

高强度氦气密复合材料绝缘子的性能研究

秦织, 潘皖江, 陈文革, 徐厚昌

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 用于超导磁体冷却回路和电回路绝缘的绝缘子是 EAST 超导托卡马克装置中一个关键部件, 在装置实际运行过程中它必须经受在一定的弯矩和拉力的动态情况下高电压和高内气压的考验。该文主要利用有限元程序对绝缘子力学性能、热学性能和电性能进行了分析与计算, 并根据低温实验对绝缘子性能进行了进一步的研究。

关键词: 绝缘子; 有限元; 热应力; 电场强度; 低温实验

Performance research of the high quality helium tight composite insulators

Qin Zhi, Pan Wanjiang, Chen Wenge, Xu Houchang

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: Insulators are the key parts of the EAST Superconducting Tokamak, which are used to insulate all cryogenic supply lines and the conductor end of the winding. During all operation modes, insulators have to accept the challenge of the high voltage and hydraulic pressure, simultaneously they are loaded with bending moment and force. The mechanics behavior analysis and thermal analysis including electrical analysis for insulators using finite element method are introduced in this paper. Also, we carry out cryogenic experiments for further study of insulators.

Keywords: Insulators, Finite element, Thermal stress, Electric field strength, Cryogenic experiments

1 引言

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 超导托卡马克是由我所设计、研制的世界上第一个全超导托卡马克 EAST 核聚变实验装置, 目前已经完成工程调试, 年内将进行物理实验。整个 EAST 装置主机是由超导磁体系统、高真空度的真空室、80K 的内外冷屏、外真空杜瓦以及主支撑结构等主要部件组成。

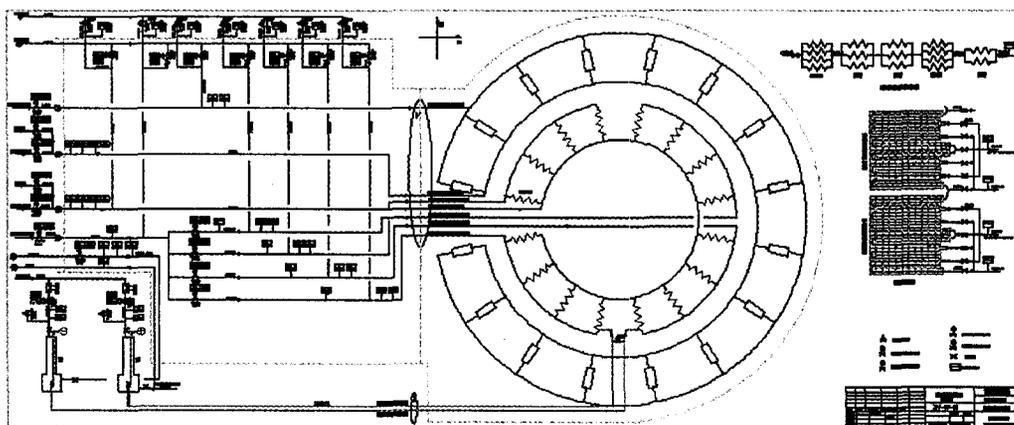


图1 EAST 装置中纵场超导磁体系统的冷却回路图

Fig. 1 The cooling - paths of the toroidal field system in the EAST device

超导磁体系统是整个装置的重要部件, 它包括产生稳态主约束磁场的纵场超导磁体系统和提供等离子体的加热和平衡的极向场超导磁体系统。纵场超导磁体系统由 16 个 D 形线圈沿环向均布组成, 各磁体绕组之间的电连接均为串联连接, 由两对气冷电流引线进行供电。纵场磁体系统的冷却回路概念设计中, 在超导温区采用强迫流动内冷方式冷却磁体。在冷却回路中, 纵场磁体 16 个线圈全部并联连接, 再串接一个 3.5K 过冷器, 然后连

