

CCPS Monograph:

CCPS 专题:

容纳失效场景的分析方法

Methods to Analyze Loss-of-Containment Scenarios

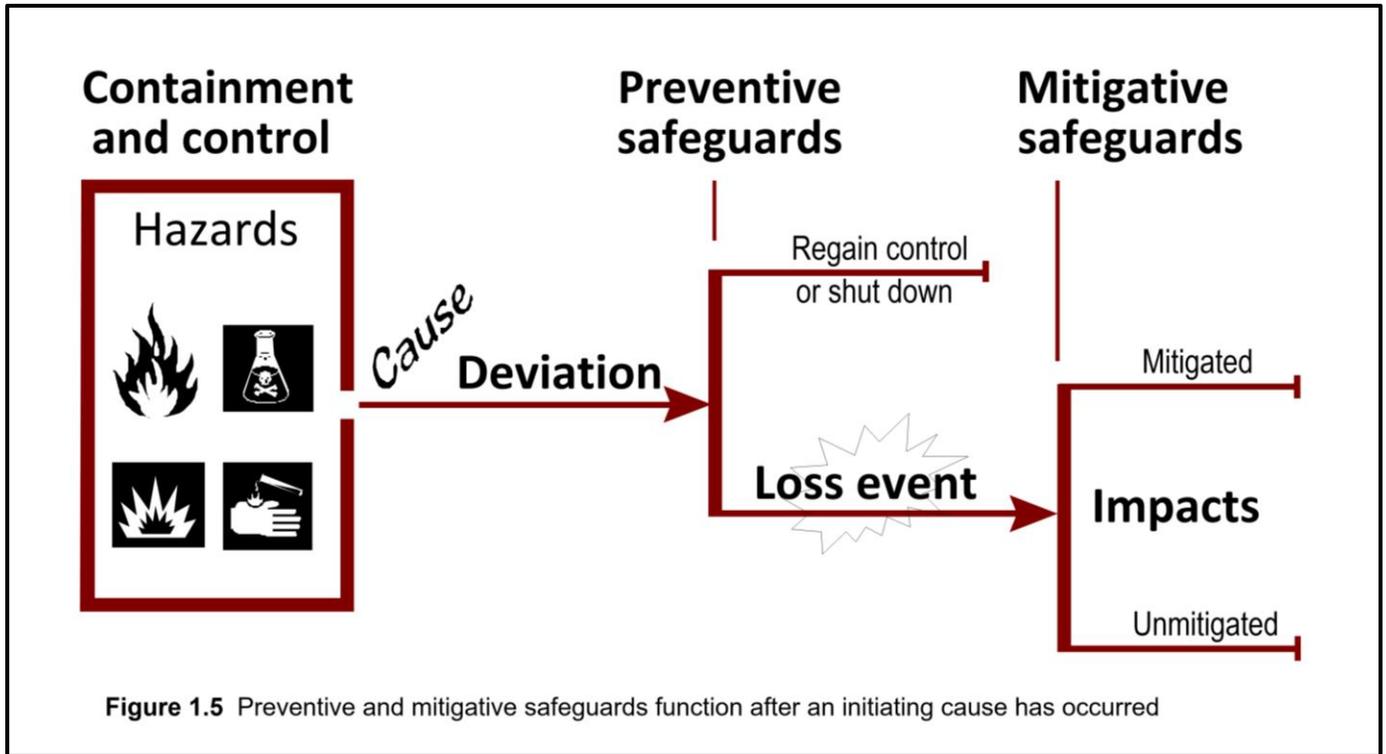


目录

带典型预防保护措施的容纳失效场景分析.....	3
无典型预防保护措施的容纳失效场景分析.....	5
结论.....	11
指导和建议方法.....	11
参考文献.....	13
致谢.....	14
附录 A: 调查结果摘要	15
附录 B: 容纳失效场景评估清单.....	19

存在典型预防保护措施的容纳失效场景分析

在 2008 年，美国化工过程安全中心（CCPS）发布了第三版《风险评估程序指南》[1]。该指南区分了容纳及控制措施以及保护措施的概念，如图 1.5 所示。在过程危害和风险分析中，保护措施被定义为使初始事故引起的事故链中断或者降低已发生事故损失的设备，系统或者操作[1]。



容纳及控制措施；危害；原因；偏差；预防措施；缓解措施；恢复控制或停车；容纳失效事件；后果；缓解后；缓解

许多可能导致容纳失效的过程危害分析（PHA）场景都会将重点放在预防性保护措施上，比如下面的危险与可操作性分析（HAZOP）场景示例：

引导词	偏差	原因	后果	保护措施
过多/过高	流体压力 > 达到下游系统压力上限	压力调节阀故障	下游管道和/或容器超压，主要容纳失效，物料泄漏至周围环境	<ul style="list-style-type: none"> 自动调压放空（控制回路）至火炬 安全阀（泄放场景已考虑压力调节阀故障）

可能导致主要容纳失效（LOPC）的过程偏差类型包括那些可能超过设计极限的偏差，例如：

- 设备超压
- 设备负压（真空）
- 设备超温
- 设备低温（脆化）
- 设备和储罐（储存容器等）满溢
- 错误的工艺材料，反应产物和副产物
- 组分/杂质异常

