

文章编号:1002-025X(2011)05-0016-04

## ITER 校正场线圈盒真空电子束焊接分析

方 雯, 吴维越, 吴杰峰, 文 伟

(中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 校正场线圈是 ITER 大型超导磁体系统的重要组成部分, 在线圈盒焊接过程中, 若线圈盒内表面与对地绝缘接触部分的温度过高, 将影响校正场线圈的超导绝缘性能。文中应用有限元焊接模拟软件 SYSWELD 对线圈盒的电子束焊接过程进行了数值模拟, 利用双椭圆热源与 3D 高斯热源的组合热源模拟真空电子束焊独有的“钉形”热源, 得到了与实际较为相符的熔池形貌; 确定了接触点上的温度分布, 并分析其对校正场线圈的影响; 同时, 对比了不同线圈盒结构的温度场分布, 从而得到能够保护对地绝缘的合理肩部尺寸。

关键词: 真空电子束焊; SYSWELD; 数值模拟; 超导; 温度场

中图分类号: TG456.3 文献标志码: B

国际热核聚变实验堆 ITER<sup>[1]</sup>是一项研究热核聚变的国际合作的大科学工程, 以开展聚变能研究, 为能够运用核聚变能提供工程技术与物理参数为目的。ITER 装置包括超导磁体系统、真空室、冷屏、外真空杜瓦等一系列主要部件以及电流引线、低温制冷系统、电源系统等一系列附属部件。超导磁体系统作为 ITER 的核心部件之一, 包括超导纵场系统、超导极向场系统、超导中心螺管系统以及超导校正场系统, 其中校正场系统的作用是补偿 ITER 内部由于线圈安

装误差、制造误差、变形误差以及其他误差引起的磁场分布误差<sup>[2]</sup>。校正场线圈主要由超导电缆、对地绝缘和线圈盒组成, 线圈截面如图 1 所示。

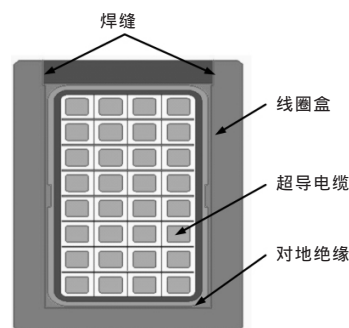


图 1 校正场线圈结构

收稿日期: 2010-11-10

panel by diffusion bonding[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 61-62: 123-127.

- [9] Masayuki S, Hirohisa M, Akihiro A, et al. Diffusion bonding of aluminum bronze to stainless steel and improvement of the weldability [J]. Transactions of the Japan Welding Society, 1991, 22(1): 57-65.
- [10] Nishi H, Araki T. Mechanical properties of brazing joints of alumina dispersion strengthened copper to 316 stainless steel for fusion reactor divertor[J]. J. At Energy Soc. Jpn., 1994, 36(10): 958-966.
- [11] Nishi H, Kikuchi K. Influence of brazing conditions on the strength of brazed joints of alumina dispersion-strengthened copper to 316 stainless steel [J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 258-263: 281-288.
- [12] Nishi H, Muto Y and Araki T. Mechanical tests of diffusion bonding joints of alumina dispersion strengthened copper to 316 stainless steel for fusion reactor divertors [J]. J. At Energy Soc. Jpn., 1994, 36(5): 432-440.
- [13] Nishi H, Araki T and Eto M. Diffusion bonding of alumina dispersion-strengthened copper to 316 stainless steel with interlayer metals [J]. Fusion Engineering and Design, 1998, 39-40: 505-511.
- [14] Yilmaz O. Effect of welding parameters on diffusion bonding of type 304 stainless steel-copper bimetal [J]. Materials Science and Technology, 2001, 17(8): 989-994.
- [15] 侯金保, 董宝明, 王 凯. 锡青铜-合金铜扩散焊技术研究[C]//第九次全国焊接会议, 天津, 1999: 180-183.
- [16] 王希琳, 王贞炳, 陈志华, 等. 铜与 45 钢扩散接合的研究[J]. 热加工工艺, 1993, 22(4): 34-36.
- [17] Padron T, Khan T I and Kabir M J. Modelling the transient liquid phase bonding behavior of a duplex stainless steel using copper interlayers [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 385: 220-228.

