

超导托卡马克 HT-7U 磁体线圈模拟 长样 VPI 及低温力学性能

崔益民 潘皖江 武松涛

(中科院等离子体研究所 合肥 230031)

摘要 主要通过与低温超导托卡马克 HT-7U 中磁体线圈同截面的长样的真空压力浸渍 (VPI) 实验, 探索线圈进行一次成形真空压力浸渍工艺的可行性, 掌握真空度和压力对浸渍的影响, 为真实线圈的真空压力浸渍工艺提供经验, 并对固化后的绝缘层取样进行低温力学性能测试。

主题词 HT-7U 低温超导磁体线圈长样 VPI 低温力学性能

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]。而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。对于一个绝热稳定的高场、高电流密度的超导磁体来说, 其绝缘层应有很高的要求, 尤其是低温力学性能, 因此, 作为绝缘工艺的真空压力浸渍工艺应有很好的可行性和可靠性。为探索工艺, 设计了图一中的长样进行了 3 次实验, 为后续真空压力浸渍实验提供了重要的参数。

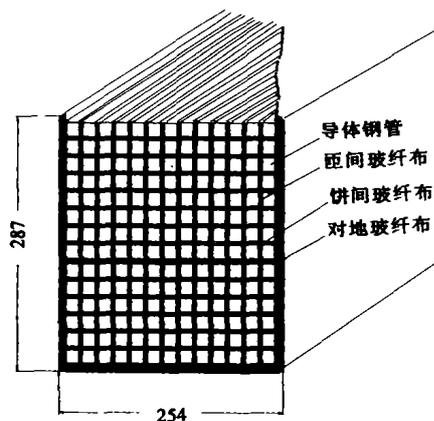


图 1 低温超导磁体截面示意图

2 长样的描述

线圈长样的截面与真实纵场线圈的截面大小一样,为了与实际磁体线圈的绝缘尺寸基本相同,短样采用截面 $20.0\text{ mm} \times 20.0\text{ mm}$ 方形管钢(代替超导导线)制造,每饼由11匝组成,匝间玻璃布厚度 1 mm ,共12饼,饼间叠放 1 mm 厚的玻璃丝毡代替原来设计中的玻璃纤维板,以改善浸透性能,12饼叠放好后绕包 8 mm 厚的对地绝缘,以上绕包均采用半迭包。为了节约用胶量,每根钢管的两端都须密封;长样的长度设计为 1000 mm ,宽度为 254 mm ,高度为 287 mm 。

模拟长样的外面要带有模具,装模过程中,模具内所有间隙用200目左右玻璃砂填充。长样的模具壁厚均为 25 mm (真实线圈盒最薄处的侧板厚为 20 mm ,这里加上 5 mm 的密封槽)。长样是上模板,下模具经螺栓螺母连接而成,下模具是焊接的带凸缘的盒形件,接合面上有密封槽,两端面由密封垫(保证磁体密封)、密封圈(保证模具密封)、端面压板用螺钉旋紧形成密封,安装好的试样如右图:

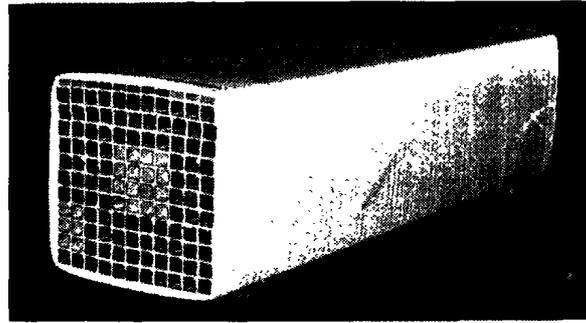


图2 模拟长样照片

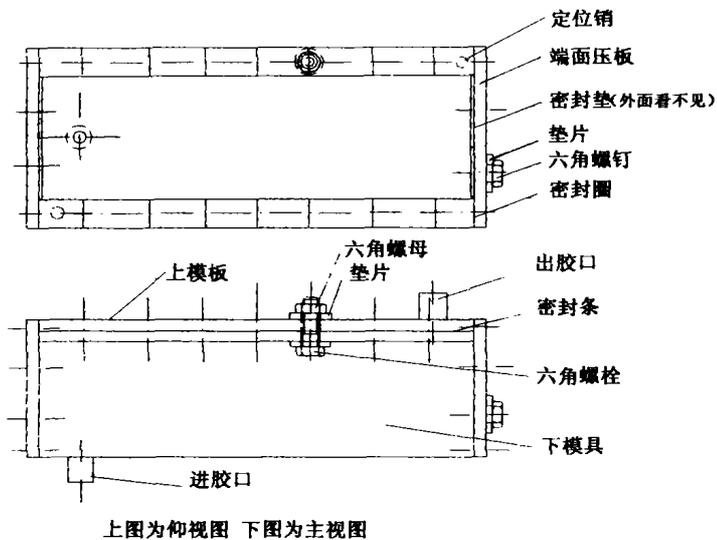
模具能密封,耐正压、负压,环氧树脂固化后能开模。

3 长样真空压力浸渍实验及结果

长样的实验目的是把长向和横向的浸渍效果联系起来考虑,掌握胶的沿线圈长向的浸渍性能,判定保证横向浸透时长向渗渍的可行性,并提供保证线圈完全浸透的优化的浸渍工艺参数:浸渍温度和时间、真空度、加压大小、加压时间,加压方法的选择,凝胶压力的大小,真实线圈的注胶口的开口大小、距离等。

长样实验采用图3示意方案,具体操作如下:

