

中华人民共和国国家标准

GB/T 26610.1—2011

承压设备系统基于风险的检验实施导则 第 1 部分：基本要求和实施程序

Guideline for implementation of risk-based inspection of
pressure equipment system—
Part 1: Basic requirements and implementation procedure

2011-06-16 发布

2011-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 缩略语	5
5 总则	5
6 RBI 分析计划	6
7 RBI 评估的数据收集	9
8 损伤机理和失效模式的识别	11
9 失效可能性评估	13
10 失效后果的计算	15
11 风险的确定、评价和管理	19
12 通过检测进行风险管理	20
13 其他减缓风险的措施	22
14 再评估和 RBI 评估结果的更新	24
15 任务、职责、培训与资质	25
16 RBI 文件和记录的保存	27
附录 A (资料性附录) 炼油厂固定设备腐蚀机理	29
参考文献	36

前 言

GB/T 26610.1—2011《承压设备系统基于风险的检验实施导则》分为5个部分：

- 第1部分：基本要求和实施程序；
- 第2部分：基于风险的检验策略；
- 第3部分：风险的定性分析方法；
- 第4部分：失效可能性定量计算；
- 第5部分：失效后果定量分析方法。

本部分为GB/T 26610的第1部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分参考了API RP 580—2002《基于风险的检验》并结合我国的实际情况制定。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本部分起草单位：合肥通用机械研究院、中国特种设备检测研究院。

本部分主要起草人：陈学东、陈钢、寿比南、艾志斌、贾国栋、杨铁成、王辉、胡久韶、谢国山、顾望平、史进、陶雪荣。

承压设备系统基于风险的检验实施导则

第 1 部分：基本要求和实施程序

1 范围

- 1.1 本部分规定了承压设备系统实施基于风险的检验(以下简称 RBI)项目的基本要求和实施程序。
- 1.2 本部分规定的基本要求和主要程序适用于石油化工装置承压设备系统实施的 RBI 项目,其他工业承压设备系统实施的 RBI 项目也可参照使用。
- 1.3 本部分给出的基本要求和主要程序适用于承压设备系统中如下设备及相关零部件实施的 RBI 项目:
- a) 压力容器及其全部承压零部件;
 - b) 过程装置界区内的压力管道及其全部承压管件;
 - c) 常压储罐;
 - d) 动设备中承受内压的壳体;
 - e) 锅炉与加热炉中的承压零部件;
 - f) 安全阀等安全泄放装置。
- 1.4 本部分给出的基本要求和主要程序不适用于承压设备系统中如下设备实施的 RBI 项目:
- a) 仪表与控制设备;
 - b) 电气设备;
 - c) 建、构筑物;
 - d) 泵与压缩机中除泵壳与压缩机外壳以外的机械部件。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的,凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件,凡是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 19624 在用含缺陷压力容器安全评定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本部分。

3.1

绝对风险 absolute risk

对风险完整、准确的描述与量化。

3.2

后果 consequence

事件的结果,可以用定性或定量的方式表达。

3.3

损坏容许度 damage tolerance

设备在不失效的前提下可承受的损伤程度。

3.4

损伤 deterioration

部件承载能力的降低。

3.5

事件 event

在一定条件下发生的事情,在给定的时间内可以对事件发生的概率进行估算。

3.6

事件树 event tree

采用逻辑和图表的方式,用以组织和描述潜在事故的分析工具,以归纳法分析初始事件对事件后果的影响。事件树从识别潜在的初始事件开始,然后在事件树的下一层次上描述由初始事件引发的一系列可能事件,依次类推,形成从初始事件到其潜在结果的发展演变。

3.7

故障树 fault tree

将导致系统中已发生或可能发生事故的原因事件以因果逻辑关系逐层排列并以树形图表示的一种逻辑模型。

3.8

外部事件 external event

超出操作者和设备控制范围而由自然力或界区外因素引发的事件。

3.9

失效 failure

是指系统、结构或部件丧失规定的功能。可以是可能发生或已经发生的失效。

3.10

失效模式 failure mode

指失效的外在宏观表现形式、过程规律和失效机理。

3.11

危害 hazard

危害是指潜在的因失效引起的某种物理状态或危险物质的释放,并由此导致人员伤亡、财产损失或环境破坏。

3.12

危害与可操作性研究 HAZOP (hazard and operability study)

失效模式及其影响分析的一种研究方式,它运用系统技术识别整个装置发生的危险和可操作性问题,它的基本过程是找出过程工艺状态的变化(即偏差),然后分析偏差产生的原因、后果及可采取的对策。HAZOP对于识别由于缺乏知识造成装置设计缺陷而带来的危害,或由于工艺过程条件或操作程序发生变更产生的危害特别有限。危害和可操作性研究的基本目的是:

- a) 对设备或工艺进行详细的描述;
- b) 对设备或工艺的每一部分进行系统评价,用以确定偏离设计意图的偏差产生的原因;
- c) 确定偏差是否引起危害或运行问题;
- d) 评价安全措施的有效性。

3.13

可能性 likelihood

概率

3.14

减缓 mitigation

降低不利事件的后果或减少特定事件的概率。

3.15

概率 probability

在设备使用寿命内事件可能发生的程度。概率的数学定义是“给随机事件赋予一个0~1之间的值”。概率与事件长期发生的相对频率或事件发生的可信度相关。

3.16

定性风险分析(评估) qualitative risk analysis (assessment)

以工程推断和经验为基础分析失效可能性与后果的方法。在本部分中故障模式、影响与危害性分析 FMECA (fault modes, effect and criticality analysis) 及 HAZOP 均属定性风险分析技术。对它们的后果和概率值应予以评估并记录。

3.17

定量风险分析(评估) quantitative risk analysis (assessment)

定量风险分析是将设备设计、制造、操作条件、运行历史、部件可靠性、人的行为、事故物理进程以及潜在的环境和健康影响等相关信息整合统一的方法。定量风险分析包括识别和描述事件的组合,评价每一种组合事件发生的频率和估计后果。

3.18

相对风险 relative risk

设备、工艺单元、系统、设备部件相对其他设备、工艺单元、系统、设备部件的风险。

3.19

残余风险 residual risk

实施风险减缓措施后的剩余风险。

3.20

风险 risk

失效可能性与失效后果的组合变量,风险即是概率和后果量化后二者的乘积。在有些情况下,风险是指对期望(事件)的偏离。

3.21

可接受风险 risk acceptance

在法律法规框架下业主接受风险的程度。风险接受度取决于风险标准。

3.22

风险分析 risk analysis

应用系统的信息识别风险源并进行风险评价。

3.23

风险评估 risk assessment

风险分析和风险评价的全过程。

3.24

风险规避 risk avoidance

不卷入风险的决策或从危险状态退出的行为。

3.25

基于风险的检验 risk-based inspection

一种重点针对材料损伤所引起的设备失效的风险评估和管理过程,对这种风险主要通过通过对设备的检测来管理。

3.26

风险交流 risk communication

在决策者和其他受风险影响者之间进行风险信息交换和共享。这些信息包括风险的存在性、自然属性、概率、严重度、接受度、处理措施和 risk 的其他各个方面。

3.27

风险控制 risk control

实施风险管理决策的行为。风险控制包括检测、再评估和决策执行。

3.28

风险准则 risk criteria

风险重要性评定的依据。风险准则可以涉及到成本与效益、法律与法规要求、社会效益与环境保护、受风险影响者的利益以及上述各项的优先顺序和评估的其他方面进行综合考虑。

3.29

风险估算 risk estimation

风险的概率和后果的确定过程。估算应包括成本、效益、受风险影响者的关注及其他适合于风险评估的因素。

3.30

风险评价 risk evaluation

按照给定的风险标准用来比较估计风险的过程。

3.31

风险识别 risk identification

找到、列出和描述风险特点的过程。风险识别要素包括危险源、事件、后果与概率。

3.32

风险管理 risk management

指导和控制风险的行为。风险管理通常包括风险评估、风险减缓、可接受风险和 risk 交流。

3.33

风险减缓 risk mitigation

选择和实施调整风险措施的过程,有时 risk 减缓是指对人进行有效防护的措施。

3.34

风险降低 risk reduction

降低特定风险的概率,减轻不利的后果。

3.35

危险源 hazard source

具有潜在后果的事件和行为,在安全领域危险源即指危险。

3.36

危险源识别 source identification

找到、列出和描述危险源的过程。

3.37

风险承受者 stakeholder

可能受到 risk 影响的任何单位和个人。

3.38

有毒化学品 toxic chemicals

对人身健康或环境有一定危害的化学物质。

3.39

未减缓的风险 unmitigated risk

采取减缓措施之前的初始风险。

4 缩略语

下列缩略语适用于本部分。

COF	失效后果(Consequence of Failure)
FMECA	故障模式、影响与危害性分析(Fault Modes, Effect and Criticality Analysis)
HAZOP	危害与可操作性研究(Hazard and Operability Study)
ISO	国际标准化组织(International Standards Organization)
NDE/T	无损检测(Non Destructive Examination/Test)
PHA	工艺过程危害性分析(Process Hazards Analysis)
P&ID	工艺和仪表流程图(Process & Instrument Diagram)
PFD	工艺流程图(Process Flow Diagram)
PMI	材质识别(Positive Material Identification)
POF	失效可能性(Probability of Failure)
PSM	工艺安全管理(Process Safety Management)
QA/QC	质量保证/质量控制(Quality Assurance/Quality Control)
QRA	定量风险评价(Quantitative Risk Assessment)
RBI	基于风险的检验(Risk Based Inspection)
RCM	以可靠性为中心的维护(Reliability Centered Maintenance)

