

文章编号:1009-9239(2001)04-0031-03

托卡马克超导磁体绝缘用玻璃纤维带<sup>①</sup>

崔益民,潘皖江,武松涛

(中科院等离子体研究所,安徽合肥 230031)

**摘要:**本文主要介绍超导磁体绝缘结构中玻璃纤维带的性能要求,并通过试验研究了玻璃纤维带的厚度及绝缘层的含胶量对复合材料的力学性能及线胀系数的影响。

**关键词:**低温超导磁体;玻璃纤维带;绝缘材料;复合材料;线胀系数

**中图分类号:**TM265;TM215.41 **文献标识码:**A

## 引言

托卡马克(TOKAMAK)装置是进行可控热核聚变实验研究的基本设备,是工程造价很高的大型复杂装置,中科院等离子体所正在设计建设的 HT-7U 将是世界上先进的超导托卡马克装置之一。

HT-7U 超导磁体是由 CICC 导体和绝缘层组成,图 1 是超导磁体线圈断面图,超导磁体绝缘层由玻璃纤维、聚合物组成。玻璃纤维带提高了绝缘层的刚度和强度,基本控制着绝缘层的力学性能,而聚合物起着粘合作用。图 2 是超导磁体纵场线圈受机械电磁作用力的应力分布,其中没有考虑冷热变化所产生的应力,从图中可以看出线圈最大应力已达 3.4MPa。由于 HT-7U 超导核聚变装置的绝缘系统运行时受到的作用力大、环境温度低、受交变冷热应力冲击,因而必须选择一种耐极低温的绝缘胶,以及可靠的绝缘处理工艺方法,使磁体的绝缘系统能承受

巨大的应力作用。为了保证超导磁体的研制成功,选取 VPI 工艺浇注超导磁体线圈是必要的,这样不但在浇注过程中能保证树脂能充分浸润玻璃纤维,而且能使得绝缘结构中的气泡量最少,从而提高绝缘结构的低温强度和低温断裂韧性<sup>[1]</sup>。因此,我所从英国卢瑟福实验室引进了 RAL230 耐超低温绝缘胶,用其与玻璃纤维做成复合材料。本文主要阐述玻璃纤维带的选用。

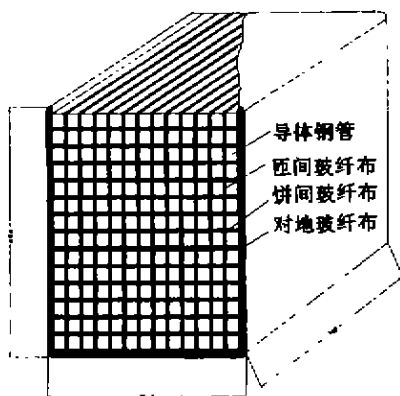


图 1 磁体线圈断面图

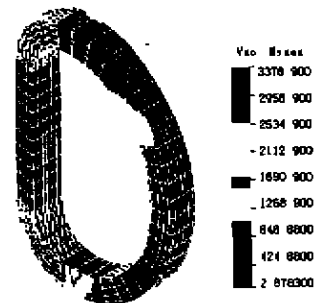


图 2 纵场受力图

## 1 在磁体绝缘层中的作用

在 HT-7U 的超导磁体中,玻璃纤维在复合材料绝缘层中起增强作用,它不仅能使绝缘层有较高的拉伸强度和刚度,而且能减少收缩,提高热变形温度和低温冲击强度等。因此,绝缘层的性能在很大程度上取决于纤维的性能、含量及使用状态。

## 2 耐辐照性要求

在树脂基本确定的情况下,需要选择玻璃纤维带

① 收稿日期:2001-02-27

项目来源:国家九五大科学工程之一。

作者简介:崔益民(1970-),男,博士生,已发表论文 5 篇。

并对其进行处理,使之能与树脂相配合。通过对三家产品的测试,发现南京玻纤研究院的无硼无碱玻璃纤维不仅能抗辐射,而且用它做成的复合材料拉伸强度也比无碱玻璃纤维布的高 20%。

