

铝合金挤压模具工作带长度对金属流速均匀性的影响

张 强

天津市金鼎线材制品科技开发股份有限公司 天津 300308

【摘要】：铝合金反向挤压模具工作带是调控金属流速均匀性的关键结构，直接影响异型材成形质量与尺寸精度。为解决复杂截面型材流速不均、易变形的问题，以 7075 铝合金航空异型材为研究对象，采用 Deform 软件建立数值模拟模型，对比分析等长、不等长及渐变三种工作带设计对流速、变形及温度分布的影响规律。结果表明，渐变工作带可显著提升流速均匀性，同时改善变形与温度分布状态。研究为铝合金异型材反向挤压模具优化提供理论依据与技术参考。

【关键词】：反向挤压；铝合金异型材；工作带；流速均匀性

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.024

铝合金因密度小、比强度高、耐腐蚀性好，成为航空航天领域核心结构材料。反向挤压具有金属流动均匀、变形抗力小、温升低等优势，是制备高性能铝合金异型材的关键工艺。复杂截面异型材挤压时，壁厚不均易引发流速失衡、扭拧翘曲等缺陷，模具工作带设计直接决定流动阻力分布，是调控流速与成形质量的核心环节。现有等长、普通不等长工作带难以适配复杂截面流动特性，流速均匀性调控效果有限。本文基于数值模拟，探究不同工作带长度对金属流动的影响，为模具结构优化提供支撑。

1 工作带长度对金属流速均匀性的影响机理

1.1 工作带长度与金属流动阻力的关联

工作带长度直接决定金属在模孔定径段的接触面积与摩擦作用强度，进而改变流动阻力大小。金属流经工作带时，与模具表面产生持续剪切摩擦，工作带长度增加会使摩擦接触路径延长，单位面积摩擦损耗累积增大，整体流动阻力随之上升。反之，工作带长度缩短会减少摩擦接触时间，流动阻力显著降低。铝合金异型材截面存在壁厚差异，不同区域金属流动路径不同，工作带长度对各区域阻力的调控效果呈现差异化特征[1]。薄壁区域金属本就因截面狭窄存在较高流动阻力，工作带长度变化对其阻力影响更为敏感，厚壁区域流动空间充足，阻力受长度变化的影响幅度相对平缓，这种差异化影响直接打破金属流速的均衡状态。

1.2 不同长度工作带的摩擦阻力分布特征

不同长度工作带会形成差异化的摩擦阻力分布形态，直接作用于金属流动过程。较短工作带的摩擦作用集中在模孔出口附近，摩擦阻力分布范围窄且强度集中，金属流经时阻力变化梯度大，易在局部形成流速突变。中等长度工作带的摩擦阻力分布相对均匀，沿模孔轴向的阻力变化平缓，金属流动过程中受力状态稳定，流速波动幅度较小。较长工作带的摩擦阻力分布范围广且强度持续累积，摩擦作用贯穿定径段全程，金属需克服持续增大的阻力流动，整体流速被显著抑制，且在截面不同位置形成梯度式阻力差。摩擦阻力分布的差异化特征，会使

金属在模孔内的流动速度产生区域性差异，逐步加剧流速分布的不均匀程度。

1.3 壁厚差异下工作带长度对流速的干扰

铝合金异型材的壁厚差异是工作带长度影响流速均匀性的关键介质条件，壁厚变化与工作带长度的耦合作用会放大流速不均效应。薄壁区域截面尺寸小，金属流动通道狭窄，流动过程中内部剪切变形剧烈，流动阻力本身处于较高水平。当匹配较长工作带时，薄壁区域金属需同时克服内部变形阻力与外部摩擦阻力，双重阻力叠加会大幅降低流动速度；匹配较短工作带时，摩擦阻力虽有降低，但内部变形阻力仍制约流速提升。厚壁区域截面尺寸大，金属流动通道宽敞，内部剪切变形程度弱，流动阻力基数较低。即使匹配较长工作带，摩擦阻力增加对整体流动的影响有限，流速下降幅度小；匹配较短工作带时，低阻力环境会使流速进一步加快。薄壁与厚壁区域在相同工作带长度下呈现相反的流速变化趋势，直接导致型材截面流速分布失衡。

1.4 工作带长度引发流速不均的核心诱因

工作带长度通过改变金属流动过程中的阻力构成与应力分布，成为引发流速不均的核心诱因。金属反向挤压过程中，模孔内的流动状态由内部变形阻力、模具摩擦阻力共同决定，工作带长度是调控摩擦阻力的核心变量。长度不合理的工作带会打破两种阻力的平衡关系，使不同截面区域的阻力配比出现显著偏差[2]。短工作带难以有效抑制厚壁区域的过快流速，无法平衡薄壁区域的流速劣势；长工作带过度抑制整体流速，且对薄壁区域的抑制作用远大于厚壁区域，进一步拉大流速差距。工作带长度的不合理设置还会导致模孔出口处金属的应力分布不均，局部应力集中会使金属流动发生局部阻滞或加速，最终形成型材截面流速快慢区域分明的不均匀分布状态。

