

燃气轮机排气管道非均匀进口喷雾冷却数值研究

张宗卫¹, 席思成², 胡希卓¹, 刘 聪³

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300; 2. 中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300;
3. 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300)

摘要:为研究燃气轮机排气管道非均匀进口条件下喷雾冷却过程中管道内部流场、喷雾雾滴汽化运动轨迹和冷却效果,基于 Realizable $k-\varepsilon$ 模型结合壁面函数和 DPM 模型进行喷雾冷却数值研究,探究在非均匀进口条件下喷雾喷头位置分布、不同喷雾雾滴直径和喷雾流量对管壁和出口降温效果的影响。排气管道为直径 1.524 m 的圆柱体,前直段长 5 m,后直段长 8 m,转弯半径 2.8 m。喷雾喷射的锥角为 45° 、速度为 30 m/s、温度为 328.15 K。研究表明:在非均匀进口条件下,非均匀分布且集中于高温区域的喷头喷雾降温效果最佳,管壁温降为 111.08 K,出口温降为 97.14 K,而喷头排数对其降温效果影响较小;喷雾冷却前、后的管道出口平面速度分布标准差分别为 12.77 和 11.14 m/s,喷雾可改善后直段流场均匀性;非均匀进口条件对直径小于 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴影响大,雾滴汽化速度快,无法与壁面碰撞进行充分汽化吸热;随着流量的增大,喷雾对管壁和出口降温效果的影响程度相似,喷雾雾滴的汽化受喷雾流量的影响,流量越大喷雾雾滴汽化长度越长。

关键词:燃气轮机;排气管道;非均匀进口;喷雾冷却;冷却效果

中图分类号:TK47 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdjgc.2024.09.006

[引用本文格式]张宗卫,席思成,胡希卓,等.燃气轮机排气管道非均匀进口喷雾冷却数值研究[J].热能动力工程,2024,39(9):45-53. ZHANG Zongwei, XI Sicheng, HU Xizhuo, et al. Numerical study on non-uniform inlet spray cooling of gas turbine exhaust pipe [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 45-53.

Numerical Study on Non-uniform Inlet Spray Cooling of Gas Turbine Exhaust Pipe

ZHANG Zongwei¹, XI Sicheng², HU Xizhuo¹, LIU Cong³

(1. Aeronautical Engineering College, Civil Aviation University of China, Tianjin, China, Post Code: 300300;
2. Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin, China, Post Code: 300300;
3. Air Traffic Management College, Civil Aviation University of China, Tianjin, China, Post Code: 300300)

Abstract: In order to study the influence of non-uniform inlet conditions on the internal flow field, evaporation motion trajectory of spray droplet, and cooling effect during the spray cooling process in the exhaust pipe of a gas turbine, a spray cooling numerical study based on the Realizable $k-\varepsilon$ model combined with the wall function and DPM model was conducted. The influence of the distribution of spray nozzle positions, different spray droplet diameters and spray flow rates on the pipe wall and outlet cooling effect under non-uniform inlet conditions was explored. The exhaust pipe was a cylindrical pipe with an equal diameter of 1.524 m, a front straight section of 5 m, a rear straight section of 8 m and a turning radius of 2.8 m. The cone angle of spray jet was 45° , the velocity was 30 m/s and the temperature was 328.15 K. The study shows that under non-uniform inlet conditions, the best cooling effect are obtained

收稿日期:2023-12-18; 修订日期:2024-01-24

基金项目:国家自然科学基金(52106121)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52106121)

作者简介:张宗卫(1984-),男,中国民航大学讲师.

通信作者:刘 聪(1988-),男,中国民航大学讲师.

with non-uniformly distributed spary nozzles concentrated in the high temperature region, with a wall temperature drop of 111.08 K and an outlet temperature drop of 97.14 K, and the effect of the number of nozzle rows on the cooling effect is small. The standard deviations of the pipe outlet planar velocity distribution before and after spray cooling are 12.77 and 11.14 m/s, respectively, indicating that spray can improve the uniformity of the flow field in the straight section. Non-uniform inlet conditions have a greater impact on droplet smaller than 25 μm in diameter, with rapid evaporation and insufficient vaporization heat absorption due to insufficient collision with the wall. As the flow rate increases, the influence of spray on the pipe wall and outlet cooling effect is similar, and the vaporization of spray droplet is affected by the spray flow rate, with larger flow rates resulting in longer vaporization lengths of spray droplet.

Key words: gas turbine, exhaust pipe, non-uniform inlet, spray cooling, cooling effect

引 言

燃气轮机排气温度远高于船体和上层建筑的温度,高温烟气会缩短管道附近设备的使用寿命^[1]。其排气管道和烟羽的红外辐射也远远高于船体和上层建筑的红外辐射。根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,物体的红外辐射能量与其温度的四次方成正比^[2]。通过对排气装置进行降温处理,降低排气装置外表面和排出气体温度是抑制红外特征最为直接、有效的方法。柳贡民等人^[3-4]对排气管道进行喷雾冷却实验研究,结果表明,在排气系统中进行喷淋冷却对发动机排气噪声和温度的抑制都是有效的。Wang 等人^[5]对船用发动机侧排气管进行喷雾冷却研究,结果表明,管内排气温度迅速下降,喷雾引起的排气阻力增加值较小,对发动机影响不大。而张成春等人^[6]的试验和仿真研究表明,排气系统喷雾后气流速度降低、阻力大幅度减小,并且喷雾冷却具有较高的传热系数,降低了废气的阻力损失^[7]。喷雾冷却中 1 kg 水滴从液态变为气态所需能量是 1 kg 空气温度增加 1 K 所需能量的 2 000 倍以上^[8-9]。喷雾冷却利用水的高汽化潜热这一物理特性对排气进行大幅降温,且无须增加过多辅助设备,适合狭小的工作环境。

