

HT-7U 纵场磁体的真空压力浸渍

崔益民¹⁾ 潘皖江 武松涛

(中科院等离子体物理研究所 合肥 230031)

Vacuum Pressure Impregnation for Toroidal Magnet Coils

Cui Yimin, Pan Wanjiang, Wu Songtao

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

Abstract Parameters involved in the fabrication process of the cryogenic super-conducting magnet coils in HT-7U by vacuum pressure impregnation (VPI) were calculated by simulating the flow characteristics of the epoxy resins in turn-compressed glass-fiber tape, in a short sample and in a long sample, respectively, so as to optimize the fabrication process. The technological feasibility of the optimized process was strictly tested by measurement of the electric and mechanic properties at cryogenic temperature of the model coils.

Keywords Cryogenic superconducting magnet, Toroidal magnet coil, Vacuum pressure impregnation

摘要 主要通过模拟匝间流动试验、短样试验和长样试验等,探求低温超导托卡马克 HT-7U 中纵场磁体线圈的绝缘层真空压力浸渍的工艺参数,确定工艺流程,并以模型线圈试验的电性能和液氮温度下的力学性能来验证工艺参数及工艺流程的可靠性。

关键词 低温超导磁体 纵场磁体线圈 真空压力浸渍

中图分类号: TM 26+5

文献标识码: A

文章编号: 0253-9748(2002)03-0217-04

托卡马克是磁约束氦聚变试验装置, HT-7U 核聚变装置是用于研究先进的全超导托卡马克运行模式,它将能获得准稳态的、极长的、单零的或双零的全电流运行的等离子体^[1]。纵场结构系统是 HT-7U 装置的关键部件之一,它提供强大的环向磁场来约束高温等离子体。纵场系统是由十六个沿环向均布的 D 形超导线圈组成, D 形纵场线圈高 3.5 m, 宽 2.5 m, 它的截面中心处的 D 形周长为 9.18 m。图 1 是 D 形线圈的外形及其截面图, 线圈的导体是 21.7 mm × 21.7 mm 的方形结构, 在导体外半叠法绕包 0.5 mm 厚的 E 形玻璃纤维带后, 绕制 11 匝构成一饼, 绕制过程中自然形成 1 mm 厚的匝间绝缘; 每两饼间放置 1 mm 厚的环氧板, 饼间形成 2 mm 厚的饼间绝缘; 12 个饼放好后, 整个线圈外面绕包 8 mm 厚的 E 形玻璃纤维带, 以形成对地绝缘。从截面图上看, 132 根导体以 11 × 12 的矩阵排列, 整个截面的尺寸为 287.2 mm × 252.4 mm。纵场磁体采用 CICC 导

体设计方案, 超导材料为 NbTi, 采用超临界 4.2 K 氦流冷却。该磁体放在材料为 316 LN 不锈钢的线圈盒中。

磁体在使用过程中, 受到极其严酷的机电应力、交变冷热冲击应力和辐照。为了保证纵场磁体的使用安全, 在低温胶和玻璃纤维带选定的前提下, 必须采用合理的真空压力浸渍 (VPI) 方法使得超导磁体与线圈盒成为一个整体, 同时控制绝缘层中富胶层和最大气泡尺寸。本文主要设计试验探求低温超导托卡马克 HT-7U 中纵场磁体线圈的绝缘层 VPI 的工艺参数, 并确定工艺流程。

1 环氧胶的常温参数

HT-7U 磁体中用的胶由环氧树脂 (双酚 F)、增塑剂 (一种小分子环氧树脂)、固化剂三组份按 60:40:21 混合组成。胶的性能如表 1 所列, 混胶后胶的起始粘度在 40 °C 时为 90.0 mPa·s, 50 °C 时为 50.0

