

Study on the Mechanism of Abnormal Flash Point Decrease in Alkylbenzene Thermal Oil and Systematic Countermeasures

Minglin Zong Fuliang Li*

Shandong North Zite Special Oil Co., Ltd., Zibo, Shandong, 255304, China

Abstract

The abnormal decrease in the closed-cup flash point of alkylbenzene thermal oils in industrial heating systems is a typical safety hazard. This study reveals that the underlying cause is the accumulation of low-boiling-point components generated by thermal cracking within the system. Primary contributing factors include the installation of an expansion tank at an excessive height, leading to the formation of a low-temperature “dead oil zone,” and insufficient venting during the oil-boiling stage. To eliminate the dead oil zone, it is proposed to connect the high-temperature auxiliary circulation line to the top of the expansion tank and, when necessary, introduce a nitrogen purging system. Engineering applications demonstrate that these measures can effectively restore and stabilize the flash point value. Additionally, emphasis should be placed on the efficient recovery and treatment of volatile organic compounds in vented gases, along with strict implementation of fire prevention measures during operation. This provides important theoretical and practical foundations for the safe and long-term operation of the system. The research further explores systematic inducements and comprehensive strategies for flash point anomalies, offering crucial insights into enhancing the operational reliability of industrial thermal oil systems.

Keywords

Alkylbenzene thermal oil; Closed-cup flash point; Expansion tank; System optimization; Nitrogen purging; Safety protection

烷基苯导热油闪点异常下降机理与系统对策研究

宗明林 李富亮*

山东北方淄特特种油股份有限公司, 中国·山东 淄博 255304

摘 要

工业加热系统中烷基苯导热油闭口闪点异常下降是典型安全隐患。本研究揭示其本质为热裂解产生的低沸点组分在系统内富集, 主要诱因包括膨胀罐安装过高形成低温“死油区”, 以及煮油阶段排气不充分。提出将高温辅助循环管线接入膨胀罐顶部以消除死油区, 并在必要时引入氮气吹扫系统。工程应用表明, 该对策可有效恢复并稳定闪点值。同时需重视排气中挥发性有机物的有效回收处理, 并在操作中严格采取防火措施, 为系统安全长效运行提供重要理论与实践依据。本研究进一步探讨了闪点异常的系统性诱因与综合治理策略, 对提高工业热载体系统运行可靠性具有指导意义。

关键词

烷基苯导热油; 闭口闪点; 膨胀罐; 系统优化; 氮气吹扫; 安全防护

1 引言

导热油(专业术语是有机热载体)加热系统因其运行稳定、控温精确等优势, 在人造板、碳素、石油化工等工业领域得到广泛应用。烷基苯型导热油(国标牌号 L-QB300)凭借其优异的热稳定性和低温流动性, 成为中低温应用场景的首选热传导介质[1]。然而, 实际运行中发现, 系统投运数年后常出现导热油闭口闪点异常快速下降的现象, 常远

超 GB/T 24747-2023《有机热载体安全技术条件》中规定的 100℃安全阈值, 且其他指标(如运动粘度、酸值和残炭)仍保持相对正常。该类“单一指标异常”现象表明, 闪点下降并非油品整体老化所致, 而与特定系统因素密切相关^[2]。传统分析多聚焦于运行过程中形成的“死油区”效应, 而本研究进一步揭示, 系统初次投运时的“煮油”质量亦是关键诱因, 其与《锅炉安全技术规程》(TSG 11-2020)的执行情况直接相关^[3,4]。本研究旨在深入剖析闪点下降的机理, 并提出系统化的工程解决策略, 为同类工业系统提供可推广的故障诊断与性能恢复方案。

2 闪点劣化机理与影响因素分析

2.1 闪点下降的本质特征

闪点是评价液体挥发性和火灾危险性的关键安全参数,

【作者简介】宗明林(1984-), 男, 中国山东滕州人, 从事导热油的应用研究

【通讯作者】李富亮(1975-), 男, 中国山东聊城人, 硕士, 正高级工程师。

其数值取决于油品中最易挥发组分的含量 [1]。导热油在高温运行中会发生热裂解反应，持续生成低沸物（主要包括短链烷烃和轻质芳烃），这些物质的不断积累是导致闪点降低的直接原因 [2]。对烷基苯型导热油而言，其热裂解通常产生苯、甲苯、二甲苯等低沸点组分，这些物质的闪点显著低于基础油，因此即便是少量积累，也会引起整体闪点明显下降。值得注意的是，闪点的变化不仅反映了油品的安全状态，也是系统运行健康状况的重要指示指标。

2.2 异常现象的技术解读

当系统出现“闪点急剧下降，运动粘度仅轻微降低，酸值与残炭基本不变，5% 低沸物馏出温度未显著前移”的异常情况时，其内在技术逻辑并非系统内生成了过量低沸物，而是因系统结构或操作缺陷，导致已生成的有限低沸物无法被有效排出，从而在主循环回路中不断浓缩、富集 [3]。该现象为问题诊断提供了明确方向：需从系统的排气能力入手探究根源，而非仅归因于油品的热稳定性。此外，此类异常也提示系统可能存在局部过热或流动停滞的区域，加剧了油品的热裂解与分解产物积累。

