

王鹏飞,刘荣华,王海桥,等. 煤矿井下气水喷雾雾化特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1213-1220. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1098

Wang Pengfei, Liu Ronghua, Wang Haiqiao, et al. Atomization characteristics of air-water spray in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1213-1220. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1098

煤矿井下气水喷雾雾化特性实验研究

王鹏飞^{1,2}, 刘荣华², 王海桥², 陈世强^{1,2}, 谭焯昊², 苟尚旭²

(1. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了分析煤矿井下气水喷雾雾化特性, 基于自行设计的气水喷雾实验平台, 采用电磁流量计、空气质量流量计及马尔文实时高速喷雾粒度分析仪对空气雾化喷嘴流量特性、雾化粒度的空间分布规律及影响因素开展了实验研究。结果表明: 随着供水压力的增加, 喷嘴耗气量以指数形式不断递减, 而耗水量以指数形式递增; 喷嘴耗气量随供气压力以指数形式递增, 而喷嘴耗水量基本呈现线性递减趋势。雾滴粒径沿喷嘴轴线方向不断增大; 距离喷嘴较近的纵断面上, 雾滴粒径沿径向不断增大, 并呈现不对称分布; 位于雾流中部的纵断面上, 轴线附近区域雾滴粒径沿径向不断增大, 而雾流外部区域雾滴粒径呈现沿重力方向增大的趋势; 在靠近雾流末端衰减区内, 雾滴粒径沿重力方向不断增大。供气压力一定时, 雾滴粒径随着供水压力的增加呈现先增大后减小的变化规律, 且供气压力越大所对应的拐点水压越高; 随着供气压力的增加, 雾滴粒径不断减小, 且减小幅度随供气压力增加而有所下降。

关键词: 气水喷雾; 喷嘴流量; 雾滴粒径; 供气压力; 供水压力

中图分类号: TD714.41

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2017)05-1213-08

Atomization characteristics of air-water spray in underground coal mine

WANG Peng-fei^{1,2}, LIU Rong-hua², WANG Hai-qiao², CHEN Shi-qiang^{1,2}, TAN Xuan-hao², GOU Shang-xu²

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the atomization characteristics of air-water spray in underground coal mine, the electromagnetic flowmeter, air-mass flowmeter and Malvern droplet particle size analyzer were used to make a systematic investigation on the nozzle flow characteristics and the spatial distribution law and influence factors of atomized particle size based on the experimental system designed by authors. The study results indicate that the water consumption of nozzle appears exponential growth with the increase of water supply pressure, and the air consumption decreases in the way of exponential. With the increase of air supply pressure, the air consumption of nozzle increases in the way of exponential, and the water consumption appears linearly decrease. The particle size of droplets increases with the distance away from nozzle in axial direction. On the longitudinal section near the nozzle, the particle size of droplets increases from inside to outside, and the particle size presents an asymmetric distribution. On the longitudinal section located in central spray flow, the particle size of droplets near the central axis increases with the distance away from the axis, and it

收稿日期: 2016-08-08 修回日期: 2016-11-16 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1361118, 51574123); 中国博士后科学基金资助项目(2015M582118)

作者简介: 王鹏飞(1984—), 男, 江西九江人, 副教授, 硕士生导师, 博士。Tel: 0731-58290040, E-mail: pfwang@sina.cn。通讯作者: 刘荣华(1964—), 男, 湖南邵阳人, 教授, 硕士生导师, 博士。Tel: 0731-58290396, E-mail: rhliu2008@sina.com

presents an increase trend along gravity direction in the outer domain of spray flow. In the attenuation zone of the spray flow, the particle size of droplets increases continuously along gravity direction. With the increase of water supply pressure, the particle size of droplets increases first and then declines slightly. The particle size of droplets decreases with the increase of air supply pressure, and the amplitude shows a decrease trend.

Key words: air-water spraying; nozzle flow; droplet size; air supply pressure; water supply pressure

20世纪90年代以来,随着煤矿机械化程度的不断提高与开采强度的逐渐加大,煤矿井下采掘工作面粉尘质量浓度剧增,作业环境恶化,严重威胁着矿工的安全生产和工人的身体健康^[1-4]。目前,国内外煤矿采掘工作面主要采用煤体预注水、通风控尘、除尘器抽尘净化、喷雾降尘及封闭隔尘等防尘措施^[5-8]。喷雾降尘具有经济、简便和实用等优点,在国内外煤矿井下得到广泛应用。煤矿井下采掘工作面喷雾一般采用常规的压力型喷嘴,由于喷雾压力的限制,其雾化效果较差,全尘降尘效率一般低于50%,对呼吸性粉尘的降尘效率甚至低于30%。而且,常规的压力喷雾耗水量大,影响煤质和工作面作业环境^[9-13]。

气水喷雾是以压力水和压缩空气作为双动力的一种新型喷雾方式,相对于常规喷雾方式,其具有耗水量小、雾化效果好、对水压要求低及降尘效率高(特别针对呼吸性粉尘)等优势。根据气液混合方式不同,可将空气雾化喷嘴分为内混式和外混式。内混式空气雾化喷嘴液体和空气在内部混合,雾化原理为空气破碎和碰撞,所形成的雾滴粒径分布较为理想,煤矿井下气水喷雾降尘一般采用该类喷嘴。目前,有关内混式空气雾化喷嘴喷雾特性方面的研究大多集中在内燃机燃烧领域,所研究的喷嘴均为小孔

