

文章编号: 1000-8055(2007)12-1989-05

收口套筒主燃区流场的 PIV 测量

林 阳, 林宇震, 刘高恩

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 在常温常压下, 采用 PIV 技术测量了旋流器套筒为收口套筒时单头部矩形燃烧室主燃区的流场, 获得了主燃区速度场和涡量场的详细信息. 试验结果表明收口套筒形成了小尺度回流区大角涡的主燃区流场结构; 收口套筒对旋转气流的收缩作用可以很好的改善燃烧室内油气的混合.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 收口套筒; 旋流器; 燃烧室; 粒子图像测速技术 (PIV); 流场
中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A

PIV experimental study of primary zone flow field of convergent sleeve

LIN Yang, LIN Yuzhen, LIU Gaoren

(School of Jet Propulsion, National Key Laboratory on Aero-engines,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The primary zone flow field of the swirler's convergent sleeve was measured by PIV technology under atmospheric pressure and temperature, providing detailed information on the primary zone flow field and vorticity field. The results show that the primary zone flow field of the convergent sleeve has a structure of small recirculation and big corner swirls, and the constriction of convergent sleeve on circumgyrated air could improve the mixing of air and fuel in a combustor.

Key words: aerospace propulsion system; convergent sleeve; swirler; combustor; particle image velocimetry (PIV); flow field

随着环境保护的日益关注, 航空污染物(CO 和 NO_x) 的排放受到越来越严格的限制^[1]. 但是 CO 和 NO_x 二者的生成是相互矛盾的: 为了减少 CO 需要提高燃烧室的热效率, 因此需要增加燃烧室进口压力与温度, 这就导致了火焰温度的升高, 反而促进了 NO_x 的生成. 贫油预混燃烧解决了这个矛盾, 获得了较低的污染指数, 但是燃烧的不稳定性困扰着它的发展, 这直接影响着发动机的控制、燃烧室的寿命以及涡轮部件. 随着旋流燃烧(Swirl flame)的引入, 改善了燃烧的不稳定性, 因此如何在燃烧室中获得良好的旋涡结构, 成为研究的焦点.

燃油喷嘴的流动机制(Fuel injector fluid

mechanics)通过控制燃油分布、油气比和主燃区动力学直接影响着燃烧特性^[2]. 旋流器是喷嘴的重要组件, 它将旋涡引入流动, 直接影响着主燃区的流场. 在激光多普勒测速技术(Laser Doppler velocimeter, 简称 LDV)、粒子图像测速技术(Particle image velocimetry, 简称 PIV)等先进的激光测试技术的帮助下, 研究人员对不同的旋流器下的流场进行了大量的研究工作. 研究表明: 在燃烧室进口下游的旋涡流动稳定了火焰, 促进了油气的混合. 在文献[3]中采用 LDV 技术测量了 4 种不同旋流器组合方案的下游流场, 并比较了他们在相同的工况下的速度场, 同时将 LDV 测量结果和计算结果进行了对比. 文献[4-6]中, 利

收稿日期: 2006-12-5; 修订日期: 2007-02-25

作者简介: 林阳(1981-), 男, 辽宁沈阳人, 硕士生, 主要从事燃烧方面研究.

用 PIV 测试技术在冷态条件下测量了不同三级环形旋流器组合方案的下游速度场, 主要研究了旋流器几何结构对主燃区流场的影响, 同时还研究了进口流量、混合管长度和文氏管出口对主燃区流场的影响, 但是并未涉及到主燃区有主燃孔射流掺混流动. 文献[7] 利用 PIV 技术测量了两种不同三旋流器组合方案主燃区速度流场, 该主燃区流场涉及到了主燃孔射流掺混的影响, 但未研究收口套筒对主燃区流场的影响.

在常压燃烧试验中匹配收口套筒的燃烧室取得了较高的燃烧效率^[8], 但是对产生高燃烧效率的原因不是十分清楚. 本文的目的是在 PIV 测试技术的帮助下研究收口套筒燃烧室主燃区流场特性, 进而从流场方面分析匹配有该部件的燃烧室燃烧高效的原因. PIV 试验所用的燃烧室模型采用单头部矩形燃烧室, 配合双级径向旋流器, 火焰筒壁面上开有主燃孔和掺混孔, 因为冷却孔对主燃区流场的影响较小, 所以没有在火焰筒壁面上开冷却孔.

