后加载和高负荷前加载叶型气动性能的试验研究

孙奇[1]，李军[2]，孔祥林[1]，江生科[1]，王建录[1]，丰镇平[2]
（1. 东方汽轮机厂产品开发处，618001，德阳； 2. 西安交通大学叶轮机械研究所，710049，西安）

摘要：采用平面叶栅和环形叶栅吹风试验对后加载和高负荷前加载叶型的气动性能进行了详细的测量和研究.在平面叶栅吹风试验中，测量了2种叶型的压力系数分布，研究了攻角、相对栅距、安装角和马赫数的变化对叶型能量损失系数的影响规律.在环形叶栅吹风试验中，测量了2种叶型的近叶顶、中叶高和近叶根处的压力系数分布以及能量损失系数沿叶高的变化规律.对后加载和高负荷前加载叶型的三维成型规律进行了讨论.试验结果表明：高负荷前加载叶型相对于后加载叶型具有更大的负荷特性；高负荷前加载叶型在采用较大的切向弯曲后可以抑制二次流的发展和减少二次流损失；前加载叶型和后加载叶型均具有优良的气动性能.研究结果对于拓宽高性能叶型在汽轮机中的应用提供了理论基础和技术支持.

关键词：后加载叶型；前加载叶型；气动性能；试验研究
中图分类号：TK262 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-987X(2007)01-0023-05

Experimental Investigations on the Aerodynamic Performance of the Aft-Loaded and Fore-Loaded Turbine Cascades

Sun Qi[1], Li Jun[2], Kong Xianglin[1], Jiang Shengke[1], Wang Jianlu[1], Feng Zhenping[2]
(1. Design & Research Department, Dongfang Steam Turbine Works, Deyang 618001, China;
2. Institute of Turbomachinery, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, China)

Abstract: The aerodynamic performance of the aft-loaded and fore-loaded turbine blade was investigated using the linear and annular turbine cascades experiments. The linear cascade experimental rig was utilized to measure the pressure distribution along the aft-loaded and fore-loaded turbine blade. Moreover, the effects of the variations of the cascade pitch, stagger angle, attack angle and Mach number on the efficiency of aft-loaded and fore-loaded turbine blade were examined. The annular cascade experimental rig was applied to measure the pressure distribution along the aft-loaded and fore-loaded turbine blade at the near tip, mid-span and near hub three typical blade heights. The energy loss coefficients distribution along the blade height was also measured for both the aft-loaded and fore-loaded blades. Further, the effects of the three-dimensional curved stacking method on the cascade performance were discussed according to the annular experimental results. The results show that the larger circumferential bowed blade can be able to suppress the secondary flow loss and improve the aerodynamic performance for the fore-loaded turbine blade. In addition, the load of the fore-loaded blade was higher than that of the aft-loaded blade.

Keywords: aft-loaded airfoil; fore-loaded airfoil; aerodynamic performance; experimental investigation

---

收稿日期：2006-06-08. 作者简介：孙奇(1969～)，男，高级工程师；李军(联系人)，男，副教授. 基金项目：国家自然科学基金资助项目(50506023).

随着汽轮机行业竞争日益加剧，提高机组效率、降低成本成为汽轮机制造商所追求的目标之一. 提高汽轮机效率的关键技术之一是提高汽轮机通流部分的效率，透平级是汽轮机通流部分的基本工作单元，透平级内损失约占汽轮机内部损失的60%～70%，而叶型损失和二次流损失约占透平级损失的60%～70%. 因此，研发高性能叶型，减少叶型损失和二次流损失，提高机组效率，具有极其重要的工程应用价值和学术研究意义.

在汽轮机中，应用的后加载以及新近研发的高负荷前加载叶栅气动性能的研究得到了制造商的重视[1-7]. 文献[1]研究了一种高负荷前加载叶型，试验验证了高负荷前加载叶型的能量损失系数较后加载叶型低. 后加载叶栅是依据减小叶栅二次流损失的机理研发的一种型线. 文献[2]对后加载叶栅进行了详细的研究. 文献[3]对后加载叶栅进行了详细的环形叶栅试验和数值模拟[3]. 高负荷前加载叶栅由于具有大的折转角和较高的出口马赫数而具有高负荷的特性，因此在航空透平中应用广泛. 由于高负荷叶片的应用，在效率不降低的情况下可以减少叶片数目，进而降低制造成本[4]. 前加载叶型的前部具有较大的负荷，势必造成二次流过早生成而降低流动效率[5-6]. 因此，进行后加载和高负荷前加载叶型气动性能的研究，探讨分析高负荷前加载叶型的三维成型规律和应用范围，进一步提高高性能叶型的气动性能而进行的改进设计、提供理论依据和技术支持的研究工作显得非常必要.

