

玻璃钢材料真空性能研究

刘一凡, 潘皖江, 武松涛, 王小明

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 将 EAST 装置所用的绝缘子玻璃钢材料和超导磁体绝缘结构所采用的玻璃钢材料放入自行设计的真空性能评价装置的样品室, 在常温下进行出气率试验。通过真空计和四极质谱仪分别对样品室和主真空室的全压、分压和出气成分进行监测, 获得被测材料的出气率和出气成分等真空性能参数。

关键词: 玻璃钢材料; 真空性能; 试验

中图分类号: TQ327.1; TB771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0999(2005)06-0021-03

在国家“九五”重大科学工程项目 EAST 超导托卡马克核聚变装置中, 超导磁体是非常重要的一个部件。超导磁体绝缘结构全部采用纤维增强复合材料。在真空下复合材料放气远大于不锈钢材料。由于超导磁体中绝缘部分所占比重比较大, 而且极向场绝缘部分全部裸露在真空室中, 因此研究低温胶复合材料放气性能显得十分重要。

1 测试原理及方法

测试装置的布置如图 1 所示。系统主真空室的体积为 76L, 样品室体积约为 2.7L。两室由直径 5mm 的小孔相连, 小孔流导为 2.3L/s (按分子流 22°C, N_2 计算)。系统主抽气泵为 FB-450 型分子泵, 有效抽速为 231L/s, 前级回气采用 FB-110 型分子泵与 2XZ-4 型机械泵串联双级式抽气结构。两室装有 DL-7 真空规管分别测量两室气载全压。主真空室装有一台 SRS-RGA200 型四极质谱仪适时监测气载分压。测试装置为不锈钢材料结构, 连接密封材料为无氧铜、纯铝丝等金属。测试装置空载时主真空室真空为 2×10^{-7} Pa, 满足测试实验可靠性要求^[1]。

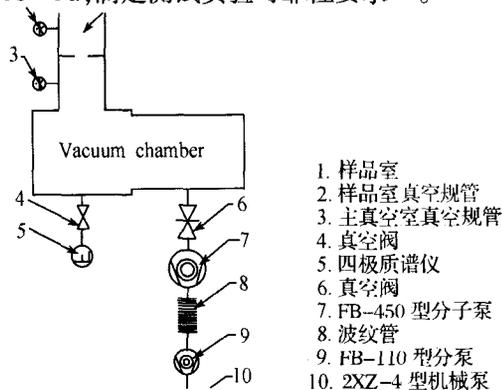


图1 真空性能评价测试装置

在此测试装置中, 如果样品材料的总放气量较样品室本底的放气量大得多, 设样品室压强为 p_2 , 主真空室的压强为 p_1 , 则样品材料的出气率方程可描述为:

$$v = V \frac{dp_2}{dt} + F(p_2 - p_1) \quad (1)$$

式中, F 为小孔固定流导; S 为泵的抽速; V 为真空室体积。将每一瞬时放气率对时间 t 积分, 得到总的放气量 Q :

$$Q = \int_0^t v dt = \int_0^t \left[V \frac{dp_2}{dt} + F(p_2 - p_1) \right] dt \quad (2)$$

在测试中, S (泵的抽速) = F (小孔固定流导), p_1 (主真空室全压) = p_2 (样品室全压); 样品室 p_2 的变化所产生的容积流量为 $V(dp_2/dt)$, 如果 p_2 的变化缓慢, 则有, $V(dp_2/dt) = F(p_2 - p_1)$, 故 (2) 式可简化为:

$$Q = F(p_2 - p_1) \quad (3)$$

恒定小孔在分子流状态下对于不同的气体在不同温度时的流导为:

$$F_i = 0.9 \sqrt{\frac{T}{M_i}} d_0^2 \quad (4)$$

式中 M 为气体分子量; d_0 为小孔直径。由 (3) 和 (4) 式可知, 利用简单计算的分子流状态下小孔流导 (F_m) 和测量两室的全压及小孔压差法来测试材料的出气率。这种方法的精确度高, 且非常可靠。同时用四极质谱仪采集的残气谱图分析测试材料的出气的气体成分, 并确定各种气体成分的出气率。即:

$$Q_i = \frac{p_i}{\sum p_i} \cdot (p_{2,DL-7} - p_{1,DL-7}) F_i \quad (5)$$

$$F_i = 0.9 \sqrt{\frac{T}{M_i}} d_0^2 \quad (6)$$

收稿日期: 2005-03-01

作者简介: 刘一凡 (1980-), 男, 在读硕士。

式中 P_i 是质谱中质量数为 i 的气体分压。

2 结果与分析

运用上述装置,对绝缘子用玻璃钢和 VPI 工艺制作的玻璃钢进行了常温下的真空性能测试。第一次测试绝缘子用玻璃钢,样品为 6 个内径为 10mm 的轴向绝缘子,总重量为 1177g,表面积约为 602cm^2 。在测试过程中一直保持抽气,两室的气压随时间的变化由图 2 所示。

