

SH 抑尘剂固化建设场地类型土的抗风蚀性能

李敏^{1,2}, 柴寿喜³, 杜红普⁴, 王宸¹, 石茜³

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;

3. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384; 4. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401)

摘要: [目的] 评价 SH 固化建设场地类型土的抑尘效果及其在建设场地中的适用性, 为合理有效控制建设场地扬尘问题提供方法依据。[方法] 以高分子材料——SH 抑尘剂为研究对象, 考虑建设场地扬尘来源(即建设场地类型土)、喷洒量、坡度、坡面形态、固化时间及堆土密度等因素, 借助 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 指标评价 SH 抑尘剂在仅固化建设场地类型土表层条件下的抗风蚀性能及其在建设场地的适用性。[结果] SH 抑尘剂可在土样颗粒间发挥联接作用, 维持土体表面的完整性, 有效解决洒水抑尘措施存在的缩裂问题; SH 对于建设场地类型土(粉土、粉煤灰、黏性土、碎石土)均具有很好的抑尘效果, 喷洒 SH 抑尘剂后, 固化土在九级风力的吹蚀作用下不会造成 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染物; SH 抑尘剂对于建筑堆土、建筑弃土及裸露地表均具有适用性, 坡度、堆土密度、坡面形态不影响 SH 抑尘剂的渗透固化效果。从抑尘效果和施工经济角度考虑, 建议施工时选取 SH 抑尘剂喷量 1.2 kg/m², 固化时间 3 d。[结论] SH 抑尘剂可在土体表层形成抗风蚀性保护膜, 实现从源头控制建设场地扬尘。

关键词: 抑尘; 建设场地扬尘; PM₁₀ 和 PM_{2.5}; 抗风蚀性能; SH 抑尘剂

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0185-06

中图分类号: X50

文献参数: 李敏, 柴寿喜, 杜红普, 等. SH 抑尘剂固化建设场地类型土的抗风蚀性能[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 185-190. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.036

Wind Erosion Control of Soil Solidified by SH Dust-depressor in Construction Site

LI Min^{1,2}, CHAI Shouxi³, DU Hongpu⁴, WANG Chen¹, SHI Qian³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401,

China; 2. Hebei Research Center of Civil Engineering Technology, Tianjin 300401, China;

3. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

4. School of Energy and Environment Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: [Objective] Construction dust is one of the sources of urban air pollution, which discharges at low height and always concentrates in dense population area. [Methods] High polymer materials of SH dust-depressor was chosen as media, and factors of construction dust source(also construction soils), application amount, slope gradient, slope shape, solidified time and density were considered. The controlling effect and applicability were evaluated by PM₁₀ and PM_{2.5}. [Results] SH dust-depressor plays a role of connection between soil particles and then restrains effectively soil shrinkage crack. The soil surface maintains integrity after solidified with SH dust-depressor. SH dust-depressor has good dust controlling effect on construction dust source(such as silt, fly ash, clay and gravel soil). There had not been any outputs of PM₁₀ and PM_{2.5} during nine-level wind erosion. SH dust-depressor has good applicability to soils in construction site. The permeation and solidification of SH was never affected by soil slope, density and surface roughness. In view of dust control and economic application, the appropriate sprayed amount should be set at 1.2 kg/m² and the solidification duration should be 3 d. [Conclusion] SH solidified measure can form protective film against wind erosion and then control dust from the source.

Keywords: dust control; construction dust; PM₁₀ and PM_{2.5}; wind erosion; SH dust-depressor

