

汽轮机空心静叶去湿缝隙结构的研究

王新军, 高铁瑜, 徐廷相

(西安交通大学 叶轮机械研究所 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要: 在空气—水膜两相流动试验装置上, 试验研究了去湿缝隙几何形状和尺寸与缝隙去水效率之间的关系, 得到了缝隙角度、宽度与去水效率的关系曲线; 分析了空心静叶去湿缝隙的抽吸过程和机理; 讨论了缝隙抽吸对叶栅通道内主流场的影响。结果表明: 小的缝隙角度可以提高缝隙的去水效率; 存在一个去水效率较低的缝隙宽度范围, 在本试验条件下, 相应去水效率较低的缝隙宽度为 1.0~1.5 mm; 另外, 将缝隙进口前端边缘加工成带有半径为 1 mm 的过渡圆角, 可以将缝隙去水效率提高 5% 以上。在此基础上, 提出了空心静叶去湿缝隙的基本设计原则以及合理的缝隙结构形状与尺寸。

关 键 词: 汽轮机; 空心静叶; 去湿缝隙; 结构设计

中图分类号: TK261 文献标识码: A

1 前 言

随着汽轮机单机容量的增大及核电汽轮机的发展, 汽轮机低压末几级动叶片的水蚀问题越来越严重^[1]。在空心静叶片的腹面和背面合适位置上开设去湿缝隙, 利用缝隙内外的压差去除静叶表面上的流动水膜或溪流, 减少水膜或溪流在静叶出口边由于撕裂而形成的大水滴数目, 是防止或减轻动叶水蚀的最直接且有效的措施之一^[2~3]。如果缝隙结构设计合理, 去湿缝隙可以去除大部分对动叶有危害的水份, 不仅减缓或消除动叶的水蚀, 而且还可以减少大水滴所造成的摩擦和制动损失。反之, 则难于取得预期的效果, 还可能引起气动损失的增大。因此, 合理的去湿缝隙必须能最大限度地去除沉积在静叶表面上的水膜或溪流并易于加工制造, 同时对叶片的气动性能和强度影响不大。影响缝隙去湿/水效率的几何参数有缝隙开设的位置、缝隙宽度、角度和形状^[4]。本文在空气—水膜两相流动试验装置上, 试验研究了去湿缝隙形状和几何参数对去水效

率的影响; 分析了缝隙抽吸对主流场的影响, 提出了去湿缝隙的合理结构。

2 空心静叶缝隙抽吸过程和机理分析

众所周知, 汽轮机中蒸汽所携带的大分散度水滴, 由于扩散或惯性作用而沉积在静叶表面上, 在高速气流切应力的作用下沿叶片表面向出口边流动, 形成连续的膜状流动或溪流状流动。

静叶表面上的缝隙抽吸过程是一个相当复杂的汽—水膜两相流动现象。缝隙抽吸流动水膜或溪流的过程可以分为以下 3 种情况^[4]:

(1) 当缝隙宽度较小(约小于 1.5 mm)时, 静叶表面上的水膜或溪流在流经去湿缝隙时, 由于水的表面张力作用, 缝隙进口前端边缘与后端边缘处的水膜仍然连接在一起, 沿流动方向呈连续的膜状或溪流状流动。在缝隙进口处, 流动水膜或溪流受到气流切应力、抽吸压差力、水膜重力和表面张力的作用。气流切应力对缝隙去水效率的影响表现在两个方面: 一是气流切应力使流动水膜的厚度变薄, 并有可能导致水膜破裂, 有利于缝隙的抽吸, 去水效率提高; 二是气流切应力使水膜产生一个沿气流方向的运动速度, 由于运动惯性使水膜越过缝隙的可能性增大, 使去水效率降低。抽吸压差的作用使水膜有被缝隙抽吸掉的倾向。重力的作用与空心静叶在隔板中的周向位置有关。表面张力则保持水膜的完整性, 有阻止水膜被缝隙抽吸掉的趋势。在气流切应力、抽吸压差力、水膜重力和表面张力的综合作用下, 流经去湿缝隙的水膜部分被抽吸掉, 另一部分则越过缝隙向下游流动。