5 总则

5.1 风险

5.1.1 RBI对装置、单元、系统、设备或组件以相对风险确定等级。

5.1.2 风险可以用如下数学形式表达：

$$\text{风险} = \text{概率} \times \text{后果}$$

5.2 风险分析的类型

5.2.1 RBI中的风险分析分为定性和定量两种类型,类型的选择取决于以下条件：

- a) 评估的目标；
- b) 评估的装置和设备的数量；
- c) 可以利用的资源；
- d) 评估的时间；
- e) 设备和工艺的复杂性；
- f) 现有数据的种类和质量。

5.2.2 定性分析要求输入描述性信息(通常为一定的数据范围而非某个确切数值),并给出定性的结果。定性分析一般能够在缺乏具体定量数据条件下完成风险评估。

5.2.3 定量分析使用逻辑模型和物理模型导出风险数值,逻辑模型描述导致严重事故的事件组合,物理模型描述事故的进展和危险物质在环境中的扩散。

5.2.4 在RBI分析中,可以将定性和定量两种方法结合使用。

5.2.5 RBI 分析可以与 QRA 共享相关的技术与数据, QRA 中相关分析结果可用于 RBI 的后果分析。

5.3 RBI 与其他风险和安全管理方法的关系

5.3.1 设备风险管理体系由 RBI 和其他风险和安全管理方法共同构成。

5.3.2 其他风险与安全管理方法(如 PHA、PSM、RCM)的结果可以为 RBI 分析提供输入信息。

5.3.3 RBI 分析的结果可用来完善工厂已经实施的各种安全风险管理。

5.4 RBI 与我国特种设备安全技术规范的关系

RBI 项目除应符合本部分的要求外, 还应遵守我国相关特种设备安全技术规范的规定。

5.5 RBI 分析的关键要素

5.5.1 一个完整的 RBI 分析过程由下述关键要素组成:

- a) 分析计划的制定;
- b) 数据收集;
- c) 识别损伤机理和失效模式;
- d) 失效可能性分析;
- e) 失效后果计算;
- f) 风险的识别、评价和管理;
- g) 通过检验进行风险管理;
- h) 其他减缓风险的措施;
- i) 再评估和 RBI 分析结果的更新。

5.5.2 RBI 分析工作流程如图 1 所示。

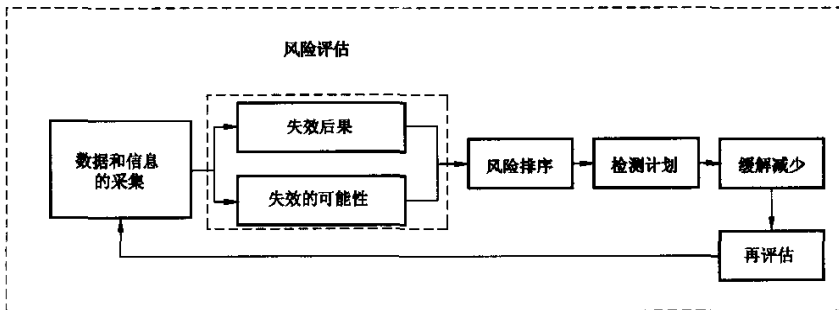


图 1 RBI 分析工作流程

6 RBI 分析计划

6.1 分析的前期准备

6.1.1 在评估开始前需制定评估方案, 方案中应明确以下内容:

- a) 评估的目的;
- b) 分析流程;
- c) 评估需要的知识与技能;
- d) 评估小组的组成;

- e) 小组成员的分工与职责；
- f) 评估的对象(设备、资产及部件)；
- g) 评估使用的数据以及采用的规范、标准；
- h) 评估的工作进度；
- i) 评估的有效期及更新时间；
- j) 评估结果的应用。

6.1.2 评估组成员与单位管理者应就 RBI 评估建立的目的与目标达成共识,一般应包括如下内容:

- a) 设备运行风险以及所采取的检测、维护等风险减缓措施的效果；
- b) 确定风险可接受准则；
- c) 风险管理；
- d) 通过风险优化和风险管理,在安全生产条件下延长设备运行周期,降低运行成本；
- e) 为符合安全与环境管理要求,建立并实施的有效检测程序；
- f) 选择除检验以外的其他降低风险的措施；
- g) 评估设备或装置闲置和在使用时的失效风险并考虑减缓措施；
- h) 在设计阶段对新设备或新项目进行 RBI 评估,以实现风险最小化；
- i) 建立设备设计寿命晚期的 RBI 评估策略；
- j) 建立设备完整性管理的风险基础数据库并实施持续风险管理；
- k) 评估小组认为需要建立的其他 RBI 评估的目的和目标。

6.2 初始范围的筛选

6.2.1 建立 RBI 评估的范围

RBI 评估的范围可按 6.2.2~6.2.5 进行不同层面的筛选,将最重要的装置、工艺单元、系统或设备筛选出来优先进行评估。

6.2.2 装置筛选

装置筛选因素(定性分析):

- a) 总资产或产值；
- b) 历史状况；
- c) 有效的 PSM；
- d) 运行年限；
- e) 周边人口密度；
- f) 至环境污染敏感区域的距离。

6.2.3 工艺单元筛选

6.2.3.1 工艺单元筛选因素(定性分析):

- a) 相对风险水平；
- b) 对装置经济性的影响；
- c) 相对失效后果；
- d) 相对可靠性；
- e) 检修计划；
- f) 类似工艺单元的经验。

6.2.4 工艺单元中的回路筛选

6.2.4.1 根据拟进行 RBI 评估的工艺单元中各设备工艺介质的化学性质、操作压力、操作温度、材质和设备运行历史等条件将工艺单元划分为若干回路。

6.2.4.2 回路筛选因素(定性分析):

- a) 相对风险水平;
- b) 相对失效后果;
- c) 相对可靠性;
- d) 实施 RBI 的预期效益。

6.2.5 设备筛选

6.2.5.1 筛选出不同设备中较高风险的设备项,以对其进行更详细的风险评估。

6.2.5.2 设备筛选因素(定性分析):

- a) 损伤机理对设备安全完整性的危害程度;
- b) 同类设备发生失效的历史和频次;
- c) 失效后果的严重程度;
- d) 材质适应性;
- e) 强度方面的安全裕度。

6.3 公用设施、应急系统和界区外系统

6.3.1 应依据 RBI 的评估计划及工厂的检测要求决定是否将公用设施、应急系统和界区外系统纳入 RBI 评估范围中。

6.3.2 按如下原则考虑是否应包括界区外系统和公用设施:

- a) RBI 评估是为了实现全厂检测资源的优化;
- b) 公用设施的可靠性;
- c) 对工艺单元可靠性的影响程度。

6.3.3 如果 RBI 评估包括了应急系统,则应考虑这些系统在正常与非正常运行时的使用情况。

6.4 确立评估工况

6.4.1 确立评估工况的通用要求

6.4.1.1 评估工况的范围应当与 RBI 目标、基础数据的质量及其他资源条件相适应。

6.4.1.2 RBI 评估中使用的运行条件指运行中的限制条件,在运行中应对关键工艺参数进行监控以确保其在限制条件内运行。

6.4.2 开停车

6.4.2.1 开停车过程中采取有效的风险减缓措施可以降低装置的 POF。

6.4.2.2 应考虑开工用管道在装置启动和随后运行期间的工作条件对评估的影响。

6.4.3 正常、非正常与周期性运行

6.4.3.1 RBI 评估时应确定装置正常操作时的以下工艺数据:

- a) 压力、温度及其波动范围;
- b) 操作介质的组成及波动范围;

- c) 物料的流速及其波动范围；
- d) 是否存在潮湿环境及其他污染物。

6.4.3.2 如果操作偏离正常运行条件,应考虑其对评估结果的影响。

6.4.3.3 对于周期性操作工况,应考虑其对评估结果的影响。

6.4.4 运行周期

6.4.4.1 工艺单元设备运行周期的长短是一个应考虑的重要因素,它将影响 RBI 检验计划及检验策略(检验方案)的制定。

6.4.4.2 RBI 评估可以包括工艺单元或设备的整个运行寿命,也可只针对某个特定的时间段;可以只评估到本运行周期结束,也可评估到下一个运行周期。

6.5 RBI 评估类型的选择

6.5.1 评估类型的选择应与评估目标相适应。

6.5.2 评估类型选择的主要参考因素:

- a) 评估对象(装置、工艺单元、回路、设备或部件);
- b) 评估目标;
- c) 数据质量及可用性;
- d) 其他资源条件;
- e) 对风险评估的认识或风险评估经验;
- f) 评估的时间要求。

6.6 评估所需资源条件与时间

6.6.1 RBI 评估的资源条件与时间决定因素:

- a) 实施的策略和计划;
- b) 实施人员的知识和技能;
- c) 基础数据和信息的可利用性及质量;
- d) 需要的资源的可利用性和费用;
- e) 需评估的设备数量;
- f) 评估的定量化程度;
- g) 对评估准确度的要求。

6.6.2 RBI 评估的时间及费用决定因素:

- a) 评估的工厂、工艺单元、系统、设备及部件的数量;
- b) 收集被评估项目的数据所需的时间及费用;
- c) 培训需要的时间及费用;
- d) RBI 评估的数据和信息所要求的时间和资源;
- e) RBI 评估和建立检测、维护及减缓措施所需的时间和资源。

7 RBI 评估的数据收集

7.1 RBI 评估需要的数据

7.1.1 RBI 评估中定性或定量分析方法的最基本区别是输入、计算、输出的数据类型和详细程度不同。

7.1.2 RBI 评估应采用一致的原则对所有基础数据进行采集和记录。

7.1.3 定量 RBI 至少需要以下典型数据:

- a) 设备类型；
- b) 材料；
- c) 检测、维修及更换记录；
- d) 操作介质总量及成分；
- e) 运行条件；
- f) 安全与监测系统；
- g) 损伤模式、速率和严重程度；
- h) 人员密度；
- i) 涂层、复合层和绝热层的设置情况；
- j) 停产损失；
- k) 设备修复和更新的费用；
- l) 环境清理费用。

