

高效智能干湿联合冷却塔设计与性能研究

麻悦宁¹, 苏海清¹, 马 飞¹, 乔 健²

- (1. 内蒙古包钢鑫能源有限责任公司, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢冷轧板材厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:针对钢铁冶金冷却系统能耗高、水耗大、工况适配性差和运维成本高的痛点,文章以钢铁全流程高温、高粉尘、高负荷工况为应用场景,融合板翅消雾换热与智能协同控制技术,开展高效智能干湿联合冷却塔的设计研发与性能验证。结果表明:该冷却塔可实现干湿模式自动精准切换,适配钢铁全流程冷却需求;全年平均节水率达 22.3%;在 -10℃、相对湿度 70% 工况下实现零雾运行,有效解决传统冷却塔结垢、磨损、飘雾、能耗偏高等行业难题。

关键词:干湿联合冷却塔;板翅消雾;智能控制;钢铁冶金;节水节能

中图分类号: TU279.7

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)03-0096-03

Design and Performance Study of High-efficiency Intelligent Dry-wet Cooling Tower

Ma Yuening¹, Su Haiqing¹, Ma Fei¹, Qiao Jian²

- (1. Inner Mongolia Baotou Steel Xin Energy Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;

2. Cold Rolled Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd.,
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In the paper, the design, research and development and performance verification of high-efficiency intelligent dry-wet cooling tower are carried out by taking the working conditions of high temperature, heavy dust and high load in the whole process of iron and steel as application scenarios as well as combining with plate-fin demisting heat exchange and intelligent collaborative control technology aiming at the pain points of high energy consumption and water consumption, poor adaptability of working conditions and high operation and maintenance costs for cooling system of ferrous metallurgy. The results showed that the automatic precise switch of dry model and wet model could be realized with the cooling tower, which was adapted to the cooling requirements of the whole process of iron and steel; annual average water-saving percentage could reach 22.3%; zero mist operation could be realized at the working condition of -10℃ and relative humidity of 70% so that such industrial problems as scaling, abrasion, drifting mist and higher energy consumption of traditional cooling tower could be effectively solved.

Key words: dry-wet cooling tower; plate-fin demisting; intelligent control; ferrous metallurgy; water saving and energy saving

钢铁冶金是工业能耗与水资源消耗重点领域,冷却系统直接影响生产效率、运营成本与低碳发展水平。当前国内钢铁冷却系统以传统湿式、干式冷却塔为主,湿式塔水耗大、冬季易飘雾结冰,干式塔换热效率低、风机能耗高,均难以匹配钢铁全流程特殊工况。在“双碳”与工业节能节水政策驱动下,干湿联合冷却技术成为系统升级核心方向。国外干湿联合冷却塔技术成熟,但售价高、定制化不足、填料易堵,难以适配国内钢铁生产。国内技术近年快速发展,双良节能等在板翅消雾、智能调控上实现突破。何锁盈等^[1]采用数值模拟揭示喷淋预冷参数与空冷塔热力性能的定量关系;徐梦菲^[2]得到不同季节干湿冷却塔最优运行策略;余志康等^[3]从多维度总结冷却塔性能提升路径。

1 干湿联合冷却塔核心理论基础

1.1 板翅消雾换热理论

板翅消雾模块采用间壁式换热+蒸发换热复合机制,流道分为独立冷、热通道。热通道完成蒸发散热,冷通道完成间壁式显热换热且无水分蒸发。冷通道空气被加热为不饱和干热空气,与热通道湿热空气混合降低相对湿度,实现消雾,见图1。同时冷通道无蒸发损失,大幅降低水耗。消雾效果与冷热通道风量比、换热面积呈正相关^[4]。