(2) 当缝隙宽度约为 1.5~2.0 mm 时, 缝隙进口前端边缘处的水膜或溪流与后端边缘处的水膜或溪流断开, 沿流动方向形不成连续的膜状或溪流状流动。

收稿日期: 2004-04-15; 修订日期: 2004-10-26

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(50336050); 国家自然科学基金专项基金资助项目(50323001)

作者简介: 王新军(1962-)男, 陕西西安人, 西安交通大学副教授。

此时, 缝隙进口之前叶片表面上的水膜或溪流受汽流切应力作用向下游流动, 在缝隙进口前端边缘发生水膜或溪流的撕裂, 形成大分散度的水滴, 撕裂形成的水滴直径远大于撕裂前的水膜厚度。具有一定运动速度的水滴在脱离缝隙前端边缘向下游运动过程中, 虽然受到抽吸压差的作用, 但由于缝隙宽度较小, 大部分来不及被缝隙抽吸掉, 就越过缝隙的后端边缘向下游流去, 甚至一些直径较大的水滴还未脱离缝隙前端边缘, 就与缝隙后端边缘相接, 跃过缝隙向叶片下游流过的可能性也大。因而, 这种情况下的缝隙去水效率较低。

(3) 当缝隙宽度增大到约大于 2.0 mm 时, 在缝隙进口前端边缘处同样发生水膜或溪流的撕裂, 但由于缝隙宽度较大, 撕裂形成的水滴在脱离缝隙前端边缘向下游运动的过程中受到汽流力、抽吸压差和重力的综合作用, 水滴的运动类似于平抛物体的运动, 其运动轨迹近似为抛物线, 因而这些水滴被缝隙抽吸掉的可能性大大增加。随着缝隙宽度的继续增大, 缝隙抽吸的水膜流量越大。在极端情况下, 即缝隙宽度为无穷大时, 缝隙将会把叶片表面上的流动水膜全部抽吸掉。

3 缝隙几何形状和尺寸对缝隙去水效率的影响

本文中的抽吸压差 Δp 是指缝隙进口压力与空心静叶内部压力的差值; 水膜流量 G_L 是沿叶高方向单位长度流动的水膜流量; 气流速度 U_e 是叶片通道内的主气流速度; 缝隙宽度 Δ 是沿气流流动方向叶片表面上缝隙的宽度; 缝隙角度 α 是缝隙中心线与叶片表面的夹角。缝隙去水效率 η 是缝隙抽吸掉的水膜质量流量 G_d 与叶片上水膜总的质量流量 G 的比值。

在不考虑叶片曲率影响的情况下, 本试验用空心平板叶片代替实际的空心静叶片; 另外, 受试验条件所限, 试验工质以空气代替水蒸气。

3.1 缝隙角度的影响

在同样的条件下, 去湿缝隙角度不同, 缝隙抽吸的效果也不同。较小的缝隙角度可以避免水膜或溪流流动的突然转向, 水膜或溪流比较自然地流入缝隙内, 在缝隙进口前端边缘处不易产生类似于水膜撕裂时的现象, 有利于水膜或溪流的抽吸, 缝隙的去水效率较高。如果缝隙角度偏大, 水膜或溪流的流

动方向变化剧烈, 在缝隙进口前端边缘处易产生类似于水膜撕裂时的现象, 导致缝隙去水效率降低。

图 1 是试验得到的缝隙角度与缝隙去水效率的关系曲线。可以看出, 在不同的抽吸压差下, 缝隙的去水效率均随缝隙角度的增大而下降; 在本文试验工况下, 缝隙角度为 45° 时的缝隙去水效率最高, 为 0.47~0.50; 当缝隙角度增大到 90° 时, 缝隙去水效率下降到 0.15~0.20, 比缝隙角度为 45° 时的去水效率降低大约 60%。显然, 较小的缝隙角度有利于提高缝隙的去水效率。在其它试验条件下得到的结果也同样表明了这种变化规律。试验结果与前面的分析是一致的, 因此, 在工艺许可的前提下, 采用小的缝隙角度可以提高缝隙的去水效率。

