

# 基于声波团聚的热脱附装置除尘的关键影响因素研究

钟雲濠<sup>1</sup>, 吴昂键<sup>1</sup>, 顾海林<sup>2</sup>, 池作和<sup>2</sup>, 陈彤<sup>1</sup>, 张光学<sup>2</sup>

(1. 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 210027;

2. 中国计量大学 能源工程研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对土壤热脱附装置存在着严重的扬尘问题,将声波团聚联合喷雾的方法应用于热脱附装置的除尘,研究了声频、粉尘初始浓度、声压级和喷雾流量等对除尘效果的影响(粉尘的平均粒径小于10 μm)。实验发现,在声频为1 400 Hz、喷雾浓度为1.0 L·m<sup>-3</sup>的条件下,团聚室的除尘效率在60 s内达到98%;声压级从145 dB提高至153 dB后,除尘效率提高了38%;SEM结果表明,声波处理后的颗粒被碾碎并团聚;添加喷雾可以提高除尘效率,但不同的喷雾浓度对最终的除尘效率影响不大,施加喷雾后的最佳声频仍为1 400 Hz;粉尘和喷雾的初始浓度越大,团聚前期的除尘速率和最后的除尘效率越大,当喷雾浓度为2.0 L·m<sup>-3</sup>时比没有喷雾时的除尘效率提高了44%,说明声波团聚对高浓度气溶胶的使用效果更好,研究结果可为热脱附装置除尘技术的研发提供参考。

**关键词:**热脱附;声波团聚;透光率;除尘效率;喷雾

中图分类号:X701.2

文献标识码:A

## Experimental studies on key parameters of the dust removal of soil thermal desorption device using acoustic agglomeration

ZHONG Yunhao<sup>1</sup>, WU Angjian<sup>1</sup>, GU Hailin<sup>2</sup>, CHI Zuohe<sup>2</sup>, CHEN Tong<sup>1</sup>, ZHANG Guangxue<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China;

2. The Institute for Energy Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** In order to solve the serious dusting problem for soil thermal desorption device, the method of acoustic agglomeration combined spray was applied to the dust removal of the thermal desorption device. The effects of sound frequency, initial dust concentration, sound pressure level and spray flow rate on the dust removal efficiency (average particle size of dust less than 10 μm) were studied. The experimental results showed that under the condition of sound frequency of 1 400 Hz and spray concentration of 1.0 L·m<sup>-3</sup>, the dust removal efficiency of the agglomeration chamber reached 98% within 60 s. When the sound pressure level was increased from 145 dB to 153 dB, the dust removal efficiency is increased by 38%. SEM results showed that the particles were crushed and aggregated after acoustic wave treatment. Adding spray could improve the dust removal efficiency, but the effect of spray concentration on final dust removal efficiency was not significant. The optimal sound frequency after spraying was 1 400 Hz. The higher initial concentration of dust and spray could lead to the higher dust removal rate and the final dust removal efficiency in the early stage of agglomeration. When the spray concentration was 2.0 L·m<sup>-3</sup>, the dust removal efficiency was 44% higher than that without spray, indicating that the acoustic wave agglomeration had a better effect on the use of high concentration aerosol. The results of this paper could offer useful information in the investigation and development of dust removal technol-

收稿日期:2022-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51876197);国家重点研发计划项目(2018YFC1802105)

第一作者:钟雲濠(2001—),男,四川成都人,硕士,主要研究方向为等离子催化CO<sub>2</sub>转化。E-mail:1245598510@qq.com

通讯作者:张光学(1982—),男,浙江湖州人,博士,教授,主要研究方向为燃料清洁利用、颗粒物控制、气固多相流。E-mail:zhangguangxue@

cjlu.edu.cn

ogy of thermal desorption device.

**Keywords:** Thermal desorption; Acoustic agglomeration; Light transmittance; Dust removal efficiency; Spray

## 0 引言

近年来,随着我国重工业的大力发展,国内大量的土壤遭受了严重的污染。数据表明<sup>[1]</sup>,截至2021年,我国约有34%的土壤存在轻度污染的情况,约48%的土壤存在重度污染的情况,因污染严重而导致无法使用占23%。为解决愈发严重的土壤污染问题,我国已有的污染土壤处理技术包括热脱附技术、气相抽提技术、氧化/还原技术、土壤淋洗技术、生物修复技术<sup>[2]</sup>等等。其中热脱附技术已在我国形成了较为成熟的产业链,其通过直接或间接加热的方式,将土壤中的污染物加热至一定温度,使其蒸发成气态与土壤分离,再通过尾气处理系统将尾气处理后达标排放,实现土壤修复<sup>[3]</sup>。土壤经热脱附装置处理后,温度在300~500℃之间,通常在出料口安装降温除尘装置,来将土壤温度进冷却至80℃左右,在实际过程中,粒径较小的土壤颗粒会被蒸发的水蒸气携带,从出料口溢出形成烟雾,从而对周围环境造成污染。因此,对热脱附装置出料口溢出的小颗粒土壤进行沉降和收集十分重要。

