

轨道交通牵引机车齿轮制造过程质量控制的关键路径与方法

潘 伟

中车福伊特传动技术(北京)有限公司 北京 102200

摘 要: 轨道交通牵引机车齿轮是机车传动系统的核心承载部件,其制造质量直接关系到机车运行安全性、可靠性与使用寿命。牵引机车齿轮制造工序多、链条长、精度要求高、质量风险隐蔽性强,传统质量控制方式难以满足高速、重载工况下的高可靠性要求。本文以齿轮全制造流程为研究对象,系统梳理原材料、锻造、热处理、切削加工、表面强化、无损检测、检验出厂等关键工序,构建“源头严防—过程严管—缺陷严查—全程追溯—持续改进”的质量控制关键路径,并提出标准化作业、精度管控、过程监控、缺陷溯源、数字化追溯等质量控制方法。结合行业实际生产案例验证控制效果,研究表明,通过构建全流程闭环质量控制体系,可有效降低制造缺陷、提升产品一致性与稳定性,为轨道交通齿轮高质量制造提供理论参考与实践支撑。

关键词: 轨道交通; 牵引机车齿轮; 制造过程; 质量控制; 关键路径

引言

齿轮作为牵引机车动力传递的关键部件,长期在高速、重载、交变冲击、复杂振动环境下工作,其齿面强度、芯部韧性、加工精度、抗疲劳性能直接决定传动效率、运行噪声及行车安全。

轨道交通牵引机车齿轮制造涉及材料工程、热加工、精密机械加工、检测技术等多个领域,工序链条长、工艺性强、质量影响因素复杂。任何工序出现质量波动,都可能导致齿轮出现变形超差、硬度不均、内部裂纹、精度不足、啮合不良等问题,进而引发早期失效。因此,建立覆盖全制造过程的质量控制关键路径,实施全过程、可追溯、闭环式质量管控,对提高齿轮制造质量、保障轨道交通安全运营具有重要意义。

本文基于实际生产流程,分析齿轮制造各环节质量风险,明确质量控制关键路径,配套系统化控制方法,并结合实际案例验证应用效果,为企业提升齿轮质量水平、实现稳定批产提供参考。

1 轨道交通牵引机车齿轮制造过程概述

轨道交通牵引机车齿轮属于高精度、高强度、高可靠性关键零部件,典型制造流程如下:①原材料采购;②精密锻造、齿坯成形与材料性能复检;③热处理(调质、渗碳、淬火、回火);④齿形切削加工(滚齿、插齿、磨齿);⑤表面强化处理(喷丸等);⑥无损检测与精度检测;⑦酸洗、清洗、防锈、标识;⑧出厂验证。各工序相互关联、相互影响,前道工序质量直接影响后道工序成果。因此,质量控制必须贯穿从原材料投

入到成品交付的全过程^[1]。

2 轨道交通牵引机车齿轮制造过程质量控制的关键路径

轨道交通牵引机车齿轮质量控制的关键路径,是指在制造流程中对最终质量起决定性作用、必须严格管控的核心链条。其以“预防为主、过程控制、全程追溯、持续改进”为原则,形成八大关键路径。

2.1 原材料入厂质量控制路径

原材料是齿轮质量的基础,直接决定齿轮强度、韧性与抗疲劳性能。控制要点包括:供应商资质审核、化学成分分析、力学性能检测、金相组织检验、超声波探伤;对炉号、批次进行唯一标识与台账管理;不合格材料严禁入库与投产。通过源头控制,杜绝夹杂、疏松、裂纹、成分偏析等缺陷流入生产环节。

2.2 精密锻造过程控制路径

锻造实现齿轮坯成形,并保证金属流线连续、组织致密。控制要点包括:加热温度与保温时间精准控制、锻造比合理、变形均匀;锻后校形与缓冷;锻件尺寸检测及超声波探伤。该路径可提高齿轮内部致密度,提升抗冲击与抗疲劳能力。

2.3 热处理质量控制路径

热处理是齿轮制造最核心、最关键、质量波动最大的工序,决定齿面硬度、芯部韧性、硬化层深度及应力状态。控制要点包括:工艺曲线固化、炉温均匀性验证、温度/时间/气氛/冷却速率实时监控;硬度检测、硬化层深度测量、金相组织分析;热处理变形监测与控