2.3 膨胀罐的“死油区”效应

传统设计中，膨胀罐（也称高位槽）常被安装在系统最高点以上不低于 1.5 米处，其低温环境（通常低于 70℃）初衷是作为低沸物与水分的冷凝捕集器，使挥发性物质冷凝后暂存并定期排出 [4]。然而，当安装高度过高时，将引发多重问题：一是静压差过大，阻碍主系统中产生的油气混合物顺利上升进入膨胀罐；二是高位槽更易受环境温度影响，冬季时油温过低、粘度剧增、流动性显著恶化；三是上述因素共同作用，易在膨胀罐底部形成低温、高粘、几乎不参与循环的“死油区” [5]。冷凝后的低沸物被困于该区域，无法通过常规方式返回主系统或排出，最终造成低沸物在系统内形成“只进不出”的单向富集，持续引发闪点下降。此外，高位膨胀罐也增加了系统静压，可能对泵和密封系统提出更高要求。

2.4 煮油阶段排气不充分的关键影响

《锅炉安全技术规程》（TSG 11-2020）第 3.4.2(5) 条明确规定：“膨胀罐应当装设排放蒸汽和气体物质的排气管”，其直径与高度须满足安全泄放要求 [3]。然而实践发现，部分系统存在高位槽放空管未安装、管径过细（如低于 DN20）、安装高度不足（未高出地面或操作平台 2 米以上）等设计与施工缺陷。这类先天性不足导致系统在初次投运的关键“煮油”阶段（脱水、脱轻过程）中，产生的大量水蒸气与初始热裂解低沸物无法有效排出 [4]。它们在系统停泵或冷却后重新冷凝，并回流至储油槽或主循环管路，混入主油中，为后续运行中闪点的快速下降埋下隐患。因此，煮油操作不仅是系统启动的必要步骤，更是确保长期安全运行的基础。

3 系统性解决方案与工程对策

3.1 系统诊断与排查方法

首先须对加热系统进行全面检测：一是检查膨胀罐，核实其安装高度、保温状态及实际运行温度（尤其关注冬季工况）；二是严格依据《锅规》[3]，查验放空管的规范性与有效性，包括是否存在、管径是否足够、高度是否达标；三是实施定期取样分析，重点识别是否呈现“闪点显著下降、粘度略降、其他指标基本正常”的特征模式，以此作为判断此类问题的重要依据 [1,2]。此外，还应考察系统运行记录，包括温度变化趋势、补油频率及量等，综合判断系统状态。

3.2 高温辅助循环管线技术

该对策的核心思路是“加热膨胀罐，活化死油区”。具体方法为：从系统主循环泵出口或换热器出口、锅炉出口回油管道等高温区段（温度通常高于 200℃）分流一小股热油（流量约占系统总流量的 1%-3%），将其并联接入原辅助排气管线，并确保从膨胀罐顶部注入（禁止从侧部或底部引入），引入管管径不应大于主膨胀管（推荐采用 DN25 或 DN32）[4]。此举可利用系统自身高温油液持续加热膨胀罐，使槽内油温升高至 80-230℃ 的理想区间，从而显著降低粘度、打破“死油区”的滞流状态，促使积聚的低沸物重新汽化，并通过规范安装的放空管顺利排出系统 [5]。该方案改造简便、成本较低且无需外接动力，特别适用于已建系统的技改。操作时应遵循分段升温原则：首先在 120-130℃ 维持 24 小时，随后升至 150-160℃ 运行 48 小时，最后在 180-230℃ 下持续运行 48-72 小时，以确保彻底排气。同时应监控膨胀罐温度，避免过热导致油品加速老化。

3.3 氮气吹扫系统的选择性应用

氮气吹扫技术借鉴自对排气要求极高的石化行业，可作为备选或补充方案。其主要适用于如下情境：当膨胀罐温度经辅助循环已有效提升，但仍因先天设计缺陷（如放空管路径过长、阻力过大或存在 U 型弯等）导致排气不畅时，可引入连续、微量的惰性氮气（流量需精确控制，通常为几升/分钟）作为载气，强制吹扫积聚于系统高点的不凝性气体和低沸物蒸气 [2]。排气中产生的挥发性有机物应通过冷凝回收装置进行收集处理，实现资源化利用，避免直接排放造成环境污染。该方案不仅辅助增强脱气效果，还能在膨胀罐内形成微正压氮气覆盖，有效隔绝氧气，延缓油品氧化，兼具延长油品使用寿命的作用 [3]。值得注意的是，该技术并非首选通用方案，而是针对传统放空管排气效率不足的强化手段，适用于对系统可靠性及油品寿命有极高要求的特殊场合。

