

# ITER Side 校正场线圈 端部大圆弧模压成形及回弹分析

文 伟<sup>1</sup>, 吴杰峰<sup>1</sup>, 陈文革<sup>2</sup>, 夏世波<sup>1</sup>, 李 波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学院 强磁场科学中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 利用大型有限元分析软件 ANSYS 分析了国际热核实验反应堆 (ITER) Side 校正场线圈 (CC) 端部三维大圆弧模压成形及释放模具后导体的回弹效应, 研究了不同半径成形时导体内外表面的应力、应变的分布及释放模具后导体的回弹规律。设计了 1 套模压成形模具, 通过修模的方式在该套成形模具上进行了不同半径成形试验, 测得了不同成形半径时模压成形后的回弹量值。试验结果验证了所建立的有限元分析模型的正确性。有限元分析和试验结果表明: ITER Side CC 端部三维大圆弧可通过模压成形达到所需的大半径要求, 为 ITER Side CC 端部三维大圆弧成形提供了一种可行方案。

**关键词:** ITER Side 校正场线圈; 模压成形; 回弹; 有限元分析

中图分类号: TB121

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)07-0836-05

## Molding and Spring-Back Effect Analysis for Large Arc of ITER Side Correction Coils

WEN Wei<sup>1</sup>, WU Jie-feng<sup>1</sup>, CHEN Wen-ge<sup>2</sup>, XIA Shi-bo<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A finite element analysis (FEM) simulation model for large arc of International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) Side correction coils by molding was established. Processes including molding and spring-back effect after being molded were simulated. The distribution of stress, strain on the inner and outer faces of conductor were gained, and the value of spring-back after being molded was obtained. One set of molding equipment was designed and manufactured, and the value of spring-back with molds of different radiuses by using this equipment was obtained. The experimental results show that the FEM simulation model is correct and molding is a feasible method for the manufacturing of ITER Side correction coils.

**Key words:** ITER Side correction coil; molding; spring-back; finite element analysis

收稿日期: 2009-08-03; 修回日期: 2009-10-26

基金项目: 国家科技计划 ITER 计划专项资助(国内配套研究)(2008GB101000)

作者简介: 文 伟(1984—), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 从事电物理装置设计与分析工作

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnk>

国际热核实验反应堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 校正场线圈 (Correction Coils, CC) 由 6 个 Top 线圈、6 个 Bottom 线圈和 6 个 Side 线圈组成, 用于补偿磁场不对称和稳定等离子体。其中 Top CC 和 Bottom CC 是平面线圈, 而 Side CC 较长的两边在第三维方向有 11.297 m 的圆弧要求, 所有超导线圈导体内部均采用 CICC (cable in conduit conductor) 结构。而超导体三辊成形由于自身的局限不能完成两端圆弧部位三维大圆弧的成形。

本研究利用有限元分析软件 ANSYS 对不同半径下模压成形后试验导体的应力、应变和释放模具后的回弹效应进行分析, 并设计相应的成形模具, 试验不同成形半径下释放模具导体回弹后的残余塑性变形量, 以验证有限元建模和分析的正确性。

## 1 模压成形及回弹过程分析

导体模压后的回弹效应不是一孤立过程, 而与成形过程密切相关, 因此, 有必要对成形和回弹过程进行分析。图 1 为 ITER Side CC 结构示意图, 图 2 为成形模具和导体图, 凸模和凹模具有相同的成形半径, 为防止导体的侧向移动, 在侧向设计有挡块。模压成形时, 凹模保持不动, 凸模、内外侧挡块在液压千斤顶的作用下向上运动, 利用模具与导体间相互作用力带动导体成形为相应半径  $R$  的导体。然后释放模具, 导体发生卸载回弹, 得到回弹后的导体。

