

吸湿型路面抑尘剂配方研制及工业试验

杜翠凤¹, 王 远¹, 卢俊杰¹, 伍朝蓬²

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 武汉钢铁集团矿业有限责任公司 乌龙泉矿, 湖北 武汉 430213)

摘 要: 针对露天采场路面扬尘特点及机理, 研制出一种吸湿型路面抑尘剂. 基于正交试验, 以失水率为评价指标, 对抑尘剂各组分进行优化, 并在实验室条件下对最优配方进行吸湿性、抗风吹等性能测试. 结果表明, 实验室研制的配方在 25 d 内最低含水率达到 8.18%, 具有很好的防风抑尘性能. 将该抑尘剂配方进行工业试验, 结果表明, 该抑尘剂的有效抑尘时间为 10 d, 与传统洒水方法相比, 抑尘费用降低了 30.71%, 节水效率达到 94.67%.

关 键 词: 路面扬尘; 吸湿型抑尘剂; 失水率; 瞬时扬尘浓度; 粉尘粒径分布

中图分类号: TD 741; R 136.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)06-0876-06

Formula Development and Industrial Testing of a Hygroscopic Road Dust-Depressor

DU Cui-feng¹, WANG Yuan¹, LU Jun-jie¹, WU Zhao-peng²

(1. Civil and Environmental School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Wulongquan Mine, Wuhan Iron and Steel Group Minerals Co., Ltd., Wuhan 430213, China. Corresponding author: WANG Yuan, E-mail: wangyuan19900828@126.com)

Abstract: Based on the characteristics and mechanisms of open pit road dust, one hygroscopic road dust-depressor was developed. The components of the dust-depressor agent were optimized by taking water loss rate as the evaluation index, which is based on the orthogonal test. The hygroscopicity, wind resistance and other properties of the optimal formula were tested in a lab environment. The results showed that the moisture contents of the optimal formula were all above 8.18% within 25 days, indicating that the optimal formula had a very good windbreak performance. Taking the optimal formula to industrial testing, it was found that the effective time of dust suppression is 10 days. Compared with the traditional water spraying, it could reduce the cost for dust suppression by 30.71% and increase the water-saving efficiency up to 94.67%.

Key words: road dust; hygroscopic road dust-depressor; water loss rate; instantaneous dust concentration; dust diameter distribution

露天矿采场的道路大多为经适当平整、压实的土质路面, 修筑简易, 运输车辆吨位高, 每当汽车运行时, 特别是重型载重汽车运行时, 带动路面浮土, 尘土弥漫, 造成严重粉尘污染^[1-2]. 矿区内的粉尘污染不仅影响工作人员的身体健康, 破坏矿区周围的环境, 缩短零部件的使用寿命, 而且使行车速度受到限制, 影响行车安全, 降低生产效率^[3-5]. 因此, 露天矿路面防尘问题越来越受到矿山生产管理人员的重视.

国内外学者针对路面扬尘进行了大量研究和实践, 并取得一批成果^[6-7]. 俄罗斯、美国、英国等国家的露天矿山一般采用洒水、喷洒液体吸湿剂(如钙或镁盐溶液)、改变路面结构(如路面中掺入水泥、沥青等物质)以及喷洒黏性抑尘剂(英国的 Lessapol 抑尘剂^[8])等方法防治路面扬尘. 近年来, 北京科技大学、兰州沙漠研究所、南方冶金学院、冶金部环保研究院等研究机构在路面抑尘剂的研究方面也取得了一些成果. 例如杜翠凤等

研制了一种能在干燥气候条件下工作的 YCH 抑尘剂,能够有效减少路面扬尘^[9].

本文通过实验室正交试验,研究出一种具有吸湿性、凝并性,而且无毒害、经济成本低廉、抑尘性能好的抑尘剂配方,并对其进行现场工业试验,评价其抑尘效果.

1 抑尘剂组成及正交试验

1.1 抑尘剂组分及作用

根据露天矿土质路面粉尘含湿率小、黏度低、粒径小的特点,本文研制的路面抑尘剂是由吸湿剂 A、凝并剂 B 和表面活性剂 C 组成.

吸湿剂 A 为无机盐类,具有吸收液体或气体状态水分子的能力,能够保持路面的湿润程度,试验中其质量分数定在 10% ~ 20% .

