

燃气透平带肋U型通道中纳米气溶胶 对流传热特性及机理

龙泽^{1,2}, 杨星^{1,2}, 丰镇平^{1,2}

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 陕西省叶轮机机械及动力装备工程实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:针对燃气透平带肋U型通道中纳米气溶胶的对流传热特性进行了数值模拟研究,通过与纯空气条件下通道的传热情况对比,分析了纳米颗粒体积分数分别为 1×10^{-5} 、 5×10^{-5} 和 1×10^{-4} 时气溶胶传热特性的差异,并从流场结构、气溶胶热物性、壁面边界层以及热边界层的角度探索了纳米颗粒影响对流传热的机理。结果表明:相比于空气,纳米气溶胶具有更强的传热强化性能,且加入纳米颗粒并不改变工质的基本流动规律;从气溶胶热物性来看,其传热强化能力主要源于纳米颗粒对气溶胶导热系数和热容的提升;从边界层来看,纳米颗粒通过影响湍流边界层与热边界层的发展规律也对传热有所强化;虽然加入纳米颗粒引入了额外的总压损失,但其传热强化的收益要高于其引起的阻力损失。

关键词:纳米气溶胶;对流传热强化;叶片冷却;带肋通道;流动与传热边界层

中图分类号:TK14 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.04.001

[引用本文格式]龙泽,杨星,丰镇平.燃气透平带肋U型通道中纳米气溶胶对流传热特性及机理[J].热能动力工程,2025,40(4):1-10. LONG Ze, YANG Xing, FENG Zhenping. Convective heat transfer characteristics and mechanism of nano-aerosols in ribbed U-shaped channels of gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(4):1-10.

Convective Heat Transfer Characteristics and Mechanism of Nano-Aerosols in Ribbed U-shaped Channels of Gas Turbines

LONG Ze^{1,2}, YANG Xing^{1,2}, FENG Zhenping^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049;
2. Shaanxi Engineering Laboratory of Turbomachinery and Power Equipment, Xi'an, China, Post Code: 710049)

Abstract: A numerical simulation study was conducted to examine the convective heat transfer characteristics of nano-aerosols in ribbed U-channels of gas turbines. Compared with the heat transfer situation in channels under conventional air cooling conditions, the difference of heat transfer performance of nano-aerosols was analyzed at nanoparticle volume fractions of 1×10^{-5} , 5×10^{-5} and 1×10^{-4} . The mechanisms by which nanoparticles influence convective heat transfer through several perspectives, such as flow field structure, aerosol thermophysical properties, wall boundary layer, and thermal boundary layer, were explored. The findings reveal that nano-aerosols significantly enhance heat transfer performance compared to air, while no change in the fundamental flow behavior of the working fluid after adding the nanoparticles. From the aspect of aerosol thermal properties, enhancements in thermal conductivity and heat ca-

收稿日期:2024-07-14; 修订日期:2024-11-26

基金项目:国家自然科学基金(52276035)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52276035)

作者简介:龙泽(1999-),男,西安交通大学硕士研究生。

通信作者:杨星(1990-),男,西安交通大学副教授。

capacity due to nanoparticles primarily drive the improved heat transfer performance. Additionally, nanoparticles positively affect the turbulent boundary layer and the thermal boundary layer's development, further boosting heat transfer efficiency. Although the introduction of nanoparticles results in increased total pressure loss, the benefits gained from enhanced heat transfer outweigh the drag losses associated with their presence.

Key words: nano-aerosols, convective heat transfer enhancement, blade cooling, ribbed channels, flow and heat transfer boundary layers

引 言

由于燃气轮机技术的不断发展,其工作温度逐年上升,已经远超材料所能承受的温度极限,因此各国都在大力发展更先进的叶片冷却技术^[1-3]。相比于美欧国家,我国的制造能力仍有不足,想要在冷却强化结构领域实现超越非常困难。因此需要从热障涂层材料与冷却替代工质等方面入手寻求突破。

一些学者从冷却工质的角度进行研究,尝试使用水雾-空气混合流体、燃油、液态金属以及蒸汽等工质代替空气来强化传热冷却。但是经过研究发现,水雾-空气混合工质对水雾颗粒的直径要求较为严格,直径过大可能造成对叶片的冲蚀,直径太小难以在高温环境中输送至指定位置,冷却效果有限^[4-6]。而使用燃油和液态金属等材料作为冷却工质则可能导致壁面磨损或者堵塞冷却通道的问题,适用范围较为受限^[7-8]。蒸汽工质则需要引入额外设备,降低燃气轮机灵活性和装备的可靠性。为了解决这些问题,部分学者提出了纳米流体的概念,即将纳米固体颗粒(如 Cu、Al₂O₃ 等)均匀融入基液中制备成新工质。目前已有研究表明纳米流体的传热能力强于传统纯流体,具有很大的传热强化潜力,同时纳米流体具有接近纯流体的流动特性,便于输送至指定位置,且堵塞管道的可能性较小^[9-11]。

由于传统纳米流体采用的基液为液体,仍存在诸如冲蚀叶片、磨损冷却通道的问题。基于此,杨星等人^[12-13]提出了新型纳米气溶胶工质:先将纳米颗粒加入基液(如水等)中,然后喷入用于冷却的工质(通常为二次流空气),利用工质远高于基液的温度将基液蒸发,而纳米颗粒因其高熔点仍以固体形态保留,与空气均匀混合形成纳米气溶胶继续流动并与壁面发生热交换。纳米气溶胶不仅可以利用纳米颗粒的性质改善工质传热性能,而且还避免了基液

冲蚀叶片或者磨损通道的问题。虽然制备纳米气溶胶会引入新的设备,但是在气溶胶闭式冷却循环系统中不需要像闭式蒸汽冷却循环系统引入蒸汽加热设备一样,引入额外的纳米气溶胶加热设备,也不需要额外的高压气体压缩设备,故系统复杂程度低,在一定程度上保证了燃气轮机的灵活性和可靠性。由此可见,纳米气溶胶克服了大部分替代工质存在的弊端,且拥有较强的传热强化潜力,具有很高的研究价值。因此,本文在燃气透平叶片典型的 U 型内部冷却通道中进行了纳米气溶胶流动传热特性的数值模拟,分析加入纳米颗粒前、后工质传热与气动特性的变化,尝试揭示纳米气溶胶的传热强化机理,为今后将纳米气溶胶作为冷却工质的研究与应用提供理论支撑和指导。

