

• 化学工程与材料工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800550

TFE裂解工艺F22汽化节点非稳态本质安全分析

秦杨梅, 肖泽仪*, 曾际颖, 郭世蒙, 樊森清

(四川大学 化学工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要:在化工过程中, 过程安全分析是非常重要的。然而, 在非稳态条件下, 过程工艺参数处于变化状态, 并且缺乏系统性的本质安全分析方法, 更容易产生危险和事故。作者对二氟一氯甲烷(F22)水蒸气稀释裂解中F22汽化非稳态过程进行了本质安全性分析。首先, 利用热量动态平衡方程, 对F22汽化过程建立了集总参数数学模型, 并对模型进行数值计算, 得到与实际相吻合的F22汽化操作温度、操作压力以及F22出口气体流量的非稳态时间过程曲线。然后, 系统地分析了影响四氟乙烯(TFE)生产过程本质安全的因素, 从物质、工艺和设备3个方面建立TFE生产过程本质安全指标体系, 并根据相关标准与文献将指标分级并建立隶属函数。将选取的相应指标值和计算所得数据输入MATLAB模糊逻辑工具箱, 利用IF-THEN规则建立模糊推理规则, 用面积重心法逆模糊化求得各指标的本质安全度。分别运用层次分析法和变权思想的方法计算得出各指标的初始权重和变权权重。最后, 计算得出F22汽化非稳态过程的系统本质安全度。结果表明: F22汽化过程达到稳态的时间将近1 000 s, 前500 s温度、压力及出口气体量升高迅速, 稳态值分别为268.55 K、432.405 kPa和1.085 kg/s; 初始时本质安全度0.576 4下降至稳态时的0.574 2, 显示该过程在非稳态(如启动)阶段表现出稍高的风险。这种方法和计算结果为该工艺中F22汽化节点相关的安全设计、建设、监控和管理提供参考理论依据。

关键词:TFE裂解工艺; F22汽化; 本质安全; 非稳态; 模糊逻辑

中图分类号:TQ022.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)04-0210-07

Unsteady State Inherent Safety Analysis of F22 Vaporization Node of TFE Pyrolysis Process

QIN Yangmei, XIAO Zeyi*, ZENG Jiying, GUO Shimeng, FAN Senqing

(School of Chemical Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Process safety analysis is important and necessary in the chemical process industries. However, a lack of a systemic methodology for inherent safety studies in an unsteady state, which causes more hazards and accidents. In order to analyze the inherent safety of the F22 vaporization unsteady state process of the steam dilution pyrolysis, the lumped parameter mathematic model for the F22 vaporization was established by using the thermal equilibrium equation. The model was numerically calculated to obtain the unsteady state time course profiles of operating temperature, pressure and F22 gas outlet mass flow rate, which were consistent with the field data. Then, the factors influencing the inherent safety of the TFE production process were systematically analyzed. The inherent safety index system of the TFE production process was established from three aspects of chemical, process, and equipment. The indices were graded according to relevant standards, and literature and membership functions were established. Index values and calculated data were input into the MATLAB Fuzzy logic toolbox. The IF-THEN rules were used to establish the Fuzzy inference rules, and the inherent safety degree of each index was defuzzified by the method of center of area (COA). The initial weight and variable weight of each index were calculated using the combination of analytic hierarchy process and variable weight method. Finally, the inherent safety degree of the F22 vaporization node was calculated. The results showed that the steady state time is nearly 1 000 s. The temperature, pressure, and outlet gas volume in the first 500 s increase rapidly. The steady state values are 268.55 K, 432.405 kPa and 1.085 kg/s respectively. The inherent safety degree decreases with time. The initially inherent safety 0.576 4 dropped to 0.574 2 at steady state. The results

收稿日期:2018-05-23

基金项目:四川省安全生产科技项目(scaqjgc_stp_20150018)

作者简介:秦杨梅(1993—), 女, 博士生。研究方向:化工安全与技术。E-mail: qyangmei@stu.scu.edu.cn

* 通信联系人 E-mail: mgch@scu.edu.cn

网络出版时间:2019-06-19 10:57:19

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190618.1011.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

showed that the unsteady state (a start-up process) appears a higher risk. The method and results provide a theoretical basis for the safe design, monitoring, and management of the F22 vaporization node in the process.

