

# Study on Film Cooling Based on PLIF Technology

Ce Zhong, Weiliang Wu

Institute of Turbomachinery, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai  
Email: fsbjay@sjtu.edu.cn

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2016; accepted: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2016; published: Mar. 8<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The film cooling visualization test is conducted on a mixed characteristic test bed using acetone PLIF method. The size of the jet hole in this experiment is in the same scale with the real one. In order to study the integrity and adherence of cooling film, the length and turning angle were defined and measured under 3 different conditions. The results showed that the blow rate has a significant influence on them. When the velocity of the jet and mainstream was close, the integrity of cooling film would be the best. The results also showed a lot of flow and mixing characteristics of film cooling. This technology has a bright future in study on fluid machinery.

## Keywords

Planar Laser-Induced Fluorescence, Film Cooling, Integrity of Cooling Film

---

# 基于PLIF诊断技术的气膜冷却研究

钟 策, 吴伟亮

上海交通大学机械与动力工程学院, 叶轮机械研究所, 上海  
Email: fsbjay@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2016年2月22日; 录用日期: 2016年3月3日; 发布日期: 2016年3月8日

---

## 摘 要

本文使用丙酮平面激光诱导荧光技术(Acetone-PLIF), 在掺混特性试验台上对冷却气膜与主气流的掺混

进行了可视化测试。试验中采用的射流孔与实际叶片气膜孔处于同一尺度范围内。为研究气膜覆盖的完整性和贴壁性, 定义了气膜的横截面长度和弯折角, 并在三种吹风比下拍摄了掺混过程的荧光图像。通过图像处理, 对上述参数进行了测量和分析, 结论表明吹风比对气膜的有效覆盖长度和弯折角存在显著影响, 在射流速度与主流相近时, 气膜覆盖效果较好。通过图像, 还捕捉到了射流孔附近的流动细节及变化规律。该技术在流体机械研究领域有广泛的应用前景。

## 关键词

平面激光诱导荧光, 气膜冷却, 气膜完整性

## 1. 引言

在现代燃气轮机中, 为了提高燃气轮机的单机效率, 涡轮入口需要的高燃气初温已经对涡轮部件冷却提出了更高要求。因此, 必须采用有效的冷却措施对部件进行冷却。在涡轮部件中, 叶片是热负荷最大的部件之一, 针对叶片冷却, 主要采用气膜冷却等技术, 气膜冷却在总冷却中贡献最大, 对气膜冷却的研究一直是高温部件冷却技术研究中的热点之一[1]。气膜冷却的设计缺陷可能导致重大故障[2], 因此针对气膜冷却的测试诊断技术具有重要的研究意义。在实验研究方面, Lesley M. Wright 和 Stephen T. McClain 等人运用 PIV (Particle Image Velocimetry) 方法对双孔气膜冷却的几何构型对冷却效率的影响进行了评估[3]; 韩昌和李佳等采用压力敏感漆(Pressure Sensitive Paint)测量比较了多种气膜孔在不同吹风比下的冷却效率, 并结合数值模拟方法对流场进行了机理分析[4]。

LIF (Laser-induced Fluorescence) 技术是一种新型光学测试技术, 该先进技术作为现代光学诊断方法的代表, 在动力机械行业有广阔前景的技术, 是一种研究动力机械的速度、浓度、温度等分布的优秀手段。PLIF 技术发展早期就被尝试用来进行流体掺混测量, 国内外研究者在喷雾与掺混测量、两相流研究、燃空比定量分析等方面开展了多项研究[5]-[7]。其中也有部分学者开展了采用 PLIF 对气膜的研究, 如大阪大学的 Kumagai 和 Takeishi 等人使用丙酮 PLIF 技术对两种孔型的平板气膜冷却进行了测量和分析, 并将结果与 CFD 计算结果进行了对比, 验证了实验方法的可行性[8]。

一方面, PLIF 技术在气体掺混测量研究方面并没有广泛应用; 另一方面, 现有研究中的实验件尺度和形状, 与实际叶片相差较大, 该技术运用到叶片气膜研究尚有许多工作需要完成。总的来说, PLIF 技术用于叶片气膜冷却的实验研究尚处在起步阶段。此外, 传热/传质比拟方法可用于研究气膜绝热壁面温比[9], 将该方法与 PLIF 方法结合, 可以对冷却效率进行非接触式测量, 在气膜冷却研究上具有广泛前景。

