球墨铸铁管生产设备精益维护与综合效能提升研究

张 政 崔博阳 李 强
河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，河南 安阳 455133

[摘要]球墨铸铁管生产主要依靠离心浇铸，管模热疲劳、离心机参数失稳以及退火炉工况波动是影响设备效能的主要因素。对于行业普遍存在的预防性维护不到位、备件管理粗放、效能评价缺失等现象，从分级分类管理、点检预防体系、关键部件诊断、标准化全员参与四个方面入手，创建起精益维护途径，最后给出参数协同优化、备件精益管控、运行数据监测、效能持续改进的综合效能提升办法。从行业实践来看，离心机经过系统的精益改善之后，设备综合效率可以由原来的50%提高到60%以上，给球墨铸铁管企业设备管理转型提供可以参照的实践框架。

[关键词]球墨铸铁管；生产设备；精益维护；综合效能
DOI：10.33142/ec.v9i11.20733 中图分类号：TG249.2 文献标识码：A

Research on Lean Maintenance and Comprehensive Efficiency Improvement of Ductile Iron Pipe Production Equipment

ZHANG Zheng, CUI Boyang, LI Qiang
Angang Yongtong Ductile Iron Pipe Limited Liability Company, He'nan Iron & Steel Group, Anyang, He'nan, 455133, China

Abstract: The production of ductile iron pipes mainly relies on centrifugal casting, and the thermal fatigue of pipe molds, instability of centrifuge parameters, and fluctuations in annealing furnace conditions are the main factors affecting equipment efficiency. Starting from the four aspects of hierarchical classification management, inspection and prevention system, key component diagnosis, and standardized full staff participation, a lean maintenance approach is created to address the common issues in the industry such as inadequate preventive maintenance, extensive spare parts management, and lack of efficiency evaluation. Finally, a comprehensive efficiency improvement method is proposed, which includes parameter collaborative optimization, spare parts lean control, operational data monitoring, and continuous efficiency improvement. From industry practice, after systematic lean improvement, the comprehensive efficiency of centrifuges can be increased from the original 50% range to over 60%, providing a practical framework for the transformation of equipment management in ductile iron pipe enterprises.

Keywords: ductile iron pipe; production equipment; lean maintenance; comprehensive efficiency

引言

球墨铸铁管生产链上，离心机、管模、退火炉属于效能敏感的重要设备。离心机高速旋转时，管模受到剧烈的交变热应力，退火炉温度制度稍有偏差就可能导致金相组织不合格。设备一旦发生劣化或者非计划停机，损失就会沿着工序链迅速传播。但是目前的行业设备管理仍然以事后维修和定期更换零件为主，预防性维护的深度和数据驱动的准确性都比较低。精益维护就是把管理重心由修复效率前移到劣化预防上，用最少的维护资源来保证设备固有的可靠性。该理念在球墨铸铁管领域还没有得到充分的应用，本文就该问题进行路径设计和效能提升措施的研究。

1 球墨铸铁管生产设备精益维护的基本内涵

精益维护在球墨铸铁管场景中的主要目的就是把消除浪费和持续改善的思想融入到设备管理的各个环节当中去，根据设备劣化规律，在合适的时机使用合适的资源来阻止故障的发生。对于离心机来说，就是从故障后抢修转为对行走机构、旋转精度、冷却水路的周期性状态控制；对于管模来说，就是用热裂纹萌生和扩展的规律来代替固定的换模周期。维持活动自身的效率也是精益的对象，点检冗余、备件积压、维修等待都是需要识别的非增值环节。维持精益化来降低非计划停机和速度损失，效能评价给维护决策提供量化依据，二者形成闭环。

精益维护的内涵也包含维护资源配置逻辑的重新安

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

排，根据设备对产线节拍、产品质量的实际影响来对资源进行分配，把有限的高技能维护力量集中到最需要的地方，从而达到提高整体维护投入边际效益的目的[1]。离心机和管模的失效后果比辅助设备要严重得多，资源倾斜配置有明确的工艺依据。同时精益维护也重视维护知识的显性化，把分散在个人经验之中的判断依据变成可以传承的标准和数据，从而减少设备管理对于某个特定人员的依赖风险。

