

文章编号:0253-9993(2010)08-1308-06

# 喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研究

程卫民,周 刚,左前明,聂 文,王 刚

(山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室,山东 青岛 266510)

**摘 要:**对喷嘴雾化粒度的指标和雾化粒度的测定方法进行了分析,利用 Winner313 激光粒度分析仪设计了喷嘴雾化实验系统,对煤矿采煤工作面常用的 5 种喷嘴进行了 5 个压力下的雾化粒度测定,得到了各类喷嘴在不同压力下的 D50、D90、D[3,2] 等数据,根据数据分析得出:要对呼吸性粉尘有较好的捕集作用,就必须实现高压喷雾;8 MPa 作为支架和煤机喷雾压力时的雾化粒度对采煤工作面降尘效果最佳。通过在综放工作面的实际应用,降尘率平均在 90% 以上。

**关键词:**喷嘴;喷雾压力;雾化粒度

**中图分类号:**TD714.4 **文献标志码:**A

## Experimental research on the relationship between nozzle spray pressure and atomization particle size

CHENG Wei-min, ZHOU Gang, ZUO Qian-ming, NIE Wen, WANG Gang

(Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

**Abstract:** Analyzed the index of atomization particle size of spraying nozzle and the test method of aerosol particle size. Utilizing Winner313 Laser Particle Size, designed the experimental system, and then tested the atomization particle size of five kinds conventional spraying nozzles in coal mine, under 2, 4, 6, 8, 10 MPa. Got data of D50, D90, D[3, 2] of various types of nozzles under different pressures, and based on these data, it is found that we should realize high-pressure spray for better capture of respirable dust. Atomization particle size under 8 MPa between support and coal cutter can realize the best performance of dust falling. Through on-site applications, the efficiency of the dust falling is achieved over 90%.

**Key words:** nozzle; nozzle spray pressure; atomization particle size

喷雾降尘具有经济、简便和实用等优点,在煤矿井下得到了广泛应用,但喷嘴雾化的效果和捕集效率仍不能满足矿井降尘的要求<sup>[1-4]</sup>。对于矿用雾化喷嘴来说,除自身参数外,喷雾压力也是决定雾化粒度大小的关键因素。在喷嘴选定的情况下,喷雾压力与雾化粒度成正比,雾化粒度越小,对呼吸性粉尘的捕集效果越好<sup>[5-10]</sup>。由于喷嘴雾化过程的复杂性,对雾化性能的研究主要依赖于诸如气体动力学、两相流体动力学和数值方法等学科的发展,目前除了部分理论研究外,多数还是实验研究<sup>[11-13]</sup>。在煤矿喷雾降尘中,压力式、旋转式、气动、超声波雾化喷嘴等都已得

到应用,但最常用的是压力式雾化喷嘴。为此,本文选择压力式雾化喷嘴,利用实验手段,对喷嘴在不同压力下的喷雾雾化粒度分布、喷雾压力与雾化粒径之间的关系等进行了研究,以期为提高矿井喷雾降尘效果提供理论指导。

### 1 喷嘴喷雾粒度指标的确定

喷嘴喷雾形成的雾场是由大小不等的雾滴群颗粒组成,为了描述和评定雾滴群的雾化质量和表示其雾化特性,需要一个液滴尺寸分布表达式来衡量颗粒直径大小或者不同直径颗粒的数量或质量。评价液

收稿日期:2010-03-08 责任编辑:毕永华

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0606);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0843);山东省采矿业“泰山学者”资助项目

作者简介:程卫民(1966—),男,山东曹县人,教授,博士生导师。Tel:0532-86057013, E-mail:chengmw@163.com

滴粒度的指标,可以用一个所谓的“平均直径”来表达,其是设想有一个液滴尺寸均匀的雾场,它在某方面的特性可以代替实际的不均匀雾场的特性,这个设想的均匀雾场的液滴尺寸称为平均粒径。平均粒径的表示方法很多,本文的实验研究,采用下述5种平均粒径来分析矿井喷嘴的雾化性能。

(1)  $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 、 $D_{90}$ : 颗粒累积分布为10%、50%、90%的粒径,即小于此粒径的颗粒体积含量占全部颗粒总体积的10%、50%、90%。