制。通过稳定热处理过程,实现齿轮强韧性匹配^[2]。

2.4 切削加工精度控制路径

切削加工决定齿轮最终几何精度,影响传动平稳性、噪声与啮合性能。控制要点包括:统一基准定位、粗精加工分开、滚齿与磨齿精度控制;齿形误差、齿距周结累积误差、齿向误差、同轴度、端面跳动全项检测;不合格品隔离、标识、评审处置。确保齿轮达到高速重载工况所需的高精度等级。

2.5 表面强化处理控制路径

表面强化(如喷丸)可在齿根形成压应力,显著提高抗疲劳寿命。控制要点包括:喷丸强度、弹丸规格、喷射时间、覆盖率检测;齿面形貌与应力状态验证;避免过喷与损伤。该路径是延长齿轮使用寿命的重要保障。

2.6 无损检测关键路径

无损检测用于识别表面与内部隐蔽缺陷,是防止致命缺陷出厂的关键防线。控制要点包括:在锻造后、热处理后、精加工后设置检测工位;采用磁粉探伤、超声波探伤、磨削烧伤检测;严格执行缺陷判定标准,超标件坚决报废并记录分析。

2.7 出厂验证控制路径

出厂验证是产品交付前的最终质量确认。控制要点包括:最终尺寸复核、外观检查、标识与防锈;出具出厂合格证。确保交付产品满足装车要求。

2.8 全过程追溯与持续改进路径

轨道交通牵引机车齿轮制造要求全生命周期可追溯。控制要点包括:单件唯一编码、全工序数据采集,从原材料-生产-检测-出厂全程可追溯;通过质量数据统计、缺陷分析、原因排查、工艺优化修正,实现质量持续提升。

3 轨道交通牵引机车齿轮制造质量控制方法

为保障关键路径有效落地,需配套实施系统化质量控制方法^[3]。

3.1 标准化作业控制

制定各工序作业指导书,明确工艺参数、操作流程、检验项目与判定标准,实现操作规范化、统一化。

3.2 三检制结合工序首件验证工步放行管理

执行自检、互检、专检,结合工序收件检验工步放行方法相结合,强化过程检验,减少人为失误。

3.3 关键工序数据采集记录

热处理、锻造、精加工等关键工序进行数据采集与曲线记录,实现过程可监控、可追溯、可复现。

3.4 精密检测与全尺寸检验

采用齿轮测量中心、三坐标测量机、硬度计、探伤仪等设备开展全项检测,确保精度与性能达标。

3.5 缺陷溯源与根本原因分析

运用 8D、鱼骨图等工具对不合格品进行分析,快速定位原因,制定纠正预防措施。

3.6 质量追溯与批次管理

建立单件追溯系统,实现从原材料到成品的全流程追踪,满足轨道交通行业安全追溯要求^[4]。

4 质量控制实际案例分析

在轨道交通牵引机车齿轮批量制造过程中,质量控制的有效性可通过实际生产案例得到充分验证。以下从原材料、热处理、加工、磨削及数字化追溯五个方面,说明关键路径与控制方法的应用成效。

案例 1: 原材料夹杂致齿根早期疲劳断裂

问题: 某和谐型机车从动齿轮运行 8 个月多齿断裂,断口起源于齿根亚表面。如图1图2



图1

图2

检测: 齿根下约 1.2mm 处发现长条状氧化铝夹杂物(长度 > 0.5mm), 超标; 材质为 42CrMo, 锻造未有效击碎夹杂。如图3



图3

原因: 炼钢脱氧控制不稳, 大尺寸夹杂残留; 锻造比不足, 流线不合理。

整改: 供应商增加钢水真空脱气 + 钙处理, 夹杂物评级从严至 A 类 ≤ 1.5 级; 入厂 100% 超声波探伤(UT), 重点筛查齿根区域; 锻造比由 3.0 提高至 ≥ 3.8 , 优化锻造工艺。

效果: 同类断裂由年 3 起降至 0 起, UT 检出夹杂报废率 0.3%。

案例 2: 热处理渗碳不均致批量硬度不足

问题: 某批次牵引齿轮(18CrNiMo7-6)渗碳后齿面硬度 50~54HRC(要求 58~62HRC), 硬化层深度 0.9~1.3mm(要求 1.6~2.0mm), 批量不合格。

原因：原可控气氛渗碳炉温不均（ $\pm 8^{\circ}\text{C}$ ）、碳势波动大；齿根碳浓度偏低，非马氏体组织超标。

整改：改用真空渗碳 + 高压油淬，炉温均匀性控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ；分段碳势精准控制：强渗 1.25% $\rightarrow$ 扩散 0.85%，齿根碳浓度 $\geq 0.7\%$ ；每炉随炉3件金相试块，强制解剖检测层深与组织。

