

压力容器常见失效形式及安全防护措施研究

赵茁森

唐山中浩化工有限公司, 河北 唐山 063611

[摘要]压力容器在反应储存换热等关键工序中得到了广泛的应用。唐山地处河北省化工产业集聚地带, 区域内煤化工、精细化工企业数量比较多, 设备长期在腐蚀性介质高温高压、温度骤变等工况环境下容易出现安全隐患以及运行失效隐患, 对生产造成很大的影响, 同时也会增加安全事故的发生概率, 基于此文中针对常见的失效类型进行系统性的分析与总结, 并基于实际情况制定针对性的安全防范措施, 以确保化工产业园区压力容器安全稳定地运行, 以供参考。

[关键词]压力容器; 失效形式; 失效机理; 安全防护; 化工设备; 唐山化工企业

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19764

中图分类号: X944.2

文献标识码: A

Research on Common Failure Modes and Safety Protection Measures of Pressure Vessels

ZHAO Zhuosen

Tangshan Zhonghao Chemical Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063611, China

Abstract: Pressure vessels have been widely used in key processes such as reaction, storage, and heat exchange. Tangshan is located in the chemical industry cluster area of Hebei Province, with a relatively large number of coal chemical and fine chemical enterprises in the region. Equipment is prone to safety hazards and operational failure hazards in corrosive media environments such as high temperature, high pressure, and sudden temperature changes, which have a significant impact on production and increase the probability of safety accidents. Based on this, a systematic analysis and summary of common failure types are conducted in this article, and targeted safety prevention measures are formulated based on actual situations to ensure the safe and stable operation of pressure vessels in chemical industry parks for reference.

Keywords: pressure vessel; failure form; failure mechanism; safety protection; chemical equipment; Tangshan chemical enterprise

引言

压力容器作为化工产业的关键核心设备之一, 是保证工业生产正常、稳定运行的基础, 全面覆盖了化工反应、物料储存、热量交换等全生产工序。从理论上讲, 压力容器的性质较为特殊, 无论哪种压力容器, 均需要进行严格的管理, 构建良好的应用条件, 否则, 有可能发生化学或物理性质的爆炸。唐山市毗邻沿海区域, 该地区长时间受到盐雾侵蚀的影响, 加之该区域的气温温差较大, 设备长期处于高负荷运转状态, 因而增加了设备安全失效隐患。近年来, 因压力超限、介质腐蚀、机械疲劳等设备故障因素诱发起化工安全事故, 由此可以凸显出该地区的压力容器安全管控存在一些不足之处。如今虽然已经构建了较为成熟完备的设备失效研判与智能安全管控体系。但是国内相关研究侧重于通用性的理论讨论, 未能对沿海化工特殊作业环境的定制化工况进行深入的分析与探讨。为了助力化工企业压力容器的安全运维, 确保安全生产, 及时采取

针对性的防腐、防水防护方案尤为关键, 将安全风险降至最低, 实现经济实用性最大化。

1 压力容器典型失效形式及机理分析

结合唐山化工企业煤化工、精细化工生产特点, 以及沿海盐雾腐蚀、四季温差交变、设备长期连续运行、老旧设备集中的现状, 将本地压力容器高频失效形式分为: 韧性断裂、脆性断裂、疲劳失效、腐蚀失效、失稳失效、泄漏失效六大类, 各类失效机理、特征及现场诱因如下。

1.1 韧性断裂失效

韧性断裂又称塑性断裂, 指设备器壁应力超过材料屈服极限后, 发生显著塑性变形, 最终断裂失效, 整体预警性较强。失效前容器出现明显鼓包、壁厚减薄、容积增大等塑性变形; 断口呈暗灰色纤维状, 断面粗糙, 无金属光泽, 断裂过程缓慢, 不会产生高速碎片, 爆炸破坏力相对较低。主要是因部分中小化工企业存在违规超压、超温运行情况, 为提升产能突破设备设计参数; 老旧储罐、反应