本文尝试了以丙酮为分子示踪剂、用 PLIF 方法获取冷却气膜荧光图像, 对气膜与主流掺混行为进行研究的方法, 重点分析了该方法在具有实际涡轮叶片尺度范围实验台上的表现, 并参考他人已有的研究工作结论, 对冷却气膜的重要参数和捕捉到的流动掺混现象进行测量分析, 初步提出了一种气膜冷却测试和评估方法。

## 2. 实验原理

含有特定分子功能团的有机分子在收到一定波长的激发光照射时, 会吸收光子, 并从基态跃迁至较高的能级态。因为处于较高能级态的分子处于不稳定状态, 会以荧光的方式辐射能量。荧光的特性会随有机分子的种类、温度、压力以及周围物质氛围(氧气浓度)等不同而呈现出规律性差异[10]。在流动实验中, 将这类有机分子作为示踪剂加入待测气体中, 通过检测受激分子的荧光强度, 可以得到区域内指定组分的浓度、温度、空间分布等信息。

在本实验的被测体系中, 认为示踪剂在气态条件下与射流气体均匀混合, 此时射流气体浓度正比于

示踪剂的浓度。设流体中某单元内示踪分子浓度为  $M$ , 射流气体浓度为  $G$ , 则有:

$$G \propto M \quad (1-1)$$

由上示踪分子浓度为  $M$ , 设荧光光强分别为  $J$ , 激光的光强为  $L$ , 则此三者具有以下的关系[11]:

$$J \propto \frac{L}{1+L/L_{sat}} M \quad (1-2)$$

其中,  $L_{sat}$  为荧光饱和时的激发光光强, LIF 实验中使用的激发光强远小于饱和光强, 即  $L \ll L_{sat}$  时, 式子可以简化为:

$$J \propto LM \quad (1-3)$$

在弱激发条件下, 当激发光光强一定, 示踪剂与射流气体均匀混合时, 设射流气体浓度为  $G$ , 有

$$G \propto L \quad (1-4)$$

实验中, 相机拍摄下的荧光图像的灰度给出了荧光光强的数值, 可以表征射流气体浓度的分布。因此, 荧光图像中荧光光强的变化趋势和特性就实际代表了射流掺混场的特性。

LIF 方法具有高分辨率, 时间响应快, 高灵敏度等特点, 使用 LIF 方法对流体掺混进行实验测量具有坚实的理论基础。

### 3. 实验装置及工况

实验在低速风洞中进行, 该风洞主体为有机玻璃材料, 截面为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的方形, 进口段长度为  $2500 \text{ mm}$ , 满足  $L \geq 10 d$  的要求, 可以使主流气体速度接近均匀, 实验段入光面为石英玻璃, 以保证紫外激光能进入实验段。实验台设计如图 1 所示。

实验件为一梯形四棱柱体, 如图 2, 实验件上开孔为半径  $1 \text{ mm}$  的圆形。

实验研究了 3 种不同的吹风比, 该吹风比由冷却气的体积流量控制, 见表 1。

实验开始前, 将射流气源通入装有液体丙酮的容器中获得平均温度为  $60^\circ\text{C}$  的饱和蒸汽。该股气流在通入实验段前再次加热, 温度维持在  $80^\circ\text{C}$ , 使进入实验段的混合气体为过热蒸汽, 防止丙酮的凝结给实验带来误差。

PLIF 实验系统如图 3。Nd:YAG 激光器的二倍频激光, 波长为  $532 \text{ nm}$ , 激发染料后发出  $562 \text{ nm}$  的染料激光, 经过二倍频晶体得到波长为  $281 \text{ nm}$  的激发光, 激发光频率为  $10 \text{ Hz}$ 。该激发光经过一透镜组, 扩束整形后得到矩形片光, 片光宽约  $25 \text{ mm}$ , 厚约  $1 \text{ mm}$ 。通过 DG535 同步激光器和 ICCD, 使激光激发荧光的信号与快门信号同步。ICCD 镜头为  $105 \text{ mm}$  焦距, 光圈为 F/4, 镜头前有滤色片, 用来滤除激发光及一些背景光的辐射。

