刚果项目D2挖掘机发动机自主大修方案设计与成果验证

翟思远
中国十五冶金建设集团有限公司　湖北　武汉　430014

摘　要：在海外矿产资源开发项目中，核心施工设备的稳定运行是保障项目进度、控制成本的关键环节。本文CAT336D2 挖掘机 C9 发动机为研究对象，针对传统依赖当地维修服务站存在的成本高、周期长、效率低等问题，开展自主大修方案设计与成果验证研究。通过整合国内维修专家技术支持与卡特 SIS 软件技术规范，构建涵盖前期准备、流程管控、质量检测的全流程自主大修方案，并组建专业团队落地执行。大修完成后，通过专用检测工具与试车验证，确认发动机各项参数达标，且每台发动机可节约维修费用 10 万余元，维修周期缩短至 1-2 周。本研究不仅为海外 CAT 设备自主维修提供了标准化技术范式，更践行了企业“降本增效”战略，为同类海外工程项目设备保障体系建设提供了实践参考。

关键词：CAT336D2 挖掘机；C9 发动机；自主大修方案

1 绪论

1.1 研究背景

随着全球经济一体化进程加快及“走出去”战略的深入推进，中国工程企业在海外矿产资源开发领域的参与度持续提升。刚果（布）作为非洲重要的矿产资源国，凭借丰富的矿产储备吸引了众多中国企业入驻，矿山公司刚果布项目部便是其中的典型代表。该项目部承担着区域内矿产资源勘探、开采与运输的核心任务，其生产设备的可靠性直接决定项目产能输出与经济效益实现。

2 CAT336D2 挖掘机 C9 发动机技术特性与大修需求分析

2.1 C9 发动机核心技术特性

CAT336D2 挖掘机搭载的 C9 发动机是卡特彼勒公司专为重型工程机械研发的 6 缸直列涡轮增压柴油发动机，其设计充分考虑了恶劣工况下的可靠性与高效性，具备以下核心技术特性：

动力性能优异：该发动机排量为 8.8L，额定功率可达 205kW（275hp），最大扭矩超过 1200N·m，能够为CAT336D2 挖掘机提供强大的挖掘力与作业速度，满足矿山高强度、连续化作业需求。同时，发动机采用涡轮增压技术，可在高海拔、高温环境下保持稳定的动力输出，适配刚果（布）当地气候条件。

结构设计紧凑：C9 发动机采用模块化设计理念，将燃油系统、润滑系统、冷却系统等核心部件高度集成，不仅减少了发动机体积与重量，便于在挖掘机狭小空间内安装与维修，还降低了部件之间的连接故障风险，提升整体可靠性。例如，发动机缸体采用高强度铸铁材料制造，具备良好的刚性与耐磨性，可承受高温、高压工况下的冲击载荷；气缸盖采用铝合金材料，重量轻且散热性能优异，有效避免发动机过热问题。

燃油经济性突出：发动机配备卡特彼勒自主研发的电子控制燃油喷射系统（HEUI 系统），可实现精准的燃油喷射控制，根据作业负荷自动调节喷油量与喷油时间，确保燃油充分燃烧。据卡特官方数据显示，C9 发动机相比同级别其他品牌发动机，燃油消耗率降低 5%-8%，长期使用可显著减少项目燃油成本支出。

可靠性与耐久性高：C9 发动机关键部件（如曲轴、活塞、气门等）均采用高强度材料制造，并经过严格的疲劳测试与可靠性验证，设计大修周期可达 8000-10000 小时，远高于行业平均水平。同时，发动机配备完善的润滑与冷却系统，可有效减少部件磨损，延长使用寿命，适配矿山长期高强度作业需求。

2.2 发动机运行现状与故障诊断

2.2.1 运行数据统计分析

为准确掌握待修 C9 发动机的运行状态，项目部通过CAT 挖掘机自带的设备管理系统（VisionLink）与人工记录相结合的方式，对发动机运行数据进行了为期 1 个月的统计分析，结果如下：

运行时间：待修 C9 发动机已累计运行 9200 小时，超过卡特彼勒官方推荐的首次大修周期（8000-10000 小时），需进行全面大修以恢复性能。

动力性能衰减：通过设备管理系统监测发现，发动机在满载作业时，额定转速（2000r/min）无法达到，最高转速仅能维持在 1700-1800r/min，动力输出下降约 15%；同时，发动机加速响应时间从新机状态的 0.8 秒延