1 PIV 实验系统及实验方案说明

1.1 燃烧室模型

为了能了解头部装置对主燃区的影响, 燃烧室模型采用了 1: 1 的单头部矩形燃烧室的设计方案. 除燃烧室头部和安装法兰外, 燃烧室其余部分均采用有机玻璃材料制成. 为保证 PIV 测量系统能够采集到良好的数据, 在燃烧室主燃区侧壁处特别设计了数据采集窗, 采集窗玻璃采用光滑的浮法玻璃. 燃烧室模型如图 1 所示.

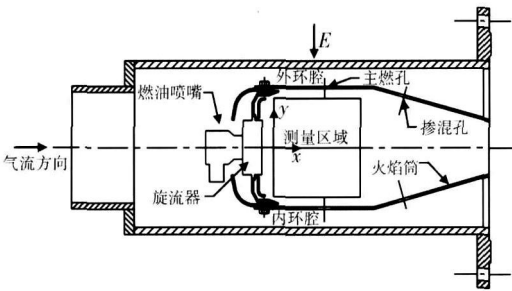


图 1 PIV 试验用模型燃烧室示意图
Fig 1 Schematic drawing of the PIV test rig

燃烧室头部方案采用旋向相反的双级径向式旋流器, 旋流器组件如图 2 所示. 一级旋流器和二级旋流器参数如表 1 所示.

1.2 测量截面

火焰筒上壁面如图 3 所示, 图中火焰筒壁面

为图 1 中火焰筒上壁面的 E 向视图. 主燃区后

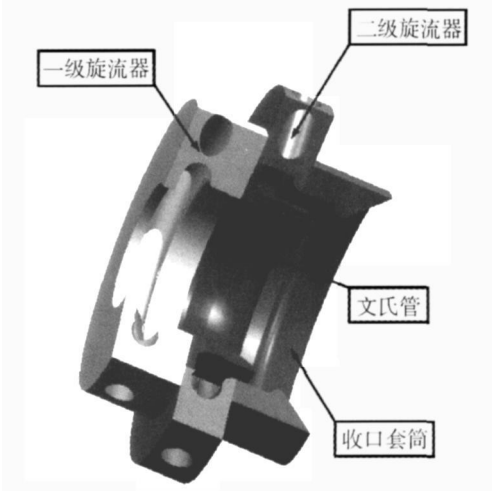


图 2 旋流器组件图
Fig 2 Subassemblies of swirler

表 1 旋流器参数
Table1 Swirlers parameters

旋流器	旋流数 S
一级旋流器	1.253
二级旋流器	1.523

火焰筒呈收敛形状. 火焰筒上、下壁面上主燃孔尺寸相同, 在火焰筒壁面上沿 z 方向分布有一个完整的主燃孔和两个半个主燃孔.

图 3 中 C-C, D-D, S-S 为测量截面.

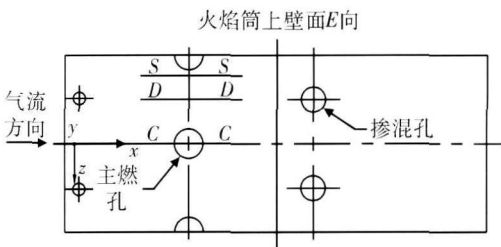


图 3 火焰筒上壁面示意图
Fig 3 Schematic drawing of liner wall

1.3 PIV 测量系统

本实验所用的仪器是 TSI 公司生产的 PIV 测量系统, 由以下几部分组成: 一个双腔 Nd: Yag 激光器, 一个 CCD 摄像机, 一个高速数据接口板, 一个同步器和数据处理系统. 如图 4 和图 5 所示.

其中激光器为功率 120 mJ/Pulse 的 Nd: YAG 双腔激光器, 所使用的摄像机分辨率为 1 k × 1 k. 激光器两次脉冲之间的间隔可以为 10 ns~ 20 μs, 第二次曝光的时间比第一次曝光的时间要长, 每秒钟拍摄 15 对单次曝光照片.

