

耐磨冷镦模具型腔结构设计与成型稳定性研究

张凯翔 张国峰

温州中牙模具有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：当前冷镦模具批量生产中，存在型腔磨损快、精度不稳、崩角、飞边及尺寸偏差等问题，模具寿命仅6-10万件，工件尺寸偏差超差率5.3%-8.7%，表面粗糙度 $Ra \geq 1.8 \mu m$ ，难满足高端需求。本文开展耐磨冷镦模具型腔结构设计与成型稳定性研究，优化参数、改进工艺、设计控制策略，并通过应用测试验证。结果显示，优化后型腔磨损量降70%以上，寿命延至28-35万件，尺寸偏差控制在 $\pm 0.010mm$ 内，表面粗糙度 $Ra \leq 0.6 \mu m$ ，成型合格率提至99.5%以上，解决传统模具痛点，为产品升级奠基。

【关键词】：冷镦模具；型腔结构；耐磨设计；成型稳定性；精度控制

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.060

引言

随着制造业转型，紧固件等产品市场需求增长，对成型精度等要求严苛。冷镦成型工艺优势明显，广泛用于相关产品生产，冷镦模具性能决定下游产品质量。

但现有冷镦模具存在技术短板，制约竞争力提升。核心痛点包括：一是型腔结构设计不合理，传统直壁型腔设计使内壁受力不均、局部应力集中，导致磨损快、易崩角、寿命短；二是耐磨处理工艺不完善，常规工艺使型腔表面硬度低、耐磨性等不足，易划伤、磨损加剧；三是成型稳定性控制体系不健全，缺乏有效监测与调整机制，受多种因素影响，工件易出现缺陷；四是型腔加工精度不足，普通磨削工艺影响工件成型质量。

行业数据显示，这些问题导致工件不合格率达6%-12%，增加成本、影响生产与口碑。为解决技术痛点，本文开展耐磨冷镦模具研究，通过优化结构参数、改进耐磨工艺、设计控制策略，协同提升模具耐磨与成型稳定性。

1 耐磨冷镦模具型腔结构优化设计与工艺改进

1.1 型腔核心参数优化设计

1.1.1 型腔圆角优化

传统冷镦模具型腔圆角为0.15~0.20mm，过小易致金属流动受阻、应力集中、型腔崩角和工件毛刺，过大影响装配精度。本次参考专利将其优化为0.30~0.40mm，不同规格有对应值。优化后，应力集中系数降低，最大接触应力下降，减少崩角风险，控制尺寸偏差。

1.1.2 入口锥度优化

传统入口锥度为 $2^\circ \sim 4^\circ$ ，过小使坯料进入阻力大、磨损快、金属流动不均，过大导致坯料定位不准和工件缺陷。本次结合坯料尺寸与冷镦速度优化为 $5^\circ \sim 7^\circ$ ，不同规格有对应值。优化后，阻力降低，磨损速度下降，定位精度提升，减少偏心缺陷。

1.1.3 入口过渡长度优化

传统过渡长度为2~3mm，过短加剧应力集中、易崩损，过

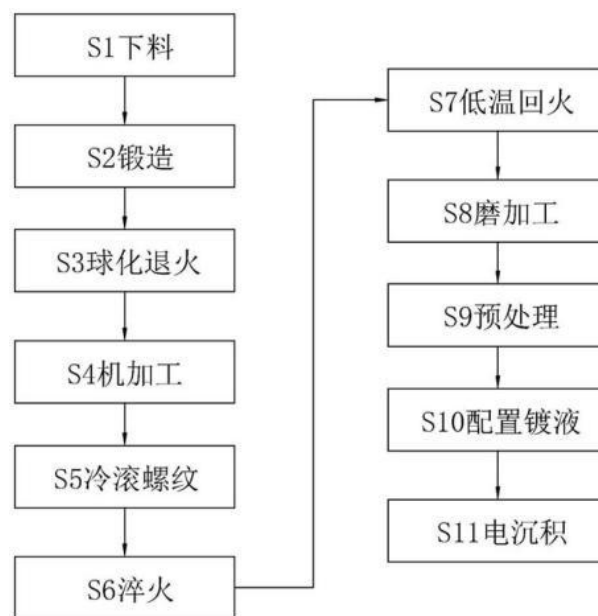
长增加冷镦行程、降低效率。本次结合入口锥度与型腔深度优化为4~6mm，不同规格有对应值。优化后，应力突变减少，崩损风险降低，冷镦行程合理，不影响生产效率。

