

铝合金制动器支架拓扑优化与铸造工艺改进

李世成

湖北航特科技有限责任公司 湖北 荆门 448000

摘要: 铝合金制动器支架作为汽车底盘关键受力部件,其轻量化设计与铸造质量直接影响整车安全性与燃油经济性。本文以拓扑优化理论为基础,对铝合金制动器支架进行结构优化设计,在满足刚度与强度要求的前提下实现显著减重。针对拓扑优化后结构复杂、铸造难度增加的问题,从浇注系统、模具温度控制及工艺参数等方面提出铸造工艺改进方案。通过铸造过程数值模拟,验证了工艺改进的有效性。研究表明,拓扑优化与铸造工艺协同设计是实现铝合金关键构件高性能制造的有效路径。

关键词: 铝合金制动器支架;拓扑优化;铸造工艺改进

引言: 汽车轻量化是当前交通运输领域节能减排的重要方向,铝合金因其低密度、良好力学性能及耐腐蚀性,在底盘关键部件中应用日益广泛。制动器支架作为连接制动卡钳与转向节的重要承载件,工作过程中承受制动扭矩、冲击及疲劳载荷,对结构强度与刚度要求较高。传统设计往往偏于保守,存在较大减重空间。同时,拓扑优化后的结构通常较为复杂,对铸造工艺提出了更高要求。本文从结构优化与工艺改进两个维度展开研究,旨在为铝合金制动器支架的高效设计与高质量制造提供技术参考。

1 拓扑优化与铸造工艺相关理论

1.1 拓扑优化理论

拓扑优化是在给定的设计空间、边界条件及约束条件下,通过优化算法寻找最佳材料分布方案的结构设计方法。其核心思想是在满足刚度、强度等性能要求的前提下,最大限度减少材料用量,实现轻量化目标。变密度法是当前工程应用最广泛的拓扑优化方法,其基本原理是将连续体划分为有限单元,每个单元赋予一个相对密度变量,通过调整单元密度分布实现材料增减。优化过程中,低密度单元逐步删除,高密度单元保留,最终形成清晰的传力路径。SIMP插值模型是变密度法的常用数学模型,通过引入惩罚因子使中间密度向两端极化,便于优化结果解读与结构重构。拓扑优化的三要素为设计变量、目标函数与约束条件。设计变量通常是单元的相对密度;目标函数一般为最小化结构柔度(即最大化刚度);约束条件包括体积保留率、应力限值及位移限值等。求解时采用优化准则法或移动渐进线法等算法迭代计算,直至满足收敛条件^[1]。此外,工程应用中还需考虑制造约束,如对称约束、拔模方向及最小成员尺寸等,确保优化结果具备可制造性。

1.2 铝合金铸造工艺基础

铝合金铸造是利用重力或压力将熔融金属液注入模具型腔,冷却凝固后获得所需形状零件的成形工艺。常用铸造方法包括重力铸造、低压铸造及高压铸造。重力铸造设备简单、成本较低,适用于中小批量生产;低压铸造充型平稳、补缩效果好,适用于对致密性要求较高的受力构件;高压铸造生产效率高、尺寸精度好,但易产生气孔,一般不适用于热处理强化型零件。制动器支架通常选用A356等铸造铝合金,经T6热处理后获得良好综合力学性能。铸造缺陷是影响铸件质量的主要因素,常见缺陷包括气孔、缩松、冷隔及裂纹等。气孔产生于金属液中的气体在凝固过程中析出;缩松缩孔源于凝固收缩时补缩不足;冷隔发生在金属液交汇时前沿温度过低、熔合不良;裂纹则由凝固收缩应力或热应力集中引起。缺陷控制的核心在于优化浇注系统、调节温度场及合理设置冒口和冷铁,实现顺序凝固与平稳充型。

2 铝合金制动器支架拓扑优化设计

2.1 初始模型建立

初始模型是拓扑优化的设计空间,基于原始制动器支架几何结构建立。首先获取原始支架的三维模型,明确其安装约束面、载荷传递面及与周边零件的避让区域。确定设计空间时,保留必要的安装接口与功能表面,将可进行材料去除的区域作为优化空间。采用有限元前处理软件建立初始模型的网格,选择适当的单元类型与网格尺寸,确保计算精度与效率的平衡。初始模型的质量、材料属性及边界连接关系需与实际工况保持一致,为后续优化计算提供准确输入。

2.2 边界条件与载荷施加

边界条件与载荷施加直接影响拓扑优化结果的合理性,需根据制动器支架的实际受力工况进行设定。约束条件模拟支架与转向节的连接关系,在螺栓安装孔处施

加固定约束。载荷工况涵盖车辆行驶过程中的典型受力状态,包括紧急制动工况下制动扭矩产生的切向力、转弯制动工况下的侧向力以及颠簸路面的垂向冲击力。各工况载荷大小及方向基于车辆动力学计算确定,施加于支架与制动卡钳的安装面。多工况优化时,需对各工况设置合理的权重系数,使优化结果兼顾各使用场景的结构性能要求^[2]。