1 模型及计算方法

1.1 几何模型

为了考察纳米流体对内部通道传热的影响情况,本文在文献[14]所研究的带肋 U 型通道模型中进行纳米气溶胶气固两相流数值研究。带肋 U 型冷却通道如图 1 所示。

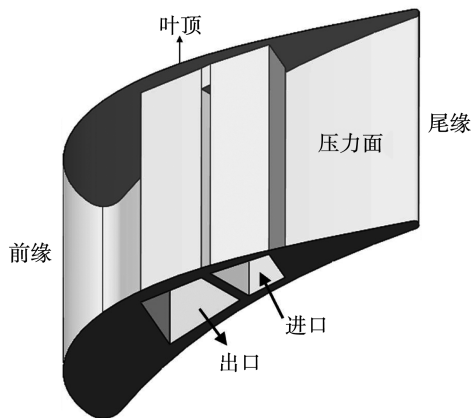


图 1 带肋 U 型冷却通道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ribbed U-shaped cooling channel

图2为带肋U型通道几何结构,图2中进口通道压力面宽度 d_s 作为基准尺寸, $d_s=100\text{ mm}$,进、出口通道的长度为 $8.9 d_s$,进口通道的水力直径 $d_{h,in}$ 为 $0.664 2 d_s$,出口通道的水力直径 $d_{h,out}$ 为 $1.020 d_s$,出口截面积 A_{out} 为进口截面积 A_{in} 的2.042倍。进、出口通道均布置了与进、出口截面呈 45° 夹角的直肋。两个通道的肋宽均为 $e=0.1 d_h$,肋之间的距离 $L=10 e$ 。

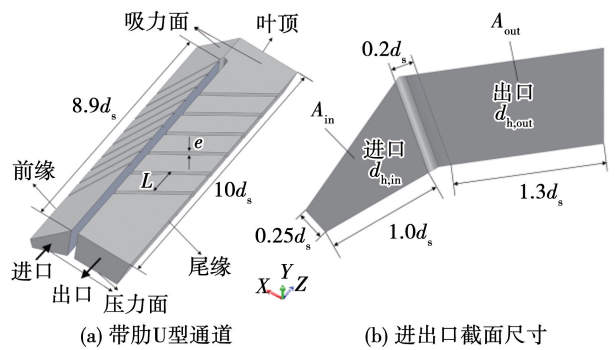


图2 带肋U型通道几何结构

Fig.2 Geometry structures of ribbed U-shaped cooling channel

1.2 计算方法及网格无关性验证

本文数值计算软件选择商用软件 ANSYS Fluent, 根据未加入纳米颗粒的单相空气工况下进口雷诺数 Re_{in} 为50 000的条件,计算出进口平均流速 u_{in} 为15.47 m/s,并沿用至其余工况,进口温度为342 K;计算工况包括4个纳米颗粒体积分数VF(Volume Fraction),分别为 $0, 1 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-5}$ 和 1×10^{-4} ;壁面选择固定壁温为300 K的固定无滑移壁面。

图3为用ICEM软件绘制的带肋U型通道模型六面体结构化网格,并进行了网格无关性验证。图3(a)为计算域网格。为了便于后续处理及分析,将通道吸力面与压力面划分成了区域0~18的19个区域,如图3(b)所示。由于压力面与吸力面区域是相对应的,故仅展示吸力面的划分情况。为了保证计算结果的准确性,分别绘制了网格数为690万、1 600万及2 400万的3套网格进行网格无关性验证。图3(c)为3套网格吸力面各个区域的无量纲努塞尔数 Nu/Nu_0 ,其中 Nu_0 为Dittus-Boelter公式计算得到的光滑通道中湍流流动的努塞尔数。从图3(c)中可以看到,网格数为1 600万的模型与网格数为2,400万的模型计算出的表面传热系数差异不大。因此,本文在综合考虑计算资源与计算精度的基础上,

选用了网格数为1 600万的模型开展后续计算。

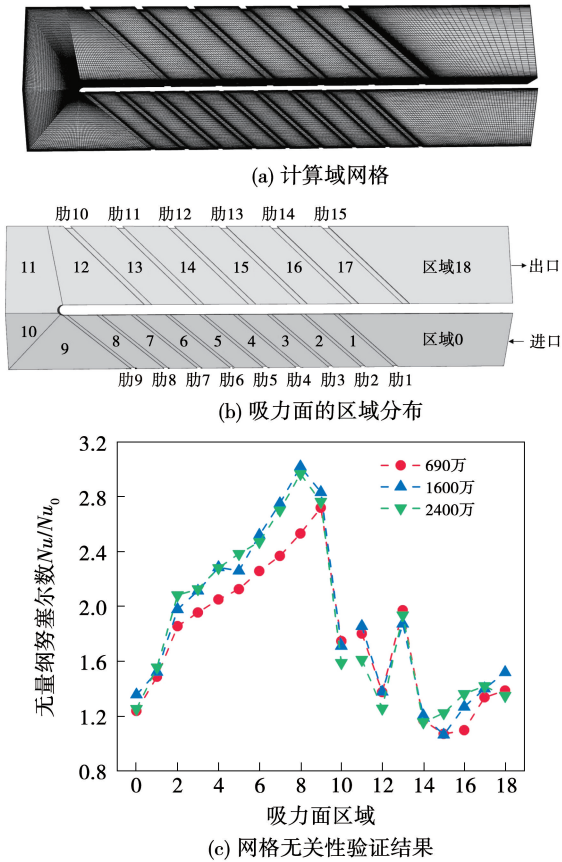
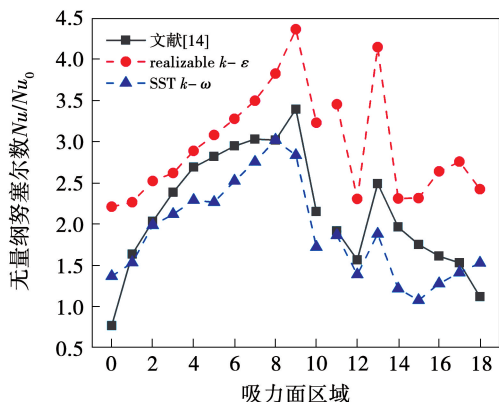


