

# 悬空全熔透 SAW 工艺技术在钢结构产品中的后续性应用

安徽杭萧钢结构有限公司焊接试验室（芜湖 241006） 宋守民 宋 珩 孔垂木 章涵希 周 杰

## 一、概述

悬空全熔透 SAW 焊接是应用于建筑钢结构产品的传统焊接技术。由于 SAW 的熔深、熔透性较好，所以 I 形平对接熔透性焊缝或 H 型钢 T 形角接船形全熔透焊缝多采用不开坡口、不刨焊根悬空焊接工艺，直接进行两面焊接。如果焊接参数选择合适，焊前准备工作充分，技能经验数据运用适当，就完全有可能获得优质的悬空全熔透一级焊缝。

但是长期以来，钢材厚度  $\delta > 12\text{mm}$  的厚板材，如厚度 14mm、16mm、18mm 乃至 20mm 以上的板材却很少使用悬空焊接工艺技术。其原因在于：由 12mm 以下薄板转换为 12mm 以上厚板悬空焊接，板材厚度、焊接参数、热输入量、焊接熔合比、焊缝熔深以及力学性能检测等焊接要素均随之发生变化，这给悬空全熔透焊接技术的应用带来了不同程度的制约。鉴于此，难度较大的厚板悬空焊接人们很少尝试，对  $\delta > 12\text{mm}$  的厚板建筑钢结构产品的全熔透焊接，往往改用切割坡口和刨削焊根的工艺形式，确保全熔透的焊接质量。

开坡口和焊缝背面刨削焊根的工艺形式会造成大量钢材和焊材的浪费。以  $\delta = 20\text{mm}$  的钢板为例，坡口剔除的母材金属尺寸以  $10\text{mm} \times 12\text{mm} \times 16\text{mm}$  计算，每米被剔除的母材金属约 0.47kg，其他不同厚度的母材，依此形式类推，形成坡口母材的焊前损耗。然后再采用不同类型的焊接方式，用焊接材料（焊条、焊丝）焊接填充坡口或刨削后的焊根沟槽，形成焊缝，又一次造成每米约 0.47kg 的焊材浪费。

如果使用焊前开坡口或焊缝背面刨削焊根工艺，约需要 15 道工艺程序。即：板材校平→板材切割下料→清理切割熔渣氧化皮→切割对角接坡口→清理切割熔渣氧化皮并打磨焊口→组立装配点焊焊缝→CO<sub>2</sub> 手工半自动

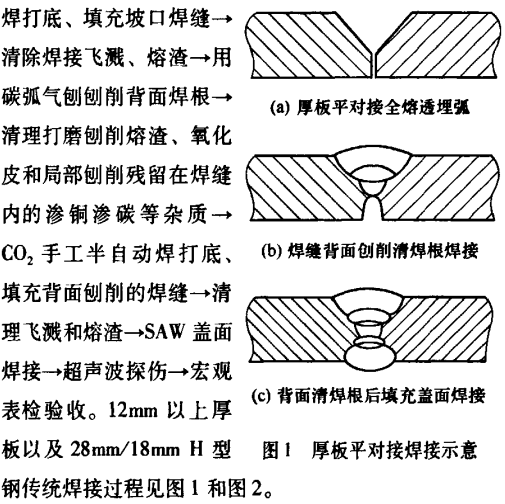
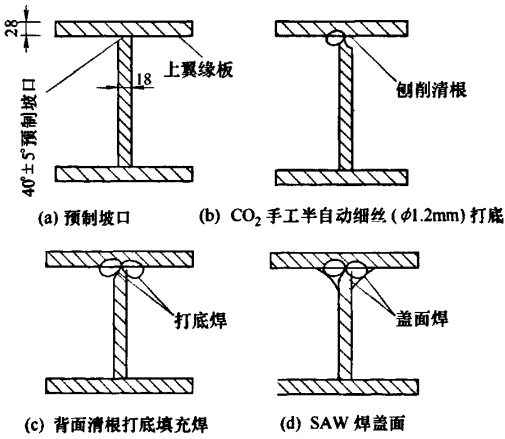