2.3 拓扑优化计算

基于建立好的有限元模型,设置优化参数并提交计算。设计变量为设计空间内各单元的伪密度,目标函数设定为最小化结构柔度(即最大化结构刚度),约束条件为体积保留率,通常保留初始设计空间的50%~70%。根据结构对称性要求施加对称约束,确保优化结果的工艺可行性。设置最小成员尺寸控制参数,避免产生细碎结构。选择SIMP插值模型,惩罚因子取3,过滤半径取网格尺寸的2~3倍,抑制棋盘格效应。设置收敛容差与最大迭代步数,启动优化计算。计算过程中可实时监控目标函数与约束条件的变化趋势,直至满足收敛条件。

2.4 优化结果分析与重构

拓扑优化完成后,对计算结果进行解读与后处理。优化结果以单元密度云图呈现,高密度区域为保留材料的主要传力路径,低密度区域为可去除材料的位置。分析材料的分布规律,识别主承力结构的方向与形态,判断是否形成清晰的拉压杆系。去除密度低于阈值的单元,生成优化后的几何轮廓。基于优化结果进行结构重构,考虑铸造工艺约束,如壁厚均匀性、避免尖角、设置拔模斜度等,将不规则的材料分布转化为可铸造的工程结构。重构后的模型需进行有限元验证,校核其刚度、强度及模态频率,并与初始模型对比,评估减重效果与性能变化。

3 铝合金制动器支架铸造工艺改进

3.1 现有铸造工艺分析

拓扑优化重构后的支架结构具有壁厚不均、局部复杂、传力路径清晰等特点,传统铸造工艺在应对此类复杂结构时存在诸多局限,需对现有工艺进行全面深入分析。评估原工艺方案中浇注系统的合理性,重点判断浇口位置的选择是否有利于金属液均匀充型,是否存在充型流程过长导致金属液前沿温度下降过快的问题,以及是否因浇口布置不当造成局部金属液聚集、形成热节。分析现有模具温度控制方案,检查模具表面温度分布是否均匀,识别是否存在因冷却水道布局不合理而产生的局部过热区域,或由于散热条件差导致的冷却不足区域,这些温度异常区域往往是缩松缩孔的易发部位。统计现有工艺下的铸造缺陷类型与分布,梳理缩松、气孔、冷

隔等缺陷的分布位置及形成原因。通过上述系统分析,明确制约铸件质量的关键工艺因素,为后续浇注系统优化、温度控制改进及工艺参数调整提供方向性指导。

3.2 浇注系统优化设计

浇注系统是金属液从浇口杯进入型腔的通道,其结构设计直接决定充型质量,是铸造工艺改进的核心环节。针对拓扑优化后支架的复杂形状与壁厚分布特征,需对浇注系统布置方案进行针对性优化。浇口位置的选择应遵循有利于金属液快速均匀充满型腔的基本原则,优先将浇口设置于铸件厚大部位,使金属液优先填充最需要补缩的位置,同时避免流程过长导致金属液前沿温度下降过多而产生冷隔缺陷。对于薄壁复杂部位,可采用多浇口分散进料的方式,缩短各部位金属液的充型距离,确保充型末期仍有足够的流动能力。横浇道与直浇道的截面尺寸需合理匹配,使金属液保持平稳流动,避免紊流卷气。内浇口方向应避免金属液直接冲击型芯或型壁,减少冲砂风险^[3]。同时优化排气设计,在充型末端设置溢流槽或排气槽,便于气体排出,减少气孔缺陷。

3.3 模具温度控制与冷却系统改进

模具温度是影响金属液充型行为与铸件凝固过程的核心工艺参数,合理控制模具温度对于保障铸件质量具有关键作用。针对拓扑优化后支架壁厚分布不均的特点,需对模具加热与冷却方案进行系统改进。对铸件的厚大部位应加强冷却措施,通过设置密集冷却水道或增加冷却水流量,加快该部位凝固速度,使其先于周边区域凝固,防止缩松缩孔产生。对薄壁部位则应采取适当保温措施,如减少冷却水道密度或增设保温涂层,确保金属液能够充满薄壁区域,防止冷隔缺陷。冷却系统设计应采用水冷与风冷相结合的方式,根据铸件不同部位的散热需求设置独立冷却回路,实现分区精确控温。在易产生热节的区域可增设冷却通道或嵌入高导热率的冷却镶块,改善局部散热条件。同时优化模具预热工艺,使模具达到均匀的初始温度,减少铸件冷却过程中的温差应力。

