

# 空气助力改善气化炉激冷室喷嘴特性的实验研究

朱 辉,曹建明,郭广祥,陈海龙

(长安大学 汽车学院 陕西 西安 710064)

**摘要:** 设计了4种不同结构的用于气化炉激冷室内喷雾激冷的压力雾化喷嘴,采用马尔文激光粒度分析仪和数码单反照相机分别测量了不同压差、不同水流量等工况参数下的液滴粒径(SMD)  $D_{32}$ 分布和雾化角变化规律,并对4种喷嘴进行了优化选型。研究表明:雾滴粒径随压力的增加而减小,随水流量的减小而减小,空气助力可以明显改善液滴的雾化质量;雾化角随压差的增大先增大后趋于平缓;当压差增大到0.4 MPa时,雾滴粒径、雾化角等参数的变化渐趋平缓。通过比较气化炉激冷室中4种压力式雾化喷嘴的测量结果,1-2号内混式空气雾化喷嘴在4组喷嘴中具有最好的雾化效果,当气压为0.8 MPa,水流量为20 L/h时,SMD极小值为16,因此优选出喷嘴1-2作为气化炉激冷室冷模实验的定型喷嘴。

**关键词:** 雾化喷嘴;空气助力;雾化角;喷雾质量

中图分类号:TD849;TQ545

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2012)04-0109-05

## Positive effect of air assistant on nozzle's characteristics in quench chamber of gasifier

ZHU Hui, CAO Jian-ming, GUO Guang-xiang, CHEN Hai-long

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** According to the spray-quench chamber's size and operating conditions, design four kinds of pressure atomizing nozzles with different structures. Using Malvern laser particle size analyser and digital single reflex camera, research the atomization performance parameters such as sauter mean diameter (SMD) and spray angles while varying differential pressure and water flow. Optimize these four kinds of nozzles. The results show that, increasing pressure and decreasing water flow, the droplets diameter decrease, the air assistant could improve remarkably atomization effect. With the increase of differential pressure, the spray angle first increase, then tend to flatten. The droplets diameter, spray angle and other parameters level off when the differential pressure reaches up to 0.4 MPa. Adopting the #1-2 inner recirculation nozzle, the minimum SMD could reach 16 when the air pressure is 0.8 MPa, the water flow is 20 L/h. So choose the #1-2 inner recirculation nozzle for spray-quench chamber's large-scale cold model experiments.

**Key words:** atomizing nozzle; air assistant; spray angle; spray quality

气流床气化技术是以极细的粉煤为原料,以氧气和水蒸气组成气化剂,通过气化剂对原料的携带作用,高速喷入气化炉完成反应过程<sup>[1]</sup>。目前气流床气化炉排渣流程主要有激冷流程、废锅流程和废

锅激冷流程。其中激冷流程的工艺主要是气化炉、激冷室、文丘里和洗涤塔4个部分,后三者价格低廉、操作简单,这也是激冷流程技术得以推广的原因,而且从技术成熟度来讲激冷流程远优于废锅流

收稿日期:2012-03-14 责任编辑:孙淑君

作者简介:朱 辉(1984—),男,陕西西安人,硕士研究生,从事喷嘴特性及喷射与雾化研究。

引用格式:朱 辉,曹建明,郭广祥,等.空气助力改善气化炉激冷室喷嘴特性的实验研究[J].洁净煤技术,2012,18(4):109-113.

程。在激冷流程中,激冷室主要由激冷环、下降管和上升管组成。当含灰高温合成气自上而下进入激冷室时,由激冷环喷出的激冷水对含灰高温合成气进行换热冷却。本文研究的激冷室采用高压水喷雾激冷方式,由激冷环和雾化喷嘴组成。雾化喷嘴可以增大气液接触面积,增强激冷室的传热传质性能。雾滴直径越小,比表面积越大,对高温气体的激冷效果越好,但动力消耗也越大;雾滴直径过小,会导致不同程度的带液问题,影响后续操作。因此在喷雾激冷流程中雾化喷嘴的设计非常重要。

