

## 核电站压力容器的焊接工艺

中国核电发展 20 年来，尽管取得了很大的成绩，但在总体发展规划以及技术路线的确立方面走了一条曲折的道路，以至于在设计自主化和设备制造国产化方面均未取得突破性的进展，这对于拥有较雄厚的核工业、电力工业和制造工业基础，拥有较强的核工程研发力量的中国来说，这种发展现状应该说是理想的。

根据我国核电发展的最新动态，到 2020 年我国核电比重预计将上升到全国电力装机总量的 4% 左右，达到 3200 万 kw 左右。国家有关部门在总结以往经验教训的基础上，对下一阶段核电发展的技术路线和规划进行积极的统一部署，可以预见我国的核电将迎来最为重要的高速发展时期，发展核电也将成为我国未来解决大量能源缺口的一个重要途径。

核电站压力容器中壳体用钢要求较高的是核反应堆。核反应堆压力容器一般由钢锻件焊接而成，锻件厚度通常在 200mm 以上，由于长期在高温高压下工作，并承受中子和 $\gamma$ 射线辐照，因此对核反应堆容器材料提出了很高的要求：应具有良好的室温综合性能，即有较高的强度、韧性和防脆断能力；沿截面应有良好的性能均一性，特别对尺寸较大、较厚截面的锻件更要求如此；具有良好的焊接性，再热裂纹敏感性低；对中子辐照应有较高的稳定性。



图 1：核电站压力容器焊接

### 一、核电站压力容器焊接的基本要求

#### 1、焊接材料一般要求

- (1) 原则上只允许经鉴定合格的焊接材料用于核容器生产；
- (2) 部件焊接中预定使用的焊接材料的每个生产批量，在投产前均需经焊接材料试验评定合格；
- (3) 埋弧焊的焊接材料应以焊剂—焊丝或焊剂—焊带的组合方式进行试验评定；
- (4) 经有关方面同意，焊接材料试验可以与焊接工艺试验一起进行，但在这种情况下，供货单位和使用单位应密切配合，严格遵守焊接工艺试验所规定的要求。

## 2、焊接生产的一般要求

在反应堆压力容器焊接生产前，必须进行焊接工艺评定和焊工操作技能考核，统称为焊接评定。焊接工艺评定是通过试件的焊接和试样的检验，对提出的焊接工艺规程正确性进行的一种评定。合格的焊接工艺评定结果，是制订供生产用的焊接工艺规程的依据。焊工技能评定是按照评定合格的焊接工艺规程评定焊工获得合格焊接接头的的能力。未经评定合格的焊工不得参与焊接操作。

## 二、核反应堆压力容器焊接

### 1、压力容器焊接工艺流程

压力容器内表面均堆焊超低碳不锈钢。顶盖组合件由上封头与顶盖法兰焊接而成。在上封头内壁驱动管座开孔的周围局部堆焊镍基合金，上封头上装有驱动管座、支承构件及吊耳。筒体组合件由容器法兰、接管段筒体、堆芯筒体、过渡段壳体和下封头焊接而成。在接管段筒体开孔部位焊接进出水管，接管段与安全端连接。在下封头内壁径向支承块焊接区域和中子通量孔周围局部堆焊镍基合金，随后焊妥径向支承块和中子通量孔管座。在顶盖组合件的顶盖法兰和筒体组合件的容器法兰上堆焊不锈钢或硬化镍基合金密封面。

压力壳顶盖组合件和筒体组合件的环缝、进出水管与接管段筒体的焊接，均采用自动埋弧焊。容器内壁和法兰平面采用带极堆焊。进出水管端手工堆焊不锈钢或镍基合金，然后用手工焊或氩弧焊与不锈钢安全段对接。

### 2、主焊缝焊接

由于反应堆压力壳长期在高温、高压下工作，并承受强烈的中子辐照，所以焊缝金属有严重的脆化倾向。通常表现为冲击韧性的显著降低和脆性转变温度的明显升高。因此，要求焊缝金属的塑、韧性有一定的储备量，以确保核反应堆压力壳能长期安全、可靠地运行。

#### (1) 主焊缝焊接特点

压力壳主焊缝的焊接特点是壳壁较厚，多层焊时由于内应力的积累，焊缝区残余应力较大，需经受多次消除应力热处理。因此，核反应堆压力容器用高强度低合金钢必须具有良好的焊接性，以避免冷裂纹等焊接缺陷产生，并保证焊缝和热影响区有较好的塑性和低温冲击韧性。

