

# Effects of Jet Impingement on Heat Transfer Characteristics of Rotating Disk

Yanglei Yu<sup>1</sup>, Dengfang Ruan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing

<sup>2</sup>The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing

Email: cqyuu@163.com, ruandf@cqu.edu.cn

Received: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

To investigate the effect of the jet impingement on the heat transfer characteristics of rotating disk, the heat transfer of rotating disk under different nozzle aperture, jet Reynolds number, disk Reynolds number, impact distance, injection angle and injection position was studied by using STAR-CCM+ software based on K-Epsilon turbulence and achievable K-Epsilon model. The simulation method was verified by comparing with experimental results. The results show that as the Reynolds number of the jet increases, the heat transfer increases. When the heat transfer area is large, the jet with a large aperture should be adopted. The ratio between injection distance and nozzle aperture has the best value. When the disk Reynolds number is high, the heat transfer coefficient increases slowly; there is the best injection angle and injection position to make the average temperature of disk be the minimum.

## Keywords

Rotating Disk, Heat Transfer, Jet Impingement, Numerical Calculation

# 射流冲击对旋转圆盘换热特性的影响

于洋磊<sup>1</sup>, 阮登芳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>重庆大学汽车工程学院, 重庆

<sup>2</sup>重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆

Email: cqyuu@163.com, ruandf@cqu.edu.cn

收稿日期: 2018年4月3日; 录用日期: 2018年4月23日; 发布日期: 2018年4月30日

## 摘要

为揭示射流冲击对旋转圆盘换热特性的影响, 基于K-Epsilon湍流及可实现的K-Epsilon模型, 利用

文章引用: 于洋磊, 阮登芳. 射流冲击对旋转圆盘换热特性的影响[J]. 机械工程与技术, 2018, 7(2): 119-129.

DOI: 10.12677/met.2018.72015

STAR-CCM+对不同喷嘴孔径、射流雷诺数、旋转雷诺数、冲击距离、喷射角度、喷射位置等因素作用下的旋转圆盘换热进行了研究,并与实验对比验证了仿真方法。研究表明:射流雷诺数增大,圆盘换热增强;换热面积较大时,宜采用孔径大的射流;射流距离与喷嘴孔径之比存在最佳值;在高旋转雷诺数时,换热系数增幅较缓;存在最佳喷射角度及位置使圆盘平均温度为最小。

## 关键词

旋转圆盘, 换热, 射流冲击, 数值计算

Copyright © 2018 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. 引言

旋转圆盘是旋转机械中最简单且应用广泛的结构,涡轮叶片、刹车盘、工件加工等都是该模型应用的实例[1] [2]。射流冲击是一种极其有效的强化局部传热或传质的方法[3] [4],射流冲击的剪切效应和旋转圆盘在其周围产生的轴对称壁射流的相互作用可产生非常复杂和剧烈的流动,能够显著改善传热过程,因此对具有射流冲击的旋转圆盘进行研究具有重要的学术和工程应用价值[5]。

自 1921 年 Von Karman 对旋转圆盘系统进行研究以来[6],众多学者对其进行了实验和理论分析。Carper [7]对液体垂直冲击温度均匀的旋转圆盘进行了实验,研究了圆盘的平均换热系数,Thomas 等[8] [9]对于有无旋转的圆盘边界层热特性进行了流体动力学及热力学分析。Rahman [10]分析了恒定角速度旋转圆盘附近薄液膜的换热过程,计算了旋转圆盘液膜附近的换热系数。Yan 等[11]对不同倾斜角度射流冲击下的圆盘换热特性进行了实验研究,评估了射流角度对换热特性的影响。Saniei 等[12] [13]研究了四种垂直射流距离的旋转圆盘的换热系数,提出了空气射流冲击旋转圆盘的局部换热系数的测量方法。Moner 等[14]利用实验研究了射流距离、雷诺数、圆盘角度等对圆盘局部换热特性的影响。Friedrich 等[15] [16] [17]对两相冲击射流的旋转圆盘换热进行了实验。尽管针对射流冲击下的旋转圆盘已经进行了大量的实验研究,但试验测试成本高,测试样本有限,难以获得各参数对系统的影响规律。为此,笔者在验证仿真方法基础上,基于 STAR-CCM+软件对喷嘴孔径、射流雷诺数、旋转雷诺数、冲击距离、喷射角度、喷射位置等影响因素对旋转圆盘换热特性的影响进行了系统研究,获得了各个因素对圆盘换热特性的影响规律,所得结论对旋转圆盘系统的热特性设计具有一定的指导作用。

## 2. 模型建立

### 2.1. 几何模型

图 1 是具有中心射流冲击的旋转圆盘物理模型示意图,由圆盘、喷管、空气域组成,圆盘周围加旋转域,射流为空气介质。在各区域间设置 Interfaces,来实现接触换热。通过试算后选取外环境域尺寸,长为 3000 mm,宽为 2200 mm,高为 3000 mm,该尺寸在保证对圆盘周围流场无影响的情况下可实现较高的计算效率。

对于非垂直及非中心射流,几何模型如图 2(a)所示,喷管轴线通过圆盘中心,喷管与圆盘间角度为  $\alpha$ ,在图 2(b)中,喷管轴线与圆盘表面垂直,与圆盘轴心线距离为  $H$ 。

