

空调冷凝器外环境喷雾冷却的数值模拟

王晓阳¹, 余 敏¹, 龙时丹², 崔明璐¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海法维莱交通车辆设备有限公司, 上海 201906)

摘要: 当室外温度过高时, 空调室外机组散热环境恶化, 导致空调经济性降低. 现采用在室外机组冷凝器上加装喷嘴进行水的喷雾冷却的方法, 降低进入冷凝器的风温, 改善冷凝器散热工况. 通过 CFD 软件进行数值模拟, 模拟不同水量、不同喷嘴角度的喷雾冷却对冷凝器外环境空气温度场以及对各点温度分布的影响. 模拟结果表明, 喷雾后冷凝器外环境温度降低, 随着喷雾量、喷雾角度的增大, 进风截面各点温度分布更为均匀, 冷凝器散热能力得到提高.

关键词: 冷凝器; 喷雾冷却; 喷嘴角度; 数值模拟

中图分类号: TB 657 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Spraying Cooling of Air Conditioning Condenser

WANG Xiaoyang¹, YU Min¹, LONG Shidan², CUI Minglu¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Faiveley Traffic Equipment Co. Ltd., Shanghai 201906, China)

Abstract: Under the environment of too high air temperature, the cooling effect of outdoor condenser of air-cooled conditioning units becomes poorer. In order to reduce the import air temperature and improve the condenser cooling condition, nozzles were installed to spray water to the condenser. The spray cooling of the condenser was numerically simulated by using CFD software and its effect on the outside environment air temperature field and the temperature distribution at different points under different water flow and different spray angle was analyzed. The simulation shows that the outside environment air temperature is reduced and along with the increase of spraying amount and spray angle, the temperature distribution at various points on the import wind section becomes more uniform. The condenser cooling ability is improved.

Key words: condenser; spray cooling; spray angle; numerical simulation

近年来随着地球温室效应的不断加剧, 夏季的室外温度比往年高出了不少, 越来越恶劣的外环境

使风冷式空调冷凝机组的散热急剧恶化, 不但降低了空调机组的制冷效率, 而且会造成空调机组寿命

收稿日期: 2014-01-19

基金项目: 上海市宝山区产学研合作资助项目(CXY-2011-06)

第一作者: 王晓阳(1989-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 强化换热与节能技术. E-mail: wxyfjob@163.com

通信作者: 余 敏(1952-), 女, 教授. 研究方向: 能源有效利用与节能技术. E-mail: usstym@qq.com

大大降低.在空调机组外加装喷雾冷却装置可达到改善散热的目的.本文在不改变原有的冷却系统的基础上,加装喷嘴进行水的喷雾冷却,以降低进入冷凝器的进口风温,改善散热情况.采用 CFD 软件对加装喷嘴喷水后的环境温度场进行了数值模拟,对喷雾降温情况及其影响因素作了分析.

1 喷雾冷却原理及其系统组成

喷雾冷却利用雾化喷头喷出的细微液滴与空气混合、蒸发,吸收大量热量,降低空气温度,近似于等焓加湿降温过程^[1].

如图 1 所示,喷雾后的空气温度降低,含湿量增加.图 1 中的 1,2 点为喷雾前、后空气状态, φ 为相对湿度, l 为等温线, h 为比焓, d 为湿度.

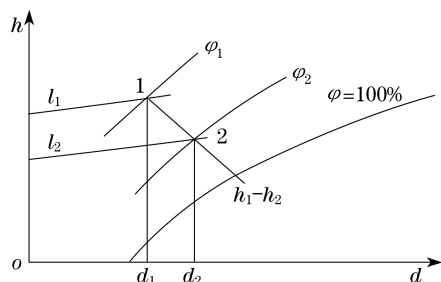


图 1 空气绝热加湿过程焓湿 ($h-d$) 图

Fig.1 Enthalpy-humidity chart of adiabatic humidifying process

喷雾系统由外部供水系统、冷却系统和控制系统组成.外部供水系统由供水泵、调节阀和管路系统组成.喷雾系统如图 2 所示.

