



移动扫码阅读

戴雯婧,甘延玲,叶绿萌,等.道路施工环保型抑尘剂的制备及其性能评价[J].能源环境保护,2021,35(2): 51-57.

DAI Wenjing, GAN Yanling, YE Lvmeng, et al. Preparation and performance evaluation of an environment-friendly dust suppressant for road construction[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(2): 51-57.

道路施工环保型抑尘剂的制备及其性能评价

戴雯婧¹,甘延玲¹,叶绿萌¹,谢宗委²,刘壮壮²,贺烈华²,黄海保¹,肖家勇^{3,*}

(1.中山大学环境科学与工程学院,广东广州510275;2.湖南建工集团有限公司,湖南长沙410000;
3.珠海市金湾区联港基础投资有限公司,广东珠海519090)

摘要:为解决道路施工过程中产生的扬尘污染问题,以水溶性淀粉、海藻提取液、羟丙基甲基纤维素等为原料,制备了一种施工道路环保型抑尘剂。模拟抑尘剂实际应用场景,将制备的环保型抑尘剂稀释不同倍数后喷洒尘样,分析了尘样的保湿性、吸湿性和抗风蚀性。结果表明:在喷洒原液稀释2倍的抑尘剂20h后,尘样的保湿性和吸湿性仍分别稳定维持在4.5%和2.2%左右;在10m/s的风蚀下,碾压后的风蚀率仅为2.742%,粘度和表面张力分别为12mPa·s和46.90mN/m;与洒水的尘样相比,喷洒抑尘剂的尘样含氧官能团增多,尘样的亲水性得以提高;在喷洒原液稀释2倍的抑尘剂后,尘样具有良好的黏连性。

关键词:道路施工;扬尘;环保型抑尘剂;抑尘性能

中图分类号:X701.2

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)02-0051-07

Preparation and performance evaluation of an environment-friendly dust suppressant for road construction

DAI Wenjing¹, GAN Yanling¹, YE Lvmeng¹, XIE Zongwei², LIU Zhuangzhuang²,
HE Liehua², HUANG Haibao¹, XIAO Jiayong^{3,*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Hunan Construction Engineering Group, Changsha 410000, China; 3. Zhuhai Jinwan Liangang Foundation
Investment Co., Ltd., Zhuhai 519090, China)

Abstract: In order to solve the problem of dust pollution during road construction, an environmental friendly dust suppressant for road construction was prepared using water soluble starch, seaweed extract and hydroxypropyl methylcellulose as raw materials. To simulate the actual application of the dust suppressant, the prepared dust suppressant was diluted by different times and then sprayed on the dust samples. The moisture retention, moisture absorption, wind erosion resistance of the dust samples were tested. The results show that the moisture retention and moisture absorption of the dust sample maintain about 4.5% and 2.2%, respectively, 20 hours after sprayed by double diluted solution. After eroding by 10 m/s wind, the wind erosion rate is only 2.742%, and the viscosity and surface tension are 12 mPa·s and 46.90 mN/m, respectively. Compared with the dust sprayed with water, the dust sprayed with dust suppressant has more oxygen-containing functional groups and its hydrophilicity increases. After sprayed with double diluted dust suppressant, the dust sample has good adhesiveness.

Key Words: Road construction; Dust; Environmental friendly dust suppressant; Dust suppression performance

收稿日期:2021-01-21;责任编辑:金丽丽

基金项目:湖南建工集团委托项目(K20-38000-030);中央高校基本科研业务费(20lgjc03)

第一作者简介:戴雯婧(1995-),女,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制工程。E-mail:951802458@qq.com

通讯作者简介:肖家勇(1975-),男,广东和平人,高级工程师,主要研究方向为建设工程管理。E-mail:13326628277@163.com

0 引言

大气漂浮的颗粒物会导致严重的环境污染,近年来,随着我国城市化的快速发展,道路施工扬尘对城市大气颗粒污染物贡献率愈加突出^[1-2]。目前,国内道路现场施工路面一般采用泥土、碎石、泥结石或混凝土等形式,道路施工从土方的开挖到后期的填筑、整平,扬尘的产生几乎伴随整个施工过程^[3-4]。扬尘中粒径较小的粉尘,易形成气溶胶,长时间漂浮在空气中,不易沉降,也不易于捕捉。这些粉尘不仅会降低能见度,增加相关工作人员伤亡事故的风险^[5],还会通过呼吸道进入体内,引发哮喘、慢性阻塞性肺疾病和肺气肿等疾病,严重情况下还会引起心血管疾病并导致过早死亡^[6-8],成为民众极为关心的环境问题和投诉热点。林方醒等^[9]通过监测珠三角区域城市房建工程的扬尘排放,发现施工道路为主要扬尘超标部位。抑制扬尘已成为城市大气颗粒物控制的重要手段^[10-13]。

