

ICS 13.100

CCS C 65

团 体 标 准

T/CCSAS 0XX—202X

化工过程本质安全化评估技术指南

Technical guidelines for the inherent safer assessment of chemical process

（征求意见稿）

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国化学品安全协会 发布

中国标准出版社 出版

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 评估总体要求 2

4.1 评估方法 2

4.2 评估流程 2

4.3 评估实施-全生命周期 3

4.4 评估报告编写 4

5 本质安全量化评估方法 5

5.1 基础本质安全指数法（BISI） 5

5.2 图形法 8

5.3 综合物流指数法（CPFI）与单股物流指数法（SPFI） 9

5.4 后果指数法（ISCI） 9

6 本质安全化检查表 10

7 本质安全化分析法 18

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国化学品安全协会提出并归口。

本文件起草单位：中石化安全工程研究院有限公司

本文件主要起草人：孙峰、贾学五、孙冰、姜杰、周明川、张广宇、尚汝松、钱亚男、王振刚、盛晓、朱云峰、李亚辉

化工过程本质安全化评估技术指南

1 范围

本文件提供了化工过程全生命周期本质安全化评估方法与工具的技术指南。

本文件适用于化工工艺路线选择、工艺开发、工程设计与装置运行等阶段的本质安全化评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件。不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 16483 化学品安全技术说明书

GB/T 35320 危险与可操作性分析（HAZOP分析）应用指南

AQ/T 3046 化工企业定量风险评价导则

NFPA 704 Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

本质安全化评估 inherently safer assessment

通过控制工艺过程中物料的种类、数量和使用条件，采用最小化、替代、缓和、简化等手段，使工艺过程及其设施从根本上减小事故发生的概率和/或降低事故后果影响。

3.2

最小化 minimization

采用不使用或者减少使用危害化学物质量的方式，降低危险程度。

3.3

强化 intensification

在实现既定生产目标的前提下，通过大幅度减小生产设备的尺寸、减少装置的数目等方法来使工厂布局更加紧凑合理，单位能耗更低，废料、副产品更少，并最终达到提高生产效率、降低生产成本，提高安全性和减少环境污染的目的。

3.4

替代 substitution

用无害或危害性较小的物料去替代危险性较高的物料，或者用一种危险性较低的工艺或加工技术代替危险性高的工艺或者加工技术。

3.5

缓和 moderation

使用较低危险或能量的加工或储存条件，较低危险的物料形式或者设施，从而可以使危险物料或能量释放的影响最小化。

3.6

简化 simplification

消除不必要的复杂性，使工厂和过程更容易设计、建造和操作，降低操作错误发生的可能性，以及容错设计，使其不易发生设备、控制和人为故障。

3.7

工艺包 process design package

包含工艺流程、工艺基础数据、工艺操作参数、关键的工艺计算、工艺设备等的成套技术数据包，是详细工程设计的依据。

3.8

定量风险评估 quantitative risk assessment

通过对系统或设备的失效概率和失效后果的严重程度进行量化分析，进而精确描述系统的风险。

4 评估总体要求

4.1 评估方法

4.1.1 本质安全评估方法包括：量化评估方法、检查表法和分析法。

4.1.2 本质安全量化评估方法采用定量或半定量的方式衡量本质安全化水平，为本质安全化工艺路线选择与工程设计提供决策依据。

4.1.3 本质安全化检查表法为基于本质安全化原理，从物料与反应、工艺流程、设备、操作与平面布置等方面进行本质安全化可能路径的检查。

4.1.4 本质安全化分析法通过本质安全化引导词和参数，以会议形式引导各方人员进行头脑风暴，寻找并考察可能的本质安全化路径。本质安全化分析可在危险与可操作性（HAZOP）分析时开展（分析方法参见GB/T 35320），也可以单独开展。

4.2 评估流程

根据任务特点，选择相应的本质安全量化评估方法，宜采用集成的方法，确保评估流程完整，标准统一。图1列出了一个推荐的本质安全量化评估流程。

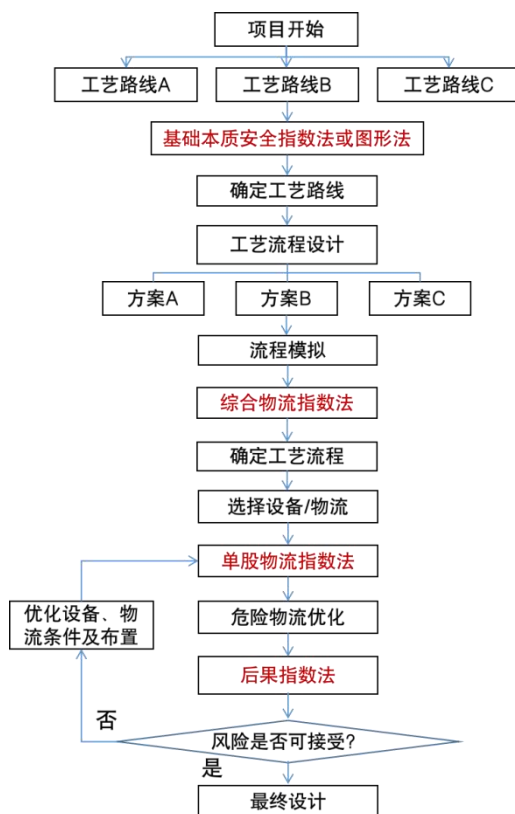


图1 集成的本质安全量化评估流程图

a) 首先是工艺路线的选择。根据反应步骤划分单元，采用基础本质安全指数法或图形法评估不同工艺路线的本质安全化水平，优先选用本质安全化水平较高的工艺。

b) 确定好工艺路线后进行工艺流程的设计。首先有必要进行流程模拟，形成物流数据表，在此基础上选用综合物流指数法对整体物流的危险水平进行评估，为流程的选择提供依据。

