

全钢丝子午线载重轮胎 X 光检测机冷却系统优化研究

杨灏宇

(双钱集团(重庆)轮胎有限公司, 中国 重庆 400900)

摘要: 在全钢丝子午线载重轮胎检测环节中, X 光检测机作为核心设备, 其检测精度与运行稳定性直接关系到产品质量控制水平。作为 X 光检测机的核心组件, X 光管在工作过程中因能量转换特性必然产生大量热能, 其冷却系统的效能成为制约设备性能的关键因素。本文聚焦载重子午线轮胎骨架结构检测场景, 通过热力学仿真与实验验证相结合的方法, 系统分析了 X 光管发热机理与现有冷却系统的技术瓶颈以及冷却系统效能衰减机制。提出一种增设压缩机加冷却器的复合优化方案, 通过实际工况验证, 通过引入蒸馏水(电导率 $\leq 2 \mu\text{S}/\text{cm}$)和接触式微通道换热器(接触面积提升 87%), 使 X 光管工作温度稳定在 $(45\pm 3)^\circ\text{C}$ 的设计区间。经 240 h 持续工况测试, 设备热负荷承载能力提升 25%, 管头预计使用寿命延长至 3 500 工作小时, 提升了设备经济运行效益。

关键词: X 光检测机; 冷却系统; 优化方案

中图分类号: TQ330.492

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)07-0013-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.07.004

轮胎企业在生产出全钢丝子午线载重轮胎成品时, 由数字射线成像检测技术支持的非破坏性材料测试已成为不可或缺的工具。X 光检测机在质量保证过程中为操作人员提供支持, 或提供全自动的 X 射线图像最终评估。X 光检测机作为核心设备, 其检测精度与运行稳定性直接关系到产品质量控制水平。作为 X 光检测机的核心组件, X 光管在工作过程中因能量转换特性必然产生大量热能, 其冷却系统的运行可靠性和降温效率成为制约设备性能的关键因素。本文系统分析 X 光检测机在检测过程中 X 光管发热机理与现有冷却系统的技术瓶颈, 提出一种管头运行温度控制的优化方案, 通过实际工况验证, 实现了 X 光管工作温度显著降低与使用寿命的有效延长。

1 研究背景

双钱重庆公司引进了两台型号为 MTIS-Y.TX/07 的 X 光检测机, 设备使用时间超过 15 年。冷却系统设降温效果差, 导致设备故障率偏高, 严重影响生产效率和产品质量, 因此, 需要对原有系统进行改造。

1.1 设备运行工况

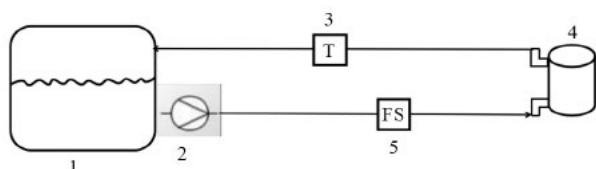
在载重子午线轮胎的在线 X 光检测过程中, 由于该检测工序在最前端, 刚硫化完成的轮胎经过自动传

输辊道传送至 X 光机的时候, 由于硫化后轮胎表面温度最高可达到 70°C , 存在外源性热传导。此时与 X 光检测工位接触产生的辐射热通量达 $3.2 \text{ kW}/\text{m}^2$, 在 X 光检测机工作的时候, 管头又有本征热生成, 电子束轰击钨靶时, 加速电压一般为 120 kV , 束流约 5 mA , 在检测过程中仅 0.2% 的能量转化为 X 射线, 其余 99.8% 的能量转化为热能 ($Q=IVt=120\times 5\times 1=600 \text{ J}/\text{S}$), 此时, X 光管需承受外源性热传导和本征热生成双重热载荷冲击。管头工作温度偏高, 影响使用寿命。

1.2 原冷却系统现状

原冷却系统采用常温水循环实现 X 光管头冷却, 由于冷却系统仅仅依靠水箱自带的风扇降温, 缺乏高效的降温设施。在 X 光检测机工作的过程中管头本征热加外源性热传导, 水温越来越高。导致管头使用寿命降低, 同时冷却系统维护工作量加大。冷却系统由水箱、水泵、管路、流量检测开关和温度检测装置组成, 见图 1。

作者简介: 杨灏宇 (1980—), 男, 研究生, 管理学硕士, 高级工程师, 项目管理专业 (PMP) 认证—美国项目管理协会 (PMI), 重庆工程师联合体工程科技智库专家, 主要从事橡胶设备管理, 数字化及项目管理工作。



