

空气悬架锻件脱模斜度设计对尺寸精度的作用分析

姜金万 刘喆卿 俞舟历 笱登华 叶晓未

浙江三维大通精锻股份有限公司 浙江 嘉兴 314311

【摘要】：空气悬架系统是现代汽车行业重要组成部分，关联驾驶舒适性与车辆性能，锻件构成空气悬架关键部件基础，尺寸精度影响整体系统运行性能，本文研究空气悬架锻件脱模斜度设计，分析其对锻件尺寸精度的影响。实验与数值模拟结合，探究不同脱模斜度角度对锻件变形的作用机制，明确二者间的关联，合理脱模斜度可降低变形与尺寸误差，提升锻件加工精度，为锻造工艺优化提供理论支撑，该研究对提升空气悬架零部件质量控制水平意义重大。

【关键词】：空气悬架；锻件；脱模斜度；尺寸精度；工艺优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.044

引言

空气悬架系统是车辆舒适性与操控性的核心技术，性能直接关联整车动态表现与稳定性，锻件是空气悬架承载部件的重要组成部分，尺寸精度关乎部件装配与使用性能，锻造过程中，锻件尺寸受多种因素影响，脱模斜度设计是关键因素。脱模斜度不合理会使锻件冷却时产生不均匀变形，进而出现尺寸误差，优化脱模斜度设计可改善锻件尺寸精度，为锻造工艺提供科学支撑，探讨脱模斜度对尺寸精度的作用机制，可为空气悬架锻件精密制造提供理论与技术指导。

1 脱模斜度对锻件尺寸精度的影响机理

脱模斜度是锻造工艺核心设计参数，关联锻件尺寸精度，锻件脱模阶段，斜度设计影响成型质量，亦与最终尺寸误差直接相关，脱模斜度的作用机制，聚焦锻件脱模时承受的变形力，脱模斜度偏小或趋近于零，锻件在模具内约束力偏高，冷却阶段产生较大内应力，最终引发变形与尺寸偏差^[1]。脱模斜度过大，模具与锻件接触面积不足，冷却状态不均，形成局部收缩，锻件精度受影响，脱模斜度设计需兼顾模具几何形状、锻件材料特性、冷却速度等因素，在满足其他工艺要求的基础上，实现尺寸精度的优化。

锻件尺寸精度的控制，依托脱模斜度的精准设计，不同斜度设计，对应不同脱模力与变形特性，锻件冷却过程中，内应力变化直接作用于变形方式，偏小的脱模斜度，易让脱模时锻件与模具间摩擦力增大，锻件表面形成较大残余应力，这类应力在冷却中逐步释放，可能造成尺寸偏移。偏大的脱模斜度虽能减小摩擦力，却可能导致模具与锻件接触不充分，进而出现冷却不均，局部区域的收缩与膨胀，同样会影响尺寸精度，脱模斜度的选择，需综合考量锻件几何复杂性、材料热物理特性，平衡变形与摩擦力，保障锻件脱模后尺寸精度符合要求。

脱模斜度对尺寸精度的影响，覆盖初步设计阶段，亦与实际生产工艺参数高度关联，实际生产中，脱模斜度的调整，受模具设计、锻造温度、冷却方式等多因素共同作用，模具的材料及表面处理工艺，会影响脱模斜度的实际应用效果，较高的

脱模斜度，可能加快模具磨损，缩短其使用寿命；偏小的脱模斜度，易因脱模难度增加，提升锻造过程的加工误差。锻件材料的热膨胀系数、模具的温度变化、冷却系统的配置，均直接作用于锻件最终尺寸精度，脱模斜度的精准设计，需以理论计算为基础，结合实际生产条件动态调整，保障锻件全生产周期的尺寸稳定性。

2 锻件脱模斜度设计中的问题分析

锻件脱模斜度设计中，易出现斜度选择与锻件尺寸精度的矛盾问题，脱模斜度过小，会加大锻件与模具间的摩擦力，造成脱模难度提升，模具磨损加剧，锻件表面质量也易出现问题，脱模斜度过小还会让冷却过程中应力分布不均，形成较大残余应力，这类应力后期释放时，易引发锻件尺寸偏差，高温环境下锻件表面与模具的摩擦加剧，会提升表面粗糙度，影响产品外观与质量^[2]。复杂形状锻件的脱模斜度设计不合理，会导致局部区域变形难以有效控制，进一步扩大尺寸误差，锻件脱模斜度设计需在模具易脱模与锻件尺寸精度间找到平衡，否则会直接影响生产效率与产品质量。

脱模斜度过大时，会产生另一类生产问题，脱模斜度过大易减少模具与锻件的接触面积，影响模具冷却效果，造成锻件局部区域冷却不均，冷却速度的差异会引发热胀冷缩不均的现象，最终产生尺寸偏差，这类设计虽能减小锻件与模具间的摩擦力，但冷却过程中产生的热应力无法有效消散，易造成锻件局部收缩或变形。脱模斜度过大还可能降低模具使用寿命，模具与锻件接触减少，会让模具表面承受更大的热冲击与磨损，进而影响生产过程中的精度稳定性，脱模斜度过大虽能提高脱模效率，却无法有效保障锻件的尺寸稳定性与精度，在复杂形状锻件的生产中，该问题表现得更为明显。

