

船用 SCR 系统尿素溶液喷嘴试验分析比较

金玉山¹, 李虎生², 刘 猛³

(1. 沪东重机有限公司, 上海 200129;

2. 南京中船绿洲机器有限公司, 江苏 南京 210039; 3. 东南大学, 江苏 南京 210018)

摘 要: 为研究并寻求能够满足柴油机各运行工况下的 SCR 尿素水溶液喷射系统开展了喷嘴雾化试验。试验分别研究了空气辅助雾化和单流体纯液两种喷嘴, 在不同的压力、流量、测量位置及在有风速情况下的雾化效果, 包括雾化颗粒平均直径、雾化角等特性参数。研究表明: 相比单流体纯液喷嘴, 空气辅助雾化喷嘴更具优势。

关键词: 船舶柴油机; SCR; 喷嘴; 雾化

中图分类号: TK421⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)01-0017-04

Experimental Analysis and Comparison of Marine SCR System Urea Solution Nozzles

Jin Yushan¹, Li Husheng², Liu Meng³

(1. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129;

2. CSSC Nanjing Luzhou Machine Co. Ltd., Jiangsu Nanjing 210039;

3. Southeast University, Jiangsu Nanjing 210018)

Abstract: Nozzle atomization tests were carried out to study and obtain a SCR urea solution injection system which can meet the requirements of diesel engines under varied working conditions. The tests studied two different nozzles respectively, including air auxiliary atomization and single-fluid pure liquid nozzles, and their atomization effect under different pressure, flow, measurement positions and when there was certain wind speed. The atomization effect means characteristic parameters such as average diameter of atomization particles, atomization angles, etc. Research shows that compared with single-fluid pure liquid nozzles, air auxiliary atomization nozzles boast better performance.

Keywords: marine diesel engine; SCR; nozzle; atomization

0 引 言

随着船舶运输业的发展, 船舶柴油机的有害排放对大气环境的污染日益加剧。在全球范围内, 船舶柴油机的排气引起的大气污染约占 5% ~ 10%, 局部地区(如挪威)已达 30% ~ 40%^[1]。国际海事组织(IMO)在 1997 年 9 月审议通过了《MARPOL73/78 公约》的新增附则 VI《防止船舶造成大气污染规则》, 对船舶柴油机的排放提出了严格的限制。控制

船舶柴油机的排放污染已刻不容缓。

Urea-SCR 是一种公认的有效降低氮氧化物排放的后处理技术, 它的原理是将尿素水溶液雾化喷入船舶柴油机排气管道中, 尿素溶液经过蒸发、热解、水解过程生成氨气, 氨气将氮氧化物还原成氮气, 从而达到减少氮氧化物排放的目的。喷入的尿素溶液雾化程度越好, 反应越充分, 降低 NO_x 效果越好。因此, 喷射系统是整个 SCR 系统的核心, 而喷嘴是其喷射系统的关键部件, 决定了雾化效果的好坏。

收稿日期: 2014-07-14

作者简介: 金玉山(1979-), 男, 工程师; 主要研究方向为内燃机排放及后处理技术, E-mail: techjys@sina.com。

1 不同形式喷嘴结构分析

目前电站及船舶的 SCR 系统常用的喷嘴分有空气辅助雾化喷嘴和单流体纯液喷嘴(无空气辅助)两种。电站 SCR 系统运行工况比较单一,喷嘴普遍采用空气辅助雾化型式;而船用 SCR 系统运行工况范围较大,两种型式的喷嘴都有运用。两种喷嘴对喷射系统的泵站及管道压力要求相差很大,辅助空气喷嘴的喷射系统仅需要 1.0 MPa 以下的压力,而单流体纯液喷嘴则需要 3.0 MPa 左右的高压。因此喷嘴的选择直接影响着后续喷射系统的整体设计。