喷雾冷却的换热性能受雾滴尺寸、喷水量、喷射角度和喷头安装位置等因素影响。唐斯密等人^[10]通过实验对柴油机水下排气温度进行降温处理,研究表明,喷嘴流量的变化对温度降低幅度影响显著。应宇辰等人^[11]通过计算和实验数据进行对比分析发现,喷雾流量增加到一定程度时对排气温度影响较小。牛长军等人^[12]对喷雾冷却的数值研究表明,

雾滴直径越大,在管道内的运动距离越远,汽化长度越长,喷雾后总压损失越小,流场得到改善。王小川等人^[13]研究了不同工况、不同喷嘴孔径下喷雾的降温性能,分析了雾滴尺寸和喷雾量对降温性能的影响,结果表明,雾滴尺寸越小,蒸发时间越短,在有限蒸发时间与运动距离内雾滴与气体的热交换越充分。Tissot 等人^[14]对喷雾气流进行数值模拟的结果表明,液滴直径越小,分散能力越差,导致混合效果较差。袁书生等人^[15]对船舶烟囱的排烟-水雾流动过程进行了数学建模与仿真计算,结果表明,相同水流量时多排喷嘴比单排喷嘴的出口处烟气平均温度下降幅度大。

以上实验和数值研究均为均匀进口条件,其温度和速度分布无法模拟燃气轮机的真实情况。因此,本研究构建燃气轮机排气管道模型,采用 DPM 模型模拟大流量非均匀进口条件下排气管道喷雾冷却的内部流场及外壁面和出口截面的温度分布情况,确定理想的喷头安装方式,并分析了喷雾流量和雾滴直径对喷雾降温效果的影响。

1 数值方法

1.1 控制方程

排气管道内气液两相流的数值计算需要基本控制方程^[16]。

连续性方程:

$$\Gamma = \frac{\partial(\gamma_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma_k \rho_k V_k) \quad (1)$$

式中:下标 k 取 l 和 g —液相和气相; Γ —两相间的质量传递,kg; ρ —连续相空气的密度,kg/m³; γ_k —各相体积分数; V_k —各相速度,m/s。

动量方程:

$$\frac{\partial(\gamma_k \rho_k V_k)}{\partial t} + V_k \nabla \cdot (\gamma_k \rho_k V_k) = -\gamma_k \sum_{i=1}^m (\nabla P_i) +$$
$$M^F + M^\alpha + \sum_{j=1}^n (b_j) + \nabla \cdot (\mu_k \gamma_k \nabla V_k) \quad (2)$$

式中: P_i —面积力,N; b_j —体积力,N; M^F —单位时间内由质量传递携带的相间动量传递,kg·m/s²; M^α —界面间的相间作用力,N; μ —动力粘度,Pa·s; m,n —流体所受面积力和体积力的种类个数。

能量方程:

$$\frac{\partial(\gamma_k \rho_k T_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma_k \rho_k V_k T_k) = \nabla \cdot (\gamma_k \frac{\lambda}{c_p} \nabla T_k)$$
$$+ \gamma_k S_T + E^F + E^T + E^F \quad (3)$$

式中: T —温度,K; c_p —比定压热容,J/(kg·K); λ —导热系数,W/(m·K); S_T —热源和流体粘性摩擦产生的热量,J; E^F —两相间质量传递迁移的热量,J; E^T —两相间由于温度差而传递的热量,J; E^F —两相间的力对各相所做的功,J。

流体的状态方程使离散后的方程组封闭。状态方程为:

$$p = \rho R_g T \quad (4)$$

式中: R_g —气体状态常数。

1.2 模型建立及边界条件

数值模拟的对象为燃气轮机排气管道,管道分为前直段、转弯段和水平段,模型尺寸与实际尺寸相同,如图1所示。排气管道为等直径 $\Phi = 1.5\text{ m}$ 的圆柱体,前直段长 $L_1 = 5.0\text{ m}$,后直段长 $L_2 = 8.0\text{ m}$,转弯段外弧半径为3.6 m、内弧半径为2.0 m、转弯半径 $R' = 2.8\text{ m}$ 。喷雾喷嘴安装于前直段前端,喷射方向垂直于管壁向圆柱中心。

入口采用速度入口条件,其设置采用数据表文件导入非均匀速度场和温度场,如图2所示。由于受排气管道前部分装置影响,进口截面高温高速区域主要集中于管道中心区域,周围为低温低速的冷却气体,进口平均速度135.7 m/s,平均温度570.7 K;出口条件采用压力出口。由于进口空气流动速度最高为185 m/s,需考虑因高速流动产生的可压缩效应,故采用可压缩理想气体。

