

斗轮机关键部件疲劳寿命预测与可靠性分析

罗浩浩

中煤鄂州能源开发有限公司 湖北 鄂州 436070

摘要：斗轮机在物料堆取作业中发挥关键作用，关键部件疲劳寿命与可靠性影响设备运行。本文先识别分类斗轮机关键部件，分析其疲劳失效机理，接着阐述疲劳寿命预测方法，包括名义应力法、局部应力应变法等，最后从设计优化、制造工艺改进、使用维护与管理三方面提出提高关键部件疲劳寿命与可靠性的措施，为斗轮机安全稳定运行提供参考。

关键词：斗轮机；关键部件；疲劳失效机理；疲劳寿命预测；可靠性分析

引言：在工业物料处理领域，斗轮机凭借高效的物料堆取能力，成为大型散料处理的核心设备。其关键部件长期处于复杂工况，承受交变载荷，易出现疲劳失效，影响设备正常运行与生产效率。研究斗轮机关键部件疲劳寿命预测与可靠性分析，有助于深入了解部件失效规律，提前预防故障，保障设备稳定运行，对工业生产具有重要意义。

1 斗轮机关键部件识别与分类

1.1 结构部件

斗轮体是斗轮机实现物料挖取与输送的核心执行部件，轮体结构多采用耐磨钢板焊接成型，具备足够的强度与刚度以抵御物料冲击与磨损，常见结构形式可适配不同工况下的挖取需求。斗子安装需契合轮体结构设计，采用便于检修拆卸的连接方式，确保作业过程中无回料、不粘料，同时具备防脱落功能，保障作业连续性^[1]。悬臂梁承担着斗轮体的支撑与物料输送载体的双重功能，支撑结构需结合设备整体载荷分布进行优化设计，兼顾结构强度与轻量化需求。长度设计需匹配斗轮机作业半径与堆取料范围，截面设计则根据受力分析采用合理构型，有效分散作业过程中产生的弯矩与剪力，避免结构变形。门座架是斗轮机的基础支撑部件，结构形式需适配设备整体布局与作业工况，为上部回转结构与行走机构提供稳定支撑。支撑方式需结合设备总质量与作业载荷进行设计，确保设备在回转、行走及堆取料作业中保持整体稳定性，避免出现晃动或偏移，保障作业安全。

1.2 传动部件

减速器是斗轮机传动系统的关键环节。齿轮传动类型依据功率、转速及传动比等要求进行选择，不同类型齿轮具有不同传动特点与适用范围。齿轮参数设计经过精确计算，包括齿数、模数、压力角等，一般齿数在15-50之间，模数在3-12mm之间，压力角通常为20°。如

此精心设计的齿轮参数，能够保证齿轮啮合平稳、传动效率高，同时具备足够强度与耐磨性，以适应长时间连续工作。联轴器用于连接不同轴系，实现动力传递。类型选择根据工作条件、转速、转矩等因素确定，不同类型联轴器具有不同补偿能力与缓冲性能。连接方式设计合理，确保联轴器在传递动力过程中连接可靠、拆卸方便，便于设备维护与检修。制动器是保障斗轮机安全运行的重要部件。结构设计紧密结合制动原理，通过特定机构实现制动功能。制动原理基于摩擦力或电磁力等，能在需要时迅速、可靠地使设备停止运动，防止因惯性继续运动而引发安全事故。

1.3 回转部件

回转支承作为斗轮机上部结构回转运动的核心部件，类型可分为四点接触球轴承、交叉滚子轴承、三排圆柱滚子复合轴承等，选用需结合设备回转精度与承载需求。承载能力设计需参考转盘轴承技术标准，根据设备上部结构总质量、作业载荷及倾覆力矩进行核算，确保能够承受轴向、径向负荷与倾覆力矩的综合作用。回转驱动装置为斗轮机回转运动提供动力，驱动方式多采用机械传动结合变频调速技术，适配不同作业场景下的回转速度需求。驱动元件选择需结合驱动功率与作业精度要求，选用符合设备工况的电机与传动部件，确保回转运动平稳、精准，实现斗轮体在指定范围内的灵活作业。

2 斗轮机关键部件疲劳失效机理分析

2.1 疲劳破坏的基本概念

在机械工程领域，疲劳破坏是一种极为常见且危害较大的失效形式。疲劳指的是材料在交变应力持续作用下，即便应力水平低于材料的静强度极限，经过一定次数的循环后，依然会发生断裂的现象^[2]。依据循环次数的高低，疲劳可划分为高周疲劳与低周疲劳。高周疲劳通常涉及大量的循环次数，应力水平相对较低，常见于

承受频繁振动或交变载荷的部件；低周疲劳则循环次数较少，应力水平较高，多出现在承受较大塑性变形的部件中。疲劳裂纹的形成与扩展是一个复杂且渐进的过程。在交变应力作用下，材料内部微观结构会发生变化，位错运动逐渐积累，形成微小的滑移带。随着循环次数的增加，这些滑移带不断发展和聚集，最终在材料表面或内部缺陷处形成微裂纹。微裂纹一旦形成，在后续的交变应力作用下，会沿着特定方向不断扩展，逐渐形成宏观裂纹。随着裂纹的进一步扩展，有效承载面积减小，当剩余强度不足以承受外力时，部件便会发生断裂。