图 2 H 型钢传统焊接工艺方法示意

综上所述，如果使用焊前开坡口或焊缝背面刨削焊根工艺，会带来复杂繁琐的工艺程序，既浪费人力物力，又影响生产周期，成为工程项目的制约因素。而且在诸多工序中，如有一个环节出现故障，就有可能派生出另外一些难以预料的问题。如采用 CO<sub>2</sub> 手工半自动焊或焊

条电弧焊进行多层多道焊打底、填充焊接,一旦出现焊缝中不允许存在的焊接缺陷,势必会造成新的返工损耗和工艺程序的增加,特别是在批量性工程的关键时刻,由于制造时限紧、任务重、周期短、质量要求高,传统工艺带来的繁琐工序是提高生产效率的瓶颈。

## 二、悬空全熔透焊接工艺

当繁琐的传统焊接工艺程序难以满足焊接生产发展需要时,人们急切地希望寻找到的简便快捷的创新捷径。在此情况下,悬空焊接工艺技术再次引起了我们的兴趣,希望通过焊接工艺试验,解决12mm以上的厚板平对接I形焊缝以及H型钢T形船形角接悬空全熔透SAW焊接工艺的难题。

悬空焊接工艺技术焊接特点既不同于焊缝背部带有衬垫物的单面焊双面成形,又不同于带有坡口的单边熔透焊接背部刨削焊根的双面焊。悬空焊接工艺技术虽然普及应用率不同,但其所体现出来的工艺简便快捷、熔深熔融性良好、焊接效率高、质量好、节能降耗以及有益环保等优越性,正有待更多的有效开发与应用。

悬空焊接试验与应用过程中比较注重选择和优化焊接参数、设置焊件条件,因为在悬空焊接过程中,焊接参数值和焊件设置条件既是焊接时焊缝熔深的实际应用参数,也是根据焊件设置的临场情况的不同进行熔深熔透比值的调控环节。当20mm I形坡口焊缝、40/20mm H型钢T形角接焊缝正面焊接时,主导要素就是在工件焊缝相应的深度内进行打底焊接,其熔深熔透比值尺寸由焊接前根据试件形式、厚度、间隙尺寸大小等选择的焊接参数决定,一般来说正面打底熔深掌控在焊件厚度45%~65%左右较为理想,同时也可以做到焊缝底部不焊穿、不挂瘤和不积渣。背面焊缝焊接,要在正面焊缝焊接熔深比值的基础上适当地调节焊接参数,增大电流(约增加正面焊接电流值的10%~15%)以增加背面焊缝熔深,焊透正面焊接余留下的未熔缝隙,如图3和图4所示。

16mm I形坡口、25mm/16mm H型钢T形角接全熔透SAW焊接试验成功之后,紧接着进行18mm、20mm I形、28mm/18mm以及40mm/20mm H型钢的不同厚度类型悬空焊的焊接试验,根据组合试件的具体设置尺寸和板厚,适当有效地调整了焊接工艺技术和参数,也比较顺利地取得了成功。随即正式运用到印度VDT公司奥利萨贾苏古达铝厂批量性钢结构吊车架的焊接工程和南京大古大板梁焊接工程中,均取得了良好效果。