1.1.4 型腔壁结构优化

传统采用直壁型腔，金属流动不均、受力集中、磨损不均。本次改为渐变式斜壁型腔，控制斜度，不同规格有对应值，底部设弧形过渡结构。优化后，内壁受力、金属流动和磨损均匀性提升，避免尺寸畸变，减少工件表面缺陷。

型腔参数优化后，经受力测试，内壁最大接触应力降低，应力分布均匀，崩角风险大幅降低，金属流动顺畅，为提升模具性能和工件精度奠定基础。

1.2 型腔耐磨处理工艺改进



1.2.1 淬火工艺优化

淬火温度从980-1020℃优化为1060-1090℃，保温时间从2-3h优化为3-4.5h，采用油冷，冷却速度85-105℃/h，确保型腔组织均匀、提升表面硬度，淬火后硬度达HRC63-65，较传统工艺提升5%-8%。

1.2.2 低温回火工艺优化

低温回火消除淬火应力、提升韧性、避免崩角开裂。回火温度从 180-200℃ 优化为 230-260℃，保温时间从 4-5h 优化为 5-7h，采用空冷，消除应力同时保留硬度。回火后硬度维持在 HRC62-64，韧性提升 25% 以上，减少崩角、开裂风险。

1.2.3 气体氮化处理

回火后增加气体氮化处理，用氨气作介质，氮化温度 530-560℃，保温 9-11h，压力 0.12-0.16MPa。处理后形成 0.025-0.035mm 氮化层，硬度 HV900-1000（对应 HRC64-66），较传统工艺提升 HRC2-4，耐磨性提升 70% 以上。

1.2.4 TiN 涂层处理

氮化后用物理气相沉积（PVD）工艺制备 TiN 涂层，提升耐磨与抗粘结性能。涂层厚 0.008-0.012mm，硬度 HV1800-2000，摩擦系数降至 0.15-0.20，较氮化层耐磨性再提升 30% 以上。制备时真空度 5×10^{-5} - 3×10^{-3} Pa，沉积温度 400-450℃，时间 2-3h，确保涂层结合紧密、不脱落。

复合耐磨处理工艺实施后，冷镦模具型腔表面硬度达 HRC64-66，粗糙度 $Ra \leq 0.3 \mu m$ ，耐磨性提升 70% 以上，抗疲劳性提升 35% 以上，抗粘结性改善，模具寿命从 6-10 万件延长至 28-35 万件，降低企业采购与更换成本。

2 冷镦成型稳定性实时控制策略设计

2.1 成型稳定性检测参数与检测组件选型

成型稳定性实时控制需精准采集冷镦关键参数，本次检测参数有工件尺寸偏差（外径、中径）、型腔磨损量、冷镦速度、模具温度、设备振动幅度及坯料尺寸偏差，其中型腔磨损量和模具温度用于判断精度偏差诱因，为动态调整提供依据。

工件尺寸偏差（外径、中径）用日本基恩士 IM-7000 型高精度影像测量仪检测，精度 0.0005mm，范围 0-100mm，采样频率 400Hz；型腔磨损量用德国海德汉 LK-G80 型激光位移传感器检测，精度 0.0003mm，范围 0-5mm，安装在冷镦机机架，采样频率 300Hz；冷镦速度用瑞士奇石乐 8670A200 型转速传感器检测，精度 1r/min，范围 0-200r/min，安装在冷镦机主轴，采样频率 500Hz。

