

# 电机轴精密锻件金属流线分布对疲劳性能的影响研究

姜金万 刘喆卿 王凯杰 王涛屹 宋芳群

浙江三维大通精锻股份有限公司 浙江 嘉兴 314311

**【摘要】**：电机轴为关键机械部件，疲劳性能直接关联整机可靠性与寿命，电机轴制造中，精密锻件金属流线分布起决定性作用，研究电机轴精密锻件金属流线分布，探究不同流线分布对电机轴疲劳性能的影响，均匀流线分布可有效分散应力，减缓裂纹产生扩展，提升电机轴抗疲劳能力。金属流线分布不均易引发局部应力集中，造成疲劳强度下降，结合研究结果，拟定金属流线分布优化设计方法，延长电机轴疲劳寿命，电机轴设计制造领域由此获得新研究思路，具备重要工程应用价值。

**【关键词】**：电机轴；精密锻件；金属流线分布；疲劳性能；应力集中

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.035

## 引言

现代机械设备中，电机轴是动力传递核心部件，应用于各类机械系统，疲劳性能决定设备长期运行稳定性与可靠性，精密锻件制造技术可提高电机轴强度与精度，金属流线分布影响其疲劳性能，金属流线均匀性决定电机轴应力分布，进而影响疲劳裂纹萌生与扩展。分析电机轴金属流线分布对疲劳性能的影响，可揭示长期使用中性能衰退机理，为电机轴优化设计和高效生产提供科学依据。

## 1 电机轴疲劳失效中金属流线呈现的问题

电机轴疲劳失效多出现于长期高负荷或频繁运行的工况，电机轴为电机核心部件，工作状态受多重因素作用，金属流线分布关联其疲劳性能表现，电机轴制造环节中，精密锻件技术常用来保障轴体结构强度与尺寸精度，锻造作业里，金属流线分布却常处于不均状态，对轴体疲劳性能形成深层影响<sup>[1]</sup>。锻件内金属流线分布不均易引发局部应力集中，这类区域更易成为裂纹源，加快疲劳失效的出现，电机轴运行期间，金属流线若分布不均，轴体承受重复载荷时，局部应力点易促使微裂纹延伸，微裂纹的持续发展会大幅影响电机轴的使用年限。

金属流线的方向性、密度与均匀性直接作用于电机轴抗疲劳性能，流线分布均匀时，载荷可在更大范围内分散，规避局部应力集中，此类结构更能抵御疲劳裂纹的萌生与延伸，金属流线分布不均则会造成局部结构薄弱或硬度偏差，极易形成应力集中点。负载波动较大的工况下，金属流线不规则区域易成为疲劳裂纹源，让电机轴的失效提前发生，实际生产过程中，锻件的金属流线受锻造温度、工艺参数、模具设计等诸多因素影响，任一环节的细微偏差，都可能对流线的均匀性造成不良影响，电机轴的设计与制造工作中，需重点关注金属流线的优化调整，保障轴体在高负荷、长时间运行的状态下，仍能保持良好的疲劳性能。

电机轴的疲劳失效并非仅由金属流线分布不均导致，金属流线的方向性、密度与均匀性直接作用于电机轴抗疲劳性能，流线分布均匀时，载荷可在更大范围内分散，规避局部应力集中，此类结构更能抵御疲劳裂纹的萌生与延伸，金属流线分布不均则会造成局部结构薄弱或硬度偏差，极易形成应力集中点。负载波动较大的工况下，金属流线不规则区域易成为疲劳裂纹源，让电机轴的失效提前发生，实际生产过程中，锻件的金属流线受锻造温度、工艺参数、模具设计等诸多因素影响，任一环节的细微偏差，都可能对流线的均匀性造成不良影响，电机轴的设计与制造工作中，需重点关注金属流线的优化调整，保障轴体在高负荷、长时间运行的状态下，仍能保持良好的疲劳性能。

失效的发生，锻造过程中，若材料本身存在明显的结构缺陷，即便金属流线分布相对均匀，轴体的疲劳性能也难以得到有效保障，电机轴实际使用时，负荷的变化、环境的温度、腐蚀作用等外部因素，也可能加快裂纹的形成与延伸。仅依靠优化金属流线分布来提升电机轴的疲劳性能，无法从根本上解决所有相关问题，需结合多方面影响因素，综合提升轴体的抗疲劳能力，在此基础上，深度探究金属流线分布与疲劳性能之间的内在关联，能够为电机轴的设计、制造与实际应用，提供更为系统的理论依据和实践指导。

## 2 精密锻造中金属流线形成的关键因素

精密锻造中，金属流线的形成受多重因素共同作用，锻造施加的温度与压力，主导金属流线的分布状态，高温环境下，金属塑性提升，材料更易发生变形，温度不均则会造成流线分布的偏差，锻造时的温度梯度，让金属不同位置的流动性产生差异，进而改变最终的流线形态，模具与金属的接触区域，因冷却速度偏快，金属流动性偏弱，往往形成流线密集或交错的结构<sup>[2]</sup>。锻造工艺中的压力，直接影响金属的变形程度，高压环境下金属更易贴合模具形状流动，改变流线的均匀性与方向性，实际生产里，压力施加不均，或是温度把控不到位，都会造成金属流线的不规则生成，影响成品的疲劳性能。

