

直接空冷系统喷雾装置优化分析

刘惠逢 李卫国 白静平 姚丽峰 李东

国电电力大同发电有限责任公司, 山西 大同 037000

[摘要] 喷雾系统能够极大地改善空冷机组的运行特性, 提高空冷系统在极端高温条件下的降温性能, 但空冷机组喷雾系统存在布置方式不合理, 导致喷淋效果差, 雾化效果不佳的问题, 造成局部区域冷却效果不明显, 文中采用数值模拟方式分析直接空冷系统喷雾装置的运行特性, 喷嘴之间的布置方式采用修正后的正三角形式, 在此基础上分析水压、喷雾角度对喷雾系统增湿降温效果的影响。

[关键词] 直接空冷系统; 雾装置; 优化分析

DOI: 10.33142/sca.v6i11.10511

中图分类号: TK264.1+1

文献标识码: A

Optimization Analysis of Spray Device in Direct Air Cooling System

LIU Huifeng, LI Weiguo, BAI Jingping, YAO Lifeng, LI Dong

PowerChina Datong Power Generation Co., Ltd., Datong, Shanxi, 037000, China

Abstract: The spray system can greatly improve the operating characteristics of the air cooling unit and the cooling performance of the air cooling system under extreme high temperature conditions. However, the spray system of the air cooling unit has an unreasonable layout, resulting in poor spray effect, poor atomization effect, and poor cooling effect in local areas. In this paper, the operation characteristics of the spray device of the direct air cooling system are analyzed by means of numerical simulation. The arrangement of nozzles is in the form of a modified triangle. On this basis, the influence of water pressure and spray angle on the humidification and cooling effect of the spray system is analyzed.

Keywords: direct air cooling system; spray device; optimization analysis

引言

喷雾系统能够提高高温条件下直接空冷机组的换热效果, 其工作原理是对除盐水施加一定压力, 通过喷嘴向特定方向喷射雾状的细小水滴颗粒, 通过轴流风机的吹动而向翅片散热器流动, 流动过程中空气与夹杂着的雾滴相互接触, 从而形成汽、气、水的混合物。通过雾滴的蒸发能够使空气降温, 并带走一部分翅片管换热器的温度, 从而提高直接空冷的冷却效果。

喷雾系统在众多设备上广泛应用, 针对空喷雾系统的研究主要涉及到喷嘴的布局设计等方面。何青等^[1-2]运用射流动力学和计算流体力学理论分析喷嘴结构和喷嘴到翅片的距离对喷嘴射流能力的影响, 提出距离越大, 翅片入口的空气速度越小, 射流面积则先增大后减小; 惠雪松等^[3]基于 SIMPLE 算法, 采用 $k-\epsilon$ 模型分析喷嘴位置、喷雾方向、喷嘴孔径及喷雾压力对空冷凝汽器压力的影响, 研究结果表明压力越大喷雾增湿效果越明显; 刘彦丰等^[4-5]基于计算流体力学理论, 提出雾化压力、流量系数和雾化角对冷却效果有很大的影响, 而喷嘴孔径对冷却效果的影响却不大。石维柱等^[6]提出喷淋系统的喷雾越均匀, 雾滴覆盖范围越大, 喷淋冷却系统的性能越好; 王松岭等^[7]基于标准湍流模型和离散相模型, 利用流体动力学方法对喷雾系统进行数值模拟, 研究雾滴的雾化过程和雾滴在空

冷单元内热湿交换效果。通过对喷雾系统的研究, 了解了喷雾降温的机理, 但为进一步地贴合工程实际, 本论文将基于已投运的直接空冷机组的喷雾系统进行分析, 研究影响冷却效果的因素。

通常喷雾结构按照一定形式将喷嘴布置在散热器下方, 由于存在雾滴无法触及到的区域, 并且雾化效果不均匀, 造成了除盐水的大量浪费, 同时降温效果不均匀, 造成局部强化, 需要强化部位并未冷却, 因此, 在考虑不同环境温度、环境风速和风机运行条件下, 基于空冷单元流体模型分析结果优化喷雾结构的布置位置、喷嘴雾化角度等, 在降低直接空冷机组建造成本的同时, 使直接空冷机组的冷端降温程度和均匀度得到合理优化。