7.1.4 定性 RBI 通常不需要 7.1.3 所列的全部数据。定性分析只是将风险进行一个粗略分类,重要的是建立一个统一的规则,确保风险分类的一致性。因此,定性分析比定量分析方法需要分析人员具有更全面的知识和丰富的经验。

7.2 数据质量

7.2.1 不同的 RBI 方法对输入数据的质量要求一致。

7.2.2 应考虑下列影响数据有效性的主要因素:

- a) 过期图纸及文件；
- b) 检测错误；
- c) 笔误；
- d) 测量设备和工具的准确性不足。

7.3 国内、外的规范、标准

在数据采集阶段,应确认设备设计时采用的规范标准是否仍然是有效版本,并考虑版本变化对 RBI 结果的影响。

7.4 现场数据、信息的来源

7.4.1 RBI 数据采集的主要信息来源由以下几部分组成:

7.4.1.1 设计、工程记录与竣工图,其中包括:

- a) P&ID 图、PFD 图等；
- b) 管道单线图；
- c) 操作规程
- d) 材料记录；
- e) 工程质量评价或质量控制记录；
- f) 采用的法规、标准；
- g) 保护设施；
- h) 泄漏检测与监控系统；
- i) 隔离系统；
- j) 资产清单；
- k) 紧急泄压与泄放系统；
- l) 安全系统；

- m) 消防系统;
 - n) 工厂布置图。
- 7.4.1.2 检测记录,其中包括:
- a) 检测时间表与周期;
 - b) 检测类型和数量;
 - c) 维修与更新;
 - d) PMI 记录;
 - e) 检测结果。
- 7.4.1.3 工艺数据,其中包括:
- a) 流体成分分析(包括腐蚀成分);
 - b) DCS 数据;
 - c) 运行程序;
 - d) 开停工程序;
 - e) 应急程序;
 - f) 运行日志与工艺记录;
 - g) PHA、RCM 和 QRA 的数据和报告;
 - h) 管理变更记录;
 - i) 场外信息和数据(如果后果对场外造成影响时)。
- 7.4.1.4 失效数据,其中包括:
- a) 通用失效频率;
 - b) 行业失效数据;
 - c) 装置和设备失效数据;
 - d) 可靠性和状态监测数据;
 - e) 泄漏数据。
- 7.4.1.5 地理条件,其中包括:
- a) 气象记录;
 - b) 地震活动记录。
- 7.4.1.6 设备更新费用,其中包括:
- a) 项目费用报告;
 - b) 行业数据库。
- 7.4.1.7 危害性数据,其中包括:
- a) PSM;
 - b) PHA;
 - c) QRA;
 - d) 其他。
- 7.4.1.8 事故调查

8 损伤机理和失效模式的识别

8.1 概述

在 RBI 评估中应考虑工艺条件(正常和非正常的)及可预见的工艺变化。评估中使用的数据应经过验证。

8.2 RBI 的失效和失效模式

8.2.1 RBI 主要关注的失效是由损伤引起的承载能力降低。

8.2.2 失效模式包括从小孔泄漏到完全破裂。

8.3 损伤模式

8.3.1 损伤模式的识别与类型

8.3.1.1 RBI 的损伤模式是指导致承载能力降低的损伤类型。

8.3.1.2 识别损伤模式应了解设备运行及其与化学、机械环境的相互作用。

8.3.1.3 在石油化工等过程装置中,主要有如下四种损伤模式:

- a) 减薄(包括内部和外部);
- b) 环境开裂;
- c) 材质劣化;
- d) 机械损伤。

炼油厂固定设备四种损伤模式下的主要腐蚀机理参见附录 A。

8.3.2 减薄

8.3.2.1 减薄包括均匀腐蚀、局部腐蚀、点蚀以及其他导致内、外表面材料损失的机理。

8.3.2.2 减薄的影响可以由以下信息给出:

- a) 厚度(初始和当前的实测厚度);
- b) 设备总的使用年限;
- c) 当前工作条件下的设计腐蚀裕量;
- d) 腐蚀速率;
- e) 工作温度与工作压力;
- f) 设计压力;
- g) 检验有效性和数量。

8.3.3 环境开裂

8.3.3.1 环境开裂包括碱腐蚀开裂、胺应力腐蚀开裂、硫化物应力腐蚀(SSC)开裂、氢致开裂(HIC)、应力导向氢致开裂(SOHIC)、碳酸盐开裂、连多硫酸开裂(PTA)、氯化物开裂等。

8.3.3.2 环境开裂敏感性须分析设备或管道的开裂敏感性或开裂的初始概率,并应考虑开裂导致泄漏的概率。应力腐蚀敏感性的等级划分因素:

- a) 材料类型;
- b) 机械性能和敏感性;
- c) 运行温度与压力;
- d) 关键工艺腐蚀物(如氯化物、硫化物、碱等)的浓度;
- e) 制造信息(如焊后热处理等)。

8.3.4 材质劣化

8.3.4.1 高温氢腐蚀(HTHA)可采用 API RP 941 中的 Nelson 曲线来判断不同材料在高温临氢环境中发生高温氢腐蚀的温度和氢分压界限。

8.3.4.2 材质劣化的关键因素一般包括材料种类、工艺运行条件、开停工条件(尤其是温度)等。

8.3.4.3 高温氢腐蚀敏感性的决定因素：

- a) 材料；
- b) 运行温度；
- c) 氢分压；
- d) 临氢服役时间。

8.3.5 机械损伤

机械损伤包括疲劳(机械疲劳、热疲劳和腐蚀疲劳)、应力或蠕变破裂、过载等。

8.4 其他失效

RBI 考虑的失效除承载能力的降低外,还可扩展到其他失效,主要有：

- a) 压力容器内部组件(如塔盘、除雾器部件、凝聚器部件、分布器配件等)的功能或机械失效；
- b) 转动设备失效(如密封泄漏、叶轮失效等)；
- c) 压力泄放装置的失效(阻塞、污垢、无法启动)；
- d) 换热管束的失效(泄漏、堵塞)；
- e) 衬里的失效(穿孔、剥离)。

9 失效可能性评估

9.1 失效可能性分析

9.1.1 RBI 评估中的失效可能性分析指分析损伤机理导致介质损失,并发生危害事件的可能性。

9.1.2 失效可能性分析应研究设备已知的全部损伤机理,并主要关注易发生多种损伤机理的设备。

9.1.3 除机械性能退化外,失效可能性分析中还可包括下述因素：

- a) 地震及极端气候条件；
- b) 泄放装置失效引起的超压；
- c) 误操作；
- d) 材料代用不当；
- e) 设计缺陷；
- f) 蓄意破坏。

9.2 失效可能性分析的度量单位

失效可能性通常用频次度量。

9.3 失效可能性分析的类型

9.3.1 分类

9.3.1.1 失效可能性分析方法分为定性和定量两种。

9.3.1.2 失效可能性分析可以同时使用定性和定量分析方法。

9.3.2 失效可能性的定性分析

9.3.2.1 定性分析方法应对工艺单元、系统或设备、材料结构和腐蚀性介质等进行识别,并依据运行历史、未来的检测维护计划和可能的材料劣化等因素,可对任一装置、单元、系统、设备部件进行失效可能性分析。

9.3.2.2 失效可能性的等级可以用文字描述(如高、中、低),也可用数字描述(如0.1次/年~0.01次/年)。

9.3.3 失效可能性的定量分析

9.3.3.1 失效可能性计算一般是以设计寿命(设计使用年限)为基准的。当设备无设计寿命或超设计寿命使用时,可采用剩余寿命代替设计寿命作为计算失效可能性的基准。

9.3.3.1.1 剩余寿命是按照在役承压设备实际情况,依据今后服役的工艺条件,分析可能的损伤模式,以及已有缺陷与损伤的安全容限与扩展趋势,按相应的标准或工程经验确定。

9.3.3.1.2 对含有超标缺陷的设备,应根据由缺陷尺寸确定的缺陷状态、服役条件、剩余寿命及继续服役的年限等情况对失效可能性进行适当修正。

9.3.3.2 当定量分析所需的数据不准确或不充分时,可采用根据相应标准或工程经验进行修正后的通用失效数据(行业的、工厂的)。

9.4 失效可能性的确定

9.4.1 失效可能性分析步骤

按如下步骤分析失效可能性:

- a) 识别已知的和潜在的损伤机理(考虑正常和非正常工况);
- b) 确定损伤敏感性和速率;
- c) 评价检测与维护历史和将来检测与维护程序的有效性。在评价失效可能性时可给定几类检验策略,可能包括将来不检测的情况,并按这些策略分别确定失效可能性;
- d) 根据设备当前状况和预测的损伤速率计算设备的失效可能性;
- e) 失效模式应根据损伤机理确定,必要时要考虑多种失效模式,并将这些失效模式产生的风险进行累计。

9.4.2 损伤敏感性与速率的确定

9.4.2.1 损伤机理分析时应对所有设备工艺条件与材料组合进行评价,确定所有已知的和潜在的损伤机理。

9.4.2.2 确定损伤机理和敏感性时,应按相同的内外部环境和材料组合进行分组,同组中设备的检测结果可为其他设备提供参考。

9.4.2.3 损伤速率用腐蚀速率或敏感性表示。对于未知或不可量化的损伤速率应用敏感性表示。

9.4.2.4 确定损伤速率的依据:

