

本文参考文献引用格式:张丽英,秦国鹏.双金属格架电子束焊接的质量控制[J].电焊机,2019,49(04):295-299.

# 双金属格架电子束焊接的质量控制

张丽英,秦国鹏

(中核建中核燃料元件有限公司,四川 宜宾 644000)

**摘要:**双金属格架是压水堆核燃料的重要组成零件,属于核反应堆芯产品,其产品质量对核电安全具有重要的意义。电子束焊接是双金属格架制造的关键工艺,多年来通过生产摸索出很多的质量保证措施,但一直未形成系统化。根据国家标准《焊接质量保证 一般原则(GB/T 12467-90)》及行业标准《压水堆核电站燃料组件设计和建造规则(RCC-C 2015)》中对焊接质量控制要素的规定,从原材料管理、技术管理、生产现场、焊接缺陷、产品检查与文件控制等方面对此进行探讨,形成标准化、系统化的焊接质量控制方法。以实现提高最终产品质量,提升用户满意度的目的。

**关键词:**双金属格架;核燃料;电子束焊接;质量控制

**中图分类号:**TG456.3

**文献标志码:**B

**文章编号:**1001-2303(2019)04-0295-05

**DOI:**10.7512/j.issn.1001-2303.2019.04.55

## Quality control of electron beam welding of bimetal frame

ZHANG Liying, QIN Guopeng

(CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co.,Ltd., Yibin 644000, China)

**Abstract:**The bimetal grid is a major component of nuclear fuel assembly, which belongs to nuclear reactor core product. So the welding quality of Bimetal Grid is of great significance for the nuclear power safety. The electron beam welding process of the bimetal grid is gradually applied to parts manufacturing of PWR nuclear fuel. Because there are many factors affecting the process, so there are many quality assurance measures. Over the years, these scattered quality control methods have not been systematized. According to the stipulation of quality control elements in GB/T 12467-90 and RCC-C 2015, combining with the experience and methods in the supervision of company's production and quality management summarized over the years, discussions are made on material control, technology management, production site management, welding defects control, product inspection, document control, etc. Finally, a standardized and systematic welding quality control method is developed. In this way, the final product quality and the user satisfaction can be improved.

**Key words:** bimetal grid; fuel assembly; EBW; quality control

## 0 前言

双金属定位格架是压水堆核燃料组件的重要组成零部件,它是由锆合金条带和镍基高温合金弹簧组成的复杂焊接结构件。2008年中核建中核燃料元件有限公司在国内首次在双金属定位格架制造中采用电子束焊接工艺。电子束焊接存在焊接参数复杂、工艺影响因素多、设备维护保养较困难等固有特性,会带来一系列的焊接质量控制方面的问题。

为提升核燃料零部件的制造水平,有必要总结归纳现有的电子束焊接质量控制措施,形成标准化、系统化的焊接质量控制方法,达到持续性提高核燃料零部件电子束焊接质量的目的。

## 1 典型双金属定位格架

压水堆核燃料定位格架的主要作用是精确地固定、隔离燃料元件棒的位置。它在组件中的首要功

收稿日期:2019-03-13

作者简介:张丽英(1983—),女,学士,高级工程师,主要从事核燃料组装焊接、质量控制、无损检测等技术工作。E-mail:224144951@qq.com.

能是保持燃料棒的几何排列,搅混冷却剂,保证堆芯的最佳热、核、机械、水力性能,在装堆和卸料时起导向作用,也使燃料组件有一定的刚性。典型双金属定位格架是由 4 片厚度 0.6 mm 的外条带、16 种 32 片厚度 0.4 mm 的内条带、244 个双弹簧和 40 个单弹簧组成的复杂弹性结构件,如图 1 所示。