2.2 结构部件疲劳失效机理

斗轮体作为斗轮机的关键结构部件，在工作过程中承受着物料冲击与旋转载荷的双重作用。物料冲击会产生瞬间的冲击力，使斗轮体表面产生应力集中，长期作用易引发表面损伤。旋转载荷则使斗轮体内部产生交变应力，导致微观结构发生变化，逐渐形成疲劳损伤。悬臂梁在变幅载荷与自重作用下，其应力分布不均匀。变幅载荷使得悬臂梁承受的应力大小不断变化，自重则使悬臂梁始终存在一定的弯曲应力。在两者的共同作用下，悬臂梁的某些部位容易产生应力集中，成为疲劳裂纹萌生的源头。门座架处于复杂工况下，由于结构形状和受力特点，在一些部位会出现应力集中现象。在长期的交变应力作用下，这些应力集中部位的材料性能逐渐劣化，最终导致疲劳破坏。

2.3 传动部件疲劳失效机理

减速器齿轮在运转过程中承受着交变应力。齿面在交变接触应力作用下，会发生微动磨损，逐渐形成微裂纹，进而发展为齿面疲劳。齿根部位由于应力集中，在交变弯曲应力作用下，容易产生齿根疲劳，导致齿轮断裂。联轴器在传递扭矩时，会受到扭矩波动的影响。扭矩波动使得联轴器承受的应力大小不断变化，长期作用下，材料内部会产生疲劳损伤，最终引发疲劳断裂。制动器在频繁制动过程中，摩擦副之间会产生大量的热量和摩擦力。摩擦力使制动器表面材料发生磨损和塑性变形，热量则会影响材料的力学性能。在两者的共同作用下，制动器会出现摩擦疲劳与结构疲劳，降低其使用寿命。

2.4 回转部件疲劳失效机理

回转支承运行过程中，滚动体与滚道之间存在滚动接触，同时承受轴向载荷、径向载荷及倾覆力矩的共同作用，滚动接触产生的接触应力与载荷引发的交变应力交替作用，导致滚道与滚动体表面产生疲劳磨损。疲劳磨损会加剧部件表面损伤，降低回转支承的承载能力与回转精度，长期累积会引发部件失效。回转驱动装置在

启动与制动过程中，载荷会发生剧烈变化，形成交变冲击载荷，使驱动装置内部部件产生交变应力。启动时的载荷冲击与制动时的惯性载荷，会导致驱动部件损伤逐步累积，长期作用下引发疲劳损伤，影响驱动装置的运行稳定性，严重时导致驱动失效，影响设备回转作业。

3 关键部件疲劳寿命预测方法

3.1 名义应力法

名义应力法是疲劳寿命预测领域广泛应用且历史悠久的方法。该方法基本原理建立在材料疲劳特性与名义应力水平关联之上，认为在相同名义应力幅作用下，材料经历一定循环次数后会发生疲劳破坏^[1]。适用范围主要涵盖高周疲劳问题，此时材料所受应力水平相对较低，循环次数较高。S-N曲线作为名义应力法的核心依据，描绘了材料应力幅与疲劳寿命之间的关系。获取S-N曲线通常需进行大量标准试样的疲劳试验，通过精确控制应力水平与循环次数，记录试样破坏时的数据，进而绘制出反映材料疲劳性能的曲线。在疲劳寿命预测中，依据部件所受名义应力幅，在S-N曲线上查找对应的疲劳寿命，为部件寿命评估提供基础。应力集中系数对名义应力法预测结果影响显著。确定应力集中系数需综合考虑部件几何形状、尺寸突变等因素。通过理论计算、数值模拟或实验测量等方法，精确量化应力集中程度，修正名义应力，使预测结果更贴近实际情况。

3.2 局部应力应变法

局部应力应变法聚焦于部件缺口、裂纹等危险部位的局部应力应变状态。基本概念基于材料在循环载荷作用下的局部塑性变形与疲劳损伤的紧密联系。理论基础涵盖材料循环本构关系与疲劳损伤累积规律。建立循环应力应变曲线是局部应力应变法的关键步骤。通过控制应变幅的循环加载试验，记录材料应力应变响应，绘制出反映材料循环硬化或软化特性的曲线。缺口根部应力应变分析是该方法核心环节。考虑缺口几何形状、尺寸及载荷条件，运用弹塑性力学理论或数值模拟方法，精确计算缺口根部应力应变分布，为疲劳寿命预测提供关键数据。

3.3 损伤容限设计法

损伤容限设计法以裂纹扩展理论为基石。裂纹扩展理论描述了裂纹在载荷作用下随时间逐步扩展的规律，考虑了材料特性、载荷谱、环境等因素对裂纹扩展速率的影响。断裂韧性作为材料抵抗裂纹扩展能力的重要指标，测定与评估需通过标准试验方法，如紧凑拉伸试验、三点弯曲试验等，获取材料断裂韧性数据，为损伤容限分析提供依据。剩余强度分析关注含裂纹部件在特定载

