

# 护航热交换器安全可靠运行

**热交换器管子-管板接头的焊接、射线检测与过程控制**——本文介绍了德国巴斯夫公司的金属列管式热交换器的管子-管板接头要求-设计、制造以及试验技术标准(E-S-MC 931:2016)中对管子-管板接头的焊接、内部缺陷检测和过程管理部分的要求,该标准已在巴斯夫公司世界各地包括中国的石油化工项目得到普遍实施,部分参与巴斯夫项目的中国制造厂的热交换器管子-管板连接接头制造质量得到显著提高,明显降低了泄漏及引起的各类事故损失,取得明显经济效益,促进了我国热交换器标准规范的进步。

文 / 顾明

**热** 交换器是炼化行业最主要工艺设备之一,炼化工业的不断发展已经使得装置和装备的大型化得到了充分的发展,管壳式热交换器目前还是得到最多应用的热交换器设备形式,其在使用中发生的最普遍问题之一就是管子与管板连接接头(以下简称“接头”)失效造成泄漏,进而造成装置运行风险如停车的经济损失,环保、安全等其他事故造成的其他损失。

充分考虑了设计因素后,在制造过程中如何有效保证接头质量成为保证热交换器长期安全、稳定以及可靠运行的重要因素,改革开放后对外合作需要使得广

泛使用的国际标准和一些国际大公司规范在国内得到比较普遍采用,促进了国内制造业的设计、制造水平。

德国巴斯夫公司 E-S-MC 931:2016《管子-管板接头要求-设计、制造、试验技术标准》是在金属制热交换器方面很有特色的一个技术标准,本文仅介绍其中对接头的焊接和内部缺陷检测(主要是射线检-RT)以及过程控制要求,该标准已在巴斯夫公司世界各地石油化工项目得到普遍应用并经数次修订,统计显示对接头做内部缺陷检测后热交换器投用3年内发生泄漏概率比不做的降低了90%以上。

自上世纪末在国内一些制造厂成功实施以来,结合标准的其它要求的实施极大提高了国内热交换器制造质量,也促进了标准规范的进步。

## 概述

对于需对接头做射线检测的热交换器,制造厂需按规定程序执行下列工作:按规定编制模拟件焊接工艺评定文件并获得业主方批准;准备模拟件材料;提前正式通知业主见证模拟件的制作和检验全过程,出具评定报告;检验合格仅代表参与考核的焊工取得设备上接头的焊接资格,且其资格在一定期限内有效;设备制造过程中接头焊接前后全过程仍需在业主或其检验代表的检验监督之下完成;对设备的接头做射线检测并出具报告;其他检验合格后即得到合格的接头。

必须按要求编制项目文件且获得业主批准,接头焊缝的基本要求见图1: $t \geq 2 \text{ mm}$  时  $r \geq 0.9t$ ;  $t < 2 \text{ mm}$  时  $r \geq t$ ,表1是焊接接头优先采用的形式,采用其他形式必须事先征得业主同意。

PROCESS-Tip

\* 更多信息请扫描二维码:



chem.vogel.com.cn

\* 反馈编码: A200941

本文作者供职于扬子石化-巴斯夫有限责任公司项目组。

焊接接头制造通用要求

管束组装前管头、管板和折流板等检验合格且达到规定的清洁标准，焊接区域的清洁状态必须保持到焊接工作完成。制造厂必须做好过程检查的准备工作，保证管头和管板孔能被检查到处于清洁状态。

施焊前需要对管头定位或固定：可采取定位胀；碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢和双相钢可采用有焊材或无焊材点焊（无焊材时采用 TIG 工艺），管板垂直安装时定位点焊的位置在时钟 12 时方位；不得在焊接区域使用有色金属、锌材和低熔点合金工具（如推拔工具、锚片以及胀接工具头等）；不得采用先胀后焊工艺。

图 1 中  $t$  为换热管最小壁厚，接头焊接要求：至少焊二层焊道。只能采用下列焊接方法：GTAW（TIG）（手工焊或全机器焊时）、GTAW/SMAW 氩电联焊以及 SMAW 手工电弧焊。仅在使用机器焊接垂直摆放管板时允许下坡焊工艺；收弧点必须越过起弧点两倍于焊道宽度的距离。多道焊时，后续焊道须完全覆盖底部焊道，且起收弧点须与底部焊道起收弧点错开。焊肉延伸超过管子内侧的尺寸允许值要求见表 2 序号 9。上述要求和可能出现