通过改变喷嘴孔径  $d$ 、射流冲击距离  $z$ 、喷射角度  $\alpha$ 、偏移圆盘轴心距离  $H$  等几何参数,设计不同

的物理模型来进行研究, 变量参数设置范围如表 1 所示。

## 2.2. 仿真模型

图 3 所示为流体域网格模型, 采用 STAR-CCM+ 软件生成“蜂窝”状多面体网格, 它有更多的相邻单元, 梯度计算及流动状况预测更准确, 收敛速度也更快。圆盘表面网格最小尺寸为 1 mm, 目标尺寸为 2 mm, 空气域网格最小尺寸为 2 mm, 目标尺寸为 50 mm, 圆盘周围旋转域及射流区域进行网格加密, 对于近壁面区域, 设置边界层, 厚度为 1 mm, 为控制体网格数量, 设置增长率为 1.2。网格总数大约为 300 万。

喷嘴射流设为速度入口, 射流雷诺数  $Re_j$  取值范围为 10,000~20,800, 湍流粘度比为 10, 温度为环境温度; 空气域边界设为压力出口, 为标准大气压, 温度为环境温度; 圆盘匀速旋转, 旋转雷诺数  $Re_R$  取

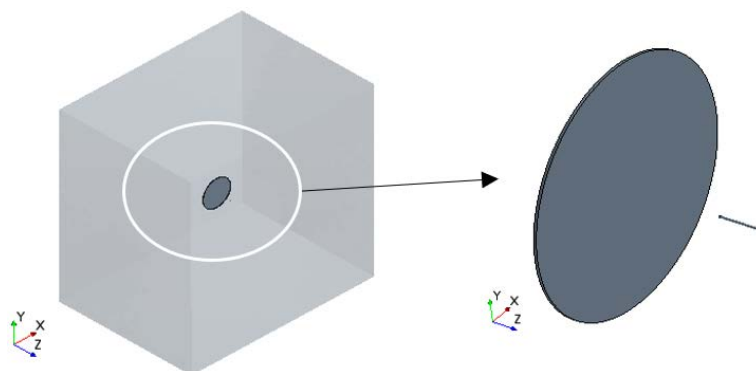


Figure 1. Schematic diagram of physical model

图 1. 物理模型示意图

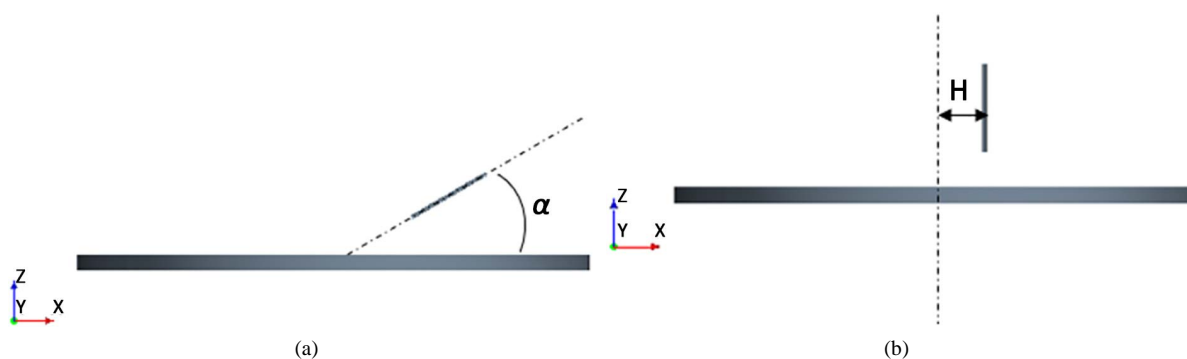


Figure 2. Schematic diagram of the physical model of non central vertical jet; (a) Different injection angles; (b) Different injection position

图 2. 非中心垂直射流物理模型示意图; (a) 不同喷射角度; (b) 不同喷射位置

Table 1. Parameter range of variable

表 1. 变量参数范围

变量	最小值	最大值	间隔
$d$	4 mm	8 mm	2 mm
$z$	40 mm	640 mm	20 mm
$\alpha$	30°	90°	15°
H	0 mm	180 mm	45 mm

值范围为 50,000~300,000; 圆盘壁面采用无滑移边界, 在圆盘靠近射流一侧设置恒定热流量。

$$\text{Re}_j = \frac{Vd}{\nu} \quad (1)$$

$$\text{Re}_R = \frac{\omega R^2}{\nu} \quad (2)$$

式中,  $\nu$  为空气运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $R$  为圆盘半径,  $\text{mm}$ 。

采用 STAR-CCM+ 分离流进行三维稳态求解, 圆盘在旋转及射流冲击下, 流场内有较强的剪切及湍流, 采用雷诺平均 Navier-Stokes、K-Epsilon 湍流及可实现的 K-Epsilon 两层模型, 对于近壁面区域, 采用两层  $y+$  壁面处理及精准壁面距离。

### 3. 仿真方法验证

为验证仿真方法的正确性与计算精度, 参考文献[1]建立了具有射流冲击的旋转圆盘仿真模型, 圆盘直径为 450 mm, 厚度为 0.3 mm, 喷嘴孔径  $d = 4 \text{ mm}$ , 射流雷诺数  $\text{Re}_j = 188000$ , 旋转雷诺数  $\text{Re}_R = 20800$ ,  $z/d = 42.5$ , 环境温度为  $15^\circ\text{C}$ , 热流量  $q_j = 1720 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

