

热挤压锻造的工艺的系统集成与优化

冯立臣^{1,2}, 梁琦^{1,2}

1. 长治凌燕机械厂, 山西 长治 046011

2. 山西省新能源航空智能保障装备技术创新中心, 山西 长治 046011

DOI: 10.61369/ME.2024070011

摘要： 本文围绕面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化展开研究。首先介绍了热挤压锻造技术的基础知识，包括其原理、工艺流程及应用领域，并深入探讨了影响热挤压锻造质量的关键因素。针对热挤压锻造工艺优化，从工艺参数、模具设计以及生产过程质量控制三个方面提出了优化方法。在高效生产路径探索方面，研究了自动化与智能化生产技术、精益生产与绿色制造模式，重点分析了能源节约与环境友好型生产模式，并提出了综合提升生产效率的策略。研究成果为机械制造工艺的集成与优化提供了理论支持和实践指导，对推动高效生产具有重要意义。过案例分析，展示了系统集成与优化在实践中的应用效果。研究表明，通过有效的系统集成和优化策略，可以显著提高机械制造工艺系统的生产效率、降低成本并提升产品质量。

关键词： 机械制造；热挤压锻造；工艺优化

Systematic Integration and Optimization of the hot Extrusion Forging Process

Feng Lichen^{1,2}, Liang Qi^{1,2}

1. Changzhi Lingyan Machinery Factory, Changzhi, Shanxi 046011

2. Shanxi Province New Energy Aviation Intelligent Support Equipment Technology Innovation Center, Changzhi, Shanxi 046011

Abstract： This paper conducts research on the system integration and optimization of mechanical manufacturing processes for efficient production. Firstly, the basic knowledge of hot extrusion forging technology was introduced, including its principle, technological process and application fields, and the key factors affecting the quality of hot extrusion forging were deeply discussed. For the optimization of the hot extrusion forging process, optimization methods are proposed from three aspects: process parameters, die design and quality control in the production process. In terms of exploring efficient production paths, automated and intelligent production technologies, lean production and green manufacturing models were studied. The focus was on analyzing energy-saving and environmentally friendly production models, and strategies for comprehensively improving production efficiency were proposed. The research results provide theoretical support and practical guidance for the integration and optimization of mechanical manufacturing processes, which is of great significance for promoting efficient production. Through case analysis, the application effect of system integration and optimization in practice is demonstrated. Research shows that through effective system integration and optimization strategies, the production efficiency of mechanical manufacturing process systems can be significantly enhanced, costs can be reduced, and product quality can be improved.

Keywords： mechanical manufacturing; hot extrusion forging; process optimization

一、机械制造工艺系统概述

机械制造工艺系统是现代制造业的核心，它由多个相互关联的子系统组成，共同完成从原材料到成品的转化过程。一个完整的机械制造工艺系统通常包括加工设备、物料输送系统、质量控制体系、信息管理系统和能源供应系统等核心组成部分。这些子系统协同工作，确保生产过程的连续性、稳定性和高效性。在机械制造工艺系统中，加工设备是最基本的组成部分，包括各种机床、成型设备和装配设备等。物料输送系统负责原材料、半成品

和成品在生产过程中的运输和存储。质量控制体系通过检测、监控和反馈机制，确保产品符合预定的质量标准。信息管理系统则负责收集、处理和传递生产过程中的各种数据，为决策提供支持。能源供应系统为整个生产过程提供必要的动力和能源支持。

二、研究背景

在全球制造业快速发展的背景下，机械制造工艺系统的集成与优化成为提升生产效率、降低成本、提高产品质量的关键。其

中热挤压锻造作为一种高效、近净成形的先进制造技术，通过高温高压加工实现复杂零件的高精度制造，显著提高材料利用率和生产效率。其工艺复杂性也带来了诸多挑战，如工艺参数的精确控制、模具设计优化及质量稳定性等。深入研究热挤压锻造的基础理论和工艺优化方法，结合自动化与智能化生产技术，融入精益生产与绿色制造理念，构建面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化框架，对于推动机械制造行业的技术升级和可持续发展具有重要意义。

（1）热挤压锻造的工艺特点与优势

高效性，热挤压锻造能够在一次成形中完成复杂零件的制造，减少后续加工步骤，显著提高生产效率。近净成形，通过精确的模具设计和工艺控制，能够实现零件的高精度制造，减少材料浪费。材料利用率高，由于近净成形的特点，材料利用率显著提高，降低了生产成本。适用于复杂零件，热挤压锻造能够制造形状复杂、尺寸精度要求高的零件，广泛应用于航空、航天、汽车、能源等领域。