声波团聚(Acoustic agglomeration)是指在含尘气体上施加高强度声场,使气溶胶之间发生相对运动,直至碰撞和团聚合并的技术。声波团聚可以使颗粒的数目浓度大幅减少,目前已被应用于多个场合的除尘和消烟。雷岩岩等<sup>[4]</sup>在烧结机尾设计并安装的声波团聚耦合旋流除尘装置,可以将烧结机尾的颗粒物排放浓度降低77%左右。南京某公司<sup>[5]</sup>研发的复合声波团聚高效除尘技术,通过声波团聚将烟气中细颗粒物的粒径增大,然后通过多相物质分离工艺实现大颗粒物的脱除,目前该技术已用于脱硫塔的改造,可将烟囱净烟气的粉尘排放浓度降低至5 mg/Nm<sup>3</sup>以下,达到粉尘超低排放标准。

国内外针对声波团聚的研究主要有除尘领域应用和团聚机理研究两方面。在除尘领域应用方面,张光学等<sup>[6]</sup>发现声波团聚存在最佳声频,并通过实验测得燃煤飞灰的最佳声频在1400~1700 Hz之间。DONG Z<sup>[7]</sup>等将声波团聚实验装置分别和静电除尘器和布袋除尘器连接,发现在1400

Hz、148 dB的声场下,可以使静电除尘器的除尘效率从89.05%提升至99.28%,使布袋除尘器的除尘效率从91.29%提升至99.19%。GUOQING S等<sup>[8]</sup>使用三种不同粒径分布的煤粉灰进行声波团聚,发现对于粒径分布较为集中的单峰颗粒,团聚效率随声压级增大而增大,对于粒径分布范围较大的双峰颗粒,在115 dB和120 dB时存在最佳声压级,团聚效率分别为25%和55%。陶威等<sup>[9]</sup>将喷雾应用到声波团聚中,发现声频为900 Hz时,在1.2 L/h的喷雾流量下,150 dB声波的团聚效率由无喷雾时的29.75%上升到了60.63%,从而降低声波团聚的能耗。赵天昊等<sup>[10]</sup>基于声波团聚和喷雾,设计了一个破碎机除尘装置,并应用于柴油机尾气的净化处理,发现在水蒸气含量为6%、声频为21 kHz的条件下,团聚效率比没有水蒸气时高30%。曹志勇等<sup>[11]</sup>将声波团聚技术应用于消除火灾烟雾,发现在1000 Hz、140 dB的声场下,烟雾的透光率在20 s内从22%提高到了90%,最佳声频在1000~2000 Hz之间。

在声波团聚的机理研究方面, Temkin等<sup>[12]</sup>通过实验总结了不可压缩粘性流体的颗粒挟带系数。Dong等<sup>[13]</sup>发现颗粒重力对于声波中粒子的碰撞效率有着显著影响。Dianov等<sup>[14]</sup>提出声波尾流效应,主要内容为:声场中的颗粒沿运动方向的流场前后不对称,在颗粒尾部存在低压区域,如果其他颗粒出现在颗粒尾部,其受到的阻力减小,会加速向该颗粒靠近,半个周期后,颗粒运动方向反向,角色互换但仍然相互靠近,经过几个周期后,两个颗粒有可能碰撞团聚。张光学等<sup>[15]</sup>构建了一种新的声波尾流模型,对模型进行了边界条件的理论分析和CFD模拟,计算了两个粒子在水平声场中的运动轨迹,发现该模型与Dianov的模型相比更加准确。

本文研究了声频、声压级、喷雾浓度等关键因素对除尘效果的影响,研究成果有助于揭示喷雾协同声波除尘的微观机理,并为喷雾联合声波除尘技术的研究提供数据参考。

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置和除尘效率的计算

实验装置如图1所示,各装置的型号和生产

厂家信息见表1。

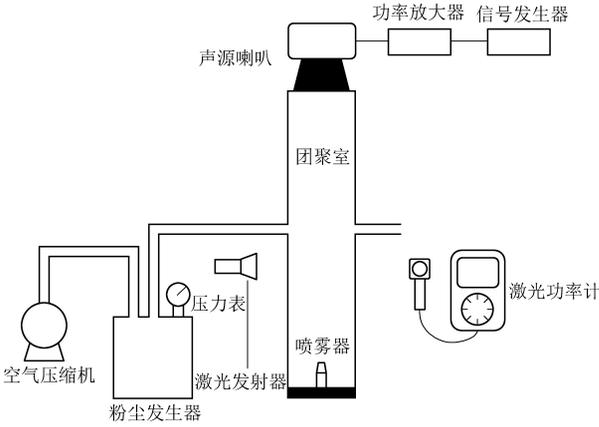


图1 研究声波团聚除尘关键影响因素的实验装置

Fig.1 Experimental setup for studying the key parameters of acoustic agglomeration dust removal

