

# 人工粗糙度对矩形弯曲管道流动与传热数值模拟

张 萌, 孙 冰

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

**摘 要:**人工粗糙度作为一种局部强化换热技术,对提高再生冷却效率有重要意义。为了研究人工粗糙度对矩形冷却通道三维流动与传热特性的影响,以及在弯曲段与二次流的耦合作用,对有人工粗糙度的三维弯曲矩形通道进行了建模,并应用 Fluent 软件进行了数值仿真计算,采用了能够有效准确地求解受强曲率影响的管道内及近壁区域湍流流动的 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型。结果表明:在冷却通道底面添加人工粗糙度会使底部流动受到干扰进而导致流速中心上移,因此在弯曲段,有人工粗糙度的冷却通道中所产生迪恩涡的范围相对较小且距离底面较远,而随着二次流的产生,流速中心会向底部移动,使得该处的换热得到改善,整体对流传热系数上升;当入口质量流量分别为 0.1 kg/s, 0.2 kg/s, 0.3 kg/s 时,有人工粗糙度工况下弯曲段加热面平均对流传热系数分别增加了 11.86%, 13.11%, 16.14%, 表明添加人工粗糙度可以显著提高换热,且随着入口质量流量的增加其对换热的提高作用也变得越来越明显。

**关键词:**再生冷却;人工粗糙度;二次流;强化换热;对流传热

**中图分类号:**V434.14    **文献标识码:**A    **文章编号:**1672-9374(2020)01-0020-08

## Numerical simulation of flow and heat transfer in a curved rectangular channel with artificial roughness

ZHANG Meng, SUN Bing

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** As a local heat transfer enhancement technology, artificial roughness is of great significance to improve the regenerative cooling efficiency. In order to study the influence of artificial roughness on the three-dimensional flow and heat transfer characteristics of the rectangular cooling channel, and the coupling effect with the secondary flow in the curved section, a three-dimensional curved rectangular channel with artificial roughness was modeled and simulated by Fluent software in this paper. RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model was used to effectively and accurately solve the turbulent flow in the pipeline and near-wall flow affected by the strong curvature. The results show that adding artificial roughness to the bottom of the cooling channel will disturb the bottom flow and cause the velocity center to move up. Therefore, in the curved section, the range of Dean vortices generated in the cooling passage with artificial roughness is relatively small and far from the bottom. With the generation of the secondary flow, the flow velocity

收稿日期:2019-04-13;修回日期:2019-05-24

基金项目:国家自然科学基金(11602186)

作者简介:张萌(1993—),男,博士,研究领域为液体火箭发动机热防护仿真

其中,矩形通道高  $h = 5 \text{ mm}$ , 宽  $b = 4 \text{ mm}$ , 内壁厚度均为  $t = 1 \text{ mm}$ 。从入口处到  $L_1 = 150 \text{ mm}$  处为非加热段以形成充分发展的湍流, 加热段包括  $L_2 = 100 \text{ mm}$  的长直段、直径  $D_h = 100 \text{ mm}$  的  $90^\circ$  弯曲段和  $L_3 = 100 \text{ mm}$  的长直段。其中加热段冷却通道底面添加人工粗糙度, 凸台为高宽均为  $0.2 \text{ mm}$  的矩

形凸台,凸台长度横贯通道底部为 4 mm,沿通道间隔  $p = 5$  mm。加热段采用非对称加热以模拟实际火箭发动机中的受热状况,受热面为冷却通道外底面。由于几何模型的对称性,只取半个模型作为计算域。网格划分也如图 1 所示,全部区域采用结构化网格,其中流体域靠近壁面处加密以捕捉边界层内的流动特征,无粗糙度情况下网格总数约为 112 万,有粗糙度情况下由于在粗糙度附近进行了加密,因此网格总数约为 140 万。流体近壁面处的  $y^+$  值为 30 ~ 60 之间,符合标准壁面函数所需的 30 ~ 300 之间的要求。