作者简介: 解 庆 (1984—), 硕士研究生, 主要研究方向为异种材料的真空扩散连接。

超导电缆由多股 CICC (cable-in-conduit-conductor) 导体有序构成, 在超导电缆外部缠绕绝缘材料, 经过真空压力浸渍<sup>[3]</sup>固化形成超导电缆的对地绝缘; 线圈盒分为底部的 U 形盒和上部的盖板, 材料为 316LN, 焊缝深度为 20 mm, 线圈盒焊缝中心与超导电缆对地绝缘的间距 (肩部宽度) 为 1.5 mm。进行线圈盒的焊接时, 若线圈盒内表面与对地绝缘接触部分的温度超过 250 °C, 就将损害到对地绝缘<sup>[4]</sup>, 从而对超导线圈的绝缘性能造成不利影响。因此, 线圈盒的焊接过程对于超导线圈的性能有着至关重要的作用。在焊接过程中, 如何控制温度、减小热影响区、保护对地绝缘层就成为了线圈盒焊接过程中的一个主要问题。

在现有的深熔焊方法中, 真空电子束焊由于具有能量密度高、热影响区小、焊接变形小、焊接参数能够精确控制, 并且整个焊接过程在真空条件下进行, 焊缝不易氧化等优点, 而被广泛应用于航空航天、原子能、国防及军工、汽车和电气电工仪表等众多行业。基于上述考虑, 在线圈盒的焊接过程中, 拟采用真空电子束焊作为线圈盒的焊接方法。

为测试焊缝性能及热影响区温度, 根据现有的校正场线圈结构, 设计制作了肩部宽度为 1.5 mm 的线圈盒电子束焊接的试验短样, 进行真空电子束焊接试验, 试验件如图 2 所示。线圈盒焊接试件总长度为 200 mm, 仍采用校正场线圈的 U 形盒体与盖板的结构。为模拟实际超导磁体线圈盒的焊接状况, 在盒体中心空腔放置环氧棒, 并缠绕玻璃丝布与线圈盒内表面隔离。在线圈盒内放置热电偶, 以测量焊接试验过程中肩部附近的温度变化。

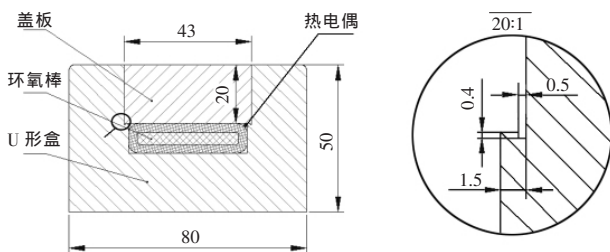


图2 焊接试验件

为了解详细的焊接温度场分布, 采用专业焊接模拟软件 SYSWELD 对此焊接过程进行模拟。将模拟所

得结果与试验所得的焊缝形貌及温度分布进行了对比, 并在此基础上模拟了线圈盒在不同肩宽下的焊接温度场分布。

## 1 有限元分析模型

### 1.1 建立有限元模型

为简化模型, 在建模过程中不需建立玻璃丝布与环氧棒的模型, 二者对焊接过程的影响可以通过改变线圈盒内表面的边界条件来实现。同时为简化模型, 去除图中的圆角以及定位卡槽。利用 ESI 集团开发的有限元建模工具 VISUAL MESH 进行模型网格的划分。焊缝区采用较密的 8 节点单元, 远离焊缝区采用 6 节点单元逐渐过渡, 以减少模型节点数, 提高计算效率。划分后的有限元模型如图 3 所示。

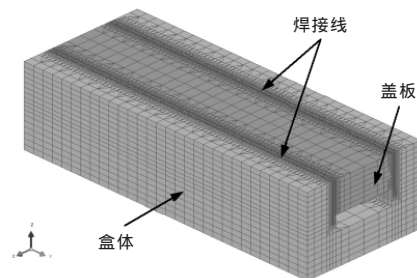


图3 有限元模型

### 1.2 焊接工艺参数

焊接设备采用 TECHMETA GENOVA 系列, 焊枪为 TECHMETA CT4, 电极直径 2 mm。焊接工艺参数见表 1。

表1 焊接工艺参数

加速电压/kV	60
电子束流/mA	192
工作距离/mm	220
焊接速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1

### 1.3 组合热源的建立

真空电子束焊接所形成的熔池区深而窄, 顶端熔宽较大, 顶端以下较窄, 呈现出一个“钉形”的熔池形貌。为了准确模拟出这种“钉形”的热源, 在 SYSWELD 软件的热源校核模块 (Heat Source Fitting) 中, 选取由双椭球热源 (Double Ellipsoid) 和 3D 锥形高斯热源 (3D Conical Gaussian) 共同作用的组合热源。这样顶端主要由双椭球热源作用, 顶端以下则主要由 3D 锥形高斯热源作用, 在二者的共同作用