接到纵场磁体线圈盒上。同时,16个纵场线圈盒分为四组,其中每四个线圈盒为一组采用串联连接并与其他三组并联连接。极向场超导磁体系统由六个大小一致上下对称分布的中心螺管和四对大圆形线圈(即一对大、小偏滤线圈和两对外部大线圈)组成。由于极向场超导磁体系统中每个线圈需要单独供电,这样中心螺管需要6对电流引线,冷却通道为15对。而四对大圆形线圈共需要8对电流引线,冷却通道为28对(其中:小偏滤线圈的冷却通道为2对、大偏滤线圈的冷却通道为12对以及两对外部大线圈的冷却通道分别为10对和4对)。图1是纵场超导磁体系统的冷却回路图。

整个超导磁体系统都采用 CICC(Cable - in - Conduit Conductor) 导体设计方案,超导材料为 NbTi/Cu,并用 4.5K 超临界氦进行迫流冷却。在装置试验过程中,所用超导磁体将从室温降至 4.5K 温度进入超导状态,然后再通以额定电流进行稳态运行,其电回路和低温冷却回路都需要进行电绝缘,以保证液氦的顺利通过,因此能使磁体冷却回路和电回路绝缘的绝缘子将是至关重要的。

整个 EAST 超导托卡马克装置共需要轴向绝缘子: 通径 10mm, 398 个; 通径 15mm, 6 个; 通径 20.6mm, 109 个; 通径 27mm, 27 个。径向绝缘子为 26 个。具体布置见下表 1。

表 1 EAST 超导托卡马克装置中复合材料绝缘子的布置
Tab. 1 The distribution of the composite insulators in the EAST device

	轴向绝缘子				径向绝缘子
	通径 10mm	通径 15mm	通径 20.6mm	通径 27mm	
纵场超导磁体系统	129				
极向场超导磁体系统	140				
80K 内外冷屏			109		
电流引线与低温传输线	29	6		26	27

2 复合材料绝缘子的结构

复合材料绝缘子由三部分构成,两端选用材料为 316L 低碳不锈钢的导管,中间绝缘内层是树脂基复合材料,内部还有一个氦通道。整个 EAST 装置需要两种绝缘子: 轴向绝缘子和径向绝缘子。轴向绝缘子主要用来绝缘装置超导磁体的低温管道,使得磁体的匝间和层间能得到充分冷却,线圈能维持超导状态。径向绝缘子在 EAST 装置传输线中使用,起着对装置真空隔离的作用,隔离两边都是真空状态,同时径向绝缘子还起着绝缘和支撑磁体导体的作用,因而对径向绝缘子主要要求是其绝缘性能。EAST 装置中轴向绝缘子和径向绝缘子结构如图 2 所示。

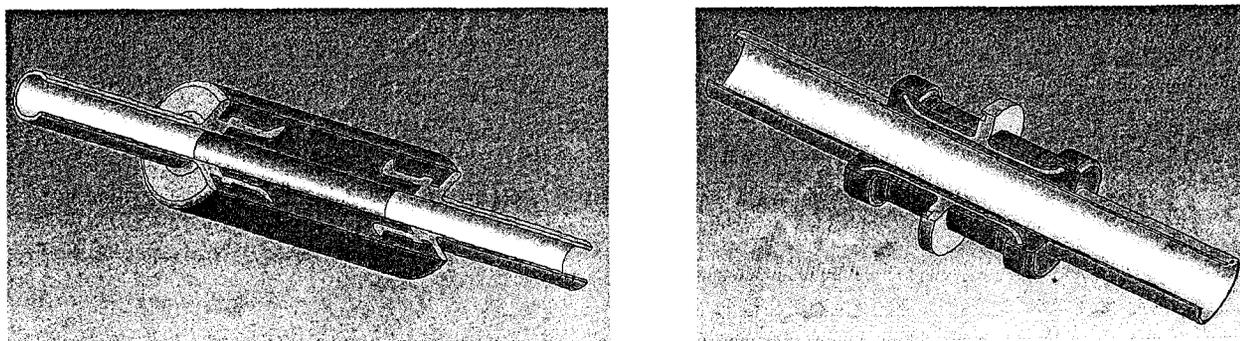


图 2 通径为 10mm 的轴向绝缘子(左)和径向绝缘子的结构图(右)

