



中华人民共和国国家标准

GB/T 30578—2025

代替 GB/T 30578—2014

常压储罐基于风险的检验及评价

Risk-based inspection and evaluation for
atmospheric pressure storage tanks

2025-08-01 发布

2025-11-01 实施

国家市场监督管理总局
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、定义和符号 1

4 一般要求 2

5 风险分析 2

6 检验策略制定 5

7 检验策略实施 9

附录 A（规范性） 减薄损伤因子 10

附录 B（规范性） 确定常压储罐底板腐蚀速率的经验方法 16

附录 C（规范性） 失效后果定量计算过程 22

附录 D（资料性） 常压储罐的检验及结果评价 32

参考文献 38



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。

本文件代替 GB/T 30578—2014《常压储罐基于风险的检验及评价》，与 GB/T 30578—2014 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 增加了术语和定义(见 3.1)；
- b) 增加了风险数值对应的风险矩阵图(见 5.1)；
- c) 增加了损伤系数计算结果确定的失效可能性等级划分(见 5.3.2)；
- d) 更改了基于风险的检验中的一般规定(见第 6 章,2014 年版的第 6 章)；
- e) 更改了基于风险的检验中的检验类型及选择原则(见第 6 章,2014 年版的第 6 章)；
- f) 增加了检测方法及检验有效性(见表 5)；
- g) 更改了腐蚀减薄的检验有效性分级及其检验方法(见 6.5.2.4,2014 年版的 6.5.2.4)；
- h) 更改了评估腐蚀速率的基本假设(见 A.3,2014 年版的 A.3)；
- i) 更改了土壤状况调整系数(见表 B.4,2014 年版的表 B.4)；
- j) 增加了不锈钢材料土壤侧温度调整系数(见表 B.9)；
- k) 更改了碳钢和低合金钢介质侧温度调整系数表中介质侧温度划分范围，增加了不锈钢介质侧温度调整系数(见表 B.12,2014 年版的表 B.12)；
- l) 增加了失效后果定量计算基本假设(见 C.1)；
- m) 更改了部分符号的定义(见 C.2,2014 年版的 C.1)。

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。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、国机特种设备检验有限公司、镇海国家石油储备基地有限责任公司、中国石油天然气集团有限公司商业储备油分公司、中国石化集团石油商业储备有限公司、中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司、江苏省特种设备安全监督检验研究院、南京市锅炉压力容器检验研究院、中国石化海南炼化化工有限公司、中国安全生产科学研究院、上海市特种设备监督检验技术研究院、宁波市特种设备检验研究院、中国石化销售股份有限公司江苏石油分公司、安徽华夏高科技开发有限责任公司、中特检验集团有限公司。

本文件主要起草人：李光海、石秀山、贾国栋、闫河、邵珊珊、王伟华、陈炜、周文祥、邢述、王十、陈中官、王金龙、巫红军、吴军、于永亮、安永明、史何秋、都亮、褚云、宋盼、陈虎、林远龙、朱军山、赵世佳、张登宇、韩利哲、陈彦泽、李寰、郭洪、谢晓东。

本文件于 2014 年首次发布，本次为第一次修订。

常压储罐基于风险的检验及评价

1 范围

本文件描述了立式圆筒形钢制焊接常压储罐基于风险的检验和评价的方法。

本文件适用于立式圆筒形钢制焊接常压储罐基于风险的检验和评价。其他常压或低压(工作压力小于 0.1 MPa)储罐基于风险的检验和评价可参照本文件执行。

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 26610.1	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
GB/T 26610.2	承压设备系统基于风险的检验实施导则	第 2 部分:基于风险的检验策略
GB/T 26610.4	承压设备系统基于风险的检验实施导则	第 4 部分:失效可能性定量分析方法
GB/T 26610.5	承压设备系统基于风险的检验实施导则	第 5 部分:失效后果定量分析方法

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 26610.1、GB/T 26610.2 和 GB/T 26610.5 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

开罐检验 off-line inspection

清空罐内介质后对储罐内外部实施的检验。

3.1.2

在线检验 on-line inspection

在不清除罐内介质的情况下对储罐实施的检验。

3.1.3

合于使用评价 fitness-for-service assessment

对含有超标缺陷或不满足标准相关要求的储罐或其部件进行评价,以判定其是否可以继续服役的过程。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

$C(t)$ ——失效后果。

$D_{f-total}$ ——总损伤系数,即各损伤因子之和。

D_{f-gov}^{brit} ——脆性断裂损伤因子。

D_f^{elin} ——衬里破坏次因子。

D_{f-gov}^{extd} ——外部损伤因子。

D_{f-gov}^{sec} ——应力腐蚀开裂损伤因子。

D_{f-gov}^{thin} ——减薄损伤因子。

D_f^{thin} ——减薄次因子。

F_M ——管理系统评价系数。

F_G ——平均失效概率。

$F(t)$ ——失效概率。

$R(t)$ ——风险。

4 一般要求

4.1 常压储罐基于风险的检验是对储罐进行损伤机理分析和风险分析计算,并根据风险(或总损伤系数)的大小以及检验的有效性确定储罐的检验策略并予以实施的检验。

4.2 常压储罐的风险分析包括储罐壁板和底板的分析,检验时应增加顶板、附件及相关设施的检验。

4.3 常压储罐的介质、生产工艺发生改变,导致损伤机理和损伤速率发生变化时,应重新进行风险分析。

5 风险分析

5.1 风险定量计算

常压储罐的风险按公式(1)计算:

$$R(t) = F(t) \cdot C(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中,失效概率 $F(t)$ 按 5.3 要求计算,失效后果 $C(t)$ 按 5.4 要求计算。

风险可用数值或风险矩阵图(见图 1)表达。

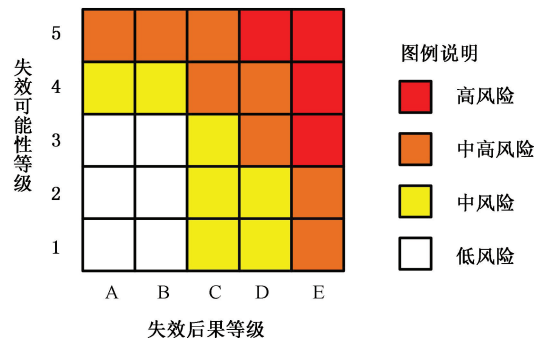


图 1 风险矩阵

5.2 风险定量计算所需基础数据

5.2.1 失效概率定量计算所需基础数据应包括以下内容:

- 储罐(包括涂层、保温和衬里)投用、修理、改造日期;
- 储罐涂层、保温和衬里施工质量,以及环境的温度和湿度等;
- 储罐的操作压力、操作温度;
- 储罐中存在的工艺介质种类(包括罐底水层)、各工艺介质的相对含量(包括腐蚀介质);
- 储罐各层壁板和底板的建造材料、名义厚度;
- 储罐建造热处理工艺;

- g) 储罐底板类型、衬垫类型、阴极保护类型、土壤电阻率、排放雨水能力；
- h) 储罐切水设施以及是否安装加热设施等；
- i) 储罐历次检验数据；
- j) 储罐建造、修理、改造所使用的文件和日常巡检发现的问题；
- k) 储罐泄漏探测系统的类型。

5.2.2 失效后果定量计算所需基础数据应包括以下内容：

- a) 储罐系统工艺操作规程、工艺流程图(PFD)、管道及仪表流程图(PID)；
- b) 储罐系统中的泄漏探测系统、隔离系统、减缓系统信息资料；
- c) 储罐的规格参数(直径、高度、容积等)；
- d) 储罐的操作压力、操作温度；
- e) 储罐中存在的工艺介质种类、各工艺介质的相对含量；
- f) 储罐的经济相关数据；
- g) 围堰的容积；
- h) 泄漏探测时间；
- i) 距地下水的距离；
- j) 公共安全与健康的影响。

5.3 失效概率

5.3.1 失效概率计算

在常压储罐失效可能性定量计算中,其失效概率,即失效可能性,按公式(2)计算：

$$F(t)=D_{f-total} \cdot F_G \cdot F_M \dots\dots\dots (2)$$

式中,总损伤系数 $D_{f-total}$ 按 5.3.3 要求计算,平均失效概率 F_G 按 5.3.4 要求选取,管理系统评价系数 F_M 按 GB/T 26610.4 规定计算。

5.3.2 失效可能性等级的划分

常压储罐的失效可能性等级按表 1 的失效概率 $F(t)$ 或总损伤系数 $D_{f-total}$ 确定。当两者不一致时,取失效可能性等级较大者。

表 1 失效可能性等级划分

失效可能性等级	失效概率 $F(t)$	总损伤系数 $D_{f-total}$
1	$0.000\ 00<F(t)\leqslant0.00\ 001$	$0<D_{f-total}\leqslant1$
2	$0.000\ 01<F(t)\leqslant0.000\ 10$	$1<D_{f-total}\leqslant10$
3	$0.000\ 10<F(t)\leqslant0.001\ 00$	$10<D_{f-total}\leqslant100$
4	$0.001\ 00<F(t)\leqslant0.010\ 00$	$100<D_{f-total}\leqslant1\ 000$
5	$0.010\ 00<F(t)\leqslant1.000\ 00$	$D_{f-total}>1\ 000$

5.3.3 损伤系数

5.3.3.1 四种常用损伤因子

常压储罐损伤系数是与储罐使用时间和检验有效性(包括检验次数)相关的函数,其计算宜考虑以

下四种损伤因子：

- a) 减薄损伤因子 D_{f-gov}^{thin} ；
- b) 外部损伤因子 D_{f-gov}^{extd} ；
- c) 应力腐蚀开裂损伤因子 D_{f-gov}^{scc} ；
- d) 脆性断裂损伤因子 D_{f-gov}^{brit} 。

5.3.3.2 总损伤系数 $D_{f-total}$

只存在一种损伤机理时，总损伤系数 $D_{f-total}$ 为该损伤因子的值；存在多种损伤机理时，总损伤系数 $D_{f-total}$ 按照以下原则确定：

- a) 局部减薄时，总损伤系数 $D_{f-total}$ 可按公式(3)计算：

$$D_{f-total} = \max\{D_{f-gov}^{thin}, D_{f-gov}^{extd}\} + D_{f-gov}^{scc} + D_{f-gov}^{brit} \quad \dots\dots\dots (3)$$

- b) 均匀减薄时，总损伤系数 $D_{f-total}$ 可按公式(4)计算：

$$D_{f-total} = D_{f-gov}^{thin} + D_{f-gov}^{extd} + D_{f-gov}^{scc} + D_{f-gov}^{brit} \quad \dots\dots\dots (4)$$

由公式(3)或公式(4)确定总损伤系数 $D_{f-total}$ 时，如果某个损伤因子小于或等于 1，则该损伤因子取 0。

如果总损伤系数 $D_{f-total}$ 计算结果小于或等于 1，则总损伤系数 $D_{f-total}$ 取 1。

5.3.3.3 各损伤因子的确定方法

5.3.3.3.1 减薄损伤因子 D_{f-gov}^{thin} 与衬里破坏次因子 D_f^{elin} 和减薄次因子 D_f^{thin} 相关，按公式(5)或公式(6)计算：

- a) 内部有衬里时：

$$D_{f-gov}^{thin} = \min\{D_f^{thin}, D_f^{elin}\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

- b) 内部无衬里时：

$$D_{f-gov}^{thin} = D_f^{thin} \quad \dots\dots\dots (6)$$

其中，减薄次因子 D_f^{thin} 按附录 A 计算，计算过程中涉及储罐底板腐蚀速率按附录 B 计算，衬里破坏次因子 D_f^{elin} 按 GB/T 26610.4 要求计算。

5.3.3.3.2 应力腐蚀开裂损伤因子 D_{f-gov}^{scc} 按 GB/T 26610.4 要求计算。

5.3.3.3.3 外部损伤因子 D_{f-gov}^{extd} 按 GB/T 26610.4 要求计算。

5.3.3.3.4 脆性断裂损伤因子 D_{f-gov}^{brit} 按 GB/T 26610.4 要求计算。

5.3.4 平均失效概率

常压储罐底板和壁板的平均失效概率为小、中、大三种泄漏孔和破裂共四种损坏形式出现的概率，按照表 2 选取。表 2 中四种损坏形式的尺寸范围和介质泄漏分析计算所采用的标准尺寸见附录 C 中 C.4。

