



文章栏目: 大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202202038

中图分类号 X513

文献标识码 A

梁文俊, 张志学, 杨雨涵. 以秸秆及植物种子制备的生态修复环保抑尘剂及其应用效果[J]. 环境工程学报, 2022, 16(10): 3346-3354.
[LIANG Wenjun, ZHANG Zhixue, YANG Yuhan. Preparation and application of environmental dust suppressant prepared from straw and seed for ecological restoration[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(10): 3346-3354.]

以秸秆及植物种子制备的生态修复环保抑尘剂及其应用效果

梁文俊[✉], 张志学, 杨雨涵

北京工业大学, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124

摘要 以农业废弃物秸秆和绿色植物种子为主要原料, 辅以少量淀粉、表面活性剂、碱等助剂, 研制出一种常温下即可快速配制的生态修复型环保抑尘剂。通过对抑尘剂粘度、渗透性等性能的评价, 确定抑尘剂制备原料秸秆、淀粉、表面活性剂和碱的最佳质量比为 20:7:2:5。抑尘剂的制备工艺简单、成本低廉, 且抗风蚀抗雨淋效果较好。在 5 级风蚀条件下, 抑尘剂的抗风蚀率大于 99%。经过中雨 (降雨量 $20 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) 雨淋后, 喷洒抑尘剂的壳体依旧紧实, 且结壳厚度未发生变化; 对喷洒抑尘剂的场地进行生态修复效果表征, 场地中所选种子生长茂盛, 这表明其修复效果显著。进一步地, 便携式风洞 (PI-SWERL) 测试结果表明, 在抑尘剂喷洒 60 d 后, 经过风速 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风力侵蚀, 抑尘剂的抑尘效率仍可保持在 90% 以上。本研究可为开发绿色、可持续的抑尘技术提供参考。

关键词 秸秆; 抑尘剂; 生态修复; 便携式风洞 (PI-SWERL).

根据 2020 年生态环境部对全国 337 个地级及以上城市的大气环境监测数据, 环境空气质量超标的城市为 135 个, 占全部城市数的 40.1%。多数城市的首要污染物为 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$, 年平均质量浓度分别为 $56 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[1]。扬尘污染是造成环境空气质量下降的重要因素, 其主要来源包括裸露土壤、建筑施工、堆场扬尘、矿山开采、道路扬尘, 以及已沉降扬尘的二次扬起等^[2-3]。安欣欣等^[4]在对北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 各组分污染特征及来源分析发现, 春天风沙季扬尘源对 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的贡献率为 11%; 李廷昆等^[5]在研究城市扬尘污染主要成因时发现, 扬尘源 PM_{10} 排放量可对标其他所有人为源的排放总量。因此, 扬尘污染的治理对于大气质量的提升具有重要意义。

目前, 应用较广泛的抑尘手段主要有洒水抑尘、防尘网抑尘以及各类抑尘剂抑尘等^[6-7]。洒水抑尘工艺简单, 但效果持续时间短、操作频繁, 且容易造成水资源浪费。防尘网在堆场、裸露土壤等场景应用较多, 但抑尘效率较差且成本较高。相比而言, 抑尘剂抑尘具有抑尘效率高、持续时间长等优势^[8-9]。BAO 等^[10]利用丙烯酸和丙烯酰胺制备淀粉接枝共聚物, 并采用化学改性法制备了一种高吸水性抑尘剂。LO 等^[11]研究出一种基于无毒材料的土壤稳定剂, 可在土壤中形成韧性和持久的双网络, 以提高土壤的机械韧性, 从而抑制粉尘产生。王洁茹等^[12]以海洋生物废弃物为原料制备出一种润湿性、粘结性良好的海洋生物型固土抑尘剂, 与百喜草种子混合应用于黄河滩,

收稿日期: 2022-02-10; 录用日期: 2022-03-11

基金项目: 北京市科学技术委员会科技计划项目 (Z191100009119002)

第一作者: 梁文俊 (1978—), 男, 博士, 教授, liangwenj@bjut.edu.cn; ✉通信作者

起到了良好的固土作用和生态修复效果。

抑尘剂的研究虽已取得一定成效，但关于生态修复型抑尘剂的研究较少。我国的耕地面积广阔，农作物秸秆的总产量高达 1.04×10^9 t，其中玉米秸秆占比高达 32.5%。随着现代工业的发展，秸秆的传统应用价值被液化气、加工饲料等取代，因此被大量遗弃焚烧，造成资源浪费和环境污染。我国自 2019 年开始在全国范围内全面推进秸秆等生物质的资源化^[13-15]。

本研究将高效抑尘和生态修复两个目标相结合，拟制备出一种常温下即可快速配制的生态修复环保型抑尘剂。以农业废弃物秸秆和绿色植物种子为主要原料，表面活性剂、碱和淀粉为抑尘剂，在抑尘固尘的同时利用种子生长实现修复。再通过粘度、分散度、表面张力等单因素指标的确定来探究各因素对抑尘剂抑尘性能的影响，以确定最优制备条件，并表征抑尘剂的结壳性能、抗风蚀与抗雨淋性能、抑尘效率和生态修复效果等，以为绿色、可持续性的抑尘技术开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 原料与设备