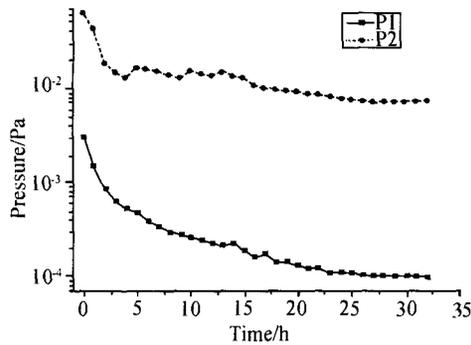


图2 绝缘子用玻璃钢测试过程中压力随时间变化

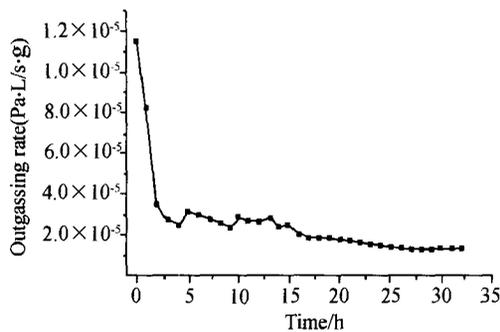


图3 绝缘子用玻璃钢出气率随时间变化

在测试过程中保持持续抽气 33h,在抽气刚开始时样品室的气压约为 $6.2 \times 10^{-2}\text{Pa}$,主真空室的气压约为 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$,等效于氮气的出气率约为 $1.2 \times 10^{-4}\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s} \cdot \text{g}$ 。在抽气过程中两室气压随时间的推移逐渐下降,刚开始 5h 内气压下降速率较快,而后基本趋于平缓。在经过 5h 抽气后样品室气压约为 $1.7 \times 10^{-2}\text{Pa}$,主真空室的气压约为 $4.8 \times 10^{-4}\text{Pa}$,等效于氮气出气率约为 $3.2 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s} \cdot \text{g}$ 。25h 后两室气压基本保持不变。样品室气压约为 $7.1 \times 10^{-3}\text{Pa}$,主真空室的气压为 $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$,等效于氮气出气率约为 $1.4 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s} \cdot \text{g}$ 。

第二次测试样品为超导线圈绝缘层用 VPI 工艺的玻璃钢材料。样品为 1 个内径为 87mm 的筒体,天平称其重量约为 510g,表面积约为 1144cm^2 。两

室气压随时间变化由图 4 所示。

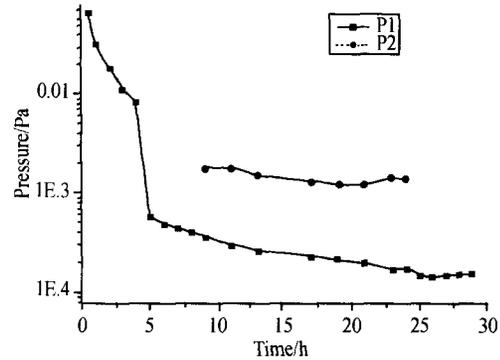


图4 VPI 工艺玻璃钢测试过程中压力随时间变化

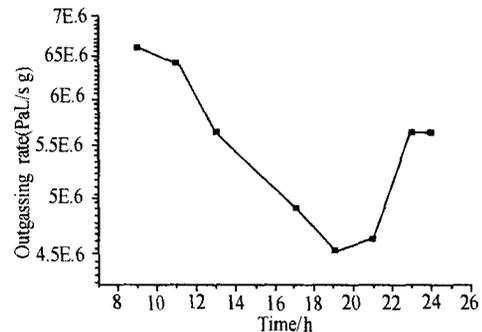


图5 VPI 工艺玻璃钢出气率随时间变化

在第二次测试过程中保持持续抽气 30h,刚开始几个小时只测量主真空室的压强,抽气 5h 后气压变化趋于平稳,在抽气 9h 后开始测量样品室压强。此时样品室气压约为 $1.8 \times 10^{-3}\text{Pa}$,主真空室的气压约为 $3.6 \times 10^{-4}\text{Pa}$,等效于氮气的材料出气率约为 $6.6 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s} \cdot \text{g}$ 。此后两室气压变化较小基本维持在稳定状态。抽气 19h 后样品室气压最低约为 $1.2 \times 10^{-3}\text{Pa}$,主真空室压强约为 $2.1 \times 10^{-4}\text{Pa}$,等效于氮气的材料出气率约为 $4.5 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s} \cdot \text{g}$ 。抽气 23h 后样品室气压有所增大,但此时两室气压也达到稳定值,样品室气压约为 $1.4 \times 10^{-3}\text{Pa}$,主真空室的气压约为 $1.7 \times 10^{-4}\text{Pa}$,等效于氮气的材料出气率约为 $5.6 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{L}/\text{s} \cdot \text{g}$ 。