表 2 推荐的常压储罐平均失效概率

常压储罐部件	不同尺寸的泄漏孔和破裂的平均失效概率(F_G)			
	小($F_{G,1}$)	中($F_{G,2}$)	大($F_{G,3}$)	破裂($F_{G,4}$)
底板	7.20×10^{-4}	0	0	2.00×10^{-6}
壁板	7.00×10^{-5}	2.50×10^{-5}	5.00×10^{-6}	1.00×10^{-7}

5.4 失效后果

5.4.1 失效后果计算

失效后果定量计算按照附录 C 进行,应包括以下过程:

- a) 选取泄漏代表性介质及其物性;
- b) 选择泄漏孔尺寸;
- c) 计算理论泄漏速率;
- d) 估算泄漏总量;
- e) 确定泄漏类型;
- f) 估算检测和隔离系统对泄漏量的影响;
- g) 确定最终的泄漏速率和泄漏量;
- h) 计算失效后果。

5.4.2 失效后果等级划分

失效后果等级划分见表 3。

表 3 失效后果等级划分

单位为万元

失效后果等级	失效经济后果 $C(t)$ 范围
A	$C(t) \leq Q$
B	$Q < C(t) \leq 10Q$
C	$10Q < C(t) \leq 100Q$
D	$100Q < C(t) \leq 1\,000Q$
E	$C(t) > 1\,000Q$
注: Q 为失效后果可接受水平的基准值,由使用单位根据其失效后果的承受能力确定。	

6 检验策略制定

6.1 一般规定

6.1.1 确定常压储罐的风险时,应综合分析评价储罐壁板和底板的风险,以最大风险确定储罐的风险等级,按不同部件分别确定检验内容和方法。

6.1.2 检验策略的制定应以控制储罐的风险(或总损伤系数)可接受为目标,重点关注潜在的损伤模式及其损伤速率。

6.1.3 检验策略的内容应包括检验时间、检验类型、检测方法及其检验有效性。

6.1.4 储罐壁板和底板的检验策略应分别制定。

6.1.5 根据不同的损伤机理选择相应的检验内容和方法时,应选择合理的检验有效性,降低检验成本。

6.2 风险或总损伤系数的可接受水平

6.2.1 风险的可接受水平由使用单位根据自身情况确定,同时考虑政府关于人员安全、环境保护的基本要求和使用的社会责任。当定量计算出的风险达到或接近使用单位可接受水平时,应实施检验。

6.2.2 使用单位可将总损伤系数作为是否实施检验的依据,当储罐的总损伤系数达到或接近目标值时,可对储罐实施检验。使用单位可根据自身情况设定总损伤系数目标值,一般情况下,常压储罐的总损伤系数目标值不宜大于 415。

6.2.3 对于以失效后果为主导的储罐,应提供额外的风险控制措施。

6.3 检验时间

储罐检验时间的确定应以在预计的下次停运检修时间点,储罐的风险位于可接受水平之下为目标:

- a) 风险评估时,储罐的风险或总损伤系数已经达到或超过使用单位可接受水平,应立即实施检验;
- b) 风险评估时,储罐的风险或总损伤系数未达到使用单位可接受水平,还应计算储罐的风险或总损伤系数达到使用单位可接受水平的时间点,下次检验时间设在该时间点之前。

6.4 检验类型及其选择原则

6.4.1 储罐检验类型包括:

- a) 开罐检验;
- b) 在线检验。

6.4.2 储罐检验类型选择的原则:

- a) 储罐检验类型应根据储罐的损伤机理、损伤部位及现场适宜的检验检测方法选择;
- b) 储罐检验类型应根据检验检测方法的有效性能否将风险或总损伤系数降低至预期水平选择。

6.5 检验检测方法和检验有效性

6.5.1 检验检测方法

6.5.1.1 根据储罐潜在的损伤机理确定检验检测部位和方法,检验检测部位应选择损伤可能发生的最严重区域,检验检测方法要考虑针对损伤机理的检验有效性。

6.5.1.2 首次检验时,检验内容不仅包括使用环境下可能发生的损伤检验,还应补充对制造、施工质量的检验抽查。

6.5.2 检验有效性

6.5.2.1 检验有效性分为 5 个级别,见表 4。检测方法对于不同缺陷的检验有效性见表 5。

表 4 检验有效性分级

检验有效性级别	描 述
高度有效(A)	几乎每种情况下检验检测方法都能够正确识别实际损伤状态(置信度(80%~100%])
中高度有效(B)	大多数情况下检验检测方法都能够正确识别实际损伤状态(置信度(60%~80%])
中度有效(C)	有一半情况下检验检测方法都能够正确识别实际损伤状态(置信度(40%~60%])
低度有效(D)	检验检测方法仅能提供少量信息来正确识别实际损伤状态(置信度(20%~40%])
无效(E)	检验检测方法不能或几乎不能提供信息来正确识别实际损伤状态,在检测特定损伤机理上是无效的(置信度(0~20%])

表 5 检测方法及其检验有效性

检测方法	损伤形态								
	局部 减薄	均匀 减薄	点蚀/ 孔腐蚀	表面 裂纹	近表面 裂纹	埋藏 裂纹	微裂纹 /微孔	尺寸 变化	衬里 脱落
目视检测	1,2,3	3,×	1,2,3	3,×	×	×	×	1,2,3	1,2,3
纵波超声检测	1,2,3	1,2,3	3,×	×	×	3,×	2,3	×	×
横波超声检测	×	×	×	2,3 ^a	1,2,3 ^a	2,3 ^a	2,3	×	×
衍射时差法超声检测	×	×	2,3 ^a	2,3 ^a	2,3 ^a	2,3 ^a	×	×	×
电磁超声测厚	2,3	1,2,3	×	×	×	×	×	×	×
相控阵检测	×	×	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	×	×	×
射线检测	1,2,3	1,2,3	1,2,3	3,×	3,×	3,×	×	×	×
磁粉检测	×	×	×	1,2	3,×	×	×	×	×
渗透检测	×	×	×	1,2,3	×	×	×	×	×
声发射检测(低频)	2,3	3	×	3 ^b	3 ^b	3 ^b	3,×	×	×
声发射检测(高频)	3,×	×	×	2,3 ^b	2,3 ^b	2,3 ^b	2,3	×	×
脉冲涡流测厚	2,3	2,3	1,2	×	×	×	×	×	×
低频涡流检测	1,2	2,3	×	1,2	1,2	×	3,×	×	×
漏磁检测	1,2	1,2	3,×	×	3,×	×	×	×	×
尺寸测量	1,2,3	1,2,3	3,×	×	×	×	×	1,2	×
超声导波检测	2,3	×	×	×	×	×	×	×	×
注：1 为高度有效(A),2 为中高度有效(B),3 为中度有效(C),× 为低度有效(D)或无效(E)。 ^a 应用时应注意扫查盲区的大小和方位。 ^b 仅对活动性缺陷。									

6.5.2.2 确定储罐检验有效性级别需要考虑以下因素：

- a) 储罐的结构类型；
- b) 储罐的检验类型；
- c) 损伤模式及失效模式；
- d) 损伤速率或敏感性；

- e) 检测方法和频次；
 - f) 受检区域的可检程度。
- 6.5.2.3 检验有效性级别的选取原则如下：
- a) 对于高风险的储罐，采用的检验方法其检验有效性级别不应低于中高度有效(B)；
 - b) 对于中高风险和中风险的储罐，采用的检验方法其检验有效性级别不应低于中度有效(C)；
 - c) 对于低风险的储罐，采用的检验方法其检验有效性级别不应低于低度有效(D)。
- 6.5.2.4 表 6～表 8 给出了常压储罐底板和壁板腐蚀减薄类损伤的检验有效性分级和推荐性检验方法。对于本文件中未列出的损伤类型，其不同检验有效性所适用的检测方法，可参考 GB/T 26610.2 选取。

注：使用在油机器人搭载检测模块(如漏磁、涡流等)按照表 6 或表 7 的内容实施在油检测时，检验有效性级别取下一行较低级别。

表 6 常压储罐底板腐蚀减薄的检验有效性分级及其检验方法

检验有效性级别	检验方法	
	土壤侧	介质侧
高度有效(A)	a) 大于 90%底板漏磁,或超声导波,或超声 C 型扫查,或低频涡流检测,及可疑部位的超声波测厚复检 b) 漏磁信号异常底板的相邻焊缝超声波检测	a) 检查表面无油污且无影响观察的杂物 b) 大于 95%目视检测及腐蚀坑测量 c) 大于 50%焊缝的真空试漏检测
中高度有效(B)	a) 大于 50%底板漏磁,或超声导波,或超声 C 型扫查,或低频涡流检测,及可疑部位的超声波测厚复检 b) 漏磁信号异常底板的相邻焊缝超声波检测	a) 检查表面无油污且无影响观察的杂物 b) 大于 95%目视检测及腐蚀坑测量 c) 大于 10%焊缝的真空试漏检测
	声发射检测及大于 95%边缘板的超声导波检测(从储罐边缘板外沿进行)	
中度有效(C)	a) 大于 10%底板漏磁,或超声导波,或超声 C 型扫查,或低频涡流检测,及可疑部位的超声波测厚复检 b) 漏磁信号异常底板的相邻焊缝超声波检测	a) 检查表面已清扫 b) 大于 95%目视检测及腐蚀坑测量 c) 腐蚀坑深度超过 1/2 板厚处的真空试漏检测
	声发射检测及声发射信号异常边缘板的超声导波检测(从储罐边缘板外沿进行)	
低度有效(D)	超声波测厚抽检	不超过 50%的目视检测
无效(E)	未检测	未检测

表 7 常压储罐壁板内部腐蚀减薄的检验有效性分级及其检验方法

检验有效性级别	检验方法
高度有效(A)	50%以上内部目视检测及腐蚀坑深度测量
中高度有效(B)	依据以前进行的内部目视检测信息进行外部超声 C 型扫查抽检或脉冲涡流检测;内部目视检测及超声波测厚

表 7 常压储罐壁板内部腐蚀减薄的检验有效性分级及其检验方法（续）

检验有效性级别	检验方法
中度有效(C)	无以前内部目视检测信息条件下进行外部超声 C 型扫查抽检或脉冲涡流检测
低度有效(D)	外部定点测厚部位的超声波测厚
无效(E)	未检测

表 8 常压储罐壁板外部腐蚀减薄的检验有效性分级及其检验方法

检验有效性级别	检验方法	
	有隔热层	无隔热层
高度有效(A)	a) 隔热层大于 95% 外部目视检测,必要时进行大于 10% 的脉冲涡流检测 b) 拆除 50% 以上的可疑区域隔热层进行目视检测,必要时进行超声波测厚或对全部可疑区域带隔热层测厚	大于 95% 目视检测,必要时进行超声波测厚或超声 B/C 扫查
中高度有效(B)	a) 隔热层大于 95% 外部目视检测,必要时进行大于 5% 的脉冲涡流检测 b) 拆除 20% 以上的可疑区域隔热层进行目视检测,必要时进行超声波测厚或对 50% 以上的可疑区域带隔热层测厚	不少于 50% 目视检测,必要时进行超声波测厚或超声 B/C 扫查
中度有效(C)	a) 隔热层大于 95% 外部目视检测,必要时进行脉冲涡流检测抽查 b) 定点测厚部位的超声波测厚	不少于 20% 目视检测,必要时进行超声波测厚或超声 B/C 扫查
低度有效(D)	外部定点测厚部位的超声波测厚或脉冲涡流检测抽查	低于 5% 目视检测,必要时进行超声波测厚或超声 B/C 扫查
无效(E)	未检测	未检测

7 检验策略实施

- 7.1 使用单位应根据风险分析的结果,制定检验计划。检验机构根据风险分析结果和检验计划,结合现场条件,确定具体的检验类型、检测方法和检验内容并实施检验。
- 7.2 常压储罐的检验内容和结果评价可参照附录 D 确定。
- 7.3 应详细记录检验结果,并与风险分析结果进行对比验证,根据检验及评价结果更新风险分析数据,进行风险再分析。



