

燃烧室新型迷宫复合冷却结构的设计与换热分析

何立明, 张立志, 原和朋, 李名魁, 金涛, 陈鑫, 蒋永健

(空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038)

摘要: 燃烧室迷宫复合冷却结构是一种集冲击、对流换热和近似发散冷却于一身, 兼具冲击冷却、对流换热冷却和席壁冷却结构优点的创新性冷却结构。本文在研究该结构冷却机理的基础上, 从实用的角度出发, 以某型现役发动机燃烧室改型设计为例, 对瓦块式迷宫冷却结构进行设计, 并进行换热分析和壁温计算。初步研究表明, 该冷却结构的冷却性能优于全气膜冷却结构。

关键词: 瓦块; 迷宫复合冷却结构; 换热分析; 冷却性能

中图分类号: V23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)05-0001-04

随着发动机性能的提高, 使得燃烧室的工作环境变得极为恶劣, 一方面燃烧室承受着极大的热负荷、高的温升, 同时受到高温燃气的热辐射和热流冲击; 另一方面承受着低频循环的热疲劳和高温蠕变, 此外还有热腐蚀等, 以至于将大大缩短燃烧室的使用寿命, 降低工作的可靠性。这对燃烧室冷却结构的设计和冷却效果提出了更高的要求^[1-2]。

燃烧室迷宫复合冷却结构是一种集冲击、对流换热和近似发散冷却于一身, 兼具冲击冷却结构、对流换热冷却结构和席壁冷却结构的优点, 结构合理, 是一种创新性的新型冷却结构。本文在研究该结构冷却机理的基础上, 从实用的角度出发, 以某型现役发动机燃烧室改型设计为背景, 对瓦块式迷宫冷却结构进行设计, 并进行换热分析和壁温计算。

1 迷宫复合冷却结构的冷却机理

燃烧室迷宫复合冷却结构由三层壁构成, 即外侧壁、中间壁和内侧壁。在外侧壁的后段开有几排小孔, 在中间壁的前端按一定间隔开有冷却空气槽道, 内侧壁为席壁结构。冷却空气从外侧壁的后段几排小孔进入上冷却通道, 再从位于中间壁前端的冷却空气槽道进入下冷却通道, 最后在席壁燃气侧形成均匀气毯, 具体冷却结构如图1所示。

该结构的冷却机理是: 从压气机流过来的二股气流在流过本结构外侧壁的前半部分时, 冷却空气与外壁面进行对流换热, 降低外壁面的温度。当二股气流流至外侧壁的后部时, 冷却空气从壁面上的几排进气孔进入上冷却通道, 一方面, 冷却空气直接冲击中间壁上表面, 对其进行冲击冷却, 降低中间壁面的温度; 另一方面, 冷却空气在上冷却通道内向前逆向流动, 分别与中间壁上表面和外侧壁内表面进行