图1为Texaco气化炉激冷室结构,激冷环采用压力式雾化喷嘴,激冷水经多级水泵送入雾化喷嘴喷出,与塔内的高温合成气发生混合和相互作用,通过阀门调节各雾化器的流量使合成气降温。本文设计了4种适合喷雾激冷工艺的喷嘴,同时搭建了实验平台。以水为介质,采用马尔文激光粒度分析仪对压力式雾化喷嘴进行试验研究,在不同工况下测试了喷嘴的重要参数,比较了各喷嘴的性能。

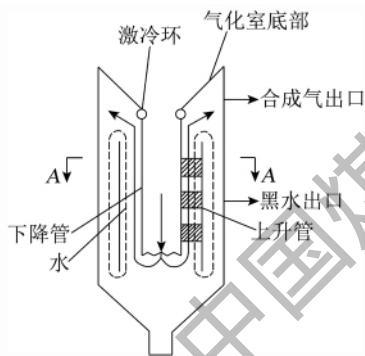


图1 Texaco 气化炉激冷室结构

## 1 实验装置与实验方法

### 1.1 喷嘴的主要结构尺寸

对于喷雾激冷的雾化喷嘴来说,其雾化机理属于压力式雾化的范畴<sup>[2]</sup>,本文设计了4种内混式扇形喷嘴,空气帽出水口的扇形角度均为 $60^\circ$ ,如图2所示,主要尺寸见表1。

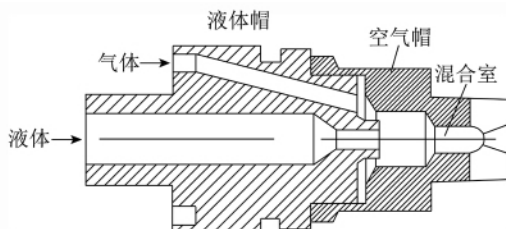


图2 内混式扇形喷嘴

表1 喷嘴的主要结构尺寸

喷嘴	液体帽出水孔直径 $D_w$ /mm	混合室出口截面积 $A_m$ /mm <sup>2</sup>
1-1号	1.6	2.5
1-2号	1.6	3.5
2-1号	2.0	2.5
2-2号	2.0	3.5

### 1.2 实验仪器及测量方法

不同结构尺寸的雾化喷嘴,均采用不锈钢材料加工,喷嘴口径为3 mm;粒径测量采用马尔文激光粒度分析仪,测量范围为 $0.2 \sim 2500 \mu\text{m}$ ;雾化角测量采用日本佳能EOS30D数码单反照相机拍摄,经图像处理软件处理,最后用MATLAB计算出雾化角。

为了精确对比各工况下喷雾雾化效果,观察喷雾变化及规律,试验须选定一个截面进行喷雾的特征参数测量,因此需要确定雾化稳定区。当气体与液体在混合室内混合形成稳定流动,高速射流在喷口附近会被气流剪切力撕裂成细小液滴,此时射流的碎裂属于雾化区。Miesse<sup>[3]</sup>通过实验证实了碎裂长度与液体流速有关;刘联胜<sup>[4]</sup>对内混式空气雾化喷嘴出口下游流场速度分布及液膜碎裂过程进行了研究,确定喷口下游30 cm前会出现喷雾回流,直到80 cm后主流平均速度下降平缓,小颗粒液滴之间会发生碰撞和黏结,因此试验将喷口下游30~80 cm区域作为喷雾稳定区,选择离喷口端面起60 cm处作为喷雾稳定截面。

为了测量喷雾锥角,照相机设置为“运动模式”,在该模式下照片不是瞬时定格的,而是动态的,利用Photoshop对照片进行灰度拉伸,能够产生边缘非常清晰的喷雾锥角图像,可以直接读取喷雾锥角。对于喷雾锥角的测量,由于喷雾液束在离开喷口后会有一定程度的收缩,呈洋葱头型,如果应用于工程中会影响液体的空间分布特性。因此须在喷嘴的出口作雾化边界的切线,2根切线的夹角即为喷雾锥角。雾化角的处理是MATLAB来求得,即用最小二乘法拟合出图像的边缘曲线得到2条边缘切线,最后计算出2条切线的夹角作为雾化角。为了有效避免人为误差的产生,使计算结果准确可信,该方法采用统一的图像处理步骤和参数,且与预期结果吻合较好。