附 录 A
(规范性)
减薄损伤因子

A.1 概述

本附录用于存在均匀或局部减薄损伤机理的常压储罐的减薄损伤因子计算。所有常压储罐应进行减薄损伤因子的分析计算,计算过程见图 A.1。

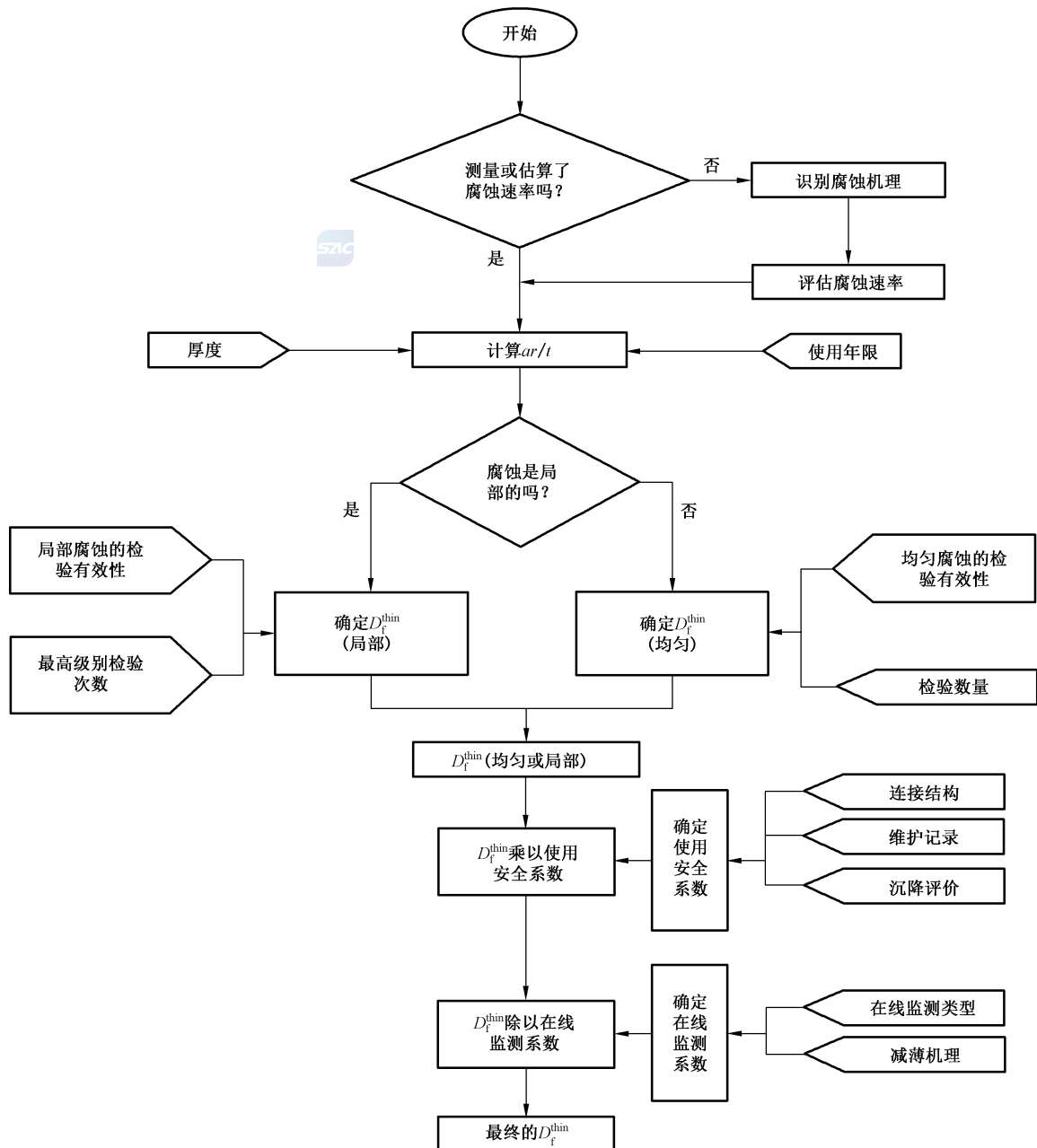


图 A.1 减薄损伤因子的确定

A.2 基本数据

A.2.1 必需数据

表 A.1 给出了储罐至少进行了一次有效检测后,确定其减薄因子所需的基本数据。

表 A.1 减薄分析所需基本数据(腐蚀速率已确定)

基本数据	说 明
厚度 t mm	投入使用时实测的厚度或最小建造壁厚
使用年限 a 年	设备的使用年限。如果工艺条件发生变化并能导致腐蚀速率发生改变,则使用年限应从工艺改变的时间算起,厚度为改变时的最小壁厚
腐蚀速率 r mm/y	根据可用的厚度数据计算的当前减薄速率。如果根据目前相对较短的时间间隔的实测厚度差计算出的“短期”腐蚀速率明显不同于根据更长时间间隔的实测厚度差计算出的“长期”腐蚀速率,则应用“短期”腐蚀速率进行评估。如果没有实测的腐蚀速率,则根据相关资料或专家建议来确定
减薄类型	10%以上表面积受到腐蚀且壁厚变化值小于 1.5 mm 的腐蚀现象定义为均匀腐蚀。10%以下表面积受到腐蚀或壁厚变化大于 1.5 mm 的腐蚀现象定义为局部腐蚀
运行温度 ℃	运行期间(含正常和异常运行条件)预计的最高运行温度
检验有效性	对常压储罐进行的每次检验活动的有效性级别
检验次数	使用期间已进行有效性不低于“中度有效”的检验活动的次数
在线监测	采用预防性的在线监测方法或工具的类型,如泄漏监测、定点测厚等
腐蚀减薄机理	确定常压储罐潜在的减薄机理
材料类别	常压储罐的材料类别
连接结构 F_{WD}	焊接或铆接
维护 F_{AM}	储罐维护是否按照相关规范进行
沉降 F_{SM}	是否做过沉降评价;已记录的沉降是否符合建造标准;是否为混凝土基础

A.2.2 附加数据

如果腐蚀速率不能根据一个或多个有效检测期间获得的厚度测量值确定,则储罐壁板应按 GB/T 26610.4 中的规定计算腐蚀速率,储罐底板按照附录 B 计算腐蚀速率。

A.3 基本假设

在基本数据表定义的时间期限内,假设减薄的平均速率基本恒定。检测越彻底、检测越频繁,且持续进行在线监测,则减薄速率大于预计值的可能性更小。

A.4 减薄损伤因子的确定

A.4.1 腐蚀速率的确定

腐蚀速率根据实测厚度数据进行计算。无实测数据时,按 A.2.2 的要求确定腐蚀速率。



A.4.2 A_{rt} 计算

A_{rt} 为腐蚀减薄的严重程度指数,该数值相当于因减薄而造成的壁厚损失的比例。常压储罐的腐蚀减薄的严重程度指数 A_{rt} 按照公式(A.1)计算。

$$A_{rt} = \max \left[\left(1 - \frac{t_{rd} - a \cdot r}{t_{\min} + CA} \right), 0.0 \right] \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

A_{rt} ——腐蚀减薄严重程度指数;

t_{rd} ——最近一次检验测量的最小壁厚,单位为毫米(mm);

a ——服役时间,单位为年;

r ——腐蚀速率,单位为毫米每年(mm/a);

$t_{\min}$ ——计算壁厚,单位为毫米(mm);

CA ——腐蚀裕量,单位为毫米(mm)。

A.4.3 减薄类型的确定

已进行有效检测的储罐,根据检测结果确定减薄类型(即均匀腐蚀或局部腐蚀)。未进行有效检测的储罐,按 GB/T 26610.4 中列出的各种减薄机理对应的减薄类型确定储罐壁板和底板介质侧的减薄类型;储罐底板土壤侧减薄类型为局部减薄。

A.4.4 检验有效性级别

根据 6.5.2 确定检验活动有效性级别。

A.4.5 最高级别有效性的检验次数的确定

根据 6.5.2 确定在指定时间期限内进行的每一次检验活动的有效性级别,最高级别有效性检验的次数将用于计算减薄损伤因子。可将两次及以上较低有效性级别的检验等效为一次较高有效性级别的检验,方法如下:

- a) 两次及以上“中高度有效”检测等效为一次“高度有效”检验;
- b) 两次及以上“中度有效”检测等效为一次“中高度有效”检验。

A.4.6 减薄损伤因子的确定

根据计算的 A_{rt} 和最高级别有效性检验的次数,按照表 A.2 和表 A.3 分别确定常压储罐壁板和底板减薄损伤因子。没有对应值时可选下一行较高值,或者在行之间使用插值。

表 A.2 壁板减薄损伤因子

A _{rt}	检验有效性												
	E	一次检验				二次检验				三次检验			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
0.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 A.2 壁板减薄损伤因子（续）

A_n	检验有效性												
	E	一次检验				二次检验				三次检验			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
0.08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.10	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.12	6	5	3	2	1	4	2	1	1	3	1	1	1
0.14	20	17	10	6	1	13	6	1	1	10	3	1	1
0.16	90	70	50	20	3	50	20	4	1	40	10	1	1
0.18	250	200	130	70	7	170	70	10	1	130	35	3	1
0.20	400	300	210	110	15	290	120	20	1	260	60	5	1
0.25	520	450	290	150	20	350	170	30	2	240	80	6	1
0.30	650	550	400	200	30	400	200	40	4	320	110	9	2
0.35	750	650	550	300	80	600	300	80	10	540	150	20	5
0.40	900	800	700	400	130	700	400	120	30	600	200	50	10
0.45	1 050	900	810	500	200	800	500	160	40	700	270	60	20
0.50	1 200	1 100	970	600	270	1 000	600	200	60	900	360	80	40
0.55	1 350	1 200	1 130	700	350	1 100	750	300	100	1 000	500	130	90
0.60	1 500	1 400	1 250	850	500	1 300	900	400	230	1 200	620	250	210
0.65	1 900	1 700	1 400	1 000	700	1 600	1 105	670	530	1 300	880	550	500

A_n	检验有效性												
	E	四次检验				五次检验				六次检验			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
0.02	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.04	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.06	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.08	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.10	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.12	6	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
0.14	20	7	2	1	1	5	1	1	1	4	1	1	1
0.16	90	30	5	1	1	20	2	1	1	14	1	1	1
0.18	250	100	15	1	1	70	7	1	1	50	3	1	1
0.20	400	180	20	2	1	120	10	1	1	100	6	1	1
0.25	520	200	30	2	1	150	15	2	1	120	7	1	1
0.30	650	240	50	4	2	180	25	3	2	150	10	2	2
0.35	750	400	90	10	4	350	70	6	4	280	40	5	4

表 A.2 壁板减薄损伤因子（续）

A _{rt}	检验有效性												
	E	四次检验				五次检验				六次检验			
		D	C	B	A	D	C	B	A	D	C	B	A
0.40	900	500	140	20	8	400	110	10	8	350	90	9	8
0.45	1 050	600	200	30	15	500	160	20	15	400	130	20	15
0.50	1 200	800	270	50	40	700	210	40	40	600	180	40	40
0.55	1 350	900	350	100	90	800	260	90	90	700	240	90	90
0.60	1 500	1 000	450	220	210	900	360	210	210	800	300	210	210
0.65	1 900	1 200	700	530	500	1 100	640	500	500	1 000	600	500	500

表 A.3 底板减薄损伤因子

A _{rt}	检验有效性				
	E	一次检验			
		D	C	B	A
0.05	4	1	1	1	1
0.10	14	3	1	1	1
0.15	32	8	3	1	1
0.20	56	18	6	2	1
0.25	87	32	11	4	3
0.30	125	53	21	9	6
0.35	170	80	36	16	12
0.40	222	115	57	29	21
0.45	281	158	86	47	36
0.50	347	211	124	73	58
0.55	420	273	173	109	89
0.60	500	346	234	158	133
0.65	587	430	309	222	192
0.70	681	527	401	305	270
0.75	782	635	510	409	370
0.80	890	757	638	538	498
0.85	1 005	893	789	696	658
0.90	1 126	1 044	963	888	856
0.95	1 255	1 209	1 163	1 118	1 098
1.00	1 390	1 390	1 390	1 390	1 390

A.4.7 减薄损伤因子的修正

A.4.7.1 使用安全系数的修正

使用安全系数 F_E 为以下三个修正系数的乘积,按公式(A.2)计算:

$$F_E = F_{WD} \times F_{AM} \times F_{SM} \dots\dots\dots (A.2)$$

公式(A.2)中修正系数的确定如下:

a) 焊接结构修正系数 F_{WD} 按表 A.4 选取。

表 A.4 焊接结构修正系数

储罐是否焊接	F_{WD}
是	1.0
否	10

b) 焊储罐维护修正系数 F_{AM} 按表 A.5 选取。

表 A.5 焊储罐维护修正系数

储罐的维护情况	F_{AM}
储罐的维护按照相关规范进行	1.0
储罐的维护未按照相关规范进行	5.0

c) 基础沉降评价修正系数 F_{SM} 按表 A.6 选取。

表 A.6 基础沉降评价修正系数

储罐的沉降情况	F_{SM}
已记录的沉降超出了建造标准,且未采取沉降监测措施	2.0
已记录的沉降超出了建造标准,安装 在线沉降监测设备发现沉降无加重趋势	1.5
已记录的沉降符合建造标准	1.0
未做过沉降评价	1.5
混凝土基础,无沉降	1.0