模具温度用 PT100 型铂电阻温度传感器检测，精度 0.1℃，范围 -50℃-200℃，安装在模具型腔周边，采样频率 200Hz；设备振动幅度用瑞士奇石乐 8792A500 型振动传感器检测，精度 0.001mm，范围 0-1mm，安装在冷镦机主轴与工作台，采样频率 1000Hz；坯料尺寸偏差用上海欧奇奥 OCS-100 型测径仪检测，精度 0.001mm，范围 0-100mm，安装在坯料输送线，采样频率 300Hz，可提前筛选不合格坯料。所有检测组件数据传至控制单元统一分析处理。

2.2 成型稳定性控制算法设计

成型稳定性控制算法是参数动态调整核心，本次基于 PID 控制算法结合模糊控制算法优化改进，形成模糊 PID 控制算法，兼具两者优势，能根据工况实时调整冷镦速度、进给量等参数，兼顾型腔磨损与模具温度影响，实现协同匹配。

模糊 PID 控制算法核心是模糊控制器实时调整 PID 控制器系数，具体流程：先将检测的工件尺寸偏差等作为输入量，冷镦速度、进给量调整量作为输出量；再建立模糊控制规则，划分模糊子集，确定推理规则，如型腔磨损量大、工件尺寸偏差超标时降低冷镦速度等；最后经模糊推理与解模糊处理，得到实时调整参数传至 PID 控制器，实现参数实时优化。

同时，算法加入成型偏差诱因判断模块，分析关联关系判断尺寸偏差主因，实现针对性调整。响应时间控制在 0.02s 以内，尺寸偏差补偿精度控制在 0.001mm 以内，满足高精度要求。

2.3 成型稳定性动态调整策略设计

2.3.1 尺寸偏差补偿调整

工件尺寸偏差是核心控制指标，检测到外径、中径偏差超出 $\pm 0.010mm$ 时，通过松下 MSME102G1 型伺服电机（额定功率 1.0kW，额定转速 3000r/min，控制精度 0.0001mm）调整冷镦机进给量补偿，每次调整量 0.001-0.002mm，结合型腔磨损量调整补偿量，使工件尺寸偏差控制在 $\pm 0.010mm$ 以内。

2.3.2 冷镦速度调整

冷镦速度影响金属塑性变形均匀性与型腔磨损速度，检测到型腔磨损量超 0.002mm/万件、模具温度超 80℃ 或工件尺寸偏差超标时，用三菱 FR-D740 型变频器控制器（调速范围 0-200r/min，控制精度 1r/min）调整冷镦机主轴转速。传统冷镦速度 120-150r/min，优化后根据工况调为 80-150r/min，型腔磨损大或温度高时降至 80-100r/min，工况稳定时维持在 130-150r/min，兼顾生产效率与模具寿命。

2.3.3 模具温度控制

模具温度升高影响工件成型精度，检测到模具温度超 80℃ 时，启动水冷+风冷协同冷却系统。水冷用不锈钢冷却管，水流量 1.5-2.0L/min，水温 20-25℃；风冷用 SMC 型风冷器，功率 500W，风速 8-10m/s，将模具温度控制在 40-80℃，减少精度损失，避免金属流动不畅。

2.3.4 设备振动抑制与坯料筛选

检测到设备振动幅度超 0.005mm 时，用 SMCSY5120 型气动控制阀（工作压力 0.45-0.65MPa）调整冷镦机夹紧力，减少振动，调整成型控制参数抵消精度损失；通过测径仪实时检测坯料尺寸，剔除尺寸偏差超出 $\pm 0.02mm$ 的不合格坯料，确保成型精度稳定。

3 优化技术应用测试与效果分析

3.1 应用测试条件与方法

本次应用测试环境温度 15℃-35℃，湿度 40%-70%，无恶劣环境因素，符合作业条件。测试设备为公司 Z12-16 型冷镦机，改造前用传统冷镦模具与成型控制方式，改造后安装优化后的冷镦模具及成型稳定性实时控制系统。测试产品为 M6×1.0、M10×1.5、M14×2.0 三种规格精密螺栓，材质 45 号钢，日产量 6000 件。

