

EAST 高压氦气密托卡马克绝缘子测试与分析

张远斌¹, 潘皖江²

(1. 合肥学院机械系, 安徽 合肥 230022; 2. 中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为了确保装置整体安全可靠的运行, 需对绝缘子进行可靠检测及分析。笔者介绍了 EAST 托卡马克绝缘子绝缘性能特殊的测试方法。通过有限元法对 EAST 托卡马克绝缘子进行分析, 获得绝缘子不同轮廓的电场强度分布情况以及热应力分布情况, 结果表明设计结构可靠。分析结果同时也为 EAST 绝缘子今后的改进提供了参考依据。

关键词: 复合材料绝缘子; 低温; 高压; 托卡马克

中图分类号: TM85; TL62

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0047-03

Test and Analysis of High Voltage Helium Tight EAST Tokamak insulator

ZHANG Yuan-bin¹, PAN Wan-jiang²

(1. Mechanical Engineering Department, Hefei University, Hefei 230022, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to ensure reliable operation of the overall security of devices, the reliable detection of insulators and analysis is needed. A special testing method for EAST Tokamak insulator is introduced. High voltage insulation property of EAST Tokamak insulator is analyzed with finite element analysis method to achieve electric field intensity along different contours and thermal stress distribution. Calculation results show that the insulator structure is reliable. This study may provide a theoretical basis for further improvement of the EAST insulator.

Key words: composite insulator break; cryogenic; high voltage; tokamak

0 引言

EAST 超导托卡马克核聚变实验装置是国家“九五”重大科学工程, 它的科学目标是建造一个具有非圆截面的大型超导托卡马克装置, 发展并建立在超导托卡马克装置上进行稳态运行所需要的多种技术, 开展稳态、安全、高效运行的先进托卡马克聚变堆基本物理问题的实验研究^[1,2]。作为整个超导磁体系统关键部件的低温、高压、氦气密复合材料绝缘子, 是整个系统的绝缘氦通道, 起着对磁体供冷和绝缘的作用, 其结构见图 1, 包括中间复合材料绝缘部分以及两端金属导管部分。绝缘子的损坏对整个装置的运行将是毁灭性的^[3], 因此, 为确保装置整体安全可靠的运行, 需对绝缘子进行可靠检测及分析。

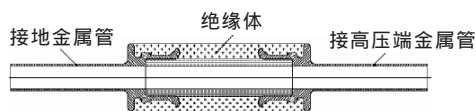


图 1 EAST 复合材料绝缘子剖面

1 绝缘子性能检测

由于托卡马克绝缘子工作环境及要求的特殊性(液氦低温, 工作时绝缘子内部还需要承受一定氦压并且保持氦气密), 决定了托卡马克绝缘子除了必须具备必要的电气绝缘性能外, 还必须具备优异的低温机械性能, 这些决定了托卡马克绝缘子检测的独特性, 即: 既有室温下的电绝缘测试, 又有室温及液氦温区下的耐气压和漏率测试(检测机械完整性)。

1.1 电绝缘性能测试

一般认为, 绝缘子的薄弱环节应该是其与气体或液体的界面, 沿面闪络场强远远低于绝缘子本身的击穿场强, 但由于托卡马克绝缘子本身实际承受电压并不是很高, 如 EAST 超导纵场磁体设计的最大端电压小于 2 000 V, EAST 复合材料绝缘子在电绝缘设计上主要参考国际热核聚变 ITER 装置的设计要求以及相关实验数据, 按照可承受 15 kV 高压击穿电压检测。电绝缘测试内容包括绝缘电阻测试、直流耐电压等级测试。

1.1.1 绝缘电阻测试

在直流电压作用下, 电介质中有微弱的电流流

收稿日期: 2008-02-27; 修回日期: 2008-08-21

作者简介: 张远斌(1974-), 男, 安徽含山人, 博士研究生, 主要从事电物理装置设计与分析方面工作。

过, 绝缘电阻就是加于试件上的直流电压与流过试件的泄漏电流的比值^[4,5]。考虑到低温下绝缘材料绝缘电阻一般都会提高, EAST 复合材料绝缘子绝缘电阻测试只在室温下进行。测试绝缘子首先用丙酮清洗去除绝缘子上的油污, 并烘干绝缘子以避免绝缘子测试时受潮。绝缘电阻测试仪测试电压选 1 kV 档, 如果测试绝缘电阻显示无穷大, 则表明测试复合材料绝缘子在绝缘上还是安全的。测试完成后, 绝缘子对地或两极间充分放电, 以保证人身安全。

1.1.2 直流耐电压等级测试

直流耐电压等级测试实际上就是测直流泄漏电流, 对于正常良好的绝缘, 泄漏电流与一定范围内的外加电压成线性关系, 绝缘如果有缺陷, 二者就不是线性关系了, 因此可通过对泄漏电流与所加电压的关系曲线分析, 定性地确定绝缘子是否有缺陷^[4,5]。