A.4.7.2 在线监测系数的修正

在线监测修正系数按 GB/T 26610.4 的要求计算。

附 录 B

(规范性)

确定常压储罐底板腐蚀速率的经验方法

B.1 基本数据

B.1.1 土壤侧腐蚀分析所需基本数据

确定估计的土壤侧腐蚀速率(CR_S)所需数据如表 B.1 所示。

表 B.1 土壤侧腐蚀——分析所需基本数据

基本数据	说 明
土壤状况 Ω·cm	储罐下方或周围堤防范围内的土壤电阻率
储罐基础	储罐基础材料的类型(土壤、沙子等),如果储罐被环形围墙支撑,则材料是指围墙内部的填充物
储罐排水	储罐排出雨水的效力,防止雨水在储罐底部积聚
阴极保护	储罐底板存在阴极保护系统,并且按照建造的标准安装和运行该系统
底板类型	单层底板或具备泄漏防护屏障(RPB)的底板,RPB 可以是纺织品或塑胶制品,或是第二层板
操作温度 ℃	在运行期间预期最高操作温度(含正常或非正常的操作条件)

B.1.2 介质侧腐蚀分析所需基本数据

确定估计的介质侧腐蚀速率(CR_P)所需数据如表 B.2 所示。

表 B.2 介质侧腐蚀——分析所需基本数据

基本数据	说 明
介质状况	干或湿,如果存在明显的底部沉淀物和水则适用湿的情况
操作温度 ℃	在运行期间预期最高操作温度(含正常或非正常的操作条件)
蒸汽盘管加热器	是或否,如果存在蒸汽盘管加热器,由于外部热量和蒸汽可能从内部盘管泄漏,可将内部腐蚀速率略微向上调整
切水设施	当始终使用切水设施时,会降低水对罐底板的损伤

B.2 腐蚀速率的确定

B.2.1 土壤侧腐蚀速率的确定

确定土壤侧腐蚀速率的步骤见图 B.1。

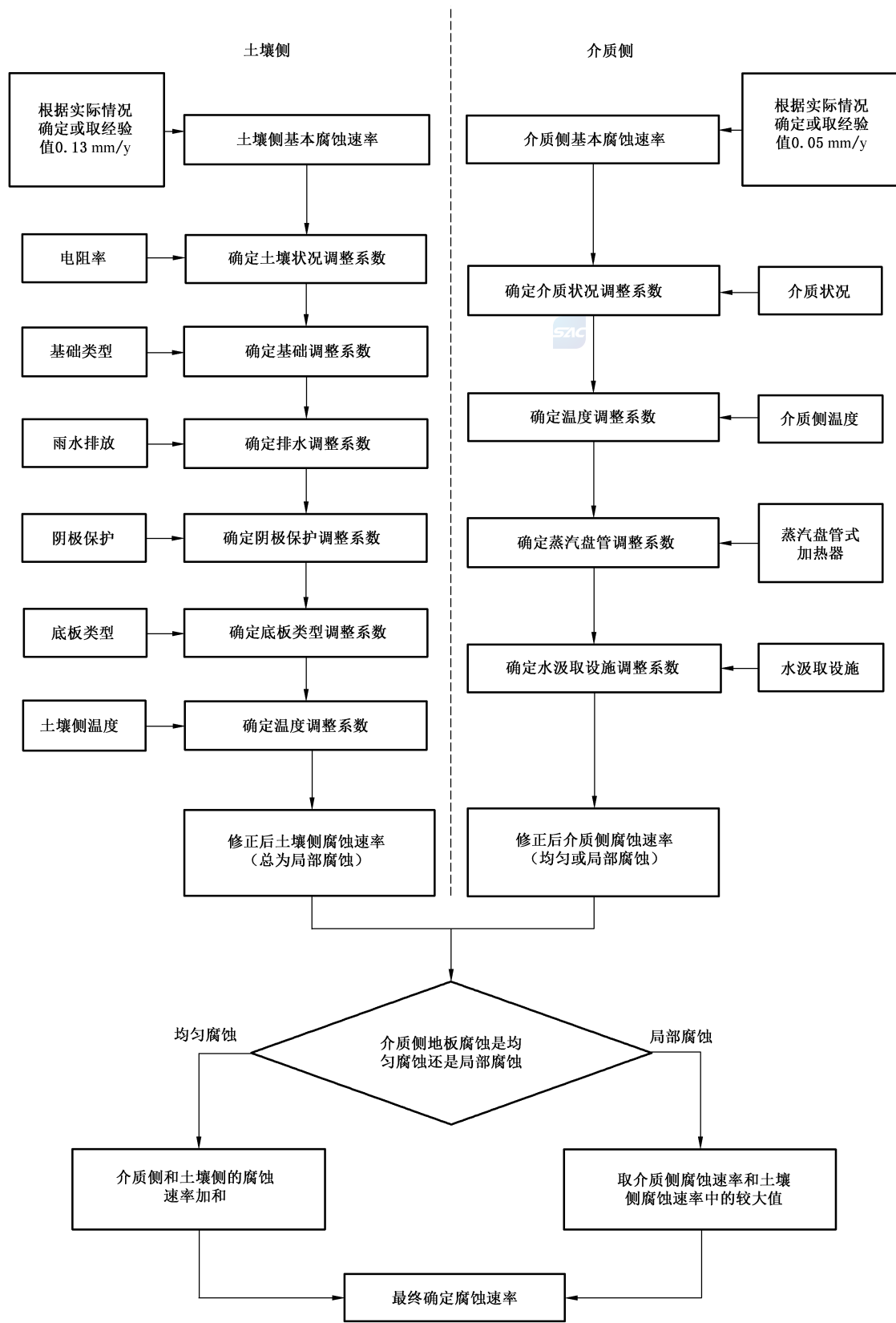


图 B.1 常压储罐底板腐蚀——土壤侧和介质侧腐蚀速率的确定

土壤侧腐蚀速率可采用表 B.1 中的基本数据,通过公式(B.1)来确定。

$$CR_S = CR_{SB} \times F_{SR} \times F_{PA} \times F_{TD} \times F_{CP} \times F_{TB} \times F_{ST} \cdots \cdots (B.1)$$

土壤侧基本腐蚀速率 CR_{SB} 的确定应基于实际检测数据。无实际检测数据时,土壤侧基本腐蚀速率可采用经验值 0.13 mm/y,该经验值所基于的条件状态如表 B.3 所示。

表 B.3 土壤侧基本腐蚀速率的条件

因 素	基本腐蚀速率条件
土壤电阻率	适度的腐蚀性(>1 000 Ω·cm~2 000 Ω·cm)
储罐基础材料	连续的沥青或混凝土
储罐排放	雨水在罐基础周围没有积聚
阴极保护	无或没有作用
底板类型	单一底板
流体整体温度	24 ℃ 以下

公式(B.1)中各调整系数的赋值如下:

a) 土壤状况调整系数 F_{SR} 按表 B.4 选取。

表 B.4 土壤状况调整系数

电阻率/(Ω·cm)	腐蚀性	F_{SR}
≤500	强	1.5
>500~1 000	较强	1.25
>1 000~2 000	中	1.0
>2 000~10 000	较弱	0.83
>10 000	弱	0.6
装有 RPB 的储罐		1.0

b) 土壤侧基础调整系数 F_{PA} 按表 B.5 选取。

表 B.5 土壤侧基础调整系数



储罐衬垫类型	F_{PA}
含盐高的土壤	1.5
压碎的石灰石	1.4
本地土壤	1.3
建筑级沙子	1.15
连续的沥青	1.0
连续混凝土	1.0
石油沙土	0.7
高电阻率,低氯化物沙土	0.7

c) 土壤侧排水调整系数 F_{TD} 按表 B.6 选取。

表 B.6 土壤侧排水调整系数

储罐排放类型	F_{TD}
罐底 1/3 以上部分长期处于水下	3.0
雨水经常积聚在罐基础周围	2.0
雨水不经常积聚在罐基础周围	1.0

d) 土壤侧储罐阴极保护调整系数 F_{CP} 按表 B.7 选取。

表 B.7 土壤侧阴极保护调整系数

阴极保护类型	阴极保护调整系数 F_{CP}
没有	1.0
有,但未按建造标准安装或维护	0.66
有,按照建造标准安装与维护	0.33

e) 土壤侧底板类型调整系数 F_{TB} 按表 B.8 选取。

表 B.8 土壤侧底板类型调整系数

储罐底板类型	F_{TB}
RPB 未按照建造标准安装	1.4
RPB 按照建造标准安装	1.0
单一底板	1.0

f) 土壤侧温度调整系数 F_{ST} 按表 B.9 选取。

表 B.9 土壤侧温度调整系数

碳钢和低合金钢		不锈钢	
土壤侧温度/℃	F_{ST}	土壤侧温度/℃	F_{ST}
$T_1 \leq 15$	1.0	$T_1 \leq 38$	1.0
$15 < T_1 \leq 49$	1.1	$38 < T_1 \leq 60$	1.1
$49 < T_1 \leq 93$	1.3	$60 < T_1 \leq 93$	1.3
$93 < T_1 \leq 121$	1.4	$93 < T_1 \leq 149$	1.4
$T_1 > 121$	1.0	$T_1 > 149$	1.0

B.2.2 介质侧腐蚀速率的确定

确定介质侧腐蚀速率的步骤见图 B.1。腐蚀速率可采用表 B.2 中的基本数据通过公式(B.2)来确定。

$$CR_P = CR_{PB} \times F_{PC} \times F_{PT} \times F_{SC} \times F_{WD} \dots\dots\dots (B.2)$$

介质侧基本腐蚀速率 CR_{PB} 的确定应基于实际检测数据。无实际检测数据时,介质侧基本腐蚀速率

可采用经验值 0.05 mm/y,该经验值所基于的条件状态见表 B.10。

表 B.10 介质侧基本腐蚀速率的条件

因素	基本腐蚀速率条件
内部涂层	腐蚀保护不需要内部涂层或没有实施
流体整体温度	24 ℃ 以下
蒸汽盘管加热器	无
切水设施	无

公式(B.2)中调整系数的确定如下：

a) 介质状况调整系数 F_{PC} 按表 B.11 选取。

表 B.11 介质侧介质状况调整系数

介质侧状况	F_{PC}
湿	2.5
干	1.0

b) 介质温度调整系数 F_{PT} 按表 B.12 选取。

表 B.12 介质侧温度调整系数

碳钢和低合金钢		不锈钢	
介质侧温度/℃	F_{PT}	介质侧温度/℃	F_{PT}
$T_2 \leq 15$	1.0	$T_1 \leq 38$	1.0
$15 < T_2 \leq 49$	1.1	$38 < T_1 \leq 60$	1.1
$49 < T_2 \leq 93$	1.3	$60 < T_1 \leq 93$	1.3
$93 < T_2 \leq 121$	1.4	$93 < T_1 \leq 149$	1.4
$T_2 > 121$	1.0	$T_1 > 149$	1.0

c) 介质侧蒸汽盘管调整系数 F_{SC} 按表 B.13 选取。

表 B.13 介质侧蒸汽盘管调整系数

蒸汽盘管	F_{SC}
否	1.0
是	1.15

d) 介质侧切水设施调整系数 F_{WD} 按表 B.14 选取。

表 B.14 介质侧切水设施调整系数

切水设施	F_{WD}
否	1.0
是	0.7

B.2.3 储罐底板腐蚀速率

储罐底板的腐蚀速率按以下步骤进行：

- a) 分别计算介质侧和土壤侧的腐蚀速率，即其基本腐蚀速率和各调整系数的乘积；
- b) 介质侧为均匀腐蚀，将介质侧和土壤侧的腐蚀速率相加作为储罐底板腐蚀速率；
- c) 介质侧为局部腐蚀，取介质侧和土壤侧腐蚀速率的较大值作为储罐底板腐蚀速率。



附 录 C
(规范性)
失效后果定量计算过程

C.1 基本假设

本文件关于常压储罐失效后果计算的基本假设条件如下：

- a) 储罐壁板和底板的泄放类型均认为是连续泄放；
- b) 不考虑监测和隔离系统的影响；
- c) 不考虑燃烧和爆炸后果的计算；
- d) 不考虑毒性后果的计算；
- e) 不考虑既不燃烧也没有毒性的后果的计算；
- f) 不考虑燃烧和爆炸引起的设备破坏和人员伤亡后果的计算。

