

# 主蒸汽 Y 型三通焊口缺陷处理工艺探讨

史海涛

(神华国能哈密电厂, 新疆 哈密 839000)

**摘要** 随着大容量、高参数火电机组的不断涌现, 对承压钢管材料的高温蠕变性能、高温持久强度和抗应力腐蚀等性能提出更高要求。SA335P91 钢因其机械性能、高温性能、加工性能良好, 更多地应用于高参数机组高温集箱、连接管道、主蒸汽管道、高温再热蒸汽管道中, 减少了钢材用量, 节省了工程投资。在检修过程中, 大径厚壁 P91 三通预留接口短小, 传统焊前预热、焊后热处理工艺容易造成应力集中, 且热处理质量不佳。本文通过对某厂主蒸汽管道 Y 型三通现场焊接及热处理施工实践, 总结出一套适用于现场大径厚壁 P91 三通管的预热、焊接及热处理工艺, 解决了焊接缺陷返修难题, 为以后的设备缺陷处理提供指导作用。

**关键词** SA335P91 钢 Y 型三通 焊接 热处理

中图分类号: TG44

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)08-0155-03

## 1 项目概况

某电厂机组超临界燃煤机组锅炉采用上海锅炉厂股份有限公司产品, 主蒸汽管路中有一锻造斜 Y 型三通, 三通材质为 SA335-P91, 规格为 ID432\*72/ID305\*53/ID305\*53。Y 型三通为不规则六方体, 管道焊缝与六方体端面距离 40mm。焊接前需预热, 焊接过程中需要严格控制焊缝层间温度, 焊后需进行高温回火热处理。

## 2 材料分析

SA335-P91 钢属于马氏体耐热钢, 具有较高的抗氧化性能和抗高温蒸汽腐蚀性能, 而且具有良好的冲击韧性和高而稳定的持久塑性及热强性能。在使用温度低于 620℃ 时, 该钢的许用应力高于奥氏体不锈钢。在 427℃ ~ 704℃ 温度范围内, 其持久强度超过 T9 和 2-1/4Cr1Mo 钢。在 550℃ 以上该钢推荐的设计许用应力约为 T9 和 2-1/4Cr1Mo 钢的 2 倍。此外, 该钢还具有优良的导热系数和较小的线膨胀系数。适用于作为锅炉壁温 ≤ 625℃ 的高温过热器、壁温 ≤ 650℃ 的高温再热器以及壁温 ≤ 600℃ 的锅炉集箱和蒸汽管道等。

## 3 材料的焊接性能分析

SA335-P91 钢已广泛用于国内高参数、大容量机组的锅炉受热面、集箱、连接管道、四大管道等, 因此其焊接性能的优劣尤为重要, 直接影响到机组的安全运行。通常通过对材料碳当量的计算来判断材料的焊接性能:

根据碳当量计算公式  $C_{eq} = [C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15] * 100\%$

计算可得  $C_{eq} \approx 2.19 > 0.6\%$ , 碳当量越高, 钢材

的淬硬倾向越严重, 热影响区冷裂倾向越大, 其焊接性能也就越差。根据经验总结, 当碳当量小于 0.4% 时, 钢材的焊接性能良好, 焊接前不需要对母材进行预热; 当碳当量为 0.4% ~ 0.6% 时, 钢材的焊接性能稍差, 焊接前需要对母材适当预热; 当碳当量大于 0.6% 时, 钢材的焊接性能较差, 焊接前需要比较高的温度对母材进行预热, 不但要保证母材预热温度均匀, 并且要严格控制焊接工艺措施, 焊后缓冷并及时进行焊后热处理, 否则焊接接头部位可能产生裂纹。此钢种焊接性能较差, 焊接过程中容易产生冷裂纹和淬硬组织, 焊前需预热, 焊接过程中需严格控制焊缝层间温度, 焊后需在马氏体转变点  $M_f$  点 (80℃ ~ 120℃) 下恒温 2 小时, 然后进行高温回火处理<sup>[1]</sup>。

