

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CASEI

团 体 标 准

T/CASEI XXXX—XXXX

承压设备基于风险的设计指南

Risk based design guidelines for pressure equipment

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国特种设备检验协会 发 布

目 次

1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 通用要求	2
5 实施流程	3
6 需求分析	4
7 危害识别	5
8 潜在风险评估	7
9 风险处置	9
10 全寿命周期风险管控	9
附录 A（资料性附录） 承压设备主要失效模式	11
附录 B（资料性附录） 潜在失效影响因素与处置措施	12
附录 C（资料性附录） 承压设备设计阶段风险评估报告	17

承压设备基于风险的设计指南

1 范围

1.1 本文件规定了承压设备涉及设计、制造、使用运维等全寿命周期活动过程中基于风险的设计项目实施的通用要求、实施流程、需求分析、危害识别、潜在风险评估、风险处置、全寿命周期风险管控等要点，旨在确保承压设备在全寿命周期范围内的安全性、可靠性和可用性。

1.2 本文件规定的通用要求、实施流程、危害识别、潜在风险评估、风险处置和全寿命周期风险管控要点适用于（包括但不限于）石油化工装置、氢能装备、燃煤机组、管网系统等承压设备实施基于风险的设计项目，其他相关领域相关承压设备也可参照此标准执行。

1.3 本文件适用于承压设备具备以下设计需求特征时的项目实施：

- a) 第III类压力容器；
- b) 当设计具有新颖或替代性特征时，如涉及新的材料、新颖的或复杂的技术等；
- c) 当设计需要满足特定的分类和法定要求时，需要确定安全目标并满足相应安全要求；
- d) 当设计需要进行风险评估和分析，以确定潜在事故和伤亡情景，并采取适当的措施来减轻风险；
- e) 当设计需要满足特定的验收标准，或者满足尽可能合理降低原则（ALARP）；
- f) 当设计需要经过多个阶段的评估和审查，以确保设计的安全性和合规性。

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 150.1~4	压力容器
GB/T 4732.1~6	压力容器分析设计
GB/T 30579	承压设备损伤模式识别
GB/T 34019	超高压容器
GB/T 37816	承压设备安全泄放装置选用与安装
GB/T 35320-2017	危险与可操作性分析（HAZOP分析）应用指南
Q/SY 1362-2011	工艺危害分析管理规范
HG/T 20581-2020	钢制化工容器材料选用规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

基于风险的设计 Risk based design

通过在设计过程中引入各阶段潜在风险的识别、预评估和事前管理，确保设计方案在满足功能要求和相关法规标准规定的同时最大程度地降低风险的方法。

3.2

失效模式 Failure mode

强度、刚度、稳定性不足或泄漏等基本功能无法实现的表现形式。

3.3.

危害识别 Hazard analysis

分析和查找设计、制造、安装、运行和维护等生命周期内各个时期潜在危害的方法。

3.4

全寿命周期 Full life cycle

设计、制造、安装、运行和维护等承压设备从生产到寿命终止的整个过程。

3.5

潜在风险评估 Potential risk assessment

在风险事件发生前，对造成承压设备的失效可能性和失效后果及其潜在风险进行定性或半定量评估的工作。

3.6

设计阶段风险评估报告 Risk assessment report during the design process

充分考虑承压设备在各种工况条件下可能产生的失效模式，针对危害识别和风险控制，在材料选择、结构设计、制造检验要求等方面提出安全措施，在设计阶段编制的风险评估报告，防止可能发生的失效。

4 通用要求

4.1 通则

4.1.1 承压设备基于风险的设计需求除应符合本文件的规定外，还应遵守国家颁布的有关法律和安全技术规范，如固定式压力容器按TSG 21的规定确定。

4.1.2 特定结构的承压设备以及铝、钛、铜、镍及镍合金、锆合金制承压设备，其基于风险的设计除应符合4.1.1的规定外，还应满足以下标准的相应要求：

- a) GB/T 151《热交换器》；
- b) GB/T 12337《钢制球形储罐》；
- c) NB/T 47041《塔式容器》；
- d) NB/T 47042《卧式容器》；
- e) JB/T 4734《铝制焊接容器》；
- f) JB/T 4745《钛制焊接容器》；
- g) JB/T 4755《铜制压力容器》；
- h) JB/T 4756《镍及镍合金制压力容器》；
- i) NB/T 47011《锆制压力容器》。

4.1.3 基于风险的设计要素应符合设计、制造和使用单位的质量管理体系。

4.1.4 基于风险的设计实施相关方包括设计委托方、受托方、监督管理机构等。

4.2 资格与职责

4.2.1 资格

a) 受托方一般为出具过相关报告的风险评估机构，应为具备同类或相似承压设备基于风险的检验（RBI）工程经验。

b) 受托方实施人员应具备承压设备相关的基础理论、承压设备设计、风险评估、安全要求、材料性能、制造检验、法规标准和项目管理等专业知识。

4.2.2 职责

a) 设计委托方是承压设备基于风险的设计需求提出方，一般需在基本安全要求基础上，提供设备类别/级别、基本设计参数、主体材质、承载介质描述及其他特殊设计需求。

b) 受托方是承压设备基于风险的设计具体实施方，主要根据设计委托方给出的设计需求基于风险给出潜在危害、相关风险因素和风险处置措施。

c) 监督管理机构是承压设备基于风险的设计监督管理方，按国家有关法律法规要求执行相关职责。

5 实施流程

5.1 实施关键要素

5.1.1 基于风险的设计分析应覆盖设计、制造、使用运维等全寿命周期可能涉及到风险变化的重要环节。

5.1.2 一个完整的基于风险的设计实施应由下列关键要素组成：

- a) 需求分析，包括设计需求、基本安全要求等；
- b) 危害识别，即跨阶段失效风险影响因素识别；
- c) 风险评估，包括风险可接受准则、失效可能性评估、失效后果评估、风险等级确定；
- d) 风险处置。

