

# Rapid prototyping technology of stamping dies and its application in custom production discussed

Tong Liu<sup>1</sup> Zhengang Zhang<sup>2</sup> Dewang Sun<sup>2</sup>

1. Hangzhou Donghua Chain Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311102, China

2. Hangzhou Ziqiang Chain Drive Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311102, China

## Abstract

Rapid manufacturing technology of stamping dies realizes complex structure, high precision and lightweight manufacturing through additive manufacturing process, significantly improving the efficiency of development in the fields of automobiles, medical and aerospace. This paper optimizes the process parameters of SLM, WAAM and other processes, proposes a multiparameter synergistic model and lattice topology design, making the size tolerance of the molded parts reach  $\pm 0.05$  mm, the surface roughness Ra reduced to  $1.6 \mu\text{m}$ , and the benefits of weight reduction by 37% are verified through the case of hot stamping dies. Digital modeling a parametric design library and multi-physical field simulation, shortening the development cycle by more than 50%. Economic analysis shows that the unit cost is better traditional processes when the production exceeds 5000 pieces, but the initial material cost is high; Environmental assessment shows that the carbon emission of AM process is .3 times that of traditional process, and the weight reduction can offset 35% carbon footprint. The technology promotion is facing challenges such as insufficient process stability, material cost and lack of standards, which need to be broken through by intelligent process optimization and gradient functional material development.

## Keywords

Die stamping; Custom production; manufacturing process

## 冲压模具快速成型技术及其在定制生产中的应用探讨

刘通<sup>1</sup> 张振刚<sup>2</sup> 孙德旺<sup>2</sup>

1. 杭州东华链条集团有限公司, 中国·浙江 杭州 311102

2. 杭州自强链传动有限公司, 中国·浙江 杭州 311102

## 摘要

冲压模具快速成型技术通过增材制造工艺实现复杂结构、高精度与轻量化制造, 显著提升了汽车、医疗及航空航天领域模具开发效率。本文优化SLM、WAAM等工艺参数, 提出多参数协同模型与晶格拓扑设计, 使成形件尺寸公差达 $\pm 0.05\text{mm}$ , 表面粗糙度Ra降至 $1.6\mu\text{m}$ , 并通过热冲压模具案例验证减重37%的效益。数字化建模整合参数化设计库与多物理场仿真, 缩短开发周期50%以上。经济性分析表明, 量产超5000件时单件成本优于传统工艺, 但初期材料成本较高; 环境评估显示, AM工艺碳排放为传统工艺的1.3倍, 轻量化减重可抵消35%碳足迹。技术推广面临工艺稳定性不足、材料成本高昂及标准缺失等挑战, 需通过智能化工艺优化与梯度功能材料开发突破。

## 关键词

冲压模具; 定制生产; 制造工艺

## 1 引言

新能源汽车、生物医疗及航空航天等高端装备制造业对模具的复杂结构、轻量化与个性化需求日益增长, 传统工艺因效率低、材料利用率差难以满足。增材制造技术凭借分层堆叠、无切削特性, 成为模具快速制造的创新路径。

【作者简介】刘通(1990-), 男, 中国河南鹿邑人, 硕士, 工程师, 从事非标设备及工装模具研发研究。

## 2 冲压模具快速成型体系

### 2.1 增材制造工艺选择

增材制造(AM)技术凭借其分层堆叠、复杂结构成形的优势已成为冲压模具快速制造的重要手段[1], 在工艺选择中需综合考量材料适配性、成形精度与生产效率三方面因素, 以激光选区熔化(SLM)工艺为例其高能量密度热源可实现钛合金等难熔材料的精密成形, 但扫描速度过快易导致孔隙率升高( $> 0.15\%$ )[2]。对此本研究提出多参数协同优化模型: 通过正交实验确定激光功率(120~150W)、扫描速度(500~800mm/s)与层厚(0.1~0.3mm)的最佳组合, 使成形件尺寸公差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内, 表面粗糙度Ra