表1 装置种类、型号和生产厂家

Table 1 Types, models and manufacturers of devices

| 种类     | 型号               | 厂家      |
|--------|------------------|---------|
| 空气压缩机  | 铜 980W-30L       | 奥突斯     |
| 气溶胶发生器 | 汇分 7991          | 汇分      |
| 信号发生器  | VC2015H          | 胜利仪器    |
| 功率放大器  | RMX 2450 MY-2100 | MEILISL |
| 声源喇叭   | 铷磁 75 芯          | BNB     |
| 声级计    | AWA 5661-3       | 爱华      |
| 激光功率计  | SANWA LP10       | 三和仪表    |

奥突斯小型空气压缩机向汇分 7991 粉尘发生器内泵入压缩空气,使粉尘从发生器出口喷出,经管道进入到团聚室内。团聚室为一个内径 120 mm、高 220 mm 的圆筒,顶部放置声源喇叭,BNB 铷磁声源喇叭连接 RMX 2450 MY-2100 功率放大器和 VICTOR2015H 信号发生器。喷头位于团聚室底部,最大流量为 300 mL/h,孔径为 0.5 mm,喷雾粒径约在 1~3  $\mu\text{m}$  左右。信号发生器用于控制声波的频率,音频功率放大器用于控制声压级大小,AWA5661-3 声级计用于测量团聚室的声压级,量程为 30~160 dB。使用激光发射器和 SANWA LP10 激光功率计,通过测量团聚室的透光率,计算团聚室的气溶胶浓度,来定量描述声波团聚的除尘效率,发射器发射的激光穿过团聚室中心位置,入射到激光功率计上,激光功率计的测量范围为 0.1  $\mu\text{W}$ ~40.40 mW,激光功率计和团聚室透光率的关系如下式:

$$T(\%) = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (1)$$

式(1)中, $T$ 为团聚室透光率, $I$ 为激光功率计的实时示数, $I_0$ 为没有粉尘和喷雾时激光功率计的示数。

Manoucheri 等<sup>[16]</sup>提出了透光率和气溶胶体积分数之间的关系式:

$$\frac{V_t}{V_0} = \frac{\ln T_t}{\ln T_0} \quad (2)$$

式(2)中: $V_t$ 和  $V_0$ 分别为声波作用时间为  $t$  时的气溶胶体积分数和初始时气溶胶体积分数,%; $T_t$ 和  $T_0$ 分别为团聚室  $t$  时刻的透光率和初始透光率。

根据上式,定义声波团聚前后气溶胶浓度的改变率为除尘效率  $\eta$ ,如下式所示:

$$\eta = \frac{V_0 - V_t}{V_0} = \left(1 - \frac{\ln T_t}{\ln T_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: $\eta$ 为  $t$  时刻声波团聚的除尘效率,%; $\eta$ 值越大,说明在 0~ $t$  时间内粉尘浓度的降低程度越大,除尘效果越好。

## 1.2 粉尘样品的粒径分布

实验使用的粉尘取自国内某热脱附装置出料口的砂质壤土,取得的壤土经 88  $\mu\text{m}$  筛网过滤,得到实验使用的粉尘样品,使用 Beckman Coulter LS13320 激光粒度仪测量粉尘样品的粒径分布,测量结果如图 2 所示。由测量结果可知,约 90.7% 颗粒的粒径在 1  $\mu\text{m}$  以内。使用电子天平和量筒测得粉尘的密度,约为 1.9  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

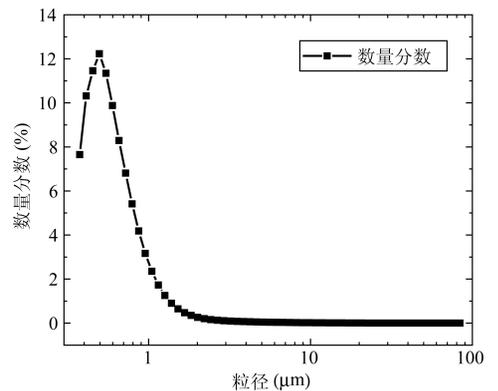


图2 粉尘的粒径分布

Fig.2 Particle size distribution of soil dust

## 2 实验结果与分析

### 2.1 声频对除尘效果的影响

图 3 显示了在粉尘浓度为 600  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、声压级为 145 dB 的条件下,改变声频后粉尘的透光率随声波作用时间的变化。

