

基于 LDV 和 PIV 技术的热声热机研究进展

潘 娜, 沈 超

(华南理工大学 传热强化与过程节能教育部重点实验室 广东 广州 510640)

摘 要: 热声热机是基于热声效应的新型动力装置, 具有节能环保等诸多优点。作为全新的非接触式测量技术, 激光多普勒测速(LDV)和粒子成像测速(PIV)在热声领域的应用对热声理论的发展起到了重要的作用。本研究综述了基于这两项技术的热声热机的研究进展, 并重点介绍了 LDV 和 PIV 技术在热声研究中的应用, LDV 技术实现了热声中声速的测量和声功的计算, PIV 技术则被用来测量谐振管内的声场和板叠尾端的流场, 进而分析热声热机内气体与固体介质间的相互作用及交变流动规律, 探究热-声转换的理论。

关 键 词: LDV; PIV; 可视化; 热声; 进展

中图分类号: TK11 文献标识码: A

引 言

LDV 和 PIV 技术实现了声速和声场的测量, 丰富了声学的测量方法, 对声学的研究起到积极的作用。热声学是一门涉及声学、热力学、流体动力学等相关知识的复杂综合性学科。基于热声效应的热声热机主要通过气体与固体介质间的热交换来实现热致声(热声发动机)或声泵热(热声制冷机)的效果, 具有可靠性高、寿命长、节能环保等优势^[1-2]。在热声研究中, 一般通过压力和温度等参数来分析热声热机的起振消振等现象。声速和声功是表征热声热机声功转换的重要参数, 也是一直以来的测量难点。LDV 和 PIV 技术在热声领域的应用使得声速和流场的测量成为可能。新型的测试方法与技术加速了热声的研究进程, 为揭示热声热机工作机理发挥了重要的作用。

1 LDV 技术在热声研究中的应用

LDV 技术在声学领域的应用始于 1976 年, Tay-

lor 首先运用 LDV 技术实现了扬声器驱动驻波管内的声速测量^[3]。但由于当时技术的限制, 计算做了大量简化并忽略了噪音的影响, 精确结果需要通过大量实验平均获得^[4]。1991 年 Vignola 实现了 LDV 水中的声速测量^[5], 在以水为介质的管内对比了不同粒径的光分散颗粒对实验结果的影响, 同时研究了布朗运动的影响, 认为对于粒径大于 0.1 mm 的测试系统, 布朗运动的影响极为微弱。系统在 10 kHz 的带宽下最小可以侦测到 5 nm 的粒子位移, 大大的提高了声速测量的精度。之后 Thompson 和 Atchley 进一步发展了声速的测量技术^[6], 提出了基于 LDV 和 BSA(脉冲频谱分析)技术的圆柱形驻波谐振管内低振幅声速的高精度测量方法。

热声领域内的速度测量较普通声速测量稍有不同。热声热机内部的流动是一种复杂的交变流动, 由于热-声转换的复杂性, 系统中引入常规的测速装置会影响系统结构及其热力学性能, 无法获得实际需要数据。LDV 作为全新的非接触式测量技术在热声领域的应用解决了热声热机速度测量的难题。最早将 LDV 技术应用于热声研究的是日本爱知大学的 Yazaki 等人于 1998 年搭建了环形行波热声发动机装置, 谐振管为长 2.58 m, 直径 20.1 mm 的不锈钢管, 其中在板叠附近用玻璃加工成 LDV 测速的可视化窗口, 以便激光射入, 同时方便对研究区域内的粒子进行探测, 如图 1 所示^[7]。声速的成功测量使得声功的分析成为可能, 通过相位差等计算成功得到了行波热声热机内的声功分布, 并于驻波热声热机进行对比, 得出一些重要结论: 驻波和行波热声热机内同时存在行波和驻波两种成份, 只是各自作用不同; 两种热声热机均在板叠处产生声功, 但驻波热声热机起振温比明显高于行波。这些结论验证了学者们对热声理论的推测, 对热声热

