

模锻过程中飞边槽结构对金属充填行为的调控作用

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】：飞边槽作为模锻成形工艺中管控金属流动、保障型腔完整充填的核心结构，其几何参数与构型样式直接改变坯料变形阻力及分流规律。为厘清飞边槽结构对金属充填行为的内在调控机制，本文分析飞边桥高度、圆角半径、仓部容积等核心结构参数变化下金属的流动路径、充填速率及应力分布特征，阐明飞边槽阻流、聚料与排溢的协同作用机制。科学配置飞边槽构造能够有效遏制金属过早外流，优化毛坯体积分配，减少型腔尖角、薄壁区域充填不充分及锻件折叠类缺陷，同时改善模锻成形载荷与模具受力工况。所得成果可为复杂构件模锻飞边槽参数优化、成形工艺方案规划及锻件成形质量管控提供理论支撑与工程参考。

【关键词】：模锻；飞边槽；金属流动；充填行为；结构调控

DOI:10.12417/2811-0536.26.09.013

引言

模锻作为精密构件近净成形的核心工艺，广泛应用于机械、航空等关键制造领域，型腔完整充填与成形缺陷管控是保障锻件质量的核心环节。飞边槽作为模锻模具的重要组成部分，直接制约金属流动态势与体积分配规律，对型腔各部位充填效果发挥决定性调控作用。实际生产过程中，飞边槽结构参数设置不合理，易引发薄壁区域充型不充分、金属外流过多及折叠裂纹等成形问题。结合飞边槽构型特征与几何参数变化，探究其对金属充填行为的调控规律，对优化模具结构设计、稳定模锻成形质量、减少生产损耗具有重要工程价值。

1 模锻飞边槽结构及金属充填成形基础概述

模锻成形借助模具型腔对金属塑性流动的约束完成构件整体塑造，飞边槽由飞边桥与仓体两大核心部分构成，是模锻模具体系内不可或缺的功能性结构。飞边桥负责阻滞金属过度流动、限制流量大小，仓体可容纳坯料中多余的金属，两者配合形成金属流动所需的边界约束环境。当金属在模锻压力作用下发生塑性变形时，内部材料会朝着阻力最小的方向定向移动，型腔拐角、薄壁及深腔区域的充填质量，完全取决于外部流动阻力的科学调控。飞边槽自身几何形态、截面样式及结构尺寸的不同，会不断改变金属变形过程中的流动阻力特征与应力应变分布情况，进而调整材料分流路径与型腔充填先后顺序。厘清飞边槽各结构单元的功能特性，掌握金属在封闭型腔与飞边槽协同作用下的塑性流动规律，既能为后续分析结构参数对充填行为的内在影响、探寻成形缺陷产生的根本原因筑牢理论根基，也能为模具结构与成形过程管控提供基础理论支撑。

2 飞边槽结构影响金属充填行为的作用机理与问题表征

飞边槽作为模锻模具中调控金属流变趋势、分配坯料体积占比的关键功能结构，能够通过改变成形路径阻力与物料分流格局，对型腔整体充填行为形成直接且决定性的调控作用。其内在作用机理本质在于飞边槽各项结构参数与坯料高温塑性流变特性之间的动态耦合适配，参数匹配度直接决定模锻充填过程的有序性与稳定性。飞边桥高度是把控金属向外溢流初始阻力的核心指标，参数取值偏高时，会大幅增大金属横向流动阻碍，造成型腔远端区域充填滞后、局部填料不足；取值偏低则阻流屏障偏弱，坯料易过早向外侧溢出，无法为深腔、薄壁及转角等难成形区域储备充足充型压力，难以保障复杂部位饱满成型。飞边槽过渡圆角半径直接影响金属流变顺畅性，圆角取值偏小易形成结构尖角突变，诱发局部应力集中，束缚金属向型腔狭小尖角区域延展填充；圆角过大又会弱化固有阻流作用，打破物料分流平衡，加剧流态紊乱与流向偏移现象^[1]。仓部容积与截面构型决定富余坯料的容纳及排溢能力，容积偏小无法及时收容成形过程中的多余金属，易造成物料局部堆积，进而引发锻件折叠、表面鼓包、内部疏松等典型缺陷；容积设计冗余过大，则无端增加坯料耗材损耗，同时增大模锻成形载荷与模具承载压力。综上，飞边槽各关键参数若配置不合理，极易诱发型腔局部充填不饱满、各区域充型速率失衡、金属流动路径偏离理想轨迹等诸多问题，不仅降低锻件外形尺寸精度，还会破坏内部金相组织均匀性。掌握飞边槽结构对金属充填的作用规律及对应的缺陷表现形式，能够为后续参数整定、结构优化及成形质量管控筑牢理论支撑与设计依据。

