

二甲苯装置吸附塔底封头焊缝缺陷现场修复技术

朱宁¹, 韩冰¹, 汪加将¹, 王玥瑶²

1. 中石化南京化工机械有限公司 江苏南京 210048

2. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司 黑龙江哈尔滨 150028

摘要: 焊接技术广泛应用于承压特种关键部件的连接与制作, 掌握无损检测与修复技术对保障核电、水电、化工及机械等关键设备运行安全具有重要意义。对二甲苯装置吸附塔底封头焊接材料WSTE36进行特性归类、焊接环境和修复难点分析, 采用TOFD技术对二甲苯装置吸附塔底封头焊缝缺陷进行检测, 确定缺陷大小和位置, 根据缺陷类别制定合理修复方案, 通过碳弧气刨等手段进行缺陷消除与设备修复。为避免增加返修次数, 可多次进行缺陷检测, 精准定位缺陷位置。在采用碳弧气刨消除缺陷时, 应控制角度与进程, 前期采用大进程刨削, 后期改用角磨机小进程打磨。在热处理过程中, 实施多点布温, 实时监测温度, 避免温度过高对吸附剂产生不良影响, 从而影响设备后续使用。修复完成后, 采用TOFD技术对设备再次进行缺陷检测, 直到设备修复完好。二甲苯装置吸附塔底封头焊缝缺陷现场修复工艺的应用与总结, 为相似设备的焊接缺陷检测与修复提供了经验与参考, 为保障核电化工、重要机械等领域关键承压设备运行安全奠定了基础。

关键词: WSTE36; TOFD; 吸附剂; 多点监测

On-site repair technology for weld defects of bottom cover of adsorption tower in xylene plant

ZHU Ning¹, HAN Bing¹, WANG Jiajiang¹, WANG Yueyao²

1.Sinopec Nanjing Chemical Machinery Co., Ltd., Nanjing 210048, Jiangsu, China

2.Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, Heilongjiang, China

Abstract: Welding technology is widely used in the connection and production of special key components under pressure. Mastering non-destructive testing and repair technology is of great significance for ensuring the safe operation of key equipment such as nuclear power, hydropower, chemical industry, and machinery. Classify the characteristics, welding environment, and repair difficulties of WSTE36 welding material for the bottom head of the adsorption tower in the xylene unit. Use TOFD technology to detect defects in the weld seam of the bottom head of the adsorption tower in the xylene unit, determine the size and location of the defects, develop a reasonable repair plan based on the defect category, and eliminate defects and repair equipment through methods such as air gouging. To avoid increasing the number of repairs, multiple defect inspections can be conducted to accurately locate the defect location. When carrying out air gouging to eliminate defects, control the angle and process. In the early stage, use large process gouging, and in the later stage, use an angle grinder for small process polishing. During the heat treatment process, implement multi-point temperature control and real-time temperature monitoring to avoid adverse effects on the adsorbent caused by high temperature and affecting the quality of repair. After the repair is completed, TOFD technology is used to perform defect detection on the equipment again until it is fully repaired. The application and summary of on-site repair technology for weld defects in the bottom head of the adsorption tower of the xylene unit provide experience and reference for welding defect detection and repair of similar equipment,

and lay a foundation for ensuring the safe operation of key pressure equipment in nuclear power, chemical industry, important machinery and other fields.

Keywords: WSTE36; TOFD; adsorbent; multi-point monitoring

1 序言

随着焊接技术不断进步，焊接工艺被广泛应用于水电、核电、化工及机械等重要设备关键部件的连接或制作中，焊接接头质量的控制与检修对保障重要压力设备的安全运行意义重大^[1]。