c) 确定好工艺流程后进行设备与装置等的详细设计。可采用单股物流指数法对单股物流的危险程度进行评估；计算与设备相连的所有物流的单股物流指数并加和，从而得到设备的本质安全化指数。确定最危险的物流与设备，重点对这些物流和设备进行优化。

d) 制定工厂可接受标准，采用后果指数法评估最危险物流可能产生的后果，对于不可接受风险，优化设备、物流等的条件与/或设备布置等。当所有危险设备或物流可能产生的后果都被考虑并评估后，确定最终设计。

e) 检查表法与分析法宜在量化评估前完成，用于对工艺路线、工艺流程设计与工程设计等进行优化，以及生成备选的方案。

4.3 评估实施-全生命周期

4.3.1 实验室研究与方案设计

该阶段进行反应、分离等初期探索，可以根据本质安全原则进行初步的优化。为了生产目标产品，可能有多种工艺路线可供选择，此时应对不同工艺路线的本质安全水平进行量化打分并排序，为选择最终路线提供依据。

应通过基础本质安全指数法或图形法等本质安全量化评估方法比较各路线的本质安全化水平，在技术指标等其它因素影响相近时，优先选择本质安全化程度较高的工艺路线。

采用**本质安全检查表**对反应的本质安全化可能路径进行逐一检查，确认是否可采用替代/消除、强化/最小化、缓和等本质安全原则优化物料、反应与工艺条件，如选用危险性更小的原料与溶剂等，通过强化取热、稀释或减量等手段减小反应热效应等。

4.3.2 中试研究

该阶段对工艺进行开发或者优化，此时有较大的本质安全优化空间。中试过程应开展工艺路线的复审，确定最终的工艺路线。对工艺流程、工艺条件、操作方法与设备选型等进行本质安全优化。

可采用**基础本质安全指数法**或**图形法**进行本质安全量化评估，为工艺路线优化最终决策提供支撑。宜获取工艺流程的物流数据，采用**综合物流指数法**进行量化评估，为工艺流程优化提供支撑。

本过程应采用**本质安全检查表**，对工艺流程、工艺条件、操作方法与设备选型等进行本质安全检查。

4.3.3 工艺包编制

基于实验研究阶段得到的基础数据，进行工业装置工艺开发，形成工艺流程图（PFD），开展初步的工程设计，形成初版管道仪表流程图（P&ID）。工艺包编制阶段是进行工艺较大改变的最后机会，应开展全面的本质安全化评估。工艺包开发阶段应对工艺流程、工艺条件、工艺物流、设备与工艺控制方案等进行全面优化，选择本质更安全的工艺、设备，优化单元操作，简化管线系统。

本过程应采用**检查表法**进行全面的本质安全化评估，审核工艺物料平衡图（PFD）、工艺过程说明书、化学品安全技术说明书（SDS）（参见GB/T 16483）、工艺控制方案、设备等文件。

可采用**单股物流指数法**对单个设备/管线的本质安全水平进行评估，并筛选出危险性较高的物流，重点对这些物流进行优化。采用**后果指数法**对最危险物料的后果进行评估，将评估结果与工厂的可接受标准相比较，如果后果经评估不可接受，则应进一步优化设备与物流，或在基础设计阶段进行空间布置优化。如果后果经评估可接受，则确定为最终设计。

4.3.4 工程设计与施工

基于工艺开发的成果（如工艺包），进行进一步工程化设计，主要工作包括完成工艺管道与仪表流程图（P&ID）、公用物料管道和仪表流程图（UID）、设备布置图与施工图等，为工程施工提供条件，本阶段本质安全化评估主要任务是P&ID图、设备设计与平面布置等优化。

本过程应采用最小化、缓和、简化等原则进行本质安全优化，包括降低危险物料大量泄漏的可能性、设备选型优化、公用工程和辅助系统设计、平面布局优化等。

采用**后果指数法**对设备、管线的本质安全水平进行评估，在设备与物流无法优化条件下，优化平面布置。

4.3.5 装置开车与运行

在役装置所有设备设施与平面布置已经确定，但是设计可能存在缺陷，操作与维护过程可能引入新的风险，或者发生事故以及发现安全隐患，此时需要进行定期或不定期（变更、发生事故后）本质安全化评估，探索本质安全化的可能性，必要时进行装置优化。

4.4 评估报告编写

4.4.1 新工艺、新技术开发项目

对于新工艺、新技术开发项目，应在中试试验前形成本质安全化评估报告初稿，并在中试试验、工艺包编制、工程设计等阶段逐步补充完善，在开车前形成终稿。

4.4.2 成熟工艺包的建设项目

对于成熟工艺包的建设项目，应进行工程设计的本质安全化评估，形成报告。

4.4.3 在役装置

对于在役装置，应开展定期或不定期（变更、发生事故后）的本质安全化评估，形成报告。

5 本质安全量化评估方法

5.1 基础本质安全指数法（BISI）

5.1.1 本方法用于工艺路线本质安全化水平的定量评估。

5.1.2 选取两个方面的指数，一是化学品危险指数，二是工艺（含反应）危险指数。

其中，化学品危险指数包括反应性指数 I_{NR} 、可燃性指数 I_{FL} 、毒性指数 I_{TOX} 、爆炸性指数 I_{EX} ；工艺危险指数包括温度 I_T 、压力 I_P 、反应热 I_R 以及反应收率 I_Y 。

