

冲压模具磨损修复与常态化维修管理方法

于 伟 赵 锋 殷洪杰 杨延亮 王令胜

中国重汽集团济南卡车股份有限公司 山东 济南 250000

摘 要：本文剖析冷热冲压模具磨损工况、四类磨损类型及内外失效诱因，阐明模具磨损对产品质量、生产产能与生产成本的负面影响，划分轻中重三级磨损缺陷标准，匹配抛光、电刷镀、激光熔覆等差异化修复工艺并完成技术选型对比。针对企业事后维修、台账粗放、作业非标等管理痛点，搭建全生命周期预防性维保体系，优化运维流程。实践证实该方案可延长模具寿命、减少停机故障，压降模具采购与维修成本，助力冲压车间精益化生产落地。

关键词：冲压模具；磨损修复；常态化维修；管理方法

引言：冲压模具是钣金成型核心工艺装备，高频冲击、摩擦载荷与复杂工况极易引发刃口、型面磨损失效，直接制约冲压生产效率与零件成品精度。现阶段多数制造企业模具修复针对性不足、运维模式被动、常态化管控缺失，易引发废品率飙升、产线停机、模具提前报废等问题。为破解生产痛点，本文结合模具失效机理梳理分级修复技术，构建标准化常态化维修管理体系，兼顾修复效率与运维管控，为冲压模具长效运维提供实操参考。

1 冲压模具磨损类型、成因及失效机理分析

1.1 冲压模具核心结构与工作工况特点

(1) 常规冲压模具由凸模、凹模、压边圈、导向机构及紧固件等组成，其中凸、凹模工作刃口与型面直接参与材料分离与成形，是磨损最集中的核心零部件。

(2) 冷冲压在室温下进行，模具主要承受周期性冲击载荷与摩擦热，磨损以磨粒磨损和粘着磨损为主；热冲压模具服役温度可达600℃以上，除受力摩擦外还承受剧烈冷热循环，高温氧化与热疲劳显著加速材料退化。(3) 模具服役过程受力状态复杂，包括垂直压缩力、侧向挤压力和卸料剥离力；摩擦主要发生于板材与模具工作表面相对滑动区域；温度因素既来源于变形热与摩擦热积累，也取决于冲压速度与冷却条件，三者耦合共同决定磨损进程。

1.2 冲压模具主要磨损类型划分

(1) 磨粒磨损常发生在凹模圆角、凸模棱边及导向面，由板材表面硬质点或脱落碳化物对模具表面产生微观切削，外观呈定向沟槽状划痕。(2) 粘着磨损多见于润滑不良或高压高温区域，模具与板材局部焊合后材料转移，导致冲压件表面产生拉伤、积瘤甚至咬合卡模，是热冲压模具典型失效形式。(3) 疲劳磨损以微裂纹、剥落坑为特征，发生于高频冲击工况下的应力集中区；

腐蚀磨损则因润滑剂分解或环境介质引起模具表面化学侵蚀，两者均具隐性渐进特点，初期难以察觉却显著缩短模具寿命^[1]。

1.3 模具磨损内外诱因及失效机理

(1) 模具钢材材质均匀性、碳化物形态及分布直接影响抗磨性能，热处理不当导致硬度不足或残余应力过大时，加剧表层剥落与变形失效。(2) 冲压速度过高、进给量不合理、板材强度超标及润滑剂选型不当或涂抹不均，均会使局部摩擦系数增大、温升加剧，加速磨粒与粘着磨损。(3) 日常养护缺失，如未及时清除工作表面粘附金属碎屑、未定期补充润滑剂及检修周期过长，将导致轻微磨损迅速扩展为宏观失效，极大降低模具稳定服役周期。

1.4 模具磨损对冲压生产的负面影响

(1) 磨损导致凸凹模间隙分布不均和型面轮廓改变，冲压件出现毛刺高度超标、回弹量波动及表面划痕等缺陷，尺寸精度和外观质量显著下降，不合格率攀升，后续机加工或装配环节返工成本增加。(2) 磨损迫使生产线频繁停机换模或进行在线修磨，单次修磨耗时数十分钟至数小时不等，有效冲压时间占比降低，产能受到直接制约；高频检修还扰乱生产节拍，延迟订单交付。(3) 严重磨损超过修磨余量后，模具整体报废，新模具制造成本高昂且周期较长；叠加不合格品损失、额外人工及能源消耗，企业单位零件生产成本大幅上涨，长期累积还将削弱产品市场竞争力。

2 冲压模具典型磨损缺陷分级与高效修复技术

2.1 模具磨损缺陷等级判定标准

(1) 轻微表层磨损指模具工作表面出现微观划痕、轻微氧化色斑或局部光洁度下降，磨损深度通常小于0.02mm，刃口棱线清晰、轮廓尺寸仍在原始公差范围内。此类缺陷未破坏模具几何形状，仅影响表面状态，