由图可知,没有声波作用时,团聚室的透光率

变化缓慢,60 s 内仅仅提升至 0.38。施加声波后,透光率在初期迅速增大,1 400 Hz 时,透光率在 30 s 内从 0.38 增加至 0.82。随着声波团聚的进行,透光率的增大速率逐渐减缓,这是因为初始时粉尘浓度大,颗粒之间的距离较小,发生碰撞和团聚的时间较短,沉降速度快,所以透光率变化大;随着团聚过程的进行,粉尘的浓度逐渐降低,颗粒间距变大,发生碰撞和团聚的时间增加,沉降速度变慢,所以透光率变化缓慢。

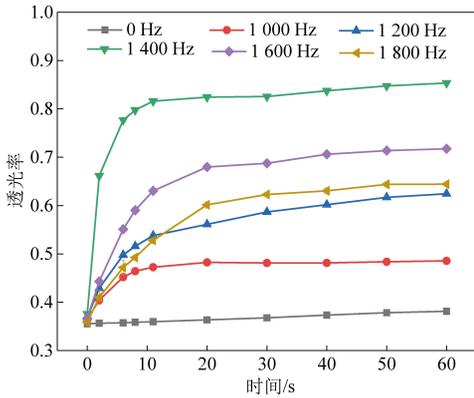


图3 不同声频下,粉尘的透光率随团聚时间的变化  
Fig.3 Changes of light transmittance of soil dust with agglomeration time at different acoustic frequencies

图4显示了  $t = 60$  s 粉尘的除尘效率  $\eta$  和声频的变化关系。由图可知,除尘效率  $\eta$  随着声频的增加先增加后减小,说明声波团聚存在着最佳声频。由拟合曲线可知,1 400 Hz 时除尘效率达到最大,为 84%,说明粉尘的最佳声频在 1 400 Hz 左右。从团聚室顶部发出的声波经底部反射后形成反射波,反射波和入射波叠加会形成驻波,驻波会带动颗粒的振动,由于不同颗粒的粒径存在差异,使得它们的质量和惯性不同,导致不同粒径颗粒在声场中的振幅不同。另外,驻波振幅最大的点称为波腹,振幅最小的点称为波节,而声频的变化会改变波腹和波节的位置,使得不同声频下声场中的颗粒振幅有所不同。随着声频增大,颗粒的振幅会逐渐减小直至为 0,且颗粒粒径越大,振幅下降的幅值越大。当声频太小时,大颗粒和小颗粒在声场中的振幅相近,使得二者的相对运动速度低,使得团聚的速度和效果差;当声频太大时,大颗粒和小颗粒均保持静止或者振幅很小,二者的相对运动速度低,导致团聚效果较差<sup>[17]</sup>。所以在中间存在着一个最佳频率,使得小颗粒和大颗粒的振幅差值最大,相对运动速度最大,即为最佳声频,最佳声频,颗粒团聚的速度最快,除尘效

率最高。

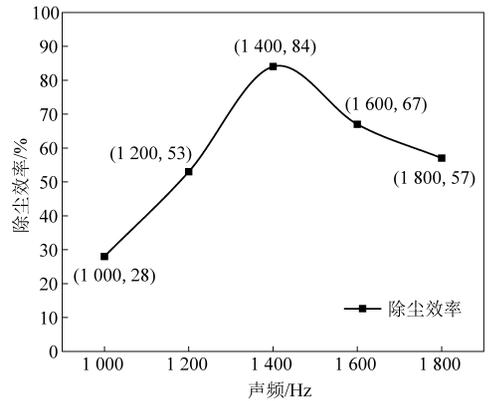


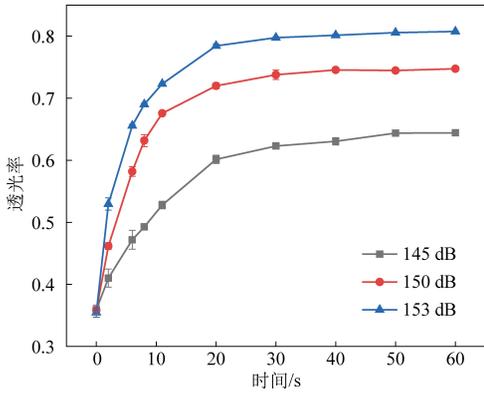
图4  $t = 60$  s 的除尘效率随声频的变化  
Fig.4 Changes of dust removal efficiency at  $t = 60$  s with acoustic frequency

