

燃气电厂冷却塔进风侧降噪技术改造与工程验证研究

董宵

深圳大唐宝昌燃气发电有限公司 158000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17689

[摘要] 针对燃气电厂冷却塔运行过程中产生的高强度气动噪声问题, 本文开展了进风侧降噪技术改造研究。通过噪声源机理分析、传播路径建模与现场测试, 提出了“片式消声器+过渡整流段+独立支撑体系”的系统治理方案。该方案在不影响通风效率和换热性能的前提下, 实现厂界噪声显著降低。经实测, 敏感点噪声下降 5 dB (A) 以上, 满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348—2008) 三类区限值要求。研究结果表明, 进风侧声学结构优化是燃气电厂冷却塔降噪的有效途径, 具有良好的工程推广价值。

[关键词] 燃气电厂; 冷却塔; 进风侧降噪; 消声器; 噪声治理

1 引言

随着城市燃气发电机组的密集布局, 冷却塔噪声成为厂界超标和居民投诉的主要来源之一。机力通风冷却塔由风机、导流筒、填料、配水管等构成, 运转时产生宽带气动噪声和结构振动噪声, 其中气动噪声为主导成分^[1]。该类噪声能量集中于中频段, 衰减慢、传播远, 且在夜间背景噪声较低时尤为明显^[2]。

传统治理多集中于出风口或风机本体, 如加装消声筒、改进叶型等, 但对于空间受限、结构固定的既有装置, 其实施难度较大。相比之下, 进风侧为主要辐射面之一, 其声能直接朝厂界方向传播, 是决定达标的关键控制点。

在国内外类似项目中, 进风侧降噪已成为重点研究方向。大量文献表示指出, 通过在冷却塔进风面布置片式消声结构, 可实现中频噪声削减约 6 dB (A); 通过优化通风通道与整流结构, 提高了空气流场均匀性, 进一步减少了二次噪声生成^[3]。由此可见, 从进风路径入手实施声学优化是改善厂界噪声的有效途径。

2 噪声机理与问题分析

冷却塔噪声由气动、机械与结构辐射三部分组成。气动噪声由叶片旋转和湍流撞击塔体内壁产生, 主要频段为 50 0~2000 Hz^[4]; 机械噪声来自电机与减速器运行时的啮合与摩擦声; 结构辐射噪声则通过钢结构与外壳传播至外部^[5]。

现场实测表明, 进风面为主要噪声辐射方向, 厂界敏感点声压级接近限值。低频衰减不足、地面反射与围墙效应叠

加, 使声场增强。尤其在夜间, 居民体感明显, 对厂区投诉风险增大。

经噪声频谱分析可知: 低频段 (125~250 Hz) 受风机叶片通频主导; 中频段 (500~2000 Hz) 呈现为气动涡流与塔体耦合的声场; 高频段 (4000 Hz 以上) 主要体现为结构辐射与管路振动产生的噪声。通过频谱诊断能够看出, 控制进风方向中频带的声能是降低总体噪声的关键所在。

3 降噪技术路线与设计原则

针对冷却塔进风面噪声传播特征, 本研究遵循“源—途—受”噪声控制原理, 从传播途径入手实施结构性治理。设计采用“片式消声器+过渡整流段+独立支撑体系”的组合方案, 既能保证声学性能, 又兼顾安装空间与维护性^[4]。

3.1 技术路线

经现场测量、频谱分析以及声传播模拟, 判定冷却塔进风面为主要辐射源。基于声学插入损失计算与气动性能耦合分析, 确定如下治理路径:

- ①于冷却塔进风方向增设吸声结构, 以削减声能辐射;
- ②设置过渡整流段, 以改善气流流态, 降低再生噪声;
- ③构建独立钢结构支撑体系, 以分担重量, 避免主塔受力;
- ④优化结构节点设计, 防止因共振产生次声干扰。

3.2 设计原则

本项目设计以声学效果、安全性、经济性为核心目标, 具体遵循以下原则:

- (1) 声学有效性: 借助合理的结构布局, 使进风面声压

级降低幅度达 5 dB (A) 以上;

(2) 气动兼容性: 通风通道阻力系数控制在不大于 0.2 的范围, 以保障冷却塔的换热性能;