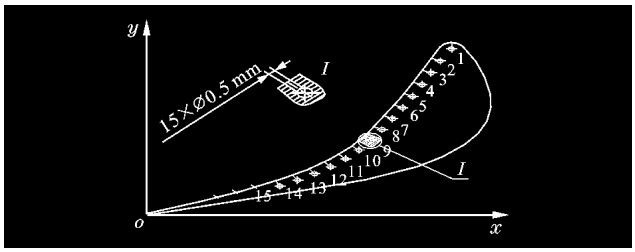
本文采用平面叶栅吹风试验研究了后加载和高负荷前加载叶栅的二维气动性能，试验测量了2种叶型的压力系数分布，研究了能量损失系数与攻角、相对栅距和马赫数之间的变化规律. 同时，采用环形叶栅吹风试验研究了2种叶型不同三维型线的气动性能. 测量了2种叶型近叶顶、中叶高和近叶根处的压力系数分布以及能量损失系数沿叶高的变化. 分析总结了后加载和高负荷前加载叶型的气动性能和适用范围.

1 平面叶栅试验

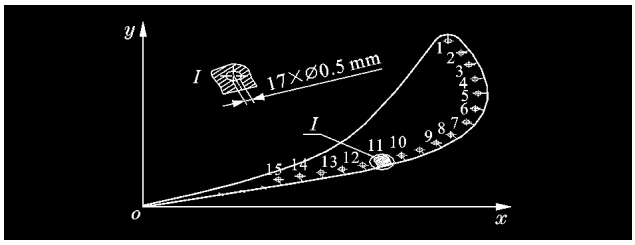
本文分别对2种后加载和2种高负荷前加载叶型在平面叶栅试验风洞上进行了设计工况、变栅距、变安装角和变攻角的气动性能研究. 图1给出了后加载和高负荷前加载叶型的型线和压力测孔布置. 表1给出了2种叶型的几何参数. 试验是在东方汽轮机厂平面叶栅风洞试验台上进行的，除变马赫数试验外，所有工况试验马赫数约为0.34，试验雷诺数约为5×10^5. 变马赫数试验中最高马赫数为0.7，试验雷诺数约为1×10^6.

表1 试验叶型的几何参数

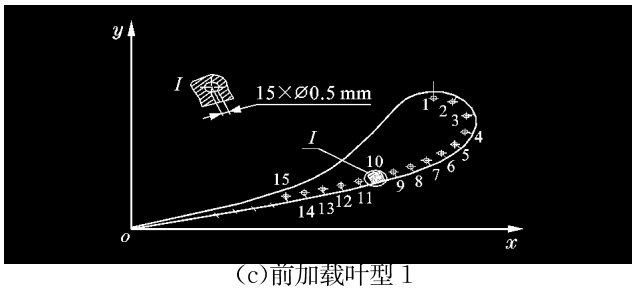
叶型	几何进气角 β_{1g}/(°)	安装角 β_y/(°)	相对栅距 $\bar{t}=t/b$	理论出气角 α_{1g}/(°)
前加载叶型	90	33.476	0.798	15
后加载叶型	90	42.422	0.685	15



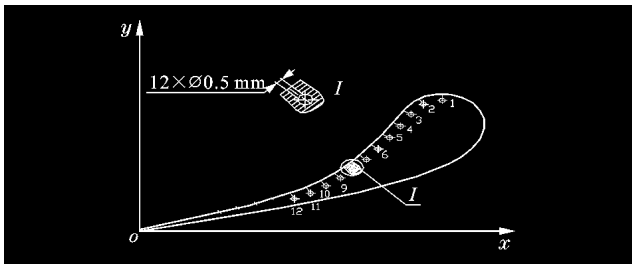
(a)后加载叶型1



(b)后加载叶型2



(c)前加载叶型1



(d)前加载叶型2

Ⅰ处放大倍数为5；1～15为测压孔编号

图1 试验叶型及测压孔布置图

采用总压方向复合测针测量栅前栅后总压和方向压差，压力和压差信号通过压力传感器、数据采集卡转换成数字信号，并通过自行编制的“控制测试及数据处理”程序进行数据处理，并实时显示压力、压差和总压损失系数、能量损失系数ξ、气流出气角

