

④ 14-17

—重技术, 1997. 2(总 72)

接管马鞍形大厚度焊缝焊接技术研究及其实施

# 接管马鞍形大厚度焊缝焊接 技术研究及其实施

刘恩清 宋忠臣 祁恒江 刘振忠 徐英辉 马照东

TL351.6

TG457.5

**[提要]:**本文针对 300 MW 核反应堆压力容器接管和接管段的焊接, 分别从焊接方法的选择、焊接工艺方案的确定和实施、焊接变形的控制等方面进行了论述, 由此而制定出合理可行的焊接施工条件。最后对焊缝质量和结构尺寸进行了全面检测, 完全满足设计要求, 给接管马鞍形大厚度焊缝的焊接奠定了理论和实践基础。

**关键词:** 焊接工艺 接管 核反应堆 压力容器

大厚度

在 300 MW 核反应堆压力容器的焊接生产中, 接管和接管段的焊接是最为困难的。接管和接管段连接部位厚度达 309 mm, 而且接管与接管段采用了插入式全焊透的结构, 形成落差较大的马鞍形环焊缝。这对焊接提出了更高的要求, 同时也必须具有焊接深坡口能力的接管马鞍形焊机。

该焊机不但应当具备焊接深坡口、行走马鞍形功能, 还必须具备仿真能力强、操作简便、焊枪自动摆角、行走马鞍形时自动调节焊接规范和连续自动焊等特殊功能, 才能确保接管的焊接质量。另外, 这种马鞍形环焊缝的特点是大厚度、大刚性、小直径, 具有相当大的结构应力和焊接应力。同时, 接管在接管段圆周上呈羊角形分布, 这又加重了接管段焊接变形的复杂程度。焊接时必须采取有效的工艺措施来防止接管段的变形, 并且所有的工艺措施都是全方位和相互关联的。可以说, 接管和接管段能否焊接成功, 也就决定

了能否生产核反应堆压力容器, 这在国内是史无前例的。

## 1 工艺方案的确定与实施

### 1.1 接管与接管段的焊接结构形式

接管在接管段上的位置及结构形式见图

1。由此图可以看出, 此结构具有如下特点:

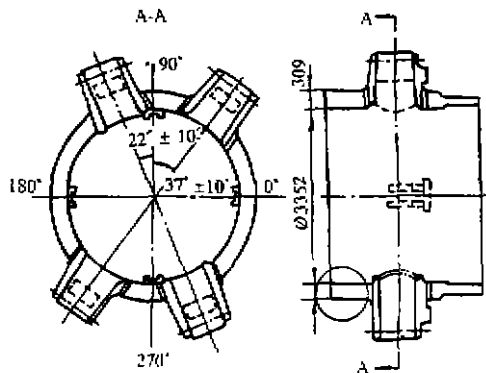


图 1

①、接管和接管段采用了插入式全焊透的坡口形式, 坡口深达 309 mm;

②、4 个接管在接管段上是不对称分布的;

③、在接管上有一个占圆周长达 1/3 的支承台;

④、接管和接管段相交构成的马鞍形落差达 78 mm;