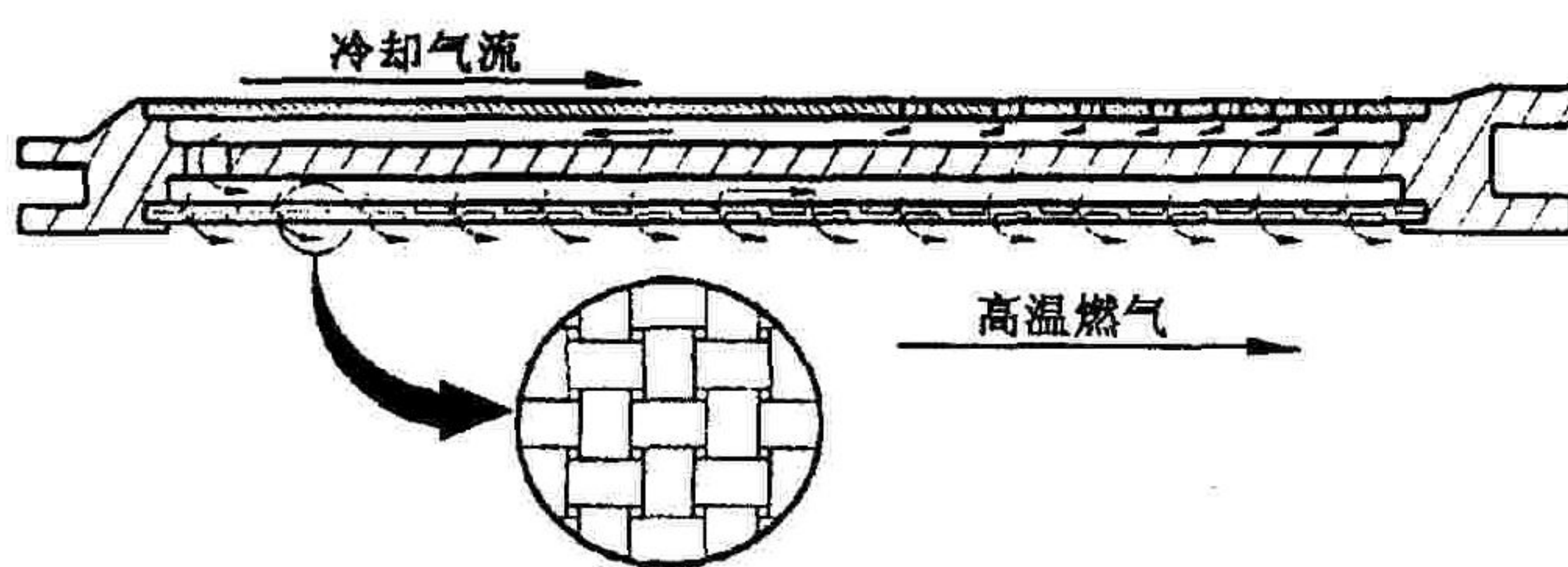


图1 迷宫复合冷却结构示意图

进行对流换热。当冷却空气流至中间壁的前端时, 通过从前端的一排冷却空气槽进入下冷却通道。冷却空气在下冷却通道内从前向后的流动过程中, 与中间壁下表面和席壁内表面进行对流换热, 同时, 冷却空气从席

收稿日期: 2004-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276070)

作者简介: 何立明(1959-), 男, 浙江上虞人, 教授, 博士生导师, 主要从事飞机推进系统气动热力和脉冲爆震发动机研究。

壁结构编织过程中自然形成的小孔流出,一方面与席壁小孔侧表面进行对流换热带走热量,另一方面在席壁燃气侧壁面形成一层均匀的冷却气膜将燃气与席壁隔开,对壁面起到很好的冷却保护作用。由此可见,迷宫复合冷却结构集冲击、对流换热和近似发散冷却于一身,兼具冲击冷却结构,对流换热冷却结构和席壁冷却结构的优点,结构合理,冷却效率高,是一种创新性的新型冷却结构。

2 瓦块式迷宫复合冷却结构设计

为了获得良好的冷却效果,在合理地确定和布置冷却结构的外侧壁(外层)、中间壁(中间层)和内侧壁(内层-席壁)表面冷却孔的大小、形式及位置分布(如孔的形状、间隔、顺排、叉排等)和各层之间的间隔等结构参数的基础上,考虑本冷却结构冷却性能的验证主要是通过与现役 WP-7 乙 B 火焰筒全气膜冷却结构的冷却性能比较进行,为了减小火焰筒冷却壁面的应力集中现象,提高其冷却结构的实用性,延长火焰筒的寿命,参考国外先进燃烧室设计,在改型设计时采用“瓦块(或瓦片)”式分段结构。

瓦块式迷宫复合冷却结构的设计就是要确定外侧壁(外层)上冲击冷却孔的排数、孔的数量、孔径、间隔及排列方式;确定中间壁(中间层)前端冷却空气槽的宽度和长度及间隔和内侧壁(内层)席壁表面冷却孔的大小以及各壁面层之间的间隔。设计的瓦块式迷宫复合冷却结构见图 2。

