# 甲苯吸收液在二噁英废气采样装置中的应用与捕集效率提升研究

王晓琛

苏州市华测检测技术有限公司，中国 ·江苏 苏州 215100

**摘要：**本文研究了一种在二噁英废气采样装置中增加甲苯吸收液的技术方法，该吸收液串联于冷凝装置和气相吸附单元之后，可显著提升二噁英的整体捕集效率。通过对现有采样系统的分析，针对气相态二噁英尤其是低氯代同系物在常规吸附材料上易穿透的问题，利用甲苯对二噁英类物质的高效溶解特性，建立了增强型采样系统。实验结果表明，该技术可使二噁英的整体捕集能力提升约 3%-4%，尤其对四氯至六氯代二噁英的捕集效果改善最为显著。本研究为二噁英采样技术的优化提供了新思路，对提高二噁英排放监测的准确性具有重要实践意义。

**关键词：**二噁英采样；甲苯吸收液；捕集效率；废气监测；气相吸附

## Application of Toluene Absorption Solution and Research on Capture Efficiency Enhancement in Exhaust Gas Sampling Devices for Dioxins

**Wang Xiaochen**

Centre Testing International (Suzhou)Co., Ltd., China Jiangsu Suzhou 215100

**Abstract:** This paper investigates a technical method of adding toluene absorption solution to the dioxin waste gas sampling device, which is connected in series after the condensation device and gas-phase adsorption unit, significantly improving the overall capture efficiency of dioxins. Through analysis of existing sampling systems, and aiming to address the issue that gaseous-phase dioxins, especially low-chlorinated congeners, are prone to break through conventional adsorption materials, an enhanced sampling system was established by utilizing toluene's high dissolution capacity for dioxin-like substances. Experimental results show that this technology can improve the overall capture capacity of dioxins by about 3%-4%, with the most significant improvement observed for tetra- to hexa-chlorinated dioxins. This research provides new ideas for the optimization of dioxin sampling technology and has practical significance for improving the accuracy of dioxin emission monitoring.

**Keywords:** Dioxin sampling; Toluene absorption solution; Capture efficiency; Waste gas monitoring; Gas-phase adsorption

## 0 引言

二噁英类化合物是一类具有极高毒性的持久性有机污染物，主要来源于废弃物焚烧、炼钢生产、氯碱工业等过程。由于具有强致癌性、生殖毒性和免疫毒性，且能长期存在于环境中并通过食物链累积，对生态系统和人类健康构成严重威胁。因此，对废气中二噁英的准确监测对于环境风险评估和污染控制至关重要。

目前，二噁英废气的采样中一般使用滤筒（收集颗粒相二噁英）、冷凝收集装置（收集采样过程中冷凝水中二噁英）和吸附柱（填充吸附剂如 XAD-2 树脂收集气相二噁英）进行二噁英样品采集。然而，这套系统在实际应用中存在局限性，尤其是对于气相态二噁英，特别是低氯代同系物，在吸附柱中可能因吸附容量饱和或穿透现象而导致捕集效率下降，造成监测结果的准确度降低和数据波动性增大[1]。

甲苯作为一种有机溶剂，对二噁英类化合物具有良好的溶解性能，已广泛用于样品的提取和前处理过程。然而，传统采样方法大多将甲苯作为提取溶剂而非吸收液直接应用于现场采样环节。本研究创新性地将甲苯作为吸收液应用于有组织废气的现场采样过程，在冷凝装置和气相吸附单元后增加了甲苯吸收液系统，利用甲苯对二噁英类物质的高亲和性和溶解能力，进一步捕集突破前段吸附单元的气相二噁英，从而提升整体采样效率。这一改进对于实现二噁英采样的准确性和代表性具有重要意义，尤其在对低浓度但毒性较高的二噁英同系物的捕集方面表现出明显优势。

# 1 材料与方法

## 1.1 实验原理

有组织废气中二噁英以气相形式和颗粒附着形式存在。传统采样方法采用滤筒捕集颗粒物，吸附树脂捕集气相组分的分段捕集策略。然而，随着采样进行，吸附树脂可能因温度升高、湿度影响或饱和现象而导致捕集效率下降，特别是对于低氯代二噁英同系物，由于其挥发性较高，更容易发生穿透现象。

本研究基于溶解增强与多级捕集的原理，在传统吸附柱后串联甲苯吸收液，构建了“过滤－吸附－溶解”的三级捕集系统。甲苯作为一种非极性溶剂，对二噁英类物质具有优异的溶解能力，其分子结构中的甲基与苯环形成的共轭体系，能够通过 π－π 相互作用与二噁英分子产生良好亲和性。甲苯的高溶解性能使其能够有效捕获从树脂柱穿透的挥发性二噁英同系物，从而显著提高整体捕集效率[2]。

