

ICS 13.040.20
CCS Z 05

团 体 标 准

T/ACEF 293—2026

挥发性有机物废气治理工程设计 本质安全评价技术规范

Technical specification for inherent safety assessment of volatile organic
compounds treatment project design



2026-08-13 发布

2026-08-13 实施

中 华 环 保 联 合 会 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语、定义和缩略语 1

4 评价原则、重点与程序 2

5 工程整体性定性安全评价 5

6 工艺系统性定性和半定量安全评价 6

7 严重爆炸事故定量评价 8

8 安全评价报告编写 11

附录 A（资料性） 挥发性有机物废气治理工程安全评价示例—活性炭吸附法 12

附录 B（资料性） 挥发性有机物废气治理工程安全评价示例—蓄热燃烧法 24

附录 C（资料性） 挥发性有机物废气治理工程常见事件失效频率参考数据 36

参考文献 35

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。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件为首次发布。

本文件主编单位：中国矿业大学（北京）、中华环保联合会大气污染物与温室气体协同减排专业委员会。

本文件副主编单位：希戈纳（上海）科技有限公司。

本文件参编单位：山东颐华环保工程有限公司、青岛华世洁新材料科技集团股份有限公司、北人伯乐氛（西安）环境技术有限公司、杭州盈创环境科技有限公司、中科新天地（合肥）环保科技有限公司、东华工程科技股份有限公司、青岛科技大学、应急管理部信息研究院、北京国环汇智环境科技有限公司。

本文件主要起草人：曹俊雅、解强、罗晨辉、张香兰、沈志成、李恒、杨海、孙传法、柴灵芝、李冬、柯亮、钱黎明、曹伟、王正、罗志雄、许夏、马永涛、张亚龙、杜金龙、范翔、石斌、孙煦、张翔、周薇、吴克食。

本文件主要审议人：栾志强、马永亮、王宗爽、焦正、羌宁、修光利、张钢锋、邵霞、张益铮、刘林杰。

挥发性有机物废气治理工程设计本质安全评价技术规范

1 范围

本文件规定了挥发性有机物（VOCs）废气治理工程设计本质安全评价的评价原则、重点、程序以及工程整体性定性安全评价、工艺系统性定性和半定量安全评价、严重爆炸事故定量评价及安全评价报告编写。

本文件适用于新建、改建及扩建的VOCs废气治理工程在设计阶段的本质安全评价，也可为现有VOCs废气治理设施的安全风险评估与运行管理优化提供指导。

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 50187 工业企业总平面设计规范

GB 55037—2022 建筑防火通用规范

GB/T 7829 故障树分析程序

AQ/T 3049 危险与可操作性分析（HAZOP分析）应用导则

AQ/T 3054 保护层分析（LOPA）方法应用导则

AQ 8001 安全评价通则

3 术语、定义和缩略语

GB 50187、GB 55037、GB/T 7829、AQ/T 3049、AQ/T 3054、AQ 8001界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 术语和定义

3.1.1

VOCs废气治理工程 VOCs Treatment Projects

用于治理生产过程中排放的挥发性有机物（VOCs）废气，为使其达到排放标准或环保要求而建设的工程，由废气收集、预处理、净化、控制及辅助设施等系统组成。

3.1.2

本质安全 Inherent Safety

本质安全是指通过设计使生产设备或系统本身具有安全性，在误操作或故障状态下仍能避免事故发生，包含“失误—安全”与“故障—安全”功能。

3.1.3

VOCs废气治理工程设计本质安全评价 Inherent Safety Assessment of VOCs Treatment Projects

Design

在VOCs废气治理工程的设计阶段，对工艺技术方案、设备选型、平面布置及自动化控制策略等方面进行的定性与定量分析与评价，旨在辨识治理工程中存在的风险，确认设计阶段消除或降低了风险因素、达到本质安全设计，并确定系统的风险等级及所需的工程防护措施。

3.1.4

信息共享 Information Sharing

在安全评价体系中，将HAZOP分析识别出的偏差、原因、后果及风险等级等数据，作为LOPA分析、风险矩阵及故障树分析等后续评价环节的输入数据或信息，从而实现评价数据在不同评价方法间的有效传递与整合，减少人为影响，提升安全评价的准确性、全面性和可靠性的工作机制。

3.1.5

多组分VOCs爆炸下限分析 Multi-component VOCs LEL Analysis

通过热力学计算、实验测定或采用经验验证的软件模拟，确定多组分挥发性有机物混合气体的爆炸下限（LEL%），考虑高浓度冲击、组分波动等最不利工况下的安全裕度，并结合废气组分、组成、工艺及工况，评估混合气体在不同运行工况下达到爆炸极限可能性的分析过程。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件，见表1。

表1 本文件使用的缩略语

缩略语	全称	释意
FTA	fault tree analysis	故障树分析
HAZOP	hazard and operability study	危险与可操作性分析
IPL	independent protection layer	独立保护层
LEL	lower explosion limit	爆炸下限
LOPA	layer of protection analysis	保护层分析
P&ID	piping and instrumentation diagram	管道和仪表流程图
PLC	programmable logic controller	可编程逻辑控制器
PFD	process flow diagram	工艺流程图
VOCs	volatile organic compounds	挥发性有机物

4 评价原则、重点与程序

4.1 评价原则

VOCs 废气治理工程设计本质安全评价应遵循科学性、全面性、系统性与层次性原则。评价工作应贯穿工程设计全过程，并根据风险特征选择适宜的评价深度，通过递进的“工程整体性定性评价—工艺系统性定性半定量评价—定量评价”体系，以及不同评价方法间的信息共享，识别并消除设计缺陷，从源头降低安全风险。

4.2 评价重点

根据 VOCs 废气治理工程的技术特点，评价工作应侧重以下方面：

a) 工艺风险特点：对于氧化类工艺，应重点分析废气浓度波动、热稳定性、设备超温超压响应性、压力容器及压力管道设计、安全泄压措施的有效性、设备防爆选型与配置、安全防护等方面；对于回收类工艺，应重点分析介质理化特性（如是否会发生聚合、氧化、水解等反应）、吸附放热、脱附方法及脱附浓度控制、冷凝系统压力控制、富集气体安全性、压力容器及压力管道设计、设备防爆选型与配置及安全防护等方面。

b) 自动化控制系统：着重评估 VOCs 废气治理设施中温度、压力、流量、浓度、液位等关键参数控制方案，以及紧急吹扫、安全联锁系统等应急控制策略在操作失误和故障发生时的可靠性与有效性。

c) 爆炸风险：VOCs 废气治理工程的主要事故类型为有机气体燃烧或爆炸。本质安全评价应以混合气体的爆炸下限（LEL%）作为关键判定指标，并在事故分析中强化定量评估，尤其应开展爆炸可能性与爆炸后果的定量分析。

d) 人为因素：在进行 VOCs 废气治理工程定性、定量评价时，应加强对人为因素引发事故风险的识别，将操作失误、沟通障碍、监管不力等人为因素纳入“6 工艺系统性定性和半定量安全评价”中 HAZOP 分析的偏差原因、“7 严重爆炸事故定量评价”中故障树分析的事件选择。同时，应提高对“6 工艺系统性定性和半定量安全评价”中 LOPA 分析剩余风险的控制要求，增加安全风险裕量。

4.3 评价程序

VOCs 废气治理工程设计本质安全评价程序主要包括前期准备、评价实施与反馈、报告编制三个阶段，具体流程见图 1。

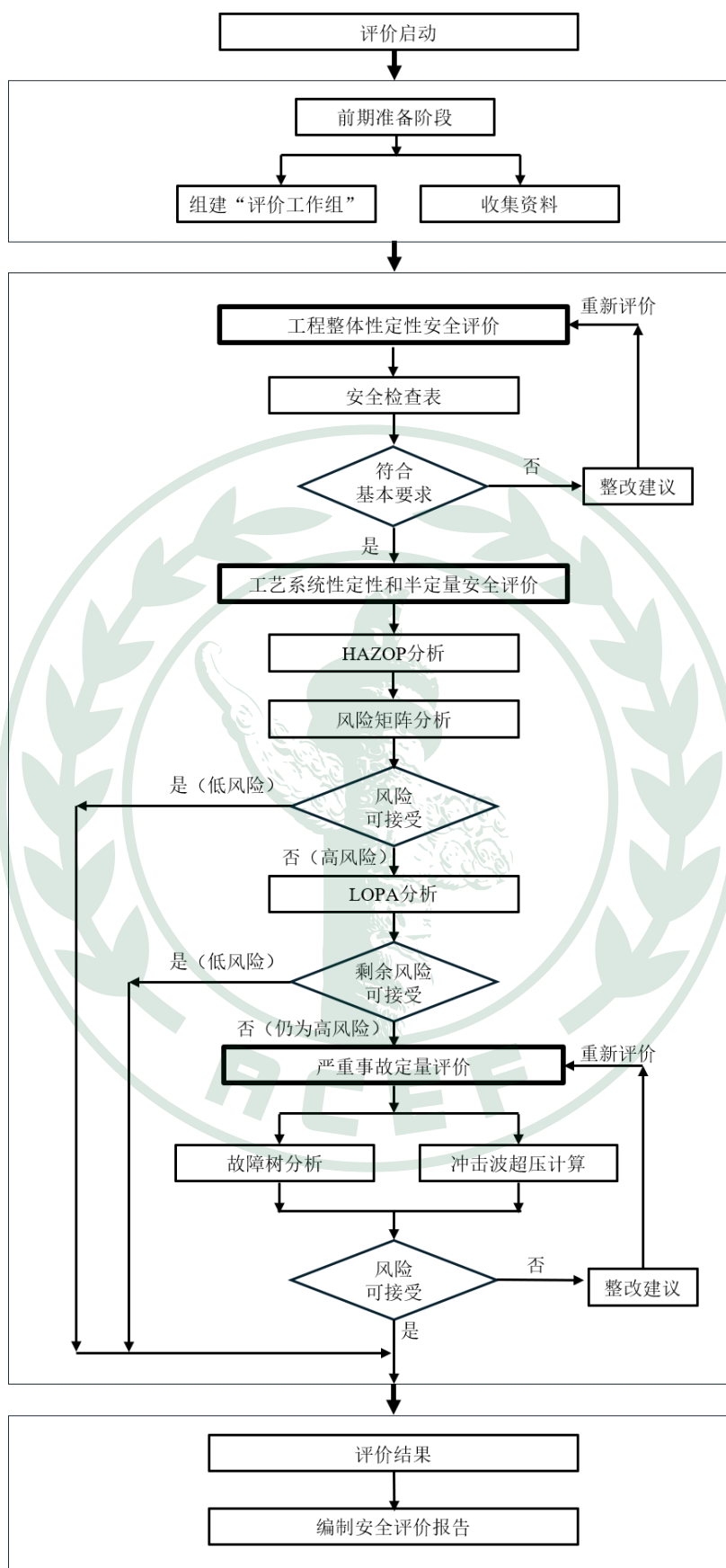


图1 VOCs 废气治理工程安全评价程序

4.3.1 前期准备

在开展评价前，应组建由具备安全评价资质及专业技术能力人员组成的评价工作组，收集必要的工程设计资料与基础数据，包括但不限于：

- a) 设计说明书、工艺流程图（PFD）、管道及仪表流程图（P&ID）、平面布置图、设备一览表和控制连锁说明等工程设计资料；
- b) 废气组分理化性质及燃烧爆炸参数等基础数据；
- c) 自然环境资料（包括但不限于气象条件、雷电、地形地貌等）。

4.3.2 评价实施与反馈

VOCs 废气治理工程评价实施与反馈应满足下列要求：

- a) 工程整体性定性评价：宜采用安全检查表评价方法，对平面布置及工艺合规性等开展初步评价。
- b) 工艺系统性定性及半定量评价：宜采用危险与可操作性分析（HAZOP）识别工艺偏差与潜在风险，并结合风险矩阵确定风险等级；对高风险场景进行保护层分析（LOPA），评估保护层的有效性；通过信息共享实现评价方法的有机结合。
- c) 严重爆炸事故定量评价：对于经 LOPA 分析后剩余风险仍不可接受的场景，宜采用故障树（FTA）确定事故发生的概率，结合冲击波超压计算评估事故后果，开展定量风险评价。
- d) 结果判定与反馈：若评价结果表明风险不可接受，应提出相应整改措施，设计修改后，应重新评价该项目，直至风险降至可接受水平。

对于工艺简单的 VOCs 废气治理工程，可根据评价程序选择适宜的评价方法。

4.3.3 报告编制

将 VOCs 废气治理工程设计本质安全评价的过程和结果编制成安全评价报告，具体要求详见“8 安全评价报告编写”。

5 工程整体性定性安全评价

5.1 评价要求

5.1.1 工程整体性定性评价宜采用安全检查表法，对工程的区域位置、平面布局及外部条件进行系统性评价。

5.1.2 安全检查评价内容应涵盖法律法规与政策符合性、平面布置、自然环境、工艺设计、治理设施的运行与维护制度以及操作人员管理制度。开展安全检查表评价时，应系统收集并核查下列基础数据与资料：

