

同轴旋转分层流燃烧器一次风扩展角 α 的实验研究

张 华, 章明川, 王 经

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要: 运用 CCD 摄像机对同轴旋转分层流低 NO_x 燃烧器出口空气动力特性进行了可视化研究, 并对采集的图像和数据进行了一系列处理。对一次风扩展角 α 进行了定义, 分析了一、二次风量比以及一、二次风叶片的位置对一次风扩展角 α 的影响, 并对其变化规律进行了研究, 为同轴旋转分层流燃烧器分层机理的研究打下了基础。

关 键 词: 同轴旋转分层流燃烧器; 空气动力场; 可视化; 图像处理; 一次风扩展角

中图分类号: TQ534 文献标识码: A

1 前 言

随着我国国民经济的持续稳定地增长, 能源消耗日益增多, 导致环保问题越来越得到重视。在以煤为主要能源的电力系统中, 如何稳定燃烧, 降低 NO_x 等污染物的生成等课题成为研究热点。同轴旋转分层流燃烧器是一种全新的可以实现分级燃烧的低 NO_x 燃烧器^[1], 它通过一、二次风旋流强度的适当配置, 利用离心力分层原理来控制一、二次风混合速度。综合运用空气分级燃烧技术降低 NO_x 生成, 其中的关键问题是如何合理组织空气动力工况, 从而达到稳定燃烧和降低 NO_x 生成的目的。本文通过对同轴旋转分层流燃烧器中的空气动力场的扩展角进行可视化研究, 得到扩展角的变化规律, 为分层机理的研究打下了基础。

2 实验装置与实验参数

2.1 可视化实验对象与实验装置

图 1 为实验装置即本文研究的轴向可动叶轮低 NO_x 燃烧器结构图。一、二次风管直径分别为 0.330 m 和 0.530 m; 中心管为点火油枪, 直径 0.110 m, 无中心冷却风。轴向可动叶轮一、二次风叶片角度分别为 30° 和 60° , 通过调节叶轮轴向位置

获得不同的旋流强度。在轴向可动叶轮燃烧器一次风涡轮处放置乙二醇示踪装置, 烟雾将随一次风运动, 利用烟雾对一次风与二次风的混合情况进行可视化实验研究。将 CCD 摄像仪置于距出风口截面 1m、距一次风管道轴线 1.5 m 左右处, 并且保持与一次风出口截面处于同一水平面的位置上对一、二次风的混合情况进行摄像。采用的测量仪器主要是 CCD 摄像仪 (Charge Coupled Device)。

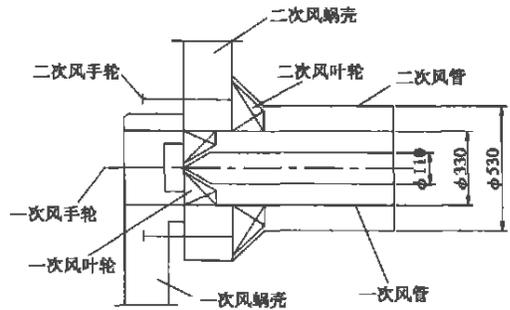


图 1 轴向可动叶轮低 NO_x 燃烧器的模型图

2.2 实验参数确定

影响轴向可动叶轮低 NO_x 燃烧器的一、二次风分层与混合特性的因素很多。分析对于给定的燃烧器, 主要的影响因素是: 一、二次风风量和一、二次风的旋流强度。本文采用一、二次风风量比 Q_1/Q_2 、一次风旋流强度 S_1 和二次风旋流强度 S_2 作为影响因素进行研究。

一、二次风的旋流强度定义为:

$$S_1 = \frac{\int_0^R uwr^2 dr}{R_1 \int_0^R u^2 r dr} \quad (1)$$

$$S_2 = \frac{\int_0^{R_2} uwr^2 dr}{R_2 \int_0^{R_2} u^2 r dr} \quad (2)$$

式中: u 、 w —燃烧器出口的轴向速度和切向速度;

