

球凹/球凸结构对小尺度通道换热影响研究

王鹏恩, 岳晨, 童乐, 张世中

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:对液体火箭发动机再生冷却通道中球凹/球凸结构进行数值模拟研究,讨论进口雷诺数 Re_{in} 在 2.2×10^4 的情况下,球凹的不同深度和不同半径对通道流动和换热的影响。结果表明,当球凹深度 H 从 0.1 mm 增加到 0.4 mm 时,综合换热因子呈现先增大后减小的趋势,其中球凹深度在 0.3 mm 处,综合换热因子达到最大值 1.4,相对于无球凹时增大了 0.13;当球凹半径从 0.3 mm 增加到 0.6 mm 时,综合换热因子随着球凹半径增加而增加,在半径为 0.6 mm 时达到最大值 1.41,相对于无球凹时增大了 0.14。

关键词:球凸结构;内嵌球凹;强化换热;数值模拟

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)02-0120-04

Study on the Influence of Spherical Concave/Spherical Convex Structure on the Heat Transfer of Small Scale Channels

WANG Pengen, YUE Chen, TONG Le, ZHANG Shizhong

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The numerical simulation of the spherical convex structure with the embedded spherical concave in the regenerative cooling channel of the liquid rocket engine was performed with the discussion on effects of different depths and radius of the spherical concave on the internal flow and heat transfer of the channel with the Re_{in} at 2.2×10^4 . The results show that when the spherical depth H increases from 0.1 mm to 0.4 mm, the comprehensive heat transfer factor increases first and decreases later, when the depth of the spherical concave is 0.3 mm, the comprehensive heat transfer factor reaches a maximum value of 1.4, increasing by 0.13 compared with the case without spherical concave. When the spherical concave radius is up from 0.3 mm to 0.6 mm, the comprehensive heat transfer factor increases with the spherical concave radius. When radius is 0.6 mm, the maximum value is 1.41, 0.14 larger than that when there is no spherical concave.

Keywords: spherical convex structure; embedded spherical concave; enhanced heat transfer; numerical simulation

0 引言

液体火箭发动机能为航天器提供强大的推力,从而满足人类太空探索的需要。但是发动机在运行时,内部的高温气流对燃烧室内壁产生剧烈的冲刷,使得壁面发生烧蚀并破坏壁面结构。因此,需要采用有效的冷却手段对发动机壁面进行冷却^[1-2]。

再生冷却作为一种发动机冷却技术,近些年已有部分文献对其进行报道^[3]。ZHANG S L 等^[4]和王敏飞^[5]模拟了不同通道长宽比对流动换热的影响,研究发现当冷却通道为方形最有利于管道内的流动换热。另外研究人员对常规通道中添加肋进行了研究^[6-9],金光等人^[6]讨论了圆柱形肋高和肋角度对换热的影响。WANG C L 等人^[8]发现球凸在强化换热的同时,可将压力降低到可接受的范围。AFANASYEV V N 等人^[9]研究了球凹的换热性能及其流动损失特性,结果表明球凹相对光滑表面换热能力增加了 30%~40%,而压力损失仅略有增加。

虽然目前已有部分文献对肋的换热研究进行了报道,但是对于液体火箭发动机的再生冷却通道研究大多是关于通道外部结构,而对于通道中添加肋的研究很少,且现有的研究也存在通道高压降的问题。由文献[10]可知,仿真对于物体的热防护是可行的,所以本文利用 Fluent 软件,根据球凹低压降的特性,研究一种球凹/球凸结构对流动换热的影响。

1 数值模拟

1.1 数值模型验证

本研究数值模型验证参考 XIE P Y 等人^[11]的验证方法,文中提到实际的再生冷却通道为矩形结构,但公开文献中还没有关于矩形管中氢流动的相关实验。所以利用文献[12]中的氢燃料在圆管中的流动实验数据进行数值模型验证,并参照该文献中 RUN75-666 组实验数据进行数值模型验证。验证结果如图 1 所示。

第一作者简介:王鹏恩(1994—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为强化换热。

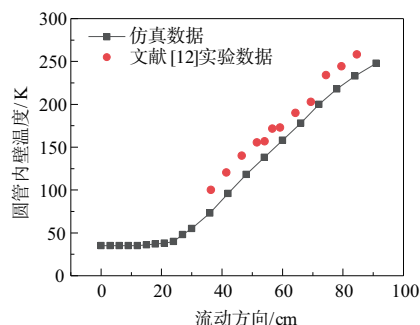


图1 数值模型验证

验证结果表明:在 Fluent 中利用 Real Gas Peng Robinson 方程定义密度可以很好地预测超临界下流体密度的变化;另外湍流模型采用 SST 模型,压力和速度的耦合采用标准 SIMPLE 方法对氢燃料在湍流下的流动模拟中是可行的。

