

阀体温挤成形工艺及模具设计

张 鹏

中鸿阀门股份有限公司 河北 邯郸 056700

摘 要：针对阀体异形结构成型难、精度差、力学性能不足等问题，本文开展阀体温挤成形工艺及模具设计研究。通过对比传统加工工艺，确定温挤成形为最优方案，拟定下料、加热、挤压、精加工全套工艺流程。完成模具整体结构、核心部件及辅助系统设计，依托DEFORM-3D仿真分析金属流动与应力应变规律，优化工艺参数与模具结构，有效消除成型缺陷，提升零件质量与模具使用寿命。

关键词：阀体；温挤成形工艺；模具设计

引言：阀体是流体控制系统的核心承压异形零件，传统切削、冷热挤压工艺存在材料利用率低、成型缺陷多、精度不足等弊端，难以满足高端阀体高性能、高精度的生产需求。为解决阀体复杂结构成型难题，提升零件力学性能与生产效率，本文以阀体温挤成形技术为核心，开展工艺方案设计、模具结构研发及仿真优化研究，为异形阀体精密、高效、低成本量产提供可靠的工艺与模具技术支撑。

1 阀体结构分析与温挤成形工艺方案设计

1.1 阀体零件结构与技术要求分析

(1) 阀体几何结构、尺寸参数与成型特点。阀体通常为带凸耳的多通结构，几何形状复杂，存在多个不同方向的通道和连接部位。该类零件壁厚分布不均，局部存在凸耳、法兰等特征，属于典型的非轴对称异形件。成型特点表现为多向流动、多区域变形，金属在各变形区域的流动特性及应变状态存在显著差异。(2) 阀体力学性能、精度及表面质量技术要求。阀体作为承压构件，对力学性能要求较高。以304不锈钢阀体为例，需通过形变强化和细晶强化提高材料强度，可在不降低耐腐蚀性的条件下使强度指标提高3~4倍。尺寸精度方面，阀体主孔需经高精度珩磨或研磨以确保密封性。表面质量要求光滑，无折叠、裂纹等成型缺陷^[1]。(3) 阀体成型难点与工艺设计制约因素。成型难点主要包括：多向通道结构导致金属流动路径复杂，易产生流线交叉、折叠等缺陷；壁厚差异大造成变形不均匀；温挤压温度窗口窄，需精确控制变形温度、速度等参数。工艺设计受制于材料温变形特性、模具寿命及设备能力等因素。

1.2 阀体成形工艺对比与选型

(1) 切削加工、冷挤压、热挤压等传统工艺对比分析。切削加工工序多、材料利用率低；冷挤压成形力大，对设备和模具要求高，且材料变形受限；热挤压虽

成形力小，但表面质量差、氧化严重、尺寸精度低。

(2) 温挤成形工艺的原理与成型特性。温挤成形是在材料再结晶温度以下、室温以上进行的塑性成形工艺。该工艺兼具冷挤压精度高和热挤压变形抗力低的优点。以304不锈钢为例，在200℃左右挤压时真应变变量可达1.2以上而不产生变形缺陷，变形抗力比室温变形大幅降低。

(3) 阀体最优成形工艺方案确定。综合考虑阀体结构复杂性和技术要求，温挤成形为最优方案，可在保证尺寸精度和表面质量的同时提高材料利用率和力学性能。

1.3 温挤成形工艺参数初步拟定

(1) 坯料选材与预处理工艺确定。坯料选用20Cr13或304不锈钢棒料。毛坯制备过程中需进行退火处理，退火温度850~880℃，保温1.5h，炉冷，退火硬度≤230HB。(2) 成形温度、挤压速度、挤压力核心参数初选。温挤压温度选择750℃；304不锈钢温挤压温度可控制在200℃左右；计算的温挤压力约为282.3kN。(3) 润滑工艺与保温工艺参数设定。对毛坯表面进行净化处理和润滑处理。采用水基石墨润滑剂，在300~800℃温度范围内润滑性能可靠。挤压前凸模和凹模工作部分预热温度250~300℃。

1.4 温挤成形工艺流程设计

(1) 坯料下料、加热、预处理工序设计。采用锯切下料→清理表面杂质→退火处理(850~880℃，保温1.5h)→表面净化→润滑处理。(2) 装模、挤压、脱模核心成型工序设计。模具预热至250~300℃后装模；温挤压温度750℃下完成挤压成形；挤压过程中采用喷雾装置将石墨水剂润滑剂喷向凸、凹模工作部分进行冷却润滑；成形后脱模取件^[2]。(3) 后续整形、热处理、精加工辅助工序设计。挤压件冷却后进行喷丸处理去除表面氧化皮；随后进行必要的热处理改善组织性能；最后通过车削、钻孔等机械加工达到最终尺寸精度和表面质量