Fig. 2 The structures of $\Phi 10$ mm axial insulator (left) and radial insulation (right)

3 复合材料绝缘子的性能分析

EAST 装置是全超导托卡马克装置,它将采用稳态及高参数的运行模式。用于整个超导磁体系统冷却回路

和电回路绝缘的复合材料绝缘子,在装置运行中必须在一定的弯矩和拉力的动态情况下接受高电压和高内气压的考验。此外,要求其绝缘结构具有良好的传热特性,易于传输热量,避免冷热循环时引起的过大不均匀应力分布,即经得起冷热冲击。为了全面地掌握复合材料绝缘子的性能,一方面采用有限元程序对绝缘子进行了多方面性能的分析;另一方面通过低温实验对其性能来进一步研究。

3.1 绝缘子的机械性能分析

复合材料绝缘子(主要指轴向绝缘子)的机械性能主要指承受由于超导磁体失超时管道内部液氦迅速气化形成的高达 5MPa 局部的气压的能力,同时,它还承受其两端与管路连接时,由于焊缝处内应力作用而产生拉力和弯矩,经过试验测试这种拉力和弯矩分别为 200kg 和 100kg·cm。此外,复合材料绝缘子需要经历从室温(300K)到液氮温区(4K)以及从液氮温区到室温的冷热过程,在这个过程中,由于绝缘子的各种组成材料的收缩系数不一致而产生的热应力等。所有这些荷载工况将在绝缘子上引起的应力分布,其最大应力值是需要关注的。

本文以直径 10mm 的轴向绝缘子为研究对象,利用 ANSYS 软件进行力学分析,采用 SOLID92 四面体单元类型。同时,可简化认为绝缘子中组成材料为两种材料,即:316L 不锈钢和绝缘复合材料,其中绝缘复合材料的材料参数是通过中科院北京低温中心进行测试而得出的,具体值可见表 2。图 3 为轴向绝缘子的有限元分析模型。其在各种工况下的计算结果可见表 3。计算结果表明:在组合工况 4 下,绝缘子中绝缘复合材料上最大冯·米塞斯应力为 294.23 MPa,出现在其绝缘复合材料的轮廓上,图 4 为轴向绝缘子中绝缘复合材料上的应力分布。

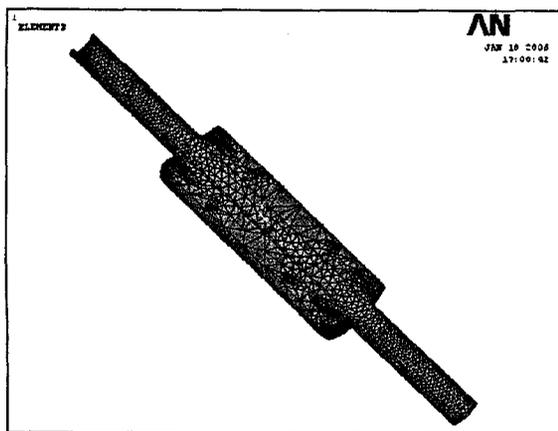


图 3 直径为 10mm 轴向绝缘子的有限元分析模型
Fig. 3 The finite element model of Φ 10mm axial insulator

