

喷淋方向对喷淋室内气-水热质交换的影响研究

鲍玲玲¹,陈冬¹,刘伟²

(1.河北工程大学 城建学院,河北 邯郸 056038;2.河北省科学院能源研究所,河北 石家庄 050081)

摘要:为提高喷淋室的传热传质效率,采用数值模拟方法,开展上喷式、下喷式两种立式喷淋室内水滴运动规律,及气-水热湿传递效果的对比研究。研究发现:在初参数完全相同的情况下,上喷式喷淋室中水滴的停留时间比下喷式多停留4.7 s,上喷式喷淋室中水滴从温排风中吸收的热量较下喷式高3 K,说明向上喷淋比向下喷淋的传热传质效率更高。

关键词:喷淋室;喷淋方向;传热传质;气-水热质;模拟;FLUENT

中图分类号:TK124

文献标识码:A

Research of spray direction's influence on the heat and mass transfer in spray chamber

BAO Lingling¹, CHEN Dong¹, LIU Wei²

(1. College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Hebei Provincial Institute of Energy Resources, Hebei Academy of Sciences, Hebei Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In order to improve the effect of heat and mass transfer, studying the influence laws of heat and mass transfer effect of various factors is of great significance to improve the efficiency of heat and mass transfer of spray chamber. This paper adopted the numerical simulation method, and carried out the contrast research of the water-drop law of motion and effect of air-water heat moisture transmission in vertical spray chamber which have two kinds including the upward-spray type and the downward-spray type. The result shows that not only the water residence time, but also the heat transfer effect the upward-spray type is superior to the downward-spray type.

Key words: spray chamber; spray direction; heat and mass transfer; simulation

温排风中大量的余热资源,对其进行回收与利用,可实现节能减排^[1-2]。目前温排风的热回收装置有间壁式气-水换热器和直接接触式(混合式)换热器两种型式,后者避免了传热间壁及其两侧的污垢热阻,只要流体间的接触良好,就有较大的传热效率。因此,通常允许流体相互混合的场合,都可以采用混合式热交换器^[3]。喷淋室内气-水之间的总热交换是由湿空气和水温下饱和湿空气之间的焓差推动进行的。该总热交换量又包括显热量和潜热量两部分,分别是由气-水之间的温差和水蒸气分压力差引起的^[4]。喷淋室内气-水热湿交换效果受气、水初参数,喷淋室的高度和结构等多种因素的影响^[5-6]。为进一步

研究喷淋方向对气-水热湿交换效果的影响,本文以立式喷淋室内气-水热湿传递过程为研究对象,通过数值模拟方法,对比研究了喷淋方向对喷淋水在喷淋室内停留时间和热湿交换效果。

1 模型建立

利用 FLUENT 软件对向上喷淋和向下喷淋进行模拟研究。

1.1 模型选择^[7]

喷淋水的模拟研究采用的是离散相(Discrete Phase Model)模型,该模型采用的是欧拉-拉格朗日方法,即将气流视为连续相,将水滴轨迹视为分

收稿日期:2016-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408182);河北省自然科学基金资助项目(E2015402139);河北省教育厅科学技术处资助项目(QN2014064) 特约专稿

作者简介:鲍玲玲(1982-),女,河北邯郸人,博士,副教授,从事热质传递方面的研究。

散在连续相中的离散相。先用欧拉法求解连续相流场,再用拉格朗日法求解离散相。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,及其对连续相相应方程的计算结果造成的影响^[8]。

1.2 边界条件设置

假定湿空气为不可压缩气体,流场为稳定流动,热湿交换单元壁面为绝热。无滑移壁面边界类型,湿空气采用速度进口边界,出口边界条件为 Outflow 出口。对于离散相的水滴,当其碰到热湿交换单元壁面时主要有三种情况:水滴与壁面发生弹性或者非弹性碰撞而反射;水滴碰到壁面时发生逃逸,被称为由边界逃逸;水滴被壁面捕获,此时水滴将在此边界处完全蒸发。本文采用水滴由边界逃逸模型,即认为当水滴遇到热湿交换单元壁面时将附着在壁面而“逃逸”,其运动轨迹的计算将被终止^[7]。