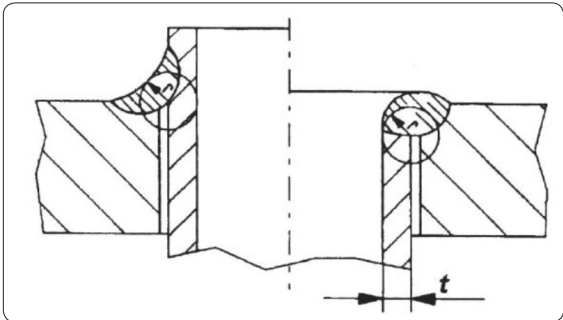


图 1 确定焊缝厚度尺寸“ $r$ ”（ $r$ ：焊肉厚度， $t$ ：管子最小壁厚）

表 1 接头型式和尺寸要求（注：公差按 ISO 2768 m 级）

| 编号 | 外形 | 提示                | 要求                                               |
|----|----|-------------------|--------------------------------------------------|
| A  |    |                   | $X=0 \sim 2 \text{ mm}$                          |
| B  |    | $t = \text{管壁厚度}$ | $a=t$<br>$x=0 \sim t-1 \text{ mm}$               |
| C  |    |                   | $a=t$<br>$x=t-1 \text{ mm}$                      |
| D  |    |                   | $a=t$<br>$R=t$<br>$X=0 \sim t-1 \text{ mm}$      |
| E  |    | 易焊穿换热管            | $t \geq 2.6 \text{ mm}$<br>$x \geq 6 \text{ mm}$ |

的局部返修均需编成方案，事先得得到业主批准（本文不介绍对接头的胀接要求）。

焊接接头制制造方法评定（模拟焊接试验）

准备和施焊

制造厂都需经过模拟焊接试验考核，目的之一是评定制造商的焊接工艺，其次是测试焊工的操作技能，只有按本技术标准考核合格的焊工才能执行设备上接头的焊接工作。有下列情况之一时，可以在得到业主同意后免于模拟焊接试验：在过去 12 个月内的与产品可类比的 PQR 或模拟焊接试验报告；可比较的且有效的工艺评定试验或可比较的模拟焊接试验虽然超过了 12 个月，但可

查实在过去 12 个月内制造过可比较的设备；制造厂对管头焊接经验丰富且持续为巴斯夫公司制造类似产品，其质保体系经过了巴斯夫定期考核。超过期限均需要重新考核焊接工艺和焊工技能。

模拟焊接试验的材料分类和覆盖按 CEN ISO/TR 15608《焊接·金属材料分类体系指南》和 ISO 15614-1《金属材料焊接程序的规范和鉴定》标准，每个焊工至少焊接 4 个接头供评估，如不合格则需重新考核。模拟件焊接试验需要包括对接头的返修工艺，返修工艺考核需另外做最少 4 个焊接接头进行考核，并考虑针对不同类型及部位的接头，2 个针对局部返修，2 个针对管板上接头全部返修的工艺评定，事先提交业

主批准的模拟焊接试验文件应包括返修工艺文件。

制造厂必须按业主批准的模拟焊接试验工艺提前申请业主见证模拟件制作和测试过程，根据管子外径  $d_a$ ，试件管子应按下列要求排列布置，详见图 2。

1. 三角形布管

$d_a \leq 40\text{ mm}$  时，不少于 10 根管子；

$d_a > 40\text{ mm}$  时，不少于 10 根管子

b) 正方形布管

$d_a \leq 40\text{ mm}$  时，不少于 12 根管子；

$d_a > 40\text{ mm}$  时，不少于 9 根管子。

根部焊道应从 A-A 或 B-B 截面起弧。固定点焊至少焊两点，应处于 A-A 或 B-B 截面上。须对固定点焊位置和类型进行记录；采用固定点焊时，根部焊道起弧点不得处于点焊位置。直至焊接完成均不允许对焊缝进行打磨或机械加工；要求焊缝高度一致，焊肉不过度堆积。

对模拟件的检验试验

对模拟焊接必须按本标准以及 EN 15614 作评定，焊接工作完成后首先通过标准要求的过程检验、最终目视检测和表面裂纹检测（略）。合格后把模拟件机加工到  $6 \sim 8\text{ mm}$  厚度后，对所有的管-管板接头按 ISO 17636 B 级进行射线检测，探伤方法如图 3 a)，接受标准见表 2；沿 A-A 和 B-B 截面切开试件（图 2），对每一接头的截面做宏观金相检查。在采用一块试样对多名焊工的技能做评定时，要求纵、横剖面都要包含每名参加评定焊工的焊缝；评介宏观金相截面上每个接头质量，测量焊肉厚度，测试报告需体现

