

离心旋流式喷嘴雾化特性实验研究

李承凯^{1,2}, 张德远¹

(1.北京航空航天大学 机械工程及其自动化学院, 北京 100191;

2.中航工业成都凯天电子股份有限公司, 成都 611731)

摘要: 目的 进一步优化低温多效蒸馏技术中的喷淋布液方式, 提高海水淡化换热效率。方法 采用马尔文激光粒度分析仪、高速摄像机和翻转水量仪对不同口径的 CJ-9 型离心旋流式喷嘴进行研究。结果 同一口径的喷嘴, 随着水流压力的增加, 液滴粒径分布的均匀性显著提高。随着水压的增加, 同一个喷嘴液体破碎的纹路变密, 同时液膜破碎的长度变短, 破碎效果越好, 雾化性能越好。同一口径的喷嘴, 入口压力越大, 其边缘流峰值越高, 空心化率现象越明显。同一压力下不同口径的喷嘴, 口径越大, 其形成双波峰的跨度越短; 同一口径的喷嘴, 入口压力越大, 其形成双波峰的跨度越长, 其边缘流峰值越高。结论 液滴粒径分布的均匀性随着水压的增加或孔径的减小而显著提高, 喷淋密度在直径方向上存在两个峰值, 运用“峰谷叠加”原理, 来满足低温多效蒸发器布液均匀的整体要求。

关键词: 低温多效蒸馏; 雾化特性; 雾滴粒径分布; 喷淋密度

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.06.009

中图分类号: TJ05; TQ051.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)06-0047-05

Research on Atomizing Properties of Centrifugal Swirl Nozzle

LI Cheng-ji^{1,2}, ZHANG De-yuan¹

(1.School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2.AVIC Chengdu CAIC Electronics Co., Ltd, Chengdu 611731, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the spraying method in LT-MED system and improve the heat exchange efficiency of seawater desalination. **Methods** Malvern spray droplet analyzer, high-speed camera and auto overturn water meter were used to research CJ-9 centrifugal swirl nozzle of different diameters. **Results** For nozzles of the same diameter, uniformity of droplet size distribution significantly increased as the flow pressure increased. With the increase of water pressure, the liquid breakage lines of the same nozzle thickened and length of the broken liquid film decreased. The better the crushing effect was, the better atomization performance would be. The higher the inlet pressure was, the higher the peak value of the edge flow and the more obvious the hollowing rate was. For nozzles of different diameters, at the same pressure, the higher the nozzle diameter was, the shorter the span of double-crest formation was. For nozzles of the same diameter, the greater the inlet pressure was, the longer the span of double crest formation was, the higher the peak value of edge flow was. **Conclusion** The uniformity of droplet size distribution significantly improves with the increase of water pressure or decrease of diameter. Spraying density has two peak

收稿日期: 2016-06-19; 修订日期: 2016-07-13

Received: 2016-06-19; Revised: 2016-07-13

作者简介: 李承凯 (1985—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为压力容器的强度分析校核和喷淋系统的喷雾学计算。

Biography: LI Cheng-ji(1985-), Male, Master, Assistant engineer. Research focus: Strength analysis of the pressure vessel and calculation of spray system.

通讯作者: 张德远 (1963—), 男, 博士, 主要研究方向为生物加工、振动切削、MEMS 加工。

Corresponding author: ZHANG De-yuan(1963-), Male, Doctor, Research focus: bioprocessing, vibration cutting, MEMS processing.

values in the direction of diameter. The principle of superposition of “peak-valley overlying” could be used to meet the overall uniform distribution requirements of LT-MED system.

