

Investigation of the Influence of Nozzle Install Angles to Spray Cooling Effect in Industrial Pipe by Numerical Simulation

Jiachen Chen*, Weiliang Wu

School of Energy and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai
Email: shurtugal@sjtu.edu.cn

Received: Feb. 25th, 2017; accepted: Mar. 14th, 2017; published: Mar. 20th, 2017

Abstract

This paper investigates how different spray nozzle install angle influence the spray cooling effect inside an industrial exhaust pipe by numerical simulation software CFX. DDM (Dispersion Droplet Model) is applied to describe the motion and heat transfer progress of the atomized water droplet; the size and the distribution of the water particles used in calculation are given according to experiments. The particle tracks and the temperature distributions of each spray nozzle install angle with different spray mass flow are discussed basing on the simulation results. In conclusion, when the spray droplets are not completely vaporized and the nozzle install angle is 180°, the spray cooling effect is the most satisfied.

Keywords

Spray Cooling, Atomization, Pipe, Install Angle of the Spray Nozzle, CFD

喷嘴安装角对管道喷雾降温影响的研究

陈嘉琛*, 吴伟亮

上海交通大学能源与动力工程学院, 上海
Email: shurtugal@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2017年2月25日; 录用日期: 2017年3月14日; 发布日期: 2017年3月20日

摘要

为研究在废气管道内部的喷雾降温过程中不同的喷嘴安装角度对管道内高温废气的降温情况的影响, 本*第一作者。

文采用DDM (Dispersion Droplet Model)离散液滴模型描述喷雾液滴的运动和传质传热过程, 使用实验所得的喷雾粒径数据, 在CFX软件上分别对不同喷嘴安装角、不同喷雾流量的管道内部的喷雾降温过程进行了数值模拟, 讨论了喷嘴安装角和流量变化对喷雾液滴的轨迹和管道内的温度分布情况造成的影响。根据模拟计算结果得到结论: 当雾滴不能完全蒸发的情况下, 喷嘴安装角为 180° 时, 管道内高温废气的降温效果最为理想。

关键词

喷雾降温, 雾化, 管道, 喷嘴安装角, CFD

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在化工、冶金等工业生产过程中, 高温废气的产生不可避免, 冷却高温废气的方法有: 水套冷却、表面淋水冷却、汽化冷却、余热回收利用、空气冷却和喷雾冷却等。其中喷雾冷却方法耗能较低、耗水量相对小、降温快速、装置简单, 水作为降温介质, 成本低而且蒸发潜热大, 其相变蒸发吸热能力优秀, 是理想的降温方法。

喷雾降温主要依靠雾滴直接蒸发吸热, 广泛应用于灭火、室外热环境调节、工业降温增湿等领域, 其前景广阔。目前国内外对于喷雾降温的研究方法是实验与数值模拟相结合。

喷雾冷却过程是同时包括流动、传热和相变传质的耦合两相流问题, 建立合理的液滴模型十分重要。文献[1]中最简单的模型称作液滴蒸发经典模型(Classic Model), 即把液滴定义为温度均匀、稳态蒸发状态的球体, 准稳态气膜均匀分布在球体周围, 球体周围的流体物性均匀一致, 液滴表面气液两相遵循热平衡。该模型的缺点在于忽略了对流过程中从液滴表面带走的空气与蒸汽的混合流(Stefan流)。实际上, 液滴蒸发是非稳态过程, 液滴在运动的同时, 其温度和直径都在同步变化, 文献[2]提出了同时考虑 Stefan流和对流传质效应的模型, 即漂移流动模型, 其精准度较优。气体湍流也可能影响液滴的蒸发, 具体机制有待进一步深入讨论。

针对喷雾的两相流动的数值模拟主要有两种方法, 一种是欧拉-欧拉方法(Eulerian-Eulerian), 另一种是欧拉-拉格朗日方法(Eulerian-Lagrangian)。目前最为常用的DDM(Dispersion Droplet Model)离散液滴模型即是一种欧拉-拉格朗日方法, 由Crowe C.T.和Smoot L.D.等人提出[3], 它将流体相视为连续介质, 而分散相视为离散介质。流体相在欧拉坐标系下求解; 分散相则在拉格朗日坐标系下求解。通过对大量质点的运动方程进行积分运算得到其运动轨迹, 通过传热传质关联关系得到离散相对流体相的影响。

对于同一喷射压力下喷射数值模拟, 欧拉-欧拉方法对于喷雾液膜破碎初始状态时的准确度和计算速度优于欧拉-拉格朗日方法; 而对于破碎后呈多点分布状态的喷雾欧拉-拉格朗日方法具有更高的精确度和效率[4]。当研究燃油喷雾燃烧时, 喷雾精确度要求较高, 可以先用欧拉方法算出喷雾初始场, 再将此结果作为初始条件带入拉格朗日方法计算, 可以明显改善计算精度[5], 该ELSA (Euler-Lagrange Spray Atomization) [6]方法更适于内燃机的燃油燃烧计算。

