



粉尘污染的水雾控制技术

(2016 年)

粉尘通常指 $0.1\sim 100\mu\text{m}$ 直径的颗粒，它们在空气中难以重力沉淀，这个粒径指的是空气动力学直径，视作球状的密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 颗粒在静止的空气中具有同样的终沉速度的粒径，不考虑其几何尺寸、形状和真实密度。其中粒径大于 $40\mu\text{m}$ 的容易沉降下来，颗粒粒径为 $10\sim 40\mu\text{m}$ 的较易沉降，粒径为 $0.25\sim 10\mu\text{m}$ 的较难沉降，粒径小于 $0.25\mu\text{m}$ 的能长时间悬浮在空中，正是由于微小粉尘颗粒在大气中的悬浮、积累形成了大面积的雾霾天气。

人眼可以看得见的粉尘粒径为 $\geq 40\mu\text{m}$ ，扩散悬浮在空中的粉尘一般都小于这个值，人通常难以分辨扩散在空中的微小粉尘。

要对扩散悬浮在环境大气中的粉尘进行处理难度很大，要有效、经济控制粉尘污染，关键是在粉尘产生的源头进行处置，在其尚未完全扩散时进行有效控制处理。

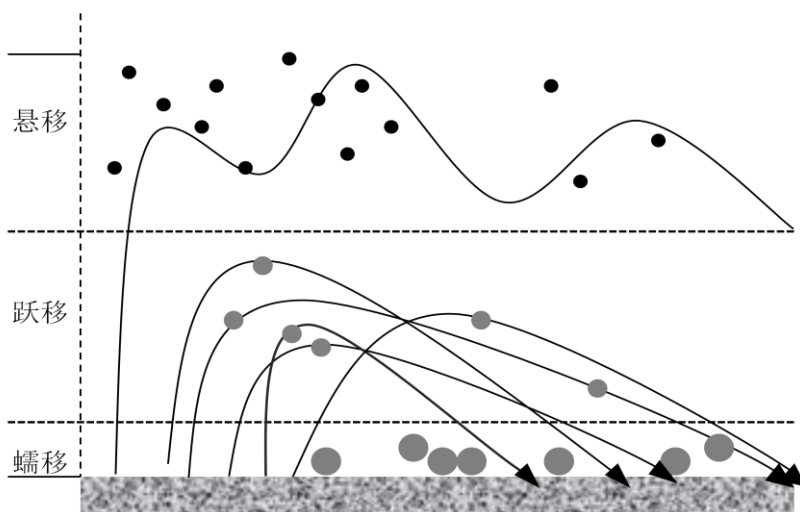
洒水除尘处理技术是简单高效、价格低廉的粉尘控制技术，能够有效的抑制粉尘飞扬，并捕集逸散悬浮在空中的粉尘。

1. 粉尘性能和危害

1.1 粉尘在空中的扩散

引起颗粒在空气中扩散的原因主要有二个，第一个是粉尘颗粒与空气分子的布朗运动；第二个是空气流产生的脉动曳引运动。

粉尘在空气中的运动形式： $500\mu\text{m}$ 以上蠕行， $70\sim 500\mu\text{m}$ 跳跃，小于 $62.5\mu\text{m}$ 悬浮在空中。



粒径大于 $90\mu\text{m}$ 的颗粒，在不同风速下，扩散距离一般小于 150m ，粒径在 $60\mu\text{m}$ 左右的尘粒扩散距离一般在 $20\text{-}70\text{m}$ ，粒径在 $30\mu\text{m}$ 的颗粒，扩散距离一般在 $300\text{-}10000\text{m}$ ，粒径在 $10\mu\text{m}$ 的尘粒，扩散距离一般在 $20\text{-}800\text{km}$ ，粒径在 $2.5\mu\text{m}$ 以下的尘粒，扩散距离可以达到 1000km 以上。

