

冶金天车金属结构疲劳损伤评估与加固改造策略

杜晓光

敬业钢铁有限公司，河北石家庄，050400；

摘要：冶金天车在钢铁生产中承担着物料吊运的关键任务，其金属结构的安全性至关重要。由于长期承受复杂交变荷载，天车金属结构易出现疲劳损伤，威胁生产安全。本文深入分析了冶金天车金属结构疲劳损伤的机理，阐述了疲劳损伤评估的方法，包括基于应力监测的评估、基于无损检测的评估等，并结合实际案例进行说明。同时，详细探讨了加固改造策略，如焊接修复、粘贴复合材料加固、增设支撑结构等，旨在为保障冶金天车安全运行、延长使用寿命提供理论与实践指导。通过本文的研究，期望能提升冶金行业对天车金属结构疲劳问题的重视，推动相关技术的发展与应用。

关键词：冶金天车；金属结构；加固改造

DOI：10.69979/3060-8767.25.08.012

1 引言

在冶金工业领域，冶金天车作为物料吊运的核心设备，在原料运输、钢水吊运、成品搬运等多个关键环节发挥着不可替代的作用。随着钢铁生产规模的不断扩大以及生产效率要求的日益提高，冶金天车的使用频率和承载负荷持续增加。在长期复杂的工作环境下，天车金属结构面临着严峻的考验，疲劳损伤问题逐渐凸显。疲劳损伤是导致冶金天车金属结构失效甚至引发重大安全事故的重要原因之一。据相关统计，因天车金属结构疲劳破坏引发的安全事故，不仅造成了巨大的经济损失，还严重威胁到操作人员的生命安全。因此，深入研究冶金天车金属结构疲劳损伤评估与加固改造策略，对于保障冶金生产的安全、稳定运行具有重要的现实意义。

2 冶金天车金属结构疲劳损伤机理

2.1 疲劳损伤基本概念

疲劳损伤是指材料在交变应力或应变作用下，经过一定循环次数后，内部微观结构逐渐发生变化，形成微裂纹，并随着循环次数的增加，微裂纹不断扩展、连接，最终导致材料宏观断裂的过程。与静载作用下的材料破坏不同，疲劳破坏通常在远低于材料屈服强度的应力水平下发生，且具有突发性和隐蔽性的特点。

2.2 冶金天车金属结构疲劳损伤影响因素

2.2.1 荷载因素

冶金天车在吊运物料过程中，所承受的荷载具有显著的动态特性与随机性，这是导致金属结构疲劳损伤的重要诱因。在起升过程中，天车需克服物料重力与惯性力，使金属结构承受急剧增大的拉应力；下降时，制动装置介入，瞬间产生的制动力会在结构上形成巨大的压应力或剪切应力；运行过程中的频繁启动、停止，也会

引发结构的振动与冲击，致使应力频繁交替变化。某大型钢铁企业的监测数据显示，在一个工作日内，天车主梁关键部位的应力循环次数可达数千次，这种高频次的应力波动极大地加速了疲劳损伤进程。

2.2.2 结构因素

天车金属结构的设计、制造工艺及几何形状，对其疲劳性能有着决定性影响。从设计角度看，不合理的结构形式或尺寸参数，会导致应力分布不均，增加疲劳破坏风险。例如，某些天车主梁采用的截面形式，在相同荷载下，应力集中程度比优化设计方案高出 30%-40%。制造工艺方面，焊接质量直接关系到结构的疲劳寿命。焊接过程中产生的气孔、夹渣、未焊透等缺陷，会成为疲劳裂纹的起始点。研究表明，存在未焊透缺陷的焊接接头，其疲劳强度仅为正常接头的 50%-70%。此外，焊缝的余高过大、咬边等问题，也会改变应力分布，引发应力集中。

结构的几何形状同样重要，焊接接头、开孔、截面突变等部位，在交变荷载作用下，会出现局部应力显著高于平均应力的现象。以天车的连接板开孔为例，孔边缘处的应力集中系数可达 2-3，在长期交变荷载作用下，极易产生疲劳裂纹。某钢铁厂曾对多台服役 5-8 年的天车进行检测，发现 90% 以上的疲劳裂纹都起源于焊接接头和应力集中部位，充分说明了结构因素对疲劳损伤的重要影响。

2.2.3 环境因素

冶金生产环境的恶劣性，对天车金属结构的疲劳性能产生了严重的不利影响。高温是冶金环境的显著特点之一，在炼钢、连铸等工序附近，天车所处环境温度可达 100℃-300℃，部分特殊区域甚至更高。高温会使金属材料的晶粒长大，强度和硬度降低，其疲劳极限可下