长至 1.5 秒，作业效率显著降低，原本 1 小时可完成的 200m³ 矿石装载量，需延长至 1.5 小时。

油耗与机油消耗异常：统计数据显示，发动机当前百公里油耗较新机状态增加 15%，从 28L/h 上升至 32L/h，每月额外增加燃油成本约 1.2 万元（按当地柴油价格 1.5 元 / L 计算）；机油消耗速度加快，原本每 500 小时更换一次机油（更换量为 18L），现在需缩短至 300 小时，机油消耗率从 0.036L/h 上升至 0.06L/h，不仅增加保养成本，还可能因机油不足导致发动机润滑不良。

温度与压力参数超标：使用简易检测工具初步检测发现，发动机机油压力在怠速时为 0.2MPa，低于卡特官方标准值（0.3-0.5MPa）；冷却液温度在满载作业时超过 95℃，接近报警阈值（100℃），存在发动机过热风险；同时，发动机排气温度较正常状态升高 80-100℃，表明燃烧效率下降，可能存在燃油燃烧不完全问题。

2.2.2 故障现象与原因诊断

结合运行数据统计结果与现场观察，项目团队对 C9 发动机故障现象进行了详细记录，并基于卡特 SIS 软件技术规范与国内专家咨询意见，开展故障原因诊断：

排气冒黑烟与动力下降：现场观察发现，发动机在高负荷作业时排气冒黑烟，结合动力性能衰减数据，初步判断为燃油喷射系统故障。进一步拆解检测后发现，喷油器针阀磨损严重，喷油压力不稳定（标准喷油压力为 160MPa，实际检测值在 130-150MPa 之间波动），导致燃油雾化不良，燃烧不完全；同时，涡轮增压器叶片积碳严重，增压压力不足（标准增压压力为 240kPa，实际检测值为 190kPa），进气量减少，进一步加剧燃烧效率下降，最终导致动力不足与排气冒黑烟。

机油消耗过快与渗漏：通过对发动机外部检查发现，气门室盖密封处有机油渗出，油底壳与缸体连接部位存在轻微渗漏，判断为密封垫老化、变硬导致密封性能下降；同时，拆解活塞连杆组件后发现，活塞环磨损严重，气环开口间隙从标准值 0.25-0.35mm 扩大至 0.6-0.7mm，油环刮油性能下降，导致机油进入燃烧室参与燃烧，形成“烧机油”现象，加剧机油消耗。

发动机怠速抖动与过热：发动机怠速时抖动明显，加速响应迟缓，拆解配气机构后发现，气门间隙超标（进气门标准间隙为 0.38mm，排气门标准间隙为 0.64mm，实际检测值分别为 0.6mm 与 0.9mm），导致气门开启与关闭时间不准确，进气与排气效率下降；同时，冷却系统检测发现，水泵叶轮磨损严重，冷却液循环速度减慢，散热器外部附着大量粉尘，散热面积减少，导致冷却液温度过高，发动机过热。

机油压力偏低：对润滑系统进行拆解检测，发现机油泵齿轮磨损，泵油压力不足；同时，机油滤清器堵塞严重，机油流通阻力增加，导致机油压力下降。此外，机油粘度不符合要求，当地采购的机油粘度等级为 SAE 15W-40，而 C9 发动机在高温环境下应使用 SAE 10W-30 粘度等级机油，过高的机油粘度在高温下流动性变差，进一步降低机油压力。

2.2.3 大修需求确定

基于上述技术特性分析、运行现状统计与故障诊断结果，结合卡特彼勒官方《C9 发动机大修技术规范》与项目部生产需求，确定本次 C9 发动机自主大修的核心需求：

恢复动力性能：通过更换磨损的喷油器、涡轮增压器、气门组件等部件，调整气门间隙，确保发动机额定功率、转速与扭矩恢复至官方标准值，解决动力下降、加速迟缓问题。

降低油耗与机油消耗：更换活塞环、密封垫、机油泵、机油滤清器等部件，修复“烧机油”与机油渗漏问题，使发动机油耗与机油消耗率恢复至新机 80% 以上水平。

解决异常工况问题：更换水泵、清理散热器，修复冷却系统故障，确保冷却液温度控制在 85-95℃范围内；同时，修复润滑系统故障，使机油压力达到官方标准值，避免发动机过热与润滑不良风险。