降至 1.6 $\mu\text{m}$ 。此外，晶格结构拓扑优化被应用于热冲压模具冷却系统设计，通过 ANSYS Workbench 仿真验证，与传统实心结构相比，晶格单元边长为 1.2mm 的六边形阵列可使冷却通道传热效率提升 42%，同时减重 37%[3]。

## 2.2 数字化建模关键技术

数字化建模技术通过参数化设计、CAE 仿真与模块化平台的三维融合显著提升了冲压模具开发效率，在参数化设计阶段基于 SolidWorks API 开发的标准化零件库已集成 200+ 种冲压模具典型构件（如凸模、凹模座），通过 VBScript 脚本实现一键式参数驱动建模，设计周期从传统模式的 2 周缩短至 5 天 [1]。CAE 仿真环节中，结合 AutoForm 与 PAM-STAMP 软件构建多物理场耦合模型，重点模拟钢板在冲压过程中的应力分布与回弹效应。实验表明，通过引入动态显式算法（DYNA），回弹预测误差可控制在 3% 以内 [3]。模块化平台方面，基于 TeamCenter 的数字孪生系统实现了设计、加工与检测数据的实时同步，某企业应用后模具试模次数减少 60%，生产成本降低 28%。

## 2.3 材料科学与后处理技术

针对增材制造模具的残余应力与硬度不均问题本研究采用分级热处理策略：首先在 Ar 气保护下进行 450 $^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$  预处理以消除内部缺陷，随后升温至 1050 $^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$  奥氏体化，最后油冷淬火 +520 $^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$  回火，最终获得硬度 HRC 58-62 的均衡组织 [2]。表面强化方面，激光熔覆 Ni 基碳化钨涂层（厚度 30 $\mu\text{m}$ ）可将模具表面硬度提升至 1200HV，耐磨性较原始材料提高 5 倍 [3]。后处理工艺中，开发了基于机器视觉的支撑结构自动去除系统，通过 OpenCV 算法识别支撑点位置，配合气动铣刀实现非接触式精加工，使表面粗糙度 Ra 从初始的 3.2 $\mu\text{m}$  提升至 0.4 $\mu\text{m}$ ，达到镜面级效果

## 3 定制化生产应用实证研究

### 3.1 汽车行业应用案例

在新能源汽车领域轻量化与高强度已成为车身设计的核心诉求，某车企采用激光选区熔化（SLM）技术制备铝合金热冲压模具，用于生产碳纤维增强复合材料（CFRP）与铝合金的异种材料连接结构。该模具通过拓扑优化设计在保证成形强度的前提下，重量较传统钢制模具减轻 65%。

实际生产中模具在连续 5000 次冲压后仍保持尺寸稳定性，表面裂纹率低于 0.02%，显著优于传统工艺的 1.2%。值得注意的是，快速成型技术使模具开发周期从 14 个月压缩至 4.5 个月，但初期材料成本较高（约为传统工艺的 2.3 倍），需通过规模化生产摊薄成本。这一案例表明，快速成型技术在高附加值、小批量汽车部件制造中具有显著经济性，但其大规模推广仍受限于材料成本与工艺稳定性。

### 3.2 医疗器械领域应用

医疗器械领域对模具的生物相容性、微观结构精度及定制化能力要求极高，以人工关节髌臼杯模具开发为例传统铸造工艺因内部流线不均匀导致成品表面粗糙度波动较大（Ra 3.2-4.8 $\mu\text{m}$ ），而基于电弧增材制造（WAAM）的钛合

金模具通过多道次熔融沉积，实现晶粒细化与致密度提升（孔隙率 < 0.05%）。实际测试显示，采用该模具注塑成型的 PEEK 生物医用材料表面粗糙度稳定在 Ra 0.8 $\mu\text{m}$  以下，细胞粘附率较传统工艺提升 40%，满足 ISO 10993 生物安全性标准。

此外快速成型技术支持患者特异性解剖结构匹配，某三甲医院联合企业开发的脊柱融合器定制模具，通过 CT 数据逆向建模，使植入体与骨骼接触面积增加 25%，术后融合时间缩短 30%。然而，医疗模具对材料洁净度要求严苛，AM 工艺中的粉末污染控制与后处理标准化仍是亟待解决的问题。

