

# SST-1 托卡马克绝缘子优化设计

张远斌<sup>1</sup>, 潘皖江<sup>2</sup>

(1. 合肥学院 机械工程系, 安徽 合肥 230022; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**对 SST-1 托卡马克重要部件复合材料绝缘子进行有限元分析, 获得绝缘子的高压绝缘性能及低温力学性能, 并根据分析结果, 对结构进行优化。结果显示, 优化后结构提高了绝缘子的绝缘性能及低温力学性能, 可满足 SST-1 托卡马克对绝缘子的设计要求。

**关键词:**复合材料绝缘子; 托卡马克; 有限元分析

中图分类号: TL626; TH122 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2012)01-0099-04

## Optimization Design for SST-1 Tokamak Insulators

ZHANG Yuan-bin<sup>1</sup>, PAN Wan-jiang<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** With the help of ANSYS FEA technique, high voltage and cryogenic properties of the SST-1 Tokamak insulators were obtained, and the structure of the insulators was designed and modified by taking into account the simulation results. The simulation results indicate that the optimization structure has better high voltage insulating property and cryogenic mechanics property, and also can fulfill the qualification criteria of the SST-1 Tokamak insulators.

**Key words:** composite insulators; Tokamak; finite element analysis

印度 SST-1 托卡马克绝缘子由中国科学院等离子体物理研究所负责研制, 其主要设计参数为: 常温下可承受 10 kV 高压 5 min, 液氦温度下可承受 3 MPa 内压不损坏。SST-1 绝缘子要求设计总长不超过 185 mm, 其中绝缘层设计长度不超过 78 mm, 绝缘子最大外径 25 mm, 金属管(电极)外径 8 mm。由于绝缘子是托卡马克核聚变实验装置磁体系统关键部件, 绝缘子的损坏会导致低温液氦的泄漏并产生高压电弧使整个装置造成损害, 因此, 从设备

的安全运行考虑, 须对设计绝缘子进行详细的分析<sup>[1-3]</sup>。托卡马克绝缘子设计难点在于确定合理的绝缘子尺寸, 保证绝缘子降温至液氦温度不会因热应力过大导致材料损坏(强度要求), 同时也要求满足绝缘子使用时基本的电性能(绝缘)要求<sup>[4-5]</sup>。

### 1 绝缘子初步设计

SST-1 绝缘子基本结构如图 1 所示。绝缘子外形尺寸, 如长度、内外径等已按设计要求确

收稿日期: 2010-10-10; 修回日期: 2011-03-21

作者简介: 张远斌(1974—), 男, 安徽含山人, 副教授, 博士后, 从事电物理装置设计与分析

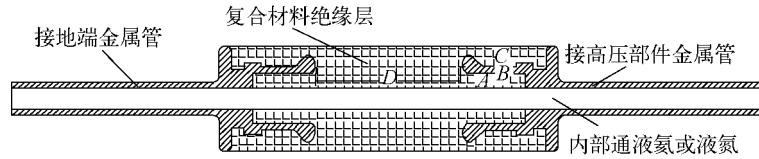


图1 SST-1 复合材料绝缘子结构

Fig.1 Structure of SST-1 insulators

定,还需进一步确定的尺寸为图1中A、B、C、D 4个基本尺寸以及其它细节尺寸。其中,基本尺寸需通过分析确定,细节尺寸则在基本尺寸确定后根据经验初步给定,然后再对按此尺寸设计的绝缘子进行相关分析,根据分析结果,对绝缘子结构进行进一步优化,并最终确定绝缘子的设计尺寸。考虑到绝缘子结构及所受载荷完全轴对称,因此在对绝缘子的有限元分析中,采用平面分析方法并按轴对称结构对模型进行处理。

1.1 结构尺寸的初步确定

绝缘子主要有4个基本尺寸,其中A、B、C 3个尺寸主要影响绝缘子强度性能,C、D尺寸则主要影响绝缘子电性能。为快速确定绝缘子4个基本尺寸,对模型进行了进一步简化,即忽略绝缘子的所有细节尺寸,将绝缘子简化成内、外为环形绝缘层,中间为环形金属层的结构。然后按不同的尺寸组合,对其分别进行电绝缘分析及机械强度分析,并根据分析结果初步确定绝缘子基本尺寸。确定的依据为:选取绝缘子热应力及最大场强相对最小的1组结构。图2为进行强度分析时获取的不同尺寸组合下绝缘子的应力分布情况。绝缘子基本尺寸确定后,还需根据经验,按绝缘子实际结构,补足其它细节尺寸,然后对完成结构重新进行电绝缘分析及结构强度分析,并根据分析结果对绝缘子结构进行进一步优化。