中国大型城市中,只有不到 1%的城市达到世界卫生组织空气质量标准。大气污染物——悬浮颗粒物(PM₁₀和 PM_{2.5})已成为影响区域环境问题的最显著因素^[1]。建设场地扬尘是建筑施工过程中产生的无组织扬尘,粒径较小,易起尘飞扬,是造成城市空气颗粒物污染的来源之一^[2]。在中国一些大、中城市,建筑扬尘在无组织扬尘中所占的比例达 20%以上,对大气 PM₁₀浓度的贡献在 10%左右,对 PM_{2.5}的贡献率有时高达 6%^[3-6]。建筑扬尘排放高度低,且往往集中在人口密集城市地区,合理有效控制建设场地扬尘已成为迫切需要解决的问题。目前场地扬尘的控制方法包括绿化裸露地面、清除路面尘土、掩盖建筑料堆、洒水、喷洒抑尘剂等^[7]。洒水虽简便但用水量大、费用高;掩盖方式只适用于临时处置。绿化和清扫需长期实施才可奏效。喷洒抑尘剂为化学抑尘,借助胶凝性化学物质在松散土体表面形成保护壳,避免气流与松散、细小土颗粒直接接触,起到抑尘作用^[8-9]。喷洒抑尘剂措施施工便捷,费用小、时效性好,逐渐成为研究热点^[10]。本研究综合考虑建设场地扬尘起尘源的分布特征,选取土质类型、喷水量、坡度、坡面形态、固化时间及堆土密度为影响因素,以 SH 抑尘剂为研究对象,依据近 50 a 京津冀地区风力等级分布,搭建风蚀试验台,通过测定和分析风蚀过程中 PM₁₀和 PM_{2.5}的分布规律,评价 SH 固化建设场地类型土的抑尘效果及其在建设场地中的适用性。

表 2 建设场地类型土的粒径分布

材料	>2 mm	2 mm>d>1 mm	1 mm>d>0.5 mm	0.5 mm>d>0.25 mm	0.25 mm>d>0.075 mm	<0.075 mm	%
粉土	0	0.52	1.18	1.76	12.22	84.32	
粉煤灰	0.36	0.94	2.84	9.01	31.52	55.33	
黏土	0	0	0.28	0.64	10.53	88.55	
材料	>20 mm	20 mm>d>10 mm	10 mm>d>5 mm	5 mm>d>2 mm	<2 mm		%
碎石土	0	31.55	58.56	7.22	2.67		

1.2 试验方法

1.2.1 固化土样的制备 以最优含水率为依据(黏土 20%、粉土 18%、砂土 10%、碎石土 8%),按 0, 0.9, 1.2 及 1.5 kg/m² 配置 SH 抑尘剂溶液,均匀喷洒于土样表面,并在自然条件下风干,实现对土样表层的固化。只喷洒水土样为对比样。土样规格:600 mm×600 mm×30 mm。

1.2.2 风蚀试验设计 建设场地多位于密集建筑群的城市市区,地面粗糙度属于 C 类,依据风荷载效应,对应的雷诺数 R_e 为:

$$R_e = 69\ 000vD \quad (1)$$

式中: v ——风速(m/s); D ——结构截面的直径(m)。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 SH 抑尘剂 SH 抑尘剂为新型水溶性高分子材料,价格低廉,黏度低,可在水中能无限稀释(表 1)。SH 抑尘剂能在常温下自然固化成高黏结强度胶膜,施工便捷,只需用清水稀释至一定浓度后均匀喷洒于土体表面即可。SH 为线性高分子材料,在光、热作用过程中,首先发生断链而产生自由基,随之产生交联反应和降解反应,在交联反应之前固化材料的强度均呈上升趋势,SH 抑尘剂具有较好的耐候性及使用寿命^[11-12],可满足建设场地临时性弃土及堆土的需求。经小白鼠急性毒理学试验证实,SH 抑尘剂具有无毒性,不会对环境产生负面影响和破坏,属于环境友好性材料^[13]。

表 1 SH 抑尘剂的基本物理化学性质

序号	性能	参数
1	固体含量	6%
2	密度	1.09 g/cm ³
3	分子量	>20 000
4	表观形态	无色透明液体
5	成本	800 元/t

1.1.2 建设场地类型土 试验所用粉土、粉煤灰、黏土、碎石土均取自施工场地,其对应的粒径分布详见表 2。

建设场地堆土高度一般为 2.5 m,依据京津冀地区最大风力等级(九级风力),风速取 23 m/s,则,雷诺数 R_e 为 3.97×10^6 。

管内流场雷诺数定义:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} = \frac{Q D}{\nu A} \quad (2)$$