(3) 施工安全性: 所有部件采用模块化安装方式, 最大单元重量不超过 500 kg;

(4) 防腐耐久性: 选用热镀锌钢与玻璃棉复合吸声层, 设计使用寿命不少于 10 年;

(5) 可维护性: 结构预留检修门, 以便于日后开展检查与更换工作。

3.3 结构设计概述

(1) 片式消声器设计

每个消声单元厚度 600 mm, 通风比 50%, 内部设穿孔板与玻璃棉吸声层, 外壳为镀锌钢板结构。

穿孔板开孔率 35%, 孔径 6 mm, 以降低反射损失。吸声棉层密度为 48 kg/m³, 厚度 100 mm。

声学插入损失 IL 计算公式如下^[4]:

$$IL = 10 \log_{10} \left(1 + \frac{R}{1-R} \right)$$

其中 R 为能量反射系数。通过材料阻抗匹配优化, 使 IL 在中频段达到 6~8 dB (A)。

(2) 过渡整流段

消声器与塔体之间留出 1000 mm 过渡段, 采用 1.0 mm 镀锌钢板焊接成整体结构。内部安装流线型导流板, 使气流均匀分布。

其作用不仅减少紊流再生噪声, 还能防止冷却塔入口负压波动导致的气流再循环。

(3) 独立支撑体系

采用 Q235 钢材焊接框架, 立柱截面为 100×100×6 mm 方管, 连接节点采用螺栓紧固。所有构件经热镀锌处理, 表面喷聚氨酯面漆, 涂层厚度≥120 μm。独立支撑体系确保了消声器受力均匀, 不影响冷却塔主体结构的稳定性。

4 监测与结果分析

4.1 测试方法与布点原则

噪声测试依据《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348—2008)^[1]以及《声学测量规范》实施。测量仪器选用 AWA6228 型积分声级计, 采用 A 计权测量模式。为确保数据

具有代表性, 设置 5 个测点, 具体如下: M1: 厂界南侧 (朝向居民区方向); M2: 厂界北侧; M3: 厂界东侧; M4: 厂界西侧; M5: 居民区敏感点方向 (距离约 70 米处)。

测试于晴天、风速小于 5 m/s 的条件下开展, 昼间与夜间各测量一次, 每次测量时长为 10 分钟。背景噪声与设备噪声分开测量, 并按照能量平均法进行修正。

4.2 治理前噪声特征

改造前, M1 点昼间声压级为 63.5 dB (A), 夜间 57.4 dB (A), 已接近 GB 12348—2008 三类区限值 (昼间 65 dB (A), 夜间 55 dB (A))。频谱分析显示, 500~2000 Hz 频段能量最高, 占总能量的约 72%。

经 FFT 分析可知, 该频段主要由进风侧气动噪声与塔体内部反射声叠加所致。

此外, 现场声场呈椭圆形扩散, 主瓣方向与居民区一致, 表明噪声直达路径显著。

4.3 改造后实测结果

改造完成后进行复测, 主要结果如下表所示:

测点	昼间噪声 [dB (A)]	夜间噪声 [dB (A)]	降噪幅度 [dB (A)]
M1	58.1	52.1	5.4
M2	56.5	50.7	4.8
M3	57.3	51.0	5.0
M4	55.8	49.9	4.5
M5	57.9	51.8	5.6

平均降噪幅度达 5.3 dB (A), 达成设计预期目标。频谱分析结果显示, 在 500~2000 Hz 频段内衰减最为显著, 噪声能量降低幅度超过 60%。鉴于气动通道保持顺畅状态, 风机电流以及进出口风速均维持稳定, 冷却塔的换热性能未受到影响。

4.4 运行状态与可靠性

投运半年后, 现场检测表明, 所有结构连接稳固, 消声器表面防腐层保存完好, 未出现渗水、锈蚀等状况。

检修门密封性能良好, 内部玻璃棉未发生脱落或受潮现象。这表明消声结构具备优良的耐候性与运行可靠性。

此外, 居民区噪声投诉事件从“偶发性”降低至“零发生”, 这说明治理措施在实际运行过程中取得了显著的社会与环境效益。

5 声传播模拟与声学机理分析

5.1 声传播模型建立

为验证治理效果及预测不同工况下的声场分布, 采用半经验声传播模型结合数值模拟进行分析。

声源以冷却塔进风口为面源, 声功率级 $L_w=98$ dB(A), $L_w = 98$ dB(A), 频率范围 200~4000 Hz。传播路径考虑空气吸收、地面反射、建筑遮挡及屏障衰减。