图 4 为仿真与实验的结果对比图, 圆盘中心处温度最小, 沿径向向外逐渐增加, 仿真与实验测试结果变化趋势一致, 数值大小吻合较好, 最大误差为  $3.3^\circ\text{C}$ 。

## 4. 结果与分析

### 4.1. 射流雷诺数的影响

图 5 是  $\text{Re}_R$  为 188,000,  $z$  为 240, 热流量  $q_j$  为  $1720 \text{ W}/\text{m}^2$  时圆盘表面平均温度随  $\text{Re}_j$  和喷嘴直径  $d$  的变化趋势, 从图中可以看出, 随着射流雷诺数增大, 圆盘表面平均温度逐渐降低, 且雷诺数越高, 温度降低幅度逐渐减小, 这是由于高雷诺数时, 随雷诺数增大, 轴向射流速度增大, 到达圆盘表面的速度随之增大, 换热效果增强; 相对于喷嘴直径为 4 mm, 喷嘴直径为 6 mm 和 8 mm 时的圆盘表面平均温度较低。图 6 为圆盘表面平均换热系数随  $\text{Re}_j$  和喷嘴直径  $d$  的变化趋势, 同样可知, 圆盘表面平均换热系数呈增大趋势, 增幅随雷诺数增大而减小, 喷嘴直径为 8 mm 时的换热系数相对其它两种喷嘴直径较大, 圆盘表面换热强, 冷却效果更明显。

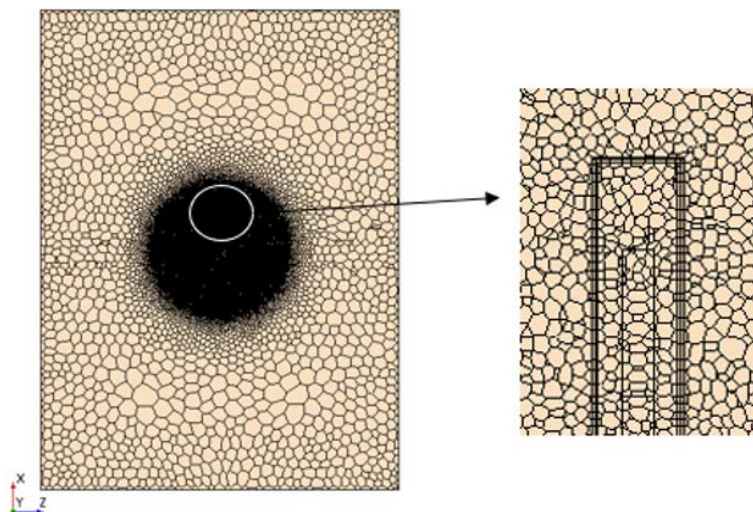
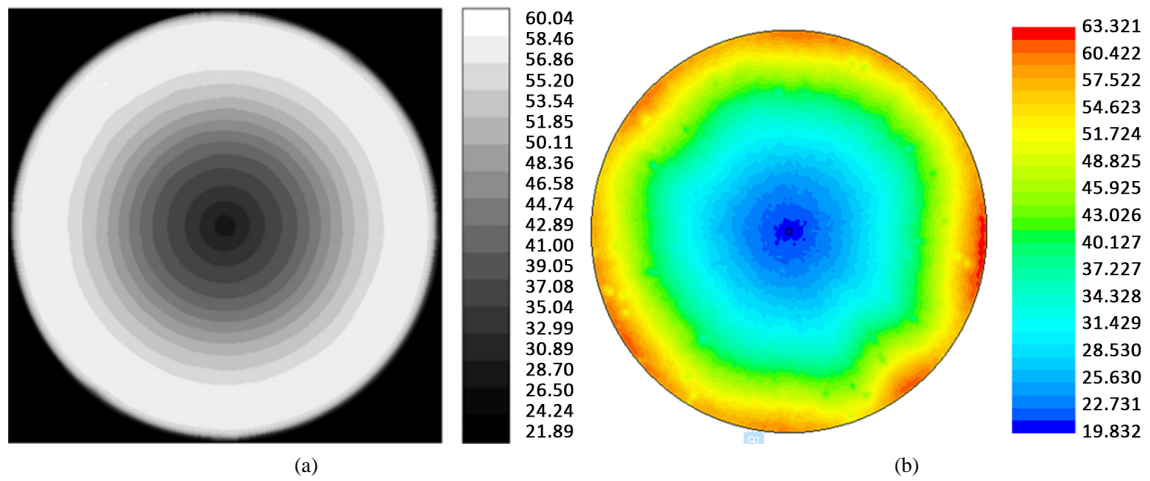


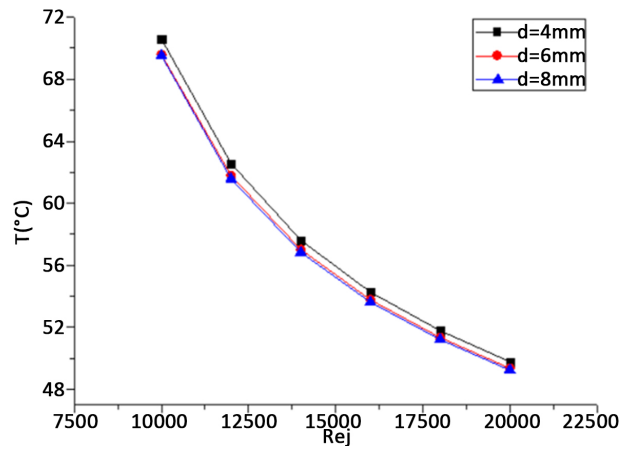
Figure 3. Schematic diagram of mesh model

