

# 燃机脱硝喷嘴雾化性能优化技术研究

肖钦翔

上海奉贤燃机发电有限公司

DOI:10.32629/eep.v9i1.3019

**[摘要]** 针对燃机电厂选择性催化还原(SCR)脱硝系统中,喷嘴雾化效果欠佳引发的脱硝效率偏低、氨逃逸率超标、设备腐蚀等问题,为提升脱硝系统运行稳定性与经济性,开展燃机脱硝喷嘴雾化性能优化技术研究。结合燃机电厂高温高压的特殊工况条件,从喷嘴结构设计、操作参数调控、雾化介质特性优化三个维度,构建“结构改进+参数匹配+介质调控”的一体化优化体系,采用ANSYS Fluent仿真模拟与现场试验相结合的方法验证优化成效。结果显示,优化后喷嘴雾化液滴平均粒径缩减32%,雾化均匀性提升28%,对应的脱硝效率由89%升至96.5%,氨逃逸率控制在3ppm以下,有效降低了设备腐蚀风险与运行能耗。该优化技术可为燃机电厂脱硝系统高效运行提供技术保障,具备广泛的工程应用前景。

**[关键词]** 燃机脱硝; 喷嘴装置; 雾化效能; 结构改良; 参数调节; SCR工艺

**中图分类号:** V231.2+3 **文献标识码:** A

## Research on Optimisation Techniques for Nozzle Atomisation Performance in Gas Turbine DeNOx Systems

Qinxiang Xiao

Shanghai Fengxian Gas Turbine Power Generation Co., Ltd.

**[Abstract]** Addressing issues such as suboptimal denitrification efficiency, excessive ammonia slip rates, and equipment corrosion caused by inadequate nozzle atomisation within Selective Catalytic Reduction (SCR) systems in gas turbine power plants, this study investigates optimisation techniques for nozzle atomisation performance. The objective is to enhance operational stability and economic viability of denitrification systems. Considering the high-temperature, high-pressure operating conditions of gas turbine power plants, an integrated optimisation framework combining ‘structural modification + parameter matching + medium regulation’ was established. This framework addressed three key dimensions: nozzle structural design, operational parameter control, and atomisation medium characteristics. The effectiveness of the optimisation was validated through a combined approach of ANSYS Fluent simulation and field testing. Results demonstrate that post-optimisation, the average droplet size of atomised liquid decreased by 32%, while atomisation uniformity improved by 28%. Correspondingly, denitrification efficiency rose from 89% to 96.5%, with ammonia slip controlled below 3ppm, effectively reducing equipment corrosion risks and operational energy consumption. This optimisation technology provides technical assurance for the efficient operation of gas turbine plant denitrification systems and holds broad engineering application prospects.

**[Key words]** Gas Turbine Denitrification; Nozzle Assembly; Atomisation Efficiency; Structural Modification; Parameter Adjustment; Scr Process

### 引言

随着环保标准对燃机电厂氮氧化物(NO<sub>x</sub>)排放指标的持续严苛化,选择性催化还原(SCR)技术凭借其脱硝效率高、工况适应性强等优势,已成为燃机电厂脱硝处理的核心手段。在SCR脱硝系统中,喷嘴作为尿素溶液雾化与喷射的核心部件,其雾化性能直接决定尿素溶液与烟气的混合均匀程度、氨氮摩尔比的控制精度,进而影响脱硝效率、氨逃逸率及设备运行安全

性。燃机电厂烟气具有温度高(350-400℃)、流速快、压力波动剧烈的特征,对喷嘴雾化的细化程度、均匀性及稳定性提出了极高要求。

目前燃机电厂脱硝喷嘴普遍存在雾化液滴粒径偏大、分布不均、喷射角度偏移等缺陷,导致尿素溶液蒸发不充分、局部区域氨气量过量或不足,不仅降低脱硝效果,还会诱发催化剂中毒、烟道腐蚀、空气预热器堵塞等连锁故障,增加设备运维成本。