C.2 符号

A_n	——与第 n 个泄漏孔尺寸相关的孔口面积,单位为平方毫米(mm^2)；
$Bb_{\text{avail},n}$	——泄放情况下对应于第 n 个泄漏孔尺寸的流体有效泄放量,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{groundwater},n}^{\text{leak}}$	——泄放情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的地下水中流体的体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{indike}}^{\text{leak}}$	——泄放情况下泄放到围堰内的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
Bb_n^{leak}	——泄放情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的流体泄放量,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{release}}^{\text{leak}}$	——泄放情况下流体泄放总体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{ss-offsite}}^{\text{leak}}$	——泄放情况下泄放在罐区外土壤表面的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{ss-onsite}}^{\text{leak}}$	——泄放情况下泄放在罐区内土壤表面的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{subsoil},n}^{\text{leak}}$	——泄放情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的地下土壤中的流体的体积,单位为立方米(m^3)；
Bb_{total}	——储罐内流体的总泄放量,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{water}}^{\text{leak}}$	——泄放情况下已到达水源的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{indike}}^{\text{rupture}}$	——破裂情况下围堰内的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
Bb_n^{rupture}	——破裂情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的流体泄放量,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{release}}^{\text{rupture}}$	——破裂情况下流体泄放总体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{ss-offsite}}^{\text{rupture}}$	——泄放在罐区外土壤表面的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{ss-onsite}}^{\text{rupture}}$	——泄放在罐区内土壤表面的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
$Bb_{\text{water}}^{\text{rupture}}$	——破裂情况下已到达水源的流体总体积,单位为立方米(m^3)；
CHT	——储罐壁板高度,单位为米(m)；
C_d	——泄放系数；
$C_{\text{groundwater}}$	——介质泄放到地下水内时的环境经济后果,单位为元每立方米(元/ m^3)；
C_{indike}	——介质泄放到围堰区域内时的环境经济后果,单位为元每立方米(元/ m^3)；
C_{qo}	——表征土壤的接触程度的调整系数；
$C_{\text{ss-onsite}}$	——介质泄放到罐区内土壤表面时的环境经济后果,单位为元每立方米(元/ m^3)；
$C_{\text{ss-offsite}}$	——介质泄放到罐区外土壤表面时的环境经济后果,单位为元每立方米(元/ m^3)；
C_{subsoil}	——介质泄放到地下土壤内时的环境经济后果,单位为元每立方米(元/ m^3)；
C_{water}	——介质泄放到地表水内时的环境经济后果,单位为元每立方米(元/ m^3)；

d_n	——第 n 个泄漏孔直径,单位为毫米(mm);
D	——储罐内径,单位为米(m);
FC_{cmd}	——设备损坏经济后果,单位为元;
FC_{environ}	——总体环境经济后果,单位为元;
FC_{prod}	——停产经济后果,单位为元;
FC_{total}	——总经济后果,单位为元;
$FC_{\text{environ}}^{\text{leak}}$	——泄放造成的环境经济后果,单位为元;
$FC_{\text{environ}}^{\text{rupture}}$	——破裂造成的环境经济后果,单位为元;
$F_{G,n}$	——按需要评估设备类型确定的每个尺寸的泄漏孔对应的平均失效概率;
$F_{G,\text{tot}}$	——不同尺寸的泄漏孔平均失效概率总和;
g	——重力加速度常数, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;
h_{liq}	——储罐内的液体高度,单位为米(m);
holecost_n	——不同尺寸的泄漏孔对应损坏经济后果,单位为元;
k_h	——以存储介质为代表性流体时,土壤的水压传导率,单位为米每天(m/d);
$k_{h,\text{water}}$	——以水为代表性流体时,土壤的水压传导率,单位为米每天(m/d);
$k_{h,\text{water-lb}}$	——以水为代表性流体时,土壤的水压传导率下限值,单位为米每秒(m/s);
$k_{h,\text{water-ub}}$	——以水为代表性流体时,土壤的水压传导率上限值,单位为米每秒(m/s);
ld_n	——对应于第 n 个泄漏孔尺寸的泄放持续时间,单位为天;
$\text{LHT}_{\text{above}, i}$	——在第 i 层壁板上的液体高度,单位为米(m);
$\text{Lvol}_{\text{above}, i}$	——在第 i 层壁板上的液体体积,单位为立方米(m^3);
$\text{Lvol}_{\text{avail}, n}$	——对应于第 i 层壁板上第 n 个泄漏孔尺寸的流体有效体积,单位为立方米(m^3);
$\text{Lvol}_{\text{total}}$	——储罐内的可能的最大流体体积,单位为立方米(m^3);
matcost	——材料价格系数;
$n_{\text{rh}, n}$	——每个尺寸的泄漏孔数量;
$\text{outage}_{\text{cmd}}$	——检修设备所需的停工期,单位为天;
outage_n	——对应于第 n 个泄漏孔尺寸造成的停工期,单位为天;
P_{ldike}	——溢出围堰的流体百分比;
P_{onsite}	——溢出围堰但仍在罐区内,地表土壤中的流体百分比;
P_{offsite}	——溢出围堰且已流到罐区外,地表土壤中的流体百分比;
p_s	——土壤孔隙率;
procost	——储罐停车期间的每天的停产损失,单位为元每天(元/d);
S_{gw}	——罐底到地下水的距离,单位为米(m);
t_{gl}	——储罐底板泄放时流体到达地下水所需的时间,单位为天;
t_{ld}	——泄放检测时间,单位为天;
$\text{vel}_{s, \text{prod}}$	——渗透速率,单位为米每天(m/d);
W_n	——流体的泄放速率,单位为立方米每天(m^3/d);
μ_1	——流体动力黏度,单位为牛秒每平方米($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$);
μ_w	——水的动力黏度,单位为牛秒每平方米($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$);
ρ_1	——储存或正常操作条件下的流体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
ρ_w	——水的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

C.3 代表性流体和相关物性的选取

C.3.1 代表性流体的选取

储罐失效后果应根据储存的介质特性选择代表性流体进行定量计算,表 C.1 给出了常压储罐常见的代表性流体;若表 C.1 中没有流体能直接代表储罐所储存的介质,则在表 C.1 列出的范围中选择与储罐储存介质最匹配的代表性流体。

表 C.1 常压储罐后果分析的流体和流体特性

流体	后果分析代表性流体	相对分子质量	流体密度 kg/m ³	流体动力黏度 N·s/m ²
汽油	C6~C8	100	684.018	4.01×10 ⁻³
轻柴油	C9~C12	149	734.011	1.04×10 ⁻³
重柴油	C13~C16	205	764.527	2.46×10 ⁻³
燃料油	C17~C25	280	775.019	3.69×10 ⁻²
原油	C17~C25	280	775.019	3.69×10 ⁻²
重燃料油	C25+	422	900.026	4.60×10 ⁻²
重原油	C25+	422	900.026	4.60×10 ⁻²

C.3.2 水压传导率

储罐失效后果分析计算中常用的土壤类型和特性见表 C.2 所示。表 C.2 中给出的不同类型土壤的水压传导率是以水作为代表性流体的;对于其他不同流体,土壤的水压传导率根据实际流体的密度和黏度,按公式(C.1)计算:

$$k_h = k_{h,water} \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right) \left(\frac{\mu_w}{\mu_l} \right) \dots\dots\dots (C.1)$$

表 C.2 常压储罐后果分析的土壤类型和特性

土壤类型	水压传导率的下限值 m/s	水压传导率的上限值 m/s	土壤孔隙率
粗砂	1×10 ⁻³	1×10 ⁻⁴	0.33
细砂	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁵	0.33
精细砂	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁷	0.33
粉砂	1×10 ⁻⁷	1×10 ⁻⁸	0.41
含砂黏土	1×10 ⁻⁸	1×10 ⁻⁹	0.45
黏土	1×10 ⁻⁹	1×10 ⁻¹⁰	0.50
混凝土——沥青	1×10 ⁻¹²	1×10 ⁻¹³	0.99

C.3.3 流体渗漏速率

储罐中的流体在土壤中的渗漏速率按公式(C.2)计算:

$$vel_{s,prod} = \frac{k_h}{p_s}$$

.....(C.2)

流体渗漏速率按下列步骤进行计算：

- a) 从表 C.1 中选择代表性流体；
- b) 从表 C.1 中确定代表性流体的特性以及密度 ρ_l 、动力黏度 μ_l ；
- c) 根据选定的土壤类型,从表 C.2 中确定以水作为代表性流体时土壤的水压传导率的上、下极限值,通过公式(C.3)计算二者的平均值：

$$k_{h,water} = 4,32 \times 10^4 \times (k_{h,water-lb} + k_{h,water-ub})$$

.....(C.3)

- d) 将步骤 b)得到密度 ρ_l 、动力黏度 μ_l 、水的物性参数和步骤 c)计算出的 $k_{n,water}$,代入公式(C.1)计算土壤水压传导率 k_h ；
- e) 根据步骤 d)计算得到土壤的水压传导率 k_h 和表 C.2 给出的土壤孔隙率 p_s 按公式(C.2)计算储罐中流体在土壤中的渗漏速率 $vel_{s,prod}$ 。

C.4 渗漏孔尺寸选择

C.4.1 在储罐的失效可能性的定量分析中,可采用离散的泄放状况或选择渗漏孔尺寸,取 4 种尺寸,即小、中、大及破裂。

C.4.2 位于储罐壁板中不同尺寸渗漏孔的泄漏直径按表 C.3 选取,位于储罐底板中不同尺寸渗漏孔的泄漏直径按表 C.4 选取。

表 C.3 渗漏孔尺寸和直径——储罐壁板

单位为毫米

渗漏孔编号	渗漏孔尺寸	孔口直径范围	渗漏孔直径
1	小	>0~3	$d_1=3$
2	中	>3~6	$d_2=6$
3	大	>6~50	$d_3=50$
4	破裂	>50	$d_4=250D$

表 C.4 渗漏孔尺寸和直径——储罐底板

单位为毫米

渗漏孔序号	渗漏孔尺寸	是否有 RPB	孔径范围	渗漏孔直径
1	小	是	>0~3	$d_1=3$
		否	>0~13	$d_1=13$
2	中	不适用	0	$d_2=0$
		不适用	0	
3	大	不适用	0	$d_3=0$
		不适用	0	
4	破裂	是	>3	$d_4=250D$
		否	>13	

C.5 泄放速率计算

C.5.1 计算的初始条件

C.5.1.1 计算壁板泄放速率时,流体的静压头均设为常数,且设定泄放出来的流体压力为大气压。

C.5.1.2 计算底板泄放速率时,按与储罐底部基础土壤典型特性相类似的连续性多孔介质建模计算。

C.5.2 储罐壁板的泄放速率

储罐壁板上泄漏孔处流体的泄放速率可根据泄漏孔上方液体高度按公式(C.4)计算:

$$W_n = 0.086 C_d A_n \sqrt{2gh_{liq}} \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

当流体以全湍流穿过粗糙孔口时,公式(C.4)中的泄放系数 C_d 在 $0.60 \leq C_d \leq 0.65$ 的范围内,本文件失效后果分析中一般取 $C_d = 0.61$ 。

C.5.3 储罐底板的泄放速率

C.5.3.1 储罐底板流体的泄放速率根据土壤的水压传导率 k_h 和泄漏孔直径 d_n ,按伯努利方程即公式(C.5)和吉赫方程即公式(C.6)计算:

$$\text{当 } k_h > 86.4 \times d_n^2 \text{ 时, } W_n = 0.012 \, 96 \pi d_n \sqrt{2gh_{liq}} n_{rh,n} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

$$\text{当 } k_h < 86.4 \times d_n^2 \text{ 时, } W_n = 0.378 \, 7 C_{qo} d_n^{0.2} h_{liq}^{0.9} k_h^{0.74} n_{rh,n} \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

C.5.3.2 参数 C_{qo} 是表征土壤的接触程度的调整系数,在良好接触时 $C_{qo} = 0.21$,接触很差时 $C_{qo} = 1.15$ 。

C.5.3.3 如果储罐底部有防泄放隔离屏(RBP),后果分析时 $C_{qo} = 0.21$, $h_{liq} = 0.08$ m。如果储罐底部没有 RBP,液体高度 h_{liq} 取罐内液体的实际高度。