(2)  $D[3,2]$ : 表面积(加权)平均粒径,又称索太尔平均径(SMD)。

(3)  $D[4,3]$ : 体积(加权)平均粒径,与本文实验中采用的 Winner 系统软件中的  $D_{av}$  意义相同。

## 2 喷嘴雾化粒度的实验研究

### 2.1 喷嘴喷雾粒度的测量方法

在喷嘴雾化特性诸参数中,最难测量的是雾化后的液滴尺寸和尺寸分布,而这两个参数又是衡量喷嘴雾化特性优劣的不可缺少的指标。喷嘴雾化特性早期采用接触式和非接触式测量方法,均存在各种各样的缺陷;目前多采用光学测粒方法来进行,应用较为广泛的用于喷嘴雾化特性测量的激光测量技术是基于 Mie 氏光散射理论为基础的激光散射粒度分析技术。光散射测粒技术具有适用范围广、测量精度高、操作简便、价格相对低等特点。由于光散射测粒技术具有上述优点,因此,本文选择光散射法测量雾场中雾滴的粒径分布情况<sup>[14-16]</sup>。

### 2.2 实验系统

实验以自来水为工质,加压设备将自来水加压到设定的压力后输送到喷嘴形成喷雾,选用 Winner313 粒度分析仪分别对 2.0、1.8、1.5、1.3 和 1.0 mm 这 5 类直径压力式雾化喷嘴在 2~10 MPa 不同喷雾压力下的喷雾雾场的雾滴粒径分散度进行测定。喷嘴 1 为 2 mm,喷嘴 2 为 1.8 mm,喷嘴 3 为 1.0 mm,喷嘴 4 为 1.3 mm,喷嘴 5 为 1.5 mm。实验系统布置如图 1 所示。本系统可通过改变喷嘴与激光测试线水平距离的方式来测定雾场不同位置处的雾粒粒径分布情况,测定完水平方向之后再移动至下一垂直测点处,直至全部测点测定完毕为止。喷嘴位置为(150,9)时的喷雾测点布置如图 2 所示。

## 3 喷嘴雾化实验结果及其分析

实验得到了大量的数据,现从两个方面对喷嘴雾化粒径进行分析。

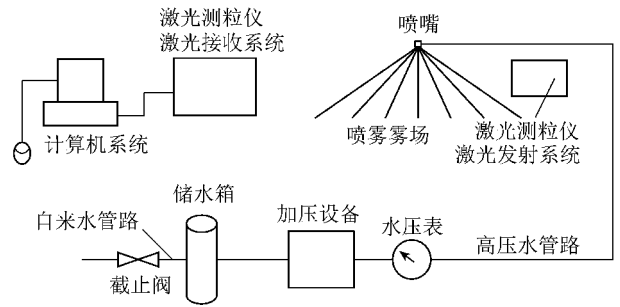


图1 喷嘴喷雾雾化实验系统

Fig.1 Experimental system of nozzle spraying

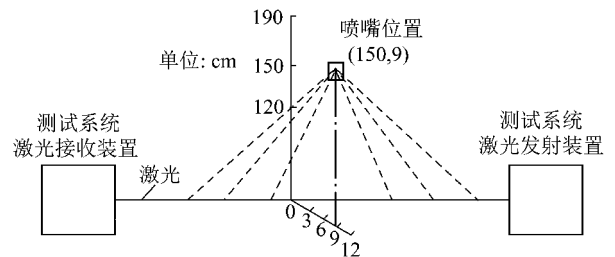


图2 喷嘴位置为(150,9)时的喷雾测点布置

Fig.2 Diagram of sprayer testing collocation on position(150,9)

### 3.1 喷嘴雾化空间粒径分布

现以孔径为 1.5 mm 的 5 号喷嘴在 5 个压力下 9 个空间位置点的雾化粒径实验结果进行分析,其结果说明喷嘴在一定范围内的雾化粒径分布,如图 3~5 所示。图 3 是在 8 MPa 时雾场粒径实际测定情况。由图 3~5 可得出:

(1) 在 5 种压力下,  $D_{50}$ 、 $D[3,2]$ 、 $D[4,3]$  和  $D_{av}$  的数值相差较小,描述煤矿喷嘴喷雾粒度大小的衡量指标可用  $D_{50}$  来表示。