## 4. 实验结果及分析

### 4.1. 实验结果

为了消除射流掺混中非定常因素影响, 试验结果用一定数量照片进行平均(200 张), 以获得能较好表现流场的图像。按照表 1 设定的工况, 对射流流场进行 PLIF 测量, 并用自行开发的图像处理程序进行了平均处理, 结果如图 4~6。

不同像素点的灰度值反映了对应位置荧光信号强度, 可以表征射流气体的浓度。冷却气流在出口处浓度最高, 浓度沿主流方向下降; 气流受主流影响向壁面弯曲, 形成覆盖在试验件表面有一定厚度的气膜, 这与实际气膜掺混过程相符[12], 可以认为本文中的方法在实际叶片气膜孔尺寸的实验台上反映了气膜的基本信息。

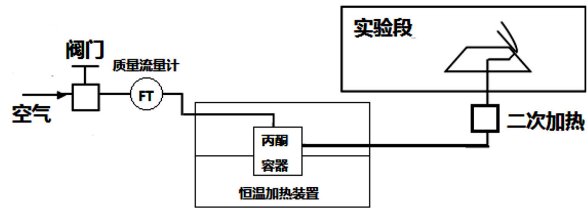


Figure 1. Design sketch of the test-bed  
图 1. 试验台设计图

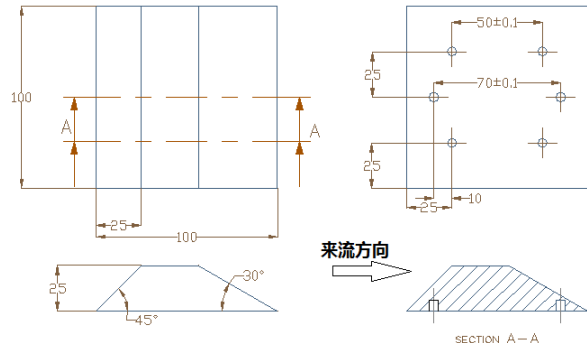


Figure 2. Design sketch of the test-bed  
图 2. 试验台设计图

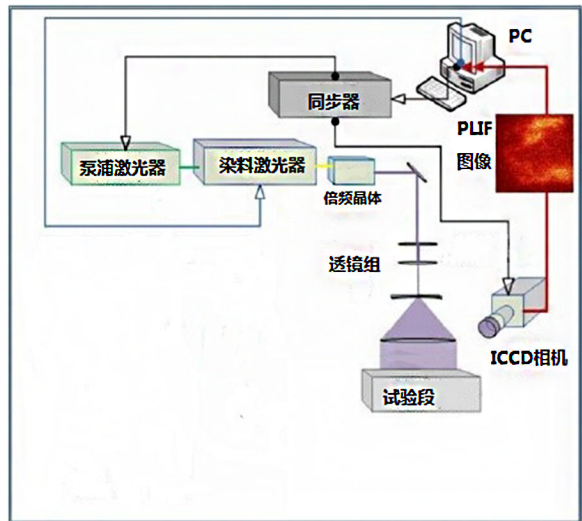


Figure 3. Schematic diagram of PLIF system  
图 3. PLIF 系统示意图

Table 1. Working conditions  
表 1. 试验工况表

工况	一	二	三
吹风比(Br)	0.697	1.101	1.467

#### 4.2. 气膜覆盖完整性分析

在气膜冷却设计中，气膜覆盖的完整性是很重要的评估指标，气膜覆盖不完整可能导致高温燃气烧

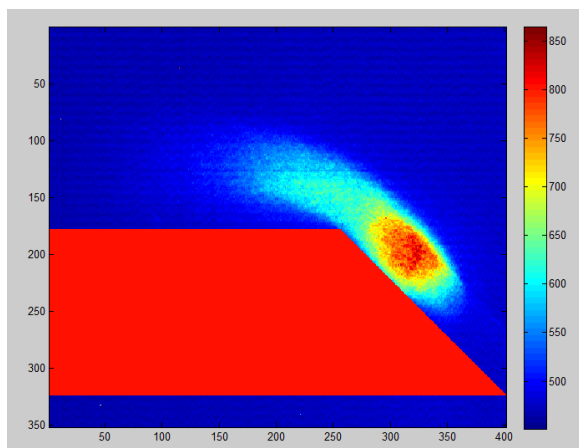


Figure 4. PLIF image of condition 1  
图 4. 工况一 PLIF 图像( $Br = 0.697$ )

