doi:10.11887/j.cn.202204016 http://journal.nudt.edu.cn

再生冷却通道结构参数对碳氢燃料流量分配影响*

尹 亮[1],丁 杰[1],刘伟强[2]
(1. 湖南文理学院 机械工程学院,湖南 常德 415000;2. 国防科技大学 空天科学学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:以液体火箭发动机再生冷却技术为背景,采用数值模拟方法对Z-type型并联通道流量分配特性进行研究,分析了通道数、通道截面形状及入口汇流结构对流量分配特性的影响。研究结果表明:在冷却通道总流通面积相同的情况下,随着再生冷却系统通道数的增加,流量分配不均匀度系数从2.59%降低至0.5%,相同流通面积下增加通道数可以有效提高流量分配的均匀程度。通道截面形状对流量分配不均匀度系数影响不大,其影响主要表现在通道内部流体速度分布及换热面积上。从换热效果看,梯形截面构型要优于矩形构型。入口汇流结构倾斜角有利于流量的均匀性分布。该研究对于再生冷却通道结构设计具有一定参考价值。

关键词:再生冷却;流量分配;通道数;截面形状;汇流结构;换热效果
中图分类号:V434 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2022)04-151-07

Effect of structural parameters of regenerative cooling channels on hydrocarbon fuel flow distribution

YIN Liang[1], *DING Jie*[1], *LIU Weiqiang*[2]
(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China;
2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the regenerative cooling technology of liquid rocket engine, the flow distribution characteristics of Z-type parallel channels were studied by numerical simulation method. The effects of channel number, channel section shape and entrance confluence structure on the flow distribution characteristics were analyzed. The results show that the non-uniformity coefficient of flow distribution decreases from 2.59% to 0.5% with the increase of the number of channels in the regenerative cooling system. Increasing the number of channels under the same flow area can effectively ensure the uniformity of flow distribution. The channel section shape has little influence on the non-uniformity coefficient of flow distribution, which is mainly reflected in the flow velocity distribution and heat transfer area in the channel, and the heat transfer effect of the trapezoidal configuration is better than that of the rectangular configuration. The entrance confluence structure is beneficial to the uniform of flow distribution. The research has a certain reference significance for the structural design of regenerative cooling channel.

Keywords: regenerative cooling; flow distribution; channel number; channel section shape; confluence structure; heat exchange efficiency

再生冷却技术是液体火箭发动机中应用最广泛的一种冷却技术[1-3],一般用于大推力液体火箭发动机,通常以燃料作为冷却剂,冷却剂通过燃烧室内外壁间的夹层或通道将燃烧室壁面热流带走,以达到冷却燃烧室壁面的目的。同时,冷却剂吸收热量后可经喷注器重新进入燃烧室进行燃烧,使得能量得以“再生”。再生冷却的优点是不会对发动机性能产生影响,但会因为冷却通道内部压降过大而造成整个发动机系统的压力过高,这对于提高燃烧室压力及发动机性能是不利的[4-8]。

具体到再生冷却技术的实施上可知,液体火箭发动机再生冷却通道一般采用并联方式布置,流动方向与发动机整体轴向平行。在实际工作过程中,由于冷却通道的分汇流属性以及冷却剂入口布置位置等问题,各冷却支路存在流量偏差。此外,由于高热流引起的燃料跨临界物性剧烈变化的特殊现象以及碳氢燃料积碳所引起的通道堵塞问题,导致再生冷却过程流量分配相比于常规并联管流量分配问题更难以解决[9-10]。徐兴亚[11]对超然冲压发动机再生冷却流量分配问题进行了数值模拟研究,分析了通道高宽比、肋厚以及流通面积对流量分配的影响,并采用实验方法对平板式并联通道流量分配问题进行了研究。姜

* **收稿日期**:2021-06-16
基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5395);常德市科技创新发展指导性计划资助项目(2020ZD27)
作者简介:尹亮(1988—),男,湖南邵阳人,讲师,博士,E-mail:yl88222@126.com