I_{NR} ——反应性指数，采用美国 NFPA704 中的反应性数值，赋值方法见表 1。

表 1 化学品反应指数 I_{NR} 确定标准

反应性	数值
物质稳定，遇水不反应	0
升温会反应，遇水会发生不激烈的反应	1
物质不稳定，但是不会爆轰；遇水剧烈反应	2
具有爆炸性，但是点火能较高；遇水剧烈反应	3
常温常压下对热或剧烈撞击敏感	4

I_{FL} ——可燃性指数，赋值方法见表 2。

表 2 化学品可燃性指数 I_{FL} 确定标准

可燃性	数值
闪点 $>120^{\circ}\text{C}$	0
$60^{\circ}\text{C}\leq\text{闪点}\leq120^{\circ}\text{C}$	1
$45^{\circ}\text{C}<\text{闪点}<60^{\circ}\text{C}$	2
$28^{\circ}\text{C}\leq\text{闪点}\leq45^{\circ}\text{C}$	3
闪点 $<28^{\circ}\text{C}$	4

I_{TOX} ——毒性指数，赋值方法见表 3。

表 3 化学品毒性指数 I_{TOX} 确定标准

毒性 (ppm)	数值
TLV > 10000	0
1000 < TLV ≤ 10000	1
100 < TLV ≤ 1000	2
10 < TLV ≤ 100	3
1 < TLV ≤ 10	4
0.1 < TLV ≤ 1	5
TLV ≤ 0.1	6

注：TLV 值表示物质在 8 小时时间内的有害暴露阈值。

I_{EX} ——爆炸性指数，赋值方法见表 4。

表 4 化学品爆炸性指数 I_{EX} 确定标准

爆炸性 (UEL-LEL) vol/%	数值
不爆炸	0
0-20	1
20-45	2
45-70	3
70-100	4

I_T ——温度指数，赋值方法见表 5。

表 5 温度指数 I_T 确定标准

工艺温度/°C	数值
< 0	1
0-70	0
70-150	1
150-300	2
300-600	3
> 600	4

I_P ——压力指数，赋值方法见表 6。

表 6 压力指数 I_P 确定标准

工艺压力/bar	数值
0.5-5	0
0-0.5 或 5-25	1
25-50	2
50-200	3

200-1000	4
----------	---

I_Y ——反应收率指数，赋值方法见表 7。

表 7 反应收率指数 I_Y 确定标准

反应收率/%	数值
>99	0
80-99	1
60-80	2
40-60	3
20-40	4
0-20	5

I_R ——反应热指数，赋值方法见表 8。

表 8 反应热指数 I_R 确定标准

反应热/J/g	数值
<200	0
200-600	1
600-1200	2
1200-3000	3
>3000	4

5.1.3 计算方法

单一化学品指数 I_{CI} ，表征工艺路线中涉及的每一种化学品的危险指数。

$$I_{CI} = I_{NR} + I_{FL} + I_{EX} + I_{TOX} \tag{1}$$

危险化学品指数 $I_{CI,max}$ ，取单元中单一化学品（质量不小于总物料质量 3%）指数的最大值，表征该单元的化学品危险指数。

$$I_{CI,max} = \max(I_{CI}) \tag{2}$$

工艺危险指数 I_{PI} ，表征工艺路线中所涉及的某一个单元的工艺危险指数。取每一个子指数的最大值。

$$I_{PI} = I_{T,max} + I_{P,max} + I_{R,max} + I_{Y,max} \tag{3}$$

根据反应步骤或功能划分单元，单元危险指数 I_U 计算方法为：

$$I_U = I_{CI,max} + I_{PI} \tag{4}$$

以加和式表达的整体本质安全指数为：

$$BISI_{PL} = \sum I_U \tag{5}$$

以最危险单元表达的整体本质安全指数为：

$$BISI_M = \max(I_U) \quad (6)$$

以平均值表达的整体本质安全指数为：

$$BISI_{AV} = \frac{\sum_1^n (I_U)}{n} \quad (7)$$

建议优先比较 $BISI_{PL}$ ，其次为 $BISI_M$ ，再其次为 $BISI_{AV}$ 。

5.2 图形法

5.2.1 本方法主要基于专家经验来比较工艺路线的本质安全化水平。

5.2.2 参数选取

每一种工艺路线的反应步骤为研究对象，选取该反应步骤的温度(T)、压力(P)和物质危险性(可燃性、爆炸性和毒性，FET)作为关键参数。FET打分可参考BISI方法，分别选取工艺路线中的所有物料的三个参数中最大值。在一个简单的图上标出每个路线的每个步骤的T、P与FET等参数(如图2所示)。

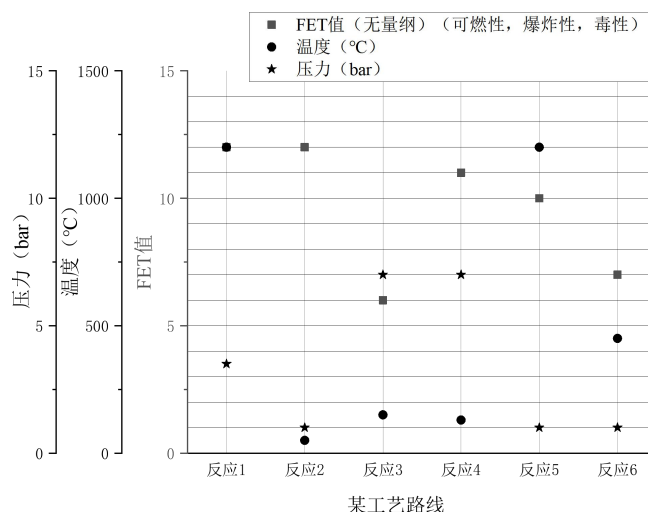


图2 采用图表法进行本质安全化水平比较的示意图

5.2.3 实际评估过程

首先结合专家经验与自身需求确定每个参数重要性，对参数重要度排序(如图3所示)，按照重要度依次评估各种值来比较不同工艺路线之间的相对本质安全化水平。按照重要度排序依次比较不同工艺路线的各个参数，结合专家经验给出最优路线。