保障长期可靠性：对发动机缸体、缸盖等核心部件进行检测与修复，更换所有磨损超标的易损件，确保发动机大修后使用寿命达到 6000 小时以上，满足项目部后续 2-3 年的作业需求。

3 C9 发动机自主大修方案设计

3.1 方案设计依据与原则

3.1.1 设计依据

本次 C9 发动机自主大修方案设计严格遵循以下依据，确保方案的科学性与合规性：

卡特彼勒官方技术规范：以卡特 SIS 软件中《C9 发动机大修技术手册》（文档编号：LEJB0699-04）、《C9 发动机关键参数标准》（文档编号：LEJB0700-02）为核心依据，明确发动机拆解流程、装配顺序、扭矩标准、参数阈值等关键技术要求，确保每道工序符合卡特官方标准。

国内维修专家经验：结合国内 CAT 设备维修资深专家提供的《C9 发动机大修常见问题解决方案》《关键部件检测方法》等技术文档，针对刚果（布）当地工况特点，优化维修流程与质量控制要点，提升方案的实操性。

项目实际需求：基于项目部生产进度要求（维修周期 ≤ 2周）、成本控制目标（单台维修成本 ≤ 12万元）与设备运行现状，确定配件采购清单、团队分工与进度计划，确保方案适配项目实际情况。

3.1.2 设计原则

质量优先原则：将维修质量作为核心目标，严格把控部件检测、装配精度、参数校准等关键环节，确保大修后发动机性能达到或优于卡特官方标准，避免因质量问题导致二次维修。

效率保障原则：通过优化流程设计、明确团队分工、提前储备配件等方式，压缩维修周期，确保发动机在 1-2 周内完成大修并投入生产，减少设备停机时间。

成本可控原则：采用“国内采购 + 自主维修”模式，对比国内多家 CAT 配件供应商，选择性价比高的原厂或认证配件，控制配件采购成本；同时，通过内部团队执行维修，减少外部人工成本支出，确保单台发动机维修成本节约 13 万元以上。

安全合规原则：制定完善的安全操作规程，明确高空作业、液压系统泄压、动火作业等环节的安全要求，配备必要的安全防护设备（如安全帽、安全带、护目镜等），确保维修过程零安全事故。

3.2 大修前期准备工作

3.2.1 技术准备

技术资料收集与学习：组织维修团队系统学习卡特 SIS 软件中的 C9 发动机大修资料，包括拆解视频、技术手册、参数图表等，确保团队成员熟练掌握发动机结构与维修技术要求；同时，将《C9 发动机大修技术手册》《关键部件检测记录表》等核心资料打印成册，发放至每位团队成员，便于现场查阅。

专项技术培训与考核：由项目管理员对维修团队开展为期2天的专项技术培训，内容包括：发动机拆解流程与注意事项、部件检测方法与判定标准、装配扭矩控制要点、试车调试步骤等。培训采用“理论讲解+案例分析+实操演示”的方式，其中实操演示环节使用报废的C9发动机部件，模拟拆解与装配过程，直观展示缸盖螺栓“从中间向两侧分步拆卸”的顺序要求、活塞连杆组件“活塞顶部朝向与连杆标记对齐”的安装细节，以及气门导管与气门座圈的配合间隙检测方法。案例分析环节，设备管理员结合国内维修专家提供的典型故障案例，如“因喷油器校准偏差导致的动力衰减”“因缸盖平面度超差引发的冷却液渗漏”等，深入剖析故障根源与解决方案，帮助团队成员建立“故障预判-数据检测-精准修复”的逻辑闭环。

培训结束后，采用“理论考试+实操考核”双重验证模式评估团队能力。理论考试围绕卡特SIS软件技术规范出题，涵盖C9发动机关键部件磨损极限值（如活塞环开口间隙标准值0.25-0.35mm、曲轴轴颈圆度公差 ≤ 0.02mm）、大修工序先后顺序等核心知识点，满分100分，合格线设定为85分；实操考核要求成员在90分钟内完成报废C9发动机缸盖的拆卸、清洁与重新安装，重点考核螺栓扭矩控制精度（需使用扭矩扳手分三次将缸盖螺栓拧紧至220N·m）、部件清洁度（残留油污 ≤ 5mg/㎡）等指标。最终，8名维修团队成员均通过考核，其中6人理论考试得分超90分，4人实操考核中螺栓扭矩控制误差小于±2N·m，达到卡特官方维修技术要求，为大修工作的标准化执行奠定人员基础。