KEY WORDS: low-temperature multi-effect distillation; atomizing properties; droplet size distribution; sprinkle density

我国淡水资源总量不少,但人均拥有量低。目前全球淡水资源形势严峻,已成为人类生存的威胁。解决淡水危机的重要技术是海水淡化^[1]。低温多效蒸馏(LT-MED)海水淡化技术是20世纪70年代末由以色列IDE公司开发的^[2],是目前主流海水淡化技术之一^[3]。低温多效蒸馏(LT-MED)技术是利用高温蒸汽与喷淋海水的温差进行热交换,管外侧海水受热蒸发浓缩,管内侧蒸汽冷却形成凝结淡水并收集而成^[4-5]。因其具有产品水水质好、预处理简单、腐蚀和结构风险小、单机制水能力大以及经济好等特点,得到了越来越多的应用^[6-7]。

LT-MED蒸馏工况即是喷淋的海水在换热管壳层形成液膜,而液膜厚度、喷淋的均匀性和通量直接影响到产生二次蒸汽的量,从而影响产水量。在喷淋不均匀或者喷淋量不够的情况下,会产生传热管干壁的现象,从而造成结垢而影响传热效果,同时也会降低传热管的使用寿命^[8]。因此喷嘴的性能是影响低温多效蒸馏技术的关键所在,液滴的粒径分布和喷淋密度的均匀性是评判喷嘴性能的重要指标^[9]。

近年来,许多学者对喷嘴的液滴粒径分布特性及应用进行了相关的研究^[10],而以海水为雾化介质,用于低温多效蒸馏技术的喷嘴雾化特性的研究还比较少,同时喷嘴雾化均匀性对喷淋系统性能影响的研究也很稀缺。通过对应用于低温多效蒸馏技术的离心旋流式喷嘴的雾化性能做系统的研究,得到的研究结果可以进一步优化低温多效蒸馏技术中的喷淋布液方式,从而对提高海水淡化换热效率具有重要的意义。

文中以出口印度海水淡化项目的型号为CJ-9的离心旋流式喷嘴为研究对象,采用马尔文Spraytec喷雾粒度分析仪和高分辨率数码相机等设备,对三种不同喷射孔径喷嘴的喷雾粒径分布及喷淋密度均匀性进行实验研究。

1 实验喷嘴和装置

1.1 实验喷嘴

实验喷嘴为离心旋流式喷嘴,如图1所示。该

喷嘴经过特殊的设计,使得液体沿着切向的方向进入喷嘴,在喷嘴的旋流室内高速旋转,与喷嘴的封盖处进行碰撞,使其具备不同方向的射流速度,在喷嘴出口以实心环状液膜的形式喷出。由于不再受到内壁的约束,液体沿着轴向及切向运动,形成一个实心锥形薄膜,即所谓喷射锥,喷射锥角一般为 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 高速的液流在剪切力和表面波的作用下实现破碎、雾化^[11]。采用3只离心式旋流喷嘴,喷嘴的喷射孔径 d 分别为15, 14.5, 13 mm(下文分别简称为大号、中号和小号喷嘴)。



图1 离心旋流式喷嘴

Fig.1 atomizing properties of centrifugal swirl nozzle

1.2 实验装置

实验装置搭建在恒压水流喷雾实验台上,该实验台由雾化装置、水路系统、测量系统以及数据处理系统组成,如图2所示。水路系统包括水源、储水罐、高压气源、调节阀,测量系统主要包括高速高分辨率数码相机、马尔文喷雾粒度分析仪、翻转水量仪、压力表和玻璃转子水流量计等。

连接水泵的控制阀与水泵为联动控制,可调出所需要的压力。翻转水量仪由水平排状量筒架、有机玻璃管组成。量筒架呈水平直线布置,如图3所示。水平排状量筒管束适用于垂直射流回落液膜分布的测量^[12]。根据喷嘴喷出的雾化液滴呈现实心圆锥形的这一现象,认为沿锥体高度的横截面在同一个圆周的喷淋密度分布恒定不变,这样可选取一个经过雾锥母线的平面,通过试验来测量该平面沿水平方向喷淋流量的分布。待水泵水压稳定后,水量

仪翻转倾倒原喷出的积水液,这样可以准确测试出单位时间内喷嘴流出的水量,从而实时测量喷嘴的各点的准确流量。马尔文 Spraytec 喷雾粒度分析仪量程为 4.6~2000 μm , 在距喷嘴喷口 400 mm 处对喷雾的液滴粒径等参数进行实时测量,测出其粒径的分布数据。