- a) 法律法规与合规性资料：包括项目的立项审批文件、环境影响报告书及批复、消防设计审查意见等。
- b) 自然环境资料：包括项目所在地的气象数据（包括但不限于雷电、气温、气压、主导风向、风速等）、地形地貌（重点关注是否存在可能导致废气积聚的低洼地带）及周边社会环境（安全防护距离内是否存在学校、居民区等敏感目标）等。
- c) 废气组分数据：废气中主要组分的物理化学性质，包括但不限于沸点、闪点、单一组分爆炸下限（LEL%）、多组分 VOCs 爆炸下限分析、燃烧热、反应活性、毒性等。
- d) 工程设计资料：包括设计说明书、平面布置图、消防设施布置图、设备一览表和控制连锁说明等。

5.1.3 平面布置评价，应依据 GB 50187、GB 55037 等通用化工与工程类安全设计规范中的相关规定核查治理设施的平立面布置，评价重点包括防火间距、爆炸危险区域划分、泄爆安全距离等方面。

5.1.4 自然环境适应性评价应分析极端天气条件（如雷暴、极寒、高温等）及特殊地形对治理工程排气与污染物扩散的影响，确定是否存在负压废气回流、局部积聚等风险。

5.1.5 工艺设计评价内容应包括处理能力、处理效率、排放指标、工艺路线、工艺设备、自动控制及仪表、安全保护措施等。评价应结合选定的治理技术，依据对应的工程技术规范，对工艺路线选择、关键设备选型、自动控制及仪表配置、安全保护措施合规性进行核查，重点核查温度、压力等监测报警装置，PLC 自动控制及报警联锁功能，阻火器、防爆膜等安全器件的设置和有效性。

5.1.6 安全检查表的编制应依据法律法规、政策文件，以及常用化工与工程类安全设计规范、VOCs 废气治理工程技术规范和 VOCs 废气治理工程装置技术要求等国家标准、行业标准及团体标准，并明确列出引用的具体条款号。

5.2 评价结果

5.2.1 评价结果应以安全检查表的形式呈现，内容包括序号、检查项目及内容、检查依据、结果和备注等方面。

5.2.2 对安全检查表中判定为“不符合”的项目应依据评价结果进行分析，明确可能导致的安全风险。分析应按标准规范要求，提出具有针对性、可操作性和经济合理性的安全对策、措施及改进建议，供设计单位参考。

6 工艺系统性定性和半定量安全评价

6.1 评价要求

6.1.1 工艺系统性定性和半定量安全评价宜采用“HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”的组合评价模式。HAZOP 分析识别偏差、结合风险矩阵评估风险等级，对高风险场景进行 LOPA 分析。

6.1.2 通过信息共享模式，HAZOP 分析得到的初始事件频率和后果严重程度可作为风险矩阵分析的数据来源，对严重事故再进行 LOPA 分析确定已有安全措施并适当添加保护层。

6.1.3 “HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”的评价内容程序和信息共享模式见图 2。

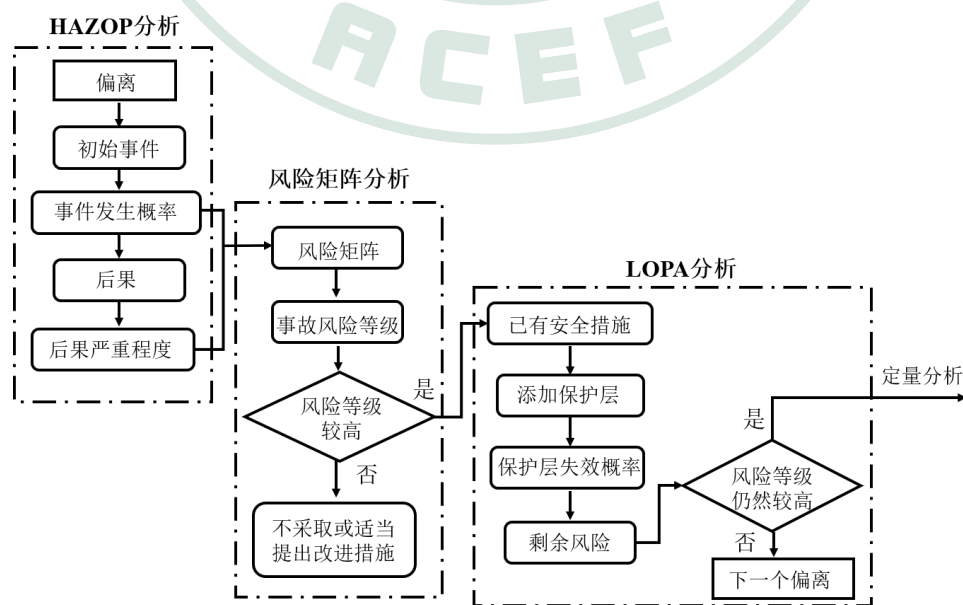


图 2 “HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”的评价内容程序和信息共享模式

6.2 HAZOP 分析

6.2.1 HAZOP 分析应符合 AQ/T 3049 中的相关规定。分析应基于准确、完整的管道及仪表流程图（P&ID）、设备一览表、控制联锁说明和物料平衡数据进行。针对 VOCs 废气治理工程，分析应包括进气条件的不确定性等系统内部动态变化过程。

6.2.2 HAZOP 的节点划分应根据 VOCs 废气治理工程的工艺流程，结合 HAZOP 的节点划分原则确定。宜按下列节点结合具体工艺组合调整：

- a) 废气收集与输送单元：包括管道、风机、缓冲罐等；
- b) 废气预处理单元：包括喷淋塔、过滤器、除尘器等；
- c) 治理工艺核心单元：包括氧化类工艺的燃烧室、蓄热室、切换阀、辅助燃料系统等；回收类工艺的吸附系统、脱附系统、冷凝系统、吸收系统等；
- d) 消防安全单元。

6.2.3 HAZOP 分析时偏差中的工艺参数应与 VOCs 废气治理工程特点相结合，除了常规的“流量”、“温度”、“压力”、“液位”等参数，还可引入 VOCs 废气治理工程特有的“混合气浓度”、“操作模式”、“氧含量”等参数。

6.2.4 原因分析应根据 VOCs 废气治理工程的特点，识别下列因素：

- a) 人为因素：包括操作失误、参数设定错误、报警响应滞后、巡检不到位等；
- b) 设备与仪表：包括设备选型不符合防爆要求、仪表故障、静电或摩擦产生点火源等；
- c) 外部因素：包括上游废气工况波动、公用工程中断等；
- d) 管理因素：包括安全管理制度缺失、变更管理不到位、运维单位管理不善等。

6.2.5 后果分析应包括可能引发的火灾、爆炸、有毒有害物质泄漏等事故，并评估事故对治理工程上下游环节的影响。

6.2.6 VOCs 废气治理工程事故严重程度按表 2 划分。

表 2 VOCs 废气治理工程事故严重程度划分表

事故等级	伤亡情况	经济损失
S5	死亡≥3人；或重伤≥10人	超过500万元
S4	死亡1~2人；或重伤3~9人	100~500万元
S3	重伤1~2人；或轻伤≥10人	20~100万元
S2	轻伤1~9人	1~20万元
S1	无人员伤亡	少于1万元

注：事故等级的判定，符合“伤亡情况”或“经济损失”条件之一即可。

6.3 风险矩阵分析

6.3.1 风险矩阵分析应符合 AQ/T 3054 中的相关规定。

6.3.2 风险等级应按 HAZOP 分析的结果，选用风险矩阵对每个偏差场景分别确定事故等级和事故发生频率。事故发生频率可按企业历史台账确定，缺乏数据时可参考附录 C 确定。通过风险矩阵计算或查阅 VOCs 废气治理工程风险评估矩阵见表 3，确定事故场景风险等级。

表 3 VOCs 废气治理工程风险评估矩阵

事故等级频率（次/年）		1	2	3	4	5
1	$<10^{-4}$	1	2	3	4	5
2	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	2	4	6	8	10
3	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	3	6	9	12	15
4	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	4	8	12	16	20
5	$>10^{-1}$	5	10	15	20	25

6.3.3 风险等级小于等于 5，可根据实际情况确定是否添加有效安全措施。风险可接受标准应按国家标准或企业内部安全管理规定确定。当风险等级达到“严重”及以上时，应进行 LOPA 分析。VOCs 废气治理工程风险等级划分及应对策略应符合表 4 中的规定。

表 4 VOCs 废气治理工程风险等级划分及应对策略

风险等级	风险描述	应对策略
1~5	可忽略安全风险	根据实际情况确定是否添加有效安全措施
6~9	一般性安全风险	宜采取安全措施或进行专项风险评估后确定
10~19	严重安全风险	按计划强制采取安全措施
20~25	重大安全风险	立即采取安全措施

6.4 LOPA 分析

6.4.1 LOPA 分析应符合 AQ/T 3054 中的相关规定。

6.4.2 对风险等级大于等于 10，添加了保护层的严重事故应根据保护层要求时的失效概率计算剩余风险，直至达到可接受水平。

6.5 评价结果

6.5.1 评价结果应列出按照不同节点划分的“HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”评价表，应包括序号、参数、引导词、偏离、原因、后果、事故等级、频率、风险等级、已有安全措施、是否添加保护层和剩余风险等级等内容。

6.5.2 应根据评价结果总结不同节点的风险，并据此提出具有针对性、可操作性和经济合理性的安全对策措施及建议。

7 严重爆炸事故定量评价

7.1 评价要求

7.1.1 严重爆炸事故定量评价宜采用故障树分析（FTA）确定事故发生的概率，采用冲击波超压计算评估事故的后果。

7.1.2 故障树分析的评价对象来源于 LOPA 分析后剩余风险高的事件。故障树分析的原因事件可按 HAZOP 分析中识别出的与爆炸相关的初始事件确定。冲击波超压计算用于评估在安全泄放装置失效或爆炸压力上升速率超过泄放能力等最不利工况下，设备本体发生爆炸时对周边环境产生的影响。

7.2 故障树分析

7.2.1 故障树分析应符合 GB/T 7829 中的相关规定。

7.2.2 顶事件应选择经 LOPA 分析添加保护层后剩余风险仍处于较高风险级别的安全隐患。

7.2.3 中间事件、省略事件和基本事件的确定，应根据工程资料及 HAZOP 分析结果，并考虑人为操作失误可能产生的影响。事件发生频率可按企业历史台账确定，缺乏数据时可参考附录 C 确定。

7.2.4 故障树分析应厘清事件的逻辑关系，绘制故障树结构图，并通过布尔运算法求出最小割集，计算顶事件的发生概率、概率重要度和结构重要度等。

7.2.5 故障树分析应总结结构重要度与临界重要度对顶事件影响较大的事件，据此提出针对性改进措施，并计算改进后的顶事件发生概率，直至降至可接受标准范围内时评价结束。

7.3 冲击波超压计算

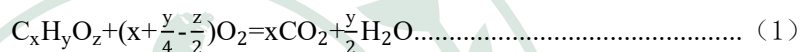
7.3.1 有机废气发生爆炸时产生的最大压力计算。

基于爆炸反应为定容绝热过程的假设，利用物理化学法计算 VOCs 混合气体发生爆炸时产生的最大压力（记为 p_m ）。

计算时，首先确定混合气体等效分子式（假设为 $C_xH_yO_z$ ）；当废气中含有氮、硫、卤素等其他元素时，根据实际化学计量数调整反应方程式及热力学参数计算，或采用专业的化工热力学软件/数据库进行计算。

计算所需物质的标准摩尔生成焓（ $\Delta_f H_m^0$ ）和平均摩尔恒容热容（ $\bar{C}_{v,m}$ ），应查阅权威化学化工物性手册或权威物性数据库。对于混合物料，应根据组分占比进行加权计算。计算爆炸反应的标准摩尔反应焓应基于气态水（ H_2O,g ）作为产物进行计算。

爆炸反应方程式：



则反应的 ΔH_1 ：

$$\Delta H_1 = x\Delta_f H_m^0(CO_2,g,298K) + y/2\Delta_f H_m^0(H_2O,g,298K) - \Delta_f H_m^0(C_xH_yO_z,g,298K) - (x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2})\Delta_f H_m^0(O_2,g,298K) \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta U_1 = \Delta H_1 - \Delta nRT_0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta U_2 = \sum n_i \bar{C}_{v,m} (T_m - T_0) = (x\bar{C}_{v,m}(CO_2) + \frac{y}{2}\bar{C}_{v,m}(H_2O) + 3.76(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2})\bar{C}_{v,m}(N_2))(T_m - 298) \dots\dots (4)$$

式（1）~（4）中：

ΔH_1 ——爆炸反应的标准摩尔反应焓，kJ/mol；

$\Delta_f H_m^0$ ——各物质的标准摩尔生成焓，kJ/mol；

ΔU_1 ——爆炸反应内能变化量，kJ/mol；

Δn ——反应前后气相物质的量之差， $\Delta n = \frac{y}{4} + \frac{z}{2} - 1$ ；

R ——摩尔气体常数，取 8.31×10^{-3} kJ/(mol·K)；

ΔU_2 ——燃烧产物总热容，kJ；

n_i ——第 i 种物质的物质的量，mol；

$\bar{C}_{v,m}$ ——为各物质在 T_0 到 T_m 区间内的平均摩尔恒容热容，kJ/(mol·K)；

T_m ——爆炸产生的最大温度，K；

T_0 ——爆炸前的最高温度，K。

由于定容绝热过程， $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$ ，联立可通过试差法求得 T_m 。