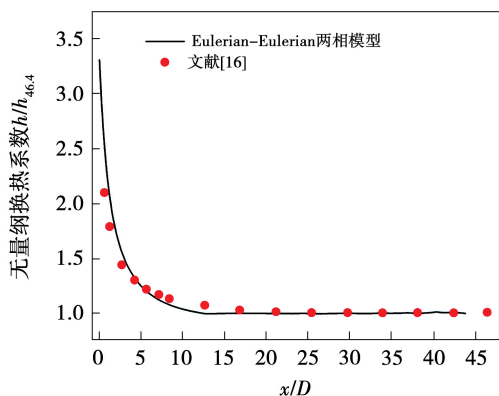
图3 U型通道模型网格划分及其无关性验证
Fig.3 U-shaped channel model meshing and mesh independence verification

为了保证湍流模型对计算的模拟准确度,本文分别选择SST $k-\omega$ 模型和realizable $k-\varepsilon$ 模型进行了计算,并将结果与文献[14]中的实验结果进行比较,如图4(a)所示。结果表明SST $k-\omega$ 模型的模拟结果更接近实验结果,故本文选用SST $k-\omega$ 模型开展研究。此前已有学者对两相流的数值计算模型进行了研究,文献[15]研究发现使用均相模型和Eulerian-Eulerian两相模型的计算结果与实验结果的最大偏差分别为12.61%和7.42%,说明Eulerian-Eulerian两相模型比均相模型更适用于本文纳米气溶胶的计算。为了进一步验证Eulerian-Eulerian两相模型对气固两相流传热与气动损失的模拟准确度,本文分别针对文献[16]中的 $Re=13\,500$ 、颗粒质量分数为0.58的实验工况与文献[17]的 $Re=28\,400$ 、颗粒质量分数为0.19的实验工况进行了计算。文献[16]中使用空气作为输送约 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的玻璃颗粒的载体,而文献[17]中采用空气输送约 $103.2\text{ }\mu\text{m}$ 的铜颗粒,均与本文所研究的第一相为空

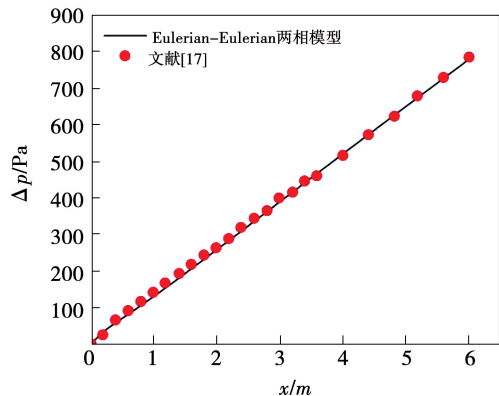
气、第二相为铜纳米颗粒的气固两相流类似。



(a) 湍流模型验证结果



(b) Eulerian-Eulerian两相模型传热预测验证结果



(c) Eulerian-Eulerian两相模型气动损失预测验证结果

图4 湍流模型验证结果

Fig.4 Validation results of turbulence models

图4(b)与图4(c)对比了数值计算和实验测量结果,其中图4(b)的纵坐标为通道各区域的传热系数 h 与通道出口处的传热系数 $h_{46.4}$ 之比,下脚标数字表示相应区域的流向方向长度 x 与通道水利直径 D 之比 x/D 为 46.4;横坐标为通道流向方向上的长度 x 与通道水利直径 D 之比;图4(c)的纵坐标为通道各区域的总压与通道进口处总压的差值,横坐标为通道流向方向上的长度 x 。可以看出 Eulerian-Eulerian 模

型对气固两相流的传热与气动损失均具有良好的预测能力,适用于本文纳米气溶胶的计算工作。

2 结果与讨论

2.1 纳米颗粒体积分数对传热系数的影响

不同纳米颗粒体积分数下,通道吸力面侧、压力面侧与前缘和尾缘侧(各面的相对位置参考图2)的传热系数 h 云图如图5所示。加入纳米颗粒后,通道表面传热系数出现了明显提升,且纳米颗粒体积分数越高,传热系数提升越明显。在工质为纯空气的情况下,吸力面与压力面的高传热系数区域仅占据了靠近前缘的一小部分区域,出口通道几乎没有任何高传热系数区域。而在纳米颗粒体积分数在 5×10^{-5} 及以上的工况下,高传热系数区域面积明显扩大,直至占据进口通道吸力面半数的区域。

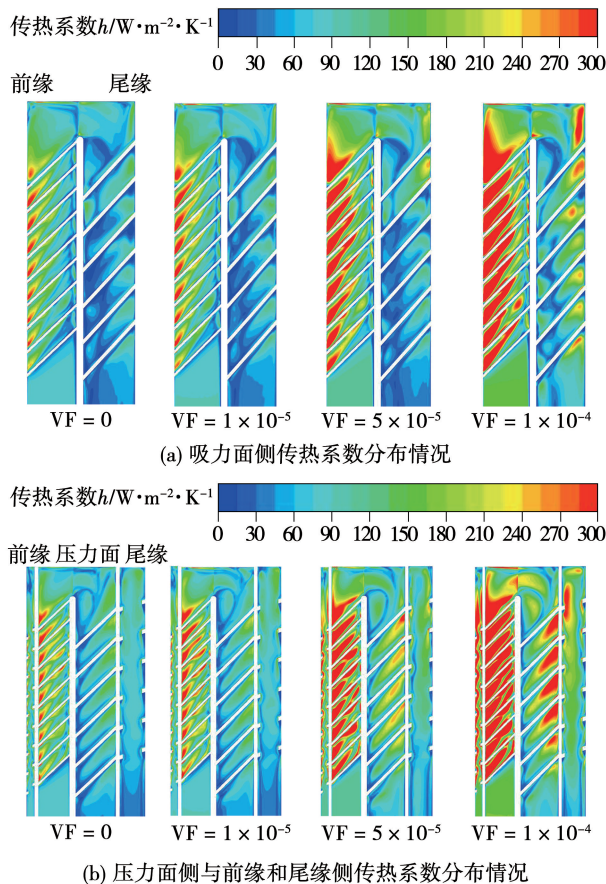


图5 通道表面传热系数分布

Fig.5 Distributions of heat transfer coefficient on channel surface

图6为通道弯头处中心截面与吸力面附近的流动情况,选取传热系数分布差距较为明显的 $VF = 0$ 和 $VF = 5 \times 10^{-5}$ 情况下的结果进行分析,分别在距离通道吸力面侧 1 mm 位置 A-A 与通道中心处