下,便可形成电子束焊的“钉形”热源。

在热源校核模块中,分别进行双椭球热源与3D高斯热源的校核,调整参数直至达到合理的熔池形貌。取计算模型的一半,得到的热源形式如图4所示。

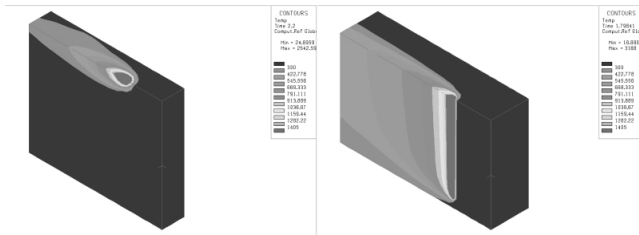


图4 热源(左:双椭球热源;右:3D高斯热源)

#### 1.4 边界条件

利用 VISUAL MESH 从 3D 模型中提取出 2D 面网格,作为焊接模拟过程中的散热面。因电子束焊在真空条件下进行,不存在热对流,因而,在散热面上只施加热辐射边界条件。初始温度设定为 25℃。选取 3D 模型的外侧节点,施加最小装夹(Minimum Clamping),阻止模型的刚性位移。

## 2 计算结果与分析

利用所建立的组合热源,加载到网格上进行计算,焊接速度均为 16.7 mm/s,第 1 道焊缝焊接完成后冷却 480 s,再开始第 2 道焊缝的焊接,整个焊接模拟时间为 960 s。

### 2.1 温度场模拟结果

线圈盒的瞬时温度场如图 5 所示。熔池深度约为 23 mm,焊缝顶部宽度约为 4.5 mm,对比实际的焊接试验件,二者的熔池形貌基本一致,可知热源的建立是合理的。

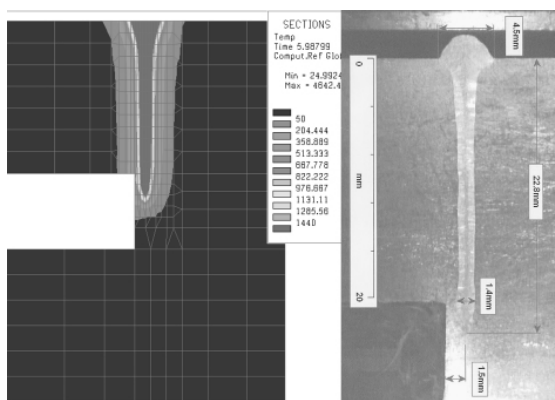


图5 熔池形貌(左:模拟结果;右:试验结果)

提取线圈盒内表面肩部的两节点,得到其温度循环曲线,如图 6 所示。从图 6 可见,在焊接模拟过程中,节点上的瞬时最高温度可达 900℃以上,之后又陡降至 200℃左右。

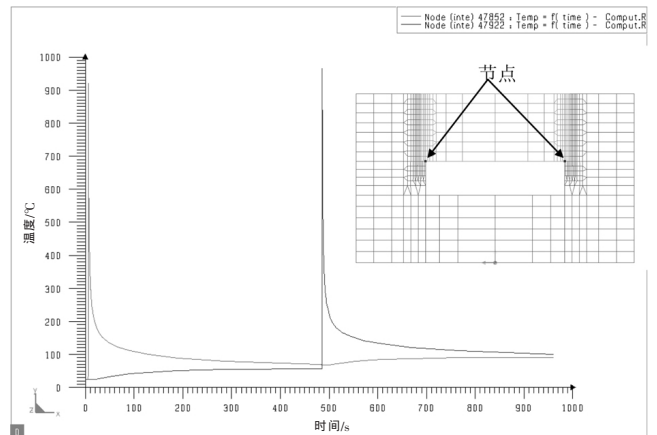


图6 所取节点上的温度循环曲线

校正场线圈的对地绝缘由玻璃纤维带和环氧胶复合构成。玻璃纤维带缠绕于超导电缆外部,利用真空压力浸渍将环氧胶与玻璃纤维带固化成为一体。玻璃纤维带通常可耐受 600℃以上的高温,环氧胶是由环氧树脂、增韧剂、固化剂等按一定比例混合形成的有机物,当温度超过 250℃时,其固化性能就会受损。由图 5 可以看出,在实际的焊接过程中,线圈盒的肩宽为 1.5 mm,焊缝中心线与线圈盒内表面非常接近。在真实的校正场线圈中,对地绝缘与线圈盒内表面直接接触,若焊接时在二者的接触面上产生高温,对地绝缘固化将被破坏,从而影响超导磁体的绝缘性能。