1.2 矩形通道模型验证

由于在公开的文献中还未见到单排添加球形结构的实验,所以本研究参考王强^[13]的验证方法,与文献[14]中的光滑矩形通道管内流动实验数据进行对比,实验中工质为不可压缩空气,雷诺数 Re 为 14 767,以通道努塞尔数为参考依据,结果如图 2 所示,可以看出仿真和实验数据基本吻合,说明了此数值方法模拟矩形管内流动是可行的。

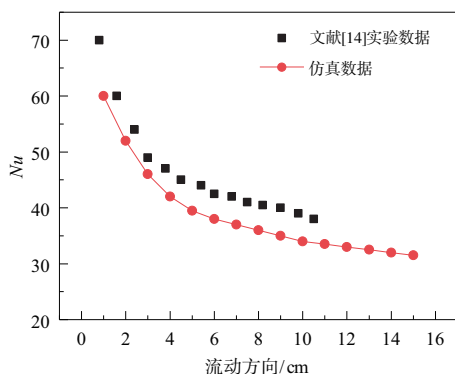


图2 矩形通道模型验证

1.3 计算模型简介

如图 3 所示为本研究的仿真模型,单位为 mm。从图中可以看出,球凹/球凸结构为在球凸上方内嵌一个球凹结构。模型总长度为 110 mm,壁面厚度为 1 mm,进口段和出口段长度各 30 mm,30~80 mm 处为加热段,通道横截面结构为 2×2 mm 结构。固体壁面选择为钢材料,内部流体为超临界氢。本文边界条件参考文献[10]的边界条件,在实际的再生冷却通道中,氢气是从亚临界状态过度到超临界状态的流动过程,本文仅仅研究氢气在超临界下的流动变化,所以进口温度设为 300 K,出口压力为 3 MPa,热流密度 q 设置为定值 3 MW/m^2 ,另外模型中球凸半径为定值 0.5 mm,高度为 0.5 mm,间距 s_p 为 1.5 mm。

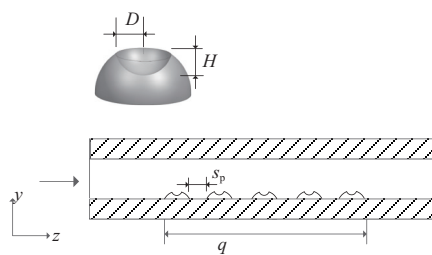


图3 球凹/球凸结构模型图

1.4 网格无关性验证

本文利用 ICEM 进行网格划分,在固液交界面加密,设置第一层网格厚度为 0.005 mm,共 15 层网格。选用雷诺数为 2.2×10^4 ,球凹深度 d_{ep} 为 0.3 mm,球凹半径 D 为 0.4 mm 时,对网格量进行验证。以内嵌扰流结构面上的平均温度作为参考依据。结果如图 4 所示,当网格量 > 500 万以后,温度变化仅为 1%。综合考虑计算效率和正确性两个因素,本文网格采用 500 万计算量。

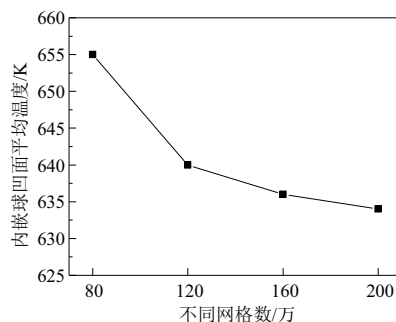


图4 网格无关性验证

1.5 参数定义

本文中所涉及的参数如下:

$$\text{通道努塞尔数: } Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (1)$$

$$\text{通道摩擦因子: } f = \frac{\rho \Delta P D}{2LG^2} \quad (2)$$

$$\text{相对努塞尔数: } \frac{Nu}{Nu_0} \quad (3)$$

$$\text{相对摩擦因子: } \frac{f}{f_0} \quad (4)$$

$$\text{综合换热因子: } \eta = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (5)$$

其中: h 为对流换热系数; D 为通道特征长度; λ 为导热系数; ρ 为流体密度; ΔP 为通道进出口压降; L 为通道长度; G 为通道质量流量; Nu_0 为光滑通道(无肋)时的努塞尔数; f_0 为光滑通道(无肋)时摩擦因子。

2 结果分析

2.1 球凹深度对冷却效果的影响

本研究首先对当球凹半径为 0.4 mm,进口雷诺数 Re_{in}

为 2.2×10^4 时,不同球凹深度对冷却效果的影响进行了研究,如图 5 所示。其中图中横坐标 0 处为无球凹结构。

从图 5 中可以看出,综合换热因子随球凹深度呈现先增大后减小的趋势,在 0.3 mm 处达到最大值 1.40。相比于不加球凹时的 1.27,综合换热因子增加了 0.13。