俞光[12]对矩形并联通道流量分配规律进行了研究,分析了燃料物性等影响因素的敏感性,考虑了煤油裂解对流量分配的影响,并提出了流量分配优化设计的方案。Kumaraguruparan 等[13]采用数值模拟和实验方法对 U 型通道流量分配规律进行了研究,采用水作为介质,对通道数、流体类型以及通道加工误差等影响进行了分析,结果表明:减小通道宽度及高度或增大通道长度均会造成不均匀度系数增大,由于加工误差所引起的不均匀度系数变化不大,约为 5%。

改变热载荷分配和通道截面变化是改善流量分配不均的一种简单且有效的设计思路。具体来说,就是通过改变通道的尺寸参数(壁厚、肋宽、通道长宽比、流通面积)或增加冷却剂流量获得冷却效果。本文对液体火箭发动机再生冷却通道模型进行简化,采用文献中典型的 Z-type 结构进行仿真分析。采用流固热耦合分析方法对均匀加热条件下再生冷却通道结构参数对流量分配的影响及冷却效果进行数值模拟研究,分析了不同通道数、截面形状及入口汇流结构参数对流量分配的影响。

1 再生冷却通道方案设计

1.1 物理模型

再生冷却通道计算域采用典型的 Z-type 结构进行分析,宽度为 36.4 mm,通道长度为 300 mm,共包含 7 根并联通道 $M_1 \sim M_7$,入口及出口面积均为 30 mm^2,如图 1 所示。其中,H 为流道高度,b 为流道宽度,a 为肋宽,δ 为冷却通道底面与加热面距离。

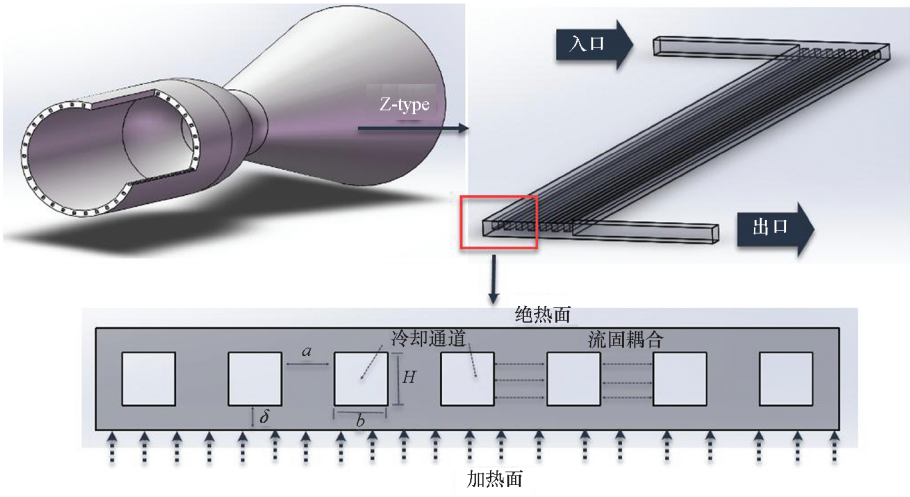


图 1 再生冷却通道简化模型

Fig. 1 Simplified model of regenerative cooling channel

考虑了肋效应下热耦合作用对流量分配的影响。由于实际发动机工作过程比较复杂,为了更加明确研究再生冷却通道结构参数对流量分配的影响,这里进行了如下假设:

1)不考虑燃料裂解结焦的影响。结焦是一系列复杂的化学物理过程,针对不同的结焦机理,可分为热氧化结焦和热裂解结焦。热氧化结焦主要发生在 145 ~425 ℃温度段内,是由于燃油中的溶解氧与燃油中的组分发生反应生成结焦前体物,继而引发一系列自由基链式反应形成。当温度继续升高至 425 ℃,热氧化结焦逐渐向热裂解结焦过渡。