## 2.2 声压级对除尘效果的影响

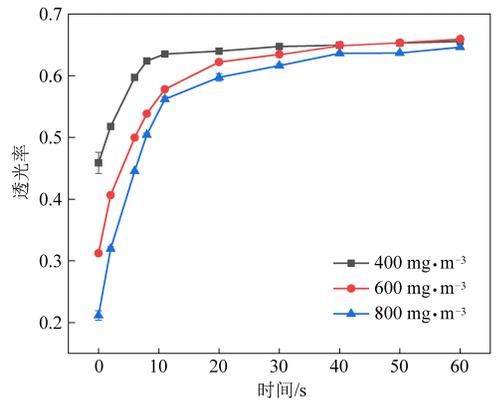
声辐射压力是声波入射到一个障碍物上,对其产生的前向平均压力。声辐射压力作用下的颗粒会进行从波腹到波节的定向运动<sup>[18]</sup>。声辐射压力的大小与声能量密度成正比。声压级的大小反映了声强的大小,而声强和声能量密度存在一定的正相关。调节功放的输入功率,使用声级计测得团聚室内的声压级分别为 145 dB、150 dB 和 153 dB,图 5(a)显示了在粉尘浓度为  $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、声频为 1 800 Hz 的条件下,改变声压级后粉尘的透光率随声波作用时间的变化。由图可知,随着声压级增大,透光率的增加速度都逐渐增大。 $t = 11$  s,粉尘的透光率分别为 0.53 (145 dB)、0.68 (150 dB) 和 0.72 (153 dB)。 $t = 60$  s 的除尘效率和声压级的关系如图 5(b) 所示,由图可知,随着声压级增大,除尘效率逐渐增大,153 dB 时达 79%,与 145 dB 相比提高了 38%。推测是声压级的增大使得声能量密度增大,导致声辐射压力增大,使得颗粒的定向运动速度加快,从而促进颗粒间的碰撞和团聚。

## 2.3 粉尘初始浓度对除尘效果的影响

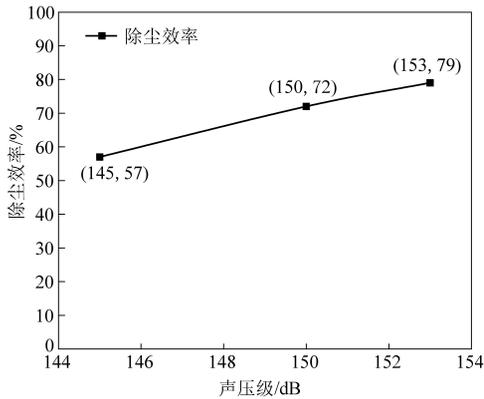
图 6(a) 显示了在声频为 1 800 Hz、声压级为 145 dB 的条件下,改变粉尘初始浓度后的透光率随声波作用时间的变化。由图可知,粉尘的初始浓度越大,0 s 时的透光率越小,分别为 0.46 ( $400 \text{ mg}/\text{m}^3$ )、0.31 ( $600 \text{ mg}/\text{m}^3$ ) 和 0.22 ( $800 \text{ mg}/\text{m}^3$ ),原因是粉尘初始浓度越大,颗粒分布越密集,对激光的漫反射越强,导致入射到激光功率计上的激光存在着能量损失,所以透光率较小。在团聚后期,三组浓度的透光率大小和变化基本相同,60 s 时达到了



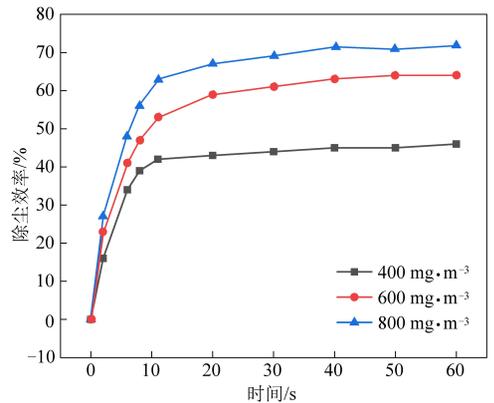
(a) 不同声压级下, 粉尘透光率随声波作用时间的变化



(a) 透光率



(b)  $t=60$  s 的除尘效率随声压级的变化



(b) 除尘效率

图 5 声压级对除尘效率的影响

Fig.5 Effect of sound pressure level on dust removal efficiency

0.66、0.66 和 0.65, 原因是团聚后期粉尘浓度很小, 颗粒间距很大, 声波作用下的颗粒相对运动很慢, 已经难以在较短的时间内发生碰撞和团聚, 此时透光率的变化主要依赖于粉尘的自然沉降, 所以变化速度慢。

图 6(b) 显示了不同粉尘初始浓度下的除尘效率随时间的变化关系。由图可知, 粉尘的初始浓度越大, 前期的除尘速率越大, 初始浓度为  $800 \text{ mg/m}^3$  时, 11 s 内除尘效率从 0 增大至 63%; 当初始浓度从  $400 \text{ mg/m}^3$  升高至  $800 \text{ mg/m}^3$  时, 60 s 时的除尘效率从 46% 提高到了 72%。推测是较大的粉尘初始浓度使得粉尘颗粒的间距缩小, 发生碰撞团聚和沉降的速度提高。

