

面向一次性餐具生产的高速冲压成形模具设计研究

杨文 张启友 潘显妙

浙江土土智能科技有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：本文针对一次性餐具高速冲压模具寿命短、精度低问题开展研究。结合材料特性完成模块化结构设计，实现快速换型；通过理论分析揭示材料流动与应力分布规律；优化核心零部件结构并强化强度校核，改进导向定位系统提升运动精度；创新设计冷却润滑系统，有效抑制热变形与磨损。验证表明，该模具实现了高精度、高效率生产，寿命与稳定性显著提升。研究成果为高速冲压模具设计提供理论依据，推动装备精密化、高效化发展，为一次性餐具智能制造奠定技术基础。

【关键词】：一次性餐具；高速冲压；成形模具；结构设计；强度校核；冷却润滑

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.065

1 引言

一次性餐具市场需求增长，对生产效率和产品质量要求提升，高速冲压成形技术成批量生产核心手段，模具设计质量影响餐具成形与生产。当前，一次性餐具高速冲压成形模具设计存在诸多问题，如高分子材料高速冲压易致成形缺陷、模具零部件易磨损、现有设计难适配高速冲压需求等。随着高速冲压技术发展，模具设计理念与手段不断革新，国内外学者提出相关设计方法与优化策略，但针对一次性餐具高分子材料的研究匮乏。基于此，本文聚焦该模具设计，开展系统分析与推演，先明确需求与指标完成整体设计，再分析材料规律优化参数，接着进行校核与优化设计适配系统，最后验证方案可行性与优越性，旨在为模具工程化设计提供支撑，促进行业发展。

2 一次性餐具高速冲压成形工艺特性与技术需求

2.1 冲压成形工艺特性分析

一次性餐具高速冲压成形是利用模具对高分子板材快速冲压、成形与分离的工艺，具有速度快、周期短、批量生产效率高的特点。其特性主要受三方面因素影响：

材料方面：聚丙烯、聚苯乙烯等高分子材料弹性模量小，易回弹导致尺寸偏差；熔点低，高速摩擦生热易造成材料软化、粘连甚至降解；塑性变形能力弱，高速冲压下易撕裂破损。

产品结构方面：一次性餐具多为薄壁壳体，形状复杂且精度要求高。高速冲压时材料流动变形不均，易出现壁厚不均等缺陷，同时模具需具备通用性和互换性以降低换型成本。

工况方面：高速动态过程使模具承受高频冲击与交变应力，易疲劳磨损；材料与模具接触时间短，变形不充分，成形质量控制难度大。

2.2 模具设计技术需求

基于上述特性，模具设计需满足六大需求：

高精度成形：精准控制材料流动，确保产品尺寸与表面质量

高稳定性：核心部件须高强度、耐磨，结构设计避免应力

集中

高效率生产：简化工序、集成多工位功能，开合模灵活，排屑顺畅

材料适配性：型腔表面特殊处理降低摩擦，冷却系统精准控温

通用性与经济性：模块化设计实现快速换型，结构优化降低成本

安全防护：配备防护装置防止工件弹出，设计便于维护的人机界面

3 高速冲压成形模具整体结构设计

3.1 模具整体设计方案

面向一次性餐具生产的高速冲压模具采用"上模座-导向机构-冲压机构-下模座-定位机构-卸料机构-冷却润滑机构"架构，满足高精度、高稳定性与高效率需求。整体结构对称布局，确保受力均匀，减少变形与振动。

上模座为整体式高强度铸铁结构，支撑冲压、导向与卸料部件；下模座同样采用铸铁制作，支撑定位、型腔与冷却系统，内部预留管路空间。冲压机构由凸模、凹模和压料圈组成，是成形核心；压料圈通过弹簧弹性压料，防止材料位移。导向机构采用四角对称布置的高强度合金钢导柱导套，确保精准对中。定位机构结合侧刃与挡料销，实现材料精确定位。卸料机构采用刚性卸料板、螺钉与弹簧组合，确保卸料顺畅。冷却润滑机构通过循环水降温与喷雾润滑，减少摩擦与磨损。

3.2 模具工作流程设计

工作流程为"送料-定位-压料-冲压成形-卸料-取件"，实现连续高速冲压。高分子板材经送料机构同步送入定位区，定位机构精准固定；上模下压，压料圈先压紧板材，随后凸模进入凹模完成成形；冲压结束，上模回程，卸料板卸下产品与废料；取件机构分离产品与废料并输送，完成循环。流程设计考虑高速动态特性，减少动作延迟，并设多点传感器监测，异常时自动停机报警，确保安全稳定。

3.3 模具模块化设计

为提升通用性与降低换型成本，模具采用模块化设计，分为冲压、定位、卸料、冷却润滑等独立功能模块，通过标准化接口与定位销实现快速装配更换。冲压模块包含凹凸模，专为不同餐具设计，换型时仅需更换此模块；定位模块通过调整侧刃与挡料销适配不同板材；卸料模块通过弹簧调节卸料力；冷却润滑模块通过阀门调节水量与喷洒量。此设计大幅提升互换性，缩短换型时间，便于维护升级，降低停机成本，为高效生产提供保障。