上述这些可能的偏差更详细信息可参见《气相泄漏缓解指南》的附录 A[2]。

可能适用于过程偏差的典型防护措施包括：

- 在基础过程控制系统（BPCS）中执行的安全功能
- 操作员监控、偏差检测及干预
- 过程报警及操作员响应（有足够的响应时间）
- 逆流保护
- 安全自动联锁（独立于 BPCS 之外的安全仪表功能）
- 紧急泄压系统
- 对基于程序操作过程的独立审核及检查

危害识别和风险评估（HIRA）技术如 HAZOP 分析等非常适合识别和评估这类场景。

没有典型预防保护措施的容纳失效场景分析

相比之下，许多 LOPC 场景涉及到的情况是初始原因直接导致物料或/和能量释放，没有实际的预防措施。例如：

- 直连大气的减压装置过早或失效开启
- 主要容纳系统腐蚀、老化/退化导致泄漏或破裂
- 主要容纳系统的制造缺陷和/或设计缺陷导致泄漏或破裂
- 在设计范围内运行时，外部因素（自然或者人为）影响主要容纳系统（例如：地震，落物/撞击）

对于这种情景，初始原因在没有预防措施的干预下直接导致危险物料和/或能量释放。初始原因（即初始事件，可能包括误操作，设备故障，外部事件或影响）是事故链的起始。从流程操作的角度来说，也标志着系统从正常状态向异常状态发生转变。下面是这种场景的一个示例：

引导词	偏差	原因	后果	保护措施
无	至下游无流量	腐蚀/冲蚀导致管道失效	主要容纳失效；物料泄漏至周围环境	[无有效预防保护措施]

在这种情况下，将“管道系统的机械完整性壁厚检查”等控制措施列为 HAZOP 分析的保护措施是很有诱惑力的。然而，容纳及控制措施如壁厚检查并不符合 CCPS 对保护措施的定义，因为它们并不能使初始原因之后的事故链中断。它们不能作为保护措施的一个非常重要的原因是，如果它们被认为是和独立保护层以相同的方式减少场景频率且被赋值，那么在估算初始原因频率时，它们可能会被重复计算——这种非保守误差将会导致场景的真实风险被低估。

那么，在 PHA 中处理这种主要容纳失效（LOPC）场景的最好方法是什么？本文旨在通过对 77 家 CCPS 成员公司展开的问卷调查来回答与此主题相关的问题。调查结果摘要见附录 A。

在接下来的段落中描述了六种不同的方法。它们并不是根据推荐程度或使用频率来排序，而是根据复杂程度从简单到复杂来排序的。值得注意的是，调查对象可以选择同时使用一种以上的方法，所以其百分比总和并不等于 100%。

不同地区的法规对如何在 PHA 中处理 LOPC 场景的要求可能有所不同；所以，文中所提到的这些方法在特定情况下可能是无效的。这个问题在调查过程中或列出的方法中没有得到明确解决。

方法 1: 在 PHA 分析中排除所有不是由过程偏差引起的 LOPC 场景

16%的调查对象表示, 他们特地在 PHA 分析中排除了不是由过程偏差导致的场景。这种处理方法的主要依据是认为这类场景不适合过程危害分析, 最好通过其他方法进行管理。这里存在两种非互斥的可能性:

- (a) 通过执行其他基于风险的过程安全要素[3], 特别是资产完整性和可靠性(也称为机械完整性), 以及其他要素如知识管理(过程安全信息)、运行准备(投产前安全审查)和变更管理, 来管理典型过程偏差以外的 LOPC 风险。这种方法表明了对设备检验和测试的强烈依赖和/或对 PHA 经常会错过此类场景的理解。
- (b) 通过使用美国石油协会 (API) 推荐导则 752、753 和 756[4,5,6]中的方法实施设备选址研究, 管理不是由过程偏差导致的 LOPC 场景。此类分析选择“评估案例事件”(例如与容器相连的最大接管失效), 并确定周围建筑构筑物中的人员是否得到充分的保护。对于固定有人建筑构筑物, API RP 752 也允许使用基于风险的方法。

方法 2: 定性地评估不是由过程偏差所引起的 LOPC 场景

在这种方法中, PHA 团队使用检查表分析, 故障假设分析, HAZOP 分析, 失效模式及影响分析等工具, 通过团队共识去识别和定性评估工艺物料和能量容纳系统的薄弱环节/缺陷。18%的调查对象表示, 他们将普遍的容纳失效问题纳入了全局节点以识别并评估这个问题。16%的调查对象表示, 他们在 PHA 分析中每个节点的时候会增加一个“容纳失效”参数/引导词, 以此引导 PHA 团队来进行分析评估。由于缺失识别薄弱环节/缺陷的规范方法架构, 这个方法可能需要一个或多个专题专家来补充 PHA 团队核心成员的经验 and 知识。然而, 这并不一定意味着本方法会排除需要一种或多种其他方法进行进一步分析的可能性。