收稿日期: 1996 年 11 月 24 日。

宋忠臣: 一重焊接处副总焊接师、研究员级高级工程师。

刘振忠: 一重集团公司焊接处副总焊接师、高级工程师。

马照东: 一重集团公司金属结构分厂工程师。

其余作者: 一重集团公司焊接处工程师。

⑤、接管上的支承台距接管段仅 150 mm 左右；

⑥、接管段重量达 70 t，而接管只有 3.5 t，接管与接管段外径比为 1:4；

⑦、两个接管中心线的交点必须与接管段的中心线垂直；

⑧、接管与接管段本体材料为 508 - III 钢锻件，内部堆焊不锈钢耐蚀层。

## 1.2 焊接方法和工艺措施

从接管和接管段的结构上我们分析认为，对焊接工艺方案的确定主要要解决两个大问题。一个是焊接方法和工艺措施，另一个是接管段焊接变形的控制。

### (1) 焊接方法的选择

从图 1 中看到接管上有一个较大的支承台，而且距接管段很近，因而在接管段外面焊接接管无论是自动焊还是手工焊都没有工艺性，无法施焊，必须在接管段里面进行焊接。采用手工焊根本是不可能的，因为坡口深度已达到 309 mm，现有的焊条也只有 450 mm 长，底部焊接材料浪费太大，工人劳动强度高，焊接质量和生产效率根本无法保证。采用普通的接管焊机也不行，因为普通的接管焊机的焊嘴不能自动摆角，完全靠工人的经验很容易造成坡口两边熔合不好，焊接质量也不好保证。此外，最重要的是普通的接管焊机不能走马鞍形轨迹，只能手动先将马鞍形坡口底部焊平后再自动焊接，从结构上看造成的焊接应力很大，很容易造成焊缝或热影响区开裂，同时操作难度太大。所以，必须有一台适应大厚度接管马鞍形的焊机。它不但具有焊接深坡口、自动走马鞍形轨迹的能力，而且焊嘴必须能够自动摆角，实现窄间隙丝极自动埋弧焊。由于焊接接管时要在接管段里边施焊，所以还必须要求焊机的电器元件具有抗高温、抗干扰的能力。在焊接接管一周的过程中高度是变化的，存在着上坡和下坡焊，从而焊道的成型也必将有所变化。

所以此焊机不但要走马鞍形，还必须在不同部位的焊接过程中（在不同的马鞍高度上）焊接规范要有所变化，以控制焊道成型。

我公司根据接管和接管段焊接要求自行设计和研制了一台接管马鞍形焊机，使其具备了上述功能，为焊接接管奠定了坚实的基础。

### (2) 工艺措施

①、坡口设计 接管和接管段焊接坡口深达 309 mm，为了便于观察和操作，确保焊接质量，最好采用 V 型坡口，但这势必造成焊接量大从而引起接管段变形。另外，V 型坡口使接管段上的坡口面也构成了马鞍形轨迹，就会造成焊丝在一周的焊接中距接管段坡口面的距离发生较大变化，从而使焊接熔合不上或坡口面严重咬边，焊接质量无法保证。根据上述情况和我公司研制的接管马鞍形焊机的特点，采用 I 型坡口较为合理，在接管段外面加垫板，在里边施焊，既方便和简化了坡口的加工，又有利于焊机定位。I 型坡口的宽度要根据结构型式和焊机功能来确定。坡口宽易于观察和施焊，但焊接量大，接管段变形倾向大。坡口太窄不易于观察和施焊，药皮也不好清除，上下坡焊接时成型不好控制，但焊接量小，接管段变形倾向小。日本在给秦山一期工程生产的 300 MW 反应堆压力容器时，接管和接管段的坡口宽为 38 mm，但所用的焊机没有摆角功能。我们综合上述因素，经工艺试验后将 I 型坡口宽度定为 32 mm。实践证明，此坡口宽度具有以下优点：

- 节省焊材，和日本相比可节省焊材 20% 多；
- 焊接量小，接管段的变形小；
- 焊机具有摆角功能后使焊丝距坡口两边能保持一致，确保了熔合良好；
- 每层排 3 道焊肉，使坡口上下成型基本一致；
- 每层焊肉厚度、每道焊肉搭接量在坡

口中排列合理,提高了焊缝的综合机械性能。

②、装配 接管和接管段的装配精度要求高,不但要求焊接后的接管中心线通过接管段的中心线,而且坡口宽度在整个圆周上的误差要小。也就是说整个 309 mm 厚度方向上坡口宽度都要保证偏差相同,因此装配十分困难和复杂。