1.3 初始条件设定

通常水滴喷射初速度大于气流速度。气流初速度 $v_0 = 5 \text{ m/s}$,气流初始温度 $t_0 = 305 \text{ K}$,相对湿度 $\phi = 90\%$,水滴直径 $D = 1.5 \text{ mm}$,水滴初始温度 $T_0 = 290 \text{ K}$,水滴以初速度 $u_0 = 8 \text{ m/s}$ 垂直向下。

2 物理模型

立式喷淋室的物理模型见图 1 所示,喷淋室

内气流自下而上流动,在喷淋室内与喷淋水进行热湿交换,最后经过顶部设置的挡水板排入大气。喷淋水有两种喷淋方式,其中图 1(a)为上喷式模型,即喷淋水自下以一定的初速度向上喷出,在上述条件下减速至零,然后再以初速度为零向下运动到喷淋室底部;图 1(c)为下喷式模型,根据前期上喷式的模拟结果设定下喷式喷淋高度为 4 m,即喷淋水自上向下喷出,最后落入喷淋室底部。图 1(b)所示为喷淋室断面 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。

3 结果分析

在上述模型基础上,以喷淋水为研究对象,模拟了喷淋室内不同喷淋方向对水滴速度变化、停留时间及温度变化的影响。

3.1 水滴速度变化

水滴受重力、浮力和气流阻力的综合作用,加速度的大小和方向取决于合力的大小和方向,与水滴直径、空气和水的相对速度等参数相关。下喷式主要存在三种情况:(1)若初始情况水滴受到合力的方向向下,则水滴加速向下运动,水滴与空气的相对速度增大,气流阻力增大,水滴受到向下的合力逐渐减小,当合力为零时,水滴加速度为零,水滴向下做匀速运动,直到水滴到达喷淋室底部。(2)若初始情况水滴受到合力为零,则水滴匀速向下运动,直到喷淋室底部。(3)若初始情况水滴受到合力的方向向上,则水滴向下做减速运动,随着水滴速度的减小,气流阻力逐渐减小,水滴所受合力逐渐减小;若合力为零时,水滴速度仍然向