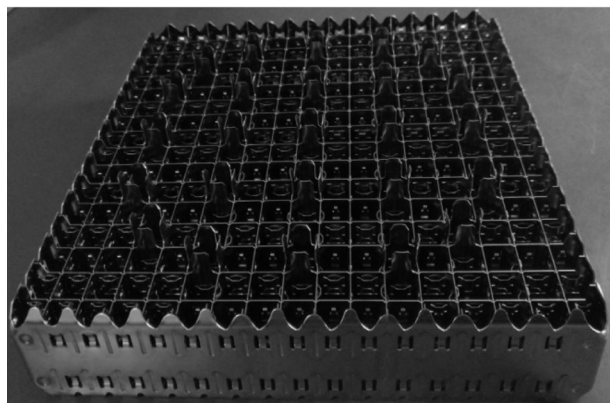


图 1 双金属定位格架焊接结构

Fig.1 Welding structure of bimetal grid

其中单双弹簧零件的材料为镍基高温合金(Inconel 718 或 GH4169),内外条带零件的材质为锆合金。其主要焊接技术要求为:

(1)焊缝外观检验。焊点、焊缝处无漏焊或未熔合;无塌陷、裂纹、烟熏色、飞溅等缺陷;氧化色小于标样;导向管点焊舌排列成直线;无穿孔或无材料型缺陷。

(2)焊后外形检查。检查弹簧刚凸距离、搅混翼弯曲高度、G 因子等项目合格。

(3)焊缝破损检查。焊接试样进行拉伸、腐蚀的破损检查合格。

双金属格架电子束焊接接头示意如图 2 所示。

## 2 电子束焊接质量控制

根据国家标准《焊接质量保证 一般原则(GB/T 12467-90)》<sup>[1]</sup>及中核建中公司《压水堆核电站燃料组件设计和建造规则(RCC-C 2015)》<sup>[2]</sup>中对焊接质量控制要素的规定,从原材料管理、技术管理、生产现场、焊接缺陷、产品检查与文件控制等方面对双金属定位格架的电子束焊接质量控制方法进行研究,以形成标准化、系统化的焊接质量控制方法。

### 2.1 原材料的管理及控制

原材料的质量直接影响到后续过程中产品的加工制造和加工质量。例如:材料混批、外条带变形、尺寸超差、氧化色、压坑、划痕等。如果使用带有

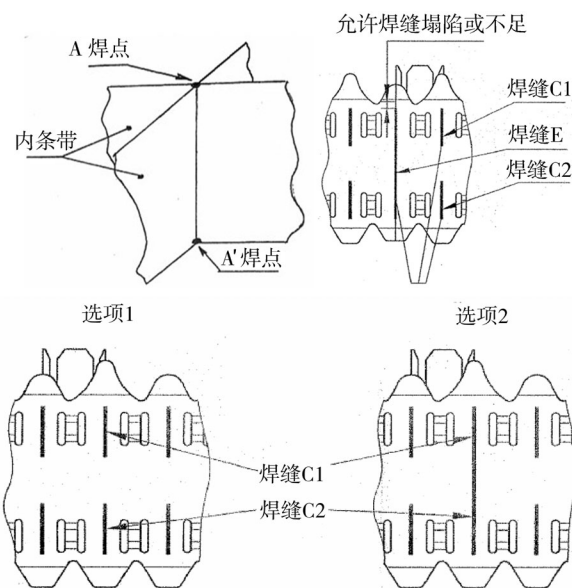


图 2 双金属格架电子束焊接接头示意

Fig.2 Welded joint of bimetal grid

缺陷的原材料(尽管满足技术条件要求)来加工制造产品,从质量控制的角度出发,就是对堆芯产品质量的一种放松。原材料焊接接头间隙超差造成的焊接缺陷示意如图 3 所示,其中左图为焊接前原材料异常导致的焊接接头缝隙过大,右图为焊接后焊缝烧穿缺陷示意。因此有必要加强原材料、外协件等物项的采购控制,并通过实施供应商供方能力评价、质量审核、现场监造、源地验收和入场复验等方式,保证原材料质量,防止或尽量减少不合格物项投产,为生产打好基础。