二甲苯装置吸附塔属于易疲劳容器，由于年承受压力交变次数高，常在未达到设计使用寿命时设备就会出现裂纹^[2-4]。

超声波衍射时差法（Time of Flight Diffraction, TOFD）技术原理为超声波衍射，因为检测灵敏度高、效率高、缺陷定位准确及缺陷检出率高等优点，已成为当前主流的焊缝无损检测方法^[5-7]。因此，TOFD技术可作为重要承压容器的定期检测手段，便于早日发现设备缺陷，及时修补^[8-10]。在设备检修过程中，通过TOFD技术，可较为准确地判定缺陷的位置与大小，为后续缺陷修复奠定基础。

基于此，TOFD技术也可作为消除缺陷后的验证方法，确认消除缺陷工艺的有效性。

2 设备概况

2.1 二甲苯装置吸附塔

某石化公司的吸附塔是生产高纯度对二甲苯的关键设备。该设备分为两个系列，每个系列各包含2台吸附塔，位号分别为DA601-1A、DA601-1B、DA601-2A和DA601-2B，规格为22100mm×6400mm×37mm（器壁）/42mm（底封头）/35mm（顶封头）。

该设备采用UOP专利技术，由鲁奇公司设计，1981年由BSL公司制造，并于1989年10月投产使用。其中DA601-2A\2B共2台吸附塔于2008年9月更换内构件和ADS-37吸附剂。该吸附塔相关技术参数见表1。

该吸附塔设备内部结构复杂，每个吸附塔都包

表1 DA601-2A\2B吸附塔技术参数

设计压力/MPa		操作压力/MPa		设计温度/℃	操作温度/℃	介质	封头和壳体材质	设计处理量/（万t/年）
顶封头	底封头	顶封头	底封头					
1.62	1.72	1.17	0.922	207	177	C8A + PDEB	WSTE36	328.6

含中心管1根、中心管分配器11层、顶格栅1层（共24块扇形顶格栅及顶部分配器）、底格栅1层（共24块扇形底格栅及底部收集器）、中间格栅11层（每层24块扇形中间格栅及每层12组分配管），以及其他内件组成。每个吸附塔均装填12层吸附剂，以二甲苯联合装置800[#]精馏单元的C8A为原料，循环解吸剂为对二乙基苯（PDEB）。ADS-7/ADS-37分别为一系列和二系列的吸附剂，优先吸附C8A共4种同分异构体中的对二甲苯。

该设备利用模拟移动床工艺技术，通过吸附分离过程，配合转阀和抽余液塔，将含有少量PX的C8A输送至700[#]异构化装置进行反应，配合旋转阀、抽出液塔和成品塔制备出高纯度的对二甲苯。该设备制造难度大，内构件复杂，其中吸附剂和格栅作为专利产品，具有附加值高、使用周期长等优势。

2.2 WSTE36

吸附塔封头和壳体的材料为WSTE36，为早期德国牌号。通过查阅材料手册，确定对应的材料数字号为1.0565，在EN 10028-3：2017《承压用扁钢 第3部分：焊接用细晶粒正火钢》中对应的牌号为P355NH。通过对设备本体进行全元素分析，WSTE36与国内的Q345R类似。对以上2种材料的化学成分和力学性能进行测试，对比结果见表2、表3。

表2 化学成分对比（质量分数）（%）

材料	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb + Ti + V
P355NH	≤ 0.18	1.00 ~ 1.70	≤ 0.50	≤ 0.015	≤ 0.025	≤ 0.30	≤ 0.50	≤ 0.08	≤ 0.30	≤ 0.12
Q345R	≤ 0.20	1.20 ~ 1.70	≤ 0.55	≤ 0.010	≤ 0.025	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.30	—

表3 力学性能对比

材料	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	伸长率 A (%)	冲击吸收能量 KV (0℃) /J
P355NH	490~630	335	22	40
Q345R	490~620	315	21	41

吸附塔母材为德国进口的P355NH (WSTE36) 材料, 由电炉冶炼制成, 热处理工艺为 (600~620)℃×60min, 交货状态为板状正火态, 金相组织为珠光体+铁素体。

P355NH (WSTE36) 钢的性能特性如下。

1) 与Q345R钢一样, 具有良好的力学性能和综合加工工艺性能, 一般在热轧状态使用。对于中厚板材可进行900~920℃正火处理, 正火后强度略有下降, 但塑性、韧性、低温冲击值都显著提高。

