

文章编号: 0258-0926(2016)05-0071-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0071

堆内构件吊篮筒体加工变形及其控制措施研究

夏 欣, 李 宁, 李 燕, 赵 伟, 陈训刚, 何培峰

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 反应堆压力容器堆内构件吊篮筒体制造过程中频繁出现加工变形超差, 严重影响吊篮筒体的加工质量和核电项目的建造周期。对筒体变形的影响因素和超差原因进行分析, 并提出筒体变形的控制措施, 在后续核电厂项目吊篮筒体的加工过程中取得良好效果。对筒体设计方面的改进和调整提出建议, 部分改进已在国产第三代核电机组—华龙一号吊篮筒体的设计中得到应用。

关键词: 吊篮筒体; 变形超差; 分析; 控制措施; 设计改进

中图分类号: TG404 **文献标志码:** A

Distortion Oversize Analysis and Control Measures for Core Barrel

Xia Xin, Li Ning, Li Yan, Zhao Wei, Chen Xungang, He Peifeng

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Severe oversize distortion frequently occurs in the manufacturing of the core barrel, which affects the processing quality of the core barrel and the construction period of nuclear power plants. This paper analyzes the effecting factors and causes of oversize distortion of the core barrel, and provides the measures to control the distortion, which achieves good results in the following manufacture of the core barrels. Moreover, the improvement and adjustment of the barrel design is provided and applied to the Hualong No.1 project which is the Chinese third generation nuclear power plant.

Key words: Core barrel, Oversize distortion, Analysis, Control measures, Design improvement

1 堆内构件结构简述

反应堆压力容器 (RPV) 堆内构件中的下部堆内构件靠吊篮法兰吊挂在 RPV 的支撑台肩上。吊篮底部有堆芯支撑板和下堆芯板, 中部有堆芯围板; 上部对应 RPV 出口位置, 开有冷却剂出口, 并焊有出口接管。上部堆内构件置于吊篮筒体里面上部。吊篮筒体内表面对应上堆芯板位置堆焊了一周宽 85 mm、厚约 4 mm 的堆焊层。在堆焊层的 45°、135°、225°、315°位置装有上堆芯板定位销; 吊篮筒体外部焊有导向销垫板。吊篮筒体堆芯段外侧还装有 4 块热屏蔽板; 其中 3 块热屏蔽板上装有 3 × 2 辐照样品架, 要求其中心线对准吊篮法兰上的 57.15 mm 吊装孔中心。

堆内构件吊篮筒体内径超过 3 m, 高超过 8 m, 由法兰、上、中、下 3 段筒体和堆芯支承板组焊而成。其中每段筒体由厚约 50.8 mm、宽约 2500 mm 的不锈钢板直接卷制焊接而成, 内外表面不再进行机械加工, 给吊篮组件的后续加工和组装带来了很大的难度。

吊篮筒体的功能是为燃料组件及相关组件提供可靠的支承和约束, 以及精确的定位。其结构尺寸大, 薄壁筒的特点决定了吊篮筒体的制造难度。吊篮筒体的制造质量将直接影响后续上部堆内构件、围板成形板组件、辐照样品塞组件等多个组件的加工和组装。

以往吊篮筒体的制造过程中, 常出现一些超

差变形引起的不符合项，这不但影响产品质量、拖延工程进度、增加生产成本，处理起来也特别棘手。本文针对这些不符合项所带来的影响、产生的原因进行了详尽地分析研究，并从制造工艺和设计方面寻求合理的解决方法。

2 吊篮筒体变形超差带来的影响

吊篮筒体的变形超差将会造成堆内构件结构和力学上的问题，即使后续通过修正措施使其最终满足功能要求，也是一件非常费时费力的工作，加之耽误产品的交货时间，将造成巨大的经济损失。