1—水箱；2—水泵；3—温度控制开关；4—管头；
5—流量检测开关

图1 控制流程图

整个冷却系统的工作流程为：水泵2运转将水箱1中的常温水通过管路经过流量检测开关5输送至X光管头4的进水口，水在管头的表面水腔循环，水温逐渐升高，通过X光管头4的出水口通过管路流经温度控制开关3返回水箱，如此往复循环。长时间运行过程中存在两个重要的隐患。一是由于没有单独的制冷系统，水温逐渐升高，X光管头运行中产生的本征生热无法快速传导，管头运行温度偏高，使用寿命仅有2 400 h左右。二是水温偏高，经常需要加水，停机时间增加。且水泵在长时间高速运行过程中产生杂质，会堵塞冷却管路。原系统运行中经常出现超温报警，流量小报警，水泵故障。三大故障占据X光检测机停机时间的26%左右。亟需进行技术升级改造。

2 系统优化方案

2.1 技术论证

现X光检测机冷却系统采用强制水循环散热方案，其热传递路径主要经过三次热交换，第一次热交换为X光管阳极靶面热量通过热传导传递至管壳。第二次热交换为管壳热量经循环水对流换热带走。第三次热交换为升温后的循环水通过水箱外的风扇散热进行环境热交换。但是热交换效率很低。原系统核心组件包括水箱（容量为10 L）、水泵（流量 $Q=0.95\text{--}7.87\text{ L/min}$ ，0.25 HP）、温度开关（动作阈值 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）、流量开关（动作阈值 2 L/min ）。

由于运行中水温偏高，原系统仅仅依靠风扇进行冷却，由于X光管头运行中产生的热量为 600 J/S 完全被水吸收，如果初始水温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，为了简化计算，假设系统所有热量都被水吸收，没有热量散失到环境中。但在实际运行中，会存在一定的热量散失。可计算水温从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需的时间。温差 $\Delta T=60-20=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其中，水的比热容 $c=4\text{ }180\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ，水的质量 $m=10\text{ kg}$ 。则热容量 $C=m\cdot c=10\text{ kg}\times 4\text{ }180\text{ J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}=41\text{ }800\text{ J/}^{\circ}\text{C}$ ，则水温从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需的总热量为 $Q=C\cdot\Delta T=41\text{ }800\text{ J/}^{\circ}\text{C}\times 40\text{ }^{\circ}\text{C}=1\text{ }672\text{ }000$

J，需要的时间为： $t=Q/P=1\text{ }672\text{ }000\text{ J}/600\text{ J/s}\approx 2\text{ }787\text{ s}\approx 46.45\text{ min}$ 。可见，不考虑散热措施的前提下，水温从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 仅仅只需要46 min左右。温度上升速率非常快。没有有效的循环水冷却装置将无法控制水温升高。所以新的系统需要增加循环水制冷装置。这是系统功能优化的关键环节。

2.2 设备选型

新设计的冷却系统将X光管循环回来的水通过压缩机制冷后再排入水箱，能保证在整个循环过程中进入X光管的水温较低，这样X光管的散热效果更好。还需要增大水量，即使用更大的水箱减缓水温上升，引入更为可靠的恒温器或控制电路，当温度接近设置温度时进行声光报警，提醒操作者。为确保冷却塔系统性能可靠，结构紧凑，操作简单，可24 h连续运行，对压缩机，自动控制装置及保护报警装置选型做了如下规定，尤其是保护装置，如压缩机过热保护、过流保护、高低压力保护、超温保护、流量保护相序/缺相保护，排气过热保护、防冻保护。配件选型见表1。

表1 配件选型表

序号	部件名称	品牌	产地	主要参数
1	压缩机	Panasonic	日本	全封闭旋转式，功率1.5 kW
2	空开	施耐德	法国	
3	水泵	格兰富	丹麦	0.37 kW，扬程20 M
4	蒸发器		国产	冷冻水量大于 $0.2\text{ m}^3/\text{h}$
5	冷凝器		国产	高效紫铜套管翅片，冷却风量 $2\text{ }000\text{ m}^3/\text{h}$
6	压力控制器（高压）	川仪	国产	闭环控制
7	压力控制器（低压）	川仪	国产	闭环控制
8	过滤器	艾默生	美国	
9	流量计	法斯特	国产	
10	防冻开关	LEFOO	国产	
11	水箱		国产	容量50 L