2) P355NH (WSTE36) 钢碳当量一般为0.43%~0.45%, 其淬硬倾向和裂纹倾向比一般低碳钢稍大, 在低温环境或厚度大、刚性结构焊接时, 应采用稍大的焊接参数及较小的焊接速度, 注意填满弧坑, 并适当预热。

3) P355NH (WSTE36) 钢的焊接性良好, 当板厚≤25mm时焊前不需预热; 当板厚>25mm时, 最低预热温度为80℃; 当板厚大>38mm时, 焊前预热100℃以上。对于重要的受压件、焊接接头厚度>32mm时, 焊后需进行消除应力处理, 最低保温温度为600℃, 保温后空冷。

3 设备检修方案制定

3.1 焊缝缺陷

2022年4月, 对4台吸附塔进行检修, 发现塔底封头均存在不同程度的焊接缺陷。

(1) DA601-1A处焊缝缺陷 底封头拼接环焊缝发现5处缺陷, 其中III级缺陷3处、I级缺陷2处。III级缺陷的类别分别是: 未熔合、未熔合+夹渣。

(2) DA601-1B处焊缝缺陷 底封头拼接环焊缝发现8处缺陷, 其中III级缺陷2处、II级2处、I级缺陷4处。III级缺陷的类别分别是: 裂纹、点状缺陷+夹渣。

(3) DA601-2A处焊缝缺陷 底封头拼接环焊缝发现6处及环焊缝1处缺陷。III级缺陷的类别分别是: 2处裂纹、2处夹渣。

(4) DA601-2B处焊缝缺陷 底封头拼接环焊

缝发现3处缺陷, 其中III级缺陷2处、I级缺陷1处。

III级缺陷的类别分别是: 裂纹、夹渣。

按照先修复较浅裂纹、再修复较深裂纹的次序, 以器壁在整个修复过程中不穿透为前提, 待修复缺陷的具体情况见表4。

表4 待修复缺陷情况

位号	焊缝编号	区段长度/mm	缺陷位置/mm	长度/mm	深度/mm	高度/mm	缺陷类别
1A	F10_0007	1660	73~137	64	16.5~26.5	3.9	未熔合+渣
	F10_0008	1660	911~955	44	12.6~16.3	3.6	未熔合
1B	F10_0001	1670	1620~1675	55	22.8~32.5	5.5	裂纹
2A	F10_0005	1680	1655~1690	35+	15.6~24.4	5.9	裂纹
	F10_0008	1690	533~575	41.3	21.9~31.6	3.9	裂纹
2B	F10_0004	1660	595~745	149.6	14.0~22.3	9.13	裂纹