喷水是抑制扬尘的一种常用方法,但水的粘度,耐久性和固结效果不佳,因此未得到广泛应用^[14]。喷洒抑尘剂被认为是一种有效控制扬尘的措施。根据抑尘的机理差异,抑尘剂可以划分为四种类型:凝聚型、润湿型、粘结型和复合型,其中复合型抑尘剂可将润湿、粘结、凝并、吸湿、保水等功能结合为一体,抑尘效果显著,适用范围广泛,因此成为近年来的研究热点^[15-17]。梁文俊等^[18]利用玉米秸秆、羧甲基纤维素钠和工业碱NaOH为原料,在常温下制备出粘度320 mPa·s,抗压强度220 kPa,能够有效抵御外界破坏和优异粘附性能的抑尘剂。来水利等^[19]以羧甲基淀粉、丙烯酸和丙烯酰胺为原料,在65℃微波辐射下以水溶液接枝共聚法制备了一种软膜抑尘剂,其保水性、抗震荡性及其抗风蚀性能均优于市售抑尘剂。SUN等^[20]用淀粉作为原料,以甲基丙烯酸甲酯和丙烯酰胺为单体,制备出最大可承受56.35 N的轴承压力,且在12 m/s风吹下,固尘率维持在80%以上的抑尘剂。李颖泉等^[21]以丙烯酸为功能单体、甲基丙烯酸甲酯为硬单体、丙烯酸丁酯为软单体、过硫酸铵为引发剂,用乳液聚合法合成固质量分数为51.0%,黏度为9.6 mPa·s,可稳定保存6个月的速溶型液体抑尘剂。目前,很多市售抑尘剂虽抑尘效果显著,但制备过程复杂、成本高、多半含有难降解单体,易对环境产生二次污染。

此外,研究者在探究抑尘剂相关性能时,大多使用浓度较高的抑尘剂原液,而忽略了在实际喷洒应用中会将抑尘剂原液稀释相应比例,这会导致实验和实际应用效果存在较大差异。因此,在研发抑尘性能优异、环保经济的环境友好型抑尘剂的同时,非常有必要探究抑尘剂实际应用场景下的喷洒效果。

1 实验部分

1.1 实验试剂

水溶性淀粉,食品级,国药集团化学试剂有限公司;海藻提取液,食品级,新未来生物制品成都有限公司;羟丙基甲基纤维素,食品级,河北鹏宇生物科技有限公司;氯化镁,食品级,上海启仁化工有限公司;尼伯金复合酯,食品级,山东鲁森生物科技有限公司;市售抑尘剂1,浓缩液,河南君平新材料科技有限公司;市售抑尘剂2,浓缩液,大城县亦博化工有限公司。

1.2 实验仪器设备

Nicolet iS10型傅里叶变换红外光谱仪,美国Thermo Fisher公司;Sigma 500型场发射扫描电镜,德国Carl Zeiss股份公司;德国克吕士K100型表面张力仪,克吕士科学仪器(上海)有限公司;T09-1S型恒温磁力搅拌器,上海司乐仪器有限公司;NDJ-1型旋转式指针黏度计,上海绩泰电子科技有限公司;9076A型电热鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司。

1.3 抑尘剂原液制备

本研究采用原材料易得、安全环保、价格经济,制备过程简单的工艺来合成抑尘剂原液,在常温下将水溶性淀粉和羟丙基甲基纤维素按照质量比7:0.5混合,并加入适量去离子水,用磁力搅拌器搅拌一定时间,使其充分混合溶解。然后加入0.1%~0.2%的氯化镁,搅拌使其充分混合反应,最后加入2.1%~2.5%的海藻提取液和0.1%的尼伯金复合酯搅拌混合均匀后封装保存。

