

浅析如何在压力容器设计制造过程中降低应力集中问题

王 傲

葫芦岛鸿鑫机械制造有限公司 辽宁 葫芦岛 125001

摘要：应力集中是压力容器设计制造中的核心安全隐患，会降低构件承载能力、引发疲劳破坏并缩短设备使用寿命。本文基于GB/T150-2024、ASMEⅧ等标准，阐述应力集中的概念、类型及危害，分析设计与制造环节中应力集中的产生原因，针对性提出优化结构设计、规范制造工艺等防控措施，为压力容器设计制造中降低应力集中、保障设备长期安全稳定运行提供理论参考与实践指导。

关键词：压力容器；设计制造过程；降低应力

引言：压力容器作为工业生产中的关键承压设备，广泛应用于化工、能源等领域，其安全运行直接关系到人员与设备安全。应力集中作为导致压力容器失效的主要诱因之一，多由结构设计不合理、制造工艺缺陷等因素引发，易造成构件开裂、泄漏甚至爆炸事故。基于此，本文围绕压力容器设计与制造全流程，探究应力集中的产生机理与防控路径，旨在优化设计制造工艺，降低应力集中危害，推动压力容器行业安全、高效发展。

1 压力容器应力集中相关理论基础

1.1 应力集中的基本概念与本质

(1) 应力集中的定义：构件在形状突变、受力不均处出现局部应力急剧增大的现象，应力集中系数是表征其程度的核心参数，指局部峰值应力与构件整体名义应力的比值，恒大于1，仅与几何形状和加载方式相关，与载荷大小无关。(2) 应力集中的本质：从材料力学角度，其本质是构件几何或受力不连续性导致载荷流线扭曲，局部应力无法均匀传递而积聚，形成应力峰值。局部应力是整体应力的局部叠加，峰值应力远高于整体平均应力，且随与峰值点距离增加快速衰减，塑性材料可通过应力重分配缓解局部高应力，脆性材料则无法缓解。

1.2 压力容器应力集中的主要类型

(1) 结构型应力集中：由容器结构设计不合理导致，是最常见类型，如开孔接管、转角尖角、焊缝接头等部位，其中开孔接管处应力集中系数可达3~6，危害显著。(2) 制造型应力集中：由制造工艺缺陷导致，如焊缝成形不良、表面粗糙度超标、焊接残余应力等，其中焊趾、焊根处的残余应力会显著加剧应力集中，易成为失效隐患。(3) 工况型应力集中：由运行工况波动导致，如压力冲击、温度变化引发的局部应力集中，其影响具有暂时性，不作为重点，设计制造阶段的防控仍是核心^[1]。

1.3 应力集中对压力容器的危害

(1) 降低构件承载能力：局部应力过高会超出材料许用应力，导致构件强度下降，易出现塑性变形，严重时直接引发开裂。(2) 引发疲劳破坏：应力集中部位长期承受交变载荷，易萌生疲劳微裂纹，裂纹逐步扩展，最终导致容器失效，这是压力容器失效的主要诱因之一。(3) 缩短设备使用寿命：应力集中会加速材料老化，增加设备维护频次和成本，若未及时防控，可能引发泄漏、爆炸等安全事故，威胁人员与设备安全。

1.4 压力容器应力集中的相关标准规范要求

(1) 国内相关标准：以GB/T150-2024《压力容器》为核心，要求设计阶段优化结构避免应力集中，如增大转角过渡圆弧、对开孔部位进行补强，制造阶段控制焊缝质量和表面精度，明确应力集中区域的无损检测要求。(2) 国际相关标准：ASMEⅧ标准中，Div.1采用规则设计，明确焊缝接头、开孔等部位的应力控制指标；Div.2采用分析设计，通过详细应力分析管控峰值应力，核心原则是确保应力集中部位的应力不超出材料许用范围，保障容器长期安全运行。

2 压力容器设计环节中应力集中的产生原因及降低措施

2.1 设计环节中应力集中的主要产生原因

(1) 结构设计不合理：这是设计环节中应力集中产生的最主要原因。开孔位置不当，如在容器封头与筒体连接处、筒体焊缝附近等应力本身较高的区域开孔，会导致局部应力叠加，加剧应力集中；转角无圆角或圆角半径过小，使得载荷流线在转角处急剧弯曲，应力快速积聚，形成明显的应力峰值；壁厚突变设计未设置过渡结构，不同壁厚连接处的应力传递中断，局部应力大幅提高，这些不合理设计均会为容器安全埋下隐患。(2) 材料选择不当：材料性能与容器运行工况不匹配，会显著加剧应力集中的危害。若容器长期处于高温、高压或腐蚀