径、小流量喷嘴,而且研究的液相介质也均为燃油^[14-19]。近几年,国内部分矿井将气水喷雾应用于煤矿井下粉尘防治,相对于常规压力喷雾,不仅耗水量大大减少,而且取得了良好的降尘效果^[20-22]。目前,虽然气水喷雾降尘已在我国部分矿井开展了现场应用,但对其缺乏系统的理论研究。气水喷雾降尘效果与喷雾特性密切相关,笔者基于自行设计的煤矿井下气水喷雾实验平台,对空气雾化喷嘴流量特性、雾化粒度的空间分布规律及影响因素开展研究,研究成果将为气水喷雾降尘在煤矿井下采掘工作面粉尘防治方面的应用提供理论指导和设计依据。

1 实验系统与方案

1.1 实验系统

设计了可仿真煤矿井下采掘工作面通风、产尘及喷雾等状态的气水喷雾实验系统,如图1所示。该系统主要由巷道模型、高压水泵、空气压缩机、水箱、马尔文实时高速喷雾粒度分析仪及相关的管道、阀门、测量仪表等组成。巷道模型由入口段、整流段、测量段、喷雾段、轴流风机及出口段等组成。为便于马尔文实时高速喷雾粒度分析仪的测量,巷道模型喷雾段采用板厚为1 cm的有机玻璃制作,其他部分均由钢板加工制作而成。

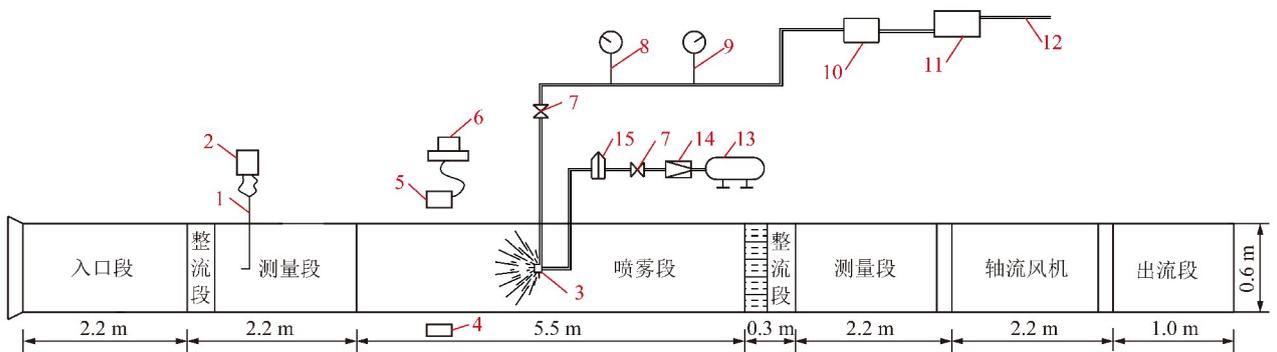


图1 气水喷雾实验系统示意

Fig. 1 Schematic of experimental system for air-water spraying

1—毕托管;2—风速仪;3—空气雾化喷嘴;4—激光发射器;5—激光接收器;6—计算机;7—流量调节阀;8—数字式压力表;9—电磁流量计;10—高压水泵;11—储水箱;12—接市政自来水管;13—空气压缩机;14—减压阀;15—质量流量计

实验系统的轴流风机采用无级变频进行启动和调节,在巷道模型内形成稳定风流。高压泵和空气压缩机分别将水和空气加压后按照一定比例输送至喷

嘴的进水端口和进气端口。空气和水在喷嘴气液混合式混合后沿水平方向由喷雾口射出形成喷雾场,由安设在喷雾段两侧的马尔文实时高速喷雾粒度分析

仪的激光发射器和接收器分析喷雾场的雾滴粒径分布情况,如图2所示。采用电磁流量计和质量流量计分别对喷嘴耗水量和耗气量进行测定。采用毕托管和压差计,通过动压法测量巷道模型内风流速度。实验选用广东省东莞市鑫悦净化科技公司生产的SUC型内混式空气雾化喷嘴,雾流形状为实心圆锥,喷嘴结构如图3所示。由图3可知,该类喷嘴主要由进水端口、进气端口、液体帽、空气帽及调节阀等组成。本次实验所采用喷嘴的气、水端口内径均为12.0 mm,喷嘴液体帽注水孔和注气孔直径分别为1.5 mm和2.0 mm,注气孔数量为4个,空气帽出口直径为2.0 mm。



图2 巷道模型与喷雾粒度测定仪

Fig. 2 Tunnel model and droplet particle size analyzer



图3 实验用空气雾化喷嘴

Fig. 3 Air-blast atomizer used in experiment

1.2 实验方案

第1组实验为喷嘴流量特性实验,通过改变供气压力和供水压力,考察喷嘴流量与工况参数之间的关系。采用电磁流量计和空气质量流量计对供气压力分别为0.5 MPa时的8种(0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0 MPa)供水压力下的喷嘴耗水量和耗气量进行测定。同时,选择供水压力0.5 MPa时的6种(0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7 MPa)供气压力下的喷嘴流量进行测定,考察喷嘴流量与供水压力之间的关系。

第2组实验为雾滴粒径的空间分布实验。将供水压力设置为0.5 MPa,对供气压力分别为0.4,0.5和0.6 MPa时的气水喷雾雾化粒径进行测定。通过移动激光粒度分析仪改变激光测试线与喷嘴的水平

