doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.08.007

设计计算

承压设备设计阶段风险评估与降险措施研究

陆新元[1,2],邵珊珊[1,2],曹逻炜[1,2],贾国栋[1,2],胡久韶[3],杜晨阳[1,2]
（1.中国特种设备检测研究院 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室,北京 100029;
2.中国特种设备检测研究院,北京 100029;3.合肥通用机械研究院有限公司,合肥 230031）

摘　要:针对当前承压设备设计阶段缺乏系统性风险评估框架的问题,基于ISO 16528-1,GB/T 150.1~150.4—2024等11项国际国内标准,提出包含“危害识别-风险评估-风险可接受判定-风险处置”的设计阶段风险评估方法。通过梳理3大类、11种失效模式(含短期失效、长期失效和循环失效),建立四等级风险矩阵,并结合ALARP准则量化风险可接受性。结果表明,设计阶段需重点关注腐蚀减薄、环境开裂、材质劣化和机械损伤共4类主要损伤;研究形成的标准化框架已支撑GB/T 150.1~150.4—2024附录F编制,解决了传统设计规范对复杂损伤机理考量不足的缺陷。该研究可为承压设备设计阶段的风险评估提供标准化参考框架。

关键词:承压设备;设计阶段;风险评估;危害识别;降险措施
中图分类号:TH49;O211.67;TB114.2　　**文献标志码:**A

Research on risk assessment and risk reduction measures in the design phase of pressure equipment

LU Xinyuan[1,2],SHAO Shanshan[1,2],CAO Luowei[1,2],JIA Guodong[1,2],HU Jiushao[3],DU Chenyang[1,2]
（1.State Key Laboratory of Low-carbon Thermal Power Generation Technology and Equipments,China Special Equipment Inspection and Research Institute,Beijing 100029,China;2.China Special Equipment Inspection and Research Institute,Beijing 100029,China;3.Hefei General Machinery Research Institute Co.,Ltd.,Hefei 230031,China）

Abstract: To address the lack of a systematic risk assessment framework during the design phase of pressure equipment, a full-process method of “hazard identification-risk assessment-risk acceptability determination-risk treatment” is proposed based on 11 international and domestic standards, including ISO 16528-1 and GB/T 150.1~150.4—2024.By categorizing 3 major types and 11 failure modes (including short-term, long-term, and cyclic failures), a four-level risk matrix is established, and risk acceptability is quantified using the ALARP principle. The results indicate that four major types of damage require focused attention during the design phase: Corrosion thinning, environmental cracking, material degradation, and mechanical damage.The standardized framework developed in this study has supported the formulation of Appendix F in GB/T 150.1~150.4—2024, addressing the inadequacy of traditional design codes in considering complex damage mechanisms. This research provides a standardized reference framework for risk assessment in the design phase of pressure equipment.

Key words:pressure equipment;design phase;risk assessment;hazard identification;risk reduction measures

0　引言

随着石油化工、煤化工、火力发电、氢能等行业的成套装置向大型化、高参数、苛刻介质和长周期运行等方向持续发展,锅炉、压力容器和压力管道等承压设备的设计、制造和运行开始采用大量新材料、新技术和新工艺,如何在经济性基础上保障承压设备长周期安全运行,成为全球范围内关注

收稿日期:2025-05-16　**修回日期:**2025-07-24
基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFB3306401)

的重要问题。现行承压设备的设计规范和标准对强度、刚度、稳定性等力学问题考虑较为全面，但尚缺乏对实际服役环境可能引发的相对复杂损伤机理和失效模式的充分考量；设计阶段也普遍缺乏长期的失效数据积累反馈和相应的风险评估标准[1]。上述问题直接导致2个显著后果：（1）承压设备因设计要求不足而在服役过程中发生突发性失效或过早失效，从而引发安全事故；（2）由于过度设计造成材料浪费与成本上升，造成经济性不足。

