

关于乙烯裂解炉专用热电偶 FMEA 分析研究

秦 军,孔祥剑,马艳平,杨 梅

(西仪股份有限公司,陕西 西安 710082)

摘要:仪器仪表是工业领域最常用到的设备之一,对于流程工业有着不可替代的作用。乙烯裂解炉是乙烯生产装置的核心设备,在炉内进行裂解反应时,裂解温度是最重要的工艺变量,温度的变化对裂解深度、裂解品质有很大影响。乙烯裂解炉专用热电偶在裂解炉中测量温度,其所处工况高温、强腐蚀,热电偶容易发生失效。为了对乙烯裂解炉热电偶的失效进行深入的研究,开展硬件故障模式及影响(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)分析,确定乙烯裂解炉热电偶可能的故障模式及其影响,分析其薄弱环节及敏感应力,从而提出可采取的有效改进和补偿措施,在设计阶段有效提高乙烯裂解炉热电偶的可靠性、稳定性水平。

关键词:裂解炉;热电偶;故障模式及影响;可靠性

中图分类号:TH

文章编号:1000-0682(2024)05-0060-05

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.012

Study on FMEA analysis of thermocouple for ethylene cracking furnace

QIN Jun, KONG Xiangjian, MA Yanping, YANG Mei

(XI YI Co., Ltd., Shaanxi Xi'an 710082, China)

Abstract: Instrumentation is one of the most commonly used equipment in the industrial field, and it has an irreplaceable role in the process industry. Ethylene cracking furnace is the core equipment of ethylene production plant. Cracking temperature is the most important process variable when cracking reaction is carried out in the furnace. The change of temperature has great influence on cracking depth and cracking quality. The special thermocouple for ethylene cracking furnace is used to measure temperature in cracking furnace. The working condition is high temperature and strong corrosion, and the thermocouple is easy to fail. In order to conduct an in-depth study on the failure of thermocouples in ethylene cracking furnace, hardware Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) analysis was carried out to determine the possible failure mode and influence of thermocouples in ethylene cracking furnace, and to analyze their weak links and sensitive stresses. Effective improvement and compensation measures are put forward to improve the reliability and stability of the thermocouple of ethylene cracking furnace in the design stage.

Keywords: cracking furnace; thermocouple; failure mode and impact; reliability

0 引言

在乙烯裂解炉中测温时,不但有高温氧化和高温腐蚀,还有流动介质的高温冲刷磨损。如此恶劣的工作环境对乙烯裂解炉热电偶是严峻的考验,根据乙烯裂解炉的工况,该文开发研制了一款针对乙烯裂解炉的专用热电偶。乙烯裂解炉专用热电偶主要由测温元件、接线盒、安装保护管三大部分组成。

为了提高乙烯裂解炉热电偶的可靠性、稳定性,开展硬件故障模式及影响(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)分析,可确定材料腐蚀以及仪表失效模式。根据分析结果,可结合相关工业领域应用实际工况,运用仿真软件拟合温度、流量等技术,开展恶劣工况条件下仪表结构设计与数据分析,实现仪表对实际工作状态(介质工作温度、工作压力、环境温度)实时感知,通过数字补偿技术实现仪表长期稳定测量,并利用可靠性数据模型丰富仪表的自诊断功能,实现仪表的可靠性指标。该方法对仪器仪表行业产品设计具有指导意义。

收稿日期:2024-06-20

第一作者:秦军(1984—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电路及软件设计。E-mail:qinjungoon@163.com

1 乙烯裂解炉专用热电偶概述

1.1 结构组成

乙烯裂解炉专用热电偶功能是采集和传递温度信号,结构由壳体部件、测温元件、法兰套管三部分组成,如图 1 所示。测温元件是热电偶测温核心元件,壳体部件主要作用是保护热电偶,法兰套管的作用是耐高温,保护测温铠装丝。