釜长期受介质冲蚀、腐蚀导致壁厚不足，承压能力下降；安全附件失效，压力表、安全阀校验不及时，超压无法及时泄压，最终引发塑性变形及韧性断裂。

1.2 脆性断裂失效

脆性断裂为低应力突发断裂，设备在无明显塑性变形的情况下瞬间开裂，裂纹扩展速度接近声速，设备外观无鼓包、变形，失效突然；断口平整光亮，呈结晶状、冰糖状；失效压力远低于设备额定工作压力，易引发设备炸裂、介质喷射、爆炸燃烧等恶性事故。主要是因该区域冬季低温寒冷，露天布置的管道、储罐、换热器易发生低温冷脆，钢材韧性大幅下降；设备焊缝、接管、转角存在焊接缺陷与应力集中，低温工况下微小裂纹快速扩展；厚壁高压容器长期高温运行出现材料回火脆化，叠加昼夜温差交变，诱发脆性断裂。

1.3 疲劳失效

疲劳失效是压力容器在交变载荷长期作用下的累积性失效，失效位置集中在焊缝、开孔、接管、支座等应力集中区域；失效前期产生微观裂纹，随运行时间延长逐步扩展，最终贯穿器壁引发开裂；断裂断面存在明显疲劳纹理，分为裂纹萌生区、扩展区、瞬断区。主要是因化工生产启停频繁、负荷调整频繁，造成压力与温度交变载荷；泵体振动、管道共振引发设备长期微振动；老旧设备焊接残余应力未消除，长期交变工况下加速裂纹萌生与扩展，是本地反应釜、换热管道的主要失效形式。

1.4 腐蚀失效

受沿海盐雾环境与化工腐蚀性介质双重影响，导致腐蚀失效，主要分为均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀四类。均匀腐蚀表现为设备整体壁厚均匀减薄；点蚀表现为器壁出现点状凹坑、孔洞；缝隙腐蚀多发于法兰、垫片、焊缝缝隙位置；应力腐蚀表现为裂纹沿应力方向分叉扩展，隐蔽性强、危害极大。主要是因唐山沿海大气含盐雾、湿度大，设备外壁易发生大气腐蚀；煤化工生产介质含硫化氢、酸碱介质，精细化工生产存在各类有机腐蚀介质，设

备内壁长期接触腐蚀介质；部分企业选材不合理，普通碳钢设备用于强腐蚀工况，防腐涂层老化脱落、防腐维护不到位，加速设备腐蚀失效。

1.5 失稳变形失效

失稳失效多见于真空储罐、负压换热器、室外大型储罐，主要指压力容器壳体、承压管道在外压、负压或局部压力失衡作用下导致设备壳体出现局部凹陷、褶皱、整体屈曲变形，结构几何形态破坏，丧失承压能力，严重时引发结构开裂。诱发因素主要包括设备负压运行时真空度超标，室外大型储罐受唐山大风天气影响，外压载荷增大，安全阀、放空阀故障导致负压失衡，设备壁厚腐蚀减薄后，结构刚度不足，极易发生失稳变形。

1.6 泄漏失效

泄漏是压力容器最常见的功能性失效，失效特征包括法兰、垫片、焊缝、阀门密封位置出现介质渗漏、滴漏、喷射泄漏，设备结构无整体断裂，但功能失效，多为其他失效的衍生故障，虽多数不会直接引发爆炸，但易造成有毒有害、易燃易爆介质外泄，引发中毒、火灾、环境污染事故。温度交变导致密封垫片老化、变形，设备振动导致法兰螺栓松动，腐蚀导致器壁穿孔，焊缝微小裂纹贯穿器壁，均是化工企业日常巡检中高发设备隐患。

2 唐山化工企业压力容器失效统计与问题分析

2.1 失效形式占比统计

结合唐山化工设备岗位现场统计及本地近 5 年压力容器故障、事故数据，整理出各类失效形式占比，为直观展示失效规律，设置如表 1 所示。

由统计数据可知，腐蚀失效、疲劳失效、泄漏失效是唐山化工压力容器三大核心失效形式，合计占比达 85%，是现场安全管控的重点。低温脆断虽占比低，但事故危害性极大，为冬季重点防控风险。