根据图 6 中所示的模拟结果,线圈盒焊接时靠近肩部的内表面节点上瞬时温度可以达到 800℃以上,远远超过了对地绝缘的耐受温度 250℃,校正场线圈的对地绝缘必定会被破坏。

为保护对地绝缘,保证校正场线圈焊接后的绝缘性能不受影响,必须降低线圈盒内表面上的焊接温度。因电子束焊在真空条件下进行,不易于通过改变边界条件增加散热等方式来降低焊接温度,而焊接高温的主要影响区域在肩部边缘,因此,可以考虑改变焊缝位置,将线圈盒肩部尺寸加大,使得焊接热影响区远离肩部的边缘,这样便可以降低线圈盒与对地绝缘接触面上的焊接温度。然而,肩部尺寸并不可以无

限制地增大。校正场线圈在装置中承受着电磁力、夹具的约束力以及自身重力等作用,肩部尺寸过大,会在肩部附近产生较大的应力集中,这对于线圈的使用会造成很大的影响。基于上述考虑,将模型的肩宽尺寸由 1.5 mm 增大至 3 mm 和 5 mm,分别进行计算。

## 2.2 增大肩宽后的模拟结果

分别建立肩宽为 3, 5 mm 的有限元模型,加载 1.3 节中建立的组合热源,焊接时间及边界条件设置与上例相同,所得结果如图 7 所示。从图 7 中可见,在肩宽为 3 mm 时,两节点的温度均在 400 °C 以上,仍可损害对地绝缘。在肩宽为 5 mm 时,节点 1 的温度在 250 °C 以下,而节点 2 的温度约为 280 °C,高于对地绝缘层的最高耐受温度。这是由于节点 2 位于第 2 道焊缝一侧,在完成第 1 道焊缝的焊接后,工件上温度没有能够完全恢复,从而在第 2 道焊缝开始时,工件的整体温度相对于第 1 道焊缝起始时要高。

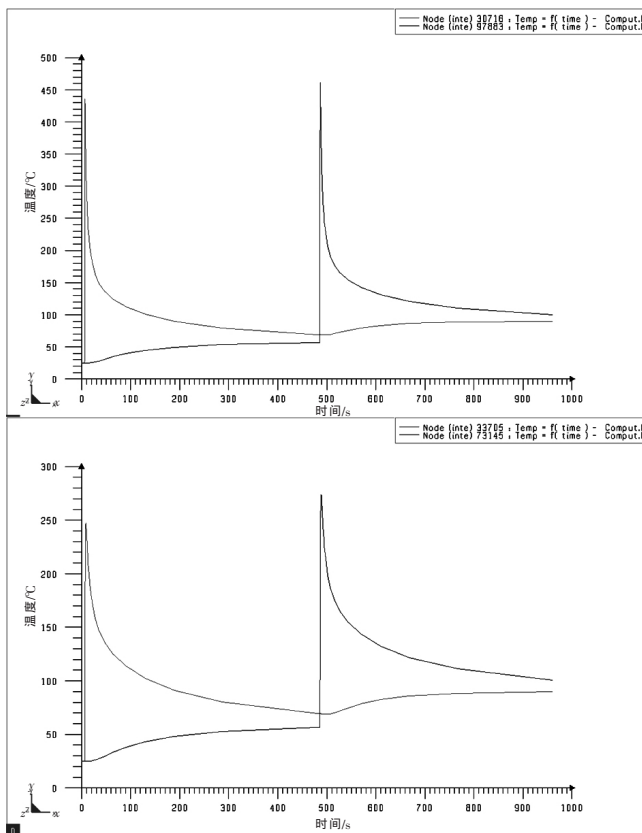


图 7 改变肩宽后的热循环曲线 (上: 3 mm; 下: 5 mm)

在肩部尺寸增加至 5 mm 的情况下,在第 1 道焊接时,线圈盒内表面的最高温度可控制在 250 °C 以下,若延长 2 道焊缝之间的冷却时间,使得工件上的

温度能够降低至室温,在第 2 道焊接时,节点上的温度便可以在 250 °C 以下,从而达到保护对地绝缘层的要求。因此,5 mm 的肩部尺寸便可以作为满足焊接工艺要求的校正场线圈盒焊接的参考尺寸。

## 3 结论

(1) 建立了超导磁体线圈盒真空电子束焊焊接试验件的有限元模型,得到了与实际焊缝相符的熔池形貌;提取了线圈盒内表面节点的温度循环曲线,得到了线圈盒与超导磁体接触面上的温度场结果,分析了在此温度下对校正场线圈工作的影响。