荷下的承载能力。通过理论计算或实验验证,确定部件剩余强度与裂纹尺寸的关系。结合裂纹扩展规律,预测部件从初始裂纹到失效的寿命。

3.4 能量法

能量法引入能量释放率概念,能量释放率表示裂纹扩展单位面积所释放的能量。该概念将疲劳损伤与能量变化联系起来,为疲劳寿命预测提供新视角。基于能量法构建疲劳寿命预测模型,需考虑材料能量释放率与裂纹扩展速率的关系,结合载荷谱与部件几何特征,建立反映能量变化与疲劳寿命关联的数学模型。与其他方法相比,能量法具有独特优势。它无需详细跟踪裂纹尖端应力应变场,从能量角度出发,简化了分析过程。同时,能量法在处理复杂载荷与环境耦合作用下的疲劳问题时,展现出一定适应性。

4 提高关键部件疲劳寿命与可靠性的措施

4.1 设计优化措施

结构优化设计聚焦减轻重量与改善应力分布,在保证结构强度与刚度前提下,优化部件几何构型与材料分布,实现轻量化设计。借助有限元分析技术精准模拟结构应力场,识别高应力集中区域,通过调整截面尺寸、优化筋板布局等方式均匀分散应力,降低局部应力水平,从源头减少疲劳损伤萌生概率^[4]。材料选择与匹配需贴合部件实际受力工况,优先选用高强度、高韧性材料,结合不同部位性能需求匹配适配材料体系,提升材料抗疲劳与抗断裂能力。兼顾材料耐磨、耐腐蚀特性,延长部件在复杂工况下的服役周期,确保材料性能与部件使用要求高度契合,符合机械材料选型规范。抗疲劳设计细节贯穿结构设计全程,关键部位采用圆角过渡设计,消除尖锐棱角引发的应力集中,提升结构抗疲劳性能。对易发生疲劳损伤的表面实施强化处理,通过喷丸、渗碳等工艺改善表面完整性,引入残余压应力,提高表面疲劳强度,有效延长部件疲劳寿命。

4.2 制造工艺改进措施

精密加工工艺是保障部件尺寸精度与表面质量的基础,采用高精度加工设备与先进加工技术,严格控制加工公差,提升零件配合面加工质量,减少尺寸偏差引发的应力集中。优化加工路径与工艺参数,降低加工过程中产生的表面损伤与微裂纹,为部件良好服役性能奠定基础。热处理工艺优化核心是改善材料内部组织与力学

性能,根据材料特性与部件使用要求制定科学热处理方案,通过调控加热温度、保温时间及冷却方式,细化材料晶粒、优化组织形态,提升材料强度、韧性与抗疲劳性能,消除内部残余拉应力。装配工艺控制直接影响部件运行稳定性,严格遵循装配规范,精准控制装配间隙与预紧力,保障部件配合精度。采用合理装配工具与方法,避免装配过程中产生附加应力与损伤,确保各部件协同工作,降低装配缺陷引发的早期疲劳失效。

4.3 使用维护与管理措施

合理控制工作载荷可有效延缓疲劳损伤累积,根据设备设计工况与载荷极限,规范作业流程,避免部件长期处于过载状态。优化作业策略,控制物料输送量与作业节奏,减少载荷波动对部件的冲击,降低交变应力幅值,延长部件服役寿命。定期维护保养需结合部件运行特性,建立标准化润滑、紧固与检查体系,定期对关键部位进行润滑,减少摩擦磨损与卡滞现象。对连接部位开展紧固与检查,及时处理松动、裂纹等隐患,维持部件结构完整性与运行稳定性。故障监测与诊断技术实现主动预防,部署先进状态监测系统,实时采集关键部件振动、温度等状态数据并分析,通过智能化算法识别异常运行状态,提前预警潜在故障,为预防性维护提供依据,提升设备整体可靠性。

结束语

斗轮机关键部件疲劳寿命预测与可靠性分析是保障设备稳定运行的关键。通过对关键部件识别分类、深入剖析疲劳失效机理,采用多种疲劳寿命预测方法,并从设计、制造、使用维护等多方面采取有效措施,可显著提高关键部件疲劳寿命与可靠性。这不仅有助于降低设备故障率,减少维修成本,还能提升生产效率,保障工业生产的顺利进行,为相关领域的技术发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]张琦昊.斗轮机回转轴承损坏原因分析及维护策略[J].中国设备工程,2023(4):145-147.
- [2]郝轰宇,武爱民,田宏亮.斗轮机智能自动无线控制系统的应用[J].现代工业经济和信息化,2022,12(4):163-164,192.
- [3]胡南山.斗轮机悬臂皮带机漏煤问题治理探析[J].科海故事博览,2023(30):112-114.
- [4]孙超宇.斗轮机自动化控制系统的设计与实现[J].数码精品世界,2023(4):223-225.