

人为粗糙度强化传热机理数值分析

周立新¹, 张会强², 雷凡培¹, 葛李虎¹, 曾立¹

¹ 中国航天科技集团公司第六研究院十一所; ² 清华大学工程力学系

摘 要: 在统观模型框架内, 采用 $k-\varepsilon$ 模型对带人为粗糙度冷却通道内的流动和传热进行了数值模拟, 得到了速度场、温度场和湍流脉动物理量分布, 并比较了人为粗糙度冷却通道与光滑通道的数值模拟结果。基于数值模拟所提供的详细的流场信息, 研究了人为粗糙度对流动和传热的影响, 揭示了人为粗糙度强化换热的机理。本研究可为改进液体火箭发动机推力室人为粗糙度冷却通道的设计提供参考。

关键词: 人为粗糙度; 传热; 数值模拟

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2004) 01-0007-05

1 引 言

与早期的液体火箭发动机相比, 现代大推力液体火箭发动机推力室室压及室温有了很大的提高。这对于推力室的可靠冷却提出了挑战。特别是对于液氧/烃发动机, 如何保证推力室的冷却是设计师所面临的主要任务之一。为解决这一问题, 必须提高推力室冷却系统的冷却能力。研究表明^[1], 人为粗糙度技术是提高推力室再生冷却通道冷却性能的有效手段。人为粗糙度强化传热技术已经成功地运用于国外大推力液氧/煤油高压补燃发动机中^[1]。

人为粗糙度强化传热的研究以往主要采用试验研究。根据试验结果进行理论分析, 得到相应的经验关系式用于人为粗糙度通道的设计。随着计算技术的发展, 数值方法已经广泛应用于许多工程领域。在传热研究中, 数值传热学越来越显示出其巨大的优势^[2]。在液体火箭发动机冷却通道强化换热技术研究中, 运用数值传热学方法, 会给研究带来极大的好处^[3]。因此, 本文运用数值方法对人为粗糙度强化换热进行研究。

作为未来一系列数值研究的开始, 同时重点

在于揭示人为粗糙度强化换热的机理, 本文将主要研究二维通道问题。本文的研究中, 将在统观模型的框架下, 运用 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算带人为粗糙度的平直通道内的流动及换热特性, 得到速度场、温度场和湍流脉动量分布。同时还对不带人为粗糙度冷却通道的流动与换热特性进行数值模拟, 并与人为粗糙度冷却通道的换热特性进行比较, 从而揭示人为粗糙度强化换热的机理。

2 问题描述

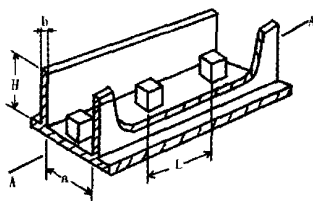


图 1 冷却通道结构^[1]

冷却通道结构如图 1 所示。人为粗糙度分布在冷却通道槽底。槽内由煤油作为冷却剂。底部的壁将与燃气接触。

收稿日期: 2003-06-30; 修回日期: 2003-07-09。

作者简介: 周立新 (1966—), 男, 博士生, 研究领域为液体火箭发动机推力室技术。

在本文的研究当中，将真实的三维通道简化为如图 2 所示的二维通道。数值模拟的主要目的是揭示人为粗糙度强化换热的机理。

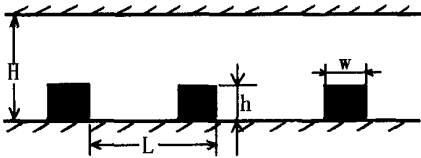


图 2 简化的冷却通道^[1]

3 基本方程及数值计算方法

本文数学模型中采用了 $k-\epsilon$ 湍流模型来模拟湍流。假定流动是二维、不可压、常物性的。由肋表面向冷却剂传递的热量被当作冷却剂的内热源处理。流场通过求解连续方程和纳维-斯托克斯方程得到。温度场由求解能量方程得到。湍流脉动量由 $k-\epsilon$ 方程得到。基本方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y}) + S_\varphi \tag{1}$$

