

# 新型Ni-Cr耐蚀合金换热器管板 焊接工艺评定及组织研究



扫码了解更多

■ 梁向荣, 于海成, 严与辉, 刘咏咏, 吴鸿鸣, 崔彦龙

**摘要:** 本文对铁素体型不锈钢换热管与奥氏体型不锈钢管板进行了焊接工艺评定, 研究了焊缝宏观、微观组织, 试验表明管板-管处焊缝金相形貌良好、热影响区与熔合区过渡处无过烧组织、无淬硬马氏体组织、无网状析出物和网状组织, 为后期新型耐蚀合金的开发、实际生产提供参考依据。

**关键词:** 焊接工艺评定; 管板; XDS; Ni-Cr合金

目前换热器是广泛用于石油、化工、冶金等工业领域的热交换设备。在热交换器生产过程中, 管板与换热管的焊接是极为重要的一环, 管接头焊接质量的好坏直接决定换热器能否正常工作, 绝大多数换热器的损坏和失效都是因为焊接接头出现问题。首先, 在进行焊接时容易出现管壁熔透和焊缝未熔合等焊接缺陷; 其次, 数量众多且密集分布的焊缝会造成焊接时管板上下不同区域存在着严重的热输入分配不均, 这两个问题会造成管接头的焊接质量下降和较为严重的管板变形, 对换热器的密封性造成了威胁; 再次, 换热器还更多的用于各种酸腐蚀环境中, 甚至某些设备对焊接接头耐酸腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀性能也同样要求严格, 其焊接连接质量的好坏直接关系到换热器的安全、稳定运行, 可能造成直接的经济损失。

本文以宣达实业集团公司自主研发新型Ni-Cr合金铁素体不锈钢(以下简称XDS—I)无缝管与高合金奥氏体不锈钢(以下简称XDS—II)板材焊接为例, 对其焊接工艺评定进行分析, 并结合换热器管板工艺评定试件制备要求, 对制备完成的试样焊缝进行检验及探讨。

## 1. 试验材料

(1) 试验材质 XDS—I 材质是铬质量分数为25%~30%的铁素体不锈钢, XDS—II 材质是铬质量分数为24%~26%, 镍质量分数为19%~22%的奥氏体

不锈钢。两种材质具有良好的力学性能和耐蚀性能。试验所用管和板材性能如表1、表2所示。

(2) 材料主要应用 换热管板XDS—II 采用高铬钼合金化特种金属材料, 在强氧化性介质中具有优良的耐蚀性能。其主要用于制造耐200℃、98.6%~100%硫酸的泵、阀、罐、塔、管线等流程装备和发烟硫酸流程装备。

换热管XDS—I 是采用高铬合金化, 并采用钛铌双稳定的超纯铁素体不锈钢材料。其耐浓硫酸性能优良, 与换热管板XDS—

表1 力学性能

| 力学性能   | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率 (%) |
|--------|----------|----------|---------|
| XDS—I  | ≥450     | ≥275     | ≥22     |
| XDS—II | ≥624     | ≥314     | ≥42.6   |

表2 耐腐蚀性能

| 温度/℃                               |        | 80    | 100   | 120   | 150   | 200   |
|------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 98%硫酸中的腐蚀速率<br>/mm·a <sup>-1</sup> | XDS—I  | 0.060 | 0.048 | 0.073 | 0.056 | 0.095 |
|                                    | XDS—II | 0.28  | 0.48  | 0.50  | 0.98  | 0.075 |

Ⅱ 材质性能相当，且换热管材质耐海水和氯离子腐蚀能力更佳，主要应用于硫酸生产系统流程中的流程装备制造，可在相关领域代替换热管板XDS—Ⅱ 相同材质产品，可在海水淡化系统流程中制造冷凝器、换热器等流程装备。

(3) 管-板试件制备 换热管-板试件制备依据NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》附录D的规定，并遵循GB151—2014《热交换器》中8.8.2.1换热管与管板焊接连接相关要求。由于管板焊缝焊接采用角焊缝，选用的管板厚度应不小于20mm，本试验换热管规格为 $\phi 25\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，长度80mm。换热管板规格为 $\phi 120\text{mm}$ ，厚度30mm，试板上加工7个 $\phi 25.1\text{mm}$ 的孔，排列如图1所示。管板焊后实物如图2所示。

## 2. 焊接工艺评定试验

(1) 焊接性分析 换热管板XDS—Ⅱ 材质组织为奥氏体，焊接性能良好，但容易产生晶间腐蚀和焊接热裂纹缺陷。由于奥氏体组织不锈钢导热系数小，而线膨胀系数大，焊接过程中易于产生拉应力，且奥氏体组织不锈

