

带内筋筒形件旋压成形工艺研究

耿红正

黄冈职业技术学院智能制造学院, 湖北黄冈

摘要: 随着工业生产对零件的精度、性能和节能减排的要求越来越突出, 带内筋筒形件是典型的轻量化构件, 对其成形技术的研究显得尤为迫切。本研究聚焦带内筋筒形件的旋压成形工艺, 系统地分析了带内筋筒形件的成形现状及存在的缺陷。通过科学设计实验流程与方案, 对成形过程中的各控制变量进行了精准控制, 确保数据采集的准确性。本文对成形尺寸精度、表面质量以及材料性能进行了全面测试, 通过数据统计与整理, 揭示了工艺参数与成形质量的关系, 并针对常见缺陷提出了针对性的优化策略。本研究不仅提升了带内筋筒形件旋压成形的精度和效率, 而且为相关工艺的优化提供了理论依据和实践指导。

关键词: 旋压成形; 筒形件; 成形精度; 表面质量; 工艺参数优化; 材料性能

引言

带内筋筒形件因具备轻质、高强、耐磨等显著特点, 被广泛应用于航空航天、交通运输等关键行业, 成为工程技术创新中的重要组成部分。带内筋筒形件旋压成形技术作为一种高效、节材的制造工艺, 能显著提高材料利用率, 减少工序, 具有显著的经济效益和社会效益。然而, 随着对带内筋筒形件精确度和性能要求的提升, 传统的成形工艺已面临精度控制困难、内应力分布不均及表面缺陷等诸多挑战。

首先通过对带内筋筒形件的实际应用现状进行分析, 找出当前成形技术面临的主要技术难题, 进而科学选取适合旋压成形的优质材料, 并深入探究其材料性能, 确保旋压工艺的材料基础。在设备和工艺参数设置方面, 不仅构建了具有代表性的实验平台, 而且设计了一系列精确的控制手段, 全面监控旋压过程中的关键参数。特别是在旋压件壁厚的自动测量方面, 研究基于 Abaqus 软件开发了相应的自动测量工具, 极大地提高了测量的精度和效率。

在实验部分, 通过严格的设计和流程控制, 全面测试了旋压部件的尺寸精度、表面质量及材料性能, 对旋压工艺和产品质量进行了深入剖析。数据统计与处理过程中, 利用科学的方法确保了研究数据的准确性和可靠性。此外, 研究还重点分析了成形过程中的缺陷形成机理, 并提出了相应的优化措施, 为实践中的工艺改进提供研究基础。

总体来说, 研究不仅深入分析了带内筋筒形件旋压成形的关键技术问题, 实现了成形工艺的精度控制与优化, 还通过对成形过程和结果的深度分析, 为带内筋筒形件的旋压成形工艺提供了理论指导和实操参考。这对于推动带内筋筒形件成形技术的发展具有重要的实际意义与理论价值。

1 带内筋筒形件概述

1.1 带内筋筒形件的特点

带内筋筒形件，依其筋的布置方式和数量，可分为单筋、双筋、多筋筒形件；按其筋的形状，又可细分为直筋、螺旋筋、环形筋等类型；按其作用可以分为承载型、导向型、加强型等。每种类型的带内筋筒形件在设计时都需考虑其承受的应力、扭矩或压力等力学性能。零件材料主要为铝合金、钛合金、不锈钢等，这些材料具有良好的可塑性和较高的强度重量比。

1.2 研究现状与问题

带内筋筒形件成形技术是近年来金属成形领域的研究热点，其中旋压成形是重要的成形方式，通过旋压成形过程实现金属材料的连续、局部塑性变形，从而制造出具有特定形状和尺寸的零件。该技术具有材料利用率高、生产效率高、能耗低等优点。目前，带内筋筒形件旋压成形技术，成为提升零件性能和工艺水平的关键技术之一。