方法 3: 使用可能性类别来评估不是由过程偏差引起的 LOPC 情景

在这种方法中, PHA 团队会使用描述性类别来评估 LOPC 场景的发生频率, 然后使用风险矩阵将其与被评估后果的严重性相结合以确定场景风险。这种方法的一个主要缺点是, 如果这些场景被定义为低概率事件, 可能导致忽略 LOPC 的影响而使其成为可容忍的风险范围。14%的调查对象表示, 不是由过程偏差导致的场景属于这一类型。更多的受访者(26%)表示, 如果他们评估的可能性很小, 但会造成灾难性影响, 他们将进行更详细的分析, 以确定风险是否可以容忍。使用一种或多种附加技术也可以应用于此方法。

方法 4: 使用失效数据库评估 LOPC 场景的可能性

16%的调查对象表示, 他们使用失效数据来评估不是由过程偏差引起的 LOPC 事件发生可能性的数量级或类别。可用的标准失效数据库是确定事件发生频率的基础。失效数据精度范围可以从推荐的数量级级别直到由“部件计数”方法(通常用于定量风险分析 QRA)得到更详细的失效值。例如, 通常使用以下数量级频率值[7]

通用初始事件频率	
1 / 年	泵密封泄漏
0.1 / 年	泵主密封完全失效
0.1 / 年	软管泄漏
0.01 / 年	软管破裂
0.01 / 年	弹簧式安全阀过早开启
10 ⁻⁵ / 年	常压储罐灾难性失效/破裂
10 ⁻⁴ / 年	常压储罐 10mm 孔径连续泄漏
10 ⁻⁵ / 年	压力容器灾难性失效/破裂
10 ⁻⁶ / 年/米	地上管道(管径≤150mm)完全破裂失效
10 ⁻⁵ / 年/米	地上管路(管径≤150mm)泄漏
10 ⁻⁷ / 年/米	地上管道(管径> 150mm)完全破裂失效
10 ⁻⁶ / 年/米	地上管路(管径> 150mm)泄漏
*失效场景具体描述、特殊注意事项、初始质量保证、通用验证方法和指导来源见参考文献[7]第 4 章数据表。	

定量风险分析可能会用到一些与上述数据相同的频率数据，但是当其在分析管道系统的失效频率时会远比上面表格里列出的数量级频率更详细。例如，会区分是否仅仅是一根全焊接的直管还是一个设有许多阀门，法兰的更复杂的管道系统。参考文献[8]给出了一个更详细的部件计数的频率计算的示例。也有很多其他失效数据源可用于失效频率的分析。

另一个调查问题是：如果将随机机械失效(残余失效)作为容纳失效的初始原因，您通常会识别和评估哪些具体场景?(选择所有适用的选项)

- a. 灾难性容器失效(31, 40.3%)
- b. 与容器相连的最大接管失效 (25, 32.5%)
- c. 全尺寸管线失效(28, 36.4%)
- d. 严重泄漏(如管道有效截面积的 10%的泄漏，包括裂纹及孔泄漏) (36, 46.8%)
- e. 轻微泄漏(如填料泄漏等) (33, 42.9%)
- f. 垫片及密封失效 (36, 46.8%)
- g. 垫片及密封泄漏 (37, 48.1%)
- h. 软管和/或其他柔性连接失效 (52, 67.5%)
- i. 间接泄漏(如管壳程换热器泄漏(管板泄漏)，其他换热器内部失效) (36, 46.8%)
- j. 其他 (20, 26.0%)

方法 5：评估具体的失效机理

43%的调查对象表示如果他们能识别导致 LOPC 场景发生的明确的失效机理（如腐蚀、侵蚀、疲劳、氢脆等），就能在 PHA 分析中涵盖和分析非过程偏差的 LOPC 场景。一个调查问题要求明确识别和评估过程中会涉及的具体损伤机理，结果如下：

- a. 保温层下腐蚀 (43, 55.8%)
- b. 侵蚀 (31, 40.3%)
- c. 应力腐蚀开裂(SCC) (36, 46.8%)
- d. 材料选择不当（例如，在不当场景用碳钢代替不锈钢） (43, 55.8%)
- e. 过程化学/产品组成的变化(44, 57.1%)
- f. 热应力 (37, 48.1%)
- g. 其他 (21, 27.3%)

一些受访者表示，相对于在 PHA 分析中识别和评估损伤机理，损伤机理的识别和评估更应当在设计阶段/材料选择时或作为其他管理系统（如机械完整性 MI 管理程序/完整性操作区间 IOW 管理程序，变更管理程序等）的一部分来进行。损伤机理也可以在 PHA 中通过专题专家的检查表审查来涵盖。

方法 6：必要情况下考虑早期失效检测作为保护措施

一个单独的调查问题是，在您分析管线/容器失效场景时，是否会包括对早期失效（例如，破裂前泄漏）检测的考虑？(选择所有适用的选项)。结果如下：

- a. 很少或者从不 (29, 37.7%)
- b. 有时(15, 19.5%)
- c. 总是 (4, 5.2%)
- d. 在我们的 HIRA/PHAf 分析场景中，当损伤机理可能导致破裂前泄漏时，我们会将早期失效的检测（并在容纳失效之前进行修正或停车）作为一种保护措施 (16 20.8%)
- e. 其他 (13, 16.9%)

关键问题是在 PHA 分析中，早期失效的检测是否应该被囊括在保护措施里。这个问题的答案取决于：

- (1) “早期失效”指的是什么，
- (2) 是否适用于待分析场景
- (3) 组织怎样定义“失效”