式中: μ ——流体动力黏度(Pa·s); ν ——运动黏度(m²/s); P ——流体密度(kg/m³); Q ——体积流量(m³/s); A ——横截面积(m²)。

20℃条件下,空气密度为 1.205 kg/m³,动力黏度为 1.81×10^{-5} Pa·s。室内风蚀试验选用 11-62 型低噪声多翼离心式通风机的风量 10 800 m³/h,则计

算所得雷诺数 R_e 为 3.99×10^6 。该雷诺数与建设场地的相近,两者具有较好的相似性。

室内风蚀试验在河北工业大学河北省土木工程技术研究中心完成。试验过程中:借助希玛 AR826 十风速仪(测量范围 $0.3 \sim 45$ m/s,风速测量误差 $\pm 3\% \pm 1$ dgts,分辨率 0.1 m/s)测定到达土样表面的风速,风蚀时间取 30 min;利用赛纳威 CW-HAT200 高精度手持式 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 专用检测仪器(量程 $0 \sim 999$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$,测量精度 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)监测风蚀过程中产生的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 颗粒物。数据采集时间:2014 年 9

月 20 日至 10 月 20 日。

1.2.3 评价方法 以环境背景值作为参考,对比分析 PM_{10} , $PM_{2.5}$, ΔPM_{10} 和 $\Delta PM_{2.5}$ 随风蚀时间的变化规律。

$$\Delta PM_{2.5} = (PM_{2.5\text{风蚀}} - PM_{2.5\text{环境}}) / PM_{2.5\text{环境}} \quad (3)$$

$$\Delta PM_{10} = (PM_{10\text{风蚀}} - PM_{10\text{环境}}) / PM_{10\text{环境}} \quad (4)$$

1.2.4 影响因素及参数设定 分别考虑 SH 抑尘剂喷洒量、土质类型、坡度(即土样与风口之间的夹角)、坡面形态、堆土干密度、固化时间等因素,详细参数设定详见表 3。

表 3 风蚀试验影响因素及其参数设定

编号	影响因素	具体参数	其他参数
1	喷量	0, 0.9, 1.2, 1.5 kg/m^2	黏土, 干密度 1.3 g/cm^3 , 平直光滑, 坡度 30° , 固化时间 3 d
2	土质类型	黏土、粉土、粉煤灰、碎石土	干密度 1.3 g/cm^3 , 干喷量 1.2 kg/m^2 , 平直光滑, 坡度 30° , 固化时间 3 d
3	土堆坡度	$0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$	黏土, 干密度 1.3 g/cm^3 , 喷量 1.2 kg/m^2 , 平直光滑, 固化时间 3 d
4	坡面形态	平直光滑、平直粗糙、波面光滑、波面粗糙	黏土, 干密度 1.3 g/cm^3 , 喷量 1.2 kg/m^2 , 坡度 20° , 固化时间 3 d
5	固化时间	3, 4, 5, 6 d	黏土, 干密度 1.3 g/cm^3 , 喷量 1.2 kg/m^2 , 平直光滑, 坡度 30°
6	堆土干密度	1.0, 1.3, 1.5 g/cm^3	黏土, 喷量 1.2 kg/m^2 , 平直光滑, 坡度 30° , 固化时间 3 d

2 结果与分析

2.1 SH 抑尘剂固化对土样表面形态的影响

只洒水水的条件下,土样在失水过程表面收缩开裂及起皮现象严重,甚至在边角处出现整块结皮层的分离。而经 SH 抑尘剂固化后,土样表面保持较好完整性,仅存在若干细小裂缝,无起皮现象(图 1)。SH 抑尘剂可以在土样颗粒间发挥较好的联接作用,增强土层表面的整体性,有效解决洒水抑尘措施实施中存在的收缩和起皮问题。