首先使接管段上接管孔的坡口面(柱面)垂直于水平面,再使接管的坡口面(柱面)垂直于水平面,用测量接管上端面是否水平来校准。然后开始装配,用接管上的支承台来确定其在接管段上的方位,用接管的上端面来确定其在接管段上的高度尺寸。最后在坡口的 4 个对称方向上对接管定位,定位长度要贯穿整个 309 mm 厚,并且偏差要小。这样既保证了坡口宽度偏差,又保证了接管中心线垂直接管段中心线。

其次是接管和接管段的固定。两者的固定必须焊接工艺支承板,而且必须对接管和接管段进行加热。这样会给装配带来十分差的操作环境,装配精度也会受到影响。我们在装配前在接管和接管段焊接支承板处先堆焊了过渡层,使焊接工艺支承板变成了冷焊。工艺支承板在接管上对称分布,焊接时也必须对称焊,使接管所受到的焊接应力也是对称的。这样在加热时才不会造成坡口间隙发生变化而影响装配接管后的精度。

③、焊接材料和焊接规范 由于坡口深 309 mm,坡口底部的焊接十分重要,不能出现焊接缺陷,否则返修十分困难。所以选用了同一种类不同厂家制造的两种焊丝。一种是日本焊丝 US56 - BX,  $\Phi 4$ , 刚性小柔性好,易于校直,送丝通畅,在深坡口焊接时容易使焊嘴到位。另一种是国产焊丝 H10Mn2NiMoA,  $\Phi 4$ , 刚性大很硬,不易校直,在深坡口焊接时焊嘴易偏离。我们在焊接 4 个接管时为了确保质量,在深坡口处焊接采用了 US56 - BX 焊丝,在坡口上部采用了

H10Mn2NiMoA 焊丝,焊剂全部采用了 603HR。

焊接接管时刚性很大,应力大,因此我们采用了比正常 508 - III 钢高的预热温度,预热面积也适当加大以防止产生裂纹。

焊接坡口深处时为了易于清渣,我们采用了小规范施焊。上坡焊时为了防止焊道太厚,我们采用了较小的线能量。下坡焊时为了防止夹渣,我们采用了较大的线能量。这样在接管一周的焊接中每一焊道成型基本一致,确保了焊接质量和均匀性。

④、焊接顺序 在安排焊接顺序时要同时考虑两个问题:一个是接管和接管段焊后防止产生裂纹,另一个是防止接管段变形。这是两个始终困扰人们的问题。经过全面应力分析后认为,在通常情况下当一个接管和接管段焊接后为了消除结构应力和焊接应力以防止产生裂纹,应当马上入炉进行消除应力热处理。但此时接管段上的其它 3 个接管孔已全部加工出来,造成接管段自身母材的不连续性,使其结构刚性减弱。因此有可能在较大的焊接应力作用下,在热处理过程中接管段会产生较大的焊接变形甚至开裂,势必影响其余 3 个接管的装配精度。

为了防止接管段变形,我们采取了对称焊的方法。也就是说,焊接一个接管进行保温后再焊接与之对称的另一个接管。这样保证了产生的焊接应力也是对称的,补强了接管段,使热处理不会造成大的接管段变形。由于焊接一个接管的时间较长,所以焊后的接管保温措施十分重要而困难。我们采用接管内外不同的加热方法,使焊缝区域始终保持在同样的预热温度,达到了两个接管对称焊接同时入炉的目的,从而避免了由焊接应力过大和不对称而引起的焊接变形。

