

人为粗糙度强化换热机理分析及效果评估

陈建华, 杨宝庆, 周立新, 杨永红, 吴海波

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 对推力室冷却通道内的人为粗糙度强化换热机理进行了分析, 讨论了影响人为粗糙度强化换热的因素。对有、无人为粗糙度的平直冷却通道内流动进行了对比数值模拟, 并以某特定发动机推力室为例, 初步评估了人为粗糙度的强化换热效果。计算和分析表明: 在推力室喉部附近设置人为粗糙度, 可使推力室气壁温平均下降约 43℃, 在冷却通道内合理地设置人为粗糙度有利于高室压可重复使用发动机推力室的热防护。

关键词: 推力室; 人为粗糙度; 传热

中图分类号: V434.24

文献标识码: A

文章编号: (2004)04-0001-05

The Mechanism and Effect of Artificial Roughness on Heat Transfer Enhancement

Chen Jianhua, Yang Baoqing, Zhou Lixin, Yang Yonghong, Wu Haibo

(Shaanxi Engine Design Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The mechanism and influence factors of artificial roughness (AR) on enhanced heat transfer in chamber cooling channels have been analyzed. The numerical simulation results of straight cooling channels with or without AR are compared. As an example, the effects of AR on the heat transfer improvement of a specific thrust chamber have also been estimated. It is shown that the average wall temperature of the gas-side drops about 43℃ with AR in the throat area. Therefore, the reasonable use of AR could gain the benefit of heat protection for high pressure reusable engine thrust chambers.

Key words: thrust chamber; artificial roughness; heat transfer

1 引言

液体火箭发动机推力室工作在高温、高压、大热流的环境中, 推力室热防护的优劣对发动机可靠工作有着重要影响。再生冷却作为推力室常

用的冷却措施在发动机上得到广泛应用。然而, 随着发动机能量特性的增大, 特别是对于可重复使用、大推力、高室压推力室而言, 简单的再生冷却即使结合内冷却有时也不能满足液体火箭发动机的热防护要求, 而为保证推力室可靠冷却而

收稿日期: 2004-03-15; 修回日期: 2004-07-12。

作者简介: 陈建华 (1966—), 男, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机推力室技术。

采用增大内冷却剂流量的手段,却又以降低发动机的性能为代价,这与高可靠、低成本、高性能发动机的发展方向相悖,因此,对于可重复使用发动机和高室压推力室,推力室的局部强化换热技术就很自然地成为很有前景的冷却措施之一。

在推力室冷却技术的实际应用中,强化换热的方法不少,例如,可提高再生冷却通道中的冷却剂流速、肋化传热面、降低室壁热阻、设置人为粗糙度等。但提高冷却剂流速可能会导致推力室的流阻损失大大增加,这一缺点给整个发动机系统造成很大的负担。人为粗糙度强化冷却技术就有可能克服这个缺点,它既可以强化局部换热又使流阻损失不过于增大。

所谓人为粗糙度就是在推力室再生冷却通道中,沿着靠近热壁面的流道表面形成一定分布的凸台,凸台的型面、高度、长度和间距不同,形成一定规律的有序组合。在再生冷却通道中设置人为粗糙度的强化换热技术,其作用不仅增大了换热面,更重要的是人为粗糙度相当于扰流器而增大了近壁流体湍流速度,从而强化对流换热。

对有、无人为粗糙度冷却通道的流动进行数值模拟,可初步了解围绕人为粗糙度的局部流动情况,有利于分析人为粗糙度的强化换热机理^[1]。有的研究者^[2]对带有纵向肋的换热装置通道内的强迫对流换热进行数值模拟,以确定局部流动和换热情况。本文针对某特定发动机推力室,对再生冷却通道内的人为粗糙度的机理进行分析,对影响人为粗糙度强化换热的因素进行讨论。对带有两个凸台人为粗糙度的矩形平直冷却通道内流动进行数值模拟,与无凸台的冷却通道进行对比以明确人为粗糙度的作用,并对冷却通道内设置人为粗糙度而引起气壁温、热流密度等参数变化进行计算,对其强化换热作用进行初步评估。

2 人为粗糙度强化换热机理

2.1 人为粗糙度结构

在推力室再生冷却通道槽底设置的人为粗糙度结构,如图1所示,具有一定分布的凸台,凸台具有一定高度 h 、长度 l 、间距 s 。人为粗糙度可采用不同的凸台型面,通常采用矩形凸台型面。

