



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 Effects of Ambient Temperature, Relative Humidity and Air Exchange Rate on the Release of TVOC from Polyurethane Plastic Runway

刘 干^{1,2}, 郑伟涛^{1,2}, 王 虹^{1,2*}

LIU Gan^{1,2}, ZHENG Weitao^{1,2}, WANG Hong^{1,2*}

摘 要:目的:探讨环境温度、相对湿度、空气交换率对聚氨酯(polyurethane, PU)塑胶跑道总挥发性有机化合物(total volatile organic compounds, TVOC)释放的影响。方法:采用0.1 m³环境舱进行温度23℃~60℃、相对湿度5%~65%、空气交换率0.5~1.5次/h环境条件下PU塑胶跑道TVOC的释放,并对其TVOC质量浓度(ρ_{TVOC})进行实时检测,分析不同环境条件下 ρ_{TVOC} 随时间的变化规律及其最大值($\rho_{\text{最大值}}$)、24 h值($\rho_{24\text{ h值}}$)、达到最大值的时间($t_{\text{最大值}}$)、趋于平衡的时间($t_{\text{平衡}}$)特征。结果:1)温度升高, $\rho_{\text{最大值}}$ 、 $\rho_{24\text{ h值}}$ 均稳定增大,且 $t_{\text{最大值}}$ 缩短, $t_{\text{平衡}}$ 延长。同时, $\rho_{\text{最大值}}$ 、 $\rho_{24\text{ h值}}$ 在30℃~35℃和50℃以上时增幅相对较大。2)相对湿度增大, $\rho_{\text{最大值}}$ 、 $\rho_{24\text{ h值}}$ 均逐渐增大,而相对湿度并不能显著影响 $t_{\text{最大值}}$ 、 $t_{\text{平衡}}$ 。3)空气交换率增大,PU塑胶跑道TVOC释放前期 ρ_{TVOC} 随之增大,而中、后期 ρ_{TVOC} 迅速下降,且下降速率与空气交换率成正比。同时, $t_{\text{最大值}}$ 、 $t_{\text{平衡}}$ 均随空气交换率增大逐渐缩短。结论:环境温度、相对湿度和空气交换率的增大均会在不同程度上促进PU塑胶跑道TVOC的释放,显著影响其 $\rho_{\text{最大值}}$ 、 $\rho_{24\text{ h值}}$ 和 $t_{\text{最大值}}$ 、 $t_{\text{平衡}}$,且温度对其影响显著高于空气交换率、相对湿度。

关键词:运动环境;塑胶跑道;总挥发性有机化合物;释放;影响因素

Abstract: Objective: To determine the effects of ambient temperature, relative humidity, and air exchange rate on the total volatile organic compounds (TVOC) released from polyurethane (PU) plastic runways. Methods: A 0.1 m³ environmental chamber is used for the release of TVOC from the PU plastic runway at a temperature of 23℃ to 60℃, a relative humidity of 5% to 65%, and an air exchange rate of 0.5 to 1.5 times/h. The real-time detection of its TVOC mass concentration is conducted and the variation of ρ_{TVOC} released by PU plastic track with time and the characteristics of the maximum value of ρ_{TVOC} (ρ_{max}), the 24 h value of ρ_{TVOC} ($\rho_{24\text{ h}}$), the time to reach the maximum value (t_{max}), the time to balance (t_{balance}) are analyzed. Results: 1) When the ambient temperature rises, ρ_{max} and $\rho_{24\text{ h}}$ increase steadily, and the t_{max} decreases, the t_{balance} increases. At the same time, the increase amplitude of ρ_{max} and $\rho_{24\text{ h}}$ are relatively large when the temperature at 30℃ to 35℃ and above 50℃. 2) As the relative humidity increases, ρ_{max} and $\rho_{24\text{ h}}$ gradually increase. And the relative humidity cannot significantly affect t_{max} and t_{balance} . 3) As the air exchange rate increases, the ρ_{TVOC} increases in the early stage, and drops rapidly in the middle and late stages. And the rate of decline is also proportional to the air exchange rate. At the same time, the t_{max} and t_{balance} are gradually shortened as the air exchange rate increases. Conclusions: The increase of ambient temperature, relative humidity and air exchange rate will promote the release of TVOC from PU plastic runway to varying degrees, and significantly affect ρ_{max} , $\rho_{24\text{ h}}$, t_{max} and t_{balance} of ρ_{TVOC} . The influence of temperature on TVOC releases from PU plastic runways is significantly higher than air exchange rate and relative humidity.

Keywords: sports environment; plastic runways; total volatile organic compounds; release; influence factors

中图分类号:G818.1 **文献标识码:**A

基金项目:

中国博士后科学基金项目(2022M722491);湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20214102);湖北省教育厅哲学社会科学研究重点项目(21D088);湖北省科技创新创业服务能力建设专项(2019BFC588);国家体育总局全民健身研究领域一般资助项目(2015B066);武汉体育学院中青年科研团队资助项目(21KT17);武汉体育学院“东湖学子”计划资助项目

第一作者简介:

刘干(1988-),男,讲师,博士,主要研究方向为体育工程学,E-mail: liugan7110@163.com。

*通信作者简介:

王虹(1981-),女,副教授,博士,主要研究方向为体育工程学,E-mail: wanghong_1@whsu.edu.cn。

作者单位:

1. 武汉体育学院,湖北武汉430079;
2. 湖北省运动装备工程技术研究中心,湖北武汉430079
1. Wuhan Sports University, Wuhan 430079, China;
2. Hubei Sports Equipment Engineering Technology Research Center, Wuhan 430079, China.

