

# 化工侧线装置设计优化与 HAZOP 分析新方法

曲顺利\*

(中海油石化工程有限公司, 山东 济南 250101)

**摘要:**通过分析侧线装置不同于传统大型装置的独有特点,对侧线装置在设计过程中提出了优化措施,特别是在设备漏热、内构件、工艺流程设计等方面;同时对侧线装置的 HAZOP 分析提出“双系列”分析方法,从安全风险性和实验成功性 2 个角度开展,完善 SIL 定级工作,为今后侧线装置的建设提供借鉴。

**关键词:**侧线装置;工程设计;实验;HAZOP 分析;SIL

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)11-0214-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.11.045

## Design optimization and new HAZOP analysis method for side-line plant

QU Shun-li\*

(CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China)

**Abstract:**Through analyzing unique characteristics of the side-line plant, which is different from that of traditional large-scale plant, the optimization measures are put forward in the design process of side-line plant, especially in the aspects of equipment heat leakage, internal components, process flow design, etc. At the same time, “two series” analysis method is proposed for HAZOP analysis on side-line plant, which is carried out from two aspects of safety risk and experimental success, so as to improve SIL grading work and provide reference for the construction of side-line plant in the future.

**Key words:** side-line plant; engineering design; test; HAZOP analysis; SIL

我国现在已经成为国际上石油化工的产业大户,但是炼油化工一体化起步较晚,产业和产品层次不高<sup>[1-2]</sup>,其中多数关键技术依然无法实现国产化和自主化,尤其在重大工艺设备、催化剂以及相配套的工艺包设计方面,均需昂贵费用从国外采购,增加了项目建设成本和产品经济效益,例如丙烷脱氢制丙烯技术大多数采用国外技术<sup>[3]</sup>,霍尼韦尔(UOP)甚至成为国内炼油化工的主要工艺技术提供方。现在国内的各大研究机构已开始将“卡脖子”技术放在创新驱动突破方向,但是为了确保实验室研究更准确更有效地转化为工业化装置以及工艺包产品,必须经过一个放大过程,为解决放大效应通常需建设一个规模相对较大的侧线装置或者中试装置<sup>[4-5]</sup>。

通过对侧线装置运行数据和放大效应关键参数分析,进而转化为大型项目工艺包。例如合成气和碳四(丁烯等)通过氢甲酰反应制备高碳醇工艺技术研发,实验室阶段每小时的进料基本上是 100~200 g,整体年产 1 t 左右 2-丙基庚醇(2-PH);而工艺包设计规模一般在 5~10 万 t/a,相差上万倍的放大倍数,无法直接准确地转化到工业设计,此时可建

设一个年产 300~500 t 的侧线装置来解决这个问题。目前侧线设计基本上是按照传统方式设计然后再委托撬装厂家加工,然而考虑到侧线存在运行时间短、装置规模小的特殊性,本文中根据侧线装置的独有特点对设计进行优化,提出一套适用于侧线装置的设计思路和 HAZOP 分析的新方法。

### 1 侧线装置特点

侧线装置特点有:一是时间短,大部分侧线都是依托大型化装置,依托现场工业原料、产品处理装置和公用工程,运行时间维持 1~3 个月,最长在半年左右;二是占地面积小,侧线装置不属于原有大型装置项目建设规划中,因此一般侧线装置是利用厂区的余地或者闲地,做成撬装模块减少占地面积,同时方便运输;三是经济分析不作为评价指标,由于侧线装置的目的是评价催化剂或者为工艺包设计提供数据,对于整体的经济评价很少要求;四是临时性,侧线装置作为一个实验装置,完成实验评价后大多数会拆除退厂。

除了以上几点,侧线装置还有特有的不确定性

收稿日期:2020-12-04;修回日期:2021-08-26

作者简介:曲顺利(1976-),男,本科,高级工程师,研究方向为炼油化工以及天然气加工设计、氢能技术研发,通讯联系人, qushl2@cnooc.com.cn。

和实验性,风险性依然存在,特别是不能对周边原有装置造成安全事故影响。目前侧线装置规模小型化基本不做HAZOP分析和SIL定级,或者依然采用传统的HAZOP分析,结果是整体风险偏低,导致后续的SIL定级分析难以有效开展。

## 2 设计优化与建议

### 2.1 保温与漏热

侧线装置设备相对较小,即使处理量相对高的反应器或者精馏塔内径基本上在DN500以下,而且由于实验数据的采集会引起设备开孔接口增多,保温效果会受到严重影响,特别是法兰以及螺栓部位<sup>[6]</sup>。漏热问题是侧线装置不能忽略的现象,即使是放热反应也会存在所放热量不足以抵消漏热量现象。如果漏热导致反应温度不够,且没有额外热源作为备用将会影响整个反应系统,甚至无法完成整个侧线实验的评定。

