

# Q345R 与双相不锈钢 022Cr22Ni5MoN 复合板的焊接

中国石化集团第十建设公司 (山东淄博 255438) 李玉庆

2011 年我公司承担某盐化工公司中卤水蒸发罐的现场制作与安装,其主体材料为低合金钢 Q345R 和双相不锈钢 022Cr22Ni5MoN (以下简称 2205) 复合钢板,其制造、组焊工艺复杂,焊接施工难度高。为保证设备的制造、现场组焊施工质量,我们对复合板的特性和焊接工艺进行了认真分析,并根据相关规范进行焊接工艺评定,拟定出焊接工艺规程,圆满完成焊接施工任务,为公司积累了宝贵的施工资料和经验。

蒸发罐内主要介质为蒸汽、卤水,温度为 90 ~ 135℃。卤水较酸、碱的腐蚀性弱,因此从经济实用角度设计,材料选用 Q345R + 2205 双相不锈钢复合板。其复层是近几年发展比较快的双相不锈钢材料,在性能上兼有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的特点,其韧性高、脆性转变温度低,耐晶间腐蚀能力强等。

我公司双相不锈钢施工较多,有一定的施工经验,复合板施工也较成熟。但对双相不锈钢复合板的施工较少,同时复层厚度为 2mm,给焊接施工带来不少难题。

## 1. 焊接难度分析

(1) 本次复合板厚度规格为 (22 + 2) mm、(18 + 2) mm、(14 + 2) mm、(10 + 2) mm,焊接接头有对接接头、角接接头、T 形接头等。由于规格、接头形式较多,焊接材料也较多,容易混淆,所以要

求焊工责任心要加强。

(2) 复层厚度为 2mm,焊接时稍有不慎就会影响过渡层、复层质量和蒸发罐使用效果,所以组焊施工时对坡口形式、焊接工艺、焊工技能水平及现场质量控制等提出更高要求。

(3) 焊接时,要求双相不锈钢复层焊接接头中奥氏体 (A) 组织和铁素体 (F) 组织的比例接近 1:1,才能保证焊接接头的力学性能、耐腐蚀性能满足要求。可以说,双相不锈钢的焊接就是围绕着如何保证双相组织比例关系的平衡而进行的。

## 2. 焊接工艺分析

(1) 焊接工艺分析 2205 双相不锈钢在高温液态下是 100% 的铁素体,焊接冷却过程中会发生铁素体组织向奥氏体组织转化的相变,在平衡条件下获得室温奥氏体加铁素体的双相组织。但焊接过程是一个快速加热、冷却的热循环过程。焊后冷却速度过快,则铁素体组织向奥氏体组织的相变会被抑制,铁素体含量就会增加达到 70%;焊后冷却速度过慢,奥氏体相变超过 60%,同时会造成铁素体组织晶粒粗大,还会产生  $\sigma$  相析出现象,导致焊接接头的韧性降低。所以,保证双相不锈钢良好接头性能最重要的措施就是控制焊缝冷却速度。表 1 为 2205 + Q345R 复合板的化学成分和力学性能 (数据来源于材料合格证)。

表 1 2205 + Q345R 复合板的化学成分和力学性能

| 复合板   | 化学成分 (质量分数, %) |      |       |       |      |       |       |       |      | 复合板的室温力学性能            |         |
|-------|----------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-----------------------|---------|
|       | C              | Mn   | P     | S     | Si   | Cr    | Ni    | Mo    | N    | 抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa | 伸长率 (%) |
| 2205  | 0.025          | 1.84 | 0.027 | 0.001 | 0.32 | 22.54 | 5.41  | 3.2   | 0.15 | 520 ~ 600             | 25 ~ 29 |
| Q345R | 0.17           | 1.49 | 0.009 | 0.006 | 0.35 | 0.059 | 0.026 | 0.002 | —    |                       |         |

