

Analysis of the causes of cracking of welded joints of raw material preheating pipelines of ethylene cracking furnace

Linbo Kang

China National Petroleum Sixth Construction Co., Ltd., Qinzhou, Guangxi, 535000, China

Abstract

This article provides an in-depth analysis of the causes of cracking in the welding joints of the preheating pipeline for ethylene cracking furnace raw materials. Firstly, the characteristics of preheating pipeline welding were introduced, including the properties of pipeline materials and welding requirements, and the possible problems that may occur during the welding process were analyzed. Then, the main factors causing cracking in welded joints were discussed, including mechanical stress, the effects of high temperature environment and medium corrosion, as well as the influence of welding defects on crack initiation. Finally, based on the actual working conditions of the preheating pipeline for ethylene cracking furnace raw materials, the causes of welding joint cracking were analyzed in detail, with a focus on discussing the effects of temperature fluctuations, residual stresses, changes in metallographic structure, and insufficient welding process control on welding joint cracking.

Keywords

ethylene cracking furnace; preheating pipelines; welded joints; causes of cracking; Residual stress

乙烯裂解炉原料预热管线焊接接头开裂原因分析

康林博

中国石油天然气第六建设有限公司, 中国·广西 钦州 535000

摘 要

本文针对乙烯裂解炉原料预热管线焊接接头的开裂原因进行了深入分析。首先, 介绍了预热管线焊接的特点, 包括管线材料的特性和焊接要求, 分析了焊接过程中可能出现的问题。然后, 探讨了焊接接头开裂的主要因素, 包括机械应力、高温环境与介质腐蚀的作用, 以及焊接缺陷对裂纹萌生的影响。最后, 结合乙烯裂解炉原料预热管线的实际工况, 详细分析了焊接接头开裂的原因, 重点讨论了温度波动、残余应力、金相组织变化、焊接工艺控制不足等因素对焊接接头开裂的影响。

关键词

乙烯裂解炉; 预热管线; 焊接接头; 开裂原因; 残余应力

1 引言

乙烯裂解炉作为石油化工行业中重要的反应装置, 其原料预热管线承担着传输和加热原料的关键任务。由于该管线在高温、高压以及腐蚀性环境下运行, 焊接接头开裂问题成为影响设备安全性与稳定性的重要因素。焊接接头的开裂不仅可能导致设备停机、生产中断, 还会增加维护成本和安全风险。因此, 研究焊接接头开裂的原因并提出相应的控制措施, 对于提高乙烯裂解炉的运行效率和安全性具有重要意义。

【作者简介】康林博 (1998-), 男, 中国河北石家庄人, 助理工程师, 从事异种钢焊接、裂解炉炉管与工艺管道异种钢焊接研究。

2 乙烯裂解炉原料预热管线焊接概述

2.1 预热管线的工况特点

乙烯裂解原料预热管大多用来加热反应的原料以确保裂解反应的顺利进行, 管道工作条件为高温、高压、腐蚀性工作环境。管道用材应该保证高温和高压力、腐蚀性工作环境下的耐高温、耐高压、耐腐蚀性能。管道系统的反应部位一般存在很高的温度, 因为裂解炉存在高温工况, 流体的温度在 700℃以上, 而且流体中可能含有腐蚀介质如氯化物、硫化物等。要求管道能长期保证稳定的运行, 因此管道用材应具有高热稳定性和抗热疲劳性。而由于管道系统存在很高的温度, 会造成管路管道的温度变化、热膨胀和热收缩, 高温管路管道焊接接头容易发生焊接缺陷, 会受到热应力的影响, 因此焊接接头质量要求很高^[1]。