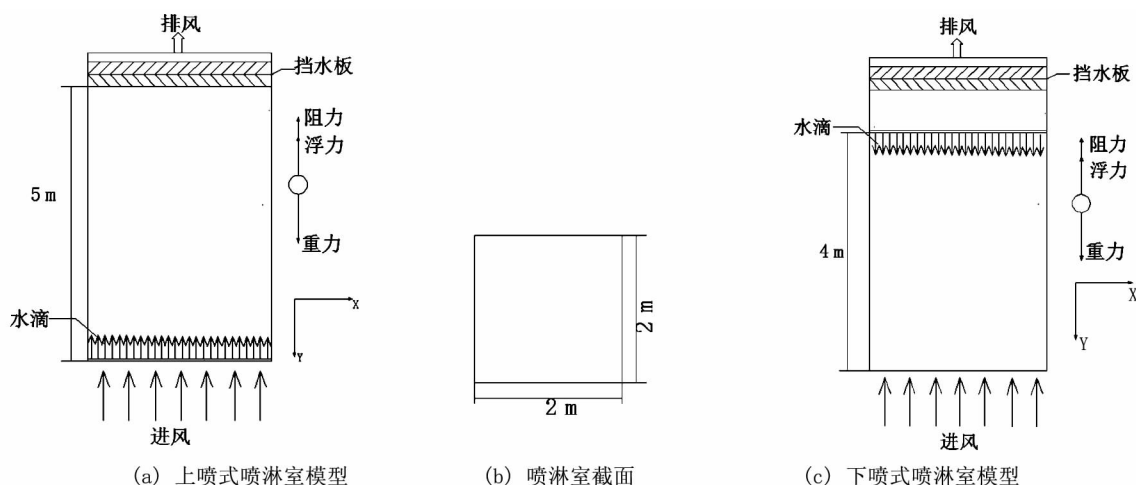


图1 喷淋室物理模型

Fig.1 Physical model of spray chamber

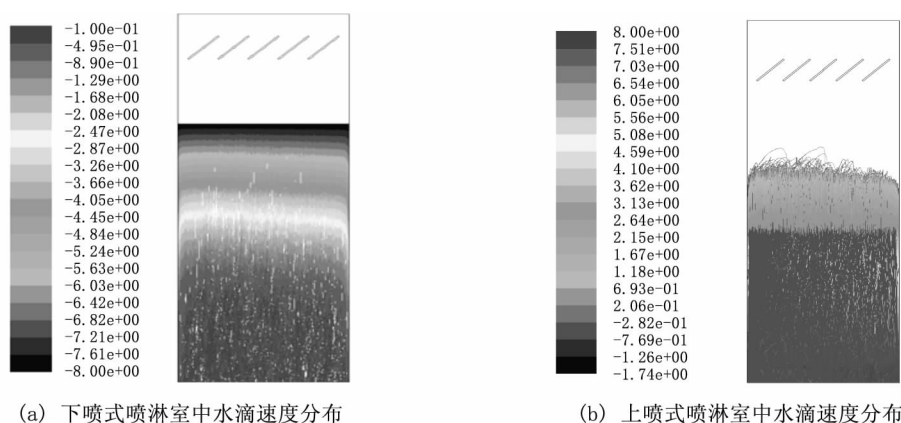


图2 上喷式、下喷淋水滴速度分布对比

Fig.2 The comparison of the water-drop velocity distribution in upward-spray and downward-spray spray chamber

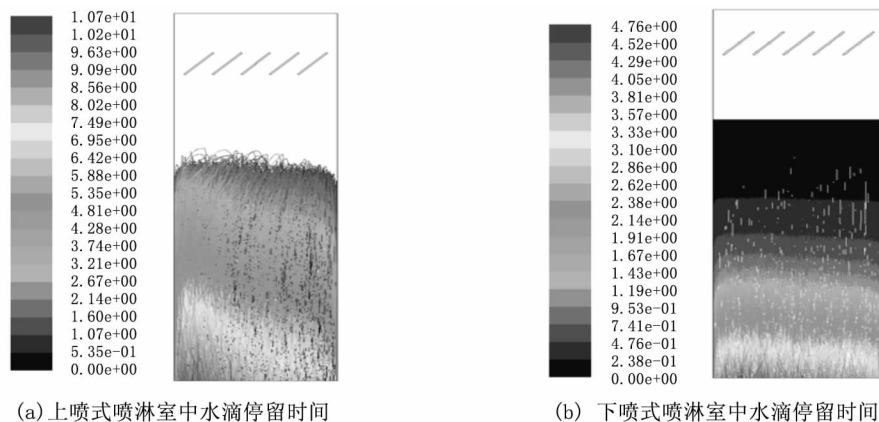


图3 上喷式、下喷淋水滴停留时间对比

Fig.3 The water-drop residence time in upward-spray and downward-spray chamber

下,则水滴继续向下做匀速运动,直到塔底;若速度减小到零时,合力仍然向上,则水滴将会向上运动,则有可能形成漂水损失;若速度和合力同时为零时,则水滴处于悬浮状态。上喷式喷淋室内水滴的受力分析与下喷式类似。上喷式水滴在垂直方向的运动较为复杂,通常情况水滴要经历向上和向下两个运动阶段,其中向上运动阶段的受力分析如图1(a)所示,而向下运动阶段的运动规律可参考上节对下喷式水滴运动规律的分析。