式中， φ 是通用自变量， Γ_φ 是广义扩散系数， S_φ 是源项。 φ 、 Γ_φ 和 S_φ 的具体含义见表 1。模型常数见表 2。

边界条件：在通道入口给出一个充分发展的

速度剖面。在通道出口运用了局部抛物化条件，沿流线物理量的一阶导数设为零。通道壁面运用无滑移条件。至于能量方程，在上壁面给定绝热条件，在下壁面给定壁温。入口端流物理量按下式给出

$$k = 1\% \times (\frac{1}{2} U_{in}^2) \tag{2}$$

式中， k —湍动能； U_{in} —入口平均流速。入口端动能耗散率 ϵ 由下式给出

$$\frac{\rho u H}{\mu_t} = 500 \sim 1000 \tag{3}$$

式中， $u=U_{in}$ ； H —特征长度，这里 H 选取通道高度。根据计算结果，入口处值对结果的影响很小。

运用壁函数计算壁面切应力。第一个内节点设置在 $yp+ \geq 15$ 处。这里 $yp+$ 为第一个内节点到壁面的无量纲距离。 k 、 ϵ 方程的边界条件为

$$\left(\frac{\partial K}{\partial y} \right)_w \approx 0 \tag{4}$$

距壁面最近的第一个内节点的 ϵ 值由下式给出

$$\epsilon_p = \frac{c_\mu^{3/4} K_p^{3/2}}{\kappa y_p} \tag{5}$$

式中， ϵ_p —距壁面最近的第一个内节点处的湍动能耗散率； K_p —距壁面最近的第一个内节点处的湍动能； y_p —距壁面最近的第一个内节点到壁面的距离； $c_\mu = 0.09$ ； $\kappa = 0.4$ 。

表 1 基本方程中 $\varphi, \Gamma_\varphi, S_\varphi$ 的表达式

方程	φ	Γ_φ	S_φ
连续	1	0	0
轴向动量	u	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x})$
横向动量	v	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_e \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_e \frac{\partial v}{\partial y})$
能量	$c_p T$	$\frac{\mu_e}{Pr}$	0
湍动能	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon$
湍动能耗散率	ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon)$

$$\mu_e = \mu + \mu_t, \mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon, G_k = \mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$$

表 2 模型常数				
C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.80	0.8	1.1

基本方程的求解采用有限差分方法。计算域被矩形网格剖分。对于压力和速度网格单元分别使用了交错网格。流场求解采用了 SIMPLEC 算法。

4 结果与讨论

采用本文所开发的 CFD 软件，对通道内的流动及换热进行了计算，得到了流动及换热的详细信息。图 3 给出了带人为粗糙度冷却通道的流线。在每一个凸台的背后都有一个回流区，这个回流区会给附近区域的流场带来很大的湍流脉动。光滑通道的流线如图 4 所示。可以看出光滑通道的流线基本上是平直的。因而，人为粗糙度的存在会给流场结构带来明显的变化。

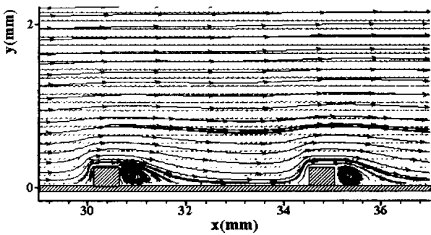


图 3 人为粗糙度通道内流线

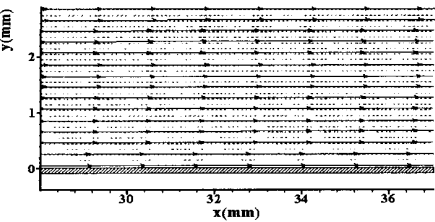


图 4 光滑通道内流线

两种通道内的轴向速度分布见图 5 和图 6。人为粗糙度给流动带来了扰动，使得轴向速度的分布与光滑通道有很大的不同，尤其在近壁区域。从图 6 中还可以发现，在两个凸台之间的区域，会造成轴向速度较大程度的降低。这一点对换热不利。由此可见，即使是对于换热过程，人为粗

