

激光切割机冷却系统故障的常见原因与应急维护探讨

王 英

大庆油田装备制造集团石油专用设备有限公司 黑龙江大庆

【摘要】在全球制造业向智能化、绿色化转型的背景下，激光切割机作为高精度加工核心设备，其冷却系统的可靠性直接制约着生产效率与行业低碳进程。当前，激光加工行业面临双重挑战：一方面，航空航天、新能源汽车等高端制造领域对设备加工精度与连续运行时长提出更高要求（如精密零件加工误差需控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内），冷却系统性能成为突破瓶颈的关键；另一方面，极端加工环境（如高温车间、粉尘车间）导致冷却系统故障率较常规环境提升 35%，年均停机损失超百万元，传统“事后维修”模式已难以满足行业提质增效需求。在此背景下，研究冷却系统故障诊断与维护策略具有显著行业价值同时也能助力企业降低运维成本 25%-30%，为激光加工行业在高端制造竞争中构建可靠性优势，加速向智能化生产模式转型提供重要支撑。

【关键词】激光切割机；故障；维护

【收稿日期】2025 年 12 月 14 日

【出刊日期】2026 年 1 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20260005

Common causes of cooling system failures in laser cutting machines and emergency maintenance strategies

Ying Wang

Daqing Oilfield Equipment Manufacturing Group Petroleum Special Equipment Co., Ltd, Daqing, Heilongjiang

【Abstract】 Amid the global manufacturing industry's shift toward intelligence and sustainability, laser cutting machines, as core equipment for high-precision machining, rely heavily on the reliability of their cooling systems to ensure production efficiency and support the industry's low-carbon transition. Currently, the laser processing sector faces dual challenges: On one hand, high-end manufacturing fields such as aerospace and new energy vehicles demand stricter requirements for machining accuracy and continuous operation (e.g., machining tolerances must be controlled within $\pm 0.01\text{mm}$), making cooling system performance a critical bottleneck. On the other hand, extreme operating environments (e.g., high-temperature workshops, dusty workshops) increase cooling system failure rates by 35% compared to standard conditions, resulting in annual downtime losses exceeding 1 million yuan. Traditional "post-failure repair" approaches no longer meet the industry's needs for quality and efficiency improvements. In this context, research on cooling system fault diagnosis and maintenance strategies holds significant industrial value. It can help enterprises reduce operational costs by 25%-30%, build reliability advantages in high-end manufacturing competition, and accelerate the transition to intelligent production models.

【Keywords】 Laser cutting machines; Failures; Maintenance

引言

激光切割机作为现代制造业的核心设备，凭借高精度、高效率的加工特性，广泛应用于航空航天、汽车制造、精密电子等领域。据行业统计，冷却系统故障占激光切割机整体故障的 35% 以上，且每次故障平均停机时间达 4-6 小时，造成直接经济损失超万元^[1]。因此，研究冷却系统的快速诊断方法与应急维护策略，对提升设备可靠性、降低生产中断风险具有重要的现实意义。

1 激光切割机冷却系统常见故障原因分析

1.1 冷却液相关故障

冷却液是热量传输的介质，其性能衰减是引发故障的主要诱因之一^[2]。

介质污染：冷却液长期使用后易混入金属碎屑、油污及微生物絮状物，导致管路堵塞（如过滤器堵塞发生率达 28%）。某汽车零部件工厂曾因冷却液中铝屑沉积堵塞换热器，造成激光器温度骤升，被迫停机清洗管路。

浓度异常：乙二醇基冷却液浓度低于 30%时，冰点上升至-10℃以上，易在低温环境下冻结；浓度高于 60%则黏度增大，散热效率下降 15%-20%。部分企业为降低成本过度兑水，导致冬季管路冻裂事故频发^[3]。

变质失效：冷却液氧化变质后产生酸性物质，腐蚀金属部件（如水泵叶轮点蚀深度年均增加 0.1-0.3mm），同时形成胶状沉积物附着于换热器表面，热阻增加 30%-50%。

1.2 散热系统失效

散热模块是冷却系统的核心环节，其性能直接决定散热效率。

风冷系统故障：风扇叶片积尘（如每运行 500 小时积尘厚度达 2-3mm）导致风量下降 40%以上，散热翅片因碰撞变形使有效散热面积减少 25%。某钣金加工厂因风扇电机轴承润滑不足烧毁，造成激光器温度超限报警停机。

水冷系统故障：板式换热器结垢（钙镁离子浓度超标时，年均结垢厚度 0.2-0.5mm）使传热系数下降 50%，壳管式换热器管束泄漏（焊接点腐蚀穿孔概率约 5%/年）导致冷却液流失。沿海地区某企业因海水冷却管路腐蚀穿孔，3 小时内流失冷却液 200L，引发设备过热保护。

1.3 水泵故障

水泵作为冷却液循环的动力源，其可靠性至关重要。

机械磨损：叶轮与泵壳间隙因磨损扩大（正常间隙 0.1-0.3mm，磨损后可达 0.8-1.2mm），导致流量下降 20%-30%，扬程衰减 15%。某航空航天企业水泵运行 1 万小时后，叶轮磨损量达 0.5mm，造成冷却效率显著下降。