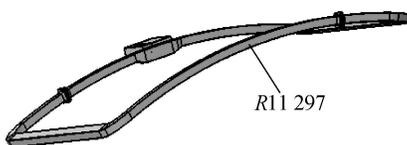


图 1 ITER Side CC 结构示意图

Fig. 1 Scheme of ITER Side CC

## 2 导体模压成形及回弹有限元分析

### 2.1 有限元模型的建立

在图 2 成形模具和导体基础上, 根据模型对称性建立了图 3 所示的有限元分析模型。由于导体和成形模具形状均较为规则, 因此, 均采

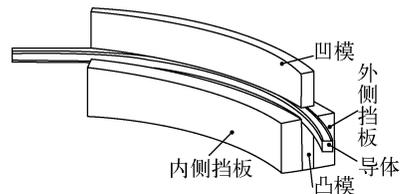


图 2 成形模具和导体

Fig. 2 Molds and conductor

用映射网格划分单元。本分析是一几何非线性、材料非线性和接触非线性过程, 采用 SOLID185 单元划分网格。对成形过程中导体和模具的接触问题采用接触对定义, 设导体为柔性体, 凸凹模具为刚性体。成形中的接触均采用面-面接触对, 选取 TARGET170 单元模拟刚性体 (模具) 的接触表面, 选取 CONTA174 单元模拟柔性体 (导体) 的接触表面。ITER Side CC 导体与 EAST 导体截面尺寸和组成相似, 为保证试验和研究正确性, 本研究采用 EAST 真实导体作为 ITER Side CC 试验导体。EAST 导体截面如图 4 所示, 外层铠甲材料为 316LN 不锈钢管, 内部超导电缆由 120 根 Nb-Ti 超导股线和 141 根铜线经四级绞缆绞制而成, 其中的 21 根铜线是电缆的铜芯, 并穿过不锈钢钢套, 在钢套中留有 34% ~ 37% 的空隙率, 以便 4.5 K 的超临界氦进行冷却。

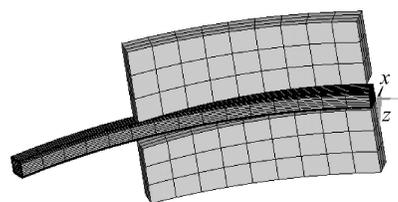


图 3 有限元分析模型

Fig. 3 FEM model

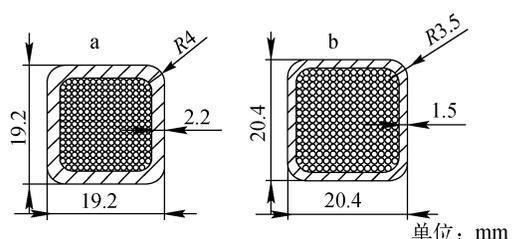


图 4 导体截面尺寸

Fig. 4 Cross section of conductor

a—CC 导体; b—EAST 导体

## 2.2 边界条件和求解算法的确定

### 1) 边界条件和加载

结构有限元分析方法的载荷共有 5 类: 自由度载荷, 集中载荷, 面载荷, 体积载荷和惯性载荷。本研究采用节点位移载荷, 限制凸模节点除成形方向  $z$  外的所有自由度, 在  $z$  方向施加对应半径  $R$  的位移量。限制凹模节点的所有自由度。对于导体, 在对称面上施加对称边界条件。为简化分析模型, 省略侧向挡块, 用限制导体节点径向位移代替。

### 2) 有限元求解方法的确定

模压成形数值分析有限元分析方法有动力显式算法、静力隐式算法、显式-隐式算法 3 种类型。在材料加工领域中, 许多问题可简化为准静态问题。对于此类问题的数值模拟, 一般均采用静力隐式算法。经典静力隐式算法具有理论基础严格的特点。虽面临迭代的收敛性问题, 但在求解问题的边界载荷、材料参数合适的条件下, 只要其收敛, 理论上即可保证结果的正确性。动力显示算法基于时间中心差分格式, 使有限元方程显示化, 避免了迭代计算和计算解的不收敛。因此, 动力显示算法也可用于静力分析, 但与经典静力隐式算法相比, 解的稳定性和精确性较差。回弹的数值模拟必须建立在精确的已得应力场基础上, 若用动力显式算法, 时间步长必须足够小, 成形的终止必须等到导体动态响应足够后。因此, 用动力显式计算包含了巨大的工作量, 卸载后的非线性成分也明显减弱。而 ANSYS 显示-隐式求解技术仅能用于壳单元, ITER CC 导体和试验用导体均必须使用体单元。本工作的成形过程和卸载后的回弹效应分析均采用经典静力隐式算法。