- a) 公开发表的数据;
- b) 实验室数据;
- c) 现场试验和在线监测结果;
- d) 相似设备的经验;
- e) 检测历史的数据。

9.4.3 失效模式的确定

9.4.3.1 失效可能性分析和后果分析相互关联。

9.4.3.2 失效可能性分析可用来评价失效模式和每种失效模式发生的概率。

9.4.4 量化检测历史的有效性

9.4.4.1 评价检测历史(检测方法、频次、范围或位置)发现已知损伤机理的有效性。

9.4.4.2 影响检测历史有效性的主要因素：

- a) 检验比例不足,未有效覆盖损伤区域；
- b) 检测方法的局限性；
- c) 检测方法和工具选择不适当；
- d) 检测人员技能欠缺；
- e) 极端工况条件下损伤速率显著升高,短时间内发生失效。

9.4.4.3 确定检测历史有效性的一些影响因素：

- a) 设备类型；
- b) 已知的和潜在的损伤模式；
- c) 损伤速度或敏感性；
- d) 无损检测方法、范围和频次；
- e) 预测的损伤部位的可检测性。

10 失效后果的计算

10.1 后果分析的一般要求

10.1.1 后果分析应可重复、简化并具有可信度。

10.1.2 承载能力降低的后果通常用流体泄漏到外部环境的量和影响来估算,一般应考虑以下几方面因素：

- a) 安全健康影响；
- b) 环境污染影响；
- c) 生产损失影响；
- d) 维修和重建费用。

10.2 后果分析的分类

10.2.1 后果的定性分析

10.2.1.1 定性分析方法包括确定工艺单元、回路或设备、操作条件和操作介质带来的危险。

10.2.1.2 失效后果可以对每一装置、工艺单元、回路、设备部件单独进行估算。

10.2.1.3 定性分析方法评估的失效后果等级可以用字母或文字描述(如 A~E 或高、中、低)并应与面积或费用等数值相联系。

10.2.2 后果的定量分析

10.2.2.1 根据如下诸因素进行失效后果的计算：

- a) 介质类型；
- b) 介质主要特性(分子量、沸点、自燃温度、燃烧能、密度等)；
- c) 工艺操作参数,如温度和压力；
- d) 泄漏事故的泄漏总量；
- e) 失效模式及相应的泄漏孔尺寸；
- f) 泄漏介质在周围环境中的相态(固、液、气或混合相)。

10.3 失效后果的表征方式

10.3.1 概述

不同种类的后果使用不同表征方式,后果的描述应尽可能具有可比性,以方便风险排序。10.3.2~

10.3.5 给出了 RBI 评估中使用的各种后果的度量单位。

10.3.2 安全

10.3.2.1 安全后果可用数值或后果类型表示。

10.3.2.2 安全后果应将事故与可能造成的伤亡程度联系起来,它可表示为伤亡程度(致死、急救、严重伤害、治疗)或与伤亡程度相对应的等级。

10.3.3 损失

10.3.3.1 损失一般指潜在的后果。

10.3.3.2 损失主要包括:

- a) 负荷降低或故障造成的产品损失;
- b) 应急设备和人员的配置;
- c) 泄漏造成的产品损失;
- d) 产品质量降低;
- e) 损坏设备的更换和修理;
- f) 场外破坏状况;
- g) 场内及场外溢出物料的清埋;
- h) 生产中断损失(利润损失);
- i) 市场份额的缩减;
- j) 人员伤亡;
- k) 土地复垦;
- l) 法律诉讼;
- m) 罚款;
- n) 信誉损失。

10.3.4 影响区域

10.3.4.1 影响区域指区域内受到的影响比预定值高,预定值是指区域内受危险后果影响的任何方面设定域值。

10.3.4.2 根据影响区域划分后果等级时,可假设受到威胁的人员、设备在工艺单元内均匀分布,或考虑人员随时间的变化和设备在不同地点的密度值以给出更精确的评估结果。

10.3.4.3 影响区域后果的单位是 m^2 。

10.3.5 环境破坏

10.3.5.1 环境破坏程度的无统一度量单位。

10.3.5.2 环境破坏程度可使用的度量单位有:

- a) 每年受影响的土地面积; m^2 ;
- b) 每年受影响的海岸长度; km ;
- c) 生物或人力资源消耗的数量。

10.4 流体泄放量

10.4.1 流体泄放量是多数后果评价中决定性要素之一。

10.4.2 流体泄放量取决于以下方面:

- a) 泄漏流体的有效体积(即设备和与之相连设备中的流体体积,理论上是快速切断阀之间流体

的量)；

- b) 失效模式；
- c) 泄漏率；
- d) 检测和隔离反应时间。

10.4.3 存量可能全部泄漏,若采用保护、防范措施隔离破损部位时,泄漏体积小于存量。

10.5 失效后果的分类

10.5.1 燃烧(火灾和爆炸)

10.5.1.1 泄漏物料若自燃或被点燃可引起燃烧。

10.5.1.2 燃烧的影响分为热辐射和爆炸冲击波。热辐射影响范围较小,爆炸冲击波影响范围较大。

10.5.1.3 典型类型有：

- a) 蒸气云爆炸；
- b) 池火；
- c) 喷射火焰；
- d) 闪燃；
- e) 沸腾液体气化爆炸。

10.5.1.4 燃烧事故的后果由以下诸因素综合决定：

- a) 易燃性；
- b) 流体泄漏量；
- c) 气化能力；
- d) 自燃性；
- e) 高压或高温操作的影响；
- f) 隔离措施；
- g) 人员伤亡和设备破坏。

10.5.2 中毒后果

10.5.2.1 当介质泄漏可能造成人员中毒时,应评估中毒后果。评估主要考虑立即造成危险的急性中毒风险。

10.5.2.2 有毒后果的判断应考虑的因素有：

- a) 流体的泄漏量和毒性；
- b) 在特定工艺和环境条件下扩散的能力；
- c) 有毒气体检测和减缓系统；
- d) 影响区域内的人口数量。

10.5.3 其他危险流体的泄漏

10.5.3.1 其他危险流体是指人接触后会引引起热灼伤或化学灼伤的流体,包括蒸汽、热水、酸性或腐蚀性物质。

10.5.3.2 估算其他危险流体泄漏造成的危害时,需考虑如下主要因素：

- a) 流体泄漏的体积；
- b) 区域内的人员密度；
- c) 流体的类型和造成伤害的性质；
- d) 安全系统(如:人员防护服、喷淋等)。

10.5.3.3 分析其他危险流体泄漏造成的危害时,还应考虑的其他因素有:

- a) 泄漏物无法处置造成的环境破坏;
- b) 泄漏物对设备的损害。

10.5.4 环境后果

10.5.4.1 RBI 评估主要考虑扩散快且后果严重的环境破坏。

10.5.4.2 环境后果影响因素:

- a) 流体泄漏量;
- b) 气化能力;
- c) 泄漏物的防护;
- d) 环境资源的影响;
- e) 法规要求。

10.5.4.3 环境后果可用费用表示。

10.5.4.3.1 费用按如下公式计算:

$$\text{环境后果费用} = \text{清理费用} + \text{罚款} + \text{赔偿} + \text{其他费用}$$

10.5.4.3.2 清理费用的影响因素:

- a) 泄漏物的排放形式(地表、地下、水面等);
- b) 液体的类型;
- c) 清理的方法;
- d) 泄漏量;
- e) 泄漏地点地形地貌特征。

10.5.5 停产损失

10.5.5.1 停产损失包括物料损失和生产中断造成的损失。

10.5.5.2 生产中断损失的估算方法分为简化方法和精确方法。

10.5.5.2.1 简化方法的计算公式:

$$\text{生产中断损失} = \text{工艺单元日均效益} \times \text{停工天数}$$

其中:

工艺单元日均效益——以税收或利润为基础估算;

停工天数——恢复生产需要的时间。

10.5.5.2.2 精确方法的计算内容:

- a) 应对设备损坏的能力(如:备用设备、复线等);
- b) 对附近设备可能的损伤(撞击损伤);
- c) 其他工艺单元潜在的产品损失。

10.5.5.2.3 生产中断后果估算应考虑如下因素并进行修正:

- a) 使用很少利用或闲置的设备来减少产品损失;
- b) 设备出料是用作其他设备原料或工艺介质时,利润损失应复合计算;
- c) 设备小损伤修理的时间可能和大损伤修理的时间一样长;
- d) 停工时间过长可能丢掉客户和市场份额,重新生产后利润损失会延续;
- e) 设备或设备零件采购困难,重新购置时间较长造成的损失;
- f) 是否在保险范围。

10.5.6 维护和改造的影响

维护和改造的影响主要考虑维修和更换设备所产生的费用。

11 风险的确定、评价和管理

11.1 风险的确定

11.1.1 计算风险

特定失效事件的风险 = 特定失效事件发生的概率 × 失效后果。

总的风险是所有特定失效事件风险的总和。

11.1.2 风险可以用数值或风险矩阵图(图 2)表述。

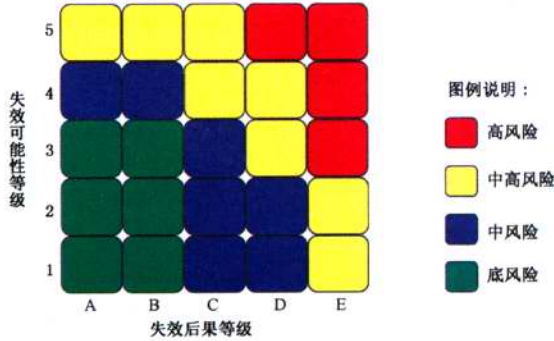


图 2 风险矩阵

11.2 风险管理决策和风险可接受准则

11.2.1 风险可接受准则

11.2.1.1 安全、环境和经济风险的可接受准则可为制定基于风险的检验计划提供依据。

11.2.1.2 无确定可接受风险准则时,可采用等风险原则。等风险原则指对风险等级为低或中的设备及管线采取的风险控制方法,要求设备和管线在下一次检验之前风险等级不得上升。