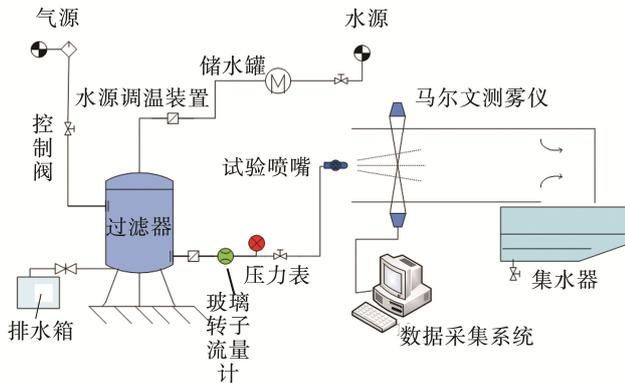


图 2 恒压水流喷雾试验台
Fig.2 Test rig of constant pressure water spray

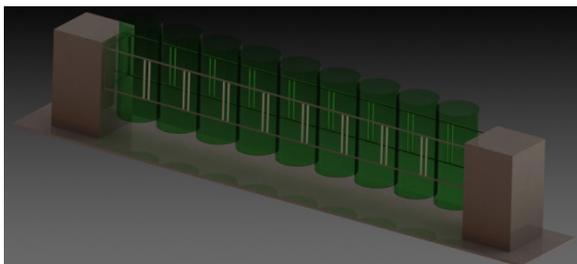


图 3 水平方向量筒架
Fig.3 The rack of horizontal measuring cylinder

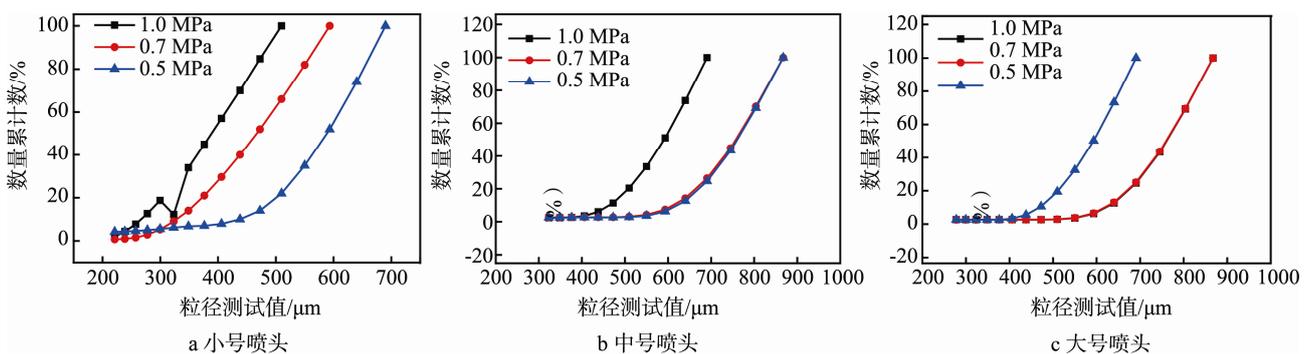


图 4 不同型号喷头的水压与粒径关系
Fig.4 The relationship of water pressure and diameter of different type nozzles

同时,在相同的水流压力下,喷嘴喷射孔径越小,其液滴粒径分布均匀性也就越好。例如三款喷嘴在 1.0 MPa 水压下,随着喷嘴孔径的变小,其液滴粒子累计数量分布曲线数值 80% 以上的粒径由 600~700 μm 减小到 450 μm ,其液滴粒径分布的均匀性也得到相应提高。这是由于在水射流喷雾破碎与雾化机理中,喷嘴

2 结果及分析

2.1 喷嘴液滴粒径分布变化规律

通过调节水路控制阀,使水压分别为 0.5, 0.7, 1.0 MPa, 使用马尔文粒度测试仪距喷口 400 mm 处测量液滴粒径。由于喷嘴口径较大,水压较小,其产生的粒径区间跨度较大,为使结果更为准确和形象,把集中分布的大粒径且数量累计数连续分布的粒径纳入统计范围内。粒径数值含义为中值直径,一半体积的水由直径小于中值直径的水滴组成,另一半体积的水由直径大于中值直径的水滴组成^[13]。

