

文章编号: 1673-9469 (2017) 03-0069-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.03.015

基于“火积”的喷淋室内气-水热湿交换性能分析

陈冬, 鲍玲玲

(河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 为研究空气饱和程度对换热效果的影响, 采用数值模拟方法, 计算气体沿等温线、等焓线、等含湿量线向饱和线靠近的过程中全热交换量、“火积”耗散、“火积”耗散热阻、全热交换效率的变化情况。研究发现: 气体沿着这三条线逐渐向饱和线靠近时其“火积”耗散热阻始终在减小, 全热交换效率在增大。

关键词: “火积”; 全热交换效率; 等温线; 等焓线; 等含湿量线

中图分类号: TK124

文献标志码: A

The performance analysis of spray chamber air- water heat exchange based on the entransy

CHEN Dong, BAO Lingling

(College of Energy and environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056038, China)

Abstract: In order to investigate the influences of air saturability on the heat transfer effect, this paper uses the numerical simulation method to calculate the effect on total heat exchange, entransy dissipation, entransy dissipation thermal resistance and heat exchange efficiency when air changes delay isotherm, isenthalpic and isobume near the saturation line. It is found that when the gas changes along the three lines approach to the saturation line, the thermal dissipation of the entransy dissipation always decreases, and the total heat exchange efficiency increases.

Key words: entransy; total heat exchange efficiency; isotherm; isenthalpic; isobume

由于熵是不适合不可逆性传热问题的分析, 需要一个新的物理量“火积”来测量与热工转化无关的传热过程的不可逆性^[1-2]。为了分析和优化不涉及热功转换的传热过程, 过增元等^[3]证明了“火积”耗散优化原理与热功转换无关, 即当“火积”耗散达到极值时传热性能最优。并成功应用于优化热传导^[4]、热对流^[5]、耦合传热传质^[6-7]。陈群^[8-9]建立了用于分析传热或传质过程和优化蒸发冷却过程的“火积”理论, 建立了空气与水直接接触式“火积”耗散方程。江亿等^[10]提出对于传递过程, 只要存在显热传递温差或传质含湿量差, 即存在显热“火积”损失或湿“火积”损失, 且传递“火积”损失永远为正, 总“火积”损失是过程微元传递“火积”损失的总和。本文将采用 FLUENT 模拟的方法, 分别

沿等温线、等焓线、等含湿量线改变空气入口相对湿度条件下, 研究上喷式喷淋室内气水热湿传递过程中全热交换量、“火积”耗散损失、“火积”耗散热阻和全热交换效率的变化规律。从而为蒸发冷却、余热回收、空气净化等各种系统的气-水的传热传质性质分析提供指导。

1 模型的建立

1.1 数值计算方法

喷淋水情况下的模拟研究采用的是离散相 (Discrete Phase Model) 模型, 该模型采用欧拉-拉格朗日方法, 即将气流视为连续相, 将水滴轨迹视为分散在连续相中的离散相。先用欧拉法求解连续相

收稿日期: 2017-05-04

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51408182)

作者简介: 陈冬 (1991-), 男, 山西晋中人, 硕士, 从事热质传递方面研究。

流场,再用拉格朗日法求解离散相^[11]。由于不能忽略离散相的水滴对连续相的湿空气场的影响,故选用离散相与连续相的耦合(Two-Way Coupling),通过耦合可以计算出水滴在其运行轨迹中失去或得到的热量、质量、动量对连续相相应方程的计算结果造成的影响^[12]。

1.2 物理模型

该模型来源于河北工程大学能源与环境工程学院通风实验室喷淋热湿交换实验台,如图1所示。换热器进风口尺寸0.4 m×0.4 m,出风口尺寸为0.4 m×0.4 m,高4 m。出口下方0.3 m处有挡水板,挡水板下方1.7 m截面处设喷嘴。