11.2.1.3 风险可接受准则可采用成本-效益分析方法。

11.2.2 按风险评估结果制定检测和维护计划

11.2.2.1 根据各种工艺设备或装置的风险,以风险值为基础排定检测顺序,确定检测的设备、检测技术和检测范围。

11.2.2.2 根据风险随时间的变化确定检测时机。

11.3 敏感性分析

11.3.1 敏感性分析包括检测风险分析中的部分或全部输入变量,以确定其对相应风险后果值的影响,并确定哪些是关键输入变量。

11.3.2 敏感性分析后的资料收集,应优先关注关键输入变量。

11.4 假设

11.4.1 当无法得到失效后果和(或)概率数据时,可按工程经验确定。

11.4.2 当已知失效后果和(或)概率数据时,在首次评估时也允许进行偏保守处理,并注意避免因过于保守而使风险过度放大的情况出现。

11.5 风险描述

11.5.1 当需要使用较多的定量后果和概率数据时,可以采用风险坐标图来表征风险。风险坐标图通常采用双对数坐标绘制(见图3),图中直线是可接受风险的域值。

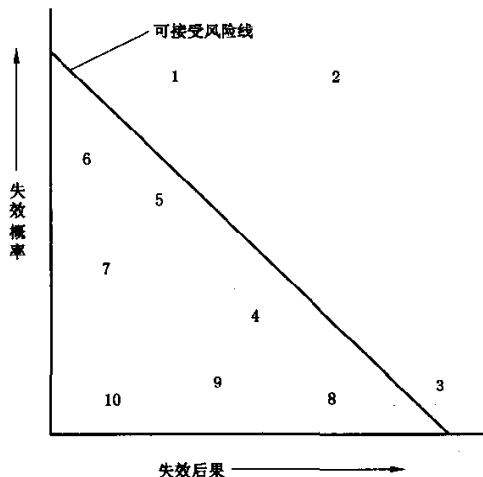


图3 风险坐标图

11.5.2 风险坐标图与风险矩阵可以作为风险排序的图示工具。

11.6 可接受风险域值的确定

11.6.1 域值将风险坐标图、风险矩阵、表格分为可接受和不可接受区域,如图3所示。

11.6.2 域值可根据有关法规、风险标准及企业的经济安全策略确定。

11.6.3 对于位于不可接受区域的设备,应按下述办法处理:

- a) 采取风险缓减措施,降低位于不可接受区域设备的风险值,使其降至可接受区域;
- b) 无法采取风险缓减措施时,应采用最低合理可行(ALARP)的风险管理方法或其他风险管理方法进行管理。

11.7 风险管理

11.7.1 基于设备风险等级和风险极限进行风险管理。

11.7.2 对于可接受的风险,不必采取减缓措施或其他措施。

11.7.3 对不可接受的风险,应采取如下减缓措施降低风险等级:

- a) 退役,应考虑该设备对装置运行是否是必需的;
- b) 检测或状态监控,应考虑是否具有有效的检测方法以及由检测结果给出的维修手段;
- c) 降低失效后果;
- d) 降低失效可能性。

12 通过检测进行风险管理

12.1 通过检测降低风险管理的不确定度

12.1.1 检测本身并不能改变或降低损伤机理。

12.1.2 检测可以提高预测损伤机理、损伤速率的能力,并预测破坏何时达到极限,降低失效发生的不确定度。

12.1.3 在预测的失效发生前就计划和实施减缓措施,可直接降低失效的概率。

12.1.4 检测数据与数据分析的质量对风险水平的降低有显著影响。

12.2 按 RBI 和失效可能性结果进行风险管理

12.2.1 RBI 按控制失效后果或失效可能性或综合运用二者来管理风险,如本部分第 11 章所示。

12.2.2 可采用检测对高风险或不可接受风险的设备进行风险管理,检测的有效性取决于如下因素:

- a) 设备类型;
- b) 已知的和潜在的损伤机理;
- c) 损伤速率或敏感程度;
- d) 检测方法、范围和频率;
- e) 对预计的破坏区域实施检测的难易程度;
- f) 是否可从流程中切出检测;
- g) POF 的降低量。

12.2.3 下述情况不推荐通过检测降低风险:

- a) 设备腐蚀速率很准确并接近寿命的终点;
- b) 与操作工艺相关的突然失效,如脆断;
- c) 损伤状况难以检测和量化;
- d) 从开始发生损伤到最终失效时间很短,在预定的检测时间前就发生失效;
- e) 受其他事件影响发生的失效。

12.3 建立基于风险的检测策略

12.3.1 RBI 评估和风险管理评价的结果,可以作为制定设备整体检测策略的基础。检测策略和其他减缓计划是使所有设备的最后风险都在可以接受的范围内。

12.3.2 制定检测计划时,应考虑风险等级、风险驱动、设备历史、检测的数量与结果、检测的类型与有效性、设备的相似工况与剩余寿命等诸多因素。

12.3.3 检测对风险降低的程度取决于以下因素:

- a) 失效模式;
- b) 损伤起始至失效发生的时间间隔(如破坏速度);
- c) 检测能力;
- d) 检测范围;
- e) 检测频次。

12.4 通过检测管理风险

设备内部的检测可能引起风险上升,如以下情况:

- a) 潮湿空气进入设备内部造成应力腐蚀开裂或连多硫酸开裂;
- b) 玻璃衬里容器的内部检测;
- c) 保护层破坏;

12.5 检测费用的 RBI 管理

12.5.1 减少低风险区域内的检测活动,将检测资源集中于高风险区域。

12.5.2 如能实现足够的风险管理,采用外部检测,总体而言可减少停工时间,延长正常运行周期,节约

检测费用。

12.6 通过评价检测结果确定处理措施

12.6.1 检测结果(如损伤机理、损伤率、设备对破坏类型的耐受性等),可以作为评定剩余寿命和将来检测计划的依据,以及对失效概率的已用计算模型进行对比和验证。

12.6.2 对所有需要维修和更换的设备部件,应制定完整的工作计划,给出维修(或更换)的范围、建议、推荐方法、相应 QA 或 QC、完成日期。

12.7 用 RBI 获得最低运行成本

RBI 可以通过以下作用来降低整个运行周期的成本:

- a) 识别损伤机理并加强失效的预测和预防,实现长周期安全运行;
- b) 提高材质对装置长周期运行的适应性;
- c) 通过减少维护、优化检测计划、延长正常运行时间,降低装置停车和维护费用。

13 其他减缓风险的措施

13.1 概述

除检测外,可通过以下方法来减缓风险:

- a) 降低失效后果;
- b) 降低失效可能性;
- c) 增强设施和人员对后果的承受能力;
- d) 对后果中的主要危险因素进行控制。

13.2 设备更换与维修

当设备损伤导致的失效风险无法控制在可接受水平时,应对设备进行更换与维修。

13.3 缺陷的合于使用评价

可采用 GB/T 19624 等规定的方法对缺陷进行合于使用评价,判断设备是否可以安全运行以及运行的条件和时间,决定检测中发现的缺陷是否需要维修和更换设备。

13.4 设备改造、重新设计和重新划分等级

13.4.1 改造或重新设计措施可以降低设备失效可能性。

13.4.2 当设备不满足原设计要求时,降低操作参数可降低设备失效可能性。

13.5 紧急隔离

紧急隔离可以降低泄漏事件的毒性、爆炸和燃烧的后果,关键因素是正确选择隔离阀的安装位置。远程操作可以显著降低风险,操作时应能及时发现泄漏并迅速启动控制阀。

13.6 紧急降压和放空

这种方法可以降低泄漏的数量与速率,减少燃烧、爆炸事故的风险。

13.7 改变工艺

改变工艺可以减少主要后果源:

- a) 将温度降低到沸点以下,减小蒸气云规模;
- b) 使用危险性较低的物料;
- c) 采用连续工艺代替间断工艺;
- d) 稀释危险物质。

13.8 减少存量

通过下述方法可减少存量:

- a) 减少有危险性的原料和中间产品的存量;
- b) 修改工艺。减少缓冲罐,回流罐或其他工艺设备中的介质存量;
- c) 用气相技术代替液相。

13.9 喷水或冲水

这种方法可以减少燃烧损失、阻止扩散。正确设计喷淋操作系统可以大大降低容器暴露在火中的概率。

13.10 水帘

13.10.1 喷水使大量的空气进入云雾中,水帘可吸收和稀释可溶性气体,空气可稀释不溶气体,降低风险。

13.10.2 水帘的设计十分关键,应考虑水帘对不同可燃性物质的作用。水帘应位于泄漏点与火源之间或位于人可能出现的地点。

13.11 防爆结构

防爆结构可以降低爆炸引起的损失,防爆结构应包括保护人员的建筑物、应急设备、关键仪表、控制电路等。

13.12 其他措施

下述各种措施也可起到缓减风险的效果:

- a) 溢出探测器;
- b) 蒸汽或空气幕;
- c) 防火设计;
- d) 仪器联锁(联动装置、停车系统、警报等);
- e) 惰性气体覆盖;
- f) 大楼和封闭结构的空气流通;
- g) 管道重新设计;
- h) 机械限流设施;
- i) 火源控制;
- j) 提高设计标准;
- k) 加强安全管理;
- l) 紧急撤离;
- m) 安全掩体;
- n) 构筑物通风口毒物清洗;
- o) 溢出物盛放;
- p) 设备场地的选择;

q) 状态监控。

14 再评估和 RBI 评估结果的更新

14.1 概述

RBI 是个动态的工具,可以对目前和未来的风险进行评估。评估是基于当时的数据和认识,随着时间的推移会发生改变。RBI 评估应该用最新的检测、工艺与维护信息来进行持续的更新。