### 1.3 实验装置与流程

试验装置如图3所示。系统主要由水路、气路、

喷射系统(扇形喷嘴)、马尔文激光粒度分析仪、闪光摄影系统等五部分组成。本试验通过改变工作时气压和水流量的大小观察喷雾变化,并在稳定段进行测量。用单反相机拍摄,对图片进行图像处理,从而得出喷雾锥角;在喷雾稳定区域内,选定一个截面,用马尔文激光粒度分析仪进行测量,得出液滴索特平均直径(SMD)  $D_{32}$  等空气雾化喷嘴的特征参数。

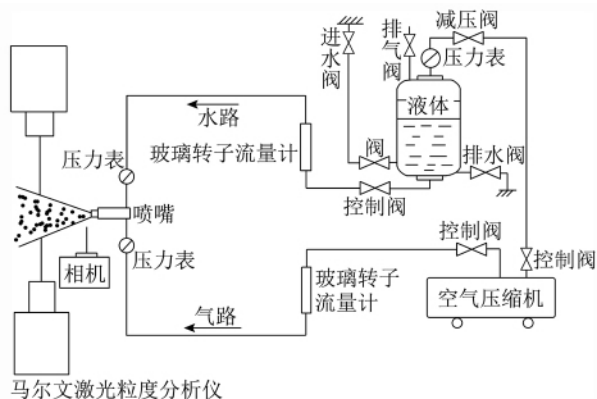


图3 实验装置及流程

#### 1.4 试验工况确定

对于内混式空气雾化喷嘴而言,影响雾化质量的环境因素主要有液体流量和气体压力。因此,必须确定各工况点的水流量及空气压力。水流量范围见表2。

表2 各型号喷嘴水流量和水流流量计量程

喷嘴	水流量/(L·h <sup>-1</sup> )	流量计量程/(L·h <sup>-1</sup> )
1-1号	20~65	10~100
1-2号	20~65	10~100
2-1号	20~100	10~100
2-2号	20~100	10~100

确定空气压力的工况点,即各组喷嘴所确定的空气压力为0.2、0.4、0.6、0.8 MPa。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 液滴粒径变化规律

液滴粒径可以作为判断雾化效果的重要参数<sup>[5]</sup>。为了保证整个气化系统中激冷室的顺利运行,选择合适的粒径范围非常重要,因此对于喷嘴的选型来说,液滴粒径是一个重要的评价参数<sup>[6-7]</sup>。

#### 2.1.1 粒径随压差 $P_g$ 的变化规律

图4所示为液滴直径  $D_{32}$  随压差  $P_g$  的变化规律。

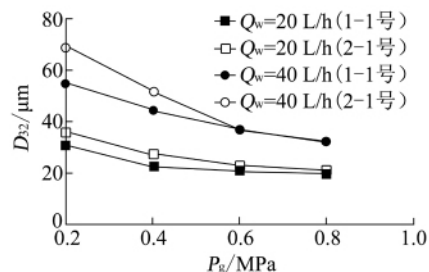


图4 相同水流量  $Q_w$  下  $D_{32}$  随压差  $P_g$  变化情况

从图4可以看出,随着压差的变化喷嘴的液滴粒径存在着相应的变化规律:当压差逐渐升高时,液滴直径逐渐变小;但是当压差升高到一定值(即  $P_g = 0.4$  MPa)以后,  $D_{32}$  将会随着压差升高开始放慢并趋于平缓。这是由于空气与液滴混合,气液两相相互作用,在空气助力的作用下使液滴快速破裂和撞击,液滴吸收大量动能,增加出口流速,从而二级雾化,产生更细小的液滴,空气助力越大,液滴粒径会越小,因此雾化效果更好。但是,当气压值继续上升,上升到一定值时,再增大空气助力不会再使雾化质量进一步改善,这是因为此时喷孔处已达到音速,高速气流的速度是一定的,液滴出口流速会趋于稳定,因此雾化效果的变化会趋于平缓。Halder<sup>[8]</sup>通过对喷嘴旋流室的数值计算得出,随液体入口雷诺数的增加,空气芯半径先迅速增大,当增大到一定值后不再变化。这与本文的实验结果基本吻合。