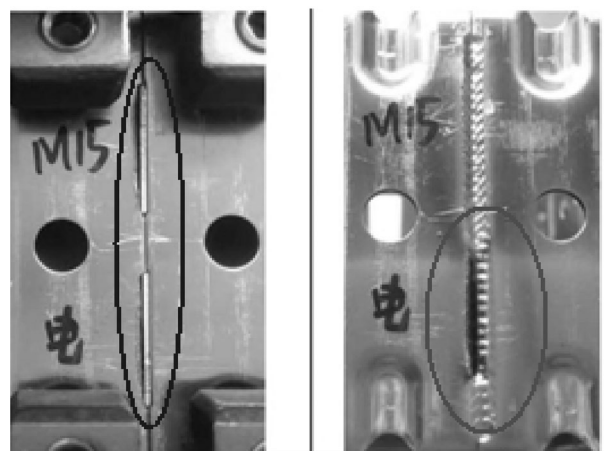


图 3 典型原材料尺寸问题造成的缺陷

Fig.3 Defects caused by raw material problems

原材料的质量控制要素有:

(1)焊接材料的输入控制。包括:原材料化学成

分、热处理状态、焊接性能、微观组织成分(如铁素体等偏析成分)<sup>[9]</sup>、材料硬度、抗拉强度、冲击韧性、抗腐蚀性能,组织晶粒度,材料外观形状缺陷、内部形状缺陷等。

(2)成品零件的输入控制(如格架弹簧、内外条带),如材质证明、外形尺寸、外观缺陷、清洁度、材料标识等。

## 2.2 技术管理及控制

对关键过程、工艺及重要产品,严格执行工艺合格性鉴定和产品合格性鉴定相结合制度。生产单位负责制定鉴定大纲,经技术和质量部门审核和总工程师批准后,由技术部门组织实施合格性鉴定,质量部门对鉴定过程进行监督,最后形成的鉴定报告需要审批,后续生产才能正式实施。鉴定质量的好坏对后续生产的稳定性至关重要。为确保鉴定一次性通过,生产单位在正式鉴定前需要做大量的工艺试验,这个过程中生产人员也得到了熟悉工艺的练习机会,对鉴定及正式生产都很有利。

典型合格性鉴定的质量控制要素:

(1)合格性鉴定前文件检查。应具有批准生效的鉴定大纲、工艺参数卡、制造检验流通卡、试样图纸、鉴定试样编号规则,对应鉴定产品的工艺操作卡、检验规程。

(2)合格性鉴定前实物检查。鉴定试样尺寸的符合性、试样材料的放行单、工装夹具的符合性、设备及计量仪表的有效性,操作人员的从业资质。

(3)合格性鉴定的现场见证。鉴定要在工艺负责人、公司技术部代表、质量管理部代表、核电用户代表、设计方代表的共同见证下实施。检查焊接实际操作人员、使用设备、焊接参数、试样刻号、破损检查取样位置等是否符合鉴定大纲规定。

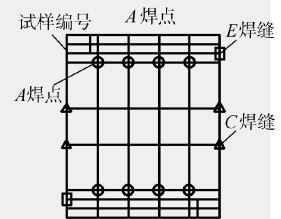
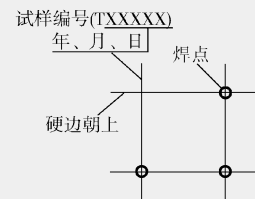
(4)合格性鉴定检测结果。按表1所列的项目检查鉴定结果是否符合技术条件规定。

(5)合格性鉴定证书。检查鉴定证书是否对焊接工艺参数、焊接设备、焊工、焊接材料、证书失效日期、证书失效条件作出规定。

表1 工艺过程质量控制试样统计

Table 1 Statistical table of technology process control samples

试样种类	制作方法
日常拉伸试样	<p>(1)在焊好的试样上截取 AA' 焊点接头试样 3 个,取 1 个做拉伸试验。</p> <p>(2)若结果不能满足适用图纸上的要求,就测试同一次制备的其他两个试样,如果这两个试样测试结果合格则复验通过,说明产品是合格的;若相反,应停止生产寻找原因。</p>
腐蚀试样	<p>(1)每只格架焊接前均需焊接腐蚀试样,每个腐蚀试样上焊 3 条焊缝;(2)不分 CT 或 CP 格架,在每个焊室当天格架焊接的第一片和最后一片腐蚀试样上各取一条焊缝进行腐蚀水试验,按 ASTM G2 标准进行;(3)每周每台设备第一只格架第一片腐蚀试样上,除一条焊缝进行腐蚀试验外,另两条焊缝存档。</p>
格架试样	<p>在下列情况下,需焊格架试样并进行拉伸试验,包括 AA' 焊点、C、E 焊缝各一个:</p> <p>(1)当日常拉伸结果出现异常或其他特殊情况下;(2)设备大修后;(3)对夹具作了重大改变后。</p>