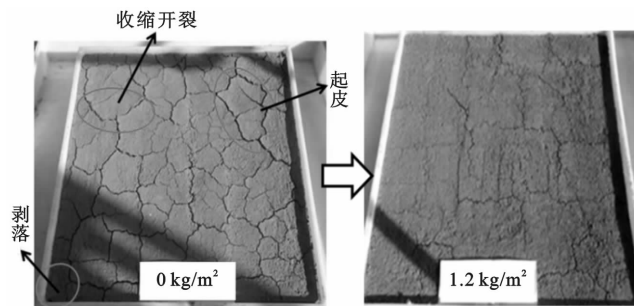


图 1 喷水及喷洒 SH 抑尘剂干燥后的表面形态

2.2 SH 抑尘剂喷量对抗风蚀性能的影响

经 SH 抑尘剂固化后,土样在九级风力吹蚀作用下所产生的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 均小于只洒水土样。只洒水的土样,风蚀前 10 min, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 远大于环境背景值, 10 min 后, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 围绕环境值上下波动。只洒水抑尘措施,土体收缩及起皮处的细小颗粒易于在风蚀作用下再次扬起(图 2)。土样经 SH 抑

尘剂固化后,九级风力吹蚀下 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的变化曲线基本稳定且均小于环境背景值。对比三种喷量, 0.9 kg/m^2 喷量曲线的波动略大,喷量越大,曲线越稳定。 $1.2, 1.5$ kg/m^2 喷量条件下, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分布曲线较为接近,因此,从抗风蚀稳定性及经济角度,适宜的 SH 抑尘剂喷量为 1.2 kg/m^2 。

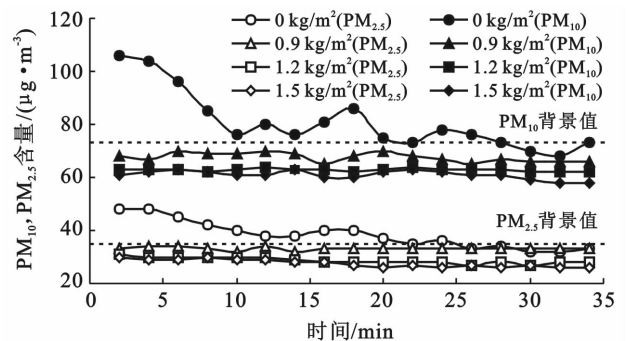


图 2 不同喷量 SH 固化土的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分布

2.3 土质类型对抗风蚀性能的影响

经 SH 抑尘剂固化后,黏土、粉土、粉煤灰、碎石土风蚀过程中产生的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 均小于环境背景值。黏土、粉土、粉煤灰的变化曲线整体稳定,碎石土在风蚀 12 min 时,出现较大增加,但很快又出现下降(图 3)。碎石土的这一现象主要是由于碎石土颗粒粒径大小不一且形状不规则,在 9 级风力的吹蚀作用下,风的拉张力造成了部分保护膜破坏,使被胶膜所覆盖的部分细小颗粒在风蚀作用下被扬起。但碎石

土的这种风蚀破坏具有瞬时性,点破坏面并没有发生进一步的扩大,位于破坏点周边的 SH 保护膜依旧具有抗风蚀作用。可初步证实,SH 抑尘剂对于建设场地类型土具有适用性。