收稿日期: 2011-07-21; 修订日期: 2011-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51006038); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2011ZM0045); 表面功能结构先进制造广东普通高校重点实验室开放基金资助项目(SFS-KF201008)

作者简介: 潘娜(1986-), 女, 河北成安人, 华南理工大学博士研究生。

机的深入研究有极大的帮助。1999 年,法国维因大学的 Bailliet 等人将 LDV 技术应用于热声制冷机中^[8],获得了谐振管各处的速度分布,并结合声压的测量计算出热声制冷机的声功分布。但是实验结果与理论值相比有一定的误差,LDV 在热声领域的测试技术需要进一步完善以获得更精确的测量结果。

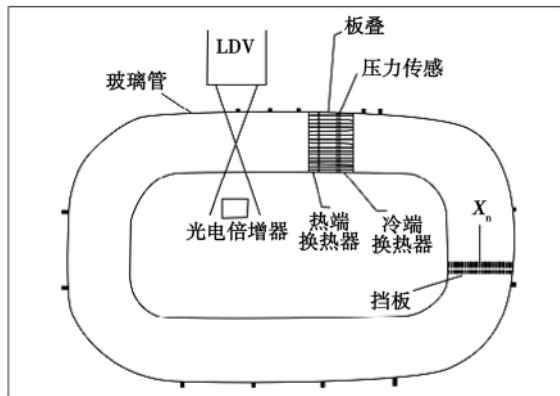


图 1 环形热声发动机可视化装置
Fig. 1 Annulus thermoacoustic engine visualization device

热声热机内声功一般通过式(1)进行计算,即:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} p(nf) u_r(nf) \cos\psi(nf) \quad (1)$$

式中: f —声振荡频率; $p(nf)$ —系统压力; $u_r(nf)$ —速率; ψ —压力和速度间的相位差。

因此声功的计算取决于相位角,压力和速度的精确测量,微小的实验误差对计算结果有较大的影响。Biwa 发现在传感器测压和 LDV 测速中由电路时间延迟导致的测量误差不可忽略^[9],提出了修正时间延迟误差的拟合公式,为声功的精确测量做出了新贡献。在此基础上,搭建了带谐振管的混合型热声发动机装置,精确计算了混合型热声热机内声功的分布情况,同环形及驻波型热声发动机相似,声功在板叠处产生,在谐振管内被消耗。

LDV 测速技术在热声领域的成熟应用推动了热声理论的研究进程。1999 年 Backhaus 和 Swift 在 Nature(《自然》杂志)上发表了基于行波工作的热声斯特林发动机可达到 40% 相对卡诺效率的伟大成果。为深入分析该高效热声发动机的工作机理,2002 年 Ueda 搭建了同文献[10]中相似的带空气腔的热声发动机装置,如图 2 所示^[11],环路内径 40 mm,全长 1.18 m,谐振管长 1.04 m,一端连接 $2.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 的容器。通过速度、压力的测量和声

功的计算证实 Backhaus 提出的结构具有足够大的声阻抗来减少粘性损失,同时指出板叠处速度与压力的相位差为 -20° ,正是这样的相位差使混合型热声发动机达到了较高的效率。之后,他们通过增添制冷装置,将发动机产生的声功用于制冷,成功获得了 -25°C 的最低温度^[12]。基于 LDV 声速测量技术及声功的精确计算,2004 年 Biwa 成功地分析了扬声器驱动下谐振管内声强的放大与衰减过程^[13]。实验证明,热声装置对声强表现为放大或衰减作用主要取决于再生器(板叠)两端的温度差方向,同时再生器(板叠)在谐振管内所处相位对热声的能量转换有较大的影响。因而热声热机不仅可以用来产生声功同样可以用作消音装置,用在需要抑制声振荡的场所。