2)不考虑流动过程中燃料相变的影响。相变传热特性不同于常规流体,主要表现为物性参数的变化,如热流密度对局部换热系数的影响以及高热流条件下局部换热系数随干度的变化等。

3)不考虑热载荷对再生通道变形的影响。再生冷却通道在较大的热载荷及机械载荷组合作用下会产生塑性变形,通道变形会造成流通面积变化,影响流量分配。

1.2 数值方法

采用商业软件 fluent 16.0 进行仿真计算。考虑到研究对象为高热流条件下的低速流动问题,选用 κ-ε Realizable 湍流模型进行计算,模拟过程中采用求解压力耦合方程的半隐方法(semi-implicit method for pressure linked equation, SIMPLE)和二阶迎风格式计算。算例中起主要作用区域壁面的壁面网格大致保证 $y^+ < 1.0$,对应的第一层网格高度为 0.002 mm,并以 1.15 的梯度布置网格。采用质量流量入口条件,冷却剂总质量流量 $m = 202$ g/s,采用压力出口条件,背压为 0.45 MPa。高温燃气传递给壁面的热流计算

式为：

$$q = k_w(T_{wg} - T_{wc})/\delta_w \tag{1}$$

式中：壁厚 $\delta_w = 1.2$ mm；T_{wg} 为燃气侧壁面温度，取 GH318 能承受的极限温度约 1 400 K；T_{wc} 为冷却剂侧壁面温度，为了保证煤油不发生裂解，取 $T_{wc} < 425$ ℃计算。将 T_{wc} 取值代入式(1)可得热流密度为 4.38 MW/m^2，这里取最小热流值进行计算，其余壁面均设置为绝热无滑移壁面条件。

采用煤油作为冷却剂，煤油温度在超过临界温度后，物性参数会发生明显变化。随着温度的升高，密度、动力黏度及导热系数均会降低。这里物性参数参考文献[14]按分段函数给出。

壁面材料选用高温合金 GH3128，其导热系数 λ 按拟合后多项式[14]给出。

$$\lambda = 6.765 + 0.011\ 55T - 1.944 \times 10^{-6}T^2\ (\mathrm{W/(m \cdot K)}) \tag{2}$$

2　结果与分析

这里采用流量分配不均匀度系数 ϕ_m 来表征流量偏差的大小。在均匀热流条件下，流量分配越均匀，流量分配不均匀度系数越小。

$$\phi_m = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\beta_i - \bar{\beta})^2} \tag{3}$$

式中，$\bar{\beta} = \sum_{i=1}^{n}\beta_i$ 表示平均流量偏差系数，β_i 为各通道流量偏差系数。

$$\beta_i = \frac{m_i}{\bar{m}} \tag{4}$$

式中，m_i 为第 i 个通道的质量流量，$\bar{m}$ 为平均总流量。

2.1　网格无关性验证

为了节约计算成本，消除网格对计算结果的影响，对网格无关性进行验证。计算中，所有网格均采用六面体结构，网格数分别为 410 857、799 062、1 076 029，分析了流量 $m = 202$ g/s、通道数 $N = 7$ 工况下三种不同网格对冷却剂出口温升的影响，如图 2 所示。从图中可以看到，三种网格数下冷却剂出口温升总体变化不大，网格数为 799 062时的冷却剂温升值变化与网格数为 1 076 029时的差别很小。因此，选取总网格数为 799 062进行仿真计算。

2.2　通道数变化对流量分配的影响

保持冷却通道总流通面积及燃气侧表面积不变，当高宽比变化后，通道数 N 随之变化。冷却通道高宽比定义为：$AR = H/b$。国内外学者已对冷却通道高宽比影响进行了研究，结果均表明：随着高宽比增大，肋传热作用增强，冷却效果提高[15-16]。本节不单独对高宽比影响进行分析，同时忽略肋强化传热作用的影响。

