

托卡马克 HT-7U 低温超导磁体的绝缘系统

崔益民, 潘皖江, 武松涛, 万元熙

(中国科学院等离子体研究所, 230031)

摘要: 主要介绍低温超导托卡马克 HT-7U 中磁体的绝缘结构, 绝缘材料的特性, 绝缘结构形成的工艺, 绝缘层的电性能和力学性能等。

关键词: HT-7U; 低温超导磁体; RAL230 胶; 玻璃纤维带; VPI; 绝缘层

1 引言

托卡马克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, 将是世界上先进的低温超导托卡马克装置之一^[1]。低温超导磁体是低温超导托卡马克装置中的关键部分, 不同方面的利用对磁体的要求各不相同, 磁体的空间形状、几何尺寸也各不相同。在 HT-7U 磁体中, 有螺旋形的中心螺线管线圈、圆环形的极向场线圈、D 形的纵场线圈。它们的截面结构基本相同, 如图 1 所示。从图中可以看出, 磁体中层与层之间(又称层间绝缘或称饼间绝缘)、匝与匝之间(匝间绝缘)及整个磁体的外围(对地绝缘), 都是由环氧胶和玻璃纤维带复合构成的绝缘部分。胶在低温超导磁体中, 具有多种用途, 实现多种目的, 包括连接、紧固、密封、填充、导热和绝缘; 玻璃纤维带提供绝缘层的刚度和强度, 基本控制着绝缘层的力学性能。由于磁体工作在液氮温度下, 对胶的低温性能要求较高, 因此 HT-7U 磁体中用的绝缘胶是能耐低温的环氧胶。另外, 磁体在使用过程中, 受到极其严酷的机电应力和辐照, 使用的绝缘材料及制造工艺都要经过慎重的考虑适合其运行条件, 为此, HT-7U 磁体中

用的玻璃纤维, 是南京玻璃纤维设计院生产的耐辐照电绝缘玻璃纤维带。

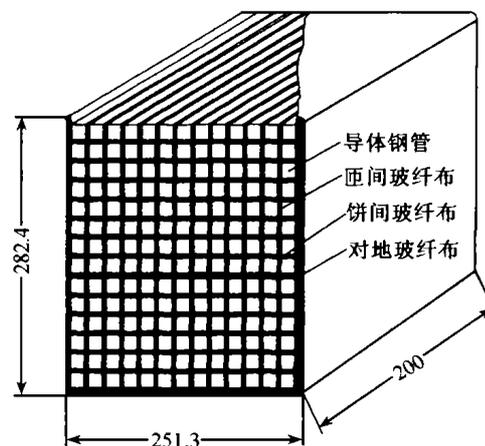


图 1 低温超导磁体截面示意图

Fig. 1 Sectional illustration of cryogenic superconducting magnet

2 HT-7U 磁体的绝缘结构

提高磁体线圈的机械强度是在其外部绕包玻璃纤维带, 再浸渍绝缘胶固化成一体。HT-7U 磁体匝间绝缘为每个导体上半叠法绕包 0.5 mm 厚的玻璃纤维带后, 绕制 11 圈导体成一饼或称为一层, 相邻的导体间构成 1 mm 厚的匝间绝缘; 再在每一饼外半叠法绕包 0.5 mm 厚

作者简介: 崔益民, 男, 1970 年生, 博士生;

潘皖江, 男, 1967 年生, 高级工程师。

的玻璃纤维带, 12 饼整齐迭放在一起, 每相邻的两饼间构成 2 mm 厚的饼间绝缘; 最后在叠放整齐的 12 饼线圈的外围半叠法绕包 8 mm 厚的玻璃纤维带, 构成对地绝缘。把绕包好的磁体线圈放线圈盒内, 在线圈与线圈盒的间隙中振动填满耐辐照的石英粉, 焊接密封箱体, 用低温环氧胶 RAL230 进行真空压力浸渍, 60 ℃ 输胶; 升温到 78 ℃, 保温 24 h 凝胶; 再升温到 130 ℃, 保温 12 h 固化, 然后缓慢冷却到室温。