张伟等[7]通过实验研究在石化工业中封闭式循环喷雾冷却系统上, 不同喷雾流量、表面结构、工质种类对喷雾冷却传热性能的影响。刘期晷等[8]使用数值仿真方法研究了喷雾冷却系统在航天器热排散的应

用, 用喷雾冷却的方式强化了壁面换热, 为冷却装置的设计提出了理论指导。王小芝[9]理论分析了雾滴在气流中的受力情况和运动轨迹, 使用 FLUENT 软件模拟计算了隧道内喷雾降温的过程, 比较分析了雾滴的运动轨迹、寿命以及沿隧道截面的蒸发率。陶焱[10]针对喷雾直接蒸发冷却过程, 使用 FLUENT 软件进行了系统的数值模拟, 并搭建实验台对高温环境下喷雾降温效果进行了实验测试。数值模拟在合理运用降温原理, 选用正确的边界条件、合理的网格划分、相符的简化模型, 可以获得令人满意的数值结果, 能够指导实验进展, 亦能有助于认识喷雾机理。

本文针对工业废气管道中采用喷雾降温设备冷却高温废气的需求, 采用数值模拟的方法, 研究工业管道内喷雾降温的过程中不同的喷嘴安装角度、不同喷雾流量对管道内喷雾降温效果的影响。

2. 研究对象

本文研究对象是一段工业废气管道, 其直径 3 m、长 10 m, 为了给管道内部的高温废气降温, 在其中布置了两排喷嘴支架, 每排四根, 呈十字形阵列, 固定在管壁上, 如图 1 所示。第一排支架与管道入口所在面(左侧端面)距离为 1.5 m, 两排支架在沿管道中轴线方向上的距离为 3 m。两排支架之间有 45° 的夹角, 以保证喷嘴喷出的雾滴在管道内分布更加均匀。

支架长为 1.3 m, 其上的喷嘴布置如图 2 所示。

喷嘴的喷口直径为 0.08 m。喷雾喷嘴安装角度 Ψ 为: 喷嘴的中心轴线与高温气体流动的方向之间的夹角。

根据喷嘴安装角为 0°、45°、90°、135°、180° 时的情况, 分别建立模型、划分网格、计算两种喷水量下管道内喷雾降温的过程, 并比较其降温效果。

3. 简化模型

3.1. 物理模型

考虑到模型具有对称性, 为降低计算量, 选取四分之一管道建立计算用的简化模型, 如图 3 所示。

使用 ICEM 软件对模型进行网格划分, 采用四面体网格, 在喷嘴、支架附近和管道壁面边界层处均做网格加密处理。模型的总网格数在 50 万左右。

在本文研究的管道内部喷雾的降温过程, 因为管道尺寸较大且内部气相、液相流速较高, 管道内气相降温过程主要发生在距离喷嘴较远的区域。在水的雾化过程中, 一次雾化发生在喷嘴附近较小的区域中, 该区域内水雾破碎, 形成细小的液滴, 其过程十分复杂, 但并非本文研究的重点, 所以在计算中, 不考虑该过程, 认为液态水在离开喷口时即已完全雾化。计算采用经典液滴蒸发模型和 DDM 离散液滴模型描述喷雾液滴的运动以及换热过程, 并用 k- ϵ 模型描述气相的湍流运动。

3.2. 喷雾参数

本研究中喷嘴的喷雾角均为 70°, 通过在每个喷口上设置射出液滴的径向、轴向速度分量来模拟喷雾角, 雾滴的绝对速度为 45 m/s。喷雾特性数据采用文献[11]研制的喷雾光学测量仪器测得, 图 4 为喷雾实验现场。表 1 为计算所采用的数据。

计算采用 NASA 推荐的水物性参数计算公式如下:

液态水的定压比热:

$$\frac{C_p^0}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (1)$$

液态水的焓计算公式:

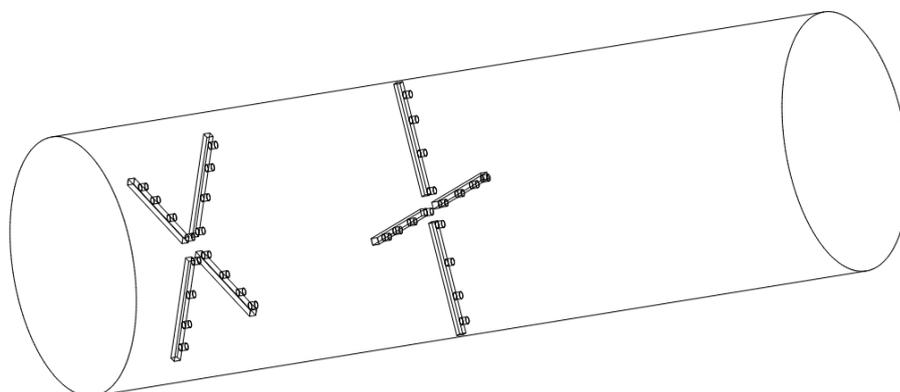


Figure 1. Industrial exhaust pipe
图 1. 工业废气管道

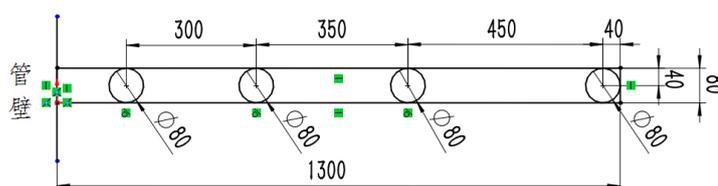


Figure 2. Nozzle positions on the supporting bar
图 2. 支架上的喷嘴位置

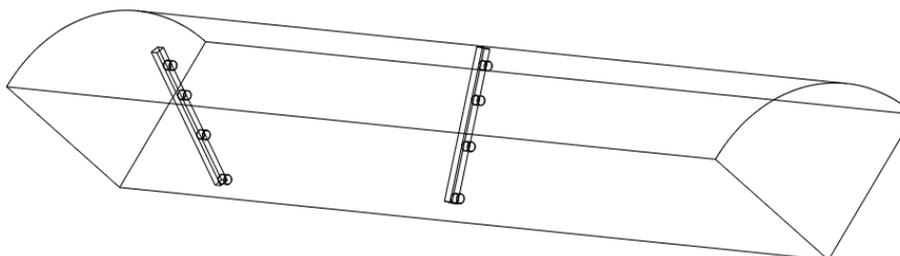


Figure 3. Simplified model
图 3. 计算区域简化模型



Figure 4. Spray experiment
图 4. 喷雾实验

$$\frac{H^0}{R} = a_1 T + \frac{a_2}{2} T^2 + \frac{a_3}{3} T^3 + \frac{a_4}{4} T^4 + \frac{a_5}{5} T^5 + a_6 \quad (2)$$

液态水的熵计算公式:

$$\frac{S^0}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a_7 \quad (3)$$

其中 R 为气体常数, T 为液态水的温度。其他参数: $a_1 = 2.67215$, $a_2 = 0.00305629$, $a_3 = -8.73026e^{-7}$, $a_4 = 1.201e^{-10}$, $a_5 = -6.39162e^{-15}$, $a_6 = -29899.2$, $a_7 = 6.86282$ 。

为考察喷嘴的喷水量对喷雾降温效果的影响, 分别计算单个喷嘴的喷水量为 25 g/s 和 50 g/s 的降温过程。每个喷嘴上选取 2000 个点作为追踪对象, 用以观测结果。

3.3. 边界条件

管道入口位于模型左侧端面, 入口输入的工质为燃气, 平均温度为 600 K, 平均流速为 3 m/s; 管道出口为右侧端面, 相对压力为 0 Pa。管道的外壁和支架壁面都为绝热滑移表面。扇形管道的两侧边界面设为周期性对称。因为管道内气体的流速以及喷雾液滴的运动速度都较快, 且有对称边界面, 所以计算中不考虑重力的影响(图 5)。

4. 结果分析

以喷嘴安装角为变量, 分别计算单个喷嘴喷水量为 25 g/s 和 50 g/s 的两个工况下高温气体的降温结果, 得到了管道内喷雾液滴的运动轨迹和管内温度的分布情况。

当单个喷嘴的喷水量为 25 g/s 时, 五个喷嘴安装角 Ψ 下的雾滴粒子轨迹如图 6 所示, 云图中的变量是液滴轨迹上的气相的温度。

喷嘴喷水量为 25 g/s 时, 管道中的喷雾液接近完全蒸发, 管道出口处的雾滴残留量在 3% 以下。

当单个喷嘴的喷水量提高到 50 g/s 时, 管道内雾滴无法全部蒸发, 管道出口处的雾滴残留量视喷嘴安装角度的不同有一定区别, 该工况下喷雾液滴轨迹如图 7 所示。

为了考察管道内部气体的降温程度, 以反应喷雾冷却的效果, 在管道中按照表 2 所示的位置选取六个横截面作为考察面, 分别提取六个考察面上的平均气相温度作为分析对象。考察面在管道中的位置与面上温度分布情况如图 8 所示。