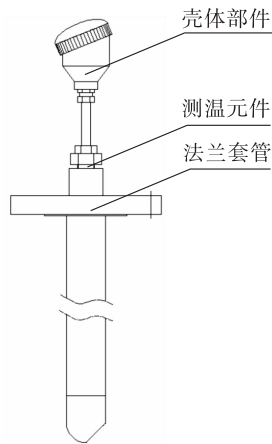


图 1 乙烯裂解炉专用热电偶外部结构图

1.2 工作原理

乙烯裂解炉专用热电偶的电极由两根不同成份导体材质组成,两端经焊接后形成回路,直接测温段为工作端,接线端为参比端。当工作端与参比端存在温差时,就会在回路中产生热电势,工作仪表则会将热电势转化为对应温度值进行显示。

2 基本规则和假设

2.1 约定层次

乙烯裂解炉专用热电偶 FMEA 分析根据热电偶的功能及结构分解,划分层次如下:

- (1)第一层次:乙烯裂解炉专用热电偶;
- (2)第二层次:壳体部件、测温元件、法兰套管;
- (3)最低层次:
 - ①壳体部件:铝盖、壳体、连接头、套管;
 - ②测温元件:铠装丝、内刚玉管、卡套螺纹、接头、外刚玉管;
 - ③法兰套管:法兰、拆装保护管、套管、内套管、凸台、陶瓷纤维。

2.2 故障判据

根据项目任务书和产品技术说明书的要求,确定乙烯裂解炉专用热电偶的故障判据,部件的故障判据根据系统故障判据分解和功能设计得到。乙烯裂解炉专用热电偶及其部件的故障判据如下。

表 1 乙烯裂解炉专用热电偶及其部件的故障判据

产品对象	故障判据
乙烯裂解炉 专用热电偶	无输出信号
	测量误差大
	保护管破损
壳体部件 法兰套管	高温介质泄露
	密封性能丧失
测温体	密封性能丧失
	无输出信号
	测量误差大
	保护管破损

2.3 故障信息来源

FMEA 表中故障模式和故障发生概率等级的信息来源:

- (1)产品应用过程中真实发生的故障模式;
- (2)根据乙烯裂解炉专用热电偶的结构组成、原理分析,预测的可能出现的故障模式。

2.4 严酷度定义

根据乙烯裂解炉专用热电偶的每个故障模式的最终影响程度,确定其严酷度等级,如表 2。

表 2 故障模式严酷度类别及定义

类别	严酷度	定义
I	灾难的	引起乙烯裂解炉专用热电偶仪表的主要或关键功能全部丧失,或对环境、人员造成危害。
II	致命的	引起乙烯裂解炉专用热电偶仪表主要或部分关键功能丧失,或造成被监控、测量、调节系统设备的损坏。
III	严重的	引起乙烯裂解炉专用热电偶部分关键性能降低,影响其主要功能的执行。
IV	轻度的	引起乙烯裂解炉专用热电偶轻度损伤,但不影响主要功能的执行,可能导致非计划性的维护或修理。

故障模式发生可能性等级如表 3 所示。

表 3 故障模式发生可能性等级表

等级	发生可能性	发生概率
A	经常发生	$>10^{-3}$ (高概率)
B	有时发生	$10^{-6} \leq p \leq 10^{-3}$ (中等概率)
C	偶然发生	$10^{-6} \leq p \leq 10^{-4}$ (不常发生)
D	很少发生	$10^{-6} \leq p \leq 10^{-6}$ (不大可能发生)
E	极少发生	$\leq 10^{-6}$ (近乎为零)

3 故障模式及影响分析(FMEA)

乙烯裂解炉热电偶的 FMEA 分析表见表 4。共分析出 21 种热电偶故障模式,其中,8 种严酷度 I 类故障模式,1 种 II 类故障模式,3 种 III 类故障模式,9 种 IV 类故障模式。

表 4 故障模式及影响(FMEA)分析表(约定层次:乙烯裂解炉专用热电偶)