钢在结晶时晶粒间存在很薄的液相层，塑性很低，所以其焊接热裂纹倾向较为严重，焊接过程需严格控制热输入。

换热管XDS—Ⅰ 材质组织为铁素体。一方面，比马氏体不锈钢的延迟裂纹的敏感性小，焊接性能优良；另一方面，碳和氮在铁素体基体中的溶解度非常低，在焊接加热后冷却过程中（即使急冷）难以防止晶间碳化物、氮化物析出，在焊缝和焊接热影响区（HAZ）晶粒粗大更增加了C、N化物的浓度，从而使铁素体不锈钢的焊接接头急剧脆化和晶间腐蚀敏感，这一现象是铁素体钢使用焊接性不良妨碍其焊接结构使用的主要原因。而本试验换热管材质中C+N元素总含量 $\leq 0.025\%$ ，相比普通铁素体不锈钢材质大幅度降低了C、N的含量，在很大程度上改进了铁素体不锈钢的抗晶间腐蚀和使用焊接性及其他综合性能，同时，为了防止其晶间腐蚀，通过采用小的

热输入，快速冷却等方法，降低热影响区敏化温度区的高温停留时间，使之处于稳定状态。

(2) 焊前准备 焊接前，应对待焊区域表面严格清理，清除全部碳氢化合物，去除油污、锈等杂质污物，呈现出金属光泽。坡口尺寸和形式属于次要因素，其变更对焊接接头性能基本影响不大，但对焊缝成形质量等有重要作用。因此，坡口尺寸按图1换热管坡口要求进行加工。

(3) 焊接方法 本试验采用手工钨极氩弧焊（GTAW），因其热源较集中，又有氩气保护冷却作用，其焊接热影响区较窄，晶粒长大倾向小，焊后不需要清渣，可以全位置焊接。且氩气保护效果好，合金元素过渡系数高，焊缝成分易于控制，同时隔离了空气对熔化金属的有害作用，是奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢最合适的焊接方法。

(4) 焊接材料 本次试验评定考虑换热管与管板各方面性能因素，焊接材料全部由公司自主研发。焊丝是采用基于换热管板相似材质XDS—Ⅱ，规格 $\phi 2.0\text{mm}$ ，化学成分如表3所示。

(5) 焊接参数 焊接参数的选择对焊接质量的好坏至关重要。本文试验考虑到为保证焊缝质量性能，采用手工钨极氩弧焊，钨极氩弧焊主要焊接参数如表4所示。

(6) 操作要求及注意事

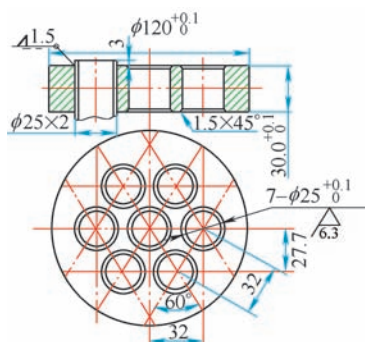


图1 管板结构与形式示意



图2 管板焊后实物

表3 焊丝化学成分（质量分数）（%）

| 牌号                  | C           | Si         | Cr        | Ni        | Cu      | S            | P            |
|---------------------|-------------|------------|-----------|-----------|---------|--------------|--------------|
| XDS—Ⅱ<br>(XD—NiS—3) | $\leq 0.03$ | $\leq 2.0$ | 26.0~28.0 | 20.0~23.0 | 0.8~1.0 | $\leq 0.030$ | $\leq 0.045$ |

表4 焊接参数

| 焊层  | 焊接方法 | 填充材料  |               | 焊接电流 |        | 电弧电压  | 焊接速度                  | 热输入                  |
|-----|------|-------|---------------|------|--------|-------|-----------------------|----------------------|
|     | GTAW | 焊丝牌号  | 规格 $\phi$ /mm | 极性   | /A     | /V    | /cm·min <sup>-1</sup> | /kJ·cm <sup>-1</sup> |
| 定位焊 | GTAW | XDS—Ⅱ | 2.0           | DCEN | 90~120 | 14~16 | —                     | ≤13                  |
| 1   | GTAW | XDS—Ⅱ | 2.0           | DCEN | 90~120 | 14~16 | 18-22                 | ≤13                  |

项 ①XDS—Ⅰ、XDS—Ⅱ材质对焊缝周围油污等杂物比较敏感，故焊前必须对焊缝坡口及管口位置及附近油污、杂物等清理干净直至露出金属光泽。②XDS—Ⅰ、XDS—Ⅱ材质需要选择小的焊接热输入，必须严格控制。③钨极氩弧焊焊枪钨棒锥度磨成60°左右，保证电弧集中稳定，同时调整好钨极伸出喷嘴长度，对于管板焊接角焊缝伸出长度选择3~4mm，以更好的保护熔池，提高焊缝质量。④为防止熔池合金元素烧损和氧化，保护气体氩气纯度要求99.99%，气体流量选择8~10L/min。⑤试件在室内焊接，采取防风 and 换气措施，保证焊接环境不受影响。