国外对压力容器设计制造阶段的风险识别、评价与控制技术高度重视。ISO 16528-1：2007中明确规定了锅炉和压力容器设计制造过程中需要考虑的主要失效模式。美国、欧盟、澳大利亚等采用多个法律法规对承压设备设计阶段风险分析提出了相关要求。ASME Ⅷ-1：2023中提到，设备部件的设计应确保材料失效或退化不影响其功能执行，若发生失效，则需确定原因，并进行重新试验。欧洲PED指令中提到，压力容器在设计时应提交风险评估报告，内容包括使用时可能出现的主要失效模式与机理、主要失效模式的失效可能性、在设计制造时采取的预防措施、使用中应注意的问题等。澳大利亚压力容器标准AS 1210—2010中指出，通过对使用过程中的危害识别、风险评估和风险控制来完成风险管理在设计阶段的工作。劳氏船级社于2018年在文献[2]中提到，应通过设计和安全声明、风险评估、修订和支持研究、最终设计评估等程序完成基于风险的设计，并可根据新颖性/偏差程度、设计复杂性和安全考虑因素进行扩展。

国内承压设备设计阶段风险评估研究与实践也逐步开展。21世纪初以来，基于风险的检验技术（RBI）的国产化研究和大范围成功应用，显著提升了承压设备运行的安全性与经济性，风险评估技术得到广泛认可[3-4]。2007年，陈学东等[5]率先提出了基于风险的设计初步理念，认为可以通过考虑工作环境、可能存在的损伤和失效来得到对设备安全性和寿命的影响，进而识别高风险工况和部位，最后进行设计优化。2009年，基于我国承压设备事故调查分析工作，陈学东等[6]进一步提出了构建基于风险与寿命的设计制造和维护平台，以期在设计制造早期阶段降低承压设备风险。同时期，风险评估技术逐步被法规标准采纳，如2009年发布的《固定式压力容器安全技术监察规程》的设计部分，首次提出了对Ⅲ类压力容器在设计阶段要出具风险报告的要求[7]。随后，2011年修订发布的GB 150中，引入了基于风险的设计制造理念，要求在压力容器设计阶段进行风险评估，并在设计制造过程中，针对主要失效模式，通过合理选材、优化结构、合理确定制造检验工艺来预防和降低使用过程中的风险[8]。随着标准制修订发展，我国现行的TSG 21—2016《固定式压力容器安全技术监察规程》第3.1.6中强制要求，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的风险评估报告；2024年，最新修订的GB/T 150.1~150.4—2024《压力容器》第5.2.2.2中明确规定，设计单位向用户出具的风险评估报告应符合附录F的要求，考虑容器在使用中可能出现的所有失效模式，提出防止失效的措施。各国法律法规关于承压设备设计阶段风险评估的要求见表1。

表1 各国法律法规对承压设备设计阶段风险分析的要求

Tab.1 Requirements of national laws and regulations for risk analysis in the design phase of pressure equipment

国家/组织	规范/标准	条款及风险评估要求
ISO	ISO 16528-1：2007	锅炉和压力容器的设计应考虑附录A，并特别考虑6.2中所列的失效模式
美国	ASME Ⅷ	设备部件的设计应使材料失效或退化不会影响其功能执行。一旦失效，应确定设备部件失效的原因，并进行重新试验
欧盟	PED指令（2014/68/EU）	附件1第1.2条规定应尽可能消除或减少危害，在安装和/或使用时是否需要采取适当的特别措施以降低风险，对无法消除的危害采取适当的防护措施
澳大利亚	AS 1210—2010	附录C要求自动考虑设计师直接关注的所有危险、失效模式和服役条件
中国	TSG 21—2016	3.1.6中规定：对第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的风险评估报告
	GB/T 150.1~150.4—2024	5.2.2.2 设计单位职责规定：设计单位向容器用户出具的风险评估报告应符合附录F的要求。附录F对风险评估报告进行了说明，应充分考虑容器在各种工况下可能产生的失效模式，在材料选择、结构设计、制造检验要求等方面提出安全措施，防止可能发生的失效