2.3 系统设计

新的系统设计对原有的水箱容量扩容至50 L，扩容后按照技术论证水温从 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时间将延长至230 min左右。另外，重点考虑循环水制冷装置新增，满足冷冻水进水温度不高于 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，出水温度低于 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这样X光检测机管头始终保持在低温运行。

（1）制冷量计算

整个系统要确保冷冻水流量： $Q_v=0.2\text{ m}^3/\text{h}=200\text{ kg/h}$ ，其中， Q_v 表示冷冻水的流量，单位为 kg/h ，且进水和回水口的水温差： $\Delta T=12-7=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。水的比热容为 c_p 则需要的制冷量 $Q_{\text{冷}}=Q_v\cdot c_p\cdot\Delta T=200\times 4.18\times 5=4\text{ }180\text{ kJ/h}=1.16\text{ kW}$ ，设计裕量按20%冗余，该冗余是基于系统稳定性需求和经济性考虑的平衡点考虑的，

且能系统应对负荷波动和突发情况，从而确保稳定运行。则实际制冷量需 $\geq 1.16 \times 1.2 \approx 1.392$ kW。压缩机选择 1.5 kW 符合工艺现状。

(2) 压缩机设计及控制

制冷剂选择环保型 R134a，制冷量需求： ≥ 1.276 kW。推荐松下品牌全封闭旋转式，功率 1.73 kW 的压缩机能完全满足当前工况。在温度控制逻辑方面进行以下控制：若出水温度 > 7 °C 时则启动压缩机，进行有效制冷；若回水温度 > 12 °C 时进行声光报警进行提示并增大水泵流量；若水箱温度 < 5 °C 时防冻保护启动（停压缩机）。通过控制逻辑实现温度精准控制。

(3) 控制流程

新的控制系统新增了压缩机，并将水箱的容量增大，本设计完全满足冷冻水流量 ≥ 0.2 m³/h、回水温度 ≤ 12 °C、出水温度 ≤ 7 °C 的核心要求：压缩机与蒸发器提供约 1.5 kW 制冷量（冗余 20%），冷凝器风量 2 000 m³/h，使散热温升仅 2.9 °C，水泵扬程为 2 0 m，远超系统阻力，50 L 水箱 +PID 控制确保温度波动 $< \pm 0.3$ °C。控制流程见图 2。

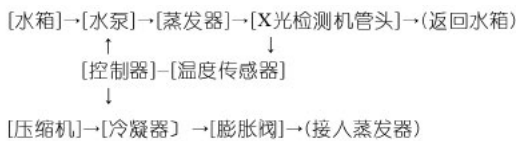


图 2 控制流程图

3 实施与效益

3.1 升级改造实施

在升级改造实施阶段，首先进行了全面的系统分析与设计，通过设备选型和设计的相关依据，精准定位了 X 光管发热机理与现有冷却系统的技术瓶颈。基于此，提出了增设压缩机加冷却器的复合优化方案，并引入了蒸馏水（电导率 ≤ 2 μS/cm）和接触式微通道换热器（接触面积提升 87%），以显著提升冷却效率。在设备选型上，精选了 Panasonic 压缩机、格兰富水泵等高品质配件，确保系统稳定运行。同时，通过精确的制冷量计算与环保型 R134a 制冷剂的选择，实现了温度的精准控制。针对原系统水温偏高及维护工作量大的问题，通过优化冷却系统设计与增加过滤器等措施，有效解决了这些难题，确保了改造过程的顺利进行。

在升级改造过程中，要求现场操作人员严格遵循

“停机—断电—挂牌—专人操作”的标准化流程，确保作业安全与系统平稳过渡。首先，执行全系统停机操作，关闭所有运行中的设备及服务，并通过多层级断电验证机制（如主电源切断、备用电源隔离）彻底消除带电风险。其次，在设备控制开关及配电箱处悬挂“禁止合闸”警示牌。拆除旧系统，实现了新系统同步更新。

3.2 经济效益分析

X 光管更换成本降低，改造前：3 支/年 $\times 200$ 000 元=600 000 元，由于温度得到有效控制，采用新型号管头价格更便宜，且成像质量也得到改善。改造后：2 支/年 $\times 160$ 000 元=320 000 元，年节约管头采购费用为 280 000 元。且设备故障率显著降低。停机损失减少。除了直接的经济效益外，质量隐性效益也得到了提升。检测质量提升方面：图像灰度标准差由 45HU 降至 30HU，设备 MTBF 也大幅提升，降低了维护人员的工作强度和突发故障处置产生的加班费。效益分析见表 2。