目前,我国所铺设的塑胶跑道主要为聚氨酯(polyurethane, PU)塑胶跑道,其铺面材料主要由 PU 预聚体、PU 橡胶颗粒或三元乙丙(ethylene propylene diene monomer, EPDM)橡胶颗粒、稀释剂等多种物质组成。原材料的多样性,导致其在高温、高湿等环境条件下容易释放总挥发性有机化合物(total volatile organic compounds, TVOC)(刘干等, 2018; Wang et al., 2017)。人们在塑胶跑道上运动时,塑胶跑道释放的 TVOC 会通过呼吸、皮肤接触等途径进入人体,刺激和危害呼吸道、皮肤、眼睛等(Annesi-Maessano et al., 2012; Weislo et al., 2016)。此外,塑胶跑道置于室外,环境温度、相对湿度(relative humidity, RH)、空气交换率等也会改变塑胶跑道 TVOC 扩散系数(Audrey et al., 2016; Wei et al., 2014)、分离系数(Lin et al., 2009)、吸附特性(Zhao et al., 2016)以及释放速率(Wal et al., 2010)等,致使其并不能一直处于稳定状态。

TVOC 释放量是评价环境空气质量的重要指标。近年来,国内外学者开展了塑胶跑道 TVOC 组成成分(Wang et al., 2017)、质量浓度(刘干等, 2018)以及释放速率(杨然存等, 2018)等检测方法的建立研究,但是环境温度、相对湿度、空气交换率等对塑胶跑道 TVOC 释放的影响尚不清楚,也鲜见相关研究报道。

环境测试舱法能够模拟环境温度、相对湿度、空气交换率等材料 TVOC 的释放条件(Athanasios et al., 2008)。光离子化检测技术(photo ionization detector, PID)适用于多种环境中 TVOC 质量浓度的连续实时检测,灵敏度高(Zhang et al., 2017)。本研究以 PU 塑胶跑道为研究对象,采用 0.1 m^3 环境舱进行其在不同环境温度、相对湿度、空气交换率等条件下的 TVOC 的释放,并以 TVOC 气体检测仪(PID 检测器)对其 TVOC 质量浓度(ρ_{TVOC})进行检测,探究环境温度、相对湿度、空气交换率等对 PU 塑胶跑道 TVOC 释放的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

PU 塑胶跑道(符合 GB 36246—2018《中小学合成材料面层运动场地》理化性能要求,武汉睿天新材料科技有限公司),其底层为双组份 PU 主剂与 EPDM 橡胶颗粒(粒径为 $2 \sim 3 \text{ mm}$,含胶量为 15%)按质量比 3:1 均匀混合,厚度为 $(10 \pm 1) \text{ mm}$;面层为双组份 PU 主剂与 EPDM 橡胶颗粒(粒径为 $1 \sim 2 \text{ mm}$,含胶量为 20%)按质量比 1:1 均匀混合,且每 2 kg PU 面层胶浆中加入 40 g 稀释剂(石油氨基酯级,主要成分包括正丁醇、丙酮、苯、二甲苯、苯乙烯等),厚度为 $(3 \pm 1) \text{ mm}$ (杜琼, 2016)。将制作的 PU 塑胶跑道(图 1)置于室外 20 天至完全成型,以聚四氟乙烯薄膜密封包装,于 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的室内环境下保存。

测试前 24 h,取出 PU 塑胶跑道样块,从距样块边缘

50 mm 处截取 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,并用铝箔包覆人为切割表面及底面,保证其裸露面积为 0.04 m^2 (图 2)。制备好的样块置于 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、 $(50 \pm 10)\% \text{ RH}$ 的纯净环境中预平衡 $(24 \pm 1) \text{ h}$,然后进行测试。



图 1 PU 塑胶跑道样块

Figure 1. PU Plastic Runway Sample Block



图 2 铝箔包覆后的 PU 塑胶跑道样块

Figure 2. PU Plastic Runway Sample Block Covered with Aluminum Foil

1.2 实验方法

1) 仪器预处理。QP21 H4L100 TVOC 释放环境舱(容积为 0.1 m^3 ,上海秦沛环保科技有限公司)的预处理:依次采用碱性清洗剂($\text{pH} \geq 7.5$,沪试)和去离子水(电导率为 $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$,沪试)擦洗环境舱内壁表面,风干舱体后空载运行以使舱壁表面化学物质充分解析并排出,当舱内 TVOC 背景浓度 $\leq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$,其他单一污染物背景浓度 $\leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 后,进行 PU 塑胶跑道 TVOC 的释放(中华人民共和国教育部, 2018)。

ppbRAE 3000 TVOC 气体检测仪(PID 检测器,紫外灯能量为 10.6 eV ,美国 RAE 公司)的预处理:分别采用高纯氮气和 10 ppm 异丁烯对其进行零点标定和扩展标定,检测仪采样流量为 $500 \text{ mL}/\text{min}$,采样泵占空比为 100%。