(7) 焊接记录 焊接事项准备完成后，将管板和换热管样固定，伸出长度3~5mm，并调整均匀。焊接试件人员应取得相应焊工证书，并有焊接换热管板的经验，焊接时必须严格按照焊接作业指导书的工艺参数和顺序要求施焊。实际焊接参数如表5所示。

3. 焊接检测

焊接完成后，对焊接试件进行检测，由于角焊缝受力较小，因此主要进行外观检测、渗透检测及角焊缝厚度测定。任取呈对角线位置的两个管接头切开，两切口互相垂直，切口一侧面应通过换热管中心线，该侧面即为金

相检测面，共有7个，其中应包括一个取自接弧处，焊缝根部应焊透不允许有裂纹、未熔合（见图3），试样切片焊缝根部位置熔合良好，无裂纹和未熔合等缺陷，均符合要求。

(1) 外观检测 外观检测要求焊缝平整光滑，焊缝均匀，表面无肉眼可见裂纹。试样焊缝经检测符合要求。

(2) 渗透检测 渗透检测时需对焊缝表面清理干净，着色剂着色时间不宜过长或过短，显像剂要喷涂均匀，保证整个渗透检测的准确性。每道焊接接头按照NB/T47013.5规定进行PT渗透检测，无裂纹为合格。本试验焊

后管板试样经渗透检测后焊缝无裂纹，符合NB/T47013.5规定渗透检测PT规定，如图4所示。

(3) 焊缝厚度测定 在每个金相检测面上测定。每个角焊缝的厚度都应 $\geq 2b/3$ （为换热管公称壁厚），即厚度 $\geq 1.33\text{mm}$ 。经游标卡尺测量，角焊缝厚度均 $> 1.33\text{mm}$ 符合标准规定，实际测定值如表6所示。

4. 金相检测及组织分析

(1) 管板焊接试样接头组织分析 体式显微镜10倍金相组织：采用莱卡M205C体视显微镜，对管板焊接试样接头组织进行宏观观察，如图5所示。

从图5可知，1~7号试样，焊缝整体熔合界面稳定，其中序号3焊缝熔敷金属较多，可以推测电压有轻微波动，热输入较高，但焊缝熔敷金属整体上组织

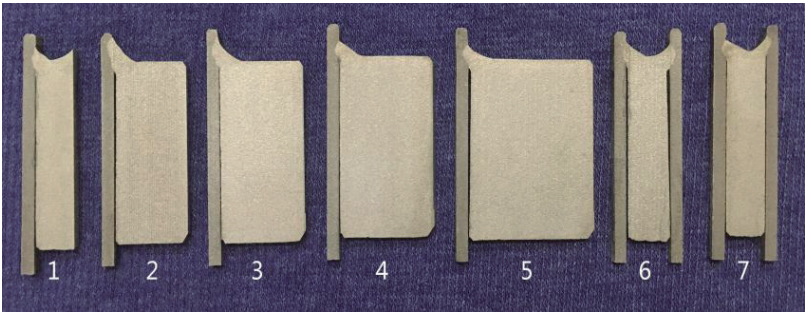


图3 管板焊接试样接头切片实物

表5 实际施焊参数

| 焊层  | 焊材牌号  | 焊丝规格 $\phi$ /mm | 焊接位置 | 焊机型号    | 钨极直径/mm | 电源极性 | 氩气流量/L·min <sup>-1</sup> | 焊接电流/A | 电弧电压/V | 焊接速度/cm·min <sup>-1</sup> |
|-----|-------|-----------------|------|---------|---------|------|--------------------------|--------|--------|---------------------------|
| 定位焊 | XDS—Ⅱ | 2.0             | 2G   | WSM—400 | 2.0     | DCEN | 10                       | 100    | 14     | —                         |
| 1   | XDS—Ⅱ | 2.0             | 2G   | WSM—400 | 2.0     | DCEN | 10                       | 120    | 14     | 20                        |

表6 角焊缝厚度测定值

| 焊缝序号  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 厚度/mm | 1.4 | 1.6 | 1.4 | 1.5 | 1.9 | 1.4 | 1.6 | 1.6 | 1.8 |