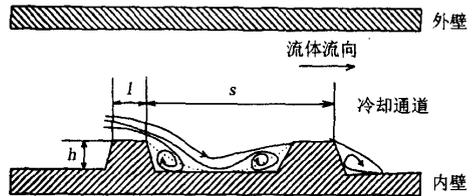


图1 人为粗糙度结构示意图

Fig.1 The configuration of AR

2.2 流体与壁面间的换热

流体流经壁面时由于粘性作用而在近壁区形成边界层,流体与壁面间的换热通过边界层来实现。边界层内的流动状况对流体与壁面间的换热有很大影响。在层流边界层内,换热主要依靠导热的方式。在湍流边界层大部分区域内,换热以湍流掺混这种强烈的对流换热形式进行,但是在层流底层换热仍以导热方式为主,层流底层的热阻对换热影响很大,层流底层越薄,流体与壁面对换热影响就越大,换热过程加剧。因此,在通道内设置人为粗糙度凸台来强化流体扰动、降低流体的层流底层厚度,是一种可行的强化流体与壁面对流换热的途径。研究表明^[3]:合理设置人为粗糙度可使总的换热效果大幅增加,而与此对应的流阻增加却不显著。

2.3 边界层的涡结构

在流动过程中,冷却通道中形成的边界层实质是个涡层。对于流体沿平板的流动,当流体雷诺数超过临界雷诺数时,层流中出现二维波,其特点为波长、频率固定,而振幅增加,流动中二维扰动非线性增加和三维扰动的作用使二维涡逐渐发展成具有三维结构的展向涡,其振幅周期性变化。在流体底层出现流向涡对,流向涡对的发展和相互作用形成流动二次不稳定,流体会发生振荡现象。在湍流边界层外层中因流动不稳定发展而产生尺度与边界层厚度同量级的展向涡,从底层到湍流外边界的区域内存在着法卡涡,而在底层中则充满着以一定间隔的流向涡对在流向涡对的作用下,在底层产生展向分布的高、低速相间流带,它们常在外层展向大涡的扫荡下发生破碎、断裂生成大量小涡,即外层的展向涡刺

激了底层涡的猝发,此时底层受到强烈扰动。随着流动发展,底层流向涡对又会重新产生。

2.4 人为粗糙度对流动的影响

当流体流经分布在冷却通道槽底壁面的凸台时,流体局部流态将发生变化。人为粗糙度的设置如果使得流体边界层受到扰动、层流底层变薄,则流体与冷却通道槽底壁面换热会增强,就可起到强化换热的功效。流体流经人为粗糙度会出现局部分离流和局部回流区,这种流动所具有的局部特点直接影响着边界层的发展。在冷却通道内表面由于设置一定型面和尺度的人为粗糙度而产生的涡流与层流中的涡相互作用,会改变流场中涡的结构和强度,从而影响流体流动状态,由人为粗糙度产生的涡动能可使边界层原有的涡动激发,有利于流体层流边界层湍流化、层流底层薄层化,因此,可通过改变冷却通道局部结构来控制边界层流态。

3 人为粗糙度强化换热的影响因素

人为粗糙度强化换热影响因素是多方面的,它的设置可使流体的层流底层变薄、流体湍流掺混加剧。强化换热,就是合理地设置人为粗糙度来促进和强化这些现象发生。人为粗糙度的设置要考虑冷却剂流速、粘度、密度、凸台型面和几何尺度(高度、宽度、间距)等因素^[4]。

人为粗糙度结构的凸台高度 h 和凸台之间的间高比 s/h 是两个重要的结构参数。凸台高度影响着层流底层的阻断效应,并且它使流线弯曲而产生离心力作用,从而在流动中形成局部回流。随着凸台高度的增加,对流换热系数的增大在一定范围内超过流阻的增大。凸台高度应大于层流底层厚度,而小于边界层厚度,这是因为,当凸台高度小于层流底层厚度时,它在热交换过程中起不到显著作用;而当凸台高度大于边界层厚度时,虽然增强了换热效果,但是流阻损失也相对增大较多。

决定换热效果强弱的边界层流动特性与凸台之间的间高比 s/h 之间有很大关系。人为粗糙度的强化换热效果可以通过有、无人为粗糙度两种情况下的热流之比来表示,即通过人为粗糙度的有效系数 ε_w 来表示,人为粗糙度的有效系数越

大,表明强化换热效果越好。人为粗糙度的有效系数可表示为

$$\varepsilon_w = q_w / q_0$$

式中, q_w 、 q_0 分别为有、无人为粗糙度时的热流。当冷却剂和流速一定时,人为粗糙度的高度、间距与人为粗糙度有效系数的关系^[4]如图2所示,由图可知,在一定凸台高度范围内,随着人为粗糙度高度的增大,人为粗糙度强化换热效果越好。在曲线上存在一个最大值,说明人为粗糙度使热流密度的增加达到最大。当间高比在范围12~14时(与流体的物性有关),强化换热的效果较好。