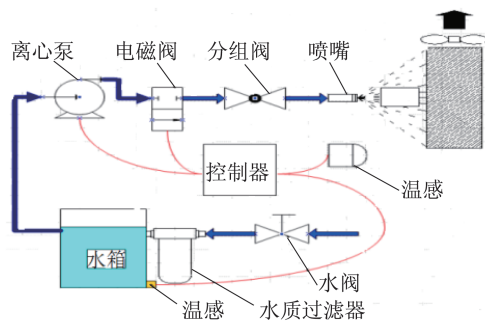


图 2 喷雾系统简图

Fig.2 Spray system diagram

2 喷雾冷却的数值模拟

2.1 数学模型

增湿降温法属于直接蒸发冷却方法.基于水的

传热能力明显优于空气的传热能力,尤其是水蒸发为水蒸气所吸收的汽化潜热远远超过其相同温度下的焓值.假设冷凝器进口空气已达饱和时空气状态,开启喷淋装置后,冷凝器空气侧入口空气的温度由水温升吸热和水汽化吸热两部分所决定.由于喷雾冷却喷水量很少,水换热量与水汽化吸热相比,水吸热只占了很少比例,在此可以忽略不计.

水蒸发吸收的汽化潜热

$$Q = G_{wzf}(h_2 - h_1) = Gc(t_1 - t_2)$$

式中, G_{wzf} 为由水蒸发成水蒸气的质量流量; h_1, h_2 分别为蒸发前、后水的焓值; G 为空调冷凝器进风质量流量; c 为比热容; t_1, t_2 分别为空气冷却前、后温度.

2.2 几何模型及边界条件

喷雾冷却系统中最重要的过程就是喷雾冷却过程.采用数值模拟研究喷嘴喷雾对进口风温的冷却效果^[2].

以西北干旱地区某额定制冷量 30 kW 的空调机组为例,冷凝风量为 4.08 kg/s,在离空调 0.6 m 处,大约 0.875 m³ 的范围内布置了 14 个喷嘴,喷嘴类型为压力旋流喷嘴,喷嘴布置如图 3 所示.通过计算得出此处风速大致为 4 m/s.由于电脑计算能力有限,只建立了 2 个喷嘴喷雾区域冷却模型,CFD 三维建模区域为 600 mm × 500 mm × 250 mm,网格如图 4 所示,网格数为 9 × 10⁶.

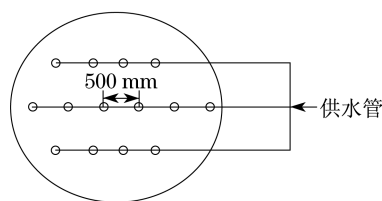


图 3 喷嘴布置图

Fig.3 Nozzle arrangement

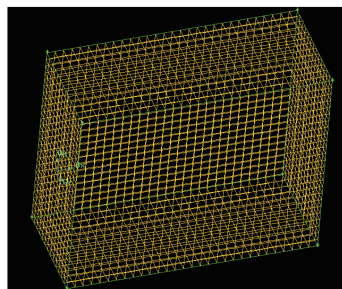


图 4 计算区域模型

Fig.4 Model of calculation area

在计算区域中,模型入口采用速度入口边界,出口采用压力出口边界,四周采用对称边界^[3].入口边

界空气速度为 4 m/s, 入口温度为 313 K, 相对湿度假设为 0.

水雾与空气热湿交换过程采用离散模型模拟, 喷嘴压力为 3 MPa, 雾化角为 70°, 喷水温度为 293 K.

2.3 控制方程

采用标准湍流模型和离散模型分别模拟连续相和离散相. 首先模拟连续相, 然后在连续相中加入离散相, 计算其与连续相的质量和能量交换. 当选用标准湍流模型处理模拟区域内的湍流问题时, 控制空气流动的微分方程包括连续性方程、动量守恒方程、湍流动能方程、湍流动能耗散率方程和能量守恒方程^[4].

连续性方程

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

式中, u_j 为空气速度在 j 方向的速度分量; x_j 为坐标轴 j 方向的位置分量; j 指标可以是坐标轴中的 x, y, z 坐标轴.