$B-B$ 取截面并绘制速度矢量图,其中速度矢量的长度与密度代表了速度大小,矢量越密集、矢量长度越长的地方流速越快。由图 6(a)可知,在靠近吸力面的附近出现了一个低流速区,在吸力面上的对应位置则为低传热系数区^[14]。这是因为,工质在流经弯头处时由于惯性的存在,其更容易向外侧流动。在向吸力面流动的过程中,会受到肋的阻挡而沿着肋流动,最终在出口通道内侧形成一个低速区,削弱了工质与壁面的对流传热,形成低传热区。

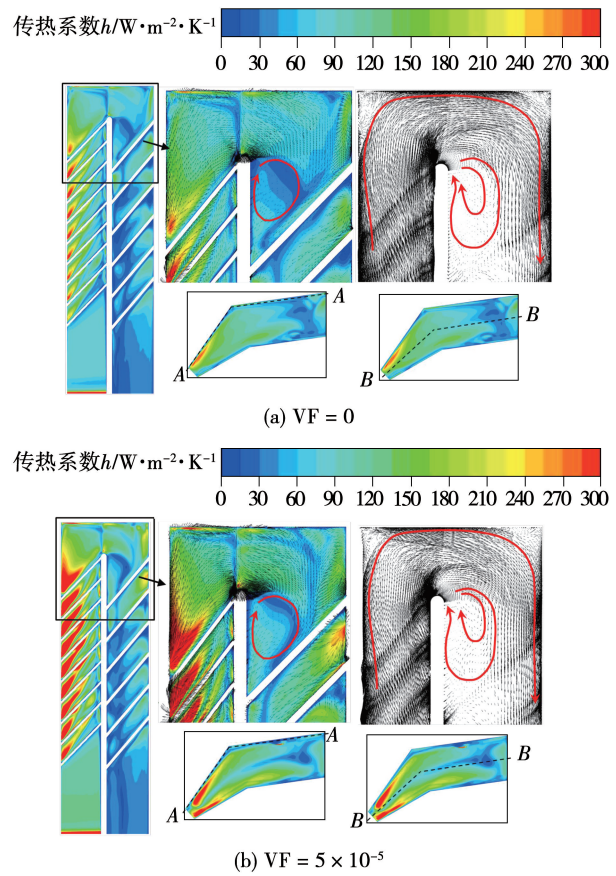


图 6 弯头处中心截面与吸力面附近的流动情况
Fig. 6 Flow situations near centre section and suction surface in bend region

图 7 为 $VF = 0$ 时吸力面不同法向截面上速度矢量分布与壁面传热系数云图的对应情况。由图 7(a)可以看出,工质流速越高对壁面冲击越强的位置,壁面传热系数也越高。而在肋与通道内、外侧壁面夹角处则会出现流动滞止点,这类区域的工质流速很低,对应壁面传热系数也低。

图 7(b)为 $VF = 0$ 时吸力面上与肋垂直的法向截面上的速度矢量分布和传热系数分布,可以看出,工质流经肋时会在肋的一端形成涡,涡沿着肋不断

发展,然后与下一级肋的涡、主流通道涡相互作用,最终形成复杂的涡系结构。这与其他学者此前得出的结论一致^[18-22]。而在靠近肋的位置存在两个旋转方向相反的涡,这一对涡交界的区域传热系数较低,形成了一条狭长的低传热系数带,该涡对在肋的两侧都存在。

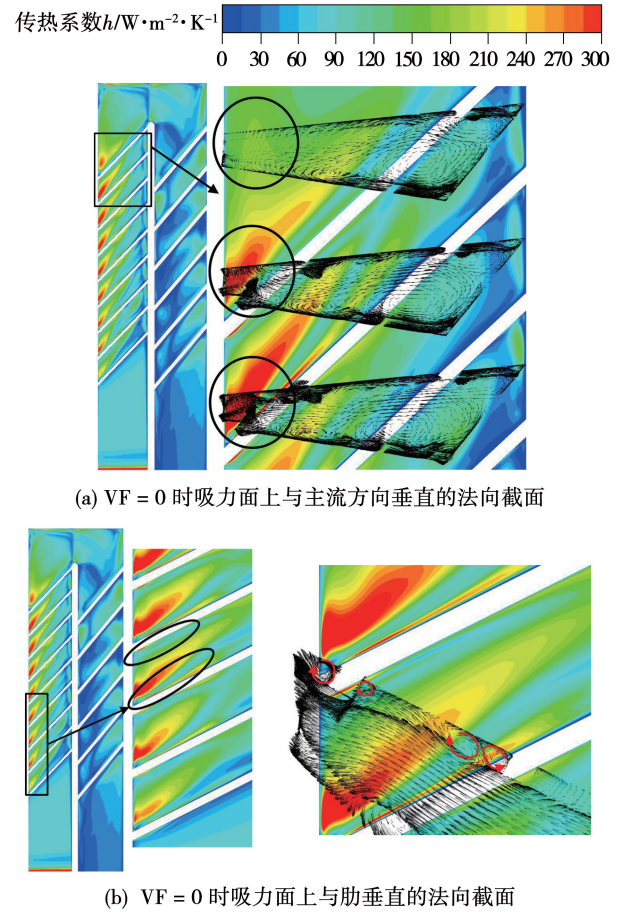


图 7 吸力面不同法向截面上速度矢量分布与吸力面传热系数云图
Fig. 7 Nephograms of velocity vector distribution on different normal cross sections of suction side vs. heat transfer coefficient of suction side

图 8 为通道吸力面传热系数分布与纳米颗粒体积分数的关系,且从图 8 可以看出,随着纳米颗粒的体积分数不断增加,肋后高传热带面积逐渐增大,下一级肋前高传热带尾部与中间大面积高传热区出现融合的现象。综合来看,纳米颗粒的传热强化能力受到自身湍流结构的影响。即纳米颗粒并不改变工质的基本流动规律,故难以克服弯头处低速区与流动滞止区的影响而大幅提升传热系数。但在涡系结构复杂、湍流强烈的两肋之间,加入纳米颗粒能够进一步提升传热系数。因此,与改变工质流动规律的

