

基于模具设计改进的铝型材产量与质量提升路径分析

周莲芝 周源

贵州雄起铝业科技有限公司，贵州铜仁，554300；

摘要：随着铝型材在建筑、交通、电子等领域的广泛应用，企业对产品质量和生产效率的要求日益提高。模具作为铝型材挤压生产中的核心部件，其设计水平直接影响金属流动、型材成形质量及生产效率。本文从模具结构、材料选择、热处理工艺、流道设计与冷却系统等关键因素入手，系统分析模具设计对产量与质量的影响机制。通过引入 CAE 模拟优化、结构标准化与寿命管理等改进路径，提出一套基于问题导向的优化方案。结合某铝型材企业模具改造实践，验证了改进措施在提升型材质量稳定性、延长模具寿命及提高产线产能方面的显著效果。研究结果为铝型材企业推进模具设计优化与智能制造提供了理论支持与实践指导。

关键词：模具设计；铝型材；产量提升；质量控制

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.032

引言

铝型材因其质量轻、强度高、加工性好等优点，被广泛应用于各类工业与民用领域。在铝型材挤压生产过程中，模具是控制金属流动方向与速度、决定型材断面形状与精度的关键装备。随着市场对高性能、定制化铝型材需求的持续增长，传统模具设计暴露出诸多问题，如流道不均、模具寿命短、加工误差大、冷却系统效率低等，不仅影响了产品质量的一致性，也制约了产线的生产能力和柔性响应速度。因此，探索以问题为导向的模具结构优化与设计改进路径，已成为提升铝型材制造水平的迫切需求。

1 铝型材生产工艺及模具设计现状分析

1.1 铝型材挤压成型工艺概述

铝型材的挤压成型是一种将加热后的铝合金锭通过专用模具，使其形成具有特定断面形状连续型材的工艺过程。整个流程通常包括铝棒加热、挤压成型、冷却、拉伸矫直、锯切及热处理等环节。其中，模具在挤压过程中起到了关键的成型作用，其结构设计直接决定了金属流动的均匀性、挤压阻力的大小以及型材成品的尺寸精度。随着工业对高性能铝型材需求的日益增长，传统的挤压方式面临着效率低、废品率高以及模具寿命短等一系列问题，对模具设计和制造技术提出了更高要求。

1.2 现有模具结构类型及功能

目前铝型材挤压模具主要分为实心模和空心模两

类，其中空心模包括桥式模和孔眼模，适用于各种中空型材的生产。模具通常由工作带、承压板、分流孔、支撑结构等部分组成，不同结构的模具适应不同的挤压压力和流动路径。现代模具设计越来越强调结构的模块化与标准化，便于更换和维修。在功能方面，模具不仅要保证型材的断面精度和表面质量，还需要具备良好的耐磨性和热稳定性。部分先进模具还集成了冷却系统和传感装置，以提升成型精度和模具使用寿命。但多数中小企业仍沿用传统模具设计，缺乏系统化的优化和智能化应用，导致产品一致性差，生产节拍不稳定。

1.3 典型模具设计问题对产量与质量的影响

模具设计不合理是限制铝型材产量和质量提升的关键因素。例如，模具流道设计不均，会造成金属流速差异，导致型材截面变形、厚薄不一，严重时出现裂纹、毛刺等缺陷。此外，模具工作带长度设计不合理会影响金属的塑性流动，进而影响挤压力和型材尺寸精度。模具热处理不到位或材料选择不当，也会使其在挤压过程中发生变形或疲劳损坏，缩短模具寿命，频繁更换影响生产效率。这些问题不仅增加了生产成本和工时，也不利于企业在高端市场中形成竞争力。

1.4 存在的主要技术瓶颈

当前模具设计与制造在多个方面面临技术瓶颈。首先是设计经验依赖性强，缺乏数字化、参数化设计工具，导致模具开发周期长、优化迭代效率低。其次，有限元模拟技术在中小企业中的应用程度较低，难以在设计阶段准确预测金属流动行为和模具热应力分布，从而影响