5.2 评估实施流程

5.2.1 基于风险的设计实施流程如图1所示。

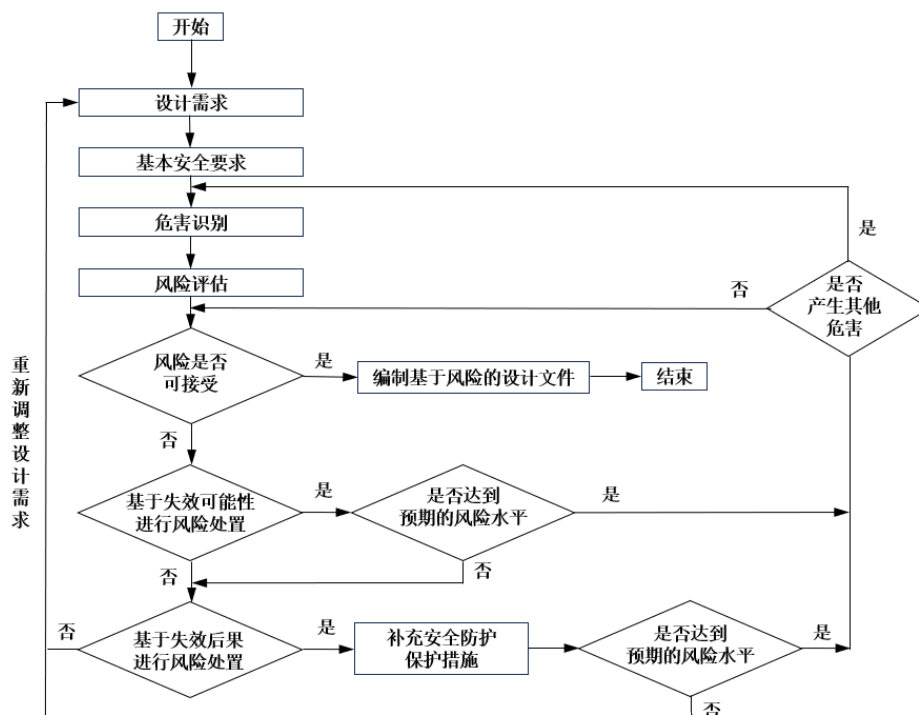


图1 基于风险的设计实施流程

6 需求分析

6.1 设计需求

6.1.1 设计委托方应以书面形式向受托方提出承压设备的设计条件（UDS）。

6.1.2 设计委托方在提出UDS时应考虑所有使用相关的因素，至少应包括下列主要内容：

- a) 建造所依据的标准；
- b) 承压设备的使用地点及其自然条件（包括抗震设防烈度、风压和雪压、环境温度等）和使用相关的情况；
- c) 承压设备的结构、主要几何参数和管口条件；
- d) 设计参数（设计压力、设计温度等）、操作参数（工作压力、工作温度、交变载荷条件、液位高度等），载荷或载荷工况以及环境要求；
- e) 介质组分与特性；
- f) 预期使用年限；
- g) 材料；
- h) 承压设备使用过程中的超压风险及原因，需考虑的超压泄放装置；
- i) 设计需要的其他必要条件。

6.2 基本安全要求

6.2.1 防止泄漏。承压设备应确保有足够的腐蚀裕量、耐环境开裂性能且密封性能良好，避免介质泄漏。

6.2.2 安全裕度。承压设备应能够承受规定的内部压力，具备适应不同预期服役环境的足够强度。

6.2.3 抗疲劳性。考虑到长期运行中可能存在的应力变化，承压设备设计时应确保具有足够的抗疲劳性能。

6.2.4 后果防控。为防止承压设备失效后的巨大事故后果，应在设计时考虑相应安全附件。

7 危害识别

7.1 损伤模式与失效模式

7.1.1 损伤模式主要包括腐蚀减薄、环境开裂、材质劣化、机械损伤和其他损伤等五大类共82种细类，损伤模式识别参照GB/T 30579执行。

7.1.2 承压设备全寿命周期内的主要失效模式包括强度失效、刚度失效、失稳失效和泄漏失效等四大类，GB/T 150中细分为脆性断裂、均匀腐蚀和磨蚀、环境介质导致的裂纹开裂、塑形垮塌、局部过度应变、屈曲和泄漏等，从时间特征上一般为短期、长期和循环失效形式，本文件所指的主要失效模式参考附录A。

7.1.3 除 GB/T 150 所涵盖的主要失效模式、基本失效模式外，设计人员在设计时应充分考虑容器在全寿命周期内可能出现的其他失效模式。

7.2 危害识别方法

7.2.1 确定危害识别清单所使用的危害识别方法包括但不限于工艺危害与风险分析（PHA）、危险与可操作性分析（HAZOP）等，PHA分析可参考Q/SY 1362执行，HAZOP分析可参考GB/T 35320执行。

7.3 设计选材

7.3.1 承压设备受压元件选材除满足 TSG 21 的要求外，还需符合 GB/T150、GB/T 4732、GB/T 34019 或其他压力容器产品标准的要求，并提供完整的质量证明书及可追溯标识。未列入标准的材料需通过技术评审，境外材料需满足 TSG 21 中关于境外材料的规定。