## 2.3 生产现场质量控制

在生产过程中,各工序产品的质量实行层层把关,防止不合格品流到下一环节。特别强调严肃工艺纪律,执行焊接工艺过程控制取样计划。以格架电子束焊接为例,统计其焊接工艺过程质量控制试样的制作(见表1)。

其余生产现场质量控制要素有:(1)开展生产前培训管理;(2)人机结合的半自动焊接程序,避免因程序相对零点的漂移而导致焊缝偏离现象;(3)长期开展现场“6S”管理,整理现场环境;(4)严格执行限用元素控制,保证焊缝质量;(5)执行焊前清洁度复查,保证产品清洁度。

## 2.4 焊接缺陷的控制

常见电子束焊缝缺陷有气孔、飞溅、氧化色及金属沉淀色、偏移等。

### 2.4.1 气孔

气孔成因主要与焊缝清洁度以及接头中的杂质有关。因为电子束焊接速度快,又在真空气氛下进行,气体往来不及逸出熔池就已冷却,滞留在熔池中的气体就形成气孔缺陷。

控制方法为:选择合适的焊接参数增加气体逸出时间,提高焊缝清洁度,减少母材杂质。

### 2.4.2 飞溅

飞溅是熔池搅拌离心力过大导致金属液体被甩出等综合因素造成的。控制方法为:

(1)调整焊接参数,减小熔池离心流动的速度从而降低金属被甩出几率。

(2)减小束流脉冲或扫描振幅频率,降低熔池金属的振荡幅度,改善焊缝成形质量。

### 2.4.3 氧化色及金属沉淀色

双金属格架电子束焊接氧化色及金属沉淀色的产生一方面是由于焊接线能量突然变化导致的焊接热影响区温度急剧变化,另一方面是焊室清洁度不够,焊室内真空环境变化导致碳化物和金属蒸镀层附着或沉积在格架上。控制方法为:

(1)定期清洁电子束阴极、阳极、磁偏转线圈,保证电子束形成通道畅通,避免电子束束流焊接过程中突然中断。

(2)定期清洁焊室,避免因杂质附着产生的短路放电,避免焊室内的碳化物层和金属蒸镀层因真空环境变化附着或沉积在格架上。

### 2.4.4 焊缝偏移的控制

焊缝偏移是由于程序相对零点漂移而导致焊缝偏离预期焊接位置的现象。控制方法为:

(1)焊接过程中增加“人工焊缝对中确认步骤”来加以控制。即在焊接前先手工调整系统焊接追踪叉线位置,使其与每个焊接面起始点对齐,然后确认焊室及枪室真空度、焊枪高压准备好后,才可以执行电子束焊接程序。

(2)制定焊缝偏移后的补焊程序和参数,通过局部覆盖补焊消除焊接缺陷。

## 2.5 产品检查与文件的控制

对于每一件产品,操作人员都要进行自检并做好岗位生产记录、现场检测记录填写流通卡;流通过到专检环节后,检验人员严格执行相关检验规程,对

于不合格品要根据相应的质保审批程序处理之后填写检验报告单;放行人员要审核报告单、跟踪文件、工艺过程控制试样的理化检测报告等,待所有文件都齐全且合格后才能放行。层层把关的同时还要保证质量的可追溯性。

## 3 结果与讨论

### 3.1 结果

焊接质量控制方法的好坏,需要通过对产品长期生产的数据统计结果来评判。以某年度两种不同材质的双金属格架电子束工艺为例,采用统计表、折线图、平均值、标准偏差等数据分析法,进行生产数据的统计验证。