1 喷雾装置增湿降温效果分析

1.1 雾化喷嘴的工作原理

喷雾系统的雾化喷嘴能够将除盐水等液体雾化喷出, 工作过程是通过高压使液体撞击喷嘴内部的铁片, 从而形成微米级的雾化颗粒从喷嘴喷出, 喷出的雾滴能够从两方面提高空冷机组冷却效果, 一是经过喷嘴雾化后的雾滴与空气接触, 可降低空气的温度, 从而提高直接空冷机组的换热效果; 另一方面是雾化后的雾滴在轴流风机的驱动下, 直接接触到空冷单元的换热器, 而雾滴在蒸发过程中能够吸收一部分热量。水的传热能力要优于空气的传热能力,

且水蒸发为水蒸汽后所吸收的热也远远超过其自身的焓值,通过这两种途径能够有效的提高直接空冷机组的冷却效果。通过对相关研究资料的整理,影响喷雾系统增湿降温效果的因素归纳为:空气质量流速的影响,喷水系数的影响和喷嘴布置方式的影响。

1.2 喷嘴的布置形式

许多学者对喷嘴雾化性能的研究大多是针对单个喷水装置而言,但实际的直接空冷机组中的冷却区域是由大量喷嘴交叉与重叠,通常直接空冷机组的喷嘴布置方式是如图 1 所示的正方布置为主,这种结构安装与维护方便,应用较为广泛。

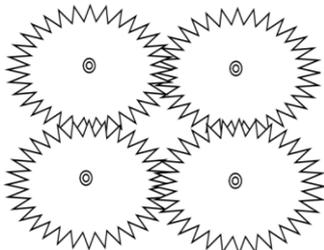


图 1 喷嘴布置形式和范围

当喷嘴成组布置时,喷水区域的交叉重叠决定了雾化的均匀性和温度变化特性。喷嘴喷雾均匀性采用公式(1)所示的波诺马林科经验公式:

$$K_n = \varphi \cdot \sigma \left(\frac{f_0}{h \cdot r} \right) \leq 0.3 \quad (1)$$

其中,计算结果小于等于 0.3 的喷雾具有均匀性; φ 的值与喷嘴距离换热器高度有关; f_0 : 喷嘴喷雾范围,等于总喷淋水面积除以喷头数,多喷嘴时必须进行修正,其修正系数:

$$\lambda = \left(\frac{f_0}{f_m} \right)^{0.33} \quad (2)$$

其中, f_m 可以利用喷嘴的具体形式进行计算。

不同的布置方式使得喷嘴之间重叠区域不同,如图 2 所示的部分重叠区域降温效果加强,合理的喷嘴间隔能够有效提高降温效果,对局部区域进行加强,但也会造成冷却区域的浪费,应基于空冷单元的冷却效果分析,对需要强制换热的区域加强雾化操作。

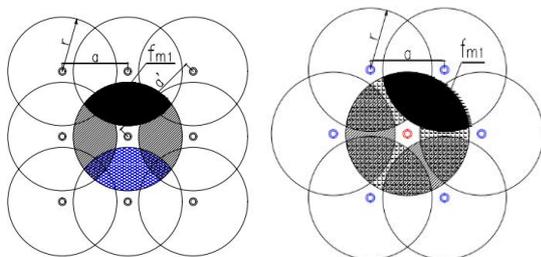


图 2 喷雾系统的喷嘴布置方式

通过图 2 的示意图可以看出正三角形喷雾范围大于正方形,并且通过经验公式计算得到三角形的修正系数小,均匀性优于正方形。所以本工程喷雾系统采用图 3 所示的正三角形布置方案。

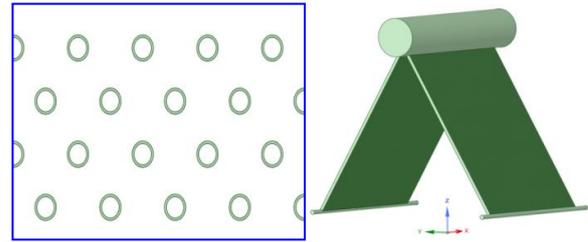


图 3 喷嘴三角形布置方式

本项目喷雾系统的喷嘴平行翅片布置,高度距离翅片 0.5~1.0m,具体高度和数量根据现场实际确定。在确定喷嘴布置形式的前提下,建立喷雾增湿系统的仿真模型,以分析喷嘴角度、喷嘴水压对雾化效果的影响。