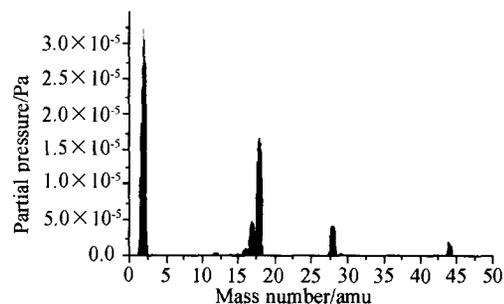


图6 绝缘子用玻璃钢测试的残余气体谱图

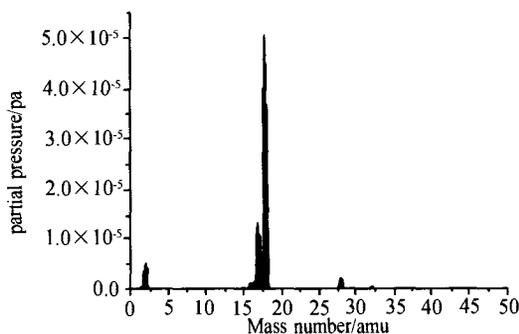


图7 VPI工艺玻璃钢测试的残余气体谱图

由两次 QMS 残余气体谱图看,绝缘子用玻璃钢材料与超导线圈绝缘层用 VPI 工艺的玻璃钢材料在常温抽气时释放的气体成分有很大差别。前者以氢气为主峰,后者以水蒸气为主要谱峰。但相同的是样品材料的表面和体内解吸出氢气、炭氢化合物和炭氧化合物,而 VPI 材料在残余气体中含有少量 O_2 ($m/e=32$)。经计算,绝缘子用玻璃钢材料各组分依次为: $H_2:H_2O:(CO+CO_2):C_nH_m=51\%:34\%:12\%:3\%$, VPI 工艺玻璃钢材料各组分依次为: $H_2O:H_2:(CO+CO_2):C_nH_m:O_2=84\%:7\%:5\%:3\%:1\%$ 。

3 结论

玻璃钢材料经上述真空性能评价试验后可以得到如下结论:

(1)从出气率上看,这两种材料经约 20h 抽气后都可以达到稳定值,其中绝缘子用玻璃钢材料的放气率略大,主要原因在于两种玻璃钢材料的成型

工艺不同,VPI 工艺玻璃钢在成型时经真空处理,因其出气率较小,其稳定后材料出气率约为 $5.6 \times 10^{-6} Pa \cdot L/s \cdot g$,而绝缘子用玻璃钢成型时没有经过真空处理,稳定后材料出气率约为 $1.4 \times 10^{-5} Pa \cdot L/s \cdot g$;

(2)从残余气体的质谱分析看,绝缘子用玻璃钢和 VPI 工艺的玻璃钢也有较大的差别,存在着大量的氢气,这主要是由于所使用的低温胶含游离成分。后者含有大量的水蒸气且所含气体质谱比较集中。从质谱看,这种材料的真空性能较好,由于其水蒸气含量最高,因此在低温下可使真空系统的真空度提高较多;

(3)本次实验从真空技术的角度分析了两种玻璃钢材料的相关真空性能,其结果可为 EAST 装置的真空估计提供数据,同时为制作全玻璃钢杜瓦提供设计依据。

参考文献

- [1] 高本辉,崔素言.真空物理[M].科学技术出版社.
- [2] 达道安主编.真空设计手册[M].国防工业出版社.1991:1040-1084.
- [3] 徐烈,周淑亮等.玻璃钢等材料的真空性能[J].低温与超导,1994,22(4):4-9.
- [4] 徐烈,周淑亮,曹庆等.玻璃钢的放气性能研究[A].第六届全国低温测试会议论文集[C].1993.
- [5] 高本辉,戴善述.真空材料常温出气率的简捷测量[J].科学仪器,1964,(2):93.
- [6] 王小明,陈俊凌等.新型掺杂石墨及其 SiC 涂层材料真空性能评价研究[J].真空电子技术.2002,(1):8-12.

VACUUM PERFORMANCE EVALUATION OF GLASSFIBER REINFORCED COMPOSITES

LIU Yi-fan, PAN Wan-jiang, WU Song-tao, Wang Xiao-ming

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031, China)

Abstract: Two kinds of glassfiber reinforced composites developed by ASIPP were tested at room temperature for evaluating their vacuum performance. The pressure and outgassing composition of the vacuum chamber were detected by vacuum gauge and quadruple mass spectrometer (QMS).

Key words: glassfiber reinforced composites; vacuum performance; test

(上接第 14 页)

MICRO-MECHANICAL INVESTIGATION OF INTERFACE BONDING PROPERTIES BETWEEN CONCRETE AND GFRP BARS

YANG Rui¹, YAN Shi-Lin², ZHANG Yan²

(1. School of Engineering Technology, HZAU, Wuhan 430070, China; 2. School of Science, WHUT, Wuhan 430070, China)

Abstract: This paper adopts micro-mechanical methods and pull-out tests to investigate the bonding properties between GFRP bars and concrete. By comparing the theoretical and experimental results, it gets some significant conclusion and lays the theory foundations for the future investigation work.

Key words: GFRP bars; bonding properties; micro-mechanics; pullout test