1.2 电绝缘性能分析

对补足细节尺寸的模型首先进行电绝缘分析。按实际运行工况,对绝缘子一端金属电极施加10 kV工作电压,另一端金属电极施加0 kV电压,模拟并获取10 kV工作电压下绝缘子的场强分布情况,结果如图3所示。绝缘子最大场强为 $0.117 \times 10^7$  V/m,远小于复合材料的临界场强 $E_0$ (大于 $2 \times 10^7 \sim 3 \times 10^7$  V/m),因而从电场强度的角度,所设计的绝缘子符合

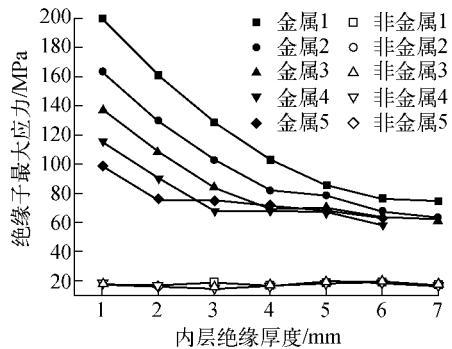


图2 不同绝缘厚度下的应力曲线

Fig.2 Stress distributing curves for different thicknesses

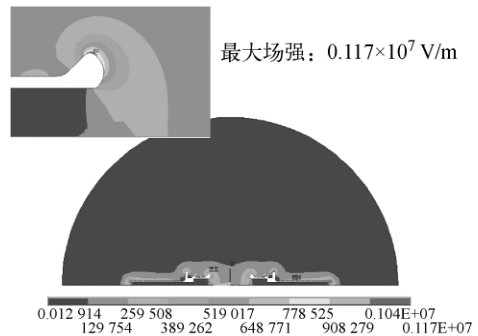


图3 绝缘子场强分布情况

Fig.3 Electric field distribution

绝缘性能要求。

1.3 机械强度分析

完成电绝缘分析后,需进一步对绝缘子进行机械强度分析。按绝缘子实际受载情况,对绝缘子整体施加温度载荷(常温300 K降至液氮4 K温度),绝缘子内壁施加3 MPa内压。分析结果表明,由于绝缘子的绝缘层与金属导体的热膨胀系数不同,由常温降到液氮温度时,绝缘子本体会产生较大的热应力,金属部分的最大应力高达171 MPa,如图4所示;而复合材料绝缘层的最大剪切应力也高达34 MPa,如图5所示,此值已达到复合材料在液氮温度下的许用剪切应力(不小于30 MPa)。因此,如按此

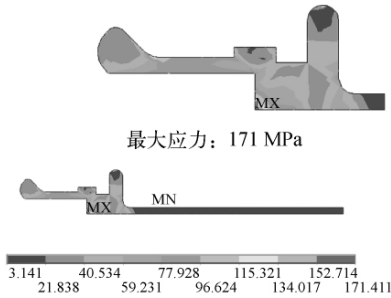


图4 金属部分应力分布情况  
Fig. 4 Stress distribution in metal

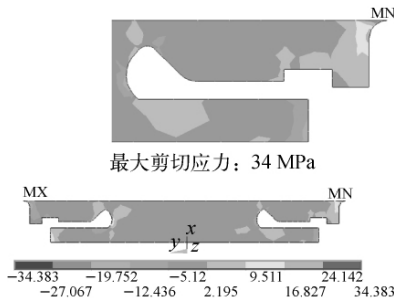


图5 复合材料剪切应力分布  
Fig. 5 Shearing stress distribution in insulation

结构设计绝缘子,则工作中发生损坏几率极大,需对设计结构进行进一步的优化。

## 2 绝缘子优化设计

根据分析结果,主要对绝缘子的 A、B、C 3 处结构进行优化,绝缘子结构更改部位示于图 6。从电场分析结果看,绝缘子的绝缘性能是符合要求的。但从绝缘子电场强度分布图中可看出,绝缘子外表面的 A 处场强较高,易起弧,不利于绝缘。当初 A 处之所以设计成金属凸缘结构,主要是为了绝缘子手工绕制方便考

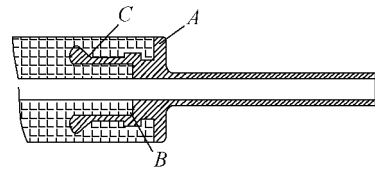


图6 绝缘子结构更改部位  
Fig. 6 Structure change of insulators

虑(不易漏胶且定位方便),但从绝缘方面考虑,此凸缘结构需去除。而从低温力学分析来看,绝缘子 B 处存在明显的应力集中现象,这与 B 处直角结构设计直接相关。可将 B 处设计成斜面结构,这样既不会影响绝缘子绕制时衬管的定位,又可有效降低应力集中。除 B 处外,C 处也存在一定的应力集中现象,此处可通过进一步增大圆弧过渡半径来进行改善。对上述部位进行结构优化,并再次进行绝缘性能及低温力学性能分析。