喷嘴在不同水压下粒径的数量累计分布如图 4 所示。由图 4 可以看出,小号喷嘴喷口水压在 0.5 MPa 和 1.0 MPa 下,其液滴粒子累计数量分布曲线数值达到 80% 的粒径值由 650 μm 减小到 450 μm ,液滴中值直径随着喷口水压的增大而减小,其粒径的跨度区间也相应减小,其液滴粒径雾化均匀性也相应得到提高。这是由于喷嘴喷射压力越大,液体在离心腔内的离心速度越大,离开喷口后,空气对液膜的相对扰动作用就越大,形成的扰动波的振动频率增大,导致破碎距离的缩小和液膜破碎变细,形成液滴颗粒也就越小,液体雾化的性能也就越好。因此同一口径的喷嘴,随着水流压力的增加,液滴粒径分布的均匀性显著提高。

直径的大小会对喷雾射流表面波的产生与发展产生重要影响。在一定的喷射压力下,喷嘴直径的减小,将意味着韦伯数的增加和雷诺数的减小,造成射流的扰动波增强,其雾化也就较充分^[14]。

高速高分辨率数码相机所拍摄的喷头在不同压力下小号喷嘴外部流场图像如图 5 所示。由图 5

可以看出,随着水压的增加,同一个喷嘴液体破碎的纹路变密,同时液膜破碎的长度变短,破碎效果越好,雾化性能也就越好。这是由于随着水流压力的增加,喷淋液在惯性力的作用下开始失稳,同时

与空气相对运动剧烈,导致破碎距离的减小和液膜表面的波纹变密,水流破碎的形态由初始的条状或者带状变成丝状。这个现象与喷雾学的基本认识是一致的^[15]。

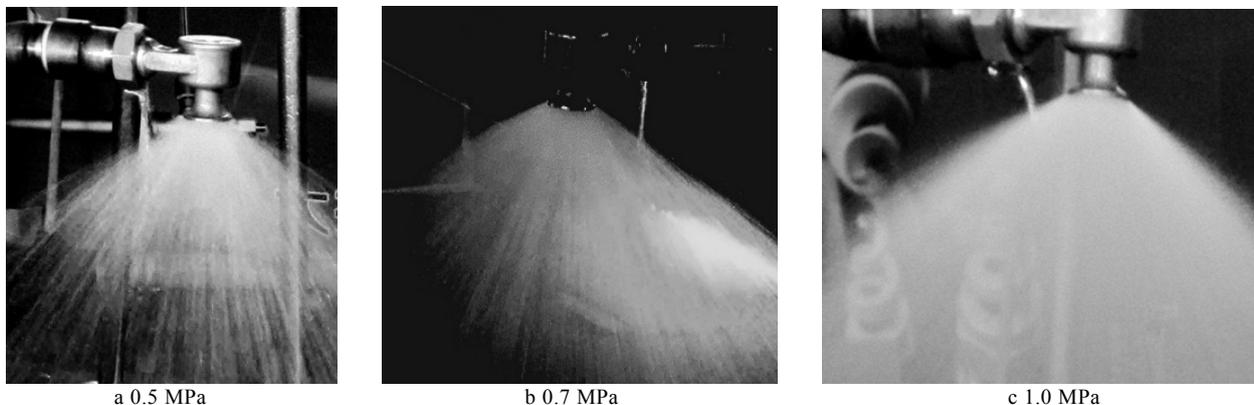


图5 小号喷头在不同压力下喷嘴外部流场图像
Fig.5 External flow field images of the spray nozzle under different pressure

2.2 喷嘴喷淋密度均匀性分布规律

采用喷淋积水率,即喷嘴下方测量量筒单位面积、单位时间累积流体的体积,来表示喷头的水平向喷淋密度,用以评判喷嘴的喷射均匀性。测量中,时间周期为 t ,量筒的积水高度为 H ,量筒进口有效面积为 S ,喷嘴喷出的流体体积为 V ,则喷淋积水率为:

$$q = \frac{V}{St} = \frac{H}{t} \quad (1)$$

式中: q 的单位是 mm/s, 具有速度的量纲。

为了统一不同口径喷嘴出口喷淋速度的径向喷淋密度分布,定义一个“喷淋无量纲积水率” Q ^[16]:

$$Q = \frac{q}{u} \times 1000 = \frac{H}{ut} \times 1000 \quad (2)$$

式中: u 为喷淋液喷口出口速度, mm/s。“喷淋无量纲积水率” Q 的物理意义为每个收集装置面积上所对应的速度分量占总速度量的比值。这样每个收集装置的值转化为无量纲量,便于不同喷嘴、不同流量下的水平喷淋密度的比较。