图2(a)为下喷式喷淋室中水滴速度分布云图。其中,左栏颜色代表速度的大小,底部颜色代表水滴的初速度。从图中可以看出,水滴初速度为8 m/s。该喷淋室为下喷式,水滴由上向下运动。水滴在向下运动过程中主要受重力、浮力、气流阻力作用。喷淋室内由上到下水滴颜色不断变化,顶部颜色代表向下运动的速度为0.5 m/s。说明水滴至上而下做减速运动,水滴由初速度为8 m/s减速至终速度为0.5 m/s。

图2(b)为上喷式喷淋室中水滴速度分布云图。其中,顶部颜色代表水滴的初速度(遮挡),从图中可以看出,水滴初速度为8 m/s,该喷淋室为上喷式,水滴喷出后先向上运动减速为零后再向下运动。喷淋室内由下到上再到下水滴颜色发生变化,底部颜色代表向下运动的速度为1.26 m/s。说明水滴先向上由初速度为8 m/s减速至终速度为0 m/s。再向下运动,由静止加速至终速度为1.26 m/s。

3.2 水滴停留时间

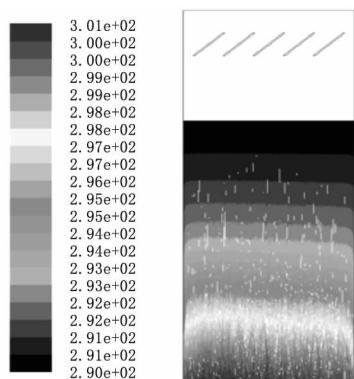
图3(a)为下喷式喷淋室中水滴停留时间云图。其中,左栏颜色代表水滴停留时间的大小,底部颜色代表水滴刚进入喷淋室。从图中可以看出,刚进入喷淋室停留时间为零。该喷淋室为下喷式,水滴向下运动,最终落到底部。越往下,水滴在喷淋室内停留时间越长,则底部水滴停留时间最长。喷淋室内由上到下颜色由深变浅,浅色

代表停留的时间最长为 3.8 s。由此得水滴在喷淋室内的停留时间为 3.8 s。

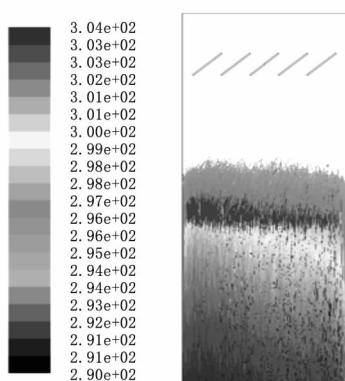
图 3(b) 为上喷式喷淋室中水滴停留时间云图。其中,底部颜色(遮挡)代表水滴刚进入喷淋室。从图中可以看出,刚进入喷淋室停留时间为零。该喷淋室为上喷式,水滴喷出后先向上运动减速为零后再向下运动,最终落到底部,则底部水滴停留时间最长。喷淋室内由开始的深色最终变为浅色,浅色代表停留的时间最长为 8.5 s。由此得水滴在喷淋室内的停留时间为 8.5 s。

由图 3 可得,水滴在上喷式喷淋室内的停留时间比在下喷式喷淋室内多 4.7 s。

3.3 水滴温度变化



(a) 下喷式喷淋室中水滴温度分布



(b) 上喷式喷淋室中水滴温度分布

图4 上喷式、下喷喷淋水滴温度分布对比

Fig.4 The comparison of the water-drop temperature distribution in upward-spray and downward-spray spray chamber

图 4(a) 为下喷式喷淋室中水滴温度分布云图。其中,左栏颜色代表水滴温度的高低,底部颜色代表水滴刚进入喷淋室。从图中可以看出,刚进入喷淋室温度为水滴的初温 290 K。该喷淋室为下喷式,水滴向下运动,最终落到底部,越往下