(2) 随着压力的增大,喷雾形成的粒径逐渐减小,喷雾压力在 2、4、6、8、10 MPa 位置(190,0)时的  $D_{50}$  为 110.710、107.344、56.916、58.434 和 39.312  $\mu\text{m}$ ; 位置(190,12)时的  $D_{50}$  为 126.433、122.532、91.098 和 119.301  $\mu\text{m}$ ; 其中以雾场轴心处的减小最为明显;当压力增大到 8 MPa 时,粒径的减小幅度有所减缓;中心位置效果最好,边缘位置粒径变化较小。

(3) 以 8 MPa 为例,喷嘴的轴心位置(190,0)、(150,0)和(120,0)处的  $D_{50}$  为 58.434、39.812 和 67.227  $\mu\text{m}$ ; 位置(190,6)、(150,6)和(120,6)处的  $D_{50}$  为 96.574、74.048 和 76.054  $\mu\text{m}$ ; 位置(190,12)、(150,12)和(120,12)处的  $D_{50}$  为 119.301、64.319 和 76.790  $\mu\text{m}$ ; 离喷嘴 150 cm 处的粒度最小,这也说明喷嘴离尘源的位置以该值捕尘效果最佳。

(4) 喷嘴中心向外在 8 MPa 时位置(120,0)、(120,6)和(120,12)处的  $D_{50}$  为 67.227、76.054 和

76.790  $\mu\text{m}$ ;位置(190,0)、(190,6)和(190,12)处的D50为58.434、96.574和119.301  $\mu\text{m}$ ,说明离喷嘴

近,中心向外粒径变化范围小;越远,中心向外粒径变化范围大。

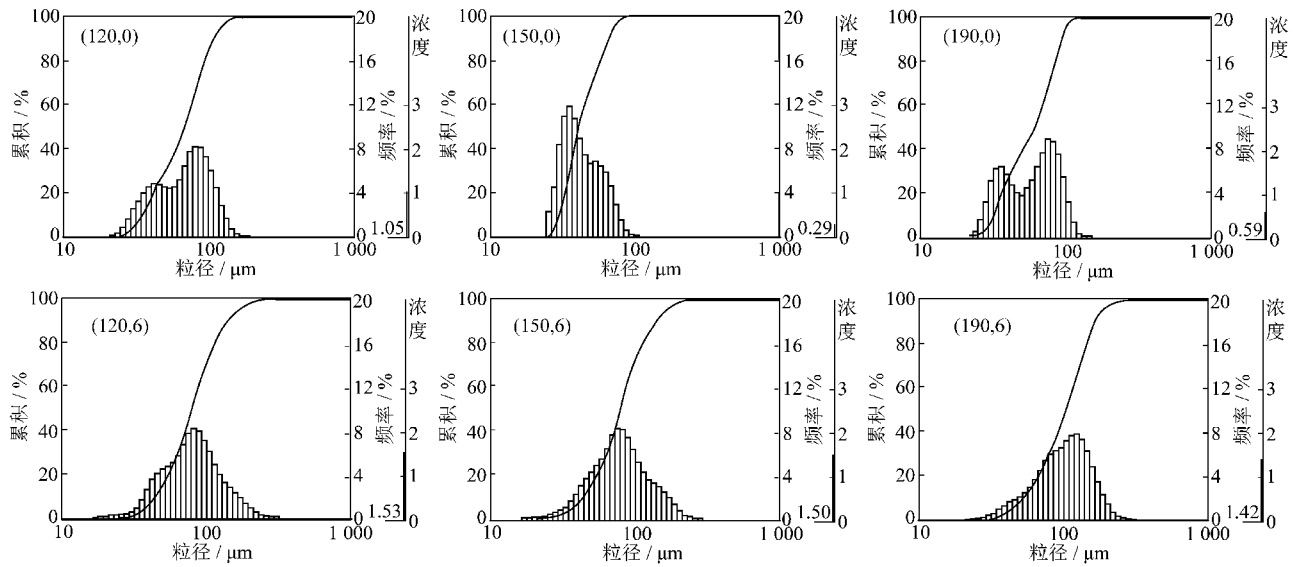


图3 雾场粒径分布分析(8 MPa)