1.2 粉尘对人体的危害

直径小于 $10\mu\text{m}$ 的粉尘称为可吸入颗粒物 (PM_{10})，直径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的粉尘称为微细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$)。人通过呼吸含粉尘的空气使粉尘颗粒进入人体内，粉尘粒径越小可以进入人体呼吸道的部位越深，粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的颗粒物通常沉积在人体的上呼吸道，粒径小于 $5\mu\text{m}$ 的颗粒 50% 可以进入呼吸道的深部并沉积在肺泡内导致尘肺病，小于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒可以 100% 进入呼吸道的深部细支气管和肺泡，可以对神经系统、肺、心脏、血管等器官造成损害。

尘肺是由于沉积在肺部的粉尘颗粒导致肺组织形成纤维化而引发的一种肺部疾病，根据导致尘肺的粉尘类型的不同而分为 13 种类型，分别为矽肺、煤工尘肺、石墨尘肺、炭黑尘肺、石棉尘肺、滑石尘肺、水泥尘肺、云母尘肺、陶工尘肺、铝尘肺、电焊工尘肺、铸工尘肺和其他尘肺，图 1 是尘肺病的病理照片，最左边为正常 78 岁老人的肺，右边为尘肺病。

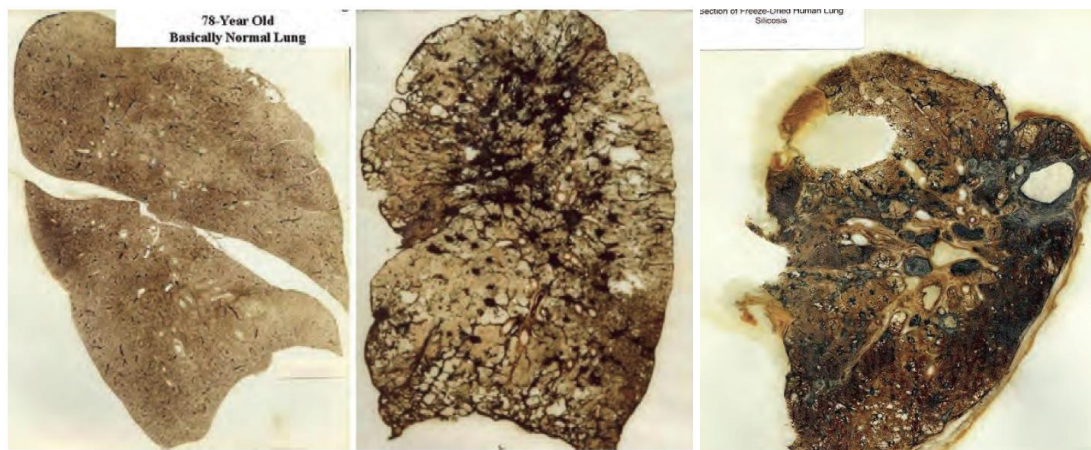
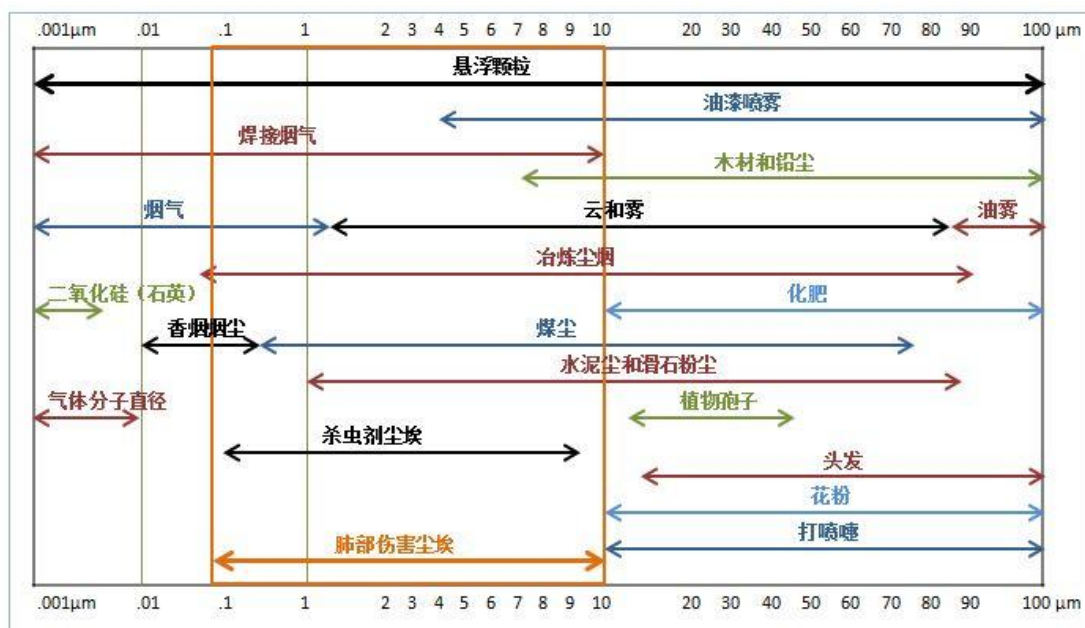


