

# 工程应用获好评，焊材工艺显其能（下）

## ——双相不锈钢焊接材料应用综述

太原理工大学焊接材料研究所 （山西 030024） 孙 咸

（2）双相不锈钢与异种金属焊接材料的选用 从表4和表5可以看出，双相不锈钢与其他双相不锈钢焊接时，在准成分匹配原则前提下，采用Ni含量比母材高、N含量略低于母材的双相不锈钢焊接材料，以保证焊缝冷却过程中有合适的奥氏体相含量。双相不锈钢与奥氏体不锈钢焊接时，通常采用低C和Mo含量介于二者之间的奥氏体不锈钢焊接材料，如E309MoL-16和E2209-16，控制焊材中的C和Mo仍然是为了保证焊缝合理的双相组织。对于双相不锈钢与碳素钢或低合金钢的焊接，通常选用含有少量铁素体的奥氏体不锈钢焊接材料，亦即倾向于高合金一侧钢的成分匹配，如E309L-16或E309MoL-16，以保证接头的抗裂性和使用性能。

需要说明的是，在AWS标准中，尚未查到表4中所列的E2510焊接材料。在AWS A5.4标准中，目前有一个E2594-16焊接材料，该焊条的合金系是25Cr-10Ni-4Mo-N。它是为超级双相不锈钢2507开发的专用焊条，从焊条和超级双相不锈钢2507的成分和力学性能综合考虑，完全可以作为E2510焊材使用。

表4 双相不锈钢及异种金属的焊接材料

| 钢 种         | 2304<br>(Cr18)   | 2205<br>(Cr22)   | 255<br>(Cr25)    | 超级<br>双相钢 |
|-------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 2304 (Cr18) | E2209<br>E2304   | E2209            | E2209            | E2209     |
| 2205 (Cr22) | E2209            | E2209            | E2510            | E2510     |
| 255 (Cr25)  | E2209            | E2510            | E2510            | E2510     |
| 超级双相钢       | E2209            | E2510            | E2510            | E2510     |
| 304         | E309LMo<br>E2209 | E309LMo<br>E2209 | E309LMo<br>E2209 | E309LMo   |
| 316         | E309LMo<br>E2209 | E309LMo<br>E2209 | E309LMo<br>E2209 | E309LMo   |
| 低合金高强度钢     | E309L            | E309L            | E309L            | E309L     |

表5 双相不锈钢及异种金属焊接材料熔敷  
金属化学成分及力学性能

| 焊条型号<br>(AWS A5.4) | 化学成分 (质量分数, %)              |      |                          |      |                  |      |              |      |      |      |
|--------------------|-----------------------------|------|--------------------------|------|------------------|------|--------------|------|------|------|
|                    | C                           | Cr   | Ni                       | Mo   | Mn               | Si   | S            | P    | Cu   | N    |
| E309L-16           | 0.02                        | 23.9 | 12.6                     | 0.05 | 1.0              | 0.33 |              |      |      |      |
|                    | ~                           | ~    | ~                        | ~    | ~                | ~    | 0.02         | 0.03 | 0.09 | -    |
|                    | 0.04                        | 24.5 | 13.2                     | 0.09 | 1.5              | 0.38 |              |      |      |      |
| E309MoL-16         | 0.02                        | 23.0 | 12.5                     | 2.7  | 0.8              | 0.90 | 0.02         | 0.03 | 0.75 | -    |
| E2209-16           | 0.02                        | 22.5 | 9.5                      | 3.2  | 0.8              | 1.0  | 0.02         | 0.03 | 0.20 | 0.16 |
| E2594-16           | <                           | 25.2 | 9.8                      | 4.0  | 0.8              | 0.6  | 0.02         | 0.03 | -    | 0.25 |
|                    | 0.04                        |      |                          |      |                  |      |              |      |      |      |
| 焊条型号<br>(AWS A5.4) | 力学性能                        |      |                          |      |                  |      |              |      |      |      |
|                    | 屈服强度<br>$R_{el}/\text{MPa}$ |      | 抗拉强度<br>$R_m/\text{MPa}$ |      | 断后伸长率<br>$A/(%)$ |      | 焊缝中<br>FN(%) |      |      |      |
| E309L-16           | 455~469                     |      | 579~586                  |      | 38~47            |      | 10~18        |      |      |      |
| E309MoL-16         | 580                         |      | 700                      |      | 30               |      | 15~25        |      |      |      |
| E2209-16           | 650                         |      | 800                      |      | 27               |      | 30~55        |      |      |      |
| E2594-16           | 700                         |      | 850                      |      | 30               |      | 35~50        |      |      |      |