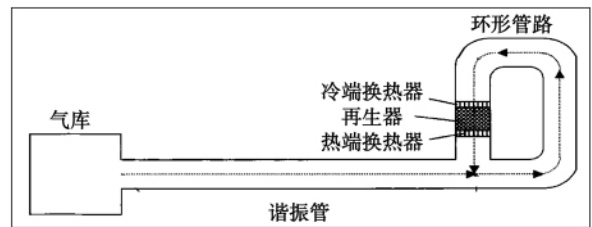


图 2 混合型热声发动机装置
Fig. 2 Hybrid type thermoacoustic engine device

随着 LDV 技术的不断成熟,其在热声领域的应用也得到不断推广。2005 年 Biwa 提出了基于 LDV 测速技术的新型高精度谐振管品质因子测量方法^[14],谐振管品质因子 Q 定义式:

$$Q = 2\pi f_0 \frac{E_s}{E} \quad (2)$$

式中: E_s —储存在系统中的能量; E —每周期的耗散能量; f_0 —系统的谐振频率。

传统测量方法中品质因子一般通过频响曲线进行计算^[15],测量误差较大,并且在能量损耗 E 较大时使用受到限制。Biwa 提出的新型计算方法完全按照品质因子定义进行,通过 LDV 声速的测量成功计算出系统内的声功储存量及损失量,进而得到品质因子。新型计算方法大大提高了品质因子的测量精度,且在高能量耗散时同样适用。2009 年 Moreau 又将 LDV 技术应用于热声设备中流体形态的研究,通过声速的变化分析板叠对谐振管内流体旋涡的影响^[16]。LDV 技术成功地解决了热声速度测量的难题,为声功的计算和品质因数的计算等提供了更为精确的新方法,对热声理论的发展做出了巨大的贡献。但 LDV 本身单点测量的技术特点决定

了其不能同时提供全场的流速数据,限制了其在热声领域进一步的发展应用。PIV的出现使热声内流场的测量成为可能,为热声交变流动规律的深入研究提供了强大的测试工具。

2 PIV技术在热声可视化研究中的应用

PIV技术综合了单点测量和显示测量技术的优点,既具备单点测量的精度和分辨率,又能获得平面流场的整体结构和瞬态图像^[17]。最早将PIV应用于声学的是Hann和Greated^[18],通过双曝光技术和自动关联方法实现了PIV对声速的测量。作为最早的PIV测声速的方法,其在应用范围上有严格的限制。之后,Nabavi等人在PIV声速测量方法上做了进一步改善,通过锁相技术实现了一个声周期内特定相位下的声场测量^[19]。锁相技术的使用增加了实验的复杂性和潜在的误差^[20],但却是现有PIV技术下进行声场定相测量的唯一有效方法。

在热声研究中PIV主要用来进行谐振管内声场的测量及流动形态的观察,为热声热机内交变流动规律及气固介质间的换热规律的研究提供了极大的方便。在声场研究方面,2002年英国开放大学的Tonddast-Navaei和Sharp利用PIV技术得到了扬声器驱动下长620 mm的光滑管内一个周期的声速正弦分布图,并对比了不同声压级下的气体振荡情况^[21]。该实验结构比较简单,未考虑板叠及换热器等部件,严格的讲未涉及到热-声转换等问题,但作为热声PIV研究的最早文献,为热声的可视化研究提供了新的思路和方法,奠定了声场研究的基础。2008年加拿大康卡迪亚大学的Nabavi等人在声场测量中做了进一步的研究。他们得到了谐振管内线性条件下的声速分布,将实验结果与理论解进行对比,验证了PIV测速结果的可靠性,进而将此方法应用于非线性研究中,发现了周期性沿谐振管运动的高速度梯度的波阵面^[22]。在国内,2009年西安交通大学王勇等人利用PIV开展了热声制冷机的可视化研究工作,在低马赫数下(最大为0.075)研究了系统的压力振幅和速度振幅随驱动频率的变化规律,并将实验结果与格子Boltzmann方法进行的模拟结果比较,验证了模拟中假定条件的合理性^[23]。以上关于声场的研究均未考虑热声热机内热与声间的相互作用,2012年华南理工大学潘娜等人在扬声器驱动的谐振管中添加了冷热端换热器^[24],利用PIV和红外热像仪考查了热与声相互作用下热声核

