

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.09.012

ITER 校正场线圈试验件 VARTM 工艺模拟^{*}

李居平, 吴杰峰, 俞小伍

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 对国际热核实验反应堆(ITER)校正场线圈试验件的真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺进行了模拟,分析了注射口位置、数量对充模过程的影响。结果表明,最优的注射位置在两匝导体之间;随注射口数量增加,充模时间近似呈指数衰减。对试验件实际浇注过程进行了模拟,通过流动前沿确定了溢料口位置。根据模拟的注射口和溢料口位置设计模具,进行浇注试验。计算充模时间6290 s与实际时间6600 s接近,试验件固化后无干斑缺陷。VARTM工艺模拟可为校正场线圈提供制造方案及工艺优化。

关键词: 复合材料;校正场线圈;VARTM;数值模拟

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)09-0049-03

VARTM Simulation for Mock-up of ITER Correction Coil

Li Juping, Wu Jiefeng, Yu Xiaowu

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

Abstract: The numerical analysis and the experimental investigation for the mock-up of international thermonuclear experimental reactor(ITER) correction coil pieces in the vacuum assisted resin transfer molding(VARTM) process was simulated. The effects of the locations and number of gates on mold-filling process were studied. The results show that the optimized locations of gates are between the two turns. Filling time had exponential decrease with the increase of the number of gates. The locations of vents are based on the flow front of resin, and the mold is designed according to those. The actual filling time (6600 s) is closed to the calculated time (6290 s). There are no dry spots in the mock-up. The VARTM simulation is proved useful in strategy design and process optimization for correction coil.

Keywords: composite; correction coil; VARTM; numerical simulation

国际热核实验反应堆校正场线圈由6个Top线圈(TCC),6个Bottom线圈(BCC)和6个side线圈(SCC)组成。线圈由超导线缆绕制而成,线缆外侧为由环氧树脂/玻璃纤维复合材料组成的绝缘层。绝缘层的制造工艺对线圈的稳定运行至关重要。真空辅助树脂传递模塑(VARTM)作为一种先进的复合材料液体模塑成型工艺,是制造复杂结构大型构件的理想工艺^[1-2],适用于校正场线圈的制造。通过对VARTM过程的数值模拟,可优化工艺设计,提高效率、减少缺陷^[3-4]。以BCC试验件为对象,进行了工艺模拟与工艺试验。

1 数学模型

Darcy定律可描述多孔介质中树脂的流动行为。流速与压力梯度呈线性关系,可表示为:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial P / \partial x \\ \partial P / \partial y \\ \partial P / \partial z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: v ——流体速度;

μ ——树脂黏度;

K ——渗透率张量;

P ——压力。

薄壳型构件忽略厚度方向的流动,仅在面内求解,Darcy定律变为二维形式:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial P / \partial x \\ \partial P / \partial y \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于不可压缩流体,其连续性方程为:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

2 工艺模拟

2.1 模型及参数

BCC为环扇形线圈,圆心角60°,长约7 m,宽

^{*}ITER计划专项(2008GB101000),国家自然科学基金项目(51107138)

联系人:李居平,博士,主要从事树脂传递模塑工艺研究

收稿日期:2014-06-18

约 2 m。真实线圈由 4×8 匝导体组成。试验件底部为 4×2 匝导体,导体上放置填充物,模拟整个线圈尺寸,线圈模型如图 1 所示。线圈绝缘层为薄壁制件,可用曲面模型进行分析。使用树脂传递模型分析软件 RTM-worx 对充模过程进行模拟。

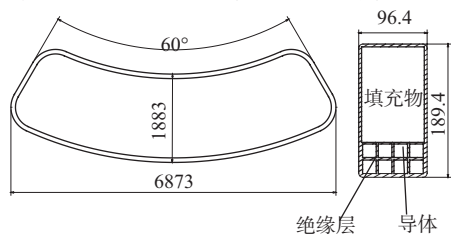


图 1 线圈模型

设定工艺参数: 注塑压力 $P=1 \times 10^5$ Pa, 纤维渗透率 $K=1 \times 10^{-10}$ m², 孔隙率为 50%, 树脂黏度 $\mu=0.1$ Pa·s。在以上参数固定情况下, 分析注射口位置及数量对充模过程的影响, 并确定溢料口位置。