降15%~30%。同时,高温还会加速材料内部的位错运动,促使微裂纹的形成与扩展。

腐蚀性介质也是威胁天车金属结构的重要因素。冶金生产过程中产生的二氧化硫、硫化氢等气体,以及冷却水、酸碱溶液等液体,会与金属表面发生化学反应,形成腐蚀坑。这些腐蚀坑不仅削弱了结构的有效承载面积,还会引发应力集中,加速疲劳裂纹的产生。研究表明,在腐蚀环境下,金属结构的疲劳寿命可缩短40%~60%。此外,高湿环境会在金属表面形成水膜,促进电化学腐蚀的发生,进一步恶化结构的疲劳性能。某沿海地区的钢铁厂,由于空气中含盐量高,天车金属结构的腐蚀疲劳问题尤为突出,维修频率比内陆地区高出近一倍。

3 冶金天车金属结构疲劳损伤评估方法

3.1 基于应力监测的评估方法

3.1.1 应力监测原理与布置

通过在天车金属结构的关键部位,如主梁跨中、支腿与主梁连接处、吊点附近等,粘贴应变片或安装应力传感器,实时监测结构在运行过程中的应力变化情况。应力监测点的布置应根据结构的受力特点和疲劳敏感区域进行合理选择,确保能够准确获取关键部位的应力信息。

3.1.2 数据采集与分析

利用数据采集系统对传感器输出的信号进行实时采集,并传输至数据分析软件。通过对应力数据的统计分析,如应力幅、平均应力、应力循环次数等参数的计算,结合材料的疲劳性能参数,运用Miner线性累积损伤理论等方法,评估结构的疲劳损伤程度。例如,根据应力幅和材料的S-N曲线,计算每次应力循环对应的损伤值,再通过累积损伤值判断结构的疲劳状态。

3.2 基于无损检测的评估方法

3.2.1 超声检测

超声检测是利用超声波在金属材料中传播时,遇到缺陷会发生反射、折射和散射的特性,来检测结构内部是否存在缺陷以及缺陷的位置、大小和形状。对于冶金天车金属结构,超声检测可用于检测焊接接头、关键零部件等部位的内部缺陷,如裂纹、气孔等。通过对检测信号的分析 and 处理,评估缺陷对结构疲劳性能的影响。

3.2.2 磁粉检测

磁粉检测主要适用于检测铁磁性材料表面和近表面的缺陷。在检测时,先对被检测部位施加磁场,使缺陷处产生漏磁场,然后在表面喷洒磁粉,磁粉会在漏磁场的作用下聚集,形成明显的磁痕,从而显示出缺陷的位置和形状。对于天车金属结构的焊缝、螺栓连接处等易产生表面疲劳裂纹的部位,磁粉检测是一种有效的检测手段。

3.2.3 红外检测

红外检测是基于物体表面温度分布与内部缺陷之间的关系进行检测的方法。当结构内部存在缺陷时,在交变荷载作用下,缺陷处的能量耗散会导致局部温度升高,通过红外热像仪可以捕捉到这种温度变化,进而发现潜在的缺陷。红外检测具有非接触、检测速度快等优点,可用于对天车金属结构进行大面积的快速筛查,确定可能存在疲劳损伤的区域。

3.3 基于有限元分析的评估方法

3.3.1 有限元模型建立

根据冶金天车金属结构的实际几何尺寸、材料属性以及约束条件,利用有限元分析软件建立精确的结构模型。将结构离散为有限个单元,通过节点连接,模拟结构在各种荷载工况下的力学行为。在建模过程中,要充分考虑结构的细节特征,如焊接接头的模拟、应力集中部位的处理等,以提高模型的准确性。

3.3.2 荷载工况模拟与分析

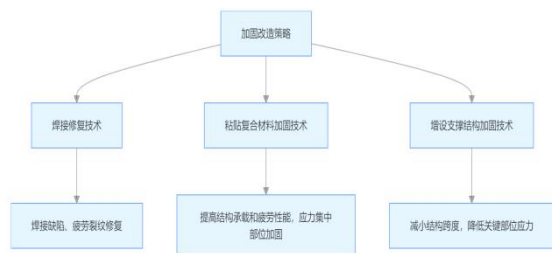
根据天车的实际工作情况,在有限元模型中施加相应的荷载工况,包括起升荷载、运行荷载、制动荷载等,并考虑荷载的动态特性和随机性。通过有限元计算,得到结构在不同荷载工况下的应力分布、变形情况等结果。对计算结果进行分析,确定结构的危险部位和潜在的疲劳损伤区域,评估结构的疲劳性能。

3.4 案例分析

某钢铁厂对一台服役10年的冶金天车进行疲劳损伤评估。首先采用应力监测方法,在主梁跨中、支腿与主梁连接处等关键部位布置应变片,连续监测天车在一个月内的运行应力数据。通过数据分析,发现主梁跨中部位的应力幅较大,且平均应力也超出了设计允许范围。同时,利用超声检测和磁粉检测对焊接接头进行无损检测,发现部分焊接接头存在未焊透、表面裂纹等缺陷。结合有限元分析,建立天车金属结构的有限元模型,模拟实际荷载工况,计算结果与应力监测和无损检测结果相吻合,进一步确定了结构的疲劳损伤程度。根据评估结果,该天车金属结构已出现较为严重的疲劳损伤,需要及时加固改造。