内的速度场与温度场分布,分析了温度差引起的热对流对速度场的影响。以太阳能在热声中的应用为背景,基于PIV技术进行多倾角下热声热机传热与流动特性研究是下一步的工作重点。

在基于PIV技术的热声流场研究方面,2003年法国里昂中央理工大学的Blanc-Benon与美国霍普金斯大学的Besnoin合作首先关注了谐振管内板叠尾部的涡分布^[25],对比了不同厚度板叠在不同压比下的情形,认为压力振幅对旋涡状态有较大影响:较小振幅下(0.5 kPa)板叠尾部出现一对旋转方向相反的对称涡,随着振幅增大(2 kPa),涡会发生脱落,且不再对称,但旋涡不会超出两倍声位移($2d_{ac} = 2U/x$)如图3所示^[26]。2009年荷兰爱因霍芬科技大学的Aben和Zeegers详细研究了板叠厚度、间距、速度振幅、频率等对流场的影响,并用 Re 和 St 两个无量纲数将旋涡分为双涡、四涡、过渡区及涡街4种情况,认为 St 与 Re 的比值决定了旋涡的形态^[27]。由于实验数据有限,该分类不能代表所有流场的情况,但无量纲参数的提出大大简化了优化设计过程,可以将相似的实验数据进行对比,对于热声这样含有众多复杂影响因素的系统来说具有重要意义^[28]。

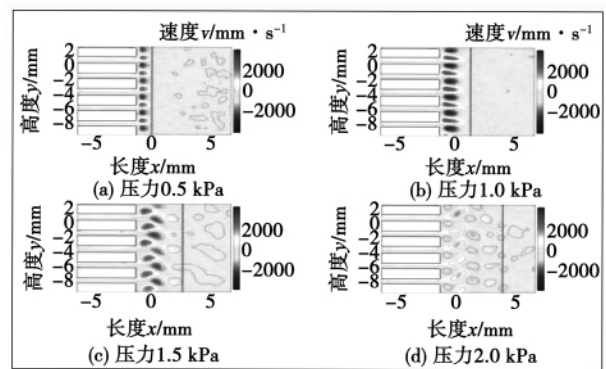


图3 不同压力振幅下旋涡分布图

Fig. 3 Chart showing the vortex distribution under various pressure amplitudes

英国曼彻斯特大学在热声内部流动形态分析及无量纲参数归纳方面进行了大量系统的研究工作^[29~35]。Mao等人在长7.4 m、横截面为134 mm × 134 mm的方形管内填充了长200 mm的板叠,如图4所示,在扬声器驱动下用PIV观察了板叠尾端旋涡的周期性变化。在此基础上,Shi等人通过6种板叠尺寸、3种板叠间距、6种相位变化(共108种情况)归纳出8种旋涡形态和9种演化过程^[33]。用

Re 、 Kc 和 Wo (或者 D/d) 3 个无量纲参数将 9 种演化过程分为四类,并将分类结果与 Blanc - Benon、Berson 和 Mao 的实验结果进行对比,吻合较好。同时分析了相位雷诺数 Re^* 和 Wo 等无量纲数对旋涡形态及演化过程的影响。在原有工作的基础上,2011 年 Shi 又通过 76 组不同物理结构的实验着重分析了 St 数对板叠尾端旋涡脱落过程的影响^[34],试图利用类似于稳态流的方法将旋涡脱落过程通过 St 数进行特征归类。以上对于声振荡中流动形态的研究都是通过多次测量取平均的方法进行,Mao 发现平均的实验结果并不能如实反映声振荡过程中每个周期的流态差异^[35],认为关注每个声振荡周期的差异更有助于分析热声热机内流体与固体介质间的相互作用,进而了解热 - 声转换过程。基于 PIV 的热声流动形态的研究为分析各物理参数对交变流动的影响提供了方便,有助于热声理论模型的建立。