以甲苯甲醇烷基化反应为例<sup>[7]</sup>,烷基化反应是一个放热反应,采用的反应器为多段进料固定床反应器,实验室阶段在反应器的轴向增加电加热装置确保整个反应在设计要求温度下进行,即恒温反应(如图1)。在工业设计保温效果好,该反应器按照绝热反应器设计不设置额外加热装置,但是侧线装置需要考虑因实验装置小导致保温效果差的问题,进而引起实验条件产生严重偏离,特别是轴向多段固定床,轴向相对较高,如果上部分漏热较大,引起反应转化率降低,放热减少,导致下部分温度会继续降低,副反应增多,偏离反应温度要求。

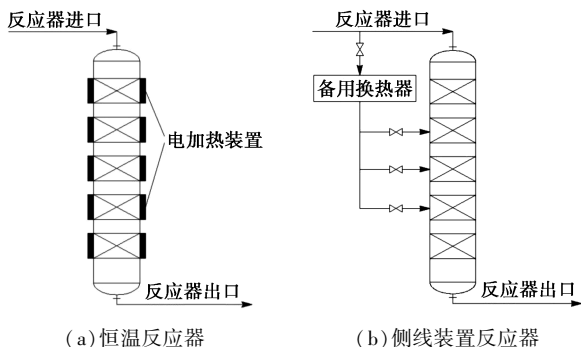


图1 实验室恒温反应器和侧线装置反应器示意图

因此在散热和保温上需重点优化设计:①反应器尽可能取消外部接口和零件,例如吊耳可利用段间法兰代替;②法兰等不平整部位可采用气凝胶等保温材料<sup>[8]</sup>。为了确保反应顺利完成,设计过程中还要比传统设计增加备用措施,根据实际运行情况

决定是否需要启用:①在保温层下增加蒸汽或者其他介质保温,减少温差,降低散热;②增加外部换热系统,例如釜式反应器增加釜内取热给热盘管双向流设计;③增加间段进料增温装置,提高侧线进料温度,或者作为急冷线(如图1)。

### 2.2 设备中关键构件设计

侧线装置设备的特点主要是尺寸小,缺点是部分零部件加工难度较高,优点是介质和流体的混合效果更充分,因此对于分布器、混合器等可根据实际情况优化设计。

例如在精馏塔中为了提高气液接触,液相分布效果至关重要,高性能的分布器要求各点流率与平均流率的最大误差保持在6%以内。因此对于多数的精馏塔需要进行分段设计,填料塔在过高的情况下会导致实际的理论层数低于理论板数,例如当液体分布质量下降40%时,20层理论板数的填料层实际上会降低至10层。对于侧线装置,直径基本上在DN500以下,液体分布的横向效应明显强于夹紧效应,局部出现浓度夹紧点的可能性低,此时重点是确保整个塔设备的垂直高度。因此区别于传统设计,小塔径设备的分布器不必选用型式极为复杂的设计,甚至利用预留段空间就可完成物料的混合,因此填料或者催化剂分段可以减少或者不设置。

### 2.3 工艺优化

侧线装置重点要放在整体设计,部分工艺设计要区别于传统的设计思路 and 理念。

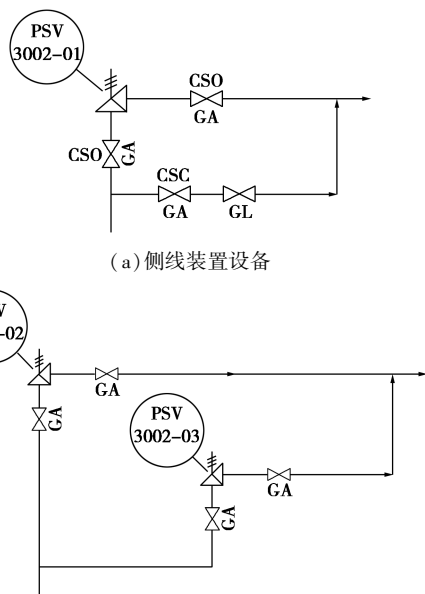
#### 2.3.1 充分考虑过滤器

过滤器在整个设计中的功能很单一,主要在泵、压缩机、喷头等上游增加一个过滤装置,将流体中固体颗粒过滤出去,保护下游阀门和设备。特别是采用固体催化剂的工艺,即使在实验室阶段没有采用过滤装置也没有出现固体颗粒现象,对于侧线装置一定要重点考量,放大效应后催化剂在外力增加后挤压破损的概率增加,所以为确保实验的顺利进行建议采用过滤器,这也是对不确定性实验的保障。在侧线装置运行后对过滤器进行检查,可以判断后续的工业设计是否有必要增加。