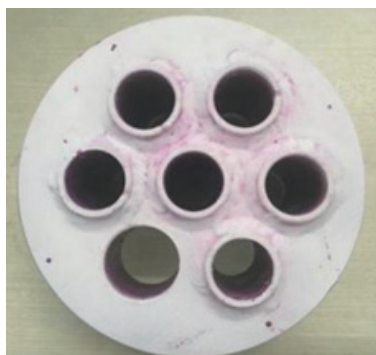


图4 管板试样渗透检测

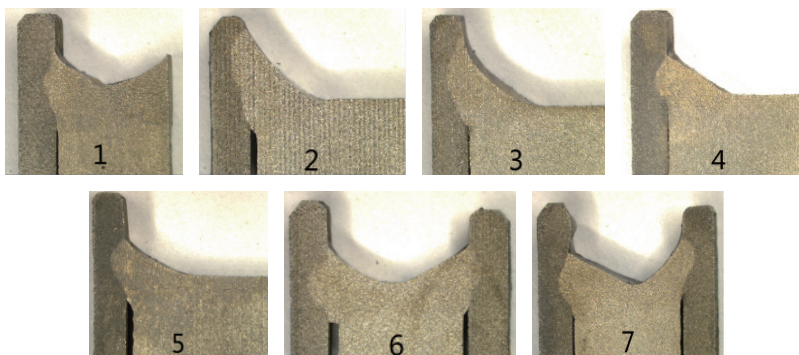


图5 体式显微镜10倍金相组织

分布良好。

通过以上7张管板及焊缝的10倍观察金相形态,可以看出,管与管板的焊缝宏观显微组织,无明显缺陷,形貌良好,无裂纹、未熔合、未焊透等缺陷。

焊缝熔合区金相组织分析:金相组织检测按GB/T13298—2015《金属显微组织检验方法》评定。图6为XDS—I熔合区金相组织,图中左侧为XDS—I母材,中间区域为热影响区,右侧焊缝区,从熔合区金相组织可以看到,熔合区过渡良好,熔合线明显,没有发现缺陷,熔合区焊缝一侧晶粒 $20\sim 30\mu\text{m}$ ,而在过渡段(椭圆形区域)的热影响区的组织相对较细,比较均匀,无过烧组织、无裂纹,无网状析出物和网状组织。

图7熔合区金相组织,左侧为XDS—II母材,中间区域为热影响区,右侧焊缝区,熔合区的过渡也是良好,熔合线明显,无缺陷,熔合区焊缝一侧呈粗大柱状晶,过渡段(椭圆形区域)的热影响区相对较细,整体组织比较均匀。因焊缝区的化学成分与母材相近,金相组织仍是奥氏体组织,焊缝中间晶界被腐蚀较少,但仍然可以看到焊缝侧具有

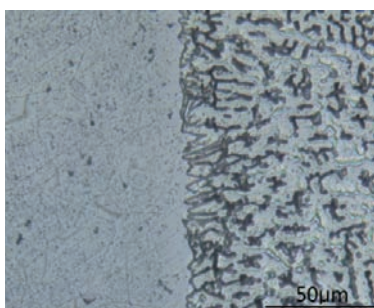


图6 XDS—I 熔合区

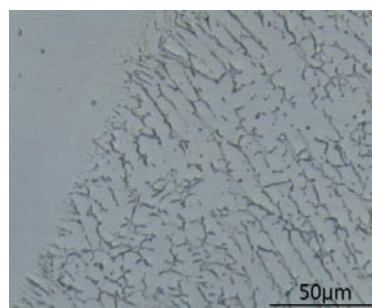


图7 XDS—II 熔合区

均匀的组织形态、无过烧组织、无裂纹。

通过以上金相组织观察分析,换热管板焊接接头组织分布良好,符合微观组织检验要求,满足焊接工艺评定要求。

## 5. 结语

(1) 本文对公司自主研发新型耐蚀Ni-Cr合金XDS—I(铁素体不锈钢)管件与XDS—II(奥氏体不锈钢)材质管板进行了焊接工艺评定,符合NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》附录D的规定,可以指导企业实际生产需要,满足产品工艺性要求。

(2) 换热管板焊缝外观及宏观金相形貌良好,无裂纹、未熔合、未焊透等缺陷,焊缝合格。焊缝切面微观金相组织热影响区与熔合区过渡良好,无过烧组织、无淬硬马氏体组织、无网

状析出物和网状组织。

(3) 本次管板焊接工艺评定及组织分析,为后期新型耐蚀合金的开发及企业以实际生产提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] 唐照国,等. 换热器管板与换热管的焊接[J]. 金属加工(热加工), 2015(2): 46-48.
- [2] 刘焕安,叶际宣. 硫酸工业用XD系列特种金属材料研发与应用概述[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2008(6).
- [3] 于海成,等. 浅析耐硫酸腐蚀用不锈钢的应用现状与发展[J]. 中国化工装备, 2017(5).

作者简介: 梁向荣等, 宣达实业集团有限公司。

MW 20180415