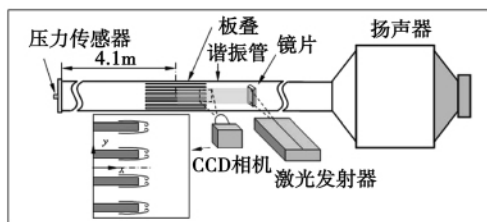


图 4 扬声器驱动热声装置

Fig. 4 Loudspeaker-driven thermoacoustic device

PLIF(平面激光诱导荧光)技术是 PIV 系统上的一种拓展技术,主要通过激光激发待测分子或原子的共振跃迁以探测他们在特定量子态的聚居密度。PLIF 技术主要用在燃烧中,检测燃烧场中重要成份的二维组分分布和定量测量燃烧火焰温度场分布^[36]。在热声研究中,PLIF 技术被用来观察气团与换热器间的热交换过程,弥补了普通单点温度测量(如热电偶)的缺陷。2010 年 Shi 等人首先将 PLIF 技术应用于热声研究中,利用两端存在温差的板叠来模拟冷热端换热器,得到热声一个流道的温度分布图,分析了气团在冷热端吸热和放热过程^[37]。在此基础上,2012 年 Jaworski 等人在相似的装置上进一步分析了一个周期内的气流在高低温板叠间的运动,并建立了数值模型,但由于对部分热损失缺乏考虑,计算结果与实验结果存在较大偏差^[38]。基于 PLIF 技术的热声温度场研究直观的反映了热声核内各处温度分布,将基于 PIV 技术的热声交变流动规律研究与基于 PLIF 技术的气固间换热规律研究相结合,对热 - 声转换机理的探索及其

效率的提高有重要意义。

3 展 望

在近十多年的研究历程中,LDV 和 PIV 技术已被广泛用于热声速度、流场和温度场的测量中,对热声内部复杂交变流动规律的研究及热声机理的探索起到了重要的作用。综合目前的研究进展来看,基于该两项技术的进一步研究工作仍需不断发展。目前,PIV 在热声中的应用主要集中于扬声器驱动的谐振管或制冷机,真正热声发动机上的声场测量尚未实现。应用 PIV 观察热声发动机起振及消振瞬间的流场变化对于探索热声机理有重要的指导意义,将成为下一步的重点研究方向。另外,目前 PIV 在热声研究中主要用来观察二维流场分布,不能立体地反映谐振管及板叠内的三维流动情况。PIV 三维技术现已基本成熟,基于两个 CCD 相机的三维立体图像对于热声内部声场及流动规律的研究更有帮助。相信随着测量技术的发展,LDV 及 PIV 在热声研究中的应用会进一步得到拓宽和发展。

参考文献:

- [1] 王红丽,汪双凤. 纯环路型和混合型行波热声发动机的对比实验[J]. 热能动力工程, 2010, 25(3): 273 - 277.
WANG Hong-li, WANG Shuang-feng. Contrast experiment of travelling-wave thermo-acoustic engines of pure loop and hybrid type [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(3): 273 - 277.
- [2] 沈超,何雅玲,卢杰,等. 安装倾角对热声发动机性能影响的试验研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(4): 421 - 424.
SHEN Chao, HE Ya-ling, LU Jie, et al. Experimental study of the influence of installation inclination angles on thermoacoustic engine performance [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(4): 421 - 424.
- [3] Taylor K J. Absolute measurement of acoustic particle velocity [J]. J Acoust Soc Am. 1976, 59(3): 691 - 694.
- [4] Taylor K J. Absolute calibration of microphones by a laser-doppler technique [J]. J Acoust Soc Am. 1981, 70(4): 939 - 945.
- [5] Vignola J A, Berthelot Y H, Jarzynski J, et al. Laser detection of sound [J]. J Acoust Soc Am. 1991, 90(3): 1275 - 1286.
- [6] Thompson M W, Atchley A A. Simultaneous measurement of acoustic and streaming velocities in a standing wave using laser doppler anemometry [J]. J Acoust Soc Am. 2005, 117(4): 1828 - 1838.
- [7] Yazaki T, Iwata A, Maekawa T, et al. Traveling wave thermoacoustic engine in a looped tube [J]. Physical Review Letters, 1998, 81(15): 3128 - 3131.
- [8] Bailliet H, Lotton P, Bruneau M, et al. Acoustic power flow measurement in a thermoacoustic resonator by means of laser Doppler anemometry (LDA) and microphonic measurement [J]. Applied A-