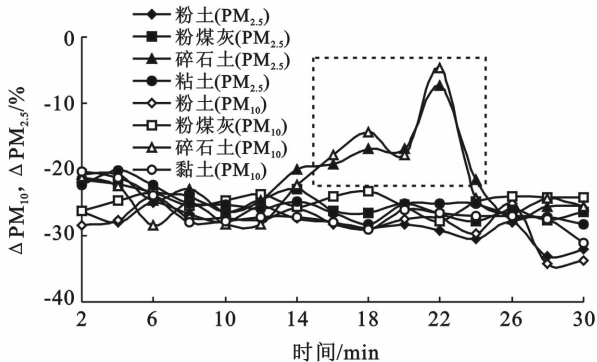


图 3 不同土质经 SH 固化后的 ΔPM_{10} 和 $\Delta PM_{2.5}$ 分布

2.4 土堆坡度对抑尘效果的影响

土堆坡度对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的影响较小(图 4)。坡度为 30° 的 SH 抑尘剂固化土,风蚀过程中, PM_{10} 会出现大于环境背景值的情况, $PM_{2.5}$ 也同期出现波动。坡度 $20^\circ, 10^\circ$ 和 0° 时, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的变化曲线稳定,且趋于一致。原因可归结为两个方面:一方面,坡度越陡,风蚀过程中土堆表面所承担的有效受力面积及有效风力将越大;另一方面,坡度较陡,喷洒 SH 抑尘

剂过程中,重力作用将影响固化的均匀性,易于在部分边角处形成薄弱面。针对图 3—4 所出现的现象,在实际施工中,如遇坡度过陡或颗粒棱角较为分明等特殊情况,建议采取增大喷洒浓度、喷洒次数或局部反复喷洒方式以有效避免薄弱面的产生,增强整体的抗风蚀稳定性。

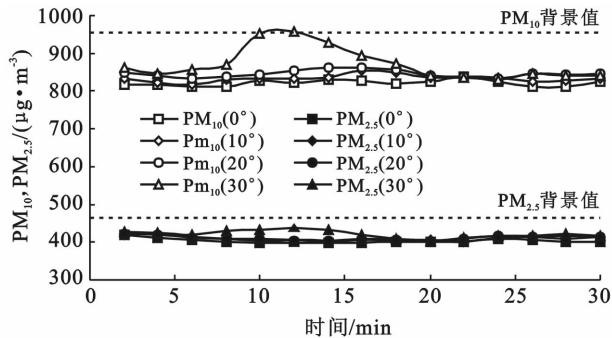


图 4 不同坡度 SH 固化土的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分布

2.5 土堆坡面形态对抑尘效果的影响

不管无论是曲面形态还是粗糙表面,SH 抑尘剂均可发挥联接作用,经固化后,两者表面均具较好的完整性,未出现严重缩裂和起皮现象(图 5)。SH 抑尘剂固化形成的保护层可完全覆盖土体表面凹凸不平的薄弱区域,将其和周边联成整体(图 5),共同抵抗风蚀的破坏。

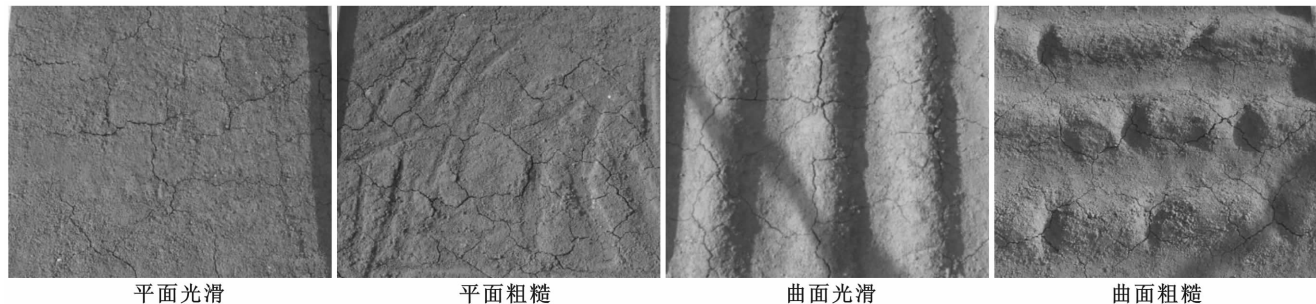


图 5 不同坡面形态经 SH 抑尘剂固化后的表面形态

在 9 级风力的吹蚀作用下,各种坡面形态所产生的 ΔPM_{10} 和 $\Delta PM_{2.5}$ 较为接近,且均小于环境背景值(图 6)。表明 SH 抑尘剂对于各种坡面均具有较好的适用性,土堆的波面形态及粗糙程度不影响 SH 抑尘剂的固化效果及固化土的抗风蚀性能。