3.4 在线减压蒸馏技术的应用局限

除上述方法外，现实操作中也有采用在线接入简易减压蒸馏设施以脱除低沸物并提升闪点的工艺。该技术可在生产现场完成处理，一定程度上避免了油品更换带来的成本与

停产损失。然而,该工艺在实际应用中存在明显局限:一是安全施工要求高,操作单位须具备危险废物回收处置相应资质;二是脱出的低沸物属于危险化学品,不能随意排放,必须合规收集并交由有资质的单位处理;三是处理周期相对较长,且工程造价较高。因此,该技术一般适用于具备相应资质与处理能力的大型企业,或作为系统闪点严重下降且其他方法效果有限时的最终处理手段,并不推荐作为常规维护措施广泛采用。

3.5 规范安装与预防性设计

所有解决对策的基础,是确保系统初设与安装严格遵从《锅规》^[3]等法规标准。对于新建或大规模改造系统,须在设计阶段彻底杜绝隐患:规范安装膨胀罐放空管,确保其管径(通常不小于DN40)、高度及路径满足安全排气要求;合理确定膨胀罐安装高度,在满足系统静压需求的前提下避免过高^[4]。推荐采用“规范安装+高温辅助循环”组合策略,从源头上消除“死油区”和氧气侵入风险,实现系统本质安全^[5]。此外,应在设计中考虑系统可扩展性与维护便捷性,如预留辅助循环接口和检测点。

3.6 安全操作规范与防护措施

系统排气吹扫作业需严格防火,特别是膨胀罐排气时。应确保排气口远离火源并加装阻火器;操作区配备消防器材,人员经专业培训,使用防爆工具。建议设置可燃气体检测报警装置,并定期组织安全演练。

4 应用案例与效果验证

国内某大型人造板企业一台25吨导热油炉系统,采用烷基苯型导热油,运行4年后闪点从新油的178℃异常降至75℃,其他指标尚在正常使用标准范围内,触发严重预警^[2]。经现场诊断,发现膨胀罐安装于15米高的屋顶,远超合理高度,且放空管管径偏小、存在积水弯,构成典型“死油区”与排气瓶颈。改造措施包括:第一,按规范更换并正确安装放空管,并在排气出口增设冷凝回收装置,对排出的低沸物进行收集处理;第二,采用高温辅助循环方案,增设一条DN25无缝碳钢辅助循环管线并安装阀门,从主循环高温段引出,并联接入膨胀罐顶部^[4]。在实施过程中,严格执行安全操作规程,在膨胀罐周边设置防火隔离区,配备专用灭火设施,确保操作安全。改造后严格执行分段升温工艺:依次在120-130℃运行24小时、150-160℃运行48小时、200-210℃运行72小时^[5]。实施效果显著:闪点在升温开始24小时内即回升至115℃,连续运行一个月后稳定于132℃,

一个季度后维持在135℃以上。该系统迄今已安全稳定运行超过两年,未再出现闪点异常下降情况,成功避免约90吨导热油的更换成本及相应停产损失,经济效益与安全性能显著提升^[3]。这一案例表明,系统优化与规范操作相结合,可有效恢复并长期维持导热油性能。

5 结语

本研究通过系统分析与工程实践,得出以下结论:烷基苯导热油闪点异常下降属于多因素耦合的系统性问题,根本原因在于热裂解产生的低沸点组分在系统内异常累积^[1];富集诱因主要包括两方面:高位膨胀罐因安装过高形成低温“死油区”,阻碍低沸物排出;系统初次煮油阶段因排气管路设计不规范,导致挥发物排气不充分,遗留初始隐患^[2,3];解决策略需系统化实施:首先确保放空管等基础配置严格符合《锅炉安全技术规程》(TSG 11-2020)要求;优先采用“高温辅助循环管线”技术以经济高效地消除“死油区”;仅当排气仍不畅通时,才考虑将氮气吹扫作为补充强化方案;对于在线减压蒸馏工艺,应认识到其适用范围有限,需具备相应资质且处理成本较高,一般作为特定情况下的备选方案^[4];在实施各项措施时,必须重视排放物的回收处理和安全防护工作,特别是膨胀罐排气时的防火防爆措施;有机热载体系统的设计、安装与验收必须严格遵循技术规程,推行“规范安装+预防性设计(如预设辅助循环接口)”理念,是实现系统长周期本质安全运行的必然趋势^[5]。

未来研究可进一步探讨不同系统配置(如管径、标高与流量)条件下低沸物生成与排出的动力学模型,并对氮气吹扫工艺参数进行精确优化,同时需要深入研究排气中挥发性有机物的回收处理技术以及系统安全防护的最佳实践,从而为系统优化设计与平稳运行提供更精准的理论依据与数据支持。此外,随着新材料与智能控制技术的发展,开发新型耐高温导热油及智能监控系统也将是重要方向。

参考文献

- [1] GB/T 24747-2023, 有机热载体安全技术条件[S].
- [2] 王国强, 张建峰. 有机热载体热稳定性与系统设计关系的研究[J]. 化工机械, 2019, 46(4): 12-16.
- [3] TSG 11-2020, 锅炉安全技术规程[S].
- [4] 赵明. 人造板热压机导热油系统常见故障分析及处理[J]. 中国人造板, 2021, 28(3): 23-26.
- [5] 孙德鹏. 导热油系统高位槽温度控制对油品寿命的影响[J]. 节能, 2022, 41(2): 67-70.