（2）热挤压锻造面临的挑战

工艺参数控制，热挤压锻造涉及高温、高压的复杂工艺过程，工艺参数的精确控制对产品质量至关重要。模具设计与优化，模具的设计直接影响零件的成形质量和模具寿命，如何优化模具设计以延长其使用寿命并提高产品质量是一个重要挑战。质量稳定性，由于工艺的复杂性，如何保证批量生产中的质量稳定性是一个关键问题。能耗与环保，高温高压工艺对能源消耗较大，如何在保证生产效率的同时降低能耗、减少环境污染是当前制造业面临的重要课题。

（3）工艺系统集成与优化的关键技术

工艺参数优化，通过数值模拟和实验相结合的方法，优化热挤压锻造的工艺参数，如温度、压力、速度等，以提高产品质量和生产效率。模具设计与寿命预测，利用先进的 CAD/CAE 技术进行模具设计，结合材料科学和疲劳寿命预测技术，延长模具使用寿命。自动化与智能化生产，引入自动化生产线和智能化控制系统，实现工艺参数的实时监控与调整，提高生产过程的稳定性和一致性。精益生产与绿色制造，通过精益生产理念减少生产过程中的浪费，结合绿色制造技术降低能耗和排放，实现可持续发展。

（4）构建集成与优化框架

基础理论研究，深入研究热挤压锻造的材料变形机理、热力学行为等基础理论，为工艺优化提供理论支持。多学科交叉融合，结合材料科学、机械工程、控制科学等多学科知识，形成系统的工艺优化方法。数字化与智能化平台，构建基于大数据和人工智能的工艺优化平台，实现工艺参数的智能优化与生产过程的实时监控。全生命周期管理，从产品设计、工艺规划、生产制造到售后服务，实现全生命周期的集成与优化，提升整体生产效率和质量。

（5）推动行业技术升级与可持续发展

技术升级，通过热挤压锻造工艺的优化与创新，推动机械制造行业的技术升级，提升行业竞争力。可持续发展，结合绿色制

造理念，减少生产过程中的能源消耗和环境污染，推动制造业向绿色、低碳方向发展。人才培养与创新，加强人才培养，推动产学研合作，促进技术创新与成果转化，为行业可持续发展提供人才和技术支持。

三、热挤压锻造技术基础

（一）热挤压锻造的典型工艺流程

热挤压锻造是一种复杂金属加工工艺，其流程从坯料准备到成品加工，每个环节都对产品质量至关重要。坯料准备阶段需选择合适材料并加工成符合要求的尺寸和形状，同时清理表面杂质，防止引入缺陷。加热环节中，精确控制温度是关键，合适的温度可降低金属变形抗力，但过高或过低的温度会导致晶粒异常长大或成形困难。挤压成形阶段，润滑剂（如玻璃粉、石墨）可减少摩擦，提高零件表面质量和模具寿命。金属在三向压应力下从模具孔口挤出，需精确控制挤压速度和压力，以确保流动均匀性。成形后，零件需进行冷却和后处理，如热处理、切边、校正等，以提高性能和尺寸精度。整个工艺是系统工程，需综合考虑材料、温度、润滑、模具设计及挤压参数等，才能实现高质量、高效率生产。

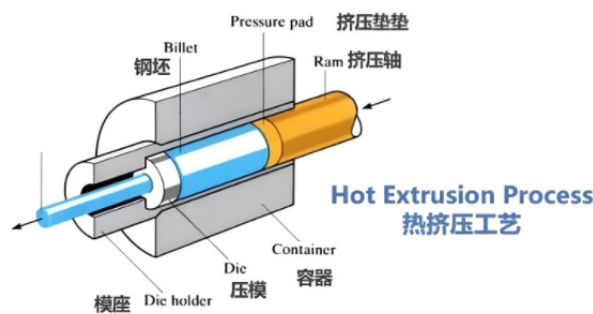


图1：热挤压工艺

（二）影响热挤压锻造质量的因素

热挤压锻造是一种高精度金属加工工艺，其质量受多因素综合影响。其中，温度控制是核心，合适的温度可降低金属变形抗力，提高流动性和塑性，但温度偏差会导致晶粒异常长大或成形阻力增加。模具设计和材料选择至关重要，模具需具备高强度、耐磨性和热稳定性，冷却系统设计可防止模具变形或损坏。润滑条件也不可忽视，润滑剂可减少摩擦，防止粘附，优化金属流动性和表面质量。挤压速度和压力需根据零件形状和材料特性精确调整，坯料的质量和尺寸精度也直接影响成形效果。这些因素相互关联，需全面优化和控制，以确保热挤压锻造工艺的高效性和稳定性。