(2) 焊接材料的选定 依据设计文件和相关焊接技术标准进行焊接材料的选择,基层选用 E5016

(J506) 焊条,过渡层选择高匹配超低碳异种钢焊条 E309L-16 (牌号 CHS062),复层选用双相钢 E2209-

16（牌号 CHS2209）焊条。根据材料合格证，各层的化学成分及力学性能如表 2 所示（数据来源材料合格证）。

表 2 双相不锈钢复合板焊接材料主要化学成分及其力学性能

| 化学成分（质量分数，%） |       |         |       |        |      |           |          |         |          |       | 室温力学性能                  |            |
|--------------|-------|---------|-------|--------|------|-----------|----------|---------|----------|-------|-------------------------|------------|
| 焊条<br>牌号     | C     | Mn      | P     | S      | Si   | Cr        | Ni       | Mo      | N        | Cu    | 抗拉强度<br>$\sigma_b$ /MPa | 伸长率<br>(%) |
| J506         | 0.103 | ≤1.6    | ≤0.04 | ≤0.035 | —    | ≤0.2      | ≤0.3     | ≤0.3    | —        | —     | ≥520                    | ≥22        |
| CHS062       | ≤0.04 | 0.5~2.5 | ≤0.04 | ≤0.03  | ≤0.9 | 22~25     | 12~14    | ≤0.75   | —        | —     | ≥520                    | ≥30        |
| CHS2209      | ≤0.04 | 0.5~2.0 | ≤0.04 | ≤0.03  | ≤0.9 | 21.5~23.5 | 8.5~10.5 | 2.5~3.5 | 0.08~0.2 | ≤0.75 | ≥690                    | ≥20        |

（3）坡口形式的选定 由于复层厚度为 2mm，按照焊工操作经验，焊条电弧焊层间厚度基本为焊条直径。根据经验值，焊接接头的过渡层、复层焊接厚度约为 3mm，都会超过复层 2mm 的厚度，所以焊接时稍有不慎，过渡段铁液就会影响到复层，使复层失去双相不锈钢的作用。

为克服以上问题，我们选择采用 X 形坡口，坡口角度为  $65^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ，以保证焊透和清渣容易。焊接顺序：先完成基层焊缝的焊接；复层侧进行清根，清根时要求超过复合处深度 2~3mm；焊接时，过渡层焊缝超过复合处 0.5~1mm，以保证过渡层质量，然后完成复层焊接。坡口形式如图 1 所示。

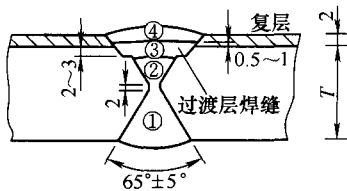


图 1 复合板对接接头坡口形式

注：①、②为基层焊道。

③为过渡层焊道。④为复层焊道。

3. 焊接工艺评定

我们依据设计文件和 JB 4708《钢制压力容器焊接工艺评定》标准对焊缝进行焊接工艺评定。焊前编制焊接工艺评定委托书，试验包括弯曲、拉伸、复层铁素体含量测定、复层晶间腐蚀四个项目。根据以往复合板评定试验的经验，复层铁素体含量鉴定、晶间腐蚀两个项目较难达到合格值，所以焊接时须严格控制接头坡口形式、层间处理、层间焊接厚度、焊接热输入等。

坡口形式依照图 1 设计，焊接时先进行基层外侧、内侧焊接，然后进行基层内侧清根处理，注意清根深度为超过复合处 2~3mm。清根后采用 CHS062 进行过渡层焊接，过渡层高度为超过复合处 0.5~1mm 为佳，最终采用焊条 CHS2209 进行复层焊接。

复层焊接时，为保证铁素体均匀向奥氏体过渡，一般控制复层焊接厚度在 2~3mm 之间，层间温度控制在 100℃ 以下；同时，控制焊接电流在 100A 以下，焊接热输入在 10kJ/cm 以下。