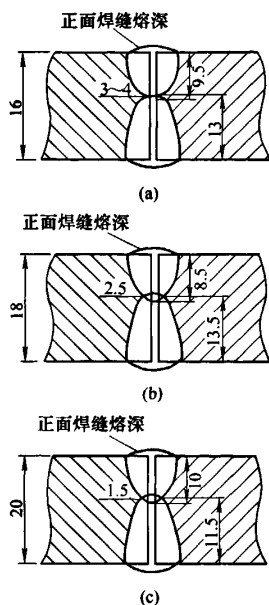


图3 I形坡口正反焊缝熔深交汇示意

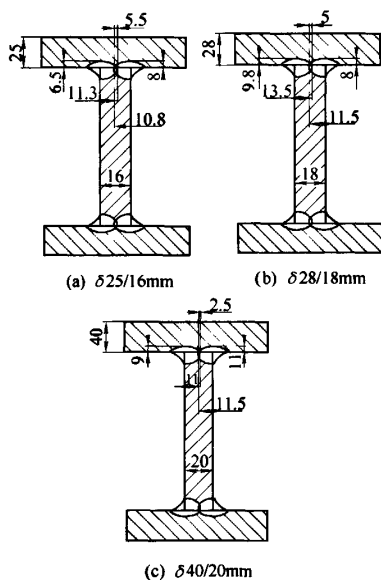


图4 H型钢T形角焊缝正反焊缝熔深交汇示意

## 三、母材试验件检测结果

表1为Q345B母材化学成分和力学性能,表2为I形、H型钢T形全熔透SAW焊接参数。表3为埋弧焊用焊丝化学成分和力学性能。焊接试件经超声波检测合格,焊接接头和焊缝横截面宏观酸蚀检测未发现裂纹、未熔合等缺陷。埋弧焊试件力学性能检测结果见表4。

表 1 Q345B 母材化学成分和力学性能

| 母材厚度<br>/mm | 供货<br>状态 | 化学成分（质量分数，%） |      |      |       |       | 拉伸试验                    |               |            | 弯 曲 | 常温冲击试验                      |     |     |
|-------------|----------|--------------|------|------|-------|-------|-------------------------|---------------|------------|-----|-----------------------------|-----|-----|
|             |          | C            | Si   | Mn   | S     | P     | $R_{\text{eL}}$<br>/MPa | $R_m$<br>/MPa | $A$<br>(%) |     | V 形冲击吸收功 $A_{\text{KV}}$ /J |     |     |
| 16          | 热轧       | 0.15         | 0.43 | 1.44 | 0.015 | 0.012 | 350                     | 520           | 25         | 合格  | 111                         | 112 | 110 |
| 18          | 热轧       | 0.15         | 0.42 | 1.60 | 0.018 | 0.013 | 349                     | 512           | 24         | 合格  | 108                         | 110 | 104 |
| 20          | 热轧       | 0.15         | 0.37 | 1.45 | 0.017 | 0.023 | 345                     | 505           | 22         | 合格  | 91                          | 98  | 122 |

表 2 I 形、H 型钢 T 形全熔透 SAW 焊接参数

| 母材<br>牌号 | 母材厚度<br>/mm | 坡口<br>形式 | 焊接材料           |       | 焊接电流<br>/A          | 电弧电压<br>/V      | 焊接速度<br>/cm·min <sup>-1</sup> | 焊丝下伸<br>长/mm | 焊接<br>极性 | 焊缝<br>要求 | 焊接<br>设备 |
|----------|-------------|----------|----------------|-------|---------------------|-----------------|-------------------------------|--------------|----------|----------|----------|
|          |             |          | 焊丝             | 焊剂    |                     |                 |                               |              |          |          |          |
| Q345B    | 16          | I 形      | H08MnA<br>φ4mm | HJ431 | 750~800/<br>800~830 | 38~40/<br>40~42 | 24±2                          | 25~30        | 反接       | 全熔透      | 威达 1250A |
| Q345B    | 18          | I 形      | H08MnA<br>φ4mm | HJ431 | 710~750/<br>890~920 | 37~39/<br>40~42 | 24±2/<br>20±2                 | 25~30        | 反接       | 全熔透      | 威达 1250A |
| Q345B    | 20          | I 形      | H08MnA<br>φ4mm | HJ431 | 720~750/<br>890~920 | 37~39/<br>40~42 | 24±2/<br>20±2                 | 25~30        | 反接       | 全熔透      | 威达 1250A |
| Q345B    | 25/16       | T 形      | H08MnA<br>φ4mm | HJ431 | 890~920             | 38~40           | 24±2                          | 25~30        | 反接       | 全熔透      | 威达 1250A |
| Q345B    | 28/18       | T 形      | H08MnA<br>φ4mm | HJ431 | 920~950             | 38~40           | 24±2                          | 25~30        | 反接       | 全熔透      | 威达 1250A |
| Q345B    | 40/20       | T 形      | H08MnA<br>φ4mm | HJ431 | 930~980             | 40~42           | 24±2                          | 25~30        | 反接       | 全熔透      | 威达 1250A |