以下将逐个对这三点进行解释和回答。

(1) 早期失效”指的是什么

CCPS 过程安全术语表[9]给出以下定义：

早期失效 — 硬件状态或操作条件上存在缺陷，在没有采取纠正措施的情况下可能导致老化/退化失效或灾难性破坏。

失效 — 失去实现需求功能的能力

老化/退化失效 — 一种逐步的或部分的失效；不会直接导致功能的全部丧失但会导致功能受损。如：可能使输出值低于或高于设计要求，或者使输出结果不稳定；老化/退化模式可能导致只能在特定操作模式下实现需求功能。如果不加以干预纠正，老化/退化失效可能会导致灾难性失效。

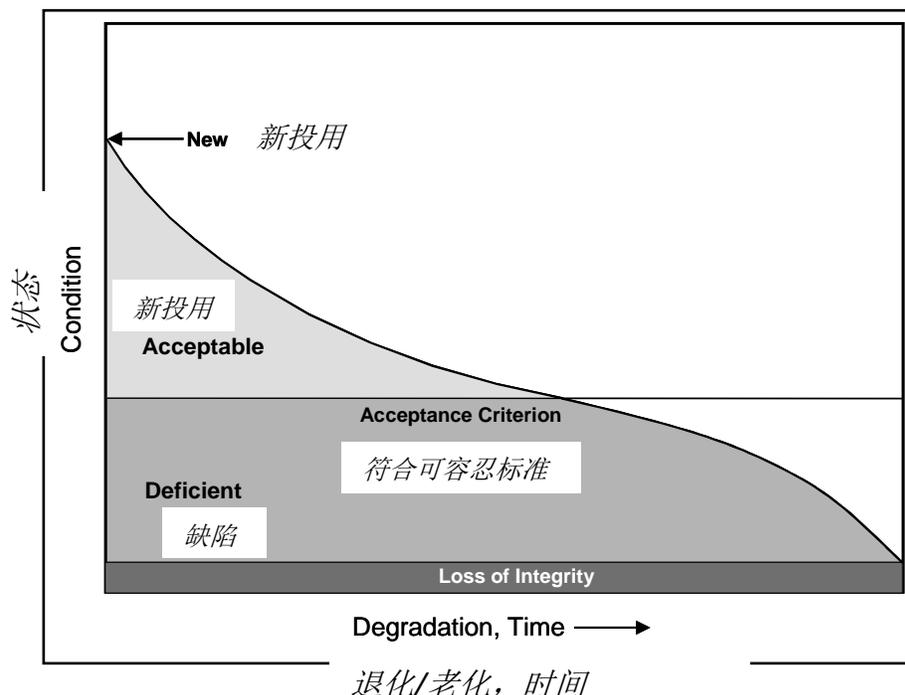
灾难性失效 — 突然发生并导致一个或多个基本功能终止的失效。

上述“老化/退化失效”的定义似乎更适用于仪表而不是主要容纳系统的完整性。在管理设备失效时，与机械完整性联系更紧密的术语是缺陷[10]。定义如下：

缺陷 — 不符合可容忍标准的条件。

可容忍标准 — 确定设备是否存在缺陷的技术基础(例如，如何分析及评估检验、测试和预防性维护[ITPM]得到的结论)

这些概念合在一起构成了下图[10]:



例如，当容器的缺陷可容忍标准是最小壁厚时，如果容器实际壁厚小于最小壁厚，那它则处于缺陷状态，而不是主要容纳失效(LOPC)状态。对于壁厚逐渐减薄的失效（腐蚀）机理，通常可以在 LOPC 发生前对缺陷进行检测及修正(或对容器采取降级使用)。然而，很多情况下即使在壁厚不足（小于最小壁厚）的情况下，该流程仍然可以在正常操作范围内运行（注：*通常正常运行操作区间相对于设计参数仍有一定裕量*）。因此在这种情况下，在实际容器失效发生以前，该缺陷条件并不属于上述初始原因的定义（除非该缺陷同时引发了容器失效）。

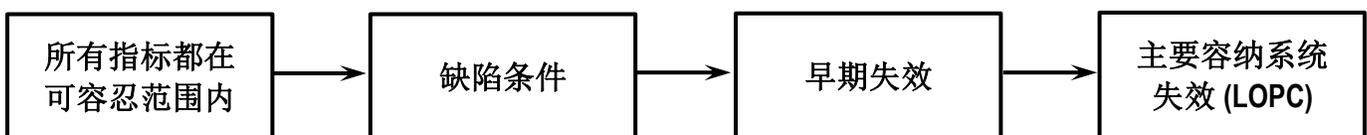
(2) 是否适用于待分析场景

一些调查对象表示，一些失效机理可能会逐渐导致 LOPC。对于这类型场景，在 LOPC 发生之前，早期失效可能被检测到并进行校正(或使系统进入安全状态)。

(3) 组织怎样定义“失效”

