

# 聚酰亚胺薄膜在大型低温超导磁体中的应用

崔益民, 潘皖江, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 论文主要介绍聚酰亚胺薄膜在大型低温超导磁体中的作用, 以及在大型低温超导磁体中的粘接性能及其提高方法。

**关键词:** 聚酰亚胺薄膜; 表面处理; 低温超导磁体

**中图分类号:** TM215.3; TQ323.7; TL631.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-9239(2002)05-0015-03

## Polyimide film for large cryogenic superconducting magnet coils

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

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

**Abstract:** In this paper the function and performance of polyimide film used in large cryogenic superconducting magnet coils are presented; and the surface treatments of polyimide film to improve the bond with epoxy resin were researched.

**Keywords:** polyimide film; cryogenic superconducting magnet coils; surface treatment

### 1 引言

中国科学院等离子体物理所正在设计建造的 HT-7U 托卡马克(TOKAMAK)装置是世界上先进的可控热核聚变实验研究的装备<sup>[1]</sup>。低温超导磁体是该装置中的两大关键部分之一, 它的截面结构如图 1 所示。磁体中层与层之间(又称层间绝缘)、匝与匝之间(匝间绝缘)及整个磁体的外围(对地绝缘)都是由绝缘胶和玻璃丝布复合构成的绝缘部分。由于磁体的绝缘结构受装置的空间尺寸和形状限制, 绝缘浸渍工艺中可能会使绝缘体产生某些小的缺陷, 材料在低温下的性能的稳定可靠性等因素都会威胁到装置安全可靠, 尤其是超导磁体线圈的内部结构非常复杂, 成型后的线圈质量无法逐层进行无损检测, 对某些部位甚至可以说无法检测。因此低温环氧复合材料绝缘层是有很大的风险的, 必须大大提高绝缘层的可靠性。

磁体在低温(液氮温度)下运行时, 主要有四类因素对低温超导磁体的锻炼行为和过早的失超有关:

(1)在 4.2K 附近, 线圈绕组材料的热容量很低; (2)尽力得到全电流密度的几乎绝热的绕组, 排斥液氮进入绕组中; (3)小的温度裕量以至从操作电流向上提高电流密度时, 很接近临界电流; (4)电流和磁场之间易产生洛仑兹力并伴随着冷却应力。虽然真空压力浸渍绝缘技术可以减少绝缘层的缺陷, 但并未完全杜绝低温超导磁体的过早的失超和线圈的锻炼行为<sup>[2]</sup>。对于环氧树脂浸渍的超导磁体来说, 其锻炼效应主要起因是环氧树脂的开裂。

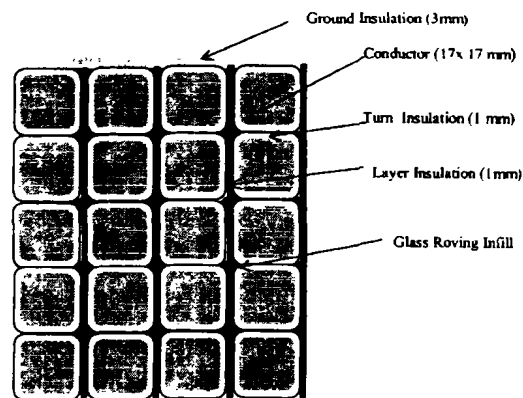


图 1 低温超导磁体截面示意图

收稿日期: 2002-07-23

基金项目: “九五”大科学工程 HT-7U

作者简介: 崔益民(1970-), 男, 博士生, 发表论文 12 篇(Tel: 0551-5592302)。

磁体绕组中存在着各种应力使环氧树脂在低温下产生开裂。如浸渍和浸润的不均匀性形成的应力、环氧固化过程中产生的应力、环氧树脂和导体材料之间的膨胀和收缩率不同而产生的应力、磁体由室温冷却到低温或由低温回升到室温的过程中产生的应力等等。这些应力贮存着一定的能量,绝大部分会在洛伦兹力的诱发下,通过环氧树脂开裂的形式释放出来。另一方面,填充环氧树脂的超导磁体几乎是绝热的。而绕组材料在 4.2K 下的热容量又很低,约为  $1\text{mJ}/\text{cm}^3 \cdot \text{K}$ , 这样,一个很小的热扰动,比如环氧树脂开裂时释放出的能量,就足以使热源附近温度升高几度,因此造成磁体过早的失超和锻炼行为<sup>[3]</sup>。为此,对于大型托卡马克装置,要稳定运行,必须改变磁体线圈的绝缘结构,通过在导体的钢管表面与复合绝缘层之间增加 1~2 层高性能的绝缘薄膜来加强绝缘层的绝缘性能。适用的绝缘薄膜主要有聚酰亚胺薄膜和聚酯薄膜,而聚酰亚胺薄膜在辐射环境中应用更为广泛,如国际上正在建造的大型托卡马克装置 ITER、KSTAR 等,匝间绝缘甚至对地绝缘中都采用了  $25\mu\text{m}$  聚酰亚胺薄膜半迭绕包后再绕包玻璃纤维带的绝缘结构。在 HT-7U 的磁体线圈中,也采用在导体钢管表面先半迭绕包  $25.4\mu\text{m}$  的聚酰亚胺薄膜,再绕包玻璃纤维带的绝缘结构。由此可见,聚酰亚胺薄膜对建造大型超导磁体具有重要的意义。

