

露天矿山运输路面复合抑尘剂的研究

谢振华[✉] 李晓超

北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

[✉]通信作者, E-mail: xiezhenh@sohu.com

摘 要 针对露天矿山运输路面的扬尘问题,对复合抑尘剂进行了研究及现场应用。通过理论分析和实验,研制出两种性能优良的复合抑尘剂,并对这两种抑尘剂进行了性能测试和对比分析。采用 FLUENT 软件,对露天矿山运输路面的粉尘运移规律进行了数值模拟,确定了最佳粉尘监测点。现场实验表明,本文研制的复合抑尘剂能使粉尘质量浓度控制在 $4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,有效抑尘时间为 6 h。

关键词 露天开采; 矿山运输; 除尘; 计算机模拟

分类号 TD 714

Research on complex dust suppressants for transport roadways in open mines

XIE Zhen-hua[✉], LI Xiao-chao

School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉] Corresponding author, E-mail: xiezhenh@sohu.com

ABSTRACT Aimed at dust raising on transport roadways in open mines, the complex suppressant was researched and applied in practice. Two excellent complex suppressants were developed through theoretical analysis and experiments, and a comparison was made between their performances. The moving rules of dust on transport roadways in open mines were simulated by using FLUENT software, and the most appropriate area was determined for dust monitoring. Practical applications show that by using the complex suppressant the mass concentration of dust is below $4\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, and the effective time of dust suppression is 6 h.

KEY WORDS open pit mining; mine transportation; dust abatement; computer simulation

目前,我国金属、非金属矿山大部分采用露天开采方式。在露天开采过程中,由于大型剥离、采矿、装卸和运输设备的使用,产生了大量的粉尘。特别是以公路运输为主的矿山,大型运输车辆加剧了路面的粉尘污染,损害工人的身体健康,破坏矿区环境,影响运输车辆的安全运行。据实测资料表明^[1],运输设备的产尘量占矿山产尘总量的 29.45%,仅次于装载设备的产尘量 52.92%。电铲的产尘强度为 $400 \sim 2\,000\text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$,运行汽车产尘强度为 $620 \sim 3\,650\text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

露天矿山运输路面粉尘防治的传统方法为洒水洒水。这种方法比较简单,但用水量大、抑尘时间短以及路面粉化严重,因此不是高效经济的抑尘方法^[2]。采用抑尘剂是露天矿山运输路面防尘的发

展趋势。抑尘剂的种类包括黏结性渣油乳化剂、吸湿性无机盐抑尘剂、有机化学抑尘剂、超强吸水剂以及复合抑尘剂等^[3]。

黏结性渣油乳化剂具有良好的湿润性及黏结性,使用方便,但抑尘效果难以保证^[4]。吸湿性无机盐抑尘剂主要包括 CaCl_2 和 MgCl_2 等卤化物,材料来源广泛,效果较好,但抑尘剂对汽车轮胎以及金属零部件有一定的腐蚀性。有机化学抑尘剂增强了纯水的抑尘效果,经济实用,但容易对环境造成二次污染^[5]。超强吸水剂具有较高的吸水率、黏结性好,抑尘时间较长^[6],但吸水剂容易受到温度等因素的影响,需要根据不同的现场条件进行配制。复合抑尘剂吸取了上述抑尘剂的优点^[7],抑尘效果优越,适用范围广泛,成为运输路面抑尘剂发展的趋势。但

是,复合抑尘剂在国内外研究还不多.国外主要有俄罗斯的由阴离子表面活性剂、水玻璃、甲基苯乙烯乳液和水组成的复合抑尘剂,澳大利亚的聚丙烯酸盐、羧甲基纤维素、聚乙酸酯乙烯组成的抑尘剂等^[8].国内有 YCH 抑尘剂,十二烷基苯磺酸钠、硅酸钠和羧甲基淀粉钠组成的保湿抑尘剂等^[9].本文针对首云矿业公司露天矿山运输路面的产尘条件,研制出经济、高效且环境友好的复合抑尘剂.