2.2 企业现存核心问题

充分围绕化工园区生产的情况，梳理总结在压力容器安全管理方面的突出问题。其一，化工园区不少设备已经

表 1 唐山化工企业压力容器失效形式占比统计表

失效形式	失效占比	高发设备	主要危害
腐蚀失效	37%	储罐、反应釜、物料管道	壁厚减薄、穿孔泄漏、爆炸
疲劳失效	25%	换热设备、高压反应管道	裂纹扩展、突发开裂失效
泄漏失效	23%	法兰、阀门、密封连接部位	介质外泄、火灾、中毒
脆性断裂	7%	室外低温承压设备	设备炸裂、重特大事故
韧性断裂	5%	超压运行反应釜	设备爆破、产能中断
失稳失效	3%	负压储罐、大型外压设备	结构变形、设备报废

临近,甚至超出设计的使用年限,并且老旧压力容器存量比较大。在长期超负荷运行过程中容易导致设备内部隐性损伤,降低整体安全运行稳定性,进而增加潜在的故障风险;其二,因设备整体防腐防护体系未能充分契合唐山沿海地区高盐雾侵蚀、高湿度的自然环境,加之化工园区并未完善针对性的专项防治方案,在一定程度上加快了设备腐蚀老化速度;其三,设备运维精细化不足,面对生产过程中频繁切换的交变压力、温度工况缺乏标准化管控流程,工况波动易加剧设备疲劳损伤,无损检测覆盖率、检测频次不足;其四,一线设备人员专业能力不足,对早期微观缺陷、疲劳隐患识别能力差,应急处置不规范。

3 压力容器安全防护与管控措施

3.1 优化设备选型与设计制造,从源头防控风险

因压力容器产生裂缝而造成容器失效已经成为化工领域重点安全隐患,不仅会影响装置的安全稳定运行,甚至会威胁工人及周边居民生命健康安全,产生不必要的经济损失等问题,这就要求企业及相关检测机构务必加大对唐山沿海腐蚀、低温交变工况,在设备新增、改造阶段严格把控选型与设计。腐蚀工况设备优先选用不锈钢、合金钢等耐蚀材质,杜绝普通碳钢滥用;室外设备设计需考虑冬季低温韧性要求,选用低温专用钢材,规避冷脆风险;优化设备结构设计,减少接管、焊缝、转角等应力集中区域,规范焊接工艺,消除焊接残余应力、未焊透、夹渣等原始缺陷,从源头降低失效概率。

3.2 强化腐蚀专项防护,解决本地高发隐患

针对唐山腐蚀失效高发问题,建立内外双重防腐体系。设备内壁根据介质特性选用衬胶、防腐涂层、钝化处理等防护工艺,定期检查涂层完好性,及时修复脱落、老化区域;室外设备外壁采用耐盐雾防腐涂料,增加防腐涂层厚度,抵御沿海盐雾腐蚀;对高腐蚀设备缩短检测周期,重点检测壁厚减薄、点蚀、缝隙腐蚀等缺陷,提前预判设备报废周期。

3.3 规范运行操作,杜绝人为工况失效

严格执行压力容器操作规程,严禁超压、超温、超负荷运行,规范设备启停、负荷调整流程,避免压力、温度骤升骤降,减少交变载荷累积损伤。优化生产工艺,稳定设备运行工况,降低频繁调参、启停带来的疲劳损伤。定期校验安全阀、压力表、液位计、泄压装置等安全附件,确保灵敏可靠,超压时可及时泄压;针对冬季低温工况,落实设备防冻、保温、伴热措施,杜绝低温脆断事故。