爆炸产生的最大压力可按压力与温度及摩尔数呈正比的规律确定，关系为：

$$p_m = \frac{p_0 T_m n}{T_0 m} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

p_m ——爆炸后的最大压力, MPa;
 T_m ——爆炸后产生的最大温度, K;
 n ——爆炸后气体物质的量, mol;
 P_0 ——爆炸前的最大压力, MPa;
 T_0 ——爆炸前的最高温度, K;
 m ——爆炸前气体物质的量, mol。

7.3.2 设备抗压强度计算。

在已知设备所用材质强度、计算厚度和直径的条件下, 设备的抗压强度 p_c 应按式计算:

$$p_c = \frac{2\delta[\delta]^t\phi}{D_i} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

δ ——设备的理论计算壁厚, mm;
 $[\delta]^t$ ——为设备材料在设计温度下的许用应力, MPa;
 ϕ ——焊接接头系数, 根据设备无损检测比例确定, 其值小于或等于1;
 D_i ——设备内径, mm。

7.3.3 设备抗压判断。

通过对比爆炸最大压力 (p_m) 和设备抗压强度 (p_c) 及安全泄放压力, 判断设备抗压风险。 $p_m > p_c$ 且安全泄放装置失效 (或未设置), 应判定设备发生破裂并释放高压气体冲击波, 进行伤害半径计算。

7.3.4 伤害半径计算。

当设备抗压强度小于爆炸最大压力时, 应计算包括死亡半径、重伤半径、中伤半径、轻伤半径等参数。

爆炸的破坏力主要取决于燃料量。衡量爆炸破坏力时, 燃料量应换算成 TNT 当量, 按下式计算:

$$W_{TNT} = \frac{\alpha W_f Q_f}{Q_{TNT}} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

W_{TNT} ——爆炸物料的 TNT 当量, kg;
 W_f ——爆炸物料中燃料的总质量, kg;
 α ——爆炸效率因子, 取 3 %作为初步估算值, 有更精确数据来源时应优先采用;
 Q_f ——爆炸物料的爆炸热, MJ/kg;
 Q_{TNT} ——TNT 的爆炸热, 一般为 4.52 MJ/kg。
 其中, 混合气体爆炸热计算可基于盖斯定律计算反应焓变近似获得。

$$Q_f = \frac{-\Delta H_1}{1000m} \dots\dots\dots (8)$$

Q_f ——爆炸物料的爆炸热, MJ/kg;
 ΔH_1 ——爆炸反应的标准摩尔反应焓, kJ/mol;
 m ——气体物质的量, mol。

a) 死亡半径

冲击波超压大于 0.1 MPa, 死亡半径记为 R_1 。

$$R_1 = 13.6 \left(\frac{W_{TNT}}{1000} \right)^{0.37} \dots\dots\dots (9)$$

b) 重伤半径

冲击波超压范围为 0.1–0.05 MPa，重伤半径记为 R_2 。

$$\Delta p = \frac{0.137}{S^3} + \frac{0.119}{S^2} + \frac{0.267}{S} - 0.019 \dots\dots\dots (10)$$

$$S = R_2 \left(\frac{p_0}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta p = \frac{0.05}{p_0} \dots\dots\dots (12)$$

$$E = W_{TNT} Q_{TNT} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

Δp ——冲击波超压值；

S ——中间因子；

p_0 ——环境压力，Pa；

E ——爆炸总能量，J。

c) 中伤半径

冲击波超压范围为 0.05–0.03 MPa，中伤半径记为 R_3 。

$$S = R_3 \left(\frac{p_0}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta p = \frac{0.03}{p_0} \dots\dots\dots (15)$$

d) 轻伤半径

冲击波超压范围为 0.03–0.02 MPa，轻伤半径记为 R_4 。

$$S = R_4 \left(\frac{p_0}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (16)$$

$$\Delta p = \frac{0.02}{p_0} \dots\dots\dots (17)$$

7.4 评价结果

7.4.1 评价结果应列出故障树分析的定性定量分析过程，包括最小割集及顶事件发生概率的计算；同时列出冲击波超压计算过程，明确不同距离处的事故后果等级。

7.4.2 评价结果应结合事故发生的概率与后果，判定当前的风险水平是否可接受。针对不可接受的风险，确定是否需要增加新的保护层或优化平面布置等安全对策措施，并重新计算改进后的风险指标，以验证措施的有效性。

8 安全评价报告编写

8.1 安全评价报告应按 5.2、6.5 和 7.4 等小节 VOCs 废气治理工程安全评价的评价结果与建议编写。

8.2 安全评价报告编制可参考 AQ 8001 中的相关要求，并结合 VOCs 废气治理工程的特点进行简化与针对性调整。报告应重点阐述工程设计阶段的本质安全特性、关键风险节点（HAZOP 分析结果）及独立保护层（IPL）的有效性，避免编写与治理工程本质安全无关的通用性宏观描述。

8.3 安全评价报告基本结构和编写格式应符合 AQ 8001 中附录 B 中的相关规定，评价报告应包含编制说明、工程概况、整体性评价结果、系统性评价结果、定量评价结果和评价结论等部分。

附录 A

(资料性)

挥发性有机物废气治理工程安全评价示例—活性炭吸附法

附录 A 包含的示例旨在举例说明本规范中描述的 VOCs 废气治理工程设计本质安全评价方法在活性炭吸附法 VOCs 废气治理工程设计中的应用。注意,为达到举例说明的目的,各个示例已被大幅度简化。在任何情况下这些示例都不具备实践案例分析的复杂性。还应注意,此处仅提供部分过程和输出结果的示例。

A.1 示例介绍

本实例选取某包装印刷企业 VOCs 废气治理工程的“活性炭吸附”部分作为示例。该企业 VOCs 主要成分包括苯、甲苯、乙酸乙酯等多种物质,设计排放总风量为 $50000 \text{ m}^3/\text{h}$, VOCs 的平均排放浓度为 $150 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。针对具体情况已制定详细的治理方案。

现使用本规范对该 VOCs 废气治理工艺方案进行评价。

A.2 工程整体性定性安全评价

按照第 5 章所述内容,工程整体性定性评价采用安全检查表,参照参考文献所列标准和规范,评价工作组收集了项目所在地的自然环境资料及工程设计文件,对治理工程整体安全性做出定性评价,编制部分安全检查表如表 A.1 所示。

表 A.1 工程设计安全检查表示例

序号	检查项目及内容（安全方面）	检查依据	结果	备注
1	法律法规与政策符合性			
1.1	工艺是否属于国家《淘汰落后安全技术工艺设备目录》		不属于	
2	平面布置			
2.1	治理设施应选择废气扩散、废水排放和废渣堆放对周边环境影响较小的地区	GB 50984—2014《石油化工工厂布置设计规范》	符合	VOCs废气治理设施紧邻生产车间，具有符合工业企业厂址规范的先天优势
2.2	甲、乙类厂房和甲、乙、丙类仓库内的防火墙，其耐火极限不应低于4.00 h	GB 55037—2022《建筑防火通用规范》第6.1.3条	符合	
2.3	当厂房建筑高度不大于7 m时，组内厂房之间的防火间距不应小于4 m；当厂房建筑高度大于7 m时，组内厂房之间的防火间距不应小于6 m	GB 50016—2014《建筑设计防火规范（2018年版）》，第3.4.8条	不符合	排放车间建筑高于7 m，而治理厂房与生产车间距离仅为4 m建议调整布局
3	自然环境			
3.1	防爆电气设备及其安装附件应符合周围环境不同条件对电器设备的要求	GB 50058—2014《爆炸危险环境电力装置设计规范》第4.3.1条	符合	
4	工艺设计			
4.1	治理工程的处理能力应根据废气的处理量确定，设计风量宜按照最大废气排放量的120 %进行设计	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.1.2条	符合	企业最大排放风量为39932 m³/h
4.2	在吸附操作周期内，吸附床内的温度应低于83 ℃；超温时能自动报警，并连锁启动降温装置	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.6.4条	符合	
4.3	应根据废气的来源、性质及流量等因素进行综合分析后选择工艺路线	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.2.1条	符合	
4.4	治理系统与主体生产装置之间的管道系统应安装阻火器或防火阀	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.5.2条	符合	
4.5	风机、电机和现场电气仪表是否满足现场防爆等级要求	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.5.3条	符合	
5	治理设施运行与维护制度			
5.1	治理设施应与产生废气的生产工艺设备同步运行，由于紧急事故或设备维修等原因造成治理设施停止运行时，应立即报告当地环境保护行政主管部门	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第11.1.1条	符合	
5.2	企业应建立健全与治理设备相关的各项规章制度，以及运行、维护和操作规程，建立主要设备运行状况的台账制度	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第11.1.4条	符合	
6	操作人员管理制度			
6.1	有管理和操作人员的培训、考核制度。	HJ 2026—2013《吸附法工业有机废气治理工程技术规范》，第11.2.2条	符合	

通过对该工程设计整体安全的安全检查表评价，可以看出该工程的整体安全性较高，但厂房距离该项不符合要求，故应根据检查表中的相关标准和规范对设计进行改进：

按照 GB 50016-2014《建筑设计防火规范（2018 版）》中第 3.4.8 条的规定，当厂房建筑高度不大于 7 m 时，组内厂房之间的防火间距不应小于 4 m；当厂房建筑高度大于 7 m 时，组内厂房之间的防火间距不应小于 6 m。案例中业主生产车间的建筑高于 7 m，而设计中治理设施与厂房的距离仅为 4 m，因此，需将两者的距离调整到 6 m 以上。

A.3 工艺系统性定性和半定量安全性评价

本案例采用活性炭吸附治理工艺，工艺系统性定性和半定量安全性评价按照第 6 章所述内容，采用“HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”的组合评价模式。

“活性炭吸附法”VOCs 废气治理工艺管路和仪表流程图见图 A.1，将治理工艺划分为吸脱附系统及输送系统 2 个节点。重点分析在脱附工况下，因温度、流量及浓度偏差可能引发的火灾爆炸事故。选取“流量”、“温度”、“压力”、“混合气浓度”为主要工艺参数，与不同的引导词组合形成偏差。找出其中有意义的偏差，导致偏差发生的原因、后果及现有安全措施。根据公司台账参考附录 C 确定事故等级和发生频率，从而确定风险等级；根据风险等级的大小来决定是否进一步采取安全措施，并核实剩余风险。以吸附系统的部分评价过程为示例，废气组分中含有乙酸乙酯等易水解、易积热物质。鉴于活性炭对酯类物质具有潜在的催化氧化作用，极易导致床层热聚集。因此，后续 HAZOP 分析将“吸附床温度”作为分析重点。