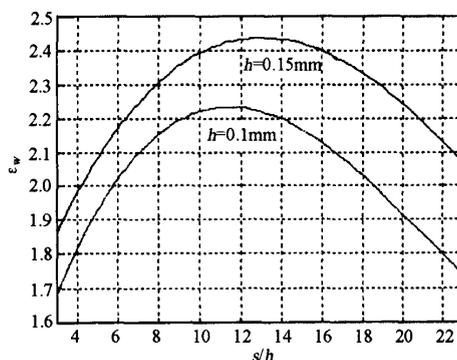


图2 有效系数与凸台高度、间高比的变化关系

Fig.2 Variations of efficient coefficient with clearance-height ratio

由于粘性作用,层流底层不可能完全消除,人为粗糙度的强化换热效果是有限的,不同的人为粗糙度结构会产生程度不同的层流转化,有着不同的强化换热效果,也不同程度地引起流阻的变化。因此,在冷却通道中设置人为粗糙度时,应寻求较佳的强化换热效果并使流阻损失较小。

4 人为粗糙度的二维数值模拟

本文对图1所示的带人为粗糙度平直再生冷却通道内的流动进行了分析,对带有两个矩形凸台型人为粗糙度和无人为粗糙度的冷却通道进行初步数值模拟,获得了有、无人为粗糙度两种状态下的速度场、湍动能等分布。计算中采用的冷

却通道截面为矩形。冷却通道高度 5mm, 冷却剂流速 40m/s。

计算中所采用的控制方程为^[5]

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

式中, φ 为通用变量; Γ_{φ} 为传递系数; S_{φ} 为源项。

计算中采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。假设流动为速度和温度充分发展的流动; 流体不可压缩; 常物性; 二维流动。

边界条件为: 上下壁面及人为粗糙度表面为速度无滑移条件, $u = v = 0$ 。下壁面和人为粗糙度表面 $T = T_w$, 上壁面为恒温条件。给定入口冷却液温度。近壁处采用壁面函数法, 第一个内节点与壁面间的无量纲距离满足 $y_p^+ > 15$ 。

根据二维数值模拟计算结果, 当冷却通道内有人为粗糙度时, 其流向速度分布见图 3。从计算结果可知, 由于人为粗糙度的存在而使局部最大流向速度达到 48.55m/s。

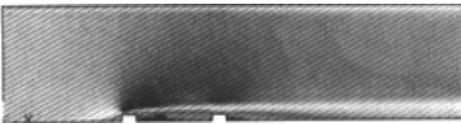


图 3 有人为粗糙度时的平直冷却通道内的流向速度分布

Fig.3 Distributions of stream velocity with AR in straight cooling channel

冷却通道内有人为粗糙度时的横向速度分布见图 4。对比平直冷却通道内有人为粗糙度两种情况的计算结果可知, 有、无人为粗糙度时的冷却通道内流动的最大横向速度分别为 19.09m/s 和 0.08m/s。可见, 人为粗糙度使得冷却通道内的局部横向速度大大增加, 从而在很大程度上增大了冷却通道底部的扰动。

此外还计算了湍动能的分布, 对比有、无人为粗糙度冷却通道内的湍动能分布可知, 二者在冷却通道内的最大湍动能存在量级上的差别。因

此, 人为粗糙度使得平直再生冷却通道近壁处的局部湍动能大大增加, 有利于局部换热的强化。

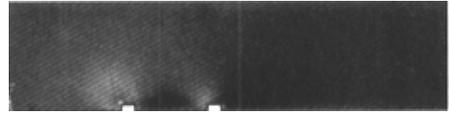


图 4 有人为粗糙度时的平直冷却通道内的横向速度分布

Fig.4 Distributions of transverse velocity with AR in straight cooling channel

5 人为粗糙度效果的初步评估

针对采用煤油为冷却剂的特定推力室, 对人为粗糙度的强化换热效果进行初步的评估, 方法是在局部再生冷却段 (燃烧室和喷管收扩段等部位) 冷却通道槽底壁面设置和不设置人为粗糙度, 计算对比各种情况下的壁面热流密度、气壁温度以及冷却剂出口温升等参数。

在人为粗糙度强化换热效果初步评估中, 采用有效系数修正肋效率, 以此来估算通道内有人为粗糙度时的热流密度变化。把矩形冷却通道处理成顶端绝热肋。对在推力室再生冷却通道不同段单独设置人为粗糙度的情况进行了计算。对人为粗糙度强化换热效果的评估如下:

对于燃烧室部位的冷却通道, 有、无人为粗糙度时的气壁温与热流密度的对比曲线见图 5 和图 6。当在燃烧室冷却通道设置人为粗糙度时, 其气壁温度下降、壁面换热系数增大。

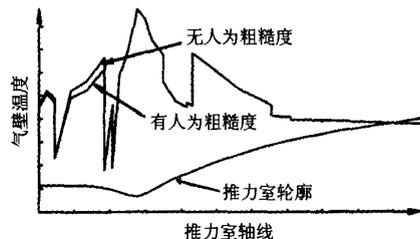


图 5 燃烧室有、无人为粗糙度时的气壁温度对比

Fig.5 Comparison of the gas-side wall temperatures with/without AR in the chamber channels

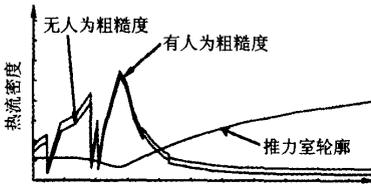


图6 燃烧室有、无人为粗糙度时的热流密度对比
Fig.6 Comparison of heat flux with/without AR in the chamber channels

对于推力室收扩段部位的冷却通道,有、无人为粗糙度时的气壁温度对比曲线见图7。当在喷管收扩段冷却通道设置人为粗糙度时,此段气壁温度下降、壁面换热系数增大。在额定工况下此时此段热流增加幅度为6.5%,最大气壁温下降72℃,平均气壁温下降43℃。

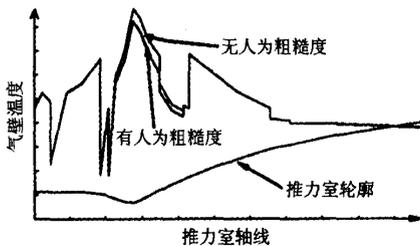


图7 喷管收扩段有、无人为粗糙度时的气壁温度对比
Fig.7 Comparison of the gas-side wall temperature with/without AR in the throat area of nozzle

计算结果还表明在再生冷却通道槽底局部设置人为粗糙度时,冷却剂温升和流阻损失增加不大,同时液壁温下降幅度大于相应的气壁温降。对于以煤油为冷却剂的推力室,由于煤油在较高的温度下会结焦,从而恶化推力室传热,而为了防止结焦的出现,要保持冷却通道液壁温在较低温度的范围之内。由此可见,在冷却通道内合理的设置人为粗糙度而引起液壁温下降,这对于防止煤油结焦是相当有利的。

6 结论

通过对带有人为粗糙度的冷却通道内的流动情况进行分析,对设置两矩形凸台人为粗糙度的平直冷却通道内流动进行的数值模拟,初步揭示了人为粗糙度的强化换热机理。讨论了影响人为粗糙度强化换热的因素。对特定推力室冷却通道设置人为粗糙度的强化换热效果进行了初步评估。结论如下:

(1) 人为粗糙度可引起冷却通道槽底的流态变化,使层流底层薄层化。人为粗糙度大大增加了局部湍流强度,提高了流体的换热能力。人为粗糙度使冷却通道内非主流方向的局部横向速度大大增加,有利于局部换热的强化。

(2) 在人为粗糙度的结构参数(型面、高度、宽度和间距等)中,凸台高度、间高比对强化换热的影响最为明显。

(3) 对于一个特定的推力室结构,在喉部附近设置人为粗糙度,可使推力室的气壁温度平均下降约43℃。

(4) 在推力室冷却通道槽底设置人为粗糙度,可降低当地气壁温和液壁温。在冷却通道内合理设置人为粗糙度有利于防止煤油结焦。

(5) 人为粗糙度强化换热冷却技术有利于增大高室压、大热流、可重复使用发动机工作的安全裕度。

参考文献:

- [1] 周立新,张会强,雷凡培.人为粗糙度强化传热机理数值分析[J].火箭推进,2004,30(1).
- [2] S C Lau, L E Ong, et al. Forced Convective Heat Transfer in Channels with Internal Longitudinal Fins[R]. AIAA87-1644.
- [3] А П Васильев, В А Кузнецов, В Д Курпатенков. Основы Теории и Расчета Жидкостных Ракетных Двигателей[M]. Москва высшая Школа, 1993.
- [4] Э К Калини, Г А Дрейцер, С А Ярхо. Интенсификация Теплообмена в Каналах[M]. Машиностроение, 1972.
- [5] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.