

# 管内湍流传热传质耦合对过饱和度的影响

代安稳,张军,叶晓辉,闫荔

(东南大学能源与环境学院,江苏南京210096)

**摘要:**为了探究湍流情况下水汽相变传热传质耦合对管道内过饱和度的影响,使用Fluent用户自定义标量(UDS)对传热传质耦合模型进行计算,研究了在不同径向位置、空气温度、壁面温度、空气流速及湿度等因素下耦合项对管道中过饱和度分布的影响。结果表明:沿径向不同位置处,耦合项对过饱和度的影响有所不同;随着温差的增大,耦合项对过饱和度的影响也会增大,当温差增大到一定程度时,耦合项的影响不可忽略;在不同的进口空气流速及湿度下,耦合项对过饱和度的影响基本相同,温差的大小直接决定了耦合项对过饱和环境的影响。

**关键词:**水汽相变;传热传质耦合;湍流;Fluent

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.12.013

[引用本文格式]代安稳,张军,叶晓辉,等.管内湍流传热传质耦合对过饱和度的影响[J].热能动力工程,2021,36(12):81-87. DAI An-wen, ZHANG Jun, YE Xiao-hui, et al. The influence of coupled heat and mass transfer on supersaturation in turbulent tube flow [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12): 81-87.

## The Influence of Coupled Heat and Mass Transfer on Supersaturation in Turbulent Tube Flow

DAI An-wen, ZHANG Jun, YE Xiao-hui, LYU Li

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096)

**Abstract:** In order to explore the influence of water vapor phase change heat and mass transfer coupling on the supersaturation in the pipeline under turbulent conditions, Fluent user-defined scalar (UDS) was used to calculate the heat and mass transfer coupling model, and the influence of the coupling term on the supersaturation distribution in the pipeline under some factors including different radial positions, air temperatures, wall surface temperatures, air velocities and humidity was studied. The results show that the influence of coupling term on supersaturation is different along different radial positions; With the increase of temperature difference, the influence of coupling term on supersaturation also increases; When the temperature difference increases to a certain extent, the influence of coupling term can't be ignored; The influence of coupling term on supersaturation is basically the same under different inlet air velocities and humidity. The temperature difference directly determines the influence of the coupling term on the supersaturated environment.

**Key words:** water vapor phase change, coupled heat and mass transfer, turbulence, Fluent

收稿日期:2021-01-20; 修订日期:2021-02-08

基金项目:国家自然科学基金(51876038)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51876038)

作者简介:代安稳(1994-),男,安徽亳州人,东南大学硕士研究生.

通讯作者:张军(1963-),男,湖北黄石人,东南大学教授.

## 引 言

细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 由于其粒径小,难以被传统的除尘设备有效脱除。解决该问题的思路之一是通过物理或化学等预处理方法,使细颗粒物在进入除尘设备之前变成粒径较大的颗粒<sup>[1]</sup>。目前,国内外研发的预处理技术主要有声团聚、电聚并、水汽相变、磁团聚等<sup>[2-5]</sup>。其中水汽相变技术由于过程简单、效果明显,具有较大的应用前景<sup>[6]</sup>。

水汽相变技术是利用水汽在细颗粒物上的异相凝结来促使颗粒物长大,其中过饱和度是决定异相凝结发生的决定性条件之一,因此充分了解相变室(细颗粒长大场所)中水汽过饱和度及其分布特征十分重要。但由于水汽在过饱和状态下性质的不稳定性,对过饱和度的确定目前仍没有很好的测量手段,主要依靠的是数值求解的方法。

目前,数值求解中基本上采用的是 Clement<sup>[7]</sup> 构建的数学模型。该模型考虑了水蒸气-空气之间的传热传质及其与气溶胶粒径分布的耦合,较为复杂,无法直接进行求解。不少学者采用简化模型对层流下相变室中的过饱和度进行了计算<sup>[8-13]</sup>,结果表明,在一些情况下耦合项对过饱和度的影响不能忽略<sup>[11-13]</sup>。