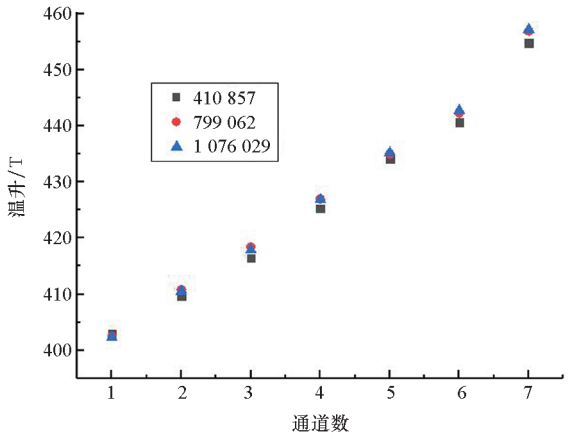


图 2　网格无关性验证

Fig. 2　Grid independence study

表 1 给出了通道数变化对流量分配不均匀度系数的影响。其中，H 为流道高度，b 为流道宽度，a 为肋宽，N 为通道数，Φ_m 为流量分配不均匀度系数。从表中可以看出，在冷却通道总流通面积相同情况下，随着再生冷却系统通道数的增加，流量分配不均匀度系数减小，流量分配也越均匀。

表 1　通道数对流量分配不均匀度系数影响

Tab. 1　Influence of channel number on the non-uniformity coefficient

AR/(H/b)	H/mm	b/mm	N
1	2.6	2.6	7
2	2.6	1.3	14
3	2.6	0.867	21

a/mm	A/mm^2	δ_w/mm	Φ_m/%
2.6	47.32	1.2	2.59
1.2	47.32	1.2	1.03
0.78	47.32	1.2	0.50

图 3 给出了各个通道流量分配系数，由于算例中通道数不同，为了便于比较，取相同位置通道进行分析。从图中可以看出，随着通道数的增加，各通道流量分配系数之间差别减小。图 4 给出了相同位置各通道出口平均速度分布，可以看出，通道数变化对速度分布影响不大，随着通道数增加，单个流通面积减小，流阻增加，流动速度略有降低。

分析上述原因：随着通道数的增多，相同流通面积下各通道之间肋宽减小；随着通道数的进一步增加，相邻通道间肋宽可忽略不计，类似于数学

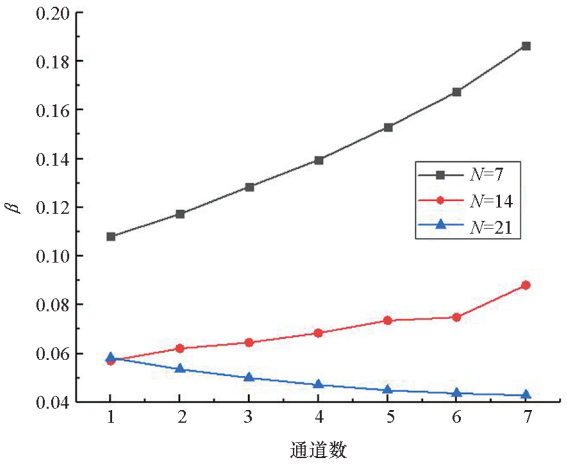


图3 不同通道数下各通道流量分配系数

Fig. 3 Non-uniformity coefficient under different channel number

中的“微积分”概念,即将再生冷却系统中的所有通道等效为一个整体通道,流量分配不均匀系数相应减小。因此,在不考虑肋强化换热作用下,相同流通面积下增加通道数可以有效减小流量分配不均匀系数。