2.6 固化时间对抗风蚀性能的影响

9 级风力吹蚀下,固化 3, 4, 5, 6 d 的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分布较为接近,且随风蚀时间的延长,各曲线变化均呈稳定状态(图 7)。固化时间 3 d 时,SH 抑尘剂与土颗粒之间的胶结反应已基本完成,固化保护壳已形成,可以满足建设场地类型土的抗风蚀要求。从施工和经济角度,建议选取的固化时间为 3 d。

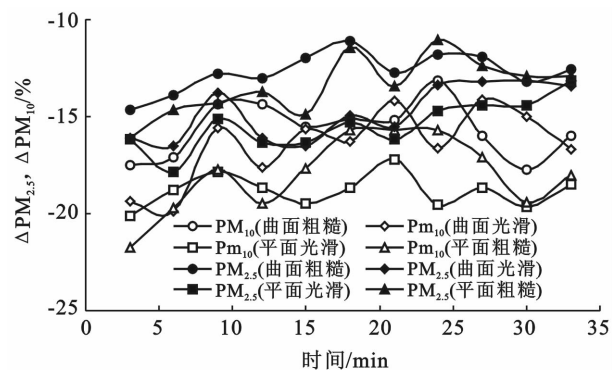


图 6 不同坡面形态经 SH 固化后的 $\Delta PM_{2.5}$ 和 ΔPM_{10} 分布

2.7 干密度对抗风蚀性能的影响

在 1.5 g/cm^3 干密度范围内,土堆密度对 SH 抑

尘剂固化土的抗风蚀性能影响较小,各曲线的波动趋势较为一致,基本维持稳定(图 8)。这表明土堆密度对 SH 抑尘剂渗透效果的影响较小,在 1.5 g/cm^3 干密度范围内,SH 抑尘剂均可有效地与表层土颗粒之间发生联接作用,形成抗风蚀性保护膜。如遇到干密度较大情况,可采用低浓度和反复多次喷洒措施。

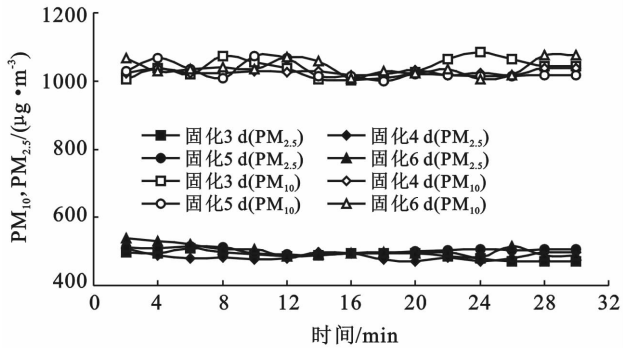


图 7 不同固化时间 SH 固化土的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 分布

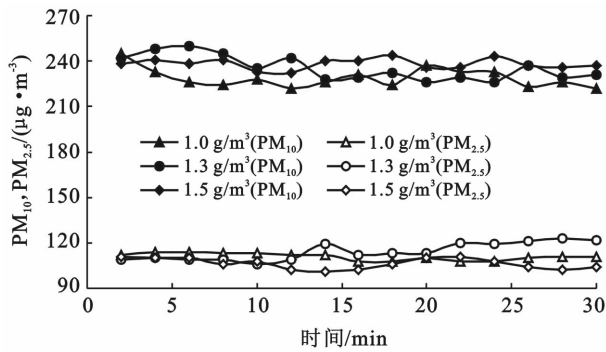


图 8 不同干密度 SH 固化土的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 分布

2.8 现场试验

试验场地位于天津某地铁施工现场,为建筑弃土,土质类型主要为粉质黏土。SH 抑尘剂的喷洒量为 $0.9, 1.2, 1.5 \text{ kg/m}^2$,固化时间为 3 d,风蚀时间取 60 min。固化后土堆表面形态如图 9 所示,分别测定风蚀作用下堆土坡顶及坡脚处的 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 分布(图 10)。现场试验证实,SH 抑尘剂的喷洒固化不影响土堆表面的分布形态(图 9)。SH 抑尘剂可发挥较好的抑尘效果,有效地抑制建设场地的扬尘,3 d 的固化时间可完全满足建设场地抑尘的要求,且适宜的 SH 抑尘剂喷量为 1.2 kg/m^2 (图 10),现场试验结果和室内结果相一致。

