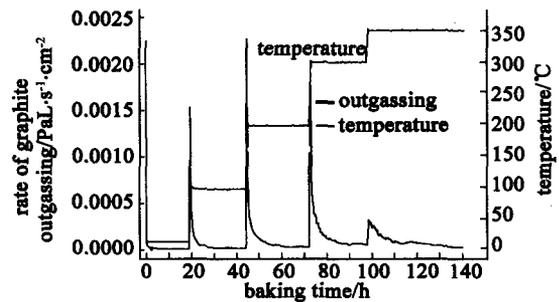


图 2 石墨材料烘烤过程中的放气速率
(流导值按 $M = 29$ 计算)

Fig.2 Time evolution of the rate of graphite outgassing

石墨材料从 100℃ 加热到 200℃ 时的放气速率峰值比较大,这是因为:(1)石墨材料在从 100℃ 升到 200℃ 加热时,部分以低能键结合的吸附气体如 H_2O 、 CO 等解附^[20];(2)石墨材料被加热到 200℃ 以上石墨材料内部在制作加工^[6]时残存的有机分子($\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_m$)开始逐渐扩散到材料表面并部分分解成 H_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2O 和其它杂质气体等,使放气速率增大;在 350℃ 时,石墨材料放气速率下降曲线不再平滑,出现较多的抖动,这是因为放气机制复杂化造成的。残余气体的来源有材料内部分子扩散、材料表面的物理解附、材料表面的化学解附和有机分子的化学分解等。

图 3 表明在双对数坐标下石墨材料放气速率与压强是呈线性变化。在不同温度和压强下石墨材料的放气速率具有相同的变化规律,即在不同压强下石墨材料在不同温度下放气速率是随压强的降低而减小。但在同一压强下石墨材料的放气速率会随着温度的升高而增加。由此可以在 EAST 实验中估判

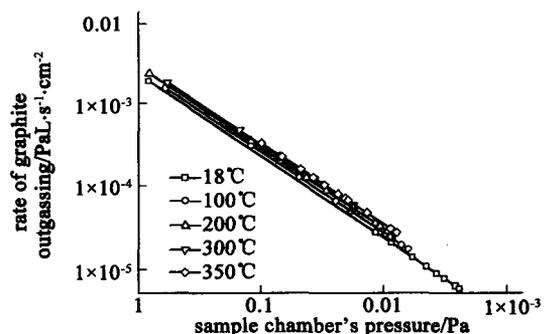


图 3 石墨材料在不同压强下放气速率

Fig.3 The rate of graphite outgassing at the different pressures

石墨材料在不同温度与压强下的放气特性。即 EAST 在抽真空时应当通过加热烘烤、辉光放电或离子回旋放电来清洗吸附在第一壁的杂质气体,而不能仅以增加抽气时间来消除杂质气体的影响。

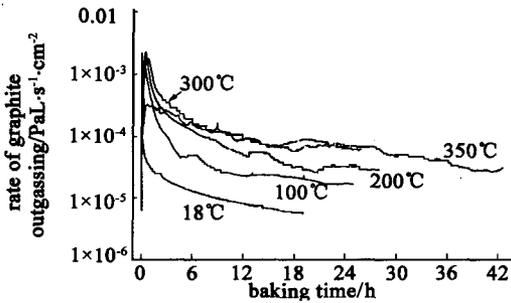


图 4 不同温度下的石墨材料放气速率

Fig.4 The rate of graphite outgassing at the different temperatures

图 4 表明石墨材料在烘烤相同时间内温度越高其放气速率越大。350°C 在加热过程中出现例外,即最大放气速率比其它温度的最大放气速率小,表明此状态下石墨材料含气量已经很小。但是在 350°C 恒温烘烤时放气速率基本规律不变。由图可判断材料从刚开始加热到 EAST 能接受的放气速率 $1.0 \times 10^{-4} (\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2})$ 所需要的时间,在常温时需要 1h ~ 2h, 100°C 时需要 4h ~ 5h, 200°C 时需要 8h ~ 9h, 300°C 时需要 12h ~ 13h, 350°C 时放气比较复杂,有待

进一步研究,一般认为要大于 18h。而石墨材料经过 18h 烘烤后其最终的放气速率如表 2 所示。

表 2 石墨材料在长时间 (> 18h) 恒温烘烤后放气速率

Tab.2 The rate of graphite outgassing after long baking (> 18h) at a constant temperature

温度/°C	18	100	200	300	350
放气速率 $\text{Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	6×10^{-6}	1.5×10^{-5}	2.3×10^{-5}	4.4×10^{-5}	2.1×10^{-6}

