

高压无缝钢质气瓶旋压成型工艺

杨忠华

喀什地区特种设备检验检测所 新疆 喀什 844000

摘要: 本文系统研究高压无缝钢质气瓶旋压成型整套工艺体系, 介绍冷热旋压成型原理、原材料性能指标、核心工装设备及成品质量评价规范。围绕气瓶筒体成型、端部收口全流程, 分析转速、减薄率、成型温度等关键参数对成型质量的影响, 归纳裂纹、褶皱、壁厚不均等缺陷成因与管控要点。通过有限元仿真完成工艺参数多目标优化, 并结合实体试验验证优化方案有效性, 有效提升气瓶成型精度与运行安全性, 为工业化生产提供可靠工艺参考。

关键词: 高压无缝; 钢质气瓶; 旋压成型工艺

引言: 高压无缝钢质气瓶是工业储能、特种设备供气领域的核心承压构件, 产品成型质量、力学性能与尺寸精度直接决定使用安全与服役寿命。旋压成型具备局部连续塑性变形、成型稳定性强的优势, 是高压气瓶主流加工技术。实际生产中易受工艺参数、工装精度、原材料性能影响, 产生各类成型缺陷。为此本文全面梳理旋压成型工艺要点, 借助仿真技术优化工艺参数, 助力提升气瓶成型质量, 规范现场生产工艺标准。

1 高压无缝钢质气瓶旋压成型基础理论与工艺体系

1.1 无缝钢质气瓶旋压成型基本原理

(1) 强力变薄旋压依靠旋轮高压挤压坯料, 使金属局部连续塑性变薄, 实现气瓶筒体成型; 无模收口旋压无需定型模具, 通过旋压轨迹控制完成气瓶端口收口, 适配异形端部成型需求。(2) 旋压过程中金属材料呈局部逐层流动特性, 变形集中于旋轮接触区域, 材料轴向延伸、周向微流动, 应力应变呈不均匀分布, 接触区域受压应力, 周边产生拉应变, 整体塑性变形均匀可控。(3) 热旋压需加热坯料, 降低金属变形抗力, 提升材料塑性, 适用于大壁厚、大直径高压气瓶成型; 冷旋压在常温下作业, 工件尺寸精度高、表面质量好, 多用于中小规格高精度气瓶成型。

1.2 气瓶旋压成型原材料与性能要求

(1) 高压气瓶专用钢材需严格把控碳、锰、硅等化学成分, 严控硫、磷有害杂质, 同时具备高强度、高韧性、抗疲劳的力学性能, 满足高压承压工况。(2) 管坯适用于筒体成型, 棒坯多用于端部收口加工, 坯料需满足尺寸规整、无裂纹、无夹杂等要求, 预处理包含除锈、矫直、预热等工序, 消除坯料初始缺陷。(3) 原材料的强度、塑性均匀性直接决定旋压成型稳定性, 材质不均易引发壁厚偏差、开裂等问题, 同时直接影响气瓶成品的耐压极限与使用寿命^[1]。

1.3 旋压成型核心设备与工装体系

(1) 专用旋压设备由主机、传动系统、液压控制系统、数控系统组成, 通过数控精准调控旋轮轨迹与压力, 实现自动化连续旋压加工。(2) 旋轮需具备高硬度、耐磨性, 根据成型工况匹配轮廓尺寸; 芯轴保证气瓶内部尺寸精度, 夹具需稳固夹持坯料, 规避加工偏移。(3) 工装精度是成型质量核心, 旋轮、芯轴的精度偏差会直接造成气瓶壁厚不均、尺寸超差, 夹具定位误差会导致工件偏心, 影响整体成型精度。

