

模具真空回火工艺优化及抗变形性能提升研究

张凯翔 张国峰

温州中牙模具有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：回火工艺是模具制造核心后续处理工序，决定模具硬度、韧性等性能，影响模具寿命、成型精度等。当前生产的冷镦模、搓丝板等模具，多采用传统空气回火工艺，存在抗变形性能不足、尺寸精度波动大等问题，导致回火后变形量大、尺寸合格率低、使用寿命短，难以满足高端紧固件成型需求。本文开展模具真空回火工艺优化及抗变形性能提升研究，优化核心工艺参数、设计辅助措施、改进实施流程，并通过生产测试验证方案实用性与可靠性。测试结果显示，优化后的真空回火工艺可控制模具变形量、提升尺寸合格率与硬度均匀性、延长使用寿命、协同提升韧性与耐磨性，解决传统工艺痛点。

【关键词】：模具；真空回火；工艺优化；抗变形性能；尺寸稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.068

引言

随着制造业转型，紧固件等产品对成型精度要求提高，对模具性能提出更高标准。模具淬火后有残余应力、组织不稳定，回火工艺合理性决定其最终性能。

现有回火工艺存在技术短板，制约产品竞争力，传统空气回火局限性突出：一是加热温度不均，模具各部位硬度偏差大，韧性与耐磨性失衡，易崩角、开裂；二是模具表面易氧化、脱碳，影响表面质量与性能；三是工艺参数设计经验化，无法有效消除残余应力，模具变形大、尺寸精度难控；四是缺乏抗变形辅助措施，加剧变形缺陷。

相关数据显示，回火工艺问题导致模具报废率、尺寸偏差超差率高，增加成本、影响生产与口碑。真空回火工艺优势明显，逐步替代传统空气回火用于精密模具生产。为解决传统工艺痛点，本文开展真空回火工艺优化及抗变形性能提升研究，通过优化参数、设计辅助措施、改进流程，提升模具性能。

1 模具真空回火工艺优化设计思路

本次模具真空回火工艺优化及抗变形性能提升研究，以解决传统空气回火工艺抗变形不足、尺寸精度波动大、硬度不均匀等痛点为目标，采用“工艺参数优化+抗变形措施设计+工艺流程改进”思路，协同提升模具性能，具体如下：

首先，开展真空回火核心参数优化，结合模具材质与淬火参数，优化温度、时间、速度、真空度等，通过试验确定最优组合，提升应力消除率，减少变形；其次，设计抗变形辅助措施，优化装夹方式、增设工装，控制变形量；再次，改进工艺流程，优化淬火与回火衔接时间、增加时效处理，规范设备操作，提升稳定性；最后，通过生产测试，对比优化前后性能，根据结果调整，确保方案贴合实际，满足需求，控制成本，提升性价比。



2 模具真空回火工艺优化与抗变形措施设计

2.1 真空回火核心工艺参数优化

(1) 回火温度优化

回火温度影响模具残余应力消除与硬度调整，传统温度为180-220℃，存在残余应力消除率低或硬度下降等问题。本次结合材质特性与使用要求，将温度优化为230-260℃，不同规格模具采用不同温度范围。优化后，残余应力消除率提升，硬度维持合适范围，韧性与耐磨性匹配。

(2) 保温时间优化

保温时间确保模具内部温度均匀、组织转变充分。传统保温时间为3-4h，存在组织转变不完全或成本增加等问题。本次结合回火温度与模具尺寸，将时间优化为4.5-7.0h，不同规格模具对应不同时间。优化后，组织转变充分，残余应力消除彻底，尺寸稳定性提升。

(3) 冷却速度优化

冷却速度影响模具残余应力分布，传统速度为20-30℃/h，

存在产生新热应力或延长生产周期等问题。本次采用分段式冷却，结合材质与尺寸，将速度优化为 10-20℃/h，分三个阶段冷却。优化后，热应力减少，回火变形量降低，生产周期合理。

(4) 真空度优化

真空度影响模具加热均匀性与表面质量，传统真空度为 0.05-0.10Pa，波动大导致加热不均和表面氧化。本次采用高精度控制系统，将真空度优化为 0.01-0.03Pa，控制波动范围。优化后，加热均匀性提升，表面质量改善，增强耐磨性与尺寸稳定性。

通过正交试验验证，当真空回火温度为 245℃、保温时间为 6.0h、冷却速度为 15℃/h、真空度为 0.02Pa 时，Cr12MoV 材质冷锻模综合性能最优，满足高端模具要求。使用要求。