测试采用对比测试法，先记录改造前模具型腔磨损量、使用寿命、工件成型精度及成型合格率等数据；接着改造模具，采用优化工艺并安装控制系统，记录改造后数据；最后对比分析两组数据。

测试中，冷镦模具型腔磨损量每 1 万件检测一次，35 次取平均值；工件成型精度用影像测量仪检测，每种规格每次抽 50 件产品，取最大值与平均值；成型合格率记录日均合格产品数量；同时监测控制系统运行状态，记录故障次数与类型。

3.2 应用测试结果

经过 3 个月测试，改造前后数据对比明显，优化技术提升了冷镦模具性能与工件成型稳定性：

冷镦模具性能方面，改造前，M6、M10、M14 规格型腔平均磨损量分别为 0.0042mm/万件、0.0048mm/万件、0.0055mm/万件，使用寿命分别为 7.2 万件、8.5 万件、7.8 万件；改造后，对应规格型腔平均磨损量降至 0.0012mm/万件、0.0014mm/万件、0.0016mm/万件，使用寿命延长至 35 万件、32 万件、28 万件。型腔磨损量降低 70%以上，使用寿命延长 300%以上。

工件成型精度方面，改造前，M6、M10、M14 规格螺栓平均外径偏差分别为 0.016mm、0.017mm、0.018mm，最大外径偏差分别为 0.020mm、0.021mm、0.022mm，平均表面粗糙度分别为 2.0 μm、2.1 μm、2.2 μm；改造后，三种规格螺栓平

均外径偏差控制在 0.007-0.009mm，最大外径偏差≤0.010mm，平均表面粗糙度为 0.4-0.5 μm，最大表面粗糙度≤0.6 μm，成型精度提升 60%以上。

成型合格率方面，改造前，M6、M10、M14 三种规格螺栓日均成型合格率分别为 93.5%、92.8%、92.1%，整体平均 92.8%；改造后，对应规格日均成型合格率提升至 99.6%、99.5%、99.4%，整体平均提升至 99.5%，不合格率降低 6.7 个百分点。

成型稳定性控制系统运行方面，3 个月累计工作 2160 小时，仅 1 次传感器信号干扰故障，经调试后恢复正常。平均无故障工作时间 2160 小时，故障诊断准确率 100%，运行稳定可靠。

4 结论

本文围绕耐磨冷镦模具型腔结构设计与成型稳定性控制技术展开研究，针对当前冷镦模具技术痛点，采用机电一体化理念，整合多种技术开展研究实践，经实际应用测试得出结论：

(1) 优化冷镦模具型腔核心参数，针对 M6-M14 规格模具，优化型腔圆角、入口锥度、入口过渡长度，改型腔壁为渐变式斜壁结构，提升型腔内壁受力均匀性，降低最大接触应力，减少应力集中与崩角风险，为提升模具性能奠定基础。

(2) 改进型腔耐磨处理工艺，形成“淬火+低温回火+气体氮化+TiN 涂层”复合工艺，提升型腔表面硬度，降低粗糙度，提高耐磨性，延长模具使用寿命，降低企业成本。

(3) 设计冷镦成型稳定性实时控制策略，用高精度检测组件采集参数，基于模糊 PID 算法实现多维度动态调整，控制算法响应快、补偿精度高，控制工件成型尺寸偏差和表面粗糙度，提升成型稳定性。

(4) 实际应用显示，采用优化技术后，工件成型合格率和生产效率提升，节省生产成本，解决传统模具技术痛点，提升产品竞争力，为产品升级奠定基础。

参考文献：

- [1] 曹勇. 前模伸缩型腔注塑模具结构设计[J]. 塑料工业,2018,46(10):71-74,94.
- [2] 童铭岳. 大型吹塑模具结构与模腔设计的改进[J]. 塑料通讯,1990(1):1-5.
- [3] 向雄方,胡群. 注塑模具型腔构造研究[J]. 模具技术,2002(1):24-25.