凝并剂 B 为高分子物质,能够把细小的粉尘颗粒聚合成较大的颗粒,并且将粉尘颗粒通过凝并剂的渗透、黏结作用与地面固结,从而提高土质路面的强度,试验中其质量分数定在 0.6‰ ~ 1.0‰.

表面活性剂 C 是常见阴离子表面活性剂,能够降低抑尘剂溶液的表面张力,加强抑尘剂对路面的渗透能力,试验中其质量分数定在 0.6‰ ~ 1.0‰.

1.2 尘样的来源

试验中所用的粉尘样品是从施工场所的路面搜集而来,属非黏性土,其粒径分布如表 1 所示.

表 1 粉尘粒径分布				
Table 1 Dust diameter distribution				
粒径/mm	>0.425	0.425 ~ 0.15	0.15 ~ 0.05	<0.05
粒径分布/%	53.58	16.88	22.31	7.23

从表 1 可以看出,粒径小于 0.15 mm 的粉尘颗粒占粉尘样品总量的 29.54%,在一定风力作用下能够产生扬尘.

1.3 配方优化试验

取等量尘样置于直径 90 mm 的培养皿中,分别量取 20 mL 所配的溶液均匀喷洒在尘样上.记下培养皿总质量,于 75 ℃ 的恒温干燥箱中,每小时称量一次培养皿的质量,计算失水率:

$$\eta = \frac{m_0 - m_i}{m} \times 100\% . \tag{1}$$

式中: η 为尘样失水率,% ; m_0 为培养皿初始总质量,g ; m_i 为每小时培养皿的质量,g ; m 为喷洒溶液的质量,g.

选取 $L_9(3^4)$ 正交表,配制 9 种溶液,尘样标号 1[#] ~ 9[#],尘样在恒温干燥箱中干燥 7 h 后的失水率如表 2 所示.

表 2 尘样失水率数据表				
Table 2 Water loss rate of dust samples				
组别	w(A)/%	w(B)/‰	w(C)/‰	$\eta(7\text{ h})/\%$
1	10	0.6	0.6	89.90
2	10	0.8	0.8	89.56
3	10	1.0	1.0	89.49
4	15	0.6	0.8	83.44
5	15	0.8	1.0	83.27
6	15	1.0	0.6	83.25
7	20	0.6	1.0	79.93
8	20	0.8	0.6	76.68
9	20	1.0	0.8	76.70

计算各因素各水平下每种试验指标的数据和以及平均值,并进行极差分析,结果如表 3 所示.

根据极差 R 大小,判断吸湿剂 A、凝并剂 B、表面活性剂 C 三个因素的主次影响顺序.由表 3 可以看出,三个因素的水平变化对试验指标的影响重要度排列顺序为 $A > B > C$. A、B、C 因素失水率极小值分别出现在 3 水平、3 水平和 2 水平,以最小失水率为指标来确定最优配方应为 $A_3B_3C_2$,对应 9[#] 尘样喷洒的抑尘剂,即吸湿剂 A 质量分数为 20%,凝并剂 B 质量分数为 1.0‰,表面活性剂质量分数为 0.8‰.

表 3 正交试验极差分析表			
Table 3 Range analysis of the orthogonal test			
项目	A	B	C
K_1	268.95	253.27	249.83
K_2	249.96	249.51	249.70
K_3	233.31	249.44	252.69
$\overline{K_1}$	89.65	84.42	83.28
$\overline{K_2}$	83.32	83.17	83.23
$\overline{K_3}$	77.77	83.15	84.23
R	11.88	1.27	1.00

1.4 抑尘剂的物理性能及毒性分析

对抑尘剂配方的黏度、表面张力、pH 以及密度进行测试,结果如表 4 所示.

表 4 抑尘剂配方的物理参数			
Table 4 Physical parameters of the dust-depressor			
黏度/ (mPa·s)	表面张力/ (mN·m ⁻¹)	pH 值	密度/ (g·cm ⁻³)
4.02	28.21	7.03	1.078

根据《铁路煤炭运输抑尘技术条件第 1 部分

抑尘剂》(TBT-3210.1—2009)中关于抑尘剂技术指标的说明,由表 4 可知,本抑尘剂配方黏度、表面张力、pH 以及密度均符合该技术指标的要求;另外,试验检测表明,该配方中不含有汞、镉、铅、铬、砷及甲醛等有毒物质,无任何毒害作用。