性工况,却选择韧性较差、强度不足的材料,材料无法通过塑性变形缓解局部高应力,易在应力集中部位产生裂纹;同时,若原材料内部存在裂纹、夹杂、气孔等固有缺陷,这些缺陷会成为应力集中的“应力源”,进一步放大局部应力,降低容器的承载能力^[2]。(3) 载荷计算偏差:设计过程中未充分考虑实际运行中的复杂载荷,仅依据理论工作载荷进行设计,会导致应力分布不均,引发应力集中。实际工况中,容器不仅承受内部压力等工作载荷,还可能受到地震、风载荷、管道附加载荷等外部载荷的作用,若设计时未将这些附加载荷纳入计算,会导致设计应力与实际应力偏差较大,局部区域因载荷超出设计预期而出现应力集中。

2.2 结构设计优化措施

(1) 合理设计开孔与接管:优化开孔位置,优先选择容器应力分布均匀的区域开孔,避开封头与筒体环焊缝、筒体纵焊缝等应力集中区域;严格控制开孔尺寸,在满足使用需求的前提下尽量减小开孔直径,降低应力集中程度;采用科学的补强结构,对于中低压容器可选用补强圈补强,对于高压、厚壁容器则采用整体补强(如加厚接管、整体锻件补强),通过分散开孔处的应力,有效减少应力集中。(2) 优化构件转角与过渡:将容器各部位的直角转角全部改为圆角过渡,根据容器壁厚和工况合理确定圆角半径,一般圆角半径不小于壁厚的1.5倍,确保载荷流线平滑过渡,避免应力积聚;对于壁厚突变的部位,设置渐变式壁厚过渡段,控制过渡段的倾斜角度,使壁厚逐步变化,实现应力的均匀传递,杜绝因壁厚突变引发的应力集中。(3) 简化结构造型:在满足使用功能和安全要求的前提下,尽量简化容器结构,减少不必要的结构突变。避免设计复杂的凸起、凹槽、异形接口等结构,这些结构易导致载荷传递不畅,形成局部应力集中;优先采用简洁、对称的结构设计,确保应力在容器各部位均匀分布,降低应力集中隐患。

2.3 材料选择与设计优化

(1) 匹配材料性能与工况:根据压力容器的实际运行工况,科学选择材料。对于高温高压容器,选用耐高温、高强度、韧性优良的合金材料;对于腐蚀性介质容器,选用耐腐蚀合金或衬里材料,确保材料的强度、韧性、耐腐蚀性等性能与工况完全匹配,使材料能够通过塑性变形缓解局部高应力,避免因材料脆性导致应力集中部位发生断裂破坏。(2) 控制材料质量:在设计阶段明确原材料的质量标准,严格筛选原材料供应商,要求供应商提供完整的材料质量证明文件;设计中明确规定原材料的无损检测要求,对原材料进行超声波、射线等无损

检测,杜绝含有裂纹、夹杂、气孔等缺陷的材料用于压力容器制造,从源头消除材料缺陷引发的应力集中^[3]。

2.4 载荷计算与应力分析优化

(1) 精准计算载荷:全面梳理容器实际运行中的各类载荷,包括工作载荷、附加载荷和特殊载荷,确保设计载荷与实际工况完全一致。在计算工作载荷时,考虑压力波动、温度变化带来的载荷变化;在计算附加载荷时,结合容器的安装环境,纳入地震、风载荷、管道推力等外部载荷,通过精准计算,避免因载荷遗漏或计算偏差导致的应力分布不均。(2) 采用先进应力分析方法:摒弃传统的经验设计方法,运用有限元分析等先进技术,对容器的关键部位(如开孔、转角、焊缝接头)进行详细的应力分析。通过有限元模拟,直观呈现应力分布情况,精准识别应力集中区域和峰值应力,根据分析结果针对性地优化结构设计、调整载荷分布,提前规避应力集中风险,确保容器设计的安全性和合理性。

3 压力容器制造环节中应力集中的产生原因及降低措施

3.1 制造环节中应力集中的主要产生原因

(1) 焊接工艺缺陷:焊接是压力容器制造的核心工序,也是产生应力集中的主要环节。焊缝未焊透、未焊满会导致焊缝有效承载面积减小,局部受力集中;咬边会使焊缝与母材过渡处形成沟槽,造成应力流线弯曲积聚;气孔、裂纹等内部缺陷会破坏焊缝的连续性,成为应力集中的“薄弱点”,这些缺陷均会导致焊缝及热影响区应力显著升高,大幅降低容器的结构完整性。(2) 加工精度不足:构件加工质量直接影响力分布,加工精度不足易引发应力集中。构件加工尺寸偏差过大、圆度或直线度不达标,会导致装配后局部受力不均;表面粗糙度超标,构件表面存在的划痕、凹凸不平会成为局部应力集中源,尤其在承受交变载荷时,会加速应力集中的危害,增加容器失效风险。(3) 热处理工艺不当:焊接过程中会产生大量残余应力,若焊接后未进行合理的热处理,残余应力会在构件内部积聚,形成应力集中。热处理温度过高、保温时间不足或冷却速度过快,会导致材料组织不均匀,产生新的内应力;而未进行热处理或热处理工艺不符,会使残余应力无法有效消除,长期作用下易引发局部开裂。