7.3.2 承压设备受压元件选材应考虑适用性原则，根据工作压力、温度、介质特性（如腐蚀性、毒性）及操作特点选择材料，达到与各种工况匹配：

a) 高温环境优先选用含铬、钼、钒等合金元素的耐热钢（如Cr-Mo钢等），确保其抗蠕变性能。
-100℃下的低温环境优先选用奥氏体型不锈钢，利用其良好的低温韧性。

b) 腐蚀性介质环境应考虑材料的耐腐蚀性，酸性介质选不锈钢、镍基合金；碱性介质选碳素钢或低合金钢；临氢环境按HG/T 20581 选抗氢腐蚀材料。

c) 设计寿命与经济性需要综合考虑，在满足安全的前提下，综合考虑材料成本、加工成本及维护费用，选材顺序一般为非合金钢、低合金钢、奥氏体型不锈钢。

7.3.3 承压设备受压元件选材应考虑力学性能、工艺性能、化学与物理性能等性能要求，主要包括强度、韧性、塑性、可焊性、成型性能、与介质相容性、组织结构稳定性：

a) 满足设计压力下的抗拉强度、屈服强度要求，作为强度计算的核心依据。

b) 通过夏比 V 型缺口冲击试验控制低温脆性。

c) 冷加工成型主要受压元件材料需经弯曲试验无裂纹。

d) 控制碳含量 $\leq 0.25\%$ ，碳当量 $C_{eq} < 0.4\%$ 时可焊性优良；受压元件用钢需为镇静钢，重要部件需炉外精炼。

e) 避免材料与介质发生化学反应，必要时进行腐蚀试验。

f) 高温下避免石墨化，低温下控制马氏体转变。

7.3.4 承压设备受压元件设计应考虑制造工艺适配性。法兰、封头、接管等不同部件根据受力和成型工艺选材料，复杂结构选成型性能好的钢材。应减少异种钢焊接，需焊后热处理的容器避免选用焊接性差的材料；非受压元件用钢需与受压元件焊接性匹配。

7.3.5 承压设备受压元件选材应参考使用经验，借鉴同类设备选材案例，避免已知缺陷材料。新材料、超厚板材需复验化学成分和力学性能，必要时进行型式试验。

7.3.6 承压设备受压元件选材应依据高/低温、腐蚀与侵蚀、环境开裂、疲劳等具体服役工况，参考 GB/T 30579、GB/T 150.2 等标准中涉及到相关损伤模式，基于损伤模式进行科学选材。

7.4 设计方法

7.4.1 受托方应依据承压设备可能出现的腐蚀、开裂、断裂、泄漏等失效模式，科学评估设计单位采用的设计方法是否合理。

a) 脆性断裂失效按 GB/T 150.2 选择材料时，容器最低设计温度不低于材料的使用温度下限，否则按 GB/T 150.3 附录 F 进行低温脆断校核。

b) 韧性断裂失效根据规则设计标准 GB/T 150.3 的强度公式计算壁厚或分析设计标准 GB/T 4732 确定壁厚。

c) 对于承受疲劳载荷存在疲劳失效风险的承压设备，无经验可遵循情况下，可根据 GB/T 4732.4 或 GB/T 4732.5 进行疲劳分析设计；对于有成功使用经验的承受循环载荷的容器，经设计单位技术负责人批准，可按 GB/T 150 进行设计，并按 GB/T 4732 补充疲劳分析和评定，同时满足其相关制造要求；超高压容器可依据 GB/T 34019 基于断裂力学进行疲劳评定。

d) 当承受压应力且存在屈曲失效风险时，可根据 GB/T 150.3 中典型结构屈曲失效评定方法或 GB/T 4732.5 中屈曲失效的弹塑性分析方法进行屈曲评定。

e) 当承受持续拉应力且存在蠕变失效风险时，可根据 GB/T 150 中给出的材料的许用应力进行蠕变失效评定，或根据 GB/T 4732.5 附录 A 中给出的蠕变失效分析设计方法进行评定。

f) 当存在密封结构时，应考虑蠕变松弛、化学腐蚀、氢致开裂等垫片或密封圈材料失效，以及热膨胀失配、表面硬度不足等法兰密封面失效。其他失效模式由设计单位根据工程经验选择相应的方法进行设计。

7.5 后果控制

7.5.1 受托方应考虑承压设备可能出现的失效后果，在出现以下情况时应设计增加超压泄放装置：

a) 服役阶段可能存在的超压风险时。

b) 承载介质为清洁、无颗粒和低黏度流体介质，需要设置安全泄放装置且无特殊要求时，应优先选用安全阀。

c) 设计上不准许压力容器内流体介质泄漏的,或压力容器内压力迅速上升,安全阀开启速度不能满足要求的,或低温环境导致安全阀无法正常工作的,或流体介质黏稠、含有颗粒、易沉淀、结晶或聚合生成高分子黏稠物等导致安全阀失效的,或泄压面积过大或泄放压力过高(低)等工况,安全阀不适用的,应优先选用爆破片装置。

d) 承载压缩气体的压力容器因受外界热源影响导致其失效的,可选用易熔合金塞泄放装置。

e) 对整定压力稳定性及密封性要求较高的压力容器,可选用针销式泄放装置,也可选用针销式泄放装置与安全阀的组合装置。

f) 组合泄放装置的选择可依据 GB/T 37816 的规定执行。

8 潜在风险评估

8.1 失效可能性和失效后果

8.1.1 承压设备失效可能性分为5个等级,失效可能性为1、2、3、4和5五等,1表示失效可能性最小,5表示失效可能性最高,潜在失效可能性按照表1划分。

表1 承压设备失效可能性等级划分

失效可能性等级	失效频率描述
1	现实中预期不会发生(在国内行业内没有先例)
2	预期不会发生,但在特殊情况下有可能发生(国内同行业有过先例)
3	在某个特定装置的生命周期里不太可能发生,但有多多个类似装置时,可能在其中一个装置中发生(失效有过先例)
4	在装置生命周期内可能至少发生一次(预期中会发生)
5	在装置生命周期内经常发生