2.2 注射口截面位置

以 100 mm 长的等截面模型为例, 分析注射口的截面位置对充模过程的影响。如图 2 所示, 为便于实际操作, 注射口设在线圈侧边, 9 个注射位置与底面距离逐渐增加。

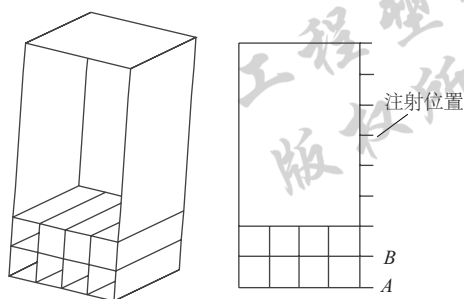


图 2 注射口截面位置

分别计算 9 个注射位置的充模时间, 得到充模时间与注射位置的关系, 如图 3 所示。

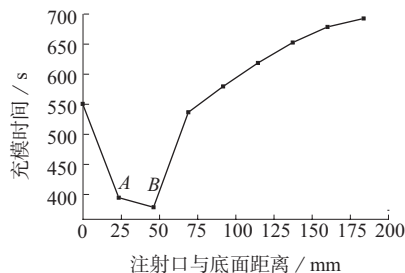


图 3 充模时间与注射位置关系

注射口设在如图 2 所示的 B 点时的充模时间最短 (380 s), 其次为 A 点 (396 s), 远小于其它位置。A、B 充模过程如图 4 所示, 黑色等值线显示了流动前沿变化。在 A 点注射时, 底部各层流动前沿基本保持一致, 同时充满。而在 B 点注射时, 上层优先

充满, 底层流动前沿滞后, 易产生干斑^[5]。A 点充模虽然时间比 B 点略长, 但树脂填充均匀, 有利于减少缺陷。最优注射位置应为 A 点, 即两匝导体之间。

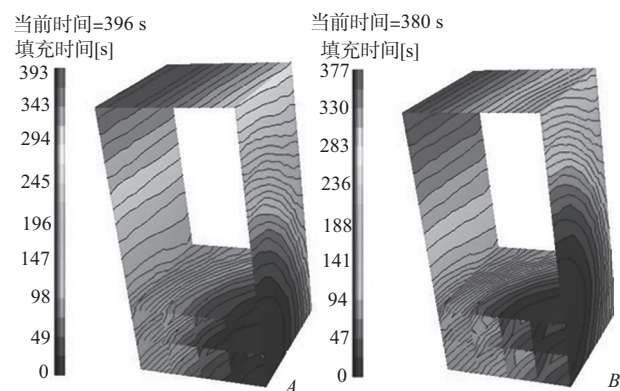


图 4 A、B 充模过程对比

2.3 注射口数量及溢料口位置

注射口在线圈平面上沿环向均匀分布如图 5 所示, 截面注射位置为图 2 中 A 点, 注射口数量为 1~12。分别模拟不同数量注射口的充模过程, 如图 6 所示。

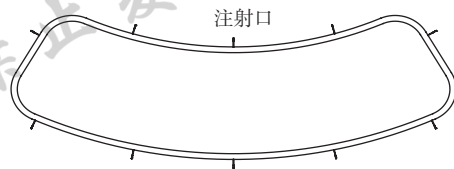


图 5 注射口平面分布示意图

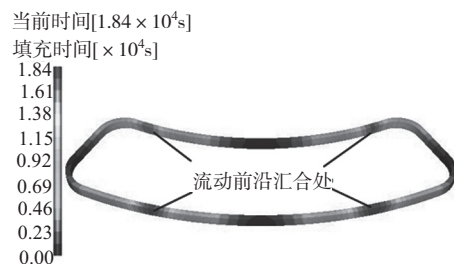


图 6 充模过程

图 6 中树脂流动前沿汇合处是树脂最后填充区域, 应设置溢料口, 使空气顺利排出, 防止干斑^[6-7]。根据注射口的位置, 通过分析充模过程即可确定溢料口位置。

根据计算结果绘制整个塑料件充模时间与注射口数量的关系曲线, 如图 7 所示。由图 7 可见, 随着注射口数量增加, 充模时间近似呈指数衰减。这说明增加注射口数量可显著提高注射效率, 但随着注射口数量增加, 提高的效果逐渐降低。