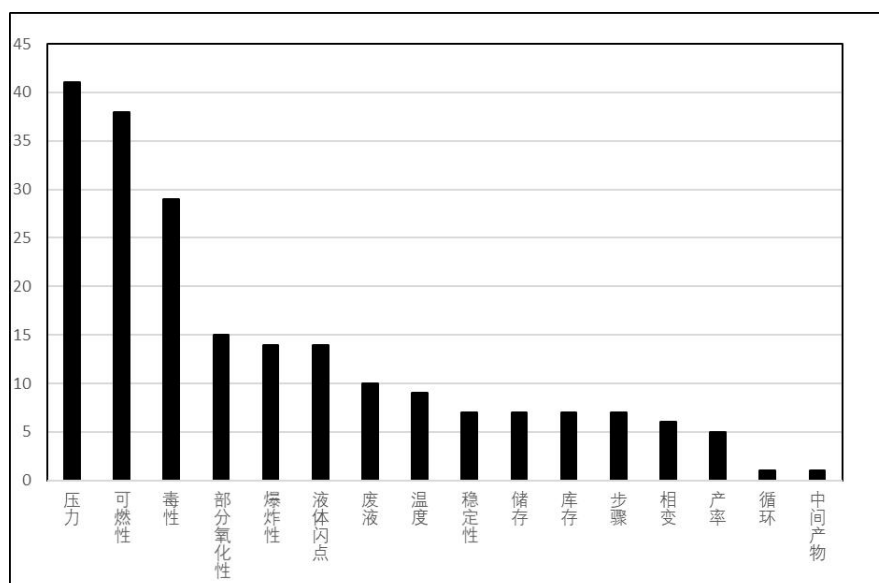


图3 某项目专家推荐的参数重要性排序（示例）

5.3 综合物流指数法（CPFI）与单股物流指数法（SPFI）

CPFI 的计算公式为：

$$CPFI = \frac{\rho \cdot \Delta H_C \cdot P \cdot \Delta FL_{mix} \cdot n}{10^8} \quad (8)$$

$$\Delta FL_{mix} = UFL - LFL \quad (9)$$

式中：

ρ ——所有流股的平均密度， kg/m^3 ；

ΔH_C ——所有流股的平均燃烧热， kJ/kg ；

P ——平均压力， bar ；

ΔFL_{mix} ——爆炸上限与爆炸下限的差值；

N ——流股的数量。

SPFI 计算每股物流泄漏危险的相对数值，计算公式为：

$$SPFI = A_0 \times (I_p \times I_\rho \times I_e \times I_{FL}) \quad (10)$$

式中：

$$I_e = \frac{\text{单独物流的热值}}{\text{所有物流的平均热值}} \quad (11)$$

$$I_p = \frac{\text{单独物流的压力}}{\text{所有物流的平均压力}} \quad (12)$$

$$I_\rho = \frac{\text{单独物流的密度}}{\text{所有物流的平均密度}} \quad (13)$$

$$I_{FL} = \frac{\text{单独物流的}\Delta FL}{\text{所有物流的平均}\Delta FL} \quad (14)$$

A_0 为系数。

CPFI 与 SPFI 均是基于物流数据，需要通过流程模拟软件获取物流数据表。

5.4 后果指数法（ISCI）

后果指数法通过计算物料泄漏后导致的爆炸与中毒后果是否可接受，从而衡量本质安全化水平。后果指数法计算得到的爆炸与中毒后果如果不可接受，应对设计进行变更，除非采用进一步严格的定量风险评估方法计算表明可接受。后果指数法计算方法参见 AQ/T 3046，进行适当简化，计算流程如下：

- a) 获取管道直径与物流数据；
- b) 估算释放的可燃/有毒物质，设气体或液体经孔泄漏，泄漏孔径为小孔（5mm）、中孔（25mm）或完全破裂；
- c) 采用多能法（TNO）计算蒸气云爆炸超压，设爆炸强度等级 7；
- d) 采用 Pasquill-Gifford 模型扩散方程计算毒气释放后果，设农村条件，大气稳定度 D；
- e) 估算对人员或设备的潜在损伤；
- f) 根据工厂的可接受标准进行决策。

6 本质安全化检查表

6.1 本质安全化评估的检查表——物料与反应

本质安全化评估的物料与反应检查表见表 9。

表 9 物料与反应

序号	检查项目	适用阶段			
		实 验 室 研 究	中试 试验	工 艺 包 编 制	工 程 设 计 与 施 工
1	替代/消除				
	使用替代工艺减少或消除有害原材料、中间产物或副产物。	√	√		
	使用高纯度原料和试剂，避免或减少一些危险或额外处理的需要。	√	√		
	使用危险性更小的原料与溶剂： 1) 不易燃的物质，如水作为溶剂； 2) 挥发性较小的物质； 3) 较低的反应活性，不与常见污染物反应； 4) 较高的热稳定性； 5) 低毒。	√	√		
	改变工艺或工艺条件减少或消除有害溶剂。	√	√		
	优先采用不含重金属的均相催化剂替换基于重金属的催化剂，以减少废水和处理问题。	√			
	优先选择废物可生物降解的工艺。	√	√		
	尽量避免使用爆炸品与剧毒品。	√	√		
2	强化/最小化				
	通过提高反应速率（减少停留时间）和提高转化率（减少回收）来减少物料存量。	√	√		