1.4 尘样采集

由于道路施工扬尘一般具有较多的尘土和沙石粉末,为模拟试剂应用工况,本文选用沙土为原料。在裸露沙土地表面挖取适量沙土,除去其中较大的砂砾、枯枝、杂草和塑料垃圾等,置于阳光下暴晒烘干,然后将沙土研磨过80目的筛子筛分,所得的样品为实验扬尘样品。

1.5 抑尘剂性能测试

通过前期初步预实验,选择将抑尘剂原液分

别稀释 2、4、6、8、10 倍来测试其各项性能,包括保湿性、吸湿性、抗风蚀性、粘度和表面张力等,在保证抑尘效果的前提下,选择最经济的方法,达到最佳抑尘效果。

1.5.1 保湿性

准备 6 个规格为 90 mm 的培养皿,每个培养皿称取 10 g 尘样铺平,分别编号 1~6,1 号按照 2 L/m²均匀喷洒清水,作为对照组。2~6 号分别均匀喷洒抑尘剂原液稀释 2、4、6、8、10 倍的溶液,喷洒量为 2 L/m²。然后将培养皿放置在温度为 35 ℃ 的电热鼓风干燥箱中,每隔 1 h 取出培养皿称重,并记录数据。保湿性根据保水率的大小来表征,其计算公式如式(1):

$$\theta_1 = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: θ_1 为保水率,%; W_2 为每隔 1 h 测得培养皿的重量,g; W_1 为喷洒溶液后培养皿的重量,g; W_0 为培养皿初始的重量,g。

1.5.2 吸湿性

准备 6 个规格为 90 mm 的培养皿,每个培养皿称取 10 g 尘样铺平,分别编号 1~6,1 号按照 2 L/m²均匀喷洒清水,作为对比试样。2~6 号分别均匀喷洒抑尘剂原液稀释 2、4、6、8、10 倍的溶液,喷洒量为 2 L/m²。喷洒溶液后将培养皿放入干燥箱中 60 ℃ 恒温烘干 2 h,取出称重后,置于室温环境中,每隔 1 h 称重并记录。吸湿性根据烘干后测得含水率的大小来表征,其计算公式如式(2):

$$\theta_2 = \frac{W_2 - W_1}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: θ_2 为含水率,%; W_2 为每隔 1 h 测得培养皿的重量,g; W_1 为喷洒溶液且干燥 2 h 后培养皿的重量,g; W_0 为尘样的质量,g。

1.5.3 抗风蚀性

准备 7 块一面光滑一面粗糙的玻璃片(10 cm × 10 cm),称取 10 g 尘样置于每块玻璃的粗糙面并铺平,分别编号 1~7,1 号不做任何处理,2 号均匀喷洒 5 mL(约为 1 L/m²)水,3~7 号分别均匀喷洒原液稀释 2、4、6、8、10 倍的抑尘剂,喷洒量为 5 mL(约为 1 L/m²)。喷洒完后置于鼓风干燥箱中 50 ℃ 温度下烘 1 h,烘完取出称重记录。前期预实验中发现在 10 m/s 的风速内,喷洒水和抑尘剂的尘样,在不经碾压的情况下,抗风蚀性都很强,基本无差异,但在道路施工过程中,作业车辆、施工人员往来会对地面尘土造成一定的碾压,可

能会使已经结壳的尘土破碎,从而产生二次扬尘,为针对道路施工实际情况测试,模拟车轮、重物和行人等会产生碾压情况,分别用装有 500 mL 水的玻璃瓶碾压尘样 5 次。先分别将 1~7 号玻璃片在 5 m/s 的风速下吹蚀 3 min 后,称重记录;然后在 10 m/s 的风速下吹蚀 3 min 并称重记录。最后通过计算其风蚀率,来进一步评价抑尘剂性能。风蚀率 E 计算公式如式(3):

$$E = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

式中: E 为风蚀率,%; W_1 为风蚀前玻璃片的质量,g; W_2 为风蚀后玻璃片的质量,g。

1.5.4 粘度

在 25 ℃ 室温环境下,利用 DNJ-1 型粘度计测量不同稀释倍数抑尘剂溶液的粘度,分别将原液稀释 2、4、6、8、10 倍的抑尘剂溶液放置在 500 mL 的烧杯中,溶液上表面没过转子刻度线,选择合适的转数,测量 3 次取平均值。