1 矿山运输路面的产尘情况

首云矿业公司目前为露天开采,采用汽车、平硐溜井开拓.运输路面主要为土石路面,载重汽车经过时产尘量大.尽管矿区每天有洒水车定时洒水,并有清洁工人负责清扫,但路边粉尘的沉积量仍大约 3 cm 厚,粉尘污染严重,严重威胁着工人的身体健康,并且影响矿区环境.

对矿区运输路面的粉尘进行采样分析得知,尘样中降尘(粒径为 10 ~ 100 μm)的比例大约占 71.6%,飘尘(粒径小于 10 μm)的比例很小,占 8.6%.粉尘的天然含水率为 0.22%,饱和吸水率为

25.74%,水土酸碱度为 7.54,呈弱碱性.根据粉尘的不同分类方法对矿区的粉尘进行评价,路面粉尘一般为无毒类粉尘,但长期吸入会导致各种尘肺病.

2 复合抑尘剂的研制

2.1 实验原理

根据理论分析和实验结果分析,研制出两种抑尘效果较好的复合抑尘剂.所研制的复合抑尘剂具有吸湿、凝并、黏结和保水四种功效,分别称为 1 号抑尘剂和 2 号抑尘剂.1 号抑尘剂的成分(质量分数)为:黏结凝并剂淀粉(1.0%),吸湿剂十二烷基苯磺酸钠(1.0%),保水剂丙三醇(0.6%).2 号抑尘剂的成分为:淀粉(0.2%),聚丙烯酸钠溶胶(0.2%),丙三醇(0.4%).在实验室对这两种复合抑尘剂的七项指标进行检测,以综合评价其抑尘性能,这七项指标分别为常温抗蒸发性、pH 值、高温抗蒸发性、吸湿性、抗研磨性、渗透时间和渗透深度.

2.2 抑尘剂抑尘性能分析

两种复合抑尘剂的七项指标的检测结果如表 1 所示.

表 1 两种抑尘剂各指标的检测结果
Table 1 Measured results of every index for two dust suppressants

抑尘剂	pH 值	常温抗蒸发性/%	高温抗蒸发时间/min	吸湿性/g	抗研磨性/%	渗透时间/s	渗透深度/cm
1 号抑尘剂	8.48	14.90	632.41	0.19	78.75	49.92	4.2
2 号抑尘剂	8.31	17.88	775.86	0.28	75.28	35.06	4.0

从表 1 中可以看出,两种抑尘剂的 pH 值均略大于 7,呈弱碱性,符合要求.在其余六项指标的对比中,2 号抑尘剂的总体效果优于 1 号抑尘剂.其中,吸湿性的对比效果较为明显,2 号抑尘剂的吸湿量为 1 号抑尘剂的 1.47 倍.为了综合比较两种抑尘剂的经济、技术性能,对两种抑尘剂进行现场实验.

对两种抑尘剂在高温(40℃)下的失水规律进行研究,结果如图 1 所示.

从图 1 可以看出:在开始的 240 min 内,尘样的含水率下降迅速,斜率较大,为加速失水期.在蒸发 240 min 之后,含水率的下降速度放缓,为缓慢失水期.总体而言,尘样含水率的下降速度由大到小为 1 号抑尘剂>2 号抑尘剂.

3 运输路面粉尘运移规律的数值模拟

为了确定载重汽车驶过路面时产尘浓度最大的区域,以便进行粉尘质量浓度的实时监测与抑尘剂的喷洒,采用 FLUENT 软件对汽车经过运输路面时的粉尘运移规律进行数值模拟.