(2) 通过增大模型的肩宽尺寸,对有限元模型进行修改,分别计算了肩宽调整至 3 mm 和 5 mm 时的温度场,得出了能够较好保护超导电缆时的理想肩宽尺寸,为优化校正场线圈盒结构及校正场线圈盒的真空电子束焊焊接工艺提供了依据。

## 参考文献:

- [1] 赵君煜. 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划[J]. 物理, 2004, 33(4): 259.
- [2] 曾文彬, 吴维越. ITER 校正场线圈的结构分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009, 29(3): 264-269.
- [3] 崔益民, 潘皖江, 武松涛. HT-7U 纵场磁体的真空压力浸渍[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(3): 217-220.
- [4] 刘润山, 张雪平, 周宏福. 环氧树脂胶粘剂的耐热改性研究进展[J]. 粘接, 2008, 29(12): 30-35.
- [5] Yi Luo, Guoqiang You, Hong Ye, et al. Simulation on welding thermal effect of AZ61 magnesium alloy based on three-dimensional modeling of vacuum electron beam welding heat source[J]. Vacuum, 2010(84): 890-895.
- [6] Bate S K, Charles R and Warren A. Finite element analysis of a single bead-on-plate specimen using SYSWELD[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009(86): 73-78.
- [7] 胡美娟, 刘金合. 12 mm 厚钛合金平板电子束焊接的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1 622-1 626.
- [8] Wu C S, Zhang M X, Li K H, et al. Numerical analysis of double-electrode gas metal arc welding process[J]. Computational Materials Science, 2007(39): 416-423.

作者简介: 方 雯 (1986—), 硕士研究生, 主要从事焊接工艺有限元分析工作。

**Analysis for the vacuum electron beam welding of ITER correction coils case***FANG Wen, WU Wei-yue, WU Jie-feng, WEN Wei*

(Institute of Plasma and Physics of Chinese Academy of Science, Hefei 230031, Anhui pro., China) P16-19

**Abstract:** Correction Coils (CC) are important components of ITER superconducting systems. During the welding procedure of the coil case, the high temperature in the interface of the coil case's interface and the ground insulation would affect the insulation performance of the correction coils. A simulation of the vacuum electron beam welding (VEBW) of the coil case was carried out by the use of the finite element analysis software SYSWELD for welding simulation. A composite heat source composed of double ellipsoid heat source and 3D conical Gaussian heat source was applied to simulate the working of EBW. It could be seen that there was a good consistency between the numerical results and the experimental results. The temperature of the nodes in the interface was obtained and the affect to the correction coils was analyzed. A comparison of temperature field among different structures of the coil cases was also made to get what the shoulder width contributes to the welding temperature field and the super conductor and an appropriate width was obtained.

**Key words:** VEBW, SYSWELD, numerical simulation, superconductor, temperature field

**Quality control based on composite visual and morphology fuzzy detection in GMAW process***ZHANG Li-ling*

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, Jiangxi pro., China) P34-37

**Abstract:** Image detection was the important step of welding quality control. In view of the welding image feature of strong noise and poor stability, a fuzzy detection algorithm of welding image based on composite visual and morphology was presented. The fuzzy detection algorithm was used to process welding image and extract molten pool's edge, and then fuzzy PID controlling theory were combined to form a whole GMAW image processing and closed-loop quality controlling system. The MAG experimental results indicated that the controlling system had the good anti-interference ability in welding process and therefore ensured the stabilization of welding quality.

**Key words:** composite visual, morphology, fuzzy detection, quality control, GMAW welding

**Statistic analysis and countermeasures for welding quality of aluminum bus***LONG Hui-guo, LONG Yi and CHEN Hong-dong*

(Hunan Electric Power company Research Institute, Changsha 410007, Hunan pro., China) P56-59

**Abstract:** Aluminium bus is important in substation or converter station, and aluminium bus weld quality affects safe and stable operation of power grid. In this paper, statistic analysis was studied on aluminium bus weld seam quality, which came from 22 new constructing 220 kV or above substation in generation station since 2005. The results showed that rate up to standard of radiographic testing classification of measuring results of aluminium bus weld seam quality was 67.69%. All of welding defects found in aluminium bus welding mainly were pore, slag, lack of fusion and lack of penetration. Welding defects affected the welding unqualified in aluminium bus are mainly pore, lack of fusion and lack of penetration. Tensile strength of aluminium bus welding mainly distributed in 60%~70% of the base metals standard values. According to the results of discussion, suggestions of prevention and weld were presented, which were significance to weld, operation and maintenance of aluminium bus in substation and converter station.

**Key words:** aluminium bus, welding defects, weld, converter station