传热强化结构相比,加入纳米颗粒在强化传热的同时,对二次空气系统的流量分配影响也更小。

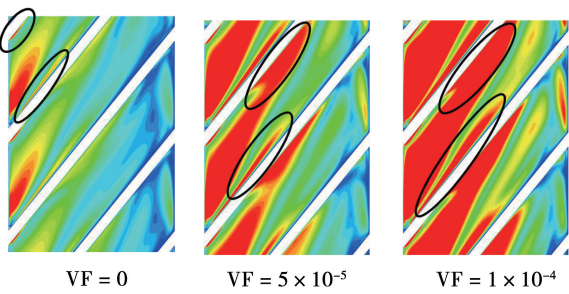


图 8 不同纳米颗粒体积分数下通道吸力面上传热系数分布规律的变化

Fig. 8 Change in distribution of heat transfer coefficient on channel suction surface at different nanoparticle volume fractions

图 9 为不同纳米颗粒体积分数情况下进、出口通道吸力面侧、压力面侧以及前缘和尾缘侧壁面平均传热系数与局部区域(区域位置见图 3(b))平均传热系数的对比。

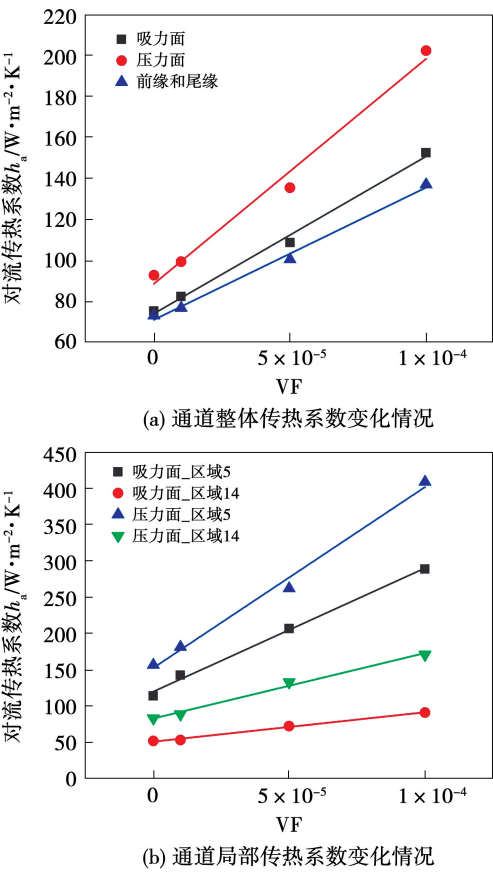


图 9 通道传热系数与纳米颗粒体积分数之间的关系

Fig. 9 Relations between channel heat transfer coefficient and nanoparticle volume fraction

由图 9 可见,通道压力面侧的传热系数受纳米颗粒体积分数的影响更为明显,而前缘和尾缘侧在三者中提升最小,与传热系数云图的规律一致。加入体积分数为 1×10^{-4} 的纳米颗粒的工况相比于单相空气时,压力面平均传热系数提升了约 118%,吸力面提升了 102% 左右,而前缘和尾缘侧仅提高了约 87%。未加入纳米颗粒时,前缘和尾缘侧传热系数低于其他两面。这也说明加入纳米颗粒并不改变工质的基本流动规律,其传热强化效果建立在原有的湍流结构基础之上。在本文所选的纳米颗粒体积分数范围内,总体传热系数与颗粒体积分数呈近似线性增长的关系,这与纳米气溶胶的导热系数与比热容变化有一定的关系。

2.2 纳米颗粒传热强化机理分析

表 1 为不同纳米颗粒体积分数下,纳米气溶胶导热系数 λ_{nf} 及密度和比定压热容的乘积值 $(\rho \cdot c_p)_{nf}$ 的变化情况。其中密度和定压比热容的乘积值 $(\rho \cdot c_p)_{nf}$ 常用于基液为液体的纳米流体的传热性能分析,因此本文选用此参数对纳米气溶胶的传热性能进行研究。 λ_{nf} 定义为:

$$\lambda_{nf} = \max(\lambda, \lambda_{\tau}) \tag{1}$$

式中: λ —工质静止时测得的导热系数; λ_{τ} —工质湍流导热系数。

热容 $(\rho \cdot c_p)_{nf}$ 定义为:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - VF)(\rho c_p)_g + VF(\rho c_p)_{np} \tag{2}$$

式中: 下标 g 和 np 分别代表空气和纳米颗粒; ρ —密度; c_p —比定压热容; VF —颗粒体积分数。

表 1 纳米气溶胶导热系数 λ_{nf} 与热容 $(\rho \cdot c_p)_{nf}$ 的变化情况

Tab. 1 Variation of thermal conductivity coefficient λ_{nf} and heat capacity $(\rho \cdot c_p)_{nf}$ of nano-aerosols		
VF	$\lambda_{nf}/10^{-2}$ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$(\rho \cdot c_p)_{nf}/$ $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
0	2.460 11	1 046.84
1×10^{-5}	2.821 10	1 078.18
5×10^{-5}	4.425 68	1 217.26
1×10^{-4}	6.431 71	1 390.66

由表 1 可以看出,相较于单相空气,纳米气溶胶的导热系数及密度和定压比热容的乘积值都有明显

提升,最大导热系数提升比约为 161.44%,最大密度和定压比热容的乘积值提升比约为 32.84%。二者在整体上提升了纳米气溶胶的传热性能,是纳米颗粒传热强化能力最直观的影响因素之一。

由于加入纳米颗粒并未对内部冷却通道中的基本流动规律造成明显影响,所以需要进一步分析湍流与边界层的变化。图 10 为距离吸力面 1 mm 处的湍动能分布情况。由图 10 可知,湍动能分布情况与表面传热系数分布情况存在一致性。随着纳米颗粒体积分数的增加,工质湍动能不断增加,壁面附近湍流也不断增强,从而在一定程度上强化了传热。这也说明了工质的湍流动能随着颗粒体积分数的增大而增加。同样,纳米颗粒对于湍动能的提升受到几何结构的限制,在本身流速较低或者涡发展不充分不剧烈的区域(如弯头处回流区与肋下游等区域),纳米颗粒对湍动能的提升也十分有限,从而限制了其在该区域的传热强化效果。由此可见,纳米颗粒对流体湍流的强化作用与流体自身的湍流结构相关。

