基于DEFORM-3D的微通道铝扁管挤压模具 结构优化

任晓雄¹,孙奎洲¹,杨 瑞²

¹江苏理工学院机械工程学院,江苏 常州 ²江苏共昌新材料科技有限公司,江苏 常州

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年6月19日; 发布日期: 2025年6月26日

摘要

采用刚塑性有限元软件DEFORM-3D对微通道扁管的挤压成形进行数值模拟,运用绘图软件SolidWorks 建立了模具的三维仿真模型;基于有限元分析软件平台,对该型材的挤压过程进行了模拟仿真分析,获 得了模具挤压微通道扁管时,焊合面上静水应力、金属速度的分布以及变化规律,并对模具结构进行了 优化设计,保证了挤压型材的尺寸精度和模具的使用寿命。

关键词

挤压模具,DEFORM-3D,模拟仿真,结构设计

Optimization of Microchannel Aluminum Flat Tube Extrusion Die Structure Based on DEFORM-3D

Xiaoxiong Ren¹, Kuizhou Sun¹, Rui Yang²

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu ²Jiangsu Gongchang New Material Technology Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: May 26th, 2025; accepted: Jun. 19th 2025; published: Jun. 26th, 2025

Abstract

Numerical simulation of the extrusion forming of microchannel flat tubes was carried out using the rigid plastic finite element software DEFORM-3D, and a three-dimensional simulation model of the

mold was established using the drawing software SolidWorks. Based on the finite element analysis software platform, the extrusion process of the profile was simulated and analyzed, and the distribution and variation law of static water stress metal velocity on the welding surface during the extrusion of microchannel flat tubes by the mold were obtained. The mold structure was optimized to ensure the dimensional accuracy of the extruded profile and the service life of the mold.

Keywords

Extrusion Die, DEFORM-3D, Simulation, Structure Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 引言

平行流式微通道换热装置作为高能效比、环保的新型热交换系统的关键,在汽车制冷领域已实现规 模化应用。其中,由铝型材冷轧后经高温塑性变形工艺制备的微通道扁管,因其结构特性成为该类换热 器的核心功能元件。其加工质量不仅取决于原材料成分控制,更直接制约着设备效能及使用寿命。

当前研究表明,传统工艺参数优化方法难以精准匹配成形需求,导致出口截面温度分布不均等缺陷 产生,最终直接影响最终成品的几何精度和模具使用周期[1]。铝合金微通道扁管的热挤压成形过程中, 温度波动显著影响着制品的质量特性。具体而言,模孔出口区域的温度变化会直接作用于扁管材料的微 观组织均匀性及其力学性能表现,而这又与最终产品的质量水平呈强关联关系[2]。基于设备的安全运行 约束,在实际生产中通常采取等温挤压工艺来调控变形过程中的热力学参数。该工艺能够有效抑制模孔 出口处因温度梯度过大所引发的质量缺陷,从而保证制品的几何精度和性能一致性,同时延长模具的使 用寿命。

随着智能制造技术的迭代升级,数值模拟与工程经验融合方法为模具研发领域注入了创新动能[3]。 通过构建多阶段分步建模策略结合有限元分析(FEA),本研究将分流组合模挤压过程划分为多个关键成形 阶段,在每个子流程中实施动态网格重构算法并优化时间步长参数,同步引入自适应体积补偿机制以消 除数值模拟中的材料守恒误差[4]。基于 DEFORM-3D 软件平台的工程实践表明:该方法成功实现了对挤 压过程的仿真,并通过数据分析完成模具结构优化设计。研究成果不仅为工艺参数选配及模具改进提供 了定量决策依据,更有效缩减了试模迭代次数,显著提升了铝型材制造系统的生产效能。

2. 建立铝型材挤压过程的模拟模型

2.1. 模型参数设定

所研究的微通道铝扁管在使用过程中孔内充有冷却介质,用作汽车冷凝系统中的流体导管。为提高 其导热率,铝扁管常被设计成薄壁多孔。本文所研究扁管孔数为 7 孔,孔间筋厚和边缘壁厚分别为 0.3 mm 和 0.25 mm,其横截面如图 1 所示。

2.2. 模具结构

本文聚焦于一类空心铝合金型材挤压成形模具参数优化问题的研究范畴。在开展数值仿真计算之前, 基于 SolidWorks 软件构建了该分流组合模具的参数化三维几何模型。所述平面分流组合模具采用双模块 结构框架,主要包含上模组件与下模基座两大部分(参见图 2)。该模块化结构采用定位销与紧固螺栓的机 械配合实现上下模座精准对位,需特别说明的是,在图 2 中以简略形式呈现关键部件连接关系。

上模组件由分流系统与成型模块构成:包含用于引导金属流动路径的分流通道网络,以及支撑核心 成形部件的分流桥结构。该分流桥不仅起到机械承载功能,更为关键的是其几何形态直接决定了模芯安 装位置的精度稳定性。所述模芯作为型材内腔成型的关键组件,其三维轮廓参数精确控制着最终制品内 部腔体的空间尺寸与形状特征。