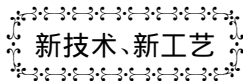
- oustics 2000 60(1):1-11
- [9] Biwa T ,Ueda Y ,Yazaki T ,et al. Work flow measurements in a thermoacoustic engine[J]. Cryogenics 2001 41:305-310.
- [10] Backhaus S ,Swift G W. A thermoacoustic stirling heat engine [J]. Nature 1999 399:335-338.
- [11] Ueda Y ,Biwa T ,Mizutani U ,et al. Acoustic field in a thermoacoustic stirling engine having a looped tube and resonator [J], Applied Physics Letters 2002 81(27):5252-5254.
- [12] Ueda Y ,Biwa T ,Mizutani U ,et al. Experimental studies of a thermoacoustic stirling prime mover and its application to cooler[J]. J Acoust Soc Am 2004 115(3):1134-1141.
- [13] Biwa T ,Tashiro Y ,Mizutani U ,et al. Experimental demonstration of thermoacoustic energy conversion in a resonator[J]. Phys Rev E 2004 69(6):0663041-0663046.
- [14] Biwa T ,Ueda Y ,Nomura H ,et al. Measurement of the Q value of an acoustic resonator [J]. Phys Rev E ,2005 ,72(2):0266011-0266016.
- [15] 张春萍,吴峰,丁国忠,等. 热声谐振管品质因数的实验研究[J]. 低温技术 2007 35(7):380-382.
ZHANG Chun-ping ,WU Feng ,DING Guo-zhong ,et al. Experimental study of the quality factor of a thermoacoustic resonator [J]. Cryogenic Technology 2007 35(7):380-382.
- [16] Moreau S ,Bailliet H ,Valière J C. Effect of a stack on Rayleigh streaming cells investigated by laser Doppler velocimetry for application to thermoacoustic devices [J]. J Acoust Soc Am 2009 ,125(6):3514-3517.
- [17] 盛森芝,徐月亭,袁辉靖. 近十年来流动测量技术的新发展 [J]. 力学与实践 2002 24(5):1-13.
SHENG Sen-zhi ,XU Yue-ting ,YUAN Hui-jing. Latest development of flow measurement technologies in the recent decade [J]. Mechanics and Practice 2002 24(5):1-13.
- [18] Hann D B ,Greated C A. Particle image velocimetry for the measurement of mean and acoustic particle velocities [J]. Meas Sci Technol 1997 8(6):656-660.
- [19] Nabavi M ,Siddiqui K ,Dargahi J. Simultaneous measurement of acoustic and streaming velocities using synchronized PIV technique [J]. Meas Sci Technol 2007 18(7):1811-1817.
- [20] Campbell M ,Cosgrove J A ,Greated C A ,et al. Review of LDA and PIV applied to the measurement of sound and acoustic streaming [J]. Optics & Laser Technology 2000 32:629-639.
- [21] Tonddast-Navaei A ,Sharp D B. PIV study of standing waves in a resonant air column [C]//Proceeding of the institute of Acoustics ,Salford 2002:241-245.
- [22] Nabavi M ,Siddiqui K ,Dargahi J. Measurement of the acoustic velocity field of nonlinear standing waves using the synchronized PIV technique [J]. Experimental Thermal and Fluid Science , 2008 33(1):123-131.
- [23] 王勇. 格子 Boltzmann 方法在热声领域的应用及热声谐振管可视化实验研究 [D]. 西安:西安交通大学 2010.
WANG Yong. Application of Boltzmann method in the thermoacoustics domain and visualization experimental study of a thermoacoustic resonator [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University 2010.