1) 制备原料。本研究抑尘剂的原料主要包括水、农业废弃物秸秆(华北地区农业固废)、淀粉(AR)、工业碱(例如 NaOH(AR))、表面活性剂(AR)、草本植物种子等。

2) 制备设备。本研究实验过程中使用到的实验仪器与设备包括：精密分析天平(BS210S)、精密电动搅拌器(JJ-1)、粘度测定仪(Viscotester C)、全自动界面张力仪(JYW-200B)、接触角测试仪(Dataphysics TP50)、扫描电镜(Hitachi S-4300)、电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9055A)、万能粉碎机(ZNH-180)、空压机(30L-750W)、便携式风洞(PISWERL)等。

3) 制备工艺。首先用秸秆粉碎机将秸秆粉碎至 2~3 mm，在容器中加入适量水，将淀粉、渗透剂、碱等按照一定质量比加入容器，待试剂充分溶解后向反应釜中加入一定质量比的秸秆碎片搅拌 20 min，从而使得秸秆在碱性环境下的纤维素结构被破坏，然后将溶液与植物种子在搅拌器中混合均匀，即得到生态修复型抑尘剂。制备流程如图 1 所示。

1.2 实验机理及方法

1.2.1 抑尘原理

秸秆是制备抑尘剂的主要原料，在抑尘剂中发挥链桥的作用。秸秆的加入可提高抑尘剂结壳后的强度，以增加整体结构的稳定性。同时，抑尘剂中植物种子的生长可起到生态修复效果，秸秆还可为植物种子的生长提供养料，从而同步实现有效抑尘和生态修复。

1.2.2 抑尘效果的影响因素

1) 粘度是抑尘剂的重要性能指标，用来衡量抑尘剂对于颗粒物的粘结效果。适当的粘度可增强抑尘剂分子间的联结性^[16]，从而使抑尘剂在喷洒后在抑尘面结壳更加紧实，以更好地发挥抑尘性能。本研究制备了一系列不同秸秆添加量的抑尘剂待测样品，采用 Thermo Viscotester C 粘度测定仪测试了秸秆添加量对抑尘剂粘度的影响；选用常温下可溶解的淀粉作为抑尘剂粘结剂，向淀粉溶液中加入碱作为助剂，并对淀粉和碱的质量对抑尘剂体系粘度的影响进行了表征。

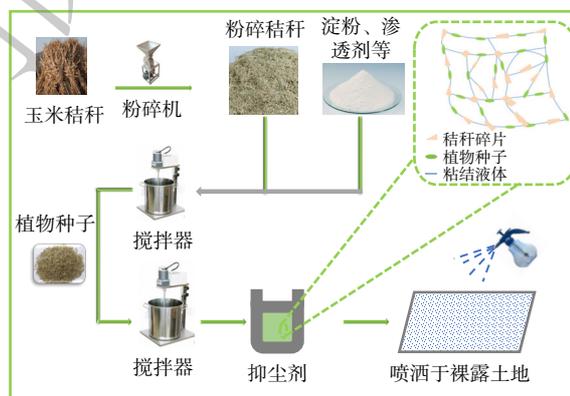


图 1 生态修复型抑尘剂制备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of preparation of ecological restoration dust suppressant

2) 抑尘剂需借助渗透剂提升其渗透性和润湿性。良好的渗透性能可增强抑尘剂在抑尘面的铺展能力,更好地与扬尘颗粒接触,从而达到抑尘目的^[17]。本研究选用工业上常用的表面活性剂作为渗透剂,采用JYW-200B全自动界面张力仪和Dataphysics TP50接触角测试仪对溶液的表面张力和接触角进行测试。

1.2.3 实验方法

在生态修复植物的选择时,首先需要遵循生态适应性、和谐性等原则,选用的植物要注意与周围环境相互协调,以保证植物形态与周围植物群落的相近性;其次,选用植物应具有耐旱、耐寒、耐热、耐贫瘠、耐盐碱、根系发达、生长周期短、成活率高等优点,从而保证在无人养护的条件下具有较强的存活力^[18-20]。本研究选用了绿化植物种常见的高羊茅、胡枝子、早熟禾、紫花苜蓿、混播四季青和耐践踏四季青6种植物,将6种植物种子分别采取应用于抑尘剂后播种和直接播种的方式播种于托盘,对2种播种方式的植物生长情况及发芽周期进行记录。

1.3 抑尘剂性能评价方法

1) 结壳性能表征。结壳时间是抑尘剂重要的应用指标之一,抑尘剂在喷洒后短时间内结壳,可在堆体表面形成一层覆盖壳体,以减少外界环境对粉尘的扰动,从而达到抑尘效果。考察了抑尘剂喷洒后在25℃、30℃、35℃、40℃、45℃和50℃温度下各表层干结成壳所需的时间,并使用扫描电镜对其结壳后的表面形貌进行了观察。

