

新建压力容器无溶剂涂层冬季施工失效原因分析及解决措施

王磊¹, 王志涛², 刘德洋¹, 康绍炜¹, 梁镐¹, 商宁宁¹, 韩忠智¹, 段绍明¹

(1. 中国石油集团工程技术研究有限公司, 天津 300451; 2. 中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100028)

摘要: 通过对现场防腐涂料、压力容器设计、基材表面处理、施工工艺、养护工艺等进行全面分析研究, 确定出现涂层失效的原因并提出具体失效解决方案, 改进后涂层附着力良好、表面光泽度高, 达到涂层质量要求。

关键词: 无溶剂涂料; 压力容器; 涂层; 防腐施工; 附着力

中图分类号: TQ637 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2024)01-0032-05

Failure Cause Analysis and Solution of Solvent-free Coating on the New Pressure Vessel During Winter Construction

WANG Lei¹, WANG Zhi-tao², LIU De-yang¹, KANG Shao-wei¹, LIANG Hao¹, SHANG Ning-ning¹,
HAN Zhong-zhi¹, DUAN Shao-ming¹

(1. CNPC Engineering Technology Research Co., Ltd., Tianjin 300451, China;

2. CNPC Offshore Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Throughout the comprehensive analysis of anti-corrosion coating, pressure vessel design, substrate surface treatment, construction technology, maintenance technology and other research, the causes of coating failure were determined and specific failure solutions was put forward. The improved coating had good adhesion and high surface gloss, which meets the quality requirements of the coating.

Key words: solvent-free coating; pressure vessels; coating; anti-corrosion construction; adhesion

某容器制造厂采用无溶剂环氧防腐涂料进行 4 台新建压力容器的防腐, 对压力容器进行气体耐压试验时, 发现首台测试的压力容器内防腐涂层出现大面积起泡, 涂层全面失效, 其他 3 台压力容器也不同程度的出现涂层附着力不合格、涂层剥离强度低的问题, 因此未进行气体耐压试验。制造厂对防腐涂料质量、施工过程细节、涂层养护等防腐节点进行问题查找, 未能找到出现问题的原因, 成为阻碍设备交付的重要因素。无溶剂环氧涂料是指固体组分含量 $\geq 98\%$, 不含挥发性有机溶剂的一种防腐涂料, 一般由低分子量的液体环氧树脂、胺类固化剂、颜填料、活性稀

剂组成, 具有单道厚涂、固化迅速、物理机械性能优异的特点, 广泛应用于管道、储罐、压力容器等需重防腐设备的内外防腐, 在石油、化工、市政等行业得到广泛应用。但无溶剂环氧涂料也存在黏度高、反应速度过快、施工适用性差等问题, 导致无溶剂环氧涂料的应用存在一定的局限性。

为查找 4 台压力容器内防腐涂层出现问题的原因, 探究解决该问题的有效措施, 提高设备内防腐涂层的防腐质量, 本文以现场 4 台压力容器为研究对象, 深入探讨出现防腐层起泡失效原因, 并针对现场施工条件提出有效的无溶剂环氧涂料施工改进措施, 改善涂料施工质量, 最终满足容器内防腐施工质量要求。

1 压力容器防腐情况

1.1 压力容器基本情况

4 台压力容器均为气液分离器, 其中 1 台压力容

收稿日期: 2023-03-14

作者简介: 王磊(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事防腐涂料研究工作。E-mail: wangl04@cnpc.com.cn。

器型号为 HQ086, 容器尺寸为 $\varphi 2\ 000\ \text{mm} \times 10\ 810\ \text{mm}$, 如图 1a 所示。3 台压力容器型号分别为 HQ085-1、HQ085-2、HQ085-3, 容器尺寸一致, 为 $\varphi 1\ 200\ \text{mm} \times 7\ 900\ \text{mm}$, 如图 1b 所示。

1、HQ085-2、HQ085-3, 容器尺寸一致, 为 $\varphi 1\ 200\ \text{mm} \times 7\ 900\ \text{mm}$, 如图 1b 所示。