选取喷嘴时通常须要考虑喷雾角度、雾化颗粒平均直径以及喷雾形状等参数,确定流量范围、流体压力,所输送流体的相对密度、黏度、温度、腐蚀性等。

此次试验采用上海斯普瑞喷嘴有限公司的外混式空气辅助雾化喷嘴及单流体纯液喷嘴各一只。

1.1 空气辅助雾化喷嘴

空气雾化喷嘴是一种广泛应用的雾化装置,其雾化原理是在喷口内或喷口外实现气流雾化液体,其主要特点是在喷嘴内设计了空气流道,利用高压空气的喷散作用,以较高的速度夹带着液体喷出,使液体雾化为更细的液滴。

空气雾化喷嘴具有雾化质量高、气耗率低、不易堵塞、供给系统简单可靠、可以采用较低成本的喷射泵等优点,并且辅助空气起到一定的冷却作用,能够避免电磁阀和尿素水溶液温度过高而造成不良后果;但是存在贯穿距离长,容易碰及排气管道及混合器,造成腐蚀的问题。辅助空气与液体在喷嘴腔体内,在调节流量及压力的过程中,可能存在相互干扰问题。

本文采用的外混式喷嘴如图 1 所示。喷嘴的型号:SU-46,共 6 个喷孔,喷孔的直径约 1.4 mm,雾化角约 75°,空气压力范围 0.17 ~ 0.7 MPa,液体压力范围从 0.07 ~ 0.4 MPa,质量流速 25 ~ 110 ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$),喷射距离可达 7 ~ 9 m。



图 1 空气辅助雾化喷嘴

1.2 单流体纯液喷嘴

单流体纯液喷嘴是另一种常用的喷嘴,其雾化原理是利用泵站的高压使液体在喷孔处实现破碎及雾化,无须使用压缩空气,利用液压即可形成非常细微的空心锥形雾化喷雾,分布均匀,压力和流量适用范围广。其缺点是在喷雾停歇状态时,容易在喷孔位置形成尿素溶液残留,并在周围高温环境下生成残渣晶体,堵塞喷孔,因此一般配置压缩空气吹扫管路进行清洗。单流体喷嘴雾化形成范围相对较小,一般 2 ~ 4 个一起使用。

图 2 所示喷嘴的型号:1/4-LN-3,单喷孔,喷孔直径约 0.7 mm,雾化角约 72°,调节液体的压力范围 0.2 ~ 8 MPa,质量流速 9.7 ~ 61 ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)。



图 2 单流体纯液喷嘴

以下根据 CFD 数值计算结合喷射特性试验,分析两种喷嘴对后续尿素溶液蒸发、热解、水解以及喷雾均匀性、氨气转化效率的影响,为船用 SCR 喷射系统方案的选择提供依据。

2 试验系统

2.1 试验设备组成

考虑雾化颗粒在柴油机排气风速下,其雾化状态与冷态下有着很大差别,本试验主要测试在风洞状态下的喷嘴雾化状态。忽略不同液体黏度的影响,在相同的压力降情况下,不同液体的喷射量只与液体的密度有关^[2],选用与尿素溶液密度相近的水做为雾化介质,流量则根据发动机样机所需尿素溶液等量设置(考虑采用 4 个单流体纯液喷嘴,因此流量为 1/4),温度为常温。

本试验主要设备包括:LS-2000 型分体式激光雾化液滴粒度分析仪、储液罐、变频泵、气源、压力表、流量计、鼓风机。大体分为:供气系统、供水系统和测试系统。空气辅助雾化试验阶段,气源的压力、流量通过调节阀门进行调节,水的压力、流量通过变频泵进行调节,分别通过压力表和浮子流量计读出。在管道后面布置