实际生产过程中，脱模斜度设计还需兼顾其他各类影响因素，锻件材料的自身特性、模具的材料及表面处理工艺、锻造工艺参数与生产中的温度变化，都会影响脱模斜度的实际应用效果，不同材料的热膨胀系数存在差异，冷却过程中的收缩率也随之不同，这就要求脱模斜度设计需结合具体材料特性做出

针对性调整,模具的表面光洁度、模具的温度控制方式与冷却介质的选择,也会在一定程度上决定脱模斜度设计的实际效果。锻造工艺中的各项变化,比如温度、压力、冷却速度等参数的调整,同样会影响锻件的变形行为与最终尺寸精度,这些因素均要求脱模斜度设计进行综合考量,确保在不同生产条件下,锻件都能保持良好的尺寸精度,锻件脱模斜度设计并非单一因素的简单调整,而是需要结合多方面工艺条件开展整体优化,以此提升产品的整体质量。

3 优化脱模斜度对尺寸精度的改善作用

优化脱模斜度是提升锻件尺寸精度的重要手段,实际生产中合理调整脱模斜度,可减少锻件变形,降低冷却不均引发的尺寸偏差,脱模斜度对锻件尺寸精度的影响,体现在锻件与模具的接触方式、冷却应力分布及脱模摩擦力上,调整脱模斜度大小,能让锻件脱模时冷却更均匀,规避过度收缩或不均变形造成的尺寸误差^[3]。优化设计结合锻件材料特性与冷却过程,适配的斜度可让模具与锻件接触更合理,减少摩擦力过大引发的变形,通过改善冷却条件提升尺寸稳定性,核心是依据锻件几何形状与材料特性做定制化斜度设计,精准控制各细节,实现尺寸精度最优。

数值模拟与实验验证是优化脱模斜度的关键支撑,数值模拟分析不同脱模斜度下的温度场与应力场,助力设计人员预测并把控锻件冷却过程的变形趋势,模拟结果可直观体现脱模斜度对锻件尺寸精度的影响,也能为模具设计提供具体改进方向,模拟分析可发现不当脱模斜度引发的局部变形,进而影响锻件整体几何精度。对比不同斜度的应力分布,优化设计方案能在保障脱模效率的同时,最大化提升锻件尺寸稳定性,实验验证依托实际生产数据反馈,持续调整优化设计,让数值模拟结果贴合实际生产情况,实现理论与实践的融合。

锻件脱模斜度优化不仅是设计阶段的调整,更需覆盖生产工艺的全方位优化,实际生产中优化脱模斜度,需结合锻造温度、模具材质及表面处理等因素综合考量,锻件材料的热膨胀系数与冷却速度,是优化脱模斜度的核心考量因素,不同材料冷却速度的差异易引发冷却不均,设计斜度时需根据材料特性选取适配的脱模角度,模具表面光洁度、模具与锻件接触面积及冷却系统布局,也会影响脱模斜度的优化效果。高光洁度模具表面可减少摩擦力,降低脱模时的应力集中,进一步提升锻件尺寸精度,冷却系统优化能让锻件脱模后温度分布更均匀,减少温度差异带来的尺寸偏差,脱模斜度优化并非单纯调整斜度角度,还需全面考量各工艺条件的协同作用,才能实现尺寸精度与生产效率的双重最优。

4 实验与数值模拟验证脱模斜度优化效果

实验与数值模拟中验证脱模斜度优化效果,核心在于精准模拟分析与实际实验数据的对比,数值模拟技术为脱模斜度优

化提供理论依据,助力设计人员分析锻件不同斜度下的热力学行为与变形趋势,搭建锻件与模具间热传导、应力分布的数值模型,可精准预判不同脱模斜度对尺寸精度的影响,模拟过程中,温度场与应力场的变化,为分析冷却过程中的热应力提供关键数据支持^[4]。对比不同脱模斜度的模拟结果,合理斜度设计能显著减少锻件冷却中因应力不均产生的变形,进而提升尺寸精度,模拟分析结果可为脱模斜度优化提供可行设计方案,为实际生产的工艺调整提供理论指导。

实验验证是实际检验数值模拟结果的重要手段,实际生产中,选取不同脱模斜度条件的锻件开展试验,测量其尺寸精度变化,验证模拟结果的准确性,实验过程中,选取具代表性的锻件形状与材料,搭配精密测量设备,实地探究不同脱模斜度对锻件尺寸偏差的影响,实验数据显示,脱模斜度优化后,锻件尺寸误差显著降低,尤其在复杂形状锻件中,优化斜度设计有效减小局部变形,保障锻件整体几何精度。对比不同斜度条件下的锻件尺寸误差,能直观体现脱模斜度对尺寸精度的积极作用,实验结果也为数值模拟提供了有力支撑。