在实际过程中相变室内气体的流动可能会处于湍流状态,为此本文针对湍流下耦合项对过饱和度求解结果的影响进行了分析,以期为该模型在湍流条件下的应用奠定基础。

## 1 数值计算

### 1.1 物理模型与网格划分

采用典型的高温热水与低温空气接触的方式构建过水汽相变过饱和环境,相变室中采用管状结构(如图 1 所示),其半径  $R = 0.15 \text{ m}$ ,长度  $L = 10 \text{ m}$ 。为了便于使用 Fluent UDS 功能进行求解,模型建立在三维直角坐标系下。

基于 ICEM-CFD 软件对三维模型进行结构网格划分,并采用 O 型划分方式,如图 2 所示。为获得准确的壁面处温度  $T_w$  和水蒸气质量分数分布,对边界层处进行网格加密,壁面处网格尺寸  $0.2 \text{ mm}$ ,计

算域总网格数为 293 000 个。

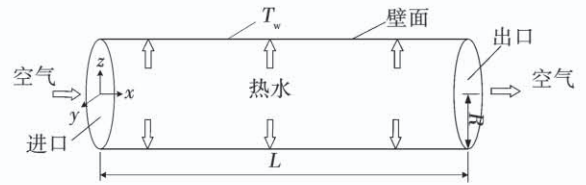
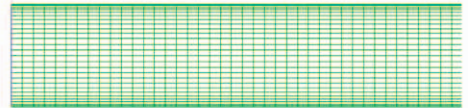
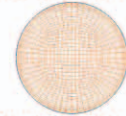


图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical model



(a) 网格划分部分主视图



(b) 网格划分左视图

图 2 物理模型的网格划分

Fig. 2 Mesh division of physical model

### 1.2 数学模型

基于 Clement<sup>[7]</sup> 构建的数学模型,作如下假设:传热及传质达到稳态;不发生均相凝结;不考虑水蒸气对混合气体物性的影响<sup>[12]</sup>;相变室中进口气流的温度和水蒸气分压分布均匀;不考虑空气中细颗粒物的影响。由此可得到传热传质耦合方程如下:

能量方程:

$$\rho c_{p,g} v \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = (c_{p,o} - c_{p,g}) D \rho \nabla c \cdot \nabla T \quad (1)$$

传质方程:

$$\rho v \cdot \nabla c + \nabla \cdot (-D \rho \nabla c) = 0 \quad (2)$$

传热传质耦合项:

$$\text{Cou} = (c_{p,o} - c_{p,g}) D \rho \nabla c \cdot \nabla T \quad (3)$$

式中: $\rho$ —空气密度; $c_p$ —比定压热容; $v$ —空气流速; $T$ —绝对温度; $\lambda$ —空气导热系数; $D$ —水蒸气在空气中的质量扩散系数; $c$ —水蒸气质量分数; $\nabla$ —梯度;下标 o 和 g 分别表示水蒸气和空气。

过饱和度  $S$  定义为水蒸气分压力  $p_o$  和水蒸气在气体绝对温度  $T$  下的饱和压力  $p_i$  的比值<sup>[14]</sup>,即:

$$S = \frac{p_o}{p_i} \quad (4)$$



1.3 Fluent 二次开发模块

Fluent 用户自定义标量(UDS)模块能够利用有限体积法对标量输运方程进行求解,其标准形式为:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i \phi - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi \quad (5)$$

式中: $t$ —时间; $x_i$ —各方向的坐标; $u_i$ —各方向速度;

$\phi$ —待求解的标量; $\Gamma$ —质量扩散率, $\Gamma = \rho D$ 。

方程左端第一项为瞬态项,第二项为对流项,第三项为扩散项,方程右端为源项。将能量方程及传质方程与标准输运方程进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 传热传质方程各项与 UDS 方程各项对应关系

Tab.1 Corresponding relation between the items in the heat and mass transfer equation and that in the UDS equation

名称	瞬态项	对流项	扩散项	源项
标准输运方程	$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$	$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i \phi$	$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)$	$S_\phi$
能量方程	-	$\rho c_{p,g} v \cdot \nabla T$	$\nabla \cdot (-k \nabla T)$	Cou
传质方程	-	$\rho v \cdot \nabla c$	$\nabla \cdot (-D \rho \nabla c)$	无
在 UDS 中对应的	-	DEFINE_UDS_FLUX	DEFINE_DIFFUSIVITY	DEFINE_SOURCE