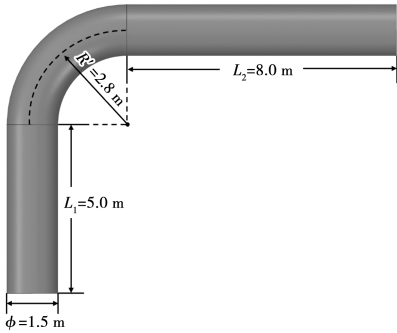


图1 物理模型
Fig.1 Physical model

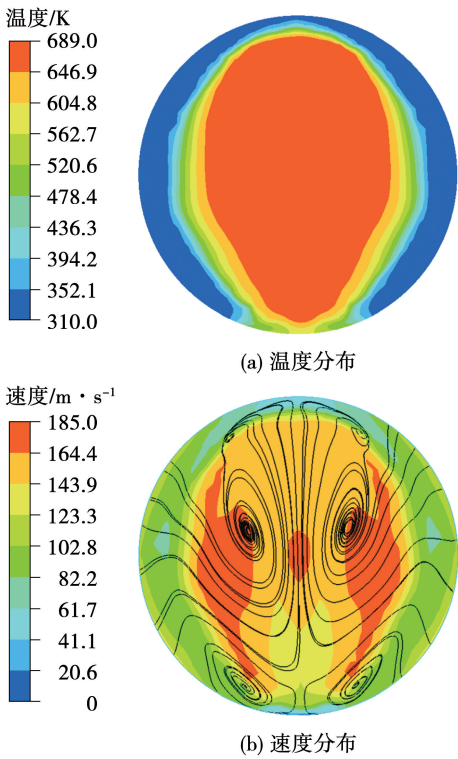


图2 进口条件分布
Fig.2 Distributions of inlet condition

1.3 网格划分及无关性验证

采用 Ansys Fluent 软件中的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型结合标准壁面函数模拟排气管道内流场;喷雾冷却过程采用离散相模型(DPM)对雾滴运动轨迹进行描述^[6,17];采用 SIMPLE 算法求解方程;对流项的空间离散化采用基于最小二乘单元的离散化方法;湍流动能方程、湍流耗散率方程和能量方程采用一阶迎风格式离散,压力方程和动量方程采用二阶迎风格式离散。

模型网格划分如图3所示。壁面附近采用表面为六边形的多面体网格,远离壁面区域使用六面体网格,设置边界层使得壁面网格 Y^+ 在30~500内。计算域网格数分别取135万、160万、248万和285万。

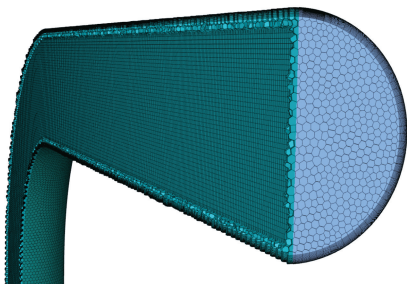


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh division

以距出口3 m处截面的面平均相对压力值为参考值。面平均压力计算结果随网格数变化情况如图4所示。网格数从135万到160万压力值变化较大,在160万网格数后变化幅度较小。通过网格无关性验证,确定计算流体域网格数为160万。

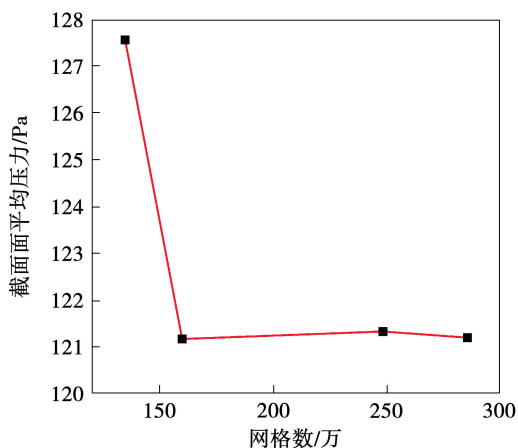


图4 网格无关性验证结果

Fig. 4 Mesh independence verification result

采用上文数值模拟方法对文献[18]中的喷雾降温工况进行模拟,对比文献[18]中喷雾后沿管程方向的管道截面平均温度,结果如图5所示。本文结果与文献[18]中的温度值在管道前半部分吻合度高,但由于喷雾参数设置和喷头位置有设置误差,后半段吻合度较差。整体上,误差均在合理范围内,证明了本文数值方法的准确性。

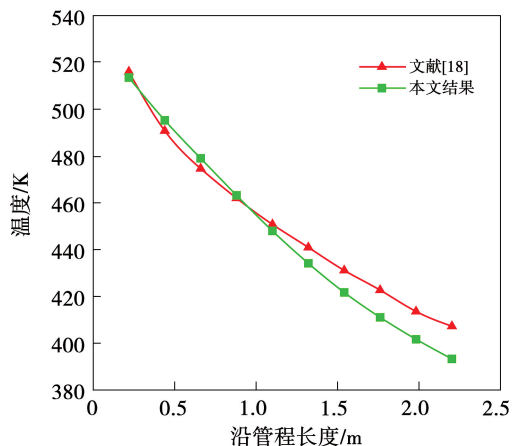


图5 数值模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of numerical simulation results