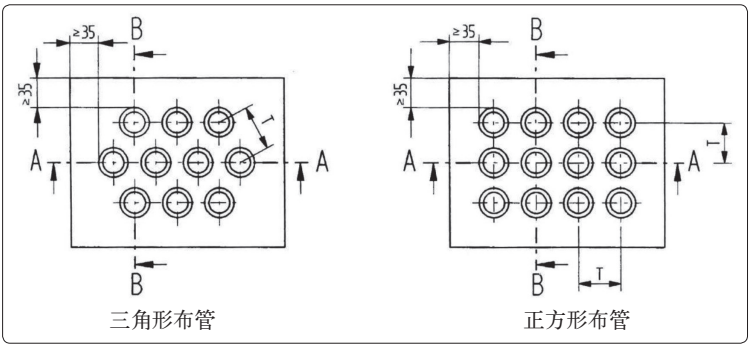


图 2 模拟件试样布管图（图中 T 代表管间距；A-A 和 B-B 代表宏观截面）

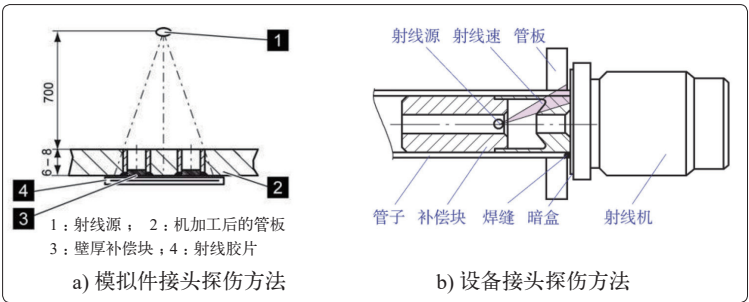


图 3 对模拟焊接试样与设备接头的射线检测

表 2 焊接试样宏观检测和射线检测的接受标准

| 序号 | 缺陷名称                         | 图示              | 接受标准                                                                                                                                             |
|----|------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 裂纹                           | 所有的裂纹类型         | 不合格                                                                                                                                              |
| 2  | 条状气孔<br>虫形气孔                 |                 | 不合格                                                                                                                                              |
| 3  | 局部密集气孔                       |                 | 不合格                                                                                                                                              |
| 4  | 球形气孔<br>均布气孔<br>链状气孔<br>表面气孔 |                 | 气孔最大允许直径：<br>$d_{\max} \leq 0.25 t$<br>气孔最大允许直径 $\leq d_{\max}$ ；<br>每个接头不超过 2 个；<br>环周方向气孔间隔 $\geq 2 d_{\max}$<br>气孔总数（管子-管板所有接头）<br>$\leq 6$ 个 |
| 5  | 固体夹杂                         |                 | 不合格                                                                                                                                              |
| 6  | 未熔合                          |                 | 不合格                                                                                                                                              |
| 7  | 未焊透                          |                 | 局部未焊透深度 $h \leq 0.5\text{ mm}$                                                                                                                   |
| 8  | 未焊满                          |                 | 焊缝厚度“r”为焊根至焊表的最短距离，“t”为公称壁厚<br>当 $t \geq 2\text{ mm}$ ： $r \geq 0.9 t$<br>当 $t < 2\text{ mm}$ ： $r \geq t$                                       |
| 9  | 焊瘤                           |                 | 当管子外径 $d_a \leq 25\text{ mm}$ ：<br>$x \leq 0.5\text{ mm}$<br>当管子外径 $d_a > 25\text{ mm}$ ：<br>$x \leq 1\text{ mm}$                                |
| 10 | 根部焊接不当                       | 根部焊道必须被后续焊道完全覆盖 | 不合格                                                                                                                                              |

每一名焊工的所有工作。对有加工硬化倾向的材料、奥氏体钢和铁素体钢的异种钢焊接等，应按相关标准做硬度检测；对有延迟裂纹倾向的材料，射线检测应至少延迟到焊接工作完成适当时间后进行。标准对工艺评定试验、试样接头焊接以及设备接头焊接的可比性和覆盖范围做了明确规定。

自动焊试样

当焊接工作由自动焊机执行时，应做一个与管子-管板接头相同的试样。其接头焊接工作需考虑工作中可能发生的各种情况和问题，至少需要在试样上各考虑一个这样的焊接接头：每台自动焊机每个班次开始工作时、设定机器焊接参数时、更换钨极时、更换焊丝时以及设备发生故障时等等，其他要求同上。