动量守恒方程

$$\rho u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_j u'_i}) + \rho g \beta (T - T_{\text{net}}) \quad (2)$$

式中, ρ 为空气密度; p 为压力; μ 为动力黏度; u'_j , u'_i 为 j, i 方向的脉动速度分量; g 为重力加速度; β 为热膨胀系数; T 为环境温度; T_{net} 为参考目标温度.

湍流动能方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_a + G_b - \rho \epsilon \quad (3)$$

式中, k 为湍动能; τ 为时间; σ_k 为经验常数; G_a , G_b 分别为由平均速度梯度和浮力引起的湍动能 k 的产生项; ϵ 为动能耗散率; μ_t 为湍流黏度.

湍流动能耗散率方程

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon^\epsilon}{k} (G_a + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, σ_ϵ 为经验常数.

能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{k}{c_p} + \frac{\mu_t}{\epsilon_r} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

式中, c_p 为比定压热容; ϵ_r 为经验常数.

3 数值模拟的结果与分析

取时间步长为 10^{-5} s 进行模拟计算, 当计算残差达到稳定后保存输出结果.

a. 喷雾冷却区域内的压力为大气压 0.1 MPa, 温度为 313 K, 进口速度为 4 m/s. 取经过 2 个喷嘴的中心截面为温度场输出截面, 喷嘴质量流量为 0.12 L/min, 喷雾半角为 70°, 喷嘴压力为 3 MPa, 温度分布如图 5 所示.

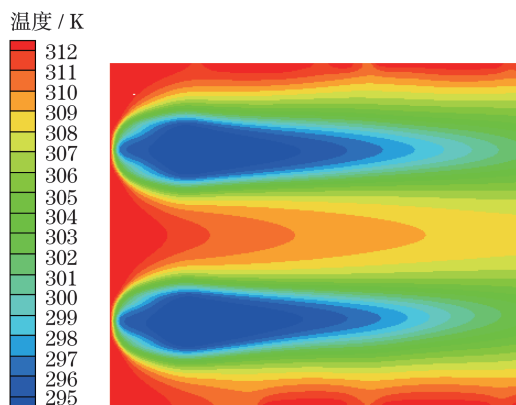


图 5 截面的温度场分布

Fig.5 Temperature distribution on the wind section

从图 5 可以看出, 通过喷雾冷却, 冷凝器迎面区域内受喷嘴喷入的雾化水的影响, 温度降低, 喷雾后区域内温度最低为 295 K, 大大改善了区域的冷却风温过高的情况. 由于进入冷凝器的冷却风温降低, 使其在不改变换热面积的情况下增加了冷凝器的换热量, 从而提高了整个空调机组的制冷系数和工作效率.

从模拟结果可以看出, 对空调外环境进行喷雾冷却的方法, 确实降低了室外环境的温度. 现讨论不同的喷雾量、喷嘴雾化角对降温幅度的影响^[5-7].

b. 不同的喷水量会影响喷雾冷却的效果, 对喷嘴质量流量为 0.192, 0.144, 0.108, 0.072, 0.036 L/min 情况下的冷却效果进行了模拟, 结果如图 6 所示.

喷雾降温过程近似为等焓加湿降温过程, 图表值可以从湿空气的焓湿图中读取. 从图 6 可以看出, 模拟值与图表值基本吻合, 最大误差在 10% 以内. 通过分析可知, 当喷水流量较大时, 喷出的雾滴较大, 在模拟区域内没有蒸发完全, 造成模拟的降温比图表值的低. 当喷水流量较小时, 由于喷嘴喷出液滴在区域内不均匀, 造成液滴集中区域喷雾量过大, 所以, 模拟的降温比图表值的高.

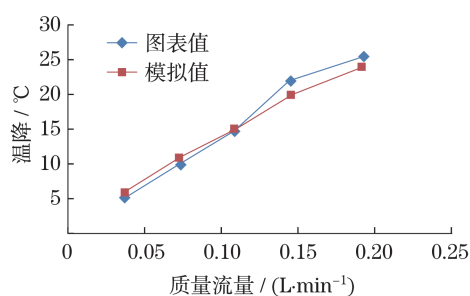
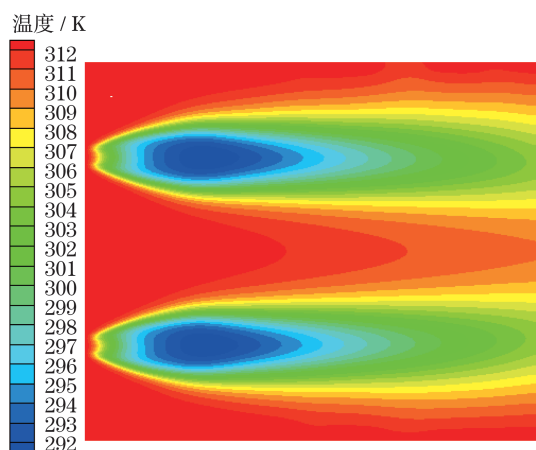