鼓风机, 模拟排气管道中高速流经的废气, 观察雾化颗粒在风速流场中被拖曳、扩散的变化历程, 具体试验装置见图 3、4。



图 3 试验装置图



图 4 引风设备

2.2 雾化液滴粒度分析仪

采用 LS-2000 型分体式激光雾化液滴粒度分析仪可对下游雾化场的液滴粒径进行测量。LS-2000 型分体式激光雾化液滴粒度分析仪是基于激光颗粒前向散射原理: 当一束激光束照射到被测液滴时, 受液滴的散射作用, 激光会向四面八方散射, 其中大部分散射光能量处于前向方向。散射光能的分布与被测液滴的大小有关, 采用专门设计的扇形多元光电探测器测出前向散射光能的分布, 根据光散射理论及反演算法对测得的散射光能分布数据进行处理, 就可以得到被测液滴的粒度分布。该方法得到的液滴尺寸不受液滴在喷雾场中所处位置的影响, 因而能够用于液滴密度较大的喷雾场。根据 LS-2000 分体式激光雾化液滴粒度分析仪的测试原理可以获得下游雾化场中一条直线上的粒径分布信息。粒度分析仪的粒度测量范围: $0.5 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$; 测量区长度: $<1\ \text{m}$; 测量时间: $<1\ \text{s}$; 重现性: $<5\%$; 测量精度: $<10\%$ (国家标准颗粒检验)。

2.3 测点分布

试验主要测量不同轴向和径向距离时液滴的粒

径、均匀性等评价雾化性能的参数。在试验过程中, 选取的测量截面坐标系: 喷嘴固定在铁架上, 选喷嘴出口几何中心为坐标原点, 雾锥喷出的方向为 Z 轴, 向上为 Y 轴, 面对喷嘴向右为 X 轴。在轴向上每 $10\ \text{cm}$ 的距离选择一个测量点, 在径向上每 $5\ \text{cm}$ 的距离选择一个测量点, 测量点选择如图 5 所示。

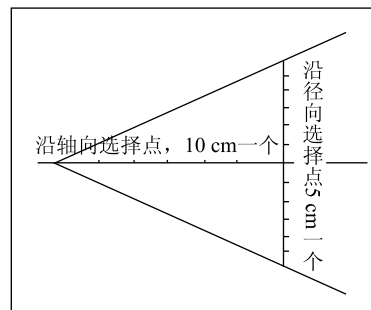


图 5 测量点选择示意图

2.4 试验条件

试验过程中, 液体流量的调节范围是 $20 \sim 60\ (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 。具体的试验工况见表 1。

表 1 试验工况汇总

喷嘴类型	轴向距离/ mm	雾化压力/ MPa	气液比
空气辅助雾化喷嘴	150、270、350		0.08 ~ 0.26
单流体纯液喷嘴	50、100、150	0.5 ~ 6	

3 CFD 计算仿真

试验前对两种喷嘴在某同工况, 即相同液体质量流速下进行 CFD 仿真计算。结果见图 6、图 7。

对比采用 4 支 LN 纯液喷嘴, 1 支 SU 空气辅助喷嘴形成的颗粒 SMD (索特尔平均直径) 更小, 即更有利于实现后续尿素溶液的蒸发反应, 并进一步加速后续尿素溶液热解过程。但是采用 4 支 LN 纯液喷嘴在液体分布的均匀性方面要优于采用 1 支 SU 空气辅助喷嘴, 即更有利于后续 NO_x 在催化剂床层上的还原反应。不论采用 LN 纯液喷嘴还是 SU 喷嘴, 都可以满足船用 SCR 系统对喷射系统的要求。

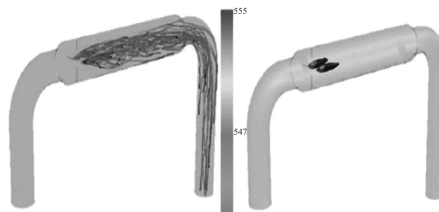


图 6 4 支 1/4_ LN_ 3 纯液喷嘴喷雾羽流与运动轨迹



图 7 1 支 SU 空气辅助喷嘴喷雾羽流与运动轨迹

4 试验结果与分析

两种类型喷嘴在模拟风道中测量的雾化试验结果如下：

4.1 空气辅助雾化喷嘴试验结果

该外混式空气辅助雾化喷嘴(图 8)具有非常明显的优势。雾化性能完全满足要求,雾化液滴粒径都小于 $40\text{ }\mu\text{m}$ (图 9)。另外在需要的流量调节范围内,即在液体流量在 $30\sim 73\text{ (kg}\cdot\text{h}^{-1})$ 之间变化时,所需压缩雾化空气量基本维持不变,这就为喷嘴负荷的调整带来了好处,即不会产生相互干扰的问题;也表明选用的空气压力是合理的。