8.1.2 承压设备失效后果分为A、B、C、D、E五等,A表示失效后果最小,E表示灾难性后果,最为严重,潜在可能失效后果按照表2划分。

表2 承压设备失效后果等级划分

失效后果等级	人员伤亡	财产损失	环境影响
A	没有员工伤害或只有轻伤,但没有重伤和死亡。	直接经济损失<50万元。	仅限于生产区域内,没有对周边环境造成影响。
B	造成重伤、急性工业中毒,但没有死亡。	直接经济损失50-100万元。	造成周边环境轻微污染,没有引起群体性事件。

C	一次死亡 1-2 人，或者 3-9 人中毒（重伤）。	直接经济损失 100-500 万元。	1.因失效造成跨县级行政区域纠纷，引起一般群体性影响。 2.发生环境敏感区的油品泄漏量 1t 以下，以及在非环境敏感区油品泄漏量 10t 以下，造成一般污染的事故。
D	一次死亡 3-9 人，或者 10-49 人中毒（重伤）。	直接经济损失 500-1000 万元。	1.因失效造成跨地级行政区域纠纷，使得当地经济、社会活动受到影响。 2.发生在环境敏感区的油品泄漏量 1t-10t，以及在非环境敏感区油品泄漏量 10t-100t，造成较大污染的事故。
E	一次死亡 10 人以上，或者 50 人以上中毒（重伤）。	直接经济损失 ≥1000 万元。	1.失效使得区域生态功能部分丧失或濒危物种生存环境受到污染。 2.失效使得当地经济、社会活动受到严重影响，疏散群众 1 万以上。 3.因失效造成重要河流、湖泊、水库及海水域大面积污染，或县级以上城镇水源地取水中断。 4.发生在环境敏感区的油品泄漏量超过 10t，以及在非环境敏感区油品泄漏量超过 100t，造成重大污染事故。

8.2 风险可接受准则

8.2.1 承压设备潜在失效风险划分为低风险、中风险、中高风险和高风险四个风险等级，按照表3风险可接受准则划分。

表3 风险可接受准则

风险等级	风险值	描述
IV 级风险	D5, E3-D5	高风险（无法接受）
III 级风险	A5,B5,C4-C5,D3-D4, E1-E2	中高风险（较难接受）
II 级风险	A4,B4,C1-C3, D1-D2	中风险（可针对失效可能性或失效后果单方面有限接受）
I 级风险	A1-A3,B1-B3	低风险（可以接受）

8.3 风险分析与评估

8.3.1 承压设备的失效可能性分析主要考虑设计、制造、使用运维等阶段存在的设备损伤机理和失效模式、制造/运行工艺对设备损伤和失效的影响、安装方式可能导致的结构损伤和应力集中、结构不合理或堵塞导致的失效、修复过程中造成的二次损伤等，结合部件失效频次、事故案例和专家经验给出失效可能性等级。

8.3.2 承压设备的失效后果包括由强度失效导致的物理或化学爆炸、刚度失效和失稳失效导致的功能丧失、介质泄漏失效造成的燃烧与爆炸、毒气扩散中毒等，以及由此造成的不可康复的人员健康影响。

8.3.3 承压设备主要部件的风险是失效可能性和失效后果的乘积，按表3划分为四个风险等级，承压设备的综合风险取其主要部件风险的最高等级。

9 风险处置

9.1 结合危害识别清单和风险评估结果，针对潜在失效影响因素逐一列出风险处置措施，相关风险处置措施可参考附录B。

9.2 对于计算后风险位于可接受范围内的低风险承压设备，风险可保留，企业可视成本需要选择是否采纳风险处置措施。

9.3 对于中风险和中高风险承压设备，可分别针对失效可能性或失效后果实施风险处置措施，进行有效的风险控制。

9.4 对于高风险承压设备，可先通过风险处置措施实施降险，如无法实现风险降低，则需要通过补充安全防护保护措施，或重新调整设计需求。

10 全寿命周期风险管控

10.1 风险评估报告

10.1.1 承压设备基于风险的设计最终输出为设计阶段风险评估报告（模板见附录C），主要包括需求分析、危害识别、风险评估、风险处置等内容，应充分考虑承压设备在各种工况条件下可能产生的损伤模式和失效模式，在材料选择、结构设计、制造检验要求等方面提出安全措施，防止全寿命周期可能发生的失效。

10.1.2 承压设备设计阶段风险评估报告，至少进行设计、校核和审核 3 级签署；对于第Ⅲ类压力容器和分析设计的压力容器，还应当由压力容器设计单位技术负责人或者其授权人批准（4 级签署）。

10.1.3 设计阶段风险评估报告的保存期限不少于承压设备的设计使用年限。

10.2 数据协同管理

10.2.1 应建立覆盖压力容器设计、制造、使用运维等全寿命周期数据管理平台，支持授权下的数据共享与追溯，确保关键风险数据在后续阶段可追溯和分析。

10.2.2 各阶段产生的关键数据应遵循统一的元数据标准和编码规范，确保数据语义一致、格式兼容，便于跨阶段、跨系统识别、交换与集成。

10.2.3 每个阶段的责任主体应确保上传数据的真实性、准确性、完整性、一致性和时效性。

- a) 真实性：数据来源真实、内容无篡改、技术状态与实际一致，且生成过程符合标准规范要求。
- b) 准确性：数据真实反映实际对象或过程的状态，无偏差或错误。
- c) 完整性：数据无缺失，覆盖所有必要信息。
- d) 一致性：跨阶段、跨系统的数据逻辑自洽，无矛盾。
- e) 时效性：数据在需要时可及时获取且反映最新状态。