测试喷嘴分别进行水压为 0.5, 1 MPa 的喷淋试验,测量高度为 620 mm。喷嘴的水平喷淋密度分布如图 6 所示。由图 6 可以看出,本次选用的离较低的区域。这是由于流体通过离心喷嘴的旋流室心式旋流喷嘴,其水平方向喷淋密度的对称性良好,喷淋密度沿直径方向具有两个波峰,其边缘

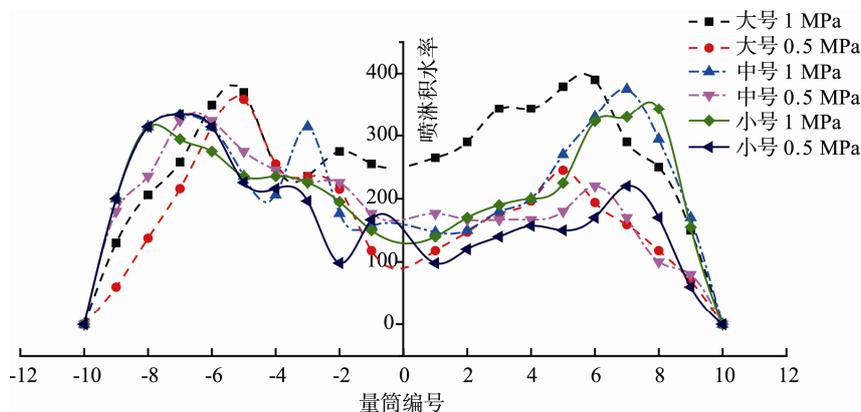


图6 不同喷嘴在喷淋高度为 620 mm 的水平喷淋密度分布
Fig.6 The horizontal spray density distribution of nozzles at the height of 620 mm

流的积水率为一个明显的最高峰,中间形成积水率时高速旋转并向下做螺旋线运动,形成较大的速度惯

量,离开喷嘴出口后,流体不受内壁的约束,沿着轴向及切向运动。针对同一口径的喷嘴,入口压力越大,

其边缘流峰值越高,空心化率现象越明显(空心化率即边缘最高峰值与中心部的最低值之比)。

同时由图6可以看出,同一压力下不同口径的喷嘴,口径越大,其形成双波峰的跨度越短;同一口径的喷嘴,入口压力越大,其形成双波峰的跨度越长,其边缘流峰值越高。因此喷淋系统可以根据喷嘴的水平喷淋密度分布特点,运用“峰谷叠加”原理,来满足低温多效蒸发器喷淋均匀性的要求。

3 结论

利用海水淡化LT-MED喷淋系统的典型喷嘴,对液滴粒径分布规律和水平喷淋密度均匀性分布进行了试验研究,得到以下结论。

1) 喷嘴液滴粒径分布规律为:随着喷嘴水压压力的增加和喷嘴孔径的减小,其粒径分布均匀性显著提高。

2) 水平喷淋密度均匀性分布特点为:同一压力下,喷嘴的口径越大,形成双波峰的跨度越短;同一口径的喷嘴,入口压力越大,其形成双波峰的跨度越长,其边缘流峰值越高。根据该喷嘴的水平喷淋分布特点,运用“峰谷叠加”原理布置喷嘴的位置,以此来满足蒸发器的布液均匀。

参考文献:

[1] 王庆文.天津万吨级海水淡化工程预处理工艺的研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
WANG Qing-wen. Study on the Pretreatment Process of Tianjin Several Thousands Tons-Scale Seawater Desalination Project[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.

[2] AL-SHAMMIRI M. Multi-effect Distillation Plants: State of the Art[J]. Desalination, 1999, 126: 45—59.