1.4 气瓶成型质量评价标准

(1) 外观评价包含筒体直径、长度、圆度等尺寸精度, 全段壁厚偏差数值, 以及表面无划痕、裂纹、褶皱、氧化缺陷等表面质量指标。(2) 内在质量需检测拉伸、冲击等力学性能, 核查耐压强度、气密性, 同时考核循环承压下的疲劳耐久性能, 保障使用安全性。(3) 成型过程需严格遵循国家及行业高压无缝气瓶技术规范, 满足成型工艺参数、质量检测、性能验收的标准化要求, 确保成品符合安全使用标准。

2 高压无缝钢质气瓶旋压成型关键工艺分析

2.1 气瓶整体旋压成型工艺流程

(1) 前期准备工序是保障旋压成型质量的基础, 主要包含坯料预处理、加热与设备装夹工作。首先对管坯、棒坯进行表面除锈、打磨、矫直处理, 清除氧化皮、划痕等原始缺陷, 保证坯料尺寸规整。根据冷热旋压工艺需求对坯料进行均匀加热或恒温恒温处理, 消除材料内应力。最后将坯料精准装夹在旋压设备工装中心位置, 校正同轴度, 固定工件位置, 避免加工过程出现偏移、晃动等问题。(2) 核心成型工序分为筒体变薄旋压与端部收口成型两个阶段。筒体成型采用强力变薄旋压工艺, 通过旋轮连续挤压坯料, 使金属逐步塑性变薄、轴向延伸, 成型出均匀的气瓶筒身结构。筒体加工

完成后,采用无模或有模收口工艺对气瓶两端进行旋压收口,控制端口弧度与尺寸,完成气瓶整体轮廓成型^[2]。

(3)成型后续工序用于优化气瓶性能与外观质量,成型后的工件需进行整体热处理,消除旋压加工产生的残余应力,提升钢材强度与韧性。随后开展端口精整、外壁打磨、尺寸修形等精加工处理,修正成型微小偏差。最后通过尺寸检测、外观筛查、耐压检测完成成品质量核验,剔除不合格工件。

2.2 核心工艺参数对成型质量的影响

(1)旋压转速、进给量与减薄率是影响金属变形的核心参数。旋压转速决定金属变形速率,转速过低易导致成型效率低下,过高则会引发金属流动紊乱。进给量直接控制单次成型变形量,进给均匀可保证金属平稳延伸,进给不均易造成局部变形差异。减薄率决定筒体壁厚成型效果,合理的减薄率可实现金属均匀塑性变形,过大易造成工件开裂,过小则壁厚不达标、成型稳定性差。(2)热旋压温度与道次分配直接影响成型稳定性。成型温度过高会导致钢材晶粒粗大、表面氧化严重,降低气瓶力学性能;温度过低会增大材料变形抗力,极易产生加工硬化。合理的道次分配可分散单次变形应力,多道次渐进成型能够缓解应力集中,避免单次大变形引发的成型缺陷,大幅提升工件成型均匀性与整体稳定性^[3]。(3)旋轮间隙与旋压压力直接决定气瓶壁厚均匀性。旋轮间隙是控制壁厚的关键,间隙偏差会直接造成筒体各处壁厚差值超标。旋压压力过大易导致局部金属过度挤压变薄,压力不足则会出现成型不充分、壁厚偏厚等问题,稳定且适配的压力参数可保障整段筒体壁厚均匀一致。

2.3 典型成型缺陷及成因分析

(1)高压气瓶旋压成型常见缺陷主要包括内壁褶皱、表面裂纹、壁厚不均等。内壁褶皱多出现于瓶肩与收口过渡区域,呈现不规则凸起褶皱;表面裂纹分为微裂纹与贯通裂纹,多分布在高应力变形区域;壁厚不均表现为筒体周向、轴向壁厚差值超标,是最普遍的成型缺陷,直接影响气瓶耐压性能。(2)缺陷产生诱因主要分为三类,工艺参数不合理是主要原因,参数匹配失衡会造成金属流动紊乱;工装精度误差,如旋轮磨损、芯轴偏心、夹具定位偏差,会导致成型受力不均;原材料性能波动,钢材成分、塑性、硬度不均匀,会大幅提升缺陷产生概率。(3)缺陷存在明确的时序生成规律,成型初期易因装夹偏差、初始参数不当产生偏心与壁厚偏差;成型中期大变形阶段易出现应力集中,引发表面微裂纹;收口成型后期金属流动受限,极易生成内壁褶