模具性能预判。再次，模具加工精度受限于设备条件，常出现装配误差和加工偏差，影响最终成品一致性。最后，模具的维护与寿命管理体系尚不健全，缺乏有效的失效监测与预警机制，常因突发性损坏导致生产中断。解决上述问题需要引入 CAE 辅助设计、提高加工工艺水平，并构建模具全生命周期管理体系，实现产量与质量的双重提升。

2 模具设计对铝型材产量与质量的关键影响因素

2.1 模具材料的选用及热处理工艺

模具材料的性能直接决定其在高温高压工作环境中的稳定性与耐久性。在铝型材挤压过程中，模具需承受周期性的机械冲击及持续的热负荷，若选材不当，极易出现热疲劳裂纹、塑性变形或早期磨损。目前，主流模具材料为 H13、SKD61 等高合金热作模具钢，它们兼具高温强度、良好的淬透性和抗热裂性能。然而，仅有优质材料并不足以保障模具性能，合理的热处理工艺同样关键。通过调控淬火温度、回火次数及时效处理，可以优化模具内部的金相组织，提高其硬度与韧性平衡。若热处理工艺控制不严，如加热不均或冷却不当，可能导致模具硬度分布不均，局部易损坏，进而影响模具寿命与型材产品的稳定性，间接制约产量提升。

2.2 流道设计与金属流动控制

铝型材在挤压成型过程中，金属的流动状态决定了最终产品的结构完整性与尺寸精度。模具内流道设计的科学性直接影响金属流速是否均匀。如果流道宽度或长度设计不合理，会导致金属流速分布不均，出现偏流、滞留或紊流等现象，进而引发型材翘曲、裂纹或内部疏松等缺陷。此外，不同型材断面结构复杂程度不一，对流道形式的适应性要求高。对于空心型材来说，分流孔和焊合室的设计尤为关键，稍有不当就可能造成焊合不良或厚度不均，严重影响质量。金属流动控制的优劣还关系到挤压力的变化情况，间接影响设备负载与单位时间产出。因此，合理的流道设计是保障高产、优质生产的基础条件。

2.3 模具结构精度与加工误差控制

模具结构的制造精度是确保铝型材产品尺寸一致性与外观质量的核心环节。在模具设计图样基础上进行加工时，若未达到设计精度，常导致装配间隙偏大、受

力不均，进而影响挤压过程中的金属流动路径和压制压力均衡。加工误差也会加剧模具各部件的局部磨损，缩短模具整体使用寿命。尤其在复杂断面的型材模具中，任何微小的尺寸偏差都可能放大为产品的结构缺陷。此外，模具结构件之间的协调配合程度，直接影响型材的脱模顺畅度和成型完整度。现代模具对结构精度的要求已从“合格”提升为“高一致性”，任何加工偏差都会在量产过程中累计成系统性误差，最终影响批量产品的尺寸稳定性与合格率，造成原材料与人力资源的浪费。

2.4 模具冷却系统与热平衡管理

在铝型材挤压过程中，模具长期处于高温运行状态，若热量积聚得不到及时释放，会造成模具局部过热，引发金属粘附、模腔烧蚀甚至结构变形等问题。冷却系统的有效性直接关系到模具温度控制能力，进而影响型材表面质量和尺寸精度。传统模具多依靠自然冷却或简易水冷方式，难以实现精确控温，容易产生温差梯度大、模具热应力集中等问题。而模具温度的不均衡还会导致金属流动的不均匀，使得型材结构不对称、表面粗糙，甚至影响挤压速度的稳定性，降低整体生产效率。合理的热平衡管理不仅可以提高模具的工作稳定性，还能延长其使用寿命，减少更换频率，从而保障生产的连续性和产品的一致性。