2) 抗风蚀与抗雨淋性能表征。抗风蚀性能是模拟在实际应用中抑尘剂喷洒并结壳以后在大风天气下的形态变化。将尘土堆成圆锥体来模拟实际料场中的堆体,将抑尘剂以2 mm、3 mm和4 mm的喷洒厚度喷洒在圆锥体表面,待其干燥结壳后,在5级风(8~10 m·s⁻¹)的条件下,持续吹6 h,分别记录其风蚀率。抗雨淋性能测试是模拟实际应用中抑尘剂在降雨条件下的形态变化:将尘土堆成底面直径为45 cm、高为15 cm的圆锥体来模拟实际料场中的堆体;再将抑尘剂喷洒在堆体表面;待干燥结壳后,采用自制设备在堆体上方以均匀小孔覆盖来模拟自然降雨(中雨条件下,即降雨量为20 mm·d⁻¹);再次结壳后观察降雨前后表面形态的变化。

3) 抑尘效率的表征。抑尘效率是评价抑尘剂性能的重要指标。采用便携式风洞(PI-SWERL)对抑尘剂喷洒3 d、10 d、30 d和60 d后的抑尘效率进行表征,并与洒水的抑尘效率进行对比。装置由风洞腔体、旋转环、DustTrak8530智能粉尘仪、控制箱和电脑组成,如图2(a)所示。PI-SWERL可通过不同转速模拟不同等级的风在抑尘面的剪切力来侵蚀土壤释放扬尘,同时,对PM_{2.5}质量浓度进行实时监测,并记录抑尘面的颗粒物累积排放潜势。在现场布置了5个测试区域(1.2 m×1.2 m),并对测试区域表层2.5 cm的土壤进行平整以备测试,如图2(b)所示。将测试出的PM_{2.5}累积排放潜势与喷水、未喷洒的裸地进行对比,并通过PM_{2.5}质量浓度计算抑尘效率,计算方法如式(1)所示。

$$\eta = \frac{C_1 - C_i}{C_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为抑尘效率,%; C_1 为裸地区域PM_{2.5}质量浓度,mg·m⁻³; C_i 为喷洒抑尘剂或水区域*i*天后的PM_{2.5}质量浓度,mg·m⁻³。

4) 生态修复效果的表征。通过研究植物生长情况发现,在植物种子中以混播四季青长势最好,其生长周期短,故选用混播四季青用于抑尘剂进行实际喷洒和生态修复效果研究。在校园内开辟了一块2 m×2 m的实验区域用于抑

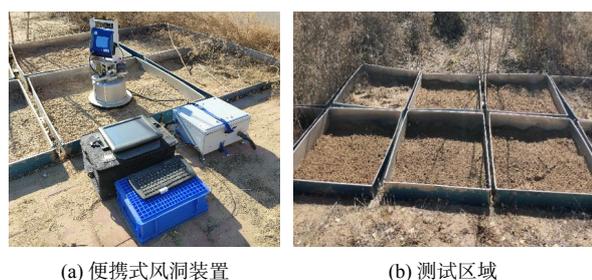


图2 抑尘效率测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dust suppression efficiency test

尘剂的喷洒，喷洒量为 $2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$ 。观察植物的长势，如图 3 所示。

2 结果与讨论

2.1 制备原料对抑尘性能影响研究

2.1.1 秸秆对抑尘剂性能影响

秸秆对抑尘剂性能影响测试结果如图 4 所示。随着秸秆质量的增加，粘度呈现出先增大后减小的趋势。这是由于秸秆的加入增强了液体分子间的交联性，因此粘度开始呈现增大的趋势。当秸秆的量继续增加，突破了交联的阈值，从而部分秸秆无法与抑尘剂液体有效交联。未交联的秸秆占据了抑尘剂分子的空间结构，因而粘度达到阈值后呈现出下降的趋势。表征结果表明，秸秆质量 6 g 即质量分数为 2% 是最佳秸秆添加量。

2.1.2 粘结剂和碱对抑尘剂性能影响

图 5 是粘结剂和碱对抑尘剂性能影响的测试结果。由图 5(a) 可知，随着淀粉质量的增加，抑尘剂的粘度越来越高。这是因为淀粉溶于水后有糊化作用，可显著增加溶液的粘度。由图 5(b) 可知，随着碱质量的增加，抑尘剂的粘度呈微量增加趋势，但对粘度影响有限。这是由于碱性环境有利于淀粉的水合溶解，加速



图 3 抑尘剂喷洒播种喷洒示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dust suppressant spraying seeding