该种结构的磁体在磁体失超时, 端电压为 2 000 V, 匝间、层间和对地击穿电压的安全系数为: 1 497, 400 和 150^[2]。

3 低温环氧胶 RAL230

3.1 胶的组成^[3]

环氧树脂(双酚 F); 增韧剂(一种小分子环

氧树脂); 固化剂。

以上三组份按 60:40:21 混合。

3.2 胶在常温下的性能

胶的黏度变化如图 2 所示。

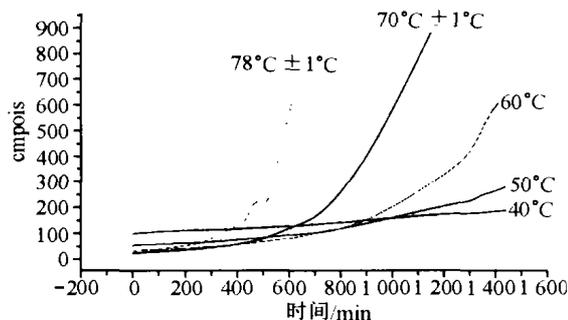


图 2 胶在不同温度下黏度对时间的变化曲线

Fig. 2 Viscosity-time curves for the resin at different temperatures

胶的其他性能如表 1 中所述。

表 1 胶的性能表

Table 1 The properties of the resin

序号	项目	单位	测试条件	测试值
1	液态外观	-	目测	棕红色透明液体, 无机械杂质
	固化后外观	-	目测	胶呈淡黄色、透明、胶面有光泽、无皱纹
2	密度	g/cm ³	25 ℃	1.20
3	凝胶时间 ^[4]	小时	78 ℃	24.00
4	固化时间 ^[4]	小时	130 ℃	12.00
5	介质损耗角的正切	%	常态, 30 ℃	0.60
6	抗冲击强度	kJ/m ²	常态	25.00
7	抗弯曲强度	MPa	常态	102.00
8	线收缩率	%	常态	1.20
9	玻璃化温度	℃	常态	62.00
10	热变形温度	℃	常态	61.00
11	凝胶挥发份	%	78 ℃	1.08
12	固化挥发份	%	130 ℃	3.12
13	击穿电压	10kV/mm	常态	7.50
14	饱和蒸气压 ^[4,5]	mmHg	60 ℃	0.03

低温超导磁体由于受力作用复杂且比较大, 所以对绝缘部分有最大气泡尺寸(小于 0.5 μm)和最大富胶厚度(小于 10 μm)的要求, 因此必须采用真空压力浸胶(VPI)工艺。

该低温胶在 60 ℃ 附近有很好的流动性和渗透性, 在 60 ℃ 有 20 h 的使用期, 饱和蒸气压较低, 适用于真空压力浸渍工艺; 胶的凝胶温

度、固化温度均不太高, 便于操作; 胶固化后在常温下有很好的力学性能、电绝缘性能, 玻璃化温度较高; 升温需考虑树脂量, 保证温度均匀, 固化后缓慢降温冷却。

3.3 胶的低温性能

低温超导托卡马克的超导磁体工作在液氮温度下, 所以胶的低温性能才是我们最关心的。

环氧树脂固化后的低温电性能优于常温下的电性能, 它的低温直流耐压值和交流击穿值比常温下的要高出 10% 以上。HT-7U 磁体中选用的未改性的双酚 F 和固化剂适合于高辐射的

应用^[3]。从室温冷却到液氮温度下的热收缩率为 0.012^[5]。低温力学性能比室温下更良好, 如表 2。

表 2 胶的低温与常温力学性能对比

Table 2 The mechanical properties contrast of the resin at cryogenic and room temperature

温 区	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa
常 温	2.6	163	102
液氮(4 K)温度	6.0	249	121

4 玻璃纤维带

4.1 磁体绝缘层中玻璃纤维带的作用

在复合材料中, 凡是能提高基体材料力学性能的物质, 均称为增强材料。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, 是主要承力组分。它不仅能使绝缘层显示出较高的抗张强度和刚度, 而且能减少收缩, 提高热变形温度和低温冲击强度等。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。