## 4 焊接工艺<sup>[2]</sup>

### 4.1 焊接方法选择

焊接应采用手工钨极氩弧焊进行打底焊接, 采用手工焊条电弧焊进行填充焊接及盖面焊接。

### 4.2 坡口型式

采用综合型坡口, 采用机械方法加工, 保证钝边尺寸和对口坡口间隙, 保证根部焊接质量。

### 4.3 焊接材料选择

手工钨极氩弧焊选用: TG-S9CB 焊丝, 焊丝直径为  $\phi 2.4\text{mm}$ , 氩气纯度不低于 99.9%

手工焊条电弧焊选用: E9018-B9 焊条, 直径为  $\phi 3.2\text{mm}$ 。

### 4.4 焊接准备

#### 4.4.1 焊前准备

1. 焊接作业必须免受恶劣天气的影响, 风、雨天

施焊必须采取可靠的遮挡措施,焊接场所的风力应符合以下规定:手工电弧焊风速不大于 8m/s;氩弧焊风速不大于 2m/s;焊接现场允许的最低环境温度为 5℃;焊接场所附近保持干燥;夜间施工要有充足的照明;焊接现场要采取必要的防风和防尘措施。

2. 焊前将母材坡口内外各 20mm~30mm 范围打磨干净,至露出金属光泽,确保没有漆、锈、油、垢、水等有害物质,坡口表面质量级别需达到 NB/T47013-2015 标准要求中的渗透 I 级。

3. 对坡口内进行硬度(母材硬度控制范围 185HB~250HB)检查,确认将原焊缝的热影响区清除干净后方可进行下一步操作。

4. 焊接材料使用前应根据批号对焊接材料的材质进行抽查确认。

5. 氩弧焊用焊丝表面不得有油、锈等污物。焊条电弧焊所使用的焊条,在焊接操作前必须经过 350℃~400℃烘干,恒温 1h~2h,使用时存放在 120℃保温筒内,随用随取,保证焊条不能受潮。

6. 检查汽水系统阀门,应全部关闭,确保管道内没有气流影响焊接质量。

7. 氩气室应使用可溶纸,使用前须进行溶水试验,溶水试验后可溶纸应成絮状。禁止将可溶纸团紧塞进管道内。可溶纸折叠,将其放入管内与管内壁严密贴合,为确保充氩质量,可溶纸应加装不少于两层,做成密封气室。

8. 将待焊管点固,对口时应做到内壁齐平,其错口值不得超过管子壁厚的 10%,且不大于 1mm,坡口间隙 3mm~4mm,点固所用的焊材以及焊接参数应与正式施焊相同。对口时禁止强力对口,更不允许用热膨胀方法对口,以防止引起附加的应力。

#### 4.4.2 焊前预热

焊前预热是预防马氏体耐热钢出现冷裂纹的重要措施。较好的预热可以有效减慢焊缝和热影响区的冷却速度,有效降低焊接淬硬组织发生的概率,有益于焊缝中氢气的逸出,可以有效防止焊接裂纹的产生。由于 SA335-P91 钢的碳当量较高,所以打底焊接时选择预热温度为 150℃~200℃,填充及盖面焊接时预热温度为 200℃~250℃,以 250℃为宜。鉴于 Y 型三通壁厚较厚且不规则,宜对三通进行整体辅助加热,以确保预热温度达到焊接要求。

1. 焊接预热及焊接过程的恒温采用中频感应加热方法与柔性陶瓷电阻加热相配合的方式进行。首先,将柔性陶瓷电阻加热片固定在母材上,以焊缝为中心每侧预热加热宽度不小于 6 倍管道壁厚。其次,按照预热宽度以焊缝为中心包裹保温材料,保温宽度每侧比加热宽度增加至少 2 倍壁厚。最后,保温后以焊缝