温度和压力之外，模具设计对金属流线的形成同样起到关键作用，模具的几何形状与尺寸，直接决定锻造中金属的流动方式，金属进入模具后，流动方向受模具内表面形状约束，模具设计划定了金属的流动路径，模具设计不合理，会让金属部分区域流动阻力增加，流线出现聚集，形成应力集中区，这类区域更易产生裂纹或发生疲劳失效。模具的表面光洁度与表面处理工艺，也会影响金属流线形成，表面粗糙的模具会增大金属摩擦阻力，阻碍流动进程，造成流线分布不均，精准的模具设计与高质量的模具表面处理，是保障金属流线均匀分布的基础。

材料自身的特性，对金属流线的形成也起着至关重要的作用，精密锻造中，合金成分、晶粒结构、杂质含量等差异，都

会改变金属的流动性，部分合金材料在高温下具备良好的流动性，另有合金则因屈服强度较高或塑性偏低，锻造中产生较大流动阻力，造成流线分布不均，晶粒大小也影响显著，细晶粒材料变形时能均匀分散应力，避免局部应力集中，推动流线均匀分布，粗晶粒材料则易在锻造过程中形成不均的流线，削弱材料的整体性能。材料中存在的气孔、夹杂物等杂质，也会在锻造中对金属流动形成不利影响，这类杂质会局部改变流线分布，造成局部区域性能波动，降低成品的使用可靠性，材料的合理选择与内在特性的严格把控，是精密锻造中决定金属流线分布的关键因素。

### 3 流线分布对电机轴疲劳性能的影响

金属流线分布对电机轴疲劳性能至关重要，高负荷、长时间运行工况下尤为明显，电机轴承担动力传递功能，承受不断变化的载荷，轴体内部随之产生应力，金属流线不均会造成局部应力集中，这类区域易产生裂纹，多次载荷循环后，裂纹扩展速度大幅提升，最终引发疲劳失效<sup>[2]</sup>。电机轴关键承载部位，流线过于密集或不规则，会使其抗疲劳能力明显下降，载荷持续作用下，流线密集区域金属在应力作用下发生微观塑性变形，进而萌生疲劳裂纹，高频负荷下这些裂纹持续扩展，可能导致电机轴断裂或彻底失效。

均匀的金属流线分布可促使轴体应力均匀分散，有效提升电机轴的实际疲劳强度，流线分布均匀状态下，电机轴体各部位承受相对平衡的应力，避免局部应力过大引发的金属疲劳损伤，电机轴实际使用中常面临多次反复载荷作用，高速旋转工况下，局部应力不均会大幅加剧金属的疲劳破坏。流线分布优化能切实改善金属整体力学性能，减少应力集中现象，增强轴体结构耐久性，精密锻造电机轴时，合理的流线设计可有效延长轴体使用寿命，降低疲劳裂纹引发的设备故障概率，电机轴设计环节需充分考量流线分布状态，确保负载反复作用下仍保持优良的抗疲劳性能。

流线分布对电机轴疲劳性能的影响，不仅取决于均匀性，还与流线方向性和分布密度密切相关，金属流线方向性决定电机轴表面摩擦和接触特性，影响材料在高应力区域的表现，部分情况下，流线弯曲或方向变化会形成局部薄弱点，高应力区域中，流线方向改变会使金属力学性质出现不规则变化，降低抗疲劳能力。流线密度较高的区域，可能因流动阻力增加导致材料局部强度下降，成为疲劳裂纹易发区域，电机轴设计时，除优化流线均匀性，还需注重方向性和分布密度，进一步提升疲劳性能，精准控制流线分布特性，可有效避免疲劳失效，延长电机轴使用寿命，提升电机整体可靠性。

### 4 基于流线优化的电机轴疲劳性能提升路径

优化电机轴金属流线分布，是提升其疲劳性能的重要途径，流线优化需从电机轴设计阶段开展，保障精密锻造中金属

流线的均匀分布，模具设计影响流线形成，设计需贴合金属在模具内的流动规律，优化模具几何形状、尺寸及表面处理，让金属在锻造中实现均匀流动<sup>[4]</sup>。电机轴承载部位的模具设计，需规避局部流线密集或弯曲问题，此类区域易引发应力集中，进而产生疲劳裂纹，可采用有限元分析计算方法，在设计阶段预判金属流线分布状态，调整模具设计与工艺参数，实现流线分布优化，提升电机轴疲劳寿命。

电机轴金属流线优化并非仅围绕模具设计展开，还深度关联锻造全过程的工艺参数精准调控，锻造中的温度、压力、变形速率三类核心参数，直接影响金属在成型过程中流线的实际分布状态，锻造温度控制需精准适配加工需求，能稳定保障金属材料塑性，避免因坯料过早冷却造成内部流线分布不均，锻造施加的压力需全程保持均匀，防止局部区域压力过高引发流线过度集中的问题。锻造速率的把控同样关键，变形速率过快会直接阻碍金属正常流动，最终形成不规则的流线分布，精准把控各类工艺参数，可在稳定保障生产效率的基础上，有效优化金属流线分布状态，切实提升电机轴的抗疲劳性能。