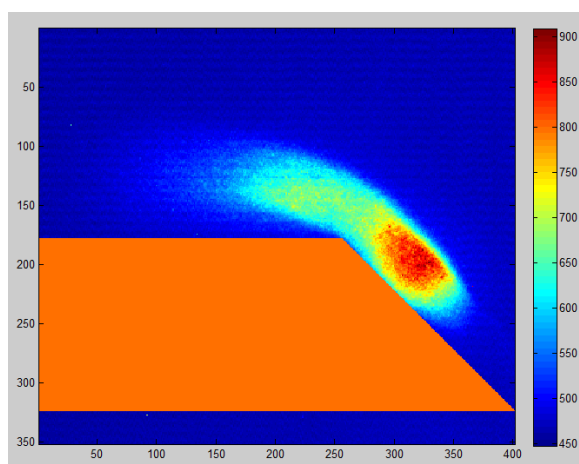


Figure 5. PLIF image of condition 2  
图 5. 工况二 PLIF 图像( $Br = 1.101$ )

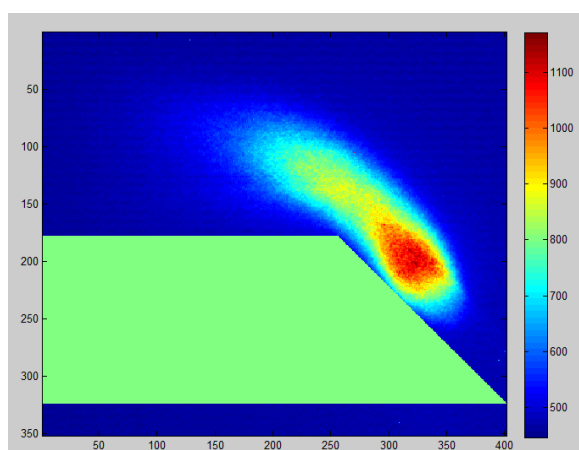


Figure 6. PLIF image of condition 3  
图 6. 工况三 PLIF 图像( $Br = 1.467$ )

蚀叶片。气膜的横截面长度可以表示气膜的覆盖范围，本文中定义气膜长度为气膜前端至末端沿主流方

向, 气膜两端以灰度值 550 作为截止值根据图像处理结果, 三个工况的气膜长度见表 2。

从趋势上看, 气膜的长度随吹风比增加, 这一结论与 Kumagai 等人的研究是一致的。在此基础上, 结合本方法给出的图片和文献[8]中的理论分析, 可以发现: 当吹风比  $Br = 0.697$  时, 气膜横截面积较小。此时射流气体流量和动量较小, 主流速度大于射流气体, 在垂直于主流速度的截面上存在较大的速度梯度, 射流气体与主流气体发生较强掺混, 主流气体被输运到壁面附近, 同时一部分射流气体离开, 导致下游处无法形成气膜覆盖在实验件表面。在荧光图像上表现为气膜长度较短且在下游分布不均。当吹风比增加到  $Br = 1.101$  时, 射流气体流量和动量增加, 可以到达出口下游更远处, 同时射流和主流速度较为接近, 主流和射流的掺混不强, 使得射流形成的气膜形状稳定, 不易破裂, 覆盖面积增加。而随着吹风比的增加, 射流的出口流速过大, 一方面使射流气体沿出口方向冲出较远, 另一方面存在很大的速度梯度, 射流气体与主流气体剧烈掺混, 容易脱离壁面, 导致气膜的覆盖区反而减小。

另一方面, 从图像中可以看出, 气膜横截面积随吹风比增加而增加, 但在不同工况下, 气膜体现出了不同的贴壁性。气膜的贴壁性对冷却效率和近壁面流动特性都有显著影响。为研究这一问题, 本文定义弯折角, 具体为气膜经过弯折面后中轴线与实验件上表面, 用  $\alpha$  表示, 如图 7 所示。

三种工况下的弯折角见表 3。

由表 3, 工况一和工况二条件下, 弯折角比较接近, 但工况二下弯折角较工况一小, 工况三的射流角明显大于前两个工况。T. F. Fric 等人的实验和孟宝宝等人的平板气膜实验中也观察到了上述现象并进行了讨论[13] [14]。结合文献中提出的原理和本文的实验图像, 可以进行如下分析: 在工况一下, 射流气