当单个喷嘴喷水量为 25 g/s 时, 不同喷嘴安装角下六个考察面上的平均温度变化曲线如图 9 所示。

Table 1. Droplet diameter distribution

表 1. 水滴粒径分布

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
粒径(微米)	52	58	64	70	76	82	88	94	100	112	118
质量分布分数	0.0497	0.2564	0.3237	0.1889	0.0922	0.0367	0.0194	0.0107	0.0128	0.0043	0.0052
数量分布分数	0.0932	0.3468	0.3258	0.1453	0.0554	0.0176	0.0075	0.0034	0.0034	0.0008	0.0008

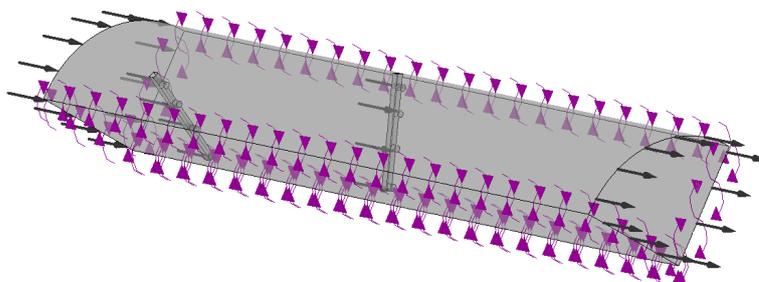
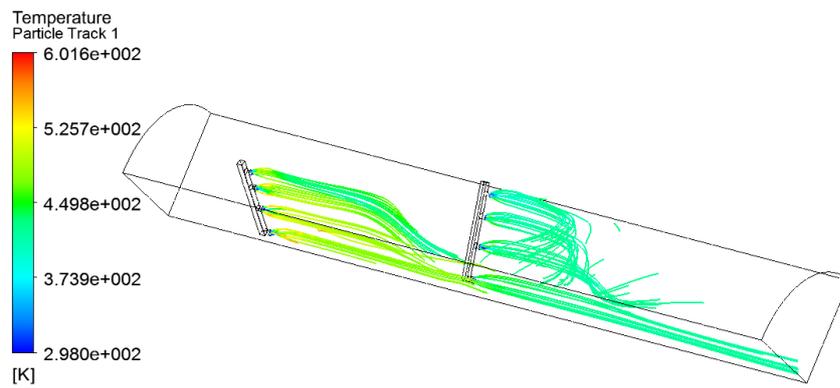
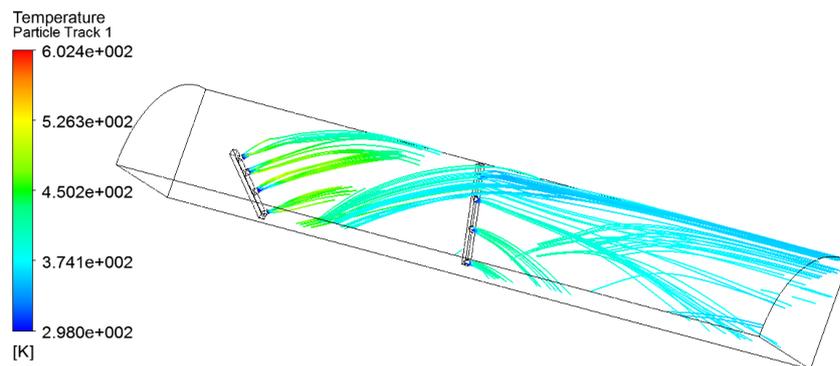