图 1 尘肺病理照片

矽肺是由于长期吸入含有游离 SiO_2 （石英）含量较高的粉尘而引起的以肺部弥漫性纤维化为特征的一种尘肺，这些纤维病变通常由损伤中间部分的胶原纤维和周围的网状纤维组成，是我国目前尘肺病中最常见而且危害最严重、最主要的职业病。

常见的岩石或矿石中可能含有 SiO_2 ，分为结合状态和游离状态（主要是石英），游离 SiO_2 含量在 10% 以上称为硅尘，含量在 10% 以下为非硅尘，结合状态的对人体危害不大，游离 SiO_2 含量越高，越容易导致尘肺病发生。

下表是常见粉尘的尺寸分布：



2. 粉尘的测量和处理技术

2.1 粉尘测量技术

粉尘在空气中的悬浮时间不仅与粉尘粒径的大小、质量、和形状有关，还与空气的速度、湿度有密切关系，通常以单位体积的质量 (mg/m^3) 来表示粉尘的浓度，产尘强度是指单位时间内的产尘量 (mg/s)。

人眼能分辨的颗粒粒径为 $\geq 40\mu\text{m}$ ，悬浮在空中的粉尘都很小人眼无法分辨，只有当微小粉尘聚集在一起形成粉尘云时人眼才能看出，误导了人们对粉尘的认识。

由于在气流作用下粉尘云在空间快速扩散，随着空间尺寸变化浓度下降变化很快。

粉尘的扩散方向随着气流的变化而改变，导致了粉尘浓度测量的困难，并且粉尘测量取样时间通常是 1 小时以上，也使监测仪器很难真实反映排放情况。

工业排放控制粉尘浓度为 mg/m^3 ，环境空间要求的粉尘浓度为 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，当排放源与环境空间较近的话很难保证满足要求。

诸多因素影响带来了粉尘测量和观察的困难。。

2.2 粉尘处理技术

粉尘治理主要使用控制技术工艺：

封闭工艺；建筑、盖板、软帘、遮覆、挡风墙、筒仓、大棚等。对粉尘产生源进行封闭可以有效的控制粉尘的进一步扩散。

通风除尘过滤工艺、静电吸附工艺。通过通风系统将粉尘收集，进行处理。

湿式处理工艺；洒水除尘、湿式洗涤工艺。对粉尘源进行洒水是最常用的粉尘控制方法。

3. 洒水除尘技术

洒水除尘技术主要就是使用水来控制粉尘飞扬、扩散，水源相对便宜并且容易获取，洒水除尘技术设备简单，不用设置处理设备，投资和运行费用低。

洒水除尘技术包括湿度控制技术和水雾捕集技术，湿度控制技术是指通过洒水来调节物料的湿度抑制粉尘的产生，通俗的说法就是对物料洒上足够的水使其不产生飞尘。水雾捕尘技术是指通过喷射水雾粒捕集悬浮在空气中的粉尘，通过气流运动改变粉尘运行方向，水粒捕集的粉尘由于重力作用重新落回到物料表面（或地面）。