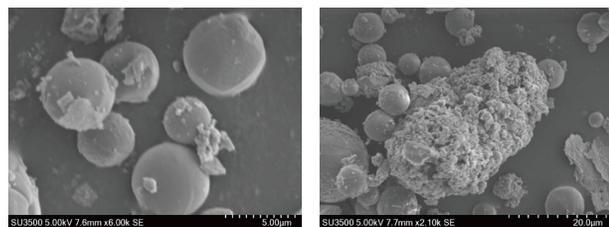
#### 2.4 声波团聚对颗粒微观结构的影响

粉尘在声波团聚前和团聚后的 SEM 图如图 7 所示。

由图可知, 团聚前的土壤颗粒主要呈圆球状, 颗粒直径在  $25 \sim 60 \mu\text{m}$  不等。团聚后可以观察到形状不规则的块状物, 最大长度在  $400 \mu\text{m}$  左右, 约为粉尘最大粒径的 5 倍, 推测可能是土壤颗粒

图 6 粉尘初始浓度对除尘效果的影响

Fig.6 Effect of initial dust concentration on dust removal efficiency



(a) 团聚前

(b) 团聚后

图 7 粉尘团聚前和团聚后的 SEM 图

Fig.7 SEM images of soil dust before and after acoustic agglomeration

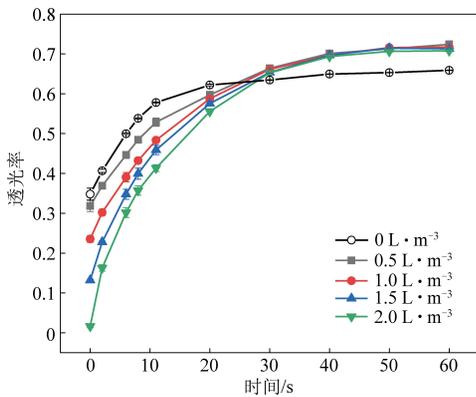
在声场中存在被碾碎的情况, 然后被碾碎的不规则颗粒在范德华力等微观力的作用下团聚在一起, 形成尺寸远大于未团聚颗粒的块状物。

#### 2.5 喷雾对除尘效果的影响

已有的研究表明, 喷雾液滴可以作为声波团聚的团聚核<sup>[11]</sup>, 使粒径小的土壤颗粒黏附在粒径大的液滴上, 提高团聚效果, 喷雾液滴和土壤颗粒之间的液桥力远大于土壤颗粒和土壤颗粒之间的范德华力<sup>[7]</sup>, 也是喷雾能够提高团聚效果的原因

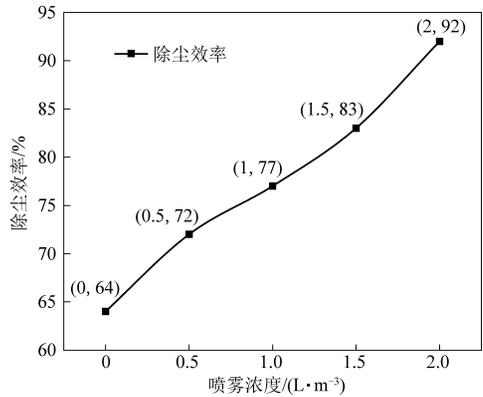
之一。图 8(a)显示了在声频为 1 800 Hz,声压级为 145 dB,粉尘浓度为  $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的条件下,改变喷雾浓度后的透光率随着声波作用时间的变化。

由图可知,喷雾浓度越大,初始时的透光率越小,原因是初始时喷雾浓度越大,对激光的阻挡越强,透光率越小。在团聚前期,喷雾浓度越大,透光率变化越快。团聚后期,各喷雾浓度的透光率相近,60 s 时分别为 0.72、0.72、0.71 和 0.71,大于无喷雾时的 0.66,说明喷雾可以降低颗粒物的浓度,提高声波团聚的效果。喷雾液滴对声波团聚的促进作用较为复杂,涉及到同向作用机理、声尾流效应、声辐射力等机理<sup>[17]</sup>,本实验所用喷雾的平均粒径约在  $50 \mu\text{m}$  左右,大于粉尘的平均粒径,