C.5.3.4 储罐底板每个尺寸的泄漏孔数量 $n_{rh,n}$ 是与储罐直径相关的函数,按照表 C.5 确定。

表 C.5 与储罐直径相关的泄漏孔数量

储罐直径 m	泄漏孔数量		
	小泄漏孔	中泄漏孔	大泄漏孔
30	1	0	0
60	4	0	0
90	9	0	0

如果储罐直径是个中间值,小泄漏孔的数量可按公式(C.7)计算:

$$n_{rh,1} = \max \left\{ \text{nint} \left[\left(\frac{D}{100} \right)^2 \right], 1 \right\} \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

其中函数 $\text{nint}[\]$ 用于四舍五入取整,例如 $\text{nint}[3.2] = 3$, $\text{nint}[3.5] = 4$, $\text{nint}[3.7] = 4$ 。

C.5.4 壁板泄放速率计算流程

储罐壁板泄放速率按下列步骤进行计算:

- 对于每个尺寸的泄漏孔,确定泄漏孔上方的液体高度 h_{liq} ;
- 对于每个尺寸的泄漏孔,根据公式(C.8)确定孔口面积 A_n :

$$A_n = \frac{\pi d_n^2}{4} \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

- 对于每个尺寸的泄漏孔,根据步骤 a) 得到的 h_{liq} 和步骤 b) 得到的 A_n ,按公式(C.4)计算泄放速率 W_n 。

C.5.5 底板泄放速率计算流程

储罐底板泄放速率按下列步骤进行计算：

- a) 对于每个尺寸的泄漏孔，确定泄漏孔上方的液体高度 h_{liq} ；
- b) 对于每个尺寸的泄漏孔，根据表 C.5 确定泄漏孔数量 $n_{rh,n}$ ；
- c) 根据 C.3.3 的步骤 d) 确定土壤的水压传导率 k_h ；
- d) 对于每个尺寸的泄漏孔，按具体情况根据公式(C.5)或公式(C.6)计算泄放速率 W_n 。

C.6 潜在泄放存量估算

C.6.1 有效存量组的估算条件

- C.6.1.1 分析计算储罐壁板泄放存量时，有效存量组为泄漏孔位置上方可能的最大流体体积。
- C.6.1.2 分析计算储罐底板泄放存量时，有效存量组为设计充装高度或最高操作充装高度时流体体积。

C.6.2 壁板潜在泄放存量

储罐壁板潜在泄放存量按下列步骤进行计算：

- a) 确定第 i 层壁板上的液体高度：
$$LHT_{above,i} = [h_{liq} - (i - 1) \cdot CHT] \dots\dots\dots (C.9)$$
- b) 确定在第 i 层壁板上的液体体积：
$$Lvol_{above,i} = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) LHT_{above,i} \dots\dots\dots (C.10)$$
- c) 对于每个尺寸的泄漏孔，确定该孔在储罐壳体上的位置。本文件规定泄漏孔均位于该层壁板的底部，则该层壁板上对应于第 n 个泄漏孔尺寸的流体有效体积为：
$$Lvol_{avail,n} = Lvol_{above,i} \dots\dots\dots (C.11)$$
- d) 根据公式(C.12)计算第 i 层壁板上对应于第 n 个泄漏孔尺寸的流体有效泄放量：
$$Bbl_{avail,n} = Lvol_{avail,n} \dots\dots\dots (C.12)$$

C.6.3 底板潜在泄放存量

储罐底板潜在泄放存量按下列步骤进行计算：

- a) 按公式(C.13)计算储罐内的可能的最大流体体积，计算结果的单位为立方米(m^3)：
$$Lvol_{total} = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \cdot h_{liq} \dots\dots\dots (C.13)$$
- b) 根据公式(C.14)计算储罐内流体的总泄放量：
$$Bbl_{total} = Lvol_{total} \dots\dots\dots (C.14)$$

C.7 泄放量计算

C.7.1 壁板泄放量

储罐壁板泄放量按下列步骤进行计算。

- a) 根据 C.5.5 的步骤 d) 计算泄放速率 W_n 。
- b) 按下述情况确定泄放检测时间 t_{ld} ；
 - 1) $t_{ld} = 7$ 天, $d_n \leq 3.0$ mm；
 - 2) $t_{ld} = 1$ 天, $d_n > 3.0$ mm。

- c) 对于每个尺寸的泄漏孔,根据步骤 a)得到的泄放速率 W_n ,步骤 b)得到的泄放检测时间 t_{ld} 以及 C.6.2 的步骤 d)得到的 $Bbl_{avail, n}$,根据公式(C.15)和公式(C.16)计算泄放持续时间 ld_n :

$$ld_n = \min \left[\left\{ \frac{Bbl_{avail, n}}{W_n} \right\}, 7 \text{ 天} \right], \quad d_n \leq 3.0 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (C.15)$$

$$ld_n = \min \left[\left\{ \frac{Bbl_{avail, n}}{W_n} \right\}, 1 \text{ 天} \right], \quad d_n > 3.0 \text{ mm} \quad \dots\dots\dots (C.16)$$

- d) 对于每个尺寸的泄漏孔,根据步骤 a)得到的泄放速率 W_n ,步骤 c)得到的泄放持续时间 ld_n 和 C.6.2 的步骤 d)得到的有效泄放量 $Bbl_{avail, n}$,根据公式(C.17)计算泄放情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的流体泄放量 Bbl_n^{leak} :

$$Bbl_n^{leak} = \min [\{ W_n \cdot ld_n \}, Bbl_{avail, n}] \quad \dots\dots\dots (C.17)$$

- e) 对于每个尺寸的泄漏孔,根据 C.6.2 的步骤 d)得到的有效泄放量 $Bbl_{avail, n}$,根据公式(C.18)计算破裂情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的流体泄放量 $Bbl_n^{rupture}$:

$$Bbl_n^{rupture} = Bbl_{avail, n} \quad \dots\dots\dots (C.18)$$

C.7.2 底板泄放量

储罐底板泄放量按下列步骤进行计算。

- a) 根据 C.5.5 的步骤 d)计算泄放速率 W_n 。
- b) 按下述情况确定泄放检测时间 t_{ld} :
- 1) 储罐基础为水泥或沥青, $t_{ld} = 7 \text{ d}$;
 - 2) 储罐设有 RPB, $t_{ld} = 30 \text{ d}$;
 - 3) 储罐没有 RPB, $t_{ld} = 360 \text{ d}$ 。
- c) 对于每个尺寸的泄漏孔,根据 a)得到的泄放速率 W_n ,步骤 b)得到的泄放检测时间 t_{ld} 以及 C.6.3 的步骤 b)得到的总泄放量 Bbl_{total} ,根据公式(C.19)计算泄放持续时间 ld_n :

$$ld_n = \min \left[\left\{ \frac{Bbl_{total}}{W_n} \right\}, t_{ld} \right] \quad \dots\dots\dots (C.19)$$

- d) 对于每个泄漏孔尺寸,根据步骤 a)得到的泄放速率 W_n ,步骤 c)得到的泄放持续时间 ld_n 和 C.6.3 的步骤 b)得到的总泄放量 Bbl_{total} ,根据公式(C.20)计算泄放情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的流体泄放量 Bbl_n^{leak} :

$$Bbl_n^{leak} = \min [\{ W_n \cdot ld_n \}, Bbl_{total}] \quad \dots\dots\dots (C.20)$$

- e) 对于每个尺寸的泄漏孔,根据 C.6.3 的步骤 b)得到的总泄放量 Bbl_{total} ,根据公式(C.21)计算破裂情况下第 n 个泄漏孔尺寸对应的流体泄放量 $Bbl_n^{rupture}$:

$$Bbl_n^{rupture} = Bbl_{total} \quad \dots\dots\dots (C.21)$$

C.8 确定经济后果

C.8.1 储罐壁板失效的经济后果按下列步骤进行计算。

- a) 确定以下参数:
- 1) $P_{lvdiike}$ ——溢出围堰的流体百分比;
 - 2) P_{onsite} ——溢出围堰但仍在罐区内,地表土壤中的流体百分比;
 - 3) $P_{offsite}$ ——溢出围堰且已流到罐区外,地表土壤中的流体百分比。
- b) 确定环境敏感度,并根据环境敏感度按表 C.6 的要求确定 C_{indike} 、 $C_{ss-onsite}$ 、 $C_{ss-offsite}$ 以及 C_{water} 。

表 C.6 基于环境敏感度的经济后果参数

单位为元每立方米

环境敏感度	低	中	高
介质泄放到围堰区域内时的环境经济后果 C_{indike}	400	400	400
$C_{\text{ss-onsite}}$ ——介质泄放到罐区内土壤表面时的环境经济后果	2 000	2 000	2 000
$C_{\text{ss-offsite}}$ ——介质泄放到罐区外土壤表面时的环境经济后果	4 000	10 000	20 000
C_{subsoil} ——介质泄放到地下土壤内时的环境经济后果	20 000	60 000	120 000
$C_{\text{groundwater}}$ ——介质泄放到地下水内时的环境经济后果	40 000	200 000	400 000
C_{water} ——介质泄放到地表水内时的环境经济后果	20 000	60 000	200 000
注：上述数据为参考值，使用单位根据实际情况调整。			

c) 对于每种尺寸的泄放孔，按表 2 选取平均失效概率 F_G ，储罐壁板不同尺寸的泄漏孔平均失效概率总和按公式(C.22)计算：

$$F_{G,\text{tot}} = \sum_{n=1}^4 F_{G,n} \dots\dots\dots (C.22)$$

d) 确定壁板泄漏的流体已泄放总体积：

$$Bb l_{\text{release}}^{\text{leak}} = \frac{\sum_{n=1}^3 (Bb l_n^{\text{leak}} \cdot F_{G,n})}{F_{G,\text{tot}}} \dots\dots\dots (C.23)$$

e) 根据公式(C.24)~公式(C.27)可分别计算储罐壁板泄漏孔泄放后仍在围堰内的流体总体积 $Bb l_{\text{indike}}^{\text{leak}}$ 、泄放到罐区内土壤表面的流体总体积 $Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{leak}}$ ，泄放到罐区外土壤表面的流体总体积 $Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{leak}}$ 和已到达水源的流体总体积 $Bb l_{\text{water}}^{\text{leak}}$ ：

$$Bb l_{\text{indike}}^{\text{leak}} = Bb l_{\text{release}}^{\text{leak}} (1 - P_{\text{ldike}}) \dots\dots\dots (C.24)$$

$$Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{leak}} = P_{\text{onsite}} (Bb l_{\text{release}}^{\text{leak}} - Bb l_{\text{indike}}^{\text{leak}}) \dots\dots\dots (C.25)$$

$$Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{leak}} = P_{\text{offsite}} (Bb l_{\text{release}}^{\text{leak}} - Bb l_{\text{indike}}^{\text{leak}} - Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{leak}}) \dots\dots\dots (C.26)$$

$$Bb l_{\text{water}}^{\text{leak}} = Bb l_{\text{release}}^{\text{leak}} - (Bb l_{\text{indike}}^{\text{leak}} + Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{leak}} + Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{leak}}) \dots\dots\dots (C.27)$$

f) 计算泄放造成的环境经济后果 $FC_{\text{environ}}^{\text{leak}}$ ：

$$FC_{\text{environ}}^{\text{leak}} = Bb l_{\text{indike}}^{\text{leak}} \cdot C_{\text{indike}} + Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{leak}} \cdot C_{\text{ss-onsite}} + Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{leak}} \cdot C_{\text{ss-offsite}} + Bb l_{\text{water}}^{\text{leak}} \cdot C_{\text{water}} \dots\dots\dots (C.28)$$

g) 确定储罐壁板破裂情况下流体泄放总体积 $Bb l_{\text{release}}^{\text{rupture}}$ ：

$$Bb l_{\text{release}}^{\text{rupture}} = \frac{Bb l_{\text{total}} \cdot F_{G,4}}{F_{G,\text{tot}}} \dots\dots\dots (C.29)$$

h) 根据公式(C.30)~公式(C.33)分别计算储罐壁板破裂情况下仍在围堰内的流体总体积 $Bb l_{\text{indike}}^{\text{rupture}}$ ，泄放在罐区内土壤表面的流体总体积 $Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{rupture}}$ ，泄放在罐区外土壤表面的流体总体积 $Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{rupture}}$ 和已到达水源的流体总体积 $Bb l_{\text{water}}^{\text{rupture}}$ ：

$$Bb l_{\text{indike}}^{\text{rupture}} = Bb l_{\text{release}}^{\text{rupture}} (1 - P_{\text{ldike}}) \dots\dots\dots (C.30)$$

$$Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{rupture}} = P_{\text{onsite}} (Bb l_{\text{release}}^{\text{rupture}} - Bb l_{\text{indike}}^{\text{rupture}}) \dots\dots\dots (C.31)$$

$$Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{rupture}} = P_{\text{offsite}} (Bb l_{\text{release}}^{\text{rupture}} - Bb l_{\text{indike}}^{\text{rupture}} - Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{rupture}}) \dots\dots\dots (C.32)$$

$$Bb l_{\text{water}}^{\text{rupture}} = Bb l_{\text{release}}^{\text{rupture}} - (Bb l_{\text{indike}}^{\text{rupture}} + Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{rupture}} + Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{rupture}}) \dots\dots\dots (C.33)$$

i) 计算储罐壁板破裂造成的环境经济后果 $FC_{\text{environ}}^{\text{rupture}}$ ：

$$FC_{\text{environ}}^{\text{rupture}} = Bb l_{\text{indike}}^{\text{rupture}} \cdot C_{\text{indike}} + Bb l_{\text{ss-onsite}}^{\text{rupture}} \cdot C_{\text{ss-onsite}} + Bb l_{\text{ss-offsite}}^{\text{rupture}} \cdot C_{\text{ss-offsite}} + Bb l_{\text{water}}^{\text{rupture}} \cdot C_{\text{water}} \dots\dots\dots (C.34)$$

j) 根据步骤 f)得到的 $FC_{\text{environ}}^{\text{leak}}$ 和步骤 i)得到的 $FC_{\text{environ}}^{\text{rupture}}$ ，计算泄漏和破裂造成的总体环境经济后