3 基于问题导向的模具改进路径分析

3.1 优化模具结构设计提升金属流动均匀性

在铝型材挤压成型过程中，金属流动的不均匀性是导致型材截面变形、尺寸误差和表面缺陷的根源之一。传统模具结构设计多依赖经验，缺乏系统性流动分析支撑，常出现流道布局不对称、焊合室空间不足、模具工作带设计不合理等问题。要提升金属流动的均匀性，必须从整体结构上进行优化。具体而言，应根据不同型材断面特点，对分流孔径大小、分流桥宽度及焊合腔空间布局进行重新设计，使金属在模具内部路径最短、阻力最小的前提下，实现多方向汇流的同步化、等速化。工作带的长度和倾斜角也应依金属流动速率梯度进行调整，以实现压缩区应力的均衡分布，减少局部高应力点的存在。通过对模具内部流场的精细调控，可有效减少型材表面缺陷，提高断面成形精度，显著提升产品合格率和产出效率。

3.2 应用 CAE 模拟技术辅助模具优化

传统模具设计往往存在“试错式”迭代过程，周期长、成本高，且优化程度受限于设计者经验。随着计算机辅助工程（CAE）技术的快速发展，尤其是流体力学、热传导及金属塑性变形模拟技术的成熟，模具设计可在制造前实现全流程虚拟验证。通过 CAE 软件，如 HyperXtrude、DEFORM 等，可模拟铝合金在不同模具结构和工艺参数下的流动路径、温度分布及应力集中区域，进而识别潜在问题，如金属滞留、焊合不良、局部过热等。在设计阶段引入模拟分析，能够为结构优化提供科学依据，缩短试模时间，降低试模成本，同时避免由于设计盲点带来的质量隐患。此外，CAE 技术还能根据模拟结果对模具结构进行自动调整与参数优化，形成快速迭代设计闭环，显著提升模具开发效率和准确性。推广 CAE 辅助设计，是从“经验设计”走向“数据驱动设计”的关键路径。

3.3 标准化模具设计提升生产效率

当前铝型材生产中存在的一个普遍问题是模具非标程度高、通用性差，导致更换频繁、调试复杂、备件管理困难，制约了生产的连续性和响应速度。构建标准化模具体系，不仅有助于降低设计与制造成本，还能提升生产管理的系统化与精益化水平。标准化应从模具零部件的尺寸统一、接口规范入手，推广模块化设计理念，使常用部件如模垫、模套、导向结构等实现互换性和通用性。在此基础上建立模具库管理系统，实现模具编码、状态跟踪和使用记录的数字化管理。标准化还可以缩短换模时间，减少调试误差，提升整线生产节拍的一致性，最终实现高效率、低损耗的生产模式。尤其对于订单多样化、批量多变的铝型材企业，标准化模具能够提升响应速度和交付能力，是推动规模化与柔性化并行发展的重要支撑。

3.4 模具维护与寿命管理机制改进

模具的寿命管理在铝型材生产中往往被忽视，许多企业仍采用“用坏即换”或“周期性更换”方式，缺乏对模具真实工作状态的动态监控与预警机制。事实上，模具损耗是逐步累积的过程，合理的维护策略可以显著延长其使用寿命，减少非计划停机时间。首先应建立模具使用全过程的记录系统，涵盖使用次数、维修频率、缺陷类型等数据，以形成完整的寿命档案。其次，通过引入温度、应力、磨损传感器等在线监测技术，实时掌

握模具工作状态，实现故障早发现、早干预。同时，制定精细化的维修与再制造标准，对模具的关键部位进行定期检测与局部修复，避免整套报废造成资源浪费。此外，应将模具寿命指标纳入质量成本分析体系，从全生命周期角度评估模具投入产出效益，为模具采购、升级及设计提供科学决策依据。完善的模具维护与寿命管理机制，不仅提升模具可靠性，也为铝型材生产的高质量运行提供了坚实保障。