皱,各阶段核心诱因不同,是工艺、工装、材料共同作用的结果。

2.4 不同旋压工艺方案对比分析

(1)单道次旋压工艺成型效率高、工序简单,但单次变形量较大,工件应力集中明显,易出现裂纹、壁厚不均等缺陷,仅适用于小变形、低精度气瓶加工。多道次旋压通过多次渐进变形,金属流动更均匀,残余应力小,成型精度高、质量稳定,适配大壁厚、高精度高压气瓶成型,但加工周期更长、效率偏低。(2)有芯模收口旋压成型定位精准,端口尺寸规整、一致性好,壁厚可控性强,适合标准化大批量生产。无芯模收口无需定制模具,工艺灵活性高、适配性广,可加工异形端口气瓶,但成型精度相对偏低,对操作人员工艺参数把控能力要求更高。(3)冷旋压工艺成品表面质量佳、尺寸精度高,无需加热工序,生产成本低、性价比高,多用于中小规格高精度气瓶。热旋压可降低金属变形抗力,规避加工硬化问题,适合大直径、大壁厚、高强度大型气瓶成型,但能耗高、工序复杂、生产成本更高,适用于重型高压气瓶的定制化生产。

3 基于有限元的旋压成型工艺仿真与参数优化

3.1 旋压成型有限元仿真模型构建

(1)结合高压气瓶旋压成型大变形、强非线性的工艺特点,优先选用适配金属塑性成型的专业有限元仿真软件,满足动态成型模拟、应力应变计算精度要求。为平衡仿真效率与计算精度,对实际工装结构进行合理几何简化,去除螺栓、倒角等非关键细小结构,保留坯料、旋轮、芯轴、夹具等核心成型构件。同时开展精细化网格划分,对瓶体筒体、收口等大变形区域采用加密网格,对工装刚性区域采用稀疏网格,有效提升仿真计算效率与结果准确性^[4]。(2)根据高压气瓶专用钢材性能参数,选取适配的塑性材料本构模型,精准还原钢材在冷热旋压工况下的流变应力与硬化特性。结合实际生产工况设置仿真边界条件,约束夹具、芯轴的固定自由度,设定旋轮的进给速度、旋转转速与运动轨迹,并匹配实际旋压压力、成型温度等载荷参数,最大程度还原真实成型环境。(3)为保障仿真数据可靠性,建立完善的模型有效性验证方案。通过对比仿真与实际工况的金属变形趋势、成型状态,结合网格收敛性检验,排除网格尺寸、参数设置带来的计算误差,校准模型各项参数,确保构建的有限元模型能够真实反映气瓶旋压成型全过程。

3.2 旋压成型过程仿真结果分析

(1)通过仿真求解可精准获取旋压全过程的应力

场、应变场动态分布规律。仿真结果显示,应力应变主要集中在旋轮与坯料的局部接触区域,呈现瞬时集中、动态迁移的分布特征。筒体成型阶段应力分布相对均匀,而瓶肩、瓶口收口区域易出现应力集中现象,是成型缺陷高发区域,通过场分布规律可精准定位高危变形区域。(2)仿真可直观还原金属流动轨迹与壁厚动态变化过程。旋压过程中金属以旋压接触点为核心,沿轴向延伸、周向小幅流动,逐步完成筒体变薄成型。通过仿真数据可实时提取不同成型阶段的壁厚数值,清晰呈现壁厚增减变化规律,精准识别壁厚偏差产生的阶段与位置,为工艺调整提供数据支撑。(3)依托仿真平台可完整还原褶皱、裂纹、壁厚不均等缺陷的生成全过程。通过追踪缺陷区域的应力累积、金属流动阻滞及变形不均情况,验证缺陷形成机理,明确参数失衡、金属流动紊乱与成型缺陷的对应关系,从理论层面解释实际生产中缺陷产生的核心原因。