对于一个组织来说被称之为主要容纳系统失效的场景，对于另一个组织来说可能并不属于此类情况。例如：一个存储/容纳危害物料的容器，如果观测不到泄漏，一般认为其容纳系统正常运行。对于这种情况而言，任何尺寸的泄漏都将被认为是容纳系统“丧失其需求功能的能力”。而对于另外一个装置/设施而言，可能会根据 PHA 定义其最小泄漏尺寸（例如每分钟一滴或每秒一滴，具体取决于危害物料的特性），而不是以其是否出现泄漏作为评判失效的标准。也就是说，小于最小泄漏尺寸的泄漏可能会被认为是“早期失效”而不是“主要容纳系统失效”。在这种情况下，最大可接受的泄漏尺寸是确定设备是否存在缺陷的标准，即缺陷条件与早期失效相同。

当缺陷条件和早期失效不相同，可以用下图表示：



例如：壁厚逐渐低于最小可接受壁厚会使设备存在缺陷，如果厚度继续减小，可能会在完全失效(LOPC)之前出现早期失效(小泄漏)。在这一过程中有两个关键点（首先是缺陷状态，然后是早期失效）的可通过检验、测试、观察、状态监测等方式来进行及时发现并避免完全失效发生。

这种场景在 PHA 分析时的初始原因仍然是 LOPC 设备失效。可以直接从通用失效数据或历史数据直接估计初始原因发生频率，也可以通过如下方式估算：

Deficient condition frequency (per year)	x	Probability of not detecting and correcting deficient condition in time to avoid incipient failure	x	Probability of not detecting and correcting incipient failure in time to avoid LOPC	=	Initiating cause (LOPC) frequency (per year)
---	----------	---	----------	--	----------	---

缺陷条件频率（/年）x 没能及时检测并纠正缺陷条件以避免早期失效发生的概率 x 没能及时检测并纠正早期失效以避免主要容纳失效（LOPC）发生的概率 = 初始原因（LOPC）发生频率（/年）

当所研究的失效机理是随着时间的推移，主要容纳系统的完整性也随之逐渐恶化时，用上述方法可以相对更好地评估 LOPC 发生频率。当然，如果早期失效属于隐性失效（无法被检测到），或者从早期失效到 LOPC 的过渡发生得很快，那么“没能及时检测并纠正早期失效以避免 LOPC 发生的概率”等于 1。

结论

本专题和调查结果展示了几种可用于传统 PHA 技术不易评估的潜在场景的分析方法。这些潜在场景会由初始原因直接导致主要容纳系统失效，且几乎不存在有效的预防措施。对于这些场景，大多数风险管理策略偏向于采取相应措施来防止初始原因的发生、降低容纳失效所产生的后果，或两者兼有。由于其没有中间选项来对初始原因作出干预并防止其发展至 LOPC 事件，组织需要明确对于此类容纳失效场景的识别、评估及处理方法及工艺流程。无论是将其囊括在正常的 PHA 分析过程中，或是作为整体设施选址研究的一部分，或是在独立的分析中进行评估，识别、评估及处理此类风险场景都是整体风险管理的必要部分。基于各个组织自身的经验和文化，多管齐下的方式可能是最好的。

指导和建议方法

利用本文件中展示的示例和附录 B 中所提供的清单，以下方法可以为没有预防性保护措施的容纳失效场景提供必要的风险管理要素。

自然灾害

对于自然发生的灾害(也被称为天灾)，谨慎的做法是对其进行总体评估(例如将其纳入全局 PHA 节点或作为场地设施选址评估的一个要素)，因为这类事件通常会影影响整个现场的设备 and 建筑物而不仅是单个单元的操作运行。获取并了解关键数据（如地震带、最大预期风速、100 年一

遇和/或 500 年一遇的洪水水平，以及其他地质/气象数据等）将有助于评估现场基础设施的强度，从而为设备支撑、地基基础设计、以及雨水和排污系统等制定总体项目规范，从而显著降低自然灾害事件带来的风险。CCPS 关于自然灾害评估和规划的专题[11] 是一个很好的参考。

1. 人员活动危害（普遍）

人员活动的危害，如落物风险（起重）或叉车撞击等，最好逐个系统或逐个地点来进行分析。相应的，容纳和控制措施(如柱式护栏、交通限制、管道支撑)也需要具体问题具体分析，而不是整个现场采用统一的方式/程序来识别及实施。

2. 设备容纳边界老化/退化

由于许多不同因素的作用（可能包括设计不合理、材料选择不当、维护不当、冲蚀、腐蚀、污染及使用年限等），设备的老化/退化(如壁厚变薄、焊接点和接头老化)可能最终导致主要容纳系统失效。对这些因素的分析在很大程度上取决于其所使用的工艺流程和设备设施所处的位置，因此，可以使用各个组织自身的过程安全信息和过程知识管理系统来处理。主题专家的经验，加上严格的检验和测试计划（包括初始检验，它决定了未来所有评估的基准线）对于这类场景风险的有效管理是非常关键的。正如上述方法 5 和 6 中所讨论的，对缺陷状态或早期失效的检测在某些情况下可以被认为是有效的控制措施。这种有效性取决于对工艺流程、类似工厂/装置和相关已发生事故深刻理解，以及在执行检验、测试并根据其结果采取行动方面的严格操作纪律。