2) 调节环境舱内置风扇转速,使 PU 塑胶跑道表面气体流速稳定在 $(0.20 \pm 0.05) \text{ m/s}$,保证舱内气体混合均匀。

3) 设置环境舱舱内温度、相对湿度、空气交换率,空载运行至预定值并稳定 1 h 后,将 PU 塑胶跑道样块放入舱内中心位置,迅速关闭舱门进行其 TVOC 释放。以样块放入环境舱内的时刻为 0 时刻。

4) 采用硅胶管连接环境舱采气口与 TVOC 气体检测仪进气口,待检测仪读数稳定后,记录 ρ_{TVOC} 。

5) 整个测试持续 24 h。在测试的前 3 h,每隔 0.5 h 记录一次 ρ_{TVOC} ; 3~8 h,每隔 1 h 记录一次; 8~16 h,每隔 2 h 记录一次; 16~24 h,每隔 4 h 记录一次。

1.3 实验工况

PU 塑胶跑道长期暴露于室外,其表面温度可达 60℃ (Gustin et al., 2018; Twomey et al., 2014),结合预平衡温度 (23±2)℃,确定具体实验工况(表 1):TVOC 释放的环境温度为 23℃~60℃。结合各环境温度下的实际相对湿度,设置相对湿度变化范围。设置空气交换率变化范围为 0.5~1.5 次/h。

1.4 实验方法的精密度与可重复性

选取 3 组实验工况,每组工况进行 3 次重复试验,以 ρ_{TVOC} 的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)确定 PU 塑胶跑道 TVOC 检测方法的精密度和可重复性(表 2)。

$$RSD = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\rho x_i - \rho \bar{x})^2}}{\rho \bar{x}} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, n 为测试次数,无量纲; ρx_i 为第 i 次测试的 $\rho_{TVOC}/\mu g \cdot m^{-3}$; $\rho \bar{x}$ 为 n 次测试的 ρ_{TVOC} 平均值/ $\mu g \cdot m^{-3}$ 。

表 1 实验工况表
Table 1 Experimental Parameter

测试组别	温度/℃	相对湿度/%	空气交换率/(次·h ⁻¹)
A	23/30/35/40	45	1.0
B	45/50/55/60	20	1.0
C	30	45/55/65	1.0
D	40	25/35/45	1.0
E	50	15/20/25	1.0
F	60	5/10/20	1.0
G	30/40	45	0.5/1.0/1.5
H	50/60	20	0.5/1.0/1.5

表 2 不同实验工况下,重复试验的 ρ_{TVOC} 相对标准偏差
Table 2 RSD Value of ρ_{TVOC} of Repeated Tests under Different Experimental Conditions

实验工况	RSD/%																
	0.5 h	1.0 h	1.5 h	2.0 h	2.5 h	3.0 h	4.0 h	5.0 h	6.0 h	7.0 h	8.0 h	10.0 h	12.0 h	14.0 h	16.0 h	20.0 h	24.0 h
30 ℃、45%RH、 1.5 次·h ⁻¹	2.40	3.77	4.47	2.25	1.02	1.25	1.60	1.53	1.27	1.32	1.24	1.32	1.02	1.46	1.52	1.32	1.30
40 ℃、45%RH、 0.5 次·h ⁻¹	3.01	4.67	2.54	2.07	2.54	1.51	2.41	1.17	1.09	1.16	1.59	1.46	1.19	1.63	2.08	1.93	0.69
55 ℃、20%RH、 1.0 次·h ⁻¹	4.17	4.83	4.47	2.13	2.87	2.76	2.04	2.90	2.73	1.74	3.00	2.04	2.21	2.31	1.92	2.50	2.80

从 3 组实验工况的重复试验来看,所有重复试验的 ρ_{TVOC} RSD 均小于 5%。同时,不同工况下重复试验的 ρ_{TVOC} 随时间的变化趋势基本一致,且 ρ_{TVOC} 的最大值($\rho_{最大值}$)、24 h 值($\rho_{24 h 值}$)以及达到最大值的时间($t_{最大值}$)、趋于平衡的时间($t_{平衡}$)均基本一致。结果表明,重复试验的 ρ_{TVOC} 能够稳定维持在实验允许的误差范围内,所建 PU 塑胶跑道 TVOC 释放及检测方法的精密度较高,整体实验流程可重复性良好。