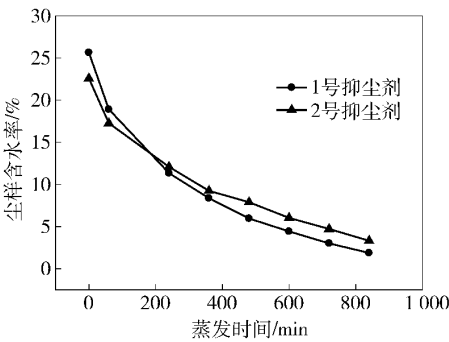


图 1 尘样含水率与时间的关系

Fig.1 Relations between time and moisture content of dust samples

3.1 数值模拟方法

3.1.1 计算模型

采用 FLUENT6.3 作为计算平台,数学模型为气粒两相流,其中气体为连续相,颗粒是离散相.对气相流动控制采用非耦合隐性求解,流体为非定常流,湍流方程为工程上应用较广的 $k-\varepsilon$ 方程,使用 SMPLE 算法求解气体流场^[10].由于所求解为运动边界问题,所以采用动网格对区域进行模拟.离散

相模型采用拉格朗日坐标下颗粒作用力的微分方程来求解颗粒的轨道,得出颗粒的运动规律^[1].

3.1.2 几何模型和边界条件

使用 GAMBIT 进行几何建模和网格划分. 根据现场的实际情况,计算区域为长 50 m、宽 10 m、高 10

m 的长方体路段. 运输车辆的长为 2.5 m、宽 1.5 m、高 2 m,车体距地面 0.5 m,运行速度分别为 5、8 和 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 模型采用右侧进风来模拟在逆风情况下的粉尘运动规律,风流速度分别为 3、5 和 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 模拟参数的设定如表 2 所示.

表 2 模拟参数的设定

Table 2 Settings of simulation parameters

项目	名称	参数设置	项目	名称	参数设置
边界条件	车辆入口边界	Pressure inlet	颗粒源参数设定	粒径/m	1×10^{-5}
	风流入口边界	Velocity		初始速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0
	四周出口边界	Pressure outlet		质量流率/ $(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.006
	湍流动能/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	1		颗粒轨道跟踪次数	5 000
	湍流扩散速度/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3})$	1		积分时间尺度常数	0.01

3.2 数值模拟结果及分析

对不同风速、不同车辆运行速度的九种情况下运输路面的速度流场和粉尘质量浓度场进行了数值模拟,部分模拟结果如图 2~图 4,坐标 x 代表车辆长度方向, y 代表高度方向, z 代表宽度方向. 图中汽车行驶方向为由左至右.

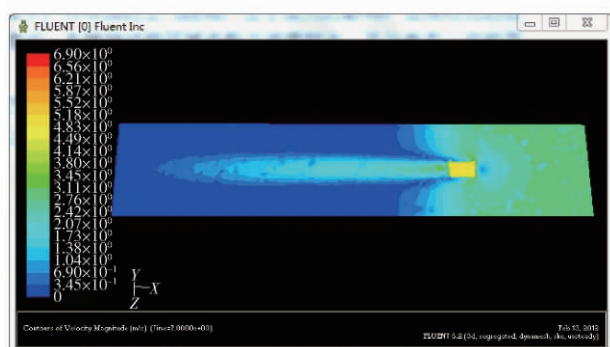


图 2 车辆运行 7 s 时的速度流场(风速 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,车速 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.2 Velocity flow field when the vehicle runs for 7 s (the wind speed is $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the vehicle speed is $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

从数值模拟结果可以看出,车辆在运行过程中,对周围的空气流场产生了很大的影响,使得附近的粉尘随着空气一起运动. 从图 3 和图 4 中可以看出,车辆驶过的区域内粉尘质量浓度较大,且车道两旁的区域粉尘质量浓度要高于车道上的粉尘质量浓度.

对九种不同情况下车辆所在位置,即 $x = 15 \text{ m}$ 、 $y = 0.5 \text{ m}$ 处沿宽度 z 方向的粉尘质量浓度进行了模拟,风速和车辆运行速度均为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的结果如图 5 所示.