1.5.5 红外光谱

采用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS10 型)进行红外光谱测试,将不做处理、喷水和喷洒抑尘剂原液的尘样在鼓风干燥箱中于 60 ℃ 条件下干燥 6 h 后,用 KBr 作为载体,取适量尘样覆盖其表面压平,用红外光谱仪扫描分析抑尘剂的分子基团、化学键和官能团等变化。

1.5.6 扫描电镜

采用场发射扫描电镜(Sigma 500 型)进行测试,将不做任何处理、喷洒水和喷洒原液稀释 2、4、6、8、10 倍抑尘剂的尘样在鼓风干燥箱中 60 ℃ 下干燥 2 h,再用导电胶分别将适量尘样粘在样品台上,测试分析不同处理后尘样的表面形态。

1.5.7 表面张力

采用德国克吕士 K100 型表面张力仪对抑尘剂溶液的表面张力进行测定,选择 Du Nouy 环法测量原液稀释 2、4、6、8、10 倍抑尘剂的表面张力,测量 5 次,取平均值。

1.6 经济实用性

为探究自制抑尘剂与市售抑尘剂的抑尘效果,分别从河南君平新材料科技有限公司和大城县亦博化工有限公司购买市售抑尘剂 1、2,选取抑尘性能测试中最具代表性的保湿性,将自制抑尘剂与所购抑尘剂进行对比,保湿性的测试方法同前一节所述,比较三款抑尘剂的经济实用性。

2 结果和讨论

2.1 保湿性

图1为不同溶液喷洒尘样的保湿性能对比,由图可知,喷洒抑尘剂的总体保湿性明显优于洒水的,喷洒抑尘剂的保水率随稀释倍数的增大逐渐减小,喷洒抑尘剂原液稀释4、6、8、10倍的保水率差异不明显,总体不超过2%。其中喷洒原液稀释2倍抑尘剂保水率是其他稀释倍数的2倍以上,在经过30 h后,保水率仍能维持在4.5%以上,说明可以长期锁住尘样中的水分,防止水分蒸发和二次扬尘产生,具有良好的抑尘效果。

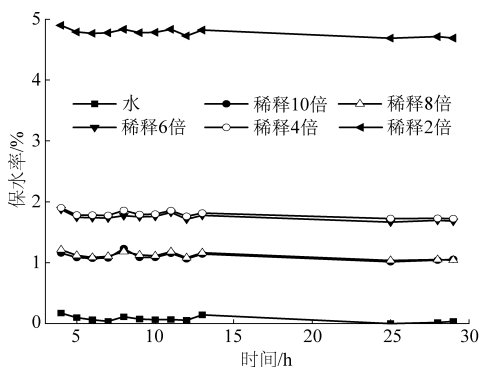


图1 不同溶液喷洒尘样的保湿性能对比

Fig.1 Comparison of moisture retention of dust samples sprayed with different solutions

2.2 吸湿性

图2描绘了不同溶液喷洒尘样后的吸湿性能对比,从图中可以看出,洒水的尘样吸湿性较差,干燥处理后的尘样含水率几乎为0。喷洒抑尘剂的含水率均高于洒水的,含水率随稀释倍数的增大逐渐减小,喷洒抑尘剂原液稀释4、6、8、10倍的尘样经烘干置于室温下,含水率保持在0.4%~1.3%之间,而喷洒原液稀释2倍抑尘剂的尘样吸

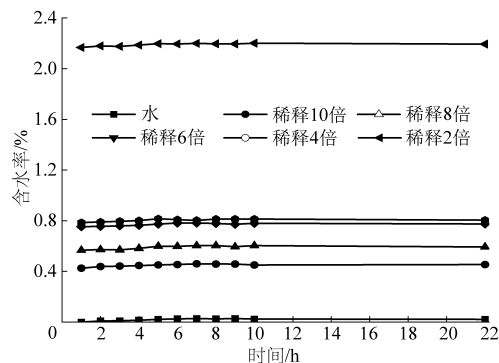


图2 不同溶液喷洒尘样的吸湿性能对比

Fig.2 Comparison of moisture absorption of dust samples sprayed with different solutions

湿性明显优于其他稀释倍数的抑尘剂,在经过20 h后,含水率仍然保持在2.2%左右,对空气中的水分展现了良好吸湿效果,能有效捕捉空气中的水分,增加尘样湿度和重量,能防止尘土飞扬,抑尘性能优越。