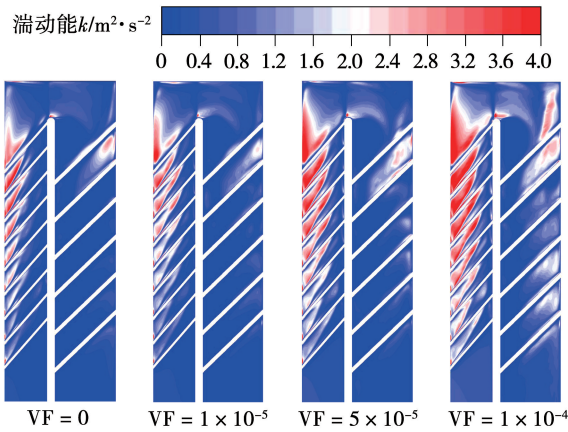


图 10 距离吸力面 1 mm 处的湍动能分布情况
Fig. 10 Turbulent kinetic energy distribution at 1 mm from suction surface

由于本文使用的纳米颗粒直径与体积分数都很小,在实际工程中可以忽略颗粒与空气之间的相对运动,因此计算中也可视作二者无相对运动,纳米颗粒对传热的强化机理来源于对边界层的影响。为了将肋对边界层的影响与颗粒对边界层的影响解耦,本文针对 VF 为 0, 1×10^{-5} , 5×10^{-5} 和 1×10^{-4} 的 4 种不同纳米颗粒体积分数的情况,选取进口截面与

通道吸力面侧肋 1 之间的中心位置点、进口截面与压力面侧肋 1 之间的中心位置点和通道吸力面侧肋 1 与肋 2 之间壁面中心位置点,计算空气组分在该处空气无量纲速度 u^+ 和空气无量纲温度 T^+ 的分布情况并进行比较。 u^+ 定义为^[23]:

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} \tag{3}$$

式中: U_t —空气组分在距离壁面高度为 y 时的切向速度; u_τ —壁面摩擦速度,定义为湍流切应力与空气密度比值的平方根。

T^+ 定义为^[23]:

$$T^+ = \frac{\rho_g c_{p,g} u_\tau (T_w - T_g)}{q_w} \tag{4}$$

式中: ρ_g —空气密度; $c_{p,g}$ —空气比定压热容; T_g —空气总温; T_w —壁面温度; q_w —壁面热流密度。

通道中某一点距离壁面的无量纲高度 y^+ 定义为^[23]:

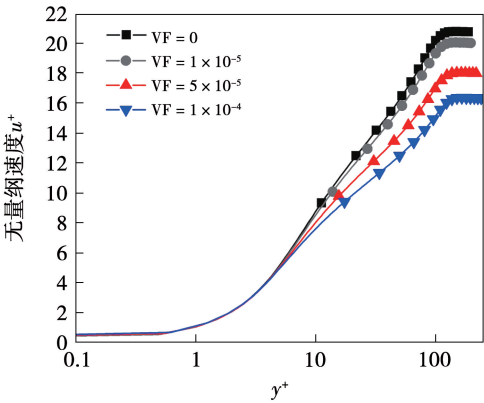
$$y^+ = \frac{\rho_g \Delta y u_\tau}{\mu_g} \tag{5}$$

式中: Δy —通道中某一点距离壁面的高度; μ_g —空气动力粘性系数。

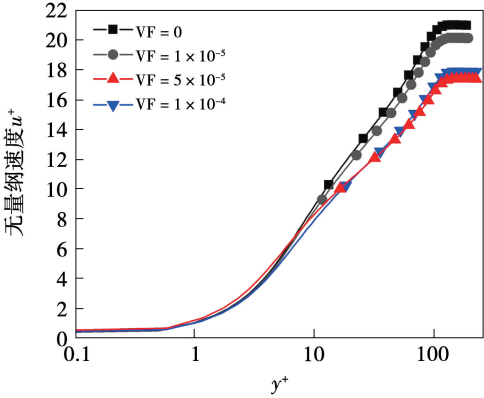
图 11 为壁面上方无量纲速度的分布情况。加入纳米颗粒后,空气达到相同的 u^+ 所需要的 y^+ 随纳米颗粒体积分数增加而增大。由于充分发展的湍流边界层可以近似认为是恒定应力层,而 y^+ 可以代表雷诺应力与粘性应力之比。 y^+ 增大意味着惯性力对流动的影响越来越起主导作用,流体流动向着不稳定的方向发展,更容易发展为湍流^[23]。加入纳米颗粒使得 u^+ 不变的情况下边界层更容易向湍流发展,从而在一定程度上强化了传热。而在肋 1、肋 2 之间壁面中心点上方, u^+ 值普遍低于肋 1 之前壁面中心点上方的 u^+ 值,说明肋 1 之后的湍流发展更剧烈。由于肋两侧会形成涡并不断发展,然后与主流融合,导致肋之间的涡系结构变得十分复杂,湍流的发展比入口段更为剧烈。这导致肋后的流动情况与进口段充分发展的湍流边界层存在差异,扰乱了 VF 对 u^+ 和 y^+ 分布规律的影响机理。由此可见,纳米颗粒对壁面边界层的影响规律也与流体本身的湍流结构有关。从工程角度来看,加入纳米颗粒可以使得流动向湍流迅速发展、强化壁面传热,能够在一定

定程度上取代诸如肋条等冷却强化结构,同时实现强化冷却和降低阻力损失的目标。

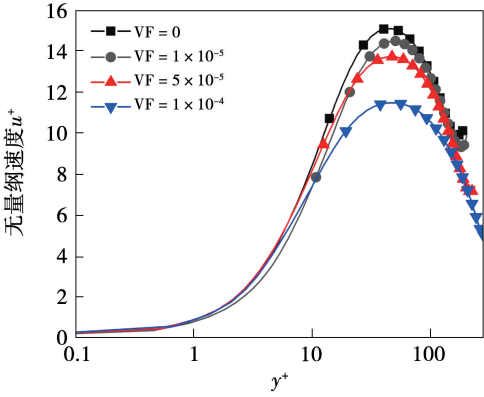
壁面温度更接近。在热边界层中,尤其是核心区, T^+ 与 y^+ 和普朗特数 Pr 的大小呈正相关^[24]。