### 3) 静力隐式算法

导体成形运动方程为:

$$M \ddot{\mu} + C \dot{\mu} + f_i = f_e \quad (1)$$

式中:  $M$ 、 $C$  分别为质量矩阵和阻尼矩阵;  $\mu$  为节点位移矢量;  $f_i$ 、 $f_e$  分别为等效内力矢量和等效节点力矢量。

假定导体成形过程是一准静态过程, 因速度和加速度的影响可忽略。如考虑  $t$  时刻和  $t + \Delta t$  时刻的平衡方程:

$$f_i^t = f_e^t \quad (2)$$

$$f_i^{t+\Delta t} = f_e^{t+\Delta t} \quad (3)$$

以上两式相减, 得到增量方程为:

$$f_i^{t+\Delta t} - f_i^t = f_e^{t+\Delta t} - f_e^t = \Delta f_e \quad (4)$$

将  $f_i^{t+\Delta t}$  表示成  $\mu^t$  附近的仅保留线性项的泰勒展开式, 得到:

$$f_i^{t+\Delta t} - f_i^t \approx \left. \frac{\partial f_i}{\partial \mu} \right|_{\mu^t} (\mu^{t+\Delta t} - \mu^t) = k(\mu^t) \Delta \mu_1 \quad (5)$$

因而, 得到求解方程如下:

$$\Delta \mu_1 = (k(\mu^t))^{-1} \Delta f_e \quad (6)$$

$$\mu_1 = \mu^t + \Delta \mu_1 \quad (7)$$

当步长较大时, 由于采用了近似表达式(5)而造成由式(7)确定的  $\mu_1$  不满足平衡方程式(4), 记此不平衡力为  $\Delta R$ 。

将  $f_i(\mu^{t+\Delta t})$  表示成  $\mu_1$  附近的仅保留线性项泰勒展开式, 得到:

$$f_i(\mu^{t+\Delta t}) - f_i(\mu_1) \approx \left. \frac{\partial f_i}{\partial \mu} \right|_{\mu_1} (\mu^{t+\Delta t} - \mu_1) = k(\mu_1) \Delta \mu_2 \quad (8)$$

从而得到新的近似解:

$$\Delta \mu_2 = (k(\mu_1))^{-1} \Delta R \quad (9)$$

$$\mu_2 = \mu_1 + \Delta \mu_2 \quad (10)$$

重复以上步骤, 直到  $\Delta R$  足够小, 得到  $t + \Delta t$  时刻的解为  $\mu^{t+\Delta t}$ 。此即为静力隐式算法。 $\Delta R \rightarrow 0$  是此格式的收敛判据。

### 4) 接触算法和接触刚度的确定

对于面-面接触单元, 可使用增进的拉格朗日方法或罚函数方法。使用增进的拉格朗日方法时, 为了找到精确的拉格朗日乘子(即接触力)而对罚函数进行了一系列迭代。与罚函数相比, 拉格朗日方法易得到良态条件, 对接触刚度的敏感性较小<sup>[1-2]</sup>。本工作采用增进的拉格朗日方法。所有的接触问题均应定义接触刚度。在本分析中, 导体在成形过程中主要以发生弯曲变形为主, 因此, 接触刚度因子 FKN 选择为 0.1。

### 5) 摩擦问题的处理

模具与导体间的摩擦力对导体模压成形有着显著影响, 它不仅影响成形力的大小和能量消耗, 还直接影响导体的成形性能和回弹量的大小, 并对导体的表面质量也有影响。本工作采用经典的库仑摩擦模型, 在分析和多次试验的基础上, 选定动摩擦系数为 0.15, 静摩擦系数为 0.09<sup>[3-4]</sup>。