和垂直距离,测定喷雾场不同位置的雾滴粒径分布情况。本组实验根据喷嘴现场应用的位置情况,在喷嘴轴线方向选取6个位置,即离喷嘴25,50,75,100,125,150 cm,并分别用空间坐标表示为(25,0),(50,0),(75,0),(100,0),(125,0),(150,0)。分别在 $x=50$ cm, $x=75$ cm, $x=125$ cm纵断面上,以喷嘴轴线为中心沿重力方向上、下各选择3个测点,即距离轴线5,10,15 cm,各测点空间位置布置如图4所示。

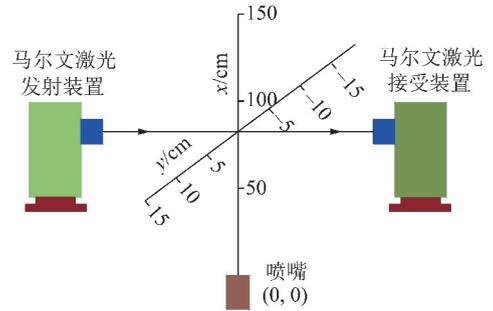


图4 测点空间位置示意

Fig. 4 Schematic diagram of location of measure point

第3组实验为供气压力的影响实验。根据文献[19,23],喷嘴雾流稳定区出现在喷口下游30~80 cm区域,本组实验选择喷口前方50 cm截面中心作为雾化性能参数的采集点。对供水压力分别为0.4,0.5和0.6 MPa时,6种不同供气压力下(0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7 MPa)的雾滴粒径进行测定,考察供气压力对气水喷雾雾化粒度的影响。第4组实验为供水压力的影响实验,保持雾化参数采集位置不变,对供气压力分别为0.4,0.5和0.6 MPa时,8种不同供水压力下(0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9和1.0 MPa)的雾滴粒径进行测定,考察供水压力对气水喷雾雾化粒度的影响。

2 实验结果及分析

2.1 喷嘴流量特性实验

图5为供气压力0.5 MPa时,喷嘴流量与供水压力的关系曲线。由图5中的实测数据可以看出,在供气压力固定时,随着供水压力的增加,喷嘴耗气量不断减小,而耗水量不断增加。对于内混式空气雾化喷嘴,空气和水在空气帽内进行混合后喷出,供气压力固定时,喷嘴耗水量随着供水压力增加而不断增加。同时,随着供水压力增加,空气帽内气液两相流压力升高,进气端口阻力增加,喷嘴耗气量不断下降,从而导致气液质量流量比随着供水压力的增加而不断下降。将上述实验数据进行拟合,得出喷嘴流量与供水压力的关系曲线和拟合方程,如图5所示。由图5(a)中的耗气量与供水压力的拟合曲线可以看出,供气压力固定时,随

着供水压力的增加,喷嘴耗气量以指数形式递减,且供水压力越大,曲线越趋于平缓,耗气量降幅越小。由图5(b)中的耗水量与供水压力的拟合曲线发现,喷嘴耗水量随供水压力呈现指数增长的变化规律,且曲线斜率随着供水压力的增大而减小。

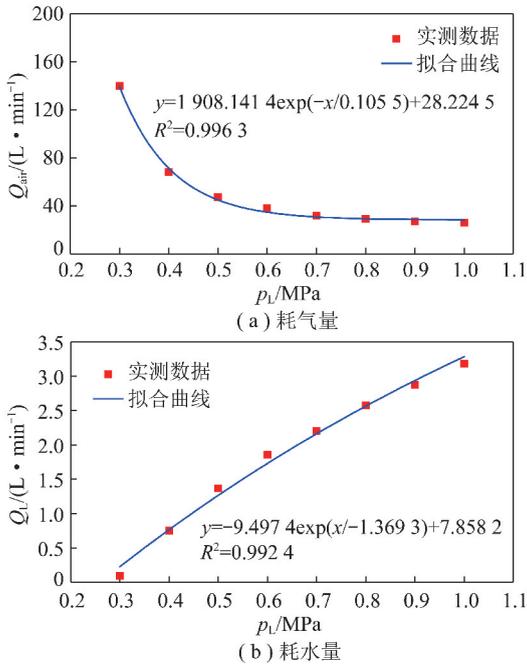


图5 供水压力对喷嘴流量的影响

Fig. 5 Effect of water supply pressure on the nozzle flow rate

选取供水压力为0.5 MPa时不同供气压力下的喷嘴流量进行实验,得出喷嘴流量与供气压力的相关性规律,如图6所示。图6中的2条喷嘴流量拟合曲线相关性系数 R^2 均大于0.99,证明喷嘴流量与供水压力具有较高的相关性。由图6还可以看出,当供水压力固定时,随着供气压力的增加,喷嘴耗气量以指数形式递增,而耗水量基本呈现线性递减趋势。