要求。

2 阀体温挤成形模具整体结构设计

2.1 模具设计总体原则与技术指标

(1) 温挤模具设计的精度、强度、耐热性设计原则。温挤压模具工作循环过程中, 由于受到高温、高压和交变载荷作用, 要求模具钢应具有强度、硬度高、韧性、耐磨性和红硬性好等性能。温挤压成形最大单位挤压力可达2000~2500MPa, 连续工作条件下模具温度可达300~500℃甚至更高。模具结构设计时应尽可能有利于金属流动, 各部位受力均匀, 型腔断面形状的工作部分应光滑连接, 尽可能避免尖角、窄缝造成的应力集中源。(2) 模具装配、拆卸与量产适配性设计要求。温挤压成形用的模具要能承受成形时引起的较大轴向压力和径向压力, 要求强度高、刚度和精度能适用各种成形工序的要求, 尤其是模架要通用性好, 便于安装、调整与更换。采用锥面配合及螺钉连接方式实现快速装拆, 凸模与凸模压紧圈采用锥面配合, 以凸肩和凹槽定位^[3]。(3) 模具使用寿命与成本控制技术指标。整体式凹模强度不足时, 采用预应力组合凹模可有效提高模具强度。改用4Cr5MoSiV钢, 工作温度在400~500℃时具有较高热强度和韧性, 耐磨性、热疲劳性均较好, 在52~55HRC硬度下使用, 模具寿命提高3倍以上。

2.2 模具核心工作部件设计

(1) 凸模结构、尺寸与成型曲面设计。凸模工作部分表面粗糙度取Ra0.10~0.6μm。采用带心轴结构设计, 凸模采用锥面配合与凸模压紧圈连接。(2) 凹模型腔结构、分型面与脱模斜度设计。可采用浮动上凹模与下凹模对合结构, 挤压件在两个凹模和凸模形成的封闭模腔中挤压成形。模具材料选用W6Mo5Cr4V2温挤模具钢, 强化处理后硬度56~62HRC。(3) 型芯、定位结构等辅助成型部件设计。对多通阀体类复杂零件, 需设置型芯以成形内部通道结构。采用预应力组合凹模结构可有效利用模具材料并保证承载能力。

2.3 模具辅助系统设计

(1) 模具加热与温度控制系统设计。温挤压前凸模和凹模工作部分预热温度250~300℃。采用镶入式电热管自控器进行加热, 实现恒温控制。(2) 模具导向、定位与锁紧系统设计。采用导柱导套导向结构保证上下模合模精度。导柱与导套间隙配合, 导向结构设置在模具四周。凸模锥形紧固圈和固定圈之间的配合精度以H7/h6为宜。(3) 脱模、顶出与润滑辅助系统设计。采用顶杆顶出机构实现脱模。温挤压过程中采用喷雾装置将石墨水剂润滑剂喷向凸、凹模工作部分进行冷却润滑。氧化

硼+石墨、石墨水剂或油剂等润滑剂均可取得良好润滑效果^[4]。

2.4 模具材料选型与性能校核

(1) 凸凹模、模座等不同部件材料选型依据。凸模和凹模工作部分选用W6Mo5Cr4V2温挤模具钢, 强化处理后硬度56~62HRC。低温(200~400℃)挤压时选用3Cr3Mo3W2V、W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2等; 中温(400~500℃)挤压时选用4Cr5MoSiV、4Cr5W2SiV、5CrNiMo等。(2) 模具材料耐高温、耐磨、抗冲击性能分析。温挤压模具钢要求具备高强度、高硬度、良好韧性、耐磨性和红硬性。4Cr5MoSiV钢在400~500℃时具有较高热强度和韧性, 耐磨性、热疲劳性均较好^[5]。

(3) 关键部件强度与刚度理论校核计算。温挤压组合凹模设计需进行预应力计算, 径向过盈量按公式进行修正。凹模切向应力与径向应力峰值出现在型腔内壁拐角处, 应力集中较严重, 易导致疲劳开裂。可采用有限元软件Deform-3D进行热力耦合数值模拟, 对模具强度进行校核。整体式凹模强度不足时, 应采用组合凹模形式提高模具强度。