### 1.2 控制方程及湍流模型

采用 Fluent 15.0 进行计算,流体域控制方程为三维 Navier-Stokes (N-S) 方程

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\phi) = \text{div}(\mathbf{D}_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中:div 为该矢量的散度; $\rho$  为控制体密度; $\mathbf{U}$  为速度向量; $\phi$  为待求标量值; $\mathbf{D}_\phi$  为广义扩散系数;grad $\phi$  为  $\phi$  的梯度; $S_\phi$  为单位控制体体积的广义源项。当  $\phi$ 、 $\mathbf{D}_\phi$  及  $S_\phi$  取不同的矢量时,该方程能代表连续方程、动量方程、能量方程和组分方程<sup>[12]</sup>。固体域热传导控制方程采用傅立叶导热方程,湍流模型则采用 RNG  $k$ - $\varepsilon$  湍流模型,在文献[13-15]均采用此模型求解流体在弯曲管道内的流动与传热,并指出其能够有效准确地求解受强曲率影响的管道内及近壁区湍流流动。近壁区域处理采用标准壁面函数。

### 1.3 边界条件及参数

计算所需要的边界条件按照如下的方式给出:入口边界取质量流量入口,质量流量为 0.2 kg/s,温度为 120 K。出口边界取压力出口,出口压力 14 MPa。冷却剂取甲烷,由于其所处压力远高于其临界压力 4.9 MPa,因此其处在超临界状态且物性参数变化比较平缓。在此基础上,为了排除物性变化对结果的干扰,假设冷却剂各物性参数保持不变,取其处于 200 K 时的物性如表 1 所示。内壁材料取铜,其导热系数为 387.6 W/m·K。由于通道几何形状的对称性,只取半个几何模型作为计算域,因此冷却剂侧对称面取对称边界条件,流固耦合壁面取无滑移条件,除加热面和流固耦合壁面以外其余壁面均取绝热边界。加热面取常热流密度,热流密度取定热流密度  $q = 20 \text{ MW/m}^2$ 。

表 1 模型所采用冷却剂物性参数

Tab.1 Coolant properties used in the model

$\rho$	$c_p$	$\lambda$	$\nu$
291.54 kg/s	4 335.2 J/kg·K	0.094 W/m·K	0.034 g/m·s

### 1.4 网格无关性验证

在进行结果分析之间,首先验证本文计算结果与网格无关,采用无粗糙度工况作为验证算例,取 3 种网格数如表 2 所示。图 2 给出了 3 种网格数目下加热段  $L_2$  区域的壁面温度沿流向变化,由图可知,3 种网格数目计算所得结果都非常接近,粗网格计算结果与其他两种相比存在一定的区别,而后两种网格数目所计算得结果几乎完全一致。因此综合考虑计算精度与计算成本,选择中间数目的网格来进行后续的研究。

表 2 网格无关性分析不同网格设置

Tab.2 Various grid settings of grid independence analysis

粗网格数	基准网格	细网格
310 000	1 120 000	2 800 000

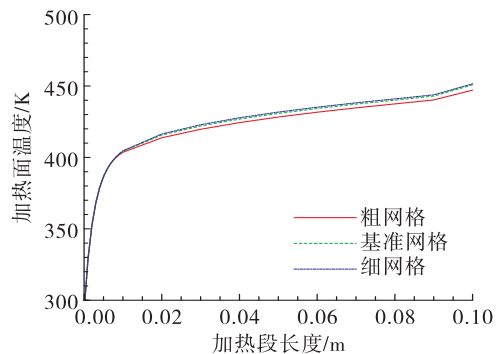


图 2 3 种网格数目下  $L_2$  加热面壁面温度沿轴向变化

Fig.2 Streamwise variations of wall temperature of  $L_2$  for three grid levels

## 2 计算结果分析

### 2.1 流场结构分析

图 3 为有人工粗糙度的冷却通道底面近壁区域流线图,从图 3 中可以看出,由于人工粗糙度的存在,使得流场结构有了较大的改变。首先使得近壁区域的层流结构遭到破坏,在每个凸台下游处产生

