

基于 CO 浓度梯度的超温热解电气火灾早期预警阈值模型研究

耿玲¹ 杨森海² 徐晓珏¹ 黄逸帆¹

1. 国网苏州供电公司 江苏苏州 215000

2. 苏州尚诚信息技术有限公司 江苏苏州 215000

摘 要: 针对电气火灾早期预警灵敏度不足的问题, 本研究提出基于 CO 浓度梯度的超温热解预警阈值模型。通过模拟不同负荷下电气设备过热热解过程, 采集 CO 浓度随温度变化的动态数据, 分析 CO 生成速率与温度升高的相关性。研究发现, 在绝缘材料热解初期, CO 浓度呈现显著非线性增长特征, 其变化梯度 ($d[CO]/dt$) 较绝对浓度更能灵敏反映热解发展阶段。基于此, 构建以 CO 浓度变化率为核心的多级预警阈值模型, 设定初级预警 (梯度持续上升)、中级预警 (梯度突增) 和高级预警 (梯度峰值) 三级判据。实验验证表明, 该模型可比传统 CO 浓度阈值法提前 3-8 分钟发出预警, 显著提升电气火灾早期识别的准确性与响应时效, 为智能消防系统提供理论支持。

关键词: 电气火灾; 早期预警; CO 浓度梯度; 超温热解; 阈值模型

引言

电气火灾因隐蔽性强、突发性高, 常由线路老化、过载、接触不良等引发, 初期表现为绝缘材料低温热解, 尚无明火与浓烟, 传统烟感、温感探测器难以及时响应, 因此实现早期精准预警至关重要。一氧化碳 (CO) 是有机材料热解的典型气态产物, 其浓度在热解初期即上升, 具有较高灵敏度。研究表明, CO 浓度变化速率 (浓度梯度) 比绝对值更能反映热解剧烈程度与发展阶段, 基于 CO 浓度梯度的预警方法因而备受关注。深入研究其与超温热解的关联机制, 构建科学预警模型, 对提升电气火灾预警的时效性与准确性具有重要意义。

目前, 国内外在气体特征预警方面已取得进展。国外较早关注 CO 在火灾探测中的应用, 提出 CO/CO₂ 比值法、CO 与温度复合判据等提升可靠性。国内学者通过实验验证了 CO 浓度变化在电气故障早期的显著性, 尝试建立基于浓度梯度的动态预警模型, 并揭示其与升温速率的正相关性。然而, 现有研究多停留在定性分析或单一阈值设定, 缺乏对不同热解阶段梯度特征的系统划分, 预警分级判据不明确, 难以适应复杂工况下的精准识别需求。

针对上述问题, 本研究聚焦构建基于 CO 浓度梯度的超温热解电气火灾早期预警阈值模型。研究内容包括: 分析绝缘材料热解机理, 明确 CO 生成动力学特征; 通过控制实验获取 CO 浓度动态数据, 提取浓度梯度 ($d[CO]/dt$) 特征;

研究梯度变化与热解进程的对应关系, 划分预警等级并建立多级阈值判据。研究方法涵盖文献调研、实验模拟与数据分析: 通过文献构建理论基础; 设计热解实验平台采集典型材料数据; 运用数学建模与统计分析构建并优化模型, 最终通过重复实验验证其有效性与鲁棒性。

1 理论基础

热解是物质在无氧或缺氧条件下受热分解的化学过程, 是电气火灾发生前的关键阶段。当电气设备因过载、接触不良等导致温度异常升高时, 其绝缘材料 (如聚氯乙烯、交联聚乙烯等) 在未达燃点前即发生热分解, 释放出 CO 等气态产物。CO 作为高分子材料热解的主要气体之一, 在热解初期即可被检测, 且生成量随温度上升呈非线性增长, 因此监测其动态变化有助于捕捉设备过热状态, 为早期预警提供依据。

电气火灾通常经历“过热—热解—阴燃—明火”的发展过程。在初始阶段, 局部温度持续升高引发绝缘层超温热解, 虽无明火与明显烟雾, 但材料分子链断裂, 释放出 CO、CO₂、烃类等特征气体。由于 CO 扩散性强, 其浓度变化早于温度与烟雾信号的显著上升, 具备更优的早期预警潜力。因此, 将 CO 作为关键参数, 有助于在火灾萌芽期实现有效识别与干预。

CO 浓度梯度, 即单位时间内 CO 浓度的变化率 ($d[CO]/dt$), 比绝对浓度更能灵敏反映热解反应的剧烈程度。热解初期梯度较小, 随温度升高, 材料分解加速, CO 生成速率

加快,梯度显著上升。这一动态特征与热解进程高度相关,可作为判断火灾发展阶段的重要依据。建立CO浓度梯度与热解状态的量化关系,有助于区分环境波动与真实故障,提升预警准确性与抗干扰能力,为构建智能分级预警模型提供核心理论支撑。