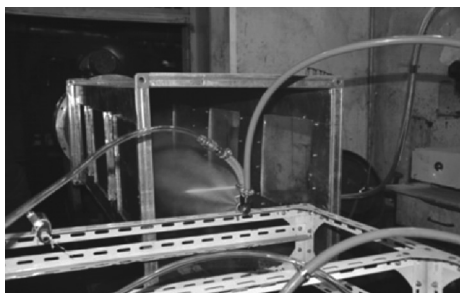


图 8 测试下的空气辅助雾化喷嘴

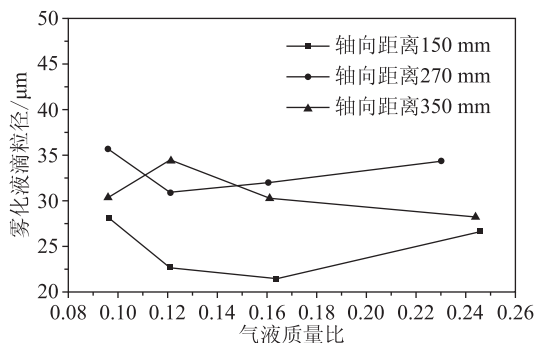


图 9 空气辅助雾化喷嘴试验统计

在测试时,该喷嘴的雾化贯穿距离的确很远,不过约 3 m 距离后的颗粒直径都非常小,在实际的 Urea-SCR 反应中,完全能够热解、水解结束,而不会碰及后面的混合器,不存在湿壁现象。有研究指出,当空气辅助雾化喷嘴孔径较大时,如果是轴

向喷射就不会造成喷束溅壁^[3]。欧博耐尔公司曾将研发的有空气辅助的喷射系统和无空气辅助的喷射系统进行试验,有压缩空气辅助喷射的尿素喷射系统可以在 300 mm 的混合长度范围内将超过 80% 的尿素有效分解,而在同样压力下,无空气辅助的尿素喷射系统在 500 mm 混合长度范围内,仅有大约 40% 的尿素有效分解^[4]。

4.2 单流体纯液喷嘴雾化试验结果

图 10 为压力雾化在风道中的雾化情况,整个雾化角接近 60° ,表明在风洞状态下喷嘴的雾化角明显变小,因为风速对雾化边缘的细小颗粒有很大的拖曳作用,如采用四个喷嘴布置,则可完全满足尿素喷射系统的要求。从试验中也看到该喷嘴喷孔尺寸过小,由于尿素溶液在输送、雾化时会呈现晶体析出现象,容易导致喷口堵塞,而选用上述空气辅助雾化内混式喷嘴则可以避免上述情况。

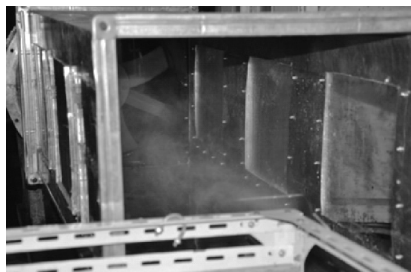


图 10 测试下的单流体纯液雾化喷嘴

图 11 为单流体纯液喷嘴的雾化性能分析,由图可知整个压力雾化的效果良好,雾化粒径普遍小于 $50\text{ }\mu\text{m}$,且在较小的雾化压力下就可以完全满足尿素喷射系统雾化要求。如提高喷射泵的压力,雾化的颗粒平均直径会更小。但是认为尿素颗粒直径在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 左右是比较合理的数值,太小的颗粒直径会在排气风速下迅速吹走,停留时间太小,不能完全反应分解,影响 SCR 的转化效率。