表 3 H08MnA、φ4mm 焊丝化学成分和力学性能

| 化学成分（质量分数，%） |       |      |       |       | 熔敷金属力学性能试验                  |                         |            |             |            |
|--------------|-------|------|-------|-------|-----------------------------|-------------------------|------------|-------------|------------|
| C            | Si    | Mn   | S     | P     | 屈服强度 $\sigma_{0.2}$<br>/MPa | 抗拉强度 $\sigma_t$<br>/MPa | 伸长率<br>(%) | 冲击吸收功<br>/J | 试验温度<br>/℃ |
| 0.08         | 0.039 | 0.95 | 0.012 | 0.013 | 415                         | 510                     | 30.2       | 90          | 0          |

表 4 SAW 试件力学性能检测试验

| 产品规格<br>/mm | 样品规格<br>/mm×mm | 项目<br>序号 | 检测项目                                 | 标准要求                         | 检测结果       | 单项评定 |
|-------------|----------------|----------|--------------------------------------|------------------------------|------------|------|
| 16          | 16×25（2 个）     | 1        | 抗拉强度<br>$R_m$ /MPa                   | 470~630                      | 535, 540   | 合格   |
|             | 18×25（2 个）     |          |                                      |                              |            |      |
|             | 20×25（2 个）     |          |                                      |                              |            |      |
| 18          | 10×10（3 个）     | 3        | 冲击吸收功<br>$A_{\text{KV}}$ /J<br>(20℃) | 三个试样平均值≥34，<br>其中一个试样≥34×70% | 42, 31, 59 | 合格   |
|             | 10×10（3 个）     |          |                                      |                              | 52, 59, 52 |      |
|             | 10×10（3 个）     |          |                                      |                              | 46, 51, 56 |      |

(续)

| 产品规格<br>/mm | 样品规格<br>/mm × mm | 项目<br>序号 | 检测项目                         | 标准要求                               | 检测结果                        | 单项评定 |
|-------------|------------------|----------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------|
| 20          | 16 × 10 (4 个)    | 2        | 180°弯曲<br>试验<br>( $d = 2a$ ) | 单个缺陷长度 ≤ 3mm,<br>单个试样缺陷总长 ≤ 7mm    | 一个 $\phi 2$ mm 夹渣           | 合格   |
|             | 18 × 10 (4 个)    |          |                              |                                    |                             |      |
|             | 20 × 10 (4 个)    |          |                              |                                    |                             |      |
| 40/20       | 20 × 25 (2 个)    | 1        | 抗拉强度<br>$R_m$ /MPa           | 470 ~ 630                          | —                           | —    |
|             | 10 × 10 (6 个)    | 2        | 冲击吸收功<br>/J (20℃)            | 三个试样平均值 ≥ 34,<br>其中一个试样 ≥ 34 × 70% | 46, 67, 62<br>142, 102, 143 | 合格   |
|             | 10 × 10 (3 个)    | 3        | 180°弯曲试验<br>( $d = 3a$ )     | 单个缺陷长度 ≤ 3mm,<br>单个试样缺陷总长 ≤ 7mm    | 无缺陷                         | 合格   |
|             | 20 × 10 (4 个)    |          |                              |                                    |                             |      |