Fig. 3 Analysis of particle size distribution in fog field under pressure 8 MPa

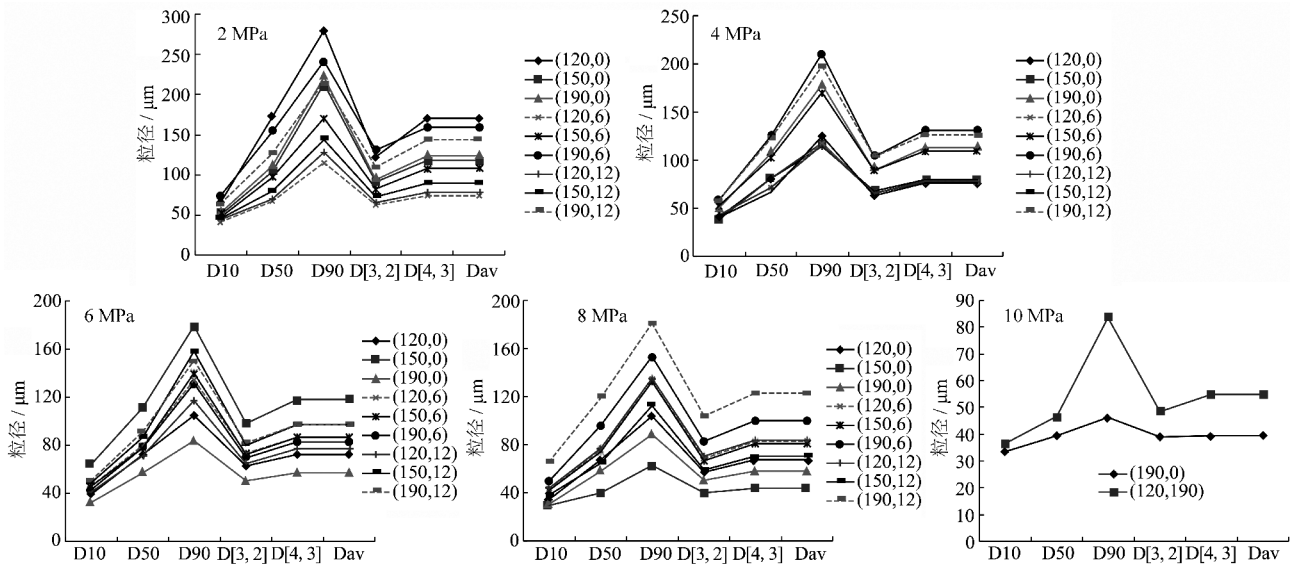


图4 不同压力的雾化粒径参数

Fig. 4 Atomization particle size parameter in different pressures

综上,喷嘴雾场轴心处雾化粒径最小,雾场向边缘处形成雾滴逐渐增大;不同压力有一个最佳的捕尘粒径范围,8 MPa时离喷嘴150 cm轴心最佳。

### 3.2 不同喷嘴压力下的雾化粒径分布

5种直径喷嘴在相同位置(150,0)、不同压力下的实验结果如图6、7所示。

由图6、7可知:

(1)在位置(150,0)处相同压力下,喷嘴的孔径越小,所成雾场的雾滴越小,喷雾压力在8 MPa时,喷嘴2和5的粒径分布曲线明显小于喷嘴1;2和5的D50和D[3,2]均已接近50  $\mu\text{m}$ ;压力相同,喷嘴直径

越大,流量越大,喷雾粒径变化并不如小直径喷嘴;喷嘴直径在1.0~1.5 mm之间的3个喷嘴,雾化粒径在不同压力下的变化基本接近。

(2)同一喷嘴在不同压力下,大直径喷嘴的雾化粒径变化不明显,小直径喷嘴变化明显,因此,在采掘工作面喷雾降尘时,喷嘴的直径不能过大,否则对呼吸性粉尘的捕集效果就差。

(3)对于小直径喷嘴,由于井下喷雾水中一般含有一些杂质,如果喷嘴孔径过小,容易堵塞,降低喷嘴的使用可靠性,所以,在满足降尘需要的情况下,应选用孔径稍大一些的喷嘴,以1.5 mm左右最佳,最好