3 试验与模拟对比

根据平面渗透率测量方法^[8], 测得使用的玻璃纤维布渗透率为 8.9×10^{-11} m²。通过黏度仪测得混

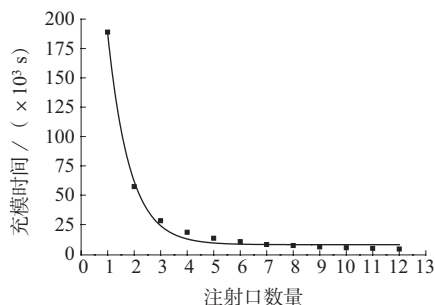


图7 充模时间与注射口数量的关系

合后的树脂在 40℃时黏度为 0.1 Pa·s。

在试验件环向等距设置 10 个注射口,通过浇注环路连接各注射口。制件内部抽真空,在大气压下进行浇注。对充模过程进行模拟,结果如图 8 所示。

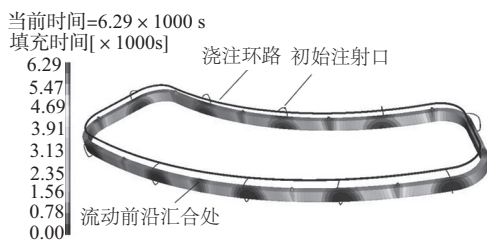


图8 试验件充模过程

试验模具如图 9 所示,溢料口设在图 8 中树脂流动前沿汇合处,共 10 个。溢料口外部有透明观察管,可确定浇注过程中树脂是否充满。各溢料口与真空机组相连。在浇注前模具加热到 40℃抽真空,真空度维持在 25 Pa 左右。树脂和固化剂混合、加热、脱气后注入模具。

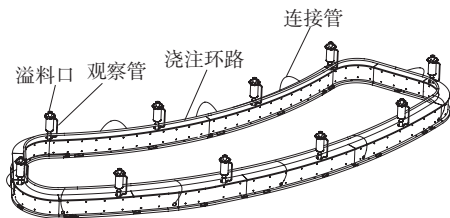


图9 试验模具

观察管中出现树脂时间约为 6 600 s。图 8 中的计算时间为 6 290 s,相对误差为 4.7%,结果接近。固化后的试验件如图 10 所示,表面质量良好,无干斑。

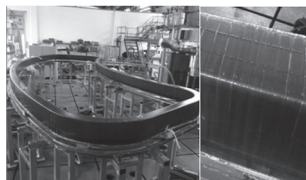


图10 固化后的试验件

4 结论

(1) 截面注射位置的设置影响充模时间,选择合适的注射位置可提高效率。最优注射位置在两匝导体之间。

(2) 随注射口数量的增加,充模时间近似呈指数衰减,注射口数量对充模时间影响逐渐减小。

(3) 根据流动前沿可确定溢料口,辅助模具设计。计算充模时间与实际时间接近,制件表面质量良好、无干斑。VARTM 工艺模拟可应用到校正场线圈的方案设计及工艺优化中。

参考文献

- [1] Simacek P, Eksik Ö, Heider D, et al. Experimental validation of post-filling flow in vacuum assisted resin transfer molding processes [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(3): 370–380.
- [2] 赖家美,王德盼,陈显明,等. 工艺参数对 VARTM 中树脂充模流动的影响研究 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(12): 49–53.
Lai Jiamei, Wang Depan, Chen Xianming, et al. Effects of technological parameters on resin molding flow process in vacuum assisted resin transfer molding[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(12): 49–53.
- [3] DeValve C, Pitchumani R. Simulation of void formation in liquid composite molding processes[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 51(8): 22–32.
- [4] Laurenzi S, Grilli A, Pinna M, et al. Process simulation for a large composite aeronautic beam by resin transfer molding[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 57(2): 47–55.
- [5] Matsuzaki R, Kobayashi S, Todoroki A. Flow control by progressive forecasting using numerical simulation during vacuum-assisted resin transfer molding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 45(2): 79–87.
- [6] Poodts E, Minak G, Mazzocchi L, et al. Fabrication, process simulation and testing of a thick CFRP component using the RTM process[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 56(1): 673–680.
- [7] 孙玉敏,段跃新,李丹,等. 风机叶片 RTM 工艺模拟分析及其优化 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 23–29.
Sun Yumin, Duan Yuexin, Li Dan, et al. Computer simulation analysis and optimization for wind turbine blade[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 23–29.
- [8] Naik N K, Sirisha M, Inani A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 65(2): 22–40.