

塑胶跑道中甲醛释放量检测方法的研究

天翼¹, 裴玉², 吴文斌³, 王琳琳², 丁军¹

(1. 无锡太湖明珠建设咨询有限公司, 江苏 无锡 214000;

2. 江苏金双和丰建设有限公司, 江苏 无锡 214000;

3. 江苏拓冠工程有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:针对塑胶跑道甲醛释放量检测的实际需求,建立气候箱采集—高效液相色谱法检测塑胶跑道中甲醛释放量的分析方法。模拟实际使用环境通过1 m³VOC环境测试舱收集样品释放甲醛,经2,4-二硝基苯肼(DNPH)衍生化后采用高效液相色谱法定量分析。该方法检出限为3.2×10⁻³ mg/m³,加标回收率95.8%~102.4%,相对标准偏差0.8%~2.1%。结果表明,该方法准确性高、精密度好、灵敏度强,适用于塑胶跑道甲醛释放量的快速可靠检测,可为相关标准制定和产品质量控制提供技术依据。

关键词:塑胶跑道;甲醛释放量;气候箱法;高效液相色谱法;衍生化

中图分类号:O657.72 文献标识码:A 文章编号:1009-8143(2026)02-0047-05

Doi:10.3969/j.issn.1009-8143.2026.02.09

Study on the Determination Method of Formaldehyde Emission from Plastic Runway Tracks

Tian Yi¹, Pei Yu², Wu Wen-bin³, Wang Lin-lin², Ding Jun¹

(1. Wuxi Taihu Mingzhu Construction Consulting Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China;

2. Jiangsu Jinshuang Hefeng Construction Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China;

3. Jiangsu Tuoguan Engineering Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: Aiming at the practical need for determining formaldehyde emission from plastic runway tracks, an analytical method using climate chamber collection coupled with high performance liquid chromatography (HPLC) was established. The formaldehyde released from samples was collected in a 1 m³ VOC environmental test chamber simulating actual usage conditions, derivatized with 2,4-dinitrophenylhydrazine (DNPH), and then quantitatively analyzed by HPLC. The detection limit of this method was 3.2×10⁻³ mg/m³, the spiked recoveries ranged from 95.8% to 102.4%, and the relative standard deviations were between 0.8% and 2.1%. The results indicate that this method has high accuracy, good precision and strong sensitivity, and is suitable for rapid and reliable determination of formaldehyde emission from plastic runway tracks, providing a technical basis for relevant standard formulation and product quality control.

Key words: plastic runway track; Formaldehyde emission; climate chamber method; High performance liquid chromatography; derivatization

引言

随着科技的发展及人们对生活品质、安全性及环境保护的追求,塑胶跑道作为具有优秀性能的运动

场地材料,在体育健身领域得到广泛应用^[1-2]。我国所用的塑胶跑道以聚氨酯塑胶跑道为主^[3-4],常使用含甲醛的胶黏剂、填料及助剂,在使用阶段会持续释放甲醛,对周边空气质量和人体健康构成潜在

收稿日期:2025-12-12

第一作者简介:天翼(1982—),男,高级工程师,研究方向:工程检测与管理。Email:13771429544@139.com

威胁。甲醛作为常见的室内空气污染物,确定为 I 类致癌物,被称为室内空气污染的“头号杀手”,甚至造成免疫系统异常,其释放量控制已成为塑胶跑道产品质量监管的核心指标^[5-7]。

目前塑胶跑道甲醛释放量的检测方法主要有干燥器法、穿孔萃取法和气候箱法^[8-9]。穿孔萃取法主要是将甲苯和被测试件实现共热,利用液体到固体的有效萃取^[10],主要测定材料中游离甲醛总量,无法反映实际使用中的释放特征;干燥器法为静态检测,操作简便但易受环境因素干扰,检测结果与实际释放情况存在偏差;气候箱法能动态模拟实际使用环境,检测结果更具代表性,是目前国际上公认的挥发性有机化合物释放量检测优选方法。检测分析分光光度法是常用的甲醛定量方法,但其抗干扰能力弱,适用于简单基质样品;高效液相色谱法经衍生化后可实现甲醛的高效分离与精准定量,基质干扰小、灵敏度高。