（三）热挤压锻造的应用领域

热挤压锻造技术因其高效性、高精度和高材料利用率，在现代工业中广泛应用。在航空航天领域，它用于制造发动机叶片、机翼框架和起落架等高强度、轻量化结构件，满足极端工况下的高性能要求。在汽车制造中，曲轴、连杆、齿轮等关键部件通过该工艺制造，提高强度和耐磨性，同时助力轻量化和降低成本。

机械制造领域，机床主轴、传动轴等通过热挤压锻造实现高精度成形，提升零件性能和可靠性。该技术在国防工业中用于制造坦克、火炮等关键部件，保障高精度和高强度。它还广泛应用于船舶、轨道交通、电子设备等领域，随着技术进步，其在材料选择、工艺优化和自动化生产方面的创新，使其应用范围不断扩大，成为推动工业发展的重要手段。



图2: 汽车热挤压锻造液压机

四、热挤压锻造工艺优化方法

(一) 工艺参数优化

热挤压锻造工艺参数的优化是提高零件成形质量、降低能耗和提升生产效率的关键环节。通过数值模拟、正交试验等方法，可以系统地分析各工艺参数对成形质量的影响规律，并确定最优参数组合。

(1) 工艺参数对成形质量的影响

在热挤压锻造过程中，主要工艺参数包括锻坯初始温度、锻造速度、压扁量、摩擦系数等。这些参数对成形质量的影响规律如下：

锻坯初始温度，初始温度对成形质量的影响最为显著。较高的初始温度能够降低金属的变形抗力，减少成形载荷，同时提高金属的流动性和填充性能。例如，在 TC4 钛合金连杆的热锻过程中，初始温度从 950℃ 优化至 975℃，单位体积能耗降低了 31.15%，成形载荷减少了 20.18%。

锻造速度，锻造速度影响金属的流动均匀性和成形载荷。较低的锻造速度有助于提高金属填充的均匀性，但过低的速度会增加能耗和生产周期。优化后的锻造速度通常在 500~550 mm/s 之间。

压扁量，压扁量的大小直接影响成形载荷和零件的最终尺寸精度。适当的压扁量能够确保金属在模具中均匀流动，减少缺陷。

摩擦系数，摩擦系数对能耗、成形载荷和变形均匀性的影响较大。较低的摩擦系数有助于减少金属与模具之间的摩擦，降低能耗和成形载荷。

(2) 工艺参数优化方法

基于正交试验和数值模拟的优化方法是当前研究的热点。例如，通过正交试验分析 TC4 钛合金连杆的热锻工艺参数，确定了最优参数组合：锻坯初始温度 975℃、摩擦系数 0.2、压扁量 20 mm、锻造速度 550 mm/s。优化后，单位体积能耗从 658.37 J/mm³ 降至 417.16 J/mm³，成形载荷从 6560.36 kN 降至 5236.42 kN，等效应力从 226 MPa 降至 220 MPa。

以下是优化前后的工艺参数对比及成形质量指标：

项目	优化前	优化后
单位体积能耗 (J/mm ³)	658.37	417.16
成形载荷 (kN)	6560.36	5236.42
等效应力 (MPa)	226	220
变形均匀性	0.656	0.587

优化后的工艺参数显著降低了能耗和成形载荷，同时提高了零件的成形质量和变形均匀性。

通过系统的工艺参数优化，可以显著提升热挤压锻造的成形质量、降低能耗并提高生产效率。优化后的工艺参数不仅提高了零件的力学性能，还减少了成形缺陷，为绿色制造提供了技术支持。

(二) 模具设计与优化

模具设计与优化在热挤压锻造工艺中起着至关重要的作用，直接影响零件的成形质量、生产效率和模具寿命。通过对模具结构、材料、冷却系统等方面的优化，可以显著提升工艺的整体性能。在热挤压锻造中，模具设计需要综合考虑多个关键参数，以确保金属流动均匀、成形质量高、模具寿命长。以下是优化前后模具设计的关键参数对比

参数名称	优化前	优化后	改进效果
模具材料	普通耐热钢	高强度耐热钢 (如 H13)	模具寿命延长 20% 以上
预热温度	250℃	300℃	模具热应力降低 15%，零件表面质量提升
冷却通道设计	直线型冷却通道	螺旋型冷却通道	冷却效率提升 20%，模具温度分布更均匀
摩擦系数	0.3	0.2	成形载荷降低 10%，零件表面质量改善
模具型腔表面粗糙度	Ra 0.8 μm	Ra 0.4 μm	零件表面质量提升，减少粘模现象