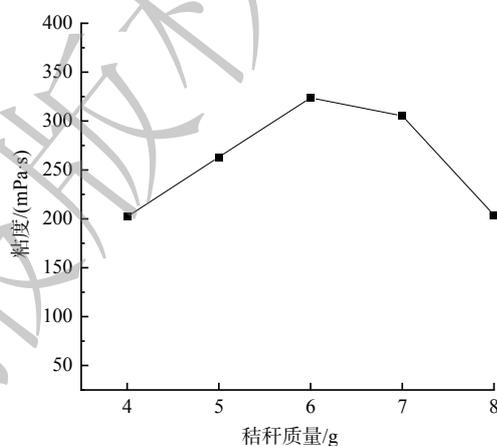
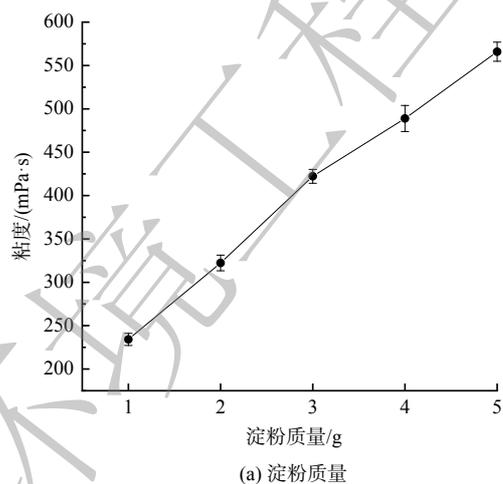
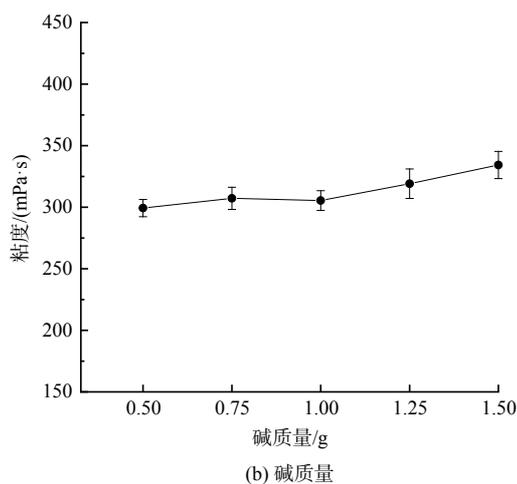


图 4 秸秆质量影响测试结果

Fig. 4 Test results of straw quality influence



(a) 淀粉质量



(b) 碱质量

图 5 淀粉和碱质量影响测试结果

Fig. 5 Test results of starch and alkali mass influence

纤维素化合物的降解过程，同时，碱性环境有利于秸秆纤维素结构的破坏、软化秸秆，从而增强溶液体系的韧性^[21-22]。

在实际应用中，适当的粘度有利于提高结壳强度、增强抑尘效果，而粘度过低或过高都不利

于喷洒抑尘剂。图6表明,随着粘度的增加,分散性能先增加后降低。这是由于粘度过低会影响抑尘剂溶液整体的联结性,除不能有效粘结粉尘颗粒物外,也不能抵消秸秆在抑尘剂中的浮力,出现分层现象;粘度过高会导致抑尘剂溶液过于粘稠,影响喷洒的均匀性且易堵塞喷洒管路,降低抑尘效率。本研究中,当粘度为250~350 mPa·s时抑尘剂的分散度最好。因此,在抑尘剂制备材料中,确定淀粉的质量分数为0.7%、碱的质量分数为0.5%。

2.1.3 渗透剂对抑尘剂性能影响

图7表明,随着表面活性剂质量分数的增加,溶液的表面张力和接触角呈现出先减小后趋于平缓的趋势。这是因为当表面活性剂分子进入水溶液后,疏水基与亲水基相互平衡,疏水基面向空气,亲水基插入水相;当表面活性剂分子浓度达到一定值时,分子富集在溶液表面,形成致密的界面膜,降低了表面张力^[23-24]。另外,接触角越小,溶液在抑尘面的铺展能力越强,故表面活性剂的加入显著增强了抑尘剂的润湿性能,使其能有效润湿粉尘,使其粘附团聚、密度增加,从而达到抑尘目的。当达到表面活性剂的临界胶束浓度后,溶液的表面张力降至最低值,此时若再提高表面活性剂浓度只会导致体相浓度增加,而溶液表面张力不再降低^[25]。在本研究中,接触角在表面活性剂质量分数为0.2%时达到拐点,此时的表面张力已达到阈值,说明此时抑尘剂具有良好的润湿性能。

2.1.4 生态修复用植物种子的选择

表1表明,应用于抑尘剂后播种种子的发芽时间要晚于直接播种的种子。这是由于抑尘剂的粘度要远高于水,喷洒抑尘剂后土壤会出现结壳,从而导致该区域种子的发芽时间受到影响。图8表明,除早熟禾外,其他几种植物生长状况良好,且应用于抑尘剂后播种与直接播种种子的长势无明显差别。这说明本研究抑尘剂对于植物种子的生长无不良影响,可与多种绿色植物种子混合使用,亦可配合多种植物种子混播使用。此外,通过对植物生长情况的初步研究,在选取的植物种子中混播四季青长势最好,其生长周期短,且价格低廉,因此,初步选择混播四季青用于抑尘剂,并进行实际喷洒和生态修复效果的研究。