### 3. 双相不锈钢焊接材料的种类及工艺方法

双相不锈钢的种类比较多。有资料显示，工程结构应用最多的当数SAF2205（00Cr22Ni5Mo3），约占80%，超级双相不锈钢SAF2507（00Cr25Ni7Mo4N）约占13%。

本文以SAF2205为例，讨论它的焊接方法及所用焊接材料。从表6和表7可以看出，双相不锈钢焊接材料有五大类，这是产品结构特点和所用焊接方法所决定的。根据结构提供的板厚（或壁厚）、坡口形式、间隙、钝边、焊缝位置等参数，可以灵活选用以下几种工艺方法：①板厚不太厚时，采用GTAW打底+GTAW填充工艺。②中厚板，单边V形坡口时，采用GTAW打底+SMAW填充工艺，亦可采用GTAW打底+GMAW填充工艺。③厚板单边V形坡口时，采用GTAW打底+SMAW填充一层+SAW填充工艺。④能开双面坡口的亦可采用

表6 国外双相不锈钢典型焊接材料的化学成分

| 焊接方法 | 焊接材料                 | 技术标准<br>(AWS) | 化学成分 (质量分数, %) |       |      |      |      |      |       |       |      |      |
|------|----------------------|---------------|----------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
|      |                      |               | C              | Cr    | Ni   | Mo   | Mn   | Si   | S     | P     | Cu   | N    |
| SMAW | OK67.50              | E2209 - 17    | <0.03          | 22.3  | 9.5  | 3.0  | 0.9  | 0.7  | 0.02  | 0.03  | 0.3  | 0.16 |
|      | Blue Max Arosta 4462 | E2209 - 16    | 0.020          | 22.5  | 9.5  | 3.2  | 0.80 | 1.0  | 0.02  | 0.03  | 0.20 | 0.16 |
| GTAW | OK Tigrod 2209       | ER2209        | <0.025         | 22.5  | 8.5  | 3.3  | 1.7  | 0.5  | —     | —     | 0.30 | —    |
|      | Blue Max LNT 4462    | ER2209        | 0.018          | 22.7  | 8.5  | 3.0  | 1.5  | 0.5  | 0.02  | 0.03  | 0.30 | 0.15 |
| GMAW | OK Autorod 2209      | ER2209        | <0.025         | 22.5  | 8.5  | 3.3  | 1.7  | 0.5  | —     | —     | 0.30 | —    |
|      | Blue Max LNM 4462    | ER2209        | 0.018          | 22.7  | 8.5  | 3.0  | 1.5  | 0.5  | 0.02  | 0.03  | 0.30 | 0.15 |
| FCAW | DW - 2209            | E2209T1 - 1/4 | 0.026          | 22.96 | 9.68 | 3.28 | 0.89 | 0.55 | 0.005 | 0.018 | —    | 0.14 |
|      | SW - 2209 Cored      | E2209T1 - 1/4 | 0.03           | 23.5  | 8.70 | 3.20 | 1.10 | 0.70 | 0.010 | 0.020 | —    | 0.10 |
| SAW  | OK Autorod 16.86     | ER2209        | 0.02           | 22.0  | 9.0  | 2.8  | 1.3  | 0.8  | —     | —     | —    | 0.15 |
|      | Blue Max LNS 4462    | ER2209        | 0.03           | 22    | 8    | 3.0  | 0.9  | 0.7  | —     | —     | —    | 0.15 |

表7 国外双相不锈钢典型焊接材料的力学性能

| 焊接方法 | 焊接材料                 | 技术标准<br>(AWS) | 保护气体                       | 屈服强度<br>$R_{el}/\text{MPa}$ | 抗拉强度<br>$R_m/\text{MPa}$ | 断后伸长率<br>$A_4(\%)$ | 铁素体FN<br>(质量分数, %) |
|------|----------------------|---------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| SMAW | OK67.50              | E2209 - 17    | —                          | 691                         | 857                      | 25                 | 25 ~ 40            |
|      | Blue Max Arosta 4462 | E2209 - 16    | —                          | 650                         | 800                      | 27                 | 30 ~ 55            |
| GTAW | OK Tigrod 2209       | ER2209        | 纯氩                         | 600                         | 765                      | 28                 | —                  |
|      | Blue Max LNT 4462    | ER2209        | 纯氩                         | 625                         | 810                      | 28                 | —                  |
| GMAW | OK Autirod 2209      | ER2209        | 纯氩                         | 600                         | 765                      | 28                 | —                  |
|      | Blue Max LNM 4462    | ER2209        | 纯氩                         | 625                         | 810                      | 28                 | —                  |
| FCAW | DW - 2209            | E2209T1 - 1/4 | 80%Ar + 20%CO <sub>2</sub> | 617                         | 808                      | 29                 | —                  |
|      | SW - 2209 Cored      | E2209T1 - 1/4 | 100%CO <sub>2</sub>        | 680                         | 820                      | 27                 | 68                 |
| SAW  | OK Autorod 16.86     | ER2209        | —                          | 630                         | 780                      | 28                 | —                  |
|      | Blue Max LNS 4462    | ER2209        | —                          | 550                         | 800                      | 27                 | 30 ~ 50            |