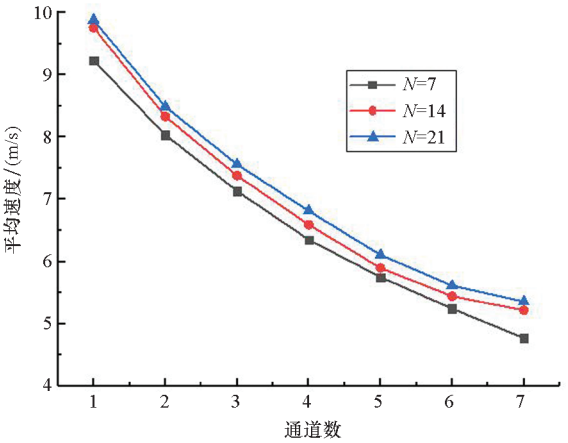


图4 不同通道数下各通道出口平均速度分布

Fig. 4 Average velocity distribution under different channel number

2.3 通道截面形状对流量分配的影响

通道截面形状是影响再生冷却效果的主要设计因素。由于冷却剂与壁面固体材料导热系数相差较大,两者在耦合传热过程中必然会由于换热面积不同而导致换热效果有较大的差别。同时,通道截面形状会对流动状态产生较大的影响,如平均速度、压降和局部流态的变化等,进而影响其流量分配。本节对梯形截面冷却通道进行对比研究,保持通道高度和总流通面积不变,改变梯形截面上下边长以改变其换热面积。

表2给出了通道截面形状对流量分配不均匀度系数的影响。从表中可以看出,当梯形截面上下长度不一致、总流通面积相等时,流量分配不均匀度系数变化不大,可以得到、当流量不变,冷却通道流通面积是决定流量分配的核心控制变量。

表2 计算模型尺寸参数

Tab. 2 Size parameters of the calculate models

算例	通道高/mm	底部宽度/mm	顶部宽度/mm	流通面积 A/mm^2	Φ_m/%
1	2.6	2.6	2.6	47.32	2.59
2	2.6	2.2	3.0	47.32	2.76
3	2.6	1.2	4.0	47.32	2.67

图5给出了不同截面下各通道流量分配系数,从图中可以得出相似结论:相同流通面积下各通道流量分配系数基本相同。图6为各通道出口平均速度分布,通道截面形状的改变主要有两方面的影响:一是冷却剂在通道内的流动速度分布,异性通道中心到壁面速度梯度不同,各区域速度大小不一致,可以看出,算例3各通道出口平均速度最小;二是换热面积变化引起的换热效果的改变,当梯形截面底部长度增大,冷却剂与气壁接触面积增大,同时由于梯形通道壁面牛顿剪切效应和肋效应的影响,其换热效果有所增强。图7为不同截面形状下燃气侧壁温云图,随着通道底部面积增大,冷却剂侧换热面积增大,换热效果增强,燃气侧壁面最高温度从1 334.5 K降低至1 265.2 K。图8给出了各个通道出口平均温度分布情况,增加底部换热面积可以提高换热效果,算例3冷却剂温升最大,可以得到,再生冷却通道梯形截面构型换热效果要优于矩形截面构型。