同时,图4还对液体帽出水孔直径  $D_w$  不同的雾化效果做了对比,其中1-1号喷嘴的  $D_w = 1.6$  mm, 2-1号喷嘴的  $D_w = 2.0$  mm。对比2组曲线,1-1号喷嘴  $D_w$  均在2-1号喷嘴  $D_w$  的下方,即液体帽出水孔直径  $D_w$  小的雾化效果好。从图中还可以看出,在  $Q_w = 20$  L/h、 $P_g = 0.8$  MPa 的工况下,当  $D_w = 2.0$  mm时  $D_{32} = 21$ ,当  $D_w$  减小至1.6 mm时  $D_{32} = 20$  达最小值。因此雾化效果较好的区域集中在大气压、小流量且液体帽出水孔直径  $D_w$  较小的情况下。

#### 2.1.2 粒径随水流量 $Q_w$ 的变化规律

图5所示为液滴直径  $D_{32}$  随水流量  $Q_w$  的变化规律。从图5中可以看出,随着水流量的变化,喷嘴的液滴粒径有着相应的变化规律:  $D_{32}$  随水流量的减小而减小,喷嘴雾化质量随流量的减小而明显改善。因为相同气压下混合一定流量的水,气压的作用力一定,出口水流速一定;当减小水流量时,还以相同气压相互作用,此时对于大流量水来讲,单个水分子

作用力会增大 相当于同流量增大了气压压力,因此雾化效果改善<sup>[9]</sup>。

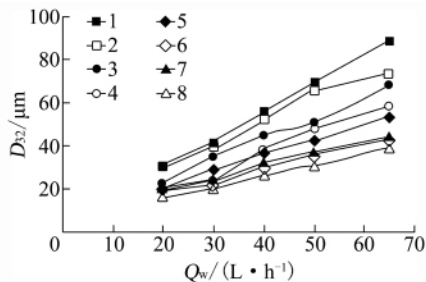


图5 相同气压  $P_g$  下  $D_{32}$  随水流量  $Q_w$  变化情况

1— $P_g = 0.2$  MPa(1-1号); 2— $P_g = 0.2$  MPa(1-2号);  
3— $P_g = 0.4$  MPa(1-1号); 4— $P_g = 0.4$  MPa(1-2号);  
5— $P_g = 0.6$  MPa(1-1号); 6— $P_g = 0.6$  MPa(1-2号);  
7— $P_g = 0.8$  MPa(1-1号); 8— $P_g = 0.8$  MPa(1-2号)

同时 图5 还对混合室出口截面  $A_m$  不同的雾化效果进行了对比,其中  $A_m = 2.5$  mm<sup>2</sup> 的为 1 3 5 7 线,  $A_m = 3.5$  mm<sup>2</sup> 的为 2 4 6 8 线。对比  $P_g = 0.2$  MPa (1-1号) 与  $P_g = 0.2$  MPa(1-2号) 2条曲线可知混合室出口截面大其雾化效果更佳。从图中还可以看出,当  $Q_w = 20$  L/h、 $P_g = 0.8$  MPa、 $A_m = 2.5$  mm<sup>2</sup> 时  $D_{32} = 20$ ;  $A_m$  增大为  $3.5$  mm<sup>2</sup> 时  $D_{32} = 16$  为最小值。因此在大气压、小流量且混合室出口截面  $A_m$  较大时,雾化效果更好。

通过图4和图5的分析,该试验可以得出雾化效果较好的区域集中在大气压、小流量且  $D_w$  较小、 $A_m$  较大的情况下。因此当  $P_g = 0.8$  MPa  $Q_w = 20$  L/h,  $D_w = 1.6$  mm  $A_m = 3.5$  mm<sup>2</sup> 时,雾化效果最好,此时  $D_{32} = 16$ 。说明1-2号喷嘴雾化效果最佳。