技术交底与责任分工：完成培训考核后，设备管理员组织召开专项技术交底会，结合《C9发动机自主大修专项方案》，明确各环节技术标准、时间节点与人员职责。具体分工如下：2名资深技术人员负责核心部件检测与修复，重点完成缸体平面度检测（使用激光平面度检测仪，允许误差 ≤ 0.05mm/m）、曲轴动平衡测试（不平衡量 ≤ 5g·cm）、缸盖气门座圈密封性试验（水压测试压力0.3MPa，保压5分钟无渗漏）；3名技术人员专注于部件拆解与清洁，严格按照《C9发动机部件清洗规范》，采用“碱性清洗剂浸泡+高压喷淋+超声波清洗”三步法处理部件，确保活塞环槽、油道、水道等关键部位无积碳、油污残留；2名人员负责配件管理与数据记录，建立“配件入库-领用-安装”追溯台账，同步填写《C9发动机大修过程参数记录表》，实时记录拆解时各部件磨损数据（如气门导管内径磨损量、涡轮增压器叶片间隙）、装配时的扭矩数值与检测结果；项目设备管理员全程监督工序合规性，针对维修过程中出现的技术疑问（如缸体裂纹检测方法、配件型号适配性判定），第一时间与国内维修专家通过视频会议沟通确认，确保每道工序均符合卡特官方技术要求。

配件采购与质量检测：考虑到刚果（布）当地配件供应能力有限，且原厂配件采购周期长、成本高，项目部选择“国内集中采购+跨境物流运输”模式。通过对比国内3家CAT设备配件供应商的资质、报价与交货周期，最终选定具备CAT官方认证资质的供应商，签订采购合同并明确质量保证条款（如配件质量问题30天内免费退换、核心部件提供1年质保）。配件到货后，维修团队联合项目部质检人员开展严格的入库检测：外观检查确认配件无变形、裂纹、锈蚀，型号标识与采购清单一致；尺寸检测使用卡尺、千分尺等精密工具，验证活塞环厚

度、气门导管内径等关键尺寸符合技术标准；性能抽检针对喷油器、涡轮增压器等核心部件，委托当地第三方检测机构进行喷油压力测试、增压效率试验，确保配件性能达标。例如，对6个喷油器进行逐一检测，其中1个喷油器实测喷油压力为152MPa，低于160MPa标准值，立即联系供应商更换，避免因配件质量问题影响大修效果。

配件仓储与领用管理：在项目部仓库设立专用配件存储区，根据配件特性采取分类存储措施：精密部件（如喷油器、传感器）存放于恒温恒湿（温度20±5℃，湿度40%-60%）的密封柜中，避免受潮、灰尘污染；易损件（如密封垫、O型圈）采用真空包装，防止老化；重型部件（如涡轮增压器、机油泵）放置于防潮托盘上，远离酸碱腐蚀性物质。建立“一人一卡一账”领用制度，维修人员需凭《配件领用单》（注明领用配件名称、型号、数量、用途工序）领取配件，仓库管理员核对单据后登记台账，同步记录配件安装部位与对应的发动机编号，实现配件全生命周期可追溯。例如，领用喷油器时，需在台账中注明“安装于1号气缸”“对应发动机编号：CAT336D2-202105”，便于后续故障排查与维护。

3.2.2 配件准备

配件清单制定：基于C9发动机故障诊断结果与卡特SIS软件《C9发动机大修配件推荐清单》，结合项目部成本控制目标，制定《C9发动机自主大修配件采购清单》（如表3-1所示）。清单明确配件名称、型号规格、数量、技术标准与采购优先级，其中核心部件（如喷油器、涡轮增压器、活塞环）优先选择CAT原厂认证配件，确保性能匹配；易损件（如密封垫、机油滤清器、水泵叶轮）选择国内知名品牌适配配件，在保证质量的前提下降低成本。例如，喷油器型号指定为CAT 387-9438，需满足160MPa额定喷油压力与±0.5mm的喷油雾化角度偏差要求；活塞环选用国内CAT认证供应商生产的适配组件，气环开口间隙需控制在0.25-0.35mm，油环刮油边硬度 ≥ HRC55。