SMAW打底 + GMAW填充或SAW填充工艺，反面清根后用GMAW或SAW填充。这期间自然不可忽略焊缝反正面的气体保护工序。

对于FCAW，既可作为GTAW打底后的填充工艺，也可以直接用于坡口打底焊接，可以免除坡口反面充氩保护工序。其工艺要点是：①采用正确的坡口形状和尺寸。②选用合理的焊接材料（见表6、表7）。③选用正确的焊接参数及规范（包括焊丝及电焊条牌号和直径、钨极直径、焊接电流、氩气流量、电源极性、焊缝层数及道数等），特别强调，避免使用过高或过低的焊接热输入，提倡使用多层、多道焊接方式。④选用正确的焊缝层间温度。⑤无需使用焊后消除应力热处理，因为超过315℃的焊后热处理温度，会对双相不锈钢的韧性和耐蚀性产生不利影响。⑥坚持正确的焊接顺序（与介质接触的焊道先焊），接头装配定位焊和熟练、高超的手工操作技能等。

上述方法及工艺的应用，取得了较为满意的效果。但是该工艺的不足之处是，焊接过程中焊缝的

背面保护问题较复杂。一旦保护不好，背面焊缝即被氧化，焊缝的质量不能保证，造成安全隐患。

近年来，一种采用药芯焊丝填充打底的GTAW焊接方法获得了应用。该方法的特点是：打底焊时用药芯焊丝的熔渣对背面焊缝进行保护，免除了焊缝背面保护，焊缝的填充层可以是GTAW焊接，也可以是焊条电弧焊（SMAW）。这种打底专用药芯焊丝成分、性能调整方便，接头性能能够满足使用要求，焊接工艺性也令人满意，是一种前景看好的工艺方法。

药芯焊丝打底的GTAW焊接方法的焊接工艺要点，除了焊接材料和焊接参数的选用，以及操作技术与上述全氩弧焊有所不同外，其他要点大同小异。还有一种采用药芯焊丝（FCAW）打底 + 实芯焊丝（GMAW）填充的工艺方法，优势突出，在业界受到了关注或试用。该工艺免除了焊缝背面繁杂的充氩程序，也无需变换电源极性，底层清渣量小，辅助时间短，比全程使用药芯焊丝填充速度快，焊接质量稳定。

4. 双相不锈钢焊接材料的应用

某工厂将炼油装置中气体塔顶换热器的管板和换热器改用2205双相不锈钢制造,采用GTAW打底+ SMAW填充工艺方法,按表8中实例①焊接工艺施

工,强调控制焊接热输入,按JB4708—2000标准进行焊接工艺评定,并经生产实践证明,焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能均可获得满意的质量保证。

相关研究针对石油天然气田开发中经常遇到的

表8 双相不锈钢焊接材料应用案例及焊接工艺要点

| 实例号 | 板厚/mm | 接头类型                    | 焊接方法                               | 坡口形状                           | 焊接材料                         |       | 钨极直径/mm |  |
|-----|-------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------|---------|--|
|     |       |                         |                                    |                                | 牌号/型号                        | 直径/mm |         |  |
| ①   | 10    | 2205 + 2205<br>(对接接头)   | GTAW打底<br>+ SMAW填充                 | 65° V形坡口,<br>间隙3mm,<br>钝边2mm   | 打底: Sandvik22.8.3.L/ ER2209  | 2.5   | 2.5     |  |
|     |       |                         |                                    |                                | 填充: Avesta2205AC/DC/E2209-16 | 4     |         |  |
| ②   | 15.5  | 2205 + X60<br>(对接接头)    | GTAW打底 +<br>GTAW填充两层 +<br>SMAW填充3层 | 70° V形坡口,<br>间隙3mm,<br>钝边1mm   | GTAW打底和填充: / ER309           | 2     | 2.5     |  |
|     |       |                         |                                    |                                | SMAW填充: /E309 MoL - 16       | 4     | —       |  |
| ③   | 20    | 2205 + 2205<br>(立焊对接接头) | FCAW向下焊打底<br>+ FCAW填充              | 60° V形坡口,<br>间隙2~3mm,<br>钝边0mm | FCAW: /E209Ti                | 1.2   | —       |  |
|     |       |                         | GMAW向下焊打底<br>+ GMAW填充              |                                | GMAW: /ER2209                | 1.2   |         |  |
|     |       | 2205 + 2205<br>(横焊对接接头) | FCAW打底 +<br>FCAW填充                 | 60° V形坡口,<br>间隙2~3mm,<br>钝边0mm | FCAW: /E209Ti                | 1.2   | —       |  |
|     |       |                         | GMAW打底 +<br>GMAW填充                 |                                | GMAW: /ER2209                | 1.2   |         |  |
|     |       |                         |                                    |                                |                              |       |         |  |
|     |       |                         |                                    |                                |                              |       |         |  |