下模基座配置了焊合室用于铝锭端部金属流汇合,同时整合模孔型腔以实现外轮廓成型。值得注意 的是,模具工作带的外部几何参数严格遵循所匹配挤压设备标准模套的接口规范要求进行适配设计。



图 2. 挤压模具三维模型

2.3. 模具的有限元分析

模型模拟分析采用 DEFORM-3D。求解器使用稀疏矩阵法,迭代方法使用牛顿-拉森法,结合使用 稀疏矩阵法与牛顿-拉夫森法是一种强大的方法,适用于处理大规模非线性系统和优化问题。具体来说, 这种结合方法能够高效地利用计算资源,减少存储需求,并通过快速收敛获得高效的求解过程[5]。

将建立好的三维模型以 STL 格式导入到 DEFORM-3D 软件中,在软件中对所建立的模具检查各 结构对应关系,对坏料进行体网格划分,提取挤压时工作带的内外部曲线。注重网格划分的质量,对 畸形的网格要进行手动调整,使网格质量达到规定的标准,否则会影响到后续模拟分析得到的结果。 为节省模拟时间和数据存储空间,利用零件的对称性取其 1/4 进行计算。得到挤压分析有限元模型如 图 3 所示。



Figure 3. Finite element analysis of three dimensional model 图 3. 有限元分析三维模型

3. 铝挤压模拟分析参数的设置

3.1. 挤压工艺参数

数值模拟采用刚粘塑性有限元法,忽略弹性变形,所以把坯料设为刚塑性体,模具和其它工件都设置为刚性体。模拟挤压参数设置如表1所示。

参数	数值	
胚料材料	1100	
模具材料	AISI-H13	
坯料初始温度/℃	480	
模具预热温度/℃	500	
挤压速度/mm/s	15	
剪切摩擦系数	0.3	
界面热传导系数	20	

 Table 1. Simulated extrusion process parameters

 表 1. 模拟挤压工艺参数

挤压毛坯和模具接触面上的行为采用塑性剪切模型来描述,在分流组合模挤压过程中,为保证焊合 质量一般不润滑,所以摩擦系数取 0.3,铝合金材料选择 AA1100 铝合金,模具材料选择 H13 钢,材料的 相关参数如表 2 所示。

3.2. 模拟条件的设置

在应用有限元方法对薄壁复杂截面空心铝合金型材的挤压试验进行数值模拟时,仍然面临显著的技术挑战。这类材料的挤压比往往超过100,导致坯料在变形前后的几何形态发生剧烈变化。这使得模拟过程中对焊合过程的数值建模成为一个难题。具体而言,在不同成形阶段和工件各部位之间,变形程度存

在显著差异,这种非均匀性增加了有限元网格划分的难度。同时,时间步长的选择对计算结果的准确性 和运行效率具有直接影响,这对参数优化提出了更高要求。此外,在模拟过程中,材料体积的损失现象 难以完全避免,尤其在三维复杂成形条件下,这一问题更加突出。即要求我们采取合适的网格划分、步 长划分和体积损失的惩罚因子。

Table 2. Performance parameters of 1100 aluminum alloy and H13 steel 表 2. 1100 铝合金和 H13 钢的性能参数

材料	杨氏模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	比热/(J·(kg·K) ⁻¹)
AA1100	7.5 × 1010	0.32~0.35	2700	203	880
H13	2.1 × 1011	0.35	7870	24.3	460

4. 数值模拟结果与分析

4.1. 金属的流动

通过有限元模拟结果可以充分验证分流组合模挤压过程中的金属流动行为,其具体可分为三个典型 阶段(如图 4 所示)。图 4(a)展示了分流阶段的特征:实心坯料在初始状态下被分割成若干流道,并导向至 分流孔。随后,在图 4(b)中进入焊合阶段:多股金属流汇入焊合室后,在高温高压条件下重新结合并包 覆模芯,形成连续的金属流。最后,图 4(c)展示的是成形阶段:经过焊合的金属在模芯与模孔之间的间隙 中被挤压成型,最终获得所需形状和尺寸的空心铝型材。



4.2. 静水压力

图 5 展示了成形件在挤压过程中的静水压力场分布特征。在分流组合模挤压系统中,焊合面上所 受到的静水压力是决定金属结合质量的关键因素,其数值水平直接影响到型材的综合性能。只有当焊 合面的平均静水压力达到铝合金屈服强度以上(即超过材料的变形临界值),才能确保实现可靠的金属 结合。

为定量评估焊合效果,研究在焊合面上选取了六个具有代表性的监测点,计算其等效平均静水压力。 测试结果显示该区域的平均静水压力达到 183 MPa (图中负号代表与选取方向相反)。试验铝合金的屈服 强度为 40 Mpa,这一压力值显著超过材料变形所需的临界条件,满足焊合工艺的技术要求。