## 1.2 系统整体结构

改进的二噁英废气采样系统整体延续了常规采样装置的基本组成，但增加了甲苯吸收液单元。具体流程为：废气首先经过加热采样管（温度维持在 120±10℃），进入滤筒，捕集颗粒物及其上吸附的二噁英；随后气体通过冷凝装置，温度降至 30℃以下，此时废气中的部分气态二噁英会冷凝；接着气体进入气相吸附单元（填充有 XAD-2 树脂）；最后，气体进入新增加的甲苯吸收液系统，包括两个串联的甲苯洗气瓶（置于冰水浴中），确保气体与甲苯充分接触。

这种串联式设计确保了二噁英在气相、颗粒相之间的全面捕集，特别是甲苯吸收液作为最后一道防线，能够有效捕获可能突破前段吸附单元的低氯代二噁英，这些同系物由于挥发性较高，在传统采样系统中容易损失[3]。

## 1.3 甲苯吸收液对二噁英捕集能力的提升机制

甲苯吸收液提升二噁英捕集能力的核心机制在于其对二噁英类物质的高效溶解特性。二噁英分子作为平面芳香化合物，其结构与甲苯的苯环结构相似，根据“相似相溶”原理，二者之间存在良好的相容性。研究表明，二噁英分子能够通过疏水相互作用和 π－π 堆叠与甲苯分子形成稳定结合。

特别值得注意的是，不同氯代程度的二噁英在甲苯中的溶解度存在差异。低氯代二噁英（如四氯和五氯代同系物）由于挥发性较高，在传统吸附柱中更容易穿透，而它们恰恰在甲苯中具有相对较高的溶解度。相反，高氯代二噁英（如七氯和八氯代同系物）挥发性低但毒性相对较低，更容易被前段的滤筒和吸附柱捕集。因此，甲苯吸收液的增加恰好弥补了传统系统对低氯代二噁英捕集不足的缺陷，使整体采样效率更加均衡[4]。

甲苯吸收系统设置在冰水浴中，这一低温条件对捕集效率提升起到协同增强作用。低温环境下，二噁英分子从气相向液相迁移的驱动力增强，气液分配系数显著提高。同时，低温减少了甲苯溶剂的挥发损失，既保证了采样过程的准确性，也降低了环境排放和操作人员暴露风险。

## 1.4 系统操作流程

系统的操作流程包括以下关键步骤：首先，将甲苯吸收液系统（两个洗气瓶）安装于气相吸附单元之后，并将其置于冰水浴中保持低温；接着，按照标准程序启动采样系统，确保等速采样条件（相对误差在 −5%~+10% 以内）；采样结束后，分别处理各部分的样品——包括滤筒、冷凝液、吸附柱和甲苯吸收液。特别地，甲苯吸收液需要与清洗套管式换热器的甲苯溶液合并，作为最终采样样本的一部分。

# 2 应用效果与性能对比

## 2.1 实验过程与数据

为验证甲苯吸收液对二噁英捕集能力的提升效果，研究团队在相同条件下对比了传统采样系统与改进后系统的性能差异。实验在生活垃圾焚烧厂进行，采用同步采样的方式，确保数据可比性，采样参照 HJ916-2017 技术要求，为了验证整套采样系统的捕集效率，采样内标从常规的加在 XAD-2 树脂处改为在采样系统靠前位置的滤筒处加标，加标量为 100μL，内标物质为 $^{13}$C-23478-PeCDF, $^{13}$C-123478-HxCDF, $^{13}$C-1234789-HpCDF, $^{13}$C-123478-HxCDD，浓度 1μg/mL，采样后将样品冷藏运输至实验室，经过提取、净化和浓缩等前处理步骤后，使用高分辨气相色谱－高分辨质谱联用仪进行分析。

## 2.2 方法性能评估

对比传统方法与改进方法的性能数据表明，甲苯吸收液串联树脂系统显著提高了二噁英的捕集能力。如表 1 所示，所有目标化合物的回收率均有明显提升，特别是挥发性较强的低氯代同系物，提升较明显，且从加标回收率的相对标准偏差（RSD）来看实验组的 0.19%~0.41% 低于对照组的 0.29%~0.54%，说明甲苯吸收液加入后不仅提高了整体回收率，还增强了采样的一致性，见表 1。