糙度并非总是带来好处，它同样也有不利的一面。是否强化换热，要看最终的总体效果。如何合理设计人为粗糙度的结构，从而使其达到最佳效果应当在今后进行进一步研究。

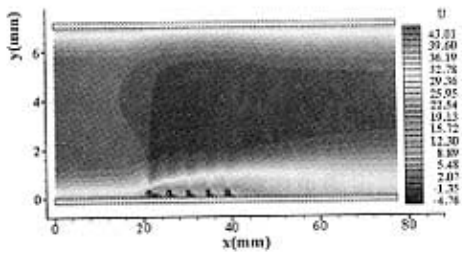


图 5 人为粗糙度通道内轴向速度分布

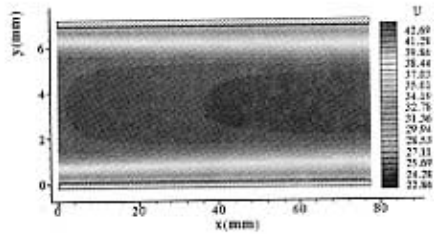


图 6 光滑通道内轴向速度分布

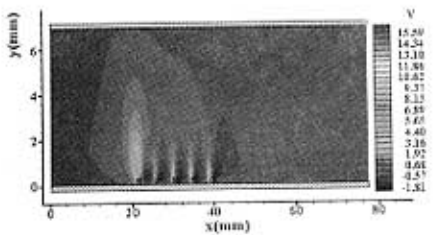


图 7 人为粗糙度通道横向速度分布

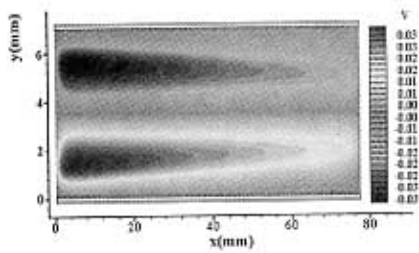


图 8 光滑通道横向速度分布

图 7 和图 8 中给出了人为粗糙度通道和光滑通道内的横向速度分布。在光滑通道内横向速度相当小,而在人为粗糙度冷却通道内,正如图 7 中所示的那样,最大横向速度可以超过 15m/s 。大的横向速度将大大加强流体(冷却剂)向主流区的对流。由流动的流体输运的热量要比因湍流扩散所传递的热流大很多,因而由底部壁面向主流体传递的对流热流会增大很多。因而人为粗糙度可以通过强化冷却通道内的横向对流来强化换热。

由于冷却通道中的流动是湍流流动,湍流掺混过程有助于换热。湍流掺混过程的剧烈程度可以用湍动能来表征。图 9 和图 10 给出了人为粗糙度通道及光滑通道内的湍动能分布。从图 9、10 中可以看出,由于人为粗糙度的存在,底部壁面附近的湍动能大大增加。湍流脉动的增强可以增强换热。

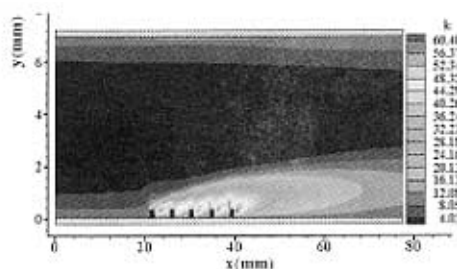


图 9 人为粗糙度冷却通道内湍动能分布

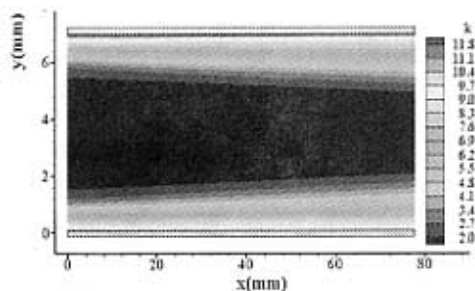


图 10 光滑冷却通道内湍动能分布

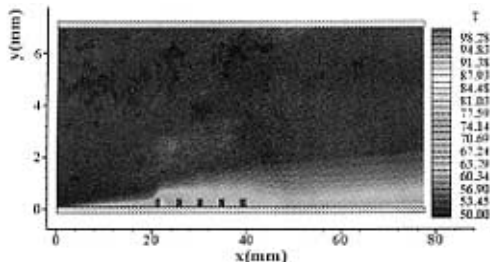


图 11 人为粗糙度冷却通道内温度场

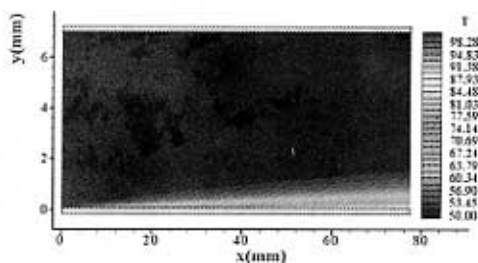


图 12 光滑通道内温度场

图 11 和图 12 分别给出了人为粗糙度冷却通道及光滑通道的温度场。这里下壁面的温度取定为 100°C 。从图 12 中可以看到,如果没有人为粗糙度,近壁处的液体薄层的温度会沿轴向持续增加,即温度边界层持续增厚。而在图 11 中可以看到,人为粗糙度的存在将会阻止这一过程。人为粗糙度会将近壁处的热流体层以对流的方式输运到主流体当中,与主流体进行充分的混合,使得这一部分流体的温度降低。这样在近壁处流体的温度将不会持续增加,因而,在有人为粗糙度时,壁面与流体间会保持较大的温差,从而强化了换热。

5 结论

本文对二维冷却通道流动进行了数值模拟,得到了流场的详细信息,研究了人为粗糙度对流动和换热特性的影响。这些影响可以归纳为以下几个方面:

- (1) 人为粗糙度会极大地增强近壁区流体的湍流脉动,从而强化湍流扩散;
- (2) 人为粗糙度会大大增加通道中的横向速度,从而强化流体的横向对流;
- (3) 人为粗糙度会阻止边界层流体温度的持续增长,使得流体与壁面之间保持更大的温差;
- (4) 人为粗糙度也存在对换热不利的一面,即会造成人为粗糙度凸台间轴向速度的降低。

人为粗糙度传热强化作用取决于上述几个方面因素的综合影响。本文目前对二维通道的数值模拟,可以初步揭示人为粗糙度强化传热的机理。

(下转第 15 页)

功能力, 反应了燃烧室的性能, 扰流环前后的压力差则说明了扰流环导致的压力损失。由表 2 可以看出, 002 工况比没有扰流环时头部压力要大, 喷管的入口压力也要大一些, 这说明扰流环对提高燃烧效率的作用是非常明显的。002 工况的喷管入口压力比 003 工况喷管入口压力小, 说明扰流环的高度对燃烧室的燃烧效率有重要的影响, 扰流环越高对燃烧效率越有利, 当然, 较高的扰流环产生的压力损失也越大, 发动机的传热环境也越恶劣。004 和 005 工况比 003 喷管的入口处的压力分别都要小一些, 说明扰流环有一个最佳位置, 如果扰流环太靠近头部或者太靠近喷管的入口处, 都会影响扰流环的性能, 尤其扰流环的位置太靠近头部时扰流效果差, 这主要因为当扰流环太靠近头部时, 它完全淹没在头部附近燃料回流区中, 导致其与推进剂的射流火焰的相互作用非常小, 达不到提高燃烧效率的效果。

由表 3 可以看出, 对于矩形的扰流环, 其压力损失对比三角形扰流环要大, 主要由于三角形圆弧边的导流作用使气流的压力损失比较小, 而气流在扰流环的折向作用下, 提高了燃料和氧化剂的混合, 从而提高了燃烧效率。但是这种扰流环对燃烧室的头部有较强的反射作用, 不利于发动机的稳定性。而在分段扰流中, 在前一段采用高度较小的矩形扰流环, 这样减小了对头部的压力反射, 而在后一段采用三角形的扰流环, 这样的效果好一些。

6 结论

在燃烧室中安装扰流环是提高发动机燃烧效率的一种新的技术, 根据以上的仿真结果分析, 可以得出:

(1) 扰流环应该放在燃烧室头部回流区的稍

下游位置, 不能太靠近喷管入口, 否则燃烧室的性能也会降低, 同时扰流环必须具有一定的高度, 高度太低对提高燃烧效率没有明显的效果。

(2) 矩形扰流环会导致燃烧室内的压力损失较大, 圆弧边三角形的扰流环对边区的流体有一定的导向作用, 但是其对喷注头部的压力反射作用较大。

从以上数学模拟的结果和分析来看, 计算所采用的方法是有效和有用的, 这为双组元液体火箭发动机的扰流环设计提供了借鉴, 也为以后的研究工作打下了基础。

参考文献:

- [1] 庄逢辰. 液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用. 长沙: 国防科技大学出版社, 1995.2.
- [2] 聂万胜. 自燃推进剂火箭发动机燃烧稳定性分析(博士论文). 国防科技大学研究生院, 1998.9.
- [3] Louis Larosiliere, Ron Litchford, Jeng San-Mou. Hypergolic Bipropellant Spray Combustion and Flow Modelling in Rocket Engines. AIAA 90-2238.
- [4] 童景山, 李敬. 流体热物理性质的计算. 清华大学出版社, 1982.
- [5] Kee R J, Rupley F M, Miller J A. CHEMKIN II: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics. Technical Report SAND 89-8009, Sandia National Labs, 1989.
- [6] 刘昌国. 高比冲性能双组元远地点火箭发动机研究. 卫星推进技术研讨会论文集, 2002.11.
- [7] Jiang T L, Chiu M H. Biopropellant Combustion in a Liquid Rocket Combustion Chamber. Journal. of Propulsion and Power, Vol.8, No.5.1992.

(上接第 10 页)

参考文献:

- [1] 葛李虎. 某型发动机推力室技术总结. 十一所内部资料, 1992.3.
- [2] 陶文铨. 数值传热学. 西安交大出版社, 1998.7.

- [3] LeBai F I, Popp M. Numerical Analysis of High Aspect Ratio Cooling Passage Flow and Heat Transfer, AIAA 93-1829.
- [4] Bi Linfeng. On the Influence of Artificial Roughness on the Heat Exchange Efficiency Of Periodic Cooling Channels. Thesis of B.Sc., Beijing University, 2002.