首先按照 6.2 所述内容，进行 HAZOP 分析，部分分析结果见表 A.2。



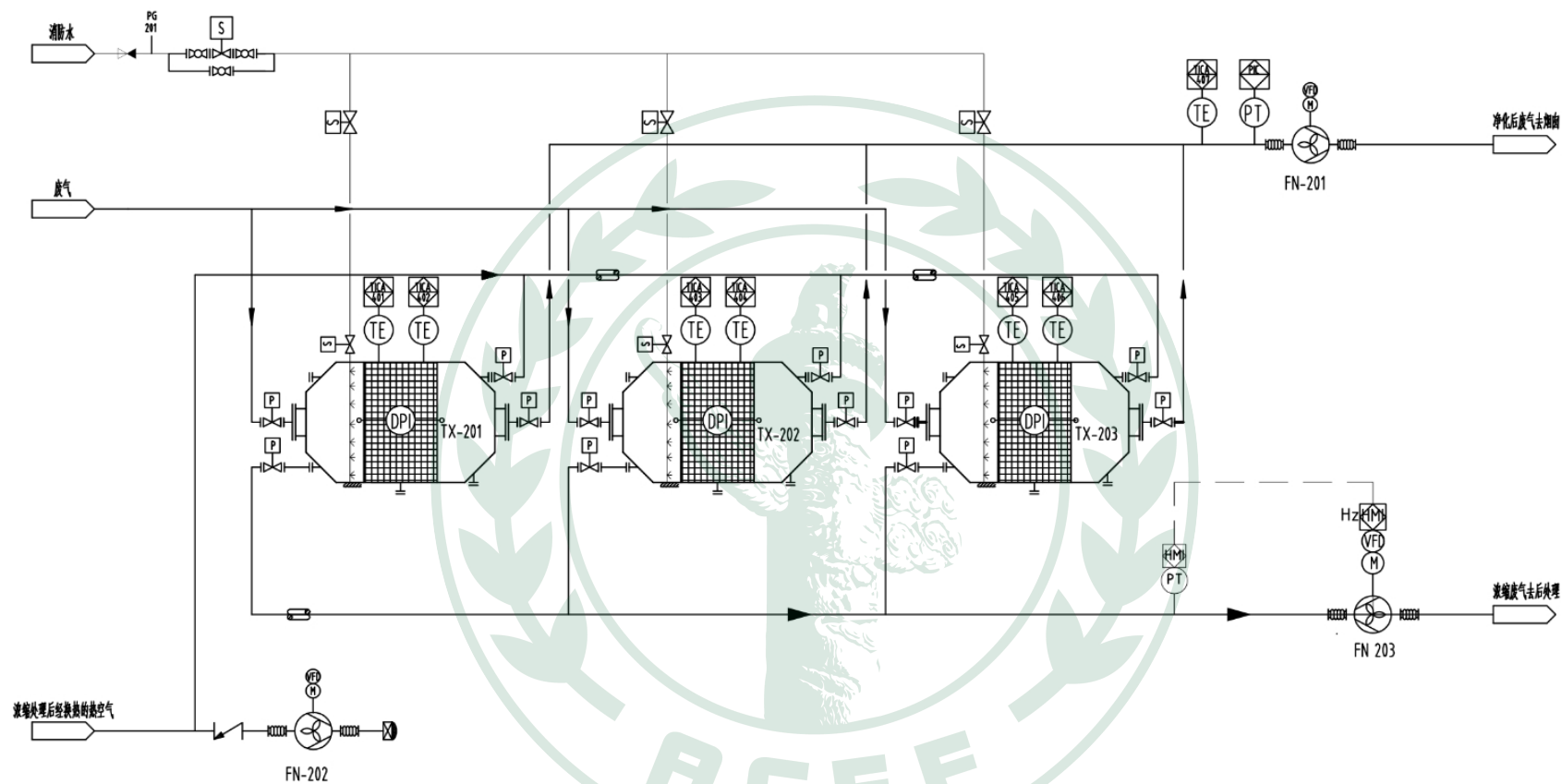


图 A.1 “活性炭吸附法” VOCs 废气治理工艺管路和仪表流程图

表 A.2 吸附工艺的 HAZOP 分析工作表示例

节点	序号	参数	引导词	偏离	原因	后果	事故等级	频率	已有安全措施
吸附系统	1.1	温度	高	温度过高	废气中有机物质在炭层内氧化积热	活性炭内部阴燃或自燃，引发火灾	S5	F4	吸附床设有多点温度监测（TICA 401-406）
	1.2				脱附气动阀内漏，高温气体窜入正在吸附的吸附床	局部活性炭温度异常升高，引发阴燃或火灾	S4	F2	热风阀选用耐高温气动阀
	1.3				前端预处理冷却设备故障	进气温度超过40℃，降低吸附效率并增加着火风险	S3	F3	喷淋泵设运行状态反馈
	1.4	压差	高	吸附床压力高	活性炭颗粒粉化或吸附杂质过多，导致床层堵塞	吸附阻力增大，风机负荷过载跳停，造成车间废气无法排出	S1	F3	吸附床进出口设压差变送器
	1.5				活性炭吸附床堵塞	设备内压力升高，甚至超压，导致设备破裂，VOCs逸散到空气中	S2	F1	吸附床设置压力监测，压力过大自动报警
	1.6				床层压力过低	活性炭吸附床进口阀故障或操作人员错误关闭	S2	F2	阀门设有故障警报
	1.7	浓度	高	混合气浓度过高	工况波动，废气浓度增加	活性炭吸附量超载，造成长时间高浓度冲击	S5	F2	入口设LEL在线监测
	1.8				预处理过滤系统出现问题或设备损坏	活性炭床被污染、堵塞，影响活性炭床效率，可能部分过热，造成火灾	S3	F1	过滤系统安装有压差计监测
脱附系统	2.1	温度	高	温度过高	浓缩后处理电加热器无法通过温控调节	脱附热风温度失控（远超120℃），引燃活性炭床层，并可能引发系统爆炸	S5	F3	PLC系统设温度高高报警
	2.2				温度传感器TE故障（示数偏低）	脱附热风温度失控（远超120℃），引燃活性炭床层，并可能引发系统爆炸	S5	F2	传感器具备自诊断功能
	2.3				混风阀故障或操作人员误关闭，无法混入冷风调节温度	热风温度无法通过混风调节，导致温度波动或超温	S3	F2	无
	2.4	风量	低	风量过低	脱附风机（FN-203）故障停机，但后处理加热器未及时停止	气流中断导致加热器内部热量积聚，烧毁加热棒甚至熔化管壁；高温气团进入炭层引发着火	S3	F3	风机运行信号反馈
	2.5	浓度	高	脱附气浓度过高	脱附初期升温速率过快，导致VOCs解吸速率激增	混合气浓度超过25%LEL，进入管道或后处理引发闪爆/爆炸	S5	F1	后处理入口管道设LEL在线监测

根据 HAZOP 结果，以及 6.3 所述内容，由风险矩阵求出各事故风险等级。部分风险分布情况见表 A.3。

表 A.3 吸附工艺风险分布情况表示例

事故等级频率（次/年）		1	2	3	4	5
1	$<10^{-4}$		1.5	1.8		2.5
2	$10^{-3} \sim 10^{-4}$		1.6	2.3	1.2	1.7, 2.2
3	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	1.4		1.3, 2.4		2.1
4	$10^{-1} \sim 10^{-2}$					1.1
5	$>10^{-1}$					

根据风险情况分布表，风险等级数大于 10 为较严重事故，需要进一步用 LOPA 分析。根据 6.4 所述内容，对 HAZOP 分析的严重事故添加保护层，添加保护层结果见表 A.4。

表 A.4 LOPA 分析工作表示例

序号	参数	引导词	偏离	原因	风险等级	已有安全措施	添加保护层措施	剩余风险等级
1.1	温度	高	温度过高	废气中有机物质在炭层内氧化积热	20	吸附床设有多点温度监测（TICA401-406）	增设消防灭火装置，并设置独立联锁逻辑	12
2.1	浓度	高	VOCs 浓度过高	活性炭吸附量超载，造成长时间高浓度冲击	10	入口设LEL在线监测	增加脱附出口浓度穿透监测	5
3.1	温度	高	温度过高	浓缩后处理电加热器无法通过温控调节	15	PLC系统设温度高高报警	增设一个不经过PLC的硬接线温度开关，超温时直接切断加热器主电源接触器	10
3.2			温度过高	温度传感器TE故障（示数偏低）	10	传感器具备自诊断功能	采用双热电偶冗余配置	5

按照 6.4 所述内容添加保护层后，剩余风险分布情况见表 A.5。

表 A.5 吸附工艺剩余风险分布情况表示例

事故等级频率（次/年）		1	2	3	4	5
1	$<10^{-4}$		1.5	1.8		1.7, 2.2, 2.5
2	$10^{-3} \sim 10^{-4}$		1.6	2.3	1.2	2.1
3	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	1.4		1.3, 2.4	1.1	
4	$10^{-1} \sim 10^{-2}$					
5	$>10^{-1}$					

本次 HAZOP 分析表明，活性炭吸附-脱附系统的核心安全风险主要集中在吸附床层热积聚、脱附升温失控以及混合气浓度超限三个方面。活性炭中灰分（金属氧化物）具有催化活性，VOCs 中的酯类可能在活性炭的作用下发生催化反应，造成局部过热，从而引发着火，甚至爆炸；过高的 VOCs 浓度会进一步加剧过热风险。由于反应不可控，且本示例排放的 VOCs 明确含有一定酯类物质，尽管现有设计已经配置了温度报警及消防灭火等措施，但事故风险等级仍然较高，需进一步进行定量分析，找到更有效的安全措施。

A.4 严重爆炸事故定量评价

A.4.1 故障树分析

按照第 7 章所述内容，以“活性炭床着火爆炸”作为顶事件，根据案例工程资料并结合“HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”分析结果，确定中间事件和基本事件，具体情况见表 A.6。

表 A.6 故障树事件汇总示例

符号	类型	事件
T	顶事件	活性炭床着火爆炸
M1	中间事件	活性炭床内VOCs浓度过高，达到爆炸下限
M2	中间事件	消防系统失效，出现火情无法及时扑灭
M3	中间事件	活性炭床内温度过高，以致能引燃有机气体
M4	中间事件	脱附进气温度过高
M5	中间事件	活性炭床局部过热
M6	中间事件	活性炭床堵塞导致热量蓄积
M7	中间事件	脱附补冷失效
X1	基本事件	PLC故障，活性炭床操作次序混乱
X2	基本事件	LEL%监测故障，浓度过高时无法发出警报
X3	基本事件	活性炭床温度监测装置失效，出现高温无法及时报警
X4	基本事件	高温警报发出后，员工应急响应不及时
X5	基本事件	PLC故障，出现火情无法启动消防系统
X6	基本事件	废气组分进入活性炭床后发生放热反应
X7	基本事件	未安装热气导流板
X8	基本事件	废气预处理故障，粉尘进入活性炭床
X9	基本事件	废气预处理压力监测装置故障，无法发出警报
X10	基本事件	浓缩废气后处理电加热器故障，功率过大
X11	基本事件	温度监测故障，温度过高时无法发出警报
X12	基本事件	脱附风机出现异常，导致风量过大
X13	基本事件	补冷风机故障，无法正常启动
X14	基本事件	混风阀故障，补冷气流无法正常进入管道
X15	基本事件	浓缩废气后处理换热器PLC故障，无法换热，过热气流直接进入活性炭床
X16	基本事件	浓缩废气后处理换热器本身发生故障，无法换热，高温气体直接进入活性炭床
S1	省略事件	生产车间VOCs浓度过高
S2	省略事件	VOCs成分发生变化，引入低闪点、低自燃点溶剂
S3	省略事件	CO ₂ 无法正常供应
E1、E2、E3、E4、E5		替代符，便于构建故障树，无实际含义

确定好所有事件后，厘清所有事件之间的逻辑关系，绘制出故障树结构图，如图 A.2 所示。

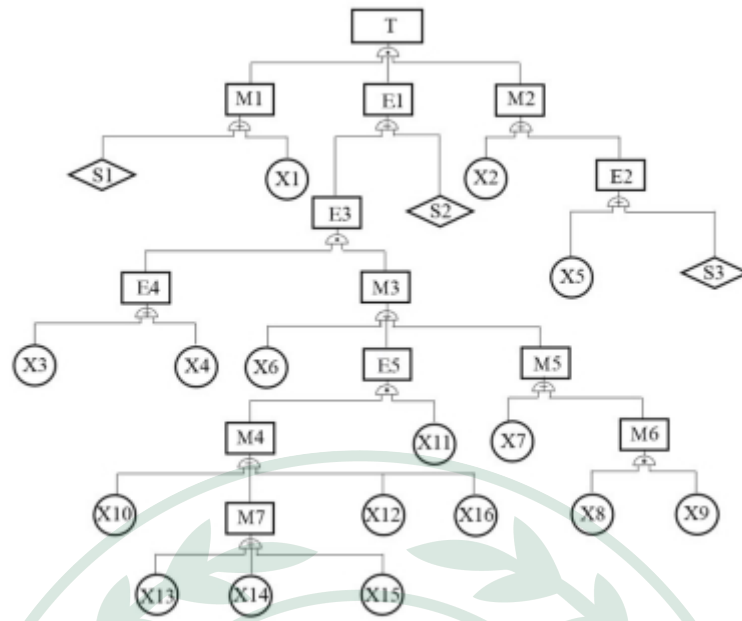


图 A.2 故障树结构图示例

对故障树进行定量分析，分别进行最小割集、结构重要度和临界重要度的计算，找出故障树中对顶事件影响较大的事件。

(1) 最小割集计算

根据故障树的逻辑结构，采用上行法求出活性炭床着火爆炸的最小割集：

$$M4 = X_{10} + M7 + X_{12} + X_{16} = X_{10} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}$$

$$M5 = X_7 + M6 = X_7 + X_8 \times X_9, E5 = M4 \times X_{11} = (X_{10} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}) \times X_{11}$$

$$M3 = X_6 + M5 + E5, E3 = (X_3 + X_4) \times M3, M2 = X_5 + S_3 + X_2, E1 = S_2 + E3, M1 = S_1 + X_1$$