由上述分析可知，尽管国内外法规标准已对承压设备设计阶段的风险评估提出了明确要求，并提供了诸如失效模式分类、风险矩阵等基础工具，但如何将这些离散的要素整合为一个逻辑清晰、可操作、且能与设计流程深度融合的系统性方法，仍是当前实践中面临的挑战。因此，本文基于风险的设计（RBD）理念和现有的风险评估方法，提出并设计基于“危害识别–风险评估–风险可接受判定–风险处置”的承压设备设计阶段风险评估方法及处置流程，并重点阐释了各环节的逻辑与迭代反馈机制，强调降险措施向具体设计参数转化的重要性，为设计阶段开展风险评估的应用提供系统性参考。

1 承压设备设计阶段风险评估及处置流程

一个完整的承压设备设计阶段风险评估及处置过程主要包括6个方面：（1）需求分析；（2）危害识别；（3）风险评估；（4）风险可接受判定；（5）风险处置；（6）基于风险的优化设计。具体设计阶段风险评估及风险处置流程如图1所示。

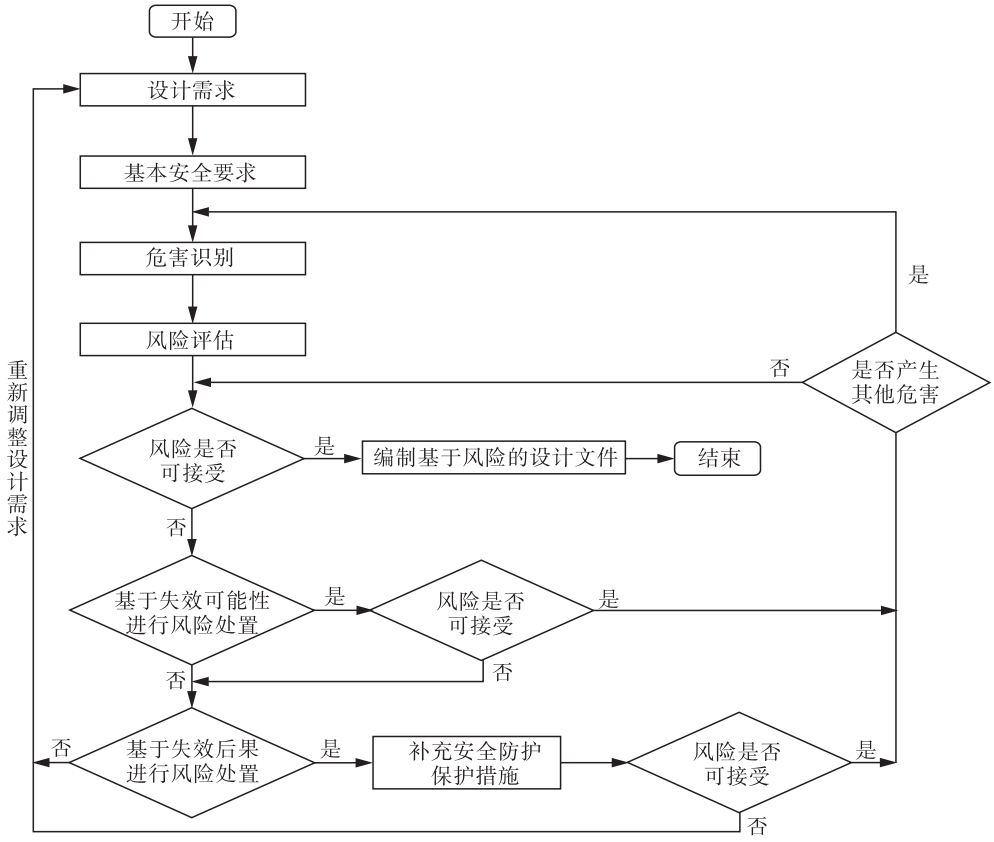


图1 设计阶段风险评估及风险处置流程示意

Fig.1 Schematic of risk assessment and risk treatment process in design phase

在开展承压设备设计阶段风险评估时，首先，应进行设计需求和基本安全要求分析，并在此基础上，开展设备的危害识别，以达到跨阶段风险影响因素识别，确定承压设备所有可能的失效模式和失效形式的目的；然后，基于设备的失效可能性和失效后果分析开展设备风险评估，确定设备的失效风险等级；最后，依据风险可接受准则判定风险是否可接受，一旦风险不可接受，则应通过在材料选择、结构设计、制造检验等方面采取降险措施，并进行针对性风险处置，处置完成后，再次进行评估，如风险在可接受范围，则可出具风险分析报告，如果风险仍然不可接受，则需要与用户或设计委托方沟通，进一步调整设计需求。