2 喷雾增湿系统仿真模型

2.1 建立仿真模型

基于气液两相流的传质传热理论,在 FLUENT 建模过程中,将雾化后的雾滴用离散相模型计算,该模型更适用于求解直接空冷机组喷雾增湿的效果,其中采用欧拉法对连续相模型进行求解,并采用拉格朗日法对离散相进行数值计算,分布在连续相中的离散相由雾滴颗粒构成。而流体在空冷单元内的运动较为复杂,气液两相的传热传质不规律,导致对空冷单元的流场仿真精度较低,因此,将空冷单元内的流体沿翅片管部件的运动看作是在多孔介质内的流动,从而提高仿真精度。利用 FLUENT 建立喷雾增湿系统的流体模型,选择软件自带的旋流喷嘴模型模拟实际的雾化过程,设置流体区域的边界条件,计算域初始状态下空气保持静止,当喷嘴从计算域上表面雾化产生液滴时,将引起计算域内空气的流动。将喷嘴所在的上表面设置为压力入口边界,初始时刻保持静止;基于直接空冷系统的结构特点,将计算域四周边界设置为压力出口;底部的表面特征为绝热壁面;周围的环境温度以及壁面温度都按照常温 20℃ 设置。数值模拟过程中,选择 Realizable k- ϵ 湍流模型,采用 coupled 算法,压力及动量采用二阶迎风格式。

2.2 不同前水压的雾化分析

基于实际运行的水压值,针对不同喷嘴前水压情况下的雾化效果,分别分析了 1MPa、1.5MPa 和 2MPa 的雾化情况,得到如图 4 所示的雾化云图。

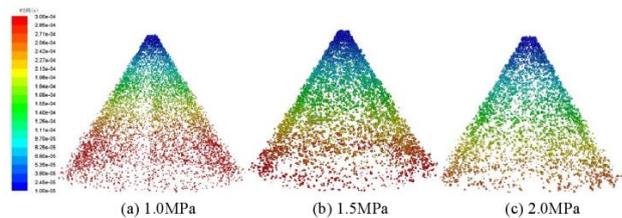


图 4 不同压力下雾化云图

通常喷嘴前水压越大，液体流出的初速度也就越大，因此，雾化云图中 2MPa 情况下的速度最大，进一步地研究雾化过程的机理，出口压力越大时喷嘴出口处液膜与空气相对速度也就越大，气体对液膜的剪切作用较强，导致液膜变薄，破碎状态下的液膜速度较大，使得液滴穿过空冷单元内的流场时间也越短，在相同的喷嘴布置形式下，2MPa 压力下液滴的平均停留时间最短。