了局部的涡旋。其次,冷却剂在流经凸台时会使流线受到压缩,进而产生了局部的高流速区域。

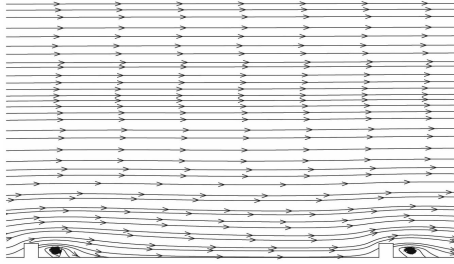


图3 有人工粗糙通道底部近壁区域流线图

Fig. 3 Streamline diagram of near wall region at the bottom of cooling channel with ribs

图4给出了两种工况下弯曲段对称面速度云图,由图4可知,当流体进入弯曲段时,由于离心力的影响,流体速度中心会逐渐向通道底部移动。此时会在通道横截面上产生二次流,对传热产生很大的影响。而当在通道底面设置人工粗糙度时,会使得靠近底面处的流速受到影响,速度中心向靠近通道顶部的方向移动。

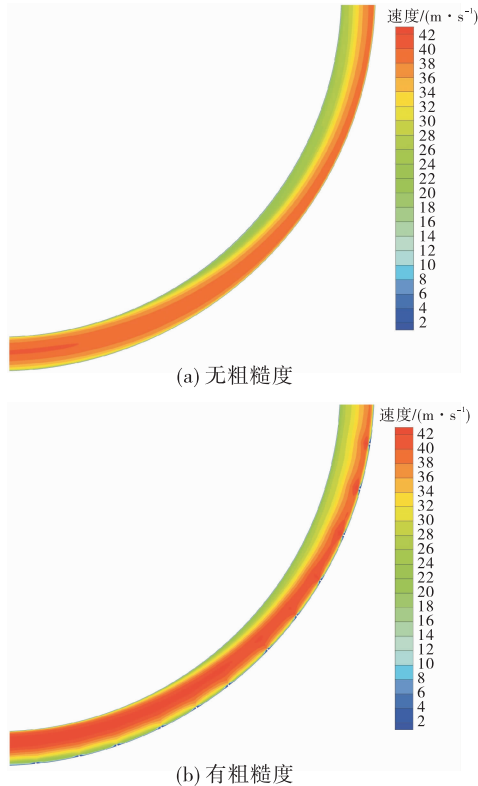


图4 弯曲段对称面速度云图

Fig. 4 Velocity contour of symmetrical plane in curved section

为了进一步讨论由于曲率所引起的二次流与人工粗糙度的相互耦合作用,在弯曲段分别取  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  三个截面,如图1所示,其中,  $\theta = 0^\circ$  表示  $x = 250 \text{ mm}$  截面,即长直段与弯曲段的连接处。图5给出了各截面上的速度云图与速度矢量图,从图5中可以看出,当  $\theta = 0^\circ$  时,无人工粗糙度的冷却通道,在通道中心流速较高,随着向壁面处的靠近流速会逐渐降低。而对于有人工粗糙度的冷却通道而言,由于底面处存在的凸台会破坏流动边界层,使得靠近底面处的流动受到了干扰,因而其流速的中心有明显向冷却通道上部移动的趋势,导致整个流场整体看上去就像是被“压扁”,而中心流速也相较于无人工粗糙度的偏高。当  $\theta = 45^\circ$  时,随着二次流的产生,流体会产生向通道底面移动的趋势,因而会导致流速中心也会随之下移。在越靠近中心对称轴处,这种下降的趋势就越明显,进而使得整个速度云图呈现出不规则的形状。此外,由于有人工粗糙度的冷却通道靠近底面处的流动受到干扰,其流速中心向底面移动的程度会较轻。而当  $\theta = 90^\circ$  时,随着二次流的进一步发展,流速中心已完全移动到冷却通道下半部分。而在冷却通道的上半部分,有人工粗糙度的冷却通道内轴向流速相对较高,表明其受到二次流动的影响相对较小。