控制物料湿度更有效，实施起来更简单方便，但洒水量和水粒径较大，在有些场合不能进行大量洒水，或者粉尘已经扩散到空中洒水无法产生效果。

水雾捕尘技术洒水量很少、水雾粒径也很小，几乎对环境不产生影响，但水雾捕尘技术实施起来要求更高。

3.1 湿度控制技术

大量的粉尘颗粒并没有飞散到空气中去，而是吸附在大块物料表面上，通过洒水湿润物料增加粉尘颗粒的粘度，使粉尘粒更紧密的吸附在大块物料上，可以有效抑制粉尘逸散到空中，叫做粉尘的**湿度控制**工艺。

大多数物料含水率（湿度）大于 16%时微细粉尘颗粒会紧紧粘附在大块物料上，其产尘量接近零，采用湿度控制来抑制粉尘产生，需保持物料有足够的



含水率、湿度均匀。这里说的湿度主要是指外含水率，这部份水份是可以蒸发的。

湿度控制技术相对更简单有效，只要对物料洒上足够量的水就可以有效控制粉尘的产生。

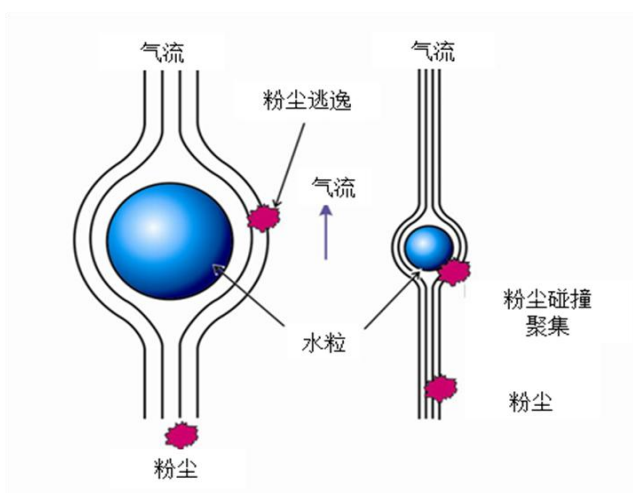
湿度控制技术要注意保证物料的湿度稳定、均匀，因为水份在空气会挥发，特别是在空气湿度低的情况挥发量更大。

不同的物料对水的亲和性也不同，见下表；

湿润性	绝对憎水	憎水	中等亲水	强亲水
$V_{20}(\text{mm/min})$	<0.5	$0.5\sim2.5$	$2.5\sim8.0$	>8.0
实际粉尘举例	石蜡、聚四氯乙烯、沥青等	石墨、煤尘、硫黄尘等	玻璃小球、石英粉尘等	锅炉飞灰、石灰尘等

3.2 水雾捕尘技术

通过洒水产生水雾粒，使液滴撞击粉尘颗粒而粘附其上，粉尘颗粒凝聚增大在重力作用下发生沉降重新落回到物料表面（或地面），叫做**水雾捕尘**工艺。



粉尘颗粒与液滴碰撞后并没有被气流带走而停留在液滴表面上，这是粉尘在液滴上粘附作用的结果，主要是毛细管粘着力。

聚集过程的原理是，粒子由于相互碰撞和粘着而变得越来越大，最后重力成为主要因素。

水粒径大小是决定捕集效率的主要因素，水粒径太小捕集发生但不能沉降下来，太大又无法捕集粉尘。由于太小的水粒在空气中发生快速蒸发，释放捕集的尘粒甚至于那些已经溶在水中的尘粒，在相对湿度 90% 的条件下， $10\mu\text{m}$ 的水滴蒸发时间约为 4 秒， $50\mu\text{m}$ 的水滴蒸发时间约为 20 秒。