3 燃烧室迷宫复合冷却结构换热分析

3.1 燃烧室迷宫复合冷却结构的物理模型

根据迷宫复合冷却结构的冷却空气的流动和冷却作用及结构特点,将整个瓦块沿轴向分为 3 个部分,建立图 3 物理模型。第一部分的传热模型见图 4。



图 2 瓦块式迷宫复合冷却结构



图 3 迷宫冷却结构物理模型

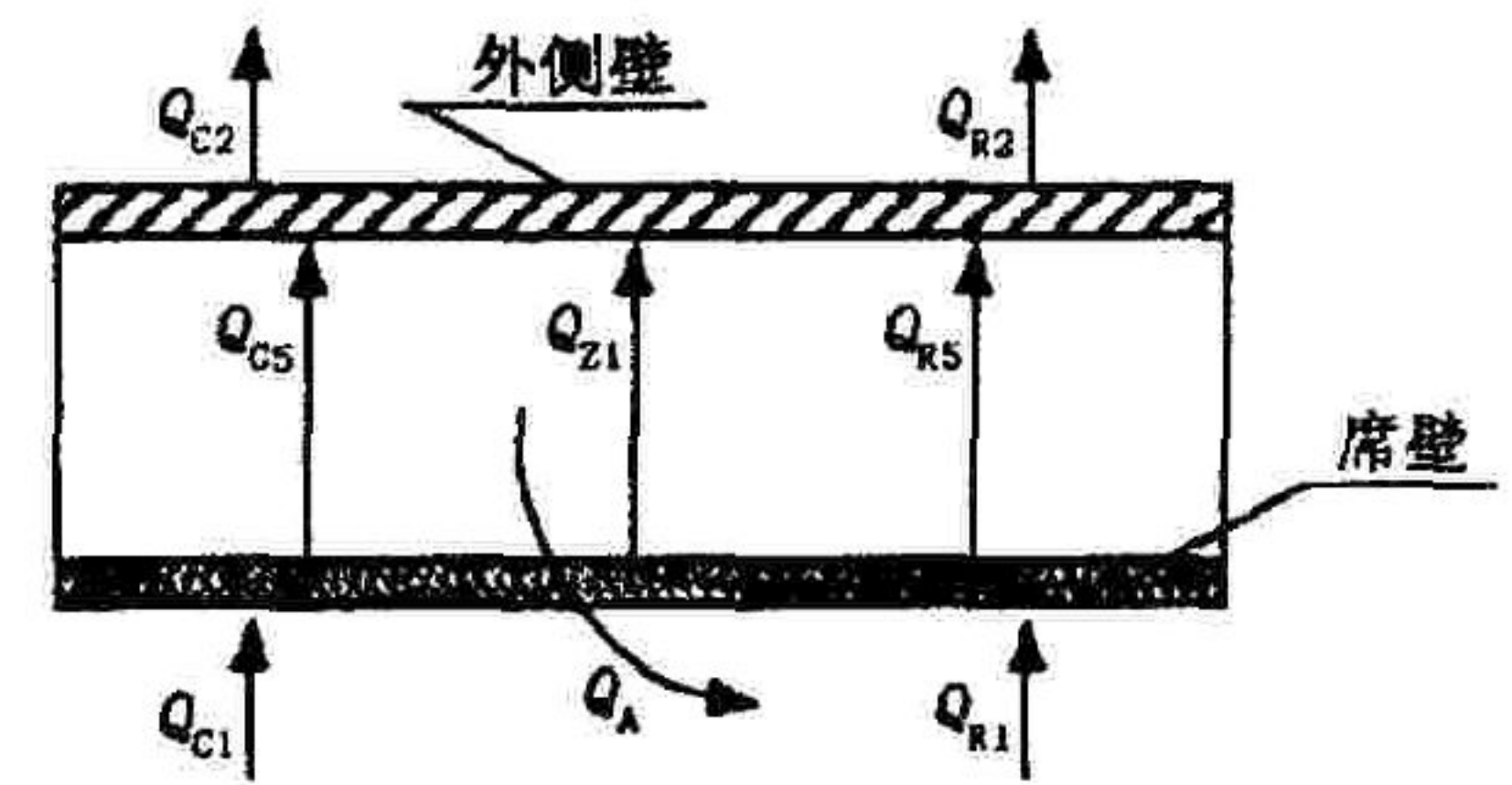


图 4 迷宫冷却结构第一部分传热模型

对外侧壁与席壁分别建立热传递平衡方程,有

$$\begin{cases} Q_{R1} + Q_{C1} = Q_{Z1} + Q_{R3} + Q_A + Q_{C3} \\ Q_{R2} + Q_{C2} = Q_{Z1} + Q_{R3} + Q_{C3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, Q_{C1} 、 Q_{C2} 分别为高温燃气与内侧席壁的对流换热量及火焰筒外侧壁与二股通道冷却空气的对流换热量; Q_{R1} 、 Q_{R2} 分别为高温燃气对内侧席壁的辐射换热量及火焰筒外侧壁对火焰筒外套的辐射换热量; Q_{Z1} 为冷却空气从上冷却通道进入下冷却通道的冲击换热量; Q_{C3} 为上冷却通道的冷却气流与席壁上表面的对流换热量; Q_{R3} 为席壁外侧对外侧壁的辐射换热量; Q_A 为冷却气流与席壁内部的换热量。