此外,通过分析二者的速度矢量图可以发现,当  $\theta = 0^\circ$  时,二者的速度矢量图没有明显的区别,因为此时并没有产生二次流。当  $\theta = 45^\circ$  时,随着二次流的产生,二者均产生了所谓的“迪恩涡”<sup>[16]</sup>,但在有人工粗糙度的冷却通道中所产生的迪恩涡的范围相对较小且距离底面较远。而  $\theta = 90^\circ$  截面上的速度矢量图则更加明显地反映了这一趋势,为了定量分析二次流与人工粗糙度产生的涡流强度的变化规律,在这里引入螺旋度的概念,其定义为

$$H = (\nabla V) \cdot V \quad (2)$$

式中:  $H$  为螺旋度;  $V$  为速度矢量。

二次流与涡流的叠加强度可以通过螺旋度的绝对值来测量,图6给出了两种情况下沿流动方向螺旋度变化。由图6可知,在  $L_2$  长直段,无粗糙度情况下的螺旋度为0,因为此时还没有产生二次流。而对于有粗糙度的情况而言,由于粗糙度的存在使得流体在靠近壁面处产生涡流,因此其在  $L_2$  处存在一定量的螺旋度。随着流体进入弯曲段,由于逐渐

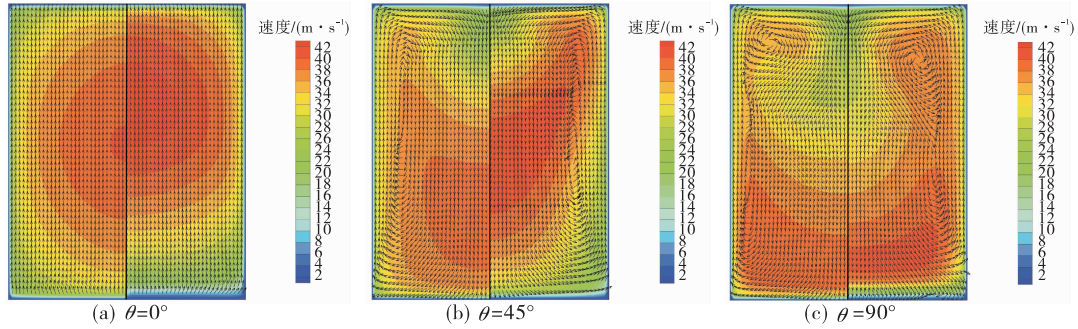


图5  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  截面轴向速度云图与速矢量图 (左: 无粗糙度; 右: 有粗糙度)

Fig. 5 Axial velocity contour and velocity vector graph at  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  cross sections (left: without ribs; right: with ribs)

产生二次流使得两种情况下的螺旋度均急剧上升。在这一范围内,由二次流产生的螺旋度占主导地位,因此两种情况下的螺旋度相差不大。随后,随着流体逐渐流向  $L_3$  长直段,二次流的强度逐渐变弱,因此螺旋度也急剧降低。但有粗糙度情况下由于存在由粗糙度产生的涡流,因此其螺旋度高于无人工粗糙度情况下的。