| 实例号 | 电源极性 | 焊接电流<br>/A    | 氩气流量/L·min <sup>-1</sup>      |        | 焊 缝<br>层数/道数 | 焊接热输入<br>/kJ·mm <sup>-1</sup> | 层间温度<br>/℃ |
|-----|------|---------------|-------------------------------|--------|--------------|-------------------------------|------------|
|     |      |               | 正 面                           | 背 面    |              |                               |            |
| ①   | 直流正接 | 105~140       | 10~15                         | 10~15  | 4/1          | 1.0~2.5                       | ≤150       |
|     | 直流反接 | 150~170       |                               |        |              |                               |            |
| ②   | 直流正接 | 80~120        | 10~15                         | 10~15  | 6/6          | 1.0~2.5                       | ≤100       |
|     | 直流反接 | 105~140       |                               |        |              |                               |            |
| ③   | 直流反接 | FCAW: 180~190 | 20%Ar +<br>80%CO <sub>2</sub> | 100%Ar | N/M          | FCAW(立): 9~19                 | 100~140    |
|     |      | GMAW: 120~140 |                               |        |              | GMAW(立): 10~20                |            |
|     |      | FCAW: 180~190 | 20%Ar +<br>80%CO <sub>2</sub> | 100%Ar | N/M          | FCAW(横): 6~11                 | 100~140    |
|     |      | GMAW: 120~140 |                               |        |              | GMAW(横): 5~10                 |            |

2205双相不锈钢与X60低合金高强钢焊接问题,对规格φ508mm×15.5mm的2205双相不锈钢与X60管线钢的异种钢焊接工艺进行研究。采用GTAW打底+GTAW填充两层+ SMAW填充3层方法,执行表8中实例②焊接工艺,接头的各项性能检测表明,所用焊接材料及工艺方法能够获得满意的焊接接头。

美国普莱克斯(中国)焊接技术中心,针对香港某大桥两个高290m桥塔上部的120m钢结构(该部分是由厚20mm、重达2000t的2205双相不锈钢结构组成,焊接接头的位置多为立焊和横焊),选择合金成分与之相匹配的实芯焊丝和药芯焊丝,以及不同类型的保护气体,分别采用FCAW打底+FCAW填充和GMAW打底+GMAW填充焊接方法,执行表8中实例③焊接工艺展开研究。

结果表明,两种工艺方法条件下,接头的力学性能及工艺性,均可满足钢结构横焊和立焊的需要。采用ER2209实芯焊丝与Stargon SS混合气体焊接工艺(GMAW打底+GMAW填充)可比FCAW打底+FCAW填充工艺降低焊接成本30%。

5. 结语

(1) 双相不锈钢焊接性的主要问题是焊接HAZ氢致冷裂纹和HAZ中温脆化倾向。选用优质、合适的焊接材料和合理的焊接工艺,是控制和改善该钢焊接性的重要技术手段。

(2) 双相不锈钢焊接材料的选用,可以采用“准成分匹配”原则,即尽可能使焊缝的主要化学成分接近母材,控制Ni含量比母材高、N含量略低于母材,保证接头获得最佳的使用性能(含耐腐蚀性能)和焊接性。

(3) 受产品结构特点和焊接方法控制,双相不锈钢焊接材料的种类5种,工艺方法各具特色;采用专用药芯焊丝FCAW打底+实芯焊丝GMAW填充的新工艺,优势明显。

(4) 不同厚度或不同位置的双相不锈钢钢接头,分别采用匹配的焊接材料和合理的工艺,均在不同的工程中获得成功应用。实芯焊丝ER2209及其工艺方法(GTAW及GMAW)仍是目前比较成熟和可靠的工艺方法。**MW** (全文完) (20120111)