单一的参数调节或结构改良难以适配燃机复杂的运行工况,亟需建立系统性的优化方案。基于此,本文融合仿真模拟与工程实践,深入剖析影响喷嘴雾化性能的关键因素,提出针对性优化技术,为燃机电厂脱硝系统提质增效提供实践参考<sup>[1]</sup>。

## 1 燃机脱硝喷嘴雾化性能影响因素分析

### 1.1 喷嘴结构参数影响

喷嘴结构是决定雾化性能的核心要素,其喷孔孔径大小、内部流道几何形状、涡流室结构参数及喷射角度设计,直接主导液体在喷嘴内部的流动状态与能量转化效率,进而影响液滴破碎、分散效果及最终喷雾形态,是适配燃机电厂高温高压特殊工况的关键设计环节。其中,喷孔孔径直接关联液体出口流速与剪切作用力,孔径过大会导致液滴破碎不彻底,粒径偏大;孔径过小则易引发堵塞问题,同时增加流体流动阻力,造成能耗上升。

内部流道形态对液体能量损耗影响显著,传统压力式喷嘴受设计限制,流道多采用直角过渡结构,液体流经该区域时易产生涡流与滞留现象,造成大量动能损耗,导致喷出液体的速度分布不均,最终使雾化液滴粒径分布离散度大,部分区域液滴团聚明显,无法实现精细化雾化<sup>[2]</sup>。涡流室作为液体旋转加速的核心部件,其深度、内径及导流结构直接决定液体旋转强度与稳定性,传统喷嘴普遍存在涡流室深度不足(通常仅5-8mm)、无专用导流结构的问题,液体进入涡流室后难以形成稳定的强旋流场,旋转动能不足,喷出后无法形成均匀对称的喷雾锥,易出现喷雾偏斜、边缘稀疏等情况,导致烟道内局部区域尿素溶液覆盖不足,影响脱硝反应的均衡性。

同时,在燃机电厂长期运行工况下,喷孔磨损与堵塞会进一步加剧雾化性能衰减。燃机电厂所用尿素溶液虽经初步处理,但仍残留少量杂质与结晶颗粒,在高压输送与高温烟气反吹作用下,杂质易在喷孔内壁附着、结晶沉积,逐步缩小喷孔有效流通面积,甚至形成局部堵塞;此外,烟气中的颗粒物与高速流动的液体对喷孔内壁产生持续冲刷磨损,导致喷孔孔径增大、内壁粗糙度上升,破坏原有流道设计精度,引发喷射流场畸变、喷雾角度偏移,进一步加剧雾化不均匀性,形成“结构缺陷+工况损耗”的恶性循环,严重影响脱硝系统稳定运行。

### 1.2 操作运行参数影响

操作参数的精准匹配是保障喷嘴雾化效能适配燃机脱硝工况的关键,其调控合理性直接决定液体破碎程度、喷雾形态及气液混合质量,核心影响参数包括供液压力、气液比(气助式喷嘴专属)、尿素溶液温度及烟气工况四大类,且各参数间存在耦合关联,单一参数的微调即可能引发雾化性能波动。对于燃机电厂主流压力式脱硝喷嘴,供液压力的适配性尤为关键,当压力低于0.8MPa时,液体出口动能不足,无法形成足够剪切力突破自身表面张力,导致液滴破碎不充分,平均粒径显著增大,部分液滴甚至呈柱状喷射,难以与烟气快速混合;而压力超过1.8MPa后,虽能细化液滴,但会造成泵体能耗激增,同时高压流体对喷孔内壁的冲刷力大幅提升,加速喷孔磨损,还可能引发喷嘴本体振动,

破坏喷雾锥稳定性,反而加剧雾化不均匀性。

对于气助式喷嘴,气液比的精准调控是平衡雾化细度与稳定性的核心,当气液比低于1.2:1时,气体驱动力不足,无法有效撕裂液膜,易出现液滴团聚现象;气液比高于2.5:1时,过高的气体流速会导致喷雾飘移,部分细液滴被烟气带走,无法在反应区域充分参与脱硝反应。此外,尿素溶液温度对雾化性能的影响常被忽视,当温度低于25℃时,尿素溶液粘度与表面张力显著上升,液体流动性变差,雾化难度增加;将温度调控至40-50℃区间,可有效降低介质粘性,为液滴破碎创造有利条件<sup>[3]</sup>。