### 6) 材料本够关系的确定

本文中, 导体外层铠甲 316LN 材料采用双线性各向同性硬化模型, 使用双线性来表示应力应变曲线, 在应力应变关系图中有两个斜率, 即弹性斜率和塑性斜率<sup>[5]</sup>。由于随动强化的 Von mises 屈服准则被使用, 所以, 包含鲍辛格效应。铠甲内的超导电缆相对于外层 316LN 相当柔性, 假定其材料性质呈各向同性, 弹性模量可选取 1~ 10 GPa, 泊松比取 0.2。本分析材料性能参数选择列于表 1。模具材料为 45 钢, 导体模压成形全过程均在常温条件下进行。

表 1 常温下材料性能参数

Table 1 Material properties under normal temperature

材料名称	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ M Pa	切线模量/ GPa
316LN	188	0.282	375	20
超导电缆	10	0.2		
45 钢	210	0.3		

### 2.3 成形分析结果

以成形半径 3 000 mm 为例, 导体模压成形 Von mises 应力和应变分布图示于图 5。

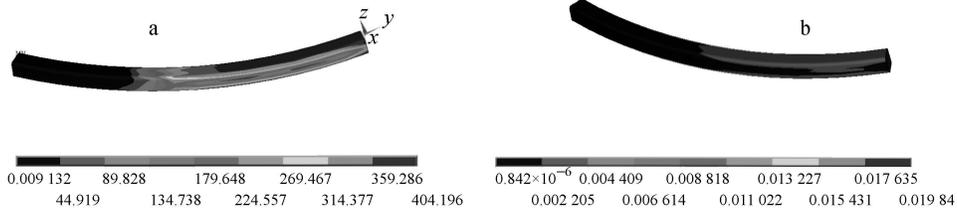


图 5 导体 Von mises 应力(a)和应变(b)分布

Fig. 5 Distributions of Von mises stress (a) and strain (b) on conductor

在模压成形过程中, 导体弯曲变形主要集中在导体的内外两侧, 变形量最大的区域应力值最大。从图 5a 可看到, 导体变形最大区域的应力值已超出了 316LN 的屈服强度, 因此, 导体已发生了塑性变形。从图 5b 可看到, 导体内外成形内外侧等效应变值明显大于其他部位, 弯曲外侧切向伸长变形, 内侧材料受到切向压缩。有限元分析结果与理论分析结果一致。

### 2.4 回弹分析

常用回弹分析有两种方案。1) 将整个回弹卸载过程假设为两个连续的阶段: 第 1 阶段为纵向力减小到零, 第 2 阶段为内弯矩减小到 0。2) 将计算得到的内部应力直接积分, 得到内弯矩, 根据弯矩卸载方法求得回弹。基于刚度、摩擦理论和方案 1, 本工作在回弹分析时, 凸模所有节点施加反向位移, 位移值的大小与模压成形时凸模位移值的大小相等。由于接触刚度和摩擦因子与初始成形时的一致, 所以, 回弹卸载弯矩与初始成形弯矩值大小相等, 方向相反<sup>[6,7]</sup>。图 6 是成形半径为 3 000 mm 时释放模具后导体回弹变形情况。

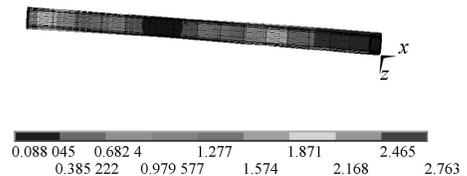


图 6 回弹分析变形结果

Fig. 6 Displacement after spring back

### 3 模拟和试验验证

为验证 ITER Side CC 端部圆角部位三维模压成形方案的可行性, 设计了 1 套模压成形设备(图 7)。该套设备的工作原理是: 内外侧挡板限制导体径向移动, 凸凹模是半径为  $R$  的弧形模, 凸模在液压千斤顶的作用下向上移动, 以强制位移的方式促使导体达到所需的圆弧半径。在进行有限元分析时, 为简化分析模型, 取消导体内外侧挡板, 通过限制导体所有节点径向位移代替。