图 3. 网格示意图



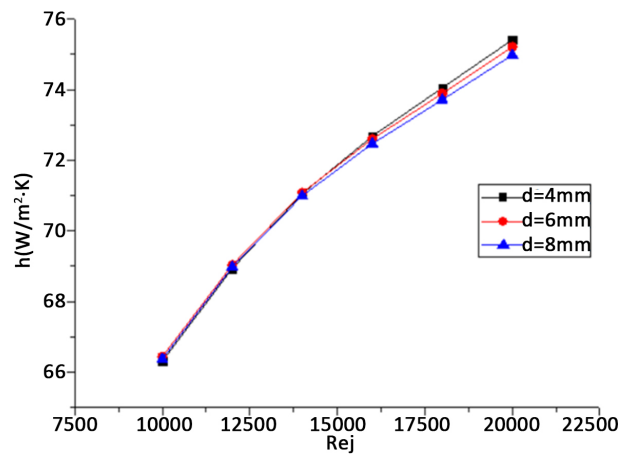
**Figure 4.** Comparison between simulation and experimental results of disk surface temperature; (a) Experimental result; (b) Simulation result

**图 4.** 圆盘表面温度仿真与实验结果对比图; (a) 实验结果; (b) 仿真结果



**Figure 5.** Variation of surface average temperature with the  $Re_j$

**图 5.** 表面平均温度随  $Re_j$  的变化



**Figure 6.** Variation of average heat transfer coefficient of surface with the  $Re_j$

**图 6.** 表面平均换热系数随  $Re_j$  的变化

### 4.2. 射流冲击距离的影响

图 7 和图 8 是  $Re_R$  为 188,000,  $Re_j$  为 20,800, 热流量  $q_j$  为  $1720 \text{ W/m}^2$  时圆盘表面平均温度及平均换热系数随  $z/d$  的变化趋势, 从图中可看出, 随  $z/d$  增大, 圆盘表面平均温度逐渐降低, 降幅逐渐减小, 如图 9 流线图所示, 由于圆盘高速旋转, 产生的气旋对于射流冲击有一定的阻碍作用, 当喷嘴距离圆盘表面较近时, 气旋对射流阻碍作用较大, 射流冲击的冷却作用受限。随着距离的增大, 阻碍作用减小, 圆盘表面的冷却效果增强, 当  $z/d$  大于 60 时, 由于射流距离较远, 冷却效果反而下降; 随着喷嘴孔径的增大, 冷却效果愈好, 在相同雷诺数时, 射流速度与喷嘴孔径成反比, 喷嘴孔径大时, 射流速度较小, 但射流过流面积较大, 到达圆盘表面的射流范围较广, 如果换热面积较大, 宜采用喷嘴孔径较大的射流, 从而使圆盘表面的温度分布更均, 有更好的冷却效果。

### 4.3. 旋转雷诺数的影响

图 10 和图 11 是  $d$  为 4 mm,  $Re_j$  为 10,000, 热流量  $q_j$  为  $1720 \text{ W/m}^2$  时圆盘表面平均温度及表面平均

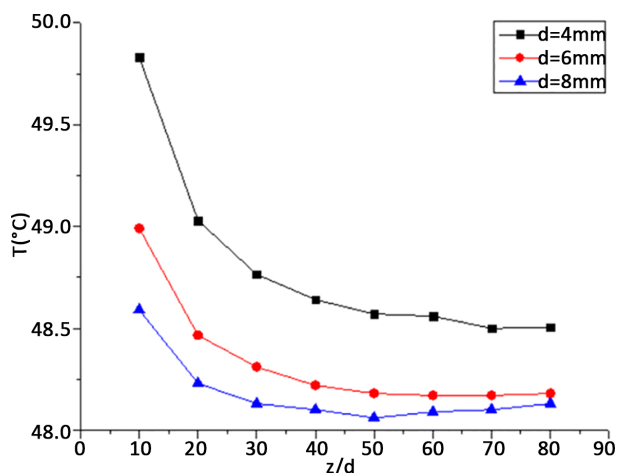


Figure 7. Variation of surface average temperature with the  $z/d$

图 7. 表面平均温度随  $z/d$  的变化

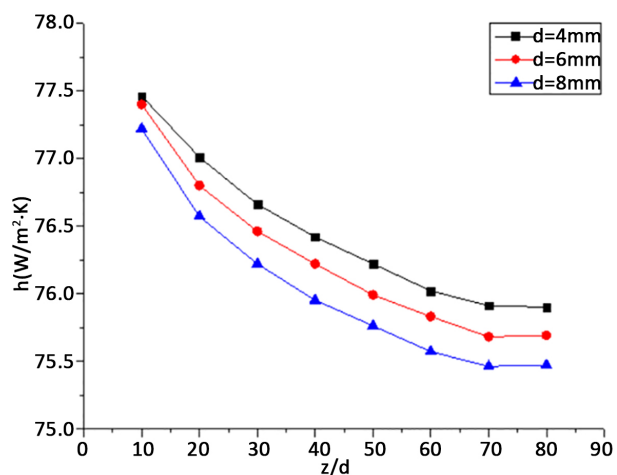


Figure 8. Variation of average heat transfer coefficient of surface with the  $z/d$