果 FC_{environ} :

$$FC_{\text{environ}} = FC_{\text{environ}}^{\text{leak}} + FC_{\text{environ}}^{\text{rupture}} \dots\dots\dots (C.35)$$

- k) 根据表 C.7 得到的不同尺寸的泄漏孔对应损坏经济后果 $holecost_n$ 、步骤 c) 得到的不同尺寸的泄漏孔平均失效概率总和 $F_{G,\text{total}}$ 以及材料价格系数 $matcost$, 根据公式 (C.36) 计算部件损坏经济后果 FC_{cmd} ; 对于 Q235A, 材料价格系数取 1.0, 其他材料的材料价格系数为与 Q235A 材料实际价格的比值。

$$FC_{\text{cmd}} = \frac{\sum_{n=1}^4 (holecost_n \cdot F_{G,n})}{F_{G,\text{tot}}} \times matcost \dots\dots\dots (C.36)$$

表 C.7 泄漏孔尺寸对应损坏经济后果

单位为元

常压储罐部件	$holecost_n$			
	小泄漏孔	中泄漏孔	大泄漏孔	破裂
底板	40 000	0	0	960 000
各层壁板	40 000	96 000	160 000	320 000

注：上述数据为参考值, 使用单位可根据实际情况调整。

- l) 对应于每一个尺寸的泄漏孔, 计算因检修损坏设备而造成的停产经济后果。
- 1) 根据公式 (C.37) 计算检修设备所需的停工期, 按照表 C.8 确定每个泄漏孔尺寸造成的停工期 $outage_n$ 。

$$outage_{\text{cmd}} = \frac{\sum_{n=1}^4 (outage_n \cdot F_{G,n})}{F_{G,\text{tot}}} \dots\dots\dots (C.37)$$

表 C.8 每个泄漏孔尺寸造成的停工期

单位为天

常压储罐部件	$outage_n$			
	小泄漏孔	中泄漏孔	大泄漏孔	破裂
底板	5	0	0	50
各层壁板	2	3	3	7

- 2) 根据公式 (C.38) 计算停产经济后果 FC_{prod} 。 $procost$ 值由使用单位根据储罐停产期间实际损失选取。

$$FC_{\text{prod}} = outage_{\text{cmd}} \cdot procost \dots\dots\dots (C.38)$$

- m) 根据公式 (C.39) 计算储罐壁板总经济后果。储罐壁板总经济后果根据各层壁板的经济后果加权计算得到。

$$FC_{\text{total}} = FC_{\text{environ}} + FC_{\text{cmd}} + FC_{\text{prod}} \dots\dots\dots (C.39)$$

C.8.2 储罐底板失效的经济后果按下列步骤进行计算。

- a) 确定 P_{lvdiike} 、 P_{onsite} 、 P_{offsite} 等百分比。
- b) 确定环境敏感度, 并根据环境敏感度按表 C.6 的要求确定 C_{indike} 、 $C_{\text{ss-onsite}}$ 、 $C_{\text{ss-offsite}}$ 、 C_{water} 、 C_{subsoil} 和 $C_{\text{groundwater}}$ 。

c) 根据公式(C.2)确定介质渗透速率 $vel_{s, prod}$ 。

d) 确定罐底到地下水的距离 S_{gw} 和流体泄放到达地下水的時間 t_{gl} ：

$$t_{gl} = \frac{S_{gw}}{vel_{s, prod}} \quad \dots\dots\dots (C.40)$$

e) 根据 C.7.2 的步骤 b) 得到的泄放检测时间 t_{ld} ，分别计算对于每个泄漏孔尺寸泄放到罐底土壤与地下水中的流体体积：

$$\text{如果 } t_{gl} > t_{ld}, Bbl_{groundwater, n}^{leak} = Bbl_n^{leak} \left(\frac{t_{ld} - t_{gl}}{t_{ld}} \right) \quad \dots\dots\dots (C.41)$$

$$\text{如果 } t_{gl} \leq t_{ld}, Bbl_{groundwater, n}^{leak} = 0 \quad \dots\dots\dots (C.42)$$

$$Bbl_{subsoil, n}^{leak} = Bbl_n^{leak} - Bbl_{groundwater, n}^{leak} \quad \dots\dots\dots (C.43)$$

f) 对于每个尺寸的泄漏孔，确定泄漏造成的环境经济后果 $FC_{environ}^{leak}$ ：

$$FC_{environ}^{leak} = \frac{\sum_{n=1}^3 (Bbl_{groundwater, n}^{leak} \cdot C_{groundwater} + Bbl_{subsoil, n}^{leak} \cdot C_{subsoil}) \cdot F_{G, n}}{F_{G, tot}} \quad \dots\dots\dots (C.44)$$

g) 确定罐底破裂情况下流体泄放总体积 $Bbl_{release}^{rupture}$ ：

$$Bbl_{release}^{rupture} = \frac{Bbl_{total} \cdot F_{G, 4}}{F_{G, tot}} \quad \dots\dots\dots (C.45)$$

h) 根据公式(C.30)～公式(C.33)分别计算储罐底板破裂后仍在围堰内的流体总体积 $Bbl_{indike}^{rupture}$ ，泄放在罐区内土壤表面的流体总体积 $Bbl_{ss-onsite}^{rupture}$ ，泄放在罐区外土壤表面的流体总体积 $Bbl_{ss-offsite}^{rupture}$ 和已到达水源的流体总体积 Bbl_{water}^{leak} 。

i) 根据步骤 h) 得到的 $Bbl_{indike}^{rupture}$ 、 $Bbl_{ss-onsite}^{rupture}$ 、 $Bbl_{ss-offsite}^{rupture}$ 和 $Bbl_{water}^{rupture}$ ，根据公式(C.34)计算底板破裂造成的环境经济后果 $FC_{environ}^{rupture}$ 。

j) 根据步骤 f) 得到的 $FC_{environ}^{leak}$ 和步骤 i) 得到的 $FC_{environ}^{rupture}$ ，根据公式(C.35)计算泄漏和破裂造成的总体环境经济后果 $FC_{environ}$ 。

k) 根据表 C.7 得到的不同尺寸泄漏孔对应设备破坏经济后果 $holecost_n$ 、C.8.1 的步骤 c) 得到的不同尺寸的泄漏孔平均失效概率总和 $F_{G, total}$ 以及材料价格系数 $matcost$ ，根据公式(C.46)计算设备损坏经济后果 FC_{cmd} ：

$$FC_{cmd} = \frac{\sum_{n=1}^3 (holecost_n \cdot F_{G, n}) + holecost_4 \cdot (D/30)^2 \cdot F_{G, 4}}{F_{G, tot}} \times matcost \quad \dots\dots\dots (C.46)$$

式中， $(D/30)^2$ 是储罐底板更换的经济后果调整系数。表 C.7 中给出了按直径为 30 m 的储罐进行过规格化的损坏经济后果，当储罐直径不同时，利用此经济后果调整系数进行修正。

l) 对应于每一个尺寸的泄漏孔，计算因检修损坏设备而造成的停产经济后果：

1) 根据公式(C.37)计算检修设备所需的总的停工期和按表 C.8 确定每个尺寸的泄漏孔造成的停工期 $outage_n$ ；

2) 根据公式(C.38)计算停产经济后果 FC_{prod} 。

m) 根据公式(C.47)计算储罐底板总经济后果：

$$FC_{total} = FC_{environ} + FC_{cmd} + FC_{prod} \quad \dots\dots\dots (C.47)$$



附录 D

(资料性)

常压储罐的检验及结果评价

D.1 在线检验内容

D.1.1 常压储罐顶板的检查主要包括以下内容：

- a) 顶板是否变形,有无积水、渗漏痕迹,有无凹陷、鼓包、折皱、穿孔等;浮顶罐的浮顶是否平整;
- b) 顶板及浮顶裸露部分防腐层有无脱落、起皮等缺陷;
- c) 顶板焊缝有无腐蚀、开裂等缺陷;
- d) 固定顶、内浮顶及浮顶是否设有人孔,人孔处的开孔补强是否满足要求;密封人孔的盖板是否采用防风结构,安装高度是否高于浮顶允许积水高度;
- e) 隔热层及防水檐是否完好;有无明显损坏,有无渗漏痕迹;
- f) 转动浮梯、导向装置是否灵活好用,浮梯有无锈蚀,踏步板是否水平,有无滑动现象;
- g) 浮顶的排水装置运行是否正常,出口阀门、加热器是否完好;
- h) 浮顶罐密封系统是否完好;
- i) 导向管、量油管是否发生弯曲变形,伸缩囊套密封设施是否完好;
- j) 浮舱是否有腐蚀泄漏;
- k) 火灾报警系统是否完好;
- l) 消防泡沫发生装置是否完好;
- m) 静电接地连接线和顶板等电位连接线是否完好;
- n) 储罐顶板厚度测定时应当根据目视检测结果,确定重点检测区域,每个检测区一般不少于 5 个测定点,检测区各个测定点的平均值作为该块顶板的剩余平均厚度值。

D.1.2 常压储罐壁板的检查主要包括以下内容：

- a) 储罐的罐体、接口(阀门、管路)部位、焊接接头等是否有裂纹、变形、腐蚀、泄漏及其他缺陷等;
- b) 壁板有无腐蚀、泄漏、异常变形,防腐涂层有无破损、脱落等;
- c) 隔热层有无破损、脱落、潮湿、跑冷;
- d) 抗风圈和罐壁加强圈有无腐蚀、脱焊和变形;
- e) 常压储罐与相邻管道或者构件有无异常振动、响声或者相互摩擦;
- f) 储罐罐壁的垂直度、圆度(同一断面最大直径与最小直径)有无异常;
- g) 有侧向搅拌装置的,其根部焊缝有无腐蚀开裂。

D.1.3 常压储罐底板检查主要包括以下内容：

- a) 储罐底板与壁板连接的角焊缝等是否有裂纹、变形、腐蚀、泄漏及其他缺陷等;
- b) 储罐底板外侧的腐蚀是否异常;
- c) 底板外侧的防腐、防水保护层有无破损、脱落;
- d) 储罐底板泄漏探测系统中有无泄漏痕迹;
- e) 储罐罐底有无翘起(特别是常压低温氢储罐)或设置锚栓的低压储罐基础环墙(或锚栓)被拔起;
- f) 基础有无开裂,地脚螺栓有无腐蚀;
- g) 底板的阴极设施是否正常;
- h) 排放(排水、排污)系统是否正常。

D.1.4 检查储罐基础有无下沉,罐体有无倾斜,散水坡有无破损、沥青封口是否完好。

D.1.5 检查储罐液位计、温度计、高低液位报警、高低温度报警、呼吸阀、通气阀、阴极保护、防雷、防静电等附件是否按要求进行校验或测试且功能正常。

D.2 开罐检验内容

D.2.1 常压储罐开罐检验应包括 D.1 在线检验内容,并按照 D.2.2、D.2.3、D.2.4 补充相应检验。

D.2.2 常压储罐顶板检验补充以下内容:

- a) 罐顶内表面是否有锈皮或剥蚀等;
- b) 支架、托架及支撑是否有断裂等;
- c) 支柱有无变薄、腐蚀、松动及扭曲等;
- d) 中央排水系统是否完好;
- e) 浮舱内隔板、肋板和桁架等是否完好,内表面是否清洁,有无腐蚀;
- f) 内浮顶密封是否完好,上部是否有异物,浮筒是否渗漏,支撑是否变形、断裂。