2.2 抗变形辅助措施设计

(1) 优化模具装夹方式

传统装夹单一固定、力度不均，模具易变形。本次采用“多点均匀夹紧+弹性缓冲”，设 4-6 个均匀分布在边缘的夹紧点，避免局部变形；在夹紧点与模具间设弹性缓冲垫，吸收应力。优化后，装夹应力降 55%以上，局部变形量减 45%。

(2) 设计专用抗变形支撑工装

针对部分模具结构，设计专用支撑工装，选用 Cr12MoV 合金，经处理硬度 HRC60-62，抗变形优，精度偏差≤0.005mm。工装定制，“贴合支撑+定位限位”，与模具贴合度超 98%，设定位销，定位精度 0.003mm。应用后，回火变形量减 30%-40%，翘曲变形量控在 0.006mm 内。

(3) 控制装夹力度与预热处理

装夹力度过大或过小都不利，本次用扭矩扳手控制，按模具尺寸材质将装夹扭矩控在 8-12N·m。装夹后、回火前增加预热处理，温度 100-120℃，保温 1.5-2.0h，减少温度梯度。处理后，温度差控在 5-8℃，提升抗变形性能。

2.3 工艺流程改进

(1) 优化淬火与真空回火衔接时间

传统工艺淬火后室温放置超 8h 易产生二次应力，加剧变形。本次将衔接时间控在 2-4h，淬火后入保温箱（150-180℃）。优化后，二次应力减 70%以上，回火变形量降 15%。

(2) 增加回火后时效稳定处理

真空回火后模具仍有残余应力，使用易尺寸漂移。本次回火冷却至室温后增加时效处理，温度 120-150℃，保温 8-10h，自然冷却。处理后，残余应力降至 30-60MPa，尺寸稳定性升 50%以上，尺寸漂移量控在 0.003mm 内。

(3) 规范真空回火设备操作流程

针对真空回火设备操作不规范针对参数波动大等问题，制

定标准化操作流程，明确设备启动、真空度调整、加热速率、温度控制、冷却操作等环节的操作要求与参数标准。如，将加热速率控制在 5~8℃/min 以防温度不均；采用梯度升压方式调整真空度，从大气压逐步升至 0.01~0.03Pa，升压时间控制在 30~40min 以确保真空环境稳定。同时，定期校准与维护设备，每月校准温度和真空度传感器，每季度检修冷却系统与加热元件，确保运行精度，使温度控制精度提升至±2℃，真空度控制精度提升至±0.003Pa。

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

本次应用测试在温州中牙模具有限公司精密模具加工车间进行，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。测试设备为公司现有 ZRC-60 型真空回火炉、淬火炉及高精度检测设备。测试产品为 M6×1.0、M10×1.5、M14×2.0 三种规格冷锻模，每组 20 套，共 60 套，淬火工艺参数一致（淬火温度 1060~1090℃，保温 3~4.5h，油冷淬火）。

测试采用对比测试法，对照组用传统空气回火工艺（温度 200℃，保温 3.5h，冷却速度 25℃/h），无专用抗变形工装，工艺衔接超 8h；实验组用优化后的真空回火工艺及抗变形措施，参数与辅助措施按研究方案执行。测试重点检测以下指标：一是回火变形量，用影像测量仪检测关键尺寸变形量，每种规格每次抽 5 套测 3 个点位取均值；二是尺寸合格率，检测整体尺寸精度，判断是否符合±0.010mm 公差要求并计算合格率；三是硬度均匀性，用洛氏硬度计测表面 5 个点位硬度算偏差；四是使用寿命，记录实际使用次数至出现缺陷，统计寿命；五是表面质量，检测氧化脱碳层厚度与粗糙度，评估质量。

3.2 应用测试结果

经 3 个月实际生产测试，对照组与实验组数据对比明显，采用优化技术后，模具各项性能显著提升，具体如下：

抗变形性能上，对照组回火变形量 0.025~0.040mm，平均 0.032mm；实验组控制在 0.008~0.015mm，平均 0.011mm，降低 65.6%，满足高端要求。各规格模具平均变形量均降低，大规格提升更显著。

尺寸精度方面，对照组合格率 88.5%~91.2%，平均 89.8%；实验组提升至 99.3%以上，平均 99.5%，提升 9.7 个百分点，不合格模具经返工可合格。