(a) 不同喷雾浓度下,团聚室透光率在60 s内的变化

根据同向作用机理,喷雾的惯性比粉尘大,运动速度更慢,导致两者的相对运动速度增大;另外,驻波声场中的声辐射力大小会随着液体球粒径的变化而呈现出系列波峰和波谷,且驻波场能够使液滴向波节处靠近<sup>[18]</sup>,使得团聚室内不同位置液滴的速度大小和方向不同。喷雾浓度越大,粉尘能更快地和附近的喷雾发生碰撞和团聚,从而提高团聚效果。图 8(b)显示了除尘效率和喷雾的关系曲线,由图可知,随着喷雾浓度增大,除尘效率也显著增大,当喷雾浓度为  $2.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$  时,除尘效率为 92%,比没有喷雾时的除尘效率提高了 44%。说明声波团聚在气溶胶浓度较高的场合效果更好。



(b)  $t=60 \text{ s}$  时除尘效率和喷雾浓度的关系

图 8 喷雾初始浓度对除尘效率的影响

Fig.8 Effect of initial spray concentration on dust removal efficiency

粉尘浓度为  $600 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,喷雾浓度为  $1.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$ ,声压级为 145 dB 的条件下,有喷雾和无喷雾时  $t=60 \text{ s}$  的除尘效率随声频的变化关系如图 9 所示。

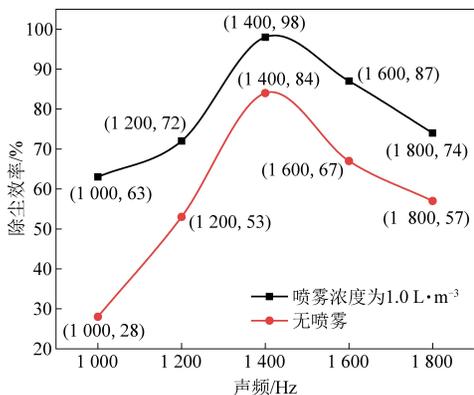


图 9 有喷雾时, $t=60 \text{ s}$  时的除尘效率随声频的变化关系

Fig.9 Relationship between dust removal efficiency at  $t=60 \text{ s}$  and audio frequency with spray

由图 9 可知,施加喷雾时各组声频的透光率均高于没有喷雾式各组声频的透光率。说明喷雾可以促进土壤颗粒的声波团聚,提高除尘效果。有喷雾时,透光率随着声频增加先增加后减小,存在最佳声频,根据曲线拟合结果可知,最佳声频在 1 400 Hz 左右,此时的除尘效率达 98%。根据同向作用机理,声场中不同粒径气溶胶的夹带系数不同,相同声频下粒径越大的颗粒夹带系数越小,使得不同粒径颗粒之间存在着相对运动,但当声频太大或太小时,不同粒径的夹带系数均会趋向于 1.0 或 0.0,所以对于粒径分布特定的气溶胶,存在着相对运动速度最大的声频,为该气溶胶的最佳声频。有喷雾和无喷雾除尘的最佳声频均在 1 400 Hz 左右,推测是由于喷雾的粒径分布情况与粉尘类似,使得夹带系数的变化趋势与粉尘相近,使得喷雾和粉尘在 1 400 Hz 达到最大相对运动速度。

### 3 结 论

本文研究了声波团聚联合喷雾对热脱附粉尘的除尘效果,探究了声频、声压级、粉尘初始浓度、喷雾流量等关键因素对声波团聚效果的影响。得到的结论如下:

(1)团聚室的除尘效率随着声频的增加先增后减,最佳声频为 1 400 Hz,再施加  $1.0 \text{ L} \cdot \text{m}^{-3}$  的喷雾后,能在 60 s 内使团聚室内气溶胶的体积分数减少 98%;随着声压级增大,除尘效率逐渐增大。

(2)粉尘在经过声波处理后,会被碾碎并团聚;

(3)喷雾能够显著提高除尘效率,对于最佳声频的影响不大,且喷雾浓度对除尘效率的最终大小影响不大。

(4)粉尘和喷雾的初始浓度越大,团聚前期的除尘速率和最后的除尘效率越大,说明声波团聚对高浓度气溶胶的使用效果更好。

#### 参考文献 (References):

[1] 河北省自然资源厅.当前我国的土壤污染现状及防治措施 [EB/OL]. (2021-5-23) [2022-12-09]. [http://gskjb.cn/kpbl/stbh/tbbh/content\\_120822](http://gskjb.cn/kpbl/stbh/tbbh/content_120822).

[2] 高国龙,蒋建国,李梦露.有机物污染土壤热脱附技术研究与应用[J].环境工程,2012(1):128-131.  
GAO Guolong, JIANG Jianguo, LI Mengmeng, et al. Research and application of thermal desorption technology of organic contaminated soil [J]. Environmental Engineering, 2012(1): 128-131.

[3] 王博.石油烃污染土壤间接热脱附关键影响因素研究[D].杭州:浙江大学,2021:1-69.

[4] 雷岩岩,宫建海.声波团聚在烧结机尾除尘系统的应用研究[J].工程管理前沿,2021,9:451-165.  
LEI Yanyan, GONG Jianhai. Application research of acoustic agglomeration intail dust removal system of sinter[J]. Frontiers in Engineering Management, 2021, 9: 451-465.