雾滴群的捕尘总效率为

$$\eta_p = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} = 1 - \frac{N_{out}}{N_{in}} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{E}{D_w} \frac{W}{Q} L\right) \quad (1)$$

粉尘捕集效率公式如式 (1) 所示， E 是单个雾滴的捕集效率，雾滴群的总捕尘量会随着 E 的值增大而增大。 E 的值一方面取决于气体流动特性，另一方面取决于雾滴与尘粒的相对大小。对于完全发展的湍流运动， E 的近似估算值为

$$E = 0.266 \ln K + 0.59 \quad (2)$$

当无量纲参数 K 满足 $0.2 < K < 0.4$ 时，计算公式为

$$K = \frac{u_r \rho D_p^2}{9 \mu D_w} \quad (3)$$

W ——供水流量 m^3/s

Q ——含尘气流流量 m^3/s

L ——含尘气流在雾流中运动的距离 m

ρ ——粉尘颗粒的密度， mg/m^3 ；

D_p ——粉尘颗粒的直径， m ；

D_w ——球形雾滴的直径， m ；

u_r ——含尘气流与雾粒的相对速度， m/s

μ ——空气的动力粘度， $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

根据式 (1) ~ (3) 可知，提高相对速度 u_r 、粉尘直径 D_p 和粉尘密度 ρ ，雾流捕尘效率会上升，并且随着雾滴直径的减小、捕尘效率的增大会更加迅速。当含尘气量 Q 一定时洒水量 W 越大捕尘效率越高，含尘气流与雾流接触的距离 L 越长捕尘效率越高。

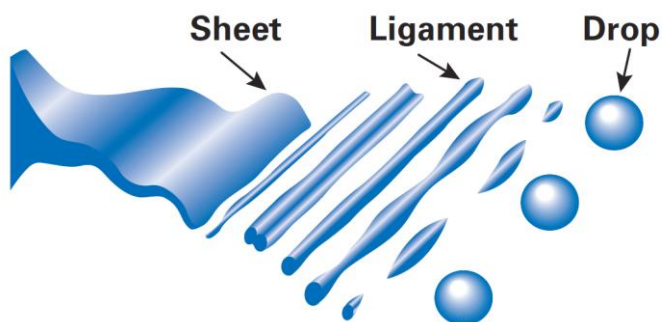
实际情况往往是相互制约的，水雾密度过高会增加水雾粒之间的碰撞聚集使水雾粒径变大，反而导致捕尘率降低。

水雾粒径越小其蒸发速度越快，使捕集的尘粒又脱离出去。水雾粒径越小速度衰减也越快，运动距离缩短减少了与粉尘的碰撞概率，也导致水雾粒没有足够的动力捕集尘粒。

实际应用中雾粒运动速度由于空气阻力作用而减慢，也会由于空气流的湍动影响而改变运动方向和速度。

4. 水雾的产生

通常通过水力雾化和空气雾化两种方式产生捕尘需要的水雾粒，促使连续液体破碎的动力是空气动力和惯性力。



一般将射程比较远的称为喷枪，射程比较小的称为喷嘴，喷嘴可以产生较小的水粒。

常见水粒径的数值表：

颗粒尺寸(μm)	参照物	沉降 3 米所需时间(s)
5000~2000	暴雨	0.85—0.9
2000~1000	大雨	0.9—1.1
1000~500	中雨	1.1—1.6
500~100	小雨	1.6—11
100~50	大雾	11—40
50~10	中雾	40—1020
10~2	薄雾	1020—25400

4.1 洒水喷枪

喷枪通常都是单相流，评价喷枪的参数主要是射程和射高，为获得尽量长的射程就要有足够大的水流来保证，喷枪的水粒径都很大，耗水量也高，一般喷枪都用来大范围的洒水调湿使用。



