

镜面模具加工技术研究进展

吕德瑾¹ 赵立^{2*}

1. 国宏工具系统(无锡)股份有限公司, 中国·江苏 无锡 214192

2. 苏州职业技术大学, 中国·江苏 苏州 215100

摘要: 镜面模具加工作为超精密制造的核心环节, 正朝着高精度、智能化、场景化定制和绿色化方向快速发展, 以满足汽车、3C 电子、医疗、光学等高端产业对产品表面质量与生产效率的严苛要求。本文综述镜面模具加工最新研究进展, 结合模具材料、超精密加工技术、镜面抛光技术进行综述, 总结未来镜面模具发展趋势。

关键词: 镜面模具; 超精密制造技术; 镜面抛光技术

Research progress in mirror mold processing technology

Lv Dejin¹, Zhao Li^{2*}

1. Guohong Tool System (Wuxi) Co., Ltd., China Jiangsu Wuxi 214192

2. Suzhou Polytechnic University, China Jiangsu Suzhou 215100

Abstract: Mirror mold processing, as the core link of ultra-precision manufacturing, is rapidly evolving towards high precision, intelligence, scene-specific customization, and greenification to meet the stringent requirements of high-end industries such as automotive, 3C electronics, medical, and optics for product surface quality and production efficiency. This paper reviews the latest research progress in mirror mold processing, integrating mold materials, ultra-precision machining technology, and mirror polishing technology, and summarizes the future development trends of mirror molds.

Keywords: Mirror mold; Ultra-precision manufacturing technology; Mirror polishing technology

0 引言

模具称之为“百业之母”, 是工业生产的基础工艺装备, 在电子、汽车、电机、电器、仪表、家电和通讯等产品中, 60%~80% 的零部件都依靠模具成形, 模具质量的高低决定着产品质量的高低。镜面模具应用主要分为两大类: 一类是追求极致光学性能(对精度要求极高), 另一类是追求完美外观质感(对表面光洁度要求极高), 其应用已渗透到多个高端制造领域^[1]。

1 镜面模具材料

我国塑料模具材料的发展, 一方面要不断提高冶金与模具制造技术, 研制出长寿命、高性能、低成本的新型钢种; 另一方面, 要对国外先进钢种的研究, 进行对这些钢种的国产化, 以代替价格高昂的进口钢材^[2]。针对镜面模具, 特别是模具钢材料, 行业内主要分为“高耐腐蚀镜面钢”和“高抛光预硬镜面钢”两类, 如表 1 所示。

2 镜面加工技术

镜面加工远不止一种设备, 而是一套覆盖从粗加工到终极抛光的超精密加工技术, 并融合精密检测与智能控制的完整系统^[3]。

2.1 超精密加工系统

一套完整的镜面加工系统通常包含以下系统, 如表 2

所示。

2.2 镜面加工设备

对于模具的 CNC 镜面加工设备, 核心是使用高刚性、高精度的五轴联动加工中心, 它专门为高光洁度和高形状精度而设计, 并配合特殊的工艺与刀具^[4]。

2.3 镜面加工刀具

镜面加工刀具是指用于对金属或其他材料表面进行精加工, 以获得极高光洁度(如镜面效果)的专用工具。根据加工方式和应用场景的不同, 主要可分为以下几类:

滚压类镜面刀具: 通过机械挤压使工件表面金属发生塑性流动, 实现无切屑的光整强化加工, 适用于外圆、内孔、端面等部位。金刚石滚光刀/挤光刀: 采用人造或天然金刚石作为滚压头, 适用于高硬度材料, 可实现 Ra 0.05 - 0.1 μm 的镜面精度。

球头类镜面刀具: 用于数控铣削(三轴或五轴)中实现高光曲面加工, 特别适合模具、叶轮等复杂曲面加工。MCD 金刚石刀具, 用于铜、铝、不锈钢等材料的车削和铣削, 加工后表面如镜面般光滑, 兼具高寿命与稳定性。PCBN 系列球刀和圆鼻刀, 用于高硬度模具 HRC55 以上等材料的铣削, 加工后表面如镜面般光滑, 兼具高寿命与稳定性。PCD 系列挤压球刀: 采用无刃结构设计结合