收稿日期: 2004-11-20

作者简介: 张 华(1977-), 男, 安徽霍邱人, 上海交通大学博士研究生。

R_1 、 R_2 —一、二次风出口半径。 S_1 和 S_2 的具体数值根据五孔探针和热线测量数据计算得到。采用一次风叶轮手柄位置调节一次风旋流强度 S_1 ,使其旋流强度变化范围在0.46~0.5之间。二次风旋流强度 S_2 由二次风叶轮手柄位置调节,使其旋流强度变化范围在1.20~1.85之间。

2.3 实验主要参数指标

可视化实验参数指标如图2所示。

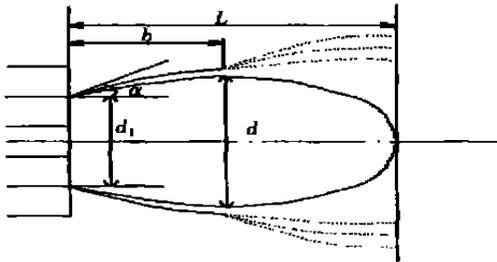
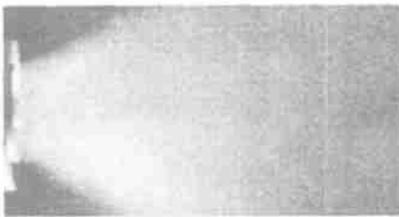


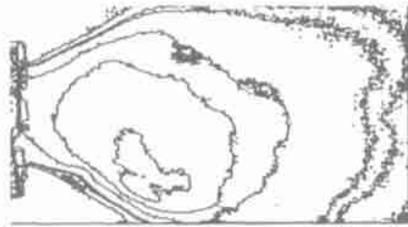
图2 可视化实验参数示意图

图2中各参数定义为:

- (1) 扩展角 α 为在某一截面上,烟雾边界点与旋流器出口处的连接与中心轴的夹角;
- (2) 一次风边界转捩长度 b 为一次风在燃烧器出口到轴向一定距离内有比较平滑的一段长度。 b



(a) 工况的一次风烟雾示踪照片



(b) (a)图工况经Laplace变换后等灰度线的图片

图3 工况的示踪照片和经Laplace变换后灰度处理

3.2 实验结果分析

3.2.1 一次风扩展角与旋流强度 S_1 、 S_2 的关系

图4是用CCD镜头拍摄的图片经灰度处理之后得到的图像。图4(a)是总体旋流强度比较大的工况,对应的扩展角也比较大;图4(b)是总体旋流强度比较小的工况,对应的扩展角也比较小。

图5(a)和(b)反映了在不同一、二次风风量比下,旋流强度对扩展角的影响。其中纵坐标扩展角的数值采用的是角度数。

反映的是流场中一、二次风之间的分层长度,是流动分层的重要参数;

(3) 一次风可视区最大长度 L ,可以作为衡量完全混合的距离;

(4) 一次风可视区最大直径 d ,对于扩展角并不大,但存在回流区的情形,它可以大致表示回流区的直径。

本文中边界的界定是假定横截面中心处亮度为100%,则亮度为5%处定义为边界。

3 实验过程与结果分析

3.1 实验过程

将烟雾发生器喷嘴插入一次风道内,摄像机对准燃烧器位置,前景采用亮光源,背景采用非反射性暗色材料,根据确定的测量工况进行实验拍摄。启动烟雾发生器,烟雾在一次风的带动下,与一次风一同喷出燃烧器,运用CCD摄像机记录这一过程。从每个工况的纪录中截取二十幅图片,经过Laplace变换处理和灰度处理之后,可以得到在对图像进行数据的提取和分析。

图3表示工况的示踪照片和经过Laplace变换处理和灰度处理后的图片。

从图5中可以看出,当一、二次风流量比较小的时候,扩展角 α 随着 S_2 的增大而增大,与旋流强度 S_1 相关性较弱。图6和图7分别是图5(a)和(b)在两个竖直平面 S_1 、 S_2 上的投影。横坐标分别为 S_2 、 S_1 ,纵坐标都是 α 。

由图7可以看出,当 $0.30 < Q_1/Q_2 < 0.60$ 时,对扩展角起主导作用的是二次风旋流强度 S_2 ,并且与它成近似的线性关系,通过拟合得到线性关系式: $\alpha - 16 = 30.8(S_2 - 1.20)$;而一次风对扩展角的影响