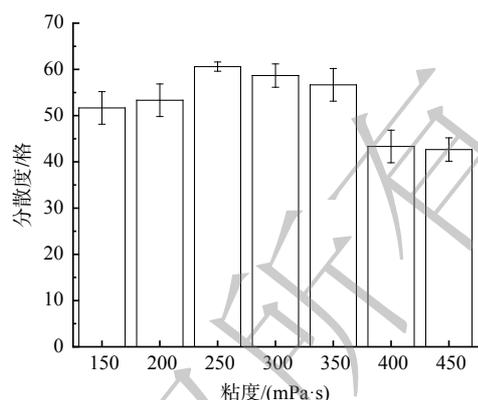


图6 抑尘剂粘度与分散度关系图

Fig. 6 Relationship between the viscosity and dispersion of dust suppressant

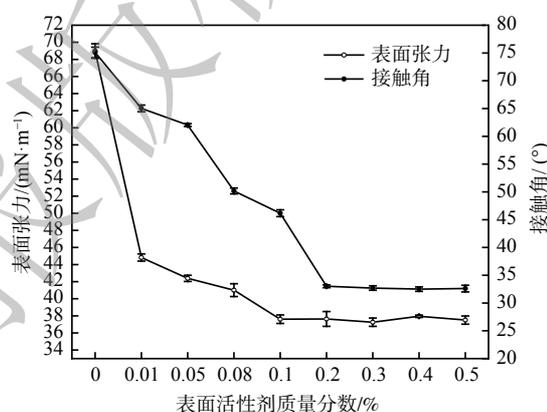


图7 表面活性剂质量影响测试结果

Fig. 7 Test results of surfactant mass influence

表1 喷洒后植物发芽时间的测试

Table 1 Test of germination time of plants after spraying

植物名称	喷洒抑尘剂的天数/d	喷洒水的天数/d
紫花苜蓿	7	4
混播四季青	9	6
耐践踏四季青	9	7
高羊茅	10	9
早熟禾	18	18
胡枝子	18	18

2.2 抑尘剂性能分析

2.2.1 结壳性能分析

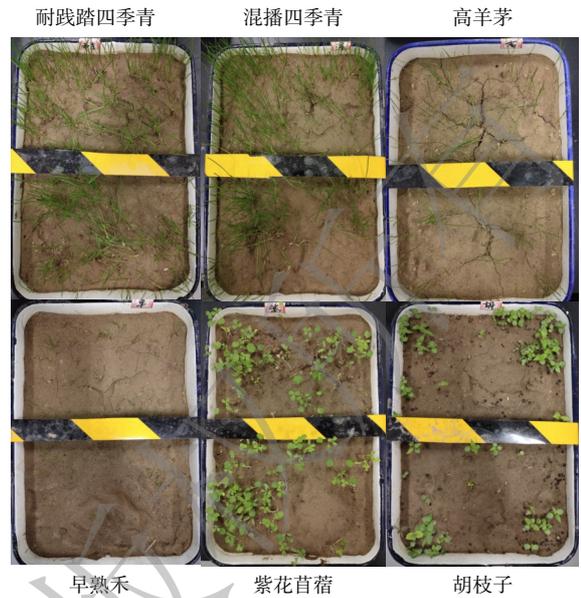
图 9 表明，在不同温度条件下，抑尘剂喷洒后的结壳时间会随着温度的升高而变得越来越短。在 25 ℃ 下，结壳时间最长大于 70 min；当气温在 35 ℃ 左右时，结壳时间缩短至 1 h 以内；当温度达到 50 ℃ 时，结壳时间最短，为 20 min。这说明抑尘剂喷洒后可在短时间内干燥结壳，起到抑尘作用。通过扫描电镜 (SEM) 对抑尘面的微观结构表征结果 (图 10) 发现，喷洒抑尘剂前后粉尘表面结构存在明显差异。在喷洒抑尘剂之前，粉尘总体呈现松散状态，颗粒之间存在大量间隙，缺乏致密性；在喷洒抑尘剂之后，喷施抑尘剂使得颗粒呈现紧密连接的网状结构，小颗粒粘在大颗粒上，明暗程度相对均匀，表现出较强的机械性能。这说明粉尘颗粒在表面活性剂的作用下得到了有效润湿，颗粒被黏附在抑尘面，即抑尘剂增强了整体结构的稳定性，使粉尘不易扬起。