收稿日期: 2001-08-27

1) 本文联系人

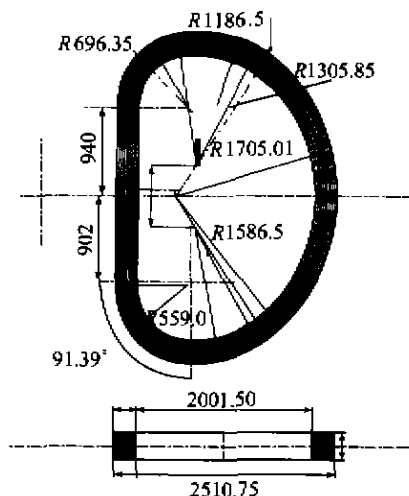


图1 D形线圈及其截面图

Fig. 1 Schematic representation of the D-shaped coil and its cross-section view

表1 胶的性能表^[2]

Tab. 1 Technical specifications of the glue in use

| 性能 | 测试条件 | 测试值 |
|-------------------------|-------|-----|
| 密度/(g/cm ³) | 25 ℃ | 1.2 |
| 凝胶时间/h | 78 ℃ | 24 |
| 固化时间/h | 130 ℃ | 12 |
| 玻璃化温度/℃ | 常态 | 62 |
| 热变形温度/℃ | 常态 | 61 |
| 饱和蒸气压/Pa | 60 ℃ | ~4 |

mPa·s, 60 ℃时为 33.0 mPa·s, 70 ℃为 23.0 mPa·s。在 60 ℃有 20 h 的使用期, 饱和蒸气压较低; 在 50 ℃和 60 ℃附近有很好的流动性和渗透性, 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^[3]。

2 试验

2.1 模拟匝间流动性试验

由于匝间间隙最小, 只有 1 mm 厚, VPI 过程中胶的流动阻力最大, 为了了解匝间 VPI 的可行性, 掌握 VPI 过程中匝间胶流动的参数, 设计 3.2 m 的曲折长槽, 进行沿紧压玻璃丝布的隙间流动性试验。

上、下模具长为 610 mm, 宽为 300 mm, 厚均为 20 mm, 在上模具开有宽 15 mm, 深 7 mm, 长 3200 mm 的槽, 槽型如图 2 所示。槽中放置用玻璃丝布带缠绕的钢条, 钢条宽 13 mm, 厚 5 mm (可缠绕 1 mm 厚的玻璃丝布), 槽和钢条加工偏差均为 ±0.05 mm。

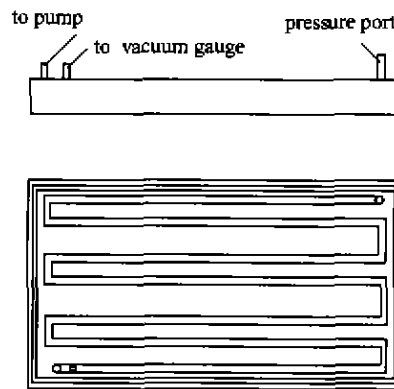


图2 匝间流动性模具

Fig. 2 Schematic representation of the flow paths of the glue

上模上有 14 个观察窗。试验时整个模具浸泡在温度可调水浴中, 具体的试验数据如表 2。该试验表明胶流动速度与温度、真空度、输胶压力、布的松紧程度关系很大, 尤其是布的松紧影响最为明显。根据文献^[4], 可近似地认为: 流速与孔隙率 ϕ 值的三次方成正比; 也与压力梯度成正比, 因而在相同的输入压力下, 真空度越高流速越大。试验 1 流速最大, 是因为在四组试验中 ϕ 值最大, 真空度最高。试验 2 流速最小, 是因为压力梯度比试验 3 和 4 小得多, ϕ 值基本相同。该试验也进一步证明以后的真实磁体 VPI 要在 50~60 ℃和 3~4 个大气压力下输胶, 同时在饱和蒸气压范围内尽可能地提高抽口真空度, 定为 13.3322~33.3254 Pa。

表2 匝间渗流的试验数据

Tab. 2 Experimental data in VPI

| 试验编号 | 绕包厚度/mm | 水浴温度/℃ | 抽口真空度/ × 133.322 Pa | 输胶口压力/atm | 流完全程时间/min |
|------|---------|--------|------------------------|-----------|------------|
| 1 | 1.0 | 50 | 0.65 | 1 | 63 |
| 2 | 1.2 | 50 | 0.65 | 1 | 475 |
| 3 | 1.2 | 50 | 0.25 | 3 | 274 |
| 4 | 1.2 | 60 | 0.40 | 2 | 182 |