编码	代码	名称	功能描述	故障模式	故障原因	局部影响	高一层影响	最终影响	严酷度类别	故障模式发生概率等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施
1.1.1	1.1.1.1-1	壳体部件	密封、保护热电偶	腐蚀、泄露	高温、酸碱环境引起腐蚀	引起工作介质泄露	密封性能丧失	高温介质泄露	I	D	目视检查		定期对法兰进行检查
	1.1.1.1-2			变形松动	铝制品较软,多次使用易变形	铝盖边缘不齐或者盖圆度不圆	不能很好地与壳体紧密配合	高温介质泄露	I	E	目视检查		使用高强度、抗变形铝盖
	1.1.1.1-3			表层生锈	腐蚀失效	无影响	无影响	无影响	IV	C			
1.1.2	1.1.2-1	壳体部件	密封、保护热电偶	表层生锈	腐蚀失效	无影响	无影响	无影响	IV	C			
1.1.3	1.1.3-1			腐蚀、泄露	高温、酸碱环境引起腐蚀	引起工作介质泄露	密封性能丧失	高温介质泄露	I	D	目视检查		定期对接头进行检查
	1.1.3-2			连接失效	螺纹未装配到位置	未紧密连接	密封性丧失	高温介质泄露	I	E			
1.1.4	1.1.4-1	法兰套管	耐高温,保护测温铠装丝	表层生锈	腐蚀失效	无影响	无影响	无影响	IV	C			
1.2.1	1.2.1-1			腐蚀、泄露	高温、酸碱环境引起腐蚀	引起工作介质泄露	密封性能丧失	高温介质泄露	I	E	目视检查		定期对小法兰进行检查
1.2.2	1.2.2-1			腐蚀、泄露	高温、酸碱环境引起腐蚀	引起工作介质泄露	密封性能丧失	高温介质泄露	I	D	目视检测		定期对接头进行检查
	1.2.2-2	法兰套管	耐高温,保护测温铠装丝	密封性丧失	与法兰密封失效	气化炉介质泄露	气化炉介质泄露	高温介质泄露	I	E	目视检查		规范工艺
	1.2.3-1			表层生锈	高温、酸碱环境引起腐蚀	无影响	无影响	无影响	I	D	目视检测		

续表 4

编码	代码	名称	功能描述	故障模式	故障原因	故障影响			严酷度类别	故障模式发生概率等级	故障检测方法	设计改进措施	使用补偿措施
						局部影响	高一层影响	最终影响					
1.2.4	1.2.4-1	法兰套管 耐高温, 保护测温 铠装丝	套管破裂	套管头 Incoloy 800H 合金在氧、硫、碳气氛下发生的高温氧化	氧化造成晶界强度的减弱, 在应力的作用下产生裂纹	无影响	无影响	无影响	I	E	无影响	高温介质泄露	套管头热处理消除应力
1.2.5	1.2.5-1												
1.2.6	1.2.6-1												
1.3.1	1.3.1-1		断裂	陶瓷纤维耐磨性差	失去隔热、保温作用	失去隔热、保温作用	失去隔热、保温作用	测量误差大	III	D			
	1.3.1-2		老化变质	高温	污染引起脆裂	测温芯失效	不能传递温度信号	无输出信号	III	C		选用高品质测温芯	
	1.3.2-1		脆裂	振动	局部断裂	局部断裂	无影响	无影响	IV	D			
1.3.3	1.3.3-1	测温元件 热电偶测温核心元件	脆裂	振动	局部断裂	局部断裂	无影响	无影响	IV	D			
1.3.4	1.3.4-1		密封性丧失	接头与法兰凸台密封失效	热电偶不固定	密封性丧失	密封性丧失	测量误差大	II	D			规范工艺
	1.3.4-2		表层生锈	腐蚀失效	无影响	无影响	无影响	无影响	IV	D			
	1.3.5-1		密封性失效	腐蚀失效	无影响	无影响	无影响	无影响	IV	D			规范工艺

4 结论

根据乙烯裂解炉热电偶的 FMEA 分析,结合热电偶的相关参数,对热电偶进行设计改进和优化补偿措施。该次设计方案中选择的测温元件为 K 分度的单支式热电偶,考虑到使用寿命,选用的测量端形式为绝缘式。该热电偶的长期最高工作为 1100 ℃,短期最高工作温度为 1200 ℃。

热电偶测温核心元件选用高品质测温芯;保护管在高温、酸碱环境中易引起腐蚀,选用耐高温、腐蚀速率慢的 Inconel 800H 合金。接线盒设计时,选用 ADC12 铸铝材质,表面喷聚氨酯涂层。