- 1) 按要求完成试样的加工,装配,密封。
- 2) 安装试样、连接真空系统、加压系统,注意各个阀门的关闭状态。
- 3) 称量胶粘剂的三组份,配制胶体,要混合均匀。
- 4) 胶置于能抽真空、加压力的胶罐,预热 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、抽空除气 1 h 。



上图为俯视图 下图为主视图

图3 VPI模拟试样图

5) 试样接好输胶管(近胶端的阀门关闭), 预热 50 °C、抽空除气到 6.7 Pa。

6) 打开输胶阀门开始浸胶, 控制输胶速度, 防止树脂把气体残留密封在线圈中, 直到抽空口的液面达到规定的要求, 关闭抽空阀门, 同时打开加压气体阀门加压, 直至完全凝胶。

7) 准确控制每步参数并记录, 加压 0.5 h 后, 升温到凝胶温度 78 °C, 保温保压 24 h 后, 升温到 130 °C, 保温 12 h 固化后, 冷却打开模具, 取出试样, 观察浸渍情况, 如浸渍良好, 则取样进行低温力学性能测试。

表 1 是具体实验参数一览表。

表 1 实验参数

开始输胶时的真空度/Pa	输胶压力/Pa	输胶时间/h	浸渍温度/°C	输胶口直径/mm	浸渍距离/mm
2.0	1×10^5	10	50	40	1000

图 4 是一浸渍良好的照片, 从图中可以看出良好的浸渍效果: 对低绝缘层完全透明, 能清晰看见内部的钢管, 呈淡黄色, 与很小的试样的颜色、透明度相同。把长样锯断, 断面也看不出任何缺陷。

4 低温力学性能测试

4.1 试样加工

为了进一步判断该 VPI 工艺的真实可行性, 从长样上对地绝缘层中, 按顺着玻璃布带方向和垂直玻璃布带的方向取出图 5 所示的样品(各 3 件), 进行液氮温度下的拉伸实验。

4.2 测试结果及分析

测试的结果如表 2 中, 数据是大于磁体线圈的结构设计要求。由于该种树脂是液氮温度下使用, 它的玻璃化温度仅为 60 °C, 在取样的机械加工过程中, 局部温度会超过它的玻璃

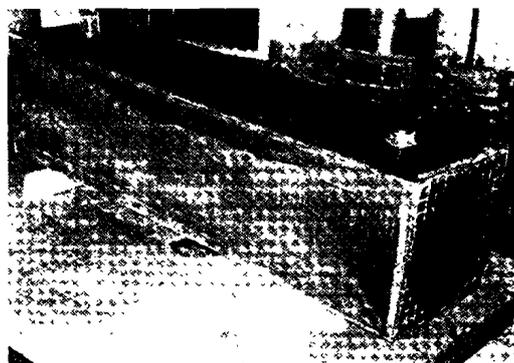


图 4 浸渍良好的模拟长样

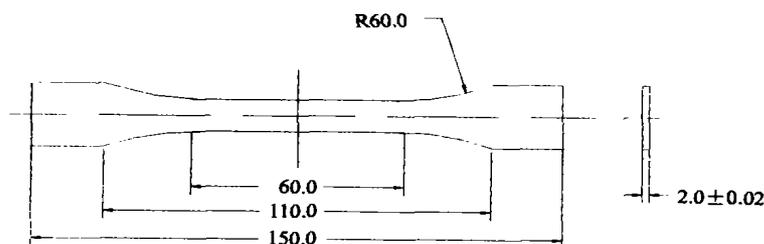


图 5 低温拉伸实验样品

化温度, 此时的机械加工过程中的振动会引起裂纹的发生或产生疲劳破坏, 而这些肯定影响

它的力学性能（另外，我们同时在层间绝缘，匝间绝缘进行了拉伸和剪切试样的取样，由于这些试样是非标准试件，详细内容不在这里叙述）。

表2 液氮温度拉伸实验数据

取向	试样号	测试结果/MPa	平均值/MPa
顺着玻璃纤维布带方向	1	607.2	608.5
	2	621.4	
	3	596.8	
垂直玻璃纤维布带方向	1	312.0	299.8
	2	288.9	
	3	298.6	

5 结论

长样的设计及密封是成功的，长样的加工是成功的，长样试验基本达到预期的目的，增强了以后真实大线圈真空压力浸渍的信心。长样实验基本上确立了真实大线圈真空压力浸渍的真空度，凝胶压力，抽孔口和输胶口的直径大小，输胶口间距及该如何控制浸胶速度等；当然，长样实验与真实线圈的真空压力浸渍还是有差异，有它的不足之处。

致谢：感谢中国科学院理化研究所低温力学实验室与我们的真诚合作。

参 考 文 献

- 1 Wu S T, Weng P D, Wan Y X, et al. The Project of HT-7U and its Progress. MT-15, Oct, 1997, Beijing, 20~24

VPI FOR LONG MODEL OF SUPERCONDUCTING MAGNETS COIL AND ITS CRYOGENIC MECHANICAL PROPERTY

Cui Yimin Pan Wanjiang Wu Songtao

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

ABSTRACT The feasibility of VPI (Vacuum Pressure Impregnation) of superconducting magnet coils of HT-7U is testified by VPI experiment of long model and the section of the model is same as that of real coils; the parameters of vacuity and pressure are analyzed, which is the basis of the VPI technology of the magnet coils, and the cryogenic mechanical property is tested of test sample that is made from the cured insulating layer of the long model.

KEYWORDS HT-7U; long model of superconducting magnet coil; VPI; cryogenic mechanical property