2 承压设备设计阶段风险评估关键要素

2.1 设计需求和基本安全要求

设计需求一般由建设方或设计委托方提出，主要包括：（1）依据标准规范；（2）操作参数（工作压力、工作维度范围、交变载荷条件、液位高度、接管载荷等）；（3）设备使用地点及其自然条件（环境温度、抗震设防烈度、风和雪载荷等）；（4）介质组

分与特性；(5)预期使用年限；(6)结构几何参数和管口方位；(7)服役过程中的超压可能性及原因；(8)设计需要的其他必要条件。

TSG 21—2016，GB/T 150.1~150.4—2024 等安全技术规范和各类标准，基于对承压设备在服役环境下的强韧性、耐腐蚀性和耐环境开裂的能力，以及安全泄放和安全防护要求的充分考虑，提出了材料选择、设计、制造、检验、使用、运行和维护等全生命周期各阶段的基本安全要求。此外，设备运行阶段企业编制的腐蚀控制文件、完整性操作窗口等文件，也是设计阶段风险评估中确定基本安全要求的重要参考文件。

2.2 损伤模式、失效模式和危害识别

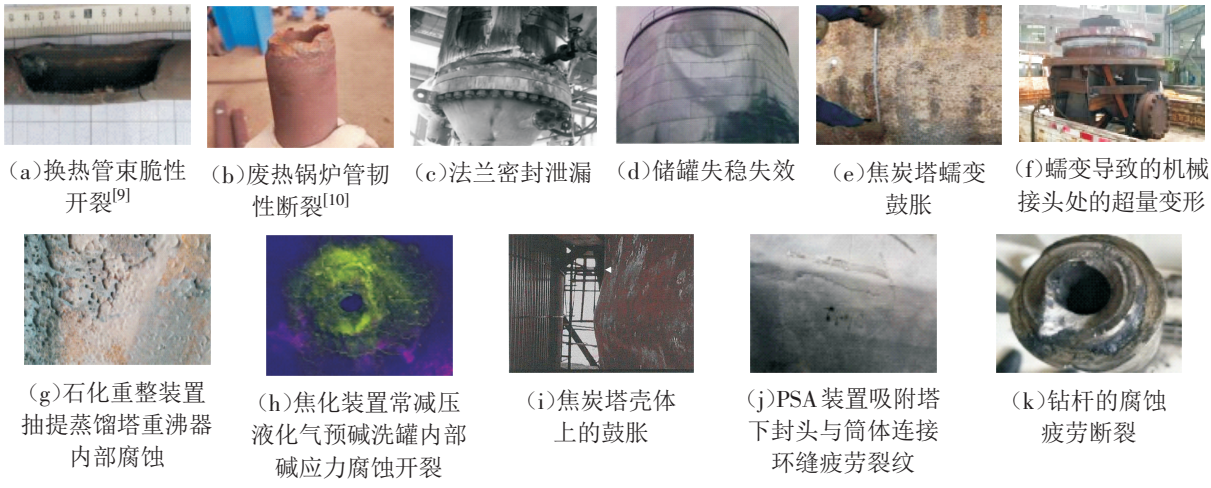
依据设备的损伤模式和失效模式进行危害识别，是设计阶段开展风险评估的基础。首先应根据用户的设计条件和其他输入信息，确定容器的各种使用工况；然后，根据使用工况的介质、操作条件、环境因素，对承压设备在设计、制造、安装、运行和维护等环节中，可能导致火灾、爆炸、有毒有害物质泄漏或造成不可康复的人员健康影响的潜在危害进行识别，形成危害识别清单。