3 结果讨论

建设场地扬尘不同于其他扬尘,主要来源于建筑工地、料场及裸露地面等,对抑尘剂的选取具有一定的特殊要求。(1) 建设场地扬尘排放高度低且多集中于人口密集的城区,抑尘剂的选取关系到对周围生态

环境和人类身体健康的影响。所以用于建设场地的抑尘剂需具有无毒无污染的特点,建设场地抑尘剂使用应是一项“绿色施工”技术。(2) 建设场地扬尘排放点分散、起尘源具有不规则性,土体类型、土堆坡度、土堆坡面形态及土堆干密度等多样化,选取适用范围广泛且施工简便的抑尘剂是关键。(3) 建设场地抑尘剂的选用需考虑工程的施工及进度,要求抑尘剂能在短时间内发挥作用,同时,抑尘剂的使用不影响后期堆料的再次使用。(4) 建设场地类型土多处于裸露状态,抑尘剂使用的时效性及其对环境因素的敏感性也是需关注方面,如抗雨蚀性能,抗老化性能,对环境温差的敏感程度及多环境因素耦合作用下性质变化等,均需进一步开展研究。这部分也是本研究正在开展的工作。



图 9 现场经 SH 固化后的土堆表面形态

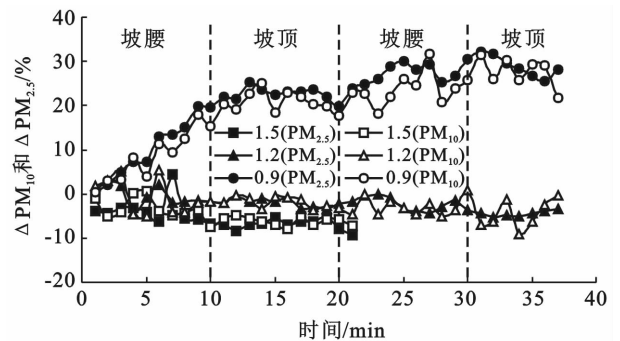


图 10 现场土堆经不同喷量 SH 固化后的 ΔPM_{10} 和 $\Delta\text{PM}_{2.5}$ 分布

4 结论

(1) SH 抑尘剂可以在土样颗粒之间发挥较好的联接作用,维持土体表面的完整性,解决洒水抑尘措施存在的缩裂问题。

(2) SH 抑尘剂适用于场地土及裸露地表的固化。土堆坡度、坡面形态及干密度均不影响 SH 抑尘剂的固化效果,即使在土堆略陡或土堆表面存在凹凸不平的情况下,SH 抑尘剂依旧可以渗入土层并与表

层土颗粒之间发生固化联接,形成完整性的抗风蚀性保护膜,发挥抑尘效果。

(3) SH 抑尘剂对于建设场地类型土(粉土、粉煤灰、黏土、碎石土)均具有较好的适用性。经 SH 抑尘剂固化后,土样在 9 级风力吹蚀作用下不会产生的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 颗粒。固化时间 3 d 时,SH 抑尘剂与土颗粒之间的胶结反应已基本完成,所形成的抗风蚀保护膜可以满足建设场地抑尘要求。从施工和经济角度,建议选取的 SH 抑尘剂喷洒量为 1.2 kg/m²,固化时间为 3 d。

[参 考 文 献]