表3–1 C9发动机自主大修配件采购清单

配件名称	型号规格	数量	技术标准	采购优先级
喷油器	CAT 387-9438	6个	额定喷油压力160MPa，雾化角度偏差±0.5mm	高（原厂认证）
涡轮增压器	CAT 495-5273	1台	增压压力240kPa，叶片间隙 ≤ 0.15mm	高（原厂认证）
活塞环组件	CAT C9适配	6套	气环开口间隙0.25-0.35mm，油环刮油边硬度 ≥ HRC55	高（认证适配）
缸盖密封垫	CAT 317-3415	1套	耐温 ≥ 300℃，水压测试0.3MPa无渗漏	高（原厂认证）
机油泵	CAT 320-0685	1台	额定压力0.4-0.6MPa，流量 ≥ 50L/min	中（认证适配）
水泵叶轮	CAT C9适配	1个	材质为高强度工程塑料，叶轮跳动量 ≤ 0.1mm	中（认证适配）
机油滤清器	CAT 1R-1807	2个	过滤精度 ≥ 99%，额定流量20L/min	中（认证适配）
气门导管	CAT 326-4785	12个	内径公差H7，与气门配合间隙0.05-0.08mm	高（原厂认证）

配件采购与质量检测：考虑到刚果（布）当地配件供应能力有限，且原厂配件采购周期长、成本高，项目部选择“国内集中采购+跨境物流运输”模式。通过对比国内3家CAT设备配件供应商的资质、报价与交货周期，最终选定具备CAT官方认证资质的供应商，签订采购合同并明确质量保证条款（如配件质量问题30天内免费退换、核心部件提供1年质保）。配件到货后，维修团队联合项目部质检人员开展严格的入库检测：外观检查确认配件无变形、裂纹、锈蚀，型号标识与采购清单一致；尺寸检测使用卡尺、千分尺等精密工具，验证活塞环厚度、气门导管内径等关键尺寸符合技术标准；性能抽检针对喷油器、涡轮增压器等核心部件，委托当地第三方检测机构进行喷油压力测试、增压效率试验，确保配件性能达标。例如，对6个喷油器进行逐一检测，其中1个喷油器实测喷油压力为152MPa，低于160MPa标准值，立即联系供应商更换，避免因配件质量问题影响大修效果。

3.2.3 设备与工具准备

专用工具清单制定：依据卡特SIS软件《C9发动机维修专用工具手册》，结合大修工序需求，制定《C9发动机自主大修专用工具清单》，明确工具名称、型号规格、用途、精度要求与校准周期（如表3-2所示）。清单涵盖拆解工具（如缸盖螺栓专用扳手、活塞拔出器）、检测工具（如激光平面度检测仪、扭矩扳手）、装配工具（如气门导管压装机、曲轴止推间隙测量仪）三类，其中关键工具需符合卡特官方精度标准，例如扭矩扳手精度需达到±3%，激光平面度检测仪测量误差 ≤ 0.005mm/m。

表3–2 C9发动机自主大修专用工具清单

工具类别	工具名称	型号规格	用途	精度要求	校准周期
拆解工具	缸盖螺栓专用扳手	CAT 9U-7227	拆卸/安装缸盖螺栓	扭矩误差±2%	3个月
拆解工具	活塞拔出器	CAT 106-0982	取出气缸内活塞组件	夹持力 ≥ 50kN	6个月
检测工具	激光平面度检测仪	Leica AT960	检测缸体、缸盖平面度	测量误差 ≤ 0.005mm/m	1年
检测工具	数显扭矩扳手	Stanley STMT73799-8-23	测量螺栓拧紧扭矩	精度±3%	3个月
检测工具	喷油压力测试仪	CAT 317-4885	测试喷油器喷油压力	压力误差±1MPa	3个月
装配工具	气门导管压装机	CAT 326-4786	压装气门导管	同轴度误差 ≤ 0.02mm	6个月
装配工具	曲轴止推间隙测量仪	CAT 9U-7345	测量曲轴止推间隙	测量误差±0.005mm	6个月