将耦合项作为源项附加在能量方程上,在 Fluent 默认求解能量方程的基础上,通过 DEFINE\_SOURCE 宏将耦合项加入到能量方程。同时,使用 DEFINE\_UDS\_FLUX 和 DEFINE\_DIFFUSIVITY 分别定义传质方程的对流项和扩散项,从而求解传质方程。使用 DEFINE\_ADJUST 宏及 C\_UDMI 来存储中间变量,计算过饱和度。

1.4 物性参数及边界条件

计算中湍流模型采用标准的  $k-\epsilon$  模型,壁面函数为 Enhanced wall Function,压力速度耦合采用 SIMPLEC,为保证计算精度及计算收敛性,压力、能量及 UDS 迎风格式均采用二阶迎风,能量及 UDS 残差设定为  $10^{-8}$ 。

计算过程中认为除水蒸气在空气中的质量扩散系数  $D$  外,其他物性均为定值,物性参数如表 2 所示。

表 2 材料物性参数

Tab.2 Material property parameters

参数	数值
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1.225
空气比热容 $c_{p,g}/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	1 005
水蒸气比热容 $c_{p,o}/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	1 863
导热系数 $\lambda/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.025 5
动力粘度 $\mu/\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	$1.79 \times 10^{-5}$

水蒸气在空气中的质量扩散系数  $D^{[15]}$ :

$$D(T) = 1.1874 \times 10^{-4} \frac{T^{1.75}}{101325} \quad (6)$$

为了获得微分方程的唯一解,必须对计算区域进行边界条件的设定,各边界条件的类型与物理参数信息如表 3 所示。

表 3 边界条件

Tab.3 Boundary conditions

边界	边界类型	速度 $v/$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	温度 $T/\text{K}$	UDS	
				类型	数值
进口	速度进口	1.0	288	恒值	0.010 89
出口	压力出口	-	288	恒通量	0
壁面	壁面	-	323	恒值	0.112 85

1.5 数值方法验证

首先,流动状态为湍流且使用了 UDS 功能,需要验证湍流情况下 UDS 代码的正确性。其次,需要将 UDS 计算的过饱和场与其他文献进行对比,验证本方法计算过饱和场的正确性。

为了验证使用 UDS 代码的正确性,使用 Fluent 自带求解器计算管道内的温度场,同时使用 UDS 计算温度场,对得到的结果进行对比。图 3 为湍流情况时,使用 UDS 方法和使用 Fluent 内嵌求解器计算出的管道中心处温度分布图,可以看出湍流情况下计算的结果完全一致,说明使用 UDS 的求解方法

正确。

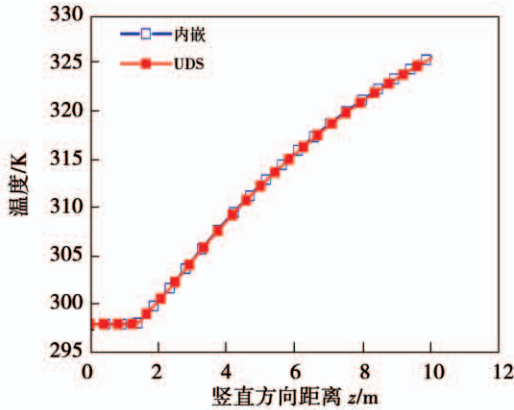


图3 湍流时 Fluent 内嵌方法与 UDS 方法计算温度结果对比

Fig. 3 Comparison of temperature calculation results between Fluent embedded method and UDS method in turbulent flow

为验证使用 UDS 方法计算的过饱和度的正确性,将模型尺寸及边界条件的选取与文献[8]保持一致,计算该工况下的过饱和度,两者结果如图4所示,最大相对误差为 3.67%,符合性良好。图中, $r$  为沿管径方向的距离, $R$  为管道半径, $r/R$  表示沿管径方向的不同位置。 $\mu_0 = \lambda L_x / Q$  为轴向尺度的无量纲量, $Q$  为空气体积流量, $L_x$  为轴向长度。