2 球墨铸铁管生产设备运行维护现状及问题分析

2.1 关键设备运行特点与维护需求

离心机是球墨铸铁管成型的主要设备，它的工作特点就是高转速、短节拍和强热冲击的叠加。管模在每一个浇铸循环中都会经历快速加热和强制冷却的过程，热应力不断地积累起来。当球墨铸铁管用水冷金属型生产大口径管时，使用离心水冷的生产方式，冷却速度较快，管模容易出现裂纹，从而导致管模的使用寿命降低。因此管模维护不能只在裂纹出现之后进行补焊或者更换，而应该把冷却水路的通畅性以及换热的均匀性纳入到日常的管理当中。退火炉的维护主要是对温度场的稳定性以及煤气压力的控制精度进行维护，退火炉的温度或者链速出现一点的小变化就可能使退火组织不合格[2]。另外离心机的浇铸参数（转速、浇铸速度、管模温度）和管模状态之间存在着很强的耦合关系，单机维护如果不能考虑参数的协同作用，那么改善的效果就会很难保持。精整工序的矫圆机、水压试验机虽然失效后果比较轻微，但是它对产线整体产出的影响也不可忽视，因此在可靠性与经济性之间寻找一个合适的平衡点。

2.2 设备维护管理中的主要问题

从行业共性上看，主要存在的问题是三个层面。第一，预防性维护的形式化。点检项目大多根据经验来确定，没有与设备失效机理相联系，点检结果不能支持维修决策。第二，备件管理的粗放化。管模、离心机易损件等重要备件要么库存过多占用资金，要么关键型号缺货造成停机等待，缺少根据消耗规律和采购周期进行动态控制的方法。第三，效能评价的缺失[3]。大部分企业只统计故障停机时间，没有系统地收集设备综合效率的数据，维护改善的效果不能被量化验证，持续改进没有基准。专业点检机制依靠创建分级分类点检标准、形成多维协同管理机制、推行动态化过程控制，可以很好地解决传统设备维护中响应迟缓、管理松散的问题，此思路对于球墨铸铁管设备管理具有直接的参照意义。需要注意的是，这三种问题之间存在着互相加强的关系，点检形式化造成故障数据不全，备件管理缺少消耗规律依据，效能评价由于缺少基础数据而流于形式，从而造成管理闭环的断裂。

3 球墨铸铁管生产设备精益维护的实施路径

3.1 建立设备分级分类维护管理机制

按照设备对产线节拍以及产品质量的影响程度来划分，这是精益维护的基础。离心机、退火炉属于 A 类关键设备，进行最频繁的状态监测，并且给予最严格的备件保障；管模是离心机的主要工装，单独建立账目，记录整个生命周期的热循环次数。经由改善离心机循环水路以及操作方式来提高管模寿命的实践证明，管模寿命的延长不单依靠材质的改良，还必须依靠冷却系统维护的细致化。B 类设备精整机、涂衬机实行周期性点检加状态触发维修，C 类辅助设备采取事后维修，维护资源向 A 类集中。分级结果会根据设备故障频次的变化以及工艺重要性的改变而进行动态调整，从而保证维护资源的合理分配和设备风险的匹配。

3.2 完善设备点检与预防性维护体系

点检体系是否有效，要从标准是否可操作、执行是否可追溯、结果是否可以反馈三个方面来衡量。对于离心机，点检标准要包括旋转精度、液压系统压力波动、冷却水流量和温度等可以量化的项目；对于退火炉，需要包括各个温区热电偶偏差、煤气压力稳定性和链速同步性。点检发现异常之后要有一个明确的升级途径，一般偏差进入周度维护计划，趋势性劣化引发预防性维修工单，突发性异常立即停止生产。预防性维护周期的确定要以失效间隔数据为依据，不能用固定的日历周期来代替，管模冷却水路清洗的频次可以按照水质硬度和流量衰减速率的变化来调整。点检数据的价值在于经过积累之后的趋势判读，单次记录本身没有意义，只有连续多个周期的同项指标变化才能体现出劣化速率，因此点检表单的设计要便于纵向比较，而不是只做合格与否的勾选。