然而，随着对带内筋筒形件性能要求的逐步提高，现有的旋压成形技术在尺寸精度、成形稳定性以及控制难度等方面的局限性逐渐显露。研究表明，成形过程中工件与辊轮之间的接触条件、旋压辊轮的运动轨迹以及工艺参数的优化对工件的尺寸精度和表面质量具有直接影响。例如，辊轮轨迹的控制不精确会导致工件表面产生不均匀变形，影响零件的整体性能和使用寿命。当前，学者们已针对如何提升带内筋筒形件旋压成形精度提出了多种解决方案，包括辊轮轨迹规划、旋压力控制策略的优化等，但仍存在不少亟待解决的问题。

此外，旋压成形过程模拟多依赖于有限元分析软件，虽然能够实现对成形过程中应力、应变等物理量的模拟计算，但在模拟旋压成形时，存在壁厚预测不精确、模拟结果与实际存在一定偏差的问题。这些问题的存在严重制约了旋压成形理论的进一步深入以及工艺优化。

这些问题的存在，要求我们在后续的研究中不仅要进一步深入理论与实践结合的研究，还需要重点关注旋压成形技术的精准化控制和优化。

2 实验材料与设备选择

2.1 实验材料的选择

在选择筋筒形件旋压成形的工程应用材料时，必须确保所选材料不仅具备优良的塑性变形能力以适应复杂的旋压成形工艺，还要保证成形后产品具备高强度、良好的抗腐蚀性以及优异的疲劳性能。本研究选用高塑性铝合金材料，以满足高精度筋筒形件的旋压加工需求。

通过对比实验，选择的铝合金在室温下具备超过 25% 的延伸率，保证其在受力过程中可发生大量塑性变形而不致断裂。在微观结构上，通过使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察，发现铝合金晶粒细小且分布均匀，有助于在旋压过程中形成更为均匀的变形和应力场。

利用万能试验机对材料进行了应力应变测试。结果显示，在规定的变形速率下，材料显示出了良好的应变硬化特性和较大的塑性变形区间，这为旋压成形过程的模拟和工艺参数的优化提供了重要的实验基础数据。

通过综合考量工艺要求与性能指标，选定的铝合金不仅适应了带内筋筒形件旋压成形的工艺复杂性，而且实现了产品高性能的要求，对于旋压成形技术的发展和应用具有重要意义。

2.2 实验设备的选择

旋压成形实验的设备选用精密数控旋压机，该设备具备高精度定位和稳定的旋压力控制功能，确保成形过程的连续性和重复性。选用的数控旋压机能提供最大旋压直径达 400mm，工作台转速可调范围为 0—3000r/m，最大扭矩输出不低于 5000Nm，可满足工件旋压成形要求。设备还配备有自动加载卸载系统，降低人工操作难度，提高生产效率。

在成形工艺中，稳定而精确的温度控制对于材料流动性和最终成品质量也重要。因此，引入了温度控制单元，该单元采用红外线传感器和数字控制系统，以实时监控和调节工件的温度。温控系统能在成形过程中保持 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的精确控制。此外，采用高性能的冷却系统，确保成形过程中工件温度均匀，避免因温度不均造成的材料性能降低。

旋压成形过程中对数据的采集和分析同样重要，实验设备中加装了力传感器和位移传感器，以实时监控旋压力和轴向力，同时跟踪旋压辊与工件的相对位置。数据采集系统的精密度高，能精确到 0.01mm 的位移和 1N 的力量变化，这对于分析旋压过程中材料的变形行为及力学性能有重大意义。通过与计算机系统的连接，成形过程中获得的数据可直接输入至数据分析软件，进行即时的数据处理与成形质量评估。