塑胶跑道甲醛检测相关标准中,GB 36246-2018《中小学合成材料面层运动场地》采用干燥器法检测甲醛释放量,限量值为 0.10 mg/m^3 ,但难以反映材料长期释放特性。本研究通过优化 1 m^3 气候箱采样条件,结合 2,4-二硝基苯肼(DNPH)衍生化-HPLC 分析技术,建立适用于塑胶跑道的甲醛释放量检测方法,系统验证方法的检出限、精密度和准确度,并与规定的干燥器法进行实际样品比对检测,为塑胶跑道甲醛释放量的精准检测和标准完善提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

高效液相色谱仪:配四元梯度泵、自动进样器、柱温箱、二极管阵列检测器(DAD),Agilent1260型,美国安捷伦科技有限公司。

C18反相色谱柱:250 mm×4.6 mm,粒径 $5 \mu\text{m}$,美国安捷伦科技有限公司。

VOC环境测试舱: 1 m^3 ,镜面不锈钢内胆,温度控制 $15^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}(\pm 0.5^\circ\text{C})$,相对湿度 $30\%\sim 70\%(\pm 3\%)$,空气交换率 $0.2\sim 2.0 \text{ h}^{-1}$,背景甲醛 $< 5 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^3$,VWH-1000型,睦尼试验设备(上海)有限公司。

智能恒流大气采样器:流量 0.8 L/min (误差 $\pm 2\%$),KB-6120型,青岛金仕达电子科技有限公司。

DNPH 硅胶采样管:填料为涂渍 DNPH 的硅胶,采样体积 24 L ,江苏端峰生物科技有限公司。

超声波清洗器:KQ-500DE型,昆山市超声仪器有限公司。

高速涡旋振荡器:XH-C型,上海达洛科学仪器有限公司。

有机相针头过滤器: $0.22 \mu\text{m}$,聚四氟乙烯材质,天津市津腾实验设备有限公司。

超纯水系统:Milli-Q型,西格玛奥德里奇(无锡)生化科技有限公司

皂膜流量计:GL-100B型,北京北分瑞利分析仪器(集团)有限责任公司。

恒温恒湿箱:BPS-250CL型,上海一恒科学仪器有限公司。

电热鼓风干燥箱:101-3A型,青岛路博众科环保有限公司。

甲醛标准溶液:色谱纯,编号TM60990,标准值 $1000 \mu\text{g/mL}$,相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}=2\%$,国家有色金属及电子材料分析测试中心。

2,4-二硝基苯肼(DNPH):纯度 $>99\%$,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

乙腈:色谱纯,美国Fisher公司。

无水乙醇、硝酸:均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

实验用水为Milli-Q超纯水系统制备的去离子水。

1.2 实验方法

1.2.1 样品采集与预处理

从华东、华南、华北地区采集15个不同品牌、配方的市售塑胶跑道成品样本,记录外观、厚度、颜色及生产批号。依据GB/T 14833-2020《合成材料跑道面层》取样要求,用不锈钢切割工具从样本非边缘区域截取2块 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 试件,以乙醇擦拭表面去除浮尘,置于 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $50\% \pm 10\%$ 恒温恒湿箱中平衡7天以上,直至样品质量变化率连续 24 h $< 0.1\%$ 。

1.2.2 气候箱采样程序

将平衡后的试件垂直悬挂于VOC环境测试舱中央,保证试件表面充分暴露。设定测试条件:温度 $23.0^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $50\% \pm 5\%$ 、空气交换率 $1.0 \pm 0.05 \text{ h}^{-1}$,舱内通入经活性炭和高锰酸钾净化的清洁空气,密闭运行 $72 \pm 1 \text{ h}$ 。采样前用皂膜流量计

校准大气采样器流量,在第72 h将活化后的DNPH硅胶采样管与舱体取样口连接,进气方向与舱内气流一致,以0.8 L/min流量采样30 min,总采样体积24 L。同时做空白试验,采集空测试舱的空气样品。采样后用聚四氟乙烯帽密封采样管两端,铝箔包裹避光,4℃冷藏保存,7日内完成分析。

1.2.3 样品萃取与净化

将采样管中吸附剂全部转移至10 mL棕色玻璃离心管,准确加入5.00 mL乙腈,涡旋振荡1 min,置于25℃±5℃超声波清洗器中萃取15 min。萃取液经0.22 μm聚四氟乙烯有机相针头过滤器过滤,滤液收集于2 mL带内衬管的自动进样器样品瓶中,全程避光操作。