(1)焊接成品率满足控制要求。某年度双金属格架电子束焊成品率统计如表 2 所示。

表 2 电子束焊格架成品率统计

Table 2 Statistical rate of final products of EBW Grid

分类	投入数	报废数	合格数	成品率
锆合金 1	980	3	977	99.7%
锆合金 2	1 135	3	1 132	99.7%

(2)焊缝质量全部合格。某年度双金属格架电子束焊点破断力折线如图 4 所示。

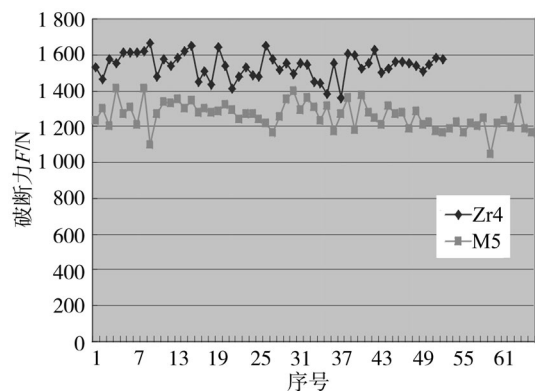


图 4 格架电子束焊焊点破断力折线

Fig.4 Breaking force breaking line diagram of EBW joints of Bimetal Grid

(3)生产过程准确性和稳定性统计分析。

综合考虑焊接过程的“质量能力”和“管理能力”<sup>[4]</sup>,采用修正后的过程能力指数  $C_{pk}$  进行分析。计算公式(给定尺寸下限的单侧计算公式<sup>[5]</sup>)为:

$$C_{pk} = \frac{\mu - T_L}{3\sigma}$$

式中  $\mu$  为总体样本算数平均值;  $T_L$  为给定尺寸下限;  $\sigma$  为样本标准偏差。

计算得出的统计结果如表3所示。

表3 电子束焊格架焊点破断力的95%置信度水平和工序能力指数计算

Table 3 Computation of 95% confidence level and process capability index of breaking force breaking of EBW grid

参数	锆合金 1	锆合金 2
平均值 $F/N$	1 540	1 259
标准偏差 $\sigma/N$	69	72
$n$	52	65
最大值/ $N$	1 665	1 410
最小值/ $N$	1 359	1 045
$K$ (查 NFX06-032)	2.07	1.99
$F-K\sigma/N$	1 397 $\geq$ 600	1 115 $\geq$ 600
工序能力指数	4.5	3.0
工序能力评价	高	高

经分析,电子束焊点破断力结果全部合格,电子束焊格架产品的成品率满足控制要求,工序能力指数高,数据离散度较小,电子束焊接工艺及焊接质量均处于可控范围内。该焊接质量控制方法经生产验证是可行的。

### 3.2 讨论

通过对主要工艺技术指标的统计分析,在获得焊接质量稳定性评价结果的同时,还能获得一些其他帮助提升质量的信息。比如,不合格产品的数量、不合格的原因,如何改进以控制不合格产品的出现

等。如此这般,产品质量才会进入一个上升的质量螺旋通道<sup>[5]</sup>。

## 4 结论

从多年来的生产、质量管理监督工作经验,以及现有的零散电子束焊接质量控制措施中,总结出一套系统化、标准化的核燃料零部件电子束焊接质量控制方法。该方法通过多年的生产应用验证,统计结果证明方法有效可行,达到了持续性提高核燃料零部件电子束焊接质量的预期研究目的。

质量保证的关键在于生产全过程的控制<sup>[6]</sup>。核燃料零部件的电子束焊接作为一种新工艺,要从材料、人员、设备、生产现场管理等方面加强产品质量的控制,达到持续改进产品质量的目的。

### 参考文献:

- [1] GB/T 12467-90,焊接质量保证一般原则[S].北京:中华人民共和国机械电子工业部,1990.
- [2] 杨轩. RCC-C 2015,压水堆核电站燃料组件设计和建造规则[S].AFCEN:核工业标准化所:2015.
- [3] 武江,周国萍. 焊接手册第一卷[M].北京:机械工业出版社,1992:66
- [4] 汤淑明,王飞跃. 过程能力指数综述[J].应用概率统计,2004,20(2):207-216.
- [5] 魏世振,韩玉启. 过程能力指数在质量损失研究中的应用[J].管理工程学报,2002,16(4):64-66.
- [6] 管云龙. 质量管理[M].北京:原子能出版社,2002:55.