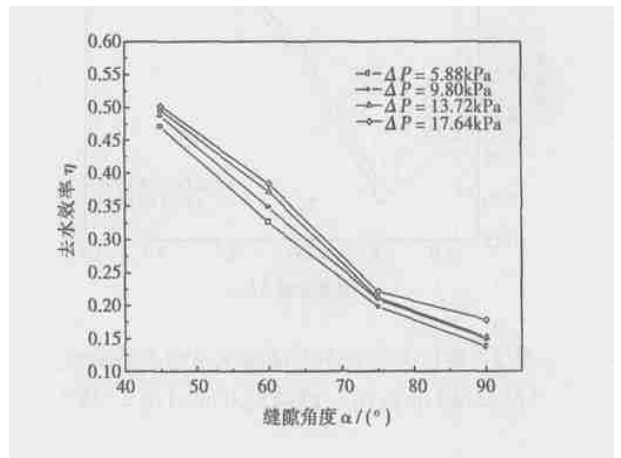


图 1 缝隙去水效率与缝隙角度的关系曲线
($\Delta=2 \text{ mm}$; $U_e=140 \text{ m/s}$; $G_L=13.40 \text{ g/(m}\cdot\text{s)}$)

3.2 缝隙宽度的影响

图 2 给出了缝隙角度为 45° 时的缝隙宽度与去水效率的关系曲线。可以看出, 缝隙的去水效率先随着缝隙宽度的增大而降低, 在本试验条件下, 缝隙宽度为 1.5 mm 时的去水效率最低, 约为 0.3 左右; 随着缝隙宽度的继续增大, 去水效率急剧增大, 当缝隙宽度增大到 3.3 mm 时, 去水效率增大到 0.6 以上。缝隙去水效率的这种变化规律在缝隙角度分别为 60° 、 75° 和 90° 时也同样存在, 但对应缝隙去水效率最小值的缝隙宽度略有不同, 约在 1.5~2.0 mm 范围内变化。在试验过程中可以观察到, 当缝隙宽度为 1.0 mm 时, 缝隙进口处的水份呈连续膜状流动, 部分水份和气流被缝隙抽吸掉, 另一部分水份则越过缝隙向下游流动; 当缝隙宽度增大到 1.5~2.0 mm 时, 缝隙进口前端边缘处有较大水滴沿着缝

隙长度方向来回摆动, 类似于水膜在静叶出口边撕裂过程时的情况, 摆动的水滴经过很短时间脱离缝隙前端边缘, 越过去湿缝隙流向叶片下游的可能性很大, 这种现象在缝隙角度较大时(如 90°) 尤为严重。这种现象的存在不利于水膜的抽吸, 从而使缝隙去水效率下降; 当缝隙宽度继续增大(约大于 2.0 mm), 在缝隙进口前端边缘处同样产生直径较大的水滴, 但在抽吸压差的作用下, 宽度的作用已远大于摆动水珠带来的不利影响, 因而这些水滴被缝隙抽吸掉的可能性增大, 表现为去水效率的急剧增大。

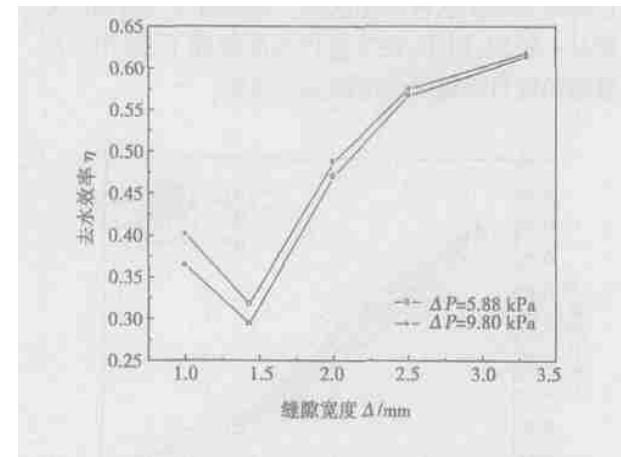


图 2 缝隙去水效率与缝隙宽度的关系曲线 ($U_e = 140 \text{ m/s}$; $G_L = 13.40 \text{ g/(m}\cdot\text{s)}$; $\alpha = 45^\circ$)