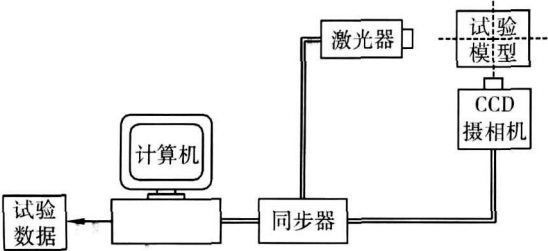


图 4 PIV 测量系统示意图
Fig 4 Schematic drawing of the PIV system

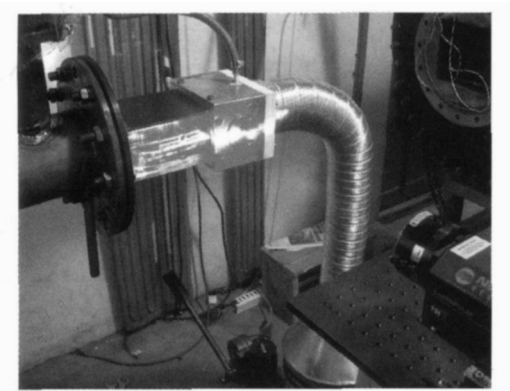


图 5 PIV 试验系统照片
Fig 5 Photograph of the PIV system

试验后采用 Insight 软件分析每对单次曝光照片以获得一幅瞬时流场速度图, 同时配合 Tecplot 流场绘图软件对图像进行后处理, 得出时均流场速度图^[9].

1.4 示踪粒子的选取与布置

示踪粒子的选取及布置是 PIV 测量的一个重要环节. PIV 属于非接触式测量, 流场的测量是通过测量流场中示踪粒子的运动间接得到的. 为了获得较好的测量精度, 应尽量减少示踪粒子对流场的干扰, 提高示踪粒子散射光的强度, 测量区域内散播的示踪粒子浓度必须适当^[10]. 基于以上考虑本试验采用烟尘颗粒作为示踪粒子.

试验时进口常温常压, 调节燃烧室出口的引射气, 给出 630 Pa 的燃烧室进出口压差, 将示踪粒子(烟尘颗粒)抽入燃烧室, 待燃烧室内示踪粒子浓度满足 PIV 测量要求时, 即可进行试验.

2 试验结果及分析

本试验的目的是研究收口套筒作用下的燃烧室主燃区流场, 分析主燃区流场特性.

为了获得良好的时均流场信息, 采集了 100 对单次曝光照片, 每对照片中前后两幅的时间间隔为 10 ns. 处理每对照片获得一张瞬时流场图. 时均流场为获得的 100 张瞬时流场的平均值, 如

图 6~ 图 9 所示. 图中所有的速度场均无量纲化, 不同测量截面的最大速度不同. 流场图中标签的颜色代表流场中速度的大小, 箭头的方向代表速度矢量方向.