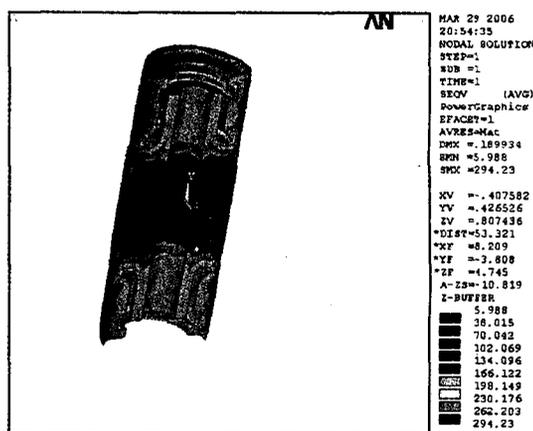


图 4 该绝缘子中的绝缘复合材料上的应力分布
Fig. 4 The stress distribution in Φ 10mm axial insulator

表 2 在 4K 温区下绝缘子中绝缘复合材料的材料参数

Tab. 2 The parameters of the composite insulator at 4K

杨氏弹性模量(GPa)			剪切模量(GPa)			主泊松比			线膨胀系数(1E-6m/(m·K))		
E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{zx}	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{zx}	ALPX	ALPY	ALPZ
24	32.715	35	9.7	11.6	8.2	0.11	0.27	0.42	19.2	4.83	7.88

表中: x 为绝缘子中绝缘复合材料的径向方向; y 和 z 为绝缘子中绝缘复合材料的轴向与环向方向。

表 3 直径 10mm 的轴向绝缘子的最大应力与最大变形量

Tab. 3 The maximum von stress and distortion of Φ 10mm axial insulator

工况	最大冯·米塞斯应力(MPa)	最大变形量(mm)
工况 1 5MPa 内气压	14.132	0.011842
工况 2 5MPa 内压 + 200kg 拉力	13.181	0.128165
工况 3 5MPa 内压 + 200kg 拉力 + 100kg/cm 弯矩	13.877	0.2594
工况 4 5MPa 内压 + 200kg 拉力 + 100kg/cm 弯矩 + 热应力	294.23	0.1899

3.2 绝缘子的电场强度分析

作为极低温下使用的氦气密绝缘结构件的复合材料绝缘子,其316L金属管道末端(可认为电极部分)将产生很高的端电压(高达15kV),其金属管道末端的轮廓形状需要认真考虑,目的是最大限度地降低在绝缘子绝缘部位的最大电场强度。本文利用ANSYS程序中的Emag模块对通径10mm的轴向绝缘子和径向绝缘子进行分析,分别建立起它们的二维模型,单元类型选用平面单元Plane121和远场单元INF110两种形式。绝缘子的绝缘部分相对介质常数(50Hz)取值为2.0,空气的相对介质常数取1.0。

该有限元模型中的电场分析理论基础是泊松方程。首先求出的是节点自由度,即电标量势电压,然后从求得的节点电压再求出电场的其它物理量。作为稳恒电场分析,其模型的激励载荷只有一种类型:外加电压,即模型的一端加15kV的电压而另一端为零电压。图7分别为通径10mm的轴向绝缘子和径向绝缘子的电场强度分布图。表4为通径10mm的轴向绝缘子及径向绝缘子在其不同轮廓表面路径中最大电场强度值。根据绝缘子的电性能分析计算结果可知,绝缘子的绝缘复合材料设计的耐压等级远远小于其极限电压20kV/mm。