3.3 带过渡圆角的去湿缝隙

图 3(a)是在缝隙宽度为 1 mm、角度为 45° 并将缝隙进口前端边缘加工成带有半径为 1 mm 过渡圆角的情况下, 得到的缝隙去水效率与抽吸压差及水膜流量的试验曲线。图 3(b)给出了在同样几何尺寸但没有过渡圆角时的缝隙去水效率曲线。比较图 3(a)与图 3(b)的试验曲线, 可以看出, 带过渡圆角的缝隙去水效率大于没有过渡圆角的缝隙去水效率。在抽吸压差较大的条件下, 带过渡圆角的缝隙去水效率比没有过渡圆角的缝隙去水效率提高约 5%; 在抽吸压差较小的条件下, 去水效率提高的更多。另外, 从去水效率变化曲线还可以看出, 随着抽吸压差的增大, 缝隙去水效率增大; 当抽吸压差增大到约 10 kPa 时, 缝隙去水效率的增加趋于平缓, 试验曲线比较平坦; 当抽吸压差增大到约 17.64 kPa 时, 缝隙的去水效率随抽吸压差的增大而增加很小。

3.4 缝隙抽吸对流场的影响

缝隙抽吸不仅可以去除静叶表面上的部分流动水膜, 还将抽吸掉叶栅通道蒸汽流场中的部分蒸汽。

这样必然对叶栅内的蒸汽流动产生一定的影响, 进而影响蒸汽的流动效率并减少了做功的工质。因而衡量去湿缝隙结构的合理性, 需要考虑缝隙的去水效率和缝隙抽吸对蒸汽流场的影响两个方面的因素。

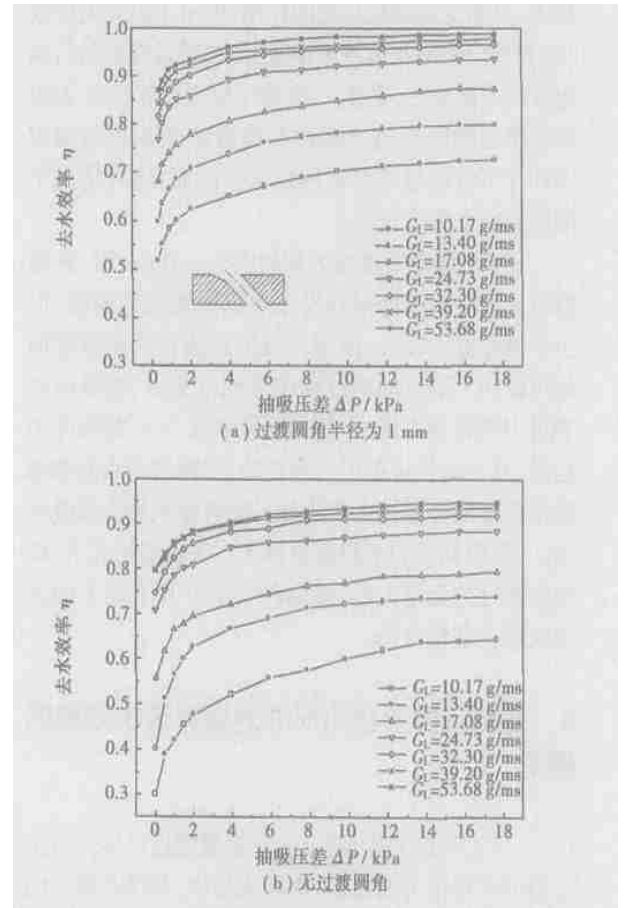


图 3 缝隙去水效率与抽吸压差的关系曲线 ($\Delta = 1 \text{ mm}$; $U_e = 80 \text{ m/s}$; $\alpha = 45^\circ$)