$$T = M1 \times M2 \times E1$$

根据计算结果共得到 114 个最小割集：

$G = \{S_1 X_5 S_2\}, \{S_1 X_5 X_3 X_6\}, \{S_1 X_5 X_3 X_8 X_9\}, \{S_1 X_5 X_3 X_7\}, \{S_1 X_5 X_3 X_{10} X_{11}\}, \{S_1 X_5 X_3 X_{11} X_{13}\},$
 $\{S_1 X_5 X_3 X_{11} X_{14}\}, \{S_1 X_5 X_3 X_{11} X_{15}\}, \{S_1 X_5 X_3 X_{11} X_{12}\}, \{S_1 X_5 X_3 X_{11} X_{16}\}, \{S_1 X_5 X_4 X_6\},$
 $\{S_1 X_5 X_4 X_8 X_9\}, \{S_1 X_5 X_4 X_7\}, \{S_1 X_5 X_4 X_{10} X_{11}\}, \{S_1 X_5 X_4 X_{11} X_{13}\}, \{S_1 X_5 X_4 X_{11} X_{14}\},$
 $\{S_1 X_5 X_4 X_{11} X_{15}\}, \{S_1 X_5 X_4 X_{11} X_{12}\}, \{S_1 X_5 X_4 X_{11} X_{16}\}, \{S_1 S_3 S_2\}, \{S_1 S_3 X_3 X_6\}, \{S_1 S_3 X_3 X_8 X_9\},$
 $\{S_1 S_3 X_3 X_7\}, \{S_1 S_3 X_3 X_{10} X_{11}\}, \{S_1 S_3 X_3 X_{11} X_{13}\}, \{S_1 S_3 X_3 X_{11} X_{14}\}, \{S_1 S_3 X_3 X_{11} X_{15}\},$
 $\{S_1 S_3 X_3 X_{11} X_{12}\}, \{S_1 S_3 X_3 X_{11} X_{16}\}, \{S_1 S_3 X_4 X_6\}, \{S_1 S_3 X_4 X_8 X_9\}, \{S_1 S_3 X_4 X_7\}, \{S_1 S_3 X_4 X_{10} X_{11}\},$
 $\{S_1 S_3 X_4 X_{11} X_{13}\}, \{S_1 S_3 X_4 X_{11} X_{14}\}, \{S_1 S_3 X_4 X_{11} X_{15}\}, \{S_1 S_3 X_4 X_{11} X_{12}\}, \{S_1 S_3 X_4 X_{11} X_{16}\},$
 $\{S_1 X_2 S_2\}, \{S_1 X_2 X_3 X_6\}, \{S_1 X_2 X_3 X_8 X_9\}, \{S_1 X_2 X_3 X_7\}, \{S_1 X_2 X_3 X_{10} X_{11}\}, \{S_1 X_2 X_3 X_{11} X_{13}\},$
 $\{S_1 X_2 X_3 X_{11} X_{14}\}, \{S_1 X_2 X_3 X_{11} X_{15}\}, \{S_1 X_2 X_3 X_{11} X_{12}\}, \{S_1 X_2 X_3 X_{11} X_{16}\}, \{S_1 X_2 X_4 X_6\},$
 $\{S_1 X_2 X_4 X_8 X_9\}, \{S_1 X_2 X_4 X_7\}, \{S_1 X_2 X_4 X_{10} X_{11}\}, \{S_1 X_2 X_4 X_{11} X_{13}\}, \{S_1 X_2 X_4 X_{11} X_{14}\},$
 $\{S_1 X_2 X_4 X_{11} X_{15}\}, \{S_1 X_2 X_4 X_{11} X_{12}\}, \{S_1 X_2 X_4 X_{11} X_{16}\}, \{X_1 X_5 S_2\}, \{X_1 X_5 X_3 X_6\}, \{X_1 X_5 X_3 X_8 X_9\},$
 $\{X_1 X_5 X_3 X_7\}, \{X_1 X_5 X_3 X_{10} X_{11}\}, \{X_1 X_5 X_3 X_{11} X_{13}\}, \{X_1 X_5 X_3 X_{11} X_{14}\}, \{X_1 X_5 X_3 X_{11} X_{15}\},$
 $\{X_1 X_5 X_3 X_{11} X_{12}\}, \{X_1 X_5 X_3 X_{11} X_{16}\}, \{X_1 X_5 X_4 X_6\}, \{X_1 X_5 X_4 X_8 X_9\}, \{X_1 X_5 X_4 X_7\},$
 $\{X_1 X_5 X_4 X_{10} X_{11}\}, \{X_1 X_5 X_4 X_{11} X_{13}\}, \{X_1 X_5 X_4 X_{11} X_{14}\}, \{X_1 X_5 X_4 X_{11} X_{15}\}, \{X_1 X_5 X_4 X_{11} X_{12}\},$
 $\{X_1 X_5 X_4 X_{11} X_{16}\}, \{X_1 S_3 S_2\}, \{X_1 S_3 X_3 X_6\}, \{X_1 S_3 X_3 X_8 X_9\}, \{X_1 S_3 X_3 X_7\}, \{X_1 S_3 X_3 X_{10} X_{11}\},$

{X1S3X3X11X13}、{X1S3X3X11X14}、{X1S3X3X11X15}、{X1S3X3X11X12}、{X1S3X3X11X16}、
{X1S3X4X6}、{X1S3X4X8X9}、{X1S3X4X7}、{X1S3X4X10X11}、{X1S3X4X11X13}、{X1S3X4X11X14}、
{X1S3X4X11X15}、{X1S3X4X11X12}、{X1S3X4X11X16}、{X1X2S2}、{X1X2X3X6}、{X1X2X3X8X9}、
{X1X2X3X7}、{X1X2X3X10X11}、{X1X2X3X11X13}、{X1X2X3X11X14}、{X1X2X3X11X15}、
{X1X2X3X11X12}、{X1X2X3X11X16}、{X1X2X4X6}、{X1X2X4X8X9}、{X1X2X4X7}、
{X1X2X4X10X11}、{X1X2X4X11X13}、{X1X2X4X11X14}、{X1X2X4X11X15}、{X1X2X4X11X12}、
{X1X2X4X11X16}。

(2) 结构重要度计算

根据公司台账并参考附录 C 得到各事件发生概率，具体如表 A.7 中所示：

表 A.7 各事件发生概率示例

事件	事件发生概率 q_i
X1	8.9×10^{-4}
X2	4.3×10^{-3}
X3	4.3×10^{-4}
X4	7.2×10^{-1}
X5	7.7×10^{-3}
X6	9.2×10^{-1}
X7	4.9×10^{-1}
X8	3.1×10^{-3}
X9	4.2×10^{-4}
X10	7.3×10^{-3}
X11	4.7×10^{-4}
X12	6.2×10^{-3}
X13	6.5×10^{-3}
X14	2.5×10^{-3}
X15	1.7×10^{-4}
X16	4.7×10^{-3}
S1	8.3×10^{-2}
S2	1.6×10^{-1}
S3	9.4×10^{-3}

计算基本事件和省略事件的结构重要度，结果如表 A.8 所示。

表 A.8 各事件结构重要度示例

事件	结构重要度	事件	结构重要度
X1	1.193×10^{-1}	X11	1.263×10^{-1}
X2	7.250×10^{-2}	X12	2.110×10^{-2}
X3	1.000×10^{-1}	X13	2.110×10^{-2}
X4	1.000×10^{-1}	X14	2.110×10^{-2}
X5	7.250×10^{-2}	X15	2.110×10^{-2}
X6	2.630×10^{-2}	X16	2.110×10^{-2}
X7	2.630×10^{-2}	S1	1.088×10^{-1}
X8	2.110×10^{-2}	S2	1.750×10^{-2}
X9	2.110×10^{-2}	S3	7.250×10^{-2}
X10	2.110×10^{-2}		

根据表中计算结果，排序比较靠前的事件 X11、X1、S1、X4、X3、X5 等的发生概率对顶事件的发生影响较大。

(3) 临界重要度计算

临界重要度是用事件的相对变化率衡量其重要度，计算各事件的临界重要度，得到结果如表 A.9 所示。

表 A.9 各事件临界重要度计算结果示例

事件	临界重要度	事件	临界重要度
X1	6.592×10^{-2}	X11	5.802×10^{-3}
X2	3.008×10^{-1}	X12	7.653×10^{-2}
X3	2.742×10^{-2}	X13	8.024×10^{-2}
X4	4.222×10^1	X14	3.086×10^{-2}
X5	4.515×10^{-1}	X15	2.099×10^{-3}
X6	3.912×10^1	X16	5.802×10^{-2}
X7	2.083×10^1	S1	1.025×10^0
X8	1.318×10^{-1}	S2	1.975×10^0
X9	6.481×10^{-2}	S3	9.670×10^{-2}
X10	1.126×10^{-1}		

根据表中计算结果，排序比较靠前的事件 X4、X6、X7、S2、S1 等事件的发生概率变化率对顶事件的发生影响较大。计算求得此时顶事件的发生概率为： $g=1.7 \times 10^{-4}$ ，发生频率等级为 F2，剩余风险等级为 10。

根据故障树分析结果，PLC 控制及报警联锁系统的稳定性、员工的响应速度、车间排放 VOCs 的浓度和成分、吸附放热反应、及脱附管路的温度监测装置对活性炭床发生着火爆炸安全事故的发生影响较大。改进措施如表 A.10 所示。

表 A.10 故障树分析改进措施示例

符号	改前 q_i	改进措施	改后 q_i^*
X4	7.2×10^{-1}	重视运维人员安全培训，编制应急预案，开展应急演练，增强员工对突发事件的处理能力	7.2×10^{-2}
X5	7.7×10^{-3}	PLC控制系统增设不间断电源（UPS），防止突然断电，并加强日常维护	7.7×10^{-4}
X7	4.9×10^{-1}	安装热气导流板	4.9×10^{-3}
X11	4.7×10^{-4}	在脱附进气管路增设温度监测装置，一用一备，保证当脱附进气温度过高能及时响应	4.7×10^{-5}
S1	8.3×10^{-2}	在吸附进气段增设LEL在线监测仪，一用一备	8.3×10^{-3}
S2	1.6×10^{-1}	建立原辅料变更安全风险评估机制	1.6×10^{-2}

改进措施实施后关键事件的发生概率 q_i^* 带入公式计算求得顶事件的事故发生概率为： $g=7.5 \times 10^{-6}$ ，频率等级为 1，剩余风险等级为 5，达到可接受范围内，改进措施有效。

A.4.2 冲击波超压计算

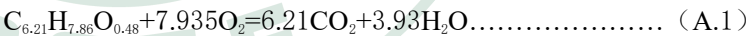
(1) 爆炸压力与设备强度核算

确定 VOCs 气体的等效分子式、标准摩尔生成焓，VOCs 组分分析如表 A.11 所示。

表 A.11 VOCs 组分分析示例

物质	摩尔分率 (%)	分子式	标准摩尔生成焓 $\Delta_f H_m^\theta$ (g,298 K) (kJ/mol)
苯	7.22	C_6H_6	82.93
甲苯	68.79	C_7H_8	50.00
乙酸乙酯	23.99	$C_4H_8O_2$	-443.42

通过加权计算得到混合有机废气的等效分子式为： $C_{6.21}H_{7.86}O_{0.48}$ ，标准摩尔生成焓为-65.98 kJ/mol，摩尔质量为 90.19 g/mol。假设爆炸反应为定容绝热过程，产生的最大压力记为 p_m ，则爆炸的反应方程式为：



已知 $\Delta_f H_m^\theta(CO_2, g, 298K) = -393.51 \text{ kJ/mol}$,

$\Delta_f H_m^\theta(H_2O, g, 298K) = -241.821 \text{ kJ/mol}$,

$\Delta_f H_m^\theta(O_2, g, 298K) = 0$;

$$\begin{aligned} \text{则 } \Delta H_1 &= 6.21\Delta_f H_m^\theta(CO_2, g, 298K) + 3.93\Delta_f H_m^\theta(H_2O, g, 298K) \\ &\quad - \Delta_f H_m^\theta(C_{6.21}H_{7.86}O_{0.48}, g, 298K) - 7.935\Delta_f H_m^\theta(O_2, g, 298K) = -3328.07 \text{ kJ/mol} \dots\dots (A.2) \end{aligned}$$

$$\Delta n = \frac{\nu}{4} + \frac{z}{2} - 1 = 7.86 \div 4 + 0.48 \div 2 - 1 = 1.205 \dots\dots\dots (A.3)$$

$$\Delta U_1 = \Delta H_1 - \Delta nRT_0 = -3331.06 \text{ kJ/mol} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\Delta U_2 = \sum n_i \bar{C}_{v,m} (T_m - T_0) = (6.21\bar{C}_{v,m}(CO_2) + 3.93\bar{C}_{v,m}(H_2O) + 29.836\bar{C}_{v,m}(N_2))(T_m - 298) \dots\dots\dots (A.5)$$

由于定容绝热过程， $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$ ，查阅不同温度区间内平均恒容热容代入公式试差，最终求得 $T_m = 2987 \text{ K}$ 。

$$p_m = \frac{p_0 T_m n}{T_0 n} = \frac{0.1013 \times 2987 \times 10.14}{298 \times 8.935} = 1.046 \text{ MPa} \dots\dots\dots (A.6)$$

(2) 活性炭床抗压判断

活性炭床采用的材料为优质低硅碳钢 Q235A (Si<0.04 %)，屈服强度可达 245 MPa，厚度为 5 mm，边长为 2 m。计算活性炭床的抗压强度：

$$p_c = \frac{2\delta[\delta]\phi}{D_i} = \frac{2 \times 5 \times 245 \times 0.8}{2000} = 0.98 \text{ MPa} \dots\dots\dots (A.7)$$