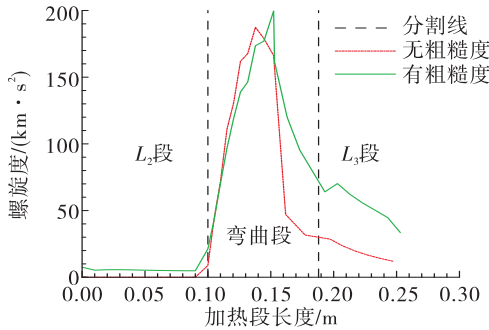


图6 两种情况下螺旋度沿流动方向变化

Fig. 6 Helicity variation along the flow direction for two cases

## 2.2 壁面传热分析

图7给出了  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  3个截面上的温度云图,通过对比二者的温度云图可以看出,有人工粗糙度的内壁温度明显较低,表明采用人工粗糙度能够显著地提高换热。随着二次流的产生,对于同一冷却通道,壁面温度也有所降低。这是由于对于凹曲率通道而言,二次流的存在会使传热得到改善。

为了整体比较二次流与人工粗糙度对壁面温度的影响,图8比较了两种情况下加热面壁面温度沿流动方向变化。由图8可知,在  $L_2$  与  $L_3$  两段长直段,壁面温度均近乎线性增长。而在弯曲段,如前文所言,由于二次流的作用使得传热得到改善,壁面温度降低。而在加热面上,有粗糙度情况下的壁面温度均低于无粗糙度情况,二者最高壁面温度分别为 463 K 与 424 K。添加粗糙度使得壁面最高温度降低了 8.42%,这表明了添加粗糙度可以显著地改善换热从而降低壁面温度。

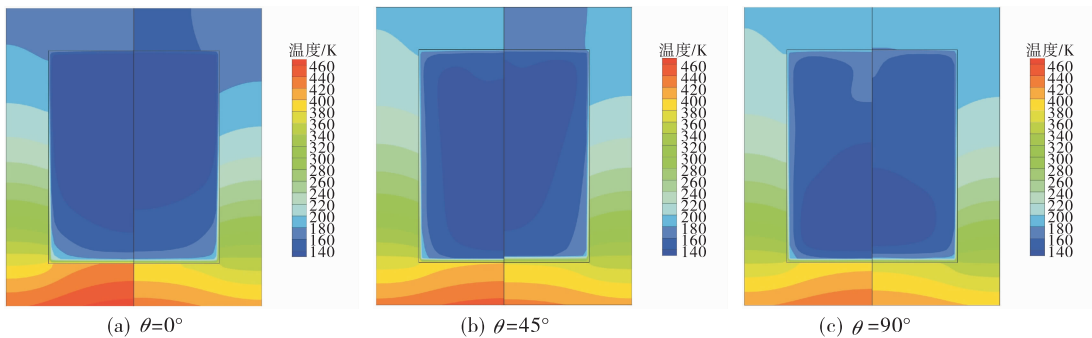


图7  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  截面温度云图 (左: 无粗糙度; 右: 有粗糙度)

Fig. 7 Temperature contour at  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  cross sections (left: without ribs; right: with ribs)

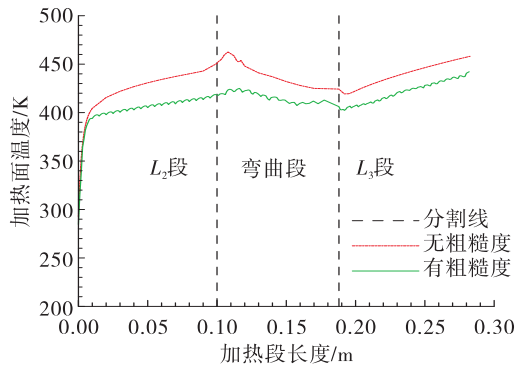


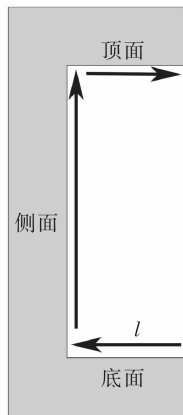
图8 两种情况下壁面温度沿流动方向变化

Fig. 8 Variations of wall temperature along flow direction for two cases

为了深入研究人工粗糙度及二次流对冷却通道对流换热的影响,取两种情况下  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  截面上顶面、侧面与底面上的对流传热系数进行比较。图9给出了所取截面的示意图,图10给出了  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  截面上顶面、侧面与底面上的对流传热系数变化图。其中,对流传热系数的定义为