对于实验所选用的空气雾化喷嘴,当供水压力为0.5 MPa时,喷嘴流量与供气压力关系的拟合方程为

$$Q_{\text{air}} = 2.7607 \exp(p_{\text{air}}/0.1714) - 2.5263 \quad (1)$$

$$Q_L = 3.5766 - 4.1683 p_{\text{air}} \quad (2)$$

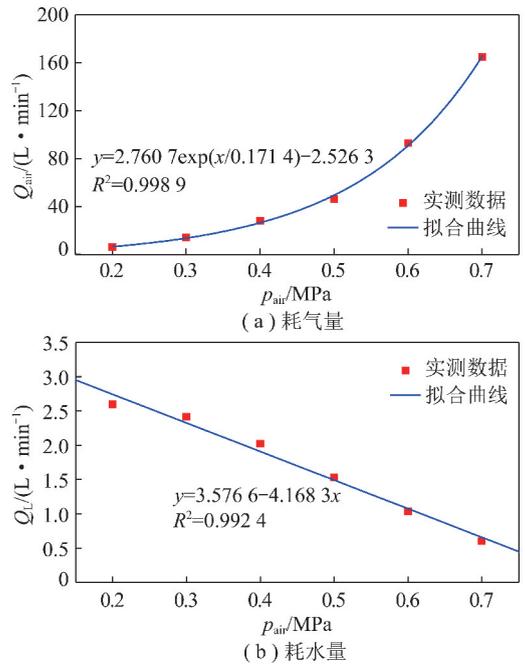


图6 供气压力对喷嘴流量的影响

Fig. 6 Effect of air supply pressure on the nozzle flow rate

从以上分析可以看出,对于固定结构参数的空气雾化喷嘴,影响喷嘴流量的工况参数包括供气压力和供水压力。根据图5和图6所得出的喷嘴流量与单一工况参数的拟合函数,设置喷嘴流量与供气压力和供水压力关系的目标函数,采用1stOpt软件进行数据拟合,得出该喷嘴耗气量和耗水量的计算公式分别如式(3),(4)所示:

$$Q_{\text{air}} = [8.7641 \exp(6.2507 p_{\text{air}}) - 2.7552] \times [7.8599 \exp(-8.7892 p_L) + 0.1421] \quad (3)$$

$$Q_L = (2.7404 - 3.2821 p_{\text{air}}) \times [3.6799 - 6.5965 \exp(-2.0392 p_L)] \quad (4)$$

为了验证上述喷嘴流量计算公式的准确性,实验还对其他工况的喷嘴流量进行了实测,并与拟合公式计算结果进行了对比,见表1。由表1可知,喷嘴流量实验测定结果与拟合公式计算结果相对误差均小于12%,部分结果误差甚至小于5%,上述公式可用于该空气雾化喷嘴流量的理论计算。

表1 实验与拟合公式计算喷嘴流量结果

Table 1 Experimental and calculation results of nozzle flow rate

| 工况序号 | $p_{\text{air}}/\text{MPa}$ | p_L/MPa | 耗气量/(L·min ⁻¹) | | 耗气量误差/% | 耗水量/(L·min ⁻¹) | | 耗水量误差/% |
|------|-----------------------------|------------------|----------------------------|----|---------|----------------------------|------|---------|
| | | | 拟合 | 实验 | | 拟合 | 实验 | |
| 1 | 0.4 | 0.4 | 39.09 | 44 | 11.16 | 1.09 | 1.14 | 4.39 |
| 2 | 0.4 | 0.6 | 18.98 | 21 | 9.62 | 2.48 | 2.27 | 9.25 |
| 3 | 0.5 | 0.4 | 73.94 | 68 | 8.74 | 0.84 | 0.75 | 12.00 |
| 4 | 0.5 | 0.7 | 31.25 | 32 | 2.34 | 2.31 | 2.21 | 4.52 |
| 5 | 0.6 | 0.7 | 58.78 | 59 | 0.37 | 1.62 | 1.48 | 9.46 |
| 6 | 0.6 | 0.8 | 55.16 | 52 | 6.08 | 1.84 | 1.94 | 5.15 |

2.2 雾化粒度空间分布

2.2.1 沿轴向方向

图7为3种不同工况条件下,雾滴索太尔平均粒径 $D_{[3,2]}$ 沿喷嘴轴向分布曲线。由图7中3条雾化粒径空间分布曲线可以发现,沿喷嘴轴线方向,随着距喷嘴的距离增加, $D_{[3,2]}$ 均呈现增大的趋势。内混式空气雾化喷嘴依靠气流对液体的剪切破碎作用而使液体于气水混合室内完成一次雾化。雾滴离开喷雾出口以后,由于内外压力差的骤变,雾滴产生急剧膨胀并进一步破裂,形成二次雾化。根据文献[23],二次雾化发生在离喷嘴出口下游相当短的距离内,本次雾化粒径测定未涉及此区域。低压水由空气雾化喷嘴经一次、二次雾化破碎成若干细小雾滴颗粒,喷嘴下游轴线中心区域雾滴浓度较高,由于湍流的脉动和中心雾流的卷吸效应,造成细小雾滴在沿轴向运动过程中不断凝聚,从而造成雾滴粒径沿轴线方向不断增加。