检测结论: 根据 GB/T1591/1994《低合金高强度钢》和 JGJ81—2002《建筑钢结构焊接技术规程》的规定, 判定该试样所检项目合格。

#### 四、应用的效果评估

(1) 通过焊接工艺试验、焊接工艺评定、焊工技能培训考证上岗, 悬空全熔透焊接工艺技术已经成功运用于国内外钢结构工程中。从试验中所积累的情况分析, I 形、H 型钢 T 形角接悬空全熔透焊接的最大厚度依然有提升空间。

(2) 悬空全熔透焊接新工艺技术的先进性主要体现在产品焊接制造的高效率。比如从原焊接制造工艺的 15 道工序中, 减除了气割坡口、碳弧气刨削清根和清理打磨熔渣等 9 道工序, 节省大量的人力物力, 缩短了生产周期。悬空焊接新工艺技术只需用原焊接制造工艺 30% 左右的生产时间和成本, 就可以保质保量按时完成焊接制造任务, 提高焊接效率 2~4 倍以上。

(3) 悬空全熔透焊接工艺技术的先进性, 还体现在焊接质量的稳定性上, 无论从宏观表征或在微观焊接质量上来说, 全自动焊接比焊条电弧焊接要稳定得多。焊缝平整光洁、宽窄度适中, 无气孔咬边缺陷, 100% 超声波探伤焊缝内外质量符合 GB11345B 级检验的 II 级以上标准。

焊缝横截面抛光酸洗后, 显现出来的正反两面焊接的焊缝, 单边熔深尺寸分别是:  $\delta 16$ mm 为 9.5 ~ 13.0mm;  $\delta 18$ mm 为 8.5 ~ 13.5mm;  $\delta 20$ mm 为 10 ~ 11.5mm, 熔透混合交汇部分分别为 3 ~ 4mm、2 ~ 2.5mm、1.5mm。H 形钢 T 形角接焊缝熔深分别是: 25mm/16mm 为 10.8 ~ 11.3mm; 28mm/18mm 为 11.5 ~

13.5mm; 40mm/20mm 为 11 ~ 11.5mm。正反对称顺序焊缝熔深交汇尺寸为 5.5mm、5mm、2.5mm。截面所形成的结晶组织光洁细腻、无裂纹、无气孔等缺陷。

悬空全熔透焊接新工艺的另一个特点是, 由于焊接中焊接材料填充量大为减少, 约占原焊接工艺 V 形坡口填充量的 1/3 或 2/5 左右, 因此这也是一项对母材和焊材的节约措施。

焊缝金属中焊材合金组合元素成分相对弱化, 这对焊缝力学性能可能产生影响。但是从焊接试件的力学试验结果来看, 无论是弯曲、抗拉强度、屈服强度、冲击功值等都在 GB/T1591—1994《低合金高强度钢》和 JGJ81—2002《建筑钢结构焊接技术规程》合格标准之列, 说明 Q345B 母材与 H08MnA 焊丝 HJ431 焊剂匹配进行全熔透 SAW 焊接, 其焊缝力学性能是可靠的。

(4) 悬空全熔透焊接工艺技术更是一项降低生产成本的焊接工艺。由于焊缝母材不需要开坡口和清理焊根, 仅此一项就可节约大量母材和焊材。另外, 将原工艺 100% 的 15 道工序减为 6 道工序, 因而从源头上批量性地节省了人力物力, 节能降耗效果显著。

(5) 有资料显示, SAW 焊接烟尘挥发量仅为焊条电弧焊的 1/53,  $\text{CO}_2$  气体保护焊的 1/26, 同时焊工也相对从原焊接工艺的明弧高温作业中解脱出来, 摆脱了焊条电弧焊、碳弧气刨、氧乙炔切割以及风动砂轮机的清理打磨等带来的有毒有害粉尘、气体、弧光和噪声的近距离困扰和伤害。MW

(20090927)