当活性炭床内发生爆炸时，爆炸产生的高压远高于活性炭床的抗压强度，爆炸将导致活性炭床破裂，释放出高压气体对周围的人员、设备和建筑造成破坏。

(3) 伤害半径计算

活性炭床吸附量越大，爆炸破坏力就越强。单个活性炭床的饱和吸附量为 180 kg，计算不同吸附量下爆炸的伤害半径，结果如表 A.12 所示。

表 A.12 不同吸附量下爆炸的伤害半径

吸附量 (kg)	等效TNT当量 (kg)	死亡半径 R_1 (m)	重伤半径 R_2 (m)	中伤半径 R_3 (m)	轻伤半径 R_4 (m)
20	6.54	2.11	6.72	9.05	11.67
50	16.34	2.97	9.13	12.28	15.84
100	32.68	3.84	11.5	15.47	19.96
150	49.03	4.46	13.16	17.71	22.85
180	58.83	4.77	13.99	18.82	24.28

以吸附量 180 kg 为例，其伤害半径的详细计算过程如下：

首先将其换算成 TNT 当量：

$$W_{TNT} = \frac{\alpha W_f Q_f}{Q_{TNT}} = \frac{0.04 \times 180 \times 3028.07 \times 1000}{90.19 \times 4520} = 58.83 \text{ kg} \dots\dots\dots (\text{A.8})$$

因此，死亡半径为：

$$R_1 = 13.6 \left(\frac{W_{TNT}}{1000} \right)^{0.37} = 13.6 \times \left(\frac{58.83}{1000} \right)^{0.37} = 4.77 \text{ m} \dots\dots\dots (\text{A.9})$$

重伤半径计算过程为：

$$E = W_{TNT} Q_{TNT} = 58.83 \times 4.52 = 265.9116 \dots\dots\dots (\text{A.10})$$

$$\Delta p = \frac{0.05}{p_0} = \frac{0.05}{0.101} = 0.495 \dots\dots\dots (\text{A.11})$$

$$\text{由 } \Delta p = \frac{0.137}{S^3} + \frac{0.119}{S^2} + \frac{0.267}{S} - 0.019 \dots\dots\dots (\text{A.12})$$

求得 $S=1.01$ 。

$$\text{由 } S = R_2 \left(\frac{p_0}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (\text{A.13})$$

求得 $R_2=13.99 \text{ m}$ 。同理可求得中伤半径 $R_3=18.82 \text{ m}$ ，轻伤半径 $R_4=24.28 \text{ m}$ 。

当 VOCs 气体发生爆炸时，活性炭床设备将会遭到破坏并释放出高压气体。活性炭床吸附饱和时，爆炸造成的死亡半径、重伤半径、中伤半径和轻伤半径分别达到了 4.77 m、13.99 m、18.82 m 和 24.28 m，破坏力巨大，因此，应当加强安全培训和安全管理，要求现场工作人员必须佩戴安全防护用品。

附录 B

(资料性)

挥发性有机物废气治理工程安全评价示例——蓄热燃烧法

附录 B 包含的示例旨在举例说明本规范中描述的 VOCs 废气治理工程设计本质安全评价方法在蓄热燃烧法 VOCs 废气治理工程设计中的应用。注意，为达到举例说明的目的，各个示例已被大幅度简化。在任何情况下这些示例都不具备实践案例分析的复杂性。还应注意，此处仅提供部分过程和输出结果的示例。

B.1 示例介绍

本示例选取某煤化工企业高浓度尾气治理工程。该废气组分复杂，主要成分包括甲烷、乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、甲醇等多种物质，排放总风量为 $100000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，废气源头平均排放浓度为 $15 \text{ g}/\text{m}^3$ ，属于典型的高浓度废气。鉴于其浓度已超过常规 RTO 的直接进气安全限值，治理方案制定了空气预混稀释+蓄热燃烧（RTO）的组合工艺。

现使用本规范对该 VOCs 废气治理工艺方案进行评价。

B.2 工程整体性定性评价

按照第 5 章所述内容，工程整体性定性评价采用安全检查表，参照参考文献所列标准和规范，评价工作组对治理工程整体安全性做出定性评价，编制部分安全检查表如表 B.1 所示。

表 B.1 工程设计安全检查表示例

序号	检查项目及内容（安全方面）	检查依据	结果	备注
1	法律法规与政策符合性			
1.1	工艺是否属于国家《淘汰落后安全技术工艺设备目录》		不属于	
2	平面布置			
2.1	设备应满足适宜的地形坡度，宜避开自然地形复杂、自然坡度大的地段，应避免将盆地、积水洼地作为厂址	GB 5018—2012《工业企业总平面设计规范》，第3.0.10条	符合	工厂园区地形平坦，园区内地质、水文条件良好
2.2	蓄热燃烧装置应远离易燃易爆危险区域，安全距离应符合国家或相关行业标准规定	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第5.3.4条	符合	
3	自然环境			
3.1	环境温度较低或废气湿度较大时宜采取保温、伴热等防凝结措施	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.3.6.5条	符合	
4	工艺设计			
4.1	当废气产生点较多、彼此距离较远时，在满足风管相关设计规范、风压平衡的基础上，应适当分设多套收集系统中继风机	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.3.1.3条	符合	
4.2	蓄热室和燃烧室内部应装设具有自动报警功能的多点温度、压力检测装置	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第8.2.4条	符合	
4.3	针对高浓度废气（>25 %LEL），进气前必须设置在线稀释配风系统，稀释风机应与RTO主机联锁，风机故障时自动切断进气	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.5.1条	符合	
4.4	燃烧室的结构和尺寸应根据燃烧温度、停留时间以及待处理废气通过燃烧室的有效体积流量等因素计算确定，其温度/浓度场可利用流体力学模型进行模拟计算	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.3.3.1条	符合	
4.5	蓄热燃烧装置应具备短路保护和接地保护功能，接地电阻应小于4 Ω	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第6.5.12条	符合	
4.6	蓄热式焚烧炉系统应设置断电断气（仪表风）后，应急旁通切换阀打开，废气切断阀关闭，炉体进出口切换阀关闭	DB 32/T 4700—2024《蓄热式焚烧炉系统安全技术要求》，第4.3.4.7条	符合	
5	治理设施运行与维护制度			
5.1	企业应制定治理设施维护计划，维护人员应根据计划定期检查、维护和更换必要的设备	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第12.3条	符合	
6	操作人员管理制度			
6.1	有管理和运行人员的培训、考核制度。	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第12.2.2条	符合	
6.2	应建立治理设施运行状况、设施维护等的记录制度	HJ 1093—2020《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》，第12.2.3条	不符合	记录台账模板内容有缺漏

通过对该工程建设运行等方面整体安全的安全检查表评价，可以看出该工程的整体安全性较高，但在人员与运行管理方面存在监督管理不完善等情况，应根据检查表中的相关标准和规范对设计进行改，按照《蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范》（HJ 1093—2020）第 12.2.3 条的规定，应建立治理设施运行状况、设施维护等的记录制度，主要记录内容包括：a) 设备的启动、停止时间；b) 过滤材料、蓄热体等质量分析数据、采购量、使用量及更换时间；c) 运行工艺控制参数，至少包括治理装置进、出口气体浓度及相关温度、压力等；d) 主要设备维修情况；e) 运行事故及处理、整改情况；f) 定期检验、评价及评估情况；g) 二次污染处理处置情况。案例中该厂对蓄热体质量分析数据、采购量、使用量及更换时间的台账模板不完整，缺少二次污染处理处置情况，应在运行管理制度和台账模板中补充完善。

B.3 工艺系统性定性和半定量评价

本案例采用蓄热燃烧（RTO）治理工艺，工艺系统性定性和半定量评价按照第 6 章所述内容，采用“HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”的组合评价模式，蓄热燃烧治理工艺管路和仪表流程图（P&ID 图）如图 B.1 所示。按照第 6 章所述内容，将治理工艺划分为集气与预处理环节、蓄热燃烧装置（RTO）、公用工程辅助系统 3 个节点。选取“温度”、“压力”、“混合气浓度”、“阀门”、“静电”等主要工艺参数与不同的引导词组合后形成偏差。找出其中有意义的偏差，及导致偏差发生的原因、后果及现有安全措施。根据公司台账参考附录 C 确定事故等级和发生频率，从而确定风险等级；根据风险等级的大小来决定是否进一步采取安全措施，并核实剩余风险。

以蓄热燃烧装置（RTO）的部分评价过程为示例，源头废气浓度高达 15 g/m^3 ，已逼近或超过部分组分的爆炸下限。评价工作组首先核查了“稀释系统”的设计可靠性，确保其能将混合气体浓度稳定控制，防止高浓废气直接冲击炉膛引发爆炸。

首先按照 6.2 所述内容，进行 HAZOP 分析，部分分析结果见表 B.2。

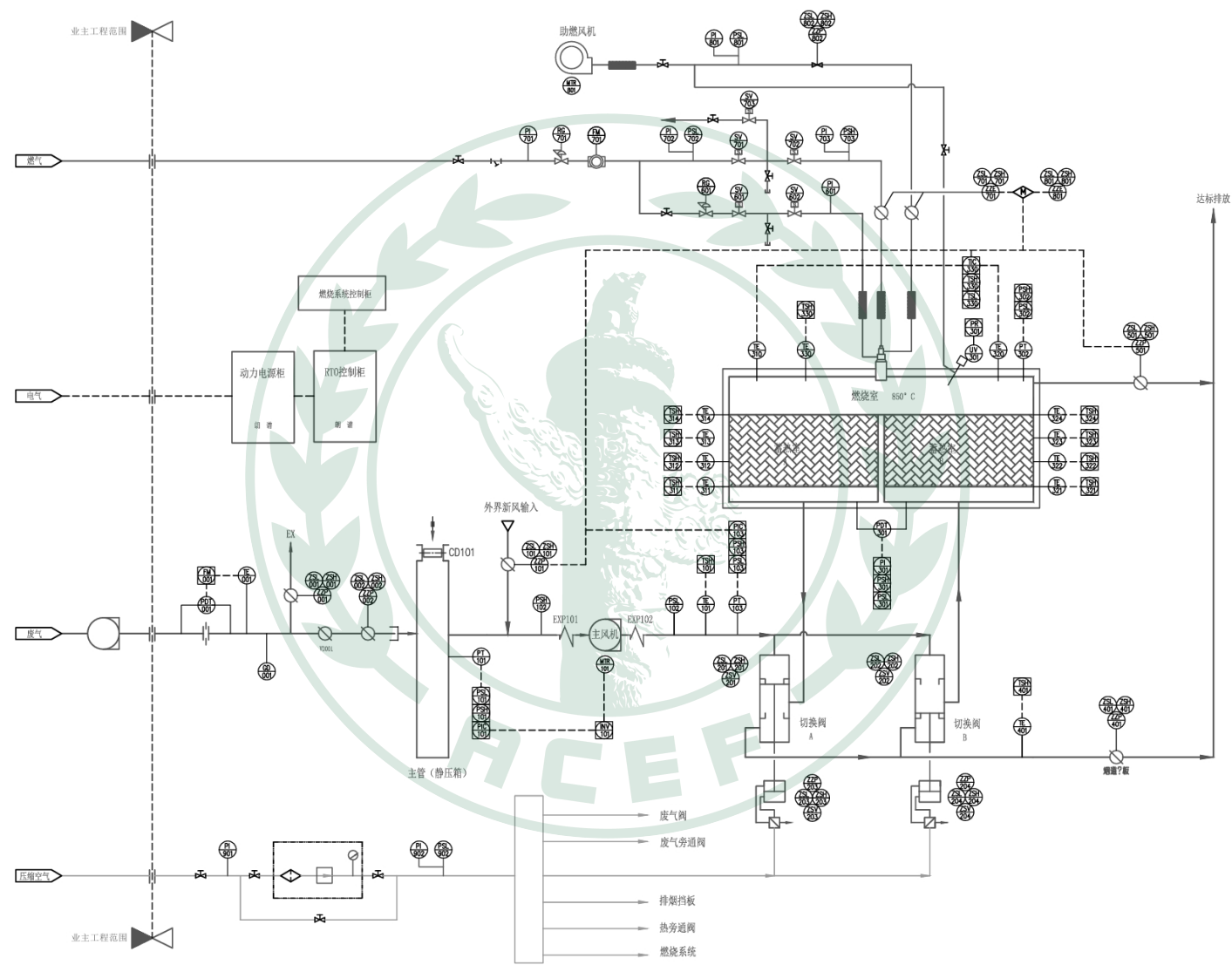


图 B.1 “蓄热燃烧法” VOCs 废气治理工艺管路和仪表流程图

表 B.2 RTO 工艺的 HAZOP 分析工作表示例

节点	序号	参数	引导词	偏离	原因	后果	事故等级	频率	已有安全措施
进气系统	1.1	浓度	高	VOCs	上游瞬时排放,造成高浓度废气冲击	进气浓度瞬间超过25 % LEL, 导致RTO炉膛发生剧烈爆燃或爆炸	5	4	进气总管设LEL在线监测仪
	1.2			混合气浓度过高	稀释风机故障停机或电动配风阀卡死在关闭位置	15 g/m ³ 的高浓源头废气未经稀释直接进炉,引发超温及爆炸	5	3	稀释风机运行监控
	1.3			高	废气预处理不彻底,夹带液滴(如甲苯冷凝液)进入管道	液滴在蓄热体表面受热气化,体积膨胀引发局部闪爆,破坏陶瓷体	4	2	预处理设置除雾器
	1.4	静电	积聚	静电积聚	输送风机叶轮材质选择不当,与高浓废气摩擦产生火花	在风机壳体内引燃高浓度有机废气,发生风机爆炸	4	1	风机外壳接地
蓄热燃烧装置	2.1	温度	高	温度过高	进气浓度过高, VOCs在蓄热体底部提前氧化放热	蓄热陶瓷体超过耐热极限发生熔融塌陷,导致RTO报废	4	4	炉膛多点温度监测(TE-314~324)
	2.2			高	燃烧器燃料调节阀故障或人员误操作,全开或卡死	炉温急剧升高,可能烧穿炉体保温层	3	2	炉温高联锁切断燃料阀
	2.3	压力	高	压力过高	RTO引风机故障停机,但前端送风机仍在运行	炉膛压力瞬间变为正压,高温烟气回火至进气管道,引爆上游车间	5	1	炉膛压力监测
	2.4			高	切换阀故障,排气阀未能及时打开	废气憋在炉内,压力急剧升高,可能冲破泄爆装置	2	3	无
	2.5	阀门	故障	阀门故障	切换阀密封垫磨损或阀板变形,导致内漏	未处理的高浓废气直接短路至烟囱排放	1	4	定期检修
公用工程	3.1	压力	低	总管压力偏低	空压机故障或仪表风管路泄漏,导致总管压力偏低	所有气动切换阀、切断阀推力不足, RTO系统瘫痪,阀门位置不可控	4	2	仪表风管路低压报警
	3.2			天然气管网压力偏低	天然气管网调压阀故障	燃烧器熄火若未吹扫,燃气积聚,再次点火时发生炸炉	5	2	燃料系统低压联锁