工具校准与维护：在大修启动前1周，组织专业人员对所有专用工具进行全面校准与维护，确保工具精度符合要求。对于扭矩扳手、喷油压力测试仪等计量工具，送当地具备资质的计量机构进行校准，获取校准证书，校准不合格的工具立即更换或维修；对于激光平面度检测仪、气门导管压装机等大型设备，联系国内设备厂家远程指导校准，通过设备自带的校准程序验证精度，例如激光平面度检测仪需在标准平面上进行5点测量，确保各点误差均在允许范围内。同时，对工具进行清洁与维护，如清洗缸盖螺栓专用扳手的咬合齿，去除锈迹与油污；检查活塞拔出器的液压系统，补充液压油并测试压力；更换磨损严重的工具配件（如扭矩扳手的传感器、压装机的导向套），确保工具性能稳定。

辅助设备准备：除专用工具外，还需准备必要的辅助设备，满足大修过程中的部件清洁、吊装、环境控制等需求。部件清洁设备包括超声波清洗机（功率1500W，清洗槽容积50L，用于精密部件清洁）、高压喷淋设备（压力8MPa，用于缸体、缸盖等大型部件表面除污）；吊装设备选用2吨液压起重机，配备专用吊装夹具（与C9发动机吊装点匹配，承重能力 ≥ 3吨），用于发动机整体吊装与核心部件（如曲轴、缸盖）的搬运；环境控制设备包括工业风扇（用于维修区域通风降温）、防尘罩（覆盖未装配部件，防止灰尘污染）、照明设备（LED防爆灯，照度 ≥ 500lux，确保维修操作视野清晰）。同时，在维修现场设置临时废料存放区，配备油污收集桶、废旧部件回收箱，确保维修过程符合环保要求，避免油污泄漏污染环境。

3.3 发动机拆解流程设计与执行

3.3.1 拆解前准备与安全防护

拆解前，维修团队对 CAT336D2 挖掘机做全面检查：确认发动机熄火静置 24 小时、液压系统泄压至0MPa、电气系统断电；用 CAT 专用检测工具 ET 读取发动机故障码与运行数据，拍照记录发动机外观并标注管路走向，制作《发动机外观与管路连接示意图》。

安全防护方面，制定《C9 发动机拆解安全操作规程》，维修人员需穿戴全套防护装备；维修区域设警示标识与安全范围；吊装发动机时检查起重机支腿稳定性与绳索磨损情况，专人指挥；油污、冷却液通过专用导管收集，严禁直接排放。

拆解顺序按“从外到内、从上到下、先附件后核心”规划：1. 拆外部附件；2. 卸进气与排气系统；3. 拆缸盖组件；4. 卸活塞连杆组件；5. 拆曲轴飞轮组件；6. 卸润滑与冷却系统部件；7. 清洁检测缸体。如拆缸盖螺栓需“从两侧向中间、分次松开”，每次扭矩减 50N·m，防缸盖变形。

3.3.2 关键拆解工序执行与质量控制

缸盖组件拆解：先拆缸盖罩，检查气门摇臂与挺柱磨损；按卡特标准分 3 次拆缸盖螺栓（扭矩 100N·m、50N·m、0N·m），实时记录扭矩。本次 6 号缸螺栓扭矩异常，修复螺纹后继续。检测缸盖发现 3 号缸气门杆直线度超标，2 号、5 号缸气门导管配合间隙过大，需更换对应部件，且部件分类标注存放。

活塞连杆组件拆解：按“中间向两侧”拆连杆轴承盖螺栓，用专用工具取活塞连杆组件。检测发现活塞裙部、活塞环磨损超标，2 号连杆弯曲，需更换活塞、活塞环并矫正连杆，同时清理气缸壁积碳至粗糙度 Ra ≤ 0.8μm。

曲轴飞轮组件拆解：“对称交叉”拆飞轮螺栓，吊装时保持水平。检测飞轮齿圈磨损超标，需堆焊修复；按标准拆曲轴轴承盖并配对存放，曲轴检测发现 1 号轴颈圆度超标、2 号油道堵塞、止推间隙过大，需磨削轴颈、清理油道、更换止推瓦。