3.2 修复难点

在对二甲苯装置吸附塔焊缝进行现场检修时, 由于设备的实际情况, 所以存在较多的修复难点, 主要如下。

1) 设备使用年代久远, 缺陷深度较深, 清除缺陷或焊接补焊容易将焊缝贯穿, 内部通氮气隔离保护, 一旦贯穿, 施工人员会有窒息风险。

2) 设备内部有昂贵的吸附剂, 热处理温度高时容易造成内部的吸附剂失活, 经济损失巨大。

3) 全程为仰焊位置, 技能水平、体力消耗是严峻考验。

4) 整个裙座只有1个通道孔可以排尘, 碳弧气刨消除缺陷产生的烟尘排除不畅, 焊接环境极差。

5) 整个消除缺陷和补焊过程需要佩戴长呼吸系统进行保护, 再次增加焊接难度。

6) 由于设计原因, 裙座的通道孔管道有遮挡, 所以人员进出极为不便, 若发生异常情况, 则迅速逃脱有隐患。

3.3 设备检修内容

根据缺陷位置和现场结构编制返修方案, 需满足表5中规范要求, 主要缺陷修理步骤如下。

1) 吸附塔底封头裙座内搭设满堂脚手架。

- 2) 排净吸附塔内所有物料。
- 3) 根据工艺编制的专项方案，对吸附塔进行盲板加装；对吸附塔进行氮气置换，直至底封头内可燃气体含量（体积分数） $<0.5\%$ ，并在热处理和焊接期间进行连续监测。
- 4) 对缺陷部位进行打磨，直至全部消除，PT或UT检测合格。
- 5) 根据焊接工艺评定要求，进行局部焊前预热；分层多道焊接，焊接时保持道间温度。
- 6) 焊后进行局部热处理。需要多点监测热处理温度，尤其是靠近第一层底格栅附近要加设热电偶，若温度过高，则需要停止热处理。
- 7) 修复部位无损检测，符合图样和NB/T 47013—2015《承压设备无损检测》规范要求。

表5 吸附塔设备检修规范要求

序号	规范名称	图号/标准号/规范号
1	吸附塔总装图	LIA00097100240
2	《固定式压力容器安全技术监察规程》	TSG 21—2016
3	《压力容器》	GB/T 150.1-150.4—2011
4	《承压设备焊接工艺评定》	NB/T 4701—2011
5	《承压设备无损检测》	NB/T 47013—2015
6	《承压设备焊后热处理规程》	GB/T 30583—2014
7	《压力容器化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类》	HG/T 20660—2017

4 设备现场检修

4.1 消除缺陷前措施

吸收塔设备现场状态如图1所示，在缺陷修复前对其进行消除缺陷前的处理。

- 1) 下封头进行充 N_2 隔离，并在出口检测油气含量是否超标，经甲方确认安全后方可开始进行施工。
- 2) 消除缺陷过程中和补焊前3层必须佩戴长呼吸系统进行保护。
- 3) 根据检测结果，采用UT+TOFD重新确定缺陷位置，标识出缺陷深度和范围。

- 4) 根据检测缺陷范围的大小，采用碳弧气刨+砂轮打磨的方法清除缺陷。



图1 吸收塔设备现场状态

4.2 消除缺陷措施

(1) 现场消除缺陷 先采用碳弧气刨消除缺陷，碳棒直径为8mm，每层刨削厚度 $\leq 2\text{mm}$ ，边刨削边观察是否有新裂纹产生，测量刨削深度，当刨削深度达到标记深度时并且经目测可发现，由缺陷前方10mm左右向中间刨削，并且在端部前方刨削深坑以直接切断裂纹扩展通道，当刨槽深度距离标记深度为3~5mm时，改用角磨机打磨，如磨削至34mm时，缺陷依然存在，则应停止消除缺陷，以防后续补焊过程中焊穿。根部修磨沟槽底部呈“U”形，沟槽两端过渡要平缓，以利于保证多层焊接时端部的质量。

(2) 消除缺陷结果

1) DA601-2B消除缺陷情况。对DA601-2B进行检修，在刨槽12mm左右发现了缺陷，两端是裂纹，中间是气孔和夹渣。

当气刨深度约24mm时，缺陷已经肉眼不可见，此时改用角磨机打磨，当打磨至长200mm、宽30mm、深26mm时，缺陷完全清除。现场消除缺陷情况如图2所示。



a) 缺陷形貌

b) 缺陷打磨消除

图2 DA601-2B消除缺陷情况

2) DA601-2A消除缺陷情况。对DA601-2A进行检修，在丁字缝一处发现缺陷，缺陷性质为未熔

合、夹渣和细裂纹。对缺陷进行碳弧气刨消除，当刨槽尺寸为长150mm、宽38mm、深27~28mm时，缺陷消除。



a) 未熔合缺陷



b) 缺陷打磨消除

图3 DA601-2A消除缺陷情况

对DA601-2A进行检修，在较深的一处发现另一个缺陷，缺陷性质为裂纹。对其进行碳弧气刨消除缺陷，当刨槽尺寸为长150mm、宽40mm、深34~35mm时，缺陷消除。



a) 焊接裂纹



b) 碳弧气刨消除缺陷

图4 DA601-2A消除缺陷情况

在此处消除缺陷后，采用PT检测，未见缺陷。补焊后经TOFD检测，发现仍有部分缺陷。产生这种现象的根本原因是坡口形式和刨削角度不一致（见图5）。虽然刨槽的宽度和深度都达到了消除缺陷的必要值，但因为采用仰焊，碳棒角度控制不当，偏离了坡口，所以未刨到缺陷位置，导致一次消除缺陷并未将缺陷完全消除干净。