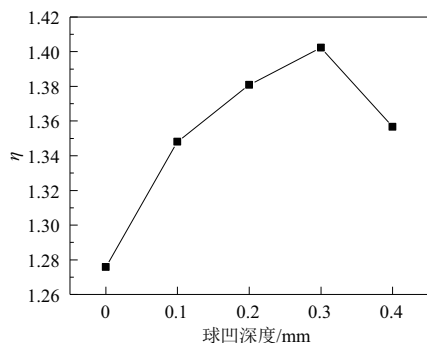


图 5 球凹深度和综合换热因子的关系

如图 6 所示为流体的流线示意图,从中可以看出,当球凹深度逐渐增加的时候,首先在球凹内会形成漩涡,加剧了流体之间的混合,增强了换热效果。

为了研究球凹结构对流体流动的影响,图 7 列出了当雷诺数为 2.2×10^4 ,不同球凹深度在 $Z = 60.5$ mm 处的流动横截面的温度分布图。

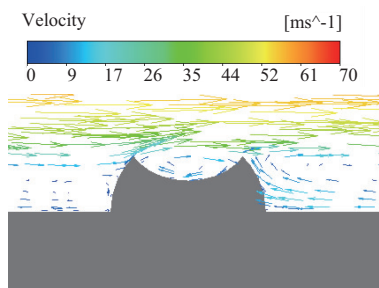


图 6 流体流线图

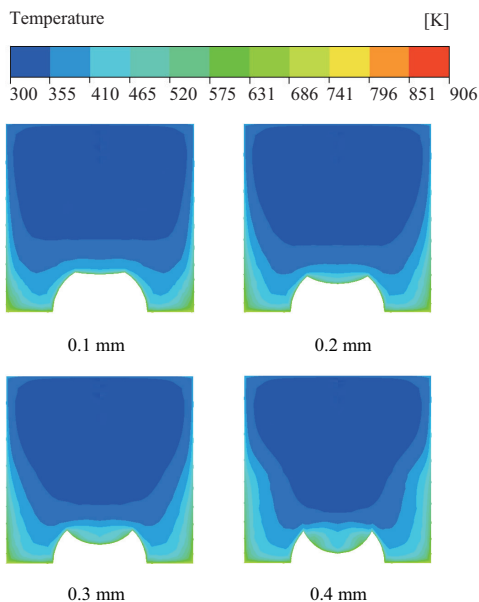


图 7 流体温度分布随球凹深度的变化关系

但当球凹深度较深的时候,如图 8 所示,在球凹底部会滞留了一小部分高温流体,且随着深度增加,滞留的流体越多,高温流体越会减小流体和高温固体壁面的温差,从而导致努塞尔数降低。所以会出现图 8 中相对努塞尔数先增大后减小的趋势。另外球凹深度的增加势必会带来摩擦因子的增加,结果如图 9 所示。最终使得综合换热因子呈现先增大后减小的趋势。

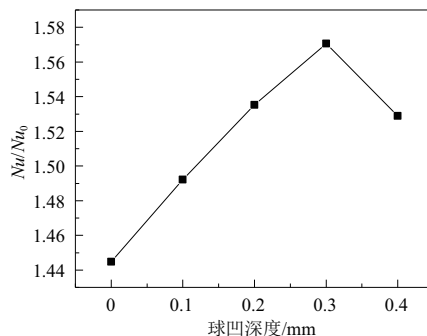


图 8 球凹深度和相对努塞尔数的关系

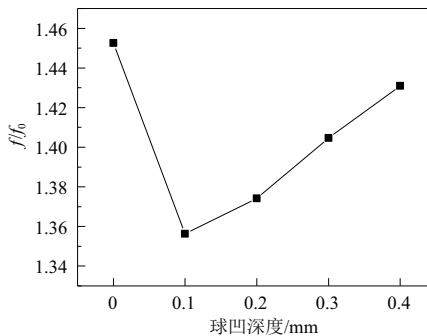


图 9 球凹深度和相对摩擦因子的关系

2.2 球凹半径对冷却效果的影响

当球凹深度为 0.3 mm,进口雷诺数 Re_{in} 为 2.2×10^4 时,不同球凹半径对冷却效果的影响如图 10~图 12 所示。其中图中横坐标 0 处为无球凹结构。

首先从图 12 可以看出,随着球凹半径的增加,综合换热因子随之增加,当球凹半径从 0.3 增加到 0.6 mm 时,综合因子从 1.33 增加到 1.41。这主要是因为当球凹的存在强化了球凹上方流体的湍流,当球凹半径增加的时候,球凹所能强化流体的范围变大,所以导致流体的相对努塞尔数随球凹半径的增加而增加,结果如图 10 所示。另外,球凹半径的增加使得流体的通道面积增加,所以使得相对摩擦因子随着球凹半径的增加而减小,结果如图 11 所示。综合两者因素,得到综合换热因子随着球凹半径的增加而增加。