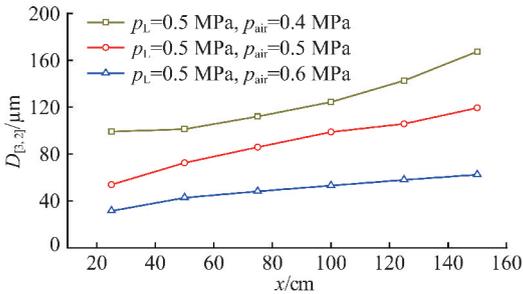


图7 雾滴粒径 $D_{[3,2]}$ 沿轴向分布曲线

Fig. 7 Axial distribution curve of $D_{[3,2]}$

2.2.2 沿径向方向

图8为雾化粒径参数 $D_{[3,2]}$ 沿径向的分布,选取的断面为 $x=50, 75, 125$ cm。由图8中 $x=50$ cm时的 $D_{[3,2]}$ 变化曲线可以看出,距离喷嘴较近的下流流场纵断面上,雾滴粒径沿径向即随着距喷嘴轴线距离的增大而增大,如激光粒度分析仪在不同空间位置(50,0), (50,5), (50,10), (50,15)处,所测雾化粒径的指标参数 $D_{[3,2]}$ 由72.52 μm 增加至91.99 μm , 99.17 μm 和102.53 μm 。从该曲线还可以看出,距离轴线相同距离位置处的下半区域雾滴粒径大于上半区域,如位置(50,10)的 $D_{[3,2]}$ 为99.17 μm ,而位置(50,-10)的 $D_{[3,2]}$ 增大至112.1 μm 。液体经喷嘴雾化形成的液滴颗粒中,粒径较大的颗粒具有较大的动量,其贯穿能力强,比小雾滴更容易到达雾流边缘,飞行的更远;另外,雾流核心区域内的强烈湍流扰动也是造成大雾滴扩散较快的原因之一。同时,受重力影响导致雾滴粒径呈现不对称分布,距离喷嘴轴线相同距离位置处的下半区域

雾滴粒径大于上半区域。

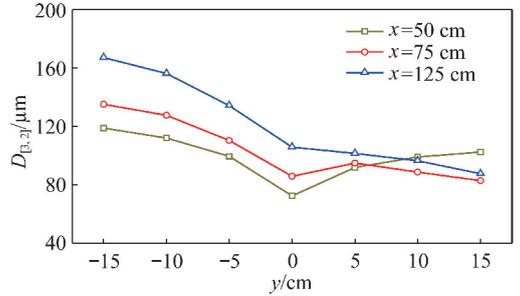


图8 $D_{[3,2]}$ 沿径向的分布曲线

Fig. 8 Radial distribution curve of $D_{[3,2]}$

由图8中雾流中部 $x=75$ cm的纵断面上 $D_{[3,2]}$ 变化曲线可以看出,位于轴线附近区域(-5 cm $<y<5$ cm)雾滴粒径仍保持前一断面相同的变化规律,即随着径向距离增大雾滴粒径不断增大,但靠近雾流外部区域($y>5$ cm),雾滴粒径呈现沿重力方向增大的趋势。在雾流中部纵断面上,位于轴线附近区域的雾滴保持较高的径向分速度和动量,能够克服重力的影响,使得雾滴粒径分布仍保持前一断面变化规律。然而,雾滴沿径向运动过程中速度不断衰减,靠近雾流外部区域的雾滴径向速度和动量较小,雾滴重力占主导地位,导致该区域雾滴粒径表现沿重力方向增大的变化规律。在靠近雾流末端衰减区内,由于雾滴速度衰减剧烈,雾滴在径向方向上的分速度与动量较小,其运动规律主要受重力支配,所以该雾流区域纵断面的雾滴粒径表现出如图6所示中 $x=125$ cm时的曲线变化规律,即雾滴粒径沿重力方向不断增大。

2.3 供水压力对雾滴粒径的影响

表2为供气压力0.5 MPa时,不同供水压力下的雾化特性参数。由表2中的雾滴粒径参数数据可以发现,当供水压力在0.3~0.9 MPa之间变化时,描述雾滴粒径大小的所有参数即 D_{10} , D_{50} , D_{90} , $D_{[3,2]}$ 及 $D_{[4,3]}$ 均随着供水压力的增大而增大,如供水压力为0.3 MPa时,雾滴索太尔平均直径 $D_{[3,2]}$ 为22.50 μm ,当供水压力增加至0.4, 0.6, 0.8 MPa时,对应的 $D_{[3,2]}$ 分别增加至53.92, 90.67, 129.80 μm 。当供水压力达到0.9 MPa后,继续提高供水压力,雾滴粒径不增加反而下降,但降幅不明显,如供水压力为0.9 MPa时, $D_{[3,2]}$ 为141.12 μm ,当供水压力增加至1.0 MPa时,对应的 $D_{[3,2]}$ 为137.90 μm 。

当供水压力在0.3~0.9 MPa变化时,由于水压较低,从注水孔喷射的水流速度较小,一级雾化程度不明显,而主要以二级雾化为主,即依靠气流对液体的剪切破碎作用而使液体于空气帽内完成雾化。从喷嘴流量特性实验可知,供气压力固定时,气液质

表2 不同供水压力下的雾化特性参数

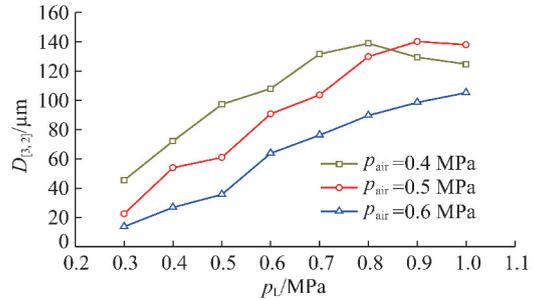
Table 2 Atomization characteristics parameters under different water supply pressure

| p_L / MPa | D_{10} / μm | D_{50} / μm | D_{90} / μm | $D_{[3,2]}$ / μm | $D_{[4,3]}$ / μm | Δ_s |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------|
| 0.3 | 14.84 | 33.22 | 68.94 | 22.50 | 38.21 | 1.63 |
| 0.4 | 34.91 | 68.90 | 129.90 | 53.92 | 76.51 | 1.38 |
| 0.5 | 31.74 | 89.28 | 275.8 | 61.02 | 130.80 | 2.73 |
| 0.6 | 50.27 | 137.1 | 478.70 | 90.67 | 205.20 | 3.12 |
| 0.7 | 55.81 | 167.6 | 569.10 | 103.70 | 245.70 | 3.06 |
| 0.8 | 62.50 | 197.50 | 606.10 | 129.80 | 272.20 | 2.75 |
| 0.9 | 68.39 | 219.50 | 621.20 | 141.12 | 287.90 | 2.52 |
| 1.0 | 66.25 | 213.40 | 622.00 | 137.90 | 285.10 | 2.60 |