第二部分的传热模型见图 5。分别对三层壁面建立热流平衡方程:

$$\begin{cases} Q_{C1} + Q_{R1} = Q_{C3} + Q_{R3} + Q_A \\ Q_{C3} + Q_{R3} = Q_{C4} + Q_{R4} \\ Q_{C4} + Q_{R4} = Q_{C2} + Q_{R2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q_{C3} 为席壁上表面与下冷却通道冷却气流的对流换热量; Q_{R3} 为席壁上表面对中间壁的辐射换热量; Q_{C4} 为上冷却通道的冷却气流与中间壁面对流换热量; Q_{R4} 为中间壁对火焰筒外侧壁辐射换热量。

第三部分的传热模型见图 6。分别对三层壁面建立三个热流平衡方程:

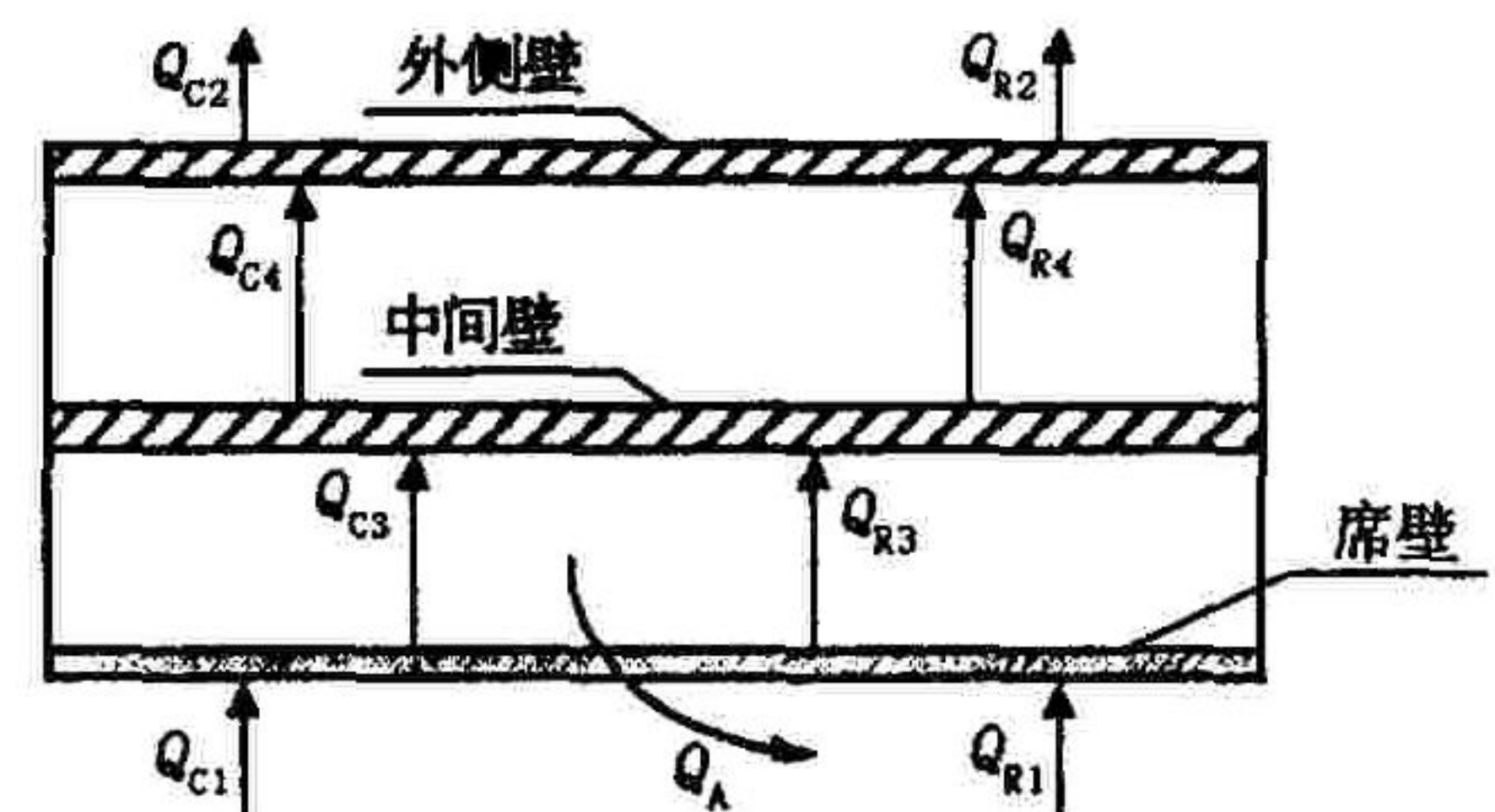
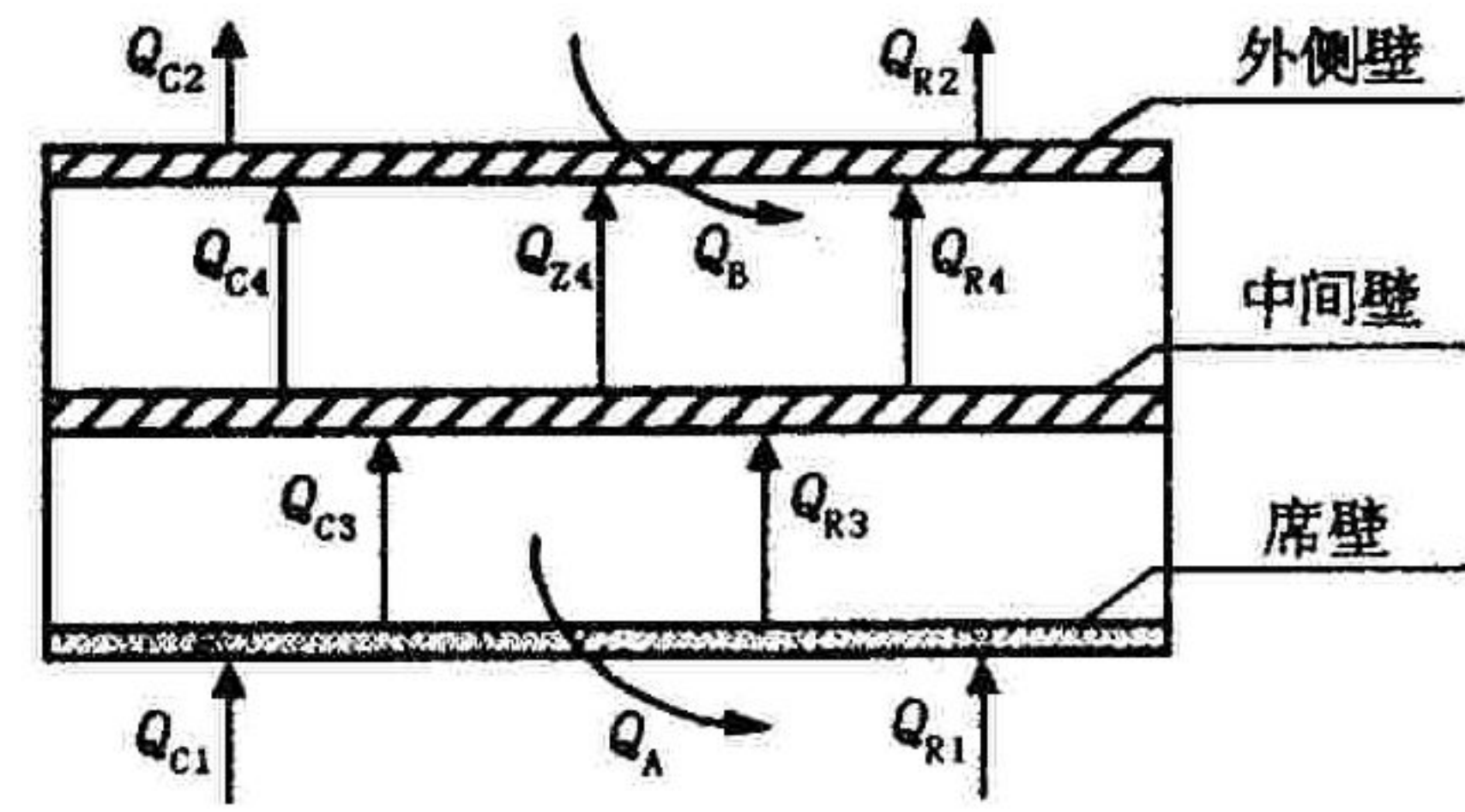


图 5 迷宫冷却结构第二部分传热模型

$$\begin{cases} Q_{C1} + Q_{R1} = Q_{C3} + Q_{R3} + Q_A \\ Q_{C3} + Q_{R3} = Q_{C4} + Q_{R4} + Q_{Z4} \\ Q_{C2} + Q_{R2} + Q_B = Q_{C4} + Q_{R4} + Q_{Z4} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_{Z4} 为冷却空气从二股通道进入上冷却通道时对中间壁的冲击换热量; Q_B 为冷却气流与外侧壁内部的换热量。