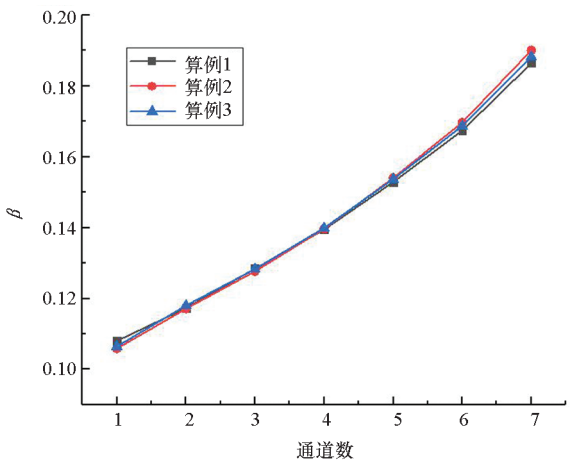


图5 不同截面下各通道流量分配系数

Fig. 5 Non-uniformity coefficient under different channel section shape

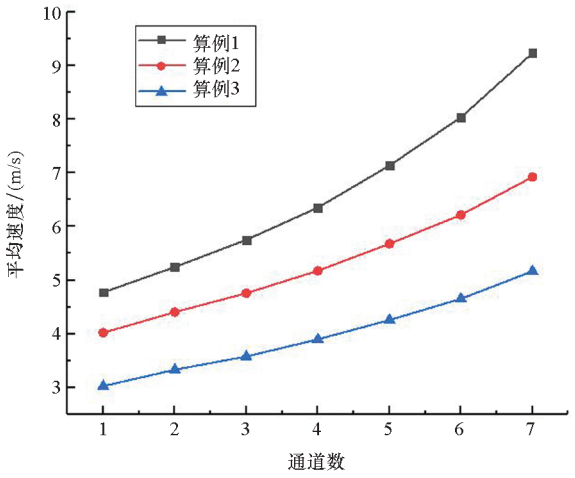


图 6　不同截面下各通道出口平均速度分布

Fig. 6　Average velocity distribution under different channel section shape

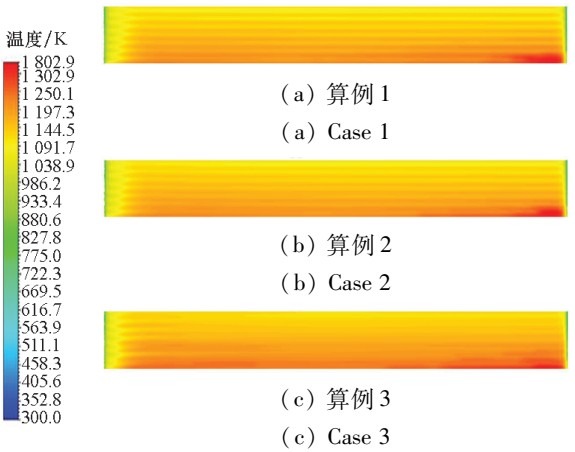


图 7　不同截面形状下燃气侧壁温云图

Fig. 7　Temperature contours of gas sidewall under different cross section

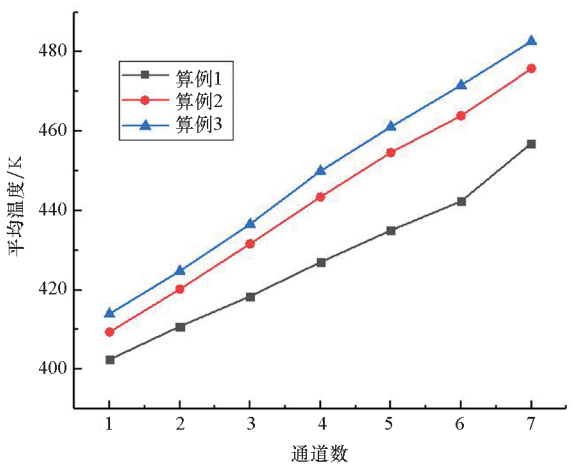


图 8　各通道出口平均温度分布

Fig. 8　Average temperature distribution of each channel outlet

2.4　入口汇流结构对流量分配的影响

并联通道中的流量分配过程，最直接的影响因素是几何结构和运行条件。几何结构变化会引起各支管水力直径的改变，通道内流体流速发生变化，流阻改变进而影响流量分配。本节对入口汇流结构对流量分配影响进行了研究，入口汇流形状由直流矩形变为三角收缩形结构，如图 9 所示，取倾斜角分别为 90°、10°、15°、20°进行研究，其余条件保持不变。