在热挤压锻造工艺中，模具设计优化至关重要。选用高强度耐热钢（如 H13）作为模具材料，显著提升了模具抗热疲劳性和耐磨性，延长寿命 20% 以上。将模具预热温度从 250℃ 提高到 300℃，有效降低温差，减少热应力和变形，提升零件表面质量。冷却系统优化，将直线型冷却通道改为螺旋型，冷却效率提升 20%，温度分布更均匀，减少局部过热导致的缺陷。表面处理工艺优化，摩擦系数从 0.3 降至 0.2，成形载荷降低 10%，减少粘附现象，提高表面质量。型腔表面粗糙度从 Ra 0.8 μm 降至 Ra 0.4 μm，进一步改善表面质量，减少粘模，延长模具寿命。这些措施综合提升了模具性能和零件成形质量，为高效生产提供有力支持。

(三) 生产过程中的质量控制

在热挤压锻造生产中，质量控制是确保零件性能和尺寸精度的关键。通过实时监控加热温度（如铝合金 650℃~750℃）、挤压速度（0.1 mm/s~2.0 mm/s）和模具温度（200℃~300℃），可优化工艺参数，避免零件缺陷和能耗增加。采用无损检测技术（如超声波、X 射线）监测零件内部质量，及时发现缩孔、裂纹等缺陷；同时，利用三坐标测量仪严格把控尺寸精度（如 ±0.1

mm)。此外，建立完善的质量追溯体系，记录并分析每一批次零件，以便及时纠正质量问题。这些措施有效提高了零件合格率，降低了生产成本，保障了热挤压锻造的高效生产。

五、高效生产路径探索

（一）自动化与智能化生产技术

自动化与智能化生产技术是现代制造业实现高效生产的关键手段。通过引入自动化设备，如工业机器人、自动化生产线和智能控制系统，能够显著提高生产效率和产品质量。例如，智能调度系统可基于实时数据优化生产计划，减少等待时间和设备闲置。同时，利用物联网和大数据技术，实现设备的远程监控与预测性维护，降低故障停机时间。此外，智能化生产还支持柔性制造，能够快速切换生产模式，满足多样化的产品需求。这些技术的应用不仅提高了生产效率，还增强了企业的市场竞争力。

（二）精益生产与绿色制造

精益生产通过优化生产流程、减少浪费和提高资源利用率，实现高效生产。例如，通过价值流分析和持续改进，企业可以识别并消除生产过程中的瓶颈和浪费环节。绿色制造则强调在生产过程中减少能源消耗和环境污染，实现可持续发展。例如，通过优化生产布局和引入节能设备，企业可以在降低能耗的同时提高生产效率。此外，精益生产与智能化技术的结合，能够进一步提升生产效率和质量控制水平。

（三）能源节约与环境友好型生产模式

能源节约和环境友好型生产模式是绿色制造的核心内容。通过精细化的能源管理和智能监控系统，企业可以识别并优化能源

消耗的关键工序。例如，智能能源管理系统能够实时监控设备的能耗情况，实现节能减排。此外，企业还可以通过优化生产工艺和采用环保材料，减少废弃物的产生和排放。这种生产模式不仅有助于降低企业的运营成本，还符合社会对可持续发展的要求。

（四）生产效率提升的综合策略

提升生产效率需要综合运用多种策略。首先，优化生产布局和设备配置，减少物料搬运距离和时间。其次，引入自动化和智能化技术，提高生产过程的自动化水平和决策效率。此外，推行精益生产管理，如准时化生产和拉动式生产，能够减少库存和浪费。同时，通过数据分析和持续改进，企业可以不断优化生产流程，提高整体效率。这些综合策略的实施，能够显著提升企业的生产效率和市场竞争力。

六、结语

本研究探讨了面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化策略，通过有效的系统集成和优化，可以显著提高机械制造工艺系统的整体效能。系统集成实现了信息流、物流和控制流的无缝连接，而基于精益生产、智能制造和绿色制造的优化策略则进一步提升了系统的效率、质量和可持续性。热挤压锻造作为一种先进的制造技术，具有高效、近净成形的显著优势，但其工艺复杂性也带来了诸多挑战。通过深入研究其基础理论，结合自动化、智能化生产技术，融入精益生产与绿色制造理念，构建面向高效生产的机械制造工艺系统集成与优化框架，不仅能够提升生产效率和产品质量，还能推动机械制造行业的技术升级和可持续发展。

参考文献

- [1] 陈学文，王立平. 基于精益生产的机械制造工艺优化研究 [J]. 机械工程学报，2021(3).
- [2] 刘海峰，赵明辉. 工业4.0背景下的机械制造系统集成策略 [J]. 制造技术与机床，2022(5).