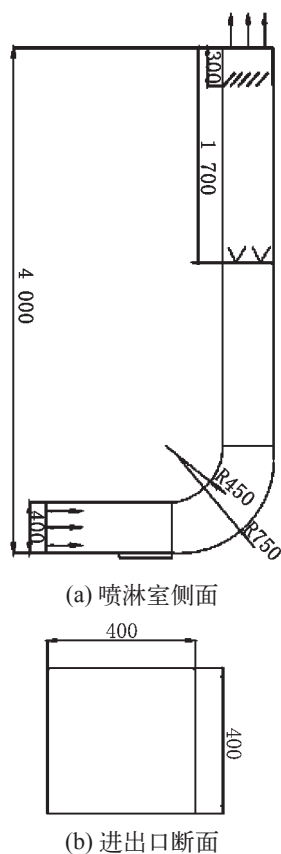


图1 喷淋室结构图(单位:mm)
Fig.1 Spray chamber structure

2 热湿传热传质过程“火积”分析模型

2.1 热湿传递单元“火积”分析模型

陈群等根据质量传递与热量传递之间的类比性,提出了质量“火积”的概念,质量“火积”用于描述混合物中某一组分向周围介质扩散的能力。之后通过对蒸发冷却器内空气-水传热传质现象物理机

制的研究,又提出了表征湿空气吸热能力的物理参数——湿空气“火积”,湿空气“火积”等于湿空气热量“火积”与湿度“火积”之和^[9],当以环境温度下的饱和空气为状态参考点(p_0, t_0, d_0)时,湿空气“火积”表示为

$$J_a = J_{ah} + J_{aw} = \frac{1}{2} G c_{p,a} (T_a - T_0)^2 + \frac{1}{2} \gamma G (T_{dh} - T_0)(d - d_0) \quad (1)$$

式中: J_a —湿空气的“火积”; G —空气流量, kg/s; $c_{p,a}$ —空气的定压比热, kJ/(kg·K); T_a —空气温度, K; γ —汽化潜热, kJ/kg; T_{dh} —空气的露点温度, K; d —空气含湿量, g/kg。

当以环境温度下的饱和空气为状态参考点(p_0, t_0, d_0)时,水只具有热量“火积”:

$$J_w = \frac{1}{2} W c_{p,w} (T_w - T_0)^2 \quad (2)$$

式中: W —水的流量, kg/s; $c_{p,w}$ —水的定压比热, kJ/(kg·K); T_w —水滴温度, K。

对于喷淋室内热湿交换单元内空气-水热湿交换过程总的“火积”耗散等于流入单元的湿空气及水的“火积”与流出单元的湿空气及水的“火积”之差,即

$$\Delta J_{des} = (J_{a,in} - J_{a,out}) + (J_{w,in} - J_{w,out}) \quad (3)$$

$$Q_t = G(i_2 - i_1) \quad (4)$$

式中: Q_t —全热交换量, kW; i_1, i_2 —空气进出口焓值, kJ/kg。

则热湿交换单元的湿“火积”耗散热阻定义为热湿交换过程总的“火积”耗散与全热交换量平方的比值,即

$$R_h = \frac{\Delta J_{des}}{Q_t^2} \quad (5)$$

式中: R_h —“火积”耗散热阻, K/kW。

2.2 全热交换效率

全热交换效率同时考虑了空气和水的状态变化,反映了空气和水热湿交换的完善程度。

$$\eta_1 = 1 - \frac{t_{s2} - t_{w2}}{t_{s1} - t_{w1}} \quad (6)$$

式中: t_{s1}, t_{s2} —空气初、终态的湿球温度, °C; t_{w1}, t_{w2} —水气初、终温度, °C。

通过计算,取 $y=3.6$ m 断面上面平均温度、水蒸气质量分数为空气的出口温度、出口水蒸气质量分数,然后通过查焓湿图得出进出口焓差得到全热

交换量从而得出水滴的最终温度。通过查焓湿图还可以得到空气的含湿量、露点温度、湿球温度等参数，从而对热交换过程的“火积”耗散、“火积”耗散热阻、全热交换效率进行计算。

3 计算结果分析

3.1 计算参数选择

气水初参数设定如下：

水滴初始温度 $T_w=310.15\text{ K}$ ，水滴直径 $D=1.8\text{ mm}$ ，喷头高度为 $H=2.3\text{ m}$ ，水滴初速度 $v_w=6\text{ m/s}$ ，水气比 $\beta=1$ 。

空气初始温度 $T_a=298.15\text{ K}$ ，含湿量 $d=5.959\text{ g/kg}$ ，空气进口速度 $v_a=5\text{ m/s}$ ，分别沿等温线、等焓线、等含湿量线从相对湿度 $\varphi=30\%$ 到 $\varphi=90\%$ 变化。