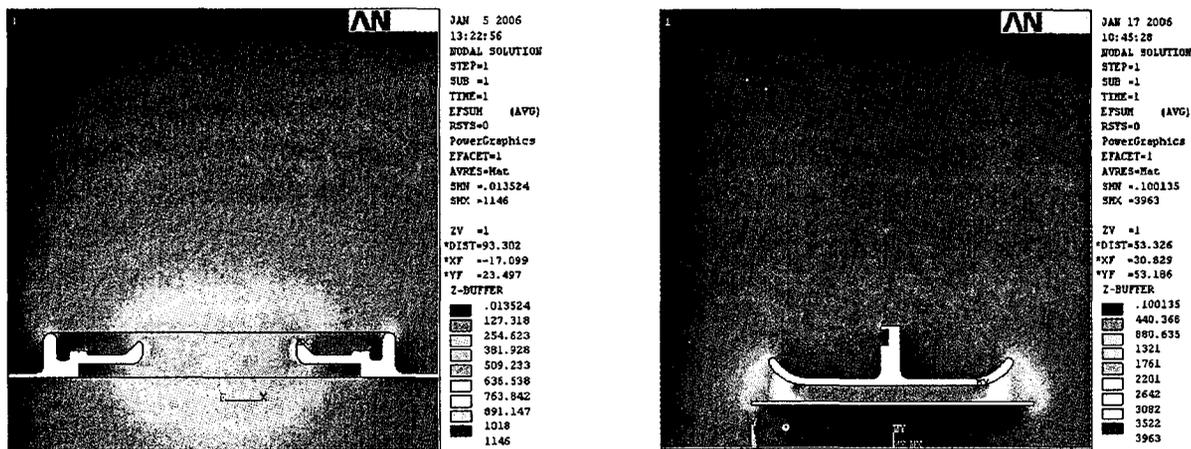


图5 通径10mm的轴向绝缘子(左)和径向绝缘子(右)电场强度分布

Fig. 5 The electric field strength distribution of Φ 10mm axial insulator (left) and radial insulation (right)

表4 通径10mm的轴向绝缘子及径向绝缘子在其不同轮廓表面路径中最大电场强度值

Tab. 4 The maximum electric field strength at different contour of the axial and radial insulation break

	通径10mm的轴向绝缘子 (E_{max} 在15kV)	径向绝缘子 (E_{max} 在15kV)
沿电极(金属)部分的轮廓表面路径	1145.8V/mm	2532.3V/mm
沿绝缘子的绝缘部分外部表面路径	396.48V/mm	3963V/mm
沿绝缘子的绝缘部分内部表面路径	1145.8V/mm	3963V/mm

4 复合材料绝缘子的实验

由以上有限元分析可以看出,绝缘子的主要破坏是由热应力造成的,由于复合材料工艺的复杂性,其许用应力的值很难确定。为了保证绝缘子在装置中的

安全性,我们通过冷热循环实验对绝缘子氦气密性能进行检验。此外,氦气密性测试主要针对轴向绝缘子进行,径向绝缘子由于密封处在装置传输导体上,所以要等到装置运行时才能检测密封性能,不过径向绝缘子密封性能不是很关键,因为其仅仅起着绝缘隔离作用,隔离的两部分都是真空状态。另外,我们还对绝缘子的电性能进行了实验。绝缘子性能测试是在我所超电工中心进行的,测试设备氦质谱检漏仪是北京科仪厂的ZQJ-230D型。

4.1 冷热循环实验

实验装置是装有液氮的实验杜瓦,通过杜瓦中装有绝缘子的篮子高度来控制绝缘子的温度。温度采用热电偶实时监控。考虑到绝缘子所受到的热应力90%都是在室温到液氮温度发生的,从液氮降到液氮温度产生的热应力很小。绝缘子在EAST装置中,从室温降到液氮和液氮温度是缓慢冷却的。为了提高绝缘子使用寿命,绝缘子冷热循环测试也采用缓慢冷却的方式,冷却速度低于50K/h。实验中,将绝缘子放在篮子中从室温降到液氮温

度,再回到室温。温度变化率不大于 50K/h,来回循环 5 次。

一般工程上,冷热循环大于 3 次是合格的,产品就认为是合格的。从测试结果来看,绝缘子在 5 次冷热循环实验中,送检的产品是合格的,说明绝缘子能承受至少 294.23MPa 的热应力。