表 2 效益分析表

序号	项目	改造前	改造后
1	型号（管头）	Y.TU120-T01	MCT120-6F
2	管头单价 / 元	200 000	160 000
3	冷却水温度 / °C	35.1	12
4	冷却水容量 / L	10	50
5	管头射线发射 / h	2 412	3 500
6	冷却装置型号	WL3002	ZY-AL-2W
7	每年维修费用 / 元	600 000	320 000
8	设备 MTBF/h	2 600	4 000
9	设备故障率 / %	3.2	0.8

从经济效益分析表显示，升级改造后经济效益显著。X 光管更换成本本年节约 280 000 元，维修费用大幅降低。同时，X 光管使用寿命延长，设备 MTBF 提升，故障率显著下降，提高了生产效率。此外，图像质量的提升与维护人员工作强度的降低，进一步体现了改造的隐性效益。整体而言，此次升级改造在成本控制、效率提升及质量保障方面均取得了显著成效，为企业带来了较为可观的经济回报。

参考文献：

[1] 苏定邦，谢颖，何美悦. 工业常用的冷却循环水系统类型与特点 [J]. 科技风，2025,(08):1-3.
[2] 魏永红. 组合式工业循环水冷却系统设计研究 [J]. 现代工业经济和信息化，2024,14(10):96-98+101.

Optimization study on cooling system of X-ray inspection machine for all steel radial load tire

Yang Haoyu

(Double Coin Group (Chongqing) Tire Co. LTD., Chongqing 400900, China)

Abstract: In the testing process of all steel radial load tires, the X-ray detection machine, as the core equipment, directly determines the level of product quality control in terms of detection accuracy and operational stability. As the core component of an X-ray inspection machine, the X-ray tube inevitably generates a large amount of heat energy due to its energy conversion characteristics during operation, making the efficiency of its cooling system a key factor restricting equipment performance. This article focuses on the detection scenario of the skeleton structure of radial tires, and systematically analyzes the heating mechanism of X-ray tubes, the technical bottlenecks of existing cooling systems, and the attenuation mechanism of cooling system efficiency through a combination of thermodynamic simulation and experimental verification. A kind of compound optimization scheme of adding compressor and cooler was put forward. Through the verification of actual working conditions, distilled water (conductivity $\leq 2 \mu\text{S/cm}$) and contact microchannel heat exchanger (contact area increased by 87%) were introduced to stabilize the working temperature of X-ray tube within the design range of $(45 \pm 3) ^\circ\text{C}$. After 240 hours of continuous working condition testing, the thermal load carrying capacity of the equipment has been increased by 25%, and the expected service life of the pipe head has been extended to 3 500 working hours, thereby improving the economic operation efficiency of the equipment.

Key words: X-ray detection machine; cooling system; optimization plan

(R-03)

两厂关停！炭黑巨头确认损失 12.4 亿元

Two factories shut down! carbon black giant confirms loss of 1.24 billion yuan

国际中橡投资控股股份有限公司(以下简称“国际中橡”)在近日召开的股东大会上,报告了中国未来的发展策略。

会上，国际中橡董事长辜公怡透露，面对中国市场长年亏损，重庆厂出售已于去年底敲定，鞍山厂也在今年初关闭，2024 年确认一次性损失 12.4 亿元，随着多年亏损厂区的正式结束，国际中橡未来将转向具成长潜力的地区重振旗鼓。

据了解，国际中橡在战略调整的同时，也积极布局未来增长点。

总经理李超儒在会上详细阐述了公司在中国市场的未来规划。他表示，公司将以马鞍山厂为核心，实施“全产全销”策略，并计划在下半年引入蒸气销售业务，以进一步优化营收结构，提升盈利能力。

此外，李超儒还透露，马鞍山厂已被选定为 SCB(可持续炭黑) 技术的试点基地，公司正致力于提升以 TPO(热裂解油) 为原料的生产能力。目前，该厂已完成 25% TPO 混合比例的试产与成品测试，预计年底前将实现 100% TPO 生产可持续炭黑，届时将成为全球第三家掌握此项技术的企业，与 Orion、Cabot 等国际巨头并驾齐驱。

另外，李超儒指出，台湾林园厂已于 2024 年完成检修与锅炉更新，同时掌握碳纳米管研发的技术突破，现积极规划相关产品的投产。李超儒总经理预测，国际中橡 2025 预估全年可销售导电炭黑 5 500 t，几乎多出 2023 销量的一倍，有望创下历史新高。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)