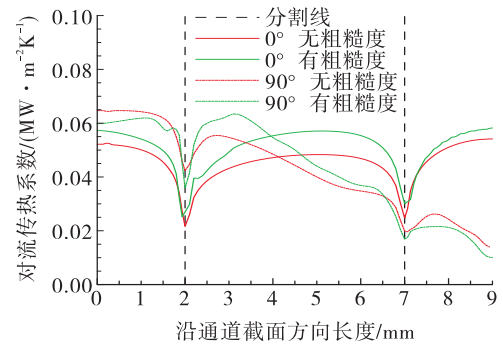
$$h_{wg,l} = \frac{q}{T_{wg,l} - T_b} \quad (3)$$

式中: $q$  与  $T_{wg,l}$  分别为该点处的热流密度和流体与通道接触点壁面温度; $T_b$  流体在该截面处的平均温度。

图9  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  截面示意图Fig. 9 Schematic diagram at  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  cross sections

通过对图10的分析可以看出,在  $\theta = 0^\circ$  截面上,通道内部各个面上对流传热系数的分布比较均匀,3个面上对流传热系数最高值比较接近且在两个拐角处出现极小值。在该截面上,通道内部有人

工粗糙度的情况下的对流传热系数均高于无粗糙度情况下的。而当  $\theta = 90^\circ$  时,由于二次流的产生使得流速中心向通道底部移动。因此对流传热系数的分布也出现变化,越靠近底部,对流传热系数越大。而由前文所述,添加人工粗糙度使得冷却通道中所产生的迪恩涡的范围相对较小且距离底面较远,因此在底面上有人工粗糙度情况下的对流传热系数略低。而在侧壁面上,有人工粗糙度情况下的对流传热系数则明显较高。在通道内部上壁面,两种情况下对流传热系数都比较小,且有人工粗糙度下的对流传热系数略低。

图10 两种情况下  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  截面上对流传热系数变化Fig. 10 Variation of convective heat transfer coefficients at  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  cross sections for two cases

将  $q$  与  $T_{wg,l}$  分别改为加热面上的热流密度与壁面温度代入公式(3),可得到通道整体的对流传热系数。图11给出了两种情况下弯曲段整体对流传热系数变化,由图11可知,受二次流的影响,两种情况下的对流传热系数沿弯曲通道均有上升的趋势。此外,添加人工粗糙度使得整体对流传热系数有了明显的提高,弯曲段平均对流传热系数提高了13.11%。

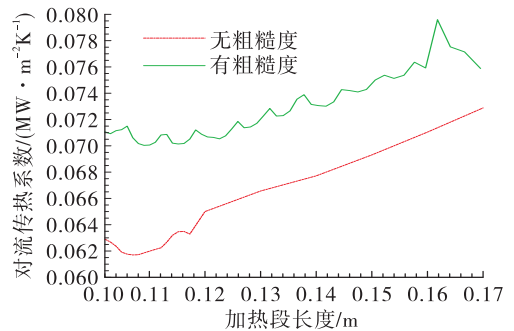


图11 两种情况下弯曲段整体对流传热系数变化

Fig. 11 Variation of convective heat transfer coefficients at curved section for two cases

### 2.3 入口质量流量对结果的影响

为了验证结论的通用性,对入口质量流量的影响进行了分析。保持其余各条件不变,分别将质量流量改为 0.1 kg/s, 0.3 kg/s。其  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$  截面上通道内部对流传热系数变化分别如图 12 和图 13 所示。