2.2 焊接接头的结构特性技术要求

乙烯裂解炉原料预热管线焊接接头工作在高温高压的工作环境下, 对焊接接头结构要求较高。焊接接头力学强度、

焊接接头抗裂、高温性能要求高；在焊接工艺过程中，材料的选择是非常关键的，必须是适宜高温和有腐蚀性的合金钢或者高温钢材质，必须保证焊接接头长期运转工作中不发生疲劳、裂纹和腐蚀等现象；另外，焊接接头的结构设计要尽量降低应力集中，避免因焊接缺陷或设计不合理导致焊接接头失效；对焊接接头质量要求包含焊缝致密性、焊缝表面平整度、焊接区域金属组织，也就是焊接接头的整体和可靠性。

3 焊接接头开裂的主要因素

3.1 机械应力对开裂的影响

焊接接头在加工制造时必然会产生机械应力，其来源于加工焊接过程中的温度伸长收缩以及外载荷等因素的作用。在焊接过程中，由于各部分的温度差，焊接接头不同位置会有不同的受热时间，故相应的位置会以不同的幅度膨胀，当焊接接头降温冷却后，受热温度较高的区域收缩幅度更大，从而形成残余应力。若这种残余应力得不到有效卸除，便会在焊接接头的位置使接头金属发生形变甚至是开裂。对于壁厚较薄的管道，由于加工焊接过程中产生的机械应力，会在接头部位产生裂纹，而在管道正常的运行过程中又进一步发生扩展开裂。机械应力是造成管道焊接接头开裂的主要应力源之一^[2]。

3.2 高温环境介质腐蚀作用

乙烯裂解炉原料预热管线正常运行的工况条件通常为高温与高腐蚀双重条件。高温对焊接接头金属组织结构产生影响，造成粗晶变形，降低焊接接头金属的力学性能。而且高温条件下金属的抗疲劳性、抗热疲劳性能差，特别在温度波动较大的工况条件下，易出现接头开裂现象。同时腐蚀性介质，如裂解过程中产生的酸性气体、氯化物、硫化物等都会增强焊接接头的腐蚀性。腐蚀性介质不只会焊接接头表面引起腐蚀损伤还会导致应力腐蚀裂纹。高温时焊接接头一般会丧失抗腐蚀能力，腐蚀的叠加与高温会降低管线的使用寿命。

3.3 焊接缺陷裂纹萌生

在焊接过程，因操作不规范或工艺不合理等因素，焊接接头极易出现各种缺陷，如气孔、夹渣、裂纹、未焊透等，这些缺陷都是产生裂纹的源泉，特别是在焊接接头的热影响区附近，这些缺陷会在焊接接头处形成应力集中，使焊接接头处的局部应力增大，产生裂纹进而发生裂解。焊接过程出现气孔、夹渣等缺陷会使焊缝的完整性遭到破坏，焊接接头的强度下降，受外部载荷或温度波动的影响出现开裂。特别是在高温运行情况下，材料的韧性降低，焊接接头微小缺陷裂纹会发展为较大裂纹，接头开裂失效。

4 乙烯裂解炉原料预热管线焊接接头开裂原因

4.1 温度波动对焊接接头的影响

在乙烯裂解炉的原料预热管线服役期间，其焊缝工作环境多数存在高温、高压交替状态，当加热与冷却循环时，

焊缝部位将承受激烈温度变化，由于高温加热与冷却过程形成的热膨胀和收缩，焊缝材料的热应力作用下将产生很大的热应力，尤其是焊缝热影响区，因材料加热-冷却速率不同产生残余应力，其热应力与管道本身的温度变化相互作用下形成焊缝的应力集中区，这些应力区可作为裂纹源开始形成扩展的过程；而温度的变异性不仅会造成焊缝处产生残余应力，还会对焊缝区域的金属组织产生变化，从而引起材料的力学性能降低，有利于裂纹形成开裂扩展的发生，而温度的变异性又对其焊后冷却过程影响很大。焊缝冷却过程中冷却速度通常很快，而厚壁管道焊接焊缝冷却过程中不同部位温差大极易形成较大的热应力，在金属材料的热膨胀/收缩性变化不一致，导致焊缝接缝处区域出现裂纹/裂纹源，随着时间温度的起伏发生裂纹发展和扩展；并且温度变异性引起的焊缝热影响区金属微观组织变化，使焊接接头韧性降低、强度下降，这也是裂纹发生的条件。焊缝反复热-冷循环特别是高温反复冲击导致焊缝加速疲劳裂纹及老化^[3]。通过合理控制温度场的方法来控制温度波动对焊接接头产生的影响，焊接前可通过适当预热的方法降低温差，使温度均匀；焊接过程中需控制加热、冷却速度，控制温度梯度过快的变化；焊接完成后进行一定的后热和缓冷，可降低焊接接头中残余应力，降低温度波动产生的不利影响。