不是很大,比二次风要小得多;但是也应注意到扩展角对 S_1 不成简单的线性关系,其变化趋势是:随着 S_2 的逐渐增加,扩展角对 S_1 的函数曲线由下凹逐渐变平,而后变成上凸。当 $Q_1/Q_2=0.80$ 时(即一次风占的比例比较大时),扩展角 α 与 S_1 、 S_2 的关系呈现出极其复杂的情况。从它的投影图可以看出:

(a)随着 S_2 的增加,扩展角对 S_1 的函数曲线仍然是从下凹变平,而后逐渐上凸,这一点与其它流量比的结论相一致;(b)当 Q_1/Q_2 比较大时,不管 S_1 、 S_2 怎样变化,一次风扩展角都比较小,这说明一、二次风流量比对扩展角的影响也是比较大的。

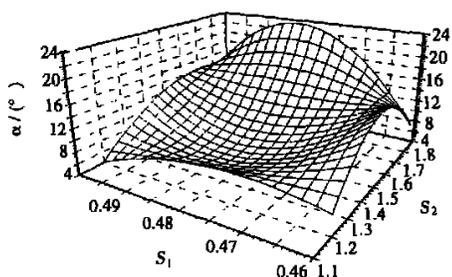


(a) 工况 $S_1=0.50, S_2=1.85$
 $Q_1/Q_2=0.35$

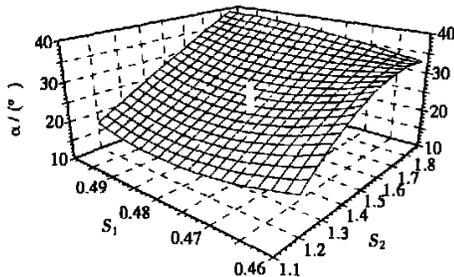


(b) 工况 $S_1=0.50, S_2=1.20$
 $Q_1/Q_2=0.80$

图 4 用 CCD 拍摄的经灰度处理后的照片



(a) $\alpha = \alpha(S_1, S_2)$, 当 $Q_1/Q_2=0.80$



(b) $\alpha = \alpha(S_1, S_2)$, 当 $Q_1/Q_2=0.35$

图 5 反映不同一、二次风风量比下旋流强度对扩展角影响

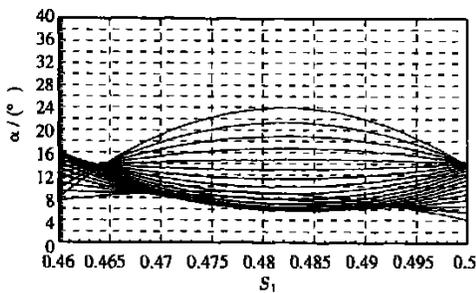
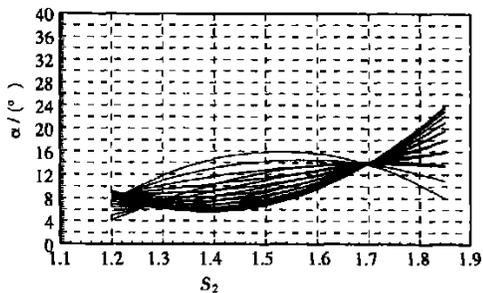


图 6 图 5(a)所示三维曲面在两个竖坐标平面上的投影

3.2.2 扩展角 α 与流量比 Q_1/Q_2 及旋流强度 S_1 、 S_2 的关系

对于变量 S_1 、 Q_1/Q_2 函数的曲面。

从图 8 中可以看出,当一次风旋流强度在一定的范围内时,扩展角几乎不随流量比的变化而变化。

图 8(a)和(b)是不同的 S_2 下一次风扩展角 α

图 9(a)是 S_1 在 0.49 附近的一条曲线, 可以看出, 其扩展角的变化幅度只有 3° , 考虑到各种误差因素, 可以认为 α 接近于常量。但是 S_1 一旦不在这个范围内, 扩展角就随流量比变化而变化, 其幅度达到了近