4.2 耐气压和真空漏率检测

耐气压和真空漏率检测的装置图见下图 6。实验时,把绝缘子装入密封的容器内,从绝缘子内部打氮压,外部抽真空检测。检漏时绝缘子外部真空在室温下为 2×10^{-2} Pa,在液氮温度为 5×10^{-3} Pa。室温打氮气压 3MPa,维持 5 分钟,检漏,加压前本体漏率为 5.2×10^{-9} mbarl/s,加压过程中漏率变化小于 0.2×10^{-9} mbarl/s。液氮温度打氮气压 3MPa,维持 5 分钟,检漏,加压前本体漏率为 3×10^{-9} mbarl/s,加压过程中漏率变化小于 0.2×10^{-9} mbarl/s。

实验结果表明,绝缘子在打氮气压前后,几乎全部绝缘子的氮漏率变化都很小,绝缘子气密性是能满足 EAST 装置运行要求的。

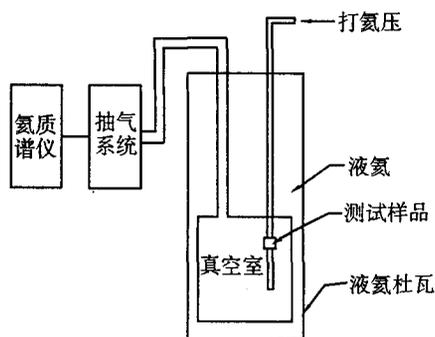


图 6 耐气压和真空漏率检测的装置图
Fig. 6 The device of testing pressure and vacuum leak rate

4.3 电性能实验

复合材料绝缘子除要求良好的机械强度和热性能外,电绝缘性能也是很关键的。EAST 装置中复合材料绝缘子绝缘性能测试主要包括绝缘电阻测试和耐电压等级测试。

4.3.1 绝缘电阻测试

影响绝缘子绝缘电阻的因素主要有温度、湿度、清洁程度、残余电荷和感应电压等。考虑到低温下绝缘材料绝缘电阻一般都会提高,EAST 装置中复合材料绝缘子绝缘电阻测试只在室温下进行,电阻测试设备选用西安福润德电气有限公司的绝缘电阻测试仪,型号为 FIM 型。绝缘子测试前需要清洗烘干,接着进行接地一分钟,在 1000V 电压下,绝缘子电阻显示无穷大。测试结果表明绝缘子在绝缘上是有保障的。

4.3.2 耐电压等级测试

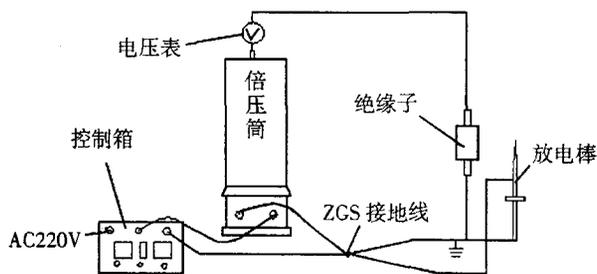


图 7 绝缘子直流泄漏电流测试系统
Fig. 7 The testing system of electric current leak

EAST 装置中,复合材料绝缘子在装置运行时承受直流电压,设计要求耐电压 15kV。直流耐电压等级测试实际上就是测直流泄漏电流。实验装置如图 7 所示。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放掉。

实验时,按图 7 连接各部件,直流电压升到 10kV,升压速率 0.1kV/s,维持 10 分钟,测得泄漏电流 $0 \mu\text{A}$ 。然后再把绝缘子放到液氮中,引出两条导线,按图 7 接测试系统,缓慢升压到 15kV,维持 5 分钟,检测泄漏电流为 $0 \mu\text{A}$ 。测试结果表明,绝缘子在高压下基本没有泄漏电流,说明绝缘性能良好。