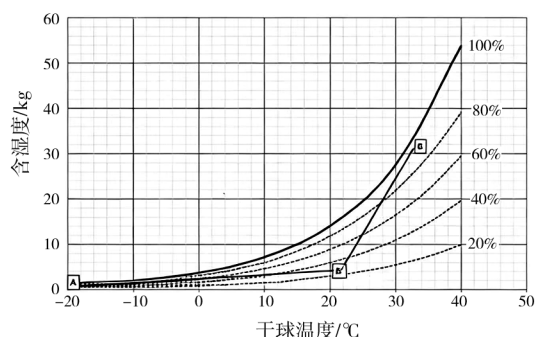


图1 板翅空冷器消雾技术原理示意图

1.2 智能协同控制理论

钢铁生产负荷连续、波动,冷却系统需快速响应环境与负荷变化。本文采用基于热平衡计算的模糊PID控制+AI自适应优化算法,实时采集环境温湿度、水温、风机转速、喷淋流量等参数,通过LSTM模型预测出水温度趋势,自动匹配最优运行模式,可使风机能耗降低15%以上^[5]。

2 高效智能干湿联合冷却塔总体方案设计

2.1 设计工况参数

以钢铁冶金循环水冷却为场景,核心设计参数:

处理水量:250 m³/h;进塔水温 29 °C,出塔水温 24 °C;环境参数:干球温度 31.7 °C,湿球温度 20.9 °C,大气压 889.1 hPa;极限消雾工况: -10 °C、相对湿度 70%,零雾运行;核心指标:全年平均节水率 ≥20%;飘水率 <0.000 5%。

2.2 总体结构设计

冷却塔采用逆流开式钢结构+板翅消雾模块一体化设计,一字形布置、两面进风,基础尺寸 4.3 m×4.3 m,塔顶高 5.6 m,结构紧凑占地小。塔体围护为玻璃钢材质,耐腐蚀、抗老化;内部集成框架、风机电机、配水、板翅消雾、收水、支撑密封系统,实现换热、消雾、节水、智能控制四大功能集成。

3 关键部件与板翅消雾核心技术

3.1 核心部件设计

(1)风机与电机系统:采用高效翼形轴流风机,直径 3 600 mm,风量 166 410 m³/h,全压 139.95 Pa,轴功率 7.6 kW;叶片为碳纤维+铝合金包覆,角度可调。配套 11 kW 高效户外电机,使用寿命 ≥10 年,可实时监测温度。

(2)收水系统:多波形改性PVC收水器,阻燃氧指数 ≥40,飘水率 ≤0.000 5%,风阻小、使用寿命 ≥20 年。

(3)配水系统:全管式复合配水,Q235 镀锌主管,ABS 大口径喷头,布水不均匀系数 <5%,可分通道控制喷淋,适配 70%~130% 负荷波动。

3.2 板翅消雾核心技术

板翅空冷器为自主研发核心部件,采用超导PVC真空吸塑成型,波纹结构分割冷热通道,片间距 21 mm,比表面积较常规填料增加 35%~50%。模块采用高频焊接+粘接工艺,耐热 65 °C、耐寒 -40 °C,耐老化性能优异。

环境冷空气同步进入冷热通道;热通道内空气与循环水逆流接触变为饱和湿热空气;冷通道内空气经间壁换热升温降湿,变为干热空气;两种空气在塔内混合为不饱和空气,排出后无液滴凝结,实现消雾。冷通道无蒸发损失,全年蒸发损失率 ≤1.2%,较传统湿式塔节水 20% 以上,冬季空冷模式蒸发损

失为零。

技术优势:通风阻力较传统消雾模块降低 40 ~ 60 Pa,风机能耗降低 10% ~ 15%;塔体高度降低 4 ~ 6 m,抗风性能提升;超导 PVC 表面亲水性好,抗垢耐磨,适配钢铁高粉尘水质。

4 智能控制系统设计与实现

4.1 系统架构

智能控制系统采用感知层—控制层—应用层三层架构,实现“监测—决策—执行—反馈”闭环控制:

感知层:配置温湿度、水温、风速、振动、能耗监测模块,实时采集 12 项关键运行参数;

控制层:以 PLC 为核心,搭载模糊 PID + AI 优化算法,完成模式切换、风机变频、喷淋调节、故障预警;

应用层:远程监控平台,支持数据存储、曲线分析、报表生成、移动端访问。

4.2 核心控制逻辑

模式自动切换:干球温度 < 5 ℃ 切入空冷模式; 5 ℃ ≤ 干球温度 < 25 ℃ 切入消雾模式;干球温度 ≥ 25 ℃ 切入换热模式。

风机变频控制:根据出塔水温偏差实时调节转速,水温稳定在 ±0.5 ℃ 范围内。

故障智能预警:监测电机温度、风机振动、模块堵塞状态,异常时 4 h 内响应、24 h 内派员到场处理。

4.3 适配钢铁工况的优化设计

针对钢铁生产负荷突变、粉尘浓度高、连续运行特点,新增三项优化:负荷突变 10 s 内完成风机与喷淋调节;实时监测通风阻力实现防堵塞预警;突发断电自动关闭喷淋,重启无扰动恢复运行。

5 全工况性能测试与结果分析

5.1 测试方案

在钢铁冶金现场搭建测试平台,选取夏季、冬季、过渡季 3 种典型工况,测试冷却水温差、节水率、消雾效果、风机能耗、飘水率等指标,并与传统湿式冷却塔数据对比。

5.2 测试结果

(1)冷却性能:全工况下进出塔水温差稳定在 5 ℃,逼近度 ≤ 3 ℃,换热效率较传统塔提升 12%;

(2)节水性能:全年平均节水率 22.3%,冬季空冷模式 100%、过渡季 18.7%、夏季 8.5%;

(3)消雾性能: - 10 ℃、70% 湿度下零雾运行,无冬季结冰问题;

(4)能耗指标:风机单位水量能耗 0.030 4 kW · h/m³,较传统塔降低 14.7%;

(5)飘水率:实测 0.000 42%,优于设计指标,无药剂飘散污染。

与传统湿式、干式冷却塔相比,本冷却塔在换热效率、节水、消雾、能耗、工况适配 5 大维度均实现突破,完全适配钢铁冶金高温、高粉尘、高负荷工况,有效解决传统设备的行业共性难题。

6 结论

(1)研发的高效智能干湿联合冷却塔,集成板翅消雾、智能协同控制、抗垢耐磨结构优化技术,完全适配钢铁冶金高温、高粉尘、高负荷全流程工况,破解传统冷却塔水耗大、飘雾、能耗高、工况适配差等难题;

(2)设备实现 3 种运行模式自动切换,全年平均节水率 22.3%, - 10 ℃、70% 湿度下零雾运行,换热效率提升 12%,风机能耗降低 14.7%,性能指标达到国内先进水平;

(3)核心板翅消雾模块自主研发,摆脱进口依赖,设备造价较国外同类产品降低 30%,兼具技术与经济价值;

(4)形成的设计方法、智能控制策略可推广至化工、电力、煤炭等高耗水行业,为工业冷却系统绿色升级提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 杨顺淋,王军,李丽.翅片管布置方式对干湿联合冷却塔预冷性能的影响[J].化工机械,2023,50(2):245 - 250.

[2] 徐梦菲.不同预冷方式下机械通风冷却塔最优运行策略研究[J].工业水处理,2023,43(8):112 - 116.

[3] 余志康,张磊.工业冷却塔性能提升路径研究综述[J].节能技术,2024,42(2):165 - 170.

[4] 龙国庆,张国罡,邓伟鹏,等.高位收水机械通风冷却塔消雾模块性能对比[J].动力工程学报,2024,44(6):859 - 865.

[5] 钱海龙,张连炯.基于热平衡计算的大型机械通风冷却塔控制策略[J].电力勘测设计,2025(6):43 - 47.