根据 HAZOP 结果,以及 6.3 所述内容,由风险矩阵求出各事故风险等级。部分风险分布情况见表 B.3。

表 B.3 RTO 工艺风险分布情况表示例

事故等级频率（次/年）		1	2	3	4	5
1	$<10^{-4}$				1.4	2.3
2	$10^{-3}\sim 10^{-4}$			2.2	1.3,3.1	3.2
3	$10^{-2}\sim 10^{-3}$		2.4			1.2
4	$10^{-1}\sim 10^{-2}$	2.5			2.1	1.1
5	$>10^{-1}$					

根据风险情况分布表，风险等级数大于 10 为较严重事故，需要进一步用 LOPA 分析。根据 6.4 所述内容，对 HAZOP 分析的严重事故添加保护层，添加保护层结果见表 B.4。

表 B.4 LOPA 分析工作表示例

序号	参数	引导词	偏离	原因	风险等级	已有安全措施	添加保护层措施	剩余风险等级
1.1	浓度	高	VOCs混合气浓度过高	上游瞬时排放，造成高浓度废气冲击	20	进气总管设LEL在线监测仪	建立LEL高高联锁保护，当浓度>25 %LEL时切断进气阀并打开旁路阀	10
1.2		高	VOCs混合气浓度过高	高浓废气未经稀释直接进炉，引发超温及爆炸	15	稀释风机运行监控	将稀释风机运行信号与主进气阀建立联锁	5
2.1	温度	高	温度过高	进气浓度过高，VOCs在蓄热体底部提前氧化放热	16	炉膛多点温度监测（TE-314~324）	底层蓄热体改用耐高温、抗热震性能更好的材质	8
3.1	压力	低	天然气压力偏低	天然气管网调压阀故障	10	燃料管线设低压联锁	熄火后必须强制进行4倍炉膛体积吹扫	5

按照 6.4 所述内容添加保护层后，剩余风险分布情况见表 B.5。

表 B.5 RTO 工艺剩余风险分布情况表示例

事故等级频率（次/年）		1	2	3	4	5
1	$<10^{-4}$				1.4	1.2,2.3,3.2
2	$10^{-3}\sim 10^{-4}$			2.2	1.3,2.1,3.1	1.1
3	$10^{-2}\sim 10^{-3}$		2.4			
4	$10^{-1}\sim 10^{-2}$	2.5				
5	$>10^{-1}$					

本次针对三室 RTO 工艺的 HAZOP 分析表明，系统的核心安全风险主要集中在有机废气浓度超限、装置超温回火及公用工程失效三个方面。对于进入 RTO 装置含有混合有机物的废气，大多数为易燃易爆气体，要求通过新风稀释控制其浓度 P 应低于最易爆组分或混合气体爆炸极限下限最低值的 25 %，即 $P<\min(P_e, P_m)\times 25\%$ ， P_e 为最易爆组分爆炸极限下限（%）， P_m 为混合气体爆炸极限下限。VOCs 浓度发生波动对 RTO 装置蓄热室及燃烧室影响较大，极易造成回火或爆炸，因此，除了在 RTO 入口管路设置 VOCs 浓度分析监测及在线联锁报警等装置、安装阻火器外，提出将稀释风机与主进气阀建立联

锁监测以进一步降低事故发生频率。但由于一旦发生火灾及爆炸，会造成伤亡严重、经济损失巨大，还需要进一步进行定量分析。

B.4 严重爆炸事故定量评价

B.4.1 故障树分析

按照第 7 章所述内容，以“高浓废气冲击，温度失控，RTO 装置发生爆炸”作为顶事件，根据案例工程资料并结合“HAZOP 分析-风险矩阵分析-LOPA 分析”分析结果，确定中间事件和基本事件，具体情况见表 B.6。

表 B.6 故障树事件汇总示例

符号	类型	事件
T	顶事件	高浓废气冲击，温度失控，RTO装置发生爆炸
M1	中间事件	燃烧室温度过高，以致能引燃有机气体
M2	中间事件	高温应急处置失败，发生火灾爆炸
M3	中间事件	高温状态未及时消除
M4	中间事件	燃料流量过大，燃烧放出大量热
M5	中间事件	RTO入口可燃组分浓度达到爆炸范围
X1	基本事件	燃料调节阀故障，导致燃料流量过大
X2	基本事件	监测控制功能故障，无法调节燃料流量
X3	基本事件	浓度联锁控制失效
X4	基本事件	上游车间生产异常，废气中VOCs浓度过高
X5	基本事件	补风阀门故障，无法稀释废气
X6	基本事件	助燃风机故障，燃料（天然气）进入后增加了VOCs浓度
X7	基本事件	高温旁通阀故障，燃烧室高温却无法移热
X8	基本事件	人员响应不及时
X9	基本事件	消防系统报警等功能故障
S1	省略事件	因某些原因造成无人值守，未及时发现火情
E1、E2		替代符，便于构建故障树，无实际含义

确定所有事件后，厘清所有事件之间的逻辑关系，绘制出故障树结构图，如图 B.2 所示。

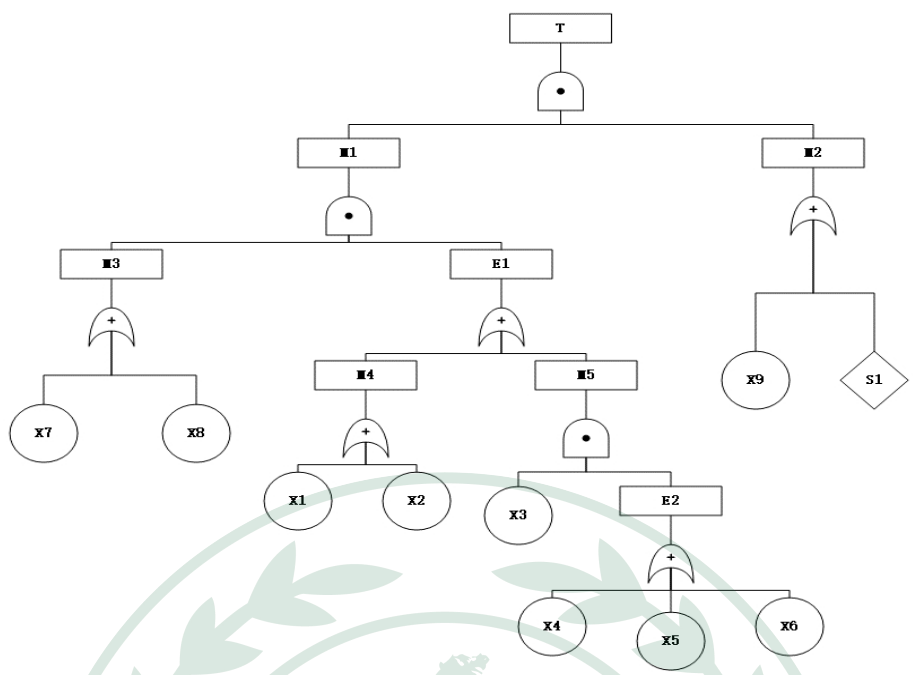


图 B.2 故障树结构图示例

对故障树进行定量分析，分别进行最小割集、结构重要度和临界重要度的计算，找出故障树中对顶事件影响较大的事件。

(1) 最小割集计算

根据故障树的逻辑结构，采用上行法求出 RTO 装置因温度失控而引起的火灾爆炸的最小割集：

$M5=X3 \times (X4+X5+X6)$ ； $M4=X1+X2$ ； $E1=M4+M5$ ； $M3=X7+X8$ ；

$M1=M3 \times E1$ ； $M2=X9+S1$ ； $T=M1 \times M2$

根据计算结果共得到 20 个最小割集：

$G=\{S1X2X7\}$ 、 $\{S1X1X7\}$ 、 $\{S1X2X8\}$ 、 $\{S1X1X8\}$ 、 $\{S1X6X3X7\}$ 、 $\{S1X4X3X7\}$ 、 $\{S1X5X3X7\}$ 、 $\{S1X6X3X8\}$ 、 $\{S1X4X3X8\}$ 、 $\{S1X5X3X8\}$ 、 $\{X9X2X7\}$ 、 $\{X9X1X7\}$ 、 $\{X9X2X8\}$ 、 $\{X9X1X8\}$ 、 $\{X9X6X3X7\}$ 、 $\{X9X4X3X7\}$ 、 $\{X9X5X3X7\}$ 、 $\{X9X6X3X8\}$ 、 $\{X9X4X3X8\}$ 、 $\{X9X5X3X8\}$ 。

(2) 结构重要度计算

根据公司台账并参考附录 C 得到各事件发生概率，具体如表 B.7 中所示：

表 B.7 各事件发生概率示例

事件	事件发生概率 q_i
X1	2.5×10^{-3}
X2	4.3×10^{-3}
X3	8.9×10^{-4}
X4	3.0×10^{-3}
X5	1.6×10^{-3}
X6	6.6×10^{-3}
X7	3.9×10^{-3}
X8	7.2×10^{-1}
X9	7.5×10^{-3}
S1	2.0×10^{-2}

计算基本事件和省略事件的结构重要度，结果如表 B.8 所示。

表 B.8 各事件结构重要度示例

事件	结构重要度	事件	结构重要度
X1	1.582×10^{-1}	X6	1.760×10^{-2}
X2	1.582×10^{-1}	X7	3.223×10^{-1}
X3	1.230×10^{-1}	X8	3.223×10^{-1}
X4	1.760×10^{-2}	X9	3.223×10^{-1}
X5	1.760×10^{-2}	S1	3.223×10^{-1}

根据表中计算结果，排序比较靠前的事件 X7、X8、S1、X9 等的发生概率对顶事件的发生有着较大的影响。

(3) 临界重要度计算

临界重要度是用事件的相对变化率衡量其重要度，计算各事件的临界重要度，得到结果如表 B.9 所示。

表 B.9 各事件临界重要度计算结果示例

事件	临界重要度	事件	临界重要度
X1	3.661×10^{-1}	X6	8.540×10^{-4}
X2	6.308×10^{-1}	X7	1.514×10^{-3}
X3	1.451×10^{-3}	X8	9.946×10^{-1}
X4	3.860×10^{-4}	X9	2.687×10^{-1}
X5	2.060×10^{-4}	S1	7.258×10^{-1}

根据表中计算结果，排序比较靠前的事件 X8、S1、X2、X1 等事件的发生概率变化率对顶事件的发生影响较大。计算求得此时顶事件的发生概率为： $g=1.3 \times 10^{-4}$ ，发生频率等级为 F2，剩余风险等级为 10。

根据故障树分析结果，生产操作人员的响应速度、各种监测控制回路功能及仪表故障、阀门故障、生产工况中 VOCs 气体组分及浓度等对 RTO 装置因温度失控而发生着火爆炸影响较大。针对影响较大的事件提出改进措施降低事件发生概率，具体如表 B.10 所示。

表 B.10 故障树分析改进措施示例

符号	改进前 q_i	改进措施	改进后 q_i^*
X2	4.3×10^{-3}	加强控制系统日常维护，增加例行检查频率，监测系统准备好应急备用电源	4.3×10^{-4}
X7	3.9×10^{-3}	安装备用阀门，并设置阀门故障报警	3.9×10^{-4}
X8	7.2×10^{-1}	加强对运维人员的安全培训，制定应急预案，组织应急演练	7.2×10^{-2}
X9	7.5×10^{-3}	可按时进行消防演练，检查维护系统	7.5×10^{-4}
S1	2.0×10^{-2}	实行远程推送与移动端联锁报警，加强人员管理	2.0×10^{-3}