5 结论

EAST 装置要求研制的绝缘子必须是在受一定的弯矩和拉力下,能在液氮温度下承受 15kV 以上的高电压,耐气压达 5MPa 以上。由有限元分析和实验结果表明自行研制的复合材料绝缘子满足性能要求。目前,EAST 装置中各种规格的轴向绝缘子及径向绝缘子已经批量生产并安装到装置的低温管路上。EAST 装置的成功调试也表明复合材料绝缘子在未来装置运行中是安全可靠的,性能是有保障的。

参考文献

- 1 潘皖江等. 超低温高电压高强度绝缘子的研制. EAST 装置设计文集(二).
- 2 潘皖江等. 超低温高电压高强度绝缘子. EAST 装置设计文集(二).
- 3 潘皖江等. 绝缘子的研制. EAST 装置设计文集(四).
- 4 张朝晖. ANSYS 工程应用范例入门与提高. 北京:清华大学出版社,2004.
- 5 张朝晖. ANSYS 8.0 热分析教程与实例解析. 北京:中国铁道出版社,2005.
- 6 唐兴伦等. ANSYS 工程应用教程——热与电磁学篇. 北京:中国铁道出版社,2003.
- 7 李正吴. 新电工手册. 合肥:安徽科学技术出版社,2002.
- 8 芮静康. 实用电工材料手册. 北京:中国电力出版社,2003.

(上接 235 页后)

- 5 Zeisberger M, Habisreuther T, Litzkandorf, et al. Optimization of levitation forces. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2001, 11(1):1741 - 1744.
- 6 肖玲,任洪涛,焦玉磊,等. YBCO 超导材料的悬浮力及其测量. 低温物理学报, 1999, 21(4):317 - 320.
- 7 谭凤顺,金能强,夏东,等. 无源高温超导磁悬浮轴承磁悬浮力的计算. 电工电能新技, 2001,18(1):16 - 19.
- 8 方家荣. 高温超导混合磁悬浮轴承系统的研究与实验. 北京:中国科学院电工研究所, 2001,8.
- 9 赵宪锋,谭永顺,周又和. 系统参数对最大超导磁悬浮力的影响研究. 低温与超导,2004,32(4):33 - 36.
- 10 郑晓静,苟小凡,周又和. 超导电磁悬浮力的数值模拟. 固体力学学报,2003, 24(1):16 - 23.
- 11 Chun Y D, Lee J. Comparison of magnetic levitation force between a permanent magnet and a high temperature superconductor using different force calculation method. Physica C, 2002, 372 - 376: 1491 - 1494.
- 12 Hauser A O. Calculation of superconducting magnetic bearings using a commercial program(ANSYS). IEEE Trans. on Magnetics, 1997, 33(2):1572 - 1575.
- 13 Camacho D, Mora L, Fontcuberta J, et al. Calculation of levitation forces in permanent magnet - superconductor systems using finite element analysis. J. Appl. Phys., 1997, 82(3): 1461 - 1468.
- 14 Grilli F, Stavrev S, Floch Y L, et al. Finite - element method modeling of superconductors: from 2D to 3D. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2005, 15(1):17 - 25.
- 15 Chun Y D, Kim, Y H, et al. Finite element analysis of magnetic field in high temperature bulk superconductor. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2001, 11(1):2000 - 2003.
- 16 Ruiz - Alonso D, Coombs T A, Campbell A M. Numerical analysis of high temperature superconductors with the critical - state model. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2004, 14(4):2053 - 2063.
- 17 Bean C P. Magnetization of high - field superconductors. Rev. Mod. Phys., 1964, 36:31 - 39.
- 18 Chen D X, Goldfarb R B. Kim model for magnetization of type - II superconductors. J. Appl. Phys., 1989,66(6):2489 - 2500.
- 19 Yon - Do Chun, Youn - Hyun Kim, Ju Lee, et al. Finite Element Analysis of Magnetic Field in High Temperature Bulk Superconductor. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2001, 11(1):2000 - 2003.
- 20 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论. 北京:高等教育出版社,2000.