Figure 5. Setting of the boundary conditions

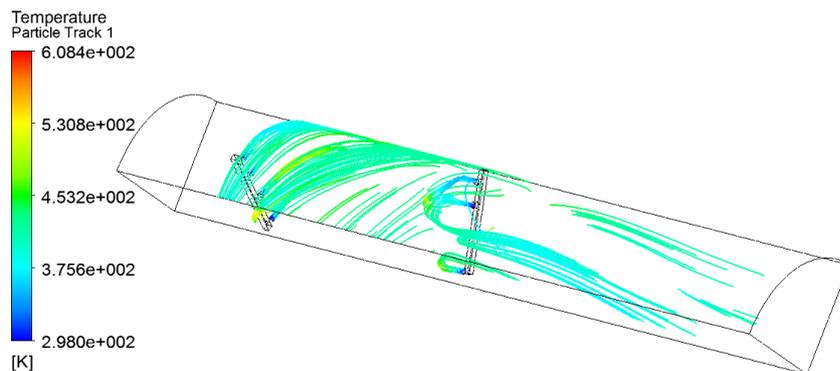
图 5. 流场的边界条件设置



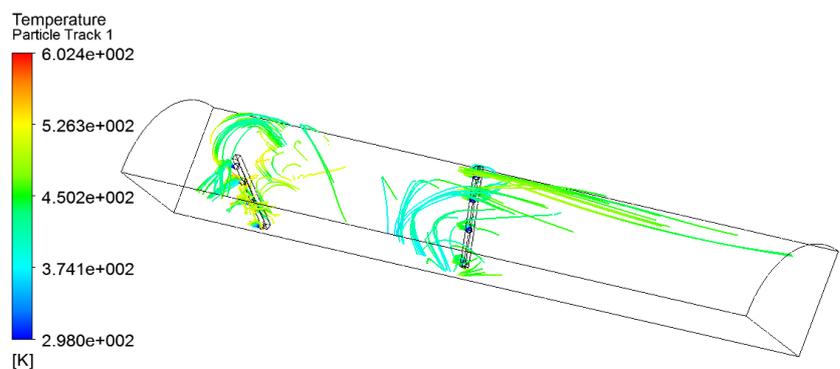
$\Psi = 0^\circ$



$\Psi = 45^\circ$



$\Psi = 90^\circ$



$\Psi = 135^\circ$

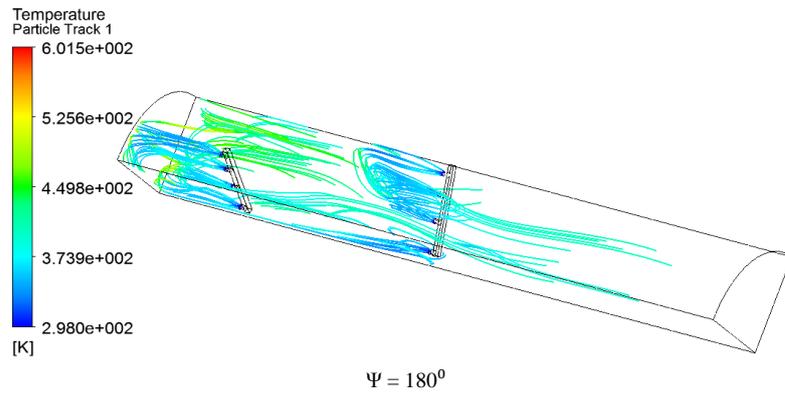
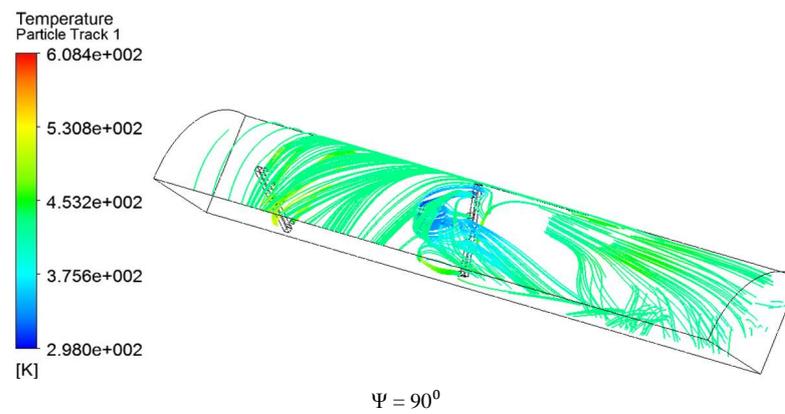
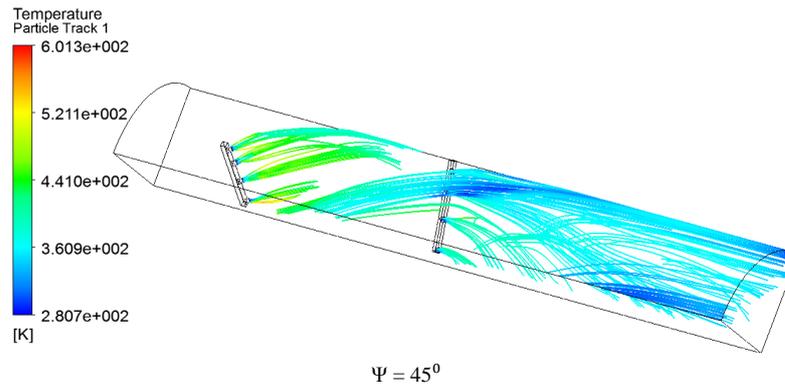
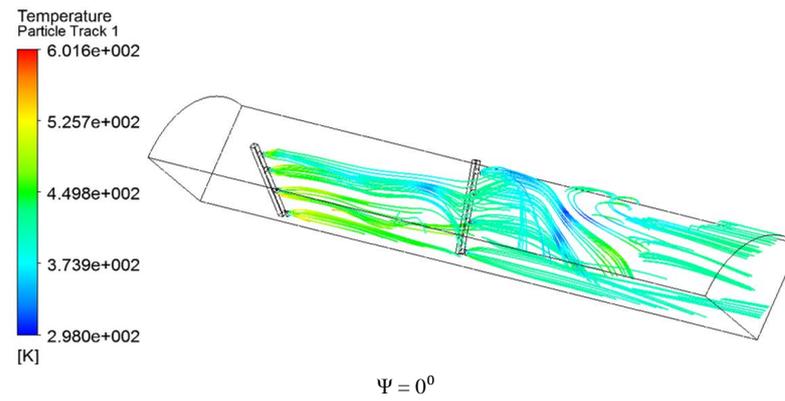