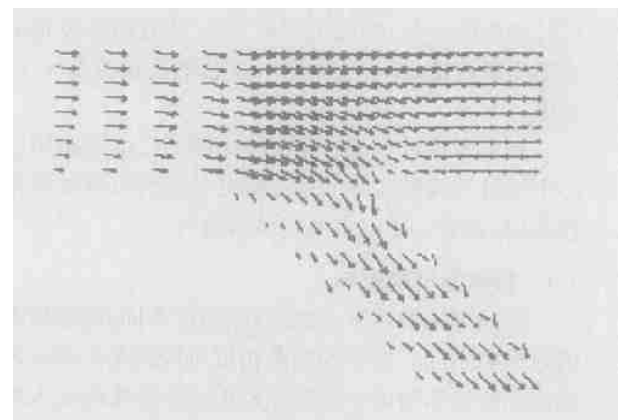


图 4 缝隙抽吸对蒸汽流场的影响

缝隙抽吸对叶栅通道内蒸汽流场影响的大小和范围与许多参数有关。图 4 是在主汽流速度 $U_e = 80 \text{ m/s}$ 、抽吸压差 $\Delta p = 3.0 \text{ kPa}$ 、缝隙宽度 $\Delta = 1 \text{ mm}$ 和缝隙角度 $\alpha = 45^\circ$ 的条件下计算的缝隙抽吸对蒸汽流场的影响。各种计算结果表明: 缝隙抽吸压差对蒸汽流场的影响最大, 如果抽吸压差偏小, 虽然流场的影响小, 但缝隙的去水效率也小, 达不到开设去湿缝隙的目的; 如果抽吸压差太大, 则缝隙抽吸掉的蒸汽量大, 对蒸汽流场的影响也大, 而且缝隙的去水效率增大也不显著, 图 3 中的去水效率曲线明显地表明了这种变化规律; 显然, 存在一个合理的抽吸压差, 在该压差的作用下缝隙抽吸正好将静叶表面上的气流边界层完全抽吸掉, 对蒸汽主流场的影响也小, 而且去水效率也高。

缝隙角度对蒸汽流动也有一定的影响, 蒸汽在流经小角度的缝隙时, 蒸汽流动方向变化较小, 可以比较自然地流入缝隙内, 气流在缝隙进口前端边缘产生的涡流范围小, 蒸汽抽吸量也小, 相应的对主流场的影响也小。因此, 采用小的缝隙角度不但可以提高缝隙的去水效率, 而且还减小对叶栅通道内的主流场的影响。

缝隙宽度对蒸汽流场的影响主要表现在影响范围上, 在其它条件相同的情况下, 缝隙的宽度越大, 缝隙流通面积也越大, 抽吸掉的蒸汽量也多, 且在缝隙进口前端边缘产生的涡流范围大, 必然对叶栅通道内的主汽流流场产生较大的影响, 降低叶栅通道内的流动效率, 不利于汽轮机级效率的提高。

4 去湿缝隙的设计原则

根据前面的分析和试验结果, 可以看出, 小的缝隙角度可以提高缝隙的去水效率, 并减小对叶栅通道内蒸汽流场的影响; 缝隙的去水效率并不是简单的随着缝隙宽度的增大而增大。缝隙宽度在约为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ 时的去水效率较低; 当缝隙宽度大于约 2.0 mm 时, 去水效率增大很快。将缝隙进口前边缘加工成一个过渡圆角, 在合理的抽吸压差下可以将缝隙的去水效率提高 5% 以上。

在汽轮机空心静叶去湿缝隙的结构设计时, 应遵循以下基本设计原则:

(1) 综合考虑缝隙的去水效率和缝隙抽吸对蒸汽流场的影响, 设计的缝隙结构既要保证缝隙有较高的去水效率, 又保证对叶栅通道内蒸汽流场的影响小;

(2) 在生产工艺许可的前提下, 应采用不大于 45° 的缝隙角度;

(3) 在满足静叶强度和刚度的前提下, 缝隙宽度的选取既要避开对应去水效率最低时的缝隙宽度, 也不必太大, 宽度为 $2.5 \sim 3.5 \text{ mm}$ 比较合理;

(4) 将缝隙进口前端边缘加工成过渡圆角, 将有利于提高缝隙的去水效率。

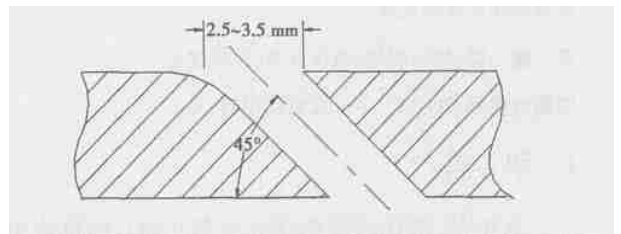


图 5 合理的去湿缝隙形状和尺寸

(5) 在空心静叶去湿缝隙的设计时, 要综合考虑缝隙的加工工艺、静叶的强度和刚度以及缝隙的去水效率和缝隙对蒸汽流场的影响。建议选取缝隙角度不大于 45° , 宽度以 $2.5 \sim 3.5 \text{ mm}$ 为宜, 并将缝隙进口处加工成圆角。