水滴在喷淋室内停留时间越长,热湿交换时间越长,随之水滴的温度越高。则底部水滴温度最高,顶部颜色代表最高温度为 301 K,得水滴在落到喷淋室底部的最终温度为 301 K。

图 4(b) 为上喷式喷淋室中水滴温度分布云图。其中,底部颜色代表水滴刚进入喷淋室。从图中可以看出,刚进入喷淋室温度为水滴的初温 290 K。该喷淋室为上喷式,水滴喷出后先向上运动减速为零后再向下运动,最终落到底部。水滴在喷淋室内停留时间越长,热湿交换时间越长,随之水滴的温度越高。则底部水滴的温度最高,顶部颜色代表最高温度为 304 K,得水滴在落到喷淋室底部的最终温度 304 K。

由图 4 可得,水滴在上喷式喷淋室内的最终温度比在下喷式喷淋室内的最终温度高 3 K。

4 水滴在喷淋室内停留时间的验证分析

为验证上述 FLUENT 模拟结果的正确性,本节运用 MATLAB 软件对水滴运动规律模型进行计算,分析两种喷射方向对水滴停留时间的影响,从而对本文水滴运动规律模型进行验证分析。

4.1 下喷式水滴停留时间对比验证

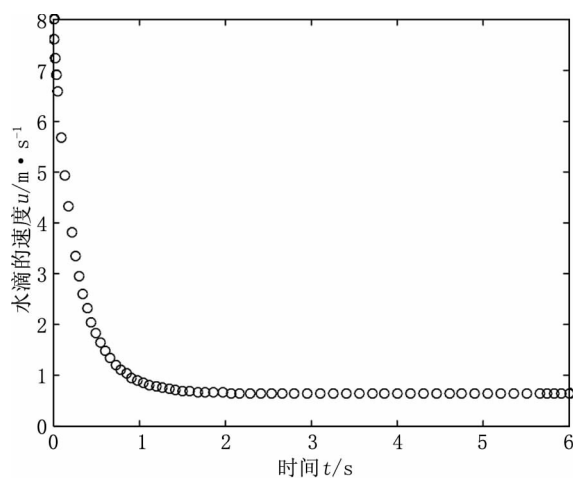


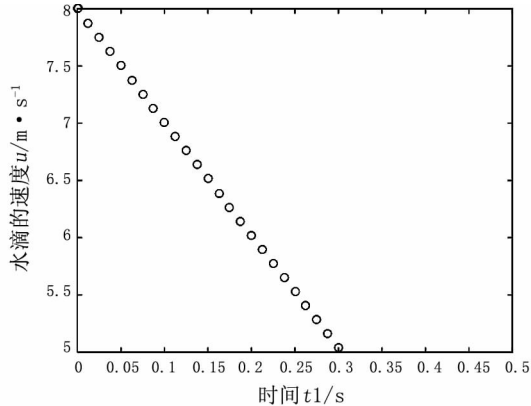
图5 下喷式水滴速度随时间变化图

Fig.5 The picture of water-drop velocity with time in downward-spray spray chamber

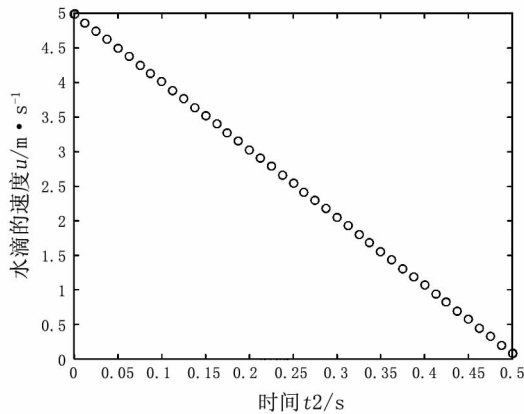
图 5 为下喷式水滴速度随时间变化图。从图中可以看出,水滴在前 1.5 s 内做减速运动,后做匀速运动,匀速运动速度为 0.5 m/s。由图 2(a) 中可得,下喷式喷淋室中水滴向下运动最终速度为 0.5 m/s,两者计算的最终速度大小相吻合。下喷式喷淋室中水滴向下运动的总时间为 3.5 s。由图 3(a) 中可得,下喷式喷淋室中水滴在喷淋室