设备上接头的检验和试验

邀请业主对接头做内部缺陷的检测（RT/UT），为避免不同检测方法的对某些缺陷存在的检出条件限制，需执行预先批准的检测工艺；必须采用业主委托的专业检测承包商，满足一定条件时也可采用制造厂或其他资源；除非特别说明，检测工作必须在制造厂及质保体系下完成，优先采用棒阳极 X 射线检测方法，如图 3. b)，或可采用 Ir192 射线检测方法。

由业主委托的检测公司随机抽取一组接头进行射线检测，所选取的接头必须包括所有施焊的焊工，且这些的接头必须抽到：特殊结构的、焊接位置受限的、经过返修的以及在目视和表面检查时发现缺陷和有疑问的，数量一般不超过表 3。

单块管板上超过 1 200 个接

表 3 设备接头做 RT 的范围和相应措施（UT 时间）

| 单件管板上管子-管板接头数                                  | 第一次或第二次抽检接头数 c)      | 第一次抽查中检出的缺陷数 | 第二次抽查中检出的缺陷数 | 措施 a) |          |     |   |  |
|------------------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|-------|----------|-----|---|--|
|                                                |                      |              |              | I     | II       | III |   |  |
| ≤ 50                                           | 8                    | 0            | 不需做第二次抽查     | X     |          |     |   |  |
| 51-90                                          | 13                   | ≥ 1          | 不接受第二次抽查     |       |          | X   |   |  |
| 91-150                                         | 20                   |              |              |       |          |     |   |  |
| 151-280<br>281-500<br>501-1 200<br>1 201-3 200 | 20<br>32<br>50<br>80 | 0            | 不需做第二次抽查     | X     |          |     |   |  |
|                                                |                      | 1b)          | 0            |       | X        |     |   |  |
|                                                |                      |              | ≥ 1          |       |          | X   |   |  |
|                                                |                      | ≥ 2          | 不接受第二次抽查     |       |          | X   |   |  |
|                                                |                      | 3 201-10 000 | 125          | 0     | 不需做第二次抽查 | X   |   |  |
| 1b)                                            | 0                    |              |              |       | X        |     |   |  |
|                                                | 1                    |              |              |       | X        |     |   |  |
|                                                | 2                    |              |              |       | X        |     |   |  |
|                                                | ≥ 3                  |              |              |       |          | X   |   |  |
| 2b)                                            | 0                    |              |              |       | X        |     |   |  |
|                                                | 1                    |              |              |       | X        |     |   |  |
|                                                | ≥ 2                  |              |              |       |          | X   |   |  |
| ≥ 3                                            | 不接受第二次抽查             |              |              |       |          | X   |   |  |
| 10 001-3 5000                                  | 200                  |              |              | 0     | 无需二次抽查   | X   |   |  |
|                                                |                      |              |              | 1     |          |     | X |  |
|                                                |                      |              |              | 2b)   | 0        |     | X |  |
|                                                |                      | 1            |              |       | X        |     |   |  |
|                                                |                      | 2            |              |       | X        |     |   |  |
|                                                |                      | ≥ 3          |              |       |          | X   |   |  |
|                                                |                      | 3b)          | 0            |       |          | X   |   |  |
|                                                |                      |              | 1            |       | X        |     |   |  |
|                                                |                      |              | ≥ 2          |       |          | X   |   |  |
|                                                |                      | ≥ 4          | 不接受第二次抽查     |       |          | X   |   |  |

I: 该管板的接头验收合格；II：该管板上的接头第一次探伤不合格后，经返修并重新探伤后接头验收合格；III：该管板的管子-管板接头不予验收，制造厂采取后续措施前必须得到业主同意。b) 必须做第二次检测。

头时，制造厂必须把在进度计划中考虑 RT 和返修纠正时间，承担纠正措施导致的额外费用（包括重复检验）。按照表 3 要求确定检测范围，以每块管板作为一个检测工作包，对检测和返修工作同时适用；在使用焊机完成单块管板多于 3 200 个接头焊接时，事先经过业主批准，允许存在不符合表 3 的抽检频率。特殊情况下，因技术原因无法做 RT(棒阳极和 Ir192)

及 UT 检测时，项目工程师、制造厂和业主焊接工程部门须协商一致采用其他无损检测方法确保制造质量，采用其他方法时管理程序与表 3 同。

对接头的评定、设备焊接、各类检测和返修等记录及报告都必须符合规定要求

射线检测程序

按照表 3 的确定每块管板检测的接头数量，如果检测出的

缺陷数量达到定义的数量，则须在此管板上加倍抽取其他接头做检测；

如果第一次抽检未发现缺陷，则接受该管板上所有接头（执行表 3 措施 I）；

如果第一次或第二次抽检中发现的缺陷数量不超过表 3 规定的上限，则接受此管板上其它未被检测的接头，仅须返修发现有缺陷的接头，并对返修后的接头重新检测（执行表 3 措施 II）；