2 实验设计与预警模型构建

本研究基于电气设备超温热解引发火灾的物理机制,设计了一套科学严谨的实验方案,旨在获取CO浓度梯度与温度变化的动态关系。实验采用自主研发的电气火灾热解模拟平台,核心设备包括高精度电化学CO检测仪、K型热电偶温度传感器、可调温加热装置及0.5m²密闭实验舱,确保环境可控。实验材料选取聚氯乙烯(PVC)、交联聚乙烯(XLPE)和橡胶等典型电缆绝缘材料。通过设定60℃至140℃的梯度升温程序,模拟设备从正常运行到过热热解的全过程,实时采集CO浓度与温度数据,采样频率为10秒/次,每组重复3次以保障数据可靠性。

数据通过LabVIEW系统自动记录并预处理,经滤波去噪后计算每分钟CO浓度变化率($d[CO]/dt$)作为关键参数。分析发现,CO梯度随温度升高呈现“缓慢—加速—骤增”的三阶段规律,尤其在80℃以上显著上升,对热解进程高度敏感,为模型构建提供数据支撑。

基于实验数据,提出CO浓度梯度与温度在80-130℃区间呈近似线性关系的假设,建立模型: $d[CO]/dt = aT + b$ 。采用最小二乘法回归分析,以PVC为例,拟合得 $a=0.48$, $b=-32.6$, R^2 达0.91,拟合效果良好。敏感性分析表明系数 a 对预警判据影响较大。为提升实用性,模型设定三级预警:初级(梯度 >0.8 ppm/min)、中级(>2.5 ppm/min)、高级(>4.0 ppm/min),实现动态识别。

针对通风稀释和材料差异问题,模型引入环境修正因子,并优化为分段线性形式,增强高温区响应能力。最终构建的多参数自适应预警模型可嵌入智能探测器,实时计算并输出预警等级。现场测试显示,优化模型在复杂环境下识别准确率仍达88%以上,显著优于传统报警方式,具备良好的工程应用前景。

3 实验结果分析与模型性能评估

通过对5组典型绝缘材料在60-140℃升温过程中的实验数据分析,系统揭示了CO浓度梯度随温度变化的规律。结果显示,在80℃以下,CO梯度普遍低于0.5 ppm/min,

变化平缓,处于热解初期;当温度升至90-110℃区间,梯度迅速上升至1.5-3.0 ppm/min,标志材料分解加速;超过120℃后,梯度急剧增加,部分样品可达5.0 ppm/min以上,预示阴燃风险临近。这一“慢—快—骤增”的三阶段特征,清晰反映了热解进程的演化路径,验证了CO梯度作为早期预警指标的有效性。

研究进一步明确了CO浓度梯度与超温预警阈值的对应关系,确立了三级预警判据:初级预警($d[CO]/dt > 0.8$ ppm/min,约90℃)提示热解启动;中级预警(>2.5 ppm/min,约110℃)标志热解加速;高级预警(>4.0 ppm/min,约125℃)预示阴燃临近。该分级机制能够实现对火灾发展进程的精准判断。同时,分析发现材料类型、通风条件和加热速率是影响该关系的主要因素。例如,PVC比XLPE更早释放CO,强通风会稀释气体浓度,快速升温则导致梯度峰值提前,这些因素需在模型应用中予以补偿。

在不同实验条件下对模型预警效果进行测试,结果表明其具备良好的鲁棒性与适应性。在标准密闭环境下,模型平均提前5.6分钟发出高级预警,准确率达92%;在模拟通风环境中,虽预警时间略有延迟(平均提前4.1分钟),但引入修正系数后准确率仍保持在85%以上;针对不同材料类型,经参数调整后模型均能有效识别热解阶段。测试过程中未出现漏报,仅个别情况因极端通风出现轻微延迟,整体表现稳定可靠。

综合评估表明,基于CO浓度梯度的超温热解电气火灾早期预警模型具有响应早、误报率低、分级明确等显著优势。相较于传统依赖CO绝对浓度或温度阈值的报警方式,该模型能更灵敏地捕捉热解动态,提前3-8分钟发出预警,大幅提升防控窗口期。其多参数自适应设计增强了在复杂环境下的适用性,为智能消防系统提供了科学、量化的判据,具备广泛的推广价值和工程应用潜力

4 预警阈值模型在实际应用中的探讨

本研究构建的基于CO浓度梯度的预警阈值模型可有效集成于智能电气火灾监控系统中。应用方案设计为:在配电箱、电缆井、数据中心等关键部位部署具备CO与温度双参数采集功能的复合型探测器,实时计算CO浓度变化率($d[CO]/dt$),并与预设的三级阈值(0.8、2.5、4.0 ppm/min)进行比对,自动触发相应等级报警信号,并通过物联网平台上传至监控中心。系统可结合历史数据动态调整阈值