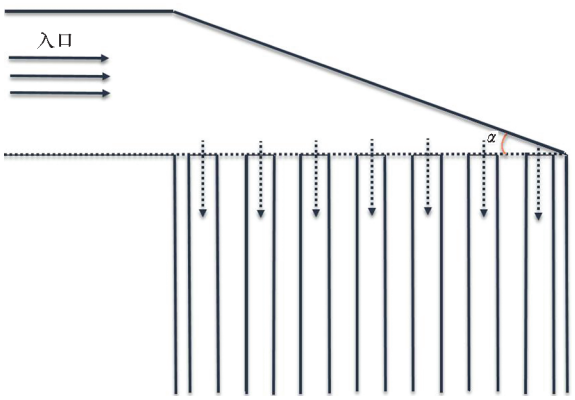


图 9　入口汇流结构

Fig. 9　Entrance confluence structure

图 10 给出了不同汇流结构下各通道流量分配系数，其中 $\alpha = 90°$ 为矩形汇流结构。从图中可以看出，随着倾斜角 α 值的减小，各通道流量分配系数值之间的差别先减小后增大，当 α 值取 15°和 20°时，除通道 1（靠近入口处第 1 个通道）外各通道流量分配系数及平均速度基本相同。各通道出口平均速度分布与流量分配系数分布情况基本相同，如图 11 所示。分析其原

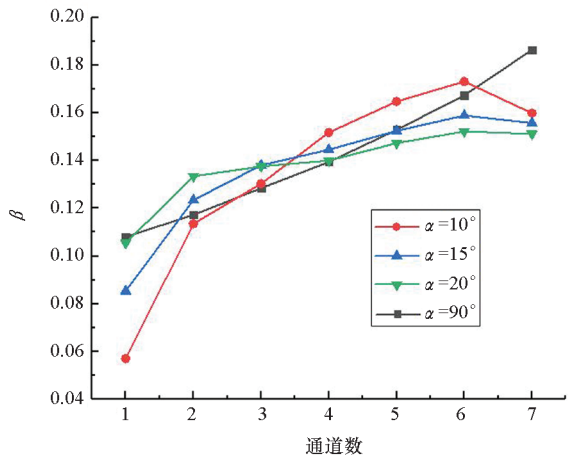


图 10　不同汇流结构下各通道流量分配系数

Fig. 10　Non-uniformity coefficient under different entrance confluence structures

因:对于采用同一公汇入口的并联通道,各支管内流量分配情况主要取决于通道进出口压差,而进出口压差变化可归结于热负荷偏差及通道几何结构的变化。因此,相同流量及热载荷条件下,随着倾斜角 α 值的减小,流通面积减小,通道内流体流速增大,为了匹配进出口压降平衡关系,该通道流量也会有所增加。通道 1 由于处于汇流入口处,受汇流结构影响较小。因此,适当减小倾斜角有利于流量的均匀性分布,该结构还有待进一步改进。

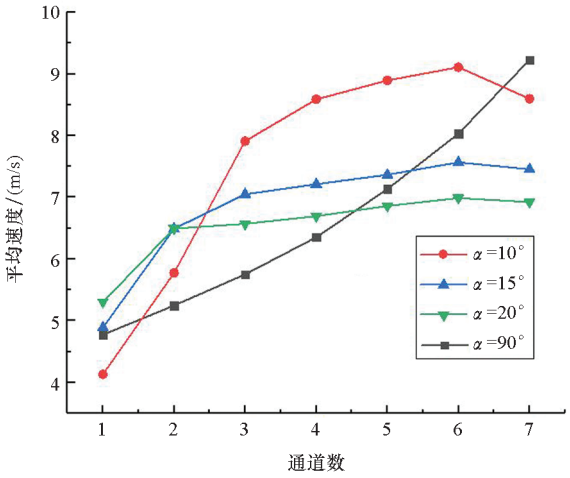


图 11 不同汇流结构下各通道出口平均速度分布

Fig. 11 Average velocity distribution under different entrance confluence structures

3 结论

本文主要关注再生冷却结构参数对流量分配的影响,对比分析了不同通道数及通道截面形状的影响差异,主要结论如下:

1)当冷却通道总流通面积相同时,随着再生冷却系统通道数的增加,流量分配不均匀度系数从 2.59% 降低至 0.5%,流量分配越均匀。相同流通面积下增加通道数可以有效减小流量分配不均匀系数。