1.2.4 对比检测方法

依据GB 36246-2018中的干燥器法,对15组塑胶跑道样品进行甲醛释放量平行检测,严格按照标准规定的样品制备、检测步骤和计算方法操作,记录检测结果。

2 结果与讨论

2.1 色谱条件优化

以甲醛-DNPH衍生物的分离度、峰形和保留时间为评价指标,系统优化流动相比、柱温、检测波长等色谱条件。考察乙腈-水体积比50:50、60:40、70:30的分离效果,当比例为60:40时,甲醛-DNPH衍生物峰形对称尖锐,无拖尾现象,且能与其他羰基化合物的DNPH衍生物实现基线分离;设置柱温25℃、30℃、35℃,结果显示30℃时色谱柱柱效最高,甲醛-DNPH衍生物保留时间稳定,无杂峰干扰;通过DAD检测器对甲醛-DNPH衍生物进行全波长扫描,发现其在360 nm波长下有最大吸收,且背景干扰最小,信噪比最优。最终确定色谱条件流动相为乙腈-水(60:40, V/V),等度洗脱,流速1.0 mL/min;色谱柱温度30℃;检测波长360 nm;进样量20 μL;保留时间6~8 min,见图1。

2.2 标准曲线建立

取1 000 μg/mL甲醛标准储备液,用乙腈稀释成0.5、1.0、2.0、5.0、8.0、10.0 μg/mL的系列标准液,各浓度点均经DNPH衍生化处理,与样品前处理步骤一致。按上述优化的色谱条件进样分析,记录各

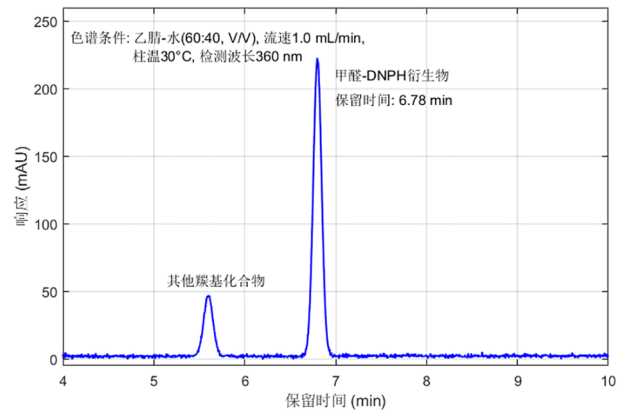


图1 甲醛-DNPH衍生物高效液相色谱图

浓度对应的色谱峰面积。以甲醛浓度(x , μg/mL)为横坐标,色谱峰面积(y)为纵坐标进行线性回归分析,得到线性回归方程为 $y=12\ 543x+86.7$,相关系数 $R^2=0.999\ 8$ 。结果表明,甲醛在0.5~10.0 μg/mL范围内峰面积与浓度呈良好的线性关系,该线性范围覆盖塑胶跑道实际样品的甲醛浓度区间,满足定量分析要求。

2.3 方法性能验证

2.3.1 检出限与定量限

对7支空白DNPH硅胶采样管按实验方法进行全程处理和色谱分析,计算空白响应值的标准偏差(S)。按公式 $MDL=t_{n-1,0.99} \times S$ 计算方法检出限,结合采样体积24 L换算为空气中甲醛浓度,得到检出限为 3.2×10^{-3} mg/m³。以4倍检出限作为定量限,得定量限为 1.28×10^{-2} mg/m³,远低于规定的0.10 mg/m³限量值,实现塑胶跑道中低水平甲醛释放量的灵敏检测。

2.3.2 精密度与准确度

设计低、中、高三个加标浓度水平进行加标回收实验,根据采样体积24 L将加标量单位由μg/管换算为mg/m³,低、中、高加标水平分别为0.041 7 mg/m³、0.125 0 mg/m³、0.250 0 mg/m³,每个水平平行测定6次。精密度以相对标准偏差(RSD)表示,准确度以加标回收率表示,结果见表1。

由表1可知,低、中、高浓度的RSD分别为2.1%、1.4%、0.8%,均小于5%,表明该方法重复性和精密度良好;平均加标回收率分别为98.2%、99.6%、101.3%,所有单个回收率在95.8%~102.4%之间,说明方法准确性高,系统误差极小,可满足塑胶跑道甲醛释放量的定量检测要求。

表1 方法精密度与加标回收率实验结果($n=6$)