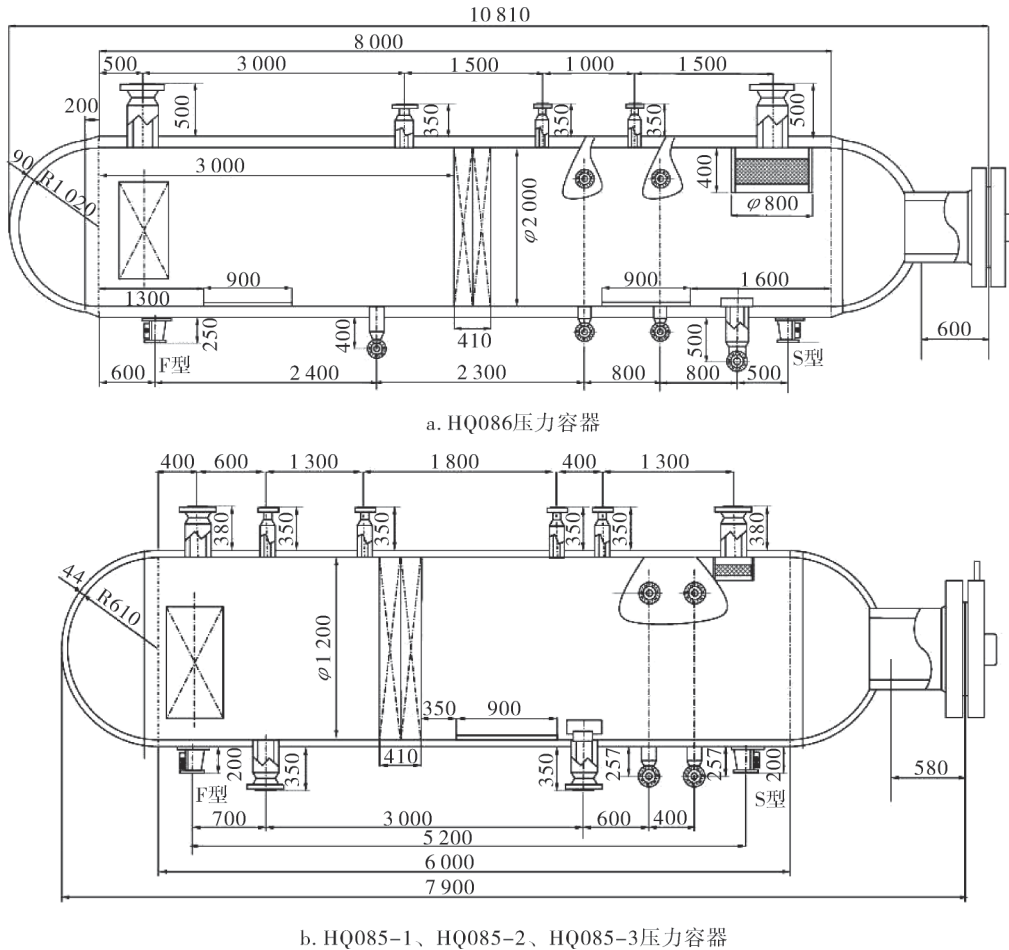


图 1 不同气液分离器尺寸示意

HQ086 容器设计压力 20 MPa, 设计温度 85 °C, 工作介质为集输气液两相流, 具有高 CO₂、高 Cl⁻、低 pH 的腐蚀环境特点; HQ085-1 容器、HQ085-2 容器、HQ085-3 容器设计压力均为 15.5 MPa, 设计温度均为 78 °C, 工作介质为集输气液两相流, 具有高 CO₂、高 Cl⁻、低 pH 的腐蚀环境特点。

4 台压力容器内、外表面均设计采用无溶剂环氧涂料进行防腐, 涂层设计总厚度 $\geq 300\ \mu\text{m}$, 外壁防腐后进行保温层保温。为降低施工难度、避免涂料使用错误, 制造厂对内、外表面防腐均选择同种涂料, 即外壁防腐采用内壁同种防腐无溶剂环氧涂料, 选用 EP-98 环氧无溶剂防腐涂料进行防腐, 涂料基本性能如表 1 所列。

1.2 压力容器防腐情况

1.2.1 基材表面处理

4 台压力容器内外壁均采用抛丸除锈方式进行表

面处理, 经抛丸除锈后基材除锈等级达到 Sa2.5 级, 锚纹深度达 70~110 μm , 对表面灰尘采用溶剂清洗方式进行清理, 达到 GB/T 18570.3—2005 要求的 3 级。