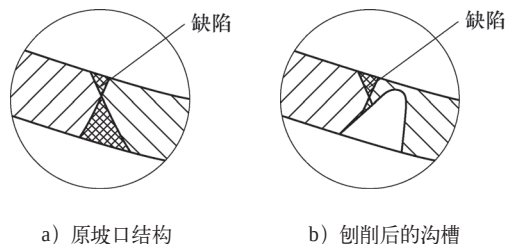


图5 原坡口结构与刨削后的沟槽

为了避免类似问题，达到彻底精准消除缺陷目的，在刨削前先采用TOFD检测，确定碳弧气刨深度，再调整刨削角度（见图6）。消除缺陷后再次用TOFD对沟槽进行检测，通过对消除缺陷前后图谱对比，可以确认缺陷是否清除干净。此方法在以往的消除缺陷确认中从未使用过，在后序现场修复中确认刨削深度和消除缺陷是否彻底时可推广使用。



图6 碳弧气刨消除缺陷

3) DA601-1B消除缺陷情况。对DA601-1B进行检修，刨槽25mm左右发现了缺陷，缺陷性质是裂纹，继续消除裂纹，发现裂纹变长然后消失。当刨槽尺寸为长200mm、宽30~40mm、深32mm时，缺陷完全消除。DA601-1B现场消除缺陷情况如图7所示。

4) DA601-1A消除缺陷情况。对DA601-1A进行检修，其中一处缺陷性质是未熔合和夹渣，当刨槽尺寸为长140mm、宽40mm、深30mm时，缺陷完全消除。DA601-1A消除缺陷情况如图8所示。



a) 坡口宽度



b) 焊缝宽度



c) 焊缝深度



d) 补焊长度



e) 焊缝检测情况

图7 DA601-1B消除缺陷情况

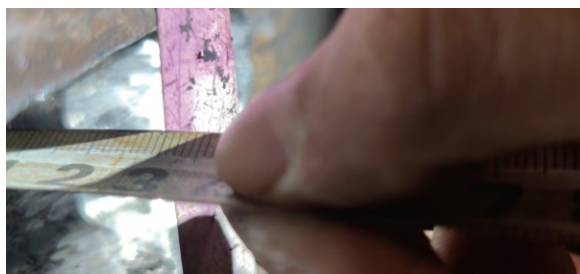
对DA601-1A进行检修，另一处缺陷性质是未熔合。当刨槽尺寸为长130mm、宽30mm、深28mm时，缺陷完全消除。DA601-1A消除缺陷情况如图9所示。



a) 刨削长度



b) 刨削宽度



c) 刨削深度

图8 DA601-1A消除缺陷情况



a) 刨削长度



b) 刨削宽度



c) 刨削深度

图9 DA601-1A消除缺陷情况

4.3 消除缺陷后措施

(1) PT检测 缺陷清除干净后进行PT检测,按NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第5部分:渗透检测》要求,I级验收合格。

(2) 补焊 检测合格后补焊,焊前采用电加热片预热100℃,用测温枪测温。达到预热温度后,首先用 $\phi 3.2\text{mm}$ 焊条打底2~3层,再改用 $\phi 4.0\text{mm}$ 焊条填充,道间温度控制在300℃以下。这个结构补焊对焊工的体力和技术是一个巨大考验,全程仰焊位置,一方面要控制电弧拖住熔池,另一方面不能将母材熔透,一旦熔透 N_2 会喷出,对人员容易造成窒息风险,吸附剂也会受到影响。