通过抛光养护即可恢复表面完整性,无需补材介入。

(2) 中度轮廓磨损表现为刃口圆角半径明显增大、型面局部出现凹陷或棱线缺失,磨损深度在0.02~0.3mm区间,冲压件开始出现毛刺增大、尺寸波动等质量偏移迹象。该阶段模具几何形状已受损,需借助补损工艺恢复尺寸与轮廓精度,但基体结构仍保持完整。(3) 重度结构性磨损包含模块崩角(缺损尺寸>2mm)、贯穿性延伸裂纹(长度>5mm)及型腔明显塑性变形,磨损深度超过0.5mm或存在断裂风险^[2]。此时模具承载能力下降,须实施堆焊重构、局部更换或结构强化方可重新服役。

2.2 轻微、中度模具磨损常规修复工艺

(1) 机械打磨+精密抛光:采用油石由粗至细逐级研磨去除表层微缺陷,配合金刚石研磨膏抛光至镜面效果,终道表面粗糙度可达 $Ra \leq 0.1\mu m$ 。该工艺成本低廉、操作便捷,适用于轻微拉毛、局部粘着及氧化层清除场景,常用于生产间隙的快速养护。(2) 电刷镀表面补损:以镀笔作阳极、模具为阴极,在磨损区选择性沉积镍-钨、钴-钼等合金层,单次修复厚度控制在0.05~0.25mm。核心工艺参数包括:工作电压6~12V、相对运动速度8~15m/min、镀液温度45~65℃。适用于精密型面局部凹陷修复,热输入低、不变形。(3) 热喷涂涂层强化:采用超音速火焰喷涂制备碳化钨-钴涂层,涂层厚度0.3~0.8mm,孔隙率低于1%,硬度可达HV1200以上。等离子喷涂氧化铬涂层适用于耐腐蚀需求高的场景。该技术可使模具表面耐磨性提升2~4倍,适合大面积均匀磨损的整体强化防护^[3]。

2.3 重度模具磨损复合修复工艺

(1) 激光熔覆修复:以高功率激光束熔覆铁基、镍基或钴基合金粉末,熔覆层与基体呈冶金结合,稀释率控制在5%~8%。工艺流程为:缺陷清理→探伤检测→逐层熔覆→机加工成形。优势在于热影响区窄(0.2~0.5mm)、变形极小,修复区硬度可定制至HRC50~62,适用于崩角与深裂纹的高质量重构。(2) 氩弧堆焊+后精加工:选用与模具同材质或相近成分焊丝,采用小电流、多层多道堆焊恢复大余量缺损。堆焊前需整体预热至300~450℃,焊后缓冷防止氢致裂纹。精加工阶段依次经粗铣、半精铣、数控磨削至最终抛光,适用于大型模具崩角、型腔大面积磨损的结构性修复。(3) 修复后热处理配套:堆焊或熔覆后必须实施去应力退火(500~650℃保温2~4h)消除残余应力;对淬火态模具需重新真空淬火+回火至目标硬度,并辅以-80℃深冷处理促使残余奥氏体转变,提升尺寸稳定性,确保修复区域性能与基体协调匹配。

2.4 不同修复技术优劣对比与选型原则

(1) 抛光修复单次成本最低(约新模价1%~3%)、周期最短(数小时),但无法解决尺寸缺失,寿命恢复率仅50%~70%;电刷镀成本中等(3%~8%)、周期1~3天,寿命恢复率60%~75%;热喷涂成本约8%~15%、周期2~4天,寿命恢复率70%~85%;激光熔覆成本15%~30%、周期3~7天,寿命恢复率85%~95%,且热损伤小;氩弧堆焊成本20%~40%、周期5~12天,寿命恢复率80%~90%,适用于超大余量修复。(2) 大批量自动化生产线应首选激光熔覆或热喷涂,确保长周期稳定运行;小批量或试制模具可选用电刷镀兼顾成本与精度;应急抢修采用抛光或局部电刷镀快速复产;大型结构件崩角则必须采用氩弧堆焊补足尺寸余量。(3) 修复后模具须经三维坐标测量仪复核型面尺寸精度,按产品图纸逐项校验关键特征点偏差;并通过试冲50~200件进行验证,检测冲压件毛刺高度、轮廓度及表面质量,确认全部达标方可上线批量服役。

3 冲压模具常态化维修管理体系构建与落地优化

3.1 模具传统维修管理现存问题

(1) 当前多数企业采取事后维修的被动模式,即模具发生明显失效乃至造成批量废品后才安排检修。此模式缺乏预防性思维,模具磨损处于失控状态,突发停机频发,打乱正常生产节拍,维修工作始终处于被动应急局面。(2) 维修台账管理粗放,普遍仅记录维修日期与更换零件名称,对磨损类型、磨损量数值、修复工艺参数、修复后尺寸检测结果等关键数据缺乏系统记录。单副模具的磨损退化历史无法追溯,后续维修策略制定缺乏数据支撑,多凭个人经验判断,决策科学性严重不足。(3) 运维人员标准化作业流程不规范,不同维修工在打磨力度、抛光道次、补镀厚度控制等操作环节执行标准不统一,修复质量因人而异。同样一副模具经不同人员修复后服役寿命差异明显,操作随意性问题突出,严重影响维修效果的一致性与可靠性。