数值模拟与实验结果相互印证,既验证了脱模斜度优化对尺寸精度的显著改善效果,也为后续工艺优化提供了依据,实际应用中,数值模拟可快速评估不同脱模斜度下的锻件性能,减少实验中反复调试的时间与成本,实验验证为模拟结果提供现实依据,确保优化方案的可操作性。二者结合,不仅能进一步完善脱模斜度优化设计,还能为实际生产中的复杂问题提供解决方案,实验与数值模拟的结合,让脱模斜度优化设计在实际生产中得到更高效应用,提升锻件生产效率与质量,保障最终产品的精度与可靠性。

5 提高空气悬架锻件尺寸精度的工艺策略

提升空气悬架锻件尺寸精度的工艺策略,需从多维度开展优化调整,核心在于精准把控锻造全流程各环节,空气悬架锻件兼具高结构复杂性与严苛性能要求,设计生产全周期,需重视各细节对尺寸精度的潜在影响,锻件尺寸精度并非仅由模具设计决定,还与锻造温度、成型压力、冷却工艺、脱模斜度等诸多因素深度关联^[5]。科学甄选锻件材料,精准管控热处理工艺,可有效改善锻件综合质量与结构稳定性,针对空气悬架这类高性能要求的核心部件,优化上述工艺环节,是提升锻件尺寸精度的关键所在,依托精准的模具设计、适配的脱模斜度选取、合理的温度调控等综合工艺措施,可显著提升锻件尺寸精度,保障其实际应用中的可靠性与长期结构稳定性。

锻造过程的温度与压力管控,是提升锻件尺寸精度的另一核心要点,锻造作业中,温度与压力的动态变化,直接影响锻件塑性变形行为与冷却速率,锻造温度过高或过低,均会导致锻件变形能力不足或发生过度变形,进而影响最终尺寸精度,优化锻件加热工艺,可确保锻造过程中锻件维持适宜温度,提

升塑性变形性能,减少因温度分布不均引发的尺寸误差,锻造压力的精准调控,同样是提升尺寸精度的关键。锻造压力过大易造成材料过度流动,压力过小则可能导致锻件成型不充分,合理管控锻造压力,能确保锻件成型阶段处于最优塑性流动状态,有效降低尺寸偏差,为进一步提升温压管控精度,现代锻造工艺常融合实时监测技术,动态调整温压参数,确保锻造各阶段的温度与压力始终处于最佳工艺区间。

空气悬架锻件生产中,模具设计与冷却系统优化是提升尺寸精度的关键,模具设计结合锻件几何形状与材料特性,设定脱模斜度,规避斜度不当引发的尺寸误差,模具冷却系统依据锻件材料属性与结构形状设计,保障锻件脱模时均匀冷却,减少局部温度差异带来的尺寸偏差,冷却速率管控是工艺优化重要环节,适配速率可约束锻件形变与收缩,保障冷却全流程尺寸稳定,模具表面处理工艺直接影响锻件尺寸精度。模具表面光洁度高,与锻件摩擦力小,脱模更顺畅,降低表面瑕疵与成

型变形风险,材料科学与表面处理技术发展,新型模具材料与先进表面处理工艺,能提升模具综合性能、优化锻件成型精度,管控上述工艺因素,锻造全流程各环节管控,可提升空气悬架锻件尺寸精度,满足空气悬架系统核心零部件高精度与高可靠性要求。

6 结语

优化空气悬架锻件尺寸精度,是一项覆盖多个工艺环节的系统性工程,精准管控脱模斜度、温度、压力及模具设计等因素,可显著提升锻件整体尺寸精度,进而增强空气悬架系统的性能与可靠性,锻造过程中,科学甄选材料与工艺参数,结合现代数值模拟与实验验证技术,为锻件尺寸控制提供有力支撑。锻造技术持续进步,进一步完善这些工艺策略,将为空气悬架零部件高精度生产筑牢基础,推动整个汽车行业向高性能、高质量方向稳步提升。

参考文献:

- [1] 李俊熙.一种空气悬架多轴汽车的轴荷计算方法[J].重型汽车,2025,(06):14-15.
- [2] 陈毅超,张鹏,武俊超,等.空气悬架客车车身倾斜问题分析及解决方案[J].客车技术与研究,2025,47(06):75-78.
- [3] 姜超,侯世耀,柯炜,等.空气悬架导向臂生产过程常见表面缺陷分析[J].金属制品,2025,51(05):46-51.
- [4] 张丽萍,孙涛,朱永博.基于几何关系的空气悬架执行器故障诊断与隔离[J].现代电子技术,2025,48(17):137-144.
- [5] 徐涛,高振洋,南金瑞,等.基于路面识别的半主动空气悬架控制[J].北京理工大学学报,2025,45(08):798-806.