

TP347制氢转油线焊缝裂纹返修

周晓琛¹, 刘培强²

1. 中国石油天然气股份有限公司广东石化分公司 广东揭阳 522000

2. 中国寰球工程公司 北京 100012

摘要: 通过对制氢炉转油线集合管焊缝裂纹的分析, 确定其裂纹产生的主要原因, 制定相应的修复工艺, 并对焊缝裂纹进行全面修复。论述了高温TP347钢管的焊接材料选用、焊接和返修等工艺。装置投产至今已一年多时间, 一直保持正常地运转, 这充分论证了此次修复工艺的正确性。

关键词: 裂纹; 焊接; 修复

1 序言

2018年9月20日, 某炼化装置大检修管道检查时发现 $12 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^3/\text{h}$ 氢炉转油线集合管凸台分支焊口裂纹, 裂纹在焊缝与主管熔合线上, 裂纹基本贯穿整条焊缝。转油线主管尺寸为 $\phi 609.60 \text{mm} \times 30.96 \text{mm}$, 支管尺寸为 $\phi 273.10 \text{mm} \times 15.09 \text{mm}$ 。管道设计压力为3.07MPa, 工作温度为612℃, 设计温度为633℃。主管与支管之间用管台焊接连接。经分析, 焊口开裂的主要原因是由高温蠕变断裂和应力松弛开裂导致的。

因施工周期所限, 现场决定对焊缝进行修复。本文以此次焊缝返修为例全面介绍TP347焊接及返修的相关问题。

焊缝裂纹全部修磨完毕、重新焊接后的情况如图1~图3所示。



图1 焊缝裂纹



图2 裂纹修磨完成后



图3 重新焊接合格后的焊缝

2 裂纹产生原因分析

经与转油线生产厂家技术人员交流并提取厂家相关焊接资料后, 可确定其原焊接工艺为采用实芯焊丝ER347H打底, 焊条电弧焊焊条E347-16填充、盖面。考虑到高温应力问题, 焊后使用不锈钢专用砂轮片将焊缝表面打磨平滑, 并对焊缝进行了900℃的稳定化热处理。焊接形式如图4所示。

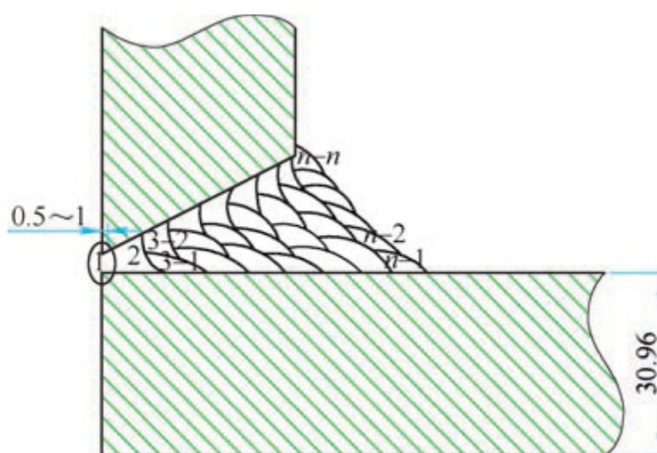


图4 焊接形式

2.1 母材厚度因素

因为转油线设计和生产日期均在2015年之

前，所以转油线TP347的厚度设计计算主要参照API 530—2008《炼厂加热炉炉管壁厚计算》中10万h的屈服强度计算。而该标准于2015年升级版为API 530—2015《炼厂加热炉炉管壁厚计算》后，对TP347的10万h的屈服强度计算做了大幅度调整。在610℃时，新标准的屈服强度为原标准的81.2%；在640℃时，新标准的屈服强度为原标准的79.8%，两标准具体要求见表1。

由表1可知，按2015年新标准计算，转油线厚度裕量不足，开裂风险明显增加。

表1 高温屈服强度与伸长率

标准	试验温度/℃	屈服强度/MPa			伸长率(%)
		10万h	6万h	2万h	
API 530—2015	610	69.7	77.2	94.7	5.7
	640	49.7	56.1	71.3	4.8
API 530—2008	610	85.8	95.0	117.2	5.3
	640	62.3	69.9	88.7	4.6