2 研究结果

2.1 不同温度下 PU 塑胶跑道 ρ_{TVOC}

设置空气交换率为 1 次/h,在常温 23℃~40℃、45%RH 和高温 45℃~60℃、20%RH 时,从 ρ_{TVOC} 的总体变化趋势来看,其在释放前期随时间变化显著,先迅速上升,达到 $\rho_{最大值}$ 后又以一定的速率下降,并最终趋于动态平衡(图 3),即 PU 塑胶跑道释放的 ρ_{TVOC} 与纯净空气循环所带走的 ρ_{TVOC} 基本相等。同时,温度升高, $\rho_{最大值}$ 、 $\rho_{24 h 值}$ 均稳定增大,且 $t_{最大值}$ 缩短, $t_{平衡}$ 延长。此外, $\rho_{最大值}$ 、 $\rho_{24 h 值}$ 在 30℃~35℃ 以及 50℃ 以上时增幅相对较大(表 3)。

2.2 不同相对湿度下 PU 塑胶跑道 ρ_{TVOC}

设置空气交换率为 1 次/h, 30℃、40℃、50℃、60℃ 时,相对湿度的改变并不会改变 ρ_{TVOC} 的变化趋势(图 4),

且同一温度下, $t_{最大值}$ 、 $t_{平衡}$ 也未见显著变化(表 4)。同时,相对湿度增大, $\rho_{最大值}$ 、 $\rho_{24 h 值}$ 均逐渐增大,但其增幅明显小于温度对其的影响,且常温段时 $\rho_{最大值}$ 、 $\rho_{24 h 值}$ 增幅逐渐平缓,高温段时 $\rho_{最大值}$ 增幅也逐渐平缓,但 $\rho_{24 h 值}$ 增幅无明显变化。

2.3 不同空气交换率下 PU 塑胶跑道 ρ_{TVOC}

常温 30℃/40℃、45%RH 和高温 50℃/60℃、20%RH 时,在 PU 塑胶跑道 TVOC 释放的前期, ρ_{TVOC} 随空气交换率的增大而增大,且这种趋势在 40℃ 以上较为显著,而 30℃ 时,仍是 0.5 次/h 时的 ρ_{TVOC} 最大;在释放的中期,即 ρ_{TVOC} 达到最大值后,空气交换率增大, ρ_{TVOC} 迅速下降,且下降速率与空气交换率成正比;在释放的后期, ρ_{TVOC} 逐渐趋于平衡,且空气交换率增大,趋于平衡的浓度值减小(图 5)。同时,空气交换率增大, $t_{最大值}$ 、 $t_{平衡}$ 均逐渐缩短, $\rho_{最大值}$ 在常温段下降,高温段上升, $\rho_{24 h 值}$ 均减小,但高温段时 $\rho_{24 h 值}$ 减小的幅度高于低温段(表 5)。

3 分析与讨论

3.1 环境温度对 PU 塑胶跑道 TVOC 释放的影响

环境温度的改变引起 TVOC 分子热运动及蒸气压改变,影响材料对 TVOC 分子的吸附能力和吸附容量,导致 ρ_{TVOC} 的变化。本研究表明,温度升高能稳定促进 PU 塑胶

跑道 TVOC 的释放(图 3)。An 等(2007)认为,温度升高,材料内部 TVOC 分子热运动增强,对 TVOC 分子的吸附能力和吸附容量降低,TVOC 大量释放, ρ_{TVOC} 增大。Verhey-

en 等(2017)发现,温度升高,材料 TVOC 的蒸气压增大,促进了 TVOC 释放, ρ_{TVOC} 增大。

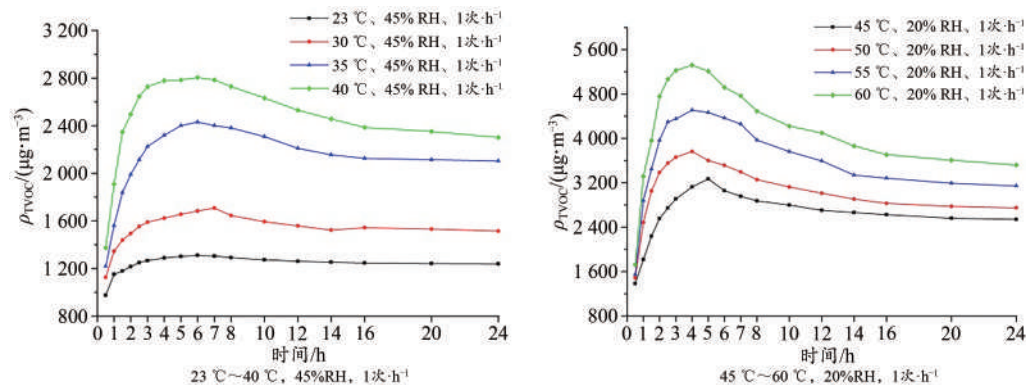


图 3 不同温度下, ρ_{TVOC} 随时间的变化趋势图
Figure 3. The Change Trend of ρ_{TVOC} over Time at Different Temperatures

表 3 不同温度下, ρ_{TVOC} 的关键值及时间节点

Table 3 The Key Value and Time Node of ρ_{TVOC} at Different Temperatures

温度/℃	相对湿度/%	空气交换率/(次·h ⁻¹)	$\rho_{\text{最大值}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$t_{\text{最大值}}/\text{h}$	$\rho_{24\text{h值}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$t_{\text{平衡}}/\text{h}$
23	45	1	1 311	6	1 240	12
30			1 709	7	1 515	14
35			2 430	6	2 103	16
40			2 806	6	2 301	16
45	20	1	3 268	5	2 541	16
50			3 766	4	2 748	16
55			4 509	4	3 143	18
60			5 319	4	3 519	20