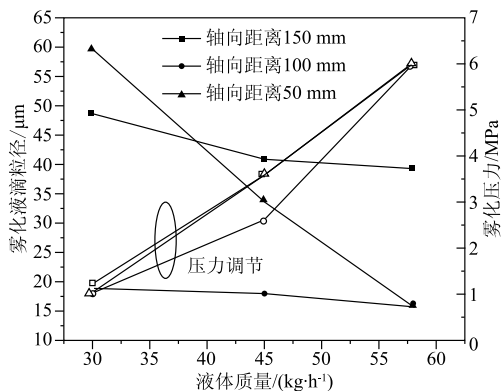


图 11 单流体纯液雾化喷嘴试验统计

(下转第 45 页)

(2) 焊接前使用电加热板将机体焊补位置预热至 150 ± 20 °C, 采用薄层、多层、短焊道焊补;

(3) 每焊一层, 在红热状态下用尖角小锤, 迅速锤击焊区及热影响区;

(4) 层温控制: 每焊好一层冷却到 $50 \sim 60$ °C 后, 再焊下一层;

(5) 焊接过程中注意清除熔渣, 使焊区和本体充分融合;

(6) 焊缝要饱满, 并高出平面 $3 \sim 5$ mm;

(7) 焊后用石棉布保温冷却至室温后按样板打磨焊接区域;

(8) 对机体进行除应力退火。

3.2 焊补结果

焊补完成后对机体进行硬度(HB)检测、PT、RT 探伤检验, 质量良好, 检测、检验结果符合要求。

(上接第 20 页)

5 结 论

试验分析表明, 两种型式喷嘴在雾化性能上都能满足 SCR 系统对喷射系统的要求, 与 CFD 仿真的计算结果也比较吻合。相比之下, 空气辅助雾化喷嘴更具有优势:

(1) 雾化颗粒平均直径同等情况下, 更能避免喷嘴口处尿素结晶问题的出现;

(2) 更能兼顾雾化颗粒平均直径和贯穿距离两个互为矛盾的因素, 使尿素颗粒能够反应完全;

(3) 喷射系统更为简单、可靠, 而不须采用昂贵的高压计量泵装置。

(上接第 37 页)

1) 将极大的降低初始投资;

2) 整个应急电站的运行维护费用将远低于满足同样电品质的一般机组, 而且随着运行时间的持续, 其经济性将更为显著。

3) 据该港口用户反馈, 一次停电 1 天, 由于采用该应急机组, 确保了码头不停产, 挽回经济损失约 600 万元, 投入回报率很高, 低碳节能。

4 小 结

通过堆焊模拟试验, 掌握了 QT400-18 类型球墨铸铁的堆焊工艺, 该堆焊工艺重复性和稳定性较好; 堆焊位置的机械性能、宏观及微观金相符合要求。将试验成果应用于某球墨铸铁柴油机机体的修复, 修复后机体质量良好, 检测结果均符合要求。

参考文献

- [1] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册 第一卷 铸铁[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 周振丰. 铸铁的焊接. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [3] EN1563, Founding-Spheroidal graphite cast irons[S]. European Committee for Standardization, 2005.

当然, 实际的喷嘴雾化效果还有待于 SCR 系统在台架上的测试结果分析。

参考文献

- [1] 梁恩胜. 船舶柴油机的排放污染与 SCR 技术[J]. 装备制造技术, 2009(11): 145-147.
- [2] 姜磊, 葛蕴珊, 李璞, 等. 柴油机尿素 SCR 喷射特性的试验研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(4): 30-34.
- [3] 姜磊, 葛蕴珊, 李璞, 等. 柴油机尿素 SCR 后处理系统排放特性试验研究[J]. 内燃机工程, 2010, 31(5): 30-35.
- [4] 王良林. 柴油机 SCR 无空气辅助尿素喷射系统控制技术开发[D]. 吉林: 吉林大学, 2012.

参考文献

- [1] 楚万秀, 卫冬生. 应对港口瞬变负荷的蓄能柴油发电机组电站的设计[J]. 柴油机, 2008(5): 36-38.
- [2] 吴杰宏. 船舶电站选型设计方案评估的研究[C]. 上海交通大学, 2008(5): 36-38.