Key words: TFE pyrolysis process; F22 vaporization; inherent safety; unsteady state; Fuzzy logic

二氟一氯甲烷(F22)水蒸气稀释裂解制备TFE单体的方法由于其转化率和产率较高,原料消耗低且副产物少,反应器结构简单可靠,是目前国内首要采用的方法^[1-2]。TFE生产过程由于产生危险化学品,其易燃易爆、毒害性导致事故隐患多,事故也具有灾害性、突发性^[3],可以从本质安全的角度分析过程风险从而预防、减少事故。现阶段已有的研究大多针对TFE稳态生产过程,但未涉及本质安全分析^[4-8]。本质安全的思想与方法由于能够在确保经济效益的同时从源头上消减风险而引起了相关行业的关注。20世纪90年代,Kletz^[9]将本质安全概念首次引入石油化工行业。化工过程本质安全并非杜绝危险源,而是凭借自身设计将危险控制在可接受的水平^[10]。“本质安全”是一种相对性概念,如果一个化工过程永久并不可分地减少或消除了与物质、操作有关的危险,过程就是本质安全的。绝对本质安全的过程是不存在的,因此可以参考本质安全原则使过程“本质较安全”,如对有危险的物料进行替代或减少使用量^[11]。目前,有关过程本质安全分析的方法与案例研究大多基于过程的稳态运行,而在实际生产过程中,安全事故多发于设备非稳态运行过程中。与稳态过程不同,在工艺非稳态运行过程中,物料或设备是很难改变的,但过程的工艺参数会发生变化,而工艺参数是影响过程本质安全的因素之一,这就使非稳态过程的本质安全水平不同于稳态过程,是变化的。但目前尚未有关“非稳态过程本质安全”的严格定义。因此,为减少实际生产过程中的安全事故,并为相关的技术和管理人员提供本质安全设计、分析和管理的理论依据,有必要分析四氟乙烯单体生产过程中工艺参数非稳态运行的风险状况,其风险水平评估表现为“非稳态过程本质安全度”。

到20世纪90年代,一些过程本质安全评价方法已经发展成熟,如Dow指数、蒙德指数和HAZOP。但这些方法需要详细的信息与专家知识,不适合作为初步工艺设计的分析工具,并且很难将这些复杂的危险评估方法应用于计算机辅助系统,例如过程模拟和优化^[12]。本质安全指数的设计是为了对本质安全性的定量评估,并将其作为指南来表明本质安全程度。并且,本质安全指数法可以应用到化工生产过程的整个生命周期进行本质安全设计、分析与评价。Edwards等^[13]在1993年首先提出了PIIS指标法,计算整体本质安全程度,对工艺路线进行选择。Heikkla^[14]

随后提出本质安全指数ISI法,其部分基于PIIS的指标,并且量化了本质安全原则。随后,多种本质安全指数法被提出,如i-Safe、I2SI、ISIM等^[15-17]。另外,Gentile等^[18]提出模糊本质安全指数,对某些变量进行评价时所隐含的不确定性和主观性的一种有用的建模方法,它有助于将定量数据与定性信息相结合。目前,针对化工非稳态过程安全的研究较少。Khakzad等^[19]利用bow-tie模型与贝叶斯网络结合的方法分析了事故情境中的动态安全。Luyben^[20-21]应用ASPEN Dynamic软件,对反应器和精馏塔进行了模拟和安全性分析,主要结果针对关键参数的动态变化和反应时间。Kossoy等^[22]将数值分析与非线性优化的方法应用到应对冷却失效的情境。

作者以某四氟乙烯生产工厂工艺流程为对象,前期已将其工艺可划分为裂解、脱酸、脱水和精馏4个工段,包含共16个工艺节点,并完成了脱酸工段的急冷器^[23]、脱水工段的冷凝脱水塔^[24]的非稳态运行的本质安全分析,这里将对整个工艺流程的起始节点——裂解工段的F22汽化过程进行非稳态运行的分析,利用模糊逻辑计算节点非稳态过程各指标本质安全度,并运用层次分析法与变权思想结合的方法获得权重,最终计算得到系统非稳态过程本质安全度,从而为TFE生产工艺流程设计或已有生产工艺流程管理提供理论依据。

1 F22汽化的非稳态过程分析

F22在汽化过程中由液体吸热汽化变为气体,之后进入过热蒸汽炉升温并与水蒸气混合。汽化装置可视为一个夹套单组分蒸发罐,如图1所示。

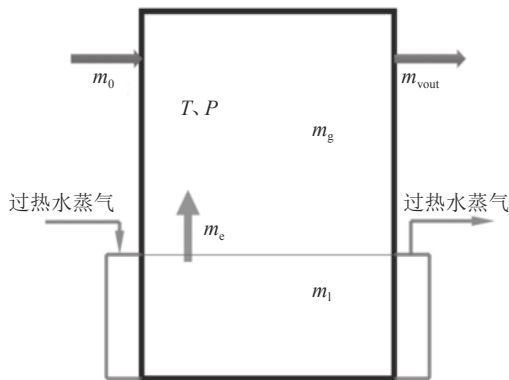


图1 F22汽化过程物流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of material flow in the F22 vaporization