内的停留时间为 3.8 s。得两种方法计算的停留时间相差 0.3 s, 近乎一致。

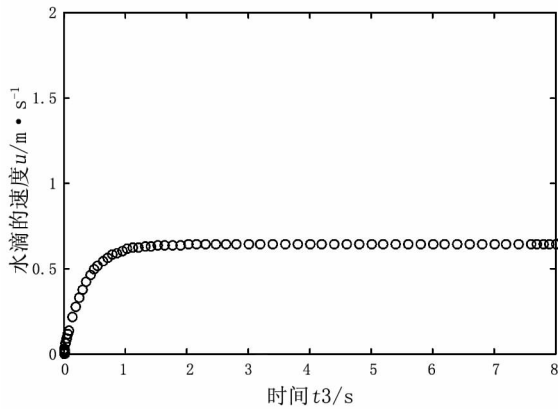
4.2 上喷式水滴停留时间对比验证



(a) 上喷式水滴由 8 m/s 减到 5 m/s



(b) 上喷式水滴由 5 m/s 减到 0



(c) 上喷式水滴由 0 向下

图6 上喷式水滴速度随时间变化图

Fig.6 The picture of water-drop velocity with time in upward-spray spray chamber

图 6(a) 为上喷式水滴向上由初速度 8 m/s 减到 5 m/s 的速度随时间变化图。从图中可以看

出, 水滴在向下运动需经历 0.3 s。图 6(b) 为上喷式水滴向上由 5 m/s 减到 0 m/s 的速度随时间变化图。从图中可以看出, 需经历 0.5 s。图 6(c) 为上喷式水滴由静止向下的速度随时间变化图。从图中可以看出水滴在前 1.5 s 内做加速运动, 后几乎做匀速运动, 匀速运动时间约为 5 s。总的运动时间为 7.3 s。由图 3(b) 中可得, 上喷式喷淋室中水滴在喷淋室内的停留时间 8.5 s。得两种方法计算的停留时间相差 1.2 s, 近乎一致。

用 MATLAB 软件计算的水滴在上喷式喷淋室内的停留时间比在下喷式喷淋室内多 3.8 s, 而用 FLUENT 软件计算前者比后者多 4.7 s, 两种方法得到的水结果近乎一致。由此可得, 本文用 FLUENT 软件进行数值模拟计算的结果合理可行。

5 结论

在初参数完全相同的情况下, 上喷式喷淋室中水滴的停留时间比下喷式多停留 4.7 s, 由于在上喷式喷淋室中水滴停留的时间更长一些, 在上喷式喷淋室中水滴从温排风中吸收的热量多一些, 水滴最终温度相对较高为 304 K, 较下喷式高 3 K, 说明向上喷淋比向下喷淋的传热传质效率更高。

参考文献:

- [1] 段泽敏, 马素霞, 郭千中. 矿井余热资源利用技术[J]. 煤矿安全, 2014(9): 68-71.
- [2] 苗世昌. 除尘器区低温省煤器烟道数值模拟[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(2): 65-68.
- [3] 连之伟. 热质交换原理与设备[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 强天伟, 沈恒根. 直接蒸发冷却空调工作原理及不循环水喷淋填料分析[J]. 制冷与空调, 2005(2): 62-65.
- [5] 周华慧. 矿井回风余热回收换热装置的换热性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [6] 鲍玲玲. 矿井回风热能回收热湿传递研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [7] 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.
- [8] 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.

(责任编辑 王利君)