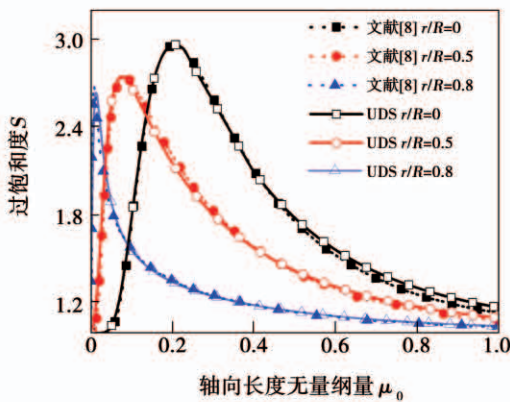


图4 Fluent UDS 与文献[8]计算过饱和度结果对比  
Fig. 4 Comparison of supersaturation calculation results between Fluent UDS and literature[8]

## 2 结果与分析

在固定模型尺寸的情况下研究了沿径向不同位置、不同的空气温度  $T_{in}$ 、不同壁面温度  $T_w$ 、不同空

气流速  $v$  及不同空气湿度  $rh$  情况下传热传质耦合项对管道过饱和度分布的影响。其中相变室长度选定为 10 m,直径为 0.15 m。其他基本参数的基准值设定为:进口空气温度 288 K,空气湿度 100%,壁面水温度 323 K,工作压力 0.1 MPa。

### 2.1 沿径向不同位置耦合项对过饱和度分布影响

图5是沿管径方向不同位置处有耦合项和无耦合项情况下过饱和度的分布。

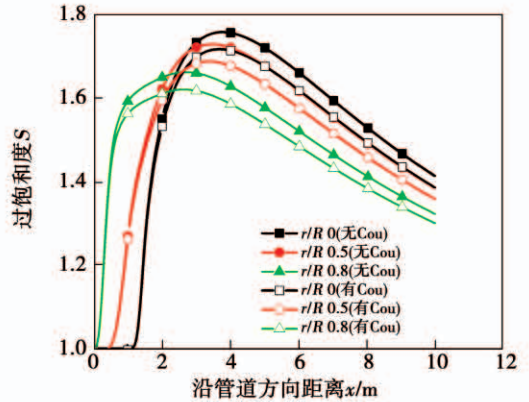


图5 沿径向不同位置有、无耦合项过饱和度的分布  
Fig. 5 Distribution of supersaturation with and without Cou along different radial positions

从图5中可以看出,附加耦合项时的过饱和度总是小于无耦合项时的过饱和度;耦合项对  $r/R = 0, 0.5$  和  $0.8$  沿管径不同位置的过饱和度的影响不同,越靠近管壁,耦合项的影响越提前。对于  $r/R$  为  $0.8$  时,耦合项在管道进口产生影响,而对于  $r/R$  为  $0$  时,管道进口处耦合项几乎没有影响。这是因为耦合项是作为能量源项添加在能量方程中的,由于质量分数分布与温度分布的趋势相同,两者的梯度具有相同的符号(同正或同负),能量源项总是正的,使得空气整体温度水平偏高,饱和水蒸气压力  $p_i$  也随之增加,因此附加耦合项时的过饱和度总是小于无耦合项时的过饱和度。由于质量分数梯度值  $\nabla c$  很小( $10^{-3}$ 数量级),耦合项中起主要作用的是温度梯度,越靠近管壁,如  $r/R = 0.8$ ,温度在很短的时间内就能扩散至此,温度梯度在进口处已经达到较大的值,耦合项对过饱和度的影响在进口处已经较大。而  $r/R = 0$  距离壁面较远,温度短时间内难以扩散到管道中心,耦合项对于  $r/R = 0$  进口处的影响较小。



### 2.2 不同空气温度下耦合项对过饱和度分布影响

图 6 是不同空气温度下有耦合项和无耦合项管道中心处过饱和度分布,从图中可以看出,附加耦合项时的过饱和度总是小于无耦合项时的过饱和度。随着空气温度的减小(即温差  $\Delta T$  增大),耦合项对管道中心处过饱和度的影响越来越大。当空气温度减小到 5 K 即  $\Delta T = 318$  K 时,有耦合项时管道内的平均过饱和度比无耦合项时小 2.89%。由前面的分析可知,耦合项中起主要作用的是温度梯度,当空气温度减小温差增大时,温度梯度亦随之增大,耦合项增大,使得能量方程中附加的能量源项增加,耦合项对管道内温度水平的影响增加,对过饱和度的影响相应的也会增加。因此,随着空气温度的减小,耦合项对管道中心处过饱和度的影响越来越大。当温差增大到一定的水平时,耦合项对过饱和度的影响不能再忽略。另外,当  $T_{in} = 287$  K 时,管道中部分位置过饱和度超过 2.0,可能发生均相凝结。相较于附加耦合项,无耦合项时管道中的过饱和度更大,凝结量更大。因此,无耦合项时均相凝结会使得过饱和度下降更多,更接近附加耦合项时的过饱和水平。当过饱和度过大时,考虑到均相凝结,相对于本文计算结果,耦合项对过饱和度的影响会偏小。