GB/T 30579—2022《承压设备损伤模式识别》将承压设备的损伤模式分为腐蚀减薄、环境开裂、材质劣化、机械损伤四大类，不属于上述四项的列为其他损伤模式。ISO 16528-1:2007 将压力容器在建造中考虑的主要失效模式分为短期、长期和循环失效。GB/T 150.1~150.4—2024 中采纳了 ISO 16528-1:2007 内容，并根据国内实际情况进行完善。基于以上标准，文中分析了承压设备主要失效模式和失效类别之间的关系（见表 2），并基于失效模式总结典型失效形貌，如图 2 所示。以损伤模式、损伤机理、损伤部件、失效模式和失效形式的分析为基础，进一步进行危害识别，形成危害识别清单。

表 2 承压设备主要失效模式、失效形式及类别

Tab.2 Primary failure modes, failure forms and categories of pressure equipment

主要失效模式	失效形式	失效类别
短期失效模式	脆性断裂〔见图 2(a)〕	强度失效
	韧性断裂〔见图 2(b)〕	强度失效
	过量变形引起的连接处泄漏或其他性能下降〔见图 2(c)〕	泄漏失效
	弹性、塑性或弹塑性失稳（屈曲）〔见图 2(d)〕	失稳失效
长期失效模式	蠕变断裂〔见图 2(e)〕	强度失效
	蠕变过量变形〔见图 2(f)〕	强度失效
	腐蚀和磨蚀〔见图 2(g)〕	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）〔见图 2(h)〕	强度失效、泄漏失效
循环失效模式	棘轮或称渐增塑性变形〔见图 2(i)〕	强度失效
	疲劳〔见图 2(j)〕	强度失效
	环境助长疲劳〔见图 2(k)〕	强度失效



(a)换热管束脆性开裂[9]　(b)废热锅炉管韧性断裂[10]　(c)法兰密封泄漏　(d)储罐失稳失效　(e)焦炭塔蠕变鼓胀　(f)蠕变导致的机械接头处的超量变形

(g)石化重整装置抽提蒸馏塔重沸器内部腐蚀　(h)焦化装置常减压液化气预碱洗罐内部碱应力腐蚀开裂　(i)焦炭塔壳体上的鼓胀　(j)PSA 装置吸附塔下封头与筒体连接环缝疲劳裂纹　(k)钻杆的腐蚀疲劳断裂

图 2 承压设备典型失效形貌

Fig.2 Typical failure morphology of pressure equipment

2.3 风险评估与风险可接受判定

由于承压设备在设计阶段能够获取的数据有限，且风险评估本身具有较高的复杂性，同时遵循以预防性为目的的原则，本文认为承压设备在设计阶段的风险评估应以定性分析为主。其核心应聚焦于潜在损伤和失效模式的识别和评估，旨在为设计人员提供参考，从而有效预防可能导致的严重后果。

目前，石化行业常用的风险评估方法包括：危险与可操作性分析（HAZOP）、过程危害分析（PHA）、基于风险的检验（RBI）、失效模式及影响分析（FMEA）和失效模式、影响及危害性分析（FMECA）等。各方法的评估方式和特点如表3所示。