(a) 进口与吸力面肋1之间中心点上方

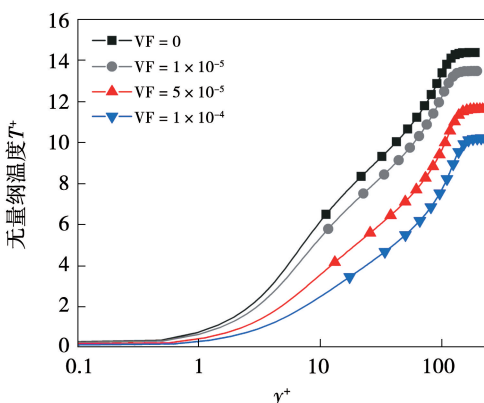


(b) 进口与压力面肋1之间中心点上方

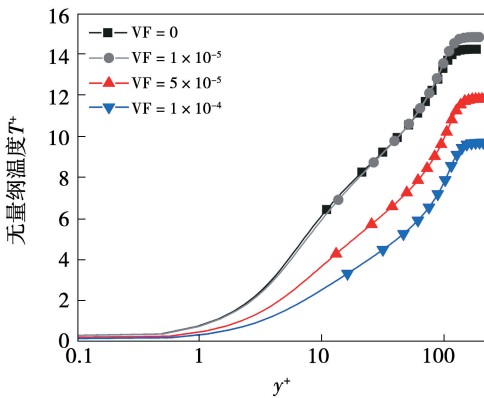


(c) 吸力面肋1与肋2之间中心点上方

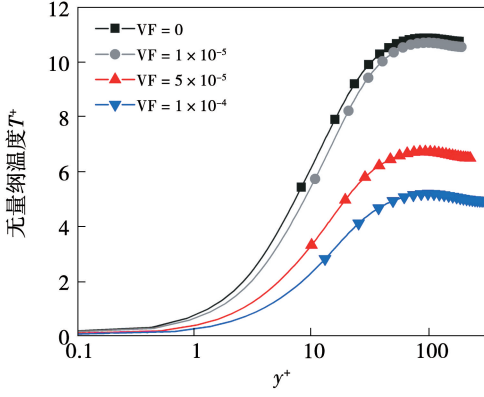
图 11 壁面上方无量纲速度 u^+ 的分布情况
Fig. 11 Distributions of dimensionless velocities
above wall surface



(a) 进口与吸力面肋1之间中心点上方



(b) 进口与压力面肋1之间中心点上方



(c) 吸力面肋1与肋2之间中心点上方

图 12 壁面上方无量纲温度 T^+ 的分布情况
Fig. 12 Distributions of dimensionless temperature
above wall surface

图 12 反映壁面上方位置处的无量纲温度 T^+ 与无量纲高度 y^+ 的关系,位置与图 11 相同。由图可见,空气的 T^+ 随着纳米颗粒体积分数的增加而下降。在 y^+ 相同的位置,即边界层中相对高度相同的位置, T^+ 越小则代表传热效果越好,即空气温度与

在热边界层中 y^+ 相同的点上, T^+ 越小意味着 Pr 越小,即湍流中热传导比动量传输更为明显,相应热边界层中的传热也就越强。一方面,图 12 (a) 和 12 (b) 表明,进口与吸力面肋 1 和压力面肋 1 之间中心点上方 T^+ 的分布规律很接近,说明吸力面与

压力面附近热边界层发展情况也是类似的,而吸力面肋 1 与肋 2 之间中心点上方的 T^+ 普遍低于肋 1 之前壁面中心点上方的值,说明肋 1 与肋 2 之间的热边界层变化更剧烈,这与肋前后区域的湍流发展情况是一致的。另一方面,不同纳米颗粒体积分数下肋 1 和肋 2 之间中心点上方 T^+ 的相对大小关系并未改变。这意味着纳米颗粒对热边界层的影响受几何结构的限制较小,与颗粒影响湍流发展的传热强化机理具有一定的叠加性。

3 个点的传热系数大小如表 2 所示, T^+ 越小的情况对应的壁面中心点处传热系数也越高。表 2 中纳米颗粒体积分数低于 5×10^{-5} 时,肋 1、肋 2 间壁面中心点的传热系数在 3 个点中最低,随着纳米颗粒体积分数上升,该点的传热系数逐渐增长至高于另外两点,这也说明肋 1、肋 2 间壁面中心点处的传热强化不仅来源于热边界层的变化,还受到流动边界层变化的影响。

表 2 中心点处的传热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
Tab. 2 Heat transfer coefficients at centre point ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)

VF	进口与吸力面	吸力面肋 1 与	进口与压力面
	肋 1 之间 中心点	肋 2 之间 中心点	肋 1 之间 中心点
0	82.702 7	68.128 9	82.539 5
1×10^{-5}	90.350 7	70.410 7	89.921 3
5×10^{-5}	120.100 0	119.353 0	112.835 0
1×10^{-4}	166.824 0	206.976 0	165.010 0

2.3 综合传热性能评价

图 13 为通道总压损失值 Δp 与纳米颗粒体积分数之间的关系。由图 13 (a) 可知,通道总压损失值随纳米颗粒体积分数变化近似呈线性增长。加入纳米颗粒后, Δp 最大增加了约 78%。在通道多个肋与 180° 弯头结构已经造成一定总压损失的情况下,加入纳米颗粒引入的总压损失十分显著,这对于流动是非常不利的,在实际运用中需要提高泵送压力或者减少冷却强化结构来克服这一影响。为了判断纳米颗粒的传热强化效果是否大于其引起的总压损失,需要对纳米气溶胶的综合传热性能进行评价。

本文采用以下公式评价纳米气溶胶的综合传热强化性能 (PEC)^[25]:

$$PEC = \frac{Nu_e / Nu_r}{f_e f_r^k}$$
 (6)

式中:下标 e 和 r — 传热强化值和参考值,参考值通常来源于光滑或平直表面下的计算值; f — 阻力系数;上标 k — k 次方。 k 随着评价方法的不同而变化,等泵功条件下 k 为 $1/3$,等压降条件下 k 为 $1/2$,等流量条件下 k 为 1 。

阻力系数 f 定义为:

$$f = \frac{\Delta p d_{h,in}}{l} \cdot \frac{2g}{u_{in}^2}$$
 (7)