## 3.3 航空航天特殊需求

航空航天部件需在极端温度、振动与疲劳载荷环境下保持高性能，某航天科技集团采用电子束熔化（EBM）技术制备钛合金航空紧固件模具，其晶界强化特性使模具在 -250 $^{\circ}\text{C}$  至 300 $^{\circ}\text{C}$  循环工况下的疲劳寿命超过 10 $^6$  次 [1]。相较于传统机加工模具 EBM 成形的模具表面硬度提升至 HRC 62 以上，且在高温氧化环境中质量损失率仅为 0.03%/1000 小时。在火箭发动机燃料喷嘴部件制造中快速成型技术实现了内部三维网状冷却通道的精确成形，使部件冷却效率提升 50%，热应力集中区域减少 70%。值得注意的是，航空航天领域对材料批次一致性要求极高，目前 AM 工艺的批次间尺寸波动（约  $\pm 0.08\text{mm}$ ）仍需通过工艺数据库与在线监测系统进一步优化。

## 4 技术经济性分析

### 4.1 成本构成对比

冲压模具快速成型技术的成本结构与传统工艺存在显著差异，以某汽车企业碳纤维复合材料连接模具项目为例，传统钢制模具总成本约为 280 万元（含材料费占 45%、加工费占 30%、试模费占 25%），而 SLM 增材制造模具成本为 410 万元（材料费占比升至 62%、设备折旧费占 28%、后处理费占 10%）。尽管材料成本高昂但快速成型技术通过减少加工工序（从 23 步精简至 5 步）与试模次数降低 70%，使单件模具综合成本在量产 5000 件后反超传统工艺（传统工艺单件成本 0.8 元，快速成型技术 0.72 元）[2]，值得注意的是晶格结构模具的轻量化设计可进一步降低整车生命周期成本——某新能源汽车企业通过减轻 23kg 模具重量，每年节约燃油消耗 1.2 吨，折算经济效益达 8.6 万元。这表明，快速成型技术的成本优势需结合产量规模与轻量化收益综合评估。

### 4.2 效益评估模型

基于全生命周期理论本文构建多目标效益评估模型，量化分析冲压模具快速成型技术的经济性与灵活性优势，模型以综合效益指数（EII）为核心指标涵盖时间、质量与柔性三大维度数学表达式如下：

综合效益指数：

$$E_{total} = E_{time} + E_{quality} + E_{flexibility}$$

时间效益 (E time) :

$$E_{time} = \frac{C_{cycle}}{Q} \times (1 - \alpha)$$

其中, C (cycle) 为单次生产周期 (小时), Q 为累计产量 (件),  $\alpha$  为工艺稳定性系数 (取值范围 0-1), 该指标反映单位产品的时效性收益  $\alpha$  越小表明工艺波动越小时间效益越高。

质量效益 (E quality) :

$$E_{quality} = \beta \times \frac{R_{rejection}}{R_{total}}$$

$\beta$  为质量权重系数 (通常取 0.6-0.9), R (rejection) 为废品率 (%), R (total)

为总产量 (件)。该公式通过废品率与总产量的比值, 结合权重系数, 量化质量提升带来的效益。

柔性效益 (E flexibility) :

$$E_{flexibility} = \gamma \times \left(1 - \frac{D_{change}}{D_{original}}\right)$$

$\gamma$  为柔性权重系数 (取值范围 0.5-0.8), D (change) 为设计变更成本 (万元), D (original) 为原设计成本 (万元)。该指标衡量技术应对设计迭代的能力, 变更成本越低, 柔性效益越显著。

模型验证与应用案例以某医疗器械企业钛合金髌臼杯模具开发为例, 传统工艺与快速成型技术的效益对比如下:

指标	传统工艺	快速成型	变化率 (%)
单件生产周期	120 h	45 h	-62.5
废品率	5.2%	1.8%	-65.4
设计变更响应时间	28天	9天	-67.9

通过模型计算, 当产量 Q=2000 件时:

传统工艺综合效益指数 E (total)=0.48

快速成型技术 E (total)=0.75 提升 56.3%

柔性效益贡献率达 42% 表明设计变更能力是快速成型的核心优势。

然而, 当产量 Q < 1000 件时, 快速成型技术的材料成本占比过高 (达 68%), 导致综合效益指数反超传统工艺 (E (Total) =0.62 vs. 0.59)。这验证了模型的有效性, 同时揭示了该技术在小批量生产中的局限性。

### 4.3 环境友好性评价

从全生命周期视角分析增材制造的环境影响呈现矛盾性特征, 一方面其材料利用率高达 92%~98% (传统工艺仅 60%~75%), 减少金属废料 70% 以上; 另一方面, 激光/电子束设备的能耗强度 (1.2~1.8kW·h/g) 远高于传统切削机床 (0.15~0.3kW·h/g) [1]。以航空航天领域钛合金紧固件模具为例, AM 工艺的碳排放量为 23.6t CO<sub>2</sub> (含材料生产、设备运行与后处理), 而传统工艺为 18.4t CO<sub>2</sub>, 主要源于 AM 设备的高能耗与粉末回收成本。

值得注意的是轻量化带来的节能减排效应可显著补偿

环境成本——某飞机制造商通过采用 AM 模具减轻结构件重量 15%, 单机飞行周期内减少燃油消耗 2.3 吨, 相当于抵消 35% 的工艺碳排放。

## 5 发展挑战与对策

### 5.1 现存问题

冲压模具快速成型技术的产业化进程面临多重系统性挑战, 技术成熟度、经济性与产业协同三者的失衡制约其大规模应用。

技术层面增材制造工艺的稳定性与多材料成形能力仍存在显著短板。例如激光选区熔化 (SLM) 工艺中粉末流动性差异与热输入不均易导致内部缺陷 (如气孔、残余应力), 影响模具服役性能。

经济性方面材料成本与后处理成本占比过高, 以钛合金模具为例, 其原料成本约为传统钢材的 5-8 倍, 且需额外投入热等静压、表面强化等工序, 进一步推高综合成本。

### 5.2 创新方向建议

针对技术瓶颈与产业化痛点需从材料工艺革新、数据驱动优化两方面突破:

材料与工艺协同创新: 优化雾化制备工艺 (如提高雾化效率、降低氧含量), 提升钛合金粉末球形率与流动性, 减少成形缺陷; 开发梯度功能材料与原位自生复合材料, 通过界面成分调控实现冶金结合, 提升多材料连接强度至传统工艺 90% 以上。

智能化工艺升级: 构建基于深度学习的工艺参数预测模型, 融合激光功率、扫描速度、层厚等变量, 实现缺陷率预测准确率 > 90%; 建立行业级工艺数据库, 整合企业经验数据 (如十万组工艺参数), 为中小企业提供标准化工艺包, 缩短技术爬坡周期 50% 以上。

## 6 结论

本文构建冲压模具快速成型技术体系, 通过工艺创新与数字化赋能证明其在复杂结构制造与轻量化领域的优势, 实验数据表明优化后 SLM 模具寿命达 5000 次冲压, 表面裂纹率低于 0.02%; 医疗用 WAAM 模具孔隙率 < 0.05% 且生物相容性达标, 经济性模型显示量产超 1 万件时综合效益显著提升但材料成本占比过高制约小批量生产, 环境评估揭示 AM 工艺碳排放较高但轻量化减重可降低 35% 飞行周期碳排放, 未来需聚焦梯度功能材料开发、智能化工艺数据库构建及行业标准体系建设推动模具制造向高效、绿色、柔性化转型为高端装备制造业技术升级提供实践参考。

### 参考文献

- [1] 王广春. 快速成型与快速模具制造技术及其应用[M]. 第三版. 北京: 机械工业出版社, 2013
- [2] 陈鹏. 基于数字化技术的模具设计与制造研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017
- [3] 朱维革. 汽车覆盖件冲压模具增材制造技术研究[J]. 热加工工艺, 2020.