D.2.3 常压储罐壁板检验补充以下内容:

- a) 储罐壁板的内表面、接口(阀门、管路)部位、焊接接头等是否有裂纹、变形、腐蚀、泄漏等,防腐涂层或衬里有无破损、开裂、脱落、变色等,必要时进行尺寸测量;
- b) 罐壁与罐底间的角焊缝和下部第一、二圈壁板的纵、环焊缝以及接管与罐体的连接焊缝有无裂纹等;
- c) 刮蜡板与罐壁是否贴合紧密,是否存在翘曲、损坏等现象;
- d) 检查壁板牺牲阳极的腐蚀情况。

D.2.4 常压储罐底板检验补充以下内容:

- a) 目视检测储罐底板、焊接接头等处有无裂纹、变形、腐蚀、泄漏等,防腐涂层或衬里有无破损、开裂、脱落、变色等,必要时进行尺寸测量;
- b) 底板排水系统是否正常,有无积液和堵塞现象;
- c) 底板相连接的内件角焊缝有无腐蚀、裂纹和变形;
- d) 储罐罐底与罐内加热器、浮顶支柱、仪表卡子等附件相接触部位补强垫板是否完好,垫板周边焊缝是否连续焊接,焊缝表面有无未焊满、裂纹、腐蚀等;
- e) 罐内加热盘管腐蚀情况,有无渗漏,支架有无损坏,管线接头有无异常变形和开裂;
- f) 检查底板牺牲阳极的腐蚀情况。

D.2.5 根据风险分析中储罐的损伤机理和发生的部位,结合检验的有效性和现场条件确定其他检验内容和检测方法,必要时对以下部位进行无损检测:

- a) 第一圈壁板的纵焊缝,第一、二圈壁板的丁字焊缝,壁板开孔与接管的角焊缝进行表面缺陷抽查;
- b) 储罐壁板和底板超出规范要求的变形部位附近焊缝的表面和埋藏缺陷检测;
- c) 目视检测发现的其他可疑部位的表面和埋藏缺陷检测。

D.3 无损检测

D.3.1 根据检验的有效性和现场条件确定无损检测的方法和比例。

D.3.2 采用在油机器人进行在油检测时,应根据罐内介质确定爆炸性混合物的级别、引燃温度组别对危险区域进行划分。

D.3.3 储罐底板腐蚀的声发射检测及结果评价按 JB/T 10764 的要求执行;储罐底板腐蚀的漏磁检测及结果评价按 JB/T 10765 的要求进行;射线检测、超声检测、磁粉检测、渗透检测、衍射时差法超声检测及相控阵超声检测等其他检测方法按 NB/T 47013 的相关要求执行。

D.3.4 罐体变形检测宜采用全站仪、三维扫描仪等适用的检测仪器进行垂直度、局部变形量等检测。

D.3.5 外观检验发现罐底板焊缝、浮顶单盘板焊缝、浮舱底板焊缝、浮舱底板与壁板连接焊缝渗漏,或检验员对焊缝质量有怀疑时,应进行渗漏检测。渗漏检测可采用真空试漏法、充气试漏法或煤油试漏法。真空试漏负压值不应小于 53 kPa,充气试漏时应向密封舱鼓入压力不应小于 785 Pa 的压缩空气。

D.3.6 其他 NB/T 47013 中未包括的无损检测方法可参照其他行业标准要求进行。

D.4 检验结果评价

D.4.1 储罐顶板剩余平均厚度不能满足承载要求或有穿孔时,顶板应修补或更换。

注:内浮顶罐指外顶的顶板。

D.4.2 储罐顶板凹陷、鼓包、折褶允许值见表 D.1、表 D.2,超过允许值应进行修复。其他目视检测结果不满足本文件要求时,应进行修复方可重新投入使用,若无法进行修复,应进行合于使用评价。

表 D.1 顶板与壁板凹陷鼓包允许值

单位为毫米

测量距离	允许偏差值	测量距离	允许偏差值
1 500	20	5 000	40
3 000	35	—	—
注:测量距离指样板弧长。			

表 D.2 顶板与壁板折褶允许值

单位为毫米

壁板厚度	允许折褶高度	壁板厚度	允许折褶高度
4	30	7	60
5	40	>8	80
6	50	—	—

D.4.3 储罐壁板的平均厚度不应小于该圈壁板的最小计算厚度与下次检验时间内腐蚀裕量之和。对于储罐罐壁分散的坑蚀深度超过表 D.3 中允许值且不满足按 NB/T 11662 要求时,应进行修补或更换。

表 D.3 储罐壁板坑蚀深度允许值

单位为毫米

钢板厚度	允许坑蚀深度	钢板厚度	允许坑蚀深度
5	1.8	8	2.8
6	2.2	9	3.2
7	2.5	≥10	3.5

D.4.4 储罐直径小于或等于 60 m 时,壁板的最小计算壁厚 $t_{\min}$ 按公式(D.1)或公式(D.2)计算:

a) 罐壁任一层壁板的最小可接受厚度 $t_{\min}$:

$$t_{\min} = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{[\sigma]\phi} \dots\dots\dots (D.1)$$

b) 罐壁任意位置的最小可接受厚度 $t_{\min}$:

$$t_{\min} = \frac{4.9HDG}{[\sigma]\phi} \dots\dots\dots (D.2)$$

当 $t_{\min} \leq 2.6 \text{ mm}$ 时, $t_{\min}$ 取 2.6 mm。

式中:

- $t_{\min}$ —— 储存介质条件下壁板的最小计算壁厚,单位为毫米(mm);
- D —— 储罐内径,单位为米(m);
- H —— 计算液位高度,单位为米(m),在评估某层时,计算液位高度为该层罐壁板底端至最高液位的高度;
- G —— 储液相对密度(取介质与水密度之比);
- $[\sigma]$ —— 操作温度条件下钢板的许用应力,单位为兆帕(MPa);
- ϕ —— 焊接接头系数,取 $\phi = 0.9$;当标准规定的最低屈服强度大于 390 MPa 时,底圈罐壁板取 $\phi = 0.85$;当评估距离焊缝 25 mm 以上或 2 倍板厚时,取 $\phi = 1.0$ 。

计算储罐壁板最小壁厚时仅考虑了介质载荷,必要时,宜考虑以下载荷的影响,通常这些载荷包括:

- a) 风载;
- b) 地震载荷;
- c) 80 °C 以上的温差载荷;
- d) 真空外压;
- e) 由管道、储罐上安装的设备产生附加载荷;
- f) 由基础沉降引起的载荷。

储罐直径大于 60 m 时,可采用变设计点法或分析设计法进行计算。罐壁厚度的变设计点法计算应符合 GB 50341 的规定。

D.4.5 罐壁变形包括不圆度、凹陷、鼓包、折褶、平斑和在焊缝上的尖峰和带斑。罐壁的几何变形应符合设计要求,不影响安全使用时,可不予以处理;凹陷鼓包和折褶允许值见表 D.1、表 D.2,超过允许值应进行修复,若无法进行修复,应进行合于使用评价。

D.4.6 储罐底板局部腐蚀部位最小厚度应确保在下次检验时的最小厚度不宜小于表 D.4 中所列数值。

表 D.4 底板最小厚度允许值

单位为毫米

罐底/基础结构	下次检验时的底板中幅板最小厚度
储罐罐底/基础设计没有探测和抑制罐底渗漏的设施	2.6
储罐罐底/基础设计有探测和抑制罐底渗漏的设施	1.3
储罐罐底设置有加强衬里,厚度大于 1.3 mm	1.3

D.4.7 边缘板的最小可接受厚度要求如下:

- a) 任意情况下,边缘板最小剩余厚度不应小于 2.6 mm,孤立的点腐蚀可忽略不计;
- b) 当储液相对密度小于 1.0 时,到下次检验时环形边缘板最小剩余厚度不应小于表 D.5 的规定;

表 D.5 环形边缘板最小可接受厚度(储液相对密度小于 1.0 时)

单位为毫米

第一层罐壁原始厚度 ^a	环形边缘板最小可接受厚度			
	$\delta^b \leq 168$	$168 < \delta \leq 186$	$186 < \delta \leq 205$	$205 < \delta \leq 223$
$t \leq 19$	4.3	5.1	5.8	D.2
$19 < t \leq 25$	4.3	5.6	7.9	9.7
$25 < t \leq 32$	4.3	6.6	9.7	12.2
$32 < t \leq 38$	5.6	8.6	12.0	15.0
$t > 38$	6.9	10.2	13.5	17.3
^a 指储罐建造时的公称厚度。 ^b δ 为第一层罐壁的应力,单位为兆帕(MPa),按 $\delta = 4.41D(H - 0.3)/t$ 计算。				

- c) 当储液相对密度大于或等于 1.0 时,到下次检验时环形边缘底板最小剩余厚度不应小于表 D.6 的规定。

表 D.6 环形边缘板最小可接受厚度(储液相对密度大于或等于 1.0 时)

单位为毫米

第一层罐壁原始厚度 ^a	环形边缘板最小可接受厚度			
	$\delta^b \leq 190$	$190 < \delta \leq 210$	$210 < \delta \leq 220$	$220 < \delta \leq 250$
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t \leq 45$	9	13	16	19
^a 产品设计工况下的公称厚度减去腐蚀裕量或水压试验工况下的公称厚度中的较大者。 ^b δ 为第一层壁板最大应力(产品设计或水压试验工况下应力较大者)。应力通过所需厚度除以第一层罐壁厚度,再乘以适用的许用应力来确定。				

D.4.8 关键区域(在罐内沿径向测量,距罐壁 80 mm 以内的罐底板区域)最小可接受厚度应为罐底板原始厚度(不含腐蚀裕量)的 1/2 或者按公式(D.1)/公式(D.2)计算得到的最下层罐壁 $t_{\min}$ 的 1/2 中的较小者,但不应小于 2.6 mm。

D.4.9 罐壁外部罐底边缘板宽度不应小于 10 mm,剩余厚度不应小于 2.6 mm。

D.4.10 储罐底板的变形测量按 SY/T 5921 的规定执行,变形量超过允许值应进行修复或合于使用评价。

D.4.11 储罐罐体及焊缝的无损检测结果,按其相应的检测标准进行评定,其合格级别按建造标准要求;超过原标准的缺陷应返修或进行合于使用评价。

D.4.12 储罐焊缝的真空试漏或煤油试漏不应出现渗漏现象,存在渗漏时,应进行修复。

D.4.13 储罐基础沉降的允许值应符合建造标准的要求,当超过建造标准要求且不满足 SY/T 5921 时,应修复或进行合于使用评价。

D.4.14 储罐罐体的防腐层不宜存在鼓包、粉化、龟裂和剥落等现象,其厚度、附着力和漏点检测应符合

原设计要求。

D.4.15 储罐保温层不宜存在脱落、破损、开裂、渗水等现象,护板不宜存在严重锈蚀。

D.4.16 储罐液位计、高低液位报警、呼吸阀、通气阀、阴极保护、防雷、防静电等附件功能不满足设计要求时,应重新安装或更换。

D.4.17 储罐紧急排水装置不应存在堵塞和泄漏现象。

D.4.18 储罐量油管、导向管不应存在妨碍浮船升降、附件转动的变形现象。

D.4.19 储罐浮顶支柱不宜出现变薄、腐蚀、松动及扭曲等影响支撑作用的现象。

D.4.20 储罐浮顶转动浮梯及其导轨不应存在引起浮船升降的变形现象。

D.4.21 储罐二次密封装置不宜存在泄漏、挡雨板和泡沫板损坏等现象。

D.4.22 储罐浮顶刮蜡板与罐壁之间应贴合紧密,不宜存在翘曲、损坏等现象。

D.4.23 储罐内部热盘管、蒸汽除蜡装置不宜存在泄漏、堵塞、变形损坏等现象。

参 考 文 献

- [1] GB 50341 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范
 - [2] JB/T 10764 无损检测 常压金属储罐声发射检测及评价方法
 - [3] JB/T 10765 无损检测 常压金属储罐漏磁检测方法
 - [4] NB/T 11662 在役常压储罐检验与适用性评价
 - [5] NB/T 47013(所有部分) 承压设备无损检测
 - [6] SHS 01012 常压立式圆筒形钢制焊接储罐维护检修规程
 - [7] SY/T 5921 立式圆筒形钢制焊接油罐 运行维护修理规范
-