4.2 残余应力热疲劳作用

焊接过程中，热影响区因为温度差而导致具有较大程度的残余应力。残余应力通常是在焊接接头的冷却阶段，由热膨胀不均匀引起的，在焊接接头以及周围区域产生拉伸或压缩应力。焊接接头承受着不均匀的内应力，随着时间推移，当进行高温运作时会产生热疲劳。在管道进行较长时间工作之后，热疲劳的过程逐渐反复，在高温条件之下会因为温度和工作应力反复交变的循环作用增加，残余应力的部分裂纹扩展速率增加。最终就会造成焊接接头破裂。热影响区在焊接接头的冷却过程中出现温度梯度，产生应力集中，特别是焊接接头的表面层和内层之间的应力差，整个过程中产生的残余应力。一旦残余应力没有得到有效的控制，在进行高温高压环境下焊接接头与内部的裂纹会形成无法忽视的裂纹源。然后继续运行以及高温循环的交变条件下，受到高温运行和交变载荷的循环作用，使残余应力反复造成焊接接头的热疲劳反复对裂纹进行扩展。

降低残余应力以及避免热疲劳的方法就是采用低温预热、慢冷却工艺，避免了过大的温差而导致应力过大。焊接过程中避免局部过度加热，减少热应力的集中，适当选用焊接工艺，优化焊接方式，减少焊接过程中累积过多的温差，也能够减少残余应力。焊接结束后进行应力消除退火也是消除残余应力的方法之一，利用一定的应力消除退火工艺可以缓和焊接接头中的残余应力，避免因热疲劳而使焊接接头中的裂纹有进一步扩大的趋势。结合管道设计上减少热应力的影响，比如管道焊接接头的形状设计，选择优质焊接材料

等,有效减少了热疲劳对焊接接头的影响,使焊接接头的综合质量得到保证。通过减小焊接过程中的温度波动以及应力分布,结合后热工艺处理,可以减少焊接接头中的残余应力,延缓热疲劳对焊接接头产生的不利影响,对控制裂纹的发生、控制裂纹的扩展有很大的帮助,保证了乙烯裂解炉原料预热管线整体的运行安全性。

4.3 金相组织演变对裂纹形成的影响

焊接过程中的焊接温度和冷却速度影响着焊接接头金相组织的形成,而焊接接头热影响区容易受到温度变化的影响,导致在焊接接头产生冷却过快时,使得金属晶粒粗大化而降低了接头的强度和韧性。焊接区域内的金属组织由于熔池冷却的原因,易生成过大的晶粒,接头晶粒过于粗大的导致了接头强度低以及接头的脆性,而且在应力的作用下更容易裂纹的产生。另外在接头中的高温条件下,由于粗大晶粒产生的脆性区域容易成为产生裂纹的起源和路径,同时不均匀的金相组织,特别是热影响区由于晶粒分布的不均匀使得焊接接头中存在局部的力学性能的不均匀,而脆性较大的晶粒部位极易在承受外力的环境下产生碎裂,使得裂纹更加容易扩张。为使焊接接头不发生金相组织的影响首先应选用恰当的焊接用材,焊接用材应和母材兼容,避免因母材和焊接用材的成分不兼容导致焊接接头产生的金相组织的不均匀;其次应控制焊接冷却速度,防止焊接晶粒的增大而产生粗大,通过合理设计焊接工艺参数,从而控制焊接温度保证焊接接头晶粒不产生过大和过小,可采用控制焊接冷却速度,避免焊接晶粒过大导致的裂纹的产生。进行后热处理的工艺后,如接头采取退火的退火工艺可以有效防止晶粒的粗大化,使得接头的力学性能得到改善,从而使接头的强度和韧性有所提升,可以减少接头裂纹的形成和扩散。