效果：硬度稳定在 59~61HRC，层深 1.7~1.9mm；周期缩短 18%，无内氧化，批量合格率 100%。

案例 3：磨齿烧伤致齿面剥落

问题：某批机车齿轮（模数 12，精度 ISO 5 级）磨齿后齿面出现月牙形黑斑，运行 6 个月发生点蚀剥落。

检测：烧伤区硬度下降 120~150HV，表层二次回火；磨削温度瞬时超 850°C ，冷却液流量不足。

整改：磨齿机加装磨削温度在线监测，超 750°C 自动降速；改用 CBN 砂轮 + 高压大流量冷却（压力 12bar，流量 80L/min）；终磨后 100% 磁粉探伤（MT），筛查微裂纹与烧伤。

效果：磨齿烧伤率由 4.2% 降至 0%，齿面粗糙度稳定 $R_a \leq 0.4\mu\text{m}$ ，点蚀失效消除。

案例 4：加工基准漂移致齿距累积误差超差

问题：批量滚齿后齿距累积误差 ΔF_p 超差（0.04~0.06mm，要求 $\leq 0.025\text{mm}$ ），啮合噪声大、振动超标。

原因：工装夹具磨损，定位基准端面圆跳动 $\geq 0.02\text{mm}$ ；滚齿机主轴径向跳动超 0.01mm，未定期校准。

整改：统一“内孔 + 端面”组合定位，夹具端面跳动 $\leq 0.005\text{mm}$ ，每周校准；滚齿机主轴每日开机空转 30min 热平衡，月度精度校准；首件全项检测（齿形 / 齿向 / 齿距），批量抽检比例提至 20%。

效果： ΔF_p 稳定 $\leq 0.02\text{mm}$ ，合格率由 82% 升至 99.7%，噪声降低 6~8dB。

案例 5：智能化追溯系统实现全链路闭环

问题：传统纸质记录易丢失，缺陷溯源难、责任不清；批量质量波动时无法快速定位工序变量。

方案：建设单件全生命周期追溯系统：

（1）每件齿轮激光打码唯一 ID，从锻造到出厂全程绑定；

（2）关键工序（热处理 / 磨齿 / 探伤）设备参数实时

上传（温度、时间、压力、检测数据）；

（3）质量数据平台自动分析：硬度、层深、精度等 SPC 统计，超趋势预警；

（4）售后故障可反向追溯至炉号、班次、操作工、设备参数。

效果：不良率下降 33%，批量缺陷响应时间由 72h 缩短至 2h；满足轨道交通全生命周期追溯要求，通过 CRRC 质量体系认证。

上述案例表明，严格执行制造全过程质量控制关键路径，实施精细化、标准化、数字化管控，能够有效解决齿轮制造中的典型质量问题，显著提升产品可靠性与稳定性。

5 结束语

轨道交通牵引机车齿轮制造质量控制是一项系统性、全过程、闭环式管理工作。其核心在于构建覆盖原材料、锻造、热处理、切削加工、表面强化、无损检测、装配出厂、质量追溯的八大关键路径，形成“源头严防、过程严管、风险严控、缺陷严查、全程可溯、持续改进”的质量控制体系。

通过实施关键路径管控与系统化质量控制方法，可有效提升齿轮尺寸精度、性能稳定性与抗疲劳寿命，降低早期失效风险，提高产品合格率与可靠性。结合实际生产案例可以看出，全过程质量控制能够切实解决齿轮制造中的典型缺陷，显著提升产品质量水平。

未来，随着智能制造、在线检测、数字化工厂不断发展，牵引机车齿轮质量控制将向自动化、智能化、实时化方向进一步升级，为轨道交通装备高质量发展提供更强支撑。

参考文献

- [1]李刚. 机车车辆齿轮制造技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2018:45-126.
- [2]国家铁路局. TB/T 3542-2020 机车牵引齿轮热处理技术条件[S]. 北京:中国铁道出版社,2020:1-18.
- [3]铁道部戚墅堰机车车辆工艺研究所. 机车车辆齿轮工艺与质量控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2015:22-79.
- [4]国家铁路局. TB/T 2989-2023 机车车辆驱动齿轮箱牵引齿轮[S]. 北京:中国铁道出版社,2023:1-26.