3.4 其他工艺参数优化

除浇注系统与模具温度控制外,浇注温度、浇注速度、保压工艺及涂料工艺等其他参数对铸件质量同样具有重要影响,需进行综合协调优化。浇注温度是控制金属液流动性的关键参数,温度过高会加剧吸气与氧化倾向,增加气孔缺陷风险;温度过低则充型能力不足,易产生冷隔,应在保证充型能力的前提下尽可能选择较低的浇注温度。浇注速度影响充型平稳性,速度过快容易造成紊流卷气及冲击型芯,速度过慢则金属液前沿降温过快,需根据铸件结构特点选择适宜的浇注速度,使金

属液平稳充满型腔。保压压力与保压时间直接影响铸件的补缩效果,适当提高保压压力有助于减少缩松缩孔,但压力过高可能导致铸件粘模。此外,优化涂料种类与喷涂工艺,改善脱模效果及铸件表面质量。各工艺参数之间存在相互影响,需综合协调确定最佳组合。

4 铸造过程数值模拟与工艺验证

4.1 数值模拟前处理

数值模拟前处理作为保障仿真结果精准性的关键基础环节,涵盖多个重要步骤。首先,把拓扑优化重构后的制动器支架三维模型精准导入专业的铸造模拟软件中,此模型是后续分析的载体。接着进行网格划分,依据模型的复杂程度与计算精度需求,挑选适宜的网格尺寸对模型实施离散化处理,严格把控网格质量,避免出现畸形网格等问题,确保其满足计算精度要求。同时,设置铝合金材料的热物性参数,涵盖液相线温度、固相线温度、结晶潜热、热导率以及密度等,这些参数对模拟金属液在铸型中的流动与传热过程至关重要。最后,明确定义边界条件,确定浇注温度、模具初始温度,还有铸型与铸件之间的界面换热系数,为后续的充型与凝固模拟筑牢坚实基础。

4.2 充型过程模拟分析

充型过程模拟用于分析金属液在型腔中的流动状态,评估充型平稳性及卷气、冷隔等缺陷风险。通过模拟获取金属液的充型顺序与流动形态,判断是否存在紊流、喷射或涡流等不利流动状态。分析充型速度场分布,识别金属液交汇位置及充型末端区域,预测卷气缺陷的易发部位。评估冷隔风险,判断金属液前沿温度是否低于流动性临界值。基于充型模拟结果,可发现浇注系统设计中的缺陷,为浇口位置、尺寸及浇注速度的优化提供依据^[4]。

4.3 凝固过程模拟分析

凝固过程模拟用于分析铸件的温度场分布、凝固顺序及缩松缩孔缺陷。通过模拟获取铸件在凝固过程中不同时刻的温度场分布,判断冷却速率是否均匀,识别局部过热区域。分析凝固顺序,判断是否形成从远离浇口

部位向浇口方向的顺序凝固趋势,识别孤立液相区及补缩通道不畅的部位。预测缩松缩孔的分布位置与相对严重程度,识别热节区域。基于凝固模拟结果,可优化冒口布置、冷铁位置及冷却工艺参数,实现缺陷的有效控制。

4.4 工艺参数优化与验证

基于充型与凝固模拟分析结果,对铸造工艺参数进行综合优化与验证。优化浇注温度,在保证充型能力的前提下,选择适宜的浇注温度范围,避免过高导致吸气、过低产生冷隔。优化模具温度控制策略,合理设定模具预热温度及工作温度范围,确保铸件冷却速率均匀。优化冷却工艺参数,调整冷却介质类型、冷却时间及冷却部位,改善凝固顺序,减少缩松缩孔。将优化后的工艺方案重新进行模拟验证,对比优化前后的充型效果与缺陷预测结果,确认工艺改进的有效性。最终形成的优化工艺方案可为后续模具设计及试制生产提供技术指导。

结束语

本文以铝合金制动器支架为研究对象,开展了拓扑优化设计与铸造工艺改进的系统研究。阐述了拓扑优化理论与铝合金铸造工艺基础,为研究提供理论支撑。建立了制动器支架的初始有限元模型,进行拓扑优化计算与结构重构,实现了显著减重。针对拓扑优化后结构的铸造难点,从浇注系统、模具温度控制及工艺参数等方面提出了改进方案。通过铸造过程数值模拟,验证了工艺改进的有效性。研究表明,拓扑优化与铸造工艺协同设计是实现铝合金关键构件轻量化与高质量制造的有效技术路径。

参考文献

- [1]朱慧明,苏小平,昂飞.铝合金制动器卡钳低压铸造工艺设计及优化[J].热加工工艺,2022,51(21):54-56,60.
- [2]卢善周,苏小平,朱慧明.铝合金制动器隔离盘低压铸造的数值模拟及优化[J].热加工工艺,2022,51(19):66-68,72.
- [3]华逢志,王东方,缪小冬,等.拓扑优化在铝合金钳体优化中的应用[J].机械,2021,48(1):14-21.
- [4]张中国,肖光春,郭宁,等.基于Abaqus的商用车气压盘式制动器钳体的轻量化研究[J].现代制造技术与装备,2022,58(7):1-5.