4.4 焊接工艺参数控制不足的影响

焊接工艺是焊接接头质量的决定性因素之一,在焊接过程中焊接电流、电压、焊接速度的焊接参数选取和控制决定着焊接接头的质量,焊接参数控制不当会引起焊接接头存在气孔、夹渣、未熔合等焊接缺陷,此类缺陷降低接头的抗裂能力,还会成为裂纹产生源,在高温高压的条件下会快速扩展,影响焊接接头整体性能。焊接工艺参数如电流、电压、焊接速度等的波动对焊接接头熔池形态不均匀,从而产生焊接缺陷,为避免焊接工艺参数不当而导致焊接裂纹产生,在焊接管道的材料特点和焊接环境条件的要求下选用焊接工艺;焊接接头的焊接参数控制稳定,避免焊接电流、电压、速度等参数的大幅度波动。并实现在实际中焊接人员须进行

系统的技术培训,提高操作水平,焊接操作必须实现规范化,检查焊接设备工作状态,保证其精确性,减少因焊接设备工作不稳定和错误操作方法而导致焊接缺陷,提高接头的焊接质量,降低焊接裂纹的产生。

4.5 运行维护过程中的裂纹扩展因素

乙烯裂解炉原料预热管线的焊接接头在长期高温、高压的工作环境中可能发生裂纹扩展。裂纹的扩展通常受外部载荷、温度波动和腐蚀介质的综合影响。特别是在腐蚀性介质的作用下,焊接接头的应力腐蚀裂纹更容易发生,且扩展速度较快,严重时可能导致管道的断裂或设备的失效。腐蚀性气体和高温环境交替作用下,裂纹扩展速度明显加快,裂纹一旦扩展至一定程度,极有可能导致设备发生严重故障,影响生产的安全与稳定。为防止裂纹的扩展,除了焊接过程中的质量控制外,管道的定期检查和维修同样至关重要。通过定期实施无损检测技术,如超声波、射线等检测手段,能够及时发现裂纹并采取修复措施,避免裂纹的继续扩展。此外,管道材料的选择也应考虑抗腐蚀性能,采用高抗腐蚀合金材料可以有效减缓裂纹的发生和扩展。在运行过程中,合理控制管道中的腐蚀性介质浓度,减少腐蚀源的影响,也是防止裂纹扩展的有效措施。对于已经出现裂纹的管道,应采取切除、加固或替换等修复措施,防止裂纹继续扩展,保障管道系统的安全运行。

5 结语

乙烯裂解炉原料预热管线焊接接头的开裂问题,是影响其长期稳定运行的主要隐患之一。通过对焊接接头开裂原因的分析,本文明确了温度波动、机械应力、焊接缺陷等因素对开裂的影响,并提出了相应的控制措施。为确保乙烯裂解炉管线的安全运行,未来应加强焊接工艺的优化、材料选择与管理、应力控制等方面的研究,同时重视设备的维护与检修工作。综合考虑各类因素,可以有效提高焊接接头的质量,延长设备的使用寿命,为石油化工行业的安全生产提供坚实保障。

参考文献

- [1] 刘强,王明. 乙烯裂解炉管道焊接质量控制与失效分析[J]. 石油化工设备, 2020, 49(06): 85-88.
- [2] 陈峰,李建华. 高温环境下焊接接头裂纹形成的机理研究[J]. 焊接技术, 2019, 48(04): 19-23.
- [3] 张磊,赵辉. 乙烯裂解炉焊接接头裂纹分析及其控制措施[J]. 石油炼制与化工, 2021, 50(02): 45-49.