首先,在建立汽化非稳态传热平衡方程前做如下假设:

- 1)F22汽化装置中气液均处于饱和状态;
- 2)F22液相、气相在控制体内温度分布均匀;
- 3)汽化装置内气体视为理想气体,满足理想气体状态方程;
- 4)汽化装置内F22液体的液位以及F22气、液相比热容为定值;
- 5)夹套换热面积和夹套换热系数取定值;
- 6)水蒸气与夹套换热忽略;
- 7)夹套中的过热水蒸汽的温度视为定值。

基于以上假设,以热量动态平衡方程、理想气体状态方程为基础,采用集总参数建立非稳态数学模型。能量方程给出了温度(作为时间的函数),由蒸气压关系得到此温度下汽化器的压力表达式。还需要一个系统的质量平衡方程与蒸汽出口流量有关的压力方程。

质量守恒: $m_e = m_0$

(1)

$\frac{dm_g}{dt} = m_e - m_{vout}$

(2)

能量守恒: $c_1m_1\frac{dT}{dt} = C_1T_0m_0 + Q - m_{vout}(c_{pv}T + \lambda_v)$

(3)

夹套热量输入: $Q = KA(T_w - T)$

(4)

式中: $m_1 = V_1\rho_1$, $u_{down} = \frac{m_{vout}}{A_2\rho_v}$, m_0 为F22液体进口质量流量, kg/s; m_{vout} 为F22气体出口质量流量, kg/s; m_e 为

F22蒸发量, kg/s; m_g 为气相空间质量, kg; T 、 P 分别为汽化过程温度与压力。

根据理想气体状态方程,将压力对温度和气相空间气体质量求偏导:

$PV = \frac{m_gRT}{M}$

(5)

根据F22饱和蒸气压表将压力拟合为温度的函数:

$P = 0.135\ 7T^2 - 57.77T + 6\ 160$

(6)

F22气体出口流量通过压力下降和下游压力和伯努利方程来控制,罐内液面面积相对于下游管径可以视为很大,因此罐内F22流速为0。阻力系数可以用稳态值来估计。

$\frac{P}{\rho_v} = k\left(\frac{P}{\rho_v} + \frac{u_{down}^2}{2}\right)$

(7)