Figure 5. Distribution characteristics of static water pressure field 图 5. 静水压力场分布特征

4.3. 速度场的分析

在挤压过程达到稳定流出处阶段时,铝扁管横截面上的最大线速度被测得为187 mm/s。然而,从图6 中可以观察到,尽管整体流速呈现出一定规律,但铝扁管中部区域的金属流动速率显著高于其端部区域, 这一现象导致了型材头部出现平整度欠佳的问题,这种趋势在挤压初始阶段尤为明显。





造成此现象的原因主要在于型材横截面几何形状较为复杂。具体而言,挤压筒中心部位的金属流速 普遍快于边缘区域的流动速度。此外,挤压过程中各点所受应力状态和变形程度的差异性也是导致流动 分布不均匀的重要因素。出口处流速分布的非均匀特性可能引发型材表面出现波浪状、扭曲等质量问题。 因此,采用具有优化分流孔布局的分流组合模具,并合理分配工作带的位置,以实现对出口流速的有效 调控,最终达到确保模具出口区域流速均匀性的目标。

5. 优化设计

5.1. 模具结构的模拟优化

根据以上分析和生产验证结果对初始方案进行优化设计。考虑到该型材为微通道铝扁管且在局部区 域具有小特征,而分流模可以挤压大的胚料,且可以通过改变分流孔的、大小、形状与位置用来平衡和 调节金属流量和流速,因此优化设计采用焊合室多锥形结构[6]。第一锥形为 20°、第二锥形为 25°。考虑 型材尺寸和模具位移因素,在下模增加了锥形过渡结构并与原模具结构进行对比,如图 7 所示。



图 7. 双锥形过渡模具与原模具结构对比

5.2. 多锥形结构静水压力

选取同样位置的六个监测点,计算其等效平均静水压力。测试结果显示该区域的平均静水压力达到 150 MPa(图中负号代表与选取方向相反)。如图 8 所示,这一压力值虽与原结构静水压力有所下降,仍显 著超过材料变形所需的临界条件,充分满足焊合工艺的技术要求。

5.3. 多锥形结构速度场

改变结构后在挤压过程达到稳定流出处阶段时,铝扁管横截面上的最大线速度被测得为 461 mm/s。 如图 9 所示,较原结构有显著提升。

总的来说,本文所述多锥形模具和传统的平面分流模相比具有如下优点:传统的平面分流组合具在 挤压机挤压铝棒料的时候,棒料和模具下模接触面是平面,这非常容易造成胚料与下模接触部分的金属 流动性差;而多锥形模具通过结构的创新,可增加金属流动性,减少了静水压力的大小,提高了模具的 使用寿命。虽然多锥形模具会造成后续切残料工艺的麻烦,但是通过改进切残料的方法可以实现多锥形 模具的残料切割。本文所述多锥形模具从模具结构上提出了创新思路,有望对模具寿命有较大提升。



Figure 8. Distribution characteristics of static water pressure field 图 8. 静水压力场分布特征





6. 结论

(1)获得了挤压成型时,型材挤出速度场、焊合室的静水压力参数的分布规律,为以后铝型材挤压模具的设计、制造、修正提供了重要依据。

(2) 根据模拟仿真得到的结果对模具的结构进一步进行改进,设计了一种焊合室双锥形过渡结构,并 对其进行数值仿真,增加锥形过渡结构后可以减小焊合室静水压力,增大型材挤出速度而且可以提高型 材的焊合质量。

(3) 在实际生产挤压试模时,利用有限元仿真软件 DEFORM-3D 对铝型材挤压模具进行模拟挤压, 不但可以预测型材缺陷,也可以减少试模修模的次数。

基金项目

江苏理工学院研究生实践创新计划项目 XSJCX24_16。

参考文献

- [1] 王旭, 孙凯, 闫彩霞, 等. 空调用铝扁管换热性能研究[J]. 轻工标准与质量, 2022(2): 105-109.
- [2] 曾翠婷. 换热器用微通道铝扁管市场前景及生产技术浅析[J]. 有色金属加工, 2020, 49(5): 6-8.
- [3] Xu, L., Pei, Y., Liu, Z., Gao, C., Xie, P., Xu, C., et al. (2024) Manufacturing of Curved Profiles Using an Extrusion-Bending Continuous Forming Process. *Thin-Walled Structures*, 199, 111831. <u>https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111831</u>
- [4] Yıldız, A., Kurt, A. and Yağmur, S. (2020) Finite Element Simulation of Drilling Operation and Theoretical Analysis of Drill Stresses with the DEFORM-3D. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **104**, 102153. <u>https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102153</u>
- [5] 代传民, 滕兆龙, 马强, 等. 平行流换热器在空调器柜机中应用的实验研究[J]. 家电科技, 2021(6): 42-44.
- [6] 褚亮,宫小龙,韩彦龙,等. 薄壁管锥形模扩口工艺参数影响分析与最佳模具半锥角解析[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(3): 115-125.