14.2 执行 RBI 再评估的关键因素

14.2.1 损伤机理与检测活动

14.2.1.1 很多损伤机理均与时间有关,损伤速率随时间而变化,通过新的检测结果可以即时修正损伤速率。

14.2.1.2 有些损伤机理与时间无关,只会在特定条件下发生。最初的 RBI 评估无法预测这些特定条件,当损伤发生后需对 RBI 进行再评估。

14.2.1.3 新的检测活动可能提供新的信息。当新的检测活动完成后,应根据检测结果判定是否需要进行 RBI 再评估。

14.2.2 工艺条件与设备改变

14.2.2.1 工艺条件的改变可以导致设备发生快速失效和无法预测的腐蚀与裂纹,一旦操作条件的变化对损伤机理有明显影响,则需要再进行再评估。

14.2.2.2 设备的改变(维修、更换)对风险有显著影响,需要进行再评估。

14.2.3 RBI 评估前提条件的变化

RBI 评估前提条件的变化对风险评估结果有显著影响,可能的变化包括:

- a) 人口密度的增加或减少;
- b) 设备和管道材料改变;
- c) 产品价格的波动;
- d) 安全与环境法律法规改变;
- e) 用户风险管理计划修改(如风险标准变化)。

14.2.4 降险策略的影响

实施了降险策略(如安装安全系统、维修等)并达到预期目的后,需更新 RBI 程序,对风险进行再评估。

14.3 实施 RBI 再评估的时机

14.3.1 重大变化发生之后。应估计每一重大变化对风险改变的影响。工艺条件、损伤机理、损伤速率、损伤严重程度以及 RBI 前提条件的改变都可能需 RBI 再评估。

14.3.2 评估周期满了之后。细小变化的长时间积累也会引起 RBI 评估的重大变化。应设定实施 RBI 再评估的最长时间间隔。

14.3.3 实施降低风险策略之后。实施降低风险策略后,应采用 RBI 再评估的结果验证采取风险缓减措施后是否已将风险降低到可接受的水平。

14.3.4 相关法规修改之后。应考虑相关法规修改后对检测要求的影响。

15 任务、职责、培训与资质

15.1 RBI小组的组成

15.1.1 RBI评估需要通过多方面收集数据、专门分析并做出风险管理的决定,通常需要组成一个具备所需技术与经验的评估小组来有效实施RBI评估。

15.1.2 15.2给出了典型RBI评估小组的组成,应根据实际情况决定小组成员。

15.2 小组成员、任务和职责

15.2.1 小组领导

15.2.1.1 小组领导应是全职的小组成员,并是项目执行单位的领导者或主要技术负责人。

15.2.1.2 小组领导的职责包括下述几方面:

15.2.1.2.1 组建评估小组,核实小组成员是否具备需要的技术与知识。

15.2.1.2.2 做好以下工作,确保评估的正确进行:

- a) 准确收集数据;
- b) 做出合乎逻辑的假设并进行记录;
- c) 确定收集数据、做出假设的适当人选;
- d) 对数据收集与分析的质量进行适当的监督和检查。

15.2.1.2.3 准备RBI评估报告,并将其分发给做出风险管理决定或实施缓减风险措施的责任人。

15.2.1.2.4 保证实施正确的风险降低措施。

15.2.2 设备工程师或检测技术人员的职责

15.2.2.1 收集设备状态和历史数据。

15.2.2.2 当无法获得状态数据时,应会同材料和腐蚀专家共同对设备现有状态进行预测。

15.2.2.3 会同材料和腐蚀专家评价设备历史检测的有效性。

15.2.2.4 实施RBI推荐的检测计划。

15.2.3 材料和腐蚀专家的职责

15.2.3.1 考虑设备的工艺条件、环境、材质和寿命等因素,评估损伤机理的类型以及对设备的适用性和破坏程度。

15.2.3.2 比较RBI预期条件与设备实际条件的差异及差异产生的原因,为RBI使用的损伤机理、损伤速率提供指导,并确定检测对相关损伤机理的有效性。

15.2.3.3 推荐降低失效可能性的方法(如改变材质、增加抑制剂、增加涂层和衬里等)及监控损伤速率变化的控制方法(如pH值监控、腐蚀速率监控、介质监控等)。

15.2.4 工艺专家的职责

15.2.4.1 提供工艺条件信息,这些信息用工艺流程数据表的形式给出,记录由正常事件(如开停车)和非正常事件引起的工艺条件的变化。

15.2.4.2 给出工艺流体或气体的组分、组分变化以及它们的毒性和可燃性。

15.2.4.3 推荐通过改变工艺条件降低风险的方法。

15.2.5 操作和维护人员的职责

15.2.5.1 核实设备是否在设定的工艺操作条件的范围内工作。

15.2.5.2 按照检测人员提供的数据进行设备的维修和更新。

15.2.5.3 推荐执行工艺、设备更新及监控的建议。

15.2.6 管理者的职责

15.2.6.1 为 RBI 提供资源保证并进行监督。

15.2.6.2 做出风险管理的决策并为组内其他人员提供风险管理的框架和机理,使他们按照 RBI 评估的结果开展工作。

15.2.6.3 为降险措施的执行提供资源与后续系统。

15.2.7 风险评估人员的职责

15.2.7.1 集中全部数据进行 RBI 分析,其具体任务是:

- a) 确定其他小组成员应提供的数据;
- b) 确定数据的准确水平;
- c) 检查核实数据和假设的正确性;
- d) 将数据输入计算机程序、运行程序;
- e) 数据输入和输出的质量控制;
- f) 人工计算风险(如果不使用计算机程序);
- g) 将结果用可理解的方式显示出来,编制 RBI 评估报告。

15.2.7.2 必要时应进行风险-利润分析。

15.2.8 环境安全人员的职责

15.2.8.1 提供环境安全系统和有关法规的数据。

15.2.8.2 推荐降低失效后果的方法。

15.2.9 财务和营销人员的职责

15.2.9.1 提供开展 RBI 所需的费用及停工造成经济损失的数据。

15.2.9.2 推荐降低失效经济后果的方法。

15.3 RBI 的培训和资格

15.3.1 风险评估人员

15.3.1.1 风险评估人员应接受过 RBI 方法与实施程序的严格训练,掌握如何操作程序及影响最终评估结果的有关因素。

15.3.1.2 提供 RBI 风险评估服务的单位的技术负责人应接受过评估程序方面的培训,以保证所组织的 RBI 项目成员具备相应的资质和经验。

15.3.1.3 利用内部的风险评估人员实施 RBI 的设备所有者,应有相应的程序和方法保证其人员具备应有的资质。

15.3.1.4 应有风险评估人员的资质和培训记录。

15.3.2 小组其他成员

15.3.2.1 应接受 RBI 方法和评估程序的基本培训,以使小组其他成员正确理解和有效运用 RBI。

15.3.2.2 上述培训应由 RBI 小组内风险评估人员提供,也可由其他掌握 RBI 方法和程序的人员提供。

16 RBI 文件和记录的保存

16.1 概述

应记录 RBI 评估的全部数据。RBI 文件中应包含以下内容:

- a) 评估的类型;
- b) 实施评估的小组成员;
- c) 评估的进度安排;
- d) 基础数据的来源;
- e) 评估过程中做出的假设;
- f) 风险评估的结果(包括可能性和后果);
- g) 检验策略(如果运用这些策略,可以管理风险);
- h) 减缓后的风险水平(例如,实施风险减缓后的残余风险);
- i) 检验策略所参考的规范或标准。

16.2 RBI 方法

16.2.1 应记录实施 RBI 评估所采用的方法,以明确评估的类型。

16.2.2 应记录失效的概率和后果。

16.2.3 如果使用特定的软件执行评估,也应作记录和维护。

16.2.4 文件应完整,以方便对所作决定的基础和逻辑进行检查及复制。

16.3 RBI 执行人员

应记录 RBI 评估小组的全部成员。

16.4 时间安排

应记录 RBI 实施的时间安排。

16.5 风险评估的任务

各种输入都将用于评价失效的概率和后果,输入的信息至少包括以下几方面:

- a) 基本设备数据和检测历史,例如:操作条件、材料结构、工况、腐蚀速率、检测历史等;
- b) 明确的损伤机理;
- c) 判断损伤机理严重程度的标准;
- d) 预测的失效模式;
- e) 判断失效模式严重程度的主要参数;
- f) 判定各种后果类型的标准,包括安全、健康、环境和经济;
- g) 评定风险可接受准则的标准。