图 8. 表面平均换热系数随  $z/d$  的变化



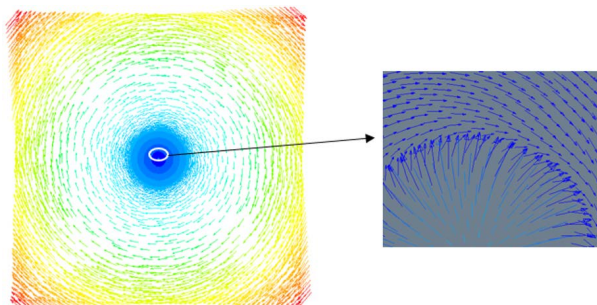


Figure 9. Streamline diagram near the surface of the disk  
图 9. 圆盘表面附近流线图

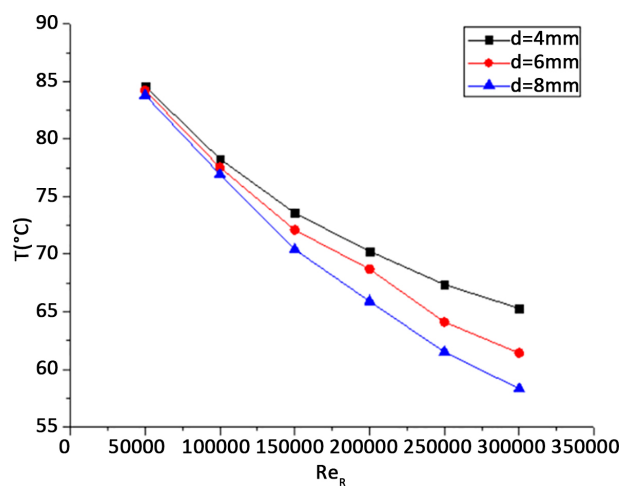


Figure 10. Variation of surface average temperature with the  $Re_R$   
图 10. 表面平均温度随  $Re_R$  的变化

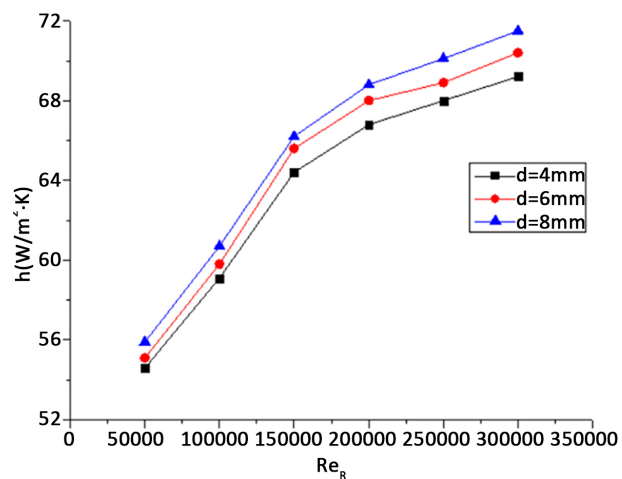


Figure 11. Variation of average heat transfer coefficient of surface with the  $Re_R$   
图 11. 表面平均换热系数随  $Re_R$  的变化

换热系数随  $Re_R$  的变化趋势, 从图中可知, 圆盘表面平均温度在射流速度不变时随旋转雷诺数的增大而减小, 圆盘表面平均换热系数随旋转雷诺数的增大而增大, 在高旋转雷诺数时, 圆盘表面换热系数增幅变缓, 继续增加旋转雷诺数对圆盘换热性能的改善有限。

#### 4.4. 喷射角度的影响

图 12 是  $d$  为 4 mm,  $Re_R$  为 188,000,  $Re_j$  为 10,000,  $z$  为 40, 热流量  $q_j$  为  $1720 \text{ W/m}^2$  时圆盘在不同射流喷射角度下的表面温度云图, 从图中可以看出, 不同喷射角度对旋转圆盘表面温度分布影响较大, 在圆盘左侧, 射流冷却效果较好, 随喷射角度增大, 圆盘表面温度分布逐渐均匀, 温度梯度减小。图 13 为圆盘表面平均换热系数随射流喷射角度变化的趋势图, 由图知, 随射流喷射角度增大, 圆盘表面平均换热系数逐渐增大, 喷射角度为  $90^\circ$  时, 圆盘表面平均换热系数为最大。

#### 4.5. 喷射位置的影响

图 14 是  $d$  为 4 mm,  $Re_R$  为 188,000,  $Re_j$  为 10,000,  $z$  为 40, 热流量  $q_j$  为  $1720 \text{ W/m}^2$  时圆盘在不同射流喷射位置下的表面温度云图, 从图中可以看出, 不同喷射位置对旋转圆盘表面最低温度影响极小, 对其最大温度影响相对较大, 随喷射位置偏离圆盘轴心距离增加, 圆盘表面最大温度逐渐增大, 喷射位置为圆盘中心时, 圆盘表面平均温度为最小, 圆盘上最低温度区域始终为喷管轴线与圆盘交汇区域。图 15 为圆盘表面平均换热系数随喷射位置变化的趋势图, 由图知, 圆盘表面平均换热系数随  $H/d$  增大而减小, 喷射位置为圆盘中心时, 圆盘表面平均换热系数为最大。