表 4 不同相对湿度下, ρ_{TVOC} 的关键值及时间节点

Table 4 The Key Value and Time Node of ρ_{TVOC} at Different Relative Humidity

温度/℃	相对湿度/%	空气交换率/(次·h ⁻¹)	$\rho_{\text{最大值}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$t_{\text{最大值}}/\text{h}$	$\rho_{24\text{h值}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$t_{\text{平衡}}/\text{h}$
30	45	1	1 709	7	1 515	14
	55		1 899	6	1 667	16
	65		1 981	6	1 736	16
40	25	1	2 686	5	2 197	16
	35		2 809	6	2 266	16
	45		2 806	6	2 301	16
50	15	1	3 644	4	2 708	16
	20		3 766	4	2 748	16
	25		3 836	4	2 796	16
60	5	1	5 020	4	3 334	18
	10		5 220	4	3 424	18
	20		5 319	4	3 519	20

散系数与环境温度之间存在指数关系。Yang 等(1998)通过模拟不同温度下 TVOC 的释放认为,其扩散系数与环境温度之间遵循 Arrhenius 方程:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \tag{2}$$

式(2)中, k 为一定温度 T 时的反应速率常数; R 为摩尔气体常量/($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); T 为绝对温度/K, $T=(t^{\circ}\text{C}+273.10)$; E_a 为扩散活化能, 可视为与 T 无关的常数/($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$); A 为指前因子。

表 5 不同空气交换率下, ρ_{TVOC} 的关键值及时间节点

Table 5 The Key Value and Time Node of ρ_{TVOC} at Different Air Exchange Rates

温度/℃	相对湿度/%	空气交换率/(次·h ⁻¹)	$\rho_{\text{最大值}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$t_{\text{最大值}}/\text{h}$	$\rho_{24\text{h值}}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	$t_{\text{平衡}}/\text{h}$
30	45	0.5	1 928	10.0	1 787	16
		1.0	1 709	7.0	1 515	14
		1.5	1 614	5.0	1 390	12
40	45	0.5	2 990	6.0	2 575	20
		1.0	2 806	6.0	2 301	16
		1.5	2 902	4.0	2 192	16
50	20	0.5	3 734	6.0	2 946	20
		1.0	3 766	4.0	2 748	16
		1.5	3 762	2.5	2 592	16
60	20	0.5	5 227	6.0	3 855	22
		1.0	5 319	4.0	3 519	20
		1.5	5 335	2.5	3 307	16

由于 T 是 Arrhenius 方程的指数项, 环境温度升高, ρ_{TVOC} 的增加速率和下降速率显著增大, 且 PU 塑胶跑道 TVOC 的释放与其扩散系数也表现出一定的指数相关性。

此外, 环境温度对 PU 塑胶跑道 TVOC 释放前期的影响更为显著, 且在较大程度上影响了 $t_{\text{最大值}}$ 、 $t_{\text{平衡}}$, 这与 Wal 等(2010)对“湿”涂层材料释放特性的研究结果一致。