10.2.4 使用、检验、维修阶段获得的在线监测结果、壁厚测定值、腐蚀速率、缺陷发展情况等新数据，应及时、规范地更新至数据平台，便于基于风险的检验（RBI）、完整性操作窗口（IOWs）、寿命到期后的设计再评估（PSLR）等利用动态更新数据进行风险控制。

附录 A（资料性附录）承压设备主要失效模式

表 A.1 给出了承压设备基本失效模式、主要失效模式和失效类别之间的关系。

表 A.1 承压设备基本失效模式、主要失效模式和失效类别关系

基本失效模式	主要失效模式	失效类别
短期失效模式	脆性断裂	强度失效
	韧性断裂	强度失效
	超量变形引起的接头泄漏	泄漏失效
	弹性、塑性或弹塑性失稳（屈曲）	失稳失效
长期失效模式	蠕变断裂	强度失效
	蠕变失稳	失稳失效
	质量损失（冲蚀、腐蚀）	强度失效、泄漏失效
	环境助长开裂（如应力腐蚀开裂、氢致开裂）	强度失效、泄漏失效
循环失效模式	扩展性塑性变形	强度失效
	弹性应变疲劳（中周和高周疲劳）或弹-塑性应变疲劳（低周疲劳）	强度失效
	环境助长疲劳	强度失效

附录 B（资料性附录）潜在失效影响因素与处置措施

表 B.1 给出了承压设备损伤模式、失效模式、潜在失效影响因素和处置措施之间的关系。

表 B.1 承压设备潜在失效影响因素与处置措施关系表

序号	损伤模式		失效模式	潜在失效影响因素	处置措施
1	腐 蚀 减薄	均匀/局部 腐蚀减薄	强度失效 泄漏失效	· 合金成分 · 危害介质含量 · 介质浓度/分压 · 温度、湿度 · 相态、流态、流速 · 酸值/pH 值 · 硫含量 · （溶解）氧含量	· 合理选材 · 合理确定腐蚀裕量 · 腐蚀性介质含量监控 · 定期检验 · 在线监测
2		电偶腐蚀	强度失效 泄漏失效	· 介质 · 材料组合 · 导电回路 · 相对暴露面积 · 表面状态	· 合理选材 · 避免出现大阴极小阳极面积比的不合理结构 · 绝缘处理 · 阴极保护 · 涂层保护
3		缝隙腐蚀	泄漏失效	· 缝隙宽度 0.025-0.1mm · 有介质滞留在缝隙内 · 易钝化合金或金属 · 腐蚀介质，特别是含氯离子熔盐	· 尽量避免形成缝隙或死角 · 选用抗缝隙腐蚀能力强的材料 · 表面钝化处理
4	环 境 开裂	氯化物应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 温度 · 浓度 · 伴热或蒸发条件 · pH 值 · 应力 · 选材 · 溶解氧	· 合理选材 · 控制介质中氯离子含量 · 尽量降低工作温度
5		碳酸盐应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 应力 · pH 值 · 氰化物含量 · CO2 浓度+温度 · 硫化物浓度	· 选材防护 · 焊后热处理消除焊接残余应力 · 使用偏钒酸盐防腐剂来预防开裂 · 内壁刷涂防腐涂层
6		硝酸盐应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 硝酸盐浓度 · 温度 · 应力 · 缓蚀剂 · 合金元素	· 焊后热处理消除焊接残余应力 · 控制操作温度大于露点温度
7		碱应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 碱浓度 · 温度 · 残余应力 · 伴热	· 选材 · 碳钢消除应力热处理
8		氨应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 残余应力 · 合金成分 · 氨/铵盐水溶液	· 合理选材 · 焊后消除应力热处理 · 限制材料碳当量 CE

				· 溶解氧	· 控制材料或焊缝硬度 · 液氨中添加大于等于 0.2% 的水作缓蚀剂，作为防止应力腐蚀开裂的措施
9		胺应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 胺类型和浓度 · 应力 · 温度	· 焊后热处理消除焊接残余应力
10		湿硫化氢破坏	强度失效 泄漏失效	· pH 值 · H₂S 分压 · 温度 · 硬度 · 钢材纯净度 · 残余应力 · NH₄HS 浓度	· 合理选材 · 焊后消除应力热处理 · 限制材料碳当量 CE · 控制材料或焊缝硬度 · 控制材料 P、S 含量 · 材料抗氢诱导裂纹 (HIC) 试验
11		氢氟酸环境应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 冷加工 (硬度) · 焊接残余应力 · 水含量 · 合金元素含量	· 选材防护 · 焊后热处理消除焊接残余应力 · 焊缝硬度控制 · 碳当量控制 · 内壁刷涂防腐涂层
12		氢脆	强度失效	· 氢浓度 · 钢/合金强度 · 残余应力 · 温度 · 壁厚 · 显微组织	· 选材防护 · 停车时先降压再降温
13		连多硫酸应力腐蚀开裂	强度失效 泄漏失效	· 环境是否存硫化物 · 敏化态材料 · 残余应力 · 钢/合金碳含量 · 水	· 采取干燥氮气吹扫和封闭工艺设备，使之与氧 (空气) 隔绝的方法来预防 · 采用碱液清洗所有设备表面，中和各处可能生成的连多硫酸。 · 应选用带稳定性元素的 18-8 不锈钢如 1Cr18Ni9Ti 或 1Cr18Ni9Nb
14		液体金属脆断	强度失效	· 低熔点金属 (如 Zn、Hg、Cd、Pb、Cu、Sn 等) 接触 · 拉应力 · 温度	· 避免材料与液态汞接触
15	材 质 劣 化	晶粒长大	强度失效	· 温度 · 时间 · 合金元素含量 · 碳含量 · 显微组织	· 选材防护 (CrMo 钢)
16		渗氮	强度失效	· 高浓度还原性氮化物 (氨或氰化物等) 分压; · 温度 · 材质 Ni 含量 · 时间	· 选材防护
17		球化	强度失效	· 温度 · 显微组织	· 选材防护 (CrMo 钢)