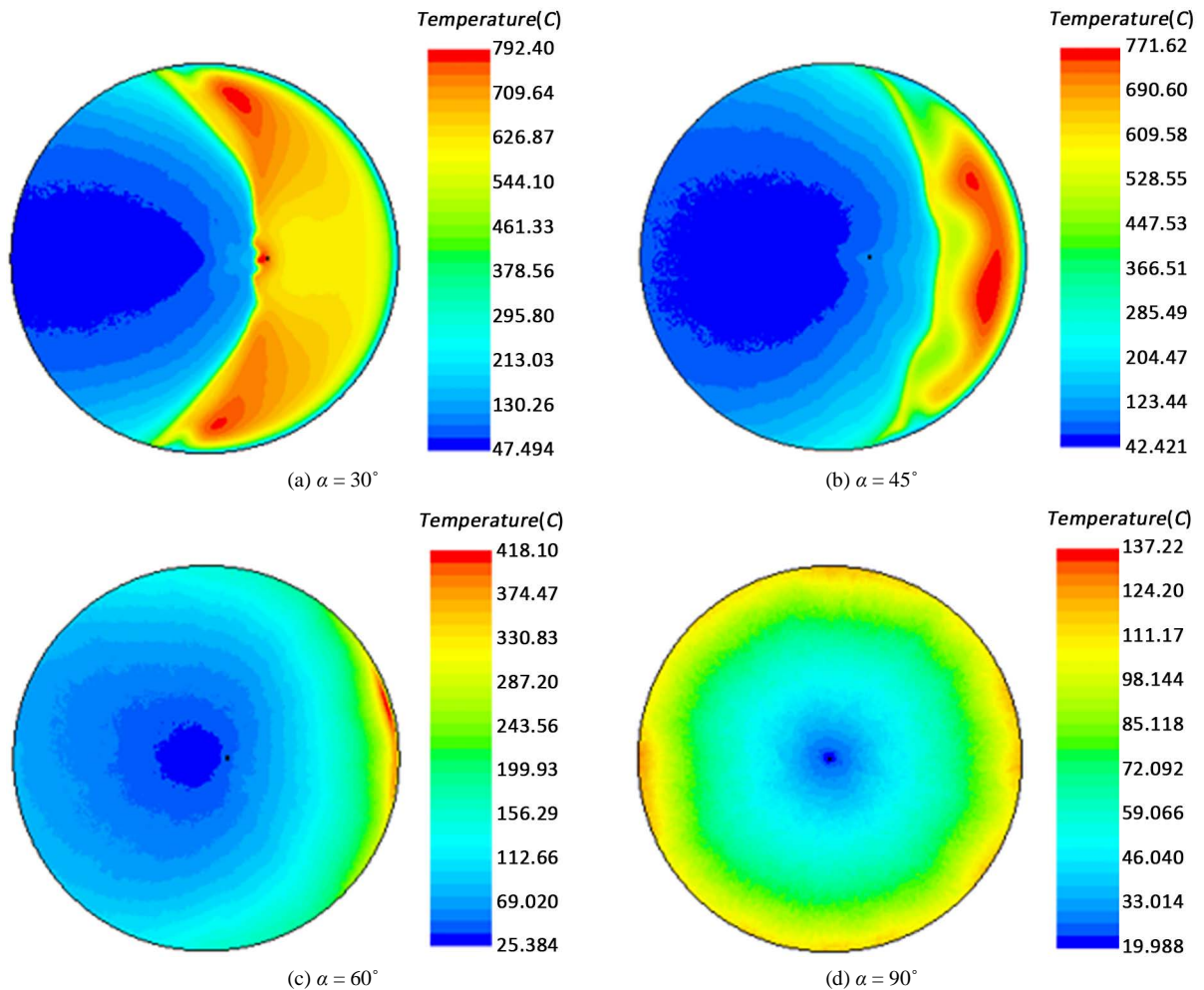
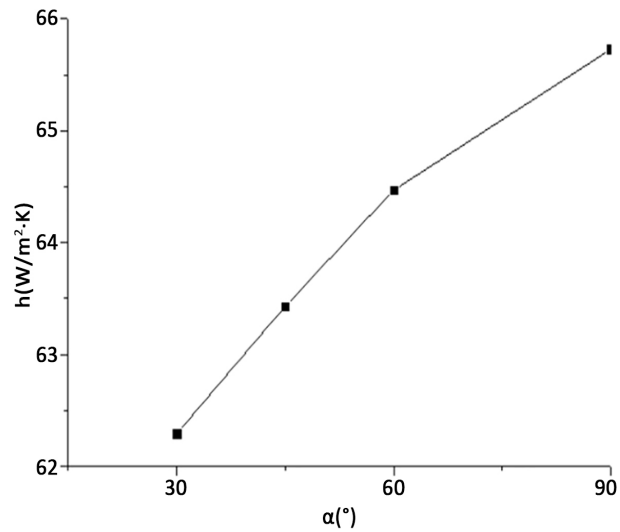