经表面灰尘处理后在 4 h 内进行首道无溶剂环氧涂料的喷涂施工, 避免基材返锈。

1.2.2 容器内壁防腐施工

4 台容器施工时正处于冬季低温期, 车间保温措施较差, 导致施工现场温度低至 0~5 °C。为此在防腐施工时对涂料进行预热至 35 °C, 使用稀释剂等降低黏度方式提高防腐施工性。采用重庆长江涂装设备有限责任公司的 GPQ9CA 喷涂机进行喷涂, 根据无溶剂环氧防腐涂料说明书配比配制涂料并添加 8%~10% 的专用稀释剂搅拌均匀后进行喷涂, 单遍湿膜厚度控制在 120~150 μm 。喷涂后采用一台 9 kW 的加热器对容器内进行加热通风。待 24 h 涂层实干后对表面出现的流挂进行处理后继续进行下一道喷涂, 5 道喷涂涂层干

膜总厚度达 400 μm 以上。

表 1 EP-98 环氧无溶剂防腐涂料性能

测试项目	测试结果	测试方法	
不挥发物含量/%	99.7	SY/T 0457—2010	
表干时间/min	20	GB/T 1728—1989)	
实干时间/h	5	GB/T 1728—1989)	
柔韧性/mm	1	GB/T 1731—1993	
抗冲击强度(25 $^{\circ}\text{C}$)	6 J 冲击无漏点	SY/T 0442—2010	
吸水率/%	0.56	SY/T 6854—2012	
耐磨性(落砂法)/($\text{L}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)	5.6	SY/T 0315—2013	
耐盐雾性/h	3 000	GB/T 1771—2007	
黏结强度(拉开法)/MPa	19.0	SY/T 6854—2012	
阴极剥离	65 $^{\circ}\text{C}$, 48 h, -1.5 V	2.4	SY/T 0315—2013
离/mm	65 $^{\circ}\text{C}$, 30 d, -1.5 V	13.8	SY/T 0315—2013
抗 1 $^{\circ}$ 弯曲(23 $^{\circ}\text{C}$)	无裂纹	SY/T 6854—2012	
耐 10%氯化钠加稀硫酸溶液 (pH 2.5~3.0, 90 d)	涂层完好	SY/T 0315—2013	
耐稀盐酸溶液 (pH 2.5~3.0, 90 d)	合格	SY/T 0315—2013	
耐 10%氯化钠溶液(90 d)	合格	SY/T 0315—2013	
耐 5%氢氧化钠溶液(90 d)	合格	SY/T 0315—2013	

喷涂施工结束后继续采用加热器进行加热通风 10 d 进行养护,并对容器内壁采用磁性测厚仪进行涂层总厚度测量,并采用电火花检漏进行防腐层漏点检测,4 台容器涂层厚度及漏点检测合格。

1.2.3 外壁防腐施工

压力容器内防腐层结束后采用同样施工工艺进行外壁防腐,由于外壁无加热设备,仍然采用加热器加热通风方式对压力容器整体进行加热,提高涂料的反应速度。5 道喷涂涂层干膜总厚度达 400 μm 以上,涂层总厚度及电火花检漏均满足要求。待喷涂施工结束后停止加热并在车间内进行涂层养护 15 d。

2 压力容器耐压试验情况介绍

为对压力容器整体承压能力进行检测,容器制造厂对内外壁防腐后的 HQ086 压力容器进行气压试验。根据 TSG R0004—2009《固定式压力容器安全检查规程》的要求进行试验压力为 22.0 MPa 的耐压试验测试,对测试过程中的异响、肥皂水检漏、容器变形等进行监测。

具体气体耐压试验测试步骤为:1)对撬装结束的压力容器进行盲板封堵,并预留容器侧面管道进行增压作业准备;2)采用增压泵逐步提高设备内压力,升压速率控制为 0.3 MPa/h,升压至试验压力的 10%、50% 进行检验,监测压力表数值、容器外壁漏气、涂层外观

变化;3)待步骤 2)检测合格后,按照试验压力 10%逐级升压达到 22.0 MPa 后,停止升压并保压 1.0 h,对容器异常响声、压力下降、设备受压变形、设备漏气、涂层脱落等情况进行观察并采取必要安全措施;4)待保压结束后,降至 20.0 MPa 保压 1.0 h 并检查压力变化;5)试验结束后为防止涂层因降压过快导致涂层起泡,采用缓慢降压方式进行降压,降压速率控制 0.8 MPa/h,直至达到大气压力,打开容器观察容器内部情况。