式中, u_2 为下游管F22气体流速, m/s。

借助MATLAB,使用龙格-库塔法进行迭代解微分式(1)~(7),可以得到汽化过程温度、压力以及F22气体出口流量关于时间的过程曲线^[25]。

2 基于模糊指标与变权思想的本质安全度计算法

2.1 本质安全指标体系的建立

通过对TFE生产工艺流程的分析,从化学物质、工艺流程、设备3个方面进行危险源辨识,建立了1个包含12个指标的3层本质安全指标体系(图2)。第1层

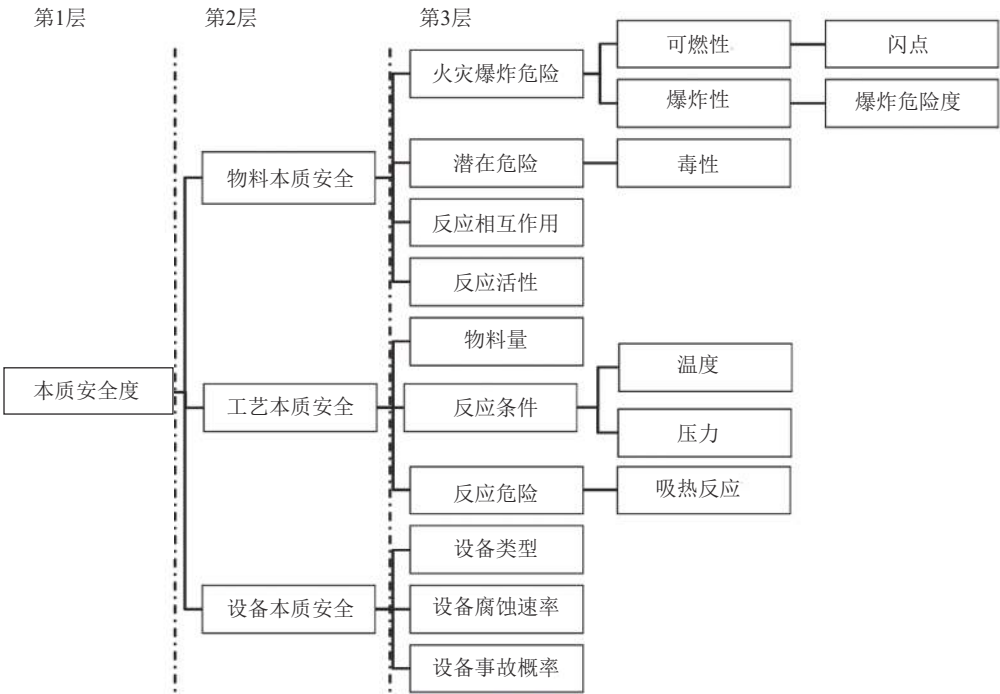


图 2 本质安全指标体系

Fig. 2 Inherent safety index system

为系统总体本质安全度,综合表达系统的本质安全水平;第2层是按照生产过程危险性的来源分为3个方面:物质本质安全度、工艺过程本质安全和装置设备本质安全;第3层为上述各具体子指标。需要说明的是,在非稳态过程中,物料、设备相关指标取值仍是定值,而工艺相关指标,如物料量、温度、压力等指标的参数取值是变化的,因此,这些指标变化所影响的风险水平也是变化的,其不同于以往本质安全指标中某指标的取值为一定值(因为传统的指标取值是基于稳态情况),而某一条线路的本质安全度即为一定值。这里将用这样的方法测量的过程风险水平用非稳态的“本质安全度”来定义,取值为[0, 1],“0”值代表过程系统具有“极大风险”,因此“本质安全度极低”,而“1”值则反之。最终得出的本质安全度的值即为非稳态过程系统相对于“本质完全安全”所能达到的水平,为一个相对概念。

2.2 模糊推理规则的建立

安全分析的特点是存在不确定性和主观性。1965年,Zadeh^[26]提出了模糊集和模糊逻辑理论。模糊逻辑可以解决不确定性和不精确的问题,以及复杂或不明确的系统。它是一种有效的工具,用于处理没有清晰边界(或问题定义)的问题,并且在过程安全性分析中广泛应用^[16,27]。作者采用模糊逻辑来评估本质安全度。

将第2.1节中子指标根据相关行业标准和相关文献进行分类,并用语言变量描述,通过模糊逻辑理论确定隶属函数。每个指标的危害一般分为5个等级:非常高(VH)、高(H)、中(M)、低(L)、极低(VL)。隶属函数的取值范围为[0, 1],它表示了本质安全度的上升趋势,并主要以三角形和梯形图的形式表示。为了建立模糊推理系统,设计了IF-THEN规则,并使用了Mamdani程序作为推理算法^[28]。然后,将各指标的值输入模糊推理系统,并运用面积重心法进行逆模糊化^[29-30]。最后,得到了所有指标的本质安全度的清晰输出。表1和2为子指标“操作温度”和“操作压力”的隶属函数。“操作温度”的分级依据参考ISI分级方法,在273.15和343.15 K之间对人体无害,343.15~423.15 K范围较温和,超过573.15 K碳钢强度明显降低^[14]。而“操作压力”指标分级参考道化学火灾爆炸指数和ISI的分级方法。表3为输出函数“本质安全度”的分级和隶属函数。参照风险分析矩阵确定模糊规则,两个输入参数“操作温度”和“操作压力”建立起“反应条件本质安全”评价矩阵,如表4所示,图3为隶属函数的形状。通过MATLAB模糊逻辑工具箱输出隶属函数得到反应条件本质安全模糊推理曲面图,如图4所示。其他子指标的隶属函数和模糊推理

规则设计同理,在此不再赘述。

表 1 操作温度的指标分级和隶属函数

Tab. 1 Index classification and membership function of operating temperature

分级	分级依据/K	隶属函数
VH	[873.15, +∞)	[723.15, 873.15, +∞, +∞]
H	[573.15, 873.15)	[498.15, 723.15, 873.15]
M	[423.15, 573.15)	[383.15, 498.15, 723.15]
L	[343.15, 423.15)或 (0, 273.15]	[308.15, 383.15, 498.15]或 [0, 0, 273.15, 308.15]
VL	[273.15, 343.15)	[0, 273.15, 308.15]

表 2 操作压力的指标分级和隶属函数

Tab. 2 Index classification and membership function of operating pressure

分级	分级依据/kPa	隶属函数
VH	[20 000, +∞)	[12 500, 20 000, +∞, +∞]
H	[5 000, 20 000)	[3 750, 12 500, 20 000]
M	[2 500, 5 000)	[1 500, 3 750, 12 500]
L	[50]或[500, 2 500)	[0, 0, 50, 225]或[225, 1 500, 3 750]
VL	(50, 500)	[50, 225, 1 500]