## 2 聚酰亚胺薄膜在低温磁体中的作用

聚酰亚胺薄膜不仅具有优良的耐热性能、突出的力学性能以及电气性能,而且具有良好的低温性能、冷热收缩应力小、抗辐射性能强和良好耐磨自润滑性能而被广泛应用在大型高能物理实验装置的磁体线圈中,它的机械性能和电性能参见表 1。在高能物理类实验装置的低温超导线圈中,聚酰亚胺薄膜的作用是:

(1) 利用聚酰亚胺薄膜良好的绝缘性能,直接提高磁体线圈的绝缘性能,  $1\text{mil}$  厚的聚酰亚胺薄膜在液氮温度下的电气强度超过  $10\text{kV}$ , 在液氦温度下的电气强度更高;

(2) 从图 2 可以看出,聚酰亚胺薄膜比其它薄膜材料具有更高的抗辐射性能,优良的辐射稳定性,利用它可以增强超导磁体线圈绝缘结构抗辐射性能<sup>[4]</sup>(装置运行时快中子辐射可达  $10^{20} \sim 10^{21}\text{n}/\text{cm}^3$ ):

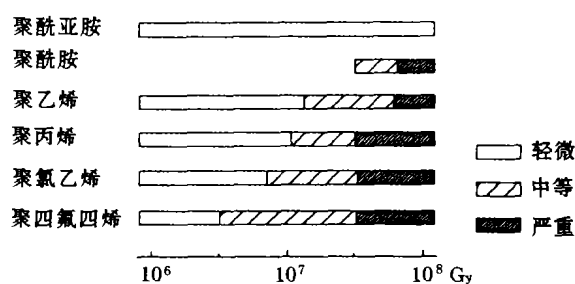


图 2 薄膜抗辐射性能对比图

(3) 在超导线圈的工作温度下,当线圈绝缘的环氧基体材料中存在微裂纹时,由于聚酰亚胺薄膜的存在,可以有效地防止裂纹的进一步扩展,有效地防止或削弱超导磁体线圈的“锻炼效应”和过早的失超;

(4) 聚酰亚胺薄膜表面摩擦系数小 ( $< 0.01$ ), 还有良好的自润滑性能,与聚酰亚胺薄膜接触的不同材料在其表面可以产生相对滑动,可以减小导体和绝缘体相对运动产生的摩擦热,同时可以减小内应力,减小内势能(尤其在线圈的降温 and 升温过程中的保护作用最为直观),有效地防止或削弱超导磁体线圈的“锻炼效应”和过早的失超。

表 1 聚酰亚胺薄膜在不同温度下的机械性能和电性能<sup>[5]</sup>

性能	温度		
	-195℃	25℃	200℃
比重	—	1.42	—
拉伸强度(MPa)	246.5	176.0	119.7
伸长率(%)	2	70	90
拉伸模量	3.59	3.03	1.83
初始撕裂强度(g/mil)	—	510	—
电气强度(kV/mil)	10.8	7.0	5.6
介电常数( $10^3$ )	—	3.5	3.0
介质损耗( $10^3$ )	—	0.003	0.002
体积电阻( $\Omega \cdot \text{m}$ , 50%RH)	—	$10^{16}$	$10^{12}$
表面电阻( $\Omega$ )	—	$10^{16}$	—

(厚度  $25.4\mu\text{m}$  Kapton 膜)

## 3 聚酰亚胺薄膜低温粘接特性

聚酰亚胺薄膜直接用于磁体绝缘结构中是有困难的。首先,聚酰亚胺薄膜插入绝缘层中降低了绝缘层的整体机械强度;其次,在用环氧树脂真空压力浸

渍形成的绝缘结构中,聚酰亚胺薄膜的插入使绝缘层间断了,破坏了绝缘结构的整体性。因此,聚酰亚胺薄膜一般都直接绕包在导体的钢管表面,而不能用于绝缘层中间。在低温下,无聚酰亚胺薄膜的 DGEBF 环氧树脂绝缘层的剪切强度大约是 50MPa,插入该薄膜后,可以近似用下式计算压剪强度<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_{st} = [0.5\tau_0 + c_2\sigma_{c(n)}] \quad (1)$$