3.2 计算方法

沿整个瓦块轴向的换热及壁温计算分为 3 个部分,先对第三部分图 6 迷宫冷却结构第三部分传热模型的三排进气孔所在位置进行换热及壁温求解,再分别对前两个部分进行求解,将 3 个部分的解合并在一起便构成整个迷宫瓦块壁面的换热和壁面温度变化曲线。本文采用一维热流平衡计算模型,在计算中作了以下基本假设:①忽略冷却空气沿外环通道流动时的温升;②忽略火焰筒壁面的纵向导热;③火焰筒外套温度等于二股气流温度,且为常数;④忽略瓦块搭接处的接触导热;⑤气流流动为一维定常湍流流动。

由方程组(1)、(2)及(3)可得 3 个独立的方程组成的方程组,但它包含了 6 个未知数,分别是席壁的内、外侧壁温 T_{w1} 、 T'_{w1} ;中间壁的内、外侧壁温 T_{w2} 、 T'_{w2} ;外侧壁的内、外侧壁温 T_{w3} 、 T'_{w3} 。因此,方程组不封闭,要求解,必须再补充 3 个方程。各热流的计算公式和补充方程参见文献[5]、[8]、[10]。

4 计算结果及分析

首先根据文献[5]的计算方法对该火焰筒的沿程参数进行了计算,包括二股通道的空气流量、各排冷却孔的流量分配及主燃孔和掺混孔的流量分配、主通道和二股通道的沿程参数。在此基础上,对改型后的火焰筒的壁面换热和温度进行了计算。计算所得的迷宫复合冷却结构的冲击冷却换热量和对流换热量的比较(在相同轴向位置)、壁温分布见图 7、图 8。