2.2.2 抗风蚀与抗雨淋性能分析

图 11 为抑尘剂抗风蚀性能测试结果。每条网线代表抑尘剂的风蚀率。当抑尘剂结壳后，在 5 级风 (8~10 m·s⁻¹) 的条件下，持续吹 6 h，喷洒量越厚、风蚀率越低。但 3 种喷洒厚度堆体风蚀率均不到 1%，这说明抑尘剂干燥后形成的壳体正如 SEM 所示，粉尘颗粒得到有效润湿并黏附在一起，展现出较强的机械性能，具有良好的抗风蚀的能力，因此抑尘剂 2 mm 的喷洒厚度即可满足要求。经过在中雨条件 (即降雨量为 20 mm·d⁻¹) 下抗雨淋性能的测试，结果如图 12 所示。对比降雨前后堆体的表面形态发现，在初次干燥后堆体表层形成了一层保护壳体，壳体在经过雨淋后未出现松散现象；再次干燥后，表层壳体依旧紧实，覆盖性良好；雨淋前后壳体的厚度均为 7 mm，未出现变化。这说明抑尘剂结壳后具有良好的抗雨淋性能。

2.2.3 抑尘效率分析

各区域风蚀扬尘 PM_{2.5} 的累计排放潜势如图 13 所示。空白区域在经过风洞腔体不同转速的连续侵蚀后，其 PM_{2.5} 累计排放为 887.07 mg·m⁻²，经过洒水处理的区域在相同条件下累计排放值为 728.95 mg·m⁻²，相比于空白区域略有降低。而喷



注：托盘上半部分为应用于抑尘剂后播种，下半部分为直接播种。

图 8 播种植物的生长状况

Fig. 8 Growth condition of plant

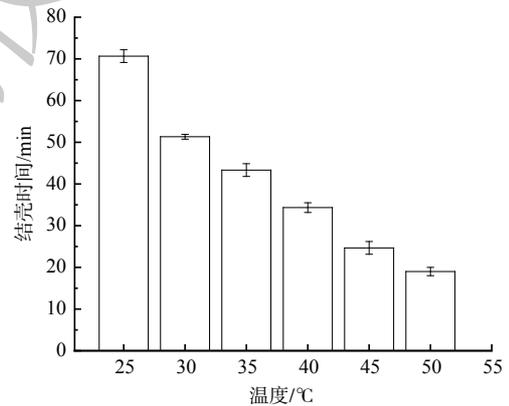
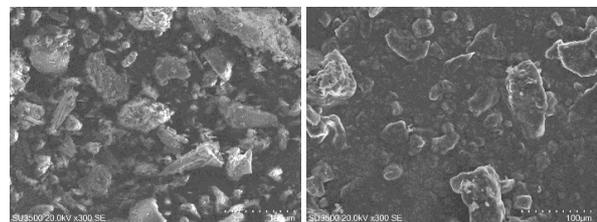


图 9 不同温度下结壳时间的测试

Fig. 9 Test results of crusting time at different temperatures



(a) 喷洒抑尘剂前 (300倍) (b) 喷洒抑尘剂后 (300倍)

图 10 抑尘剂喷洒前后尘样表面扫描电镜结果

Fig. 10 Surface SEM before and after dust suppressant spraying

洒抑尘剂的区域 $PM_{2.5}$ 累计排放大幅降低, 在喷洒 3 d、10 d、30 d 和 60 d 后, $PM_{2.5}$ 累计排放分别为 $5.49 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $17.80 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $18.77 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $70.27 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这说明 $PM_{2.5}$ 的排放得到有效控制, 故抑尘剂喷洒结壳后可有效抵抗大风侵蚀。

由图 13 可知, 在整个风蚀模拟过程中, 占全年总天数约 81.9% 的极大风速 ($\leq 10.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应转速 $\leq 3\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 条件下, $PM_{2.5}$ 累积排放潜势占总排放潜势的 0.38%, 而占比较小的极大风速 ($\geq 15.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应转速 $\geq 5\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 条件下, 对应的累积排放潜势占总排放潜势的 86.91%。转速大于 $4\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 后, 累积排放潜势有了明显上升趋势, 因此, 本研究仅讨论 PI-SWERL 模拟极大风速 $\geq 13.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应转速 $\geq 4\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 抑尘效率的变化。如表 2 所示, 洒水的抑尘效率会随着风洞转速的提高而越来越低, 当转速达到 $6\ 000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 抑尘效率仅为 5.9%, 且有效时间短; 喷洒抑尘剂后, 其在 30 d 内的抑尘效率可达 99% 以上, 而 60 d 内抑尘效率略有降低, 但仍可达到 90%。抑尘剂的抑尘效率会