为中心,在保温层外侧布置中频感应线圈,以焊缝为中心每侧预热加热宽度不小于 5 倍管道壁厚。采用中频感应加热能够使金属工件在较短时间内获得温度均匀的预热效果,将中频感应加热装置启动进行预热。预热时,应采用测温枪测量坡口的温度,并与热处理数字显示仪显示的温度比较,用来确定热处理设备记录数据与实际温度的误差值。预热过程中应考虑到此误差值,并采取相应措施作相应补偿。当预热温度达到设定的焊接预热温度后,将中频感应线圈断电拆除,同时将柔性陶瓷电阻加热器送电,用以维持焊接过程中的恒定温度。

2. 坡口边缘至少应布置 2 支热电偶,水平管道上下布置。热电偶的布置应尽量靠近坡口边缘 20mm~25mm。

3. 预热温度:开始 GTAW 前预热 200℃,充分恒温以确保焊接坡口处温度达到工艺要求。

#### 4.4.3 焊口消磁

将焊线按一定方向缠绕在母材上,利用直流电焊机对缠绕线圈通直流电,在管道外部施加一个反向磁场,通过调整线圈数量及电流大小来控制所形成的磁场大小,以达到消除母材磁性的目的。

使用回形针在坡口边缘处检查消磁的效果,必要时通过调整电流的大小或改变线圈的缠绕方向、缠绕圈数等,达到消磁的效果,待磁性消除后进行打底层焊接。

### 4.5 焊接

#### 4.5.1 焊接参数选择

SA335-P91 钢焊接时,应采用较小的焊接线能量,采用多层多道焊,以减小焊接残余应力,减少焊接过热区宽度,细化晶粒,提高焊缝金属的抗裂性能。

#### 4.5.2 焊接操作

SA335-P91 钢的焊接,不但要严格控制焊接工艺参数和层间温度,而且焊工操作手法对焊接接头质量有着至关重要的影响。

1. 氩弧焊打底焊。焊接时应采用短弧焊接,使焊枪与焊缝垂直,保证氩气对熔池的保护。焊枪和焊丝作横向摆动且两边稍作停留,保证坡口根部熔透。同时,必须控制好熔池温度防止熔池温度过高产生焊穿、焊瘤等缺陷。在接头焊接时,要将弧坑打磨干净,将弧坑处的收弧裂纹和气孔等焊接缺陷清除,然后在母材坡口处引弧继续焊接,打底焊层厚度应不小于 3mm。

2. 焊条电弧焊填充焊。焊接时,要尽可能采取对称施焊的方法;焊条垂直于焊缝并采用短弧施焊,采用较小的焊接线能量。如果焊接电弧过长,会出现电弧燃烧不稳、熔深不足、熔化金属飞溅大及合金元素烧损加剧等问题,并且容易产生咬边、未熔合等焊接缺陷,同时空气中的 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 等有害气体容易进入熔池,在焊缝金属中形成气孔缺陷。焊接时焊条可作横向摆

动,在坡口两侧稍作停留,收弧时,特别要注意把焊接电流衰减下来,填满弧坑后移向坡口边沿收弧,防止产生弧坑裂纹。每焊完一道应彻底清理焊渣,若发现有气孔等焊接缺陷时,用便携式砂轮机将缺陷消除掉。每层焊道接头应错开10mm~15mm,同时注意尽量使焊道平滑过渡,运条时应注意焊条角度,便于清渣和避免出现“死角”,每层焊接完成后使用钢锯条或扁口凿子对层间进行清理。单层焊道宽度应小于焊条焊芯的4倍,单层焊道厚度应小于焊条焊芯直径。

3. 焊条电弧焊盖面焊。焊接电流较填充焊接电流适当减小,保证合适的焊条角度,采用窄道焊接、运条均匀,避免坡口边缘产生咬边缺陷。焊脚尺寸以控制在10mm~12mm为宜,焊脚尺寸差小于2mm,避免在角焊缝中产生应力集中。