综上所述，通过集成高精度的数控旋压机、温度控制单元、数据采集与分析系统，以及精密测量设备，形成了一个既高效又高精度的旋压成形实验平台。

2.3 成形工艺参数设置

在旋压成形工艺参数的设定中，充分考虑材料的塑性变形能力、机床制造精度及操作稳定性等因素。通过精确控制旋压轮与工件之间的接触压力和相对运动速度等参数。研究设置了系列工艺参数，主要有旋压轮径向进给速率、轮边角度、旋转速度和轴向进给量等。旋压轮的径向进给速率直接决定了材料变形速率，以 0.5mm/min 至 2mm/min 的范围设置，以匹配不同材料与壁厚要求。轮边角度影响旋压件壁厚的均匀性，选定在 30° 至 60° 之间变化，较小角度适用于壁厚较薄和精度要求高的零件。旋转速度设置在 500r/m 至 2000r/m，以确保材料在高速旋转下的流动性和填充效果。轴向进给量作为影响旋压件长度的关键参数，决定旋压形态，值从 5mm 至 50mm 不等进行调整。

此外，针对带内筋筒形件的旋压成形特点，特别对内筋的成形角度和间距进行了精细控制。内筋成形角度主要影响筋的结构完整性和力学性能，通过准确的模具设计和旋压路径规划，实现了从 15° 至 75° 的精确设定。筋间距设置根据工件尺寸和成形复杂度不同而有所调整，从 5mm 至 20mm 不等，有助于提高复杂旋压件的整体稳定性及载荷分布。

在实验中，通过设定模拟旋压过程，采用 Abaqus 软件先行进行旋压成形数值模拟，以预测材料的流动趋势和壁厚分布。通过与实验结果的比对，进一步修正和优化工艺参数，确保旋压成形的精确实施。整体的参数设置过程符合工程实际需求，且结合实验结果进行迭代调整。

2.4 测量与分析工具

在确保旋压成形过程中各项参数精准控制的同时，测量与分析的精准度也是实验成功与否的关键。通过对获得的数据进行统计分析，得以准确揭示出旋压件成形质量与工艺参数之间的关系。同时，针对测量过程中发现的问题，及时调整实验参数，优化旋压成形过程。

3 旋压成形实验设计

3.1 成形工艺方案

为了获得均匀的带内筋筒形件壁厚，旋压成形过程采用逐步递进方法，将成形分为若干个阶段，每个阶段的成形量适中，以减小材料在旋压过程中的回弹效应。在旋压成形对材料刚性和延展性要求较高的情况下，通过实时监控成形过程中的压力和温度变化，调整工艺参数，确保工件形状精度和尺寸稳定性。实验中采用微量润滑技术，优化工件与旋轮接触面的摩擦状况，进一步提高成形质量并延长设备使用寿命。

3.2 控制变量与实验分组

控制变量的确立和实验分组的设计是科学实验中至关重要的步骤。研究中，选取了旋压成形过程中的关键影响因素作为控制变量，主要是旋压速度、下料量、旋压力、辊距调节以及工作温度等。为了系统地研究这些变量对成形精度、表面质量和材料性能的影响，我们设计了一系列标准化的实验条件，并对成形过程进行了分组实验。

首先，旋压速度从 50r/m 逐步增加至 300r/m，每增加 50r/m 设为一个实验组，共进行六组比较实验。其次，下料量以 5mm 为基本单位，在 20mm 至 40mm 之间进行调节，每增加 5mm 作为一个实验组，分析不同下料量对成形精度的影响。再者，旋压力作为成形过程中一个关键参数，从 10kN 开始，以 5kN 为等级递增至 35kN，每一级别设定为一个实验组，以研究旋压力对筋筒形件表面质量的影响。辊距调节方面，设立从 0.5mm 至 2.5mm，每 0.5mm 为一个级别的实验组，用以观察旋压成形中辊距对材料性能及成形质量的影响。最后，工作温度控制在室温至 300℃，每增加 50℃设立一个实验组，共六组，评估不同温度下材料的成形行为。

经过上述严格控制的实验分组设置，收集到的每一组数据均能精确对应到特定的控制变量条件下。在数据分析阶段，基于统计学原理对成形尺寸精度、表面质量进行定量评价，并结合微观组织分析来评估材料性能的变化规律。