2 性能表征

2.1 吸湿性能

分别称取 30 g 尘样于直径 90 mm 的培养皿中,均匀洒入 14 mL 溶液,待尘样浸润后,取出称重并记录,实验室温度为 18~26℃,相对湿度为 10%~60% 之间(通常情况下,抑尘剂均在自然条件下应用,故在研制过程中没有刻意改变环境的相对湿度和温度)。连续测量 25 d,计算尘样含湿率:

$$\eta = \frac{m_i - m_0}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为尘样含湿率,%; m_0 为烘干后培养皿初始总质量,g; m_i 为每次测得培养皿的质量,g; m 为烘干后的尘样质量,g。粉尘的含湿率随时间的变化曲线图如图 1 所示。

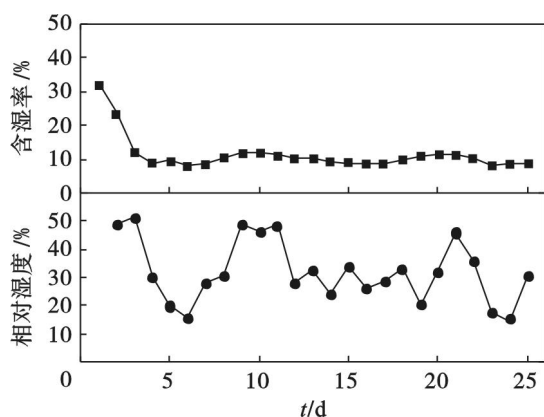


图 1 粉尘的含湿率随时间的变化曲线图

Fig. 1 Moisture rate of dust as a function of days

由图 1 可以看出,尘样的含湿率随着时间的变化而变化,刚喷洒完尘样的含湿率最大,随着放置时间的延长,抑尘剂溶液本身的水分在前 4 天急剧蒸发,含湿率急剧下降,从第 5 天开始,含湿率变化与室内相对湿度变化趋势相同,变化幅度较小。粉尘含湿率曲线出现高低起伏的变化,说明该抑尘剂具有良好的吸湿放湿性。相关文献表明,当粉尘含湿率 4% 时,路面扬尘浓度不超过卫生标准的允许值 2 mg/m^3 ,而本文研究的粉尘样品的含湿率在 25 d 内的最小值为 8.18% (见图 1),远大于 4%,更不容易产生扬尘。故本文研究的抑

尘剂至少在 25 d 内都能够防止扬尘产生,因此具有很好的抑尘性能。

2.2 抗风蚀性能

将抑尘剂溶液和清水分别均匀喷洒在装满粉尘样品的培养皿内,其编号分别记为 1[#]、2[#]。风向与水平面成 0°角和 30°角。使用 DF-2 型低噪声离心式鼓风机模拟风吹,通过阀门调节风速,用 QDF-6 数字风速仪测定风速。风速分别控制在 5, 8, 11, 14, 20 m/s,其中 5, 8, 11 m/s 吹 5 min, 14, 20 m/s 吹 3 min,用电子天平再次称重并记录。计算尘样损失率,计算公式如下:

$$\eta = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为尘样损失率,%; m_0 为风吹前尘样总质量,g; m 为风吹后尘样总质量,g。

各组尘样的损失率,通过计算如表 5 所示。

表 5 尘样的损失率

Table 5 The loss rate of the dust samples	0°		30°	
	1 [#]	2 [#]	1 [#]	2 [#]
5 m/s	0	0.01	0.01	0.02
8 m/s	0	0.22	0.02	0.22
11 m/s	0.04	0.72	0.05	2.11
14 m/s	0.07	7.36	0.20	22.08
20 m/s	0.21	47.28	1.30	93.82

由表 5 可见,在相同风速下,尘样与风流方向的角度越大,在风的剪切力作用下尘样的损失率就越大。当尘样与风流方向的角度一定时,尘样损失率随风速的增大而增大,洒水尘样的损失率大于同风速下喷洒抑尘剂尘样。当风流方向与尘样表面成 0°时,即使风速达到 20 m/s,喷洒抑尘剂尘样损失率只有 0.21%,而洒水尘样损失率则达到 47.28%,说明本试验抑尘剂配方具有很好的防风抑尘性能。

3 工业试验

3.1 矿山概况

武钢乌龙泉矿是一座年采剥总量 500 万 t 的石灰石矿,矿岩主要依靠 25 t 和 28 t 重型汽车运输,车流量为 10 辆/h。采场路面均为土质路面,浮土厚度约 26~28 mm,长 5 km,宽 6~9 m。气候干燥时,路面扬尘浓度高,严重影响正常生产。

矿山目前采用载水量为 5 t 的洒水车对采场路面进行洒水抑尘,上午 9 点和下午 2 点各一次。

试验路段选在 +55 m 处的采矿车间尾石一

班附近,是运输矿石和岩石的主要路段,长约50 m,宽约8.7 m.在喷洒抑尘剂前,未对该段路面进行任何松动、平整等处理.