2.3 抗风蚀性

未做处理尘样、喷洒水尘样及喷洒不同稀释倍数抑尘剂的尘样的抗风蚀性能测试结果见表1,从表1可以看出,经过碾压后,不做处理和洒水的尘样,分别在5 m/s和10 m/s风速吹3 min后,风蚀率都高达97%以上,说明其抗风蚀性极弱。而喷洒原液稀释不同倍数抑尘剂的尘样均具有一定的抗风蚀性,且随抑尘剂原液稀释倍数增大,抗风蚀性逐渐减弱。其中喷洒原液稀释2倍抑尘剂的尘样,经过碾压后,在5 m/s风蚀下,风蚀率仅有0.838%,在10 m/s风蚀下,风蚀率为2.742%,说明喷洒原液稀释2倍抑尘剂的尘样表面固化层的强度较高,不易松散,不易再次漂浮到空气中,具有远超其它稀释倍数抑尘剂的优异抗风蚀性能。

表1 抗风蚀性测量结果

Table 1 Wind erosion resistance measurement results

尘样名称	烘干后玻璃片 +尘样质量/g	5 m/s 风蚀后玻璃片 +尘样质量/g	5 m/s 风蚀率/%	10 m/s 风蚀后玻璃片 +尘样质量/g	10 m/s 风蚀率/%
不做处理	80.175 1	70.224 7	99.504	70.201 3	99.738
水	78.832 4	69.078 7	97.537	69.015 5	98.169
稀释2倍	79.727 0	79.643 2	0.838	79.452 8	2.742
稀释4倍	79.519 2	76.685 4	28.338	75.717 5	38.017
稀释6倍	80.232 3	77.974 1	22.582	77.713 0	25.193
稀释8倍	78.733 3	73.688 6	50.447	72.757 6	59.757
稀释10倍	79.212 2	73.181 7	60.305	72.023 8	71.884

2.4 粘度测试

水以及不同稀释倍数抑尘剂的粘度测试结果如图 3 所示,从图中可明显看出,从图中可以看出,稀释不同倍数的抑尘剂粘度均比水(1 mPa·s)的粘度高,原液稀释 2 倍的抑尘剂是稀释其他倍数的抑尘剂及水的粘度值的 2 倍以上,其余稀释倍数的抑尘剂粘度值差异不明显。一般在组分相同情况下,粘度值越高,粘结性能越大,抑尘效果越好,说明原液稀释 2 倍的抑尘剂粘结性能最佳,对尘样能够有效的起到粘结作用,使粉尘颗粒发生聚集,增大颗粒物的粒径,从而达到高效抑尘效果。

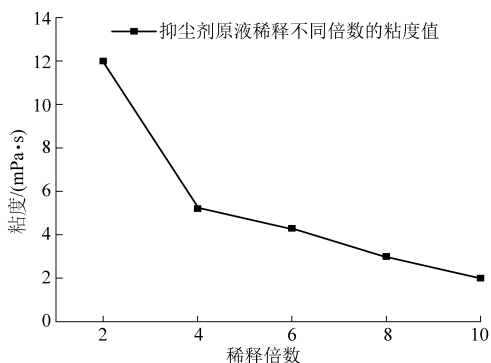


图 3 不同溶液的粘度值变化

Fig.3 Viscosity of different solutions

2.5 红外光谱

图 4 为不做处理、喷洒水和喷洒抑尘剂原液三种不同方式处理尘样的红外光谱图,由图对比分析可得出,在喷洒抑尘剂原液尘样的红外光谱图中,2 935 cm^{-1} 为水溶性淀粉甲基上 $-\text{CH}_2-$ 上的

C-H 不对称伸缩振动峰。在 1 420 cm^{-1} 处的峰为纤维素上的 N-H 的伸缩振动峰。在 1 159 cm^{-1} 处出现的 C-O-C 的伸缩振动峰明显强于不做任何处理和喷洒水的尘样,可以说明尘样中的含氧官能团增多,增大了尘样亲水性,提高抑尘性能。同时抑尘剂均为食品级原料,在尘样上的吸附主要为物理吸附,不会影响尘样结构和性质,因此不会对环境产生二次污染,是一种环保型的抑尘剂。