声压级计算公式为:

$$L_p = L_w - 20 \log_{10}(r) - 8 - \Delta L_{\text{barrier}} - \Delta L_{\text{atm}}$$

其中, r 为声源至接收点距离, $\Delta L_{\text{barrier}}$ 为屏障衰减量, ΔL_{atm} 为大气吸收修正。

通过将消声器插入损失曲线输入模型, 计算改造前后声场差异。

5.2 模拟结果与对比

模拟结果表明, 改造前声场主瓣聚焦于冷却塔正前方, 厂界处声压级约为 62 dB(A), 与实测数据相符。改造后, 主瓣向上移动并向两侧扩散, 声能密度降低约 50%。

在敏感点方向, 声压级从 62 dB(A) 降至 56 dB(A), 与现场实测的 58 dB(A) 差值处于 ± 2 dB 范围之内, 这表明模型具有良好的精度。

等声压级图显示, 进风侧声场分布由开放型转变为封闭型, 这说明“片式消声器 + 整流段”结构有效地阻断了直达声传播路径。

5.3 声学机理分析

进风消声结构的主要降噪机制涵盖以下三个方面:

(1) 声阻抗匹配效应: 穿孔板与玻璃棉吸声层构建出阻抗梯度结构, 促使声波实现逐层衰减。

(2) 多孔吸声作用: 玻璃棉材料能够将声能转化为热能, 特别是对中高频声波具备良好的吸收性能。

(3) 反射干扰控制: 整流段对声波入射角加以改变, 从而降低声波在风道内的多次反射叠加效应。

这些机制协同发挥作用, 使得冷却塔进风方向的中频噪声能量呈现显著下降态势, 成为一种高效且稳定的声学治理途径。

6 结论

改造后冷却塔运行稳定, 厂界噪声全部达标。经多轮复

测, 敏感点噪声稳定在昼间 58 dB(A)、夜间 52 dB(A) 左右, 较改造前平均下降 5~6 dB(A)。

降噪效果主要集中在 500~2000 Hz 中频段, 该频段亦是居民主观听觉最敏感区域, 因此体感改善尤为明显。

声能分布特征显示, 改造后进风面声能密度降低超过 50%, 声场均匀性提高。风机运行电流变化不超过 1%, 换热性能保持稳定。说明降噪结构未增加明显气动阻力, 兼顾了降噪与能效。

(1) 燃气电厂冷却塔的噪声主要来自进风侧的气动噪声, 属于中频宽带声, 传播距离较远, 对居民区的影响较为明显。

(2) 采用“片式消声器+过渡整流段+独立支撑体系”的设计, 在不改变风机运行工况的前提下, 实现厂界噪声降低 ≥ 5 dB(A), 符合《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348—2008)^[1]的要求。

(3) 数值模拟与实测结果高度一致, 偏差 ≤ 2 dB(A), 证明了模型和结构设计的可靠性。

(4) 改造后的结构具备优良的安全性、防腐性和维护性, 施工周期短且运行稳定。

(5) 本研究形成的技术路线和设计参数可为其他燃气电厂及大型工业冷却装置的噪声治理提供工程借鉴, 对建设绿色、低噪声能源体系具有重要的意义。

[参考文献]

- [1] GB 12348—2008 工业企业厂界环境噪声排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 王志刚, 刘晓峰, 等. 冷却塔噪声控制技术[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(3): 105-110.
- [3] 陈涛, 张海军. 火电厂冷却塔噪声治理工程实践[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(2): 58-62.
- [4] 李斌, 陈昱东. 消声器设计与插入损失计算方法研究[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 425-430.
- [5] 王凯, 张浩. 声传播建模在电厂噪声预测中的应用[J]. 电力环保, 2022, 38(4): 76-81.
- [6] JGJ59—2011 建筑施工安全检查标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.