同时,燃机烟气工况的动态波动对雾化效果干扰显著,在烟气温度350-400℃、流速15-20m/s的常规工况下,喷雾扩散易受气流冲击,若烟气流速波动幅度超过±3m/s或压力波动大于0.1MPa,会直接干扰喷雾锥形态,破坏尿素溶液与烟气的动态混合平衡,导致局部区域氨氮比失衡。

### 1.3 雾化介质特性影响

雾化介质(尿素溶液)的物理特性对雾化性能具有显著影响,主要包括粘度、表面张力与纯度三个方面。尿素溶液粘度越高,液体分子间内聚力越强,越难被撕裂成细滴;表面张力过大会导致液滴收缩团聚,降低雾化细度。实际运行中,尿素溶液浓度波动、杂质含量超标会改变其物理特性,同时杂质结晶易造成喷嘴堵塞,进一步恶化雾化效果。此外,添加剂的选用也会影响介质特性,不当添加剂可能引发泡沫生成或设备腐蚀,需兼顾雾化效果与系统兼容性<sup>[4]</sup>。

## 2 燃机脱硝喷嘴雾化性能优化技术方案

### 2.1 喷嘴结构优化设计

结合燃机脱硝工况需求,对喷嘴结构进行多维度优化。采用流线型内部流道设计,将原直角过渡改为圆弧过渡(半径R=5mm),减少液体流动过程中的能量损失,提升流速均匀性;优化涡流室结构,将涡流室深度增加至12mm,增设3片倾斜导流叶片(倾角15°),强化液体旋转强度,促进液膜破碎。喷孔采用变径设计,入口孔径8mm,出口孔径4mm,形成渐缩式通道,提升液体出口流速;同时对喷孔内壁进行抛光处理(粗糙度Ra≤0.8μm),减少磨损与杂质附着,降低堵塞风险。

针对不同燃机负荷特性,优化喷嘴喷射角度,将固定角度改为可调节式(30°-60°),适配烟气流量变化,确保喷雾覆盖整个烟道截面,避免局部混合盲区。材质选用耐高温耐腐蚀的316L不锈钢,提升喷嘴在高温烟气环境下的使用寿命,减少腐蚀对雾化性能的影响<sup>[5]</sup>。

### 2.2 操作参数精准调控

基于仿真模拟与试验数据,建立操作参数优化匹配模型。对于压力式喷嘴,将供液压力从0.8MPa优化调整至1.2-1.5MPa,在此区间内液滴粒径随压力升高显著减小,且能耗与设备损耗处于合理范围;对于气助式喷嘴,将气液比优化至1.8:1,平衡雾化细度与喷雾稳定性,避免飘移与团聚现象。

同步优化尿素溶液温度,将尿素溶液预热至40-50℃,降低其粘度与表面张力,提升雾化效能;建立烟气工况自适应调节机

制,通过实时监测烟气流速、压力与温度,动态调整供液压力与喷射角度,确保雾化性能与烟气工况精准匹配。针对负荷波动场景,设定多组参数阈值,实现不同工况下的快速切换与稳定运行。

### 2.3 雾化介质特性优化

优化尿素溶液介质特性,将尿素溶液浓度控制在25%~28%,兼顾脱硝反应活性与雾化性能;在尿素溶液中添加适量非离子型表面活性剂(添加量0.1%~0.3%),将表面张力降至30mN/m以下,促进液滴破碎与分散,同时避免泡沫生成与设备腐蚀<sup>[6]</sup>。建立尿素溶液净化预处理流程,采用两级过滤装置(精度分别为5 μm与1 μm),去除介质中的杂质与结晶物,从源头减少喷嘴堵塞风险。