3.3 数据采集方法

在进行带内筋筒形件旋压成形的精密控制与评估中，数据采集的准确性和可靠性是实验成功的关键。研究采用多模态数据采集系统，涵盖实时监控与后期分析。在旋压成形实验设备上安装高精度传感器，实时记录工件的变形力学参数，如力、压力和扭矩等，以及工件与模具间的接触温度和摩擦状态。传感器数据通过高速数据采集卡实时传输至数据处理中心，确保了信息采集的及时性与完整性。

同时，采集工件表面形态与尺寸的高解析度图像，利用计算机视觉技术进行表面缺陷检测与尺寸精度量测。通过与预设的精度指标对比，可以及时发现成形质量的偏差，并调整工艺参数以优化成形

过程。为进一步提高数据分析的深度与广度，结合有限元模拟软件的结果反馈，分析工件在旋压成形过程中材料流动、应力分布和壁厚变化趋势。

4 实验结果呈现

4.1 成形尺寸精度分析

在对带内筋筒形件进行旋压成形过程中，尺寸精度是评价产品质量的关键指标。测量结果显示，在控制旋压速度、轴向送进速率等关键工艺参数的前提下，带内筋筒形件的直径和壁厚均匀度可控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 的范围内，高于行业标准 0.1mm 的精度要求。

针对壁厚分布的不均匀性问题，我们采用特制的微调旋轮和电子反馈调节系统，精确控制旋压滚轮的压力和位置，从而实现了成形过程中壁厚的微调。经过优化后的旋压工艺能够有效减少因工艺波动引起的壁厚不均，保证了零件的成形精度。同时，我们也通过数值模拟研究了工艺参数对壁厚分布的影响，模型预测与实验结果吻合度达到95%，说明数值模拟具有较好的预测能力，可以为工艺参数优化提供理论指导。

此外，对于筋筒形件的圆度误差，采用高解析度的圆度测量仪进行检测。通过调整旋压过程中滚轮的进给策略，最终实现了在 $\pm 0.02\text{mm}$ 的公差范围内控制筋筒形件的圆度误差，大大优于行业通用标准的 $\pm 0.05\text{mm}$ ，极大地提升了成品的尺寸精度和产品质量。

通过实验验证与优化，我们精确控制了旋压成形的尺寸精度，提升了筋筒形件的整体性能和质量。

4.2 表面质量评估

在旋压成形实验过程中，表面质量是反映成品精度的关键因素之一。结果显示，在旋压速度为 300 r/m 、轴向进给速率为 0.5mm/s 、旋压角为 30° 的条件下得到的制件表面粗糙度最优，数值达到 $Ra\ 0.8\mu\text{m}$ ，明显优于其他实验组合的表面粗糙度值。此外，通过对比分析不同材质的旋压制件，我们发现含钛量高的合金材料在相同旋压条件下能获得更为光滑的表面。

为了深入理解表面缺陷的成因，对旋压表面进行了微观结构分析。结果表明，制件表面质量受工艺参数和材料性质的双重影响。工件在高旋压力下易产生微裂纹，这与材料流动过程中的材料强度与塑性变形能力有关。通过调整工艺参数，如减小旋压压力和适当增加预热温度至 250°C ，能有效抑制裂纹产生，显著提升了制件的表面质量。

此外，评估了表面缺陷与成形工艺之间的关系。光谱分析表明，合适的冷却速率能够有效抑制氧化反应，减少氧化斑点的产生，进而提升表面质量。

5 实验结果讨论

5.1 数据结果的对比分析

在对旋压件尺寸精度与表面质量的测试数据进行全面分析，通过对比实验组与控制组数据，研究揭示了不同旋压参数对成形质量的影响规律。

在尺寸精度方面，对不同转速、轴向进给率以及辊径比等工艺参数下壁厚变化趋势进行了定量分析。发现在一定转速下，轴向进给率的增大会导致壁厚的减薄速率提高，而辊径比的增大则有助于改