4.2 单相流喷嘴

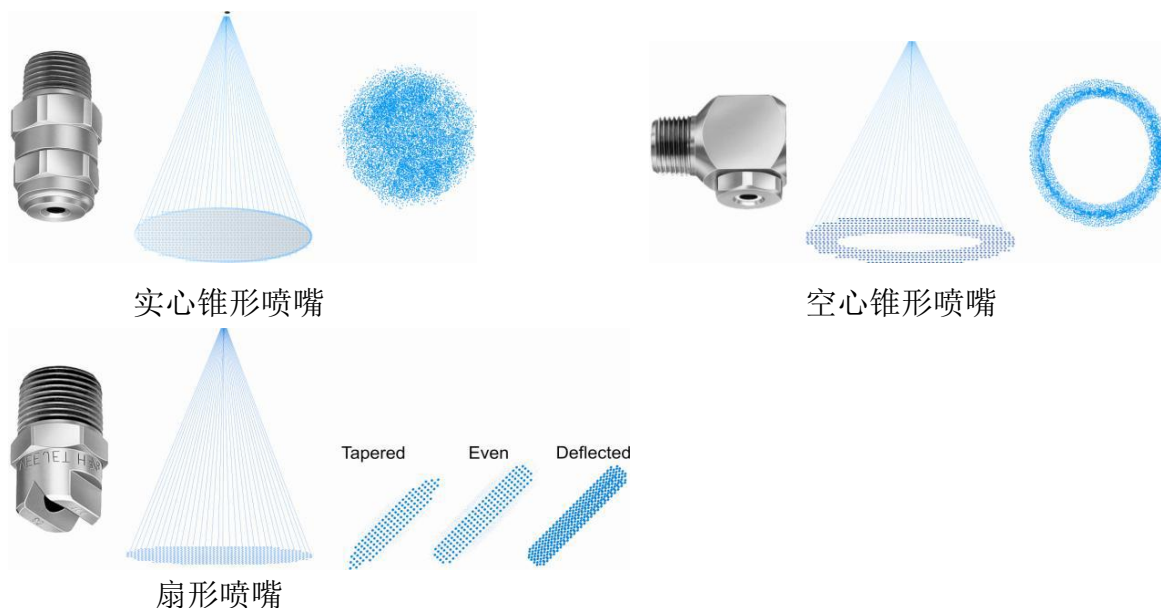
单相喷嘴指单一流体（主要是水）在高压作用下直接从喷嘴孔高速喷出，使液体发生破碎、雾化。

水相喷嘴压力与雾滴粒径关系

喷嘴压力 MPa	2.5	5.0	7.5	10	12.5	15
喷嘴直径 $\phi 1\text{mm}(\mu\text{m})$	452	198	96	75	60	80
喷嘴直径 $\phi 1.2\text{mm}(\mu\text{m})$	564	286	102	97	43	63