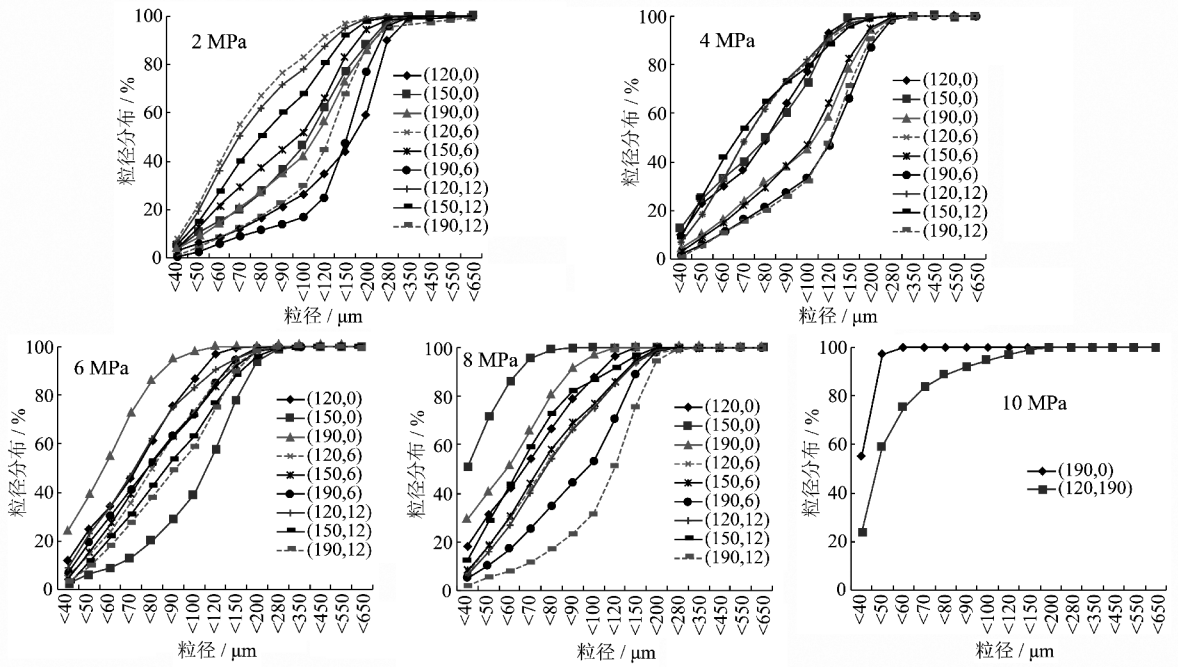


图 5 不同压力的雾化粒径分布

Fig. 5 Atomization particle size distribution in different pressures

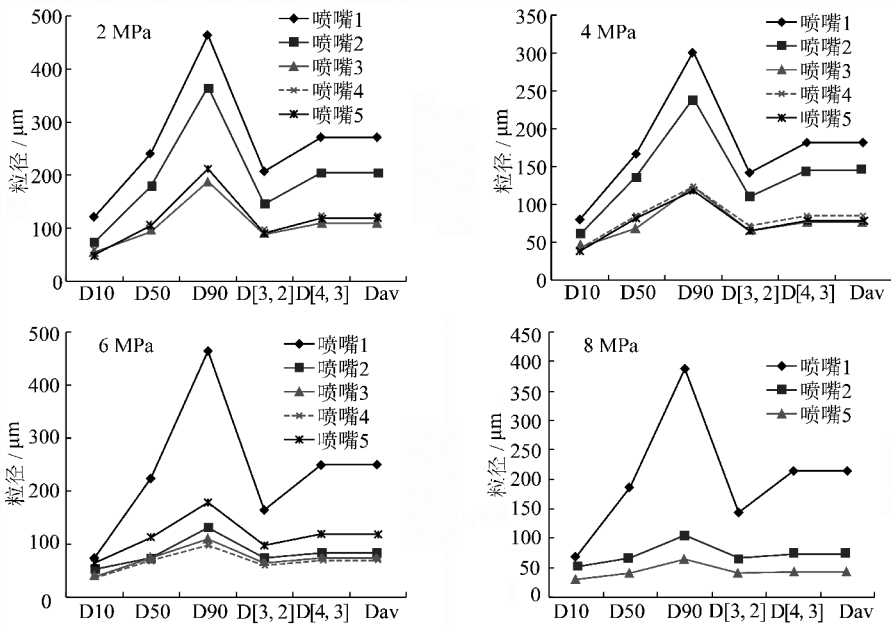


图 6 5 种直径喷嘴在不同压力下的雾化粒径参数

Fig. 6 Atomization particle size parameter for five kinds of different nozzle in different pressures