2 喷头位置分布确定

喷雾的基本参数为:喷雾喷头的雾锥角为 45° ,喷射速度为30 m/s,喷雾平均粒径为 $100\text{ }\mu\text{m}$,喷雾温度为328.15 K,总质量流量为6.62 kg/s,第一排喷头距进口处0.5 m。喷雾喷头设置4种分布方式,如图6所示。图中, α 和 β 代表喷头间不同的夹角值, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 22.5^\circ$ 。方案1采用8个喷头,均匀分布;方案2采用12个喷头,非均匀分布,喷头主要集中于管道壁面上下侧;方案3采用12个喷头,非均匀分布,集中于左右两侧;方案4采用16个喷头,均匀分布。

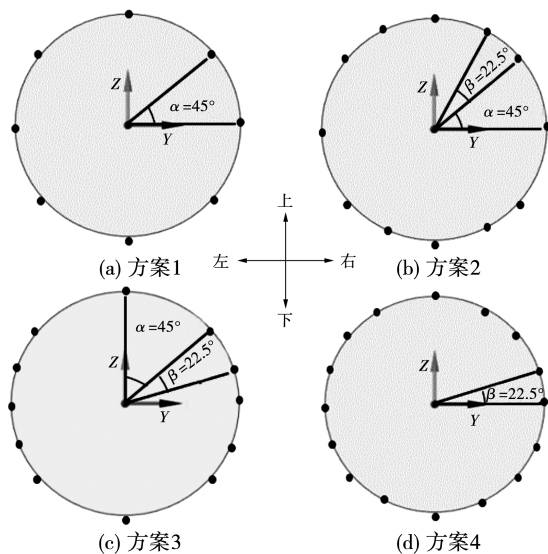


图6 喷头位置方案

Fig. 6 Spray nozzle position schemes

4种喷雾方案对管道的管壁和出口温度的影响

如表 1 所示。对于非均匀进口条件,4 种方案对于管道壁面以及出口气体温度的降温效果均有不同。由表 1 可知,方案 1,2,4 均有较好的降温效果,都可以使管壁温度下降 100 K,出口气体温度至少下降 80 K,并且方案 2 的降温效果最好,管壁温降为 111.08 K,出口温降为 97.14 K,对比方案 3,管壁温降为 86.59 K,出口温降为 67.64 K。说明,对于非均匀的进口条件,方案 3 喷头集中布置在低温区域(左右两侧),所以温降最小。将喷头集中分布于高温区域,喷雾雾滴在喷出后立即与高温气体进行热量传递,使得喷雾雾滴快速气化,降低周围温度,所以能够达到最好的降温效果。同时,对比方案 4,说明不是喷头越多喷雾降温效果越好。

表 1 喷头分布方案对管壁及出口温度的影响(K)

Tab.1 Influence of spray nozzle distribution scheme on pipe wall and outlet temperature (K)

方案	管壁温度	管壁温降	出口温度	出口温降
1	465.25	103.51	471.11	85.57
2	457.68	111.08	459.55	97.14
3	482.17	86.59	489.03	67.64
4	459.20	109.56	468.00	88.68

文献[15]指出,对于均匀进口,喷头排数对喷雾冷却效果有较大影响。因此,本研究在非均匀进口条件下探讨喷头排数的影响,并在方案 2 基础上设计了 3 种喷头排数。图 7 为喷头排数的分布情况。首排距进口 0.5 m,排与排之间相隔 0.5 m。喷雾的基本参数与上文相同。

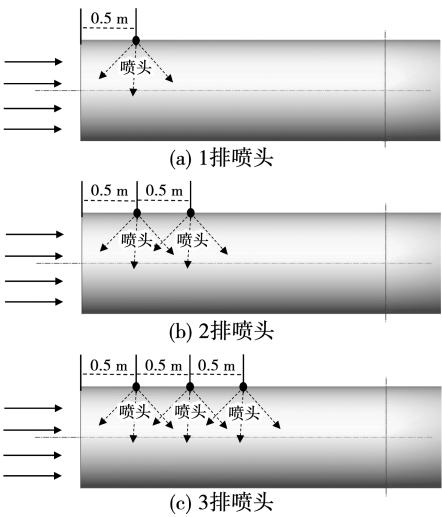


图 7 喷雾喷头的排数位置

Fig.7 Positions of rows of spray nozzle

表 2 为 3 种喷头排数的降温效果。通过对比不同排数下的管壁和出口温降值发现,与均匀进口条件相比喷头排数对非均匀进口条件下的喷雾降温效果影响较小。管壁平均温降超过 110 K,出口平均温降超过 97 K。不同喷雾排数下管壁和出口的温降值相差均在 3 K 以内。由于 3 排喷头具有相对较好的降温效果,因此最终选择 3 排喷头、且采用方案 2 的非均匀分布安装方式。

表 2 喷头排数对降温效果的影响(K)

Tab.2 Influence of the number of spray nozzle rows on cooling effect (K)

喷头排数	管壁温度	管壁温降	出口温度	出口温降
1 排	457.68	111.08	459.55	97.14
2 排	455.66	113.10	456.94	99.74
3 排	453.54	115.22	457.51	99.17