在图 7 所示设备上, 通过修模的方式得到了不同半径成形时导体回弹后圆弧拱高。试验和模拟结果列于表 2。

由表 2 可看到, 试验结果与分析结果基本吻合, 试验结果验证了有限元分析的正确性。

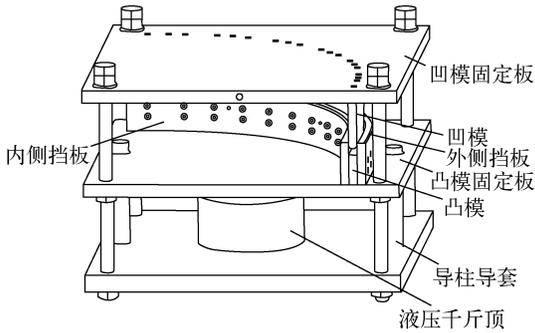


图7 试验用模压成形试验设备

Fig. 7 Molding equipment of experiment

但由于分析将成形过程假设为准静态过程,而实际成形过程是一多变的复杂过程,所以,试验结果与分析结果间存在一定误差。

表2 试验和模拟结果

Table 2 Results of test and simulation

成形半径 $R/mm$	回弹后圆弧拱高 $H/mm$	
	有限元分析结果	试验结果
8 000	0	0
5 000	0 193	0 178
4 000	1 085	1 105
3 000	2 763	2 911
2 500	3 201	3 310

## 4 结论

1) 基于有限元分析软件 ANSYS 建立的 ITER Side CC 端部大圆弧模压成形分析模型符合实际,分析中必须根据实际情况选择合适的接触刚度系数和摩擦系数。

2) 根据反向加载方案 1,通过凸模反向移动,完成了回弹卸载过程方向弯矩的加载,实现了回弹效应模拟。

3) 研究发现,ITER Side CC 大圆弧模压成形时,回弹对导体成形后最终几何形状的影响很大,在导体成形过程中,必须进行回弹补偿。

4) 模压成形方案能够满足 ITER Side CC 三维大圆弧半径要求,解决了超导体三辊成形无法实现端部三维大圆弧成形的技术难题。

## 参考文献:

[1] 薛新, 刘强, 阮锋. 基于数值模拟的弧形件板料弯曲回弹补偿研究[J]. 冲压, 2007(6): 59 61.

XUE Xin, LIU Qiang, RUAN Feng. Spring-back compensation study in sheet metal bending of arc shape workpiece based on numerical simulation[J]. Stamping, 2007(6): 59 61 (in Chinese).

[2] 吴建军, 张贺刚, 王俊彪, 等. 型材拉弯的力学与回弹分析[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(4): 357-359.

WU Jianjun, ZHANG Hegang, WANG Junbiao, et al. Mechanical and spring-back analysis for the stretch bending process of extruded profile[J]. Materials Science and Technology, 2004, 12(4): 357-359(in Chinese).

[3] 吴建军, 张萍, 何朝阳. 大直径薄壁弯管回弹的有限元分析[J]. 特种成形, 2009(1): 79-81.

WU Jianjun, ZHANG Ping, HE Chaoyang. FEM simulation for the bending spring-back of thin walled and large diameter tube[J]. Special Forming, 2009(1): 79 81(in Chinese).

[4] 古涛, 鄂大辛, 高小伟, 等. 管材弯曲成形的有限元模拟与实验分析[J]. 特种成形, 2006(1): 66-68.

GU Tao, E Daxin, GAO Xiaowei, et al. Finite element simulation and experimental analysis of the forming process of pipe bending[J]. Special Forming, 2006(1): 66 68(in Chinese).

[5] 杜长城, 王俊翔, 陈杰富, 等. 锅炉弯管缠绕式冷管成形工艺及回弹的数值模拟[J]. 四川大学学报, 2008, 40(60): 75-79.

DU Changcheng, WANG Junxiang, CHEN Jiefu, et al. Numerical simulation for twisting cold bending process and spring-back of boiler pipe[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(60): 75 79(in Chinese).

[6] LOU H Z, STELSON K A. Three dimension tube geometry control for rotary draw tube bending part1: Bend angle and overall tube geometry control[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 5(123): 258-264.

[7] 詹梅, 杨合, 栗振斌. 管材数控弯曲回弹规律的有限元分析[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(4): 349-352.

ZHAN Mei, YANG He, LI Zhenbin. FEM numerical analysis of spring-back law of NC tube bending[J]. Materials Science and Technology, 2004, 12(4): 349 352(in Chinese).