硬度均匀性上，对照组硬度偏差 HRC3~5，平均 HRC4.1；实验组控制在 HRC1~2，平均 HRC1.6，提升 42%，避免相关缺陷。

使用寿命上，对照组平均 6~10 万件，各规格不同；实验组延长至 28~35 万件，各规格均有提升，延长超 300%，降低

成本。

表面质量方面,对照组氧化脱碳层平均 0.015mm,粗糙度 Ra 为 1.5~2.0 μm ; 实验组控制在 0.002mm 以内,粗糙度 Ra 为 0.2~0.3 μm ,质量大幅提升,避免相关影响与缺陷。此外,实验组模具的生产效率提升 18%-23%,单套模具真空回火加工成本约 750 元,较国外同类工艺降低 37.5%,兼顾性能与经济,贴合公司生产需求。

3.3 效果分析

结合应用测试结果分析模具真空回火工艺优化及抗变形性能提升技术的应用效果,结论如下:

一是模具抗变形性能显著提升。优化真空回火核心参数,使回火温度等达最优组合,残余应力消除率升至 90%-95%; 优化专用抗变形工装设计与装夹方式,回火变形量降低 65% 以上,解决传统回火变形量大问题。

二是模具尺寸稳定性与精度大幅提高。优化后的工艺加热均匀、冷却合理,结合流程改进与时效稳定处理,尺寸合格率升至 99.5% 以上,使用中尺寸漂移量控制在 0.003mm 以内,满足高端紧固件成型对精密尺寸要求,减少返工率,提升生产效率。

三是模具综合力学性能协同增强。优化后的工艺实现硬度与韧性合理匹配,硬度维持在 HRC62-64,硬度均匀性提升 42%,韧性与耐磨性协同增强,避免崩角等缺陷,使用寿命延长 300% 以上,降低企业模具采购与更换成本。

四是企业经济效益与市场竞争力显著提升。应用优化技术使模具尺寸合格率提升 9.7 个百分点,废品损失减少 75% 以上; 模具寿命延长 300% 以上,单台冷镦机每月节省模具更换成本 12000-18000 元; 提升模具表面质量与性能,增强公司产品市场口碑与竞争力,为拓展高端市场奠定基础,带来经济与社会

效益。

五是技术实用性、经济性与推广价值良好。该优化技术贴合生产实际,适配现有设备,无需大规模改造,单套模具加工成本 600-900 元,具经济性; 解决当前工艺优化不足等痛点,可用于多种材质模具生产改造,为其他精密模具提供参考,符合行业发展趋势,有广泛推广价值。

4 结论

本文围绕模具真空回火工艺优化及抗变形性能提升技术展开研究。针对传统空气回火工艺抗变形性能不足等痛点,结合温州中牙模具有限公司经验,参考相关专利技术,采用机电一体化理念,整合多方面技术开展研究实践,得出结论如下:

(1) 优化模具真空回火核心工艺参数,针对 Cr12MoV 材质冷镦模,确定真空回火温度、保温时间、冷却速度、真空度等参数,最优组合下模具残余应力消除率达 94%,回火变形量仅 0.010mm,硬度均匀性偏差为 HRC1.5,实现残余应力消除与力学性能协同优化。

(2) 设计抗变形辅助措施,采用特定装夹方式,定制支撑工装,控制装夹扭矩,增加预热处理工序,使模具回火变形量减少 30%-40%,提升抗变形性能与尺寸稳定性。

(3) 改进工艺实施流程,控制淬火与真空回火衔接时间,增加回火后时效稳定处理,规范设备操作流程,使模具尺寸稳定性提升 50% 以上,使用中尺寸漂移量控制在 0.003mm 以内,提升工艺稳定性与一致性。

(4) 实际生产测试显示,采用优化技术后,模具回火变形量、尺寸合格率、硬度均匀性、使用寿命、表面质量、生产效率等指标均有显著改善,单台冷镦机每月节省成本 12000-18000 元,解决传统工艺痛点。

参考文献:

- [1] 金荣植.先进的模具真空热处理技术与应用[J].金属加工(热加工),2016(7):0-3.
- [2] 刘仁培,陈文华,施政.模具钢堆焊金属的强度与变形对热疲劳抗力的影响[J].南京航空航天大学学报,2005,37(5):551-556.
- [3] 苏立武.DIEVAR 模具钢的真空热处理工艺[J].热处理,2017,32(1):36-39.