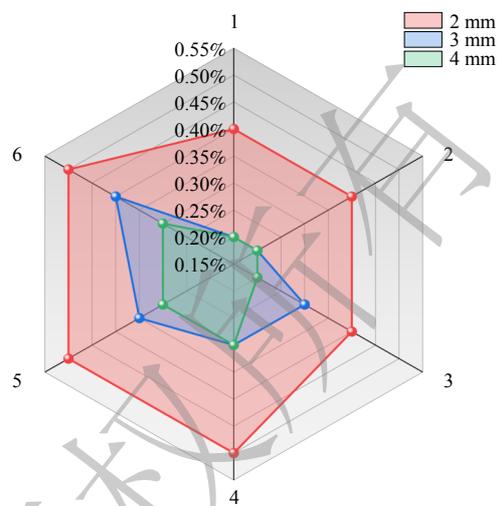


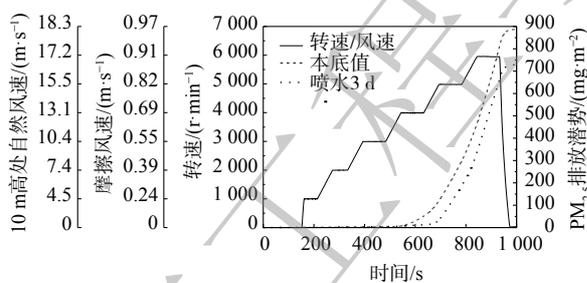
图 11 抗风蚀性能的测试结果
Fig. 11 Test result of wind erosion resistance



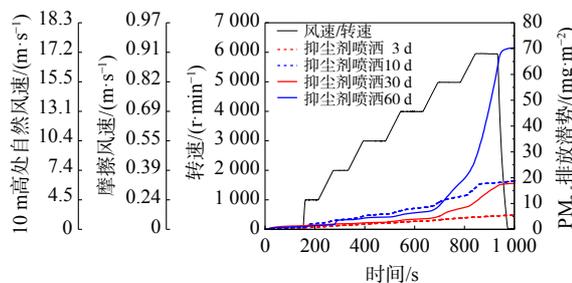
(a) 降雨前 (b) 降雨后

图 12 抗雨淋性能的测试结果

Fig. 12 Test result of rain resistance



(a) 空白与喷水区域 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势



(b) 喷洒抑尘剂区域 $PM_{2.5}$ 累积排放潜势

图 13 不同区域 $PM_{2.5}$ 的累积排放潜势

Fig. 13 Cumulative emission potential of $PM_{2.5}$ in different regions

表 2 抑尘效率测试结果

Table 2 Dust suppression efficiency test results

转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	洒水后的抑尘效率 $\eta/\%$		喷洒抑尘剂后的抑尘效率 $\eta/\%$		
	喷水 3 d 后	喷水 3 d 后	喷洒 10 d 后	喷洒 30 d 后	喷洒 60 d 后
4 000	87.4	98.9	96.9	98.4	97.1
5 000	15.7	99.6	98.5	98.2	94.7
6 000	5.9	99.8	99.3	98.2	90.0

随着转速的提高而增长，这是由于在低转速时，相同条件下的扬尘本底值较低，而随着转速提高，本底值出现了大幅上升，而喷洒抑尘剂的区域 $PM_{2.5}$ 浓度变化不大，因此，高转速时的抑尘效率要大于低转速时的抑尘效率。虽然风洞腔体模拟与实际抑尘场景存在差异，但所有的测试均在相同环境中进行，且检测数值稳定性好，所以能实现不同抑尘剂的抑尘效率在同一实验体系下进行比较和评价。测试结果表明，相比于相同方法测试的其他抑尘剂^[26]，本研究制备的抑尘剂抑尘效果更佳。

2.2.4 生态修复效果分析

通过将混播四季青用于抑尘剂制备，并对实际喷洒后的生态修复效果进行研究，结果(图 14)表明抑尘剂喷洒区域的植物生长状态正常。这说明抑尘剂对于植物的生长并无影响，本研究制备的抑尘剂与种子混合后具有良好的生态修复效果。实验区域内植物存在长势不均匀的情况，这是由于抑尘剂在喷洒时无法做到使植物种子分布绝对均匀，且植物种子也存在失活情况。草坪在形成的过程中亦需进行多次补播，因此，生长不均的情况可通过补播来改善。



图 14 生态修复效果

Fig. 14 Ecological restoration effect

3 结论

1) 通过对所制备抑尘剂的性能评价，确定秸秆、淀粉、表面活性剂和碱的最质量配比为 20:7:2:5。该抑尘剂具有良好的渗透性能、抗风蚀和抗雨淋性能。

2) 制得抑尘剂的抑尘效果显著，在 $17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风力条件下其抑尘效率可达到 99.8%，在喷洒 60 d 以后，其抑尘效率亦可保持在 90% 以上。

3) 该抑尘剂具有良好的生态修复效果，多种常见的植物种子均可适用于此类型的抑尘剂。

4) 该抑尘剂制备工艺简单、成本低廉，解决了传统液体抑尘剂运输成本高、不便储存的难题，实现了废物资源的再利用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2020年全国生态环境质量简况[R]. 北京, 2021. <https://www.mee.gov.cn>.
- [2] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 2011, 36(5): 15-19.
- [3] ASKARIYEH M H, VENUGOPAL M, KHREIS H, et al. Near-Road Traffic-Related Air Pollution: Resuspended $PM_{2.5}$ from Highways and Arterials[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(8): 2851.
- [4] 安欣欣, 曹阳, 王琴, 等. 北京城区 $PM_{2.5}$ 各组分污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2251-2261.
- [5] 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 等. 城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路[J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1323-1331.
- [6] 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.
- [7] 郭秀秀. 建筑施工扬尘对生态环境的污染及整治措施研究[J]. *环境科学与管理*, 2021, 46(9): 123-127.
- [8] 王林凯, 郭红霞, 秦建平, 等. 风蚀扬尘抑尘剂制备及其抑尘效果[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(12): 3460-3467.