直接空冷系统的翅片换热器与喷雾系统配合使用，而喷嘴距离翅片管区的距离直接影响降温效果，如图 5 所示的不同高度情况下的喷嘴雾化范围。

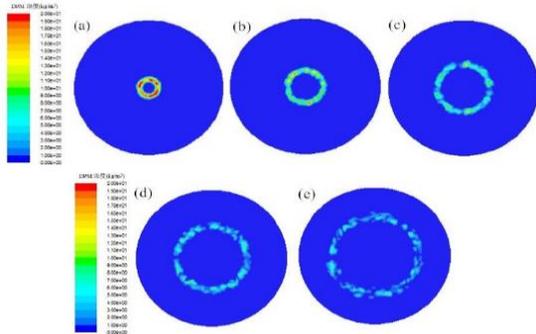


图 5 喷嘴不同高度下雾化范围

不同的喷雾高度使得液滴所能覆盖的翅片管区域随之改变，结合现场喷雾管的压力，对喷嘴距离翅片管的高度进行优化，以满足实际的冷却要求。

2.3 不同喷射角度的仿真分析

喷雾角度影响着喷雾系统的雾化效果，在固定喷雾高度和水压的情况下，获得不同夹角的喷雾系统雾化效果。如图 6 所示的喷嘴倾斜度示意图。

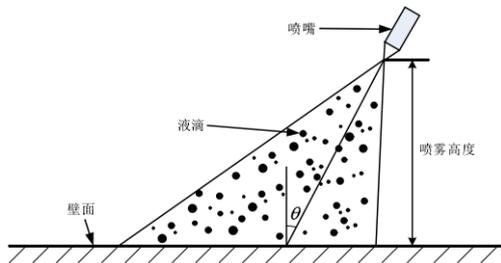


图 6 喷嘴倾斜度的影响

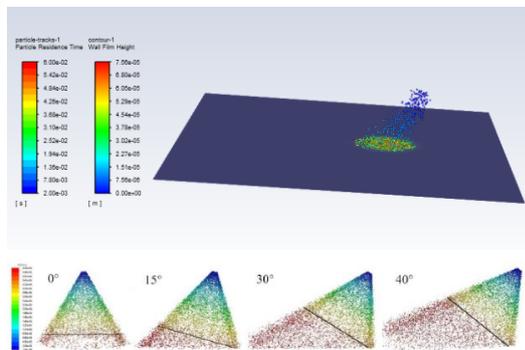


图 7 喷嘴不同角度下的云图

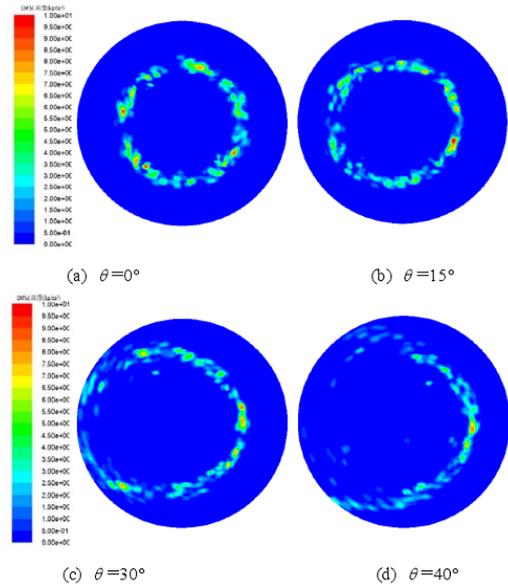


图 8 不同喷嘴角度的横切面云图

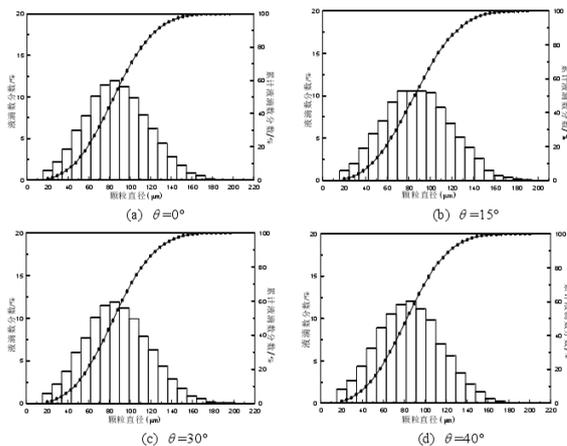


图 9 不同倾角下液滴直径分布

采用控制变量的方式研究倾斜射角对雾化效果的影响，图 6 中的夹角 θ 表示液体喷射轨迹的中心线与竖直方向的夹角。在保证喷嘴的前水压和喷射高度固定不变的情况下，得到如图 7 所示的雾化云图，分别是喷雾角度为 0° 、 15° 、 30° 和 40° 时的雾化效果，通过对不同喷雾角度的分析以获得最佳雾化效果。

通过不同喷嘴角度的颗粒直径分布图可知，当倾角 $\theta = 15^\circ$ 时，直径在 $75 \mu\text{m}$ 到 $100 \mu\text{m}$ 范围内的液滴所占比例接近，而其他倾斜角度的液滴直径范围主要集中在 $90 \mu\text{m}$ 附近。颗粒大小较为均匀的雾滴能够使降温效果更好^[6]，而喷嘴与翅片管的夹角不同影响着液滴分布，后期结合现场实际，喷嘴倾斜角度不大于 15° 时的降温效果较为明显。

2.4 喷嘴布置间距的仿真分析

合理地布置喷嘴之间的间距，以使喷雾系统达到最佳的工作状态，如图 10 所示给出了双喷嘴的示意图。双喷

嘴同时进行雾化作业时，雾滴的运动轨迹存在干涉区域，干涉区域内的雾滴密度更大，可提高换热效果，但也会存在未被完全蒸发的雾滴形成水滴直接下落的问题。

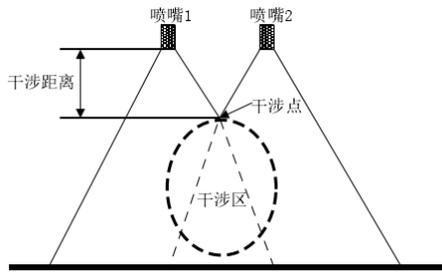


图 10 双喷嘴干涉区域

间距过小会造成水雾的重叠，降低降温范围，但可以实现局部的雾化加强；间距过大会使降温范围变大，减少喷嘴数量，节约成本，可根据实际使用情况对直接空冷机组进行流场分析，对需要加强降温的区域设置较小的喷嘴间距，以达到最佳的降温效果。