20° 。当流量在 0.35 到 0.40 之间的范围内时, 一次风旋流强度 S_1 反而对扩展角几乎没什么影响, 图 9 (b)是在 $Q_1/Q_2=0.39$ 时的曲线, α 的变化幅度不到 3° 。

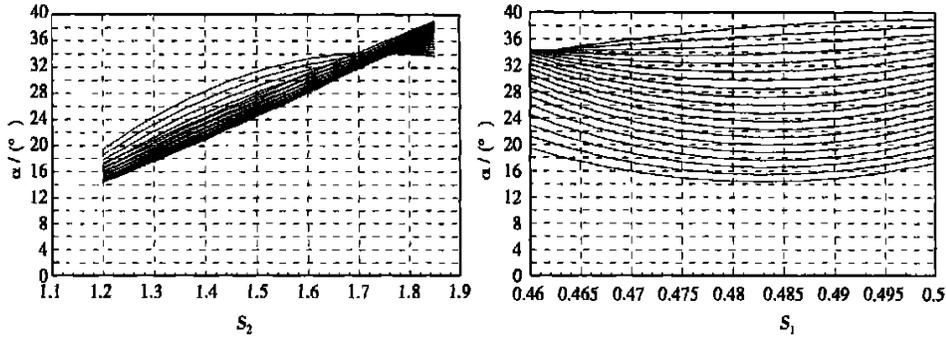
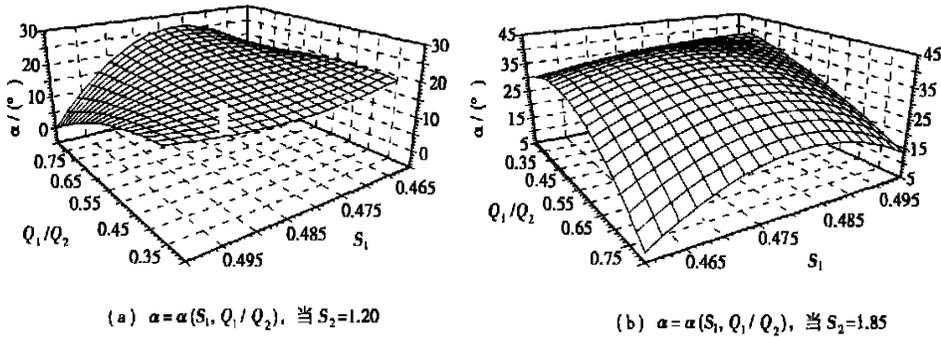


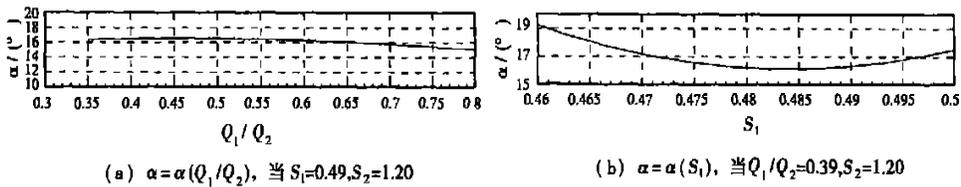
图 7 图 5(b)所示三维曲面在两个垂直坐标平面上的投影



(a) $\alpha = \alpha(S_1, Q_1/Q_2)$, 当 $S_2=1.20$

(b) $\alpha = \alpha(S_1, Q_1/Q_2)$, 当 $S_2=1.85$

图 8 不同 S_2 下 一次风扩展角 α 对 $S_1, Q_1/Q_2$ 函数曲面图



(a) $\alpha = \alpha(Q_1/Q_2)$, 当 $S_1=0.49, S_2=1.20$

(b) $\alpha = \alpha(S_1)$, 当 $Q_1/Q_2=0.39, S_2=1.20$

图 9 S_1 在 0.49 附近的曲线图

图 10(a)和(b)分别是给定 S_1 时的 $\alpha = \alpha(S_2, Q_1/Q_2)$ 曲面。可以看出, 在一、二次风旋流强度一定的条件下, 扩展角与流量比有比较明显的递减关系。

从图 11 可以看出, 给定 S_1 , 不同流量比下的 α 与 S_2 的关系曲线几乎都是直线, 而且除了 $Q_1/Q_2 > 0.7, S_1=0.46$ 的工况以外, 它们的斜率总是在 $20 \sim 40$ 的范围内变化。在低流量比的实际工况中, 当一