Figure 6. Particle tracks of the water spray when mass flow is 25 g/s
图 6. 喷水量为 25 g/s 时喷雾雾滴粒子轨迹



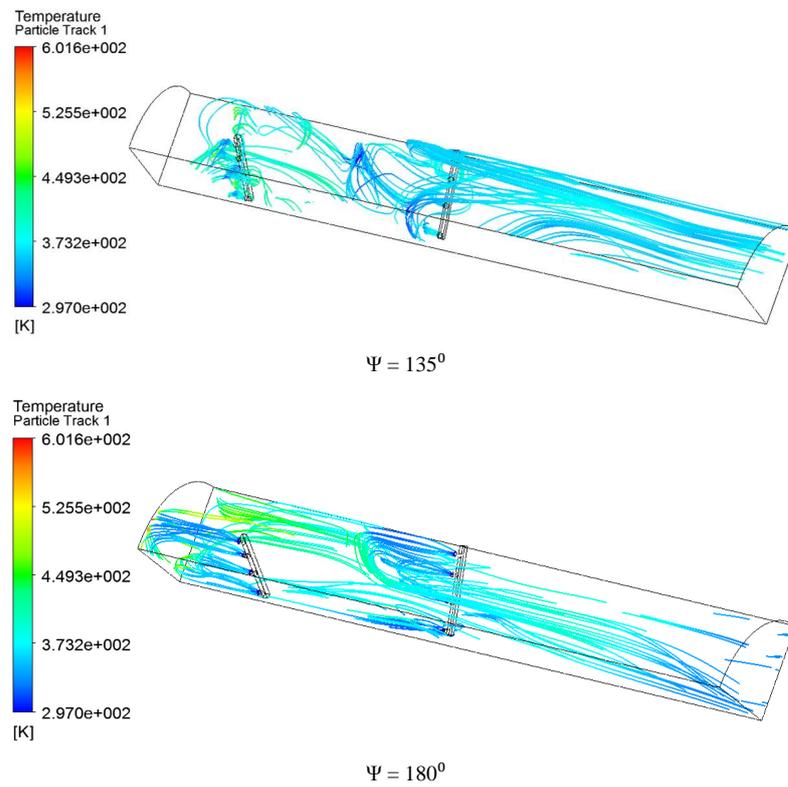


Figure 7. Particle tracks of the water spray when mass flow is 50g/s
 图 7. 喷水量为 50 g/s 时喷雾雾滴粒子轨迹

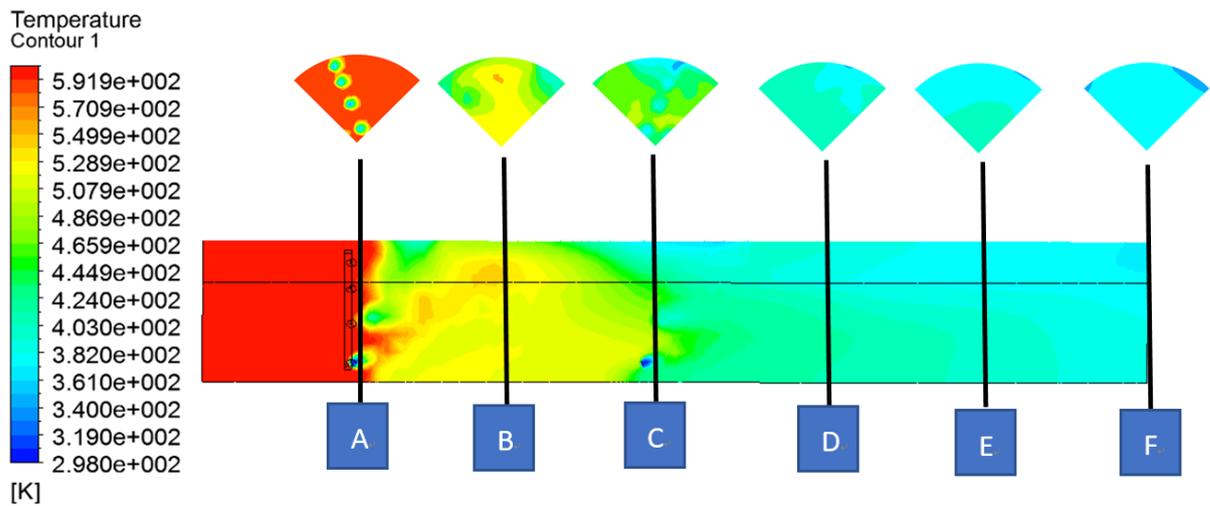


Figure 8. Temperature distribution in the pipe when mass flow is 25 g/s and $\Psi = 45^\circ$
 图 8. 喷水量为 25 g/s, $\Psi = 45^\circ$ 时温度分布图