3.3 强化关键部件故障诊断与维修管理

管模裂纹和离心机旋转系统故障属于破坏性最严重的两种失效形式。管模裂纹的早期诊断可以用停机后的目视检查和渗透检测，更好的方法是在线监测冷却水回水温度和流量的变化，从而间接判断模壁热阻是否异常升高。离心机振动频谱分析可以发现轴承磨损、转子不平衡等早期信号。维修管理上，关键部件的更换和修复要制定出标准化的作业指导书，对拆卸顺序、配合间隙标准以及试运行验证项目做出规定，从而降低维修质量受个人经验影响的程度。对修复后的部件建立修复档案，跟踪其二次使用情况，给维修方式的选择（修复或者更换）提供数据支持。故障诊断能力的建立主要分为两个层次，常规征兆的识别

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

可以由经过培训的操作和点检人员来完成，而复杂的故障原因分析需要依靠专业的技术人员和诊断工具来进行，两个层次之间通过标准化的异常上报格式来保证信息的无损传递。

3.4 推进设备维护标准化与全员参与

标准化作业是精益维护得以实施的载体，应该把点检、润滑、清洁、紧固等基础维护工作分解成可以执行、可以检查的标准步骤，用目视化的形式展示在设备现场。全员参与的重点是操作人员的自主维护，离心机操作工每班次对冷却水压力、管模表面状态进行确认，退火炉操作工对煤气压力波动、炉温曲线进行实时监视，异常信息用标准化表单及时传递给维修部门。该机制把维护的感知触角伸到设备运行的每一个时刻，弥补了专业维修人员巡检间隔里缺少监控的情况。全员参与的持续性依靠正向激励和能力培养两个方面来支撑，一方面把设备状态指标纳入到操作班组的绩效评价当中，另一方面通过定期的培训使操作人员能够识别出基本的异常情况，防止自主维护流于形式。

4 球墨铸铁管生产设备综合效能提升措施

4.1 优化关键设备运行参数与生产协同

设备效能的损失不是由于设备本身故障造成的，而是由于运行参数和工艺要求不匹配造成的。离心机浇铸时转速和浇铸速度的关系决定管壁厚度是否均匀以及管模热负荷的分布情况。应该建立以管模温度、管径为变量的参数优化矩阵，通过系统的试验来确定各个规格产品的最佳参数组合，把优化的结果固化成设备控制系统预设方案。退火炉的效率提高要协调链速同各个温区的设定值，在保证退火组织合格的情况下减小炉内停留时间或者降低保温温度。离心球墨铸铁管退火炉在工艺改进、设备更新以及能源节约等方面所作出的改善，可以使得退火炉自身能源利用得到提高的同时，也能够对整个退火炉的各个环节进行协同优化。参数优化的效果要依靠设备综合效率和产品质量数据同步改善来体现，不能因为单个指标的提高而掩盖了整体效能的转移性损失。生产协同的另一个方面就是离心机和退火炉之间的节拍匹配，离心工序的产出速度如果和退火炉的处理能力不匹配，就会出现产成品堆积或者退火炉空载的情况，虽然没有直接反映到设备故障上，但是从整体上影响了产线的综合效率。

4.2 加强备品备件与维修资源精益管理

备件管理的精益化就是把备件分为两类，一类是消耗规律稳定、通用性强的通用件，一类是失效模式离散、专用性强的关键件。管模、离心机专用轴承等主要备件要根据历史消耗数据和采购提前期来确定安全库存量，并且和供应商签订应急调拨协议来减少常态库存。易损通用件可以采用寄售或者定期补货的方式，从而减少资金占用。维修资源方面，把内部维修力量按照技能矩阵进行分级，A类设备的精密诊断和修复由高级别人员负责，B类设备的常规维护由中级人员负责，防止高技能资源浪费在低复杂度的工作上。备件精益化管理是设备维护优化的重要途径，在实践检验中可以达到故障率降低和维护成本节约同时取得的效果。备件和维修资源的协同也表现在维修计划排程上，把需要停机配合的备件更换和预防性维护窗口一起安排，可以减少重复停机造成的产出损失。