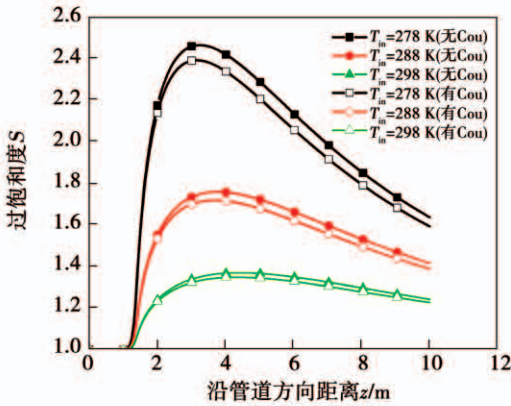


图 6 不同空气温度下有、无耦合项管道中心处过饱和度的分布 ( $T_w = 323$  K)

Fig. 6 Distribution of supersaturation with and without Cou in the center of the pipeline at different air temperatures ( $T_w = 323$  K)

### 2.3 不同壁面温度下耦合项对过饱和度分布影响

图 7 是不同壁面温度下有耦合项和无耦合项情况下管道中心处过饱和度分布。从图中可以看出,附加耦合项时的过饱和度总是小于无耦合项时的过饱和度。随着壁面温度的增大(即温差  $\Delta T$  增大),耦合项对管道中心处过饱和度的影响越来越大。当壁面温度为 333 K,即  $\Delta T = 45$  °C 时,有耦合项时管道内的平均过饱和度比无耦合项时小 4.45%。当  $T_w = 323$  K 时,管道中部分位置过饱和度超过 2.0,可能发生均相凝结。此时,相较于本文计算结果,耦合项对管道中心处过饱和度的影响会偏小。

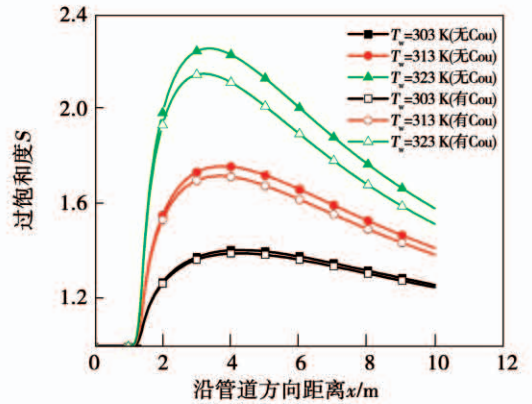


图 7 不同壁面温度下有、无耦合项管道中心处过饱和度的分布 ( $T_{in} = 288$  K)

Fig. 7 Distribution of supersaturation with and without Cou in the center of pipeline at different surface temperatures

为了进一步研究相同温差时耦合项对过饱和度影响,将温差相同时过饱和度的相对误差列于表 4。通过对比可以发现,温差相同时,耦合项对过饱和度的影响不同,当管道内整体的温度水平较高时,耦合项产生的影响更大。如当  $\Delta T = 25$  °C 时,工况 1 ( $T_w = 323$  K,  $T_{in} = 298$  K) 的平均温度明显大于工况 2 ( $T_w = 313$  K,  $T_{in} = 288$  K) 时的平均温度,工况 1 的平均过饱和度相对误差要大于工况 2。这是因为温差相同时,管道内温度梯度值比较接近,但质量分数梯度值有一定的差别。由于水蒸气质量分数与温度呈指数关系,温度较高时,壁面处水蒸气质量分数会更高,产生的质量分数梯度更大。因此,相同温差时,温度水平较高的管道内耦合项较大,对过饱和度产生的影响也就越大。当壁面温度增大到一定值