表3 风险评估方法及特点

Tab.3 Risk assessment methods and their characteristics

方法	风险评估方式	特点
RBI	量化设备失效的可能性（POF）与失效后果（COF），据此确定设备风险等级	数据驱动，量化风险，适合设备级优化，需失效数据库支撑
HAZOP	以系统化方式剖析工艺流程潜在偏差，探寻危险及可操作性问题	系统性强、全面度高，适宜复杂系统，对专家经验依赖度高，耗时久，成本偏高
PHA	对工业过程潜在危险展开初步分析，涵盖What-If，Checklist等手段	速度快、灵活性好，分析深度不够
FMEA/FMECA	着重识别系统潜在故障模式及其影响，FMECA在此基础上进一步剖析故障的严重性与发生概率	结构化程度高，适合组件级分析，对系统级风险涵盖不足，数据需求量大

GB/T 26610.1—2022《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》中给出了具体基于风险检验的程序，采用风险矩阵对风险进行定性评估，并结合定量风险矩阵与最低合理可行（ALARP）原则，设置风险阈值以指导风险可接受判定。企业也多采用RBI方法，对风险实行分级管理，优化设备安全和检维修管理。

在设计阶段，可借鉴上述思路构建评估方法，通过建立危害识别清单，对损伤、失效进行充分识别基础上，结合同类设备失效频率，将承压设备设计阶段风险评估的失效可能性分为5个等级，用1，2，3，4，5表示，其中，1表示失效可能性最小，5表示失效可能性最大。失效可能性划分见表4。考虑人员伤害、财产损伤和环境影响，将承压设备设计阶段风险评估的失效后果分为5个等级，用A，B，C，D，E表示，其中，A表示失效后果影响最小，E表示失效后果最为严重。

表4 风险可接受判定

Tab.4 Risk acceptability determination

风险等级	风险区域	描述
Ⅳ级	D5，E3-E5	高风险（绝对不能容忍）
Ⅲ级	A5，B5，C4-C5，D3-D4，E1-E2	中高风险（难以容忍）
Ⅱ级	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容忍）
Ⅰ级	A1-A3，B1-B3	低风险（可以接受）

基于上述可能性与后果等级，即可通过风险矩阵确定设备在设计阶段的风险等级，分为Ⅰ（低）、Ⅱ（中）、Ⅲ（中高）、Ⅳ（高）级，其中，Ⅰ级风险在矩阵中对应的区域为A1-A3，B1-B3，Ⅱ级风险在矩阵中对应的区域为A4，B4，C1-C3，D1-D2，Ⅲ级风险在矩阵中对应的区域为A5，B5，C4-C5，D3-D4，E1-E2，Ⅳ级风险在矩阵中对应的区域为D5，E3-E5。Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ级风险分别用绿色、蓝色、黄色和红色表示，绘制风险矩阵如图3所示。

建立表4中所示的风险可接受判定规则，如果风险评估结果为低风险，则可以接受；如果风险等级为中风险，需要进行进一步分析，确定是否可接受；中高风险和高风险是不能容忍的，需要提前

进行风险处置、优化设计，甚至根据实际情况进一步调整设计需求。在实际的工程设计中，最终的风险可接受准则应与用户（设计委托方）共同制定，并综合考虑设备功能、失效后果的严重性、安全投入成本及可接受风险水平等因素。