### 1.3 接管焊接变形的控制

4 个接管在接管段四周呈羊角形分布,相邻两个接管间夹角为  $60^\circ$ 。正因为这样分

布和这样的大厚度, 我们对接管段的焊接变形十分重视。除采取上述措施外, 我们对接管段自身也进行了防变形控制。首先我们对接管段进行了刚性支承, 在接管段的两端分别支承十字型支承板。考虑到装配和两种材料在加热时线膨胀系数不同, 支承板和接管段之间预留了间隙。同时也考虑了支承板的固定方式。若采用焊接方法将支承板和接管段连接起来会带来一系列问题, 两者焊在一起形成一个刚体, 构成了新的应力场, 在热处理时将使接管段变形复杂化。若将支承板焊在接管段内部的不锈钢堆焊层上, 当接管段热处理变形较大时势必会造成连带堆焊层而开裂, 直接影响堆焊层的质量。同时焊接的支承板不好拆除, 焊接 4 个接管时反复装焊工作量大, 接管保温困难。所以我们根据接管段的内腔结构, 对支承板的形状和固定方法采取了特殊的设计, 使支承板和接管段易装易拆, 又不焊接。支承板呈自由状态, 它仅起一个限位作用, 使接管段焊接和热处理达到了预期效果。

## 2 无损检测和尺寸检查

### 2.1 无损检测

4 个接管焊接后经 PT、MT、UT、RT 探伤全部满足技术条件的要求, 而且 UT 探伤采用了直探头、45°探头、60°探头在接管段内外全部进行 UT 探伤的方法, 焊缝内部质量十分理想。

### 2.2 尺寸检查

测量位置见图 2, 测量结果见表 1。可见接管段变形仅在 1.5 mm 以下, 完全满足了设计要求 ( $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  是测量未加工的不锈钢堆焊层, 应减去不锈钢堆焊层的厚度偏差)。

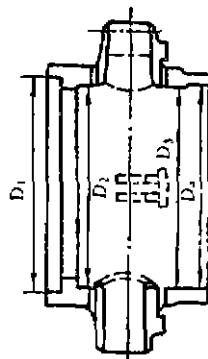


图 2

表 1

设 计	0° ~180° (直径)	45° ~225° (直径)	90° ~270° (直径)	135° ~315° (直径)	最大差
$D_1$ $\varnothing 260^{+0.4}_{-0.4}$	3 260.2		3 261.6		1.4
$D_2$ $\varnothing 344^{+0.10}_{-0.10}$	3 349.38	3 350.21	3 347.53	3 347.60	2.68
$D_3$ $\varnothing 344^{+0.10}_{-0.10}$	3 348.52	3 347.35	3 349.20	3 346.75	2.45
$D_4$ $\varnothing 374^{+0.1}_{-0.1}$	3 367.27	3 367.36	3 369.35	3 369.10	2.08

## 3 焊接鉴证件

为了考证接管和接管段的力学性能, 我们采用了由分别与接管和接管段同炉号的 508-Ⅲ钢且厚度也是 309 mm 的两块试板进行了焊接, 所用的焊接方法和热处理参数完全和产品相同, 其性能值见表 2。从此表可以看出, 所有的性能指标全部满足技术条件的要求。另从低倍照片(略)可以看出, 焊缝的熔合状态十分理想。

## 4 结 语

300 MW 核反应堆压力容器 4 个接管和接管段的焊接成功, 是我国焊接史上的一个创举和里程碑。它标志着我国完全有能力自行制造核反应堆压力容器, 同时也说明了我公司完全具备生产更大型核压力容器的能力。

(1) 接管和接管段所采用的焊接方法是完全正确的, 自行设计制造的马鞍形焊机具有焊接大厚度接管的功能, 处于国内领先地位, 达到了国际先进水平。

(2) 接管和接管段所采用的工艺措施是十分得当的, 它完全满足了大厚度马鞍形接管焊接的要求, 填补了国内空白。

(3) 接管段焊接变形的控制是十分有效的, 为大厚度接管变形的预防积累了经验。

(4) 接管和接管段鉴证件表明, 焊缝的质量是优良的, 完全满足并好于设计要求。

(5) 300 MW 核反应堆压力容器接管和接管段焊接的成功经验完全可以推广到更大类型同类产品的焊接上。 (下转 49 页)