	提高反应选择性，提高产品收率。	√	√		
	耦合反应步骤，避免中间储存。	○	√	√	
	优先采用平推流反应器或环管反应器替代搅拌釜式反应器。	○	√	√	
	优先采用气相反应取代液化气体反应，以降低物料量和潜在泄漏率。	√	√		
	强化混合效果以最小化反应器尺寸。		√	√	
	对于反应工艺危险度为 4 级或 5 级的硝化、过氧化反应，优先采用微通道反应器。	○	√	√	
	优化工艺条件减少危险废物或副产品的产量。	√	√		
	优先采用连续或半间歇操作替代间歇操作。	○	√	√	
3	缓和				
	优先使用低浓度的危险原料，如：氨水替代无水氨，稀盐酸替代无水氯化氢，稀硫酸替代发烟硫酸，稀硝酸替代浓发烟硝酸，湿过氧化苯甲酰替代干过氧化苯甲酰。	√	√		
	通过使用性能更好的催化剂等方式，降低反应条件（温度、压力等）的苛刻度。	√	√		
	通过使用挥发性更高的溶剂移走反应热来缓和反应。	√	√		
	稀释反应物的浓度来更好的控制反应，并减少失控的可能性。	√	√		
	在挥发性有害物质中添加组分来降低其蒸气分压。	√	√		
	通过降低累积率、增加热容或稀释产物，将反应工艺危险度被评为 4 级或 5 级的反应降低至 3 级或以下。	○	√		
	尽量降低反应对工艺参数（如温度、压力、浓度、pH 值等）的敏感性（如参数在±10%内波动时不造成系统急剧变化）。	√	√		
	半间歇反应将危险性较小的物料作为底料，危险性较高的物料（不稳定、易燃、有毒等）作为滴加料，控制累积率，以使反应在冷却、加热或搅拌失效等异常情况下更安全。	○	√	√	
	如果工艺使用可能与常见污染物（如空气、氮气、水、蒸汽、氧化铁（锈）、油、润滑油或液压油等）发生危险反应的物料，建议从源头避免接触的可能。		√	√	
	避免使用可能与工艺物料发生危险反应的公用工程、密封介质、润滑油。		√	√	
	如果工艺中的物料不兼容，建议从源头避免接触的可能，比如不同管线进料、不同收集罐、储存区域分隔等。		√	√	
	用无害的传热介质（如水或蒸汽）替换有毒或易燃的传热介质。		√	√	
	避免工艺过程出现爆炸性环境，包括气相或液相。	○	√	√	
	确保外部热源或传热介质的温度不会引发反应器内物料的放热分解（如自限温电伴热或热水）。	○	√	√	√
	优化放热反应的试剂添加时间和曲线，以便失去冷却不会导致热失控。	○	√	√	√
	优先使用更大粒径或泥浆形式的爆炸性粉末，降低粉尘爆炸可能性。	○	√	√	√

注：适用阶段打“√”的为必选检查项，适用阶段打“○”的为可选检查项。

6.2 本质安全化评估的检查表——工艺流程

本质安全化评估的工艺流程检查表见表 10。

表 10 工艺流程

序号	检查项目	适用阶段			
		实验室研究	中试试验	工艺编制	工程设计与施工
1	强化/最小化				
	优先使用气相进料取代液相进料（如液氯等），以减少管线中的危险物料量。	○	√	√	
	使用危险性较小的原料，或者就地生产所需的危险反应物，以降低危险品运输和储存需求。		√	√	
	使用高压、低存量设备/管道系统/反应器或低压、高存量设备/管道系统/反应器。（介质存量和压力的“折衷”设计具有最坏的泄漏情况。）		√	√	
	多个精馏塔进行耦合，以减少底部、底部泵、再沸器和冷凝器中的存量。		√	√	
	仔细匹配装置单元容量、运行模式、故障率和可用性，以尽量减少或消除中间缓冲罐的需要。		√	√	
	合并单元操作（例如用反应精馏或萃取替代多个单独的反应器、安装有再沸器或换热器的多塔分馏或萃取塔），以减少整个系统容积。		√	√	
2	缓和				
	使用回流管线确保平推流式反应器中的良好混合和分配（避免热点）。		√	√	
	将固体进料以泥浆、气体输送、输送机等形式添加到工艺中，以减少现场人工操作。	○	√	√	√
	设计缓冲容器以承受上游压力，避免设置多个减压设备。		√	√	
	通过设计自动或远程操作，避免操作员直接接触危险品。		○	√	√
	使用泄放物收集系统，以收集泄放的物料。		○	√	√
	对于接触后会造成危险的换热介质，使用二次传热系统，而不是在同一换热器中直接接触。		○	√	√
	限制传热设备可达的最高温度，以防止超过最高工艺或设备设计温度。		○	√	√
	管壳式换热器中危险性高的物料尽量走管程。		○	√	√
	优先使用气体惰化系统处理易燃物料和易爆粉尘（如氮气、二氧化碳）。		○	√	√
	在低压和低温下储存物料，将潜在泄漏率降至最低： 1）把温度降低到物料的常压沸点以下，以减少泄漏问题； 2）通过制冷将液化气体保持在环境压力。		√	√	
3	简化				