本研究显示, ρ_{TVOC} 的增加速率或下降速率均随着温度升高而增大(图 3)。Wei 等(2014)研究发现, TVOC 扩

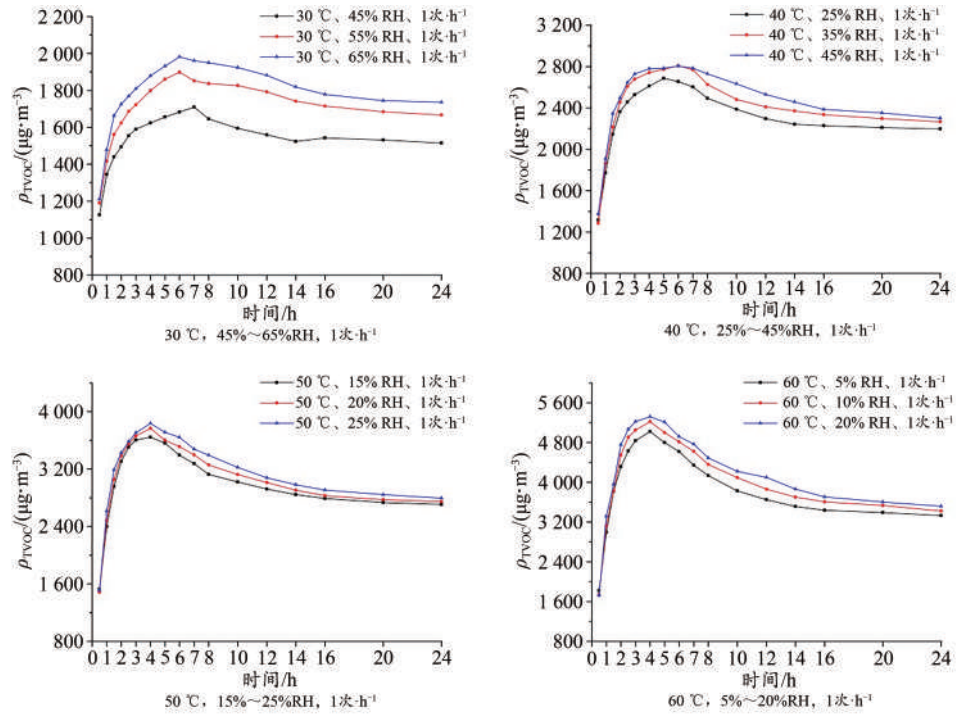

 图4 不同相对湿度下, ρ_{TVOC} 随时间的变化趋势图

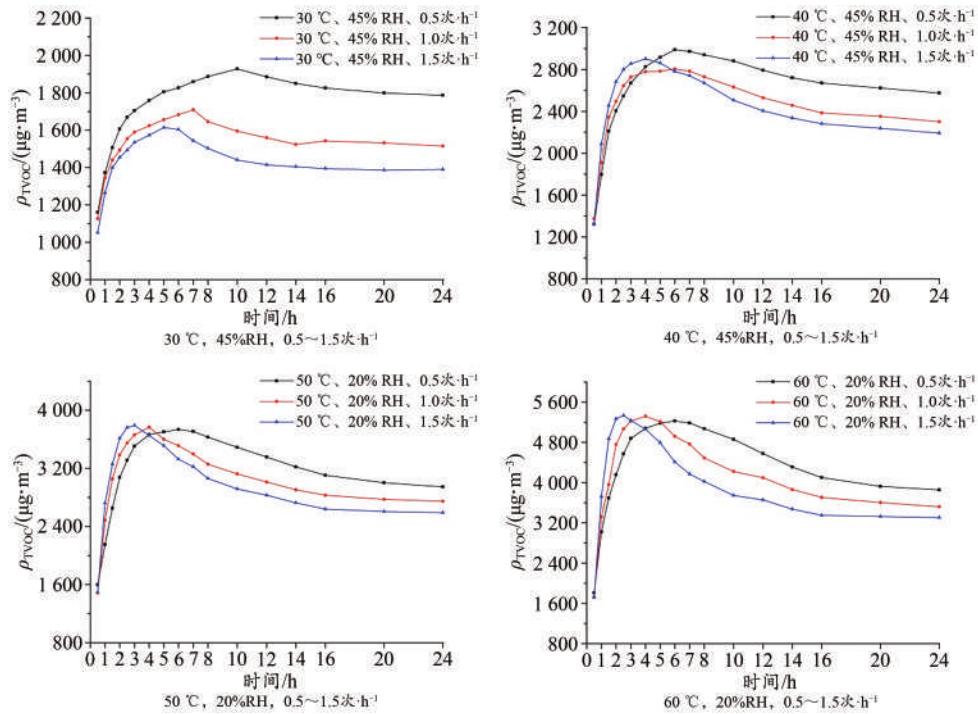
 Figure 4. The Change Trend of ρ_{TVOC} over Time at Different Relative Humidity

 图5 不同空气交换率下, ρ_{TVOC} 随时间的变化趋势图

 Figure 5. The Change Trend of ρ_{TVOC} over Time at Different Air Exchange Rates

PU 塑胶跑道 TVOC 的活跃度在 30 °C ~ 35 °C 和 50 °C 以上时显著增强(表 3)。以往研究发现,不同的温度范围或节点,材料 TVOC 释放的活跃度并不一致,呈现出较大的 ρ_{TVOC} 波动(黄丽,2018)。对于 PU 塑胶跑道而言,未来的研究可着重关注 30 °C ~ 35 °C 和 50 °C 以上时 ρ_{TVOC} 的变化趋势及机制。

3.2 环境相对湿度对 PU 塑胶跑道 TVOC 释放的影响

环境相对湿度的变化改变了空气中的水蒸气压及其与材料内部的水蒸气压梯度,也影响了材料 TVOC 的吸附特性,导致 ρ_{TVOC} 不断改变。本研究表明,相对湿度增大能促进 PU 塑胶跑道 TVOC 的释放(图 4,表 4)。相关研究已证实,TVOC 的释放量与相对湿度成正比(朱海欧等,

2013; Jo et al., 2009)。在 PU 塑胶跑道 TVOC 释放过程中,相对湿度增大使得水蒸气压升高,大部分不与水蒸气发生化学反应的 TVOC 扩散系数增大,促进 TVOC 释放。同时,环境水蒸气压的升高降低了外部环境与塑胶跑道内部之间的水蒸气压梯度,水蒸气蒸发变慢使其对 TVOC 释放的阻碍作用变小,有利于 TVOC 释放。

材料 TVOC 的释放也与其多孔性质和吸附特性密切相关 (Parthasarathy et al., 2011; Zhao et al., 2016)。PU 塑胶跑道作为一种典型的多孔材料,其上吸附的亲水性和疏水性单元都会占据一定的孔隙空间。相对湿度增大,水蒸气蒸发变慢,水分子占据的孔隙空间变大,TVOC 占据的孔隙空间变小,更多的 TVOC 向外逸出, ρ_{TVOC} 增大。