4 模具改进对铝型材产量与质量提升的实践应用分析

4.1 某铝型材企业模具优化改造项目概述

随着市场对高精度、高性能铝型材产品需求的不断提升，某沿海大型铝型材制造企业启动了一项模具优化改造专项工程，旨在通过系统性模具结构升级与工艺优化，实现产能提升与产品质量双重突破。该企业主要生产建筑型材、工业型材及部分高端定制型材，长期面临产线换模频繁、型材合格率波动大、挤压效率低等问题。项目初期，通过调研产线模具使用现状，发现模具材料选型不规范、结构设计不合理、流道布局不平衡、冷却系统老化等是造成质量不稳定的主要因素。为此，企业组建了以技术部、模具车间和质检中心联合参与的专项改进小组，采用问题导向、目标驱动的原则，对重点产品线的模具进行全面分析与优化，计划通过三个月的集中攻坚，实现模具平均寿命提升 30%、单位产量提升 15%、不合格率下降 50% 的目标。

4.2 关键模具改进措施及实施效果

在模具优化过程中，企业首先对所有高频次使用的模具进行了材质替换，选用性能更稳定的 H13 热作模具钢，并引入真空淬火与多次回火热处理工艺，提升模具的整体热稳定性和抗裂性。在结构方面，针对复杂断面的工业型材模具，重新设计了分流孔与焊合室，使金属流动更趋均衡，有效降低了因偏流造成的断面缺陷。同时，利用 CAE 软件对模具内部金属流动进行模拟分析，根据仿真结果调整流道尺寸及工作带结构，确保型材成型压力均衡，减少翘曲变形。针对模具冷却效率低问题，全面改造了模具冷却水道系统，优化冷却路径，并引入局部控温装置，实现模具温度的动态调节。改进后，模具在高温下的变形率显著降低，型材表面粗糙度平均下降了 15%，型材一次成品率由原先的 86% 提升至 95% 以上。

挤压效率提升也十分显著，部分产线每日产量提升近 20%。

4.3 改进前后产量与质量对比分析

从项目实施前后的数据对比可以看出，模具优化带来的效益十分明显。以企业主要生产的某空心建筑型材为例，原使用老模具时，平均挤压速度为每分钟 4.8 米，成品率约为 84%，模具寿命为 850 模次；而改进后的模具使挤压速度提升至每分钟 5.6 米，成品率提高至 95%，模具使用寿命达到了 1200 模次以上，使用周期延长了 40%。质量方面，产品的表面划痕、裂纹和尺寸不稳定问题明显减少，客户退货率由月均 1.5% 下降至 0.3%。此外，产品尺寸一致性提高后，大大减少了后段精整、裁切和返修工序，降低了人工成本和废料率。生产线平均单班产量由原来的 10 吨提升到 12.2 吨，在维持相同设备配置条件下实现了产能的有效扩展。这一系列数据表明，模具的结构与功能优化对于生产效率和产品质量具有决定性影响，是真正实现精益化生产的重要环节。

5 总结

通过对铝型材模具设计的系统优化与改进，可以有效提升金属流动的均匀性、模具结构的精度与寿命管理

水平，从而显著提高产品质量与生产效率。本文从模具材料、流道设计、结构控制、冷却系统等关键因素出发，结合 CAE 模拟与标准化策略，探讨了切实可行的改进路径，并通过实际企业案例验证了其在产量提升、质量优化与经济效益方面的明显成效。研究表明，模具设计的优化不仅是解决产线瓶颈的技术手段，更是推动铝型材行业高质量、智能化发展的重要驱动力。

参考文献

- [1] 袁凯. 探讨 6063 铝型材挤压质量与产量的优化与提高[C]//第四届广东铝加工技术国际研讨会论文集. 2013: 496-498.
- [2] 林轶韬. 铝型材静电喷涂控制系统研究与开发[D]. 广东: 广东工业大学, 2021.
- [3] 安丛雪. 异形铝型材挤压成形数值模拟与模具 CAD 系统开发[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2015. DOI: 10.7666/d.D794890.

课题项目：贵州省科技计划项目“铝型材自动化生产加工工艺关键技术研究”编号：黔科合成果[2023]一般 486.