不大于 2 mm;8 MPa 压力时 3 种喷嘴的  $D[3,2]$  要低于 6 MPa 时的  $D[3,2]$ ,但如果压力继续增大到 10 MPa,则对喷雾设备的磨损程度严重增大,不利于设备的长久使用,故喷雾压力选用 8 MPa 最佳。

#### 4 应用实例

兖州矿业集团东滩煤矿 1303 综放工作面年产 600 万 t,煤机内、外喷雾为自带喷嘴,煤机内喷雾喷嘴直径 1.2 mm、外喷雾喷嘴直径 1.8 mm,煤机内喷

雾压力 2.0 MPa;支架喷雾用实验 5 号喷嘴 1.5 mm;用 KPB-315/16 清水加压泵加压。试验时,选择 4 种试验方式:无任何降尘措施;支架、煤机内外喷雾,转载点和回风巷净化水幕采用 2.0 MPa 左右的自然水压(措施 I);支架、煤机外喷雾采用 4.0 MPa,煤机内喷雾、转载点和回风巷净化水幕采用 2.0 ~ 2.5 MPa 水压(措施 II);支架、煤机外喷雾采用 8.0 MPa,煤机内喷雾、转载点和回风巷净化水幕采用 2.0 ~ 2.5 MPa 水压(措施 III)。试验结果见表 1。

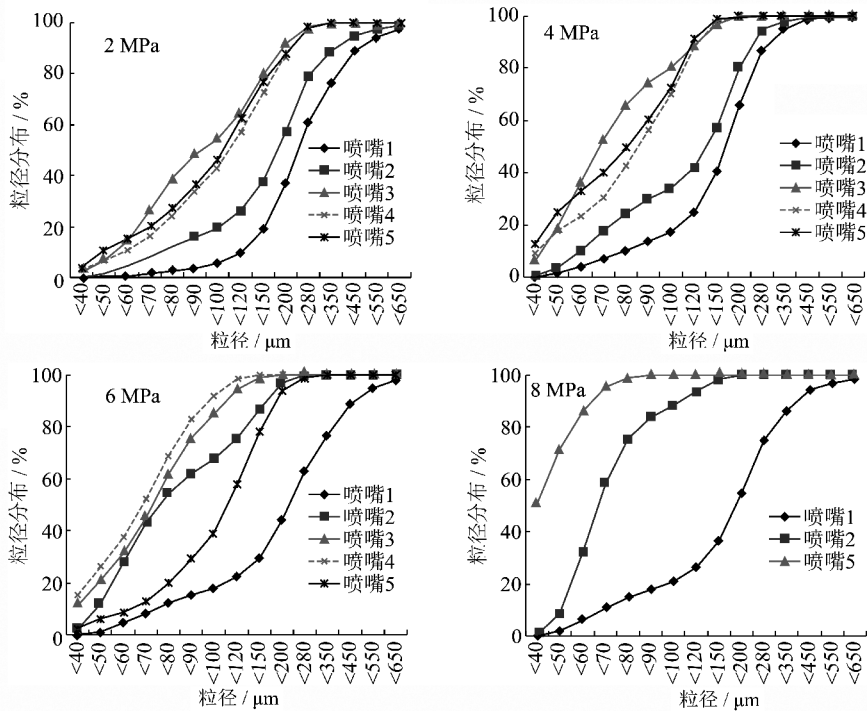


图7 5种直径喷嘴在不同压力下的雾化粒径分布

Fig. 7 Atomization particle size distribution for five kinds of different nozzle in different pressures

表1 综放工作面降尘试验结果

Table 1 The results of dust-falling experiment within full-mechanized caving face