如果检测发现的缺陷等于或多于表 3 数量上限，视为该管板上所有的接头可能存在缺陷，执行表 3 的措施 III。典型做法是重做此管板上的所有接头且重新检测，返修工艺必须得到业主批准，返修后重新进行检测评定；或在协商一致的情况下对此管板上所有接头做 100%检测；

除非另有说明，首次检测的费用（表 3 中第一次抽样检测、特殊情况下第二次抽样检测）属于业主，返修及返修后重新检测的费用由制造厂承担（措施 II）。实施措施 III 时，制造厂承担 100%检测费用，或整体返修及按表 3 要求重做所有检测的费用，制造厂还要承担因返修和重做造成推迟交货的责任。

评价射线检测结果

以表 2 对缺陷标准的定义（裂纹、条状气孔 / 虫形气孔 / 局部密集气孔、未融合以及根部未焊透等）和表 3 对检测发现的缺陷数量为基础评价检测结果。对气孔和夹杂类缺陷，尺寸小于表 4 限值的“小型”圆状、椭圆状以及细长形等气孔类缺陷，在考虑缺陷在焊缝中的位置且得到业主批准后（如：折算成缺陷数量评价），可以考虑接受。单个气孔和单个

表 4 产品气孔和夹杂缺陷尺寸限值

| 当 $d < 0.25 t$ ,<br>且 $d \leq 0.5 \text{ mm}$ | 当 $d = 0.25 t$ , 且 $d \leq 0.5 \text{ mm}$<br>至 $d = 0.5 t$ , 且 $d \leq 1 \text{ mm}$ | 当 $d > 0.5 t$ ,<br>或 $d > 1 \text{ mm}$ |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 一般不评价                                         | 按气孔和夹杂数量评价                                                                            | 不接受                                     |
| $t$ : 管壁厚度 ; $d$ : 气孔和夹杂最大检出尺寸                |                                                                                       |                                         |

夹杂超过表 4 限定的尺寸时，即按表 3 中的缺陷计算数量。不接受线性缺陷。

下列情况的密集气孔缺陷不被接受：当管子直径小于 25 mm 时，20 mm 长焊缝内存在 3 个气孔，或单个接头内出现 6 个气孔；当管子直径大于等于 25 mm 时，20 mm 长焊缝内存在 3 个气孔或单个接头内出现 8 个气孔；低于限值直径的小气孔可以忽略。

依据所采用的检测技术，射线底片可能显示被检测管头及其周围的管头的缺陷，所发现的周围管头缺陷也必须纳入评价范围，计算缺陷数量一并处理，不影响表 3 的对检测范围的定义。

超声检测 (UT) 要求

对接头需要做 UT 时，按 RT 相同评估程序进行，须采用的合适试件确定和描述对缺陷的有效检出能力限制范围，递交业主做评估决定。

结论

近几十年来因德国巴斯夫等国际大公司的国内投资项目，引进了对热交换器管子 - 管板焊接接头的射线检测技术和装备，成功培训了一批国内化工装备制造单位和检测人员。巴斯夫公司的《管子 - 管板接头要求 - 设计、制造、试验技术标准》也随技术、装备的进步和工程实践经验的积累不断修订完善，从早期版本 WN75-100 经数次修订到目前 E-S-MC 931 : 2016，形成一整

套完整的专业标准，多年来不断降低热交换器在使用中发生泄漏失效的比例，在装置和装备大型化的今天，大大减少了泄漏事故隐患。

比较相关的标准可以看出该规范的内容框架与技术标准 EN ISO 15614-8 : 2016 接近，但是要求更严，更具量化了检验标准和可操作性，实际应用价值更高；专业标准 EEMUA 143 : 2 017，对 EN ISO 15614-8 : 2016 标准作了补充和进一步阐述，但未对接头射线检测提出更多要求。广泛采用的 ASME BPVC-IX : 2019 标准中要求对接头做模拟件试验，做外观检查、渗透和宏观检测；TEMA-2019 标准中的要求是常规检测按制造厂标准方法，特殊要求由双方协议商定，对接头的射线检测未作专门的说明；作为对 ASME 和 TEMA 补充和进一步阐述的 PIP VESV1002-2012 和 PIP VESST002-2012 等也未对接头射线检测做更多要求。

技术引进也促进了国内的技术进步，虽然 GB 151-2014 没有明确对接头的射线检测要求，但对接头做射线检测的方法已列入了标准 NB/T 47013.2-2015 资料性附录。与国际先进标准接轨，提高国际竞争力是我国企业发展必走的路径。