4.2 耐辐照电绝缘玻璃纤维

在树脂基本确立的情况下, 需要优化选择玻璃纤维带并对其进行处理使之能与树脂相配合, 通过对多家产品的测试, 认为无硼无碱玻璃

纤维对 HT-7U 装置比较合适, 它不仅能抗辐射, 而且复合材料抗拉强度也比同类无碱布高 20%^[6]。

耐辐照电绝缘玻璃纤维又称无硼无碱玻璃纤维。它在高能辐照十分稳定, 是原子能反应堆用优良的电绝缘材料和保温隔热材料。由于无碱纤维中碱金属离子少, 所以无碱玻璃纤维的电绝缘性能比有碱玻璃纤维优越得多。耐辐照电绝缘性能如下:

(1) 高剂量辐照性能

在累积中子辐照剂量 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, γ 剂量 ($3 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$) Gy 及大于 280 °C 的条件下, 以耐辐照电绝缘玻璃纤维及绝缘材料的耐辐照电缆, 其电绝缘性能优于其他绝缘材料的同类的电缆。

表 3 三种材料电绝缘性能比较

Table 3 The insulating properties of three materials

绝缘材料名称	电缆绝缘电阻($\Omega \cdot \text{m}$)
耐辐照电绝缘玻璃纤维	7.1×10
石英纤维	4.9×10^8
聚酰亚胺	9.7×10^6

(2) 辐照对成品纱断裂强度无明显影响。

(3) 具有优良的耐水性和耐酸性。

4.3 玻璃纤维带的选用

玻璃纤维是一种优良的弹性材料。应力—应变图基本上是一条直线, 没有塑性变形阶段^[7]。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, 以取得绝缘层强度方向最优化效果, 增加带的层数来保证厚度要求。表 4

是我所与桂林电器科学研究所合作试验测得的数据。从表中可以看出, 减小玻璃纤维带厚度, 能增加强度, 同时减低了含胶量。而含胶量对绝缘层的线胀系数有直接的影响, 表 5 是含胶量与线胀系数的数据(试样厚度均为 8.9 mm)。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, 要尽可能地减少含胶量。

表 4 不同厚度的纤维带构成的复合材料试验数据的比较

Table 4 The experiment data contrast of composites of different thickness glass tapes

编号	布厚/mm	层数	试样平均宽/cm	试样平均厚/cm	平均抗弯曲强度/Pa	平均抗冲击强度/(kJ/m ²)	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%
7	0.12	33	0.600	0.411	506.7	111.2	34.5%
8	0.12	36	0.600	0.411	531.5	136.1	32.8%
9	0.12	40	0.600	0.412	536.0	149.4	30.9%

表 5 带厚、层数及含胶量对线胀系数的影响(所有的试样厚为 8.9 mm)

Table 5 The influence of the thickness of tape and the layer numbers of tape and the ratio of resin to linear expansion coefficient (all test samples are 8.9 millimeters thick)

玻璃丝带厚	0.2 mm			0.17 mm			0.12 mm		
层数	44.00	48.00	52.00	52.00	56.00	60.00	74.00	79.00	85.00
含胶量/%	42.23	38.58	34.78	38.54	36.34	33.57	35.12	32.46	30.95
长向线胀系数/(10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	4.66	3.88	2.80	4.29	1.95	1.85	3.65	1.81	1.36

玻璃纤维带的质量及处理方法对绝缘层的低温力学性能有很大的影响。为此与北京低温中心合作作了进一步的研究。通过对不同产地,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)的玻璃纤维布进行表面处理及偶联剂(不同的种类,不同的浓度)偶联处理,确定胶对玻璃纤维的浸润性及样品粘结工艺,制作单剪样品进行不同温度下的初选,优化样品用 Evans 横向拉伸方法进行评价,并且得出液氮温度下的相关数据。