3 计算结果及分析

3.1 喷雾流场和温度场分析

在非均匀进口条件下,喷雾雾滴喷入排气中时,雾滴与周围高温环境进行热量传递,雾滴汽化导致管道内气体流场分布发生变化。喷雾喷射前后管道截面的流场分布情况如图 8 所示。

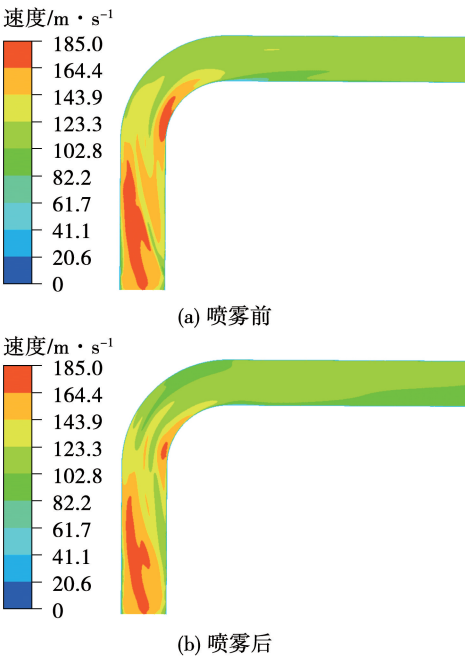


图 8 管道截面速度云图

Fig.8 Contours of velocity on pipe section

喷雾喷射前后管道内部流场存在一定变化,非均匀进口导致管道前直段内部流场分布不均匀,外围低温气体随管道向高温区流动。由于管道弯头的作用,内侧弯头处出现高速区,而弯头末端则出现小部分分离区域。随着气体充分混合,在管道后直段速度分布较为均匀。

图 9 为喷雾冷却前、后出口截面速度分布云图。喷雾喷射前、后的出口平均速度与入口平均速度的变化率分别为 15.35% 和 21.51%。同时,出口平面的速度分布标准差分别为 12.77 和 11.14 m/s。说明喷雾降低了后直段内部流场速度、改善了出口截面速度的均匀性。

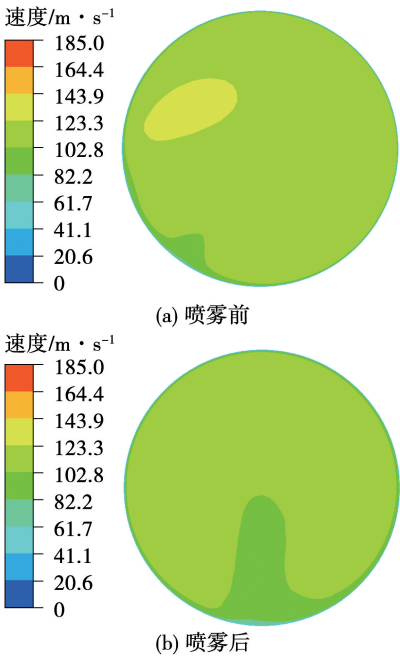


图 9 出口截面速度云图

Fig. 9 Contours of velocity on outlet section

喷雾喷射前、后管道中截面温度分布如图 10 所示。在喷雾冷却前,管道前直段高温气体与低温气体混合不充分,高温区域占主要部分。随着空气流动,高温气体和低温气体在管道弯头充分混合,使得后直段气体温度降低效果明显,但存在温度不均匀的情况,高温区域主要集中于后直段的中部和底部。喷雾喷射后,受管道内部流动的影响,右侧喷雾雾滴迅速与高温气体换热蒸发,前直段截面中的右侧高温气体温度下降明显,高温区域面积减小。对于弯

头段内的高温气体,喷雾有较好的降温效果,弯头后段的高温区域面积减小明显。与喷雾喷射前相比,管道后直段的平均温度更低,受弯头尾段的流动影响,喷雾在后直段的降温主要集中于上侧区域。近壁面温度相比于中心区域更低,形成低温气体包围高温气体的良好温度分布。这表明,喷雾对于非均匀进口的高温排气具有较好的降温效果,能够改善排气温度的分布状况。

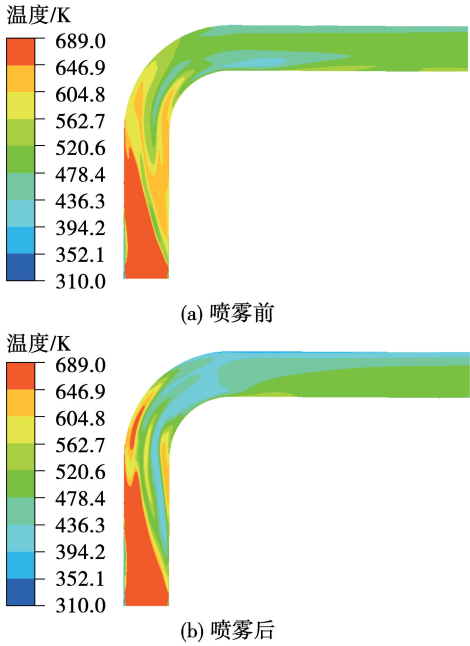


图 10 中截面温度云图

Fig. 10 Contours of temperature on middle section

喷雾喷射后,雾滴会在撞击壁面时吸收壁面热量,壁面温度降低,改善管道壁面高温情况。喷雾前、后管壁温度云图如图 11 所示。在喷雾前,非均匀的进口条件使得排气管道壁面温度分布情况复杂,内部复杂流动直接影响管道壁面温度。然而管壁整体呈高温状态,平均温度为 568.76 K,管壁高温区域主要集中于前直段管道外侧和内侧。由于内部气体在弯头和后直段的温度降低,管道壁面中部和后部区域温度降低明显。在喷雾后,喷雾雾滴与高温壁面接触,吸收热量并蒸发,管道壁面整体平均温度下降,平均降温在 115 K 左右,并在壁面附近形成低温边界流。前直段壁面高温区面积减小,并主要局限于低温边界流中。弯头管壁温度分布更加均匀,但面积有所减小。后直段整体温度明