(3) 消氢处理 补焊完后立即采用加热片,对材料进行(300~350)℃×2h消氢处理。

(4) 无损检测 消氢处理后,对补焊处新焊缝进行100%UT+100%MT检测,检测结果为NB/T 47013—2015 I级合格。对补焊处新焊缝进行100%TOFD检测,检测结果为NB/T 47013—2015 II级合格。其中,UT和TOFD检测范围仅针对补焊处的新焊缝。

(5) 消除应力热处理 检测合格后进行消除应力热处理,采用1台LWK-B-240型电加热控制柜和3片履带式电加热器。履带式电加热器规格为660mm×165mm,每片功率5kW,数量为2片;660mm×330mm,每片功率10kW,数量为1片。

用1片660mm×330mm履带式电加热器沿纬线方向覆盖修复部位焊缝,在其两侧各加1片660mm×165mm加热器用于辅助加热,在修复部位焊缝最宽处50mm布置1只热电偶用来控温,外面铺40mm厚硅酸铝耐火纤维保温棉。沿经线方向距660mm×165mm履带式电加热器边缘800mm和斜45°距离1500mm处各布置1只热电偶,用来监测温度。焊后热处理工艺参数见表6,焊后热处理工艺曲线如图10所示。

表6 焊后热处理工艺参数

均温温度 /℃	均温 时间 /h	升温速度 /(℃/h)	降温速度 /(℃/h)	升温时 最大 温差 /℃	降温时 最大 温差 /℃	均温时 最大 温差 /℃
600±20	1.5	≤120 (≤400℃时 可不予 控制)	≤150 (≤400℃时 可不予 控制)	140	140	40

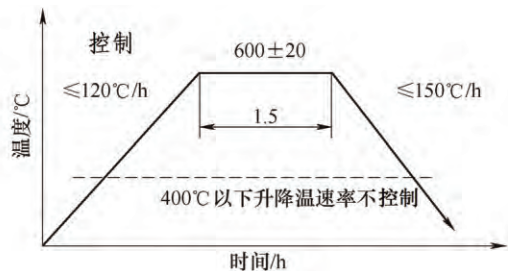


图10 焊后热处理工艺曲线

在焊后热处理过程中,观察3只监测热电偶的温度,温度达到600℃时,800mm处和斜45°距离1500mm处温度分别为70℃和42℃,这个温度不会对塔内的吸附剂造成影响。

(6) 再次无损检测 消应力热处理后对补焊处新焊缝进行100%UT+100%MT检测,检测结果为NB/T 47013—2015 I级合格;对补焊处新焊缝进行100%TOFD检测,检测结果为NB/T 47013—2015 II级合格。UT和TOFD检测范围仅针对补焊处的新焊缝。

(7) 耐压试验 根据TSG 21—2016中耐压试验通用要求规定,耐压试验后,如果出现返修深度>1/2厚度的情况,应重新进行耐压试验。但本试验的二甲苯吸附塔底封头通过平衡管穿过底格栅与上部床层相连通,若对塔底封头检修完成后进行水压试验,则会有大量的水通过平衡管进入到上部床层中,造成吸附剂永久性损伤;同时,水压试验会使底部格栅承受较大压力,极有可能造成格栅变形或密封失效,最终导致吸附塔发生漏剂。综上所述,考虑到吸附剂不能遇水的特性以及格栅等吸附塔内构件承压能力十分有限,且内部含有昂贵的吸附剂材料,因此塔底封头不具备水压试验的条件。

参考TSG 21—2016规定,不能进行耐压试验的压力容器,应注明计算厚度和制造与使用的特殊要求,具体如下。

1) 该封头原材料为WSTE36,相当于国内Q345R(正火)钢,经计算,该封头计算厚度为36.44mm,而封头实测厚度达42mm,满足要求。

2) 焊接返修必须有合格焊接工艺评定支撑并严格执行,对返修焊缝进行100%UT+100%MT检测,检测结果应符合NB/T 47013—2015 I级合格要求;对返修焊缝进行100%TOFD检测,检测结果应符合NB/T 47013—2015 II级合格要求。