3 基于充填行为调控的飞边槽结构匹配设计方法

3.1 模锻构件成形特征适配原则

(1) 型腔结构特征对标适配: 模锻构件的型腔深浅跨度、截面厚度差异以及拐角过渡曲率, 都是飞边槽结构适配设计的重要考量依据。带有复杂异形轮廓、薄壁构造与深腔腔体的锻件, 对成型阶段金属流动的约束门槛更高, 对边界调控条件有着更为严苛要求。飞边槽整体布局需贴合型腔外沿轮廓走向做整体一体化排布, 顺着构件外形走势统筹结构形制。同时依照构件整体成型难度划定飞边桥基础规格, 充分顾及型腔局部死角、窄缝狭长区域的充型诉求, 让飞边槽阻流调控能力和金属自然流变趋势形成深度契合, 有效规避金属无规则漫流现象, 缓解由此造成的型腔局部填料不均、成型不饱满等实际问题。(2) 坯料塑性流动特性适配: 坯料自身的塑性形变潜力与高温受压下的流变行为, 是制定飞边槽结构设计准则的重要前提。不同材质坯料在模锻高温高压工况下的流动性能差异显著, 直接影响飞边槽阻流、储料与排溢功能的匹配效果。塑性较差的合金坯料流变惯性强, 受压后极易提前向飞边仓外侧溢出, 需在结构设计上强化飞边槽的阻流限位效能, 合理增大流动阻滞作用, 延缓坯料外溢节奏, 为型腔复杂区域充型预留充足压力^[2]。塑性性能优良的常规锻造材料流变适应性更好, 可适度放宽飞边槽流通约束尺度, 借助仓体内部富余空间缓释多余坯料堆积产生的内压, 平缓成形过程中的应力波动, 维持金属在型腔内匀速、有序的充填节奏, 适配不同材质坯料的流变规律, 让飞边槽结构与坯料塑性特性形成良好匹配, 保障整体模锻充型过程平稳连贯。

3.2 飞边槽关键结构参数设计

(1) 飞边桥几何参数整定: 飞边桥作为模锻模具中调控金属流变走向、把控型腔充填质量的关键核心构件, 其厚度规格与过渡圆角形式的合理选取, 是保障型腔各区域填充均匀饱满的重要基础。结合模锻成形全程应力传递与载荷分布特点, 精准划定飞边桥基准尺寸参数, 借助桥部实体结构构筑稳固可控的流动阻力屏障, 引导坯料金属主动向型腔深凹腔体、薄壁转角及尖角等难充填区域有序汇聚。采用大弧度平缓圆角过渡结构, 弱化形体突变形成的流动阻滞盲区, 缓解局部应力集中弊端, 避免金属在飞边桥边缘发生滞留堆积、流向偏移等问题。通过规范金属整体流变路径, 使坯料依照成形规律匀速平稳填充型腔, 从结构参数层面把控充填节奏, 为提升模锻构件整体成形精度与成型品质夯实设计基础。(2) 飞边仓空间构型规划: 飞边仓在模锻体系中兼具富余坯料收纳与成形