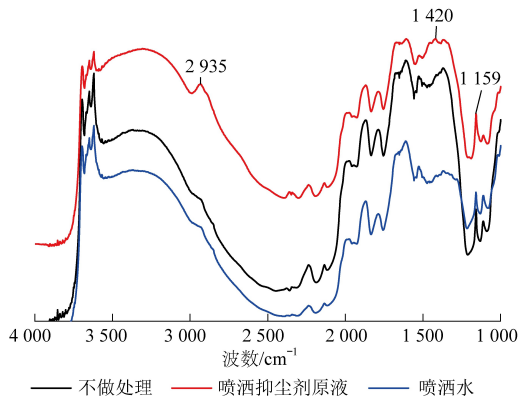


图 4 不同处理尘样的红外光谱图

Fig.4 Infrared spectra of dust samples treated by different methods

2.6 扫描电镜

通过扫描电镜对不同条件处理的尘样进行了表面形貌的观察。扫描电镜图如图 5 所示,图 a、b、c、d、e、f、g 分别为不做处理、喷洒水、喷洒原液稀释 2、4、6、8、10 倍的尘样扫描电镜图,通过对比不同处理尘样的扫描电镜图观察发现,不做处理,

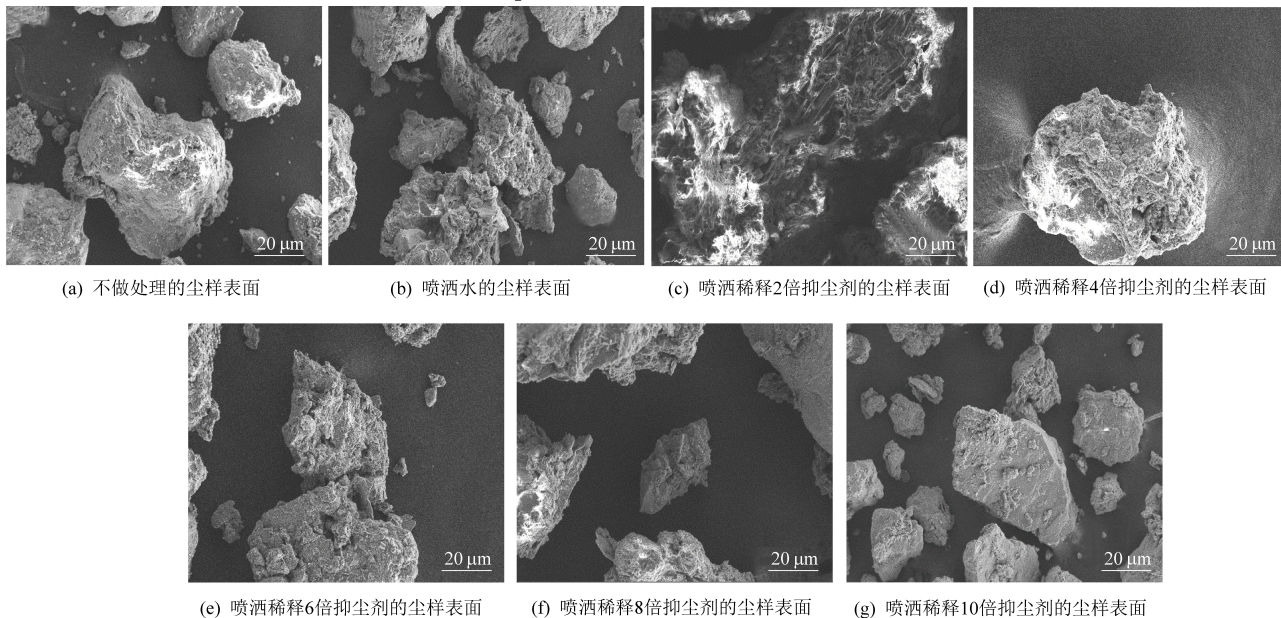


图 5 不同处理的尘样表面扫描电镜

Fig.5 Scanning electron microscopy of dust samples with different treatments

喷洒水和喷洒原液稀释 4、6、8、10 倍的尘样相互之间黏连性较小,尘样颗粒较为独立、松散,尘粒间有较多的空隙。但是喷洒原液稀释 2 倍抑尘剂的尘样表现出良好的黏连性,尘样相互之间呈现丝状黏连,空隙减少,提高其紧密结合性能,起到了良好的抑尘效果。