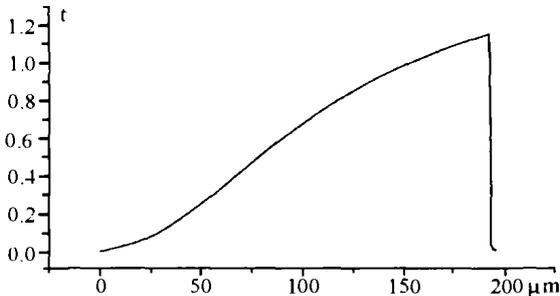


图 3 液氮温度下复合材料的抗剪强度
Fig. 3 Shearing strength of the composite at liquid helium temperature

图 3 是玻璃纤维带与树脂粘结的液氮温度下的抗剪强度。从图中可以看出在低温下复合材料是脆性断裂,其最大剪切应力为 240 MPa。在实验测试中还发现对玻璃纤维不同的处理方法对剪切性能影响很大,其中采用 KH560 对玻璃纤维处理,低温抗剪性能最高,并且不同的浓度影响也很大。

考虑绝缘层复合成型后的含胶量、线胀系数、低温下的电性能和力学性能,并通过复合材料在液氮温度下的试验,玻璃纤维带选择无硼无碱无捻纤维带,用浓度为 2% 的 KH560 浸润剂处理,带宽 25 mm,带厚 0.12 mm。

在低温胶选定 RAL230 后,选择无硼无碱玻璃纤维带与之配合,满足磁体低温性能要求,应用于 HT-7U 超导磁体上是合适的。

5 绝缘结构的成形工艺

核聚变装置 HT-7U 中的低温超导磁体受力作用复杂且比较巨大,而且磁体尺寸又非常大,磁体中心线的周长都超过 10 m,对绝缘层部分有最大气泡尺寸和最大富胶厚度的要求,所以磁体的绝缘结构的成形工艺非常重要,因此必须采用真空压力浸胶(VPI)工艺,带线圈

盒的磁体,还要在线圈盒与磁体间的缝隙处振动填满短石英纤维,再进行真空压力浸渍工艺。在大量试验的基础上,总结工艺流程如下:

绕包匝间绝缘、绕制线圈、绕包层间绝缘和对地绝缘——装入浸渍罐或线圈盒中——按要求密封或焊接密封——预热、抽空除潮气——浸渍绝缘胶(绝缘胶浸渍前要预热、抽空除气)——加压——采用呼吸法(抽空、加压多次)——是浸渍罐中的取出滴干后置于加热炉(能加压)中、加压、升温凝胶;有线圈盒的直接带压、升温——卸压、再升温固化——缓慢冷却至室温——检验。

表6 绝缘层的低温与常温力学性能对比

Table 6 The mechanical properties contrast of the insulation layer at cryogenic and room temperature

温区	抗剪强度/MPa		抗弯强度/MPa	
	试验结果	磁体结构要求	试验结果	磁体结构要求
室温	265.5		522.0	
液氮温度	280.3		541.6	
液氮温度	281.4	220.0	542.0	450.0

从以上数据看出绝缘层的性能是符合要求的,也证明该绝缘结构的设计是合理的,VPI的工艺是成功的。

7 结论

在核聚变试验装置中,磁体线圈要承受非常高的动态负荷,要求绝缘系统必须能够耐受正常的电磁应力、冷热循环应力等,无起层、无裂纹或导体分离,同时也要求高的耐辐照性

HT-7U的绝缘技术是一种要求材料、研究、设计、操作、检查等专家大力合作的技术,得到了国内外许多研究院(所)的大力协作,为保证了国家大科学工程的顺利进行,取得良好的经济效益。