4. 焊接过程中,焊工要时刻注意母材预热温度、焊接层间温度应符合要求,焊道表露缺陷要及时消除。

5. 焊接完成后检查焊缝尺寸要满足技术要求,并与母材圆滑过渡,不得有未熔合、咬边等缺陷。

### 5 焊后热处理<sup>[3]</sup>

SA335-P91 马氏体耐热钢的焊接接头,焊后需进行高温回火处理,从而消除或减少焊接接头区域出现的淬硬组织,增加焊接接头的塑性和韧性,减少焊接残余应力,同时有利于扩散氢的逸出,减少冷裂纹产生。所以,焊接结束后经低温转变后应立即进行高温回火处理。如因特殊原因不能及时进行焊后热处理工作,则应进行后热处理。后热处理工艺为:加热温度300℃~400℃,保温2h~4h。后热的加热宽度应不小于预热时的加热宽度。

#### 5.1 热电偶安装

采用接触法测温,选用k型热电偶。热处理时每个截面应进行分区控温,垂直位置的管道焊接接头进行焊后热处理时,应使用不少于2~3支热电偶,沿圆周均匀布置。其中1支控温热电偶布置于焊缝中心,其他监测热电偶布置于距焊缝边缘1倍壁厚处,且不小于50mm。

#### 5.2 焊后热处理

##### 5.2.1 保温宽度及材料的包扎

恒温时焊缝测量截面在加热范围内任意两侧点间的温度差应低于20℃;焊接完成经低温转变完成后,采用中频感应加热器的方法进行加热,将用于预热的加热片拆除,然后包扎保温。加热宽度焊缝每侧不小于160mm,保温宽度每侧为加热宽度的2倍。

##### 5.2.2 焊后热处理参数

焊后热处理采用中频感应加热器的方法,热处理恒温温度为740℃~760℃。

1. 升降温速度。升温速度=8000÷壁厚(℃/h)=

8000÷53≈151℃/h(对于P91/T91钢,升降温速度应不大于150℃/h)。

降温速度=6250÷壁厚(℃/h)=6250÷53≈118℃/h。

根据计算升温速度确定为不大于150℃/h(升温时,温度在300℃以下可不控制升温速度);降温速度不大于117℃/h,温度降至300℃以下可断电让其在静止空气中自然冷却。

2. 恒温时间。对高合金钢,宜恒温时间按3~5min/mm计算,最少60min,采用感应加热时取值宜偏于以上计算的下限:恒温时间=3×壁厚min=3×53min=159min。

### 6 焊接检验

焊接质量的检查和检验实行三级检查验收制度,采用焊工自检与专业检验项结合的方法。焊接完成后,焊工应根据图纸要求对焊接部件进行宏观的尺寸检查和焊缝表面成型检查。待热处理工作完成24小时后,进行最终尺寸检查。由专人对焊缝材质进行光谱分析,并对焊接接头范围进行硬度、超声波检测、磁粉检测、金相检验。

对于存在超标缺陷的焊接接头,应查明焊接接头不合格的产生原因,进行原因分析的同时提出返修措施,表露的缺陷可以采用机械打磨的方法消除。需要补焊消除的缺陷,可以采用挖补的方法,用机械法挖除缺陷,然后补焊,并重新进行热处理。挖补处理不应超过两次,返修后的焊接接头还应按照原检验方法重新进行检验。

对于经硬度检验或金相检验不合格的焊接接头,经分析为热处理工艺控制不当造成应重新热处理。因加热温度过高导致焊接接头过热或因焊接工艺控制不当导致焊接接头硬度过高,应割掉重新进行焊接。

对于经光谱分析不合格的焊缝,应重新确认焊接材料,并割除重新焊接。

### 7 结论

通过严格控制SA335-P91钢的焊接及热处理工艺,顺利完成了缺陷部位的返修工作,并获得了较好的焊接接头质量。同时建议在设计此类三通时,应考虑现场施工的难易程度,将焊接接头与三通本身保留一定距离,满足现场焊接热处理要求。

### 参考文献:

- [1] 杨富,章应霖,任永宁,等.新型耐热钢焊接[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [2] 国家能源局.DL/T 869-2021火力发电厂焊接技术规程[S].2021-12-22.
- [3] 国家能源局.DL/T 819-2019火力发电厂焊接热处理技术规程[S].2019-06-04.