2.7 表面张力

图 6 为不同溶液的表面张力值,从图中可以看出,不同稀释倍数抑尘剂的表面张力值均小于水(72.28 mN/m)的表面张力值,其中稀释 2 倍的抑尘剂与抑尘剂原液表面张力值相差不大,均小于 48 mN/m,相较于水来说,表面张力值减小了将近一半,但是从稀释 4 倍抑尘剂开始表面张力值开始明显增大。表面张力值小能够加速粉尘湿润,使其更容易被捕捉,从而提高抑尘效果。因此稀释 2 倍的抑尘剂具有最佳的实用性能。

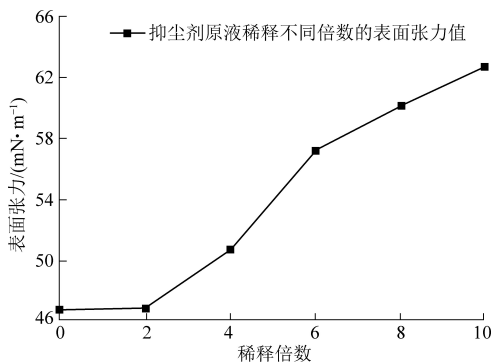


图 6 抑尘剂原液稀释不同倍数的表面张力

Fig.6 Surface tension of the original solution of dust suppressant diluted by different times

2.8 经济实用性分析

自制抑尘剂与市售抑尘剂的保湿性能对比见图 7,从图中可以看出,在经过 5 h 后,抑尘剂的保水率都迅速下降至 10% 以下,购买的两款市售抑尘剂更是降到 1% 以下,而自制稀释 2 倍的抑尘剂在经过 30 h 后,仍然保持在 4.5%~5% 的保水率,由此可见,自制抑尘剂的抑尘性能要好于这两款在售抑尘剂。此外,自制抑尘剂实际使用中的喷洒量约为 1 L/m²,通过成本核算,包括交通运输费在内,该抑尘剂的使用成本约为 1.25 元/m²,市售抑尘剂 1、2 的使用成本分别约为 0.84 元/m² 和 0.92 元/m²,和市售抑尘剂相比,虽然自制抑尘剂价格更高,但是其抑尘性能却是市售的约 5 倍,从长远角度看,自制抑尘剂抑尘性能好,原材料绿色,易降解,没有二次污染,具有更好的经济实用性。

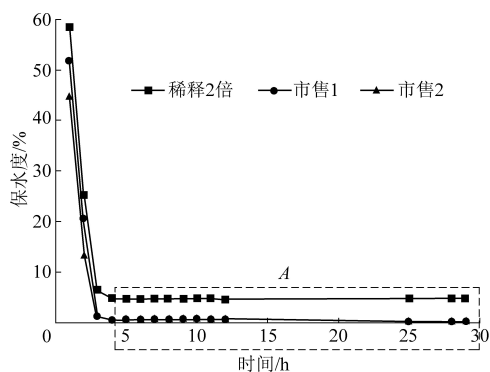


图 7 自制抑尘剂与市售抑尘剂保湿性对比

Fig.7 Comparison of moisture retention of prepared and commercial dust suppressants

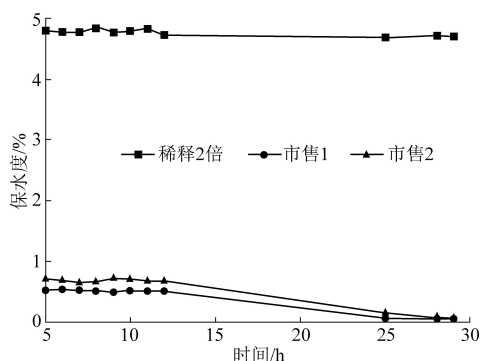


图 8 图 7 中 A 的放大图

Fig.8 An enlarged view of A in figure 7

3 结论

本研究在充分考虑制备工艺、经济环保和实际应用等因素基础上,利用水溶性淀粉、羟丙基甲基纤维素、海藻提取液和尼伯金复合酯等食品级原料,在常温下以低成本简单工艺制备了一种环保型道路施工抑尘剂。

通过测试,喷洒原液稀释 2 倍的抑尘剂的尘样,保湿性和吸湿性在经过 20 h 后,能稳定维持 4.5% 和 2.2% 左右,在 10 m/s 的风蚀下,经过碾压,风蚀率仅为 2.742%,粘度和表面张力分别为 12 mPa·s 和 46.90 mN/m,和原液相比差异小。表面张力小,湿润性好,增加了尘样间的粘结性,吸附性和保湿性,表现出良好的抑尘性能。