注: $D_{[3,2]}$ 和 $D_{[4,3]}$ 分别表示索太尔平均径(SMD)和体积加权平均径; D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 为特征粒径,分别代表小于此颗粒的颗粒体积占全部颗粒总体积的10%、50%和90%; Δ_s 为相对尺寸范围,描述雾滴尺寸的分散程度。

量流量比随着供水压力的增大而不断减小,意味着气体能够提供给单位质量的液滴克服表面张力和黏性力的能量减小,使得液滴难以破碎成细小雾滴。随着供水压力的增大,注水孔水流速度不断提高,一级雾化逐渐加强,二级雾化减弱,导致供水压力达到0.9 MPa后,雾滴粒径随着供水压力增加而有所下降。对供气压力分别为0.4 MPa和0.6 MPa时的供水压力影响进行考察,也均表现出类似的变化规律,如图9所示。由图9中 $p_{\text{air}}=0.4$ MPa时的变化曲线可以发现,雾滴粒径随着供水压力的增加呈现先增大后减小的变化规律,但相对于 $p_{\text{air}}=0.5$ MPa的曲线,其拐点提前至 $p_L=0.8$ MPa。由图9中 $p_{\text{air}}=0.6$ MPa时的变化曲线发现,雾滴粒径随着供气压力增加而一直增加,但增幅有所下降,在实验所测定的供水压力

范围内未出现拐点,拐点水压高于1.0 MPa。

图9 供水压力对 $D_{[3,2]}$ 的影响Fig. 9 Effect of water supply pressure on the $D_{[3,2]}$

从以上实验结果和分析发现,供气压力一定时,雾滴粒径随着供水压力的增加呈现先增大后减小的变化规律,且供气压力越大所对应的拐点水压越高。分析其原因是供气压力越大,喷嘴二级雾化越强烈,一级雾化需在较高的供水压力时才能发挥主体作用,导致拐点水压增大。从实验中还可以发现,虽然供水压力到达拐点后,继续提高供水压力,可以改善雾滴粒径,但从实验结果发现减小的幅度有限。而且,由于内混式空气雾化喷嘴出口排泄能力有限,供水压力过高会导致气液混合室内压力升高,甚至会出现水流倒灌压缩空气管道,影响正常喷雾。因此,煤矿井下采掘工作面进行气水喷雾降尘时,因合理控制供水压力,避免水流倒灌,确保正常喷雾的形成。

2.4 供气压力对雾滴粒径的影响

图10为供水压力0.5 MPa时,不同供气压力下的雾滴粒径分布。由图10中的体积频率柱状图可以发现,在供水压力不变的情况下,随着供气压力的增加,体积频率峰值逐渐往左即雾滴粒径减小的方向移动;从累计体积分数曲线可以看出,雾滴特征粒径 D_{90} ,

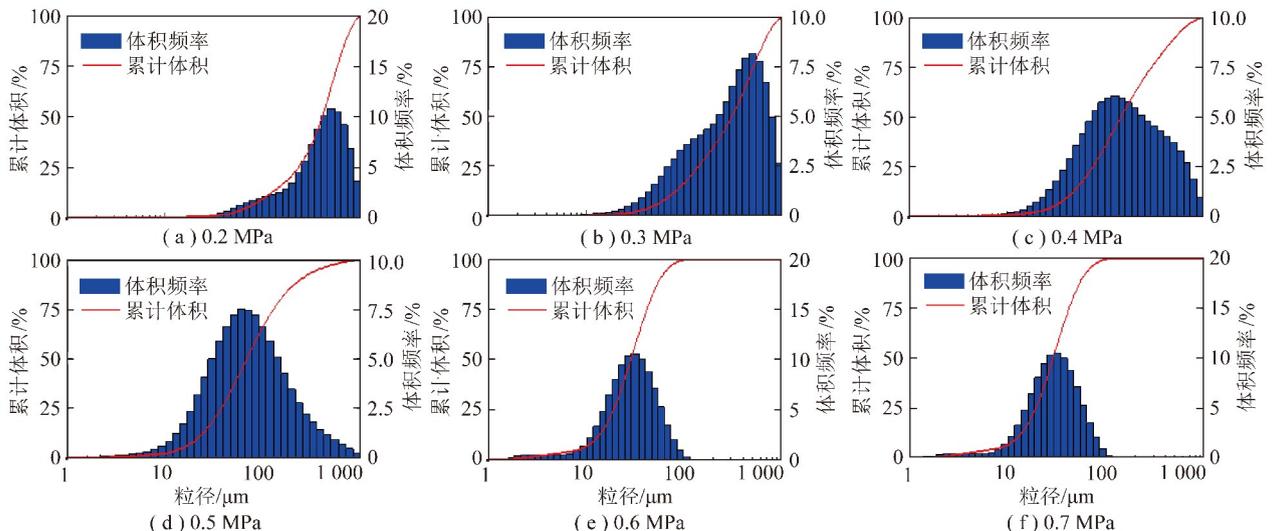


图10 不同供气压力下的雾滴粒径分布

Fig. 10 Particle size distribution of droplet under different air supply pressure