2.1 结构方面

(1) 对上部堆内构件吊装的影响

为了便于上部堆内构件的顺利吊装，吊篮筒体和上堆芯板之间，设计的可能最小间隙为 2.87 mm。

若筒体局部内半径偏小，导致吊篮筒体和上堆芯板的间隙小于 2.87 mm，将造成上部堆内构件吊入过程中，上堆芯板刮蹭吊篮筒体内壁的情况，进而影响吊装。

(2) 对堆焊层的影响

为了限制上部堆内构件在地震载荷作用下的横向位移，要求上堆芯板和吊篮筒体堆焊层之间的设计间隙在 2.09 ~ 2.335 mm 之间，以保证装配后的间隙不小于 1.5 mm。

若筒体局部内半径偏小，为保证上述间隙，只能通过加工堆焊层，极限情况下，可能出现堆焊层被加工完，还不能满足间隙的情况。

(3) 对下堆芯板组装的影响

下堆芯板虽然可以倾斜进入筒体再往下吊装，单若筒体局部内半径过小，则仍需考虑适量加工下堆芯板外径以使其吊入时避免刮蹭吊篮筒体内壁。

2.2 力学方面

错边量超差可能造成薄膜应力和弯曲应力的增大，从而造成应力超过设计要求。同时，错边还可能引起筒体较大变形。因此，需分析此处的应力和变形是否超过其限值。

3 变形超差原因分析及工艺改进措施

3.1 筒体对接环焊缝错边量超差

福建福清 1 号吊篮筒体据厂方称上、中、下

段筒体下料尺寸基本一致，然而从上、中（含下）部筒体环焊缝接口处半径对比数据中可以明显看出，上部筒体内径大于中（含下）部筒体半径，这也许是在卷板过程中压延造成的^[1]。

秦山二期扩建工程 3 号机组的吊篮筒体整体下料偏小，造成筒体变形后，最小内半径 $R1533.41\text{ mm}$ 小于上堆芯板半径 $R1535\text{ mm}$ 。

引起筒体环焊缝错边量超差和筒体内半径偏小的主要原因有：

(1) 2 段对接筒体的直径不一致。其原因：

筒体卷制前下料的展开长度不同；筒体卷制过程中压延伸长度量不同。

(2) 2 段筒体接口处圆度（或圆柱度）不同，或变形的方位不一致。

(3) 每段筒体纵焊缝焊接时收缩量不同，也会造成筒体接口处直径不一致。

(4) 如果按公差下限尺寸计算展开长度下料，卷制、焊接后筒体直径会偏小。

工艺改进措施：

(1) 严格控制每段筒体的下料长度要一致。

为避免出现筒体内径偏小，下料时应按公差上限尺寸计算下料的筒体展开长度 L ：

$$L = L_0 - \Delta L_1 + \Delta L_2$$

$$L_0 = \pi (D_0 + \text{上偏差})$$

式中， D_0 为吊篮筒体中径； ΔL_1 为吊篮筒体卷制和校圆过程中压延长度； ΔL_2 为吊篮筒体纵焊缝焊接时的收缩量。

(2) 适度控制吊篮筒体卷制时的压力，尽量做到一致。卷制完成后对筒体上、中、下进行周长测量，以掌握卷制过程中 ΔL_1 ；便于校核下料展开长度计算的准确性，必要时做适当修正。

(3) 每段筒体纵焊缝焊接完成后，再度测量筒体上、中、下周长，以便控制 ΔL_2 。若圆柱度不满意，应进行再次校圆。校圆时应控制力度，避免过度压延使筒体直径变大。

(4) 加工环焊缝坡口前应采用支撑环从筒体内部将筒体校圆，然后加工焊接坡口。待对接环焊缝焊接完成后卸下支撑环。

3.2 出口管嘴开孔和焊接导致筒体局部变形

福建福清 1 号机组、浙江秦山二期扩建工程 3 号机组、辽宁红沿河 1 号机组、福建宁德 1 号机组、广东阳江 1 号机组等项目的吊篮筒体在出口管嘴处都出现了较大的局部变形。其中秦山二