3) 在设备使用过程中, 温度、压力和介质应严格按图样要求执行, 即操作压力塔顶1.17MPa; 塔底0.922MPa; 操作温度177℃; 介质为C8A + PDEB。

5 结束语

二甲苯装置吸附塔底封头焊缝缺陷现场修复技术的成功应用, 为同类化工机械设备的焊缝缺陷修复积累了宝贵经验, 主要归纳总结为以下几个方面。

1) 针对不同的设备, 检修时需考虑其内部构造的复杂程度, 在修复内有介质的设备时, 必须清楚介质的特性, 从而科学制定检修方法。

2) 在检修过程中, 做好安全措施。尤其注意在进行创通或焊穿预案、消除缺陷过程和补焊前三层时必须佩戴长呼吸系统进行保护。

3) 返修前可通过增加无损检测次数或采用多元、先进的检测技术, 对缺陷位置精准定位, 避免因缺陷未清除干净而增加返修次数。

4) 在碳弧气刨消除缺陷时, 应控制刨削角度和每次深度, 达到缺陷深度要特别注意裂纹是否延伸和扩展, 裂纹快消除时需改用角磨机打磨。

5) 消除缺陷后采用TOFD检测, 可精准检测碳弧气刨深度, 同时与消除缺陷前进行对比, 确认缺陷是否清除干净。

6) 热处理过程中采用多点布置热电偶实时监测温度, 防止因温度过高而损坏设备内部吸附剂的性

参考文献:

[1] 宁东明, 程敏, 刘淑倩, 等. 不等厚度锥体与筒体
优角对接焊缝的多分区TOFD检测方法[J]. 无损检测, 2023, 45 (11) : 14-19.

[2] 廉继康. 吸附塔焊缝裂纹分析及预防措施[J]. 石油工程
建设, 2018, 44 (6) : 77-78, 82.

[3] 杨夫裕, 赵石军, 刘钊. 吸附塔附件对受压元件疲
劳寿命的影响[J]. 一重技术, 2018 (3) : 17-19.

[4] 杨万辉, 田风宾, 张璐, 等. 变压吸附制氢吸附塔
裂纹分析及处理[J]. 精细与专用化学品, 2021, 29
(2) : 33-36.

[5] 吴春雷, 李令闯, 隋伟, 等. TOFD检测方法在水利
水电工程焊缝检测中的应用[J]. 水利科学与寒区工
程, 2022, 5 (11) : 143-146.

[6] 支紫喬. TOFD超声成像检测技术在压力容器检验中
的应用研究[J]. 中国金属通报, 2019 (10) : 164-
165.

[7] 贾伯早. TOFD超声成像检测技术在压力容器检验中
的应用[J]. 化工管理, 2019 (1) : 27.

[8] 张岩, 周海. TOFD检测技术在在役设备定期检验中
的应用分析与建议[J]. 中国设备工程, 2023 (6) :
181-183.

[9] 张子健. 304/Q345R不锈钢复合板常压储罐对接焊
缝TOFD检测[J]. 电焊机, 2021, 51 (2) : 88-92,
113.

[10] 郑春, 姚甲伟, 张海. 炼化装置现场高压厚壁管道
TOFD检测的难点及质量控制措施[J]. 焊接技术,
2019, 48 (9) : 129-132.

MW 20240104

《金属加工（热加工）》2024年第5期广告目次

单位名称	查询编号	位置
恒进感应科技（十堰）股份有限公司	1468	封面 A
盐城高周波热炼有限公司	5326	封二
伊达新技术电源（昆山）有限公司	1925	封三
北京金威焊材有限公司	1161	封底
应达工业（上海）有限公司	1262	前彩 1
第 22 届北京国际热处理展览会	8149	前彩 2
中国锻压协会	5699	V