D_{50} , D_{10} 均随着供气压力的增加而不断减小。对供水压力分别为 0.4 MPa 和 0.6 MPa 时的供气压力影响进行考察,也均表现出类似的变化规律,即随着供气压力的增加雾滴粒径不断减小,如图 11 所示。

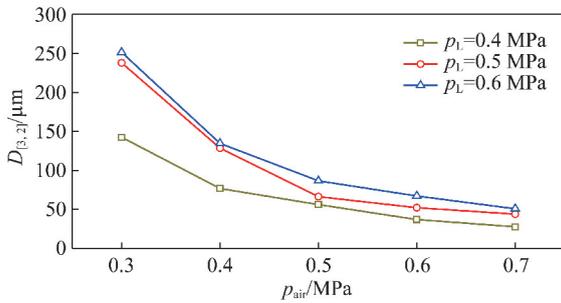


图 11 供气压力对 $D_{[3,2]}$ 的影响

Fig. 11 Effect of air supply pressure on the $D_{[3,2]}$

图 11 为供水压力分别为 0.4, 0.5, 0.6 MPa 时,雾滴索太尔平均直径 $D_{[3,2]}$ 与供气压力的关系曲线。由图 11 可以发现,当供水压力固定时,雾滴索太尔平均直径 $D_{[3,2]}$ 随着供气压力的增加而减小,如供水压力为 0.5 MPa 时, $D_{[3,2]}$ 由供气压力为 0.2 MPa 时的 313.07 μm , 分别减小至供气压力为 0.3, 0.5, 0.7 MPa 时的 237.81, 66.34, 52.23 μm 。由图 11 还可以发现,当供气压力增大至 0.5 MPa 后,继续提高供气压力,粒径的减小幅度有所降低,如供水压力为 0.5 MPa 时,供气压力由 0.6 MPa 提升至 0.7 MPa, D_{50} 和 $D_{[3,2]}$ 仅分别减少 11.69 μm 和 8.24 μm 。对于内混式空气雾化喷嘴,当供水压力固定时,气液质量流量比随着供气压力的提高而不断增大,气体能够提供给液滴进行雾化的能量增加,有利于液滴破碎成更小颗粒。

由以上分析可见,在采掘工作面进行气水喷雾降尘时,为确保呼吸性粉尘降尘效率,应适当提高气液质量流量比来改善气水喷雾雾化效果。然而,随着气液流量比的增加,气水喷雾耗水量不断下降,导致单位空间含水量及雾滴浓度均随之下降,不利于粉尘的捕获与沉降。因此,在现场应用过程中,应综合考虑耗水量、雾化效果及降尘效率,合理选择工况参数。

3 结 论

(1) 当供气压力固定时,随着供水压力的增加,喷嘴耗气量以指数形式不断递减,而耗水量以指数形式递增;供水压力固定时,随着供气压力的增加,喷嘴耗气量以指数形式递增,而喷嘴耗水量基本呈现线性递减趋势。

(2) 雾滴粒径沿喷嘴轴线方向,随着距喷嘴的距离增加而不断增大;距离喷嘴较近的纵断面上,雾滴

粒径沿径向不断增大,并呈现不对称分布,距离喷嘴轴线相同距离位置处的下半区域雾滴粒径大于上半区域;雾流中部的纵断面上,位于轴线附近区域雾滴粒径随着径向距离增大雾滴粒径不断增大,但靠近雾流外部区域,雾滴粒径呈现沿重力方向增大的趋势;在靠近雾流末端衰减区内,雾滴粒径沿重力方向不断增大。

(3) 供气压力一定时,雾滴粒径随着供水压力的增加呈现先增大后减小的变化规律,且供气压力越大所对应的拐点水压越高。

(4) 供水压力固定时,随着供气压力的增加,气液流量比不断增大,雾滴粒径不断减小,且减小幅度随供气压力增加而有所下降。

参考文献 (References):

- [1] 许满贵,刘欣凯,文新强. 煤矿综掘工作面高效喷雾降尘系统[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2015, 30(2): 1-7.
Xu Mangui, Liu Xinkai, Wen Xinqiang. Full-mechanized excavation face efficient sprinkler & dust fall system[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 30(2): 1-7.
- [2] 时训先,蒋仲安,周妹嫣,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 Zhong'an, 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.
- [3] 时训先,蒋仲安,褚燕燕. 煤矿综采工作面防尘技术研究现状及趋势[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(1): 41-43.
Shi Xunxian, Jiang Zhong'an, Chu Yanyan. Current development an trend of dust control technology research of fully mechanized coal faces[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2005, 1(1): 41-43.
- [4] Wang Pengfei, Feng Tao, Liu Rouhua. Numerical simulation study on the dust distribution of full-mechanized face under the isolation effect of air curtain[J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(1): 65-69.
- [5] 徐厚学,施国华,郑彦奎. 综采面采煤机割煤粉尘分布特性及防治技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(3): 75-77.
Xu Houxue, Shi Guohua, Zheng Yankui. Distribution characteristics of dust produced in cutting coal and prevention technology at fully-mechanized coal face[J]. Journal of Coal Mine Safety, 2013, 44(3): 75-77.
- [6] 陈贵,王德明,王和堂,等. 大断面全岩巷综掘工作面泡沫降尘技术[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1859-1864.
Chen Gui, Wang Deming, Wang Hetang, et al. The technology of controlling dust with foam for fully mechanized excavation face of large cross-section rock tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1859-1864.
- [7] 程卫民,聂文,姚玉静,等. 综掘工作面旋流气幕抽吸控尘流场的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1342-1348.
Cheng Weimin, Nie Wen, Yao Yujing, et al. Numerical simulation