16.6 风险评估所作的假设

应清晰的记录 RBI 评估中所做出的各种假设,提高重新进行 RBI 评估和更新的能力。

16.7 风险评估的结果

文件中应记录可能性、后果风险的结果。

16.8 降险措施与结果

文件中应记录实施的降险措施、方法、过程、人员以及实施降险措施的结果。

16.9 法律、规范和标准

当法律、规范允许时,RBI 可以作为替代常规固定周期检验的一种选择,按本标准的要求实施。RBI 的实施过程,应当满足相关法律、规范的要求和规定。

附录 A
(资料性附录)
炼油厂固定设备腐蚀机理

表 A.1~A.4 分别给出了炼油厂固定设备(包括管线)四种失效模式下可能存在的主要腐蚀机理。

表 A.1 减薄

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
盐酸腐蚀	引起碳钢和低合金钢的局部腐蚀,尤其是“露点”部位(<204℃)。奥氏体不锈钢受到点蚀和缝隙腐蚀。在有氧化剂的条件下,可加速镍合金腐蚀	局部	盐酸百分含量、pH值、材料结构、温度	常压塔塔顶、加氢处理排出液、催化重整排出液及再生系统
电化学腐蚀	两种金属连接处浸入电解质液中时发生。	局部	连接的金属材料,间距	海水和一些冷却水系统
硫酸腐蚀	强酸引起各种金属材料的腐蚀,取决于很多因素	局部	酸百分含量、pH值、材料、温度、速度、氧化剂等	硫酸烷基化单元、除盐水
氢氟酸腐蚀	强酸引起各种金属材料的腐蚀	局部	酸百分含量、pH值、材料、温度、速度、氧化剂等	氟烷基化单元,除盐水
磷酸腐蚀	弱酸引起金属腐蚀。通常是在水处理中为抑制生物腐蚀而加入的	局部	酸百分含量、pH值、材料、材料、温度	水处理单元
苯酚(石碳酸)腐蚀	弱酸引起的各种金属腐蚀和损失	局部	酸百分含量、pH值、材料、材料、温度	重油和脱蜡装置
大气腐蚀	腐蚀工艺通常发生在大气中,碳钢转换为 Fe ₂ O ₃	均匀腐蚀	氧气的分压、温度范围和湿度	高温工艺下,使用无保护层的碳钢很容易发生(如蒸汽管)
保温层下腐蚀(CUI)	CUI是大气腐蚀的一种典型情况。温度、湿度较高和保温材料中残余的腐蚀性物质很容易形成腐蚀性环境	通常高度集中	氧气的分压、温度范围和湿度、保温材料内的腐蚀性成分	保温的管道和容器
土壤腐蚀	与土壤接触的金属会发生腐蚀	局部腐蚀	材料、土壤特性、涂层类型	罐的底部,埋地管线
高温硫化物腐蚀(不含 H ₂)	腐蚀工艺类似于大气腐蚀。在这种情况下,碳钢转化为硫化亚铁。转化速度取决于操作温度和硫的浓度	通常均匀腐蚀	硫的浓度和温度	温度超过 232℃;硫的含量超过 0.2%的部位。在蒸馏、焦化设备,FCC和加氢单元
高温硫化物腐蚀(含 H ₂)	含有 H ₂ ,更容易产生硫化腐蚀	通常均匀腐蚀	硫和氢的浓度、温度	温度超过 232℃;硫的含量超过 0.2%的部位。加氢处理单元在 H ₂ 混合点后、反应器、反应器流出物系统(换热器、加热器分离器和管道)等

表 A.1 (续)

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
环烷酸腐蚀	环烷酸腐蚀是有机酸对合金钢进行的腐蚀。温度 177 ℃ 到 399 ℃ 范围。原料中环烷酸可用 KOH 中和数值表示	局部腐蚀	环烷/有机酸的浓度和温度	蒸馏单元减压塔的中间部分,在常压蒸馏单元、炉子和转油管线也会发生
氧化	一定温度下发生高温腐蚀,反应将金属转化为金属氧化物	均匀腐蚀	温度、存在的空气、材料	炉管的外侧,炉管架,其他暴露在烟气中的管架
冷却水腐蚀	由溶解盐、气体、有机化合物或微生物活动引起的碳钢和其他金属的腐蚀	全面或局部腐蚀	温度、水质、氧含量和流速	所有用冷却水的设备
锅炉冷凝水腐蚀	锅炉系统和冷凝水回水管道上的	全面腐蚀和点蚀	溶解的气体、氧气、二氧化碳	蒸汽发生系统和冷凝水回水系统,透平冷凝水系统
烟气露点腐蚀	燃料中硫和氯类物质在燃烧中形成二氧化硫、三氧化硫和氯化氢在低温下遇水蒸气形成亚硫酸和盐酸	局部腐蚀	三氧化硫或氯化氢的浓度,金属表面温度	燃烧含硫或氯的燃料的炼油厂加热炉和锅炉,燃气透平
碱性腐蚀	苛性盐或碱性盐的浓缩引起的局部腐蚀通常在蒸发或高传热条件下发生	局部	碱性溶液浓度和温度	碱洗脱硫单元,工艺防腐的碱注入入口,局部碱浓缩部位
石墨腐蚀	铁基体被腐蚀、留下腐蚀产物和多孔石墨的脱合金腐蚀形式	不明显	合金的组成和温度、通气程度、pH 值和暴露时间等	地下管道以及锅炉给水设备,消防水系统
二硫化铵腐蚀(碱性酸性水)	加氢反应流出物系统和处理碱性酸性水装置中的侵蚀性腐蚀	局部	NH ₄ HS 浓度、速度和/或局部紊流、pH 值、温度、合金组成	加氢装置,FCC、胺处理、焦化装置、酸性水处理装置
氯化铵腐蚀	氯和氨在一定温度下结晶,形成垢下腐蚀和吸潮后的低 pH 值腐蚀	全面或局部腐蚀	浓度、温度和水	加氢和催化重整装置反应流出物系统,FCC 和焦化分馏塔,蒸馏塔顶系统
酸性水腐蚀(酸性)	由 pH 值介于 4.5 和 7.0 之间含有硫化氢的酸性酸水引起的钢腐蚀。也可能含有二氧化碳(CO ₂)	全面或局部腐蚀	硫化氢含量、pH 值、温度、速度和氧浓度	高硫化氢含量和低氨含量的 FCC 和焦化气体分馏装置的塔顶系统,丙烷脱沥青装置溶剂罐
冲蚀/冲蚀腐蚀	固体、液体、蒸汽或其任何组合之间的相对运动的结果而产生的材料表面的机械损耗	局部	冲击材料、速度、浓度、被冲击材料的性能,耐腐蚀保护膜性质	管道、各种阀、泵、搅拌器、加氢反应器流出物系统,蒸馏装置减压塔环烷酸腐蚀

表 A.1 (续)

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
燃灰腐蚀	燃灰在金属表面沉积和熔化使材料加速高温腐蚀	局部	污染物的熔盐浓度、金属温度和合金组成	燃油的加热炉、锅炉、燃气透平
二氧化碳腐蚀	二氧化碳溶于水变成碳酸后具有腐蚀性。碳酸对碳钢和低合金钢的腐蚀是个电化学的工艺,包括正极铁的溶解和负极氢的产生。反应伴随 FeC 化和(或)Fe ₃ O ₄ 膜的形成,它能否起到保护作用由条件决定	局部	二氧化碳的浓度和工艺条件	炼油厂蒸汽凝结系统,催化裂化装置中的临氢设备和气体回收单元
胺腐蚀	溶解的酸性气体(二氧化碳和硫化氢)、胺降解产物、耐热胺盐(HSAS)和其他污染物引起	均匀和局部腐蚀	设计和运行规程、胺种类和浓度、污染物、温度和速度	胺处理装置再生塔再沸器,管线
微生物引起的腐蚀	活性有机体如细菌、藻类或真菌导致的腐蚀形式	局部	有细菌,水,缺氧,营养物和工艺污染物	换热器、储罐的底层水,消防水系统

表 A.2 应力腐蚀开裂

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
氯化物开裂	开裂会从奥氏体不锈钢设备的内部或外部开始,主要是由于制造应力和残余应力。一些应用应力也会引起开裂	晶内开裂	酸的浓度、pH 值、材料、温度、制造、接近屈服应力	外部开裂出现在保温和湿气氛,暴露在火和水中的设备等。内部开裂出现在氯和水同时存在的地方
腐蚀开裂	开裂主要从碳钢设备的内部开始,由制造和残余应力造成	晶间开裂或晶内开裂	腐蚀性物质的浓度、pH 值、材料、温度、应力	腐蚀性物质处理单元、脱硫醇处理、蒸馏装置进料预热和脱盐、污水处理、蒸汽系统
连多硫酸腐蚀	敏化的奥氏体不锈钢在湿的连多硫酸环境下开裂。连多硫酸是由 FeS 遇到水和氧气转化而来	晶间开裂	材料敏感微观结构、水、连多硫酸	通常发生在催化裂化反应器、燃气系统、脱硫炉和氢处理单元
胺开裂	胺用于气体处理,清除溶解酸性气体中的 CO ₂ 和 H ₂ S。开裂通常是由吸收的酸性气体和胺的破坏性产物造成的	晶间开裂	胺的类型和浓度、材料、温度、应力	胺处理单元
氨开裂	碳钢和耐酸黄铜的开裂	碳钢晶间开裂,铜合金晶内开裂	材料结构,温度和应力	通常出现在氨生产和处理单元,例如以氨作中和剂的浓缩

表 A.2 (续)

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
氢应力开裂——HF(氢氟酸)	暴露于氢氟酸水溶液环境中腐蚀产生的氢原子加入钢中在高残余应力部位开裂	晶间开裂	钢硬度、强度和应力	与氢氟酸接触的管道、设备,螺栓和压缩机部件
氢致开裂与应力导致开裂	碳钢和低合金钢遇到水和 H ₂ S 时发生。因腐蚀产生的氢原子扩散到材料中形成氢分子。材料退化的形式是起泡或材料分层应力开裂	平面开裂,近焊缝时晶内开裂	H ₂ S 的浓度、水温度、pH 值、材料的结构	在水和 H ₂ S 同时出现的地方,如蒸馏、催化裂化与气体回收、加氢处理、污水和焦化单元
碳酸盐应力腐蚀开裂	在含有碳酸盐的系统中在拉伸应力和腐蚀的共同作用下发生于碳钢焊缝邻近	晶间开裂	水相中硫化氢浓度为 50 wppm 或更大且 pH 值为 7.6 以上和含碳酸	FCC 分馏塔顶系统,制氢装置二氧化碳去除设施,酸性水处理系统
硝酸盐应力腐蚀开裂	在含有碳酸盐、硫化氢及 NO _x 的系统中在拉伸应力和腐蚀的共同作用下发生于碳钢焊缝邻近	晶间开裂	水相中硫化氢浓度为 50 wppm 或更大且 pH 值为 7.6 以上和含碳酸、NO _x	FCC 再生系统,特别是再生器壁温低于烟气露点温度的部位
腐蚀疲劳	裂纹在周期载荷和腐蚀的共同作用下扩展	晶内开裂	材料、腐蚀性环境、周期应力和应力集中点	旋转设备、脱气塔,腐蚀性环境中受到周期应力作用的任何设备
碱应力腐蚀开裂	暴露于苛性碱的管道和设备上的应力腐蚀开裂	碳钢是晶间,不锈钢是晶内	碱浓度、金属温度和应力水平	碱洗脱硫单元,工艺防腐的碱注入入口,局部碱浓缩部位
氢脆	原子氢渗入而引起的高强度钢的延展性损失可导致脆性开裂	晶间、晶内	氢溶于钢中、材料与金相组织和残余应力	未消除应力的湿硫化氢环境,高强度钢的球罐,螺栓,加氢反应器