参数,实现自适应预警。实际应用效果分析表明,该模型能显著提升早期识别能力,在多起模拟真实场景的测试中,平均比传统烟感或温感系统提前 5 分钟以上发出预警,且误报率低于 10%,尤其适用于通信基站、老旧小区、轨道交通等对电气安全要求高的场所。

该模型在多种场合具有良好的适用性。在密闭或半密闭空间如配电室、机房、电缆隧道中,CO 易于积聚,浓度梯度变化明显,模型响应灵敏、准确性高;在人员密集场所如商场、学校、医院,其分级预警机制有助于实现风险分层管理,避免盲目疏散。适用性源于模型对热解本质特征的捕捉能力——无论环境如何,绝缘材料过热分解必然伴随 CO 的非线性释放。此外,模型对无明火的“阴燃型”电气故障尤为敏感,弥补了传统探测技术的盲区,因此在预防隐蔽性火灾方面优势突出。

然而,模型在实际应用中仍存在局限性。首先,强通风环境会稀释 CO 浓度,导致梯度下降,可能延迟预警;其次,不同绝缘材料的热解特性差异较大,通用阈值需结合现场材料类型进行校准;再次,环境中存在其他 CO 源(如燃气泄漏、汽车尾气)时,可能引发误判。此外,探测器长期运行中的传感器漂移也会影响测量精度。

针对上述问题,未来改进方向包括:一是引入风速、CO/CO₂ 比值等辅助参数构建多因子融合判断模型,提升抗干扰能力;二是建立典型材料热解数据库,支持探测器自动识别并调用对应阈值参数;三是采用定期自检与远程标定技术,保障传感器长期稳定性;四是开发边缘计算模块,实现本地化实时分析,降低通信依赖。通过持续优化,推动该模型向智能化、自适应、高鲁棒性的新一代电气火灾预警系统发展。

5 结论与展望

本研究成功构建了基于 CO 浓度梯度的超温热解电气火灾早期预警阈值模型,通过实验验证了 CO 浓度变化率与温度在 80 - 130℃ 区间呈显著线性关系,并确立了初级(>0.8 ppm/min)、中级(>2.5 ppm/min)和高级(>4.0 ppm/min)三级预警阈值。模型在实际测试中平均提前 5.6 分钟发出预警,准确率达 88% 以上,显著优于传统单一参数报警方式。研究证实,CO 浓度梯度能灵敏反映绝缘材料热解进程,为电气火灾的早期识别提供了科学、量化的判据,具备良好

的工程应用价值。

未来研究可从三方面深化:一是优化模型算法,融合风速、材料类型、CO/CO₂ 比值等多参数,提升复杂环境下的适应性与抗干扰能力;二是拓展应用场景,将模型应用于储能电站、新能源汽车电池热失控等新型火灾风险领域;三是推动智能化发展,结合边缘计算与物联网技术,实现探测器自学习、自校准与远程监控,构建更加精准、可靠的智能预警系统,助力智慧消防体系建设。

参考文献:

- [1] 陈克,张斌,郭宇航,等.面向应用的国内电气火灾物证鉴定技术研究进展[J].消防科学与技术,2025,44(09):1326-1333.
 - [2] 王金荣.变电站电气火灾早期预警与智能防控技术[J].数字技术与应用,2025,43(1):123-125.
 - [3] 刘艺飞,肖琼,沈立成,等.峰丛洼地土壤剖面 CO₂ 浓度双向梯度效应及其影响因素[J/OL].地球与环境,1-11[2025-09-28].<https://doi.org/10.3724/EE.1672-9250.2025.53.031>.
 - [4] 郑灿锋.基于热解特征气体与级联神经网络的电缆火灾早期预警技术研究[D].广州大学,2025.
 - [5] 刘木疆,乔洪新,陈昆,等.基于 ZigBee 技术的配电网环网柜电气接头温度超阈值检测[J].电力设备管理,2024,(18):223-225.
- 作者简介:** 耿玲(1981—),女,汉族,江苏苏州人,国网江苏省苏州市吴中供电公司运检专职,主要研究方向:电气工程及其自动化;

杨森海(1986—),男,汉族,江苏苏州人,苏州尚诚信息技术有限公司,主要研究方向:零碳园区;

徐晓场(1998—),女,汉族,江苏苏州人,国网江苏省苏州市吴中供电公司配电网格经理,主要研究方向:电气工程及其自动化;

黄逸帆(1997—),男,汉族,江西抚州人,国网江苏省苏州市吴中供电公司配电网格经理,主要研究方向:电气工程及其自动化。

基金项目: 2025 年国网苏州供电公司:超温热解电气火灾极早期监测预警智能装置研制及应用服务,编号:16161455。