改进措施实施后关键事件的发生概率 q_i^* 带入公式计算求得顶事件的事故发生概率为： $g=5.8 \times 10^{-7}$ ，频率等级为 1，剩余风险等级为 5，达到可接受范围内，改进措施有效。

B.4.2 冲击波超压计算

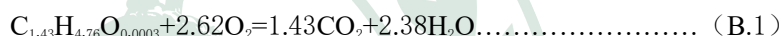
(1) 爆炸压力与设备强度核算

确定 VOCs 气体的等效分子式、标准摩尔生成焓和热值，VOCs 组分分析如表 B.11 所示。

表 B.11 VOCs 组分分析示例

物质	摩尔分率 (%)	分子式	标准摩尔生成焓 $\Delta_f H_m(g, 298K)$ (kJ/mol)
甲醇	0.031	CH_3O	-201.17
甲烷	63.781	CH_4	-74.847
乙烷	25.329	C_2H_6	-84.667
乙烯	3.579	C_2H_4	52.283
丙烷	5.537	C_3H_8	-103.847
丙烯	1.744	C_3H_6	20.414

通过加权计算得到混合有机废气的等效分子式为： $C_{1.43}H_{4.76}O_{0.0003}$ ，标准摩尔生成焓为-72.77 kJ/mol，摩尔质量为 21.92 g/mol。假设爆炸反应为定容绝热过程，产生的最大压力，记为 p_m ，则爆炸的反应方程式为：



已知 $\Delta_f H_m^0(CO_2, g, 298K) = -393.51$ kJ/mol,

$\Delta_f H_m^0(H_2O, g, 298K) = -241.821$ kJ/mol,

$\Delta_f H_m^0(O_2, g, 298K) = 0$;

$$\begin{aligned} \text{则 } \Delta H_1 = & 1.43\Delta_f H_m^0(CO_2, g, 298K) + 2.38\Delta_f H_m^0(H_2O, g, 298K) - \Delta_f H_m^0(C_{1.43}H_{4.76}O_{0.0003}, g, 298K) \\ & - 2.62\Delta_f H_m^0(O_2, g, 298K) = -1065.48 \text{ kJ/mol} \dots\dots\dots (B.2) \end{aligned}$$

$$\Delta n = \frac{y}{4} + \frac{z}{2} - 1 = 4.76 \div 4 + 0.0003 \div 2 - 1 = 0.19015 \dots\dots\dots (B.3)$$

$$\Delta U_1 = \Delta H_1 - \Delta n RT_0 = -1065.95 \text{ kJ/mol} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$\Delta U_2 = \sum n_i \bar{C}_{v,m} (T_m - T_0) = (1.43\bar{C}_{v,m}(CO_2) + 2.38\bar{C}_{v,m}(H_2O) - 9.85\bar{C}_{v,m}(N_2))(T_m - 298) \dots\dots (B.5)$$

由于定容绝热过程， $\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$ ，查阅不同温度区间内平均恒容热容代入公式试差，最终求得 $T_m = 2825$ K。

$$p_m = \frac{p_0 T_m n}{T_0 n} = \frac{1.013 \times 2825 \times 3.81}{298 \times 3.62} = 0.97 \text{ MPa} \dots\dots\dots (B.6)$$

(2) RTO 装置抗压判断

RTO 装置采用的材料为优质低硅碳钢 Q235A (Si<0.04 %)，屈服强度可达 245 MPa，厚度为 6 mm，边长为 3.8 m。计算装置的抗压强度：

$$p_c = \frac{2\delta[\delta]^{\frac{1}{2}}\phi}{D_i} = \frac{2 \times 6 \times 245 \times 0.8}{3800} = 0.62 \text{ MPa} \dots\dots\dots (B.7)$$

当 RTO 装置内发生爆炸时，爆炸产生的高压远高于 RTO 装置的抗压强度，爆炸将导致设备破裂，释放出高压气体对周围的人员、设备和建筑造成破坏。

(3) 伤害半径计算

在达到爆炸下限后，浓度越高，破坏力就越强。VOCs 废气为可燃性混合气体爆炸下限为 3.84 %，计算不同浓度下 RTO 爆炸造成的伤害半径，结果如表 B.12 所示。

表 B.12 不同 VOCs 浓度下爆炸的伤害半径

VOCs浓度 (V%)	VOCs质量 (kg)	等 效 TNT 当 量 (kg)	死亡半径 R_1 (m)	重伤半径 R_2 (m)	中伤半径 R_3 (m)	轻伤半径 R_4 (m)
3.84	0.95	0.38	0.74	2.59	3.48	4.49
4	0.99	0.39	0.75	2.63	3.53	4.56
5	1.24	0.49	0.81	2.83	3.80	4.91
10	2.48	0.99	1.05	3.57	4.79	6.18
20	4.96	1.97	1.36	4.50	6.04	7.79
40	9.92	3.95	1.75	5.67	7.60	9.81

以浓度恰好达爆炸下限 3.84 %为例，此时 VOCs 质量为 0.95 kg（停留时间按 1 s 计算），其伤害半径的详细计算过程如下：

首先将其换算成 TNT 当量：

$$W_{TNT} = \frac{\alpha W_f Q_f}{Q_{TNT}} = \frac{0.03 \times 0.95 \times 1317.52 \times 1000}{21.98 \times 4520} = 0.38 \text{ kg} \dots\dots\dots (\text{B.8})$$

因此，死亡半径为：

$$R_1 = 13.6 \left(\frac{W_{TNT}}{1000} \right)^{0.37} = 13.6 \times \left(\frac{0.38}{1000} \right)^{0.37} = 0.74 \text{ m} \dots\dots\dots (\text{B.9})$$

重伤半径计算过程为：

$$E = W_{TNT} Q_{TNT} = 0.38 \times 4.52 = 1.7176 \dots\dots\dots (\text{B.10})$$

$$\Delta p = \frac{0.05}{p_0} = \frac{0.05}{0.101} = 0.495 \dots\dots\dots (\text{B.11})$$

$$\text{由 } \Delta p = \frac{0.137}{S^3} + \frac{0.119}{S^2} + \frac{0.267}{S} - 0.019 \dots\dots\dots (\text{B.12})$$

可求得 $S=1.0099$ 。

$$\text{由 } S = R_2 \left(\frac{p_0}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

可求得 $R_2=2.59 \text{ m}$ 。

同理可求得中伤半径 $R_3=3.48 \text{ m}$ ，轻伤半径 $R_4=4.49 \text{ m}$ 。

当 RTO 装置中含 VOCs 气体发生爆炸时，装置将会遭到破坏并释放出高压气体。在气体浓度恰好达到爆炸下限 3.84 %时，爆炸造成的死亡半径、重伤半径、中伤半径和轻伤半径分别达到了 0.74 m、2.59 m、3.48 m 和 4.49 m，破坏力巨大，因此，应当加强安全培训和安全管理，要求现场工作人员必须佩戴安全防护用品。

附 录 C

(资料性)

挥发性有机物废气治理工程常见事件失效频率参考数据

C.1 说明

本附录提供的数据主要参考了 AQ/T 3054《保护层分析（LOPA）方法应用导则》、美国化工过程安全中心（Center for Chemical Process Safety, CCPS）过程安全失效数据库等国内外安全统计数据库，并结合 VOCs 废气治理工程特点进行了范围修正。

本附录提供的基础安全数据均为参考性范围区间。中小微企业在缺乏自身历史统计数据时可采用本附录数据作为保护层分析（LOPA）和故障树分析（FTA）的输入源；若项目具备符合其实际工况的、更为可靠的企业历史台账或设备厂商测试数据，应优先采用企业自有数据。

C.2 常见事件参考失效频率

事件类别	事件描述	频率参考范围（次/年）
工艺条件变化	浓度异常波动	$1.0\times10^0\sim5.0\times10^0$
公用工程失效	仪表风中断	$1.0\times10^{-1}\sim2.0\times10^{-1}$
	单路供电故障	$1.0\times10^{-1}\sim5.0\times10^{-1}$
设备故障	风机机械故障停机	$1.0\times10^{-1}\sim3.0\times10^{-1}$
	控制回路失效	$1.0\times10^{-1}\sim2.0\times10^{-1}$
	可燃气体浓度监测故障	$1.0\times10^{-2}\sim1.0\times10^{-1}$
	温度、压力传感器失效	$1.0\times10^{-4}\sim1.0\times10^{-2}$
	阀门机械故障	$1.0\times10^{-3}\sim1.0\times10^{-1}$
	爆破片未在设计压力下爆破	$1.0\times10^{-2}\sim5.0\times10^{-2}$
	阻火器防回火失效	$1.0\times10^{-2}\sim5.0\times10^{-2}$
	管道发生破裂泄漏	$1.0\times10^{-4}\sim1.0\times10^{-2}$
人为干预失效	紧急状态下人员响应不及时或操作失误	$1.0\times10^{-1}\sim1.0\times10^0$

参 考 文 献

- [1] 杨忠霖, 解强, 栾志强. VOCs 治理工程安全研究现状[J]. 中国环保产业, 2020, (12): 28-32.
- [2] 杨忠霖, 解强, 郝郑平, 等. VOCs 治理工程安全评价体系研究与构建[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 77-85.
- [3] 杨忠霖. VOCs 治理工程安全评价体系研究与构建[D]. 中国矿业大学(北京), 2020.
- [4] GB 12358—2024 作业场所环境气体检测报警器 通用技术要求
- [5] GB/T 20002.4—2015 标准中特定内容的起草 第4部分: 标准中涉及安全的内容
- [6] GB 20101—2025 涂装有机废气净化装置安全技术要求
- [7] GB 50016—2014 建筑设计防火规范(2018年版)
- [8] GB 50019—2015 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范
- [9] GB 50055—2011 通用用电设备配电设计规范
- [10] GB 50057—2010 建筑物防雷设计规范
- [11] GB 50058—2014 爆炸危险环境电力装置设计规范
- [12] GB 50140—2005 建筑灭火器配置设计规范
- [13] GB 50160—2008 石油化工企业设计防火标准(2018年版)
- [14] GB 50984—2014 石油化工工厂布置设计规范
- [15] GB 50726—2023 工业设备及管道防腐蚀工程技术标准
- [16] GB 55037—2022 建筑防火通用规范
- [17] GB/T 50051—2021 烟囱工程技术标准
- [18] GB/T 50493—2019 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准
- [19] GB/T 50759—2022 油气回收处理设施技术标准
- [20] HJ/T 386—2007 环境保护产品技术要求 工业废气吸附净化装置
- [21] HJ 1093—2020 蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范
- [22] HJ 1163—2021 包装印刷业有机废气治理工程技术规范
- [23] HJ 2000—2010 大气污染治理工程技术导则
- [24] HJ 2026—2013 吸附法工业有机废气治理工程技术规范
- [25] HJ 2027—2013 催化燃烧法工业有机废气治理工程技术规范
- [26] T/ACEF 006—2020 挥发性有机物综合治理一厂一策编制技术指南
- [27] T/ACEF 009—2020 汽车维修业大气污染防治可行技术指南
- [28] T/ACEF 011—2020 加油站油气回收可行技术指南
- [29] T/ACEF 035—2022 工业企业挥发性有机物末端治理效果综合评价指南
- [30] T/ACEF 036—2022 挥发性有机物治理设施运行维护与安全管理技术规程
- [31] T/ACEF 043—2022 废气预处理设备 几何形折板除雾器
- [32] T/ACEF 044—2022 含尘废气处理设备 涡流强化式除尘器
- [33] T/CAEPI 21—2019 袋式除尘用滤料技术要求
- [34] T/CAEPI 24—2019 袋式除尘用超细面层滤料技术要求
- [35] T/CAEPI 29—2020 废气生物净化装置技术要求

- [36] T/CAEPI 31—2021 旋转式沸石吸附浓缩装置技术要求
- [37] T/CAEPI 33—2021 袋式除尘用滤袋技术要求
- [38] T/CAEPI 34—2021 固定床蜂窝状活性炭吸附浓缩装置技术要求
- [39] T/CAEPI 42—2022 袋式除尘用覆膜滤料技术要求
- [40] T/CAEPI 52—2022 工业有机废气净化用蜂窝活性炭
- [41] T/CAEPI 53—2022 活性炭纤维吸附-蒸汽脱附溶剂回收装置技术要求
- [42] T/CAEPI 61—2023 颗粒活性炭吸附-蒸汽脱附溶剂回收装置技术要求
- [43] T/CAEPI 62—2023 颗粒活性炭吸附-氮气脱附溶剂回收装置技术要求
- [44] T/CAEPI 71—2023 袋式除尘用褶皱滤袋技术要求
- [45] T/CAEPI 72—2023 袋式除尘用折式滤筒技术要求
- [46] T/CAEPI 73—2023 预荷电脉冲袋式除尘器技术要求
- [47] T/CLIAS 006—2022 制鞋行业挥发性有机物治理工程技术规范
- [48] T/QGCML 511—2022 炼焦煤工业挥发性有机物污染控制管理技术要求
- [49] T/CNAGI 003—2022 日用玻璃行业涂装工序挥发性有机物污染防治技术规范
- [50] T/CI 019—2021 常温催化氧化法治理挥发性有机物技术规范