经试验测试发现,HQ086 压力容器无异响、无泄压、无变形,耐压合格,但内壁涂层出现均匀的大面积起泡,气泡大小不一,较大的起泡可达 10.0 $\text{cm}\times 8.0$ cm ,如图 2a 所示。

对容器内涂层外观进行观察,发现涂层表面无光泽,具有明显褶皱状纹理,涂层不粘手,具有一定硬度。将起泡位置涂层剥落后可漏出金属光泽基材表面,起泡涂层内部也存在小泡,如图 2b 所示。

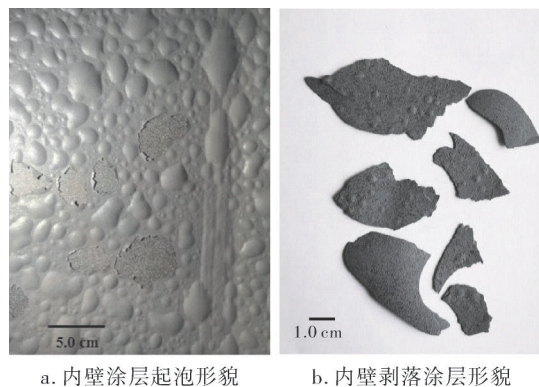


图 2 HQ086 压力容器耐压试验后内壁涂层起泡情况

3 涂层失效原因分析

由于 HQ086 压力容器涂层失效后无法进行相关测试,为对内防腐涂层出现问题原因进行查找,对 HQ085-1、HQ085-2、HQ085-3 压力容器内外防腐涂层质量进行检测,并开展现场防腐试验。

3.1 防腐涂层质量情况

HQ085-2 容器内涂层未完全固化,涂层表面出现粘手、变软情况,进行涂层翘剥发现涂层出现片状脱落,涂层附着力较低,如图 3 所示,表明 HQ085-2 压力容器内防腐涂层不合格。

进一步对 3 台容器内防腐涂层进行拉开法附着力测试,结果分别为 1.22 MPa、3.84 MPa、1.97 MPa。表明其内防腐涂层附着力低,涂层质量均不合格。

现场制样的 EP-98 环氧无溶剂防腐涂层及容器外壁涂层附着力测试结果分别为 17.21 MPa、14.81 MPa,表明涂层附着力均可达 14.80 MPa 以上,涂层质量良好,同时涂料实干时间 7.5 h,满足 EP-98 环氧无

溶剂防腐涂料冬季固化条件下实干时间要求,并与施工过程中 24 h 实干时间形成明显对比。涂层表面光泽良好,无褶皱、变软。

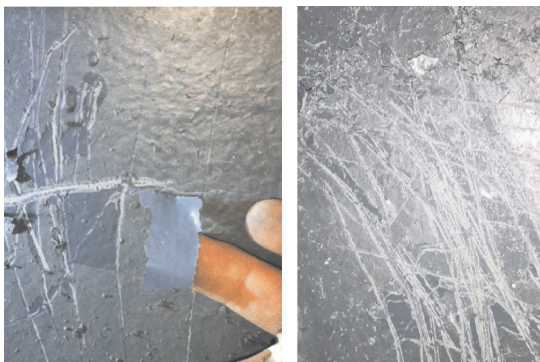


图3 HQ085-2 容器内涂层附着力翘剥测试

通过对 4 台压力容器情况对比及内外防腐涂层质量差异的分析,确定 4 台压力容器外防腐涂层质量好,内防腐涂层均未达到涂层质量要求。

3.2 内壁涂层质量失效原因分析

通过对压力容器施工及防腐涂层质量情况的调研,可以看出外防腐涂层及现场制备样板涂层良好,附着力优异,但内壁防腐涂层附着力较差。在确认防腐涂料不存在质量问题的情况下,也说明内壁防腐施工或某一环节出现问题,导致涂层出现固化问题。为此针对 4 台压力容器内壁防腐施工、养护的细节进行详尽的了解与调研,发现存在如下问题。