Table 2. Length of cooling film  
表 2. 气膜长度

工况	一	二	三
气膜长度(px)	175	216	200

Table 3. Turning angle  
表 3. 弯折角

工况	一	二	三
弯折角	23°	22°	35°

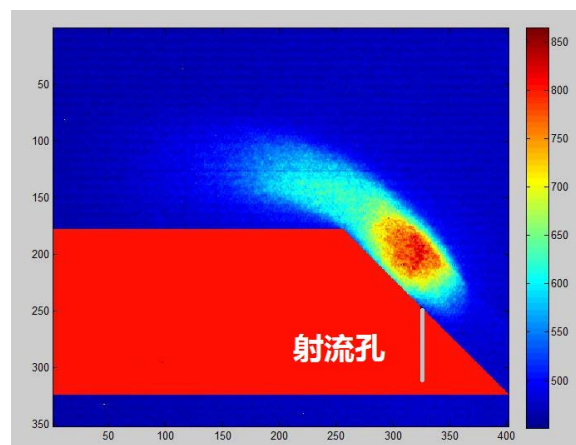


Figure 7. Location of the jet hole  
图 7. 射流孔位置

体较少, 动能也较低在出口附近易于附在壁面上形成气膜, 但由于射流与主流存在较大速度差, 射流气体与主流气体掺混, 容易被主流带离壁面。工况二下, 射流迹线更贴近壁面。表明相对工况一, 在吹风比为 1.101 的情况下壁面附近有更多的射流气体。这是由于射流速度较工况一增大, 此时主流和射流的速度比较接近, 湍流度在主流方向变换比较平缓, 主流与射流气体之间作用比较稳定, 使气体能较好的贴附在壁面上。但在工况三下, 可以看出吹风比增加到一定程度后, 气体在背风侧刚离开气膜孔时, 与主流发生强烈掺混, 使冷却气流从迎风侧被输运到主流中, 离开壁面无法形成覆盖。

### 4.3. 流场细节及冷却效率计算

此外, 通过丙酮 PLIF 方法得到的结果可以为流场细节捕捉和冷却效率测量计算提供必要的试验数据。

根据层流理论和动量定理, 射流气体只有垂直于主流速度的动量, 因此射流气体应只在射流孔至下游出口的空间内分布。而实际图片中, 参考气膜孔的位置, 可以明显看到一部分射流气体扩散, 相对射流出口逆主流方向分布。吴介之等人的涡动力学引论一书中描述了这一现象[13], Kelso R 的实验中也有马蹄涡现象的论述[14]。对照文献的理论和本文的实验结果, 可以认为该部分气体与主流剧烈掺混, 在气膜前端形成马蹄涡, 导致射流气体受到卷吸作用, 在射流出口上游也有分布。

根据表 4 反映出的各工况下射流孔上游射流气体的宽度, 可以认为马蹄涡的强度随吹风比的增大而增加。需要说明的是, 本实验没有针对气膜冷却的速度场进行测量, 因此不能直接判断马蹄涡的结构。本文中对马蹄涡的测量和研究基于浓度分布图像中出现的射流气体逆主流分布现象和文献中的相关论述进行, 实验和分析结果得出了马蹄涡的分布位置、尺寸以及吹风比对马蹄涡强度的影响。

根据 Lampard 和 Hay 使用的传热/传质比拟分析方法[9], 被测气体的热扩散系数与质量扩散系数相关, 此时当地气膜冷却效率可以表示为  $\eta = C_g - C / C_g - C_c$ 。本文中的图像可以为传热/传质比拟分析方法提供气膜浓度分布数据, 进而对气膜冷却效率进行计算。

### 4.4. 小结

综上, 本文将丙酮 PLIF 方法应用于气膜冷却研究, 得到了冷却气体浓度分布的荧光图像。为研究气膜覆盖完整性, 定义了气膜长度和弯折角。通过对气膜图像进行分析, 得出了吹风比对上述参数的影响。同时实验中还观察到了马蹄涡现象, 测量研究了吹风比对马蹄涡强度的影响。根据传热/传质比拟分析方法, 本文中的实验结果可以为冷却效率计算提供实验数据。