通过红外光谱测试,得出制备的抑尘剂的含氧官能团增多,增大了尘样亲水性,提高抑尘性能。通过扫描电镜显示,喷洒原液稀释 2 倍抑尘剂的尘样,表现出良好的黏连性,尘样间呈丝状紧密相连,有效抑制扬尘。

在保证抑尘效果的前提下,和市售的抑尘剂对比,原液稀释 2 倍的抑尘剂使用成本约 1.25 元/

m², 价格略高于市售抑尘剂, 但是其抑尘性能却是市售的约 5 倍, 维持时间更长, 原料均为可降解食品级材料, 具有经济实用、绿色环保等优点, 有望实现规模推广应用, 极大抑制道路施工扬尘, 有效保护大气环境。

参考文献

- [1] CHEN X, YU S, WANG L, et al. Common source areas of air pollution vary with haze intensity in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, 18 (7): 957-965.
- [2] 王翠萍. 露天矿边坡开挖对邻近铁路隧道的影响分析 [J]. *铁道建筑*, 2020, 60 (6): 78-81.
- [3] 郭建强, 刘玉成, 王友, 等. 新型临时道路施工技术与环境性研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2018 (1): 61-64.
- [4] 黎雅婷, 周景坤. 珠三角地区雾霾污染成因及改进对策分析 [J]. *特区经济*, 2020 (9): 27-29.
- [5] 邵龙义, 时宗波, 黄勤. 都市大气环境中可吸入颗粒物的研究 [J]. *环境保护*, 2000 (1): 24-26+29.
- [6] FENG R, ZHENG H. J. Evidence for regional heterogeneous atmospheric particulate matter distribution in China: implications for air pollution control [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, 17 (2): 1839-1847.
- [7] KIM K H, KABIR E, KABIR S. A review on the human health impact of airborne particulate matter [J]. *Environment International*, 2015, 74: 136-143.
- [8] YAO L, ZHAN B, XIAN A, et al. Contribution of transregional transport to particle pollution and health effects in Shanghai during 2013-2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 677 (10): 564-570.
- [9] 林方醒, 苏浩, 陈群, 等. 珠三角区域城市房建工程扬尘排放特征研究 [J]. *广东土木与建筑*, 2018, 25 (7): 56-58.
- [10] MEDEIROS M A, LEITE C M M, LAGO R M. Use of glycerol by-product of biodiesel to produce an efficient dust suppressant [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 180: 364-369.
- [11] ALI H, KHAN E. Environmental chemistry in the twenty-first century [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2017, 15 (2): 329-346.
- [12] JURICKA D, MUCHOVA M, ELBL J, et al. Construction of remains of small-scale mining activities as a possible innovative way how to prevent desertification [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13 (6): 1405-1418.
- [13] DANG X, SHAN Z. Dust pollution and control with leather waste [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2018, 16 (2): 427-437.
- [14] YU S. Water spray geoengineering to clean air pollution for mitigating haze in China's cities [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, 12 (1): 109-116.
- [15] 李永强, 周亚萍, 杨晓娟, 等. 复合型道路抑尘剂在城市道路中的应用及经济分析研究 [J]. *科学技术创新*, 2020 (27): 120-121.
- [16] 姚俊花. 道路抑尘剂在我国城市的应用现状与问题思考 [J]. *环境保护与循环经济*, 2020, 40 (3): 25-28+62.
- [17] 张江石, 刘绍灿, 范召究. 新型煤尘化学抑尘剂配方优选实验 [J]. *煤矿安全*, 2020, 51 (6): 31-36.
- [18] 梁文俊, 任思达, 马贺, 等. 环境友好型煤尘抑制剂的制备优化 [J]. *环境工程学报*, 2019, 11 (9): 5091-5096.
- [19] 来水利, 李玉珍, 蔡垒, 等. 改性羧甲基淀粉抑尘剂的微波制备及其应用 [J]. *应用化工*, 2019, 48 (2): 350-353+360.
- [20] SUN J, ZHOU G, GAO D, et al. Preparation and performance characterization of a composite dust suppressant for preventing secondary dust in underground mine roadways [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2020, 156: 195-208.
- [21] 李颖泉, 赵保卫, 董波, 等. 施工扬尘控制用速溶型抑尘剂性能研究 [J]. *安全与环境学报*, 2019, 19 (6): 2088-2094.