时,耦合项对过饱和度的影响不再能忽略。经过计算,当  $T_w = 353\text{ K}$ 、 $T_{in} = 288\text{ K}$  时,有耦合项时管道内平均过饱和度比无耦合项时小 9.61%。

表 4 温差相同时过饱和度相对误差结果对比

Tab.4 Comparison of relative error results of supersaturation with the same temperature difference

工况	$T_w/\text{K}$	$T_{in}/\text{K}$	相对误差/%
1	323	298	-1.28
2	313	288	-0.80
3	313	298	-2.05
4	313	298	-2.05
5	313	278	-2.88
6	333	288	-4.45

### 2.4 不同进口空气速度下耦合项对过饱和度分布影响

图 8 是不同进口空气速度下有耦合项和无耦合项管道中心处过饱和度分布。从图可以看出,附加耦合项时的过饱和度总是小于无耦合项时的过饱和度。随着流速的增加,耦合项对过饱和度的影响基本不变,但产生影响的位置随之延后。这是因为当空气进口温度与壁面温度都确定时,管道内的温度梯度及质量分数梯度也基本确定,空气流速对耦合项不会产生影响,因此耦合项对过饱和度的影响基本不变。由于管道直径不变,温度扩散到管道中心处的时间不变,但随着流速的增大,温度扩散到管道中心处的位置沿轴向延后。

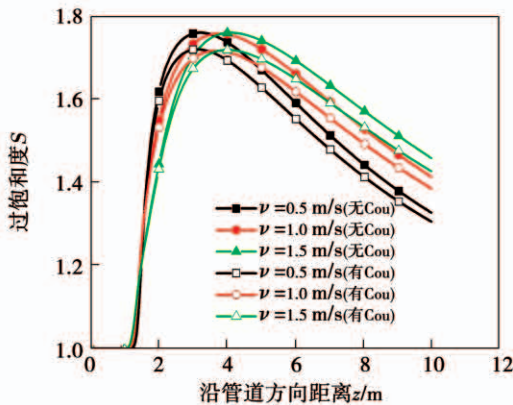


图 8 不同进口空气流速下有、无耦合项管道中心处过饱和度分布

Fig.8 Distribution of supersaturation with and without Cou in the center of pipeline at different inlet air flow rates

### 2.5 不同空气湿度下耦合项对过饱和度分布影响

图 9 是不同进口空气湿度下有耦合项和无耦合项管道中心处过饱和度分布。从图可以看出,附加耦合项时的过饱和度总是小于无耦合项时的过饱和度。耦合项在不同的空气湿度下对过饱和度的影响基本相同。这是因为不同的空气湿度影响的只是空气中水蒸气的质量分数,而并未影响到温度。由于质量分数梯度值很小,而耦合项中起主要作用的是温度梯度,即便进口空气湿度不同,耦合项对过饱和度的影响也基本相同。

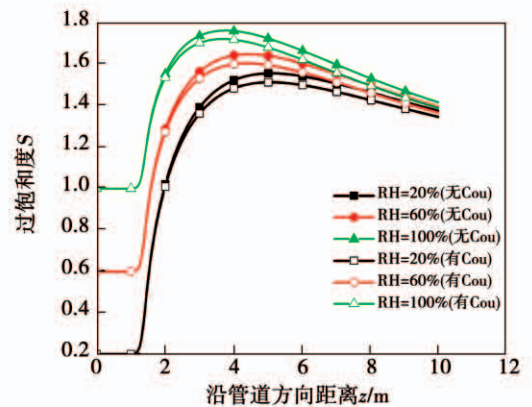


图 9 不同进口空气湿度下有、无耦合项管道中心处过饱和度分布

Fig.9 Distribution of supersaturation with and without Cou in the center of pipeline at different inlet air humidity

## 3 结 论

采用 Fluent UDS 方法数值计算了管内湍流传热传质耦合项对过饱和度的影响,针对不同的工况进行了数值模拟,得出结论:

(1) 沿径向不同位置处耦合项对过饱和度的影响有所不同,越靠近壁面,耦合项对过饱和度的影响越提前;越靠近管道中心,耦合项对过饱和度的影响越延后。

(2) 随着温差的增大,耦合项对过饱和度的影响也会增大,当温差达到一定值时,耦合项的影响不能再忽略。如当空气温度为 288 K,壁面温度达到 353 K 时,相对误差接近 10%,耦合项的影响不可忽略。当温差相同时,耦合项对过饱和度的影响不同,