内压缓冲的双重功能, 其截面轮廓形态与整体延展范围, 需紧扣余料容纳、压力缓释两大核心诉求进行统筹规划设计。仓体内部宜采用规整通畅的空腔构造, 适配模锻全过程中多余金属逐步挤压流入、循序渐进堆积的动态演化特征, 契合成形各阶段物料持续汇入的变化规律。仓体外缘边界要与模具分型面做到无缝平顺衔接, 杜绝腔体空间截面突变引发金属流向急剧偏转, 从结构上规避流变无序、局部偏流等不良现象。通过对飞边仓容积尺寸与空间布局的科学配比, 可有效疏解型腔内部集聚的成形应力, 均衡各区域压力分布状态, 为金属匀速流变、饱满充型营造平稳力学环境, 依托合理的空间构型设计, 保障整个模锻成形过程始终处于有序、可控的运行状态。

3.3 多工况下结构协同校核方式

(1) 成形全过程流动状态校核: 模锻塑性成形是金属持续流变、逐步填充型腔的动态过程, 需依照全周期金属演化规律, 对飞边槽布设位置、整体尺寸及结构形态开展系统性动态校核。完整跟进型腔填料、多余坯料分流以及飞边成型等关键阶段的金属运动特征, 实时把握物料流向、流速及堆积状态的变化特点。重点检验现有飞边槽布局能否长效发挥阻流控流、集聚坯料与有序排溢的综合效能, 精准甄别结构布设中易造成型腔填充滞后、流态无序紊乱的不合理部位^[3]。针对性对槽体位置、尺寸配比进行微调优化, 理顺金属整体流变路径, 保障模锻各阶段充填节奏协调统一, 为构件高质量成形提供动态结构保障。见图1所示:

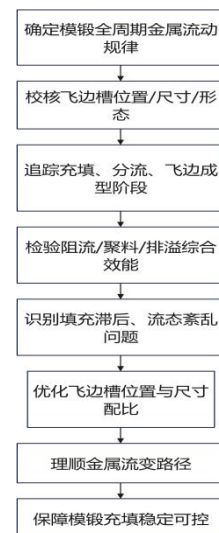


图1 模锻成形全过程金属流动状态校核流程

(2) 模具受力与成形工况校核: 模锻工艺始终处在高温、高压与强冲击耦合的复杂载荷环境中, 必须结合模具整体应力分布特征与高温成形实际工况开展专项适配校核。飞边槽结构设计不应只侧重金属导流

与充填调控,还需统筹槽体自身承载强度以及整套模具的整体结构刚度,规避槽体转角及衔接位置出现局部应力集中,有效降低模具开裂、表层磨损及塑性损伤等损耗故障。锻造温度与成形速率的小幅波动,会改变坯料高温流变性能,间接干扰飞边槽对金属流向的调控效果。在结构设计阶段需充分兼容多类工况参数的波动区间,让飞边槽在常规生产工况下均可稳定约束金属流变路径、维系型腔有序充填,进而形成可适配现场实际生产条件的标准化设计范式。

4 飞边槽结构调控对模锻成形质量的应用成效分析

(1) 型腔充填完整性显著提升:以金属充填行为规律为依据优化飞边槽整体结构布局,精准协调飞边桥阻流控制作用与仓体容纳排溢能力,妥善化解模锻过程中物料流变失衡的突出问题,进一步改善型腔整体填充饱满度与物料分布均匀程度。经过结构优化的飞边槽能够形成梯度稳定的流动阻力场,引导坯料金属主动流向型腔深凹腔体、薄壁薄层以及尖角转角等不易填充的关键区域,避免坯料提前向槽体外围溢出而造成局部缺料、填充不饱满等成形弊病,确保型腔各个区域均可获得足量物料补给^[4]。合理设置飞边槽圆角过渡形式,能够消除金属行进路径中的阻滞盲区,弱化局部流变阻碍,减少物料停滞堆积、流向偏移等现象,促使坯料沿着型腔内壁轮廓平稳有序延展,实现全域均匀饱满填充,从成形源头改善锻件整体成型品质,还可简化后续整形、修边等后续加工流程,降低精加工工序工作量。