3 阀体温挤成形仿真分析与工艺及模具优化

3.1 仿真模型建立与参数设置

(1) 基于有限元软件的阀体与模具三维模型简化与导入。采用DEFORM-3D有限元软件建立阀体温挤成形三维热力耦合刚粘塑性有限元模型。利用SolidWorks或UG建立阀体及模具几何模型, 以STL格式导入DEFORM-3D前处理模块。对模具型腔、凸模工作带等关键部位进行网格局部细化, 坯料网格划分数控制在80000~120000单元。(2) 材料属性、摩擦系数、边界条件参数设定。304不锈钢材料本构模型采用应变补偿的Arrhenius型模型或修正Johnson-Cook模型。温度范围1173~1473K, 应变0.1~0.8, 应变速率0.01~10s⁻¹。摩擦系数取0.15~0.25。坯料初始温度200~750℃, 模具预热温度250~300℃, 环境温度20℃, 传热系数取5~10N/(s·mm·℃)。(3) 仿真加载方式与求解方案确定。采用多向顺序加载或多向分步加载方式。求解器选用Newton-Raphson迭代法, 时间步长设置为0.001~0.01s/步, 每步最大迭代次数25次, 收敛容差0.001。

3.2 温挤成形过程仿真结果分析

(1) 成形过程中金属流动规律与填充效果分析。模拟结果表明, 成形过程中金属流动比较均匀, 金属流线基本沿锻件轮廓方向。在多向受力条件下, 主动力交叉易引起流线交叉, 在流线交叉部位可能出现拉伸缺口或流线折叠。优化后的锥度设计可有效改善材料流动行

为。(2) 成形应力、应变分布规律分析。工件等效应力在224~267MPa范围内。凹模切向应力和径向应力峰值均出现在型腔内壁拐角处附近,应力集中较严重,容易导致凹模的疲劳开裂。温挤压成形时真应变变量可达1.2以上而不产生变形缺陷。(3) 挤压力、成形温度随时间变化曲线分析。仪表阀体多向可控精密成形模拟最大载荷为 $6.21 \times 10^6 \text{N}$ 。成形过程中坯料温度随变形功的增加而升高,可通过调整凸模加载速度和坯料初始温度控制温度非均匀性。

3.3 成形缺陷分析与工艺参数优化

(1) 阀体成型褶皱、缺料、变形等缺陷成因分析。阀体锻件表面缺陷多属于金属流动不合理造成的折叠缺陷。不同加载方式对缺陷影响显著:第1种加载方式成形困难,易产生毛刺和锻造不满;第2种加载方式易产生折叠缺陷。多向压应变易形成流线折叠。(2) 基于仿真数据的温度、速度、压力参数优化。最佳工艺参数组合为:坯料温度200~750℃,凸模速度10~12mm/s,摩擦系数0.15。采用多向分步加载时挤压力曲线平滑,不会出现金属折叠。(3) 优化后工艺方案的成型效果验证。第3种、第4种加载方式可有效避免成形缺陷。模拟得到的锻件充填饱满,试验产品与模拟结果具有较好的一致性。

3.4 模具结构优化与性能验证

(1) 模具应力集中、磨损隐患位置分析。凹模切向应力和径向应力峰值均出现在型腔内壁拐角处附近,应力集中较严重。局部应力过大是导致模芯开裂的主要原因。(2) 模具型腔、导向结构、紧固结构优化设计。

通过优化上模结构、增设溢流槽等措施增大金属流动面积,显著降低模芯内腔局部应力和上模载荷。采用有预应力的组合式凹模替代整体式凹模,应力应变分布更为理想。(3) 优化后模具整体工作性能仿真验证。基于Deform-3D模拟结果提取模具应力及温度场分析结果,进而在ANSYS中建立热力耦合有限元分析模型进行验证。优化后的组合凹模可有效提高模具强度和使用寿命。

结束语

本文完成了阀体温挤压成形工艺规划与模具系统化设计,通过有限元仿真明晰了成形过程的金属流动、应力应变分布特征,解决了阀体折叠、缺料等成型问题。经参数与结构优化,有效改善了模具应力集中现象,提升了成形质量与模具耐用性。研究验证了温挤压工艺应用于阀体成型的可行性与优越性,可为同类异形承压零件的塑性成形工艺及模具设计提供重要参考。

参考文献

- [1]王强,张治民,李旭斌.复杂阀体温热挤压成形缺陷及工艺参数优化[J].塑性工程学报,2023,30(05):89-95.
- [2]刘长红,程俊伟,冯宪章.基于数值模拟的阀体复合挤压成形工艺与模具设计[J].模具工业,2023,49(08):223-228.
- [3]徐胜利,李春玲,周娟利.不锈钢阀杆温挤压成形工艺及模具结构优化[J].热加工工艺,2024,53(11):102-106.
- [4]赵志远.复杂多通阀体温挤压成形模具设计与失效分析[J].模具技术,2024,17(04):45-50.
- [5]李明浩.高压阀体温挤压成形工艺改进与模具精度控制[J].机械设计与制造,2024,22(09):189-192.