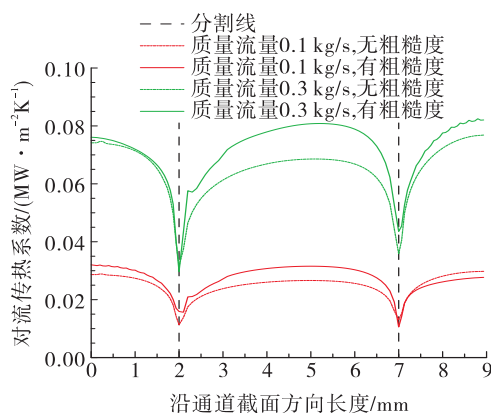


图 12 两种质量流量下  $\theta = 0^\circ$  截面上对流传热系数变化

Fig. 12 Variation of convective heat transfer coefficients at  $\theta = 0^\circ$  cross sections for two mass flow rates

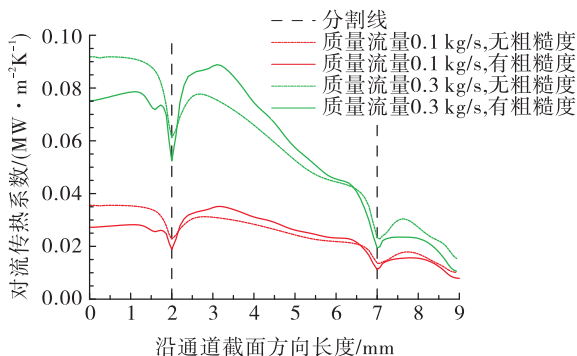


图 13 两种质量流量下  $\theta = 90^\circ$  截面上对流传热系数变化

Fig. 13 Variation of convective heat transfer coefficients at  $\theta = 90^\circ$  cross sections for two mass flow rates

通过对图 12 和图 13 的分析可以看出,在不同入口质量流量下,通道内部各个面上对流传热系数的变化趋势基本保持一致。除了  $\theta = 90^\circ$  截面上的通道底面与上壁面以外,其他各个面上的换热都得到了不同程度上的增强。此外,图 14 给出了两种流量下弯曲段加热面整体对流传热系数变化。通过对图 14 的分析可知,两种质量流量下弯曲段平均对流传热系数分别提高了 11.86% 和 16.14%。因此可以得出结论,随着质量流量的增加,人工粗糙度

对换热的提高作用也越来越明显,表明在冷却剂入口质量流量较大时添加人工粗糙度能够获得更好的收益。

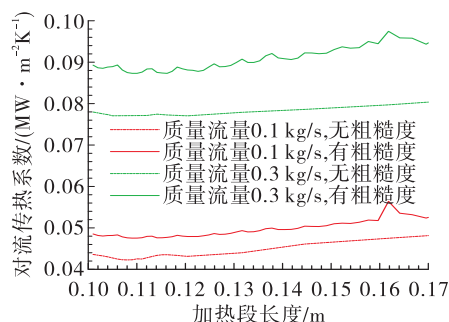


图 14 两种流量下弯曲段整体对流传热系数变化

Fig. 14 Variation of convective heat transfer coefficients at curved section for two mass flow rates

## 3 结论

为了研究人工粗糙度对矩形弯曲通道内三维流动与传热的影响,本文对有人工粗糙度的三维弯曲矩形通道进行了仿真计算。通过对流场结构以及冷却通道各内壁面的传热进行分析,得到如下结论:

1) 在冷却通道底面添加人工粗糙度会使底部流动受到干扰进而导致流速中心上移,中心流速增加。而随着二次流的产生,流速中心会向底部移动。此外,在有人工粗糙度的冷却通道中所产生迪恩涡的范围相对较小且距离底面较远,这个趋势会随着二次流的进一步发展而更加显著。

2) 由于二次流的存在使得通道内部各个面上对流传热系数的分布也出现变化,越靠近底部,对流传热系数越大。又因为本文采用的是在底面给定热流密度的非均匀加热,因此,二次流的产生会使弯曲段的换热得到改善,整体对流传热系数上升,壁面温度下降。