18		石墨化	强度失效	· 温度 · 应力 · 合金元素：Mo、Cr · 时间	· 选材防护（CrMo 钢）
19		渗碳	强度失效	· 高碳活性气相 · 温度 · 合金元素：Cr、Ni · 微量氧气或蒸汽	· 选材防护 · 介质添加少量硫，硫抑制渗碳作用
20		脱碳	强度失效	· 气相介质碳含量 · 温度 · 时间	· 选材防护 · 控制介质组分
21		金属粉化	强度失效	· 还原性气体介质 · 氧化还原交替环境 · 温度	· 介质中加入保护性硫化物（H₂S） · 材料渗铝
22		σ 相脆化	强度失效	· 高温持续时间 · 温度 · 焊接（包括堆焊） · 铁素体含量（包括 δ 铁素体） · 热处理	· 通过焊接工艺评定，优化焊接工艺，防止 σ 相脆化 · 控制铁素体含量 · 热处理时间尽量短一点
23		475□脆化	强度失效	· 温度 · 持续时间 · 铁素体含量	· 选材防护
24		回火脆化	强度失效	· 杂质元素含量（S、P、Sn、Sb、As）； · Mn 元素含量 · 温度 · 时间 · 临氢环境 · 焊缝组织	· 材料订货控制（J 系数和 X 系数控制） · 步冷试验及参数控制 · 装置开车先升温再升压 · 水压试验时控制水温
25		钛氢化	强度失效	· pH 值 · 硫化物含量 · 温度 · 电位差 · 铁锈、FeS 等杂质 · 材质	· 选材防护（备注：钛不应在胺或酸水等已知会产生氢化现象的使用环境中使用）
26		再热裂纹	泄漏失效	· 应力 · 壁厚 · 温度 · 焊后/消应力/稳定化处理 · 焊缝金属与基体强度差	· 焊接工艺评定 · 热处理后进行无损检测
27		脱合金腐蚀	强度失效	· 敏感材料 · 操作环境（见 GB/T 30579 表 1）	· 选材防护
28		敏化-晶间腐蚀	泄漏失效	· 温度 · 含碳量 · 合金成分（Nb、Ti、V） · 固容热处理+快速冷却/稳定化热处理	· 合理选材 · 固溶处理或稳定化处理 · 晶间腐蚀试验 · 控制介质成分 · 控制温度
		金属热老化	强度失效	· 温度 · 含碳量 · 析出相（G 相、M₂₃C₆、	· 合理选材 · 固溶处理或稳定化处理 · 控制温度

				Nb(C,N) · 服役时间	· 定期检验
29	机 械 损 伤	机械疲劳	强度失效	· 几何不连续（如槽口、开孔、错边、表面缺陷、腐蚀坑、螺纹根部缺口等） · 材料内部的冶金和显微结构不连续（如金属夹杂物、焊接/锻造缺陷、划痕、加工刀痕等） · 循环应力 · 热处理和显微组织 · 循环次数	· 按 GB/T 4732 标准进行疲劳分析设计 · 提高钢板、锻件的质量控制指标 · 防止应力集中 · 降低焊接残余应力 · 控制焊接缺陷 · 控制容器表面质量 · 定期检验
30		热疲劳	强度失效	· 循环温差 · 应力及幅值 · 循环次数 · 温度 · 材料物理/力学性能（如导热率、比热、弹性模量、屈服应力） · 应力集中部位，如缺口、焊脚、壳体接管连接处等 · 热处理	· 按 JB4732 标准进行疲劳分析设计 · 提高钢板、锻件的质量控制指标 · 防止应力集中 · 降低焊接残余应力 · 控制焊接缺陷 · 控制容器表面质量 · 定期检验 · 在设备开机和停机期间控制加热和冷却速度 · 应考虑在不同材料的相邻部件之间的不均匀热膨胀。
31		振动疲劳	强度失效	· 振幅 · 振动频率 · 材质抗疲劳能力 · 振动源（包括支撑不足、支撑过度、刚性连接等） · 应力集中部位	· 使用支撑或减振设备（隔振）来消除或减小振动 · 在小口径接头上安装劲板和加强杆 · 取消不必要的接头
32		汽蚀	强度失效 泄漏失效	· 汽蚀余量 · 温度 · 固体或磨蚀性颗粒 · 流体性质 · 相态、流态 · 流速 · 夹带空气	· 使流动路径呈流线型以减少紊流 · 降低流速 · 去除夹带的空气 · 增加泵的吸水压 · 通过添加剂改变流体性质
33		超压（过载的一种）	强度失效	物理超压 · 设计安全裕度 · 压力 · 弹性操作范围 · 进出料速度 · 瞬时压力脉动 · 过热蒸汽温度超限 · 液化气体受热蒸发 · 物料受热膨胀 化学超压 · 可燃气体/粉尘燃爆 · 放热化学反应失控 · 化学反应产生气体量远大于消耗气体量	· 设置安全阀 · 压力监测仪表 · 超压连锁控制系统 · 设液位计（防止过量充装）