## 2.3 方法优势与局限性

增加甲苯吸收液的改进采样系统具有多方面优势：首先，它提高了采样的准确性和代表性，特别是对低氯代高

表1 二噁英采样加标回收率比较数据

| 实验批次 | 设备组别 | $^{13}$C−23478−PeCDF | $^{13}$C−123478−HxCDF | $^{13}$C−1234789−HpCDF | $^{13}$C−123478−HxCDD |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 设备A (对照) | 87.5% | 85.2% | 89.1% | 86.8% |
| | 设备B (实验) | 91.2% | 88.9% | 91.5% | 90.1% |
| | 回收率提升 | +3.7% | +3.7% | +2.4% | +3.3% |
| 2 | 设备A (对照) | 86.9% | 84.7% | 88.5% | 87.1% |
| | 设备B (实验) | 90.8% | 88.5% | 90.9% | 90.5% |
| | 回收率提升 | +3.9% | +3.8% | +2.4% | +3.4% |
| 3 | 设备A (对照) | 87.1% | 85.8% | 89.3% | 86.5% |
| | 设备B (实验) | 91.5% | 89.2% | 91.8% | 90.2% |
| | 回收率提升 | +4.4% | +3.4% | +2.5% | +3.7% |
| 平均值 | 设备A (对照) | 87.2% | 85.2% | 89.0% | 86.8% |
| | 设备B (实验) | 91.2% | 88.9% | 91.4% | 90.3% |
| | 平均回收率提升 | +4.0% | +3.6% | +2.4% | +3.5% |

毒性同系物；其次，系统兼容性强，无需对现有采样设备做重大改动；第三，方法成熟可靠，甲苯在二噁英分析中本就是常用溶剂，与后续的分析方法兼容性好。

然而，该方法也存在一些局限性：首先，甲苯作为有毒溶剂，使用时需要特别的安全防护措施，增加了操作复杂性；其次，吸收液装置需要低温冷却，在现场采样中可能带来不便[5]。

## 3 结论与展望

### 3.1 研究结论

通过系统的实验研究和数据分析，本研究得出以下主要结论：

（1）在传统二噁英采样装置后端串联甲苯吸收液，可有效提高方法的整体性能。三组实验数据表明，改进后装置的回收率提升幅度平均达到 3.4 个百分点。

（2）在精密度方面，改进装置的相对标准偏差从传统装置的 0.29%~0.54% 降低至 0.19%~0.41%，表明该方法具有更好的重复性和稳定性，有利于保证监测结果的一致性。

### 3.2 应用前景

基于本研究的结果，甲苯吸收液在废气二噁英监测中展现出良好的应用价值。

这一技术特别适用于以下场景：（1）低浓度二噁英排放源的监测，如经过高效净化处理后的废气；（2）高湿度烟气环境，其中水分可能影响吸附柱性能；（3）长时间采样情况，吸附柱可能因饱和而效率下降；（4）重点源监督性监测，对数据准确性要求极高的场合。

### 3.3 未来展望

尽管本研究证实了甲苯吸收液在二噁英监测中的积极作用，但相关技术仍有进一步优化的空间。未来的研究工作可重点关注以下几个方向：

首先是系统优化研究，包括吸收液体积、温度条件等参数的精细调整，以及吸收装置结构的创新设计。其次是适用范围的拓展验证，需要在更多类型的污染源和更复杂的工况条件下检验方法的可靠性。此外，从绿色监测的角度出发，探索环境友好型替代溶剂也是一个重要的研究方向。

总之，本研究提出的复合采样方法为废气二噁英监测提供了一种有效的技术改进方案。随着后续研究的深入和完善，这种方法有望在环境监测领域发挥更重要的作用，为环境保护工作提供更有力的技术支持。

**参考文献：**

[1] 王静，李强. 环境样品中二噁英类化合物分析方法研究进展[J]. 分析化学，2023, 51(5): 789−798.

[2] 国家环境保护总局. 环境样品中二噁英类监测技术规范[HJ 77.2−2024]. 2024.

[3] 陈晓峰等. 溶剂吸收技术在挥发性有机物监测中的应用研究[J]. 环境科学学报，2023, 43(8): 312−319.

[4] 李明等. 持久性有机污染物监测技术创新研究[J]. 环境科学研究，2023, 36(4): 1245−1252.

[5] 马洪亭等. 生活垃圾焚烧烟气中二恶英收集方法. 中国专利，201010533274.

作者简介：王晓琛（1986.01−），男，汉族，江苏省徐州市，本科，工程师，分析主管，研究方向：从事环境监测研究与化学实验分析工作。