加标水平	加标量 (mg/m^3)	平均测得值 (mg/m^3)	标准偏差 (mg/m^3)	RSD (%)	平均回收率 (%)
低浓度	0.041 7	0.041 0	0.000 9	2.1	98.2
中浓度	0.125 0	0.124 5	0.001 7	1.4	99.6
高浓度	0.250 0	0.253 2	0.002 0	0.8	101.3

2.4 实际样品检测与方法比对

采用建立的气候箱-HPLC法和GB 36246-2018

规定的干燥器法,对15组塑胶跑道样品进行甲醛释放量平行检测,结果见表2。

由表2可知,气候箱-HPLC法检测的甲醛释放量显著高于干燥器法,二者检测结果差异明显。15组样品中,气候箱法检测有7组样品甲醛释放量超过规范限量值($0.10 \text{ mg}/\text{m}^3$),超标率46.7%,其中1、2、3号样品释放量为限量值的9~23倍,存在较高健康风险;而干燥器法检测的所有样品甲醛释放量均低于限量值,未出现超标情况。

表2 塑胶跑道样品甲醛释放量测定结果

样品编号	类型(颜色/厚度)	气候箱-HPLC法 测定结果(mg/m^3)	干燥器法 测定结果(mg/m^3)	是否超标(≥ 0.10)
1	红色/13 mm	1.856	0.082	是(严重)
2	蓝色/10 mm	2.347	0.095	是(严重)
3	绿色/8 mm	0.943	0.078	是(严重)
4	红色/12 mm	0.622	0.065	是
5	混合/10 mm	0.451	0.058	是
6	蓝色/13 mm	0.298	0.058	是
7	绿色/10 mm	0.186	0.035	是
8	红色/8 mm	0.122	0.028	是
9	蓝色/12 mm	0.098	0.025	否(接近)
10	混合/13 mm	0.086	0.022	否
11	红色/10 mm	未检出	未检出	否
12	绿色/13 mm	未检出	未检出	否
13	蓝色/8 mm	未检出	未检出	否
14	混合/8 mm	未检出	未检出	否
15	绿色/12 mm	未检出	未检出	否

干燥器法为静态短期检测,仅能反映样品在密闭静态环境下的短期甲醛释放量,无法捕捉材料的持续释放特征;而气候箱法动态模拟实际使用环境,经72 h密闭检测,能反映样品在实际使用中的长期释放情况,检测结果更贴近真实使用场景。此外干燥器法采用分光光度法检测,抗干扰能力弱,易受塑胶跑道基质中其他成分干扰,导致检测结果偏低;而HPLC法经衍生化后分离效果好,基质干扰小,检测结果更精准。

15组样品中甲醛释放量存在显著差异,最高值(2号, $2.347 \text{ mg}/\text{m}^3$)是最低检出值(10号, $0.086 \text{ mg}/\text{m}^3$)的27倍以上,另有5组样品未检出甲醛,该差异主要与样品生产所用原材料相关,使用劣质或过量脲

醛树脂胶黏剂的样品,甲醛释放量显著偏高,而原材料和生产工艺控制较好的样品,甲醛释放量极低甚至未检出。

3 结论

本研究建立气候箱采集-高效液相色谱法检测塑胶跑道甲醛释放量,通过优化色谱条件和采样参数,实现了甲醛的高效分离与精准定量,具有灵敏度高、准确性好、精密度强的特点。与GB 36246-2018规定的干燥器法相比,气候箱-HPLC法能动态模拟塑胶跑道实际使用环境,检测结果更贴近真实释放特征,可有效避免干燥器法静态检测导致的结果偏低问题,更适合评价塑胶跑道甲醛的长期释放

风险。实际样品检测结果显示,46.7%的塑胶跑道样品甲醛释放量超标,部分样品存在严重的健康风险,表明目前塑胶跑道产品的原材料和质量控制仍需加强。

本研究建立的检测方法操作简便、结果可靠,可作为塑胶跑道甲醛释放量的精准检测手段;建议相关标准进一步完善检测方法体系,将气候箱法纳入塑胶跑道甲醛释放量的法定检测方法,同时加强原材料源头管控,完善产品质量控制体系,保障塑胶跑道的使用安全。

参考文献

- [1] 黄荣庆. 聚氨酯塑胶跑道的发展趋势浅析[J]. 聚氨酯工业, 2019, 34(03): 40-42.
- [2] 刘昌亮, 卢晶晶. 塑胶跑道的应用现状与市场发展趋势[J]. 塑料助剂, 2024, (06): 68-71+94.
- [3] 朱亮亮, 邹奎, 李丽丽, 等. 小型测试舱法测定塑胶跑道面

层甲醛释放量的不确定度分析[J]. 福建建设科技, 2025, (01): 66-70.