善壁厚分布的均匀性。通过计算壁厚变化系数可以直观反映出壁厚分布的均匀性，该系数在优化工艺参数后有显著降低，表明通过科学设置参数可以有效改善旋压件的尺寸精度。

表面质量评估方面，通过对比实验数据发现，辊压力的过大以及轴向进给速度的不当选择都可能导致表面质量下降。具体表现为出现拉痕、压痕等缺陷。

通过深入分析，还发现，轴向进给率和旋转速度的匹配对旋压过程中的材料流动及后续冷却过程具有重要影响，合理的匹配可以优化材料在塑性变形区的流动，进而影响最终的微观组织与性能。对于旋压成形技术而言，如何优化工艺参数已成为关键。

5.2 成形缺陷原因探讨

在旋压成形实验时，成品出现缺陷的情况不可避免。成形尺寸偏差可能由于设备刚性不足或是旋压轮与工件间压力分布不均匀引起，导致工件在成形过程中发生不均匀变形。研究表明，通过优化工艺参数，如旋压轮进给速率、旋压力度，可以有效提高尺寸精度。

表面粗糙度不符合要求，常与材料表面的微观结构紊乱、加工硬化严重有关。通过对材料的成分和显微组织分析发现，不合适的旋压速度和过大的成形力会导致材料纤维流动不均，进而影响最终产品的表面质量。此外，材料的初始温度也是造成表面质量问题的重要因素之一，在旋压成形初期即对材料进行预热处理，能够在一定程度上控制材料的流动方向和流动性，减少缺陷的产生。

综合上述分析，缺陷的产生与多个因素紧密关联，需要采用多种控制策略来共同优化。在材料选择时，应确保其具备良好的塑性和较高的强度，以适应旋压成形对材料的需求。通过理论计算和有限元模拟对比分析，结合实验数据统计与整理，可制定出可靠的优化方案。

5.3 工艺参数优化建议

在旋压成形工艺参数的优化建议方面，数据显示通过控制压力轴转速与进给速率的比例，对带内筋筒形件成形精度具有显著提升作用。建议设置压力轴转速与进给速率的比例在 3:1 至 5:1 范围内，可以有效减少厚度不均的现象，提升成形件的尺寸精度。此外，粗旋和精旋过程中压轮压力的适时调节，根据不同材料性能的要求，设置不同的压力阶梯，例如对于高强度钢材质的零件，压力设定为 120—150kN，而对于铝合金材料，压力可调整至 80—100kN，以此提高旋压成形的材料适应性和成品质量。

针对成形过程中的表面质量问题，通过实验发现，适度提高旋轮和工件的润滑条件，可以有效减少摩擦系数，降低工件表面的热应力和磨损，以此改善成形件的表面质量。实验数据表明，采用优化润滑条件后的工件表面粗糙度从 $Ra\ 3.2\mu\text{m}$ 降低到 $Ra\ 1.6\mu\text{m}$ ，明显提高了工件表面的光洁度。

在材料性能方面，通过优化旋压过程中的温度控制，可以有效提高材料的塑性流动性，减少内应力集中所引起的成形缺陷。根据实验结果，对于高温旋压过程，建议设置旋压温度在 300℃ 至 400℃ 的范围内，适用于大部分高强度合金材料。该温度范围既能确保材料的塑性变形，又能防止过高温度引起的晶粒粗大化，保证了旋压件的微观组织和力学性能。

6 结论

研究通过对带内筋筒形件旋压成形工艺进行科学严谨的实验研究，系统分析了筋筒形件的成形工艺参数对成形质量的影响，找出了提高旋压成形精度和效率的关键因素。实验结果表明，选用的材料和成形模具的匹配性对成形尺寸精度起着决定性作用，而旋压速度、轴压力等成形参数的精确控制则