期核电扩建 3 号机组上段筒体严重变形,明显变成了椭圆柱,在距管嘴最下端 90 mm 处,长短轴相差达 26.5 mm,严重偏离了设计限值。分析此焊接变形的主要原因是:

(1)吊篮筒体是一个薄壁筒,因此刚性较差。要在筒体上开 3 个大孔,先用等离子切割的方法加工至 1013 mm,然后机械加工至 1073 mm,目的是去掉等离子切割带来的热影响区可能对材料性能造成的不利影响。开孔过程筒体的应力状态遭到破坏,将会引起筒体新的变形,筒体开孔部位半径增大。

(2)焊接时,因为接管嘴刚度比较大,在焊缝收缩时会造成筒体再次变形,接管嘴焊接部位的筒体半径会减小^[2]。

工艺改进措施:

(1)在等离子切割(开孔)前,先沿着切割线钻一排孔,钻去绝大部分的金属(若用数控铣床加工还可以提高效率),以减少等离子切割时的热量带来的热变形。

(2)焊接前应在筒体内侧用支撑将筒体校圆,在出口接管周围也要增加一些辅助支撑,以限制焊接过程中筒体局部产生过度变形。

(3)采取合理的焊接程序,控制焊接层间温度。加强焊接过程中的尺寸监测,合理调节筒体内外焊接顺序,尽量控制焊接变形。

(4)焊接完成后,进行 $420^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 消除应力的热处理,已达到尺寸稳定。

3.3 中部导向销垫块引起的变形

中部导向销垫块尺寸为 $192 \times 203 \times 58.7$ mm 的不锈钢平板,具有很大的刚性,在吊篮筒体外部焊接垫块部位又被铣去了 7.8 mm 使得吊篮筒体局部刚性减弱。在垫块的四周采用的是 14 mm 高的角焊缝,焊缝冷却时产生很大的应力,会导致筒体局部出现较大的向内变形。

工艺改进措施:

(1)安装中部对中销的孔最终被加工到 140.97 mm。因此焊接之前可以在垫板中部开 1 个 120~130 mm 的孔,降低垫板的刚性。

(2)垫块与吊篮筒体的焊接时,控制焊接速率和层间温度,也会使筒体变形得到很大的改善。

上述各项工艺改进措施在后续福清核电厂 3/4 号机组、海南昌江核电厂 1/2 号机组、红沿河

核电厂 3/4 号机组的吊篮筒体的制造过程中得到推广应用,再未出现过类似的吊篮筒体变形超差的情况,取得了良好的效果。

4 设计方面的改进和调整

堆内构件吊篮筒体内径超过 3 m,高超过 8 m,由法兰、上、中、下 3 段筒体和堆芯支承板组焊而成。其中每段筒体由厚约 50.8 mm,宽约 2500 mm 的不锈钢板卷制焊接而成,内外表面不再进行机械加工,给吊篮组件的后续加工和组装带来很大的难度。上面几项工艺改进措施在稳定产品质量、减少不符合项方面收到了良好的效果,但并没有降低吊篮筒体的加工难度。为了降低吊篮筒体的加工难度,考虑在不影响其功能的情况下,对吊篮筒体的设计参数进行适当的调整。

4.1 调整吊篮筒体内径的公差带

上、中、下部筒体内径原设计为 3397.2 ± 3.2 mm,吊篮筒体组件内径原设计为 $3397.2^{+3.2}_{-6.4}$ mm。制造过程中出现吊篮筒体筒体内径偏小时,将影响 RPV 上部堆内构件的吊装。若将吊篮筒体直径公差带向上调整 3.2 mm,即将上、中、下各段筒体内径调整为 $3397.2^{+6.4}_0$ mm、吊篮筒体组件内径调整为 $3397.2^{+6.4}_{-3.2}$ mm^[3],便可适度增加吊篮筒体的内径,避免出现吊篮筒体内径偏小的情况。上述调整并不影响吊篮筒体的力学性能和热工水力功能。