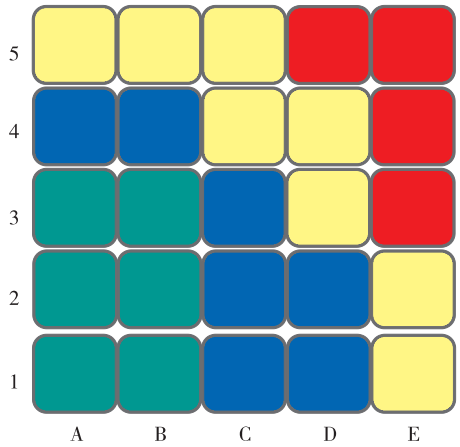


图3 设计阶段风险矩阵示例

Fig.3 Example of risk matrix for design phase

2.4 风险处置与降险措施

基于风险评估结果，对于被判定为低风险的承压设备，可在成本效益分析的基础上，决定是否进一步实施风险处置措施。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，并进行有效的风险控制。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措施，或重新调整设计需求。上述策略体现了GB/T 150.1—2024附录F中对于设计阶段出具风险评估报告的基本要求，在设计、制造阶段，通过材料选择、结构设计和制造检验要求来控制风险的失效可能性，同时为使用单位在使用、运维阶段制定应急预案和控制失效后果，提供关键的信息输入。

设计阶段风险评估的降险措施一般可通过合理选材、优化材料（如控制材料硬度和碳当量）、控制介质成分、优化工艺（如优化焊接工艺、消除焊接残余应力、热处理等），以及采用外部手段防腐（如考虑定期检验、在线监测、使用防腐涂层和缓蚀剂等）等方面进行处理。基于危害识别清单，表5列出了设备风险处置措施。措施表一般应包括损伤模式、损伤机理、主要损伤部件（如有）、失效模式处置措施等。

表5 设备风险处置措施

Tab.5 Equipment risk treatment measures

序号	损伤模式	主要损伤机理	主要损伤部件	主要失效形式	防护措施
1	腐蚀减薄	均匀/局部腐蚀减薄	所有承压部件	泄漏	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、在线监测等
2	环境开裂	氨应力腐蚀开裂	—	开裂、泄漏	合理选材、焊后消除应力热、在液氨中添加≥0.2%的水作为缓蚀剂等
3	材质劣化	球化	—	断裂、变形	选材防护，如使用CrMo钢等材料
4	机械损伤	机械疲劳	所有承压部件	断裂、疲劳、泄漏	按相关标准进行疲劳分析设计，提高钢板、锻件的质量控制指标，降低焊接残余应力、控制焊接缺陷、定期检验等

在实际操作中，有效的风险处置要针对设备特定损伤机理，提出具有明确技术参数的设计输入与制造等要求。如在某超高压萃取釜的设计阶段风险评估中，其整体风险被评估为Ⅱ级，具体针对设备内筒存在氯化物应力腐蚀开裂的风险，提出“工艺介质中氯离子含量低于25 ppm”的设计要求；针对筒体多层包扎结构带来的系列风险，提出“内筒在制造中采用氩弧焊打底”的制造要求，以及“对内筒所有对接焊缝进行PT复核”的检验计划要求等。另外，在风险评估报告内容满足基本要求的前提下，可考虑将设备长周期运行中的环保、经济效益、节能、质量等方面的影响因素纳入报告中，从安全性、经济性等方面提供多种降险措施，供用户和设计单位参考，进一步提升承压设备设计阶段风险评估的可操作性与工程价值。

3 结论

（1）提出承压设备设计阶段风险评估方法具体流程和关键要素，系统梳理了承压设备的3大类、11种主要失效模式，分析了典型失效类型和失效类别。

（2）明确了风险评估的4个等级，并绘制风险矩阵，制定了风险可接受准则。结合实际需求，提出了具有针对性的风险降低措施建议。

（3）在后续研究中，将依据本文所构建的评估流程和关键要素，开展实际案例应用研究，积累承压设备损伤数据，以进一步优化和完善评估流程，提升风险评估方法的科学性和实用性。

参考文献：

[1] 梁瑞，郭晓璐，姜峰，等.承压设备设计阶段风险评估技术方法研究[J].化工机械，2012，39(5)：586-590.
LIANG R，GUO X L，JIANG Feng，et al.Research on risk assessment technologies for pressure equipment at design stage[J].Chemical Engineering & Machinery，2012，39(5)：586-590.

[2] Lloyd's Register. Ship right design and construction additional design procedures：Risk based designs[R]. London：Lloyd's Registe，2018.