表 3 本质安全度的隶属函数

Tab. 3 Membership function of inherent safety degree

本质安全度分级	隶属函数参数
VVL	[0, 0, 0.25]
VL	[0, 0.25, 0.5]
L	[0.25, 0.5, 0.67]
M	[0.5, 0.67, 0.83]
H	[0.67, 0.83, 1]
VH	[0.83, 1, 1]

表 4 反应条件的模糊推理规则

Tab. 4 Fuzzy inference rules of reaction conditions

本质安全度		操作压力				
		VL	L	M	H	VH
操作温度	VL	VH	VH	H	M	L
	L	VH	H	M	L	L
	M	H	M	M	L	VL
	H	M	L	L	VL	VVL
	VH	L	L	VL	VVL	VVL

将第2.1节中选取的指标分别取值,输入每个指标对应模糊规则,经逆模糊化可得到指标值的集合,即 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ 。

2.3 指标权重的确定

2.3.1 初始权重

$W^{(0)} = \{w_1^{(0)}, w_2^{(0)}, \dots, w_m^{(0)}\}$ 为各指标的初始权重集,根据各指标的相对重要性程度,结合已有本质安全指数方法,使用层次分析法进行分析,根据标度法,

将下一层次的各因素相对于上一层次的各因素进行两两比较,构造判断矩阵并进行计算和一致性检验,确定相应各指标的初始权重^[31]。

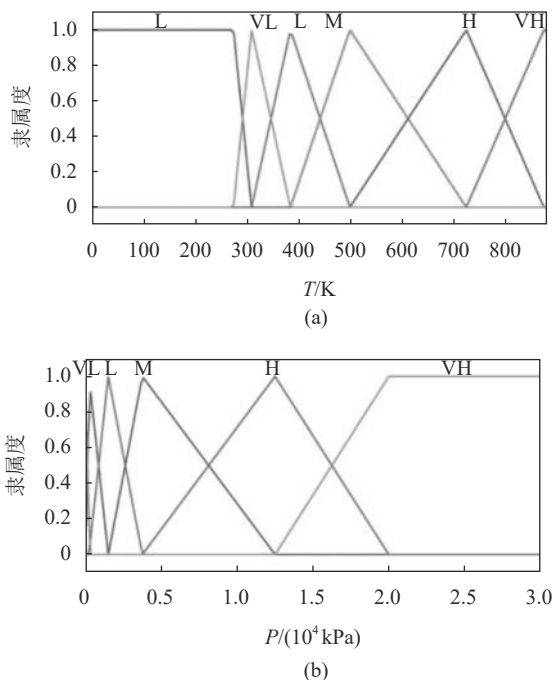


图 3 操作温度和操作压力输入隶属函数

Fig. 3 Input membership function of operating temperature and pressure

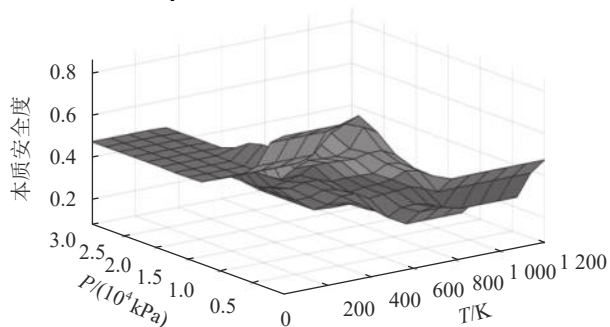


图 4 反应条件本质安全模糊推理曲面

Fig. 4 Inherent safety Fuzzy inference surface of the reaction conditions

2.3.2 变权公式

评价中各指标的权重随评价向量的不同而变化,即 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ 随评价指标值的变化而变化。变权公式为^[32-33]:

$$w_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{w_j^{(0)} \frac{\partial B}{\partial x_j}}{\sum_{j=1}^m \left| w_j^{(0)} \frac{\partial B}{\partial x_j} \right|} \quad (8)$$

B 为均衡函数,此处选用和型均衡函数, α 取 0.5, 即惩罚型变权,当某一指标值 x_j 太小, $w_j(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ($j = 1, 2, \dots, m$) 变大,综合评价值变小。

$$B(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{j=1}^m x_j^\alpha (\alpha \geq 0) \quad (9)$$

2.4 系统本质安全度计算

本质安全度是权重值与指标值的积^[34]。定义系统本质安全度为权重矩阵与指标矩阵的积:

$$S = WI \quad (10)$$

式中: S 为系统本质安全度; W 为一个行矩阵(指标权重值集),通过第 2.3 节计算得出; I 为列矩阵(指标值集),通过第 2.2 节相关步骤计算。

在 F22 汽化节点的非稳态运行过程中,物料危险性和设备危险性所对应的指标本质安全度均为定值,系统本质安全度的变化主要是脱水工艺危险中温度、压力指标参数引起的。根据 F22 汽化非稳态传热过程的热力学曲线图,选取不同时间节点 F22 汽化过程温度、压力作为系统温度、压力,分别计算不同时间节点系统的本质安全度,从而生成 F22 汽化节点非稳态过程的本质安全度曲线。