目前,我国拥有自主知识产权的第三代核电机组“华龙一号”的反应堆吊篮筒体组件公差范围 $-3.3 \sim +6.4$ mm。

4.2 适当减小上堆芯板外径

上堆芯板与吊篮筒体理论上二者半径方向有 6.07 mm 的间隙,如果考虑公差的影响,最小间隙是 2.87 mm。在吊篮筒体变形的情况下,容易出现局部间隙偏小的情况,因此,可考虑通过减小上堆芯板外径以增大吊装间隙,同时,上堆芯板外径减小,但保持上堆芯板与筒体堆焊层的间隙不变,还可以增大堆焊层厚度,有利于堆焊层的加工。

上堆芯板外径减小 2 mm,不影响上堆芯板的强度及其与导向销的配合。

目前,华龙一号堆型已将上堆芯板外径减小,堆焊层的厚度增加,增大了其与筒体的吊装间隙。

表 1 吊篮筒体设计参数修改对比
Table 1 Comparison of Design Parameters

项目	修改前要求/mm	修改后要求/mm
上部筒体内径	$\Phi 3397.2 \pm 3.2$	$\Phi 3397.2^{+6.4}_0$
中部筒体内径	$\Phi 3397.2 \pm 3.2$	$\Phi 3397.2^{+6.4}_0$
下部筒体内径	$\Phi 3397.2 \pm 3.2$	$\Phi 3397.2^{+6.4}_0$
吊篮筒体内径	$\Phi 3397.2^{+3.2}_{-6.4}$	$\Phi 3397.2^{+6.4}_{-3.2}$
上堆芯板外径	$\Phi 3385.06^{0}_{-0.25}$	$\Phi 3383.06^{0}_{-0.25}$
错边量	3	3.5

4.3 放宽错边量要求

上、中（含下）部筒体的错边量设计要求为 3 mm，由于筒体出口管嘴的焊接和导向销垫的焊接变形不易控制，极易出现错边超出设计值的情况，因此，可考虑从设计上放宽错边量要求。

根据法国《压水堆 核岛机械设备设计和建造规则》（RCC-M）G4340 的要求，堆内构件的成形与加工应符合 F4300（对于 1 级设备）的最低要求。而根据 RCC-M F4320 的要求，吊篮筒体最大允许错边量为 7.08 mm。

秦山核电二期和岭澳核电项目中，法国人对 RPV 吊篮筒体错边量的要求为 3.5 mm。

华龙一号核电机组基于对吊篮筒体加工过程的严格控制考虑，并未将错边量放宽，仍然按 3 mm 进行规定，但上述数据可作为处理不符合项的依据。

上述涉及吊篮筒体设计参数的修改和调整详见表 1。

5 总 结

本文主要总结分析了堆内构件吊篮筒体制造

过程中常常出现的变形超差的主要原因，制定了工艺改进措施。并将这些工艺改进措施推广到后续核电机组的吊篮筒体的加工中，获得了满意的效果。

另外适度的调整了吊篮筒体直径公差带，调小了上堆芯板的外径和堆焊层处的内径。同时，将上部筒体与中（含下）部筒体焊接错边量适当放宽。经上述设计调整不但可以方便吊篮筒体的制造，还可以提高生产效率，降低生产成本。

本文的吊篮筒体制造工艺改进措施和设计改进及调整对于我国今后核电厂反应堆机组吊篮筒体设计和制造具有重要指导意义。

参考文献：

- [1] 郭红芳,姜志远. 吊篮筒体制造的监督与实践[J]. 一重技术, 2008, 5: 2-3.
- [2] 王天雄,江才林,臧友鹏. AP1000 三代核电吊篮上筒体组件制造矫形工艺[J]. 上海电气技术, 2013, 2: 2-3.
- [3] 武一民,周志革,杨津,等. 公差分析与综合的进展[J]. 机械设计, 2001, 2: 4-5.

（责任编辑：刘 君）