	减少处理及反应步骤。		√	√	
	将多用途容器替换为单独的特定功能容器，以降低复杂性。		√	√	
	避免反应器、管道或缓冲罐中的死角或混合不良区域，因为在这些区域可能会发生热量积聚，从而引发热反应或失控。		○	√	√
	尽量减少管道和配件的泄漏点。		○	√	√
	尽量直接生产需求压力的气体，避免维护频繁且易泄漏的气体压缩设备。		√	√	
	优先采用高度差、防虹吸回路设计，以避免不必要的回流或虹吸。			√	√
	采用“故障安全设计”，比如公用工程故障时（停水、停电等）。		○	√	√

注：适用阶段打“√”的为必选检查项，适用阶段打“○”的为可选检查项。

6.3 本质安全化评估的检查表——设备

本质安全化评估的设备检查表见表 11。

表 11 设备

序号	检查项目	适用阶段			
		实 验 室 研 究	中 试 试 验	工 艺 包 编 制	工 程 设 计 与 施 工
1	替代/消除				
	优先用内衬玻璃或塑料的管道代替钢管，以防腐蝕。			√	√
	优先使用由导电材料或内置金属纤维制成的滤袋，以防止静电积聚。			√	√
2	强化				
	优先用填料塔或薄膜塔板更换用于蒸馏和分离的传统塔板，以减少持液量（对于传统塔板，每个理论板的持液量为 40-100 mm，对于填料塔为 30-60 mm，对于薄膜塔板小于 20 mm）。		√	√	
	优先用更高效的电化学反应器、燃料电池、变压装置、变温装置或膜装置取代釜式反应器。		√	√	
	优先用刮膜蒸发器代替蒸馏塔。		√	√	
	优先用离心萃取器代替萃取塔。		√	√	
	优先用闪蒸干燥器代替干燥塔。		√	√	
	优先用连续在线混合器替代混合釜。		√	√	
	优先用高 g 值装置（旋转式、旋风式、射流式等）取代传统的分离装置。		√	√	
	优先用紧凑型换热器（单位体积内较高的换热面积，如螺旋板式、板框式、板翅式）替换管壳式换热器。		√	√	
	优先考虑用膜分离或液-液萃取代替蒸馏和分离塔（这些可能需要更大的库存，但通常可以在环境压力或温度下进行）。		√	√	
	优先用离心流化床干燥器替代传统干燥器。		√	√	
	使用薄膜蒸发器代替传统蒸发器以减少库存。		√	√	

	优先用水力旋流器取代传统的含油污水净化系统，可减少一个数量级的存量。水力旋流器也可用于其他基于密度差的物理分离。		√	√	
	优先使用喷射混合装置快速混合和反应危险物质（如使用甘油、硝酸和硫酸制造硝化甘油），以减少存量并确保反应快速进行。		√	√	
	蒸馏或分离塔底部直径变小，以减少液体库存。			√	√
	最小化危险物料管道的长度。			√	√
	通过减少管线长度和直径来减少管道物料存量，但要注意，直径小于 25mm 的小口径管道比大型管道更容易受损。			√	√
3	缓和				
	限制危险原料的供应压力，使其低于接受容器的最大允许工作压力。			√	√
	设计和建造足够坚固的容器和管道，以承受工艺过程中可能产生的最大超压，即使发生“最坏可信事件”（不需要复杂的高压联锁系统和/或紧急泄压系统）。比如：设计管道和下游储罐，以承受泵出口最大压力，从而避免需要安全阀或回流管线。			√	√
	设备设计可容纳环境温度或可能达到的最高工艺温度下的物料（如提高其最大允许工作温度，以适应冷却失效，减少依赖外部系统如制冷来控制温度，使物料的蒸汽压小于设备设计压力）。			√	√
	在设计处理危险物料的工艺单元时，限制其工艺波动的幅度。 泵的最大能力低于物料加入的安全速率。 对于重力流加料系统，设计管道尺寸或安装孔板将最大加料速率限制在安全范围内。 利用泵/压缩机的最小流量线（通过孔板控制流量）确保出口阀关闭时的最小流量。			√	√
	设计容器，使其在出现问题时能够承受全真空，并避免需要真空释放系统（这些系统可能会将空气吸入含有易燃材料的系统，甚至氮气系统也可能出现故障）。			√	√
	设计承压设备，使其“破裂前泄漏”。利用被动泄漏限制技术（例如防喷垫圈和溢流阀）来限制容器失效的可能性。			√	√
	优先为危险品提供双重安全保护壳，并对间隙进行监测，尤其是在泄漏不易被检测到的情况下，例如从地下或裙板储罐底部泄漏的情况下。			√	√
	为储罐或其他设备设计薄弱环节，以确保故障导致的损坏或泄漏最小（例如，薄弱的储罐顶部接缝导致顶盖处失效，而不是液位以下的接缝失效，防止故障导致液体泄漏）。			√	√
	优先采用内部热传递系统（例如容器内的冷却盘管），相比于外部热交换系统效率更高，并且系统中的任何泄漏都包含在容器内。			√	√
	优先用屏蔽电机或磁耦合泵等无泄漏泵取代传统泵。			○	√
	优先使用潜水泵以避免需要泵房（任何泄漏都会回到周围的液体中）。				√
	优先用波纹管阀代替传统阀门，以减少泄漏的可能性。			○	√