- [4] 刘干, 郑伟涛, 王虹. 环境温度、相对湿度、空气交换率对聚氨酯塑胶跑道TVOC释放的影响[J]. 中国体育科技, 2023, 59(03): 82-88.
- [5] 姚博伟. 高通量微孔板酚试剂法快速测定室内空气中甲醛的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2026, 62(01): 92-96.
- [6] 刘琬琪, 王菊, 徐晴晴, 等. 紫薇对甲醛和苯复合污染的生理响应和抗性评价[J/OL]. 分子植物育种, 1-14[2026-04-03].
- [7] 刘佳钧. 室内甲醛的污染源分析及防治措施建议[J]. 科技风, 2016, (10): 186.
- [8] 张彰, 蒋志浩, 卢志刚, 等. 甲醛释放量气体分析测试方法比较研究[J]. 中国人造板, 2021, 28(07): 31-34.
- [9] 吕强强, 陈剑, 黄志豪. 家具制造企业人造板甲醛干燥器法快速测定[J]. 中国检验检测, 2024, 32(06): 61-64.
- [10] 洪洋. 人造板甲醛释放量检测用穿孔萃取仪的改进[J]. 建材与装饰, 2018, (09): 41.

(上接第46页)

参考文献

- [1] Abdel-Shafy H I, Mansour M S M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation[J]. Egyptian journal of petroleum, 2016, 25(1): 107-123.
- [2] Felemban S, Vazquez P, Moore E. Future trends for in situ monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources: The role of immunosensing techniques[J]. Biosensors, 2019, 9(4): 142.
- [3] Sakshi, Singh S K, Haritash A K. Polycyclic aromatic hydrocarbons: soil pollution and remediation[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(10): 6489-6512.
- [4] Li S, Gao X, Zhu S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coal preparation plant products: A contributor to environmental pollution[J]. Science of The Total Environment, 2024, 906: 167887.
- [5] Låg M, Øvreivik J, Refsnes M, et al. Potential role of polycyclic aromatic hydrocarbons in air pollution-induced non-malignant respiratory diseases[J]. Respiratory research, 2020, 21(1): 299.
- [6] Gupta H. PAH determination in effluent and sludge samples of paper industry[J]. Environmental Technology & Innovation, 2018, 9: 115-121.

- [7] 鲍珊, 钱东坤, 付慧, 等. 液液萃取/气相色谱-串联质谱法测定人尿中16种羟基多环芳烃[J]. 分析测试学报, 2024, 43(02): 261-268.
- [8] 沙贤亮, 杨琳玲, 秦延平, 等. 地表水中24种多环芳烃的全自动固相萃取结合气相色谱-三重四极杆质谱测定法[J]. 环境与健康杂志, 2025, 42(01): 57-64.
- [9] 霍彩霞, 刘海霞, 刘芳, 等. 镍铬基体上ZIF-8复合涂层的构筑及其对环境水体中多环芳烃的微萃取性能研究[J/OL]. 分析测试学报, 1-12[2025-11-16].
- [10] 丁杭冰, 杨精存. MSPE-GCMS在工业废水多环芳烃检测的应用及预处理条件优化[J]. 化工安全与环境, 2024, 37(07): 38-42.
- [11] 武啸言, 姚林林, 李诗宇, 等. 环境中多环芳烃衍生物的检测方法及其污染现状[J]. 环境化学, 2025, 44(01): 66-84.
- [12] 吴越, 王丽, 王晓南, 等. 氨基功能化磁性纳米吸附剂固相萃取水中多环芳烃[J]. 分析化学, 2022, 50(07): 1093-1112.
- [13] 朱振宝, 赵远利, 李国梁. Fe₃O₄@COF的制备及用于食用植物油中多环芳烃的分析[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(03): 34-39+69.
- [14] Deng Z H, Wang X, Wang X L, et al. A core-shell structured magnetic covalent organic framework (type Fe₃O₄@COF) as a sorbent for solid-phase extraction of endocrine-disrupting phenols prior to their quantitation by HPLC[J]. Microchimica Acta, 2019, 186(2): 108.