2)当冷却通道总流通面积相同时,通道截面形状对流量分配不均匀度系数影响不大。截面形状主要影响通道内部流体速度分布及换热面积大小。

3)梯形截面构型换热效果要优于矩形截面构型,这是因为随着通道底部面积增大,冷却剂侧换热面积增大,换热效果增强。

4)随着倾斜角 α 值的减小,各通道流量分配系数值之间的差别先减小后增大,当 α 值取 15° 和 20°时,除通道 1 外各通道流量分配系数及平均速度基本相同,适当减小倾斜角有利于流量的均匀性分布。

参考文献(References)

[1] 尹亮, 刘伟强. 热流体层板装置研究进展及应用综述[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(3): 15 – 22.
YIN L, LIU W Q. Research progress and application of thermal fluid platelet devices [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(3): 15 – 22. (in Chinese)

[2] YIN L, LIU H P, LIU W Q. Capillary character and evaporation heat transfer in the wicks of high temperature liquid metal heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175: 115284.

[3] TAKAHASHI H, KODERA M, TANI K. Flush air data sensing system for a sharp-nosed hypersonic vehicle with curved-wedge forebody[J]. AIAA Journal, 2020, 58(11): 4819 – 4831.

[4] 宋亚超. 超临界航空煤油在竖直烧结管内的强化传热实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
SONG Y C. Experimental investigation on enhanced heat transfer of supercritical aviation kerosene in vertical inner-sintered coating tubes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)

[5] ZHONG F Q, FAN X J, YU G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3): 543 – 550.

[6] HUANG H, SPADACCINI L J, SOBEL D R. Fuel-cooled thermal management for advanced aeroengines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(2): 284 – 293.

[7] LI F Q, LI Z Z, JING K, et al. Thermal cracking of endothermic hydrocarbon fuel in regenerative cooling channels with different geometric structures [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(6): 6524 – 6534.

[8] YIN L, E J Q, DING J, et al. An experimental study on the spray characteristics of splash platelet injector [J]. Acta Astronautica, 2021, 181: 377 – 383.

[9] 景婷婷, 何国强, 秦飞, 等. 超临界裂解煤油的并联通道流量分配特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 1 – 6.
JING T T, HE G Q, QIN F, et al. Flow distribution characteristics of supercritical hydrocarbon fuel in parallel channels with pyrolysis [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(1): 1 – 6. (in Chinese)

[10] 张晓红, 姜俞光, 秦江, 等. 通道截面形状对碳氢燃料流量分配的影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 1977 – 1987.
ZHANG X H, JIANG Y G, QIN J, et al. Effect of channel cross sectional shape on flow distribution of hydrocarbon fuel[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 1977 – 1987. (in Chinese)

[11] 徐亚兴. 热耦合并联通道中超临界碳氢燃料流量分配与热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

XU Y X. Study on the flowrate distribution and thermal characteristics of supercritical hydrocarbon fuel in thermal coupled parallel channels[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

[12] 姜俞光. 热裂解型碳氢燃料并联通道流量分配及偏差抑制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
JIANG Y G. Investigation of endothermic hydrocarbon fuel flow distribution characteristics and flow deviation control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

[13] KUMARAGURUPARAN G, KUMARAN R M, SORNAKUMAR T, et al. A numerical and experimental investigation of flow maldistribution in a micro-channel heat sink[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38(10): 1349 – 1353.

[14] 孙弘原. 超燃冲压发动机燃烧室煤油再生冷却研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
SUN H Y. Investigation of kerosene′s regenerated cooling of supersonic combustion chamber[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

[15] LEE D, LEE K, HAN S, et al. Coking test using jet A – 1 and desulfurized kerosene in a regenerative cooling channel environment[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2022, 23(3): 546 – 556.

[16] LI M C, WEI S S, HUNG C H, et al. Experimental and numerical investigation of swirling H_2O_2 and polypropylene hybrid rocket motor with regenerative cooling[J]. Acta Astronautica, 2022, 190: 283 – 298.