3 结语

文中利用 Fluent 软件,分析内嵌球凹结构对再生冷却矩形通道管内超临界氢燃料的流动影响,所得结论如下:

1) 当球凹深度为 0.3 mm 时,综合换热因子最高,相

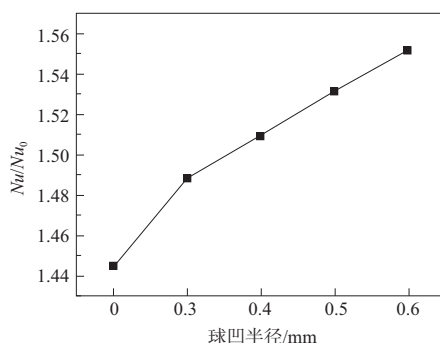


图 10 球凹半径和相对努塞尔数的关系

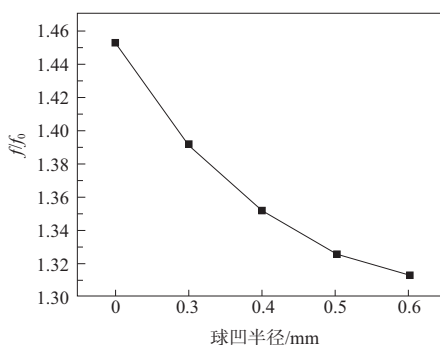


图 11 球凹半径和相对摩擦因子的关系

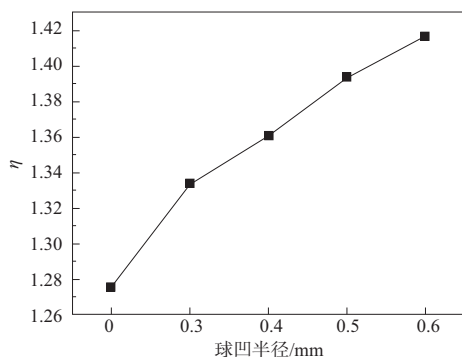


图 12 球凹半径和综合换热因子的关系

对于无球凹结构时,综合换热因子增加了 0.13。

2) 当球凹深度过大时,在球凹底部会滞留小部分高温流体,影响换热。

3) 当球凹半径增加的时候,使得球凹所能强化流体的范围变大,导致流体的相对努塞尔数增加,另外球凹半径的增加使流体的通道面积增加,从而减小了相对摩擦因子。

参考文献:

- [1] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京:中国宇航出版社, 1993.
- [2] 李瑞婷. 液氢/液氧火箭推力室室壁失效的数值研究[D]. 北京:北京工业大学,2013.
- [3] 休泽尔(美). 液体火箭发动机现代工程设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2003.
- [4] ZHANG S L, FENG Y, ZHANG D, et al. Parametric numerical analysis of regenerative cooling in hydrogen fueled scramjet engines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(25):10942-10960.
- [5] 王敏飞. 矩形冷却通道内超临界 RP-3 航空煤油对流换热数值研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [6] 金光, 包宇, 郭少朋, 等. 圆柱形内肋强化换热数值模拟与火耗散分析[J]. 热能动力工程, 2018, 33(4): 8-14.
- [7] XIE G N, LIU X T, YAN H B, et al. Turbulent flow characteristics and heat transfer enhancement in a square channel with various crescent ribs on one wall[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115:283-295.
- [8] WANG C L, WANG L, SUNDÉN B. Heat transfer and pressure drop in a smooth and ribbed turn region of a two-pass channel[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85:225-233.
- [9] AFANASYEV V N, CHUDNOVSKY Y P, LEONTIEV A I, et al. Turbulent flow friction and heat transfer characteristics for spherical cavities on a flat plate[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1993, 7(1):1-8.
- [10] 蒋苏苏, 沈红祥, 李兴勇, 等. 热力学仿真在天线罩热防护设计中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(6): 139-141.
- [11] XIE P Y, ZHANG X B. Hydrogen flow and heat transfer characteristic analysis in cooling channel wall with the spherical convexity structure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(31):16991-17003.
- [12] FRIEDMAN R, GRAHAM R W, HENDRICKS R C, et al. Experimental heat-transfer results for cryogenic hydrogen flowing in tubes at subcritical and supercritical pressures to 800 pounds per square inch absolute[R]. NTRS - NASA Technical Reports (National Aeronautics and Space Administration), 1966.
- [13] 王强. 球凹/球凸结构强化微通道对流换热研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [14] PENG W, JIANG P X, WANG Y P, et al. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in channels with different types of ribs[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14/15):2702-2708.

收稿日期:2020-02-19