3.2 模具全生命周期常态化预防性维修方案

(1) 日度点检聚焦三项核心内容:型面润滑状态检查,确认自动润滑系统管路畅通、油量充足且无泄漏,人工辅助涂覆时确保均匀覆盖;表面磨损目视巡检,重点观察刃口及圆角部位有无异常划痕、积瘤或局部变色;紧固件扭矩抽检,保证模架连接螺栓及镶块固定螺钉处于规定预紧力范围,杜绝松动引发的偏载磨损。(2) 周期维保按阶梯式执行:周度实施刃口锋利度校准,使用轮廓检测仪测量刃口圆角半径,记录变化趋势并适时安排轻微修磨;月度进行涂层养护,清除表面微

裂纹内杂质,检查涂层剥落情况并做局部补涂;季度安排拆机深度检修,将凸模、凹模完全拆卸,实施磁粉探伤与三维尺寸复测,系统评估本阶段磨损状况并调整下季度维保计划^[4]。(3)退役模具预判建立双重预警机制:一是磨损阈值预警,设定关键指标限值,如刃口磨损量 $\geq 0.3\text{mm}$ 或型面尺寸超差超过产品公差1/3时发出黄色预警,达到2/3时触发红色预警;二是报废更换判定规则,当单次预测修复成本超过新模造价的50%,或同一位置已累计修复超过3次时,启动退役评审程序,避免过度修复造成资源浪费。

3.3 模具维修标准化管理体系搭建

(1)建立一码到底的模具运维台账与磨损修复档案,每副模具赋予唯一编码,完整记录从入库启用、每次冲压批次与次数、每次点检与维修详情、直至最终报废的全生命周期数据。档案模板统一规定磨损部位图示标注方式、磨损量记录精度及修复工艺代码,确保数据规范可比。(2)明确维修人员岗位职责与权限分级,初级工执行日常点检与简单抛光,中级工负责电刷镀与热喷涂操作,高级工及工程师承担激光熔覆与堆焊修复决策。配套编制标准化作业规程,对打磨粒度选用、抛光压力控制、刷镀电压与温度设定等关键参数作出量化规定,配套操作图示与检查确认表,实现不同人员操作结果趋同。(3)备品备件与修复耗材实施仓储统筹管理,依据模具型号清单建立安全库存模型,对易损镶块、导柱导套等关键件设置最低库存警戒线。耗材依据历史消耗速率按月滚动补充,入库执行批次管理与有效期追踪,杜绝因物料短缺导致的维修延误,同时避免过度囤积占用资金^[5]。

3.4 管理体系优化与生产应用效益分析

(1)基于磨损累积数据动态校准维保周期——分析发现某大型覆盖件模具在4.8万冲次后圆角磨损速率急剧上升,则将该型号定点维保节点由原6万次前移至4.5万次。同时优化管控流程,将点检异常上报层级由三级压

缩为一级,可直接触发维修工单推送至执行端,响应时间由平均4小时缩短至0.5小时以内。(2)以某汽车冲压车间实施数据为证:体系运行12个月后,纳入管理的37副主力模具平均使用寿命由原11.2万冲次提升至17.8万冲次,增幅达59%;月均突发停机由9次降至2次;修复一次合格率由76%跃升至93%;年度模具采购成本下降约35%,维修工时节约超1800小时。(3)综合效益集中体现为模具寿命延长带来的采购成本降低、停机减少带来的产能释放、质量稳定带来的废品损失下降三重叠加。更深远意义在于,标准化体系使维修管理从“因人而异”的经验模式转变为“有据可依”的制度模式,生产稳定性与可预期性大幅增强,为精益制造与智能化升级奠定了坚实基础。

结束语

综上,本文结合冲压模具磨损失效机理匹配分级高效修复工艺,依托全生命周期管控思维优化原有被动运维模式,搭建标准化、数据化常态化维修管理体系,兼顾磨损修复提质与日常运维降本。车间实际应用验证体系实用性极强,有效改善模具服役性能、规整运维作业流程。后续可结合模具冲次大数据、智能点检设备优化预警机制,进一步推动模具运维向智能化、预判式精益管理转型升级。

参考文献

- [1]丁紫阳.钣金冲压模具磨损缺陷修复技术及日常运维管理研究[J].材料科学与工程进展,2022,6(10):89-94.
- [2]徐亮.冷冲压模具磨损修复工艺对比及车间标准化维保方案[J].制造技术与机床,2023,20(12):156-160.
- [3]张伟明.大批量生产下冲压模具磨损管控与预防性维修措施[J].模具制造,2025,25(2):67-69.
- [4]梁启文.汽车冲压模具磨损失效机理及高效修复技术应用[J].汽车工艺与材料,2024,14(8):70-74.
- [5]孟凡超.冲压车间模具常态化点检、磨损修复及台账管理优化[J].设备管理与维修,2023,31(15):145-147.