## 2.2 雾化角变化规律

雾化角可作为衡量喷嘴雾化效果的另一个重要参数<sup>[10-12]</sup>。通常选择雾化角要与激冷室塔径相匹配;同时要获得相同的雾化角所需的能耗(压力损失)应较小<sup>[13-14]</sup>。

通过对各组实验喷嘴雾化图像的处理,得到各工况下的喷雾锥角,综合比较了4种喷嘴的性能,结果显示:喷嘴1-2号在不同工况下与其它喷嘴相比,在气压大、流量小且混合室出口截面  $A_m$  较大时,雾化粒径明显较小,且能耗较其他喷嘴小。故选定喷嘴1-2号作为气化炉激冷室雾化系统冷态试验的定型喷嘴。以1-2号喷嘴为例,其各工况下喷雾锥角的变化规律如图6所示。

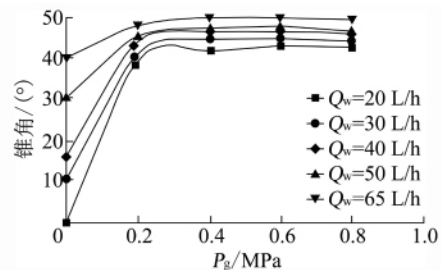


图6 喷雾锥角  $\alpha$  的变化情况

由图6可以看出,空气压力一定时,喷雾锥角随着水流量的增加逐渐增大。当无空气助力,流量由20 L/h增大至100 L/h时,喷雾锥角  $\alpha$  由0增大到40°左右。通过试验,当无空气助力时,其雾化效果好坏以及喷雾锥角大小主要由水流量决定,流量越大,雾化效果越好,锥角越大。如图6,任意取其中1条曲线,当水流量一定,无空气助力时,喷雾锥角相对较小,当空气助力由0到0.2 MPa时,喷雾锥角  $\alpha$  明显变大,通过拍摄照片也可看出雾化效果明显增强。另外,随着空气助力的增大,喷雾锥角先增大后减小。其原因在于,在较低压力下(约0.4 MPa)随着气压的升高,喷雾锥角  $\alpha$  逐渐增大;当空气助力升高到一定程度时,由于气液相互作用,这种作用力会达到一平衡稳定值,将得到喷雾分布最均匀喷雾面,此时有效喷雾面最大,喷雾锥角  $\alpha$  达到了最大值;当空气助力继续上升,破坏了该平衡,喷雾角边缘的主要流体为空气,水含量相对空气较少,由于气流压缩水流的作用,喷雾角边缘将由外向里收缩,因此喷雾锥角  $\alpha$  又减小。所以,对于单个喷嘴,雾化角随着压差的增大,先迅速增大,后缓慢减小,这与 Seoksu Moon 等<sup>[15]</sup>通过建立模型所揭示的规律基本一致。

## 3 结 论

(1) 对于同一个喷嘴,雾滴粒径随压差的增大而减小,当压差增大到0.4 MPa以后,粒径下降趋势趋于平缓。即当压差增大到一定程度后,继续通过增大压力来降低粒径不经济。在相同工况下,喷嘴1-2号的雾滴粒径最小。

(2) 对于同一个喷嘴,雾滴粒径随着水流量的减小而减小。在气压大、流量小且混合室出口截面  $A_m$  较大时,雾化效果更好。试验证明1-2号喷嘴雾化效果最佳。

(3) 对于同一个喷嘴,雾化角随着压差的增大,

先迅速增大,后缓慢减小,在相同压差下 4 种喷嘴中,喷嘴 1-2 号的雾化角最大。

(4) 通过对雾滴粒径和雾化角的综合比较,结果证明喷嘴 1-2 号的雾化性能最好,因此选择喷嘴 1-2 号作为气化炉激冷室喷雾系统冷态试验的定型喷嘴。

参考文献:

- [1] 姚敏,刘万洲,王俭,等.单喷嘴气化炉内稠密气固两相旋流浓度场研究[J].洁净煤技术,2011,17(1):46-50.
- [2] 王宝中,贾晓鸣,赵伟.水煤浆喷嘴磨损机理研究[J].洁净煤技术,2002,8(3):22-24.
- [3] Miesse C C. Correlation of experimental data on the disintegration of liquid jets [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1955, 47(9): 1690-1701.
- [4] 刘朕胜,杨华,吴晋湘,等.环状出口气泡雾化喷嘴液膜破碎过程与喷雾特性[J].燃烧科学与技术,2005,11(2):121-125.
- [5] 曹建明.喷雾学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [6] 尹柯,王亦飞,刘海峰,等.喷雾激冷室喷嘴特性及喷嘴选型[J].华东理工大学学报,2011,27(2):156-162.
- [7] 高振宇.液固两相低压旋流雾化喷嘴数值模拟与实验研究[D].重庆:重庆大学,2006.

- [8] Halder M R, Dash S K, Som S K. Initiation of air core in a simplex nozzle and the effects of operating and geometrical parameters on its shape and size [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(8): 871-878.
- [9] Chen Minggong, Lu Shouxiang, Liu Xuanya, et al. Spraying of liquid solid suspension under pressure: Experiment and results [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(11): 1535-1538.
- [10] 侯凌云,侯晓春.喷嘴技术手册[M].北京:中国石化出版社,2011.
- [11] 李萍.内混式空气雾化柴油喷嘴两相流场的 CFD 模拟[D].南京:南京工业大学,2006:46-47.
- [12] 李萍,张薇.内混式气液雾化喷嘴雾滴粒径的试验研究[J].小型内燃机与摩托车,2006,35(4):21-24.
- [13] 汪铁林,周玉新,伍沅.旋涡压力喷嘴的雾化特性[J].化学工程与装备,2008(2):6-10.
- [14] Eun J. Lee, Sang Youp Oh, Ho Y. Kim, et al. Measuring air core characteristics of a pressure-swirl atomizer via a transparent acrylic nozzle at various Reynolds numbers [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1475-1483.
- [15] Seoksu Moon, Essam Abo-erie, Choongsik Bae. The spray characteristics of a pressure swirl injector with various exit plane tilts [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(7): 615-627.

(上接第 95 页)

控系统与模块车间集控系统进行了合并,实现了全厂集中控制,从而缩短起停车时间,减少设备空运转时间,节省电耗。

(5) 加强对锅炉房的管理。2010 年 6 月,将其中 1 台 4 t 锅炉换成 6 t 锅炉,加大对供热锅炉与供热管网的维修力度,减少跑、冒、滴、漏,并新建锅炉水回收池,每天可回收水 60 t。同时应用锅炉节能新技术,对 4 台锅炉给煤装置进行改造,将斗式给煤改造成分层给煤,改善锅炉煤的燃烧效果,提高热效率,可以获得 20% 以上的节煤率。

### 3 经济效益分析

#### 3.1 投资概算

投资概算情况为:锅炉分层给料器 4 台,总价 24 万元;压滤机 2 台,总价 300 万元; S11-630KVA 3 台 22.2 万元, S11-200KVA 1 台 2.8 万元,变压器合计 25 万元;新旧集控系统合并(全系统) 65 万

元;投资概算总计 414 万元。

#### 3.2 节能降耗

在节能降耗措施实施后,2011 年原煤入选吨煤耗电量是 2.35 kWh,2010 年原煤入选吨煤耗电量是 2.47 kWh,入选每吨原煤节约电耗 0.12 kWh,马脊梁选煤厂的年入选能力按 360 万 t 计(电费为 0.713 元/kWh),每年节约电费 30.8 万元。2010 年锅炉用洗精煤 5690 t,2011 年锅炉用煤达到 4500 t,一年节约洗精煤 1190 t,每吨洗精煤按港口价 750 元计,可节约 89.25 万元,每年共节约 120.05 万元。

#### 3.3 投资回收期

投资回收期:  $414/120.05 = 3.45$  a

### 4 结 语

马脊梁选煤厂通过一系列节能降耗措施的实施,不仅降低了运营成本,增加了效益,而且进一步提高了运营管理水平,连续两年被评为全国优质高效选煤厂和山西省“十佳”选煤厂。