表1 镜面模具材料及特性

类型	典型牌号 (国内/常见)	核心特性	适用场景
高耐腐蚀镜面钢	S136 / S136H (瑞典) 4Cr13 (中国GB) HPM38 (日本日立)	1. 极佳的耐腐蚀性：高铬含量(约13.6%)，抵抗PVC、酸性塑料及潮湿环境腐蚀。 2. 优异的抛光性：可达#8000-#12000目以上镜面效果。 3. 耐磨性良好，热处理稳定性高	光学透镜（相机、镜头）、导光板、化妆品包装。 PVC、含阻燃剂塑料、医疗食品级制品（如注射器、容器）。 适用于长期接触水气的模具。
高抛光预硬镜面钢	NAK80 (日本大同) 10Ni3MnCuAl (中国GB)	1. 顶级的镜面抛光性：可达#10000-#15000目，表面粗糙度Ra≤0.01 μm。 2. 预硬化状态：出厂硬度约HRC 37-43，无需热处理，加工后不易变形。 3. 纯净度极高，放电加工性能好。	光学级镜片、摄像头镜片、高光外观件（汽车格栅、家电面板）。 复杂精密模具：对尺寸稳定性要求极高的模具。
通用预硬镜面钢	718H / 3Cr2NiMo (中国GB)	1. 综合性能均衡：抛光性（#6000-#8000目）、耐磨性、韧性均优于P20。 2. 预硬化（约HRC 35-40），加工性能好。	大中型精密模具：汽车灯罩、仪表盘、高光电子外壳。 增强塑料：含玻纤（如PA+GF）的工程塑料等。

表2 超精密加工系统组成

系统	主要构成与设备	核心功能与目标
高精度成型系统	超精密加工中心、五轴数控机床、超精密数控车床、镜面磨床	负责模具的“粗加工”与“精加工”。例如，使用CBN或金刚石刀具，可直接在模具钢（如S136）上加工出Ra 10-30 nm的表面。
确定性抛光系统	光学表面成型（CCOS）机、抛光盘、机器人研抛系统、磁流变/离子束抛光机	负责“精修”与“终极抛光”。通过精确控制抛光工具的抛光时间、压力与路径，将面型精度提升至纳米级，并消除切削痕迹。
在线/在位检测系统	激光干涉仪、高精度3D轮廓仪（如UA3P）、机器人摆臂轮廓仪	实时或在线检测加工形状误差（面型精度PV/RMS）和表面粗糙度（Ra）。
智能工艺软件	加工路径规划软件、智能误差补偿软件	系统的“大脑”。根据检测数据自动规划加工策略，并采用算法（如误差预测模型、智能控制策略）补偿各类扰动误差。
精密支撑与环境控制	气浮/液压支撑转台、恒温隔振地基、洁净车间	为整个加工过程提供超稳定的物理环境，隔离温度、振动等干扰，是保证纳米级精度的基础条件。

表3 镜面加工CNC设备对比

设备类型	核心特点	核心功能与目标
超精密五轴加工中心	超精密五轴联动，高刚性/高稳定性（如聚合物混凝土床身），超高转速主轴（转速30,000-60,000 RPM或更高），热变形控制。	复杂三维曲面（如光学透镜、车灯、手机外壳模具）精密成型与镜面加工。
精密成型磨削系统	以磨代抛，使用金刚石砂轮对已淬硬的模具钢进行数控成型磨削。	淬硬模具钢复杂曲面（如汽车反射镜模具）的高精度、高效率镜面成型。
高速雕铣机/加工中心	高转速、良好刚性，性价比高，通常为三轴或五轴。	较复杂曲面或小型模具零件的高速精加工及抛光。

表4 镜面加工表面质量评价

评价维度	核心指标	典型测量方法	对模具/产品的影响	检测与评价
微观轮廓	表面粗糙度 (Ra, Rz, Sa)	表面微观不平度的算术平均偏差。	最直接影响：光亮度、脱模力、产品外观、耐腐蚀性。	使用接触式轮廓仪或白光干涉仪
纹理缺陷	波纹度 (Wa)	介于宏观形状与微观粗糙度之间的周期性起伏。	导致产品表面出现规则明暗条纹（橘皮、光畸）。	通过工业显微镜干涉显微镜或扫描电镜观察微观纹理和缺陷。
	表面缺陷	划痕、针孔、料纹（抛光纹理）、白点（微小裂纹）。	破坏外观完整性，成为应力集中点，降低疲劳强度。	
宏观几何	形状精度	曲面与设计理论轮廓的整体偏差。	影响光学元件的成像质量、零件的装配精度。	使用三坐标测量机或激光跟踪仪检测曲面轮廓度。
物理性能	表面应力	加工导致的残余应力层（拉应力/压应力）。	压应力提升耐磨性、抗疲劳性；拉应力易诱发裂纹。	通常采用目视比对标块，在标准光源和特定角度下进行主观评价。
	表层变质层	加工导致表层组织变化（如白层、热影响区）。	白层通常硬度高但脆，易剥落，影响寿命和产品表面。	

PCD 材质, 其独特刃型设计能实现全范围高效加工, 刀具寿命长, 适用于 SKD61、STAVAX 等难加工材料。

这些刀具的选择需根据工件材质、形状、精度要求及设备条件综合判断, 滚压类适合大批量、高硬度件的表面强化, 而球头铣刀则更适用于复杂曲面的高精度数控加工。

2.4 镜面加工表面质量

镜面加工的表面质量是一个综合性概念, 远不止肉眼可见的“光亮”^[5]。它由一系列可量化、可测量的微观和宏观指标共同定义, 直接影响模具的最终性能(如脱模性、产品外观、耐磨性), 如表4所示。