3.2 焊接工艺优化措施

(1) 规范焊接工艺参数:根据压力容器的材料、壁厚,合理选择焊接电流、电压和焊接速度,确保焊缝成形均匀、饱满,避免出现未焊透、未焊满、咬边等缺陷。焊接过程中控制熔池温度,减少热影响区范围,降低热

应力积聚,同时避免焊接速度过快导致的焊缝未融合问题,从源头减少焊接缺陷引发的应力集中。(2)优化焊接接头设计:结合容器结构和受力情况,采用合理的焊接接头形式,优先选用对接接头,其应力分布均匀,应力集中程度远低于角接接头;对于角接接头,可采用圆角过渡或坡口设计,减少焊缝与母材的突变,使应力平滑传递,降低焊缝处的应力峰值,避免应力集中^[4]。(3)加强焊接质量检测:焊接完成后,采用超声波检测、射线检测等无损检测技术,对焊缝及热影响区进行全面检测,及时发现未焊透、裂纹、气孔等隐藏缺陷,并采取补焊、打磨等措施妥善处理。同时建立焊接质量追溯体系,确保每一道焊缝都符合设计和规范要求,消除焊接缺陷带来的应力集中隐患。

3.3 加工精度控制措施

(1)提升加工设备精度:采用高精度车床、铣床、卷板机等加工设备,严格控制构件的加工尺寸偏差、圆度、直线度等关键指标,确保构件尺寸符合设计要求。定期对加工设备进行校准和维护,避免设备精度下降导致的加工误差,从设备层面保障加工精度,减少因尺寸偏差引发的受力不均和应力集中。(2)优化加工工艺:合理安排加工工序,采用“先粗加工、后精加工”的流程,减少加工过程中的变形;对易变形构件采用工装夹具固定,控制加工过程中的变形量。同时优化表面加工工艺,通过打磨、抛光等方式,降低构件表面粗糙度,消除表面划痕、凹凸等缺陷,避免表面缺陷成为应力集中源。

3.4 热处理工艺优化措施

(1)合理选择热处理方式:针对不同的母材材质、焊接工艺及容器工况,选用合适的热处理方式。对于低碳钢、低合金钢制造的压力容器,焊接后可采用退火处理,有效消除焊接残余应力,改善材料组织;对于高强度钢

容器,可采用正火+回火处理,在消除残余应力的同时,提升材料的韧性和强度,避免应力集中加剧,保障容器的结构性能^[5]。(2)严格控制热处理参数:严格按照设计要求和相关标准规范,精准控制热处理的温度、保温时间和冷却速度,避免参数偏差导致的热处理缺陷。热处理过程中采用专业测温设备实时监测温度,确保构件各部位温度均匀,保温时间充足,使焊接残余应力充分释放;冷却过程中采用缓慢冷却方式,避免因冷却速度过快产生新的内应力,防止形成新的应力集中,确保热处理效果符合要求。

结束语

降低压力容器设计制造过程中的应力集中,是保障设备安全服役、延长使用寿命的关键举措,需贯穿设计与制造全流程。设计环节需优化结构、合理选材、精准计算载荷,制造环节需规范焊接、严控加工精度、优化热处理工艺,同时严格遵循相关标准规范。未来可结合有限元分析等先进技术,持续优化防控措施,平衡安全与经济性,为压力容器行业的高质量发展提供有力支撑,助力工业生产安全稳定推进。

参考文献

- [1]曹野,赵明.压力容器设计阶段风险评估过程中存在的问题和建议[J].石化技术,2020,8(3):177-180.
- [2]党亚茹,张满航.压力容器设计及制造过程中降低应力集中的措施[J].石化技术,2021,28(2):166-167.
- [3]王晓飞.浅析如何在压力容器设计制造过程中降低应力集中问题[J].中国设备工程,2024,11(13):88-90.
- [4]刘淑婷.压力容器制造过程中常见质量问题与对策研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(5):68-70.
- [5]杨丽霞.压力容器设计及制造过程中降低应力集中的措施[J].流体测量与控制,2022,3(3):46-49.