致谢 感谢桂林电器科学研究所绝缘分所、中科院北京理化研究所低温实验室、南京玻璃纤维研究设计院、英国卢瑟福实验室和上海先锋电机厂与我们的合作。

6 绝缘层的电性能和力学性能

由于真实的磁体线圈无法进行破坏性的检验,只能用模拟试样线圈进行试验。

室温下,匝间绝缘复合材料片的击穿电压可达4.0万伏,击穿点经过玻璃布。随着复合材料中的胶含量的降低,材料的电压击穿值有所降低,但根据资料^[8]和经验,环氧胶和玻璃环氧复合材料在低温下的绝缘性能更好,另外材料的直流耐压值高于交流击穿值,所以HT-7U的磁体绝缘层的电强度是足够的。绝缘层的低温力学性能比室温下更良好,如表6。

参考文献

- 1 Wu S T, Weng P D, et al., The Project of HT-7U and its Progress, MT-15, Oct, 1997, Beijing, 20~24
- 2 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:[博士论文]. 中国科学院等离子体物理研究所, 1999. 120~121
- 3 Dave Evans, Canfer S J. A New Resin System for the Impregnation and Bonding of Large Magnet Coils. Rutherford Laboratory Internal Report, 1999
- 4 Dave Evans. Insulation and Impregnation. P. R. China, November 1999
- 5 Dave Evans. Techniques Available for the Vacuum Impregnation of Magnet. IPP, Hefei, November 1999
- 6 潘皖江等. VPI 工艺在 HT-7U 超导磁体上的应用. HT-7U 设计文集(四). 2001. 201~203
- 7 王荣国等. 复合材料概论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999. 39~40
- 8 王寿秦. 低温绝缘技术. 低温与超导, 1978(3): 33~41 (下转第 171 页)

息指示包括颜色指示。

·减少显示给操纵员的信息量,特别是事故状态下的各种非主要信息需全面抑制,所显示的信息应更综合、更全面、更有相关性、更富逻辑性与条理性。

·执行操作规程的操作,与操纵员联合进行测试。

参 考 文 献

1 郑明光,宁忠和,徐济鋈等. 核电厂先进主控制室功能分

析与功能分配. 核动力工程, 2001, 22(2)

2 郑明光,徐济鋈,宁忠和. 核电厂先进报警系统. 核动力工程, 2001, 22(5)

3 郑明光,宁忠和等. 中国百万级核电厂概念设计. 仪表与控制, 1997, 7

4 IEC 1227-1993 Nuclear Power Plants-Control Rooms-Operator Controls

5 NUREG-0700-1981 Guidelines for Control Room Design Review

6 陈浩,郑明光. 核电厂诊断系统的发展. 核电工程与技术, 12(4)

Large Screen Mimic Display Design Research For Advanced Main Control Room in Nuclear Power Plant

ZHENG Mingguang¹, YANG Yanhua¹, XU Jijun¹,
ZHANG Qinshun, JIN Chenghua²; NING Zhonghe¹

(1 Energy and Power Engineering School, Shanghai Jiaotong University, 1954 Huashan Road Shanghai 200030)

(2 Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Hongcao Road 29 Shanghai 200233)

Abstract: Firstly the evolution of mimic diagrams or displays used in the main control room of nuclear power plant was introduced. The active functions of mimic diagrams were analyzed on the release of operator psychological burden and pressure, the assistance of operator for the information searching, status understanding, manual actuation, correct decision making as well as the safe and reliable operation of the nuclear power plant. The importance and necessity to use the (large screen) mimic diagrams in advanced main control room of nuclear power plant, the design principle, design details and verification measures of large screen mimic display are also described.

Key words: nuclear power plant; main control room; mimic display; design research

(上接第 144 页)

Insulation System of Cryogenic Superconducting Magnets in Tokamak HT-7U

CUI Yimin, PAN Wanjiang, WU Songtao, WAN Yuanxi
(Institute of Plasma Physics, The Chinese Academy of Sciences, 230031)

Abstract: The insulation formation of cryogenic superconducting magnet in Tokamak HT-7U is introduced, and the properties of insulation materials are analyzed. The VPI (Vacuum Pressure Impregnation) technology of the magnet coils and the electric and mechanic properties of insulation layers are explained.

Key word : HT-7U; cryogenic superconducting magnet; epoxy resins RAI.230; glass-fiber; tape; VPI; insulation layer