无硼无碱玻璃纤维在高能辐照下十分稳定,是原子能反应堆用优良的电绝缘材料和隔热材料。由于无硼无碱玻璃纤维中碱金属离子少,所以它的电绝缘性能比有碱玻璃纤维优越得多。

可以根据已有的经验如用该玻纤做成的耐辐照电缆判断其优劣。

(1)在累积中子辐照剂量  $1 \times 10^{20}$  nvt,  $\gamma$  辐照剂量  $(3 \sim 5) \times 10^5$  Gy 及  $> 280$  C 的条件下,以该玻璃纤维做成的耐辐照电缆的电绝缘性能优于同类的石英纤维电缆,由表 1 可见,它的绝缘电阻是很高的。

表 1 几种绝缘材料做成的电缆绝缘电阻

绝缘材料名称	电缆绝缘电阻( $\Omega \cdot m$ )
无硼无碱玻璃纤维	$7.1 \times 10^8$
石英纤维	$4.9 \times 10^8$
聚酰亚胺	$9.7 \times 10^6$

(2)在如下条件下的积分通量:快中子  $3.8 \times 10^{19}$  nvt(能量  $\geq 1$  Mev),热中子  $1.61 \times 10^{20}$  nvt,累积  $\gamma$  剂量:  $1.054 \times 10^6$  Gy,温度  $> 500$  C,电缆绝缘电阻达到  $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7 \Omega \cdot m$ ,优于石英纤维和聚酰亚胺。

可以看出辐照对产品中的玻纤无明显影响。用其做成的复合材料其力学性能也很优良。耐辐照玻璃纤维 NOL 环的拉伸强度和弯曲强度分别比 E 玻璃纤维做成的复合材料提高 20% 和 14%,而且具有优良的耐水性和耐酸性。

### 3 配以合适的含胶量

玻璃纤维是一种优良的刚性材料。应力—应变图基本上是一条直线,没有塑性变形阶段<sup>[2]</sup>。玻璃纤维的拉伸强度随直径变细而拉伸强度增加,所以为了提高绝缘层的力学性能,应选用较细的纤维丝,同时控制纤维带的经线和纬线的数量比,增加带的层数来保证厚度要求,以取得绝缘层强度方面最优的效果。表 2 是我所与桂林电器科学研究所合作试验的数据,从表中可以看出:当试样的总厚度确定之后,层数增加使复合材料材料中玻纤含量增多,胶含量减少,起到提高弯曲强度和冲击强度的作用。胶含量对绝缘层的

线胀系数也有直接的影响,表 3 是不同含胶量的线胀系数数据(试样厚度均为 8.9mm),从表中可以看出随着含胶量的增加,线胀系数增大。由于 HT-7U 的磁体是在极低温下使用,为了保证绝缘层的线胀系数与不锈钢线圈盒的线胀系数接近,应当尽可能地减少胶含量。

表 2 不同厚度的纤维带构成的复合材料力学性能比较

编号	带厚(mm)	层数	试样平均宽(cm)	试样平均厚(cm)	平均弯曲强度(MPa)	平均冲击强度(kJ/m <sup>2</sup> )	平均含胶量(%)
1	0.2	20	0.600	0.410	429.5	93.3	42.4
2	0.2	22	0.600	0.410	465.5	107.0	39.5
3	0.2	24	0.600	0.412	517.6	117.8	37.3
4	0.17	24	0.600	0.410	494.0	105.8	40.2
5	0.17	26	0.600	0.410	521.6	113.7	36.7
6	0.17	28	0.600	0.412	522.1	135.5	33.6

表 3 带厚、层数及含胶量对线胀系数的影响

玻璃丝带厚	0.2(mm)			0.17(mm)		
	含胶量(%)	42.23	38.58	34.78	38.54	36.34
纵向线胀系数( $10^{-6}/^{\circ}C$ )	4.66	3.88	2.80	4.29	1.95	1.85

### 4 选择玻纤纱种类

玻璃纤维纱分为无捻纱和有捻纱两种。无捻纱一般用增强型浸润剂,由原纱直接并股、络纱制成;有捻纱则多用纺织型浸润剂,由原纱经过退绕、加捻、并股、络纱而制成。加捻可提高纤维的抱合力,改善单纤维的受力状况,有利于纺织工序的进行。但捻度过大不易被树脂浸透。无捻纱中的纤维是平行排列的,拉伸强度很高,对树脂的浸润性良好,容易被树脂浸透。因此,HT-7U 超导磁体中选用无捻纱。