Table 2. Positions of the observation planes
 表 2. 考察面在管道内的位置

考察面	A	B	C	D	E	F
管道内位置(m)	1.7	3.1	4.9	6.7	8.3	10

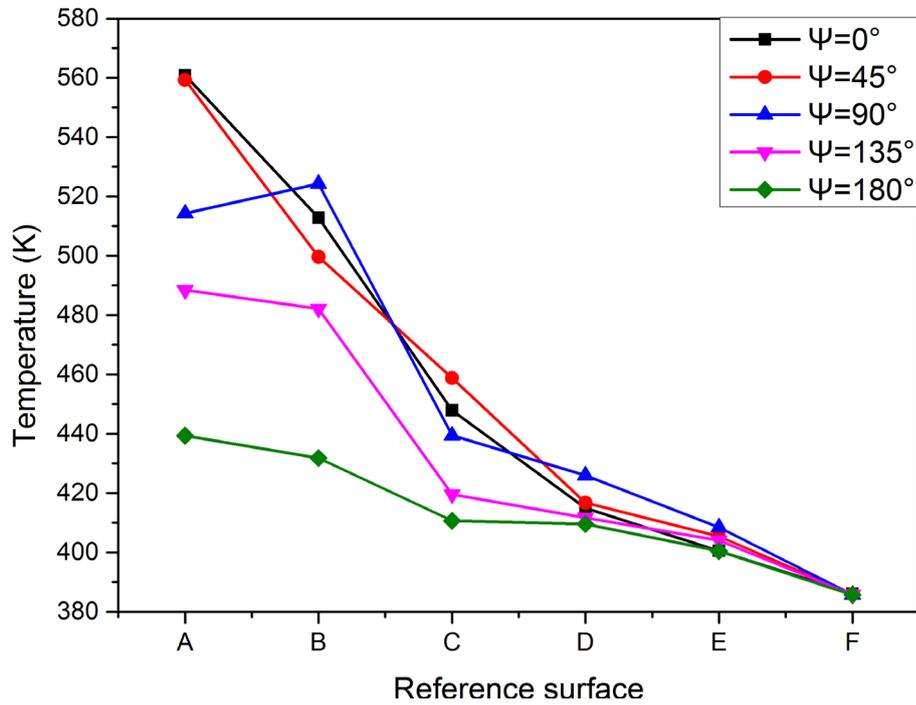


Figure 9. Gas temperature on the observation planes when mass flow is 25 g/s
 图 9. 喷水量为 25g/s 时考察面上的平均气相温度

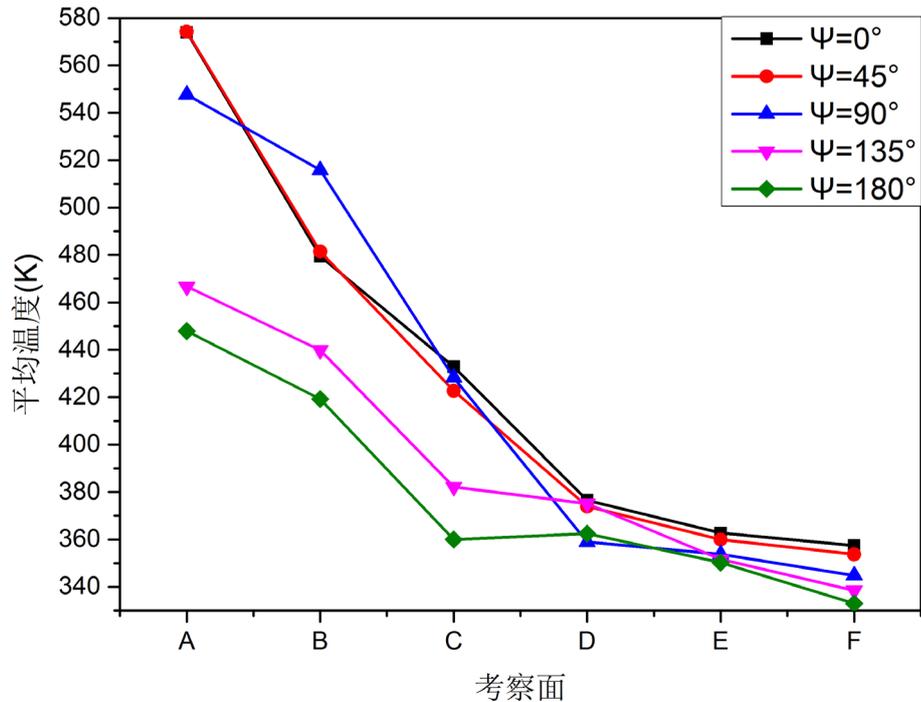


Figure 10. Gas temperature on the observation planes when mass flow is 50 g/s
 图 10. 喷水量为 50 g/s 时考察面上的平均温度