3) 通过对弯曲段加热面壁面温度与整体对流传热系数的分析可知,通过添加人工粗糙度使得壁面最高温度降低了 8.42%,平均对流传热系数增加了 13.11%。这表明通过在通道底部添加人工粗糙度能够有效改善换热,降低壁面温度。

4) 在不同入口质量流量下,通道内部各个面上

对流传热系数的变化趋势基本保持一致。当入口质量流量分别为0.1 kg/s, 0.2 kg/s, 0.3 kg/s时, 弯曲段加热面平均对流传热系数分别增长了11.86%, 13.11%, 16.14%。这表明随着入口质量流量的增加, 人工粗糙度对换热的提高作用也变得越来越明显。

在本研究中, 并没有考虑甲烷的实际物性。而在实际发动机中, 甲烷在冷却通道中一般处在超临界状态且会经历跨临界过程。在此过程中, 由于物理性质的急剧变化会对传热产生很大的影响, 因此, 后续工作可以考虑结合甲烷实际物性来对人工粗糙度的影响进行分析。

#### 参考文献:

- [1] 刘国斌. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [2] 蔡国飙. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [3] 章思龙, 秦江, 周伟星, 等. 高超声速推进再生冷却研究综述[J]. 推进技术, 2018, 39(10): 2177-2190.
- [4] 陈建华, 杨宝庆, 周立新, 等. 人为粗糙度强化换热机理分析及效果评估[J]. 火箭推进, 2004, 30(4): 1-5.  
CHEN J H, YANG B Q, ZHOU L X, et al. The mechanism and effect of artificial roughness on heat transfer enhancement[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2004, 30(4): 1-5.
- [5] HOSSAIN J, TRAN L V, CARPENTER C, et al. Numerical study of enhancement of regenerative cooling using ribs[R]. AIAA 2013-3996.
- [6] XU K K, TANG L J, MENG H. Numerical study of supercritical-pressure fluid flows and heat transfer of methane in ribbed cooling tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 346-358.
- [7] KAMALI R, BINESH A R. The importance of rib shape effects on the local heat transfer and flow friction characteristics of square ducts with ribbed internal surfaces[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(8): 1032-1040.
- [8] NARAGHI M, DASSONVILLE R. Improved correlations for curvature effects in cooling channels of rocket engines[C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta, Georgia. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [9] VALENTIN J, NARAGHI M. Effects cooling channel curvature on coolant secondary flow and heat transfer[C]//46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville, TN. Reston, Virginia: AIAA, 2010.
- [10] PIZZARELLI M. Effectiveness of spalart-allmaras turbulence model in analysis of curved cooling channels[J]. AIAA Journal, 2013, 51(9): 2158-2167.
- [11] PIZZARELLI M, NASUTI F, ONOFRI M. CFD analysis of curved cooling channel flow and heat transfer in rocket engines[C]//46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville, TN. Reston, Virginia: AIAA, 2010.
- [12] 康玉东, 孙冰. 燃气非平衡流再生冷却流动传热数值模拟[J]. 推进技术, 2011, 32(1): 119-124.
- [13] 丁珏, 翁培奋. 三种湍流模式数值模拟直角弯管内三维分离流动的比较[J]. 计算物理, 2003, 20(5): 386-390.
- [14] 赵金辉, 王志国, 晋世强. 不同曲率直径比下90°弯管内部流场分析[J]. 轻工科技, 2014, 30(8): 64-65.
- [15] 孙业志, 胡寿根, 赵军, 等. 不同雷诺数下90°弯管内流动特性的数值研究[J]. 上海理工大学学报, 2010, 32(6): 525-529.
- [16] 湛含辉, 朱辉, 陈津端, 等. 90°弯管内二次流(迪恩涡)的数值模拟[J]. 锅炉技术, 2010, 41(4): 1-5.