本研究显示,环境相对湿度对 PU 塑胶跑道 TVOC 释放的促进作用显著小于温度 (图 3、图 4),这与 Lin 等 (2009)、郑允玲等 (2015) 对胶合板的研究结果一致。此外,在不同的温度范围内, $\rho_{24\text{h值}}$ 增幅受相对湿度影响的程度并不一致,且温度较低,相对湿度对其释放的促进作用较为明显,而温度升高,高温对其的促进作用远大于相对湿度。同时,本研究还表明,相对湿度并不是改变 PU 塑胶跑道 TVOC 释放趋势以及主要释放阶段节点的主要因素 (图 4)。

环境温度相同,相对湿度由低向高变化, ρ_{TVOC} 的增加速率逐渐变小 (图 3),表明相对湿度增加,其对 PU 塑胶跑道 TVOC 释放的促进作用逐渐降低。

3.3 环境空气交换率对 PU 塑胶跑道 TVOC 释放的影响

环境空气交换率的改变引起了材料与舱内空气流动处边界层 TVOC 浓度梯度的变化,也影响了材料 TVOC 的扩散系数及吸附效应,导致 ρ_{TVOC} 的变化。本研究表明,空气交换率增大能够促进 PU 塑胶跑道 TVOC 的释放 (图 5)。但在 30 °C 时,TVOC 释放量较少,促进作用有限, ρ_{TVOC} 主要以累积为主,从而使 30 °C 时仍是 0.5 次/h 时的 ρ_{TVOC} 最大。

Audrey 等 (2016) 认为,空气交换率是影响材料 TVOC 吸附效应的关键因素。Chang 等 (2011)、Xiong 等 (2013) 认为,材料 TVOC 的扩散受材料与空气流动处边界层 TVOC 浓度梯度控制,其遵循菲克第二定律:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

式 (3) 中, C 为扩散物质的体积浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); t 为扩散时间/s; x 为扩散方向上的有效线性距离/m; D 为扩散物质在材料内的扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),近似于恒量。

当边界层浓度梯度 $\frac{\partial C}{\partial x}$ 变大时, $\frac{\partial C}{\partial t}$ 也变大,从而使 PU 塑胶跑道中的 TVOC 分子由高浓度一侧向低浓度一侧加速释放, ρ_{TVOC} 快速增加。

本研究中,在释放的前期 PU 塑胶跑道 TVOC 快速释放后,空气交换率增大导致进入环境舱内纯净空气的体积增加,纯净空气带走的 TVOC 大于因浓度梯度变化加

速释放的 TVOC, ρ_{TVOC} 下降。同时,边界层浓度梯度减小,TVOC 释放减弱。因此,在释放的中期,空气交换率增大导致 ρ_{TVOC} 快速下降,且下降速率与空气交换率成正比。此外,在长期释放过程中,空气交换率与 ρ_{TVOC} 的平衡值呈显著的负相关,这与 Liu 等 (2010)、赵杨等 (2015) 对材料 TVOC 长期释放的研究结果一致。

不同温度范围内, $\rho_{\text{最大值}}$ 、 $\rho_{24\text{h值}}$ 随空气交换率的变化规律并不一致 (表 5)。以往研究发现,环境温度对材料 TVOC 释放的影响程度最大 (Lin et al., 2009)。而本研究中,随着环境温度的增加,其对 ρ_{TVOC} 的影响也逐渐超过了空气交换率。

4 结论与展望

环境温度、相对湿度和空气交换率的增大均会在不同程度上促进 PU 塑胶跑道 TVOC 的释放,显著影响其 $\rho_{\text{最大值}}$ 、 $\rho_{24\text{h值}}$ 和 $t_{\text{最大值}}$ 、 $t_{\text{平衡}}$,且环境温度对其影响显著高于空气交换率、相对湿度。加强塑胶跑道服役过程中 ρ_{TVOC} 的实时检测,尤其是在恶劣、极端天气情况下,可有效避免塑胶跑道 TVOC 对人体健康的影响。未来,研究可进一步扩大挥发性有害物质种类及环境影响因素,以优化运动场地挥发性有害物质的指标体系及限值,助力健康运动环境的构建。

参考文献:

- 杜琼, 2016. 塑胶跑道运动场跑道材料合成与铺设施工[J]. 建筑工程技术与设计, (22): 1204.
- 黄丽, 梁卫辉, 秦孟昊, 2018. 温度对木器漆甲醛与可挥发性有机化合物 (VOCs) 散发的影响[J]. 建筑科学, 34(8): 71-76, 88.
- 刘干, 郑伟涛, 王虹, 2018. 小型环境舱-气相色谱-质谱法定性和定量分析塑胶跑道释放的挥发性有机化合物[J]. 理化检验 (化学分册), 54(3): 249-254.
- 杨然存, 徐鹏, 王伟科, 等, 2018. 环境测试舱-热脱附-气相色谱法测定跑道面层材料的总挥发性有机化合物的释放速率[J]. 理化检验 (化学分册), 54(7): 752-756.
- 赵杨, 沈隽, 崔晓磊, 2015. 3 层实木复合地板 VOC 释放及快速检测[J]. 林业科学, 51(2): 99-104.
- 郑允玲, 赵杨, 朱美潼, 等, 2015. 胶合板 VOC 释放特征及规律的快速检测方法[J]. 东北林业大学学报, 43(6): 120-123.
- 中华人民共和国教育部, 2018. 中小学合成材料面层运动场地: GB 36246—2018[S]. 北京: 中国标准出版社.
- 朱海欧, 阙泽利, 卢志刚, 等, 2013. 测试条件对竹地板挥发性有机化合物释放的影响[J]. 木材工业, 27(3): 13-17.
- AN J Y, KIM J A, KIM K W, et al., 2007. The effect of temperature for VOCs, formaldehyde emission from particleboards using VOC analyzer[C]. 2007 Beijing International Bonding Technology Symposium & 2nd Asian Conference on Adhesion. Beijing, China: 252-254.
- ANNESI-MAESANO I, HULIN M, LAVAUD F, et al., 2012. Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary schoolchildren of the French 6 Cities Study[J]. Thorax, 67(8): 682-688.

- ATHANASIOS K, PAOLO L, DIMITRIOS K, 2008. VOC and carbonyl emissions from carpets: A comparative study using four types of environmental chambers[J]. *J Hazard Mater*, 152(2): 669-676.
- AUDREY M, DAPHNE B, BRICE T R, et al., 2016. Measurements of VOC/SVOC emission factors from burning incenses in an environmental test chamber: Influence of temperature, relative humidity, and air exchange rate[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 23(7): 6300-6311.
- CHANG Y M, HU W H, FANG W B, et al., 2011. A study on dynamic volatile organic compound emission characterization of water-based paints[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 61(1): 35-45.
- GUSTIN M, FLEMING P R, ALLINSON D, et al., 2018. Modelling surface temperatures on 3G artificial turf[C]//The 12th Conference of the International Sports Engineering Association. Brisbane, Australia: MDPI Proceedings, doi: 10.3390/proceedings2060279.
- JO W J, SOHN J Y, 2009. The effect of environmental and structural factors on indoor air quality of apartments in Korea[J]. *Build Environ*, 44(9): 1794-1802.
- LIN C C, YU K P, ZHAO P, et al., 2009. Evaluation of impact factors on VOC emissions and concentrations from wooden flooring based on chamber tests[J]. *Build Environ*, 44(3): 525-533.
- LIU Z J, LI A G, WANG Z C, et al., 2010. Computational fluid dynamics simulation of formaldehyde emission characteristics and its experimental validation in environment chamber[J]. *J Chongqing Univ (English Edition)*, 9(3): 124-132.
- PARTHASARATHY S, MADDALENA R L, RUSSELL M L, et al., 2011. Effect of temperature and humidity on formaldehyde emissions in temporary housing units[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 61(6): 689-695.
- TWOMEY D, PETRASS L, HARVEY J, et al., 2014. Heat experienced on synthetic turf surfaces: An inevitable or preventable risk?[J]. *J Sci Med Sport*, 18(Suppl 1): E119-E120.
- VERHEYEN T V, REYNOLDS A J, 2017. Yallourn brown coal: The effect of drying conditions on its VOC emissions[J]. *Fuel Process Technol*, 155(1): 88-96.
- WAL J F, MOONS A M M, CORNELISSEN H J M, 2010. Indoor air quality in renovated Dutch homes[J]. *Indoor Air*, 1(4): 621-633.
- WANG H, LIU G, ZHENG W T, et al., 2017. Research of national standards and experiment's verification of harmful substances in polyurethane plastic runway[C]. 2017 2nd International Conference on Environmental Science and Engineering. Xiamen, China: DEStech Publications: 141-144.
- WEI W J, XIONG J Y, ZHANG Y P, 2014. Temperature impact on the emissions from VOC and formaldehyde reference sources[C]//8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning. Lecture Notes in Electrical Engineering, 261: 389-394.
- WCISLO E, BRONDER J, BNBK A, et al., 2016. Human health risk assessment in restoring safe and productive use of abandoned contaminated sites[J]. *Environ Int*, 94: 436-448.
- XIONG J Y, WANG L X, BAI Y H, et al., 2013. Measuring the characteristic parameters of VOC emission from paints[J]. *Build Environ*, 66: 65-71.
- YANG X D, CHEN Q, BLUYSSSEN P M, 1998. Prediction of short-term and long-term VOC emissions from SBR bitumen-backed carpet under different temperatures[J]. *ASHRAE Transactions*, 104(2): 1297-1308.
- ZHANG W Q, LI H, ZHANG Y J, et al., 2017. Fast determination of monocyclic aromatic hydrocarbons in ambient air using a portable gas chromatography-photo ionization detector [J]. *Chromatographia*, 80(8): 1233-1247.
- ZHAO P, CHENG Y H, LIN C C, et al., 2016. Effect of resin content and substrate on the emission of BTEX and carbonyls from low-VOC water-based wall paint[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 23(4): 3799-3808.

(收稿日期: 2020-12-18; 修订日期: 2022-11-06; 编辑: 尹航)