3 镜面模具抛光技术

模具镜面抛光和其他行业的表面抛光有较大的区别。模具镜面抛光要求非常高, 不仅要考虑到抛光本身, 而且还要考虑到模具表面的几何精度。模具镜面抛光是一个极其精细的系统工程, 其工艺并非单一方法, 而是一套多步骤、多技术组合的严谨流程。即从粗到细, 一步一步消除上一道工序留下的痕迹, 最终达到镜面^[6]。

第一, 传统手工抛光(主流、核心), 这是最经典、最灵活, 也是技术要求最高的方法, 尤其适用于复杂型腔模具。工艺流程: 粗抛(去刀痕与EDM层) - 半精抛(进一步平整化) - 精抛(实现预镜面) - 超精抛(实现最终镜面)

第二, 机械化/自动化抛光。超声波抛光: 利用超声波能量, 使细小的磨料在工具头与工件之间高频振动, 实现微观切削。抛光力小, 不会导致工件变形; 特别适合窄缝、深槽、微小异形孔等手工难以触及的区域。机械手/机器人抛光: 工业机器人夹持抛光工具(如气动打磨头、羊毛轮), 按照预设路径和压力进行抛光。稳定性好, 一致性高, 适用于大型平面、规则曲面的批量抛光。磁流变抛光/流体抛光: 利用磁性磨料流体或含有磨料的黏弹性流体, 在磁场或压力作用下流过工件表面, 进行柔性研磨, 适合超精密、无亚表面损伤的抛光, 多用于光学模具。化学/电化学抛光: 通过化学反应或电化学溶解, 选择性去除表面微观凸起, 实现整体平滑。不产生机械应力, 可达极高光洁度, 会轻微改变尺寸, 控制不当会降低表面锐度。

4 当前挑战与问题分析

工艺与自动化: 依赖人工抛光, 效率低且一致性差^[7]。

刀具与表面质量: 刀痕、表面波纹、难以达到纳米级粗糙度。传统刀具无法达到最终镜面要求, 且易留下规律性刀痕。

设备与精度控制: 机床振动、机床误差、装夹变形、热影响。小尺寸、复杂形状工件的装夹容易引起变形, 且单件加工效率低。

检测与一致性: 对于需要多个相同型腔的模具, 保

证一致性是难点。这依赖于机床的重复定位精度、稳定的加工参数, 以及加工后使用高精度三坐标测量机进行全数检测。

5 发展趋势与未来展望

未来的镜面模具将不仅是“产品”, 更是集成了先进材料、智能工艺和全生命周期数据包的“可预测性高价值资产”。

首先, 目标与需求: 从追求“高精度”到保障“长寿命与过程稳定”; 应用拓展至激光雷达、AR/VR等光学领域。

其次, 制造模式: 全流程数字化与柔性化: 设计制造一体化(CAD/CAM/CAE); 智能生产线与柔性制造单元。

最后, 产业生态: 供应链安全与技术自主: 实现关键材料与技术的国产化替代; 企业向“技术解决方案提供商”转型。

6 结语

镜面模具加工的发展前景既充满机遇, 也面临挑战。行业正站在一个从“精度驱动”向“综合性能与智能化驱动”演进的关键节点。汽车、消费电子、医疗器械、尤其是光学、AR/VR等新兴领域, 对超精密、高质量外观件的需求持续增长, 为镜面模具提供了广阔的应用空间。总而言之, 这是一个技术为王、应用导向的专业领域。

参考文献:

- [1] 张永平, 汪洋, 高照兵等. 模具加工领域中高精技术的应[用]. 模具制造, 2025, 25(8):16-18,22.
 - [2] Libiao T. Discussion on Mold Manufacturing and NC Machining Technology[J]. Electric Tool, 2018.
 - [3] Qinghong C. Application of Reverse Engineering Technology in the Development of High-precision Mold[J]. Journal of Changsha University, 2019.
 - [4] 李永. 提升高端模具和精密机械加工效率的方法探析[J]. 中国金属通报, 2025(13):164-166.
 - [5] 王建军, 王帅, 穆龙涛等. HUD 镜面模具五轴定点加工方案研究及应用[J]. 模具技术, 2025(4):30-36.
 - [6] 孙文秀. 精密型腔类模具的大面积镜面加工方法[J]. 中国金属通报, 2023(19):183-185.
 - [7] 李磊. 数控铣加工模具零件工艺的优化措施[J]. 机械工业标准化与质量, 2025(3):61-64.
- 作者简介: 吕德瑾(1990-), 女, 汉族, 山东临沂人, 博士, 研究方向: 从事超精密加工技术研究。
* 通讯作者: 赵立(1991-), 男, 汉族, 江苏苏州人, 博士, 研究方向: 从事机械工程研究。