3.2 结果分析

3.2.1 沿等温线

当空气初参数沿等温线变化时，气水热湿交换过程的全热交换量、“火积”耗散、“火积”耗散热阻、全热交换效率变化情况如图2所示：

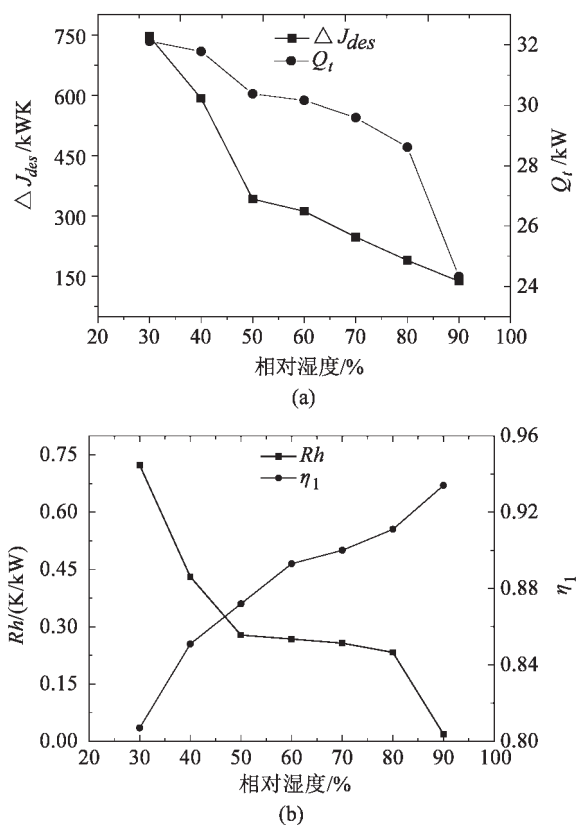


图2 空气初始状态沿等温线变化
Fig.2 Air initial state changes along the isothermal

通过模拟计算发现，随着空气初状态沿等温线 ($T=298.15\text{ K}$) 接近饱和线，其全热交换量不断减少，当相对湿度 $\varphi=90\%$ 时，全热交换量最小为 24 kW ；当相对湿度 $\varphi=30\%$ 时，全热交换量为 32 kW ，达到最大值。随着进口空气相对湿度的增大，“火积”耗散不断降低，当相对湿度 $\varphi=90\%$ 时，“火积”耗散最小为 $138\text{ kW}\cdot\text{K}$ ；当相对湿度 $\varphi=30\%$ 时，“火积”耗散最大为 $746\text{ kW}\cdot\text{K}$ 。随着进口空气相对湿度的增大，“火积”耗散热阻逐渐降低，相对湿度 $\varphi=90\%$ 时，“火积”耗散热阻最小为 0.02 K/kW ；相对湿度 30% 时，“火积”耗散热阻最大为 0.72 K/kW 。随着进口空气相对湿度的增大，全热交换效率逐渐增大，当相对湿度 $\varphi=30\%$ 时，全热交换效率最小为 0.81 ；当相对湿度 $\varphi=90\%$ 时，全热交换效率最大为 0.93 。

3.2.2 沿等焓线

当空气初参数沿等焓线变化时，气水热湿交换过程的全热交换量、“火积”耗散、“火积”耗散热阻、全热交换效率变化情况如图3所示：

通过计算模拟发现，随着空气初状态沿等焓线 ($i=40.43\text{ kJ/kg}$) 变化接近饱和线时，其全热交换量几乎不变为 32 kW ；随着进口空气相对湿度的增大，“火