3 结果与讨论

3.1 F22 汽化过程非稳态模拟结果

F22 汽化过程的传热计算重点在于装置内存在相变且蒸发是贯穿过程始终的,并且初始时间装置内压力比下游管道压力的 350 kPa 大,因此存在压差,从开始出口就有 F22 气体流出模拟结果如图 5 所示。由图 5 可知,操作温度、操作压力以及 F22 气体出口流量随时间的变化趋势是相似的,因为这 3 个变量相互之间是制约的关系。规定参数在达到稳态值的 99.99% 时认为已经达到稳态。温度稳态值为 268.55 K,在 804 s 时达到 268.523 2 K,达到稳态值的 99.99%,因此在 804 s 可以认为 F22 汽化装置中温度已达到稳态。规定压力的稳态值为 432.405 kPa,在 1 144 s 时达到稳态值的 99.99%,为 432.362 kPa,认为已经达到稳态。稳态的 F22 气体出口流量规定为 1.085 2 kg/s,在 1 390 s 达到稳态值的 99.99%。在前 400 s 时温度、压力和气体出口量随时间快速升高,到达 500 s 左右,这 3 个参数达到一定值,上升速率明显减缓,但总体仍成上升趋势。在 1 000 s 左右微有上升,1 000 s 后可以视作 3 个参数已达稳态。温度由 263.15 K 上升至 268.55 K,压力由 354 kPa 上升至稳态 432.405 kPa,升高了 78.405 kPa。由于夹套温度已定,开始时夹套内外温差最大,因此传热速率较快,参数值上升较快。随着时间的变化,温差减小,换热速率减慢,参数值增长较缓慢。

F22 汽化过程实际稳态运行时数据如表 5 所示。实际出口气体温度范围在 263~273 K 内,计算结果达到稳态时的数据 272.993 K,整个过程中压力控制

在 300~600 kPa 中, 模拟计算的 压力变化范围是 354~506.22 kPa, F22 出口 气体流量模拟结果较实际 数据稍小, 但差别不大, 说明了该模型的合理性和可 用性。

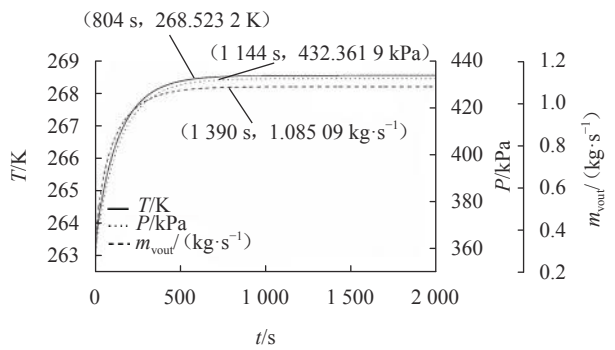


图 5 F22 汽化操作参数的时间过程曲线

Fig. 5 Time-course profile of the F22 vaporization operating parameters

表 5 计算结果与实际生产数据对比

Tab. 5 Comparison of the calculation results and field data

	操作温度/K	操作压力/kPa	F22 出口流量/(kg·s ⁻¹)
现场	263~273	300~600	1.11
模拟	268.55	354~432.4	1.085

3.2 F22 汽化非稳态过程本质安全度

通过模糊和变权算法, 将子指标本质安全度集和权重集矩阵相乘, 得到 F22 汽化非稳态过程本质安全度时间曲线, 如图 6 所示。由图 6 可知, 设备启动之始, 本质安全度最大, 达 0.576 4。随着时间推进, 在前 500 s 左右本质安全度降低速度很快, 500 s 后趋于平缓, 稳定值为 0.574 2。在本质安全度降低的过程中, 降低速率逐渐减缓, 直至到达稳态。参照第 3.1 节得到的 3 个参数的曲线, 由于操作温度和操作压力是影响 F22 汽化非稳态过程的主要参数。在模糊变权计算中, 除了这两个指标共同影响的“反应条件”指标是呈现非稳态变化过程的, 其他指标均取常数。因此, 得到的本质安全度非稳态曲线的整体趋势与温度或压力呈现相反状态。在前 500 s, 温度、压力均呈上升速率降低的趋势上升, 至 1 000 s 左右趋于稳态, 所以在此过程中本质安全度呈现相反的变化趋势。由于采用了惩罚型变权, 经常权算出的本质安全度整体偏高于变权算法得到的结果, 达 0.634 9。因此, 通过变权算法得到的结果显示了更高的风险, 显示了此算法在分析系统本质安全水平过程中更精细地反映了各指标的影响且偏于保守, 有利于系统本质安全分析。