2.2 焊材选择

制造厂商选用的焊接工艺为氩电联焊，即采用氩弧焊打底，焊丝为ER347H，规格为 $\phi 2.5\text{mm}$ ，直流正接；填充、盖面采用焊条电弧焊，焊条为E347-16，规格为 $\phi 3.2\text{mm}$ ，直流反接。打底和第一层填充时焊缝均需充氩保护。焊接参数见表2。

表2 焊接参数

焊接层道	焊材	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹
打底	ER347H	90~110	10~13	7~10
填充盖面	E347-16	90~110	21~22	8~12

按炉专利商焊接要求，焊接347型不锈钢材料时，当设计温度 $>400^\circ\text{C}$ ，厚度超过19mm，焊接工艺应按如下要求：①采用E347-15、E347-16或ER347（SFA5.4），与介质接触侧的熔敷金属厚度至少为3~5mm。②焊缝的其余部分应用E16-8-2-15，E16-8-2-16（SFA5.4）或ER16-8-2（SFA5.9）填充。当设计温度 $>538^\circ\text{C}$ ，或者买方指定为“H级别”材料时，应使用碳含量（质量分数，下同）为0.040%~0.080%的高碳钢焊条或焊丝。炉专利商认为，厂家原选用的E347-16无法满足高温持久应力要求。

3 返修工艺的选择与确定

3.1 焊后稳定化热处理的必要性与可行性

（1）焊后稳定化热处理的必要性 某设计院认为焊缝返修后将一直在600℃以上高温工况下工作，焊后必须进行稳定化热处理。其理由为：①稳定化热处理能降低焊缝中铁素体含量，可降至9FN或更少，这样将减少铁素体转化为脆性 σ 相，从而降低焊缝韧性下降的风险。②返修焊缝焊接量大，热处理能大幅度降低焊缝残余应力。③溶解Cr₂₃C₆，避免贫铬降低焊缝晶间腐蚀能力。参照NB/T 47015—2011《压力容器焊接规程》要求，接管与筒体焊缝局部焊后热处理时，均温带应环绕包括接管在内的筒体全圆周。

（2）焊后稳定化热处理的可行性 现场专家经过论证后认为现场的条件不足以进行焊后稳定化热处理，达不到理想状态的稳定化热处理将面临无法解决的奥氏体不锈钢高温脆化的风险。并且加热温度越高和加热时间越长，脆化越严重^[1]。

经商讨后各方达成共识，焊后不进行稳定化热处理。

3.2 焊接方法和焊材选择

因对选用焊条E347-15还是焊丝ER16-8-2进行填充、盖面有较大争议，施焊前利用现场TP347、 $\phi 273.1\text{mm} \times 15.09\text{mm}$ 转油线备用管做焊接试件进行晶间腐蚀、铁素体含量和短时高温拉伸等试验，从而进行性能对比。试件坡口、焊接顺序如图5所示。

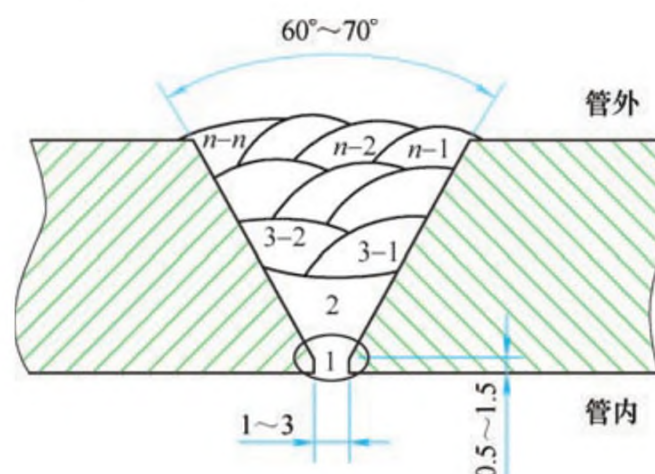


图5 试件坡口及焊接形式

母材和焊材的主要化学成分中 $w_s < 0.015\%$ ， $w_p < 0.025\%$ ， $w_c > 0.04\%$ ，详见表3。

表3 母材、焊材的主要化学成分（质量分数）（%）

牌号	Mn	Si	Cr	Ni	Nb	Mo
TP347	1.67	0.35	17.22	10.26	0.49	—
TGF347	1.05	0.46	18.82	9.12	0.61 ^①	0.09
E347-15	1.23	0.45	19.84	10.07	0.66	0.06
ER16-8-2	1.69	0.44	16.3	8.5	—	1.3