从图 9 看出, 考察面 A、B、C 上的温度变化受到喷嘴安装角的影响更为明显, 随着喷雾安装角度增大, 喷雾液滴与气相开始掺混的位置逐渐提前, 考察面上的平均温度随安装角增大而降低, 且此三面上

降温幅度较大, 这是因为喷雾降温主要依赖雾滴的蒸发吸热, 降温幅度与气液两相的掺混的程度有直接关系, 喷嘴安装角大的工况下气液两相掺混开始得更早, 降温过程开始得更早。

考察面 D、E、F 上的平均温度也随着喷雾安装角的增大而逐渐降低, 但是降温幅度较小。由于喷水量为 25 g/s 时, 五个喷嘴安装角的工况下雾滴都接近完全蒸发, 出口处平均温度都为 386 ± 1 K, 没有明显区别, 说明在喷雾完全蒸发时, 喷雾安装角不影响最终降温效果。

当单个喷嘴的喷水量为 50 g/s 时, 六个考察面上的平均温度如图 10 所示。喷水量增大后, 管道内部温度下降的趋势不变, 但降温幅度有所增加。从温度变化曲线中可以看出, 喷嘴安装角越大, 降温的效果就越好。比较五个喷嘴安装角 Ψ 对应的管道出口处的气相温度, 发现 Ψ 越大则出口处的气相温度越低, 如: $T(\Psi = 180^\circ) = 332.9$ K, 比 $T(\Psi = 0^\circ) = 357.5$ K 低 24.6 K。这是因为高温气体与未能完全蒸发的液滴接触换热的的时间更长, 所以液滴带走的热量更多, 气体的温度能降得更低。说明当喷雾液滴无法完全蒸发时, 喷嘴安装角对管道内部高温气体的喷雾冷却过程有影响, 喷嘴安装角增大有助于提高喷雾冷却的效果, 当 $\Psi = 180^\circ$ 时降温效果最佳。

5. 结论

本文使用 CFX 软件对不同喷嘴安装角度、不同喷雾流量下管道内部喷雾降温的过程进行了数值模拟。得出结论:

(1) 当喷雾雾滴能够完全蒸发时, 喷嘴安装角对管道内高温气体喷雾降温的最终效果没有明显影响; 当喷雾雾滴不能完全蒸发时, 喷嘴安装角对管道内高温气体喷雾降温的最终效果有一定影响, 安装角越大则降温效果越好。

(2) 当雾滴未能完全蒸发, 喷嘴安装角为 180° , 即喷雾入射方向与高温气体流动方向相反时, 喷雾降温效果最为理想。

参考文献 (References)

- [1] Sazhin, S.S. (2006) Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*, **32**, 162-214.
- [2] 辛娟娟, 周致富, 辛慧, 等. 单个液滴蒸发模型中不同质量传递公式的有效性分析[J]. 化工学报, 2012(6): 1704-1708.
- [3] Crowe, C.T. and Smoot, L.D. (1979) Multicomponent Conservation Equations. *Pulverized-Coal Combustion and Gasification*, 15-54.
- [4] Burger, M., Klose, G., Rottenkolber, G., et al. (2002) A Combined Eulerian and Lagrangian Method for Prediction of Evaporating Sprays. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, **124**.
<https://doi.org/10.1115/1.1473153>
- [5] 何志霞, 张亮, 王谦, 王芬. 耦合喷嘴内流欧拉 - 拉格朗日喷雾模型研究[J]. 内燃机工程, 2016, 1(27): 72-77.
- [6] Lebas, R. and Blokkeel, G. ELSA Model for Atomization: To Benefit of the Eulerian and Lagrangian Descriptions of the Liquid Phase. ICLASS-2006.
- [7] 张伟, 王照亮, 徐明海. 闭式循环喷雾冷却传热特性实验研究[J]. 热能动力工程, 2012(27): 429-433.
- [8] 刘期聂, 程文龙, 赵锐, 韩丰云, 范含林. 一种紧凑式喷雾冷却系统的传热特性仿真分析[J]. 航天器工程, 2010(19): 61-66.
- [9] 王小芝. 崇明隧道运营累积温升及喷雾降温可行性研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [10] 陶垚. 喷雾直接蒸发冷却过程数值模拟与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [11] 吴伟亮, 陈汉平, 罗次申. 新型喷雾光学测量仪的研制[J]. 热能动力工程, 2003, 18(6): 623-626.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：met@hanspub.org