根据缝隙设计的基本原则以及试验结果, 合理的去湿缝隙结构如图 5 所示。

参考文献:

- [1] MOORE M J, SIEVERDING C. H. 透平和分离器中双相流[M]. 蔡颐年, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [2] 俞茂铮, 黄跃. 汽轮机末级隔板中的水份沉积规律及去湿方法[J]. 汽轮机技术, 1988(5): 44-50.
- [3] 姚秀平. 核电 600 MW 汽轮机末级空心静叶去湿缝隙设计研究[J]. 动力工程, 1998 18(4): 7-14.
- [4] 王新军. 汽轮机空心静叶去湿缝隙研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1999.

non-uniform distribution of parameters. A pair of spiral vortex with an opposite direction of rotation was formed in a plenum. The results of calculation were compared with those of experiments. **Key words:** numerical simulation, flow field, steam extraction opening, steam turbine

汽轮机空心静叶去湿缝隙结构的研究 = **A Study of the Moisture-removal Slot Structure in the Hollow Stationary Blades of a Steam Turbine** [刊, 汉] / WANG Xin-jun, GAO Tie-yu, XU Ting-xiang (National Key Laboratory on Multi-phase Flows in Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 14 ~ 17

On a test rig of air and water-film two-phase flows an experimental research was conducted of the relationship between the geometric shapes and dimensions of a moisture removal slot on the one hand and the moisture removal efficiency of the slot on the other. As a result, obtained were the correlation curves of slot angles, widths and moisture removal efficiency. An analysis was performed of the suction process and mechanism of the moisture removal slot in a hollow stationary blade and the impact of the slot suction on the main flow field in a cascade passage discussed. The results of the analysis show that a small slot angle can enhance the moisture removal efficiency of the slot and there exists a range of slot widths, which contribute to a relatively low efficiency of moisture removal. Under the present test conditions the slot width associated with a relatively low efficiency of moisture removal is found to be 1.0 - 1.5 mm. Moreover, when the front-end edge of the slot inlet is machined to form a transition round angle with a 1 mm radius, it is possible to enhance the moisture removal efficiency of the slot by more than 5%. On this basis proposed are the basic design principle of a moisture removal slot and rational slot structure shape and dimensions for the hollow stationary blades. **Key words:** hollow stationary blade, moisture removal slot, structural design

焦炭流化床燃烧条件下氧化亚氮生成过程的实验研究 = **Experimental Investigation of Nitrous Oxide Formation During the Combustion of Coke in a Fluidized Bed** [刊, 汉] / REN Wei, LU Jun-fu, ZHANG Jian-sheng, et al (Department of Thermal engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 18 ~ 21

On the test rig of a small-sized fluidized bed an experimental research was conducted of the formation of nitrous oxide during the combustion of anthracite coke. It has been found that the oxidation reaction of HCN during the combustion of the coke represents an avenue of conversion of coke nitrogen to N_2O . At the same time the multi-phase reaction of NO and coke surface is also a kind of generation path of N_2O . The separation-out of HCN is a result of the further devolatilization during the combustion of coke. On completion of the coke devolatilization process N_2O has originated from the gas-solid multi-phase reaction of NO and coke surface. **Key words:** coke combustion, nitrous oxide, formation path

压电陶瓷激励影响燃气燃烧器性能的实验研究 = **Experimental Study of the Impact of Piezoelectric Ceramics Excitation on the Performance of a Gas Combustor** [刊, 汉] / ZHAO Hong, YANG Zhi-guo, LOU Hui-juan (Energy and Power Engineering Institute under the Beijing Astronautics and Aeronautics University, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(1). — 22 ~ 26

By using a hot wire anemometer and a TESTO 360 gas analyzer measurements were taken respectively of the cold and hot-state conditions of a gas combustor under the excitation of piezoelectric ceramics. Investigated mainly was the impact of piezoelectric-ceramic excitation frequency and amplitude magnitude on the velocity field of a mixing-dilution zone, the NO_x generation rate at the combustor outlet and the distribution of temperature. Test results indicate that the piezoelectric-ceramic excitation of various frequencies has a definite effect on the flow of combustion-assisting air and the mixing-