#### (2) 焊接材料选择

主焊缝焊材选择通常要求焊缝及热影响区的性能与母材等同。除拉伸性能外，特别要求焊缝及热影响区的冲击韧性有足够的裕度。为了满足这些要求，主焊缝焊接一般采用自动埋弧焊，而根部封底则大多采用手工焊。自动埋弧焊采用 Mn-Mo-Ni 系焊丝，其成分基本上与母材 SA508 C13 钢相近。焊剂一般采用烧结型焊剂。在焊剂-焊丝的适当组合下，熔敷金属的化学成分一般应满足下列要求(%)： $C \leq 0.10$ ， $Si \ 0.15 \sim 0.60$ ， $Mn \ 0.8 \sim 1.8$ ， $P \leq 0.025$ ， $S \leq 0.025$ ， $Ni \leq 1.20$ ， $Cr \leq 0.30$ ， $Mo \ 0.25 \sim 0.65$ ， $Cu \leq 0.25$ ， $V \leq 0.02$ 。

对强辐照区的主焊缝，则要求  $P \leq 0.008\%$ ， $Cu \leq 0.05\%$ ， $Co \leq 0.03\%$ 。

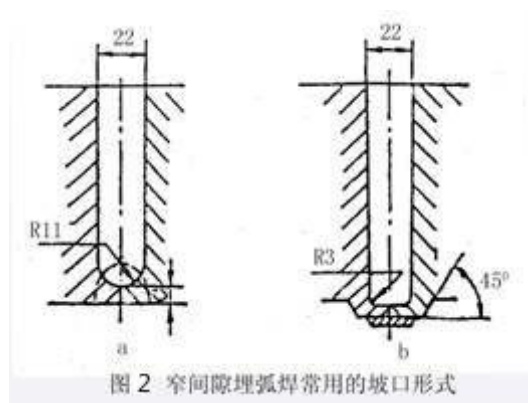
主焊缝经  $610 \pm 10^\circ\text{C}$ 、保温 20h 的模拟焊后热处理,其力学性能应达到与母材相同水平。

为了提高焊缝金属的性能,目前已注意到采用高纯度的焊丝和高碱度的焊剂相匹配。由于焊接坡口较深,要求在较窄坡口内焊接具有良好的工艺性能。当前国际上常用的焊剂-焊丝匹配为瑞士 Oerlikon 的 OP41TT-S3NiMo1,日本神户制钢的 MF27X-US56BX 等。上述匹配能满足 ASME SFA5、23 对核级焊缝金属规定的要求,并且在经过长期的消除应力处理后,仍具有优越的力学性能。如 MF27X-US56BX 的焊缝金属,经  $288^\circ\text{C}$ 、 $1.5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2 (>1\text{MeV})$  的中子辐照试验后,按吸收能量 60J 考核增温仅  $18^\circ\text{C}$ ,按侧向膨胀 1mm 考核增温仅  $28^\circ\text{C}$ 。

### (3) 焊接工艺

主焊缝焊接一般采用埋弧焊,U形坡口角约为  $10 \sim 15^\circ$ ,根部半径通常取  $8 \sim 10\text{mm}$ ,对厚度  $200\text{mm}$  的主焊缝,坡口上端开口大约为  $45 \sim 55\text{mm}$ 。近年来,为了缩短焊接周期和提高接头性能,已愈来愈多地采用窄间隙埋弧焊工艺。决定窄间隙焊接质量的技术关键有三方面:一是导电嘴的结构和焊丝的自动对中;二是引弧技术;三是根部焊接技术。对厚度  $220 \sim 280\text{mm}$  的焊缝,坡口上端开口一般取  $16 \sim 20\text{mm}$ 。这种坡口采用每层焊两道的工艺,在深坡口中脱渣容易,焊缝质量与焊道形状容易控制,特别是焊缝与侧壁的熔合比较好,并使下道晶粒细化。窄间隙埋弧焊要求采用脱渣性良好的焊剂,还要求合理地选择焊接参数。选用的焊接线能量比较低,一般在  $15 \sim 35\text{kJ/cm}$  范围内,如焊接线能量高于此范围,韧性会下降。最好能将焊接过程一次完成,而不要中途停顿,任何中止焊接过程的操作都易造成未熔合等缺陷。

窄间隙焊接的坡口角一般取  $1^\circ$  或更小,目前常用的坡口形式如图 2a 所示,先正面(外侧)焊接,后反面(内侧)挑焊根,用手工焊填满。为了减少内侧焊接的工作量,也有采用全部从外侧焊的坡口形式,如图 2b 所示,坡口填满后,根部用机械加工去除。这种坡口形式虽然对保证焊缝根部质量有好处,但也在一定程度上加大了锻件的重量。



来源: 摘自网络