- [24] 潘娜,沈超,汪双凤. 热声热机热声核内传热与流动特性实验研究 [J]. 工程热物理学报 2012 33(4):651-654.
PAN Na ,SHEN Chao ,WANG Shuang-feng. Experimental study of the heat transfer and flow characteristics of a thermoacoustic engine within its thermoacoustic nuclei [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2012 33(4):651-654.
- [25] Blanc-Benon P ,Besnoin E ,Knio O. Experimental and computational visualization of the flow field in a thermoacoustic stack [J]. Comptes Rendus Mecanique 2003 331(1):17-24
- [26] Berson A ,Michard M ,Blanc-Benon P. Measurement of acoustic velocity in the stack of a thermoacoustic refrigerator using particle image velocimetry [J]. Heat and Mass Transfer ,2008 44(8):1015-1023.
- [27] Aben PCH ,Bloemen P R ,Zeegers J C H. 2-D PIV measurements of oscillatory flow around parallel plates [J]. Exp Fluids 2009 46(4):631-641.
- [28] 金滔,王本仁,张淑仪. 热声制冷的研究现状 [J]. 应用声学 2002 21(2):1-7.
JIN Tao ,WANG Ben-ren ,ZHANG Shu-yi. Status quo of the study on thermoacoustic refrigeration [J]. Applied Acoustics ,2002 21(2):1-7.
- [29] Mao X A ,Yu Z B ,Jaworski A J ,et al. PIV studies of coherent structures generated at the end of a stack of parallel plates in a standing wave acoustic field [J]. Exp Fluids 2008 45(5):833-846.
- [30] Mao X A ,Marx D ,Jaworski A J. PIV measurement of coherent structures and turbulence created by an oscillating flow at the end of a thermoacoustic stack [J]. Springer Proceedings in Physics , 2007 109 ,Part II:99-102.
- [31] David M ,Mao X A ,Jaworski A J. Acoustic coupling between the loudspeaker and the resonator in a standing-wave thermoacoustic device [J]. Applied Acoustics 2006 67(5):402-419.
- [32] Jaworski A J ,Mao X A ,Mao X R ,et al. Entrance effects in the channels of the parallel plate stack in oscillatory flow conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2009 33(3):495-502.
- [33] Shi L ,Yu Z B ,Jaworski A J. Vortex shedding flow patterns and their transitions in oscillatory flows past parallel-plate thermoacoustic stacks [J]. Experimental Thermal and Fluid Science , 2010 34(7):954-965.
- [34] Shi L ,Yu Z B ,Jaworski A J. Investigation into the Strouhal number associated with vortex shedding from parallel-plate thermoacoustic stacks in oscillatory flow conditions [J]. European Journal of Mechanics B/Fluids 2011 30(2):206-217.
- [35] Mao X A ,Jaworski A J. Application of particle image velocimetry measurement techniques to study turbulence characteristics of oscillatory flows around parallel-plate structures in thermoacoustic devices [J]. Meas Sci Technol ,2010 ,21(3):03540301-03540316.
- [36] 关小伟,刘晶儒,黄梅生,等. PLIF 法定量测量甲烷-空气火焰二维温度场分布 [J]. 强激光与粒子束 2005 17(2):173-176.
GUAN Xiao-wei ,LIU Jing-ru ,HUANG Mei-sheng ,et al. PLIF method for quantitatively measuring the two-dimensional tempera-