材料选择与处理，对电机轴金属流线的优化工作起到核心关键作用，材料本身的塑性、基础强度与内部微观结构，直接影响锻造加工中的实际流动性及流线的成型效果，细晶粒结构的金属材料流动性显著优于粗晶粒材料，在锻造加工中更易形成均匀的金属流线，以此提升电机轴的抗疲劳性能，材料内部的夹杂物、气孔等原生缺陷，会直接干扰金属流线的正常分布，造成流线形态出现不规则的问题。选材阶段需严格规避缺陷占比较多的材料，经专业热处理的材料内部组织结构得到优化调整，更适配锻造加工的实际要求，有效保障金属流线均匀分布，稳步提升电机轴的整体疲劳性能，材料特性与锻造工艺的协同作用，能让金属流线优化的实际效果充分发挥，显著提升电机轴的疲劳寿命，为电机设备的长期稳定运行筑牢坚实基础。

### 5 流线优化后的性能验证与规律提炼

流线优化后电机轴的性能验证，需通过实验测试印证金属流线优化对其疲劳性能的提升作用，疲劳试验直接评估电机轴疲劳强度与寿命，常采用旋转弯曲疲劳试验、轴向拉伸疲劳试验等测试方式，流线优化后的电机轴，在疲劳试验中呈现出显著的性能改善<sup>[5]</sup>。相同载荷与工况下，优化流线的电机轴可承受更多载荷循环，疲劳寿命较未优化的电机轴大幅延长，观察疲劳断裂表面可见，优化后电机轴的裂纹起始位置分布更均匀，未优化的电机轴则易在局部形成应力集中，造成裂纹的快速扩展，流线优化可有效提升电机轴抗疲劳能力，降低疲劳失效引发的故障风险。

后续分析可见，流线优化既提升电机轴疲劳寿命，也改善其整体力学性能，金属流线的优化让电机轴长期工作时的应力分布更均匀，减少局部应力集中的情况，借助有限元分析与模

拟仿真，能清晰观测到优化流线后电机轴运行中的应力变化，优化前，电机轴局部应力偏大，尤其在流线密集或不规则区域，易造成金属材料的屈服与断裂。优化后的流线让电机轴可在更多区域分散应力，避免应力过度集中，大幅降低局部失效的概率，流线分布优化后，电机轴整体力学性能提升，在承载较大压力、负荷频繁变化的工作条件下，仍能保持稳定运行状态，减少因疲劳失效产生的停机与维护成本。

归纳分析多次实验数据，可提炼出流线优化提升电机轴疲劳性能的相关规律，金属流线的均匀性，是提升电机轴疲劳性能的关键因素，流线均匀分布，能让材料承受重复载荷时避免局部应力集中，有效延缓疲劳裂纹的萌生与扩展，流线的方向性与密度优化，同样影响电机轴的疲劳性能，合理的流线方向性，保障应力在轴体内部的均匀分布，适配的流线密度，避免材料特定区域塑性过高或过低，进而提升整体疲劳强度。流线优化后，电机轴的局部硬度变化幅度较小，材料组织结构实现

均匀化，让金属承受外部应力时的状态更稳定，流线优化不仅提升电机轴抗疲劳能力，也改善其长期工作的稳定性与可靠性，这些规律为后续电机轴的设计与生产提供了宝贵参考，也为打造更高效、更耐用的电机轴提供了全新设计思路。

## 6 结语

流线优化对电机轴的疲劳性能形成显著提升效果，优化后的金属流线能够有效延长电机轴的实际疲劳寿命，同步改善轴体整体力学性能，减少轴身局部应力集中问题，直接降低因疲劳失效引发的各类设备故障风险，实验与分析结果充分印证，金属流线的均匀性、方向性、密度均直接影响电机轴疲劳强度，为电机轴的设计与生产工作提供全新理论依据与专业技术支持，后续可针对性进一步优化流线分布，结合材料核心特性与制造工艺创新，为稳步提升电机轴的运行可靠性与综合性能筑牢坚实基础。

## 参考文献：

- [1] 黄单栋,倪若钦.城轨电客车牵引电机轴温预警逻辑优化研究[J].现代城市轨道交通,2025,(07):89-95.
- [2] 随帅民,唐赢武,槐孝纪.市域列车牵引电机轴电压评估及测试研究[J].防爆电机,2025,60(03):51-54+64.
- [3] 苟文星,宋红,沈惠红,等.新能源分体式焊接空心电机轴工艺路线研究[J].锻造与冲压,2024,(23):20+22+24+26+28.
- [4] 苗站.不同金属流线的分布对稀土镁合金内环筋构件承载能力的影响[D].中北大学,2021.
- [5] 苗站,张治民,于建民,等.不同参数对铝合金枝杈类构件金属流线的影晌及优化[J].锻压技术,2021,46(02):105-110.