为了不影响该矿区的正常生产,抑尘剂喷洒完毕后立即通车.由于选择的试验路段距离较短,在汽车的引带作用下,使得汽车进入试验区时将外部粉尘带入试验路段,驶出试验区时将抑尘剂带出,这对试验结果有一定的影响.试验路段及周围道路状况如图2所示.

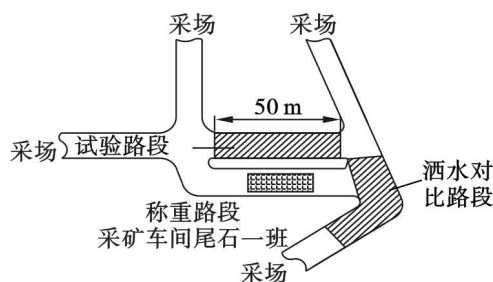


图2 试验路段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test section

3.2 数据及分析

3.2.1 气象参数

试验期间的天气主要以晴天、多云为主,使用AZ9861 记忆式温度/湿度/风速仪测量采场内的气象参数,包括温度、相对湿度以及风速.

试验期间,上午9点温度在16.8~24.5℃,相对湿度46%~64.2%,风速0.8~1.4 m/s,下午2点温度在19.8~28.5℃,相对湿度28%~42.9%,风速1.6~3 m/s.上午的湿度大,温度较低,下午湿度小,温度较高.试验期间各天温度及相对湿度变化如图3所示.

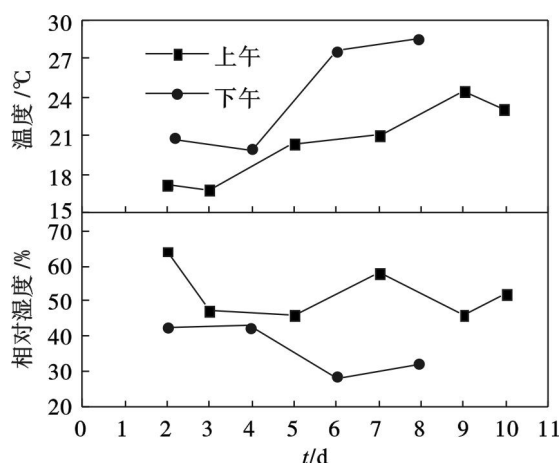


图3 温度及相对湿度变化图

Fig. 3 Temperature and relative humidity

3.2.2 对比路面汽车瞬时扬尘浓度测定

当有汽车经过对比路段时,使用DustTrak II 气溶胶监测仪 TSI 8530 测量1 min内汽车尾部扬

起的粉尘浓度的最大值和平均值,见表6.

表6 对比路面行车后粉尘浓度

Table 6 Road dust concentration after vehicles passing through

组号	1	2	3	4
最大值	32.4	126	67.9	47
平均值	7.72	28	19.7	14.2

从表6中可以看出,当有车辆行驶通过没有喷洒抑尘剂的对比路面时,4组数据中,车辆通过瞬时粉尘浓度最大值达到32.4,126,67.9和47 mg/m³,平均值有3组达到了28,19.7和14.2 mg/m³,这都远远超过了国家规定的10 mg/m³.可见该路面粉尘浓度超标,影响正常的生产作业活动.

3.2.3 对比路面洒水降尘效果评价

洒水对比路段与喷洒抑尘剂试验路段的测试环境的温度、湿度及喷洒时间都是相同的,洒水量为1.5 kg/m³.当洒水车在对比路段洒水后,每隔15 min 测量一次行车后粉尘浓度,60 min 以内的粉尘浓度变化如图4所示.