Figure 12. Temperature nephogram of disc surface at different angle of injection

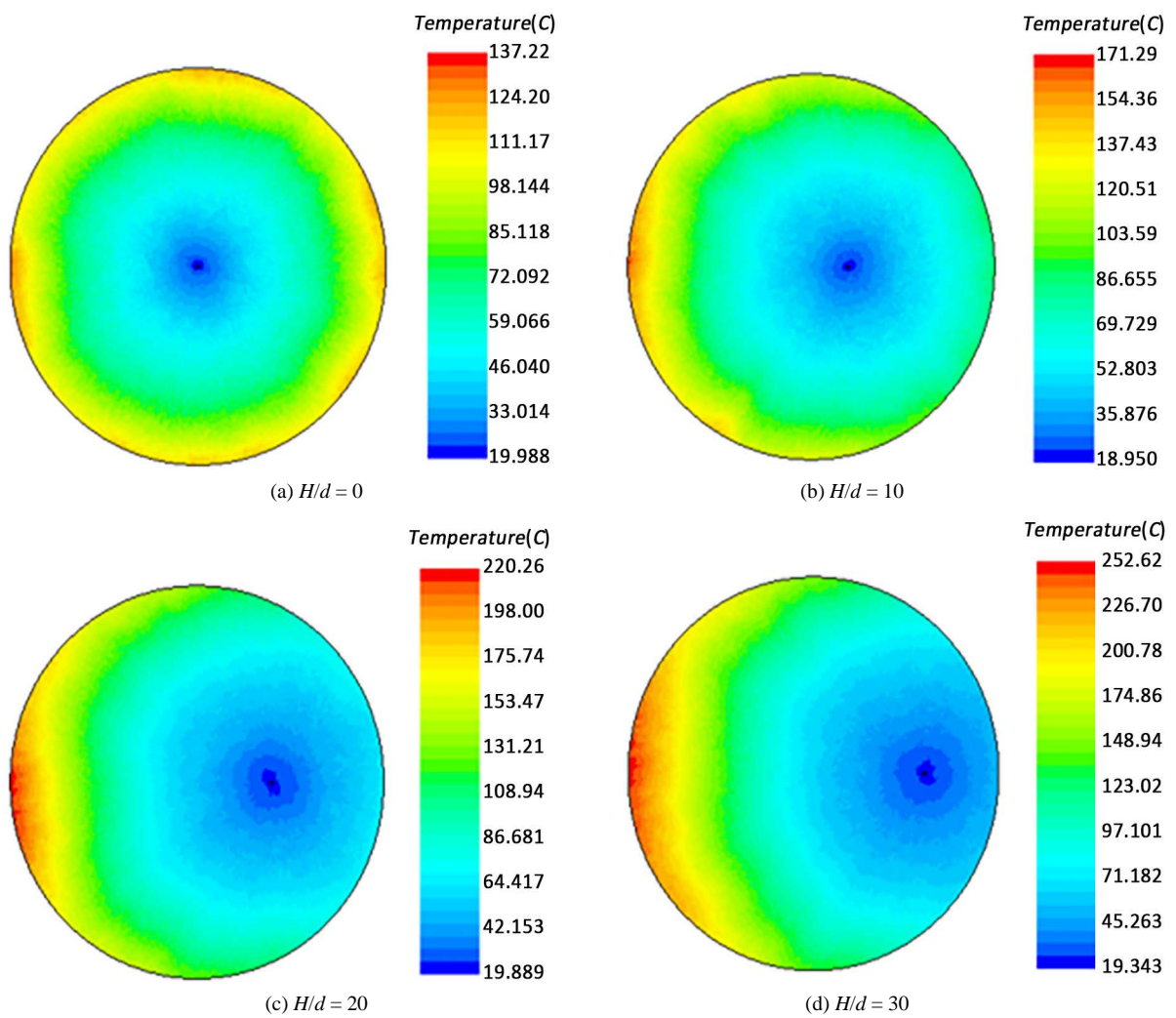
图 12. 不同喷射角度圆盘表面温度云图

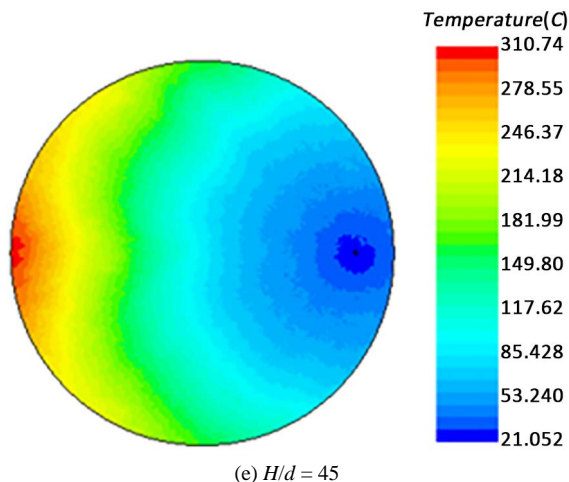




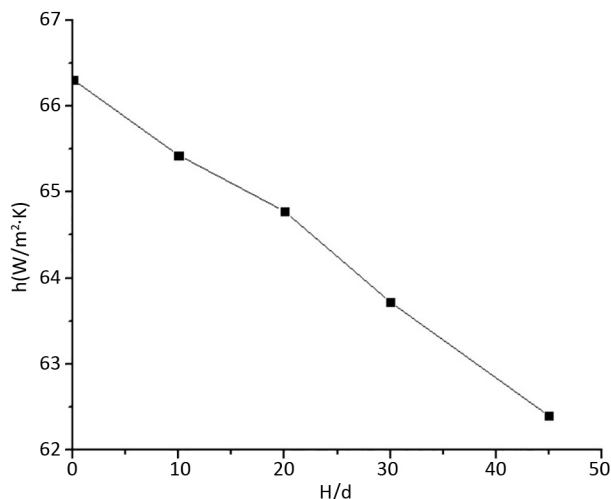
**Figure 13.** Variation of average heat transfer coefficient of surface with injection angle