1) 每台容器仅有一处人孔,加热器功率较小,导致容器内通风不良。容器制造车间冬季施工温度低,虽然加热器加热温度可达 160 ℃,但风力较小,采用加热器在唯一人孔位置进行加热、通风时,导致容器内部空气无法逸出。加热器输出热风仅能在人孔部位循环,无法进入容器内部,使涂层固化温度无法保证。导致容器内部温度、通风条件均达不到要求,涂层固化不彻底,最终引起涂层起泡。

2) 无溶剂涂料不应采用添加溶剂施工方式喷涂。在进行无溶剂环氧涂料的防腐施工时,由于现场采用的 GPQ9CA 喷涂机压缩比仅为 32:1,无法进行高黏度涂料的防腐施工,车间采用无溶剂环氧涂料添加稀释剂的方式提高涂料的施工适用性。但由于无溶剂环氧涂料在添加稀释剂后存在加热、通风不良的情况,导致涂料固化受到影响。

3) 部分稀释剂未采用涂料厂家提供的专用稀释剂导致涂层出现橘皮、褶皱。施工过程中,车间采用的部分稀释剂为市售普通环氧稀释剂,其溶解能力弱于厂家专用稀释剂,致使喷涂后涂层表面出现较明显的褶

皱,致使涂层外观较差,同时也对涂层固化质量产生影响。

4) 制造车间对涂层外观要求严格,每道涂覆后的涂层需对流挂进行处理。由于容器空间狭小,导致大量粉尘堆积影响下一道涂覆,为此采用香蕉水对堆积的粉尘进行清洗,清洗过程中由于香蕉水较强的溶解能力,影响前道涂层表面的活性基团与下一道涂料的结合,对涂层间附着力产生影响。

5) 防腐施工人员理论基础薄弱,对防腐涂料基础理论了解欠缺,对无溶剂环氧涂料与溶剂型环氧涂料施工方式差异不知悉,对防腐施工过程质量把控关键节点认识不到位,导致对施工及养护过程中出现差异的本质原因及解决方案欠缺。

4 失效解决方案及改进效果

根据对现场涂层失效原因分析,结合施工现场情况,最终确定将 4 台压力容器内防腐涂层进行彻底喷砂除锈后重新进行防腐施工的方案。

4.1 涂层失效改进措施

根据现场情况,对 4 台容器施工针对性地提出如下改进措施:

1) 改善通风不良。由于人孔数量少,通风效果差,因此在容器腔体的内侧采用抽风机抽风方式进行改善,形成循环风将加热器输出热风引流到容器内部。同时为减少热量散失,将容器上部管道口进行封堵,底部及侧面管道口开放便于空气进入,改善了容器内部温度,容器内部温度可达 15 ℃ 以上。持续进行加热、通风,直至施工后 7 d 养护期结束。

2) 减少稀释剂用量。在不得不使用稀释剂的情况下,为便于施工,选用由厂家提供的专用稀释剂,并严格控制稀释剂加量至 6%~8%,减少稀释剂用量,减少流挂现象发生,提高涂料固化速度及固化程度。

3) 优化施工方式,减少流挂,减少层间施工。通过对稀释剂用量调整,喷涂角度、喷涂厚度及雾化效果的改善,提高施工质量,减少流挂,进而减少因层间处理流挂导致的灰尘,并采用专用稀释剂进行少量灰尘的清理,保证防腐质量。

4) 开展施工人员培训,加强对防腐涂料理论知识的学习。通过对涂料构成、涂层设计、表面处理、施工注意事项、涂层养护等的培训,提高施工人员对防腐涂料的认识水平,减少因理论知识欠缺导致的施工问题。

4.2 涂层改进效果

经改进措施施工后,4 台压力容器内壁涂层表面光泽良好,无褶皱、流挂,固化程度高,并对在容器内同步制备的试板进行拉拔附着力试验,测试结果如表 2 所示。

表2 4台容器拉拔附着力测试结果

容器号	测试值/MPa	平均值/MPa
HQ085-1	16.44	16.35
	16.68	
	15.93	
HQ085-2	12.54	12.68
	13.27	
	12.22	
HQ085-2	15.10	14.93
	14.68	
	15.02	
HQ086	20.68	20.15
	19.84	
	19.94	