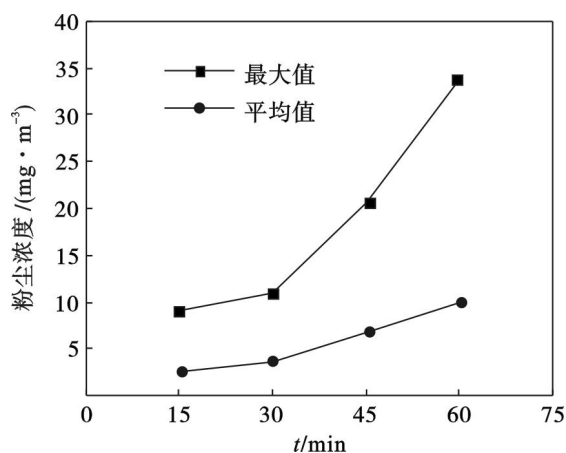


图4 洒水路面粉尘浓度变化情况

Fig. 4 Road dust concentration of after water spraying

从图4中可以看出,洒水过后30 min之内,瞬时最大粉尘浓度保持在10 mg/m³以下.但随着时间的推移,粉尘浓度逐渐增加,在45 min时瞬时最大粉尘浓度已达到20 mg/m³;60 min时,瞬时最大粉尘浓度达到了35 mg/m³.洒水抑尘在30 min之内还有一定的抑尘效果,超过30 min抑尘效果基本消失,所以洒水有效抑尘时间约为30 min.可见,洒水抑尘时间短,效果不理想.

3.2.4 抑尘剂抑尘效果评价

1) 路面粉尘含湿率变化情况分析.试验期间,每天在试验路段挖取长、宽、高均为20 mm的土样,对其进行烘干、称重,通过计算得到上午和

下午两组路面粉尘含湿率,上午的取样时间是 9 点,下午的取样时间是 14 点,结果如图 5 所示。

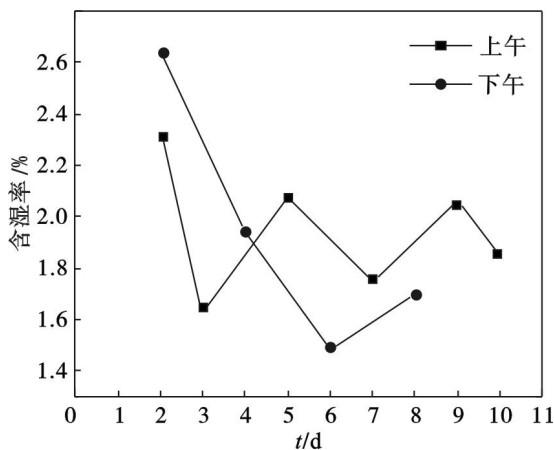


图 5 粉尘含湿率变化曲线
Fig. 5 Moisture rate of dust as a function of days

图 5 中可以看出,试验路段上午路面粉尘含湿率随着时间的变化曲线呈起伏趋势,对照气象参数中的相对湿度的变化曲线图可以看出,二者的变化趋势基本保持一致,粉尘含湿率在 2% 上下徘徊.试验路段下午路面粉尘含湿率随时间变化的整体趋势是下降的,从最初的 2.65% 下降到 1.7%.

综合来讲,由于吸湿剂的吸湿作用,上午温度较低,相对湿度较高,路面粉尘含湿率较高,粉尘颗粒间所存在的液体桥联力增加,当有大型车行驶通过时不易引起扬尘;而下午温度上升,相对湿度下降,路面粉尘的水分蒸发,含湿率也随之降低,路面受凝并剂的作用凝并成较粗颗粒,路面变得板结,汽车通过时同样不易引起扬尘.

2) 路面粉尘粒径分析.使用标准检验筛(880 和 125 μm) 将待测土样进行筛选、称重,计算其粒径分布,路面粉尘粒径分布结果如表 7 所示.

表 7 粉尘粒径分布			
Table 7 Dust diameter distribution			
路面状况	粒径间隔/mm		
	>1	0.125 ~ 1	<0.125
未喷洒抑尘剂	31.07	27.74	41.20
喷洒抑尘剂 2 d 后	41.88	31.66	26.01
喷洒抑尘剂 3 d 后	35.46	33.23	31.31
喷洒抑尘剂 4 d 后	42.15	35.96	21.89
喷洒抑尘剂 5 d 后	46.06	34.71	19.23
喷洒抑尘剂 6 d 后	38.05	32.73	29.22
喷洒抑尘剂 7 d 后	49.81	33.40	16.78
喷洒抑尘剂 8 d 后	44.77	27.20	28.03
喷洒抑尘剂 9 d 后	36.26	32.14	31.59
喷洒抑尘剂 10 d 后	45.65	33.78	20.57

从表 7 可以看出,在未喷洒抑尘剂的路段,粒

径间隔小于 0.125 mm 的粉尘占 41.2%,粒径间隔大于 0.125 mm 的粉尘占 58.8%.而在喷洒抑尘剂的路段,粒径间隔小于 0.125 mm 的粉尘从第 2 天到第 10 天都没有超过 41.2%,第 9 天最大也只达到 31.59%.