	对于易燃液体储罐进料，使用带有防虹吸开口的进料管。			○	√
4	简化				
	优先使用喷射混合喷嘴快速混合有害物质（确保一种物质只能在另一种物质流动时流动，并保持一种流动与另一种流动的比率近似恒定。在喷射器中，只有当压力侧流动时，吸入侧才会流动，压力侧流体的流速也决定了吸入侧的流动）。			√	√
	使用混合进料喷嘴替代在容器内混合的搅拌器。			√	√
	设计容器入口，以避免在涉及易燃液体时发生飞溅，从而产生静电（例如，将入口管线浸入液位以下，但注意确保不会回流虹吸）。			○	√
	工艺设备材料尽量不使用玻璃、塑料或其他脆性材料。			√	√
	设计换热器的管程和壳程能承受最大压力，不需要压力泄放设施。				√
	使用射流泵，因为它们没有活动部件，没有密封，可以焊接到管道中。			√	√
	使用所有（或主要）焊接连接管道，以减少潜在泄漏点的数量。				√
	对于危险品，尽量使用固定管道而不是柔性软管，以减少泄漏的可能性。				√
	挑战对已安装附件和相关管道、阀门等的需求，以及对旁路和仪表的需求，从而降低复杂性和潜在泄漏点的数量。			√	√
	用高完整性垫片（如金属缠绕垫片）替换传统垫片，或者使用焊接连接，以减少泄漏的可能性和大小。				√
	将膨胀波纹管更换为膨胀弯，这样可以更好地承受安装不良的影响，并且需要较少的维护。				√
	优先使用螺栓接头，而不是快卸接头，因为如果接头打开时设备仍处于受压状态，则有机会重新连接接头（安全恢复的可能性更好）。				√
	使用能够清楚显示其开启或关闭的阀门（例如上升轴、带三通手柄的球阀）。				√
	使用 8 字盲板，因为其清楚显示管线是连通的还是断开的。				√
	避免使用视镜、玻璃转子流量计和其他薄弱设备，按需要使用耐高压的或者铠装视镜。				√
	尽量减少对法兰、垫圈和其它存在潜在泄漏点的连接件的需求。				√
	将冗余输入和输出分配给控制系统的各个模块，以减少共因失效。				√
	对于冗余设备分别使用独立的电源母线，以减少部分电源故障的后果。				√
	采用密闭取样系统。				√
	确保止回阀和其他定向设备清楚地显示正确的方向，以确保它们没有安装错误。				
	阀门的易用性和可操作性，防止不必要的错误。				
	消除所有不必要的交叉连接。				
	对于软管连接，使用专用的软管和卡扣接头。				√
	工艺设备、管道和部件使用耐腐蚀材料。				√
	使用地下罐或屏蔽罐。				√

	为燃烧器管理系统提供连续的长明灯（独立可靠的燃料气来源）。				√
	使用危险物料时尽量减少连接、通路和法兰数量。				√
	避免在危险工况下使用螺纹连接。				√
	使用套管。				√
	尽量减少管道的弯头数量（潜在的冲刷腐蚀点）。				√
	使用能够清楚识别状态的设备。				√
	设计/选择不可能出现装配错误的设备。				√
	易于辨识流向的单向阀。				√
	带上升阀杆的闸阀，清楚地指示开启或关闭位置。				√
	手柄清晰显示位置的手动直角回转阀。				√
	对于自动阀，除阀门输出外，还显示阀门的实际位置。				√
	使用开放式排放或溢流管到二次围堵容器，用于超压、溢流和真空保护。				√
	消除高于容器压力等级的公用工程连接。				√
	在几个单独的容器中执行几个工艺步骤，而不是在一个多用途容器中执行所有步骤。				√
	最大限度地使用全焊接管。				√
	提供额外的腐蚀/侵蚀余量。				√
	减少或消除振动（如通过减振或设备平衡）				√
	尽量减少使用末端对空（排液或排气）的快开阀门（如 V 型球阀或旋塞阀）				√
	在危险工况下杜绝使用末端对空（排液或排气）的快开阀门（如 V 型球阀或旋塞阀）				√
	使用不同连接方式的软管以防止连接错误（如空气/氮、原材料）				√
	对于末端对空的直角回转阀门，使用圆形阀门手柄可以最大限度地减少碰撞可能性。				√
	提高阀门阀座的可靠性（如尽可能使用系统压力密封阀座，使用阀座几何形状、阀门操作和流量消除或减少阀座损坏）				√
	去除不必要的膨胀节、软管和爆破片				√
	使用鹤管替代软管装卸危险物料。				√
	通过以下措施关注控制系统人为因素： 简化控制显示器 限制仪表复杂性 清楚显示正常和异常工艺条件的信息 符合操作人员期望的控制和显示逻辑 以统一方式独立显示相似信息 安全报警与工艺报警易于区分 尽快更正无效报警和消除不必要报警，防止对报警的麻痹 控制系统显示能为所有操作行动提供足够反馈 控制系统显示布局合理、统一、有效				√

	控制系统易区分、可访问和易于使用				
	控制系统满足标准期望（颜色，移动方向）				
	控制系统的安排逻辑上遵循正常的操作顺序				
	操作程序的格式和语言便于操作人员遵守和理解，并包含必要信息				