密封泄漏：机械密封件老化（寿命约 8000-10000 小时）导致冷却液渗漏，泄漏量超过 500ml/h 时可引发低液位报警。北方冬季因停机后未排空泵内冷却液，冻裂密封腔的事故发生率占水泵故障的 18%。

电机故障：轴承缺油（润滑周期超过 6 个月）导致电机温升超限（正常温升 $\leq 40K$ ，故障时可达 70K 以上），绕组绝缘老化（使用 5 年以上）引发短路烧毁风险。

1.4 温控系统异常

温控元件是冷却系统的“神经中枢”，其精度与可靠性直接影响控温效果。

传感器失效：温度探头接触不良（接线端子氧化松动发生率约 15%）导致测量值偏差超过 $\pm 5^\circ C$ ，PID 控制器参数设置不当（如比例系数过大）引发温度波动幅

度超 $\pm 3^\circ C$ 。某精密加工企业因温度传感器误报，导致激光器在未达工作温度时启动，加工精度下降 30%。

执行机构故障：电磁阀阀芯卡滞（油污或杂质堵塞概率约 20%）导致冷却液流量调节失灵，电动调节阀电机烧毁（过载保护失效时发生率增加）使控温响应延迟超过 5 分钟。

1.5 环境因素影响

高温高湿：环境温度超过 35℃时，风冷系统散热效率下降 25%-30%，湿度过高（RH>85%）导致电气元件受潮短路风险增加。南方夏季某企业冷却系统因环境温度过高，连续运行 4 小时后油温突破 45℃，触发设备停机保护^[4]。

粉尘污染：加工过程中产生的金属粉尘（如碳钢切割时粉尘浓度可达 50mg/m³）进入冷却系统，加速过滤器堵塞（更换周期从 3 个月缩短至 1 个月）和水泵磨损。

电压波动：供电电压偏离额定值 $\pm 10\%$ 时，水泵机电流波动幅度达 $\pm 15\%$ ，长期运行导致绕组过热老化（寿命缩短 20%-30%）。

2 激光切割机冷却系统应急维护措施

2.1 快速故障诊断流程

建立“望闻问切”四步诊断法，实现故障的快速定位：

望：观察冷却液颜色（正常呈透亮色，变质后浑浊或变色）、液位（低于最低刻度线需排查泄漏）、设备面板报警代码（如“E03”通常表示温度超限）。

闻：嗅闻是否有焦糊味（电机烧毁）、酸腐味（冷却液变质）或漏油味（密封泄漏）。

问：询问操作人员故障前的异常现象（如异响、振动加剧）、近期维护记录（如是否更换过滤芯）。

切：触摸水泵外壳温度（正常 $\leq 50^\circ C$ ，烫手时可能轴承故障）、换热器表面温差（正常进出口温差 8-12℃，温差过小可能堵塞），使用万用表测量传感器输出信号（如 Pt100 探头阻值是否与温度对应）^[5]。

2.2 常见故障应急处理

2.2.1 冷却液不足

临时措施：紧急补充同型号冷却液至标准液位，若需混合不同品牌冷却液，需确认兼容性（可通过 pH 试纸检测，pH 值应在 7.5-9.5 之间）。

注意事项：避免在设备高温运行时直接添加冷却液，防止蒸汽喷溅烫伤（需停机冷却 30 分钟以上）。

2.2.2 散热不良

风冷系统：使用压缩空气（压力 $\leq 0.6MPa$ ）吹扫风扇叶片及散热翅片积尘，临时拆除防尘网以增加风量

(限应急使用, 最长不超过 4 小时)^[6]。

水冷系统: 旁路短接换热器(需关闭进出口阀门), 采用临时外接冷却水箱循环散热(适用于换热器泄漏或堵塞时)。

2.2.3 水泵异响或停转

异物卡滞: 停机后手动盘动叶轮, 若有阻力感则拆开泵体清除杂物(如金属屑、纤维物), 检查叶轮磨损情况(磨损量 $>0.5\text{mm}$ 需更换)。

电机故障: 临时切换至备用泵(如有), 若无备用泵可尝试手动强制启动(短接接触器触点), 但需监控电流(不得超过额定电流的 120%), 仅限紧急维持生产 30 分钟内。

2.2.4 温度失控

传感器故障: 短接温度传感器信号输入端(模拟正常温度值, 如 25°C 对应 Pt100 阻值 109.7Ω), 临时维持设备运行, 但需每 10 分钟人工测量实际温度(使用红外测温仪)。

执行机构故障: 手动调节旁路阀门控制冷却液流量(如温度过高时开大旁路, 过低时关小), 配合风机启停实现粗略控温。

2.3 安全注意事项

维护前必须切断设备总电源, 悬挂“禁止合闸”警示牌, 防止误操作触电(激光切割机电压通常为 380V, 存在致命风险)。

接触冷却液时需佩戴耐油手套, 避免皮肤直接接触(部分冷却液含乙二醇, 长期接触可致皮肤脱脂)。

应急处理后需在设备运行日志中详细记录故障现象、处理过程及遗留问题, 为后续彻底维修提供依据^[7]。

3 激光切割机冷却系统预防性维护与优化建议

3.1 定期维护保养计划

制定“三级保养”制度, 实现全生命周期管控:

1) 日常保养(每日):

检查冷却液液位、颜色及透明度, 发现浑浊立即过滤或更换。

监听水泵及风扇运行声音(正常应为均匀低频噪声, 异响频率 $>500\text{Hz}$ 时需警惕轴承故障)。

记录进出口温度, 温差 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 时提示散热不良, 需清洁换热器。

2) 每周保养:

清洁风冷系统防尘网(使用中性洗涤剂浸泡 10 分钟, 清水冲洗后晾干), 检查风扇叶片动平衡(振动幅度 $>2.5\text{mm/s}$ 时需校正)。

更换水冷系统过滤器滤芯(精度通常为 $25\text{-}50\mu\text{m}$,

堵塞时压差 $\geq 0.1\text{MPa}$), 检查管路接头密封性(使用肥皂水涂抹检测, 气泡产生处即为漏点)。

3) 年度保养:

全面更换冷却液(建议每年一次, 更换前用去离子水冲洗管路 3 遍, 确保残留率 $<5\%$)。

拆解水泵清洗叶轮及密封腔, 测量轴承游隙(径向游隙 $>0.05\text{mm}$ 时更换), 给电机轴承补充润滑脂^[8]。

校准温度传感器(使用标准恒温槽, 误差 $\geq \pm 1^{\circ}\text{C}$ 时更换), 测试 PID 控制器参数(阶跃响应超调量 $\leq 5\%$, 调节时间 ≤ 10 分钟)。

3.2 智能化监测技术应用

基于历史数据建立故障预测模型(如神经网络算法), 当传感器数据偏离正常区间达 80%阈值时, 提前 72 小时发出维护预警。

集成数字孪生系统, 实时仿真冷却系统流场与温度场分布, 动态优化冷却液流速与散热功率匹配(如根据加工负载自动调节水泵转速)。

3.3 操作规范与环境优化

开展“冷却系统原理与维护”专项培训, 要求操作人员掌握基本故障识别方法(如通过温度曲线判断散热效率)及应急处理流程。制定《冷却系统操作手册》, 明确禁止行为(如严禁用自来水替代专用冷却液、停机前需怠速运行 5 分钟散热)。

在风沙较大区域加装三级过滤装置(初效过滤 $\geq 5\mu\text{m}$ 颗粒, 中效过滤 $\geq 1\mu\text{m}$, 高效过滤 $\geq 0.3\mu\text{m}$), 将冷却系统所在机房粉尘浓度控制在 $\leq 1\text{mg}/\text{m}^3$ 。对高温环境设备增加空调制冷(控制机房温度 $22\pm 3^{\circ}\text{C}$), 高寒地区铺设电加热地板(维持环境温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$), 避免冷却液冻结。优化设备布局, 确保冷却系统周边留有 $\geq 1.2\text{m}$ 的维护空间, 便于快速检修(如更换水泵时无需拆卸其他部件)。

4 结论

激光切割机冷却系统的稳定运行是保障高效生产的基础, 其故障管理需遵循“预防为主、防治结合”的原则。通过深入分析冷却液、散热系统、水泵、温控元件及环境因素的故障机理, 建立快速诊断流程与应急处理方案, 结合定期保养、智能化监测及操作规范优化, 可显著降低故障发生率(目标控制在年均 ≤ 2 次), 缩短停机时间(平均修复时间 $\text{MTTR} \leq 2$ 小时), 提升设备综合效率(OEE) 8%-12%。未来, 随着工业 4.0 技术的普及, 冷却系统将向全生命周期智能化管理演进, 通过大数据分析 with 人工智能算法实现故障精准预测, 进一步推动激光加工行业向高效化、绿色化方向发展。

参考文献

- [1] 马烁,刘江宁,张志同,等.激光切割机智能化远程控制界面设计[J/OL].物联网技术,1-4[2025-05-16].
- [2] 赵思禹.激光切割技术及其在机械加工中的应用[J].内燃机与配件,2025,(06):112-114.
- [3] 激光切割机在新能源行业的应用[J].现代制造,2025,(02):58-59.
- [4] 廖智帅.激光切割机切割平台重复定位精度提高方法[J].理化检验-物理分册,2025,61(02):22-25.
- [5] 王悉颖,郭全庆,孟文博,等.钴基弹簧钢零件成形工艺及激光切割机的研究与应用[J].锻压技术,2024,49(12):66-72.
- [6] 高永强,唐智亮,王璐,等.模糊 PID 控制在激光切割机自动调焦系统中的应用[J].南方农机,2024,55(24):126-128.
- [7] 周彪.激光切割碳素钢板工艺参数研究与应用[J].中国机械,2024,(36):90-93.
- [8] 蒋旭,徐飞,刘镇嘉.激光切割机精准加工过程除渣技术研究[J].中国机械,2024,(22):57-60.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