显下降,且温度分布以低温流为边界,分为上下两个温度区域。在出口附近,壁面温度基本呈均匀的低温分布。

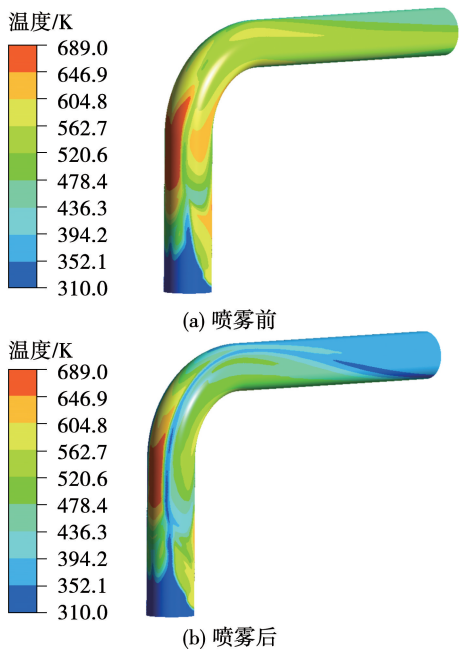


图 11 管道壁面温度云图

Fig. 11 Contours of temperature of pipe wall

3.2 喷雾参数影响

在非均匀进口条件下,喷雾的基本参数如下:单个喷雾喷头的雾锥角为 45° ,平均粒径为 $100\text{ }\mu\text{m}$,速度为 30 m/s ,温度为 328.15 K ,喷雾总质量流量为 6.62 kg/s 。基于这些参数,本研究考虑了不同喷雾雾滴直径和流量对排气管道壁面和排出气体降温效果的影响。

3.2.1 喷雾雾滴直径

在喷雾基本参数基础上,改变喷雾雾滴直径,计算雾滴直径在 $10\sim500\text{ }\mu\text{m}$ 范围时管壁面平均温度值和出口截面平均温度值。

不同雾滴直径下的喷雾降温效果如图 12 所示。图中: ΔT 为温降值, K ; D_g 为雾滴直径, μm 。喷雾对出口气体和管壁有显著的降温效果,雾滴直径为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 时,对管壁的温降达到最高值 136.11 K ,出口的温降为 130.95 K 。但随着雾滴直径的增大,喷雾对管道壁面和出口气体的温降效果减弱。出口温降从最高值 130.95 K 降至 44.19 K ,温降差值为 86.76 K ;而对于管壁的温降影响更加显著,从 $25\text{ }\mu\text{m}$ 时的最

高值 136.11 K ,降至 $500\text{ }\mu\text{m}$ 时的 13.93 K ,温降差值为 122.18 K 。在喷雾其他参数不变情况下,雾滴直径越小,单颗雾滴吸热汽化效果越好,具有更好的吸热能力。雾滴直径在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以内时,壁面温降呈先上升,在 $25\text{ }\mu\text{m}$ 达到最高值,而后再下降的变化趋势。出口温降在 $10\sim25\text{ }\mu\text{m}$ 内变化不明显。说明雾滴直径在 $25\text{ }\mu\text{m}$ 以内能够在管道内充分汽化吸热,但受非均匀气流影响,雾滴直径较小时,汽化速度快,无法与壁面碰撞进行充分汽化吸热,导致壁面温降效果差。

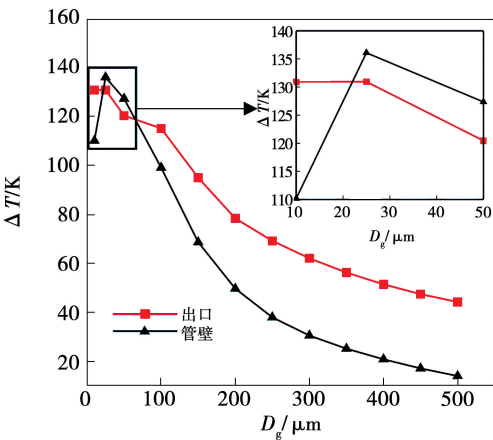


图 12 喷雾雾滴直径对降温效果影响

Fig. 12 Influence of spray particle diameter on cooling effect

图 13 是雾滴直径分别为 10 和 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴汽化过程中的运动轨迹。由图 13 可知,雾滴直径越大,其在排气管道内的汽化运动轨迹越长,吸热汽化能力越弱,导致其降温效果减弱。直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的喷雾雾滴在管道弯头处能够完全汽化,汽化后与气体混合,有效改善后直段流场;而直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴在排出管道前无法完全汽化,但在内部不均匀流场的影响下,雾滴在后直段主要分布在管道壁面附近,形成了低温气体包围内部高温气体的分布,也能够一定程度上降低排气外表面温度。此外,雾滴直径越大,在管道内的停留吸热时间越长。同时,未完全汽化的雾滴随气体一起排出,降低了出口截面温度。因此,雾滴直径的增大导致喷雾冷却效果减弱,但减弱的程度逐渐减小。