①0.61%为Nb+Ta的含量。

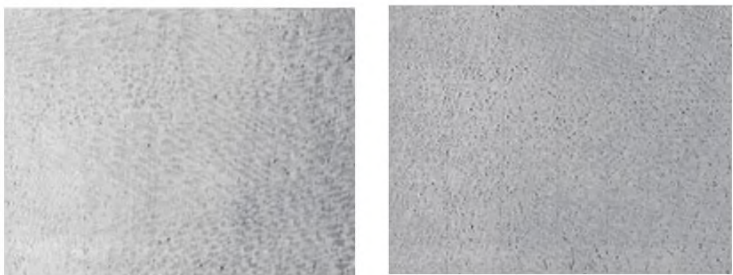
因现场返修焊口焊接时无法进行背面充氩保护，打底均采用日本株式会社 ϕ 2.6mm的TGF347自保护焊丝打底。试件1的填充和盖面选用伯乐 ϕ 3.2mm E347-15焊条。试件2的填充和盖面选用英曼彻特 ϕ 2.4mm的ER16-8-2焊丝进行氩弧焊焊接。焊接参数见表4。

表4 焊接参数

焊接层道	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹
打底	90~110	10~13	7~10
试件1填充、盖面	90~110	21~22	8~12
试件2填充、盖面	90~110	10~13	7~10

注：所有试件焊后均做640℃高温短时拉伸。

（1）焊缝晶间腐蚀 对两种焊接方法分别取样按GB/T 4334—2008E进行晶间腐蚀试验。将磨光试样在微沸的硫酸铜水溶液中连续腐蚀16h，在焊缝位置取金相试样检测晶间腐蚀，结果两种焊接方法均未发现晶间腐蚀裂纹。焊缝表面组织形貌如图6所示。



a) 试件1 b) 试件2

图6 焊缝表面组织形貌

（2）铁素体含量和晶粒度测试 经测试，焊材E347-15焊接的焊接试件1铁素体含量为11.2FN，焊缝等轴晶区域晶粒度7级。

焊材ER16-8-2焊接的焊接试件2铁素体含量为6.4FN，焊缝等轴晶区域晶粒度4.6级。

（3）高温拉伸性能对比 按GB/T 4338—2006要求，对焊接试件做640℃高温短时拉伸试验，试验结果见表5。

表5 试件力学性能

试件	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)	断裂位置
试件1	307	215	22.5	焊缝
试件2	325	255	23.0	母材

通过上述试验结果对比，最后确定返修工艺采用日本株式会社TGF347自保护焊丝打底，采用曼彻特焊丝ER16-8-2进行氩弧焊填充、盖面，焊后将焊缝表面打磨平滑，不进行焊后热处理。

4 焊缝返修

4.1 裂纹清除和坡口修补

用不锈钢专用砂轮片角向磨光机将原焊缝中裂纹清除，清除后采用PT检测，直至无裂纹为止。对于距内表面5mm以内缺口进行修磨，采用TGF347补焊；对于其他部位缺口采用ER16-8-2补焊，补焊完再用不锈钢专用砂轮片角向磨光机将坡口部位打磨平滑。坡口修磨完毕后按要求进行无应力组对。

4.2 焊接

返修焊接参数按表6进行。

表6 返修焊接参数

焊接层道	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min ⁻¹
打底	90~110	10~13	7~10
填充、盖面	90~110	10~13	7~10