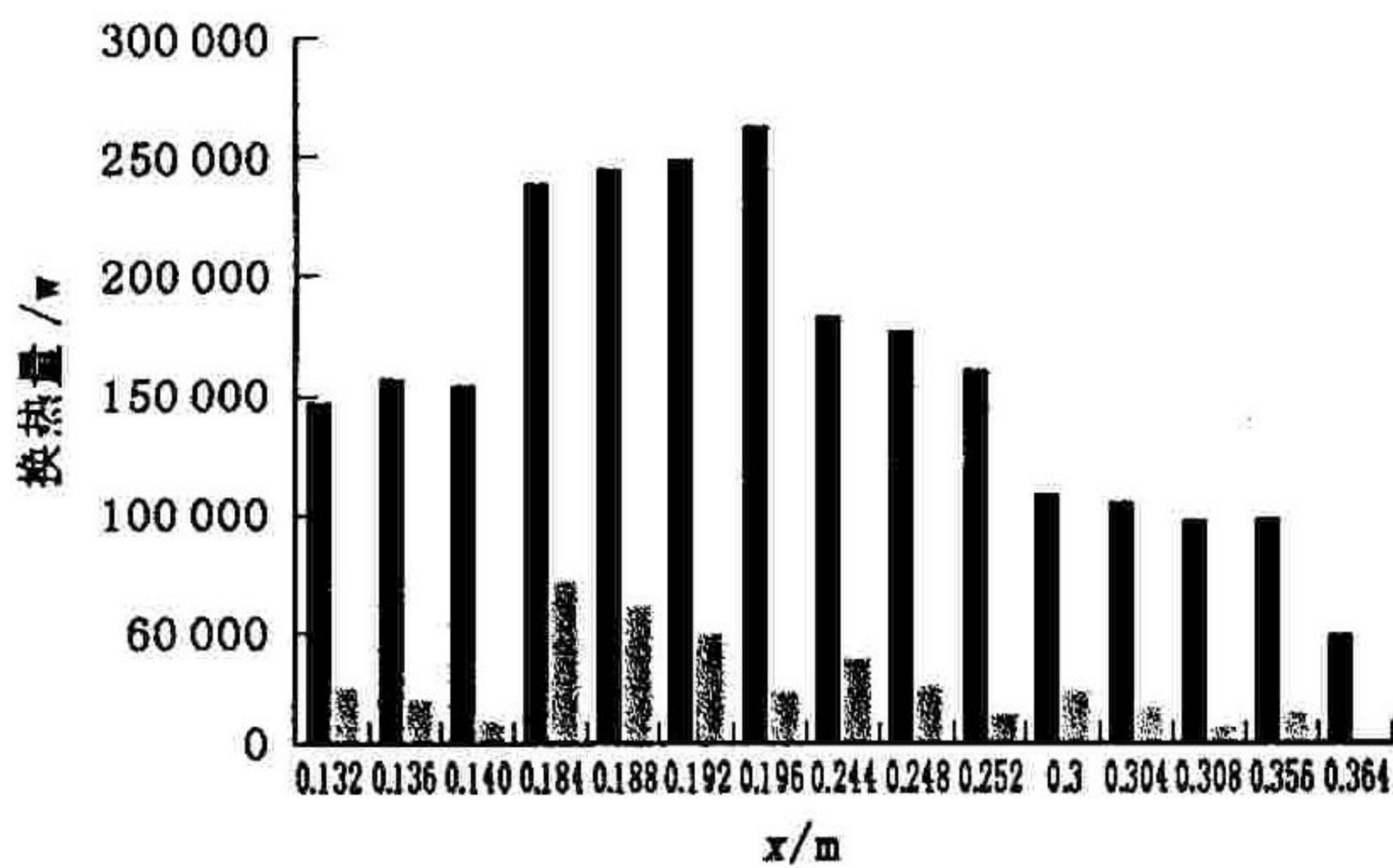


图 7 冲击冷却量与对流换热量的比较

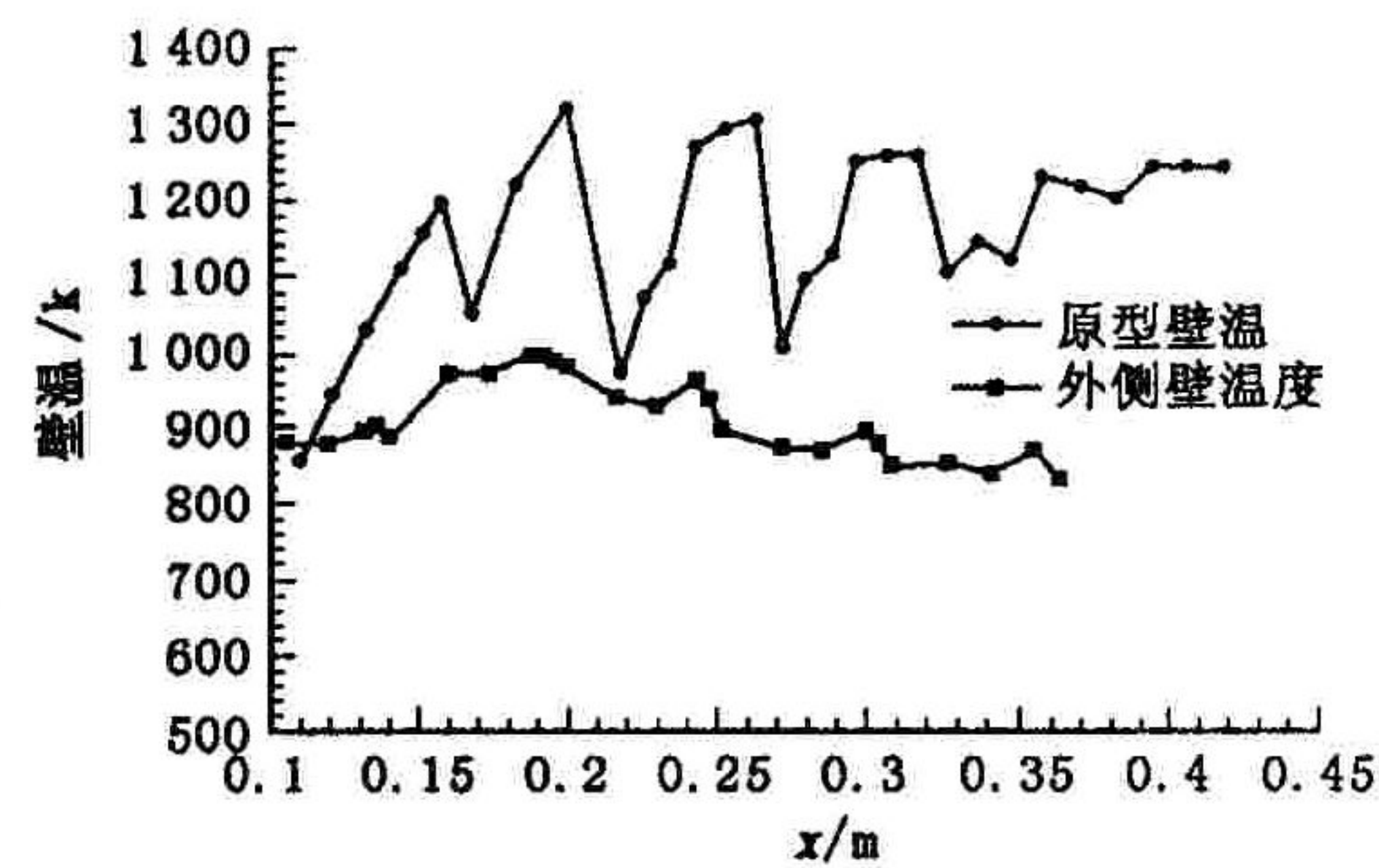


图 8 迷宫冷却结构火焰筒的壁温分布

由图 7 可知,冲击冷却比对流冷却换热量要大得多,前者的换热量是后者换热量的 3~6 倍^[10],因而在每一块瓦块的每排冷却进气孔处的壁温都比其前部的对流冷却处有明显的下降。且随着燃气温度的增加,换热量也较大幅度的开高。对于对流换热来说,流量变化对换热量的影响比较大。

从图 8 中可知,由于迷宫复合冷却结构火焰筒是多层壁结构,使得火焰筒壁温总体比较平稳。而且改型后的壁温比原型火焰筒的最高温度还要低 400 K 左右,平均温度低 300 K 左右,这是由该冷却结构的结构特点所决定的。一方面冲击冷却效果比对流冷却效果好,另一方面席壁结构是由特别窄和特别薄的金属条编制而成,在壁表面形成多而均匀的冷却孔,增大了冷却空气与壁面的接触面积,冷却空气经过如此多的小孔在内壁面形成的均匀气膜具有更好的保护特性及充分发挥冷却空气的冷却潜能,使壁面不易出现局部过热点。因此,迷宫冷却结构具有近似于发散壁结构的优良冷却保护性能。

5 结论

1) 燃烧室迷宫复合冷却结构是一种新型的冷却结构,兼具冲击冷却结构、对流换热冷却结构和席壁冷却结构的优点,结构合理,冷却效率高;

2) 该冷却结构的冷却性能优于全气膜冷却结构,冷却空气量比原型全气膜冷却火焰筒节省近 25%。壁温的平均温度有大幅度降低,比原型壁温低约 300 K,且壁温的轴向分布比原型火焰筒平坦;

3) 冲击冷却换热量比对流换热量大,前者的换热量是后者换热量的 3~6 倍,这是在燃烧室冷却结构设计中应注意的问题。

参考文献:

- [1] 葛绍荣,刘澄瀛,徐靖中. 气膜冷却[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [2] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京:宇航出版社,1988.
- [3] 罗森诺 W M. 传热学基础手册[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [4] 傅元丁. 发散冷却火焰筒壁面温度的数值计算方法[D]. 西安:西北工业大学,1986.
- [5] 何立明. 燃烧室新型席壁结构的壁温计算及实验研究[D]. 西安:西北工业大学,1993.
- [6] Kadotani K, Goldstein R J. On the Nature of Jet Entering a Turbulent Flow - part B: Film Cooling Performance[J]. Engineering for Power, Trans. ASME, 1979.
- [7] 黄兆祥. 航空喷气发动机燃烧室(第二期)[M]. 北京:国防工业出版社,1979.