34		热冲击	强度失效	· 温差 · 热膨胀系数 · 铸造/焊接/锻造缺陷	· 防止高温管线中流体中断 · 设计时使约束最小化 · 安装隔热套管以防止液体冲击 · 尽量减少雨水或消防水喷淋情形 · 检查热/冷注入点是否有潜在的热冲击
35		蠕变	强度失效	· 温度 · 应力 · 合金元素含量 · 晶粒尺寸	· 选材防护（如 CrMo 钢等） · 按标准确定许用应力 · 防止应力集中 · 焊后热处理温度宜取标准要求的上限
36		应变时效	强度失效	· 化学成分：N、C 元素 · 成形工艺：轧制、弯曲工艺的应变速率 · 温度范围 150-350°C · 冷加工变形 · 加载和升温顺序及幅度 · 应力集中部位	· 冷加工后进行热处理
37	其 他 损 伤	冲蚀	强度失效 泄漏失效	· 腐蚀介质 · 介质流速、流态 · 夹带颗粒尺寸、硬度和密度、冲击角度等 · 材质硬度	· 使流动路径呈流线型以减少紊流 · 降低流速 · 去除夹带的空气 · 增加泵的吸水压 · 通过添加剂改变流体性质 · 定期检修
38		腐蚀疲劳	强度失效 泄漏失效	· 应力集中部位，如点蚀坑、缺口、表面缺陷、截面突变、角焊缝等 · 循环应力 · 促进氢进入环境的因素 · 材料耐疲劳、耐腐蚀性能	· 控制给水或冷凝水水质 · 通过焊后热处理使焊接残余应力和加工应力减到最小 · 将焊缝轮廓打磨光滑使焊缝余高减到最小
39		过热	强度失效	· 温度 · 介质压力或外加载荷 · 壁厚减薄	· 温度监测 · 超温连锁控制系统 · 喷淋系统
40		低温脆断	强度失效	· 脆性相比比例 · 材料韧性和抗脆断能力（包括材料纯净度、晶粒尺寸等） · 壁厚 · 温度	· 加强水压试验操作过程管理 · 为了防止低温脆断，严禁水温低于 5℃； · 水压试验前进行内外壁 100%MT 检测。
41		耐火材料退化	强度失效	· 耐火材料性能，如耐腐蚀、耐热冲击和热膨胀性能 · 锚固材料选择 · 定期干燥和养护 · 适应工艺环境的固定杆和填充物	· 选材防护 · 定期检验
42		高温氢损伤 (HTHA)	强度失效	· 温度 · 氢分压 · 材质碳含量	· 选材防护（CrMo 钢）

附录 C（资料性附录） 承压设备设计阶段风险评估报告

C.1 概述

根据颁布的 TSG 21 中 3.6 条关于“对第三类压力容器，设计时应当出具包括主要失效模式和风险控制等内容的设计阶段风险评估报告”的要求，对 XXX 设备进行设计阶段风险评估。

C.2 设计条件和基本设计参数

C.2.1 设计条件

设计委托方提出的设计条件应包括建造标准、使用地点、自然条件、几何结构和管口条件、载荷工况、环境要求、介质组分与特性、预期使用年限、材料、超压泄放装置（如需）及其他必要条件。

C.2.2 基本设计参数

基本设计参数应包括设计压力、设计温度、焊接接头系数、水压试验压力、容器类别、加热面积（如有）、设计循环载荷（周次）、内径/外径、壁厚等。

C.3 设计使用情况分析

对介质、选材、设计方法、服役工况等设计使用情况进行逐一分析和说明。

C.4 危害识别

通过一种或若干危害识别方法，基于损伤模式和失效模式，从设计选材、设计方法、后果控制、制造工艺、使用危害等多个方面给出承压设备的主要损伤部件存在的损伤模式、主要损伤机理、失效模式和潜在危害后果等。

C.5 潜在风险评估

进行失效可能性和失效后果分析，综合设计、制造和使用各方意见，建立风险可接受准则，给出设备整体和不同部件的潜在风险评估结果。

C.6 风险处置及管控建议

根据危害识别和风险评估结果，从设计、制造、使用等全寿命周期各环节，提出相应的风险处置及管控建议。

中国特种设备检验协会团体标准

《承压设备基于风险的设计指南》

编制说明

一、目的和意义

近年来，承压设备不断向大型化、高参数、苛刻介质和长周期等方向发展，发生泄漏、火灾和爆炸等事故的安全风险越来越大。原国家质量监督检验检疫总局颁布了 TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》和国家标准 GB/T 150-2024《压力容器》，要求出具设计阶段风险评估报告，但缺乏相应的标准指导。制定《承压设备基于风险的设计指南》标准，不仅能全面地考虑实际服役环境可能引发的相对复杂的失效模式和损伤机理，提升设计制造过程中承压设备的本质安全，也有利于进一步规范设计阶段风险评估报告的统一性、完整性和可操作性，保障石油化工、电力、冶金、医药、航空航天等行业的承压设备安全使用，不会因为设计要求不足而在使用过程中突然失效或过早失效，也不会由于过度设计造成材料浪费缺乏经济性。

二、任务来源

本项目来源于《中国特种设备检验协会团体标准项目任务书》（项目编号：2024024），立项标准名称为《承压设备基于风险的设计指南》，由中国特种设备检测研究院提出，协会归口。