冶金天车金属结构加固改造策略

冶金天车金属结构加固改造策略多样,焊接修复可处理缺陷裂纹,需把控工艺与质量;粘贴复合材料能增强承载与疲劳性能;增设支撑结构可优化受力。通过合理运用这些策略,能有效应对天车金属结构疲劳损伤,提升设备安全性与可靠性。



4.1 焊接修复技术

4.1.1 焊接修复工艺选择

对于天车金属结构中出现的焊接缺陷或疲劳裂纹，可采用焊接修复的方法进行处理。在选择焊接工艺时，要根据结构材料、缺陷类型和位置等因素综合考虑。例如，对于低碳钢和低合金钢材料的结构，常用的焊接方法有手工电弧焊、二氧化碳气体保护焊等。对于较深的裂纹，可采用开坡口焊接的方式，确保焊接质量。

4.1.2 焊接修复质量控制

焊接修复过程中的质量控制至关重要。在焊接前，要对缺陷部位进行彻底清理，去除油污、铁锈等杂质，并对裂纹进行止裂处理。焊接过程中，要严格控制焊接参数，如焊接电流、电压、焊接速度等，确保焊接质量。焊接后，应对修复部位进行无损检测，如超声检测、磁粉检测等，确保焊接接头无缺陷。同时，要对修复后的结构进行适当的热处理，消除焊接残余应力，提高结构的疲劳性能。

4.2 粘贴复合材料加固技术

4.2.1 复合材料选择与粘贴工艺

粘贴复合材料加固是一种常用的结构加固方法，对于冶金天车金属结构，可选用碳纤维复合材料或玻璃纤维复合材料等。在粘贴前，要对结构表面进行处理，确保表面平整、干燥、清洁。然后，根据设计要求，将裁剪好的复合材料片材均匀涂抹粘结剂，粘贴在结构需要加固的部位，并施加适当的压力，使复合材料与结构表面紧密贴合。

4.2.2 加固效果分析

粘贴复合材料加固可以有效提高结构的承载能力和疲劳性能。复合材料具有较高的强度和模量，能够分担结构所承受的部分荷载，降低结构关键部位的应力水平。通过有限元分析和试验研究表明，粘贴复合材料加固后的天车金属结构，在相同荷载条件下，应力幅明显降低，疲劳寿命显著延长。

4.3 增设支撑结构加固技术

4.3.1 支撑结构设计

根据天车金属结构的受力特点和疲劳损伤情况，合

理设计增设支撑结构。例如，在主梁跨中增设中间支撑，可减小主梁的计算跨度，降低主梁所承受的弯矩和应力。支撑结构的形式可采用钢支撑、混凝土支撑等，其材料和截面尺寸应根据计算确定，确保支撑结构能够有效地承担荷载。

4.3.2 支撑结构安装与调试

在安装支撑结构时，要确保支撑与天车金属结构的连接牢固可靠。对于钢支撑，可采用焊接或螺栓连接的方式；对于混凝土支撑，要保证基础的稳定性。安装完成后，要对支撑结构进行调试，确保其能够正常发挥作用，对天车金属结构起到有效的加固效果。

4.4 案例分析

以上述钢铁厂的冶金天车为例，针对评估出的疲劳损伤问题，采用了多种加固改造策略。对于焊接接头处的缺陷，采用二氧化碳气体保护焊进行修复，并严格控制焊接质量。在主梁跨中及应力集中部位，粘贴碳纤维复合材料进行加固，以提高结构的承载能力和疲劳性能。同时，在主梁跨中增设了一道钢支撑，减小了主梁的计算跨度。经过加固改造后，再次对天车金属结构进行应力监测和有限元分析，结果表明，结构关键部位的应力水平明显降低，疲劳损伤得到有效控制，天车的安全性和可靠性得到显著提高。

5 结论

冶金天车金属结构的疲劳损伤问题严重影响着钢铁生产的安全与稳定。通过深入研究疲劳损伤机理，采用科学合理的评估方法，如基于应力监测、无损检测和有限元分析等方法，能够准确评估天车金属结构的疲劳损伤程度。针对不同的疲劳损伤情况，选择合适的加固改造策略，如焊接修复、粘贴复合材料加固、增设支撑结构等，可有效提高天车金属结构的承载能力和疲劳性能，延长其使用寿命。在实际工程中，应加强对冶金天车的日常维护与监测，定期进行疲劳损伤评估，及时发现和处理潜在的安全隐患，确保冶金天车的安全可靠运行，为钢铁行业的持续发展提供有力保障。

参考文献

- [1] 黄凌峰. 天车升沉补偿装置摇臂机构滑轮接触特性及损伤机理研究[D]. 西南石油大学, 2018.
- [2] 刘永明. 桥式起重机再次加固改造的一次成功经验[J]. 中国设备管理, 1994(04): 26. DOI: CNKI: SUN: SBGL. 0. 1994-04-022.
- [3] 崔洁. 用加长天车缓冲器的方法解决厂房排架结构和更换天车梁问题[J]. 科技资讯, 2013, 000(015): 66-66. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3791. 2013. 15. 049.