表 A.3 材质劣化

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
高温氢侵蚀	碳钢和低合金钢遇到高温氢在高温(>260 °C)下,氢扩散进材料,与钢中的碳反应,产生甲烷气体沿晶格边界形成裂纹。	晶间裂纹开裂,脱碳	材料、氢的分压、温度、工作的时间	发生在加氢脱硫、加氢裂化、加氢重整和制氢单元的反应部分
晶粒增长	在钢受热到一定温度以上时发生晶粒增长。碳钢从 593 °C 开始,大部分从 732 °C 开始,奥氏体不锈钢和镍铬合金在 899 °C 开始	局部	最高温度、最高温度的时间、材料	炉管失效,火灾损坏的设备

表 A.3 (续)

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
石墨化	由于长期暴露在 440 ℃~760 ℃ 范围内,珠光体颗粒分解成铁素体颗粒和石墨	局部	材料、暴露的时间和温度	FCC 反应器
6 相脆化	奥氏体不锈钢和其他铬含量超过 17% 的不锈钢在较长时间暴露在 538 ℃~816 ℃ 范围内	无显著特点	材料、暴露的时间和温度	铸造炉管和部件, FCC 中的再生器旋风
475 ℃ 脆断	发生在铁素体不锈钢中。在 343 ℃~538 ℃ 时老化,降低这一温度延展性	无显著特点	材料、暴露的时间和温度	复合钢板设备,停工检修期的塔盘
回火脆化	低合金钢长期维持在 371 ℃~566 ℃ 范围内。操作温度下强度没有明显变化。当回到环境温度时,能引起脆性断裂	无显著特点	材料、暴露的时间和温度	在停工和启动阶段,老的炼油厂可能会出现这样的问题,因为它有足够长的操作时间。加氢处理和加氢裂化可能发生此类问题
液态金属脆化	普通延展性的金属与液态金属接触并受到拉伸应力时形成灾难性脆断。例子包括不锈钢与锌的结合和铜合金与汞的结合	局部	金属结构,拉伸应力,遇到的液态金属	原油中汞,在蒸馏工艺中在某些设备(如冷凝器的管道)低点位浓缩和聚集。由于汞进入炼油系统导致的工艺设备的失效
渗碳	高温下碳向金属内扩散。碳含量的增加,会导致铁素体钢和一些不锈钢的硬化。冷却渗碳钢,结构会变脆	局部	材料结构,温度和暴露的时间	有焦炭沉积的炉管是渗碳的一个很好代表
脱碳	受热介质与金属中的碳发生反应,使铁合金表面失去碳	局部	材料结构,环境温度	碳钢炉管。过度加热
金属粉化	渗碳钢在 482 ℃~816 ℃;温度下处于氢、甲烷、CO、CO ₂ 以及轻质轻的混合物中的金属损失	局部	温度,工艺流的成分	脱氢单元,燃烧加热炉,焦化加热炉、裂化单元和气体涡轮机
渗氮	暴露于含有高含量的氮化合物的高温工艺流体,材料形成硬而脆的表面层	不明显	温度、时间、氮气和金属成分	甲烷重整装置、过热蒸汽裂解和合成氨装置
脱金属腐蚀	多相合金的一个相优先损失	局部	工艺流的特点,材料	水冷系统中的耐酸管道
钛氢化	氢扩散到钛中并发生化学反应形成脆性氢化物相。这可导致延展性完全丧失	不明显	金属温度、溶液化学和合金组成。电偶腐蚀环境	钛材料的冷凝器、换热器,换热器和空冷的钛衬管,钛材料表面的铁污染
软化(球化)	440 ℃~760 ℃ 的温度范围内钢的微观组织的一种变化	不明显	金属化学、微观组织、曝露时间和温度	FCC、焦化和重整装置的管道和设备

表 A.3 (续)

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
应变老化	中间温度下变形和碳钢材料老化的共同作用,强度增加,韧性降低	不明显	钢的组成及制造工艺	未经过消除应力的敏感材料制成的厚壁容器
异金属焊缝开裂	奥氏体钢不锈钢和铁素体材料的连接焊缝	焊脚裂纹	填充金属类型、加热与冷却速率、金属温度、带温时间、焊缝几何形状	炉管、加氢换热器接管管的焊缝
再热裂纹	焊后热处理期间因拉应力引起的金属的开裂,常见于厚壁断面	晶间开裂	材料类型、晶粒大小、残余应力、断面厚度、应力集中点	高约束区,包括接管焊缝和厚壁管的厚壁容器

表 A.4 机械损伤

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
机械疲劳	承受的循环应力超过材料的承受极限,导致部件的开裂	局部	循环应力的等级,材料结构	泵和压缩机的往复部件,旋转设备的轴和相连的管,回转减震器等旋转设备
机械损伤	典型的例子是设备和工具的误用,风的破坏,设备运输和安装时的疏忽大意	N/A	设备的设计、操作规程	边缘面和机械座的表面没受到表面保护和处理不当时受到损坏
超压	压力超过设备允许的最大的工作压力	N/A	设备的设计、操作规程	工艺条件紊乱造成过热导致超压;设备偏离设计的工艺压力
过载	载荷超过设备允许的最大载荷时发生	N/A	设备的设计、操作规程	水压试验时会因施加的重量过大时支撑结构超载,热膨胀和收缩会产生超载问题
脆断	低韧性和低冲击强度的钢的延展性降低	局部	材料结构、温度	缺乏预防措施时给设备增压。低温下
蠕变	高温设备的承受应力低于其屈服应力时,发生连续的塑性变形	局部	材料结构、温度和施加的应力	炉管
应力断裂	在高温下,施加的应力低于屈服时金属失效的时间	局部	材料结构、温度和施加的应力,暴露的时间	炉管
热震动	设备在短时间内受到大而不一的热应力的作用,造成微小的膨胀和收缩,由此引起热震动。如果设备的运动对热震动作了限制,应力会在超过屈服强度	局部	设备的设计,操作规程	伴随流体偶尔中断,或出现在燃烧中

表 A.4 (续)

损伤机理	描述	性质	关键变量	例子
热疲劳	热疲劳是温度的循环变化引起材料应力的循环变化	局部	设备设计, 操作规程	焦碳塔受到循环热产生热疲劳裂纹。设备上的旁通阀和带有很强的加强圈的管道, 在循环温度下工作, 也容易产生热疲劳
耐火材料退化	耐火材料对各种形式的机械损伤、氧化、硫化	局部	耐火材料选择、设计及安装, 锚固材料	FCC 再反系统、冷壁反应器、锅炉、加热炉
振动引起的疲劳	因振动、水锤或不稳定流体流动而引起的动态载荷作用	局部	振动的幅度和频率及部件抗疲劳能力	旋转和往复式设备、安全阀、降压阀附近管线, 换热器管
腐蚀疲劳	腐蚀工艺, 特别是点蚀加速了机械疲劳的进展	局部	循环应力。材料的结构, 介质引起的点蚀可能性	蒸汽炉的顶盖, 锅炉的炉管
汽蚀	液体中蒸汽泡的快速形成和破裂, 引起金属表面压力的波动, 从而引起汽蚀	局部	介质的压力	泵的叶轮背部, 泵的弯曲部位
短时过热	局部过热, 在相对低应力水平下发生永久性变形	鱼嘴型开裂	温度、时间及应力	锅炉和加热炉的火焰冲击, FCC 和硫回收装置耐火材料损坏
热冲击	短时间高的热应力, 由于膨胀或收缩受阻, 材料产生变形	发丝裂纹	温差大小和材料的热膨胀系数	FCC 和焦化装置, 其他装置的设备 and 管道
蒸汽阻滞	蒸汽发生设备在运行时热通量和流体流量的平衡破坏, 形成的蒸汽毯造成金属温度升高	开式破裂	热通量和流体流量的平衡	所有蒸汽发生装置

参 考 文 献

- [1] SY/T 6230—1997 石油天然气加工工艺危害管理
 - [2] SY/T 6507—2000 压力容器检验规范维护检验、定级、修理和改造
 - [3] SY/T 6552—2003 石油工业在用压力容器检验的推荐作法
 - [4] SY/T 6553—2003 管道检验规范在用管道系统检验、修理、改造和再定级
 - [5] SY/T 6620—2005 油罐检验、修理、改建和翻建
 - [6] SY/T 6653—2006 基于风险的检查(RBI)推荐作法
 - [7] API 510 Pressure Vessel Inspection Code—Inspection, Repair, Alteration, and Aerating
 - [8] API 570 Piping Inspection Code—Inspection, Repair, Aleration, and Aerating of In—
Service Piping Systems
 - [9] API RP 571 Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry
 - [10] API RP 579 Fitness-For-Servic
 - [11] API RP 580 Risk-based Inspection
 - [12] API Std. 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction
 - [13] API RP 750 Management of Process Hazards
 - [14] API RP 752 Management of Hazards Associated With Location of Process Plant Build-
ings
 - [15] API RP 939C Guidelines for Avoiding Sulfidation (Sulfidic) Corrosion Failures in OilRe-
fineries
 - [16] API RP 941 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Pe-
troleum Refineries and Petrochemical Plants
-