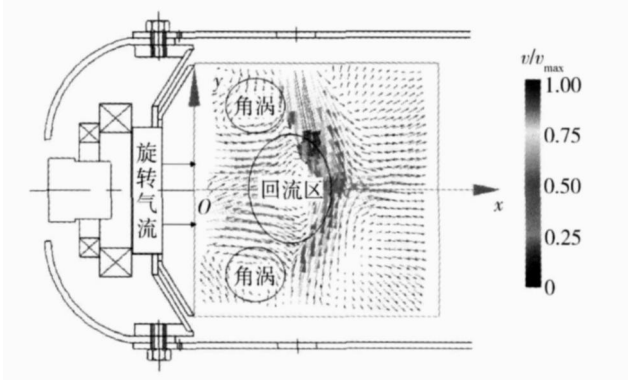


图 6 G-C 截面时均流场速度分布
Fig 6 Time averaged velocity flow field of the G-C plane

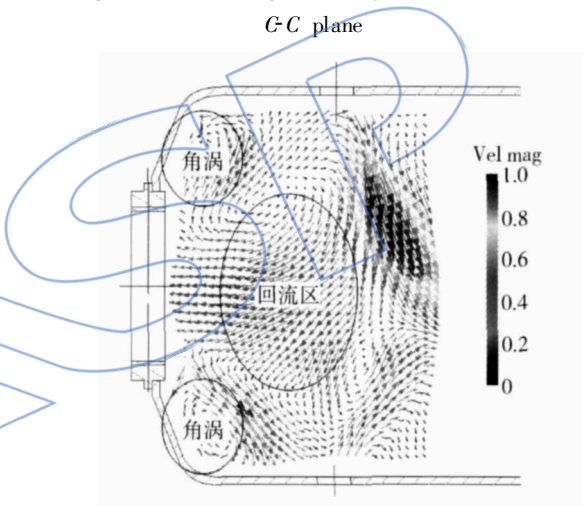


图 7 不收口套筒主燃区流场
Fig 7 Flow field of the primary zone flow field with un convergent sleeve

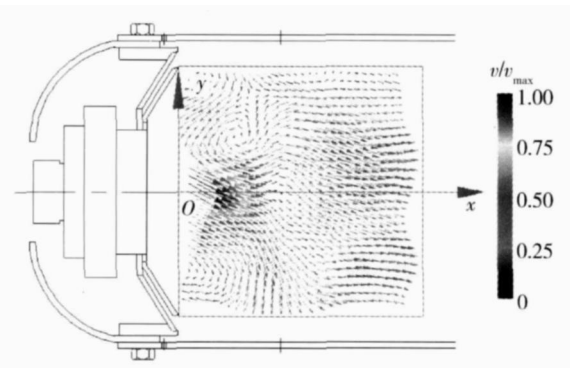


图 8 D-D 截面时均流场速度分布
Fig 8 Time averaged velocity flow field of the D-D plane

2.1 收口套筒与不收口套筒主燃区流场的比较

图 6 显示了收口套筒主燃区中心截面的时均

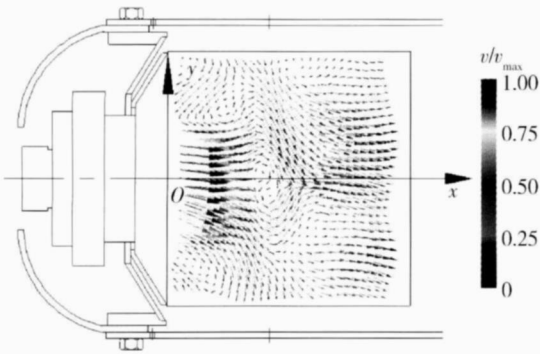


图 9 S-S 截面时均流场速度分布

Fig 9 Time averaged velocity flow field of the S-S plane

速度流场,由图中可以看出:由于旋流器套筒的收口对旋转气流产生了强烈的收缩作用,抑制了旋转气流的扩张,所以从旋流器进入燃烧室的旋转气流在主燃区形成了一个小尺度的回流区,在外围形成了两个大大的对称的角涡的主燃区流场结构.

这种主燃区流场结构与匹配不收口套筒的旋流器形成的主燃区流场结构截然不同,不收口套筒主燃区流场结构如图 7 所示.旋流器的旋转气流沿不收口套筒的出口边缘射入燃烧室主燃区,主燃区中旋转射流的边界清晰可见,在该边界内部形成了大尺度的回流区,由此可知不收口套筒主燃区流场结构类似龙卷风的结构.由于火焰筒头部壁面存在着壁面分离,所以在火焰筒头部上下两侧存在着小尺度的角涡区.

由此可见套筒的收口与否对主燃区流场的结构有很大的影响.

2.2 收口套筒主燃区流场特性

收口套筒主燃区中心截面流场如图 6 所示.图中可以看出:上、下两股主燃孔射流穿透强烈,在位于燃烧室轴线略下方相交;由于主燃区气流的影响,主燃孔射流向燃烧室下游偏转.仔细观察发现虽然主燃孔尺寸相同,但是上、下火焰筒壁面的主燃孔射流流速存在着差异,这可能是因为喷嘴支杆对气流的堵塞作用引起的.虽然燃烧室是轴对称结构,但是由于喷嘴支杆对气流的堵塞,减小了燃烧室内环腔的进气量,使得外环腔的进气量大于内环腔,从而导致了上火焰筒壁面主燃孔流速大于下火焰筒壁面主燃孔流速.