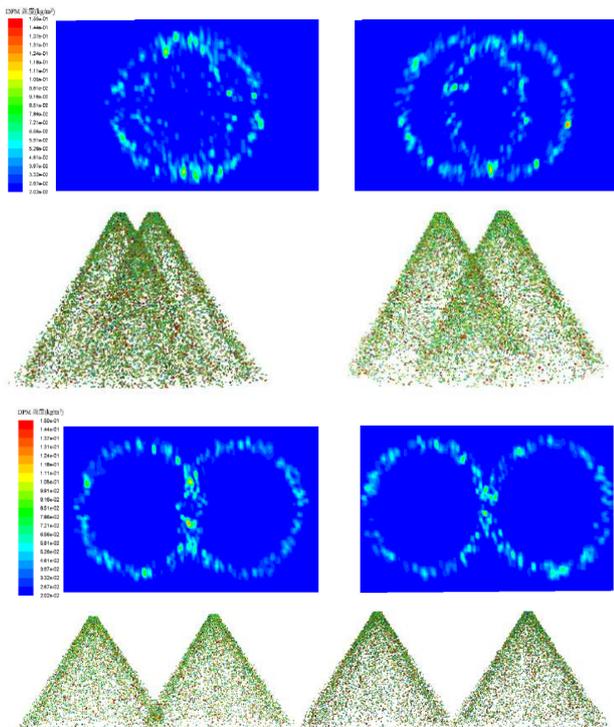


图 11 双喷嘴交叉重叠

通过图 11 给出的四种不同双喷嘴交叉重叠云图，后期结合现场施工位置，为喷嘴厂家提供雾化角度等参数，在不同的位置设置相应的合理间距。

3 结论

通过对直接空冷系统的喷雾装置进行雾化效果分析，喷嘴前水压值越大，雾化效果越好，喷嘴前水压达到 2MPa

压力时，液滴的平均停留时间较短。而喷嘴与翅片管的夹角小于 15° 时雾化的液滴直径更为均衡；通过双喷嘴重叠效果的分析，为实际的喷雾系统布置提供参考依据。

【参考文献】

[1]何青,张暎,杜冬梅,等.直接空冷凝汽器干式吹扫系统的喷嘴流场特性[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(11):3108-3115.
[2]何青,刘婧,赵晓彤,等.直接空冷凝汽器干式吹扫系统喷嘴结构特性[J].中国电机工程学报,2015,35(13):3351-3357.
[3]惠雪松,孙会亮,马少帅.直接空冷机组空冷单元内喷雾增湿系统的结构优化[J].东北电力技术,2012,33(8):27-31.
[4]刘彦丰,张京卫,云昆.喷嘴流量特性对直接空冷机组喷雾增湿系统冷却效果影响的数值研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2012,39(3):83-87.
[5]刘彦丰,张京卫,李宏伟.直接空冷机组喷雾增湿系统喷嘴布置位置数值研究[J].电力科学与工程,2011,27(12):54-58.
[6]石维柱,安连锁,张学镭,等.直接空冷机组喷淋冷却系统的数值模拟和性能分析[J].动力工程学报,2010,30(7):523-527.
[7]王松岭,赵文升,刘阳,等.直接空冷机组雾化增湿系统的数值研究[J].中国电机工程学报,2008(29):28-33.
[8]邹文重,温济铭,胡相杰,等.开放式空冷余热排出系统影响因素敏感性研究[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(7):1175-1180.

作者简介: 刘惠逢 (1987.8—), 毕业院校: 山西大学工程学院, 所学专业: 热能与动力工程, 就职单位: 国电电力大同发电有限责任公司, 当前职务: 生技部汽机专责职称级别: 助理工程师; 李卫国 (1970.1—), 毕业院校: 武汉水利电力学院, 所学专业: 电厂热能动力, 就职单位: 国电电力大同发电有限责任公司, 当前职务: 生产副总经理, 职称级别: 高级工程师; 白静平 (1984.6—), 毕业院校: 太原理工大学, 所学专业: 热能与动力工程, 工作单位: 国电电力大同发电有限责任公司, 当前职务: 总工程师, 职称级别: 工程师; 姚丽峰 (1983.2—), 毕业院校: 华北电力大学, 所学专业: 动力工程, 就职单位: 国电电力大同发电有限责任公司, 当前职务: 生计部主任, 职称级别: 工程师; 李东 (1988.10—), 毕业院校: 合肥工业大学, 所学专业: 热能与动力工程, 就职单位: 国电电力大同发电有限责任公司, 当前职务: 汽机车间主任助理 (主持工作), 职称级别: 工程师。