水压力越高产生的水粒径越小，压力越高喷嘴的磨损也越厉害，对设备和管道的要求也高。

常用的单相喷嘴喷雾形状有三种，实心锥形、空心锥形、扇形。

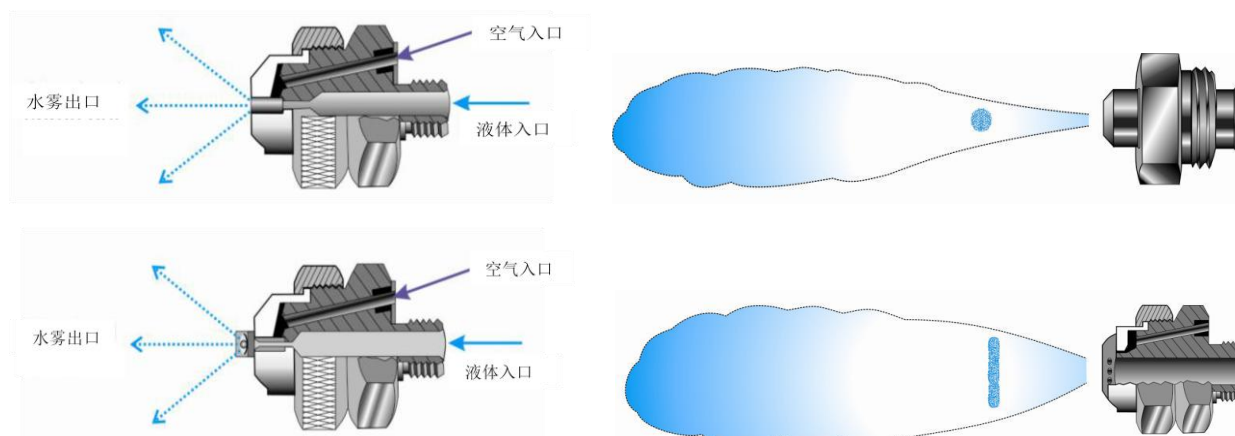


4.3 双流体喷嘴

双流体喷嘴通常是指利用高压空气形成高速射流，使水发生分裂而雾化。流体压力越大，雾化粒径越小，喷射速度越高，产生雾粒的数量也会更多。

双相流喷嘴压力相对于单相流喷嘴要低，并且有较大的流量调节范围，双相流喷嘴会产生较大的诱导气流，增加空气的扰动。

空气雾化喷嘴有圆形和扇形两种喷雾模式。



4.4 控制系统

为保证喷嘴的稳定运行需要保证输送流量、压力均衡稳定，要有一套精密的管路调节和控制系统。



5. 洒水除尘技术应用

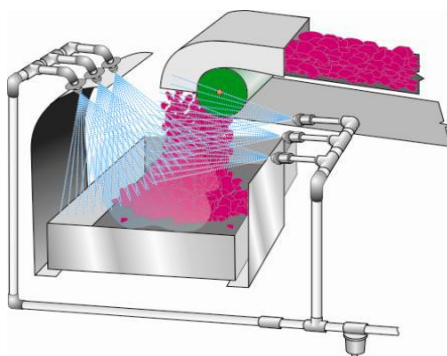
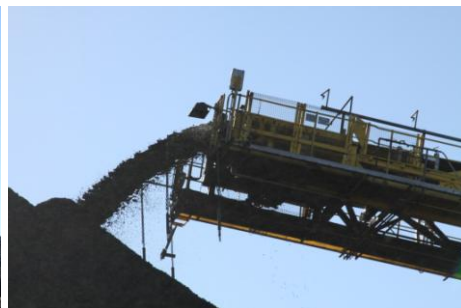
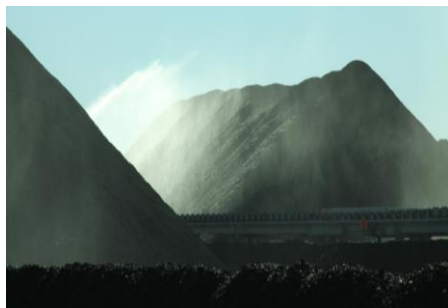
洒水除尘技术包括湿度控制技术和水雾捕尘技术，湿度控制技术更简单，通过洒水可以有效的抑制粉尘的产生，但湿度控制通常洒水量大，有些物料不允许洒水，一些工况条件下也可能无法洒水。

在很多情况下难以区分是湿度控制还是水雾捕尘，可能两种工艺都发生功效，其中一种工艺为主，另一种工艺为辅。

以下是洒水除尘技术的一些典型应用。

5.1 散货输送

矿石、煤炭、砂石等堆场、皮带机、转接点，装船机、装车机、堆取料机等；



5.2 地下矿、隧道粉尘控制

爆破、掘进机、凿岩机、钻孔机、装卸机械等；



5.3 现场施工作业

开挖、破碎、拆除作业等；





5.4 制造工场作业

铸造、电焊、气割、打磨等作业；



5.5 道路清扫、运输等作业。