通过以上分析和焊接工艺的严格控制，焊接工艺评定各试验项目全部合格（见表 3）。

表 3 焊接工艺评定相关试验结果

| 拉伸试验（试验依据 JB 4708—2000 和 GB/T 228—2002 标准进行） |         |         |                      |         |          |         |
|----------------------------------------------|---------|---------|----------------------|---------|----------|---------|
| 试样编号                                         | 试样宽度/mm | 试样厚度/mm | 横截面积/mm <sup>2</sup> | 断裂载荷/kN | 抗拉强度/kPa | 断裂部位和特征 |
| 1 - 1                                        | 20      | 20      | 400                  | 236     | 590      | 热影响区，塑性 |
| 1 - 2                                        | 20      | 20      | 400                  | 228     | 570      | 热影响区，塑性 |
| 弯曲试验（试验依据 JB 4708—2000 和 GB/T 232—2002 标准进行） |         |         |                      |         |          |         |
| 试样编号                                         | 试样类型    | 试样厚度/mm | 弯轴直径/mm              | 弯曲角度（°） | 试验结果     |         |
| 1 - 3 ~ 6                                    | 侧弯      | 10      | 40                   | 180     | 未见缺陷/合格  |         |
| 复层铁素体含量测定（GB 1954—1980 磁性法）                  |         |         |                      |         |          |         |
| 试样编号                                         | 试样规格/mm |         |                      | 平均值（%）  |          |         |
| 1 - 7                                        | 20 + 2  |         |                      | 41. 2   |          |         |
| 复层晶间腐蚀（试验依据 GB/T 4334—2008 标准进行）             |         |         |                      |         |          |         |

(续)

| 试样编号 | 试样规格/mm | 压头直径/mm | 弯曲角度(°) | 晶间腐蚀裂纹  |
|------|---------|---------|---------|---------|
| 1-8  | 80×20×3 | 5       | 180     | 无晶间腐蚀裂纹 |
| 1-9  | 80×20×3 | 5       | 180     | 无晶间腐蚀裂纹 |

#### 4. 现场焊接质量控制

为保证焊缝焊接质量,首先对进入现场的施焊焊工进行考核。考核分焊工资质审核和现场考试两个项目。主要目的考核施焊焊工的操作技能水平、焊接工艺执行情况、层道质量及热输入控制。实操考核结果以焊接过程中过渡层工艺执行、焊缝外观质量、试件变形、RT 探伤为依据,合格者正式录用为焊工,不合格者不得参与蒸馏罐焊接。

其次,现场施焊交底卡。整个蒸馏罐的焊缝有对

接接头、T形接头、角接接头等,我们依据相关设计和规范要求,每种接头形式都有不同的焊接顺序和要求。焊接技术人员对焊工进行施焊前交底,交底内容为焊接工艺特点、坡口形式、焊接顺序、选材要求等,特别是对复层过渡段进行了特殊设计要求。