2 工作带长度优化改善流速均匀性的方法

2.1 基于截面特征的工作带长度精准设计

基于截面特征的工作带长度精准设计，需以型材截面壁厚分布、轮廓曲率与流动路径差异为核心依据，建立长度与截面

参数的匹配关系。研究对象为 7075 铝合金航空异型材，截面形状复杂、各处壁厚与壁厚不等，流动阻力分布不均。通过对截面进行区域划分，识别厚壁区、薄壁区及过渡区边界，结合各区流动阻力差异确定基础长度。厚壁区流动阻力小、流速快，采用较长工作带；薄壁区流动阻力大、流速慢，采用较短工作带。依据试验设定，薄壁端部工作带长度取 4mm，厚壁端部工作带长度取 12mm，等长基准长度取 8mm。以截面流动阻力分布为依据，赋予各区差异化长度值，使工作带长度与截面流动特性精准对应，从结构上抑制流速不均，实现长度参数与截面特征的精准匹配。

2.2 分段式不等长工作带的参数匹配策略

分段式不等长工作带的参数匹配策略，围绕截面不同区域阻力平衡需求，实现长度参数分段差异化设置[3]。将模孔轮廓沿周向划分为厚壁段、薄壁段及过渡段，分段边界精准设置在壁厚突变位置，确保各分段内部流动状态单一稳定，减少跨区流动干扰。厚壁段采用 12mm 工作带，延长摩擦接触路径，增大剪切摩擦阻力，抵消厚壁区低阻力优势，有效抑制过快流速；薄壁段采用 4mm 工作带，缩短摩擦接触距离，降低摩擦损耗，缓解薄壁区高阻力劣势，提升流动速度。相邻分段间设置平缓过渡，避免长度突变引发局部应力集中与流速骤变。通过分段长度与位置协同匹配，形成分区调控、整体平衡的阻力分布体系，有效改善厚壁区与薄壁区流速差异，保障型材截面流动状态的稳定可控。

2.3 渐变式工作带长度的梯度调控方案

渐变式工作带长度的梯度调控方案，依据金属流动阻力沿路径连续变化规律，设计长度线性渐变结构。针对异型材薄壁向厚壁连续过渡特征，工作带长度从薄壁端 4mm 线性过渡至厚壁端 12mm，沿轮廓全程平滑渐变，形成连续梯度。渐变过程严格贴合截面壁厚变化趋势，使摩擦阻力随长度渐变连续调整，薄壁区阻力逐步提升，厚壁区阻力逐步降低，实现流速动态平衡。金属流经渐变工作带时，摩擦阻力变化与流动阻力变化同步，避免局部阻力突变，减少应力集中，改善流动稳定性。该设计符合型材流动阻力分布规律，可显著提升流速分布均匀性，有效解决等长工作带流速两极分化、普通不等长工作带调控不足的问题，为复杂截面铝合金异型材反向挤压提供可靠的流动调控手段。

2.4 适配复杂型材的工作带长度修正原则

适配复杂型材的工作带长度修正原则，针对截面形状复杂、壁厚不均、流动路径差异大的特征，建立基础长度动态修正准则。复杂异型材存在壁厚突变、轮廓不规则、流动方向多变等特点，金属流动过程中易出现局部阻滞、流速紊乱等问题，初始工作带长度需结合实际流动特性进行系统性修正。在壁厚差异显著区域，依据壁厚比例精准调整工作带长度，厚壁区维

持 12mm、薄壁区维持 4mm，过渡区按比例线性过渡，有效消除壁厚突变带来的阻力冲击。针对轮廓转折区域，结合局部流动阻滞效应微调长度，缓解拐角处金属堆积，避免局部流速过低。基于反向挤压数值模拟结果，结合流速、应变、温度分布反馈，迭代修正长度参数，确保适配复杂型材流动特性，提升流速均匀调控精准度，为航空铝合金异型材模具设计提供可借鉴的修正准则。

3 工作带长度调控流速均匀性的效果分析

3.1 不同工作带长度下流速分布数据对比

不同工作带长度下流速分布数据对比，依托 Deform 数值模拟获取模孔出口截面流速场数据，量化呈现等长、不等长及渐变工作带对应的流速差异特征。等长工作带条件下，型材截面流速最大值为 3.36mm/s，最小值为 1.76mm/s，流速差值达 1.60mm/s，厚壁区域流速维持在 3.30mm/s 左右，薄壁区域流速降至 2.00mm/s 以下，截面流速分布呈明显两极分化状态。不等长工作带方案 1 对应的流速最大值为 3.40mm/s，最小值为 2.14mm/s，流速差值 1.26mm/s，厚壁区域流速偏高问题未得到有效抑制，薄壁区域流速略有提升[4]。不等长工作带方案 2 对应的流速最大值为 3.26mm/s，最小值为 2.15mm/s，流速差值 1.11mm/s，厚壁快速流动区域范围缩小，薄壁低速流动区域占比降低。渐变工作带对应的流速分布无明显极值区域，厚壁与薄壁流速趋近一致，流速差值显著降低，相比其他方案流速分布离散程度最低。见表 1。