[3] 邵珊珊，贾国栋，谢国山，等.我国在役承压设备检测评价法规标准体系进展[J].中国特种设备安全，2016，32(6)：9-13.
SHAO S S，JIA G D，XIE G S，et al.Development of the regulations and standards system on inspection and assessment of in-service pressurized equipment[J]. China Special Equipment Safety，2016，32(6)：9-13.

[4] 程伟，陈炜，陈益辉，等.常压塔塔顶冷凝系统设备腐蚀计算与风险评估[J].压力容器，2024，41(9)：68-76.
CHENG W，CHEN W，CHEN Y H，et al. Corrosion calculation and risk assessment of overhead condensing system equipments of atmospheric pressure tower[J].Pressure Vessel Technology，2024，41(9)：68-76.

[5] 陈学东，王冰，艾志斌，等.以风险与寿命为基准的承压设备设计与制造[J].压力容器，2007，24(10)：1-5.
CHEN X D，WANG B，AI Z B，et al. Design and manufacture of pressure-bearing equipment based on risk and life[J]. Pressure Vessel Technology，2007，24(10)：1-5.

[6] 陈学东，艾志斌，范志超，等.我国承压设备事故调查分析及基于风险的设计制造与维护[C]//中国机械工程学会压力容器分会，合肥通用机械研究院有限公司.压力容器先进技术——第七届全国压力容器学术会议论文集.北京：化学工业出版社，2009：65-73.
CHEN X D，AI Z B，FANG Z C，et al. Accidents investigation and analysis of pressure equipment in China and risk based design，manufacture and maintenance[C]//Pressure Vessel Division of the Chinese Society of Mechanical Engineering，Hefei General Machinery Research Institute Co.，Ltd.. Advanced Pressure Vessel Technology—Proceedings of the 7th National Conference on Pressure Vessels. Beijing：Chemical Industry Press，2009：65-73.

[7] 陈学东，艾志斌，李景辰，等.压力容器风险评估技术在国家安全技术规范中的采用[J].压力容器，2008，25(12)：1-4.
CHEN X D，AI Z B，LI J C，et al. Adoption of risk-based assessment technology in national security technological specifications [J]. Pressure Vessel Technology，2008，25(12)：1-4.

[8] 陈学东，崔军，章小浒，等.基于风险的设计制造技术在国家技术标准中的应用[J].压力容器，2012，29(2)：1-7.
CHEN X D，CUI J，ZHANG X H，et al.Application of risk-based design and manufacture technology in national technological standards[J]. Pressure Vessel Technology，2012，29(2)：1-7.

[9] 肖伟.低温过热器管开裂原因[J].理化检验-物理分册，2023，59(6)：15-18.
XIAO W. Cracking cause of low temperature superheater tube[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A：Physical Testing)，2023，59(6)：15-18.

[10] DU C，CHENG L，LU J，et al.Analysis of the causes of waste heat boiler leakage in larg-scale chemical plants[J].Journal of Physics Conference Series，2024，2760：012017.

作者简介：陆新元(1990)，女，高级工程师，主要从事承压设备检测及风险评估研究工作，通信地址：100029 北京市朝阳区和平街西苑 2 号中国特种设备检测研究院，E-mail：luxinyuan66@126.com。

通信作者：曹逻炜(1985)，男，正高级工程师，主要从事压力容器安全风险控制技术研究工作，通信地址：100029 北京市朝阳区和平街西苑 2 号中国特种设备检测研究院，E-mail：lwcao_1794@126.com。

本文引用格式：
陆新元，邵珊珊，曹逻炜，等.承压设备设计阶段风险评估与降险措施研究[J].压力容器，2025，42(8)：54-60.
LU Xinyuan，SHAO Shanshan，CAO Luowei，et al.Research on risk assessment and risk reduction measures in the design phase of pressure equipment[J].Pressure Vessel Technology，2025，42(8)：54-60.