等，实时绘制出气角、损失系数随栅距的变化曲线. 主步进电机沿栅距方向每隔 1 mm 测量 1 个点，每个工况至少测量 2 个栅距，如果 2 个栅距的损失系数偏差超过 0.3%，出气角偏差超过 0.3°，则进行第 3 个栅距的测量[5]. 其中压力系数和能量损失系数的计算方法参见文献[7]，本文所示图中的能量损失系数均进行了归一化处理.

试验件采用钢制叶片，将 2 只测量表面静压的叶片在其吸力面和压力面的中间截面上分别打有 15～18 个∅0.5 mm 的静压孔，因为出气边非常薄，在加工过程中尽可能将测压孔布置得靠近出气边处，尤其是在吸力面，以反映此处的逆压梯度.

从图 2($\overline{B}$ 为量纲一的弦长)可看出，前加载与后加载叶型的压力面压力系数 c_p 分布几乎重合. 前加载叶型吸力面上的压力系数在进口段下降很快，呈典型的前加载特性，而且压力下降后，在以后的弧段上就几乎保持不变，也几乎没有扩压存在，叶片的负荷也明显比后加载叶型大. 图 2 也验证了前加载叶型的设计思想，即增大叶片负荷，减少叶片只数，降低制造成本，而且叶型损失非常小.

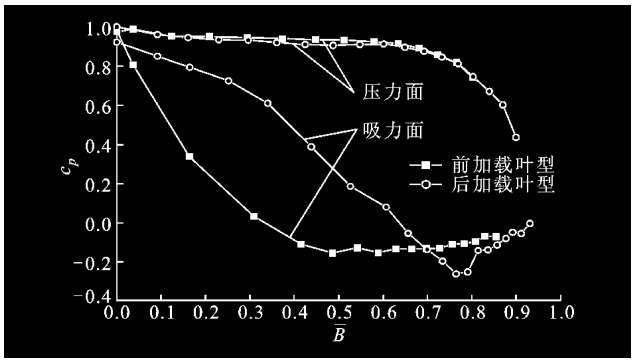


图 2　叶型表面压力系数分布

从图 3 可以看出，2 种叶型对攻角的变化都不敏感，尤其是前加载叶型的头部为较大的圆弧形，在±20°攻角范围内，能量损失系数 ξ 几乎不变. 后加载叶型的能量损失系数随攻角的变化也很小，只是在−15°攻角以后损失增加较多. 总的说来，前加载叶型在各种攻角下的叶型损失系数都较后加载叶型略低.

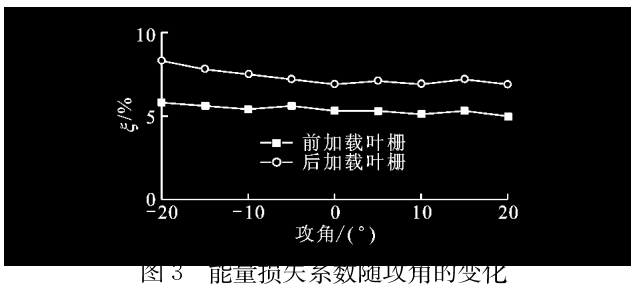
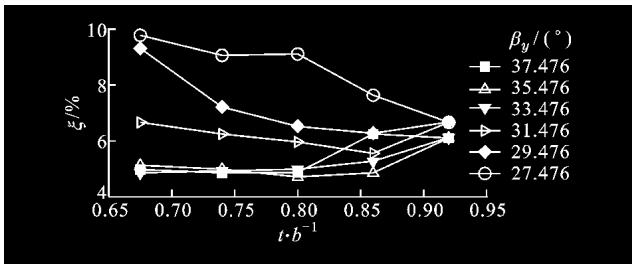
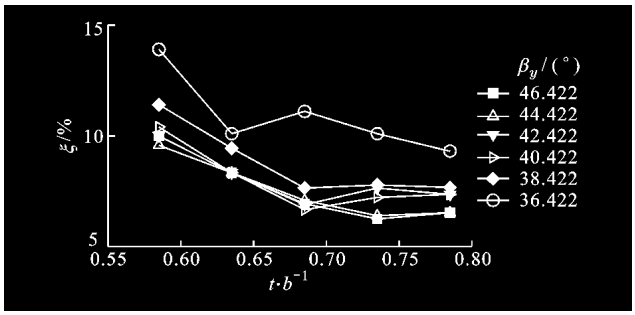