(2) 锻件成形缺陷有效抑制:对飞边槽结构进行科学化配置与参数适配,能够从流变调控层面规避模锻加工中多发的成形瑕疵,全方位改善锻件内部组织状态与外部成型品相。精准设定飞边桥竖向高度与仓体容纳容积,可合理制衡型腔内部成形压力场分布,规避压力偏高诱发的锻件表面鼓包、本体开裂等问题,同时缓解压力偏低带来的金属折叠、内部疏松等成形隐患。飞边槽采用顺滑过渡构造可缓释局部应力聚集状况,改善坯料形变过程中塑性流变不均的状况,减

少内部组织结构瑕疵的产生,促使锻件基体晶粒趋于细化排布、整体组织分布更为匀整,强化构件综合力学服役性能。与此同时,合理规划飞边槽空间形态,可引导富余金属平稳汇入仓体内部,杜绝余料在型腔边沿无序堆积产生的毛刺与厚大飞边,优化锻件外观成型效果,减少次品产出,切实提升模锻生产成品合格率。

(3) 模锻成形稳定性与经济性改善:飞边槽结构调控不仅能提升锻件质量,更能有效优化模锻成形过程的稳定性,减少生产损耗,提升生产经济性。优化后的飞边槽结构可适配不同成形工况,即便锻造温度、成形速率等参数出现小幅波动,仍能维持对金属充填行为的平稳调控,减少工况变化引发的成形质量波动,提升生产过程的稳定性与一致性。同时,合理的飞边槽设计可减少金属损耗,通过精准控制飞边厚度与多余金属排出量,降低坯料消耗,提高材料利用率^[5]。此外,飞边槽结构优化可平衡模具受力分布,减少模具局部应力集中,降低模具磨损与损坏的可能性,延长模具使用寿命,缩减模具更换与维护成本;同时缩短锻件后续修边、打磨等工序的加工时长,提升生产效率,实现模锻生产质量与经济性的双重提升。

5 结语

全文围绕模锻飞边槽对金属充填行为的调控作用展开系统梳理,从飞边槽基础结构与金属成形原理切入,剖析其构型、几何参数影响金属流动及型腔充填的内在机制,归纳结构匹配不当引发的成形质量问题。结合构件成形特征、参数整定与工况校核,构建适配金属充填调控的飞边槽设计思路,阐释结构合理布设对型腔充填完整性、缺陷抑制及生产效益的正向影响。飞边槽作为调控金属流动、平衡成形阻力的核心结构,其构型与参数的科学匹配是复杂模锻构件近净成形的关键。现有研究厘清了结构与充填行为的耦合规律,可为异形、薄壁件飞边槽设计提供理论参考,为工艺匹配、模具改良及质量管控提供落地思路,助力模锻制造向精密化、稳质化推进。

参考文献:

- [1] 赵一平.简叙铝合金模锻工艺和模具设计(连载二)[J].锻造与冲压,2021,(17):64-66.
- [2] 杨锋,富国亮,侯巧红,等.基于 Deform 的飞边槽结构对法兰盘模锻的影响分析[J].热加工工艺,2020,49(19):108-110.
- [3] 徐文翠,张志鹏,吴艳丽,等.阀盖锻件闭式模锻成形工艺研究[J].锻造与冲压,2025,(11):20+22+24+26+28+30+32+34.
- [4] 史今.高铬铸铁的液态模锻工艺及热处理性能研究[J].金属加工(热加工),2025,(06):102-108.
- [5] 盛志敬,罗彦云,张洞川,等.一种中心楔块模锻工艺优化[J].世界有色金属,2021,(22):196-197.