比较图 6,图 8 和图 9 可以发现:旋流器出口下游的高速气流在主燃孔截面处消失,取而代之的是一股低速流,这说明主燃孔射流穿透强烈,其

相遇后,在主燃孔截面 z 向(图 3)产生了速度分量,强烈的影响了旋流器的旋转射流,有效的抑制了其向燃烧室下游传播.

观察图 8 和图 9 可以发现:旋流器出口的旋转气流的流向偏下,这与二级旋流器开孔方向是一致的,由此可知在双级旋流器中,主燃区流场主要受二级旋流器的旋转空气的影响.比较图 8 和图 9 可以发现在 $D-D$ 截面和 $S-S$ 截面旋转气流的流向存在着差异.这是因为套筒的收口对二级旋流器的旋转气流强烈的收缩作用,使二级旋流器的旋转气流在远离套筒出口过程中(由 $D-D$ 截面到 $S-S$ 截面)逐渐减弱,由图中观察即为旋流器出口的旋转气流的偏角减小.

涡量 $\omega = \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right]$ 是衡量流体旋涡强度的

重要物理量之一.由于 PIV 可以获得全场流场的速度参数,故可以直接通过 PIV 测得的数据获得涡量场. TSI 公司提供了相关的 Tecplot 软件拓展,使得可以直接使用 Tecplot 软件获得涡量场,测得的涡量场如图 9~ 图 10 所示.图中所示涡量的定义与上式略有不同,即 $\omega = - \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right]$. 测得的示踪离子呈现逆时针方向运动趋势时,涡量为负值;呈现顺时针方向运动趋势时,涡量为正值.

图 10 所示的是 $G-G$ 截面的涡量场,图中可以明显看见在每股主燃孔射流左右两侧各存在 2 个涡量绝对值较大的区域,其余区域的涡量相应很小,由此可见主燃孔射流与燃烧室内的气流存在着强烈的交互作用.主燃孔左右两侧的涡量呈对称分布,可知主燃孔射流对其左右两侧气流的影响在该平面内近似相等.

由于采用 $-450 \sim 450 (1/s)$ 作为涡量场的上下轮廓分布尺度,以致于在图 10 中观察不出主燃区的涡量分布.为了能够明显地观察出主燃区的涡量分布,将涡量场的上下轮廓分布尺度减小为 $-150 \sim 150 (1/s)$,如图 11 所示.由图可以看出,主燃区中涡量在燃烧室轴线两侧呈对称分布.在从旋流器进入燃烧室的旋转气流与主燃孔射流相互作用后,使主燃区流场处于四个大尺度涡的影响范围之内.而值得注意的是特别标记的位于旋流器下游在旋转空气内部的 2 个不引人注意的沿燃烧室轴线对称的两个小小的涡量区,由此可以推知在旋转空气内部未被测得的区域内存在着一个很小的回流区,可见收口套筒对气流强烈的收

缩作用,使本应在传统燃烧室内发展为较大的回流区被抑制在旋流器出口附近。

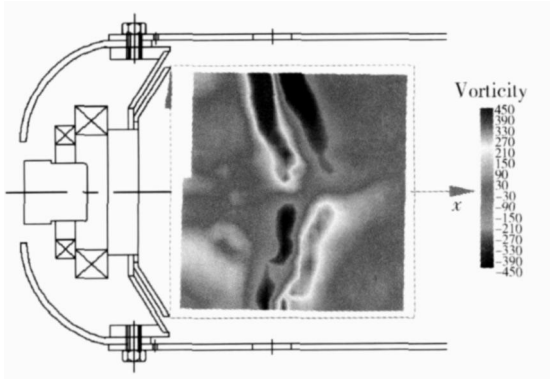


图 10 $G-C$ 截面涡量场
(上下轮廓分布尺度为 $-450\sim 450(1/s)$)
Fig 10 Vorticity field of the $G-C$ plane
(Contour legend $-450\sim 450(1/s)$)