三、编制过程

2024 年 4 月，中国特种设备检测研究院（以下简称“中国特检院”）向协会团体标准工作委员会提出编制团体标准《承压设备基于

风险的设计指南》的申请，2024 年 5 月该标准正式纳入协会团体标准立项计划，2024 年 6 月成立标准起草组，主要编制过程如下：

1、前期项目调研阶段

2024 年 4 月至 6 月，中国特检院等单位结合承压设备基于风险的设计的相关规范标准，调研的内容包括：

（1）GB/T 150《压力容器》附录 F（规范性）“风险评估报告”的实施情况；

（2）合肥通用机械研究院有限公司、中石化工程建设有限公司等 5 家单位在设计、制造、检验检测、设备使用运维过程中的风险评估和风险管控情况；

（3）查阅学习相关规范和标准：特种设备安全技术规范 TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》，国家标准《压力容器》（GB/T 150-2024）、《压力容器分析设计》（GB/T 4732-2024）、《承压设备损伤模式识别》（GB/T 30579-2022）、《承压设备安全泄放装置选用与安装》（GB/T 37816-2019）、《危险与可操作性分析（HAZOP 分析）应用指南》（GB/T 35320-2017），以及行业标准《工艺危害分析管理规范》（Q/SY 1362-2011）、《钢制化工容器材料选用规范》（HG/T 20581-2020）等；

2、标准起草阶段

标准起草组根据前期调研的情况，制定了标准框架，确定通用要求、实施流程、需求分析、危害识别、潜在风险评估、风险处置、全寿命周期风险管控等基本内容，于 2024 年 9 月形成了标准草案。

3、研讨完善阶段

2024 年 9 月，标准起草组以线上会议形式，邀请相关专业技术人员，对标准草案进行多次讨论和修改完善。本标准是国家重点研发计划课题的研究成果之一，2024 年 11 月、2025 年 6 月，标准起草组在课题年度会议和技术交流会上汇报了标准框架和制定的总体思路、标准每部分的主要内容，与会专家提出了修改意见建议。标准编制组针对意见建议，对标准草案进行修订，形成标准征求意见稿，下一步面向社会对本标准征求意见。

四、主要内容技术指标确立

本标准的编制遵循“先进性、实用性、统一性、规范性”的原则，注重标准的可操作性，保证标准起草工作的科学性、真实性、规范性。按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写原则》的要求进行编写。本标准中的主要内容包括：

1 范围

本文件规定了承压设备涉及设计、制造、使用运维等全寿命周期活动过程中基于风险的设计项目实施的通用要求、实施流程、需求分析、危害识别、潜在风险评估、风险处置、全寿命周期风险管控等要点，旨在确保承压设备在全寿命周期范围内的安全性、可靠性和可用性。

本文件规定的通用要求、实施流程、危害识别、潜在风险评估、风险处置和全寿命周期风险管控要点适用于（包括但不限于）石油化工装置、氢能装备、燃煤机组、管网系统等承压设备实施基于风险的设计项目，其他相关领域相关承压设备也可参照此标准执行。

本文件适用于第 III 类压力容器，以及设计具有新颖或替代性特

征的、设计需要满足特定的分类和法定要求的、设计需要进行风险评估和分析以确定潜在事故和伤亡情景并采取适当的措施来减轻风险的、设计需要满足特定的验收标准或者满足尽可能合理降低原则（ALARP）的、设计需要经过多个阶段的评估和审查以确保设计的安全性和合规性的承压设备。

2 规范性引用文件

GB/T 150.1~4	压力容器
GB/T 4732.1~6	压力容器分析设计
GB/T 30579	承压设备损伤模式识别
GB/T 34019	超高压容器
GB/T 37816	承压设备安全泄放装置选用与安装
GB/T 35320-2017	危险与可操作性分析（HAZOP分析）应用指南
Q/SY 1362-2011	工艺危害分析管理规范
HG/T 20581-2020	钢制化工容器材料选用规范

3 术语和定义

本文件定义了基于风险的设计、失效模式、危害识别、全寿命周期、潜在风险评估、设计阶段风险评估报告等标准中涉及的6个术语。

4 通用要求

规定了应遵循有关法律法规和特定技术标准、质量管理体系的要求，给出了基于风险的设计实施相关方，以及各方应遵循的资格与职责。

5 实施流程

规定了基于风险的设计实施过程的关键要素及其组成，给出了具体实施流程。

6 需求分析

给出了具体设计需求和基本安全要求。

7 危害识别

明确了基于风险的设计中应考虑的伤害模式与失效模式，给出了PHA、HAZOP等可采用的危害识别方法，并从设计选材、设计方法、后果控制等方面给出了设计阶段危害识别要点。

8 潜在风险评估

给出了失效可能性评估、失效后果评估的规则，给出了风险可接受准则建议和风险结果分析利用。

9 风险处置

结合危害识别清单和风险评估结果，针对不同风险等级的承压设备，明确了如果进行风险优化与处置措施。

10全寿命周期风险管控

给出了风险评估报告应考虑主要内容，面向全寿命周期风险管控，明确了数据协同管理方面要点。

附录A 承压设备主要失效模式为资料性附录，给出了承压设备基本失效模式、主要失效模式和失效类别关系。

附录B 潜在失效影响因素与处置措施为资料性附录，给出了承压设备损伤模式、失效模式、潜在失效影响因素和处置措施之间的关系。

附录C 承压设备设计阶段风险评估报告为资料性附录，给出了承压设备设计阶段风险评估报告应包含的重点内容及相关内容要求。

五、差异对比

无。

六、与相关法律法规和国家标准、行业标准、地方标准的关系

本标准可全面支撑特种设备安全技术规范TSG 21-2016《固定式压力容器安全技术监察规程》3.1.6条款“第III类压力容器或者用户要求的其他压力容器，设计单位应当出具包括主要失效模式和风险控制等内容风险评估报告。”和GB/T 150.1《压力容器》附录F（规范性）风险评估报告的具体实施。

七、重大分歧意见的处理

无。

八、实施推广建议

标准发布实施后，中国特种设备检验协会作为管理部门，与承压设备设计、制造和使用运维单位共同推动该标准在全国范围内的推广和实施。