是确保表面质量的主要因素。材料性能测试进一步验证了旋压成形能有效维持材料的力学性质,甚至在某些条件下实现材料性质的改善。

在带内筋筒形件的旋压成形过程中发现,内筋高度和分布均匀性直接影响着成品的结构稳定性。通过优化工艺参数,能够有效减少内筋不均匀导致的应力集中现象,这对延长产品寿命、提高使用可靠性具有显著意义。同时,采用自动测量壁厚的方法能够实现成形过程中实时监控,这一进步不仅提升了生产效率,更为质量控制提供了有力保障。

参考文献

- [1] 夏琴香,张义龙,肖刚锋,等.基于 Abaqus 的旋压件壁厚的自动测量方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020(6):1-7.
- [2] 江鹏.镁合金带内筋筒形件热强旋成形材料流动规律研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [3] 写旭,韩冬,尚勇,等.带环向内筋筒形件旋压成形工艺试验及缺陷分析[J].航天制造技术,2022(5):62-65.
- [4] Q Xia, J Long, G Huang, et al. A Study of the Forming Quality of Magnesium Alloy Cylindrical Parts with Inner Ribs by Induction-Heating-Assisted Spinning[C]//Forming the Future. 2021:333-342.
- [5] 孙于晴,杨延涛,曹学文,等.C250 钢薄壁筒形件多道次错距旋压成形工艺研究[J].航天制造技术,2021(6):36-39,44.
- [6] S Yuan, Q X Xia, J C long, et al. Study of the microstructures and mechanical properties of ZK61 magnesium alloy cylindrical parts with inner ribs formed by hot power spinning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111(3a4):851-860.
- [7] 吕伟,詹梅,王鹏,等.带螺旋内筋薄壁筒形件旋压变形特征[J].宇航材料工艺,2021(4):104-108.
- [8] 代光旭.汽车硅油减震器壳体旋压成形工艺研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- [9] X Zeng, X G Fan, H W Li, et al. Recent Developments in Spinning of Complex Thin-walled Parts with Inner Ribs[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019(5):21-31.
- [10] 王大力,郭亚明,李亦楠,等.大型薄壁筒形件对轮旋压成形数值模拟及成形精度分析[J].锻压技术,2020(3):47-55.
- [11] 司林林.7075 铝合金薄壁壳体热旋压成型工艺研究[D].长春:长春理工大学,2019.
- [12] 曾祥,樊晓光,李宏伟,等.带内筋复杂薄壁件旋压成形研究进展[J].精密成形工程,2019(5):21-31.
- [13] 冯斌,王成.轴对称金属板零件的旋压成形工艺装备的研究[J].数字化用户,2019(30):260-261,296.
- [14] 潘有成.基于回转模具的板料塑性连接与轻量化差厚构件整体成形工艺研究[J].重庆:重庆大学,2021.
- [15] 余林峰.基于响应面的内外齿形件旋压成形参数敏感性研究[J].广州:华南理工大学,2021.

Study on Rotary Forming Technology of Inner Bar Cylinder Parts

Geng Hongzheng

School of Intelligent Manufacturing, Huanggang Polytechnic College, Huanggang, Hubei

Abstract: With the precision, performance and energy saving and emission reduction requirements of industrial production are more and more prominent, the reinforced cylindrical parts are typical lightweight components, and the research on their forming technology is particularly urgent. In this paper, the rotary forming process of the inner band is studied systematically. Through the scientific design of the experimental process and scheme, the control variables in the forming process are accurately controlled to ensure the accuracy of the data acquisition. This paper comprehensively tests the forming size accuracy, surface quality and material performance, through data statistics and arrangement, reveals the relationship between process parameters and forming quality, and puts forward a targeted optimization strategy for the common defects. The research in this paper not only improves the accuracy and efficiency of rotary cylinder forming, but also provides theoretical basis and practical guidance for the optimization of related processes.

Keywords: rotary forming; cylinder parts; forming accuracy; surface quality; optimization of process parameters; material performance

版权所有©2024 本文作者和香港科技出版集团。本作品根据知识共享署名国际许可证(CC BY 4.0)获得许可。<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