大颗粒粉尘质量大于细小颗粒粉尘,在相同的外力作用下不易扬起,即使扬起也会由于重力作用迅速沉降,不会产生扬尘.由此可见,喷洒抑尘剂的抑尘方法可以有效降低小颗粒在路面粉尘中所占比例,增加大颗粒在路面粉尘中所占比例,对露天矿路面扬尘起到了很好的抑尘效果.

3) 路面粉尘浓度分析.每天使用 DustTrak II 气溶胶监测仪 TSI 8530 测量采场环境本底粉尘浓度和试验路段行车时的粉尘浓度,测量数据如图 6 所示.

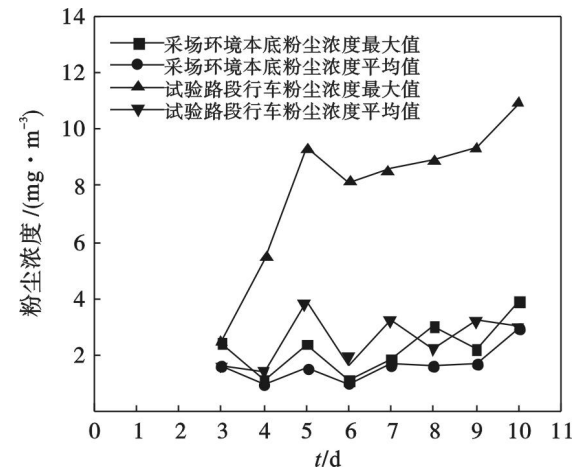


图 6 本底及试验路段粉尘浓度变化情况
Fig. 6 Dust concentration of the background and test section

由图 6 可以看出,在喷洒抑尘剂的路面上,当没有大型车经过时,粉尘浓度基本保持在 4 mg/m^3 以下,呈高低起伏变化的趋势;当有大型车经过时,在车尾部的瞬时粉尘浓度逐天增加,在第 10 d 时瞬时粉尘浓度最大值为 10.9 mg/m^3 ,平均值为 3.01 mg/m^3 .扣除采场环境本底粉尘浓度的影响,试验路段行车粉尘浓度均未超过国家规定(GBZ 2.1—2007《工作场所有害因素职业接触限值》)的 8 mg/m^3 .可见,抑尘剂的有效抑尘时间为 10 d,每天 24 h 均有效.

为了更好地评价抑尘剂效果,取喷洒抑尘剂第 10 d 的试验路段、洒水 60 min 的对比路段以及未采取任何抑尘措施的对比路段行车瞬时粉尘浓度进行对比.在无防尘措施、洒水降尘以及抑尘剂抑尘的路面上,大型车行驶通过时的瞬时最大粉尘浓度分别为 126、33.6 及 10.9 mg/m^3 ,在未喷

洒抑尘剂的路面行车瞬时最大粉尘浓度是洒水抑尘路面的4倍,是抑尘剂抑尘路面的12倍。

综上所述,路面喷洒抑尘剂不仅抑尘效果好,而且有效抑尘时间长。

3.3 抑尘剂节水效果分析

我国水资源非常紧缺,节水对于矿区是异常重要的。根据乌龙泉矿的实际资料,该采场每天早上9点和下午2点使用一台东风牌5t洒水车对整个矿区的路面进行2次洒水抑尘,路面全长5km,主干路面宽8m,洒水量按 1.5 kg/m^3 计算,每天需水量120t,全年按300d计算,全年需水量为 $3.6 \times 10^4\text{ t}$ 。

如果用喷洒抑尘剂的抑尘方法,每10d喷洒一次,喷洒量按 2 kg/m^3 计算,每次需水量64t(配方药剂占有一定体积,按水体积的20%计算),全年需水量 $1.92 \times 10^3\text{ t}$ 。节水效率达到94.67%。可见,喷洒抑尘剂的节水效果非常明显,这对于矿区具有非常重要的现实意义。