对于较高的温度水平,耦合项对过饱和度的影响较大。

(3) 不同的空气流速及进口空气相对湿度情况下,耦合项对过饱和度的影响基本相同。耦合项对过饱和度的影响主要由温差决定,因此不必考虑不同的空气流速及空气湿度下,耦合项对过饱和度有不同影响。

### 参考文献:

[1] 徐俊超,张 军,于 燕,等. 细颗粒长大特性的直接测量[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(1):70-75.  
XU Jun-chao,ZHANG Jun,YU Yan,et al. Direct measurement of fine particles growth characteristics[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2016,46(1):70-75.

[2] 袁竹林,凡凤仙,姚 刚,等. 声波对悬浮 PM2.5 作用的数值模拟与实验研究[J]. 燃烧科学与技术,2005,11(4):298-302.  
YUAN Zhu-lin,FAN Feng-xian,YAO Gang,et al. Study of sound wave effect on the PM2.5 suspended in the air by numerical simulation and experiments[J]. Journal of Combustion Science and Technology,2005,11(4):298-302.

[3] 竹 涛,陈 锐,王晓佳,等. 电凝并技术脱除 PM2.5 的研究现状及发展方向[J]. 洁净煤技术,2015,21(2):6-9.  
ZHU Tao,CHEN Rui,WANG Xiao-jia,et al. Research status and development direction of electric agglomeration technology for PM2.5 removal[J]. Clean Coal Technology,2015,21(2):6-9.

[4] XU J,ZHANG J,YU Y,et al. Characteristics of vapor condensation on coal-fired fine particles[J]. Energy & Fuels,2016,30(3):1822-1828.

[5] 何叶青,周寿增,宋 琪,等. Nd-Fe-B 粉末颗粒间的磁团聚现象及有限元模拟计算[J]. 功能材料,2002,33(2):154-162.  
HE Ye-qing,ZHOU Shou-zeng,SONG Qi,et al. Magnetic agglomeration interaction among particles of Nd-Fe-B powders and its finite element calculation[J]. Journal of Functional Materials,2002,33(2):154-156.

[6] FISENKO S P,WANG W N,SHIMADA M,et al. Vapor condensation on nanoparticles in the mixer of a particle size magnifier[J].

International Journal of Heat & Mass Transfer,2007,50(11-12):2333-2338.

[7] CLEMENT C F. Aerosol formation from heat and mass transfer in vapour-gas mixtures [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1985, 398 (1815): 307-339.

[8] HERING S V,STOLZENBURG M R. A method for particle size amplification by water condensation in a laminar,thermally diffusive flow [J]. Aerosol Science & Technology, 2005, 39 (5): 428-436.

[9] 于 燕,徐俊超,张 军,等. 生长管中过饱和度在不同构建方式下的分布特性[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(4):733-738.  
YU Yan,XU Jun-chao,ZHANG Jun,et al. Distribution characteristics of supersaturation from different creating methods in growth tube [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2016,46(4):733-738.

[10] BRIN A A,FISENKO S P. Growth and motion of heterogeneous water droplets in laminar flow diffusion chambers [J]. Colloid Journal of the Russian Academy of Sciences,2007,69(6):679-684.

[11] BARRETT J C,CLEMENT C F. A soluble one-dimensional problem for coupled heat conduction and mass diffusion with aerosol formation in a vapour-gas mixture [J]. Journal of Aerosol Science,1986,17(2):129-143.

[12] FRANCISCO E L,CHRISTOS H,YANNIS D. The effect of coupled heat and mass transfer on the saturation ration in laminar tube flow [J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31 (S1): 930-931.

[13] CHRISTOS H,ELIAS P,YANNIS D. Combined heat and mass transfer in laminar flow diffusion nucleation chambers [J]. Journal of Aerosol Science,2002,33(5):797-816.

[14] MCDONALD J E. Homogeneous nucleation of vapor condensation, Part I: thermodynamic aspects [J]. American Journal of Physics,1962,30(12):225-237.

[15] CUSSLER E L. Diffusion; mass transfer in fluid systems [M]. New York: Cambridge University Press,1997: 63-69.

(刘颖编辑)