3.4 完善定期检测与隐患排查体系

定期组织技术人员对压力容器进行科学的检测与维护工作,对压力容器安全检验合格证即将失效的特种设备进行完整的记录,并提前向相关检测部门提出说明以及定期检验要求。分类分级,强化设备的检测监管力度。对于厂区内服役年限久、长期受沿海盐雾、运行压力高的重点压力容器,增加检测的频次以及提高检验检测标准。通过运用无损检测手段,探查设备内部细微损伤,全面掌握设备的真实安全状态。建立设备台账与全生命周期档案,记录设备运行参数、检测数据、隐患整改情况、维修记录,实现设备动态管控;细化日常现场巡回检查流程,巡查内容主要包括焊缝完好程度、连接处的密封性能、实际壁厚变化、管线接口介质渗漏等,以便能够及时发现潜在的隐患,并及时采取针对性的处理,及时消除安全问题,避免缺陷累积扩大。

3.5 优化设备运维与疲劳管控

针对本地疲劳失效高发问题,做好设备减振降噪治理,加固管道支架、设备支座,杜绝共振现象;减少设备频繁启停与大幅负荷调整,稳定运行工况,降低交变载荷损伤;对焊缝、应力集中区域开展专项探伤检测,重点监测疲劳裂纹扩展情况,提前修复微裂纹缺陷;对超期服役设备进行强度评估与寿命预判,达不到安全标准的坚决淘汰报废,杜绝带病运行。

3.6 强化人员管理与专业培训

通常而言,因技术人员操作失误或不规范会造成压力容器失效,不仅会对技术人员的生命安全造成威胁,而且会产生不必要的经济损失,对企业的口碑造成很大的影响,因此需要定期开展职业技能方面的培训工作,在培训过程中着重讲解规范操作流程、失效识别方法,以此提高技术人员的操作水平,增强其自我保护意识。同时要求特种设备持证上岗,严格落实相关操作规范,完善岗位责任制,对维保、检测责任人、巡检等人员进行明确的职责划分,将人为影响因素降到最低。

3.7 健全应急管理体系

按照相关标准加强完善应急预案管理体系,充分围绕长期的工作经验以及实际的检验情况,对使用过程中可能存在的安全风险进行全面综合性的分析,并在此基础上构建有效的应急预案,包括现阶段已经发生的安全隐患,以及可能产生的异常现象等。化工工程根据相关标准,定期开展安全演练活动,进一步提高操作人员与管理人员处理突发事件的能力,同时加强完善各类设施,以确保在发生

问题时可以第一时间进行处置。完善隐患预警机制,对于潜在的隐患,例如压力异常、壁厚持续减薄等情况,提前进行预警和干预,将压力容器失效后的损失降到最低。

4 结论

本文充分围绕唐山沿海化工产业的实际情况,对于压力容器市场模式进行了深入的探讨与分析,导致压力容器失效的问题主要集中于疲劳损坏、腐蚀损伤以及介质渗漏,并且在低温环境下材质脆性断裂安全隐患尤为突出,尤其是在冬季,基于此,通过优化结构设计、落实防腐防护措施、加强日常运维管控、提高作业人员专业技能、定期进行无损检测、完善应急处置预案等措施,以此确保设备长期处于稳定运行状态,从源头上防范重特大安全生产事故的发生。

[参考文献]

[1]俞翔,梁俊杰,刘功祥.压力容器定期检验中风险识别典型案例[J].中国设备工程,2026(6):188-190.

[2]宋可婷.压力容器设计中应力集中问题的成因分析与优化策略研究[J].中国石油和化工标准与质量,2026,46(5):117-119.

[3]陈学东,崔军,陈炜,等.我国极端条件压力容器设计制造与维护技术进展[J].压力容器,2025,42(10):1-22.

[4]杨巧莲,李静文,刘会丽,等.压力容器密封失效分析与化工设备材料选择的关系探讨[J].中国轮胎资源综合利用,2025(8):145-147.

[5]周晓东.压力容器失效原因分析及防范建议研讨[J].中国设备工程,2023(8):177-179.

[6]王良杰,王柳,白鹏飞,等.海洋平台压力容器常见失效形式及检测方法分析[J].石油和化工设备,2021,24(1):76-78.

作者简介:赵茁森(1997—),男,汉族,河北唐山人,助理工程师,云南省昆明理工大学过程装备与控制工程专业毕业,现就职于唐山中浩化工有限公司,从事化工设备工作。