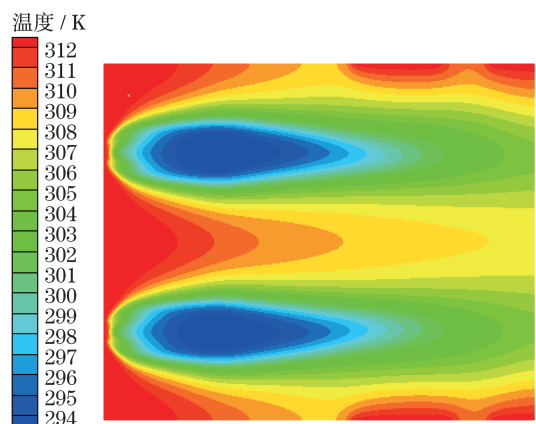
图6 喷雾冷却降温模拟值与图表值比较

Fig.6 Spray cooling simulation result compared with the chart value

c. 喷嘴出口到雾化边界的两条切线之间的夹角为雾化角.雾化角影响雾化降温的区域大小,通过设定喷嘴流量 0.15 L/min 时雾化半角为 20°,60°的模拟来说明,如图 7 所示.



(a) 20°雾化半角



(b) 60°雾化半角

图7 不同雾化角下的温度分布

Fig.7 Temperature distribution under different spray angles

从图 7 可以看出,在相同喷雾量情况下,雾化角越大,雾滴在区域内喷洒得越均匀,降温区域越大.区域内截面温度分布越均匀,有效降温的范围越大,进入冷凝器的空气温度分布均匀,可充分利用冷凝器散热面进行散热,且避免了由于散热部件热应力过大而导致的散热器寿命降低.

4 结 论

a. 数值模拟结果表明,在直接空冷系统中加装喷嘴,通过水的喷雾冷却可以使进入冷凝器迎面的风温降低.

b. 模拟结果与理论结果大致相符,再次证明了喷雾冷却对冷凝器起到了增强换热的作用.

c. 喷水量不同会影响喷雾冷却的效果.在实际运用喷雾减温法时,可以通过喷入水量的多少来控制进入冷凝器的空气温度.

d. 喷雾雾化角会影响喷雾区域的降温情况.在相同喷水量情况下,雾化角越大,降温区域越大,降温区域内各点温差越小.

e. 随着温室效应的影响,夏季室外温度越来越高.对冷凝器迎面外环境区域进行喷雾降温的方法可以改善空调运行工况,提高空调机组的工作效率和经济性.

参考文献:

- [1] 王松岭,赵文升,宋立琴,等.直接空冷机组喷雾增湿系统的研究[J].动力工程,2008,28(5):722-726.
- [2] 李永欣,李保明,李真,等.Venlo 型温室夏季自然通风降温的 CFD 数值模拟[J].中国农业大学学报,2004,9(6):44-48.
- [3] 吴飞青.温室冬季热环境数值分析与实验研究[D].杭州:浙江工业大学,2010.
- [4] 王松岭.流体力学[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [5] 刘乃玲,张旭.压力式细雾喷嘴雾化特性的研究[J].同济大学学报,2005,33(12):1677-1679.
- [6] 赵旭,余敏,龙时丹,等.内燃机车喷雾冷却的模拟研究[J].上海理工大学学报,2013,35(5):475-478.
- [7] 吴开奇,袁益超,黄燕,等.弹簧喷嘴雾化性能试验研究[J].上海理工大学学报,2014,36(3):255-259.

(编辑:石 瑛)