(1) 对接接头焊接工序要求 图2中①为基层外侧焊缝;②为基层内侧焊缝(基层焊缝内侧清根、打磨、PT检测合格);③为过渡层焊缝;④为复层焊缝。

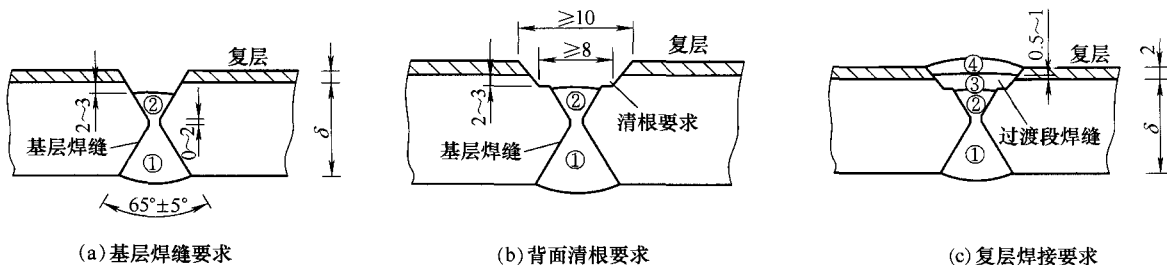


图2 对接焊缝交底卡坡口形式及焊接顺序

(2) T形接头焊接工序要求 图3中①为基层焊缝外侧、护板焊接;②为基层焊缝内侧清根、打

磨、PT检测合格;③为基层内侧焊缝,过渡层焊缝;④为复层焊缝。

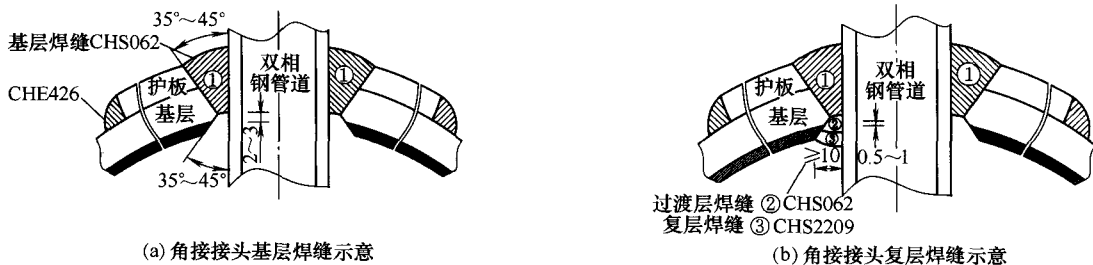


图3 加护板角接头交底卡坡口形式及焊接顺序

注:图中①②采用焊条 CHS062;③采用焊条 CHS2209;其他采用碳钢焊条

(3) 内口封堵角接头焊接工序要求 图4中的①复合管端部 CHS062 焊条堆焊;②复合管端部

CHS2209 堆焊;③基层内侧、过渡层焊接;④复层焊接;⑤基层焊缝外侧清根、打磨、PT检测合格;基层外侧焊缝焊接;⑥护板焊接。

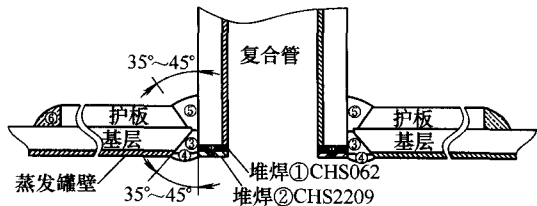


图4 内口封堵角接头交底卡坡口形式及焊接顺序

注:图中①③⑤采用焊条 CHS062;

②④采用焊条 CHS2209;⑥采用碳钢焊条

#### 5. 其他焊接注意事项

(1) 焊工焊前需严格检测焊缝组对质量。坡口尺寸不符合工艺要求;复层(不锈钢侧)没刷白堊粉;焊缝组对错口>1mm,焊工可拒绝施焊。

(2) 焊工领用焊条时,严格检查施焊焊条牌号和焊接工艺相符。

(3) 装配时点固焊只能在基层(下转第39页)

3. 成本分析

主要在改造成本及与手工送丝钨极氩弧焊对比两方面进行分析。

(1) 在改造成本上 本套装置主要利用现有设备，外购及改造成本主要包括控制盒及内部供电及调速电路、送丝辅具等，成本总额大约在 600 元。与购买整套送丝装置相比，成本优势明显。

(2) 与手工送丝钨极氩弧焊施工成本对比 以大庆油田工程建设公司油建公司承担的中卫－贵阳联络线工程陇南支线天然气管道工程为例，管道材质为 L290，规格为  $\phi 219\text{mm} \times 6\text{mm}$ ，管道全长 85km，焊口数约 9500 道，业主要求采用氩弧焊打底。材料方面，根据计算，氩弧焊打底每道口约熔敷金属 0.57kg，9500 道口共需熔敷金属 5415kg。而手工焊时焊丝利用率约 80%，这样约需焊丝 6770kg，按单价 12.10 元/kg 计，合计金额约 8.2 万元；半自动焊时焊丝利用率接近 100%，按单价 8.68 元/kg 计，合计金额约 4.7 万元。这样可节省焊丝费用约 3.5 万元。