次风旋流强度保持为一定值时, 一次风扩展角 α 就主要取决于二次风旋流强度和流量比, 扩展角与二次风旋流强度成一次线性关系。由于在可视化实验中一次风为弱旋流、二次风为强旋流, 因此从图 11 可以看出当二次风旋流强度取得最大值时, 扩展角同时取得最大值, 只有 $Q_1/Q_2 > 0.7, S_1=0.46$ 的工况除外。这说明 S_2 是影响扩展角的主导因素, S_2 的大小直接决定了扩展角的大小。

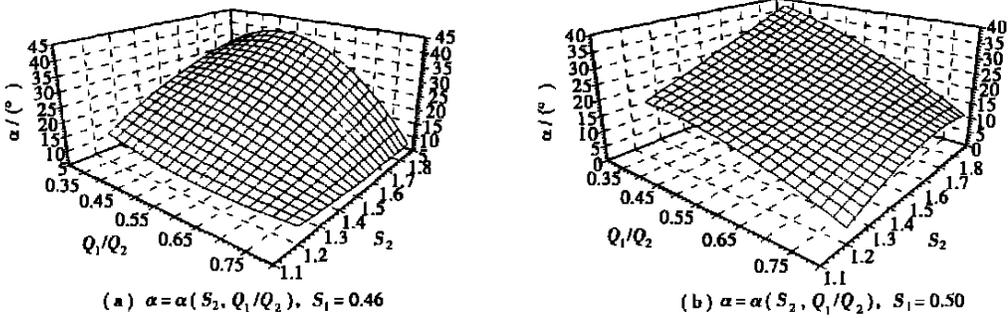


图 10 给定 S_1 时的 $\alpha = \alpha(S_2, Q_1/Q_2)$ 曲面图

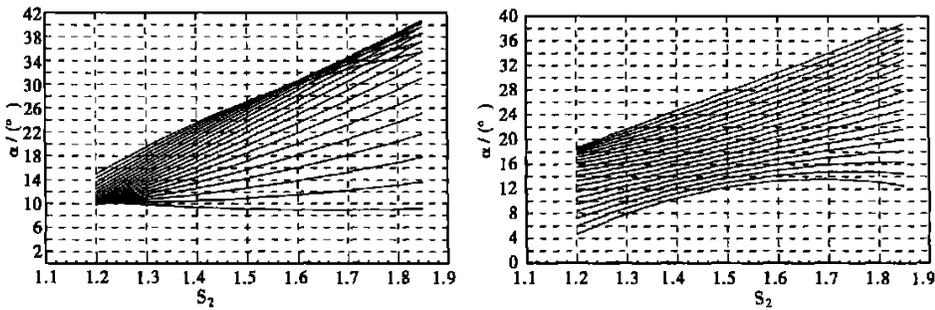


图 11 图 10(a)、(b)所示三维曲面在 (α, S_2) 平面上的投影

总之, 由于二次风的旋流通常很大, 它对扩展角的形成通常起着主导作用, 只是少数工况除外 ($Q_1/Q_2 > 0.7$)。 $Q_1/Q_2 = 0.7$ 可以认为是区分二次风旋流对扩展角影响强与弱的临界位置, 流量比大于 0.7 之后, 一次风旋流强度将对扩展角起着主导作用, 而且这种作用关系呈现出复杂的变化。

4 结 论

本文实验研究采用新方法, 应用先进科技设备 (CCD 摄像机) 得到了对燃烧器一次风扩展角全面的分析结果。实验表明: 一次风扩展角是一、二次风旋流强度和一、二次风风量比共同作用的结果, 其大小范围取决于二者的配置。只有当二者处于合理配置

时, 燃烧器才能处于较好的燃烧工况。这个结论对于优化参数, 降低污染, 促进煤粉的燃烧具有实用价值。

参 考 文 献:

- [1] BARTA L E, LEWIS P F, BEER JANOS M. Low NO_x combustion of pulverized coal using the radially stratified flame core burner[J]. **Joint Power Generation Conference ASME** 1999, 23: 165-178.
- [2] 张忠孝, 吴江全, 栾 翔. 洁净煤燃烧技术发展方向[J]. 电站系统工程, 1999, 15(2): 44-47.
- [3] 毛健雄, 毛健全, 赵树民. 煤的清洁燃烧[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 马春元. 径向浓缩旋流煤粉燃烧器的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996.