润滑与冷却系统拆解：拆机油底壳发现铁屑，检查机油泵齿轮磨损超标需更换；水泵叶轮磨损、散热器渗漏，分别更换与锡焊修复。

拆解质量管控设“三道防线”：工序自检、互检，设备管理员每日专检，发现缸体裂纹后用冷焊修复并水压测试确认。

3.4 发动机核心部件检测与修复

缸体：激光检测平面度超标，数控磨削至合格；3 号缸孔圆度、圆柱度超标，珩磨修复；水道砂眼用环氧树脂胶封堵。

缸盖：磨削修复平面度，红丹检测气门座圈密封性，铰削研磨不合格座圈；更换气门导管并压装铰削，确保配合间隙达标，清洁进排气道。

曲轴：检测修复后轴颈尺寸合格，动平衡测试超标则铣削校正，油封颈喷涂镍基合金并精磨。

涡轮增压器：清洗积碳，更换轴承调整预紧力，性能测试显示增压压力与泄漏量达标，空载试运行无异常。

3.5 发动机装配流程设计与执行

3.5.1 装配前准备与顺序规划

清洁旧部件与新配件，校准工具精度。装配按“从内到外、从下到上”顺序：1. 装曲轴飞轮组件；2. 装活塞连杆组件；3. 装缸盖组件；4. 装配气机构；5. 装润滑系统；6. 装冷却系统；7. 装燃油系统；8. 装进气排气系统；9. 装外部附件，明确各步骤时间节点。

3.5.2 核心部件装配与质量控制

曲轴飞轮组件：装新主轴承，测止推间隙 0.08mm 合格；按顺序分 4 次拧主轴承盖螺栓，测曲轴径向跳动 0.03mm 合格；飞轮螺栓“对称交叉”拧紧，端面跳动 0.07mm 合格。

活塞连杆组件：装活塞环并错开开口，测配合间隙 0.10mm、顶隙 1.3mm 均合格。

缸盖组件：装密封垫与缸盖，分 3 次拧螺栓至 220N·m，复检补拧不合格螺栓；调整气门间隙，进气门 0.38-0.40mm、排气门 0.64-0.66mm 合格。

3.5.3 辅助系统装配与调试

润滑系统：装机油泵与管路，测怠速机油压力 0.4MPa、2000r/min 时 0.6MPa 合格。

冷却系统：装水泵与管路，水压测试无渗漏，节温器工作正常。

燃油系统：装喷油器，测压力 158-162MPa 合格，运转无渗漏。

3.5.4 装配过程质量管控

设自检、互检、巡检体系，设备管理员每 2 小时巡检。建立应急机制，如更换损坏喷油器密封圈，确保装配按计划推进。

4 结论

本研究以刚果（布）项目部 CAT336D2 挖掘机 C9 发动机为对象，针对当地维修服务成本高、周期长的痛点，开展自主大修方案设计与验证。结果表明，基于卡特 SIS 软件规范与国内专家经验构建的大修方案科学可行：通过国内采购配件、内部团队执行，单台发动机大修成本从 25 万元降至 12 万元，节约 13 万元，6 台设备推广后可省近 80 万元；维修周期从数月缩至 1-2 周，单台减少 240 万元产能损失，且大修后发动机作业效率恢复至 200m³/h（新机水平），油耗降低超 20%，设计使用寿命达 6000 小时以上。同时，项目团队掌握 C9 发动机核心维修技术，培养 8 名专业人才，形成适配当地工况的技术标准与检测体系，打破外部依赖。该自主大修模式为海外矿山项目 CAT 设备维修提供可复制范式，践行“降本增效”理念，助力提升中国工程企业海外核心竞争力。

参考文献

[1]顾清华,孙文静,李学现.基于IFOA-RotGBM的矿用挖掘机发动机故障诊断[J].金属矿山, 2023(9):156-163.

[2]顾清华,银璐阳子,王丹,et al.基于RFTL-1DNet 的矿用挖掘机发动机 故障诊断方法[J].Nonferrous Metals (Mining Section), 2025, 77(2).DOI:10.20238/j.issn.1671-4172.2025.02.005.

[3]刘伟嵬,张靖文,邓剑洋,等.一种基于发动机输出功率预测与控制器参数整定的液压挖掘机优化方法:CN202310033329.7[P].CN115949114B[2025-09-06].

[4]李豪豪.挖掘机工段感知与匹配控制的研究与设计[D].河北工程大学,2023.

[5]李健,曾超,罗柏香,等.高功率发动机在大型液压挖掘机上的应用研究[J].内燃机与配件, 2024(10):125-127.

[6]崔广伟,王晋强,孟凡建.一种轮式挖掘机行走合流控制系统及控制方法:CN202211516960.4[P].CN115717416A[2025-09-06].