2.2 质谱分析

2.2.1 石墨材料放气成分

利用四极质谱仪对分析室的背景残余气体以及石墨材料刚加热到各温度值时的残余气体进行扫描,得到如图 5 所示一组质谱图。图 5 中(a)为本底在 18°C 的质谱图,(b)(c)(d)为石墨材料从 18°C 加热到 200°C、350°C 下分析室的质谱图。图 6 中(a)(b)为在石墨材料恒温 200°C、350°C 烘烤 18h 后分析室的质谱图。由图 5(a)可以知道本底谱图的质量数是:1、2、16、17、18、28 和 44,其中 1、2、17、18 和 44 是 H^+ 、 H_2 、 HO^- 、 H_2O 和 CO_2 。质量数为 28 对应有两种气体 CO 和 N_2 ,但分析质谱图发现质量数 14 的峰值很小而 44 峰值却相对比较大,所以可以推断质量数 28 是 CO 可能性最大。虽然质量数 32 的峰值特别小,但所存在少量质量数为 16 的气体成分,应当是 H_2O 、CO 和 CO_2 被电离的产物 O^{2-} 。所以可推

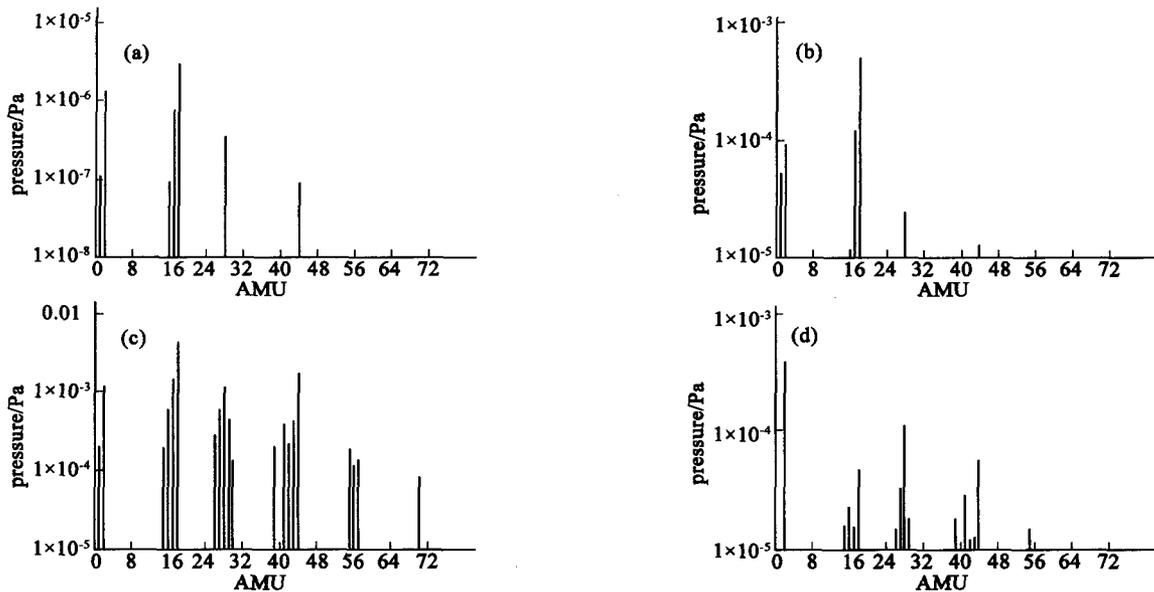


图 5 石墨材料从 18°C 加热到不同温度时的质谱图

Fig.5 Graphite mass spectrum from 18°C to the different temperatures:(a) spectrum of background at 18°C,(b)outgassing spectrum of graphite at 18°C,(c)outgassing spectrum of graphite at 200°C,(d)outgassing spectrum of graphite at 350°C

断出本底残余气体的主要成份是 H_2 、 H_2O 、 CO 和 CO_2 , 其中 H_2O (57%) 和 H_2 (19%) 所占的比例最大。同时也说明真空环境是很好的, 不存在漏气和泵油等其它的杂质污染^[18]。图 5(b) 到 (d) 间的谱图变化表明, 石墨材料在升温过程中放气成分和其分压强的变化是: 在 18°C 至 200°C 升温过程中两者都在逐渐增加, 但在 200°C 至 350°C 升温过程中两者又逐渐减少。其中气体成分和分压强变化较大的主要是大质量数 ($Z > 20$), 而这些大质量数的气体在等离子体中都是杂质气体, 需要严格控制其含量。将图 5 和图 6 进行比较可知, 石墨材料在恒温 200°C 和 350°C 各经过 18h 烘烤后, 所放出的气体成分和对应的压强都出现明显的减少和下降, 特别是大质量数的杂质气体的压强, 下降非常明显。