 $\text{mg}/\text{m}^3$ 

| 工序   | 无措施   |       | 措施 I  |       | 措施 II |       | 措施 III |      |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|
|      | 全尘浓度  | 呼尘浓度  | 全尘浓度  | 呼尘浓度  | 全尘浓度  | 呼尘浓度  | 全尘浓度   | 呼尘浓度 |
| 落煤   | 3 518 | 1 862 | 255.3 | 151.3 | 96.0  | 57.0  | 50.4   | 33.1 |
| 司机处  | 1 531 | 1 048 | 177.3 | 73.6  | 69.8  | 29.8  | 37.4   | 23.2 |
| 放煤   | 2 035 | 713   | 487.3 | 210.3 | 174.2 | 80.9  | 91.9   | 42.9 |
| 移架   | 2 486 | 1 604 | 536.2 | 300.4 | 190.7 | 111.2 | 97.0   | 57.9 |
| 前部溜头 | 747   | 521   | 136.6 | 53.2  | 56.0  | 22.9  | 33.7   | 12.8 |
| 后部溜头 | 527   | 389   | 171.3 | 82.5  | 67.7  | 34.8  | 39.4   | 20.7 |
| 多工序  | 1 804 | 1 087 | 211.6 | 89.3  | 81.3  | 35.1  | 46.1   | 23.8 |
| 破碎机  | 428   | 270   | 97.1  | 55.2  | 36.7  | 22.6  | 25.1   | 13.2 |
| 转载机  | 558   | 317   | 113.2 | 60.0  | 45.1  | 26.2  | 27.8   | 19.0 |
| 回风巷  | 607   | 358   | 86.7  | 35.4  | 33.2  | 15.9  | 25.4   | 8.9  |

(1)综放工作面在无任何降尘措施时,落煤时全尘可达到 $3\,518\text{ mg}/\text{m}^3$ 。各工序产生尘对比,以落煤、移架、放煤和多工序产尘最多,这也是增加支架、煤机外喷雾压力的原因。根据上述实验数据,增加喷雾压力是非常有效的。

(2)从试验4个阶段对比可知,在采取措施I时,降尘的幅度大,落煤全尘从 $3\,518$ 降到 $255.3\text{ mg}/\text{m}^3$ ,降尘率达到92.7%,这说明只要采取措施并能正常使用,降尘效果就较为明显;在采取措施III后,落煤全尘从 $3\,518$ 降到 $50.4\text{ mg}/\text{m}^3$ ,降尘率达到98.5%,降尘率已达到了很高水平,但全尘浓度仍较高,降尘率和措施I相比,仅提高了5.8%,这是目前一些矿

并不愿使用高压喷雾降尘的原因。

(3)采取措施III后,煤机的降尘效果明显,但放煤和移架效果还没达到理想的水平。

(4)根据实验室实验数据和采煤工作面试验数据,煤机和支架喷雾降尘必须采用高压喷雾,压力最好在 $8\text{ MPa}$ 左右。

(5)工作面降尘措施必须同时采用,定期维修,才能保证较好的降尘效果。

## 5 结 论

(1)利用Winner313激光粒度分析仪,设计了喷嘴雾化实验系统,该系统能对喷嘴雾化粒度进行准确

的测定;对煤矿采煤工作面常用的 5 种喷嘴进行了 2、4、6、8、10 MPa 五个压力下的雾化粒度测定,得到了各类喷嘴在不同压力下的 D50、D90、D[3,2] 数据;喷嘴雾场轴心处雾化粒径最小,雾场向边缘处形成雾滴逐渐增大;不同压力有一个最佳的捕尘粒径范围,8 MPa 时离喷嘴 150 cm 轴心最佳。

(2)同一喷嘴在不同压力下,大直径喷嘴的雾化粒径变化不明显,小直径喷嘴变化明显,因此,在采掘工作面喷雾降尘时,喷嘴的直径不能过大,否则对呼吸性粉尘的捕集效果差;过小也易于堵塞,以 1.5 mm 左右最佳,最好不大于 2 mm。

(3)综放工作面在无任何降尘措施时,落煤时全尘可达到 3 518 mg/m<sup>3</sup>。各工序产尘对比,以落煤、移架、放煤和多工序产尘最多;增加喷雾压力对有效降尘是可行的。