- on the flow field of swirling flow air curtain aspiration control dust in fully mechanized workplace[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8):1342-1348.
- [8] 王鹏飞,刘荣华,汤梦,等.煤矿井下高压喷雾雾化特性及其降尘效果实验研究[J].煤炭学报,2015,40(9):2124-2130.
Wang Pengfei, Liu Ronghua, Tang Meng, et al. Experimental study on atomization characteristics and dust suppression efficiency of high-pressure spray in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 40(9):2124-2130.
- [9] 聂文,程卫民,周刚.综掘工作面压风气幕形成机理与阻隔效果分析[J].煤炭学报,2015,40(3):609-615.
Nie Wen, Cheng Weimin, Zhou Gang. Formation mechanism of pressure air curtain and analysis of dust suppression's effects in mechanized excavation face[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3):609-615.
- [10] Zhou Q C, Steve N. Research on numerical emulator of mine methane and coal dust explosion[J]. Journal of Coal Science and Engineering(China), 2008, 14(3):447-452.
- [11] 程卫民,刘伟,聂文,等.煤矿采掘工作面粉尘防治技术及其发展趋势[J].山东科技大学学报(自然科学版),2010,29(4):77-82.
Cheng Weimin, Liu Wei, Nie Wen, et al. The prevention and control technology of dusts in heading and winning faces and its development tendency[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2010, 29(4):77-82.
- [12] Nie Wen, Cheng Weimin, Han Li, et al. Simulation on dissolute and dust dispersion in comprehensive mechanized heading face with forced-exhaust ventilation[J]. Journal of Coal Science and Engineering(China), 2011, 17(3):298-304.
- [13] 周刚,聂文,程卫民,等.煤矿综放工作面高压雾化降尘对粉尘颗粒微观参数影响规律分析[J].煤炭学报,2014,39(10):2053-2059.
Zhou Gang, Nie Wen, Cheng Weimin, et al. Influence regulations analysis of high-pressure atomization dust-settling to dust particle's microscopic parameters in fully mechanized caving coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10):2053-2059.
- [14] 吉晓莉,陈家炎,赵云惠.内混式空气雾化喷嘴的研究[J].武汉工业大学学报,1998,20(3):47-49.
Ji Xiaoli, Chen Jiayan, Zhao Yunhui. Study on internal blend air-blast atomizer[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1998, 20(3):47-49.
- [15] 郑斌,姬丽霞,路春美,等.电厂SCR空气雾化喷嘴的雾化特性研究[J].环境工程,2009,27(3):79-86.
Zheng Bin, Ji Lixia, Lu Chunmei, et al. Study on atomization characteristics of the SCR airblast atomizer in electric power plant[J]. Environment Engineering, 2009, 27(3):79-86.
- [16] Anubhav Sinha, R Surya Prakash, A Madan Mohan, et al. Airblast spray in crossflow-structure, trajectory and droplet sizing[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 72(1):97-113.
- [17] Ma Rui, Dong Bo, Yu Zhongqiang, et al. An experimental study on the spray characteristics of the air-blast atomizer[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88(12):149-156.
- [18] Raj Mohan B, Jain R K, Meikap B C. Comprehensive analysis for prediction of dust removal efficiency using twin-fluid atomization in a spray scrubber[J]. Separation and Purification Technology, 2008, 63(5):269-277.
- [19] 曹建明,朱辉,郭广祥,等.空气助力改善液滴雾化质量的研究[J].实验流体力学,2013,27(1):56-60,87.
Cao Jianming, Zhu Hui, Guo Guangxiang, et al. Study on assistant to improve quality of droplet atomization[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(1):56-60, 87.
- [20] 侯腾彦,高贵军,刘邱祖.矿用风水雾化器液滴破碎机理及其降尘效率研究[J].矿山机械,2014(7):132-135.
Hou Tengyan, Gao Guijun, Liu Qiuzu. Study on droplet breakup mechanism and dust-fall efficiency of mine wind-water atomizer[J]. Mine Machinery, 2014(7):132-135.
- [21] 句海洋,凌标灿,彭驰,等.综掘工作面机载气水两相喷雾装置的应用[J].煤炭工程,2015,47(4):131-133.
Ju Haiyang, Ling Biaocan, Peng Chi, et al. Application of water-air two-phase spray device on coal shearer in fully mechanized tunneling working site[J]. Coal Engineering, 2015, 47(4):131-133.
- [22] 李瑞升,宋召谦.采掘面风水喷雾降尘技术试验与应用[J].山东煤炭科技,2004,22(2):30-32.
Li Ruisheng, Song Zhaoqian. Experiment and application of the technology of air-water spray and dust suppression[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2004, 22(2):30-32.
- [23] 刘联胜,傅茂林,吴晋湘,等.气泡雾化喷嘴喷雾平均直径在下游流场中的分布[J].工程热物理学报,2001,22(5):653-656.
Liu Liansheng, Fu Maolin, Wu Jinxiang, et al. The distribution of SMD downstream the discharge orifices of effervescent atomizers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5):653-656.