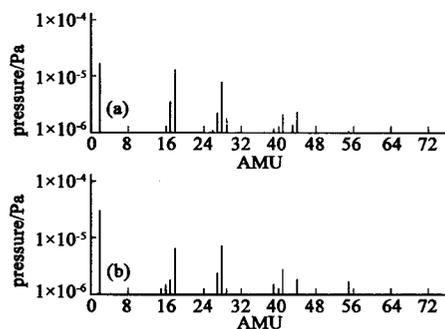


图 6 石墨材料在 200°C 和 350°C 烘烤后的质谱图

Fig.6 Graphite mass spectrum after baking at 200°C and 350°C : (a) outgassing spectrum in the constant 200°C , (b) outgassing spectrum in the constant 350°C

实验中发现只有石墨材料刚被加热到 200°C 时 ($P_{\text{分析室}} = 6.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$) 所出现的气体成分最多, 相应的分压强也是最大的。由图 5(c) 可以知道残余气体的成分, 其中 1、2、17、18、28 和 44 是 H^+ 、 H_2 、 HO^- 、 H_2O 、 CO 和 CO_2 。而 H_2O (66%) 和 H_2 (18%) 在残余气体里占得比例最大, 因为 H_2O 在 180°C 左右有个放气峰值^[20]。另外质量数 26、27、29、30、39、41、42、43、55、56、57、70 通过查标准谱图知, 主要是 MP 油、环戊烷、丙烯酸、环己烷以及其它少量的有机分子 ($C_xH_yO_m$) 的电离碎片和多次电离的碎片。这主要是由于石墨材料特殊的加工方式^[6], 残留的有机分子, 当石墨材料受到高温烘烤时, 它们会逐渐扩散出来。石墨材料经过 300°C 长时间烘烤后, 这些有机分子的含量逐渐减少, 而且再加热到 350°C 时有机分子的含量也相对较少, 如 5(d) 图示。对比图

5(c)(d) 和图 6(a)(b) 知, 石墨材料在 350°C 恒温长时间烘烤后, 基本可以消除这些有机杂质气体且 H_2O 的含量比较低。同样可以推断质量数 16 在富含 H 的高温气体里是 CH_4 的可能性比较大, 不仅因为有机大分子电离的产物中有 CH_4 , 而且如果是 O 离子会跟谱图里的有机分子和有机离子反应。另外质量数 32 的峰值特别小。

以上表明将石墨材料在 350°C 的真空环境下进行长时间烘烤后, 其吸附的大多数以低能键合的气体分子以及有机分子等能有效地去除。所以为了减少等离子体中大质量数的杂质气体含量, 安装前和抽真空时对第一壁石墨进行长时间高温烘烤是必要的。

2.2.2 主要气体成分的放气速率

本底放气实验表明, 样品室在经过长时间抽气后温度变化对分析室的压强影响不大, 主要是因为分析室的体积远大于样品室, 且不锈钢材料本身放气就小^[21], 所以用 18°C 的本底来代替各个温区的本底, 不影响其它温度下放气速率的计算结果。

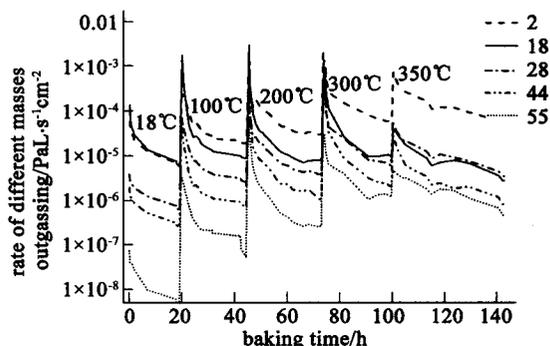


图 7 不同气体的放气速率

Fig.7 The outgassing rates of different gases

在试验中发现残余气体中主要气体的质量数分别为 2 (H_2)、18 (H_2O)、28 (CO) 和 44 (CO_2), 可利用式 (6) 和标准谱图分别计算出它们的放气速率, 如图 7 所示。从图中可以很明显看出在 18°C 至 350°C 的烘烤过程中, H_2O 的放气速率先逐渐增加然后逐渐降低; 而 H_2 的放气速率却一直在逐渐增加并在加热到 100°C 后超过 H_2O 成为最大的放气源; CO_2 和 H_2O 放气特性, 都是逐渐增加然后又开始下降, 但其在恒温时会下降得很快, 长时间恒温烘烤后其放气速率降低; CO 的放气速率一直在增加, 自加热后就一直保持较高的放气速率。这也表明石墨材料在加热过程中首先解附的是 H_2O , 然后才逐渐是 H_2 、 CO_2 和 CO 。