**图 13.** 表面平均换热系数随喷射角度  $\alpha$  的变化





**Figure 14.** Temperature nephogram of disc surface at different position of injection  
**图 14.** 不同喷射位置圆盘表面温度云图



**Figure 15.** Variation of average heat transfer coefficient of surface with the injection location  
**图 15.** 表面平均换热系数随喷射位置的变化

## 5. 结论

- 1) 随射流雷诺数增大, 圆盘表面平均换热系数增大, 射流雷诺数越高, 平均换热系数增加幅度变缓。
- 2) 圆盘表面平均换热系数随旋转雷诺数的增大而增大, 在高旋转雷诺数时, 圆盘表面换热系数增幅变缓, 继续增加旋转雷诺数对圆盘换热性能的改善有限。
- 3) 射流距离与喷孔直径之比  $z/d$  存在最佳值, 过大或过小都会使圆盘的换热性能变差。
- 4) 随射流喷射角度增大, 圆盘表面温度分布逐渐均匀, 温度梯度减小, 圆盘表面平均换热系数逐渐增大。随喷射位置偏离圆盘轴心距离增加, 圆盘表面最大温度逐渐增大, 喷射位置为圆盘中心时, 圆盘表面平均温度为最小。

## 参考文献

[1] Astarita, T. and Cardone, G. (2008) Convective Heat Transfer on a Rotating Disk with a Centred Impinging Round Jet.

*International Journal of Heat & Mass Transfer*, **51**, 1562-1572.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.040>

- [2] Shevchuk, I.V., Saniei, N. and Yan, X.T. (2015) Impingement Heat Transfer over a Rotating Disk: Integral Method. *Journal of Thermophysics & Heat Transfer*, **17**, 291-293. <https://doi.org/10.2514/2.6767>
- [3] 顾维藻. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] Bo, L., Zhang, J.Z. and Tan, X.M. (2015) Effect of Jet Velocity on Heat Transfer in the Vicinity of a Rotating Disk. *Journal of Engineering Thermophysics*.
- [5] Chen, Y.M., Lee, W.T. and Wu, S.J. (1998) Heat (Mass) Transfer between an Impinging Jet and a Rotating Disk. *Heat & Mass Transfer*, **34**, 195-201. <https://doi.org/10.1007/s002310050249>
- [6] Kármán, T.V. (1921) Über laminare und turbulente Reibung. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, **1**, 233-252. <https://doi.org/10.1002/zamm.19210010401>
- [7] Carper Jr., H.J. and Deffenbaugh, D.M. (1978) Heat Transfer from a Rotatingdisk with Liquid Jet Impingement. Proceedings of the Sixth International Heat Transfer Conference, Toronto, Canada, vol. 4, Hemisphere Public Corporation, Washington DC, 113-118.
- [8] Thomas, S., Hankey, W.L., Faghri, A. and Swanson, T. (1990) One-Dimensional Analysis of the Hydrodynamics and Thermal Characteristics of Thin Film Flows Including the Hydraulic Jump and Rotation, *Journal of Heat Transfer*, **112**, 728-735. <https://doi.org/10.1115/1.2910447>
- [9] Thomas, S., Faghri, A. and Hankey, W.L. (1991) Experimental Analysis and Flow Visualization of a Thin Liquid Film on a Stationary and Rotating Disk. *Journal of Fluids Engineering*, **113**, 73-80. <https://doi.org/10.1115/1.2926500>
- [10] Rahman, M.M. and Faghri, A. (1992) Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Thin Liquid Film over a Rotating Disk. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **35**, 1441-1453. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90035-Q](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90035-Q)
- [11] Yan, X. and Saniei, N. (1997) Heat Transfer from an Obliquely Impinging Circular, Air Jet to a Flat Plate. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, **18**, 591-599. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(97\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)00051-9)
- [12] Saniei, N., Yan, X.J.T. and Schooley, W.W. (1998) Local Heat Transfer Characteristics of a Rotating Disk under Jet Impingement Cooling. *Proceedings of 11th IHTC*, Kyongju, 23-28 August 1998, 445-450.
- [13] Saniei, N. and Yan, X. (2000) An Experimental Study of Heat Transfer from a Disk Rotating in an Infinite Environment Including Heat Transfer Enhancement by Jet Impingement Cooling. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, **7**, 231-245. <https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.v7.i4.20>
- [14] Moner, T. and Abdalhamid, M. (2013) Experimental Study of Heat Transfer Distribution between an Obliquely Smooth Flat Plate and Impinging Air Jet from Circular Nozzle.
- [15] Friedrich, B.K., Ford, T.D., Glaspell, A.W., et al. (2016) Experimental Study of the Hydrodynamic and Heat Transfer of Air-Assistant Circular Water Jet Impinging a Flat Circular Disk. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **106**, 804-809. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.102>
- [16] Kuraan, A.M., Moldovan, S.I. and Choo, K. (2017) Heat Transfer and Hydrodynamics of Free Water Jet Impingement at Low Nozzle-to-Plate Spacings. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **108**, 2211-2216. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.084>
- [17] Kuraan, A.M. and Choo, K. (2017) The Influence of Nozzie-to-Plate Spacing on the Circular Hydraulic Jump of Water Jet Impingement. *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, Orlando, 30 May-2 June 2017, 86-89.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2167-6631，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

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

期刊邮箱：[met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)