#### 2.3.2 安全阀的优化设计

安全阀的主要功能是确保设备的安全,一般设计原则是一个独立设备配备相应安全阀,而且设备可独立检修。但是对于侧线装置由于相对流程短,运行时间短,不考虑常规的检维修,因此安全阀的设计有很大优化空间。一是减少备用设计(如图2),侧线装置不考虑在线检修工况,在安全设计情况下

可减少备用<sup>[9]</sup>。二是由于流程短、空间小,可以通过优化设计实现系统的安全阀共用,减少阀门设置数量,降低费用。例如在甲苯甲醇烷基化制备对二甲苯的侧线装置中,反应器一直到末端的分离装置不设置任何隔断阀门(如图 3),设置在末端具有压力低且温度低的优点,即使在装置切断过程也是尽量采用短管型式,节省了 4 个安全阀。



(a) 侧线装置设备  
(b) 常规连续运行设备  
图 2 安全阀设置

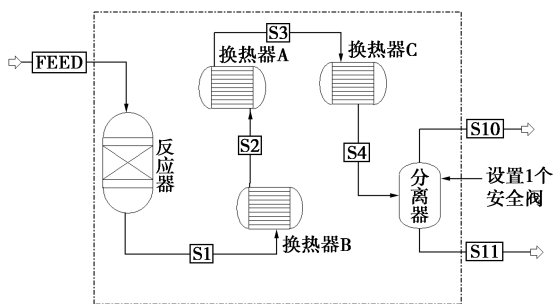


图 3 工艺系统共用安全阀设计

另外,由于设备设计规模小,相对投资成本低,因此换热器等可以通过选用绕管式结构或者提高设计等级等方式,实现高温差的单体设备加工,减少设备数量。

### 2.3.3 流量计和取样设置

侧线装置中关键位置流量、温度、压力等参数是后续工艺包和工程转化的重要依据。对于侧线装置流量相对低,管径的选取特别是液相多数在 1/2 寸以下,优先采用卡套管的型式。对于小管径流量计,建议首选质量流量计以获得精确数据,在关键原料与产品管线、循环管线等位置必须设置流量计。

取样设计要更加灵活,分析范围更广,特别是化

工项目,复杂的副反应在实验室中可能无法发现甚至没有发生,因此取样的选取点和样品分析范围一定要全面,必要时安装在线分析仪对工艺进行实时的调节和控制。

除了以上几个方面,在设计的时候还要充分考虑到撬装设计,这也包括了整体的安装、运输和拆卸,特别是反应器、塔等高设备。

## 3 HAZOP 分析新方法

目前对于新建大型装置根据规范必须做 HAZOP 分析和 SIL 定级工作,HAZOP 全称为危险性和可操作性研究<sup>[10-11]</sup>,是通过“头脑风暴”的模式来识别整个工艺危险的有效方法,目的主要是辨识和评估可能造成人员伤害或财产损失的风险,发现设计中存在的缺陷。在 HAZOP 分析中,会对每一个“偏差”所造成的危险性进行评估,然后确定危险发生的后果严重程度和概率,最后通过风险矩阵判定该偏差所能引起后果的危险性,主要分为“低风险”、“中风险”、“高风险”以及“严重高风险”。对于危险性定级较高的在 SIL 定级分析相应回路的安全仪表系统,提高可靠性。

### 3.1 节点划分“总分”

HAZOP 分析节点划分是整个分析过程的“器官”,如何有效地划分节点非常关键。鉴于侧线装置流程短,可以从“一体化-总分”的角度分析简化节点划分,对于温度、压力或者流量等在一个系统的整体分析,无法系统性地再按照小节点分析,避免出现重复分析的现象。

例如常规侧线装置以反应器为核心,配备换热系统、进料系统、分离系统等。对于反应单元和换热单元的流量、压力等都是一个系统,完全可以将其合并为一个节点分析,同时防腐、取样分析、公用工程、放空等可以作为一个总体只做 1 次分析。

### 3.2 新建“双系列”风险矩阵

风险矩阵是整个 HAZOP 分析的重点内容,传统 HAZOP 分析后果主要按照人员伤害、财产损失、环境影响和社会影响 4 个方面来定义,更多的是考虑财产和死亡人数,而大多数侧线分析会沿用周边装置 HAZOP 的风险矩阵。例如表 1。

表 1 常规石油化工项目 HAZOP 分析风险矩阵

严重性	A~D
人员伤亡	从人员伤亡数量和重伤人员数量来划分
财产损失	通过财产经济损失金额和停车程度来划分
环境影响	对周边地区的生活、工作等造成污染程度划分
社会影响	对社区、居民、公司以及国内外等造成的影响

但是对于侧线装置规模投资低的特点,财产损失、人员伤害和环境影响相对较小,因此侧线装置的分析几乎都是低风险。这其中特别需要注意的一点是“停车”,对大型项目的停车会造成严重经济损失,甚至达到上千万元等,但是对于侧线装置“停车”反而成为了一种有效保护方法。