打底后再利用TGF347焊丝填充一遍，保证TGF347焊接的焊缝厚度在3~5mm，然后采用ER16-8-2盖面焊接完成。焊接时应尽量减小焊缝过热，避免形成粗大的柱状晶，焊接时应采用焊接工艺规程中规定的小热输入和小截面焊道，采用多层多道焊，摆动时的焊道宽度 $\leq$ 6mm。严格控制层间温度在70℃以下再焊接，以防止焊缝及热影响区晶界组织成分增大，造成焊接接头的高温韧性下降。焊接完毕后将焊缝打磨平滑。

5 焊缝检测

在打磨完坡口以后，焊缝两侧应作渗透检测，在焊完底层和表面层后，应分别做渗透检测，合格级别为NB/T 47013—2015标准I级。检测时的显影液和定影液只能通过毛刷涂、不能喷，以免造成其他部分的污染。

虚实结合焊工培训模式在企业中的运用研究

唐冬前¹, 周永东²

1. 南宁中车轨道交通装备有限公司 广西南宁 530000

2. 中车株洲电力机车有限公司 湖南株洲 412000

摘要: 通过分析企业在传统焊工培训过程中存在的问题, 引入了虚拟焊接培训理念, 并将增强现实的虚拟焊接培训与传统焊工培训有机结合, 建立适用于企业的虚实结合的焊工培训模式, 并进行焊接培训效果验证, 证明了该模式在企业焊工培训中的可行性和高效性。

关键词: 增强现实; 虚拟焊接; 虚实结合; 焊工培训

1 序言

随着焊接技术的不断发展, 很多焊条电弧焊已被各种自动化、智能化的焊接设备替代, 但焊条电弧焊的便利性, 决定了其依然具有很大的市场^[1]。从企业近年的人才招聘情况来看, 技能院校焊工技能人才稀少, 且焊工进入企业后, 需要培训合格后才能上岗, 但由于新进焊工基础薄弱, 焊接培训成本高、周期长、效率低, 企业需要花费大量的财力、物力才能培养出一名优秀的焊工。此外, 焊接过程中产生的有害物质对焊工身体会造成一定的危害, 使得企业新进焊工在心理上有一定排斥^[2]。故传统焊工培训方法急需改变, 寻找更为合理的培训方式。如何改变、升级、发展传统焊工培训成为问题的焦点。

增强现实 (Augmented Reality, AR) 虚拟焊接培训技术的出现, 为企业焊工培训提供了新的契机。增强现实技术通过计算机的虚拟成像, 将虚拟

信息叠加到真实场景中, 给人一种真实的焊接体验。对比单纯传统焊工培训模式, 具有很重要的现实创新意义, 但又不能完全取代传统培训方式。因此, 本文基于西班牙Seabery的Soldmatic虚拟焊接培训系统, 研究将增强现实的虚拟焊接培训与传统培训相结合的模式在企业焊工培训中的运用情况^[3]。

2 虚拟焊接培训系统

2.1 虚拟焊接培训分类

虚拟焊接培训主要包括虚拟现实焊接培训 (见图1) 和增强现实虚拟焊接培训 (见图2)。虚拟现实焊接培训是纯虚拟界面, 能够全方位的反映焊接过程和焊接缺陷, 是一种较好的培训方法, 但是焊工在连续体验过程中易产生头晕等不适, 发展受到制约。而增强现实虚拟焊接培训, 是一种有实际焊枪、模拟焊接设备、虚拟焊接情景的高仿真数字教学系统, 通过人机互动让焊工切身感受操作过程, 实现较高的培训效果^[4, 5]。

PT检测完成后采用相控阵对焊缝进行再次确定, 以无裂纹为合格。

6 结束语

从2018年10月12日焊缝返修合格后, 转油线投入使用到目前一切正常, 这也充分证明了此次返修工艺的正确性。随着国家对汽柴油品质的要求越来越高, 制氢炉规模将会越来越大。在制氢炉转油线

焊接中, 此类问题还会再次出现, 但在不断的施工和经验总结中, 我们将会对这类钢高温服役时的焊接有更深层的了解。

参考文献:

- [1] 陈祝年. 焊接工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 2002: 1064.

MW 20200825