2.2 短样试验

进一步了解胶的浸渍性能, 判定横向渗透的可行性, 掌握胶沿截面方向的浸渍工艺参数: 浸渍温度和时间、真空度、加压大小、加压时间等, 并在实验的基础之上优化横向工艺参数, 为总体工艺参数的优化提供数据。

短样采用 20.0 mm × 20.0 mm 方形管钢制造, 为了与实际磁体的截面尺寸基本相同, 每饼由十一匝组成, 匝间玻璃丝布厚 1 mm, 共 12 个饼, 饼间叠放 1 mm 厚的玻璃丝布代替原来设计中的玻璃纤维板, 以改善浸透性能, 12 个饼叠放好后绕包 8 mm 厚的

对地绝缘。为了节约用胶量,每根钢管的两端都须密封;为了防止胶从小样的两端渗入,保证胶从四周渗入,小样的两端必须密封,采用 6 mm 厚橡胶垫加上钢板用螺栓旋紧密封;两端头的钢管间用常温固化的环氧树脂密封。小样的长为 200 mm,宽为 251.3 mm,高为 282.4 mm,其截面尺寸、长度和形状如图 3 所示(密封未画出),图中,1 为导体钢管;2 为匝间玻纤布;3 为饼间玻纤布;4 为对地玻纤布。为了保证两端密封的可靠性,两端面必须保证平整或加工保证平整。

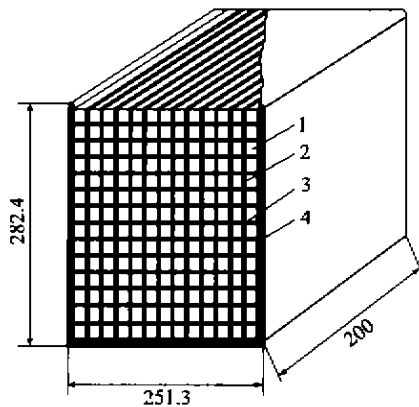


图 3 小样截面和构形图

Fig.3 Schematic diagram showing the cross-sectional view of the small short sample

工艺流程:小样装入浸渍槽预热—抽空—输胶,再抽空—加压—再抽空—再加压—卸压—出罐、滴胶,折开观察。

表 3 短样试验数据

| 试验编号 | 试验真空度 Pa | 试验温度 °C | 浸渍时间 min | 浸渍压力 atm | 抽空-加压循环次数 |
|------|----------|---------|----------|----------|-----------|
| 1 | 33.325 4 | 60 | 180 | 1 | 2 |
| 2 | 26.664 4 | 60 | 90 | 2 | 2 |
| 3 | 19.998 2 | 50 | 90 | 2 | 1 |

三组短样试验数据见表 3,结果都非常满意,证明了横向浸透的可行性,并认为试验 3 的参数较优。

2.3 长样试验

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透的可行性,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、加压大小和加压时间等。

模拟试样的截面尺寸与小样截面尺寸一致,是由同样的方形钢管做成,先由 11 根绕包成一饼,再由 12 个饼叠加后绕包对地绝缘层,饼间垫有 1 mm

厚的玻璃丝布;模拟试样的长度为 1 000 mm;试样的两端面的密封要求同小样的端面,也采用密封垫和常温固化环氧树脂密封,两模具的端面板用螺钉旋紧密封。模拟试样的外面要带有模具,试样的模具壁厚均为 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)。试样是上模板、下模具具经螺栓、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(上模板和下模具的密封槽要错开 5~10 mm,形成双重密封),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,安装好的试样如图 4 所示。模具能密封,耐正压、负压,环氧树脂固化后能开模。图 4 中 1 为定位销,2 为端面压板,3 为密封垫,4 为垫片,5 为六角螺钉,6 为密封圈,7 为上压板,8 为六角螺母,9 为出胶口,10 为密封条,11 为六角螺栓,12 为下模具,13 为进胶口。