泄漏电流的测试与绝缘电阻测试的原理基本相同, 不同之处在于测量泄漏电流时所用的电源一般采用可调的直流高压装置, 并用微安表直接测量流过试件的电流。测试系统见图 2, 图中控制箱调节直流电压, 通过倍压筒输出高电压, 连接被测试的绝缘子, 测试完成后用放电棒把相关的设备和绝缘子上负载电荷卸放掉。

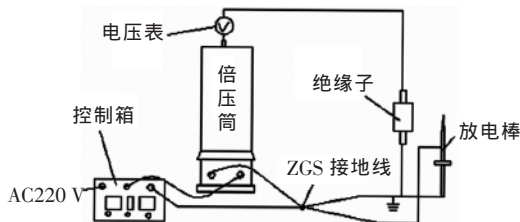


图2 绝缘子直流泄漏电流测试

EAST 复合材料绝缘子泄漏电流测试在室温和液氮温度下分别进行, 室温测试电压 10 kV, 液氮温度测试电压 15 kV, 测试时间为 10 min, 如漏电流小于 $5 \mu\text{A}$, 可认为检测合格。考虑到液氮温度下高电压环境比较难实现, 并且绝缘结构因热应力的破坏主要是发生在液氮温度以上, 因此可以认为液氮温度测试满足使用要求。

1.2 机械完整性检测

考虑到托卡马克绝缘子使用环境为液氢(或液氮)低温, 由于复合材料绝缘层与金属导体的热膨胀系数不同, 在如此低温下很可能导致绝缘层与金属发生分离或是绝缘材料发生脆裂, 液氮可能通过绝缘子裂缝泄漏至真空装置, 导致放电发生, 给装置带来灾难性的后果。因此在对托卡马克绝缘子的电绝缘性能测试中必须穿插绝缘子的低温机械性能测试, 并且这也是托卡马克绝缘子测试的关键及特殊所在(即氦气密要求)。根据相关实验结果, 如果绝缘子在液氮低温下机械性能能够得到保证(保持绝缘子的机械完整性, 不发生氦泄漏), 那么其低温下的

电气绝缘性能不会劣于常温下的电气绝缘性能, 因此对低温下绝缘子性能的检测主要集中在机械完整性(氦气密)上。机械完整性测试包括: 室温-液氮温度的多次冷热冲击循环测试(热疲劳及热冲击检测); 室温及液氮温度下的气压耐压测试(图3为液氮温度下的气压耐压测试示意图, 测试氦压 5 MPa)等。机械完整性测试穿插在电气绝缘性能测试中进行, 顺序如下: 首先选用摇表进行常温下的绝缘电阻测试, 然后进行室温及液氮温度下的耐电压测试; 对测试合格的绝缘子进行室温-液氮温度的冷热冲击循环测试, 后进行室温及液氮温度下的气压耐压测试, 通过氦质谱仪检测出损坏绝缘子; 完毕后对绝缘子进行表面脱水, 然后再次进行绝缘电阻及耐电压测试。只有所有测试合格方可使用。绝缘子安装在装置上后, 还需要进行一次机械整体性检测, 即: 每个安装的绝缘子采用铝箔包裹, 并对其内部打氦压, 通过氦质谱仪检漏。

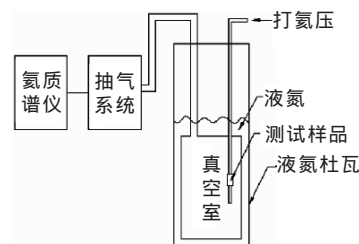


图3 液氮温度下的气压耐压测试

2 有限元分析

作为极低温环境下使用的氦气密绝缘的结构件, 绝缘子主要采用树脂基玻璃纤维增强复合材料作为氦密封绝缘材料, 由于绝缘结构材料的线膨胀系数与两端管金属材料的线膨胀有较大差异, 因此绝缘子金属管道末端轮廓不仅要根据电场强度计算结果来设计优化, 还必须考虑到热应力过大导致绝缘层与金属发生分离或是绝缘材料脆裂而产生的绝缘失效。通过有限元分析获得的结果, 不仅为实验检测提供理论依据, 同时也为绝缘子今后结构的改进提供参考, 包括电场分析及低温力学性能分析。

2.1 电场分析

虽然绝缘子的薄弱环节是其与气体或液体的界面, 沿面闪络场强远远低于绝缘子本身的击穿场强, 但由于托卡马克绝缘子实际承受电压不是很高, 因此分析中主要考虑其击穿场强。按静电场处理, 将绝缘子金属两端看成两电极, 一端按照 15 kV 电压施加载荷, 另一端按照 0 kV 施加, 由此可计算出 15 kV 的电压作用下绝缘子的场强分布情况, 见图 4。由分析结果可知, EAST 绝缘子的最大场强为 $0.1 \times 10^7 \text{ V/m}$, 而 EAST 绝缘子中复合材料的临界场强大于 $2 \sim 3 \times 10^7 \text{ V/m}$, 因而从电场强度的角度, 绝缘子的耐电压