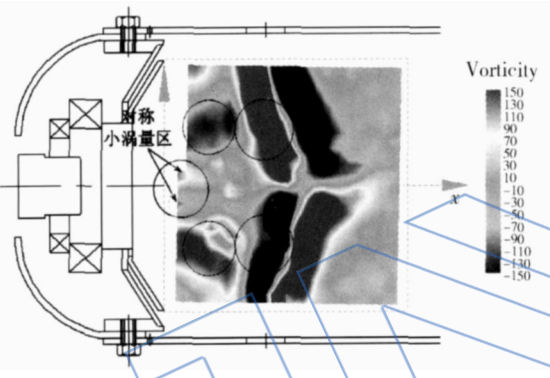


图 11 $G-C$ 截面涡量场
(上下轮廓分布尺度为 $-150\sim 150(1/s)$)
Fig 11 Vorticity field of the $G-C$ plane
(Contour legend $-150\sim 150(1/s)$)

常压燃烧试验中,匹配有该收口套筒的燃烧室在选定参数变化范围内的燃烧效率在 98.8% 到 99.5% 之间^[8]。经典理论认为燃烧性能的好坏是由燃油的蒸发、掺混以及化学反应这三个过程决定,而雾化质量的好坏直接决定着这三个过程。由图 6 和图 11 可以看出:收口套筒在收口的喉道处对旋流气产生了强烈的收缩作用,经过旋流空气雾化后的燃油在此收口处与旋流空气进一步交汇,加强了二者的掺混;而且主燃区 4 个大尺度涡的流场结构,增强了主燃区内气流流动,从而加强了主燃区油气的掺混,使主燃区内油气混合更为均匀。由此可见收口套筒对加强油气的混合有很大的帮助。这可能就是匹配有该收口套筒的燃烧室具有较高燃烧效率的原因之一。

3 结 论

在进口常温常压条件下,利用二维 PIV 测量了旋流器套筒为收口套筒的单头部矩形燃烧室主燃区流场,获得了清晰的流场信息。

研究发现:

收口套筒的主燃区流场结构与不收口套筒主燃区流场结构截然不同;

收口套筒在收口喉道处对旋转气流有很强的收缩作用,从而加强了旋流空气和燃料的掺混;而在主燃区内起主要作用的 4 个大尺度涡,增强了主燃区气流的流动,促进了主燃区油气的混合。可见收口套筒可以很好的改善燃烧室内油气的混合。

参考文献:

[1] International Civil Aviation Organization. Aircraft engine emissions[S] // Environmental Protection: Volume II. [S. l.]: International Civil Aviation Organization, 1999.

[2] Midgley K, Spencer A, McGuirk J J. Unsteady flow structures in radial swirler fed fuel injectors [R]. ASME Paper, No. GT2004-53608, 2004.

[3] Li G, Angier S, Lambolez O, et al. Experimental study of velocity flow field for a multiple swirl spray combustor [R]. AIAA Paper, No. 2002-0618, 2002.

[4] Li G, Gutmark E. Flow field measurements of triple swirler spray combustor [R]. AIAA Paper, No. 2002-4010, 2002.

[5] Li G, Gutmark E. Geometry effects on the flow field and the spectral characteristics of a triple annular swirler [R]. ASME Paper, No. GT2003-38799, 2003.

[6] Li G, Gutmark E. Experimental and numerical studies of the velocity field of a triple annular swirler [R]. ASME Paper, No. GT2002-30069, 2002.

[7] Peng Yunhui, Xu Quanhong, Lin Yuzhen. Experimental studies of the primary zone flow field and combustion performance of a triple swirler combustor [R]. ASME Paper, No. GT2005-68218, 2005.

[8] Gong Jing, LIN Yuzhen, LIU Gaoen, et al. Investigation of combustion performance of a hybrid airblast atomizer under simulated Low power condition [R]. ASME Paper, No. GT2005-68219, 2005.

[9] 冯旺聪,郑士琴. 粒子图像测速(PIV)技术的发展[J]. 仪器仪表用户, 2003, 10, (6): 1-3.

FENG Wangcong, ZHENG Shiqin. The development of particle image velocimetry [J]. Electronic Instrumentation Customer, 2003, 10, (6): 1-3.

[10] 梁桂华,赵宇. 内燃机燃烧室流场 PIV 测试中示踪粒子跟随性分析[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44, (5): 662-665.

LIANG Guihua, ZHAO Yu. Analyses of following behaviors as tracer particle by PIV in chamber of internal combustion engine [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44, (5): 662-665.