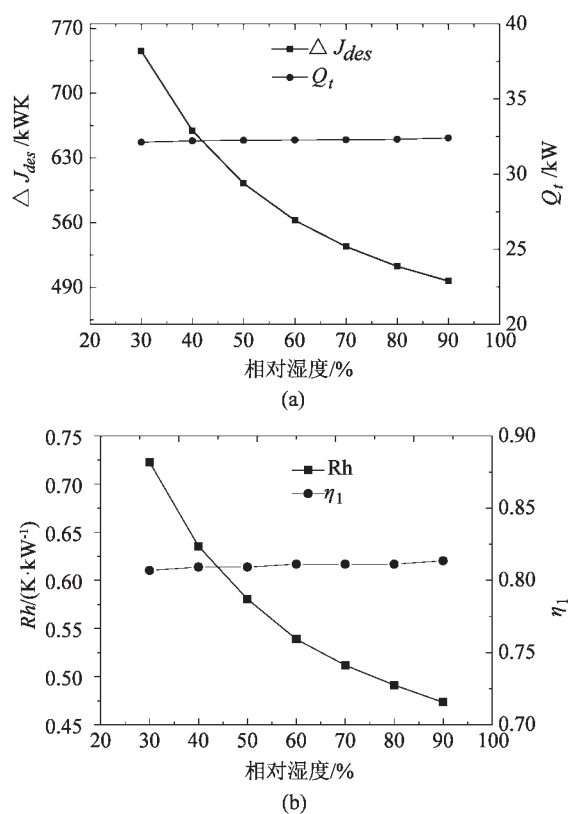


图3 空气初始状态沿等焓线变化
Fig.3 Air initial state changes along the isenthalpic

积”耗散不断降低,当相对湿度 $\varphi=90\%$ 时,“火积”耗散最小为497 kW·K;当相对湿度 $\varphi=30\%$ 时,“火积”耗散最大为746 kW·K。随着进口空气相对湿度的增大,“火积”耗散热阻逐渐降低,相对湿度 $\varphi=90\%$ 时,“火积”耗散热阻最小为0.47 K/kW;相对湿度 $\varphi=30\%$ 时,“火积”耗散热阻最大为0.72 K/kW。随着进口空气相对湿度的增大,全热交换效率几乎不变为0.81。

3.2.3 沿等含湿量线

当空气初参数沿等含湿量线变化时,气水热湿交换过程的全热交换量、“火积”耗散、“火积”耗散热阻、全热交换效率变化情况如图4所示:

通过计算模拟发现,随着空气初状态沿等含湿

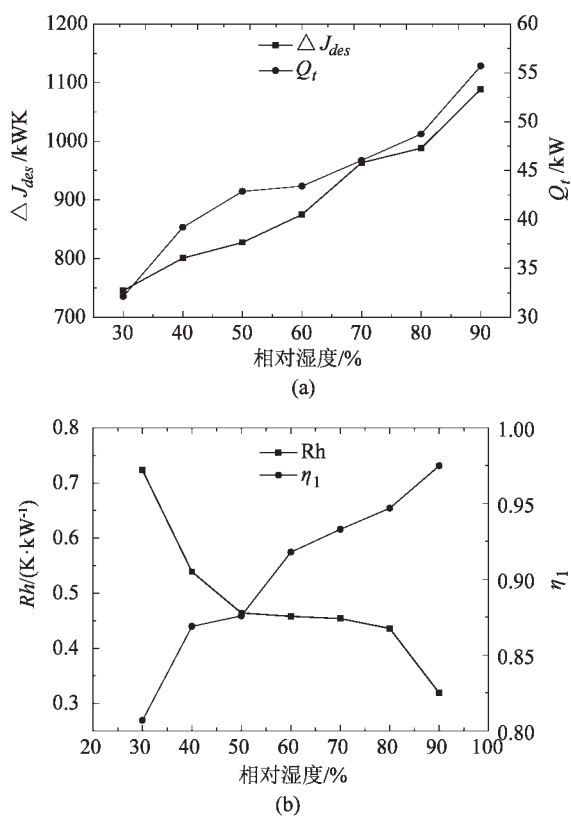


图4 空气初始状态沿等含湿量线变化
Fig.4 Air initial state changes along the isobume

量线($d=5.959$ g/kg)变化接近饱和线时,其全热交换量不断增大,当相对湿度 $\varphi=30\%$ 时,全热交换量最小为32 kW;当相对湿度 $\varphi=90\%$ 时,全热交换量最大为56 kW。随着进口空气相对湿度的增大,“火积”耗散不断增大,当相对湿度 $\varphi=30\%$ 时,“火积”耗散最小为746 kW·K;当相对湿度 $\varphi=90\%$ 时,“火积”耗散最大为1 089 kW·K。随着进口空气相对湿度的增大,“火积”耗散热阻逐渐降低,相对湿度