- [1] 张庆丰,罗伯特·克鲁克斯. 迈向环境可持续的未来: 中华人民共和国国家环境分析[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2013.
- [2] Zhao Pusheng, Feng Yinchang, Zhu Tan, et al. Characterizations of resuspended dust in six cities of North China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(30): 5807-5814.
- [3] 田刚,李建民,李钢,等. 建筑工地大气降尘与总悬浮颗粒物相关性研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(9): 1941-1943.
- [4] Wang Ying, Zhang Guoshun, Zhang Xingying, et al. The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(16): 2935-2952.
- [5] Muleski G E, Chatten C J, Kinsey J S. Particulate emission from construction activities [J]. *Journal of Air&Waste Management's Association*, 2005, 55(6): 772-783.
- [6] 王莉莉,王跃思,吉东生,等. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(7): 1077-1086.
- [7] Tjoe E N, Hilhorst S, Spee T, et al. Dust control measures in the construction industry[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2003, 47(3): 211-218.
- [8] 余勇. 扬尘的污染特性及防治措施的研究[J]. *江苏环境科技*, 2008, 21(1): 129-132.
- [9] 张晶,胡春玲,任庆. 城市扬尘污染现状及防治对策[J]. *环境保护科学*, 2008, 34(2): 4-6.
- [10] 王蛟龙,胡志光,张玉玲. 化学抑尘剂的研究现状分析[J]. *化学工程师*, 2014, 226(7): 51-53.
- [11] 王银梅,谌文武,韩文峰. SH 固沙机理的微观探讨[J]. *岩土力学*, 2005, 26(4): 650-655.
- [12] 王银梅,韩文峰,谌文武. 新型高分子材料固沙抗冻性能试验研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(4): 145-148.
- [13] Li Min, Chai Shouxi, Du Hongpu, et al. Feasibility of reinforced saline soil with treated wheat straw and lime [J]. *Soil and Foundations*, 2012, 52(2): 231-241.
- (上接第 184 页)
- [6] Dang C K, Eric C, Gessner M O. Magnitude and variability of process rates in fungal diversity-litter decomposition relationships[J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(11): 1129-1137.
- [7] Kahindi J H P, Giller K E, Woomer P, et al. Agricultural intensification, soil biodiversity and ecosystem function in the tropics: The role of nitrogen-fixing bacteria[J]. *Applied Soil Ecology*, 1997, 6(1): 55-76.
- [8] Bell T, Newman J A, Silverman B W, et al. The contribution of species richness and composition to bacterial services[J]. *Nature*, 2005, 436(25): 1157-1160.
- [9] Griffiths B S, Ritz K, Bardgett R D, et al. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions: An examination of the biodiversity-ecosystem function relationship [J]. *Oikos*, 2000, 90(2): 279-294.
- [10] 吴利,余育和,冯伟松. PCR-DGGE 技术在环境微生物群落研究中的应用[J]. *合肥师范学院学报*, 2010, 28(6): 103-108.
- [11] 解红娥,李永山,杨淑巧,等. 农田残膜对土壤环境及作物生长发育的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(S): 153-156.
- [12] 常瑞甫,严昌荣. 中国农用地膜残留污染现状及防控对策[M]. 北京: 中国农业科学与技术出版社, 2012.
- [13] Chu Haiyan, Noah Fierer, Christian L L, et al. Soil-bacterial diversity in the Arctic is not fundamentally different from that found in other biomes[J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 12(11): 2998-3006.
- [14] 樊有国,罗学刚. 环境降解聚乙烯地膜残余组分对土壤酶活性的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(6): 1-6.
- [15] Lucas N, Bienaime C, Belloy C. Polymer biodegradation Mechanisms and estimation techniques: A review [J]. *Chemosphere*, 2008, 73(4): 429-442.
- [16] Elshafei G M S, El-Said M M, Attia H A E, et al. Environmentally friendly pesticides: Essential oil-based w/o/w multiple emulsions for anti-fungal formulations [J]. *Industrial Crops & Products*, 2010, 31(1): 99-106.
- [17] 全世普,刘嘉藩,侯哲. 淀粉/聚烯烃共混降解材料的发展趋势[J]. *塑料包装*, 2003, 13(2): 41-47.
- [18] 卓凤萍,陈仕江,殷幼平,等. 贡嘎蝠蛾幼虫肠道菌群的分析[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2004, 27(11): 26-29.