从图 5 及其他模拟结果可以看出,粉尘质量浓度较高的区域为宽度方向 $0 \sim 4 \text{ m}$ 、 $6 \sim 10 \text{ m}$,其中重

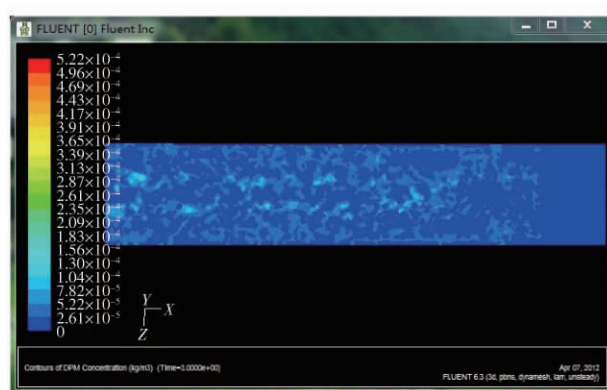


图 3 车辆运行 3 s 时的粉尘质量浓度分布(风速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,车速 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.3 Distribution of dust mass concentration when the vehicle runs for 3 s (the wind speed is $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the vehicle speed is $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

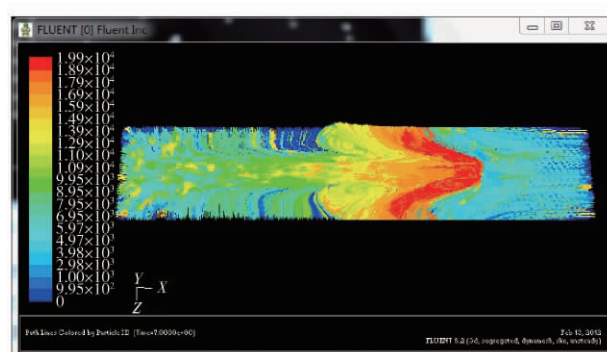


图 4 车辆运行 7 s 时粉尘颗粒的迁移路径(风速 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,车速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.4 Migration path of dust particles when the vehicle runs for 7 s (the wind speed is $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the vehicle speed is $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

点产尘区域应为 $2 \sim 4 \text{ m}$ 和 $6 \sim 8 \text{ m}$. 由于 $z = 5 \text{ m}$ 处为车辆经过的位置,受到强烈湍流的影响,粉尘随气流流向两旁,故质量浓度较低. 在 3 m 和 7 m 处粉尘

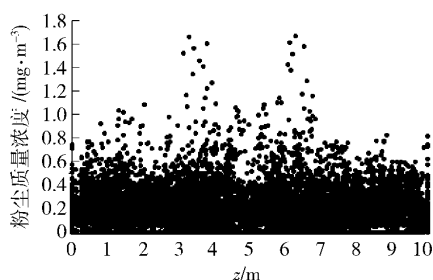


图 5 风速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 车速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时车辆所在位置的粉尘质量浓度

Fig. 5 Dust mass concentration at vehicle location when the wind speed is $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the vehicle speed is $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

质量浓度值最大, 故将监测点布置在宽度 3 m 和 7 m 处。

对不同情况下 $y=0.5 \text{ m}$ 处, 沿 x 方向整个路面的粉尘质量浓度分布进行了数值模拟, 部分结果如图 6 和图 7。

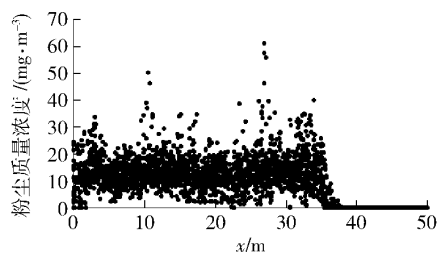


图 6 风速 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 车速 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时高 0.5 m 处的粉尘质量浓度分布

Fig. 6 Distribution of dust mass concentration at the height of 0.5 m when the wind speed is $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the vehicle speed is $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

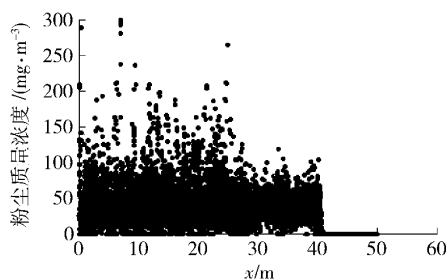


图 7 风速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 车速 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时高 0.5 m 处的粉尘质量浓度分布