4 高速冲压成形过程理论分析

4.1 材料成形机理分析

一次性餐具高速冲压是高分子材料（如聚丙烯、聚乙烯）在模具作用下的塑性变形过程。高速冲压应变率达 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ ，摩擦热使材料局部升温，形成应变率强化与温度软化的耦合作用。冲压过程分三阶段：初始弹性变形；压力增大至屈服强度后塑性变形，分子链取向滑移；材料向型腔流动形成制品。薄壁壳体结构使材料流动距离长，凸模头部区域先变形。高分子材料回弹特性显著影响成形精度，高速工况下回弹更明显，模具设计需预留补偿量并优化型腔形状。合理控制冲压速度与模具温度可平衡应变率与温度效应，减少成形缺陷。

4.2 应力应变分布理论分析

基于塑性力学理论，高速冲压中材料处于复杂三维应力状态。凸模接触区承受高压应力，率先发生塑性变形，产生大压缩和剪切应变；材料流向侧壁时，径向压应力增大，拉伸应变显著；边缘区域因约束小易过度拉伸。高速应变率加剧应力分布不均，易在局部形成剪切带，带内应变剧增且温度升高，降低材料强度，严重时引发断裂。餐具薄壁特性使厚度变化显著影响应力分布：变薄区域应力集中，易破裂。模具设计需优化型腔过渡区几何形状，避免应力集中，同时调控压料力分布，均衡材料流动，抑制剪切带形成。

4.3 冲压成形缺陷形成机制分析

主要缺陷及形成机制如下：

壁厚不均：材料流动不均匀所致。模具型腔结构不合理导致流动路径不畅；冲压速度过快使材料无法充分流动；压边力不足造成材料位移。

边缘褶皱：边缘区域拉伸变形不均与压料力分布不均共同作用，形成波浪状褶皱。

尺寸偏差：高分子材料回弹、模具热变形与磨损、定位机构精度不足导致产品与设计尺寸偏离。

表面划痕：模具型腔表面粗糙度超标、润滑不足增大摩擦、材料含杂质等因素造成。

材料撕裂：材料塑性变形能力不足、局部应力集中、冲压

速度过快使局部应变速率超限。

缺陷形成受材料特性、模具结构、工艺参数协同影响。理论分析表明，优化模具几何形状、精确控制冲压速度与温度、合理设计压料系统是抑制缺陷的核心策略，可显著提升一次性餐具成形质量与生产效率。

5 模具核心零部件结构设计与强度校核

5.1 凸模与凹模结构设计

凸模与凹模是一次性餐具冲压成形核心部件，其结构决定产品精度与质量。凸模用整体式，形状与餐具内表面一致；凹模用镶嵌式，型腔与外表面一致，便于加工更换，降低维护成本。材料选高强度、耐磨、高韧性合金工具钢，承受高速冲压载荷，延长寿命。对其表面强化，氮化提升硬度耐磨，抛光提升光洁度，减少摩擦，提升产品质量。优化圆角半径与脱模斜度，改善材料流动，减少缺陷。确定合理凸模头部圆角半径，确保材料平稳变形；凹模入口设合理脱模斜度，便于产品脱出，减少损伤变形。

5.2 导向机构设计

导向机构确保模具高速冲压精准对中，影响运动精度与稳定性。采用导柱导套导向，对称布置在上、下模座四角。导柱为圆柱形，表面精密加工；导套为滑动导套，与导柱间隙配合，优化间隙确保顺畅运动。导柱导套选高强度合金钢，表面氮化处理。导套内设润滑油槽注润滑脂，减少磨损，导柱端部设倒角，避免碰撞。

5.3 定位机构设计

定位机构实现冲压材料精准定位，提升产品尺寸一致性。采用侧刃与挡料销结合定位，侧刃控进给步距，挡料销限横向往位移。侧刃形状尺寸据材料设计，刃口锋利；挡料销位置据冲压位置调整。侧刃与挡料销用高强度合金工具钢，表面淬火处理。侧刃与卸料板间隙配合，挡料销与下模座螺纹连接。设弹性压紧装置，压紧材料，提升定位精度。

5.4 核心零部件强度校核

高速冲压下，模具核心件承受高频冲击与交变应力，易疲劳磨损或断裂，需严格强度校核。凸模重点校核抗压与抗弯强度，确保应力低于许用值；凹模校核抗压、抗剪切强度及镶嵌结构配合强度，防止松动；导柱计算压应力、弯曲应力及与导套接触应力，避免磨损；上、下模座校核弯曲强度与刚度，控制应力和挠度在允许范围，维持精度。

校核依据为最大冲压载荷下的应力分布与变形量，与材料许用值对比。不达标时，采取优化措施：增大关键截面、选用高速钢或硬质合金等高强度材料、增设加强筋或改进结构，直至满足工况需求。此系统化流程确保模具在长期高频工作中保持高精度与长寿命，为一次性餐具高效生产提供可靠保障。