[3] 李超,张建丽,黄桂桥,等.国产海水淡化装置铝黄铜换热管腐蚀调查分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(3): 105—109.
LI Chao, ZHANG Jian-li, HUANG Gui-qiao, et al. Corrosion Analyses of Aluminum Brass Tube Heat Exchanger in Homemade Equipment for Seawater Desalination[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(3): 105—109.

[4] 解利昕,王红菊,王世昌.低温多效海水淡化系统的模拟计算[J]. 水处理技术, 2012, 38(10): 50—53.
XIE Li-xin, WANG Hong-ju, WANG Shi-chang. Programming and Calculation of LT-MED Desalination Process[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(10): 50—53.

[5] 冯厚军,赵河立.铜材在海水淡化行业应用及需求分析[C]//中国铜加工技术与应用论文集.北京, 2007: 51—58.
FENG Hou-jun, ZHAO He-li. Industry Applications and Needs Analysis of Copper in the Desalination[C]//

China Copper Technology and Application Forum Collection. Beijing, 2007: 51—58.

[6] 孙小军,刘克成,庞毅,等.国产万吨级低温多效海水淡化技术应用[J]. 水处理技术, 2010, 36(1): 124—127.
SUN Xiao-jun, LIU Ke-cheng, PANG Yi, et al. Application Research of Homemade 12500 m³/d Low-temperature Multi-effect Distillation Process[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(1): 124—127.

[7] 尹建华,吕庆春,阮国岭.低温多效蒸馏海水淡化技术[J]. 海洋技术, 2002, 21(4): 22—26.
YIN Jian-hua, LYU Qing-chun, RUAN Guo-ling. Technology of Low Temperature Multiple Effect Distillation for Seawater Desalination[J]. Marine Technology, 2002, 21(4): 22—26.

[8] 祝杰,吴振元,叶世超,等.喷淋塔液滴粒径分布及比表面积实验研究[J]. 化工学报, 2014, 65(12): 4709—4715.
ZHU Jie, WU Zhen-yuan, YE Shi-chao, et al. Drop Size Distribution and Specific Surface Area in Spray Tower[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2014, 65(12): 4709—4715.

[9] 唐虎,成竹,蒋军亮,等.空气助力雾化喷嘴雾化特性实验研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(2): 38—45.
TANG Hu, CHENG Zhu, JIANG Jun-liang, et al. Experimental Investigation of Spray Characteristic of Air-blast Atomizer[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 38—45.

[10] 易贤.飞机积冰的数值计算与积冰试验相似准则研究[D].绵阳:中国空气动力研究与发展中心,2007.
YI Xian. Numerical Computation of Aircraft Icing and Study on Icing Test Scaling Law[D]. Mianyang: China Aerodynamics Research and Development Center, 2007.

[11] 张永良.离心喷嘴雾化特性实验研究和数值分析[D].北京:中国科学院工程物理研究所,2013.
ZHANG Yong-liang. Experiment and Numerical Studies on the Atomization of a Pressure Atomizer[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Science, 2013.

[12] 龚景松,傅维标.旋转型气-液雾化喷嘴的雾化角与流量分布特性研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(6): 632—634.
GONG Jing-song, FU Wei-biao. A Study of Atomization Characteristics of "Swirling Gas-liquid Spray Atomizer"[J]. Engineering for Thermal Energy & Power, 2006, 21(6): 632—634.

[13] DWAYNE B J. Icing at the McKinley Climatic Laboratory—An Update of the New Icing Capability Project(end of FY03)[R]. AIAA 2004-735, 2004.

[14] 艾育华.喷嘴与蒸汽喷射器研究[D].北京:华北电力大学,2001.
AI Yu-hua. Investigation of Spray Atomizers and Steam-Ejectors[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2001.

[15] 曹建明.喷雾学[M].北京:机械工业出版社,2005.
CAO Jian-ming. Liquid Sprays[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[16] 方立军,阚德民,李铁军.压力式雾化喷嘴径向喷淋密度的测量方法[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(9): 52—54.
FANG Li-jun, KAN De-min, LI Tie-jun. Measure Methods of Spray Distribution in Radial Direction of Pressure Atomization Nozzle[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(9): 52—54.