锅炉水冷壁高温氧化试验的热分析动力学研究 = **Dynamics Study of the Thermal Analysis of Boiler Water-wall High-temperature Oxidation Tests**[刊, 汉] / ZHAO Hong, WU Guang-jun, LING Be-lin, et al (Education Ministry Key Laboratory for Energy Clean Utilization and Environmental Engineering of the Research Institute of Thermal Energy Engineering under Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 397 ~ 401

To analyze the high-temperature corrosion problem in boiler water-walls, high-temperature oxidation tests were conducted of boiler water-wall material 20 g on a high-temperature atmosphere test rig. By using the dynamics method of thermal analysis the test data were processed and analyzed. As a result, the oxidation activation energy and a pre-exponential factor were obtained under the condition of pure air at 810 ~ 920 °C. An analysis was conducted of the shape and element composition, etc of the oxidation products by employing a scanning electronic microscope equipped with an energy spectrum analyzer and the average oxidation speed of 20 g in the oxidation process obtained. **Key words:** material 20 g, high-temperature oxidation, dynamics of thermal analysis, high-temperature corrosion

同轴旋转分层流燃烧器一次风扩展角 α 的实验研究 = **Experimental Research on the Primary-air Expansion Angle of a Coaxial Swirl and Stratified-flow Burner**[刊, 汉] / ZHANG Hua, ZHANG Ming-chuan, WANG Jing (Mechanical and Power Engineering Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 402 ~ 406

By using a CCD video camera a visual research was conducted of the aerodynamic characteristics at the outlet of a coaxial swirl and stratified-flow low NO_x burner. A series of processing were performed of the collected images and data with the primary-air expansion angle being defined. The primary and secondary air flow ratio was analyzed and the impact of the primary and secondary-air blade location on the primary-air expansion angle assessed. The law governing the variation of the expansion angle was also studied. All the above work has laid a foundation for the stratification mechanism research of the coaxial swirl and stratified-flow burner. **Key words:** coaxial swirl and stratified-flow burner, aerodynamic field, visualization, image processing, primary air expansion angle

超细褐煤粉的热解特性及其热解机理 = **Pyrolysis Characteristics of Super-fine Pulverized Lignite and Its Pyrolysis Mechanism**[刊, 汉] / REN Geng-po, ZHANG Chao-qun (Mechanical & Power Engineering Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240), WEI Li-hong, et al (School of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 407 ~ 410

By employing the traditional method of thermogravimetry it is very difficult to accurately deduce the reaction mechanism of pyrolysis. In view of this, the authors have on the basis of pyrolysis curves and kinetic equations made use of a dual extrapolation method and obtained the pyrolysis mechanism for Yuanbaoshan lignite at an average particulate diameter of 10.68 μm . It has been ascertained that its pyrolysis mechanism at the low temperature section assumes an Anti-Jander three-dimensional diffusion equation. Meanwhile, the pyrolysis characteristics of Yuanbaoshan lignite of different particulate samples were also studied along with an analysis of the impact of temperature rise rate and particulate size on the pyrolysis characteristics of the pulverized lignite. **Key words:** super-fine pulverized lignite, dual extrapolation method, thermogravimetric analysis, particulate size, pyrolysis mechanism

气膜冷却平板通道的数值模拟 = **Numerical Simulation of a Gas Film-cooled Flat Plate Channel**[刊, 汉] / LU Ben, JIANG Pei-xue (Key Laboratory of Thermal Energy Power Engineering and Thermal Sciences of the Thermal Energy Engineering Department under Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), LI Ling-bo (Ling Ao Nuclear Power Company Limited, Shenzhen, China, Post Code: 518124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(4). — 411 ~ 413

A numerical simulation was performed of the coupled heat transfer problem involving the three-dimensional convection heat exchange and heat conduction in a gas film-cooled flat plate channel without ribs and with 450 ribs. A non-structured