### 2.1 优化后的绝缘性能

分析表明,虽然优化后绝缘子最大场强只是略有下降,但绝缘子沿面最大场强则下降明显,且绝缘子沿面场强分布较优化前更为合理。优化前绝缘子沿面场强分布如图 7a 所示,最大场强为  $0.77 \times 10^6$  V/m,最大场强位于绝缘子电极金属凸缘处。去除凸缘后,绝缘子表面最大场强降至  $0.34 \times 10^6$  V/m,如图 7b 所示。对比优化前后的分析结果可发现,在距绝缘子边缘约 20 mm 处(金属电极头附近),均存在场强峰值,对优化后结构,此处即为绝缘子沿面场强的最大处,且优化后结构在此处的场强低于优化前结构(优化前此处场强约为  $0.4 \times 10^6$  V/m),优化后场强分布情况更有利于绝缘。

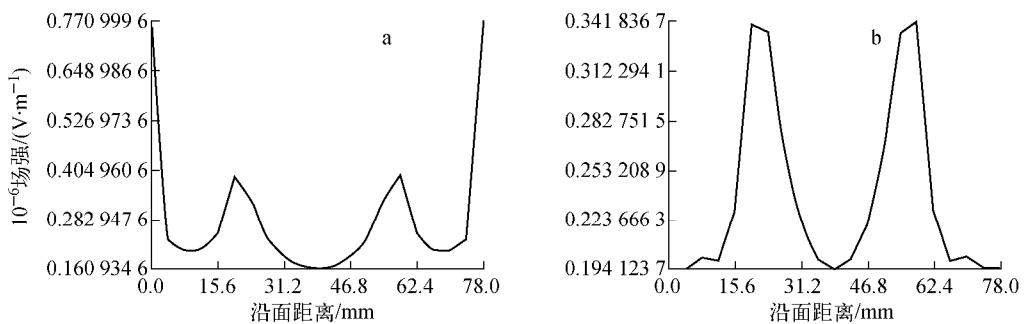


图7 绝缘子沿面场强分布  
Fig. 7 Field strength along insulator contour

## 2.2 优化后的结构强度性能

分析表明,优化后绝缘子的热应力显著降低,金属部分的最大应力由优化前的171 MPa降低到优化后的106 MPa(图8),复合材料绝缘层的最大剪切应力也由优化前的34 MPa降低到优化后的21 MPa,均满足设计要求。同时,从优化后应力分布情况看,此设计结构仍有继续优化的空间,这些分析结果也为绝缘子今后结构的进一步改进提供了有益的参考。

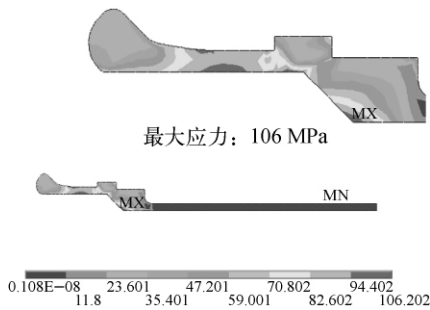


图8 优化后金属部分应力分布

Fig. 8 Optimized stress distribution in metal

## 3 结语

根据有限元分析结果,去除了绝缘子金属电极中的凸缘结构,改善了绝缘子表面的场强分布。对绝缘子应力集中处改用斜面或增大圆弧过渡半径的方法,大幅降低了绝缘子的热应力。分析结果表明,优化结构可满足SST-1托

卡马克装置对绝缘子的设计要求。

## 参考文献:

- [1] WU Songtao, WENG Peide. The HT-7U project and its preliminary engineering design[J]. Fusion Engineering, 1997(1): 249-252.
- [2] WU S T, WU W Y. Design of the HT-7U Tokamak device[J]. Fusion Engineering, 1999(1): 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] 张远斌,潘皖江. EAST托卡马克绝缘子低温力学性能理论及实验分析[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(6): 752-755.  
ZHANG Yuanbin, PAN Wanjiang. Theoretical and experimental analysis of cryogenic mechanics property for EAST Tokamak composite insulators[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(6): 752-755(in Chinese).
- [5] 张远斌,潘皖江,奚维斌,等. EAST复合材料绝缘子性能有限元分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2007, 27(2): 137-140.  
ZHANG Yuanbin, PAN Wanjiang, XI Weibin, et al. Study of the property of EAST composite insulators with finite element analysis[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2007, 27(2): 137-140(in Chinese).