Fig. 7 Distribution of dust mass concentration at the height of 0.5 m when the wind speed is $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the vehicle speed is $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

由模拟结果可知, 在不同风速和车速的情况下, 粉尘质量浓度有较大变化。通过 Tecplot 软件分析粉尘质量浓度分布, 风速 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和车速 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时粉尘质量浓度基本分布在 $10 \sim 20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 风速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和车速 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时粉尘质量浓度基本分布在 $40 \sim 70 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。随着风速和车速的增加, 粉尘质量

浓度也随之增加, 在 $x=10 \sim 30 \text{ m}$ 出现最大值。因此, 在 $y=0.5 \text{ m}$, $z=3$ 和 7 m 两条线上各选择三个点 ($x=10, 20, 30 \text{ m}$), 共六个粉尘质量浓度连续监测点。

4 两种复合抑尘剂的现场应用实验

4.1 实验方法

(1) 抑尘剂的配制。根据现场喷洒水量计算复合抑尘剂各因子的用量, 先将淀粉加入到搅拌罐里, 加入冷水进行搅拌, 再加入十二烷基苯磺酸钠 (或聚丙烯酸钠溶胶) 和丙三醇, 连续搅拌 30 min, 至溶剂混合均匀。用 pH 计检测溶液的 pH 值, 符合标准后装到洒水车上, 进行实地喷洒。

(2) 粉尘监测方法。对运输路面无处理、喷洒 1 号抑尘剂和喷洒 2 号抑尘剂三种情况下空气中粉尘质量浓度进行监测。粉尘监测采用统计平均法, 即在现场各种荷载扰动的条件下, 监测粉尘质量浓度的平均值。利用粉尘采样器对现场测点的粉尘质量浓度进行采样。

实验前 3 天为连续晴天, 粉尘监测采样每天两次, 每次连续采样 1 h, 分别在六个采样点同时采样, 计算平均值。FC-4 型粉尘采样器的流量设置为 $30 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 现场大气压为 101.3 kPa 。

4.2 实验结果

粉尘质量浓度监测结果如表 3 所示。路面无处理时, 气温 25.7°C , 空气湿度 59.7% ; 喷洒 1 号抑尘剂时, 气温 25.5°C , 空气湿度 51.1% ; 喷洒 2 号抑尘剂时, 气温 26.3°C , 空气湿度 54.9% 。

表 3 运输路面粉尘质量浓度监测结果

Table 3 Monitoring results of dust mass concentration at the transportation roadway $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

采样点	路面无处理	路面喷洒 1 号抑尘剂	路面喷洒 2 号抑尘剂
1	11.78	4.50	3.67
2	12.78	5.44	4.78
3	13.17	4.83	3.56
4	11.67	4.83	4.06
5	12.44	4.78	3.78
6	11.61	4.89	3.78
平均	12.24	4.88	3.94

4.3 实验结果分析

从表 3 可以看出, 路面无处理情况下粉尘平均质量浓度为 $12.24 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于工业企业卫生标准 ($10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。与图 6 中的数值模拟结果相比较, 模拟结果与实测数据相符。喷洒 1 号复合抑尘剂时的

粉尘平均质量浓度为 $4.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 低于标准质量浓度的一半, 其有效抑尘时间为 4 h. 喷洒 2 号复合抑尘剂时的粉尘平均质量浓度为 $3.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 为喷洒 1 号抑尘剂时粉尘质量浓度的 80.73%, 抑尘效果优于 1 号复合抑尘剂. 根据实测结果, 2 号抑尘剂的有效抑尘时间为 6 h.

5 结论

(1) 根据理论分析和实验研究, 研制了两种抑尘性能优良的复合抑尘剂. 1 号复合抑尘剂中淀粉、十二烷基苯磺酸钠和丙三醇的质量分数分别为 1.0%、1.0% 和 0.6%; 2 号复合抑尘剂中淀粉、聚丙烯酸钠溶胶、丙三醇的质量分数分别为 0.2%、0.2% 和 0.4%.