效率方面，半自动钨极氩弧焊焊接速度 8 ~ 10cm/min；而手工钨极氩弧焊 4 ~ 6cm/min。对于  $\phi 219\text{mm}$  管，单道口打底半自动钨极氩弧焊约需 7.3min；手工钨极氩弧焊约 13.2min，相比每道口可节约 5.9min。9500 道口共计可节省焊接时间约 934h。按每天工作 10h，人工费 200 元/天计，可节省人工费 1.87 万元。两者合计，共节省费用近 5.4 万元。

4. 结语

通过以上的研制、试验和应用，可得出以下结论：

- (1) 现有设备通过改进，完全可以实现钨极氩弧焊的自动送丝功能，提高了效率，降低了成本。
- (2) 钨极氩弧焊半自动技术完全适用于全位置管道的焊接。
- (3) 该装置的研发成功，为未来我单位实现管道钨极氩弧焊现场工厂化预制打下了基础。MW

(20120117)

(上接第 36 页)  
上进行，点固焊、正式焊接都必须对复层进行保护，以避免碳钢（特别是飞溅物）污染复层。

(4) 不得用碳钢焊材、低合金焊材在过渡层和复层焊缝上施焊。

(5) 基层施焊前，应清除坡口及其两侧各 20mm 范围内（以离坡口边缘的距离计）的氧化物、油污、熔渣及其他有害杂质，复层距坡口 100mm 内应涂白垩粉，防止焊接飞溅伤及复层。

(6) 焊接参数和层次必须保证在规定范围之内，罐体焊缝按照每段 500mm 分层分道焊接，控制反变形。

(7) 每层焊缝需严格打磨、清理，确认无缺陷和夹杂后，方可进行下一道焊接。焊接层间温度控制在 150℃ 之内。

(8) 复层侧清根时，须严格控制深度为超过复层过渡点 2 ~ 3mm，宽度不得少于 10mm。

(9) 复层焊接前须严格检查复层侧清根坡口，经 PT 探伤检测没有缺陷，并经质检人员确认后，方可进行下一步施焊。

(10) 在焊接基层焊缝时，注意焊缝不能把复层熔化，控制焊条摆动幅度小于焊条直径的 3 ~ 4 倍；

复层焊缝表面应平滑，焊缝金属与母材应平缓过渡，不能形成台阶。

(11) 焊缝焊接完成后应严格检查焊缝表面熔渣、飞溅等，并清理干净。焊缝高度  $\leq 3\text{mm}$ ，不得有咬边、夹渣、裂纹等缺陷。焊缝两侧夹具及吊耳等拆除后，应对其残留痕迹进行打磨，并认真检查。

焊接参数如表 4 所示。

表 4 焊接参数

| 母材<br>牌号 | 焊材牌号               | 焊接电流/A<br>( $\phi 3.2\text{mm}$ ) | 焊接电流/A<br>( $\phi 4.0\text{mm}$ ) |
|----------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Q345R    | E5016 (J506)       | 100 ~ 135                         | 135 ~ 160                         |
| 2505     | E2209—16 (CHS2209) | 80 ~ 120                          | —                                 |
| 过渡段      | E309L—16 (CHS062)  | 80 ~ 120                          | —                                 |

6. 结语

此工程中共有蒸发罐 6 台、闪蒸罐 2 台，壳体全部采用双相不锈钢复合板。共计完成焊接施工焊缝 3050m，经外观检查质量为优。按照 JB 4730—2005 规范，所有焊缝按 20% 比例进行了 RT 拍片探伤 2200 张，合格率达到 98.5%。

MW (20120209)