## 5. 结论

本文利用丙酮 PLIF 技术对弯曲表面气膜冷却的浓度场进行了可视化显示, 根据 PLIF 图像的灰度信息获得了气膜冷却在不同工况下的不同表现, 可以得出如下结论:

1) 丙酮 PLIF 技术可以用于研究气膜覆盖的完整性和贴壁性。在本文的实验装置中, 吹风比对气膜的有效覆盖长度和弯折角存在显著影响。在低吹风比和高吹风比的情况下, 主流与射流掺混作用强烈, 容易导致射流气体脱离壁面, 使得气膜覆盖面积减小, 完整性受到破坏; 另一方面, 在射流速度与主流速度接近的工况二条件下, 湍流度沿主流方向发展较平缓, 且径向速度梯度也较小, 不易发生剧烈掺混, 因此工况二的完整性和贴壁性在三种工况中最好。

Table 4. Size of horseshoe vortex

表 4. 马蹄涡尺寸

工况	一	二	三
马蹄涡尺寸(px)	29	31	34

2) 丙酮 PLIF 技术可以对射流孔附近的流动细节进行捕捉。根据得到的图像以及文献中的相关论述, 射流气体逆主流分布的位置存在马蹄涡现象, 图像表明其强度随吹风比的增大而增加。通过进一步研究, PLIF 方法将对掺混过程中更多流动细节进行可视化显示和测量, 在气膜冷却等流体机械研究领域具有广泛的应用前景。

## 参考文献 (References)

- [1] Blair, M.F. (1983) Influence of Free-Stream Turbulence on Turbulence Boundary Layer Heat Transfer and Mean Profile Development—1. Experimental Data. *Journal of Heat Transfer*, **105**, 33-40. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3245555>
- [2] Chernobrovkin, A., Lakshminarayana, B., Chernobrovkin, A., *et al.* (1998) Numerical Simulation and Aerothermal Physics of Leading Edge Film Cooling. *ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, American Society of Mechanical Engineers, New York, 103-118. <http://dx.doi.org/10.1115/98-gt-504>
- [3] Wright Lesley, M., McClain Stephen, T. and Clemenson Michael, D. (2010) Effect of Free Stream Turbulence Intensity on Film Cooling Jet Structure and Surface Effectiveness Using PIV and PSP. *Journal of Turbomachinery*, **133**, 1703-1718.
- [4] 李佳, 韩昌, 任静, 等. 基于压敏漆的带横槽气膜冷却实验与数值研究[J]. 工程热物理学报, 2010(2): 239-242.
- [5] 赵建荣, 杨仕润, 俞刚, 张新宇. 火焰结构的平面激光诱导荧光技术观测[J]. 分析测试学报, 2003, 22(2): 16-18.
- [6] 马骁, 何旭, 王建昕, 等. 用激光诱导荧光法测量 GDI 发动机缸内混合气分布[J]. 内燃机工程, 2010, 31(4): 1-5.
- [7] 姚云, 郭方飞, 周波, 等. 喷射器内气-液两相流型及其转换特性的研究[J]. 高校化学工程学报, 2009, 23(3): 392-396.
- [8] Kumagai, T., Takeishi, K., Oda, Y., *et al.* (2008) Numerical and Experimental Research on a Mixing Process of Film Cooling Air with Mainstream (Thermal Engineering). *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers B*, **74**, 453-460.
- [9] Lampard, D. and Hay, N. (2000) The Use of a Mass Transfer Technique to Infer Heat Transfer Coefficients on Film Cooled Turbine Components. *Measurement Science & Technology*, **11**, 933-941. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/11/7/309>
- [10] 马骁, 何旭, 王建昕. 激光诱导荧光法用于内燃机燃烧可视化的研究进展[J]. 车用发动机, 2008(1): 7-13.
- [11] Crimaldi, J.P. (2008) Planar Laser Induced Fluorescence in Aqueous Flows. *Experiments in Fluids*, **44**, 851-863. <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-008-0496-2>
- [12] 戴萍, 林枫. 燃气轮机叶片气膜冷却研究进展[J]. 热能动力工程, 2009, 24(1): 1-6.
- [13] 吴介之, 马晖扬, 周明德. 涡动力学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [14] Kelso, R., Lim, T. and Perry, A. (1996) An Experimental Study of Round Jets in Cross-Flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **306**, 111-144. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112096001255>