(2) 对两种复合抑尘剂的七项性能指标进行了实验检测, 结果表明 2 号抑尘剂的抑尘效果优于 1 号抑尘剂.

(3) 根据现场的实际情况, 运用 FLUENT 对运输路面的粉尘运移规律进行了数值模拟, 确定了粉尘质量浓度较大的区域, 得出粉尘质量浓度为 $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 并确定了六个粉尘监测点.

(4) 复合抑尘剂的现场应用实验表明, 路面无处理时的粉尘质量浓度为 $12.24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于国家标准, 且与数值模拟结果相符. 喷洒 1 号抑尘剂时的粉尘质量浓度为 $4.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 喷洒 2 号抑尘剂时的粉尘质量浓度为 $3.94 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 1 号抑尘剂的有效抑尘时间为 4 h, 2 号抑尘剂可达 6 h.

参 考 文 献

- [1] Bi S G. Dust pollution control of open-pit mine. *China Molybdenum Ind*, 2000, 24(5): 33
(毕上刚. 露天矿粉尘污染治理. 中国钼业, 2000, 24(5): 33)
- [2] Tang Z Y, Liu W J, Cai M F, et al. Selection of ecotype dust suppressive factors for simple roadway in open pits. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2005, 27(6): 649
(谭卓英, 刘文静, 蔡美峰, 等. 露天矿运输道路生态型抑尘因子的选择. 北京科技大学学报, 2005, 27(6): 649)
- [3] Wang W, Huo M Q, Zheng X J, et al. Research on compound dust suppressor and application. *Environ Eng*, 2010, 28(Suppl 1): 176
(王薇, 霍茂清, 郑向军, 等. 复合型抑尘剂的制备与应用研究. 环境工程, 2010, 28(增刊 1): 176)
- [4] Dixon-Hardy D W, Beyhan S, Ediz I G, et al. The use of oil refinery wastes as a dust suppression surfactant for use in mining. *Environ Eng Sci*, 2008, 25(8): 1189
- [5] Peng X L, Wu C. Progress of chemical dust suppressants and their applications. *J Saf Sci Technol*, 2005, 1(5): 44
(彭小兰, 吴超. 化学抑尘剂新进展研究. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(5): 44)
- [6] Wang Z Y. *Research on Applications of Dust Suppressant for High Power Absorbent Resin in Highway Construction* [Dissertation]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007
(王族友. 高倍吸水树脂抑尘剂在公路施工中的应用研究 [学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2007)
- [7] Li W J, Chen Q B, Li C. Synthesis and properties of dust suppressor of poly(vinylalcohol)/acrylic acid graft copolymer-mixture in transportation. *J China Coal Soc*, 2010, 35(7): 1177
(李万捷, 陈庆柏, 李春. 运输用聚乙烯醇/丙烯酸接枝共聚共混物抑尘剂的制备及特性. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1177)
- [8] Pang P, Englezos P. Phase separation of polyethylene oxide (PEO)-water solution and its relationship to the flocculating capability of the PEO. *Fluid Phase Equilib*, 2002, 194-197: 1059
- [9] Du C F, Cai S J, Jiang Z A. Experimental study on controlling road dust raising in the open mine with the YCH dust suppressant. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(Suppl 2): 45
(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. 北京科技大学学报, 2007, 29(增刊 2): 45)
- [10] Xie Z H, Zhou Y R. Optimization research on guide plate installed in quadrate 90° curved duct. *J Basic Sci Eng*, 2009, 17(4): 566
(谢振华, 周艳荣. 90° 方截面弯管内加装导流板的优化研究. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 566)
- [11] Qin Y P, Zhang M M, Cui L J, et al. Numerical simulation of dust migration and study on dust removal modes with the forced ventilation shunt in a fully mechanized workplace. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 33(7): 790
(秦跃平, 张苗苗, 崔丽洁, 等. 综掘工作面粉尘运移的数值模拟及压风分流降尘方式研究. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 790)