无论常权算法或变权算法, 所得非稳态本质安全度均高于 0.5, 说明 F22 汽化本质安全程度处于中等偏上水平。在实际生产操作过程中, 越趋于稳态时温

度压力越高, 本质安全度越低, 属于危险时间节点, 生产操作人员应保持警惕, 加大监管力度, 避免事故的发生。

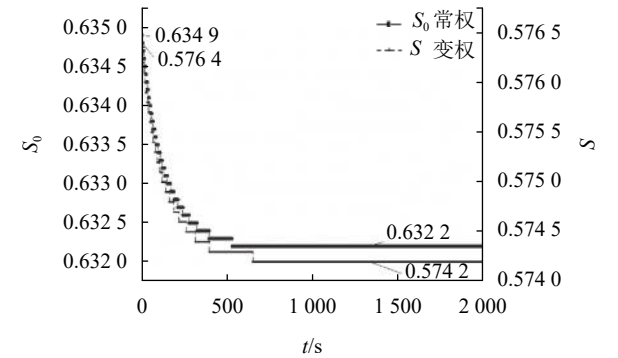


图 6 F22 汽化节点非稳态本质安全度的时间过程曲线

Fig. 6 Time-course profile of unsteady inherent safety degree of F22 vaporization node

4 结 论

对现行的 F22 汽化过程建立非稳态模型, 结果表明温度、压力均在前 500 s 内迅速上升, 1 000 s 左右达到稳态。并根据 TFE 单体生产工艺流程相关特性及相关已有本质安全指标法, 选取合适的指标建立本质安全指标体系, 运用模糊逻辑算法和变权思想计算相关指标和系统整体本质安全度, 从而有效地对非稳态过程的本质安全度进行量化, 生成非稳态本质安全度的时间过程曲线, 得到 F22 汽化过程在非稳态的启动阶段的本质安全度为 0.57, 表明 F22 汽化非稳态过程本质安全度处于中等稍偏上水平, 且表现出比稳态(平稳运行)时稍高的(安全)风险。这个结果可以为 TFE 单体生产 F22 汽化节点的本质安全设计、安全监控和管理提供理论依据。这种方法也可用于 TFE 工艺过程其他节点分析, 从而为整个工艺的本质安全分析提供基础。

参考文献:

- [1] Zhu Shungen. Production and technology of tetrafluoroethylene(I) [J]. Organo-fluorine Industry, 1997(1): 4-27. [朱顺根. 四氟乙烯的生产和工艺(I) [J]. 有机氟工业, 1997(1): 4-27.]
- [2] Liu Yu, Yang Zhuoya. Process control analysis of reducing HCFC-22 consumption of tetrafluoroethylene monomer production unit [J]. Organo-fluorine Industry, 2011(2): 17-19. [刘玉, 杨卓亚. 降低四氟乙烯单体生产装置 HCFC-22 单耗的过程控制分析 [J]. 有机氟工业, 2011(2): 17-19.]
- [3] 姜彦东, 陈春燕, 魏欣, 等. 基于变权思想的化工路线本质安全化研究 [C]. 中国职业安全健康协会学术年会, 北京: 2011.
- [4] Dong Wensheng. Study on the clean and energy-saving production technology and engineering of tetrafluoroethylene monomer [D]. Xi'an: Northwest University, 2008. [董文胜. 四氟乙烯单体清洁节能生产工艺及工程化研究 [D]. 西安: 西北大学, 2008.]