3.3 多目标工艺参数优化

(1)结合高压气瓶成型技术要求,确立多维度优化目标,以气瓶尺寸精度达标、整体成型稳定性提升、无成型缺陷为核心优化方向。综合控制筒体圆度、壁厚偏差等尺寸指标,降低成型过程应力波动,规避裂纹、褶皱等常见缺陷,兼顾成型质量与工艺稳定性,满足高压气瓶安全使用标准。(2)采用正交试验法开展关键工艺参数筛选与优化,选取旋压转速、进给量、减薄率、成型温度等核心参数作为试验因子,设置多水平试验梯度,通过有限元仿真批量计算各组试验结果,分析各参数对成型质量的影响权重,剔除次要参数,明确核心影响参数及最优参数区间。(3)通过极差与方差分析,综合多目标优化要求,整合各参数最优水平,确定适配高压气瓶旋压成型的最优工艺参数组合。再次通过有限元仿真对优化参数进行模拟验证,对比优化前后的应力应变分布、壁厚精度及缺陷情况,验证参数组合的可行性与优越性,完成工艺参数初步优化^[5]。

3.4 优化工艺的试验验证

(1)为验证仿真优化结果的工程实用性,严格按照生产标准制备试验坯料,保证试验原材料、预处理工艺

与仿真模型参数一致。设计对照试验方案,分别采用原始工艺与优化工艺开展多组重复成型试验,控制单一变量,排除原材料、设备工况等外界因素干扰,保障试验数据真实有效。(2)试验完成后,对两组工艺成型的气瓶进行全方位质量检测,精准测量筒体尺寸、壁厚偏差、表面质量,通过力学试验、耐压试验检测气瓶内在性能,整理汇总各项试验数据,对比分析优化工艺在成型精度、稳定性、缺陷控制方面的提升效果。(3)将实体试验检测数据与仿真模拟结果进行逐项对比校验,分析仿真数据与试验数据的误差范围,验证有限元仿真模型的准确性与优化工艺的可靠性。同时针对微小误差进一步微调工艺参数,实现仿真模拟与实际生产的高度契合,为高压气瓶旋压成型工艺的工业化优化应用提供可靠依据。

结束语

本文完成高压无缝钢质气瓶旋压成型基础理论、工艺流程、参数影响规律及缺陷机制的系统性分析,依托有限元仿真手段优化核心工艺参数,并通过实体试验验证优化工艺的可行性与优越性。优化后的工艺可有效改善壁厚不均、应力集中等问题,降低成型缺陷率,提升产品整体质量。后续可结合智能化控制技术迭代工艺方案,适配多规格高压气瓶生产需求,推动旋压成型工艺标准化与精细化发展。

参考文献

- [1]王洪海,陈俊德,陈冬,等.强力旋压工艺在大直径气瓶管制造中的应用[J].钢管,2022,51(3):58-63.
- [2]余泽金,米永峰,姜海龙,等.高压无缝钢质气瓶强力旋压成型工艺及性能研究[J].锻压技术,2023,48(7):112-118.
- [3]潘州鑫.某型钢质高压气瓶翻板旋压成形优化设计及模拟分析[J].机械制造与自动化,2024,53(4):89-93.
- [4]金伟娅,李曰兵,潘州鑫.高压无缝钢瓶冷旋压成型残余应力调控技术研究[J].压力容器,2025,42(2):32-38.
- [5]张斌凯,江连运,赵春江,等.高压气瓶瓶口收口旋压成形缺陷分析与工艺优化[J].机械制造与自动化,2024,53(4):89-93.