3. 设备非预期操作

从设计上来说，放空和排净设施是潜在的容纳失效位置，因为它们的正常功能是(以计划和可控的方式)从工艺流程中移除物料。当放空和排净设施意外开启时，它们将成为 LOPC 事件的来源。特别是提前/误开启的压力释放设施(如安全阀、爆破片、调压阀等)可以被视为 LOPC 事件，即使根据 API RP 754 它们通常不被视为过程安全事件（Tiered Process Safety Event）。虽然对于安全阀等泄压设施的复位/回座设施的测试可以在一定程度上认为是预防性保护措施，但对泄压设施意外开启的大多数响应都属于减缓措施。

4. 连锁（多米诺）效应

对于本专题中考虑的许多场景，存在潜在重大连锁（多米诺）效应的可能性是很高的。我们鼓励从业者将这种潜在影响的可能性囊括在他们的 PHA 或其他类型的分析中。

参考文献

1. Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures, Third Edition* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008)
2. Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Vapor Release Mitigation* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1988)
3. Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Risk Based Process Safety* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007)
4. API Recommended Practice 752, Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Buildings (American Petroleum Institute, Washington, DC)
5. API Recommended Practice 753, Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Portable Buildings (American Petroleum Institute, Washington, DC)
6. API Recommended Practice 756, Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Tents (American Petroleum Institute, Washington, DC)
7. Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Initiating Events and Independent Protection Layers in Layer of Protection Analysis* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015)
8. M. Moosemiller, "Development of Algorithms for Predicting Ignition Probabilities and Explosion Frequencies," *43rd Annual Loss Prevention Symposium* (American Institute of Chemical Engineers, 2009)
9. Center for Chemical Process Safety, Process Safety Glossary, <http://www.aiche.org/ccps/resources/glossary>, accessed 20 September 2022
10. Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Asset Integrity Management* (Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016), Chapter 11
11. Center for Chemical Process Safety, *CCPS Monograph: Assessment of and Planning for Natural Hazards*, 2019, <https://www.aiche.org/sites/default/files/html/536181/NaturalDisaster-CCPSmonograph.html>
12. API Recommended Practice 571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry (American Petroleum Institute, Washington, DC)

致谢

本专题是由 CCPS 成员组成的小组委员会编写的，Unwin 公司的 Bob Johnson 是本文的主要作者，D&H 过程安全和 CCPS 承包商 Peter Lodal 提供监督。他们不对此承担法律责任。更正、更新和建议请发送给 Anil Gokhale 博士 ccps@aiiche.org。CCPS 认可并感谢以下人员对本文件的贡献和审核。

Contributing/ Peer Review Team

Derek Bergeron	ABS
Katie Bramhall	Parkland Refining
Curtis Clements	Chemours
Ramesh Harrylal	Natural Gas Co. of Trinidad and Tobago
Scott Link	Nova Chemicals
Mohammad Nashwan	Saudi Aramco
Irfan Shaikh	Chevron
Jerome Taveau	Jensen Hughes
John Traynor	Evonik
Laura Turci	3M
Jennifer Bitz	CCPS Staff

CCPS 也要感谢超过 70 名认真阅读并完成回复这份调查的人，这也是本专题的基础。

衷心希望本文所提供的信息将为整个行业带来更令人印象深刻的内容；然而，美国化学工程师学会、其顾问、CCPS 小组委员会成员、其雇主及其雇主高管和董事均不担保或代表本书内容的准确性或正确性。在(1)美国化学工程师学会、其顾问、CCPS 小组委员会成员、他们的雇主、雇主的官员和董事以及(2)本文件的用户之间，用户对使用或滥用本文的后果承担一切法律责任。

附录 A: 调查结果摘要

去掉重复的部分后，一共有 77 份有效的调查结果。

问题与所收到回复的分类一起列出。每个选项后面都有调查对象对其的选择总数量和百分比(红色)。考虑到我们问题的选项可以多选，我们认为这是最佳的数据展示方式。

部分问题也列出了小组委员会对结果的评论。

1. 如果初始原因是管道或容器的随机机械失效(换言之，不是由于过程偏差或外力所造成的残余失效)，您通常如何处理容纳失效的情况?(选择所有适用的选项)
 - a. 将它们排除在 HIRAs/ PHA 分析范围之外(12, 15.6%)
 - b. 将它们纳入 HIRAs/ PHA 分析范围内，但由于它们的可能性一般都很低，因此通常这些场景都属于可容忍的风险范围内 (11, 14.3%)
 - c. 将它们纳入 HIRAs/ PHA 分析范围内，当它们的发生可能性可低但后果是灾难性的情况下，将会进行更详细的分析(例如 LOPA)，以确定其风险是否处在可容忍范围内 (20, 26%)
 - d. 当分析每个节点会将“容纳/容纳失效”作为引导词，且鼓励团队对其展开讨论(12, 15.6%)
 - e. 为了解决这个问题，将容纳失效作为引导词纳入全局节点并展开讨论 (14, 18.2%)
 - f. 将其纳入 HIRAs/ PHA 之中，并使用失效数据库来评估这些失效场景发生可能性的数量级或类别 (12, 15.6%)
 - g. 只有在能够确定导致失效的特定损伤机理(如腐蚀、侵蚀、疲劳、氢脆等)时，才会囊括并分析它们。(33, 42.9%)
 - h. 其他 (24, 31.2%)

评论:

大多数调查对象认为他们的资产完整性管理计划满足需求从而不将容纳失效纳入 HIRA/PHA 分析中。

对于那些在 HIRA/PHA 中分析它们的人，他们会使用标准的可用数据库来确定频率。

2. 如果将随机机械失效(残余失效)作为容纳失效的初始原因，您通常会识别和评估哪些具体场景?(选择所有适用的选项)
 - a. 灾难性容器失效(31, 40.3%)
 - b. 与容器相连的最大接管失效 (25, 32.5%)
 - c. 全尺寸管线失效(28, 36.4%)
 - d. 严重泄漏(如管道有效截面积的 10%的泄漏，包括裂纹及孔泄漏) (36, 46.8%)
 - e. 轻微泄漏(如填料泄漏等) (33, 42.9%)
 - f. 垫片及密封失效 (36, 46.8%)
 - g. 垫片及密封泄漏 (37, 48.1%)
 - h. 软管和/或其他柔性连接失效 (52, 67.5%)

- i. 间接泄漏(如管壳程换热器泄漏(管板泄漏), 其他换热器内部失效) (36, 46.8%)
- j. 其他 (20, 26.0%)

评论:

几乎每一个选项都较为平均的被勾选了。

3. 您通常使用哪些特定工具来识别和分析主要容纳失效场景? (选择所有适用的选项)
- a. 危险及可操作性研究 HAZOP (66, 85.7%)
 - b. 领结法 Bow-Tie (18, 23.4%)
 - c. 保护层分析法 LOPA (43, 55.8%)
 - d. 检查表 (17, 22.1%)
 - e. 故障假设法 What-If (44, 57.1%)
 - f. 失效模式及影响分析 FMEA (13, 16.9%)
 - g. CCPS 风险分析筛选工具 RAST (5, 6.5%)
 - h. 定量风险评估 (QRA) (40, 50.9%)
 - i. 其他 (请说明) (12, 15.6%)

评论:

HAZOP 分析方法占比最高。一半以上的调查对象回答会使用 LOPA 方法进行分析, 但也有些调查对象认为对容纳失效的分析并不适合使用 LOPA 方法。

4. 您是否通常将泄放设施过早/误开启 (与超压本身无关)作为场景的初始原因?
- a. 是的, 在任何情况下 (11, 14.3%)
 - b. 可以, 但前提是泄放未被控制/处理(如火炬) (20, 26%)
 - c. 不会 (34, 44.2%)
 - d. 有时 (10, 13.0%)
 - e. 仅在特定工况下 (2, 2.6%)

评论:

几乎一半的调查对象不认为泄放设施错误泄放需要作为一种场景来分析。

5. 在设施运行过程中, 您是否通常将打开排净或放空作为初始原因(例如, 人员误操作、阀门卡在开位或阀门内漏)?
- a. 是的 (48, 62.3%)
 - b. 不是 (8, 10.4%)
 - c. 有时 (18, 23.4%)
 - d. 仅在特定工况下 (3, 3.9%)

评论:

与泄放设施相比, 更多的调查对象更关注排净和/或放空。

6. 如何识别和评估由外力引起的意外机械伤害/物体打击场景(如叉车、车辆、起重机、管道支架失效等), 或不合理地使用机械力来解决操作性问题(如为了避免架桥使用锤击固体处理设备), 影响主要容纳系统并导致其失效?
- a. 它们被明确排除在 HIRAs/PHA 分析范围之外 (14, 18.2%)
 - b. 它们包含在 HIRAs/PHA 分析范围之内, 并使用标准的默认失效值来表示发生的可能性 (7, 9.1%)
 - c. 如果认为该外力与被分析的过程有关联, 则将其囊括在 HIRAs/PHA 分析范围之内 (31, 40.3%)
 - d. 在待分析的每一个节点或部分, 使用包含可能外力影响的检查表来辅助识别相关的外力(5, 6.5%)
 - e. 将其作为设施选址研究的一部分 (9, 11.7%)
 - f. 其他 (10, 13%)

评论:

与之前的答案一样, 许多将外力影响排除在 HIRA/PHA 分析范围之外的人通过他们的资产完整性管理计划来解决这个问题。

7. 您一般如何识别和评估由自然灾害如风、地震、火灾等外部因素影响主要容纳系统并导致其失效的场景?
- a. 它们被明确排除在 HIRAs/PHA 分析范围之外 (16, 20.8%)
 - b. 它们包含在 HIRAs/PHA 分析范围之内, 并使用标准的默认失效值来表示发生的可能性 (2, 2.6%)
 - c. 如果认为自然现象与待分析的过程有关联, 则将其囊括在 HIRAs/PHA 分析范围之内 (13, 16.9%)
 - d. 在待分析的每一个节点或部分, 使用包含可能自然灾害的检查表来辅助识别相关的自然灾害(8, 10.4%)
 - e. 将其作为设施选址研究的一部分 (18, 23.4%)
 - f. 其他 (20, 26%)

评论:

一些调查对象表示他们有特定区域的自然灾害检查表, 例如, 用于加利福尼亚州设施的地震检查表。

8. 识别和评估过程涉及哪些具体的失效机制? 例如: (选择所有适用的选项)
- a. 保温层下腐蚀 (43, 55.8%)
 - b. 侵蚀 (31, 40.3%)
 - c. 应力腐蚀开裂(SCC) (36, 46.8%)
 - d. 材料选择不当 (例如, 在不当场景用碳钢代替不锈钢) (43, 55.8%)
 - e. 过程化学/产品组成的变化(44, 57.1%)

f. 热应力 (37, 48.1%)

g. 其他 (21, 27.3%)

评论:

这里的大多数选择似乎反映了调查对象涉及的特定业务和产品。

9. 在您分析管线/容器失效场景时，是否会包括对早期失效（例如，破裂前泄漏）检测的考虑？(选择所有适用的选项)

a. 很少或者从不 (29, 37.7%)

b. 有时(15, 19.5%)

c. 总是 (4, 5.2%)

d. 在我们的 HIRA/PHAf 分析场景中，当损伤机理可能导致破裂前泄漏时，我们会将早期失效的检测（并在容纳失效之前进行修正或停车）作为一种保护措施 (16 20.8%)

e. 其他 (13, 16.9%)

评论:

对于选 d) 的人来说，他们似乎有一个以证据为基础的强有力的检验计划用来识别那些可以通过检测来发现的损伤机理。大多数回答者没有这样做，或只是偶尔为之。

10. 是否考虑连锁（多米诺）效应？

a. 是，明确在 PHA/HIRA 分析范围中 (12, 15.6%)

b. 是，但将其作为设施选址研究的一部分 (19, 24.7%)

c. 未考虑 (36, 46.8%)

d. 其他 (9, 11.7%)

11. 对于主要容纳失效场景，您还有什么分析评估思路或想让小组委员会知道和了解的内容吗？

以下是调查对象的一些回复。请参阅调查结果以获得完整的列表。

考虑到管理控制措施的性质(例如使用的检验方法及频次，初始事件发生频率，设计等)，机械完整性场景更适合放到 LOPA 分析之外来处理。

在评估失效情景时不考虑双重危害。然而，实际发生的事故总是会涉及一个或多个控制措施失效。应在专题中阐述这方面的指导意见。

我们的监管机构要求我们将机械完整性场景包含在 PHA 分析中，但目前没有国际公认的标准可以执行。你们的专题会很有帮助的！

最好讨论一下可以在 PHA 中管理，且独立于设施选址评估/定量风险评估所涵盖范围的被动场景。

祝你们好运，因为这个行业真的需要一种简单而全面的技术来评估上述场景。

附录 B: 容纳失效场景评估清单

1. 自然灾害

- a. 危害类型
 - i. 地震
 - ii. 大风
 - iii. 火灾风险（外部）
 - iv. 洪水
 - v. 闪电
 - vi. 地质沉降；设备或结构支撑的沉降
 - vii. 其他（请说明）
- b. 评估需要
 - i. 基础设施
 - 1. 供电
 - 2. 供水
 - 3. 蒸汽/其他换热介质
 - 4. 仪表风
 - 5. 氮气
 - 6. 其他（请说明）
 - ii. 设备支撑
 - 1. 地基基础设计
 - 2. 排净/漫流
 - 3. 防雷保护
 - 4. 其他（请说明）

摘自 CCPS 专题:自然灾害评估与规划[11]

2. 人员活动危害（普遍）

- a. 危害类型
 - i. 车辆撞击（叉车、卡车等）
 - ii. 开挖作业
 - iii. 落物风险（起重）
 - iv. 不当维护或维护材料使用不当
 - v. 施工/安装缺陷
 - vi. 其他（请说明）
- b. 评估需求
 - i. 交通控制及授权进入
 - ii. 物理屏障（柱式护栏、路障等）
 - iii. 质量管理；备件管理
 - iv. 其他（请说明）

3. 设备老化

a. 危害类型

i. 腐蚀

1. 普遍
2. 应力腐蚀开裂 (SCC)
3. 微生物腐蚀 (MIC)
4. 保温层下腐蚀 (CUI)

ii. 冲蚀

iii. 疲劳

iv. 磨蚀/磨损

1. 正常磨损
2. 异常磨损

v. 杂质/污染

vi. 氢致脆化

vii. 高温氢蚀

viii. 支撑腐蚀

ix. 其他 (请说明)

b. 评估需求

i. 资产完整性计划: 评估、测试、检验规程

1. 类型
2. 频次

ii. 在线腐蚀监测

iii. 材料验证 (PMI)

iv. 预期剩余寿命评估方法

v. 其他 (请说明)

摘自 API RP 571, 炼油行业静设备损伤失效机理[12]

4. 设备非预期操作

a. 危害类型

i. 放空及排净

1. 自动
2. 手动
3. 泄放设施误开启

ii. 物料错流/逆流

iii. 储罐满溢

iv. 设备过早/提前打开

v. 其他 (请说明)

b. 评估需求

i. 实施操作评估

©AIChE 2023. All rights reserved. Reproduction for non-commercial, educational purposes is encouraged.
However, reproduction for any commercial purpose without express written consent of AIChE is strictly prohibited.

1. 上锁挂牌（LOTO）实施及复位
2. 许可系统
- ii. 泄漏检测
 1. 在线
 2. 模拟计算（泄漏量计算）
- iii. 其他（请说明）

5. 连锁（多米诺）效应 – 详细描述