- [5] He Aiping. Technical renovation of teflon production equipments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. [何爱平. 四氟乙烯生产装置的技术改造[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.]
- [6] Shan Jie. The effective technology of tetrafluoroethylene refining[J]. *Organo-fluorine Industry*, 2014(2): 29–34. [单杰. 行之有效的四氟乙烯精制技术[J]. *有机氟工业*, 2014(2): 29–34.]
- [7] Chen Zhibin, Chen Xuandong. Safe production technology of tetrafluoroethylene[J]. *Chemical Production and Technology*, 2002, 9(5): 40–42. [陈志斌, 陈宣东. 四氟乙烯的安全生产技术[J]. *化工生产与技术*, 2002, 9(5): 40–42.]
- [8] Wang Shuhua, Xie Huiping, Ma Gui, et al. Safety technology and management in tetrafluoroethylene production[J]. *Chemical Production and Technology*, 2003, 10(6): 1–3. [王树华, 谢慧萍, 马圭, 等. 四氟乙烯生产过程的安全技术和管理[J]. *化工生产与技术*, 2003, 10(6): 1–3.]
- [9] Kletz T A. What you don't have can't leak[J]. *Chemical Industry*, 1978, 6: 287–292.
- [10] Wang Xiaoyu. Assessment of inherently safer chemical process by index classification[D]. Shenyang: Northeastern University, 2006. [王晓宇. 化工过程本质安全指数法评价[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.]
- [11] Center for Chemical Process Safety (CCPS). Inherently safer chemical processes—A life cycle approach [M]. 2ed: Chicester: Wiley-Blackwell, 2010.
- [12] Rahman M, Heikkilä A M, Hurme M. Comparison of inherent safety indices in process concept evaluation[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005, 18: 327–334.
- [13] Edwards D W, Lawrence D. Assessing the inherent safety of chemical process routes: Is there a relation between plant costs and inherent safety[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 1993, 11: 252–258.
- [14] Heikkilä A M. Inherent safety in process plant design: An index-based approach[M]. Finland: VTT Publications, 1999.
- [15] Chidambaram P, Rajagopalan S, Reginald T. Expert system for the design of inherently safer processes. 1. Route selection stage[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41: 6698–6710.
- [16] Khan F I, Amyotte P R. Integrated inherent safety index (I2SI): A tool for inherent safety evaluation[J]. *Process Safety Progress*, 2004, 23: 136–148.
- [17] Leong C T, Shariff A M. Inherent safety index module (ISIM) to assess inherent safety level during preliminary design stage[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008, 86(2): 113–119.
- [18] Gentile M, Rogers W J, Mannan M S. Development of a Fuzzy logic-based inherent safety index[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2003, 81: 444–456.
- [19] Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Dynamic safety analysis of process systems by mapping bow-tie into Bayesian network[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91(1/2): 46–53.
- [20] Luyben W L. Use of dynamic simulation for reactor safety analysis[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2012, 40(20): 97–109.
- [21] Luyben W L. Rigorous dynamic models for distillation safety analysis[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2012, 40(20): 110–116.
- [22] Kossoy A A, Akhmetshin Y G. Simulation-based approach to design of inherently safer processes[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2012, 90(5): 349–356.
- [23] Zeng Jiying, Qin Yangmei, Guo Shimeng, et al. The intrinsic safety of F22 cracking to TFE process-water-quencher unsteady analysis[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2018, 21(1): 28–44. [曾际颖, 秦杨梅, 郭世蒙, 等. F22裂解制TFE工艺本质安全-急冷降温非稳态分析[J]. *四川化工*, 2018, 21(1): 28–44.]
- [24] Guo Shimeng, Zeng Jiying, Qin Yangmei, et al. Inherent safety of TFE production for F22 cracking-condensation dehydration unsteady analysis[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2017, 20(1): 5–9. [郭世蒙, 曾际颖, 秦杨梅, 等. F22裂解制TFE工艺本质安全-冷凝脱水非稳态分析[J]. *四川化工*, 2017, 20(1): 5–9.]
- [25] 薛定宇. 高等应用数学问题的MATLAB求解[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [26] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8: 338–353.
- [27] Gentile M, Rogers W J, Mannan M S. Development of an inherent safety index based on Fuzzy logic[J]. *AIChE Journal*, 2003, 49: 959–968.
- [28] Mamdani E H, Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller[J]. *International Journal of Human Computer Studies*, 1975, 7: 1–13.
- [29] Hong Y, Pasman H J, Sachdeva S, et al. A Fuzzy logic and probabilistic hybrid approach to quantify the uncertainty in layer of protection analysis[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 10–17.
- [30] Chu T A. Defuzzified Fuzzy MLMCDM model[J]. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 2013, 28: 493–504.
- [31] 刘新宪, 朱道立. 选择与判断—AHP(层次分析法)[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 1990.
- [32] Wang Y M, Yang J. Interval weight generation approaches based on consistency test and interval comparison matrices[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2005, 167: 252–273.
- [33] Liu W. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 1997, 17: 59–65.
- [34] Hassim M H, Hurme M. Inherent occupational health assessment during process research and development stage[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23: 127–138.

(编辑 黄小川)

引用格式: Qin Yangmei, Xiao Zeyi, Zeng Jiying, et al. Unsteady state inherent safety analysis of F22 vaporization node of TFE pyrolysis process[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, 51(4): 210–216. [秦杨梅, 肖泽仪, 曾际颖, 等. TFE裂解工艺 F22汽化节点非稳态本质安全分析[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(4): 210–216.]