式中: $d_{h,in}$ —进口面水力直径; l —通道中心线总长; g —重力加速度; u_{in} —进口速度。

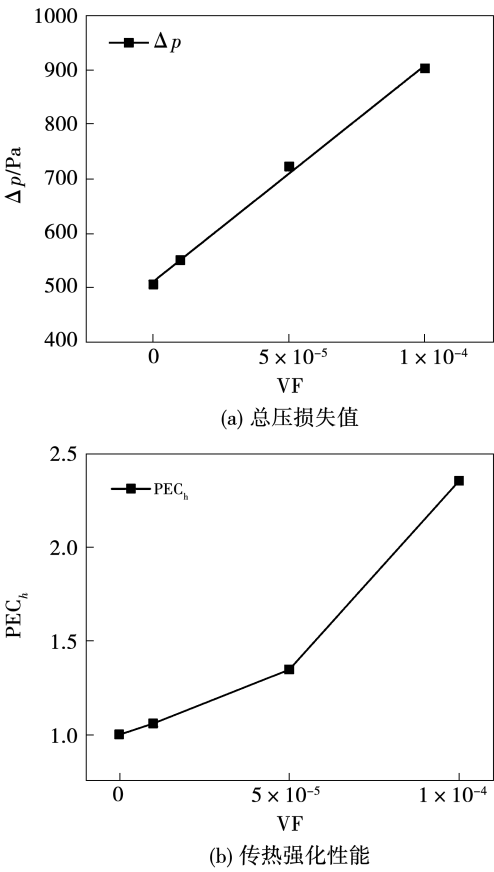


图 13 通道总压损失值和传热强化性能随纳米颗粒体积分数的变化曲线
Fig. 13 Variation curves of total channel pressure loss value and heat transfer enhancement performance with nanoparticle volume fraction

加入纳米颗粒虽然使得壁面传热系数增大,但

是工质的整体导热系数也会上升,所以使用该标准时分子用努塞尔数之比无法反映出纳米颗粒强化传热的能力。因此,本文选择将分子改为传热系数 h 之比,故上式变为:

$$PEC_h = \frac{h_e/h_r}{(f_e/f_r)^k} \quad (8)$$

式中:下标 h — 对流传热系数 h 。

本文选择 $VF=0$ 时的平均值作为参考值,故 $VF=0$ 时通道整体平均指标值为 1。实际应用中等泵功条件下的评价较为常用,因此本文也在此条件下进行评价,结果如图 13(b) 所示。加入纳米颗粒后,通道整体传热强化评价指标值最高提升了 135% 左右。这说明在增加通道总压损失值的前提下,纳米颗粒对通道传热性能的提升更为显著。综合来看,采用纳米气溶胶能够有效地强化内部通道的传热性能,有利于叶片的冷却。

3 结 论

本文分析了纳米气溶胶的流动传热特性以及其影响机理,论证了纳米气溶胶的应用潜力和研究价值。得出以下结论:

(1) 纳米气溶胶具有远高于空气的对流传热性能,且具有与空气相似的流动特性。纳米气溶胶的传热强化效果与其中纳米颗粒的体积分数大致呈线性增长关系。在本文所选用的通道中,纳米颗粒并不改变工质的主要流动规律,而是通过提高工质的导热系数和热容提高了传热系数。

(2) 加入纳米颗粒使得边界层更易发展为湍流,从而对传热有所强化。纳米颗粒对气溶胶湍流的影响与气溶胶在通道中自身的湍流结构有关,在肋结构加剧通道内湍流的基础上,纳米颗粒进一步增强了这一强化效果。此外,加入纳米颗粒强化了边界层内的热传导,进而强化了传热,且两类边界层的强化机理存在可叠加性。

(3) 尽管纳米气溶胶的流动特性与空气类似,加入纳米颗粒仍使得工质流动阻力增大,引入了额外的总压损失。但在等泵功条件下的综合传热性能评价结果表明,加入纳米颗粒虽然引起了更大的阻力损失,但是总上传热强化效果更为明显。

参考文献:

- [1] LANGENER T, WOLFERSDORF J V, SELZER M, et al. Experimental investigations of transpiration cooling applied to C/C material [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 54: 70 – 81.
- [2] WAMBERSIE A, WONG H, IRELAND P, et al. Experiments of transpiration cooling inspired panel cooling on a turbine blade yielding film effectiveness levels over 95 [C]//Proceeding of 14th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics & Thermodynamics. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021.
- [3] PARBAT S, KANG B. Integrated transpiration and lattice cooling systems developed by additive manufacturing with oxide-dispersion-strengthened alloys [C]//Proceedings of 2021 University Turbine Systems Research (UTRS) Project Review Meeting, 2021.
- [4] ABDELMAKSOU R, WANG T. A numerical investigation of air/mist cooling in a conjugate, 3 – D gas turbine vane with internal passage and external film cooling [C]//Proceedings of ASME SHTC 2019: Summer Heat Transfer Conference, 2019.
- [5] WANG T, LI X, PINNINTI V, et al. Simulation of mist transport for gas turbine inlet air cooling [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2008, 53(9/10): 1013 – 1036.
- [6] LI X, WANG T. Two-phase flow simulation of mist film cooling with different wall heating conditions [C]//Proceeding of Annals of the Assembly for International Heat Transfer Conference 13. Begell House Inc, 2006.
- [7] LIVINGOOD J N, ELLERBROCK H H, KAUFMAN A. NASA turbine cooling research status report [R]. Report Number: NASA-TM-X-2384, 1971.
- [8] MA K Q, LIU J. Liquid metal cooling in thermal management of computer chips [J]. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2007, 1(4): 384 – 402.
- [9] MASUDA H, EBATA A, TERAMAE K, et al. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles [J]. Netsu Bussei, 1993, 7(4): 227 – 233.
- [10] CHOI S U S, EASTMAN J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [J]. Asme Fed, 1995, 231(1): 99 – 105.
- [11] WANG X, XU X. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2012, 13(13): 474 – 480.
- [12] 杨 星, 丰镇平. 带纳米气溶胶冷却的燃氢燃气轮机发电系统: CN115306563A [P]. 2022 – 11 – 08.
YANG Xing, FENG Zhenping. Hydrogen-fired gas turbine power generation system with nano-aerosol cooling: CN115306563A [P]. 2022 – 11 – 08.