式中: $\tau_0$  = 无压缩的纯剪切强度

$c_2$  = 法向压缩和剪切之间相关因数

$\sigma_{c(n)}$  = 当地法向压缩应力

在缺少计算数据时,可以认为插入聚酰亚胺薄膜后绝缘层的剪切强度为 30MPa。

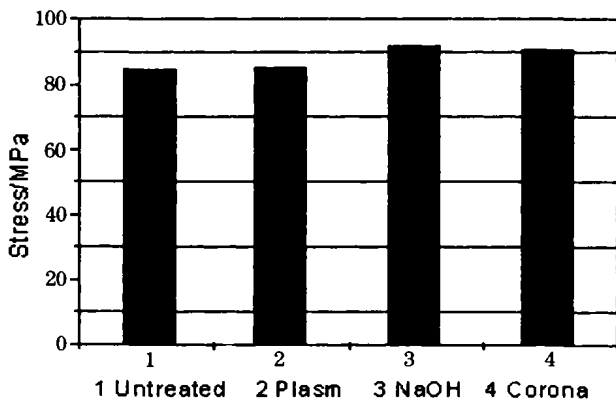


图3 三种方法表面处理后的粘接强度对比

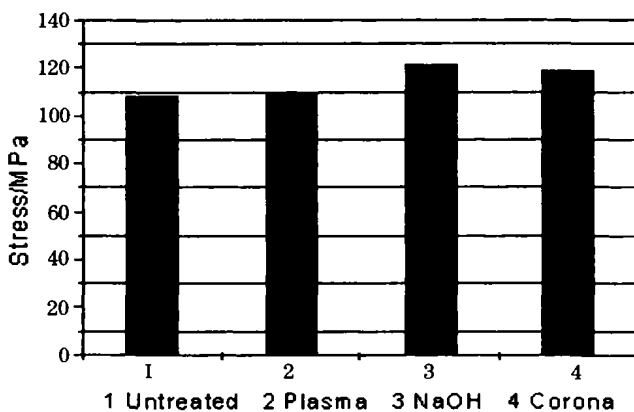


图4 经三种方法表面处理再在表面沉积树脂后的粘接强度对比

要提高聚酰亚胺薄膜与环氧树脂的粘接强度,必须对其进行表面处理。粘接强度的大小与其表面不同

的处理方法相关。处理方法主要有电晕放电法(Corona)、等离子体处理法(Plasma)、化学方法(NaOH 溶液)等,还可以应用表面沉积树脂法与前面三种方法配合使用<sup>[7]</sup>,图3是聚酰亚胺薄膜分别经过三种方法表面处理后与双酚F和E玻璃纤维复合的绝缘结构在液氮温度下剪切强度的对比,图4是聚酰亚胺薄膜分别用三种方法表面处理后、再用表面沉积树脂法与双酚F和E玻璃纤维复合的绝缘结构在液氮温度下剪切强度的对比。从图中可以看出,一般的表面等离子处理对增加聚酰亚胺薄膜的粘接强度作用不大;电晕放电法有一定效果,但与电晕放电功率有关,而经一定浓度氢氧化钠溶液处理的聚酰亚胺薄膜粘接强度增加较为明显。相比之下,在三种方法表面处理之后或甚至不经处理,在表面沉积树脂对增加粘接强度都非常明显。

#### 4 结论

聚酰亚胺薄膜在大型低温超导磁体线圈中的应用提高了绝缘层的性能,从而可以提高 HT-7U 托卡马克装置的安全可靠性。通过选择适合的表面处理方法进一步改善了聚酰亚胺薄膜与环氧树脂的粘接性能,提高了绝缘层的性能。

#### 参 考 文 献

- [1] Wu. S. T, Weng. P. D et al. The Project of HT-7U and its Progress. Beijing, 1997(15): 20~24.
- [2] H. Fujita, T. Takaghi et al. The Training in Epoxy-Impregnated Superconducting coils. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL, MAG-21, 1985, 2.
- [3] Li. B. Z, Ding. L. R. et al. Training Effect of Racetrack-shaped Superconducting Magnet Impregnated with Epoxy Resin. Cryogenics and Superconductivity, 1988, 16.
- [4] 陈强. HT-7U 浸泡式超导磁体导体表面传热性能及磁体绝缘的研究. 中国科学院等离子体物理研究所博士学位论文, 1999.
- [5] 王孟贤, 何元白. 聚酰亚胺新型材料, 科学出版社, 1998.
- [6] KSTAR Magnet System Review, SAIT, 1999
- [7] D. Evans and R. P. Reed. LOW TEMPERATURE ADHESIVE BOND STRENGTH OF ELECTRICAL INSULATION FILMS. Advances in Cryogenic Engineering (Materials), Vol 46.