由表2可以看出,4台容器内试板的测试结果均大于12.00 MPa,表明容器内防腐涂层附着力显著提高,涂层固化质量得到有效改善。

由于HQ085-2容器试板附着力测试最低,为此选择HQ085-2容器进行耐压试验测试,试验压力为17.05 MPa。经升压测试、保压检查、降压测试后,内防腐涂层无起泡、脱落、褶皱,涂层保持完好,达到预期效果。进一步对其他3台容器的耐压试验表明,内防腐涂层质量良好,无起泡、脱落、褶皱,满足设计要求。

5 结语

本文通过对4台新建压力容器无溶剂环氧防腐涂层冬季施工过程中出现的涂层质量问题,进行深入分析,查找出现涂层质量问题的原因。通过分析内外防腐情况及对施工过程的深入了解,最终找到出现涂层质量不合格的原因为压力容器内部通风不畅导致涂层固化效果差。

对施工过程中出现的施工、养护相关问题进行详细分析,并提出针对性的解决方案。经重新施工后涂层质量良好,达到设计要求。

防腐涂层质量关系着设备的本质安全,对压力容

器等设备进行内防腐施工时,需随时进行必要的检验、检测,以保证涂层质量。同时,对出现的涂层质量问题,需要结合现场实际,开展全面的材料、施工、养护分析,针对性地筛查出现问题的原因,并有效提高防腐质量。

参考文献:

- [1] 杨志敏.无溶剂防腐涂料述评[J].化学工业,2015(8):26-29.
- [2] 董彬,王宪军,叶春艳,等.无溶剂环氧涂料的抗阴极剥离性能[J].腐蚀与防护,2012(2):136-138.
- [3] 段绍明,郭晓军,张丽萍,等.弯管无溶剂环氧防腐涂料研究[J].石油工程建设,2010(6):51-53.
- [4] 张斌,于晓颖,孟庆鹏.无溶剂环氧涂料在石化行业中的应用[J].上海涂料,2008(6):40-43.
- [5] 王志涛,孙韬,井丽磊,等.无溶剂环氧涂层体积收缩率的研究[J].涂料工业,2011(2):53-56.
- [6] 王冬臣.油气集输容器内防腐施工质量控制分析[J].全面腐蚀控制,2020(11):79-81.
- [7] 王进春,吴国需,贾慧.无溶剂环氧涂料概况及在石油行业的应用前景[J].石油与天然气化工,2010(2):178-182.
- [8] 刘凌玉.有机蒙脱土改型无溶剂环氧涂料的制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2007:3-15.
- [9] 康永.无溶剂环氧防腐涂料性能的影响因素[J].上海涂料,2012(1):41-43.
- [10] 吴锡合,贺三,王成,等.一例无溶剂环氧涂层失效分析[J].内蒙古石油化工,2010(18):44-47.
- [11] 宋成立,林冠发,袁军涛,等.油田压力容器和储罐内涂层的应用技术研究[J].新技术新工艺,2016(2):88-91.
- [12] 郭晓军,白晶,张丽萍,等.厚涂耐磨无溶剂环氧防腐涂料的研制[J].涂料工业,2008(7):60-62.
- [13] 张攀.化工生产压力容器腐蚀问题的原因及防护措施[J].化工管理,2020(10):192-193.
- [14] 常国富,管亚军.压力容器锥形封头局部腐蚀失效分析[J].特种设备安全技术,2016(5):16-18.

(上接第31页)

- [2] 李福秋,史进朝,邵德生.航天产品工艺 FMEA 技术及其应用[J].质量与可靠性,2011(2):29-33.
- [3] 孟凡刚,孙渠成,徐贵峰,等.基于 PFMEA 分析方法解决某车型尾门与侧围面差匹配问题[J].汽车实用技术,2022(4):109-113.
- [4] 周建华,张发平,李伊,等.涡扇发动机转子系统装配过程 PFMEA 技术应用研究[J/OL].航空制造技术:1-7[2022-12-

03].

- [5] 蒋立正,祝洲杰,尤光辉.PFMEA 在电机装配线转子轴承压装工位中的应用[J].机械工程与自动化,2021(4):182-184.
- [6] 米灿根,孙伟绪,徐婷.上下开启的尿素加注口小门装置:CN208149454U[P].2018-11-27.
- [7] 刘庆珍,赵梦,刘喜山.浅析质量工具 PFMEA 及应用[J].计量与测试技术,2020(4):70-72.