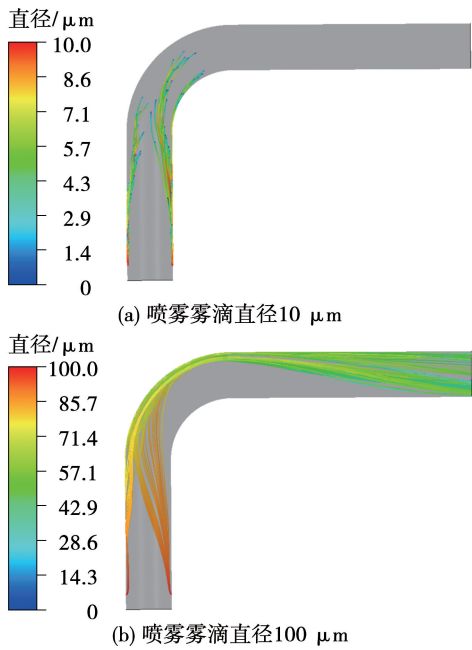


图 13 不同直径下雾粒汽化运动轨迹

Fig. 13 Vaporization trajectories of mist particles with different diameters

3.2.2 喷雾流量

在喷雾基本参数基础上,雾滴直径为 50 μm ,在 0.5 ~ 8.0 kg/s 范围内改变喷雾质量流量,计算出管壁和出口温降随喷雾质量流量变化,如图 14 所示。 m_g 为喷雾质量流量。喷雾流量对出口和管壁的降温效果明显,喷雾流量 8 kg/s 时,出口温降 139.27 K,管壁温降 137.83 K。随着喷雾流量的增加,喷雾对于管道壁面和出口气体的降温效果明显。对于出口,温降随喷雾质量流量的增加而近线性增加。而对于管壁温降,质量流量在 4 kg/s 前温降值均小于出口温降值,质量流量在 3.5 ~ 4.5 kg/s 温降效果增加幅度增大,在 4 kg/s 时管壁与出口温降值相近,而后管壁温降值大于出口温降值。在 8 kg/s 时,管壁温降和出口温降值相近。

图 15 为喷雾雾滴在质量流量 3.5 和 8.0 kg/s 时的雾滴汽化运动轨迹。在 3.5 kg/s 质量流量下,喷雾雾滴在非均匀高温高速的气体中充分吸热汽化,并在管道弯头处完全汽化。而随着喷雾流量的增大,喷雾对管道内部流场产生影响,导致部分雾滴在排出管道前无法充分汽化。这些雾滴在后直段与壁面撞击并吸热,降低壁面温度,最终以液态形式随着气体一起排出。因此,随着喷雾流量的增加,喷雾

的降温效果也相应增强。这表明,喷雾雾滴的汽化过程受雾滴质量流量的影响,质量流量越大喷雾雾滴的汽化轨迹长度越长。

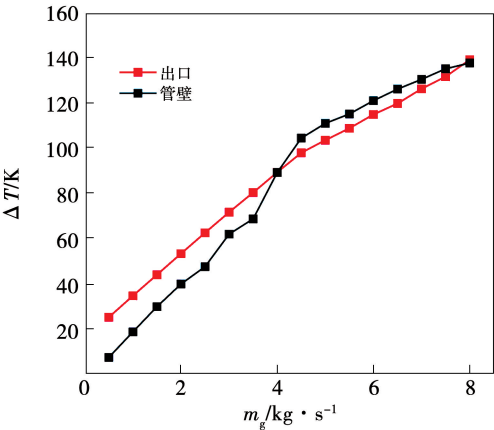


图 14 喷雾质量流量对降温效果的影响

Fig. 14 Influence of spray flow rate on cooling effect

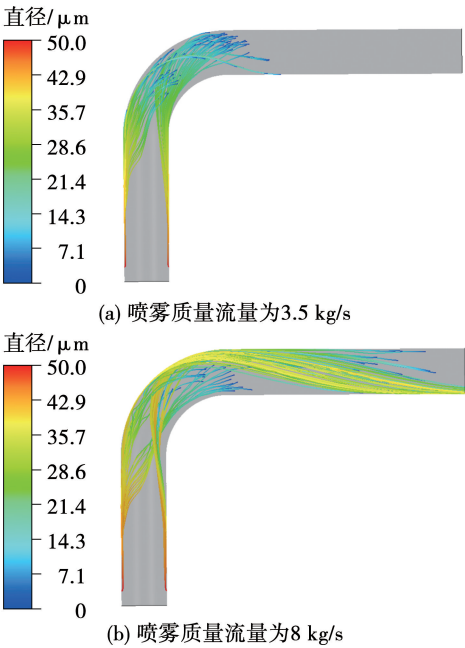


图 15 不同流量下雾滴汽化运动轨迹

Fig. 15 Vaporization trajectories of mist droplet at different flow rates

4 结 论

(1) 在非均匀进口条件下,喷头分布对喷雾降温效果影响较大。非均匀分布且集中于高温区域喷射的喷头降温效果最佳,可管壁和出口的温度降低 111.08 K 和 97.14 K,而喷头排数对其降温效果影响较小。