注：适用阶段打“√”的为必选检查项，适用阶段打“○”的为可选检查项。

6.4 本质安全化评估的检查表——操作和平面布置

本质安全化评估的操作和平面布置检查表见表 12。

表 12 操作和平面布置

序号	检查项目	适用阶段			
		实 验 室 研 究	中 试 试 验	工 艺 包 编 制	工 程 设 计 与 施 工
1	缓和				
	在露天建造处理爆炸性或易燃材料的工厂，以使泄漏安全扩散（在露天区域产生爆炸需要几吨，而在密闭建筑中可能需要几公斤）。不适用于即使在低浓度下也具有剧毒或对环境有害的材料。				√
	涉及有毒物料的工厂采用全封闭措施，以防止泄漏到大气中。				√
	开展定量风险评估确保将个人风险与社会风险控制在可接受范围内。				√
	开展多米诺效应评估，确保爆炸超压不会造成进一步的损坏。				√
	采用以下的火灾被动安全防护措施： 1）二次围堵（如堤坝、围堰、建筑物、围墙）。 2）为工艺设备、罐、容器设置永久性跨接和接地系统。 3）使用防火隔热，而不是固定的/便携的消防设施。				√
	设计易燃液体储存区，使溢出和泄漏不会积聚在储罐或其他工艺设备下，以减少火灾升级的可能性。				√
	将工厂放置在远离人口中心或环境敏感区域的地方。				√
	在工厂布局中使用缓冲区（开放空间或低危险工厂），以保护人员和环境免受危险的影响。				√
	布置工厂时，考虑地面坡度和主要风向，因为这将影响泄漏的扩散。				√
	现场远离外部危险源。				√
	场地远离学校、医院、商业、自然保护区等敏感区域，靠近原材料供应。				√
	将装卸区设在远离主要工艺装置。				√
2	简化				
	将需要同时或顺序操作的阀门或其他设备放置在相邻位置，以便操作。				√
	在工厂设计和布局中考虑应急规划和响应要求。				√
	设计清晰的逃生路线和安全的集合区域。				√
	清晰、合理和一致的工厂标签设计。				

注：适用阶段打“√”的为必选检查项，适用阶段打“○”的为可选检查项。

6.5 检查方法

对照每个问题进行检查，回答“符合”、“不符合”或者“不适用”。如果回答“符合”，进一步说明改造的路径；如果回答“不符合”或者“不适用”，则说明理由。如果在某个检查项目下面的本质安全化方案与别的检查项目矛盾，则应进一步采用量化评估方法确定该方案的合理性。

7 本质安全化分析法

7.1 目的

通过系统化的方法，全面考察可能的本质安全化方案，并初步确定各种改进方案对安全性、经济性的作用以及其他负面影响，提出初步的可行性建议。

在工艺包编制、工程设计与施工阶段，针对危险性较高的单元、设备与场景，应进行本质安全化分析。

7.2 分析小组成员和要求

本质安全化分析小组可由设计人员、工艺工程师、设备工程师、仪表工程师、安全工程师、有经验的操作人员等组成。根据需要，可要求以下人员参加本质安全化分析：工艺包供应商、成套工艺设备供应商、公用工程工程师、电气工程师、管道工程师、机械工程师、催化剂工程师等。

分析组长宜由第三方人员担任，在整个分析过程中，小组成员宜保持不变。

7.3 分析程序

本质安全化分析会议基本程序主要包括：

- a) 分析项目概况介绍；
- b) 划分节点；
- c) 选取引导词；
- d) 根据分析目的确定参数或危险场景，由引导词与参数确定具体的本质安全化路径，找到检查表 13、表 14 中对应的引导词，逐一检查可能的本质安全化路径；
- e) 分析可行性，如果没有可行性，则分析终止；
- f) 分析本质安全化路径对 SHE 的影响；
- g) 分析经济性；
- h) 分析负面影响；
- i) 提出建议措施，确定责任部门；
- k) 重复步骤 d) ~i) 直到该引导词下所有本质安全化路径分析完毕；
- l) 重复步骤 c) ~i) 直到该节点所有引导词分析完毕；
- m) 最后重复步骤 b) ~i) 直到所有节点分析完毕。

7.4 分析法参数与引导词

工艺本质安全化分析选项引导词见表13，工艺参数见表14。

表13 工艺本质安全化分析选项引导词列表

引导词	解释
从源头降低严重性： 强化 替代 缓和	如果发生了危险，则尽量减少后果，例如减少存量，最大限度地增加安全扩散的机会，爆炸泄放。
从源头减少可能性： 简化 减少频率/数量 操作友好	尽量减少危险/启动地点或任务的数量， 例如，在密封方面的弱点，如配件、仪器、或维护操作的次数。 尽量减少发生错误的机会，例如，使其易于控制，易于操作和维护，易于正确识别。 最大限度地提高工厂状态-是否清楚开启、关闭、运行/不运行、加压、满、空。 如果事情开始出错，通过来自任务或控制系统的良好反馈，最大限度地提高及时恢复的机会。
与危险隔离： 距离 屏障 保护	定位远离外部危害和影响。 利用距离/工厂/自然特性作为屏障，以限制对人、工厂和环境的影响。 限制事故升级的机会。 最大化逃跑的机会。
其他： 被动保护 主动保护 操作/管理控制	不是本质安全，但是被动可能比主动更好，主动可能比操作控制更好。

表14 工艺参数列表

分类	参数
化学条件	浓度
	组成
	催化剂
	溶剂
工艺条件	温度
	压力
	相态（气、液、固）
	液位
时间顺序	原料的进样时间
	间歇/半间歇/连续
设备（阀门、泵、管道、反应器、塔、垫片）	尺寸
	几何形状
	类型
	位置
	方向

7.5 本质安全化分析法可与检查表法结合使用。

7.6 本质安全化分析记录示例见表15。

表 15 本质安全化分析记录表（示例）

T/CCSAS 0XX—202X

引导词	参数/危险场景	本质安全化路径	可行性	ISHE（标记：+ 0 -）			经济性（标记：+ 0 -）	负面影响	建议	责任部门
				安全	健康	环境				
替代	泵	屏蔽泵替代机械密封泵	是	+	+	+	—		可行	采购部门
简化	泵	取消泵，改为压力输送	否							