4.3 推进设备运行数据监测与信息化管理

数据采集的广度和精度决定着效能管理的颗粒度。离心机要收集并保存每模次的浇铸参数、管模温度曲线和液压系统压力；退火炉要记录各个温区的实际温度和设定值的偏差序列、煤气流量和链速。经过积累之后可以得到两种分析，一种是设备劣化趋势分析，管模冷却水回水温度随着使用次数的增加而上升的斜率可以用来预测清洗或者更换的时间点，另外一种是效能损失归因分析，把停机时间按照故障类型、责任工序和处置耗时进行分类统计，找出频次最高或者损失最大的损失项作为优先改善的对象。利用监测技术搭建起设备管理信息化平台，对核心设备和备件实行全生命周期的精细化管理，可以依靠运行和故障数据来判断设备的劣化情况，并且可以准确地找到故障的位置。信息化建设的重点不在于系统规模，而在于数据采集点设置和维护决策流程之间的衔接是否有效，防止数据大量堆积但是没有转化为维护行动。

4.4 建立设备综合效能评价与持续改进机制

设备综合效率（OEE）是衡量精益维护效果的主要指标，它包括可用率、性能效率和合格品率这三个方面。对于球墨铸铁管产线而言，可用率损失要分成计划停机（换模、计划检修）和非计划停机（故障、等待备件）两种情况；性能效率损失要考虑到离心机节拍低于设计值、退火炉链速受限等情况；合格品率要包含管模状态造成的尺寸超标以及退火不良品。从行业实践来看，通过对离心机的参数进行精确调节以及设备的改造，离心机的 OEE 可以由原来的约 50%提高到现在的 61.57%，证明了效能改善的空间是存在的。评价机制就是把 OEE 的数据按照设备、班次以及损失的种类来划分，从而得到月度效能分析报告，找出主要的损失项并提出相应的改善措施，下个周期再进行验证，形成计划、执行、检查、处理的闭环。持续改进机制的运行要防止指标异化，即不能为了追求 OEE 数值而把本来应该记录的停机时间转移到其他的统计口径上，

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

效能评价的真实性依靠的是数据采集的规范以及审核的独立。

表 1 球墨铸铁管关键设备精益维护要点与效能改善指向

设备	主要失效模式	精益维护要点	效能改善指向
离心机	旋转精度衰减、液压失稳	振动频谱监测、参数矩阵固化	降低非计划停机与速度损失
管模	热疲劳裂纹、冷却水阻	水路流量监测、寿命次数追踪	减少换模停机与废品
退火炉	炉温偏移、煤气压力波动	温区偏差点检、链速协同优化	提升合格品率与能源效率

从表 1 可以看出，这三种主要设备的维护重点虽然不同，但是都把提高可用率和合格品率作为主要目标，而不是单独提高某一个指标。

5 结语

球墨铸铁管生产设备的精益维护，不是指维护部门自身的工作量增减，而是指设备可靠性对产线产出和质量的支持作用。从管模冷却水路的精细化控制到离心机参数矩阵的固化，从点检标准和失效机理的对接到 OEE 损失的逐项归因，精益维护和效能提高都是按照同样的逻辑进行的，用数据代替经验，用预防代替抢修，用持续改善代替周期性的重复。从行业已经存在的 OEE 提升案例可以看出，改善的空间是存在的，并且可以通过系统的方法来获取。对于球墨铸铁管企业来说，把设备管理由原来的维护职能转变为效能职能，是面对成本压力和质量要求的一种现实做法。

[参考文献]

[1]马俊秀,冯鹏,宗哲,等.水冷金属型管模使用寿命的提升研究[J].山西冶金,2023,46(6):256-257.
[2]焦志民,任万真,王尚典,等.网格化精益检修模式在班组管理中的运用[J].设备管理与维修,2023,10(1):1-2.
[3]聂高升,查显文,褚建灿,等.全员生产维护管理在宁钢的实践与创新[J].冶金设备,2024,15(1):1-5.

作者简介：张政（1994—），男，河南鹤壁市浚县人，助理工程师，郑州轻工业大学电气工程及其自动化专业毕业，现就职于河南钢铁集团永通球墨铸铁管有限公司，从事冶金铸造工作；崔博阳（1995—），男，河南安阳人，助理工程师，中原工学院电气工程及其自动化毕业，现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，从事铸管天车工作；李强（1994—），男，河南安阳人，助理工程师，郑州职业技术学院广告设计与制作专业毕业，现就职于河南钢铁集团安钢永通球墨铸铁管有限责任公司，从事球墨管离心铸造工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.