(2) 喷雾对流场产生一定影响,降低后直段的内部流速、提高出口截面速度的均匀性,对高温气体和管壁有显著的降温效果,可有效改善管道后直段壁面和内流温度分布的均匀性。

(3) 非均匀进口条件对直径小于 25 μm 的雾滴的降温效果影响较大。雾滴直径较小时,其汽化速度快,无法与壁面碰撞进行充分汽化吸热。随着雾滴直径的增大,喷雾对管道壁面和出口气体的降温效果减弱。

参考文献:

[1] 李方舟,白书诚,吴俐俊.一种用于船舶烟气冷却的喷雾螺旋管冷却器的传热特性研究[J].热能动力工程,2023,38(4):64-74.
LI Fangzhou, BAI Shucheng, WU Lijun. Study on heat transfer characteristics of a spray helical tube cooler for marine flue gas cooling [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 64-74.

[2] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[3] 柳贡民,黄亮,张文平,等.船用柴油机排气冷却降噪装置性能仿真与实验研究[J].船舶工程,2007,29(3):5-8.
LIU Gongmin, HUANG Liang, ZHANG Wenping, et al. Simulation and experimental study on the characteristics of exhaust cooling and noise reduction equipment for marine diesel engine [J]. Ship Engineering, 2007, 29(3): 5-8.

[4] 袁江涛,杨立,金仁喜,等.动力排气系统细水雾蒸发冷却试验研究[J].工程热物理学报,2010,31(3):461-464.
YUAN Jiangtao, YANG Li, JIN Renxi, et al. Experimental study on water mist evaporative cooling in power machine exhaust system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(3): 461-464.

[5] WANG Z, WU W, YANG X, et al. Numerical simulation for flow and heat transfer of side exhaust spray of marine diesel engines [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(5): 1.

[6] 张成春,辛振涛,于海,等.基于喷雾冷却的发动机排气系统减阻[J].吉林大学学报(工学版):2024,54(3):641-649.
ZHANG Chengchun, XIN Zhentao, YU Hai, et al. Drag reduction of engine exhaust system based on spray cooling [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(3): 641-649.

[7] HE G, WANG X C. Research on spray cooling within finite volume based on eulerian-lagrangian method [C]//Advanced Engineering Forum. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2012, 4: 131-135.

[8] BEGG N. Experimental and computational analysis of evaporative spray cooling for gas turbine exhaust ejectors [D]. Kingston, CA: Queen's University, 2011.

[9] ARMITAGE G. An experimental and numerical investigation of evaporative spray cooling for a 45° bend near a gas turbine exhaust [M]. Kingston, CA: Queen's University, 2014.

[10] 唐斯密,李铤.柴油机水下排气红外抑制仿真及试验研究[J].中国舰船研究,2019,14(4):98-103.
TANG Simi, LI Xianbin. Numerical simulation and experimental study of infrared suppression of under water diesel engine exhaust gas under water [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(4): 98-103.

[11] 应宇辰,赵建华.柴油机排气系统喷雾冷却实验研究[J].节能,2019,38(4):57-59.
YING Yuchen, ZHAO Jianhua. Experimental study on spray cooling of diesel engine exhaust system [J]. Energy Conservation, 2019, 38(4): 57-59.

[12] 牛长军,华佳亮,王坤,等.燃气轮机喷雾冷却流动与换热数值研究[J].热能动力工程,2022,37(6):91-96,194.
NIU Changjun, HUA Jialiang, WANG Kun, et al. Numerical investigation on flow and heat transfer in spray cooling of gas turbines [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 91-96, 194.

[13] 王小川,李雁飞,贺国.基于喷雾降温方法的发动机排气红外抑制研究[J].激光与红外,2015,45(11):1343-1348.
WANG Xiaochuan, LI Yanfei, HE Guo. Infrared suppression of exhaust gas of engine based on water spray cooling [J]. Laser and Infrared, 2015, 45(11): 1343-1348.

[14] TISSOT J, BOULET P, TRINQUET F, et al. Air cooling by evaporating droplets in the upward flow of a condenser [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(11): 2122-2131.

[15] 袁书生,朱旭程,赵元立,等.舰艇动力装置排烟水雾降温的大涡模拟[J].系统仿真学报,2014,26(3):537-542.
YUAN Shusheng, ZHU Xucheng, ZHAO Yuanli, et al. Large eddy simulation to cool ship board engine exhaust with fine water mist [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(3): 537-542.

[16] 杨显锋.管内气液两相流场和声场研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
YANG Xianfeng. Study on the fluid and acoustic field of gasliquid two-phase flow in pipe [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.

[17] 刘楠.喷雾干燥耦合流场数值模拟与实验研究[D].大连:大连理工大学,2021.
LIU Nan. Numerical simulation and experimental study on coupled flow in spray drying [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

[18] XIN Z, ZHANG C, SHEN C, et al. Study on the drag reduction performance of high-temperature exhaust pipe by spray cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 225: 120098.