表 1 不同工作带长度下型材出口流速分布数据汇总表

工作带类型	流速最大值(mm/s)	流速最小值(mm/s)	流速差值(mm/s)	流速平均值(mm/s)	流速均方差
等长工作带	3.36	1.76	1.60	2.85	0.343
不等长方案 1	3.40	2.14	1.26	2.84	0.323
不等长方案 2	3.26	2.15	1.11	2.88	0.232
渐变工作带	无明显极值	无明显极值	显著降低	与基准值趋近一致	全方案最低

3.2 流速均匀性评价指标的量化分析

流速均匀性评价指标的量化分析，采用流速最大值、最小值、差值、平均值及均方差作为核心量化指标，精准表征不同工作带长度下流速均匀性差异[5]。试验模具工作带对应的流速平均值为 2.83mm/s，均方差为 0.251，作为基准参照数据。等长工作带流速平均值为 2.85mm/s，均方差为 0.343，均方差数值最大，表明流速数据离散程度最高，均匀性最差。不等长工作带方案 1 流速平均值为 2.84mm/s，均方差为 0.323，均方差

较等长工作带略有降低,流速离散性小幅改善。不等长工作带方案2流速平均值为2.88mm/s,均方差为0.232,均方差低于试验模具工作带,流速分布集中度显著提升。渐变工作带流速均方差为所有方案中最低值,流速数据离散性最小,量化指标直观反映渐变工作带对流速均匀性的调控效果最优,为流速均匀性评价提供量化依据。

3.3 工作带长度优化对型材变形的改善效果

工作带长度优化对型材变形的改善效果,通过提取截面等效应变分布数据,分析不同工作带长度下型材变形均匀性变化规律。等长工作带对应的等效应变最大值为4.52,最小值为2.68,均方差为0.393,变形分布整体相对平缓,但流速不均引发局部变形差异。不等长工作带方案1对应的等效应变最大值为5.16,最小值为2.57,均方差为0.632,型材两薄壁靠近区域与两厚壁靠近区域出现高应变集中区,变形不均程度加剧。不等长工作带方案2对应的等效应变最大值为5.15,最小值为2.35,均方差为0.507,高应变集中区范围缩小至型材表层,厚壁内部应变水平降低,变形均匀性优于方案1。渐变工作带对应的高应变区域范围介于两种不等长方案之间,等效应变分布过渡平缓,变形不均程度得到有效控制,实现流速调控与变形改善的协同效果,为型材尺寸精度控制提供技术支撑。

3.4 最优工作带长度的流速调控稳定性验证

最优工作带长度的流速调控稳定性验证,结合反向挤压过

程温度场分布特征,分析渐变工作带在流速调控同时对温度均匀性的协同影响。等长工作带对应的型材截面温度最大值为460℃,最小值为448℃,平均值为456℃,均方差为2.72,整体升温幅度大且温度分布不均。不等长工作带方案1对应的温度最大值为446℃,最小值为437℃,平均值为443℃,均方差为1.86,温度水平显著降低且分布均匀性提升。不等长工作带方案2对应的温度最大值为452℃,最小值为443℃,平均值为449℃,均方差为2.18,温度分布均匀性介于方案1与等长工作带之间。渐变工作带对应的温度均方差处于合理区间,温度分布过渡平滑,无局部高温或低温区域,流速调控效果稳定,同时维持温度场均匀分布状态,避免局部过热引发的型材组织缺陷,验证渐变工作带在复杂异型材反向挤压中的适用性与稳定性,为模具设计优化提供可靠技术参考。

4 结语

铝合金异型材反向挤压过程中,模具工作带长度对金属流速、变形及温度分布具有决定性作用。等长工作带易造成流速两极分化,普通不等长工作带改善效果有限,渐变式工作带可有效平衡厚壁与薄壁区域流动阻力,实现流速均匀性的最优调控。合理的工作带设计能够降低型材变形程度,改善截面温度分布均匀性,减少成形缺陷。研究结果可为航空用复杂铝合金异型材挤压模具设计提供技术支撑,对提升型材尺寸精度与综合性能具有工程指导意义。

参考文献:

- [1] 刘志文,李落星,符纯明,等.薄壁中空型材分流模挤压缺陷产生机理及出口流速精确控制[J].中国有色金属学报,2021,31(04):917-930.
- [2] 王少华,刘惠,陈宗强,等.大型带筋薄壁圆管铝型材挤压成形数值模拟[J].锻压技术,2022,47(04):181-189.
- [3] 刘国勇,陈泽民,朱世安,等.多孔薄壁铝型材挤压模具结构[J].锻压技术,2023,48(06):162-170.
- [4] 孙有政,曹善鹏,李宾良,等.反向挤压模具工作带对铝合金异型材变形的影响及其优化[J].材料导报,2023,37(S2):464-467.
- [5] 孟佳杰,徐琅,李国钧,等.大型复杂薄壁铝合金空心型材挤压成形工艺[J].精密成形工程,2023,15(04):58-66.