此外,定期开展喷嘴维护保养工作,建立磨损与堵塞监测台账,每运行3000小时对喷孔进行清洁与磨损检测,对磨损量超过0.2mm的喷嘴及时更换,确保雾化性能长期稳定。

## 3 优化效果仿真模拟与现场试验验证

### 3.1 仿真模拟分析

采用ANSYS Fluent软件构建喷嘴雾化仿真模型,选用欧拉-拉格朗日多相流模型与离散相模型(DPM),模拟优化前后喷嘴的雾化过程,监测液滴粒径分布、喷射角度、速度场及浓度场。仿真结果显示,优化后喷嘴雾化液滴平均粒径从85 μm减小至58 μm,粒径分布均匀性提升28%,喷雾锥角度稳定在45°,液滴在烟道内的分布均匀性显著改善,无局部浓度过高或过低区域,尿素溶液与烟气的混合效率提升35%。

通过参数敏感性分析,验证了供液压力、气液比与表面活性剂添加量对雾化性能的影响权重,其中供液压力影响最大(权重42%),为现场参数调控提供了理论支撑。

### 3.2 现场试验验证

在某300MW燃机电厂脱硝系统开展现场试验,选取优化前后的喷嘴进行对比测试,监测脱硝效率、氨逃逸率、液滴粒径及设备运行状态。试验结果表明,优化后脱硝系统运行稳定,脱硝效率从优化前的89%提升至96.5%,满足现行环保排放要求;氨逃逸率从8ppm降至3ppm以下,有效缓解了催化剂中毒与烟道腐蚀问题;喷嘴堵塞频率降低80%,使用寿命延长至8000小时以上,每年可减少运维成本约12万元。

同时,通过热效率监测,优化后的脱硝系统对燃机热效率的影响控制在0.5%以内,实现了脱硝效能与经济性的协同提升。试验数据与仿真结果一致性良好,验证了优化方案的可行性与可靠性<sup>[7]</sup>。

## 4 结论与展望

本文针对燃机电厂脱硝喷嘴雾化性能优化问题,从结构、参数、介质三个维度提出一体化优化方案,通过仿真模拟与现场试验验证,得出以下结论:优化后的喷嘴结构与操作参数、介质特性高度适配,雾化液滴细度与均匀性显著提升,有效改善了尿素溶液与烟气的混合效果,大幅提高脱硝效率,降低氨逃逸率与运维成本,可为燃机电厂脱硝系统高效运行提供技术支撑。

未来可进一步开展智慧化优化研究,结合物联网与大数据技术,在喷嘴上布设压力、流量、磨损状态传感器,实现运行参数的实时监测与精准调控;探索新型雾化技术(如超声波雾化、气液两相脉冲雾化)在燃机脱硝中的应用,进一步提升雾化性能与系统稳定性,助力燃机电厂实现环保与经济的双重目标。

### [参考文献]

- [1]周昊.电站锅炉SCR脱硝喷嘴雾化性能优化研究[J].动力工程学报,2020,40(7):548-554.
- [2]王鹏.气助式脱硝喷嘴雾化特性数值模拟与试验[J].热力发电,2021,50(9):132-138.
- [3]李军.燃机电厂SCR脱硝系统氨逃逸控制技术[J].电力科学与工程,2022,38(4):67-73.
- [4]张磊.基于Fluent的脱硝喷嘴结构优化及雾化性能分析[J].化工机械,2021,48(3):392-396.
- [5]刘建忠.燃煤机组脱硝喷嘴雾化特性及影响因素试验研究[J].环境工程学报,2020,14(8):2156-2163.
- [6]中华人民共和国国家能源局.DL/T1904-2018火电厂烟气脱硝用喷嘴技术条件[S].北京:中国电力出版社,2018.
- [7]陈勇.表面活性剂对脱硝尿素溶液雾化性能的影响[J].应用化工,2022,51(6):1654-1657.

### 作者简介:

肖钦翔(1992--),男,汉族,上海人,大学本科,高级工,热控仪器仪表。研究方向:热控设备维护。