因此鉴于实验装置特殊性,而且其目的性是实验的成功而不是经济效益,特别是新技术的时效性,如果增加更多的保护措施会提高一定成本但是会推进实验进度,降低实验失败概率。因此对于侧线装置可做双系列风险分析,第一是上述提到的传统化工安全危险性分析;第二是实验成功率影响风险分析,相关的风险矩阵如表2。“后果”为实验成功、实验经费、停工时间以及后续开工,作为第一组的辅助结果,进而作为后续 SIL 定级的依据,从安全风险和实验成功率 2 个方面分析,既考虑实验的安全运行也要确保装置有效完成。

表2 新增侧线装置 HAZOP 分析实验成功风险矩阵

严重性	A~D
实验成功	对实验能够成功的可能性继续分析划分
实验经费	对实验经费的影响划分
停工时间	造成停工时间长短划分
后续开工	对后续能够开工或者开工所需要的成本和工作量继续划分

第二系列的分析考虑到实验装置的成功、实验经费的允许程度、停工周期的长短以及停工后能否继续开工等问题,提高整体工艺分析的层次。

### 3.3 HAZOP 分析流程图

图4是通过上述“双系列”分析方法优化后,HAZOP 分析的流程简化图。

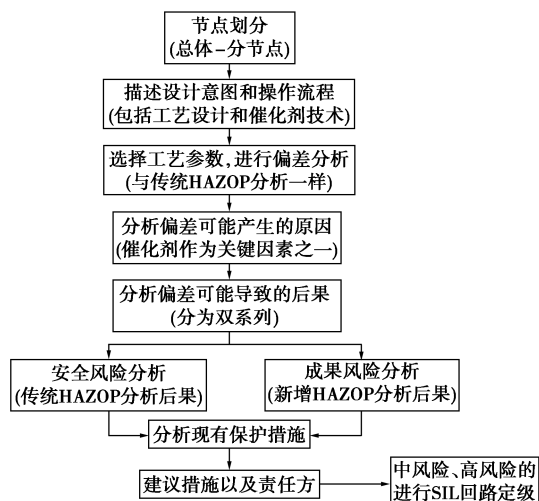


图4 优化后 HAZOP 分析的流程简化图

## 4 总结

通过分析侧线装置与传统装置的独有特点,针对侧线装置的设计提出了几点优化。

(1)漏热与保温是侧线需要重点考虑的,也是确保整体运行温度要求,以防因为温度导致实验的整体失败。

(2)塔内件的优化设计,考虑体型小设备的气液或者液液混合效果好,因此可减少设备制造的复杂程度,例如气相分布器、液相分布器、搅拌器、再分布器等。

(3)对于工艺流程可根据实际情况进行优化,例如安全阀的设计等。

重点为侧线的 HAZOP 分析提出了“双系列”的风险矩阵,一个是传统以生命安全和财产损失为核心的安全风险分析,新增一个以试验成功、停工时间、重新开工等分析,重点考虑实验成功的风险分析。

## 参考文献

- [1] 马跃,许佳伟.浅析我国石油化工技术创新发展趋势[J].化工管理,2018,(34):73-74.
- [2] 杜星星,陈奇强,张鹏.我国炼化一体化进程的进展[J].当代化工,2012,41(8):828-829.
- [3] 郭梦扬,云泽拥.国内丙烷脱氢装置发展现状[J].天津职业院校联合学报,2019,21(11):84-87.
- [4] 光新军,王敏生,叶海超,等.我国油气工程领域“卡脖子”技术分析和发展对策建议[J].石油科技论坛,2019,38(5):32-39.
- [5] 千吨级合成气制混合醇工业侧线装置试车成功[J].石油炼制与化工,2015,46(1):77.
- [6] 林肖.焦化装置高温法兰泄漏原因分析及解决措施[J].齐鲁石油化工,2014,(3):248-252.
- [7] 齐美美,李孝国,常洋,等.核壳结构 Pt@ZSM-5@S-1 分子筛用于甲苯甲醇烷基化制对二甲苯的研究[J].现代化工,2020,40(9):131-135,141.
- [8] 吴晓栋,宋梓豪,王伟,等.气凝胶材料的研究进展[J].南京工业大学学报:自然科学版,2020,42(4):405-451.
- [9] 程京山,夏德富,杨继有.化工压力容器安全阀的设置与安装设计[J].盐科学与化工,2019,48(12):34-37.
- [10] 李萌.HAZOP 分析的应用与研究[J].当代化工,2020,49(9):1973-1976.
- [11] 李元军.项目 HAZOP 分析完整性保证及其分析方法运用扩展的探究[J].现代化工,2019,39(9):11-15. ■