3.4 抑尘剂经济成本分析

3.4.1 洒水抑尘经济成本分析

洒水降尘费用由洒水车油料消耗、水费、设备维修费及人员工资等构成。根据该矿区提供的相关资料,洒水车每12趟油料消耗100kg,每天需水量为120t,洒水车装水5t,则每天洒水车需要跑24趟,一年按300d计算,全年耗油60t,武汉当时0#柴油价格为7.2元/升,全年油料消耗费为36.288万元;洒水车每天洒水两次,年需水量是 $3.6 \times 10^4\text{ t}$,矿区的水费按1.5元/t计算,全年水费为5.4万元;矿区提供洒水车维修费每月700元,全年维修费为7000元;洒水工人工资每月2000元,洒水需要1名工人,全年人员工资2万元;洒水车折旧费为10万元。综上所述,该矿区全年洒水降尘总费用为54.388万元。

3.4.2 喷洒抑尘剂经济成本分析

该矿喷洒抑尘剂所需的总费用由抑尘剂原料成本费、油费、水费、设备维修费及人员工资等构成。每1t抑尘剂溶液的原料成本费为72元,喷洒抑尘剂量按 2 kg/m^2 ,对路面全面喷洒一次需要的抑尘剂溶液量为80t,每年按300d计算,每10d喷洒一次,全年抑尘剂原料成本费为17.28万元;抑尘剂使用洒水车进行喷洒,洒水车全年耗油4t,全年油料消耗费为2.4万元;洒水车每次喷洒抑尘剂溶液所需水量为64t,年需水量是 $1.92 \times 10^3\text{ t}$,全年水费为2880元;设备维修费包括洒水车维修费和搅拌站建设费,洒水车维修费

每月700元,全年维修费为7000元,搅拌站建设费按10万元计算,搅拌站年折旧率为1%,每年设备维修总费用为1.7万元;需1名洒水工和2名搅拌工,全年人员工资6万元;洒水车折旧费为10万元。综上,该矿区全年使用抑尘剂降尘的总费用为37.687万元。

每年洒水降尘总费用为54.388万元,而抑尘剂降尘的总费用为37.687万元,与洒水降尘相比,费用降低了30.71%。使用抑尘剂降尘的成本远低于洒水降尘成本,大大减少了企业的经济成本。

4 结 论

1) 通过正交及优化试验,得出最佳抑尘剂配方,该配方具有很好的防风抑尘性能。

2) 工业试验表明,抑尘剂的有效抑尘时间为10d,每天24h均有效。同时,与洒水抑尘相比,使用喷洒抑尘剂的方法,抑尘费用降低了30.71%,节水效率达到94.67%。

该路面抑尘剂降尘和节水效果显著,有一定的经济效益,有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Organiscak J A, Randolph Reed W M. Characteristics of fugitive dust generated from unpaved mine haulage roads[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2004, 18(4): 236-252.
- [2] Du C F, Du J H, Li H S. Experiment study on formula and field of the dust suppressant for the open mine road[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 1033(152): 1847-1855.
- [3] Fulekar M H. Occupational exposure to dust in quartz manufacturing industry[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 1999, 43(4): 269-273.
- [4] Sinha S, Banerjee S P. Characterization of haul road dust in an Indian opencast iron ore mine[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(17): 2809-2814.
- [5] King A M. Health dust monitoring at Derlwyn opencast coal site[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1997, 28(2): 336-336.
- [6] Gebhart D L, Hale T A, Michaels-Busch K. Dust control material performance on unsurfaced roadways and tank trials. USAEC/USACERL Technical Report SFIM-AEC-ET-CR-96196[R]. Champaign, 1996.
- [7] Li L S, Chai Q, Wang B, et al. Preparation and application of polymer dust suppressants in coal transportation under microwave irradiation[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1536(396): 1632-1635.
- [8] Ghose M K, Majee S R. Air pollution caused by opencast mining and its abatement measures in India[J]. *Journal of Environmental Management*, 2001, 63(2): 193-202.
- [9] 杜翠凤,蔡嗣经,蒋仲安. YCH抑尘剂抑制露天矿路面扬尘的实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(sup2): 45-48. (Du Cui-feng, Cai Si-jing, Jiang Zhong-an. Experimental study on controlling road dust raising in the open mine with the YCH dust suppressant[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(sup 2): 45-48.)