- [9] FAN T, ZHOU G, WANG J. Preparation and characterization of a wetting-agglomeration-based hybrid coal dust suppressant[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 113: 282-291.
- [10] BAO Q, NIE W, LIU C Q, et al. Preparation and characterization of a binary - graft - based, water - absorbing dust suppressant for coal transportation[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(7): 47065.
- [11] LO C, TIRKOLAEI H K, HUA M T, et al. Durable and ductile double-network material for dust control[J]. *Geoderma*, 2020, 361(C): 1-10.
- [12] 王洁茹. 海洋生物型固土抑尘剂的研制、性能表征及其在黄河滩区的应用研究[D]. 青岛: 山东大学, 2021.
- [13] 石祖梁, 贾涛, 王亚静, 等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(9): 32-37.
- [14] 周治. 我国农业秸秆高值化利用现状与困境分析[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(2): 9-16.
- [15] 候其东, 鞠美庭. 秸秆类生物质资源化技术研究前沿和发展趋势[J]. *环境保护*, 2020, 48(18): 65-70.
- [16] FAN T, LIU Z Y, OUYANG J T, et al. Synthesis and performance characterization of an efficient coal dust suppressant for synergistic combustion with coal dust[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 269: 110854.
- [17] ZHOU Q, QIN B T, MA D, et al. Novel technology for synergetic dust suppression using surfactant-magnetized water in underground coal mines[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 109: 631-638.
- [18] 符治明, 张晓龙, 李洪青, 等. 贵州高速公路岩石边坡常用绿化植物幼苗生长规律实验研究[J]. *贵州林业科技*, 2012, 40(4): 24-29.
- [19] 孙盛年. 高速公路边坡绿化植物种类的搭配及应用[J]. *现代农业科技*, 2019(24): 123-124.
- [20] 张锡国, 阿力坦巴根那, 余海龙. 赤通高速公路边坡生态恢复中的植物选择[J]. *防护林科技*, 2010(4): 96-98.
- [21] 包秀春, 刘金炜, 赵栋梁, 等. 纤维素结晶度与粗糙度关系的研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(4): 83-86.
- [22] 李辉勇, 金密, 魏琴琴, 等. 弱碱性过氧化预处理对稻草秸秆酶解糖化的影响[J]. *生物质化学工程*, 2011, 45(5): 11-16.
- [23] WANG P F, TAN X H, ZHANG L Y, et al. Influence of particle diameter on the wettability of coal dust and the dust suppression efficiency via spraying[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 132: 189-199.
- [24] ZHOU G, QIU H, ZHANG Q, et al. Experimental investigation of Coal Dust Wettability Based on Surface Contact Angle[J]. *Journal of Chemistry*, 2016, 2016: 9452303.
- [25] 张晓光. 表面张力和电导法对比测定表面活性剂临界胶束浓度[J]. *化学教育(中英文)*, 2021, 42(18): 134-136.
- [26] 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 等. 风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 3935-3941.

(责任编辑: 靳炜)

Preparation and application of environmental dust suppressant prepared from straw and seed for ecological restoration

LIANG Wenjun*, ZHANG Zhixue, YANG Yuhan

Beijing Key Laboratory of Regional Air Composite Pollution Prevention and Control, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

*Corresponding author, E-mail: liangwenj@bjut.edu.cn

Abstract Using agricultural waste straw and green plant seeds as the main raw materials, supplemented with a small amount of starch surfactant alkali and other additives, a kind of environmental protection dust suppressant for ecological restoration was developed. Through the evaluation of viscosity permeability and other properties of dust suppressant, the optimal mass ratio of straw, starch, surfactant and alkali was determined to be 20:7:2:5. The preparation process of dust suppressant was simple, the cost was low, and the effect of wind erosion and rain resistance was significant. Under the condition of wind erosion at grade 5, the wind erosion resistance rate was more than 99%. After moderate rain (rainfall of 20 mm·d⁻¹), the shell sprayed with dust suppressor was still compact, and the shell thickness did not change. The ecological restoration effect of the site sprayed with dust suppressor was characterized, and the selected seeds in the site grew luxuriant, which indicated that the restoration effect was significant. Furthermore, the test result of portable wind tunnel (PI-SWRL) showed that after 60 days of dust-suppressor spraying, the dust suppression efficiency remained more than 90% after wind erosion at a wind speed of 17.2 m·s⁻¹.

Keywords straw; dust suppressant; ecological restoration; portable wind tunnel (PI-SWRL).