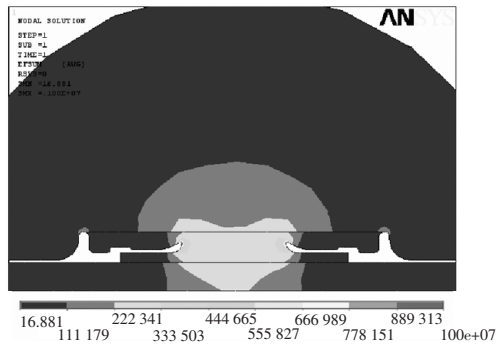


图4 绝缘子电场强度分布

是符合要求的。图5为由ANSYS处理后输出的沿绝缘子不同轮廓电场强度分布情况,其中图5(a)是沿绝缘子绝缘体内表面的电场强度分布,其最大场强值约为0.39 kV/mm。图5(b)是与绝缘层交界金属端管轮廓的电场强度分布,其最大场强值为1 kV/mm。从结果上看,绝缘子结构设计虽然可以满足装置使用要求,但仍可以设法改善绝缘子结构,使其电场分布尽可能均匀,以减小绝缘子电场强度的极值。

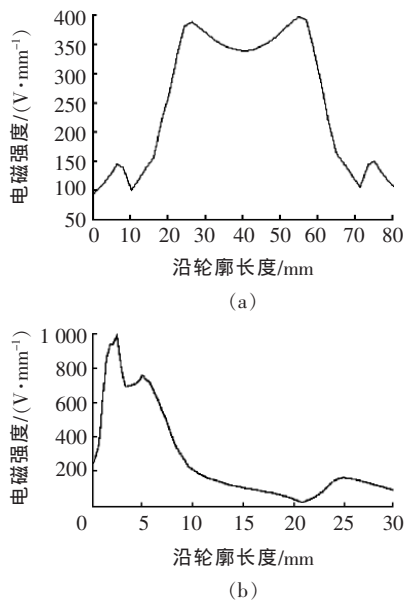


图5 沿不同轮廓的电场强度分布情况

2.2 低温力学性能分析

绝缘子任何细小的裂缝对托卡马克来说都是灾难,过大的热应力是造成绝缘子裂缝的一个重要原因,因此需要全面分析工作状态下绝缘子的热应力(上接第46页)

方便、直接地完成模型的调用,能够使电气柜的结构设计更加直观,更加方便,具有良好的三维空间可视化功能,同时也可以降低对设计人员的经验要求,大大减少设计考虑欠周全而导致的“回炉”情况的发生,缩短了新产品的研发时间。同时便于设计人员对产品成本进行控制,还可以在需要的时候运用相关CAE软件对产品进行电学分析,迎合了国家“十一五”规划中确定的制造业“两用”工程。

情况。分析表明,绝缘子在液氦工作温度下绝缘子产生较大热应力,金属管处的最大应力达120 MPa,远小于不锈钢在液氦温度下的许用应力。绝缘子的薄弱部分——复合材料绝缘层在工作状态下的受力情况见图6,最大剪切应力约27 MPa,而玻璃纤维增强的复合材料在液氦温度下的剪切强度在100 MPa左右,许用剪切应力值也不小于30 MPa。从分析结果上看,绝缘子满足装置使用要求,但应进一步改善结构,进一步降低其热应力。

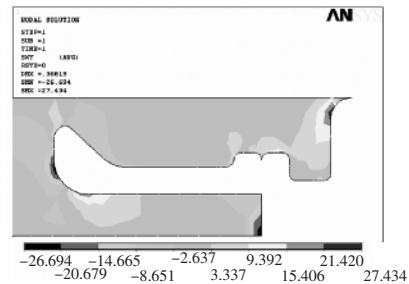


图6 绝缘层局部剪切应力分布

3 结语

托卡马克绝缘子使用环境特殊,在对绝缘子绝缘性能的检测中,除了进行常温下的电绝缘性能测试外,还增加了液氮低温下的直流耐电压等级测试以及液氮温度(及室温)下的机械性能测试,实际使用情况证明了这种测试方法的可靠性。通过ANSYS的模拟分析表明,现有的绝缘子结构设计可以满足装置使用要求。

参考文献:

- [1] WU Song-tao, WENG Pei-de. The HT-7U Project and Its Preliminary Engineering Design [J]. Fusion Engineering, 1997 (17): 249-252.
- [2] WU S T, WU W Y. Design of the HT-7U Tokamak Device [J]. Fusion Engineering, 1999(18): 549-552.
- [3] BAUER K, FINK S. The Electrical Insulation System of a Forced Flow Cooled Superconducting (SC) Magnet [J]. Cryogenics, 1998(38): 1 123-1 134.
- [4] 蓝之达. 电气绝缘试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [5] 王川波. 高压电气绝缘及测试 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

参考文献:

- [1] 余林, 徐长根. UG 辅助设计标准教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [2] 沈键. Solidedge 基础与实例精解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] 求是科技. VisualBasic6.0 数据库开发技术与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.