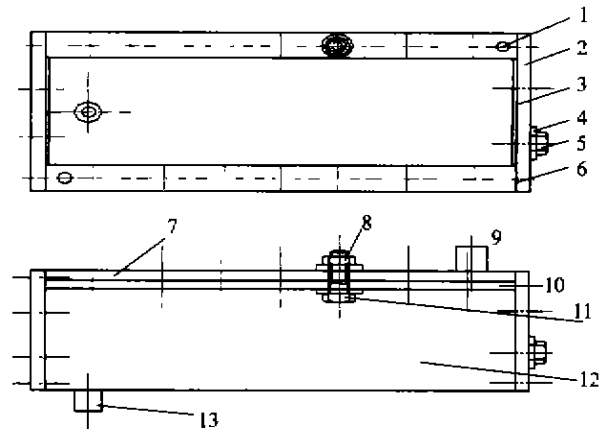


图 4 VPI 模拟试样图

Fig.4 Schematic representation of the simulated VPI sample

工艺流程:长样预热—抽空脱气、脱水—输胶—再抽空—加压—再抽空—再加压—浸渍完全后—带压升温凝胶—卸压、升温固化—检验。

表 4 长样试验数据

| 试验编号 | 试验真空度 Pa | 试验温度 °C | 浸渍时间 min | 浸渍压力 1×10^5 Pa | 抽空-加压循环次数 |
|------|----------|---------|----------|-------------------------|-----------|
| 1 | 13.332 2 | 50 | 200 | 1 | 2 |
| 2 | 13.332 2 | 60 | 125 | 2 | 2 |

长样试验数据见表 4,证明了所选用的胶粘剂对 HT-7U 的纵场线圈进行 VPI 工艺的可行性及可靠性,并提供了相应的工艺参数。

2.4 模型线圈的试验

模型线圈的一切参数与真实纵场线圈相同,真

实的线圈浸渍长度是 4.59 m,以真空度为 13.332 2 Pa,浸渍温度为 60 ℃,浸渍压力不超过 4 个大气压,浸渍时间 15 h 等工艺参数浸渍同样大小的模型线圈,呼吸(抽空—加压)4 次,升温凝胶、固化。检测绝缘层的电性能,液氮温度下抗拉强度和抗弯强度均符合工程设计要求。

3 结论

以上试验表明 VPI 过程中,布的松紧度、浸渍温度和时间、真空度、加压大小、加压时间、呼吸(抽空—加压)的循环次数等是非常重要的参数。系列试验也进一步证明以后的真实磁体 VPI 一定要带压输胶;同时在不超出饱和蒸气压的情况下,尽可能地提高可用真空度;采用多次呼吸法增强浸润效果。

VPI 工艺是造价昂贵的超导线圈制造的最后一道工序,要求有绝对的可靠性,经过充分研究与试验摸索,以上实验得出的工艺参数经过与真实线圈相同的模型线圈的检验,符合要求,为有关科学工程创造了条件。

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 Evans D. Techniques Available for the Vacuum Impregnation of Magnet. IPP, Hefei, November 1999
- 3 崔益民. TOKAMAK 超导磁体用 VPI 浸渍树脂应用性能研究. 绝缘材料, 2001, (2): 44 ~ 46
- 4 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 398 ~ 400
- 9 Hatwar T K, Shin S C, Stinson D G. Corrosion-resistant Protective Overcoat for Magneto-optical Media. IEEE Trans Magn, 1986, 22 (5): 946 ~ 948
- 10 Lee Z Y, Miao X S, Hu Y S *et al.* Kerr Effects Enhancement and Corrosion-resistant Improvement by AlN and AlSiN Films. J Appl Phys, 1991, 67: 5344
- 11 Zak J, Moog E R, Liu C *et al.* Universal Approach to Magneto-optics. J Magn Mater, 1990, 89: 107 ~ 123
- 12 Egashira K, Yamata T. Kerr-effect Enhancement and Improvement of Readout Characteristics in MnBi Films Memory. J Appl Phys, 1974, 45(8): 3634 ~ 4487
- 13 Xiong R, Li Z Y, Yang X F *et al.* Direct Method to Determine the Elements of Dielectric Tensor of Perpendicular Magnetic Films by Measuring the Kerr Rotation Angle and the Reflectivity R of Double-layered Film. Materials Science and Engineering B, 2000, 76: 56 ~ 58

(上接第 212 页)