[5] 中国环保协会.2019 实用技术:复合声波团聚高效除尘技术[EB/OL]. (2020-05-20) [2022-10-09]. <https://mp.weixin.qq.com/s/K-9d2nCDJhqlmFogKdzK3A>.

[6] 张光学.燃煤飞灰气溶胶声波团聚的理论和实验研究[D].杭州:浙江大学,2010:1-40.

[7] Dong Z, Zhongyang L, Jianping J, et al. Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment [J]. Powder Technology, 2016, 289: 52-59.

[8] Guoqing S, Xiaoyu H, Chunlong H, et al. Experimental study of acoustic agglomeration and fragmentation on coal-fired ash with different particle size distribution[J]. Powder Technology,

2018, 325: 145-150.

[9] 陶威,徐超,仲兆平.低浓度细颗粒物声波团聚及喷雾优化实验[J].环境工程,2020,38(10):162-168+127.  
TAO Wei, XU Chao, ZHONG Zhaoping. Acoustic agglomeration and spray optimization of low concentration fine particulate matter [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (10): 162-168+127.

[10] 赵天昊.基于声波团聚效应的破碎机除尘装置[J].节能,2020,39(6):71-72.  
ZHAO Tianhao. Dust Removal Device of Crusher Based on acoustic Agglomeration Effect [J]. Energy Saving, 2020, 39 (6): 71-72.

[11] 曹志勇,罗志浩,金东春,等.声波团聚技术消除储能电站火灾烟雾的实验研究[J].安全与环境工程,2021,28(1):55-60.  
CAO Zhiyong, LUO Zhihao, JIN Dongchun, et al. Experimental study on fire smoke elimination of energy storage power station by acoustic agglomeration technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(1): 55-60.

[12] S Temkin, C M Leung. On the velocity of a rigid sphere in a sound wave[J]. Journal of Sound & Vibration, 1976, 49(1): 75-92.

[13] Dong S, Lipkens B, Cameron T M. The effects of orthokinetic collision, acoustic wake, and gravity on acoustic agglomeration of polydisperse aerosols [J]. Journal of Aerosol Science, 2005, 37(4): 540-553.

[14] Dianov D B, Podol'skii A A, Turubarov V I. Calculation of the hydrodynamic interaction of aerosol particles in a sound field under Oseen flow conditions [J]. Soviet Physics - Acoustics, 1968, 13(3): 314-319.

[15] Zhang G, Zhang L, Wang J, et al. A new model for the acoustic wake effect in aerosol acoustic agglomeration processes [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 61: 124-140.

[16] Manoucheri M, Ezekoye O A. Polystyrene soot agglomeration enhancement in an ultrasonic acoustic field [J]. Hazardous Waste and Hazardous Materials, 1996, 13(1): 121-130.

[17] Zhang g x, Ma z f, Shen j, et al. Experimental study on eliminating fire smokes using acoustic agglomeration technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020(382): 121089.

[18] Enrique R, Juan A G, Timothy J M. Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2006, 13, 2: 107-116.

[19] 祖坎.声场作用下可吸入颗粒物团聚动力学特性及对过滤器工作效率的影响研究[D].上海:上海交通大学,2018:1-55.

[20] 张光学,马振方,吴林陶,等.超细液滴气溶胶声波团聚的实验研究[J].中国电机工程学报,2020,40(2):608-614.  
ZHANG Guangxue, MA Zhenfang, WU Lintao, et al. Experimental study on acoustic agglomeration of ultra-fine droplet aerosols [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 608-614.

- [21] 吴融融. 声波对球形粒子的声辐射力研究[D]. 南京: 南京大学, 2016: 1-48.
- [22] Zhang G X, Zhou T T, Zhang L L, et al. Improving acoustic agglomeration efficiency of coal-fired fly-ash particles by addition of liquid binders[J]. *Chemical Engineer Journal*, 2018, 334: 891-899.
- [23] 张云峰, 李涛, 刘鹏. 基于LBM的颗粒声波尾流效应数值研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(2): 93-99.  
ZHANG Yunfeng, LI Tao, LIU Peng. Numerical study on acoustic wake effect of particles based on LBM[J]. *Journal of Changsha University of Technology*, 2019, 16(2): 93-99.
- [24] Ossai I C, Ahmed A, Hassan A, et al. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 17: 1-42.
- [25] Yang S, Jiahua W, Wenwen B. Numerical investigations of acoustic agglomeration of liquid droplet using a coupled CFD-DEM model [J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31: 2394-2411.
- [26] Zu K, Yao Y, Cai M. Modeling and experimental study on acoustic agglomeration for dust particle removal [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2017, 114: 62-76.