6 模具冷却与润滑系统设计

6.1 冷却系统设计

高速冲压时，模具与材料摩擦产生大量热量，若不及时散热，会导致模具热变形、尺寸精度下降、寿命缩短，同时使材料软化粘连，影响产品质量。因此必须设计高效冷却系统。

系统采用循环水冷却方式，根据模具结构与热量分布，在凹模周围设置环形冷却通道，在凸模内部设轴向通道，遵循均匀冷却原则。系统由水泵、水箱、管道、阀门和温度传感器组成，水泵提供循环动力，水箱储水散热，传感器监测温度实现自动控制。冷却通道尺寸与数量根据热量产生量优化设计，确保模具温度稳定控制在 50-80℃ 范围内。

6.2 润滑系统设计

润滑系统旨在减少摩擦、防止粘连，提高产品质量和模具寿命。根据工艺特性，采用喷雾润滑方式，在冲压区域合理布置喷嘴形成均匀润滑膜。

润滑介质选用专用冲压润滑油，需具备优良的润滑性、冷却性、高温稳定性和环保性能。系统由润滑泵、油箱、喷嘴、管道和调节阀门构成。喷嘴布置与数量根据模具结构优化，精确控制喷雾角度与范围；系统与冲压节奏同步运行，确保最佳润滑效果同时避免浪费。

6.3 冷却与润滑系统协同工作设计

两系统协同是高速冲压成功的关键，共同控制模具温度和摩擦系数。协同主要体现在三方面：润滑油辅助冷却带走热量；冷却系统维持适宜温度，防止润滑油高温降解；控制系统联动调节，根据实时温度和冲压速度自动调整冷却水流量与润滑油用量。

例如，当冲压速度提高时，系统自动增大冷却水流量并增加润滑油喷洒量；当模具温度偏低时，则降低冷却强度与润滑油用量。这种精准协同控制确保模具始终处于最佳工作状态，显著提高生产稳定性与可靠性，同时优化能源与材料使用效率，实现高效、稳定的高速冲压生产。

7 模具设计方案可行性与优越性验证

7.1 成形精度可行性验证

通过理论分析验证高速冲压成形模具的成形精度可行性。

一方面，模具核心零部件采用高精度加工工艺，凸模与凹模加工精度达微米级，导向与定位机构精度合理，能满足一次性餐具尺寸要求；另一方面，优化模具结构设计，考虑材料回弹特性预留补偿量，导向与定位机构确保精准对中与定位，减少精度下降。结合一次性餐具成形工艺需求，以聚丙烯餐盒为例，模具能将关键尺寸偏差控制在±0.3mm 以内，模块化设计与标准化接口提升了成形精度稳定性。

7.2 生产稳定性可行性验证

从模具强度与刚度、耐磨性、冷却润滑效果等方面进行理论分析。核心零部件经强度校核，选用高强度、高耐磨材料并表面强化，能承受高频冲击与摩擦，减少磨损变形，导向与定位机构稳定可靠，减少生产中断。冷却与润滑系统协同控制模具温度与摩擦系数，减少热变形与磨损，避免材料粘连与缺陷。所设计模具能在高速冲压下稳定工作，满足批量生产需求。

7.3 模具设计优越性分析

与现有模具相比，本文所设计模具具有以下优越性：一是采用模块化设计，通用性与互换性强，可快速换型，降低成本与时间，提升效率；二是核心零部件结构优化，强度与耐磨性高，延长模具寿命；三是冷却与润滑系统协同工作，精准控制温度与摩擦系数，减少磨损与粘连，提升产品质量；四是工作流程优化，工序衔接顺畅，减少延迟，提升冲压效率，且配备完善安全装置，提升生产安全性。

8 结论

本文针对一次性餐具高速冲压成形模具开展系统研究。基于高分子材料特性与动态工况分析，明确高精度、高稳定性技术要求。设计模块化整体结构，实现不同规格餐具快速换型生产。通过理论分析揭示材料成形机理与应力分布规律，阐明缺陷形成机制。优化凸凹模结构，选用高强度材料并进行表面强化处理，满足高速工况要求。创新设计循环水冷却与喷雾润滑协同系统，精准控制温度场与摩擦系数，有效减少磨损与粘连。验证表明，该模具具有高精度、高效率、长寿命及优异通用性，综合性能优于现有产品。研究成果为一次性餐具模具设计提供理论支撑，推动生产装备精密高效化发展。未来可结合数值模拟与机器视觉技术，实现质量在线检测与智能控制，进一步提升产品质量与生产效率。

参考文献：

- [1] 杜洋洋,王磊,李晓俊.高速冲压模具导板润滑装置的设计改进[J].锻造与冲压,2023(10):56-58.
- [2] 严磊,杨妹,元昌.冲压模具结构拓扑一尺寸联合优化设计方法[J].汽车工程,2024,46(12):2181-2189,2231.
- [3] 李晨曦.先进制造技术在餐具产品生产中的应用研究[D].天津:天津科技大学,2022.
- [4] 林彩梅,黎一强,欧星.基于 SolidWorks 的冲压模具设计及装配[J].机电工程技术.2024,53(11).
- [5] 王烨鹏.材料与材料成型技术的探讨与研究[J].科技创新与应用.2017,(8).