这中间包含了解附气体由物理解附到化学解附的过程。

另外在试验中发现质量数 55、56、57 和 70 的谱峰几乎同时出现,由于它们的峰值在质谱图里差别不是很大,所以选取峰值最大的质量数 55 作为代表,进行分析。从图 7 中可知,质量数 55 的放气速率会随着温度的升高而增大,但可以通过长时间的高温烘烤来降低它的放气速率。

3 总结

通过实验获得用于 EAST 装置上石墨材料在 18℃ 至 350℃ 之间的放气特性及规律:放气速率随着温度的变化而改变,烘烤的温度越高放气速率也就越大;在 18℃ 至 200℃ 之间时,残余气体主要是 H₂O 和 H₂,而随着温度逐渐升高,残余气体的主要成分是 H₂ 和 CO;经 350℃ 的高温长时间烘烤后能有效的减少杂质的放气成分和减小其放气速率。

经 140 多个小时的烘烤,石墨材料单位面积的总放气量为 522.2Pa·m³·m⁻²。根据不同温度下的放气特性试验、四极质谱分析和数据处理,计算出石墨材料在 18℃ 至 350℃ 之间长时间烘烤单位表面积的放气速率和主要残余气体的放气速率。

本实验为 EAST 第一壁石墨材料的选型、结构设计、安装调试,壁的预处理,优化真空系统的配置,等离子体放电前的抽真空、烘烤以及放电过程中降杂质等提供了实验依据。

参 考 文 献

- [1] 朱士尧.核聚变原理.合肥:中国科技大学出版社,1992:280-317
- [2] 宋云涛,姚达毛,武松涛,等.核聚变装置放电真空室材料的要求和发展.材料导报,2004,14(4):8-9
- [3] 王小明,陈俊凌,辜学茂,等.新型掺杂石墨及其 SiC 涂层材料真空性能评价研究.真空电子技术,2002,(1):8-12
- [4] Miyahara A, Tanabe T, Nucl J. Mater. 1988, (155-157):49
- [5] Xie C Y, Chen J L, Li et al. Journal of Nuclear Materials, 2007, (363-365):282-286
- [6] Zhuangjun Fan, Lang Liu, Jiangang Li, et al. The preparation of fine-grain doped graphite and its properties. Journal of Nuclear Materials, 2002, (305):77-82
- [7] Li H, Li J G, Chen J L. Behavior of thick SiC gradient coatings on graphite under high heat flux and HT-7 limiter plasma irradiation. Materials Science Forum, 2005, (475-479):1367-1370
- [8] 胡建生,李建刚,曾敏,等.HT-7U 石墨材料在 HT-7 超导托卡马克装置的先行实验.真空科学与技术学报,2001,21(3):245-249
- [9] Holtrop K L, Hansink M, Kellman A G. Outgassing tests on materials used in the DIII-D magnetic fusion tokamak. J. Vac. Sci. Technol. 1999, A17(4):2064-2068
- [10] Schleussner D, Rösler D, Becker J, et al. Temperature programmed desorption from graphite. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1999, 17(5):2785-2790
- [11] Donkov N I. Temperature controlled outgassing of graphite samples for thermodesorption spectroscopy investigations. Meas. Sci. Technol. 1998, 9:1777-1780
- [12] Holtrop K L, Hensink M J. High temperature outgassing tests on materials used in the DIII-D tokamak. Journal of Vacuum Science & Technology A. 2006, 24(4):1572-1577
- [13] 王明旭,许增裕,谌继明,等.HL-2A 装置第一壁石墨组件研究.核聚变与等离子体物理,2003,24(1):24-28
- [14] 张以忱.第十一讲:真空材料.真空,2001(6):50-53
- [15] 张涤新,李得天,冯焱,等.动态流导法真空校准装置.真空,2005,42(3):30-34
- [16] 高本辉,崔素言.真空物理.北京:科学出版社,1983:221-222
- [17] 李得天,冯焱,李正海.分压力质谱计校准装置的性能测试及校准实验.真空与低温,2001,7(1):21-26
- [18] 崔云康,张晓兵,雷威,等.电真空器件残气质谱分析和贮存寿命的快速测试研究.真空科学与技术学报,2007,27(1):80-83
- [19] Ng N, Collins R E, So L. Thermal and optical evolution of gas in vacuum glazing. Materials Science and Engineering B, 2005, 119(3):258-264
- [20] Pierce D E, Murray R A, Lareau R, et al. Outgassing of quartz. Frequency Control Symposium, 1994, 48th, Proceedings of the 1994 IEEE International, 1994, 1-3:107-114
- [21] Nemanic V, Setina J. Outgassing in thin wall stainless steel cells. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films May 1999, 17(3):1040-1046