- [8] 金涛,邓新发,何立明. 某型发动机高空、低速下燃烧室冷却性能分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2004,5(1):6-9.
- [9] 李长林. 航空发动机主燃烧室设计[M]. 北京:航空专业教材编审组,1984.
- [10] 原和朋. 迷宫复合冷却结构设计及冷却性能研究[D]. 西安:空军工程大学工程学院,2004.

(编辑:姚树峰)

A Design and Heat Exchange Analysis of Combustor for the Maze Composition Cooling Structure

HE Li - ming, ZHANG Li - zhi, YUAN He - peng, LI Ming - kui, JIN Tao, CHEN Xin, JIANG Yong - jian

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

Abstract: Maze composition cooling structure of combustor is a kind of novel cooling structure incorporated the strong points of impingement, convection heat exchange and approximately perspiration cooling. It possesses the advantages of impingement, convection heat exchange and mat wall cooling structure, so it is an ideal cooking structure. On the basis of investigating cooling mechanism of this cooling structure and from the practical point of view, tile maze cooling structure is designed by taking the modification design of combustor in active service engine for example. Meantime heat exchange analysis and calculation of wall temperature also are made. Preliminary investigation shows that the cooling performance of this cooling structure is superior to that of full air - film cooling structure. Key words: tile; maze composition cooling structure; analysis of heat exchange; cooling performance