### 5 玻璃纤维带

#### 5.1 耐压试验

试样大小为  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 1.1\text{mm}$ ,采用模具和真空压力浸渍(0.2 兆,常压)制取复合材料片状试样(5 层 0.2 毫米厚的玻璃丝带)。分别在室温下进行交流电压击穿实验,结果击穿电压达到 4.5 万伏。

由于该玻璃环氧纤维复合材料在低温下应用,因此其电气强度比常温下较高<sup>[3]</sup>,另外该材料直流耐压值高于交流击穿值,所以磁体绝缘层的电气强度是足

够的。

### 5.2 低温力学性能试验

玻璃纤维带的质量及处理方法对材料力学性能有很大的影响。为此与北京低温中心合作研究了不同产地,不同种类(E、S),不同编织方式(有捻、无捻、纱的粗细、经线纬线的密度、布的厚度等)的玻璃纤维布以及偶联剂表面处理(不同的种类、不同的浓度)对性能的影响,确定对胶浸润性好的玻纤及粘结工艺,再测试不同温度下(室温、液氮中)试样的抗剪切性能,用 Evans 横向拉伸方法进行评价,得出液氮温度

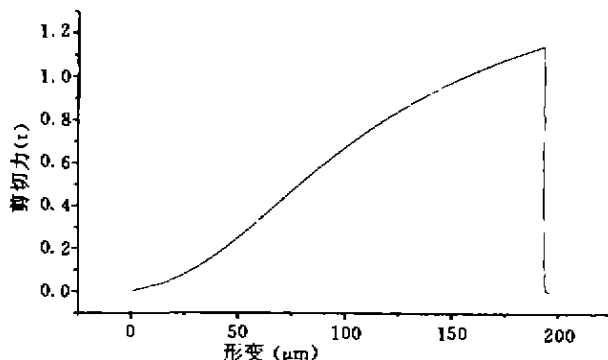


图3 液氮温度下复合材料的剪切力与形变的关系曲线

下的相关数据。

图3是液氮温度下玻璃纤维带与树脂制成的复合材料的剪切力与形变的关系曲线,从图中可以看出在低温下复合材料是脆性断裂,其最大剪切强度为24MPa。在测试中发现采用KH560处理玻璃纤维,其复合材料的低温剪切强度最高。

### 6 结论

综合考虑绝缘层复合成型后含胶量对线胀系数、低温电性能和力学性能等的影响,选择无硼无碱纤维无捻带,用浓度为2%的KH560浸润剂处理后,与低温胶RAL230复合,可以满足磁体低温性能要求,应用于HT-7U超导磁体上是合适的。

致谢:感谢桂林电器科学研究所和北京理化所在本项目的合作。

### 参 考 文 献

- 1 潘皖江等. VPI工艺在HT-7U超导磁体上的应用. HT-7U设计文集,2001. 2.
- 2 王荣国等. 复合材料概论. 哈尔滨工业大学出版社,1999.
- 3 AEA-TECDOC-417. Insulators for Fusion Applications. IAEA, Vienna, 1987.

## The Glass-Fiber Tape in Cryogenic Superconducting Magnets of TOKAMAK

Cui Yi-min, Pan Wan-jiang, Wu Song-tao

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

**Abstract:** In this paper the function and performance of the glass-fiber tape used in cryogenics superconducting magnet coils are presented. The significance of controlling the percentage of epoxy resin and increasing the performance and decreasing the line expand coefficient of the insulation layer by the thickness and the fabric and the processing means of glass-fiber tape were tested by experiment.

**Keywords:** Cryogenic superconducting magnet; Insulating material; Glass-fiber tape; Epoxy resin; Line expand coefficient

\*\*\*\*\*

### 新产品

#### 1. CEPCP(G)-21 覆铜箔环氧纸层压板

CEPCP(G)-21 是以浸有环氧酚醛树脂混合树脂的胶纸为芯在其两面各贴上一张上胶玻璃布,然后再与涂胶铜箔叠合经热压而成的组合型覆铜箔板,产品机械强度高,电性能优良,尺寸稳定,翘曲小,除阻燃性不作要求外,其它性能同 GB4724-92 中 CEPCP-22P 板的要求,并与 CEPGC-31 板接近,但加工工艺远比后者简单,价格仅相当于后者的一半左右。

生产单位:西安绝缘材料厂 厂长:冯元 传 真:029-4262259

联系人:李树连 电话:029-4237390