参考文献:

- [1] 陶小利,高嵩,黄宏伟,等. 耐高温压力变送器在特殊场合应用的分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(6):112-113.
- [2] 陈垦伦, 灵敏仪, 梁佩博, 等. 基于 FMEA 的某型高温熔盐压力变送器可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023(02):33-39.
- [3] 陈清清. K 型热电偶高温测温特性的研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2021.
- [4] 系统可靠性分析技术、失效模式和影响分析(FMEA)程序:GB/T 7826—2012 [S]. 2012.
- [5] 故障模式、影响及危害性分析指南:GJB/Z 1391—2006 [S]. 2006.
- [6] 可靠性维修性保障性术语:GJB 451A—2005[S]. 2005.

(上接第 30 页)

- [6] JANI F, ADHAMDOUST S R, HOSSEINIS, et al. Process monitoring of polyolefin slurry – phase polymerization in continuous stirred – tank reactor via analysis of acoustic emission waves [J]. Brazilian journal of chemical engineering, 2023; 1 – 13.
- [7] 唐宇, 黄海龙. 反应釜实训装置的设计与应用 [J]. 机械设计与制造, 2023, 388(6): 176 – 179 + 183.
- [8] WU F, YANG F, MAD, et al. Design of virtual digital os-

cilloscope based on LabVIEW[J]. E3S Web of Conferences, 2021 (268) :1059.

- [9] 周细凤,曾荣周,林愿,等. 基于 NI Multisim 和 LabVIEW 的通信电子线路课程开放式虚拟实验平台[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(5): 135-139.
- [10] GE Z, GUO H, WANG T, et al. Universal graph filter design based on butterworth, chebyshev and elliptic functions[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2023, 42(1): 564-579.

(上接第 39 页)

- [6] 刘高强. AGV 自动运输系统在 PCB 生产车间的应用研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
- [7] 戴博, 杨根科. 面向高端装备制造企业的智能生产物流系统设计[J]. 制造业自动化, 2017, 39(6): 136 - 139.
- [8] 张晓东, 曹毅, 李秀娟. 立体仓库巷道堆垛机控制系统设计[J]. 自动化仪表, 2013, 34(5): 46 - 48.
- [9] 梁胜涛, 陈良坤, 舒奇奇, 等. 基于无线通信与 RFID 定位的智能仓储系统的设计[J]. 自动化技术与应用,

2020,39(1):169–172.

- [10] 吴淑梅,张志超,赵剑伟,等. 基于视觉与 PLC 的面相物流末端的智能分拣系统[J]. 机电工程技术,2022,51(5):112-115.
- [11] 高净净. 基于 MES 与 AGV 互连的智能仓储系统设计[J]. 机电工程技术,2021,50(7):72-74.
- [12] 薛玉东,贺鹏飞,王中训,等. 基于分布式控制系统的带电作业工器具智慧仓储设计[J]. 电子设计工程,2023,31(24):42-46.

(上接第 43 页)

- [6] 张雁忠,刁嘉,翟化欣,等.基于嵌入式技术的风电场智慧监控系统[J].微型电脑应用,2023,39(10):91-94.
- [7] 晋高建.基于BAS-BPNN模型的风电机组塔筒倾斜度预测研究[J].电气技术与经济,2023(10):20-23+28.
- [8] 赵飞飞,张显云.三维激光技术在风力发电机塔筒垂直度检测中的应用[J].电视技术,2023,47(06):201-204.

- [9] 乐天达,赵强,章志鸿,等. 基于 PWKNN 算法的风电系统故障诊断研究[J]. 微型电脑应用,2024,40(01): 188-192.
- [10] 杜静,许亚能,谢双义,等. 基于 TMD 的风力机塔筒振动控制研究[J]. 太阳能学报,2021,42(02): 157-162.
- [11] 单立宇,张兰红,陈小海. 基于磁链预测的永磁直驱风力发电机 SVM-DTC 技术[J]. 电子设计工程,2023,31(4): 62-67.