(4)根据实验室实验数据和采煤工作面试验数据,煤机和支架喷雾降尘应采用高压喷雾,压力最好在 8 MPa 左右。

#### 参考文献:

- [1] 刘毅. 综采工作面粉尘运动规律及高压喷雾除尘技术的研究[D]. 北京:北京科技大学,2006.  
Liu Yi. Research on dust distribution regularity of fully mechanized mining face and high-pressure spray dust removal technology[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2006.
- [2] 周刚. 综放工作面喷雾降尘理论及工艺技术研究[D]. 青岛:山东科技大学,2009:28-32.  
Zhou Gang. Research of theory about dust preventin by water-cloud and relevant techniques for fully-mechanized caving coal face[D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2009:28-32.
- [3] 傅贵,张江石,潘结南,等. 工作面粉尘污染状况研究[J]. 煤炭学报,2006,31(1):63-66.  
Fu Gui,Zhang Jiangshi,Pan Jienan, et al. Study of longwall top-coal caving face dust pulation status[J]. Journal of China Coal Society, 2006,31(1):63-66.
- [4] 李德文,郭胜均. 中国煤矿粉尘防治的现状与发展方向[J]. 金属矿山,2009,11(S):747-752.  
Li Dewen,Guo Shengjun. The status and developing direction of the chinese coal mine dust prevent and control[J]. Metal Mine,2009, 11(S):747-752.
- [5] 宋马俊. 国外煤矿粉尘控制措施的新进展[J]. 中国职业安全卫生管理体系认证,2003(3):21-22.  
Song Majun. New developments of the method within controlling coal mine dust in overseas[J]. China Occupational Safety and Health Management System Certification,2003(3):21-22.
- [6] 尚建国,杨凤玲,程芳琴. 煤矿井下煤尘治理技术研究进展[J]. 科技情报开发与经济,2009,33(19):112-113.  
Shang Jianguo,Yang Fengling,Cheng Fangqin. The research progress of the coal mine dust prevent and cotrol technology[J]. Sci. Tech. Information Development & Economy,2009,33(19):112-113.
- [7] 陈斌,郭烈锦,张西民,等. 喷嘴雾化特性实验研究[J]. 工程热物理学报,2002,22(2):237-240.  
Chen Bin,Guo Liejin,Zhang Ximin, et al. Experimental research on the characteristic of the spray atomization[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2002,22(2):237-240.
- [8] 曹建明. 喷雾学研究的国际进展[J]. 长安大学学报(自然科学版),2005,25(1):82-87.  
Cao Jianming. International progress of research within spray study [J]. Journal of Changan University (Natural Science Edition), 2005,25(1):82-87.
- [9] 马素平,寇子明. 喷雾降尘机理的研究[J]. 煤炭学报,2005,30(3):297-300.  
Ma Suping,Kou Ziming. Study on mechanism of reducing dust by spray[J]. Journal of China Coal Society,2005,30(3):297-300.
- [10] 时训先,蒋仲安,周姝嫣,等. 综采工作面粉尘分布规律的实验研究[J]. 煤炭学报,2008,33(10):1117-1121.  
Shi Xunxian,Jiang Zhongan,Zhou Shuyan, et al. Experimental study on dust distribution regularity of fully mechanized mining face [J]. Journal of China Coal Society,2008,33(10):1117-1121.
- [11] 曾卓雄,姜培,谢蔚明. 喷嘴雾化粒径的实验研究[J]. 西安交通大学学报,2000,34(4):75-77.  
Zeng Zhuoxiong,Jiang Pei,Xie Weiming. Experimental research on the particle size of spray atomization[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2000,34(4):75-77.
- [12] Cheng Weimin,Wang Gang,Nie Wen, et al. Study and application of automatic spray system on blasting face in thin seam of Beisu Coal Mine [A]. Progress in Safety Science and Technology:Vol VII [C]. Beijing: Science Press/Science Press USA Inc., 2008: 1582-1585.
- [13] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京:机械工业出版社,2005:116-156.  
Cao Jianming. Spray study [M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2005:116-156.
- [14] 刘向升. 综放工作面支架喷雾降尘装置的选择及优化[D]. 青岛:山东科技大学,2007:28-32.  
Liu Xiangsheng. Selecting and optimizing of the set of spraying dust falling between supports in full-mechanized (caving) mining face [D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology, 2007:28-32.
- [15] 岳晓峰,王瑾,梁亮,等. 油束雾化形成机理分析[J]. 中国公路学报,2007,20(5):117-121.  
Yue Xiaofeng,Wang Jin,Liang Liang, et al. Analysis of atomization forming of pocket of oil [J]. Journal of Chinese Road,2007, 20(5):117-121.
- [16] 范明豪,周华,杨华勇. 高压细水雾灭火喷嘴的雾化特性研究[J]. 机械工程学报,2002,38(9):17-21.  
Fan Minghao,Zhou Hua,Yang Huayong. Research on the atomization characteristic of flame dousing spray with water mist under high pressure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2002,38(9):17-21.