ture field distribution of methane-air flame [J]. Strong Laser and Particle Beams 2005 ,17(2) : 173 - 176.

[37] Shi L ,Yu Z B ,Jaworski A J. Application of laser-based instrumentation for measurement of time-resolved temperature and velocity fields in the thermoacoustic system [J]. International Journal of Thermal Sciences 2010 ,49(9) : 1688 - 1701.

[38] Jaworski A J ,Piccolo A. Heat transfer processes in parallel-plate heat exchangers of thermoacoustic devices numerical and experimental approaches [J]. Applied Thermal Engineering 2012 ,42: 145 - 153.

(丛 敏 编 辑)



现代燃气轮机动静叶运行可靠性标准的制定

据《Электрические станции》2012 年 2 月刊报道,俄罗斯全俄热工研究所研究人员对现代燃气轮机动静叶运行可靠性判断标准的制定进行了深入研究。

在 950 ~ 1 250 °C 温度,1 h 时间内短时间加热以及在接近金属工作温度下长时间时效处理后,对 IN792 镍基合金铸造叶片金属研究已经证实:

(1) 在 1 h 时间内随着短时间加热温度的提高,IN792 合金叶片发生原始 γ' 相粒子逐渐增大。而接近金属工作温度下长时间时效处理的过程中,也发生了同样的现象。

(2) 基于上述长期时效处理和全套试验的结果,确定了 IN792 合金叶片金属相应于工作温度下长期运行的正常状态,并根据约 850 °C 温度下工作的 IN792 合金静叶,制定了其显微结构状态可靠性的判断标准:原始 γ' 相粒子的尺寸不大于 1.3 μm 。在更大的粒子尺寸下,会降低叶片金属的机械性能和耐热性能。

(3) 制定的标准允许在定理检查时根据显微结构状态评定叶片对运行的适用性。

IN792 化学成份的含量示于表中。

IN792 的化学成份	参数 /%
C	0.0920
Ni	基本的
Cr	12.700
Co	8.850
W	3.650
Mo	1.560
Ta	4.450
Al	3.200
Ti	4.230
Nb	0.300
V	0.300
Fe	0.620
Hf	1.000
Zr	0.005
B	0.015

(吉桂明 摘译)

基于 LDV 和 PIV 技术的热声热机研究进展 = **Advances in the Study of Thermo-acoustic Heat Engines Based on LDV (Laser-Doppler Velocimetry) and PIV (Particle Image Velocimetry) Technology** [刊, 汉] / PAN Na, SHEN Chao (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy Conservation, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012, 27(5). -523 ~ 528

Thermo-acoustic heat engines are new type power plants based on the thermo-acoustic effect and feature many merits, such as energy conservation and environmental protection etc. As a wholly-new non-contact type measurement technology, the applications of laser-Doppler velocimetry (LDV) and Particle Image Velocimetry (PIV) in the thermo-acoustic domain have played an important role in the development of the thermo-acoustic theory. The authors have described the applications of the LDV and PIV technology in the thermo-acoustic study and given an overview of the latest advances in the study of thermo-acoustic heat engines based on both technologies. The LDV technology was used to realize the measurement of the acoustic speed and calculation of the acoustic power in the thermo-acoustics while PIV technology was employed to measure the acoustic field inside resonant tubes and the flow field in the tail portion of stacks, further analyzing the interaction between the gas and solid media in a thermo-acoustic heat engine and their law governing the alternative flow and study the heat-acoustic conversion theory. **Key words:** LDV (laser-Doppler velocimetry), PIV (Particle Image Velocimetry), visualization, thermo-acoustic, advancement

基于泄漏流控制的轴流压气机叶顶前缘端削设计 = **Leakage Flow Control-based Leading Edge Blade Tip Machined Design of an Axial Flow Compressor** [刊, 汉] / WANG Wei, CHU Wu-li, ZHANG Hao-guang (College of Power and Energy Source, Northwest Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012, 27(5). -529 ~ 534

To control the blade tip leakage flow and enlarge the stability margin of a compressor, presented was a method for machining the blade tip at the leading edge. A high-energy fluid was introduced from the blade tip clearance at the leading edge and the turning direction of the leakage flow was controlled by the inertia of the incoming flow. A numerical method was adopted to study the influence of nine leading edge blade tip machined structures on the performance of the rotor at various rotating speeds. With an aim to increase the stability margin, an optimized design was performed of the blade tip machined structure. It has been found that with an incoming flow introduced from the leading edge blade tip clearance, the leading edge blade tip machining can lower the return flow extent of the leakage flow, thus decreasing the blocking extent of the passage. Under the premises of the total pressure ratio and isentropic efficiency keeping constant, the stability margin of the rotor was increased by 2% and 3% at the high and low