$\varphi=90\%$ 时,“火积”耗散热阻最小为0.32 K/kW;相对湿度 $\varphi=30\%$ 时,“火积”耗散热阻最大为0.72 K/kW。随着进口空气相对湿度的增大,全热交换效率逐渐增大,当相对湿度 $\varphi=30\%$ 时,全热交换效率最小为0.81;当相对湿度 $\varphi=90\%$ 时,全热交换效率最大为0.98。

4 结论

1) 空气初状态沿等温线接近饱和线时全热交换量不断降低、“火积”耗散不断降低、全热交换效率不断增大、“火积”耗散热阻不断降低。

2) 空气初状态沿等焓线接近饱和线时全热交换量没明显变化、“火积”耗散不断降低、全热交换效率几乎不变、“火积”耗散热阻不断降低。

3) 空气初状态沿等含湿量线接近饱和线时全热交换量不断增加、“火积”耗散不断增加、全热交换效率不断增大、“火积”耗散热阻不断降低。

由以上的热湿交换规律可知,在上喷式喷淋换热器中空气的相对湿度越大,气水全热交换效率越高,“火积”耗散热阻越低,为增大喷淋换热器的换热性能,在喷淋换热之前可对低湿空气进行加湿处理提高空气的含湿量,以提高气水全热交换效率,减小“火积”耗散热阻。

参考文献:

- [1] PRIGOGINE I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes[M]. Third Edition, New York: International science Publishers, A Division of John Wiley and Sons, 1967: 76-77.
- [2] 鲍玲玲, 陈冬, 刘伟. 喷淋方向对喷淋室内气-水热质交换的影响研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2016, 33(2): 73-77.
- [3] 过增元, 梁新刚, 朱宏晔. “火积”——描述物体传递热量能力的物理量[J]. 自然科学进展, 2006, 16(10): 1288-1296.
- [4] GUO Z Y, ZHU H Y, LIANG X G. Entransy—A Physical Quantity Describing Heat Transfer Ability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50 (13-14): 2545-2556.
- [5] CHEN Q, GUO Z Y. Entransy theory and its application to heat transfer analyses in porous media[J]. Nonlinear Sci. Numer. Simul, 2010, 11 (1): 11-22.
- [6] CHEN Q, REN J X, MENG J A. Field synergy equation

- for turbulent heat transfer and its application[J]. Heat Mass Transfer, 2007, 50: 5334-5339.
- [7]YUAN F, CHEN Q. A global optimization method for evaporative cooling systems based on the entransy theory[J]. Energy, 2012, 42: 181-191.
- [8]GUO Z Y, LIU X B, TAO W Q, et al. Effectiveness-thermal resistance method for heat exchanger design and analysis[J]. Heat Mass Transfer, 2010, 53 (13-14): 2811-2884.
- [9]CHEN Q, YANG K D, WANG M, et al. A new approach to analysis and optimization of evaporative cooling system I: theory[J]. Energy, 2010, 35 (6): 2448-2454.
- [10]江 亿, 谢晓云, 刘晓华. 湿空气热湿转换过程的热学原理 [J]. 暖通空调, 2011(3): 51-64.
- [11]余 军. 矿井回风换热器数值模拟与优化 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013: 33-38.
- [12]王景刚, 余 军, 王建学, 等. 矿井回风换热器数值模拟 [J]. 制冷与空调, 2013 (3): 37-40.
-
- (上接第 59 页)
- [3]曾 力, 赵 伟. 高强再生混凝土干缩特性 [J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(4): 125-130.
- [4]张 健, 杜 辉, 张 财, 等. 矿物掺合料和再生骨料对混凝土的收缩性能的影响 [J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(4): 145-149.
- [5]BENTUR A, IGARASHI S I, KOVLER K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11): 1587-1591.
- [6]田志伟. 富含砖粒的再生混凝土试验研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2015.
- [7]KOU S C, POON C S. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (8): 2877-2886.
- [8]GB/T 25177-2010, 混凝土用再生粗骨料 [S].
- [9]钱晓倩, 詹树林, 金南国. 建筑材料 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [10]GB/T50082-2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S].
- [11]GB/T50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准 [S].
- [12]COLLEPARDI M, BORSOI A, COLLEPARDI S. Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(6): 704-708.