图 3　能量损失系数随攻角的变化

从图 4a(图中 t 为栅距；b 为弦长)可看出，除安装角较设计值减小 6°和减小 4°、且小栅距下的能量损失系数较大外，其余安装角下前加载叶型能量损失系数都不大. 相对于设计值，减小栅距和增大栅距能量损失系数都要增大，该叶型的最佳相对栅距在 0.75～0.85 之间，最佳安装角为设计安装角(±4°). 图 4b 给出了后加载叶型不同安装角下能量损失系数随相对栅距的变化. 后加载叶型在所有安装角下能量损失系数都随着相对栅距的增大而减小，该叶型的最佳相对栅距应在 0.65～0.85 之间，并且安装角减小 6°以后，损失系数增加较多，该叶型的最佳安装角为设计安装角(±4°).



(a)前加载叶型



(b)后加载叶型

图 4　不同安装角下能量损失系数随相对栅距的变化

从图 5 可看出，2 种叶型在出口等熵马赫数 Ma 小于 0.6 时，前加载叶型的能量损失系数变化不大，在大于 0.6 时，前加载叶型的能量损失系数增加相对较多，后加载叶型的能量损失系数也增大，但幅度没有前加载叶型的大.

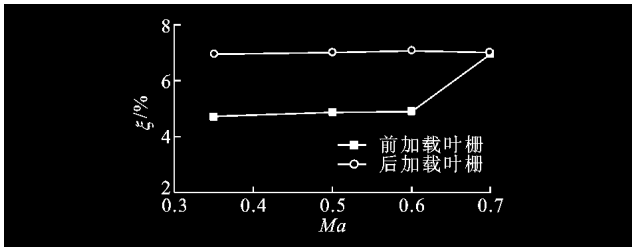


图 5　能量损失系数随马赫数的变化

2 环形叶栅试验

后加载和前加载叶型的环形叶栅试验采用不同的三维成型设计方法进行. 试验方案和参数如表2所示. 环形叶栅试验是在上海发电设备成套设计研究所的环形叶栅风洞上进行的. 弯曲叶片试验件的材料为环氧树脂,在出气边加入了钢片,以增大强度,避免出气边在试验时变形. 试验时栅前总压取风洞筒体的总压,栅后总压采用梳状总压测针测量. 梳状测针由5个总压测管构成,各相邻测管的间距为4 mm. 试验时测针感受孔距叶栅出口平面的轴向距离为10 mm,测针由坐标定位系统控制. 试验时测针沿环形叶栅周向和叶高方向测点的间距为1 mm或2 mm. 栅后根顶部端壁静压取一个栅距内的平均值.

图6给出了试验的前加载和后加载叶型三维实体图. 从图7和图8可以看出,2种叶栅的表面压力分布与平面叶栅试验结果类似,前加载叶型呈典型的前加载特性,叶片的负荷也明显比后加载叶型大. 前加载叶型增大了叶片负荷,减少了叶片只数,降低了制造成本,总损失也很小,经济性和适用性都很高. 从图7($\bar{L}$为相对叶高)可以看出,前加载叶型3个截面的压力面上静压分布相差不大. 弯曲叶栅根部吸力面静压升高,明显较中部截面高,压力面和吸力面压差明显减小,叶片负荷降低,这一方面是由于根部栅距较小的原因,另一方面是弯曲引起根部附面层压力升高所至. 顶部截面吸力面前半段的表面

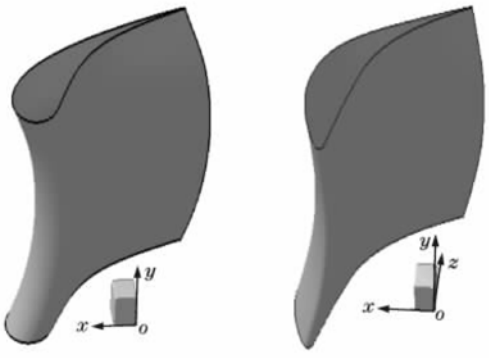


图6 前加载和后加载叶型三维示意图

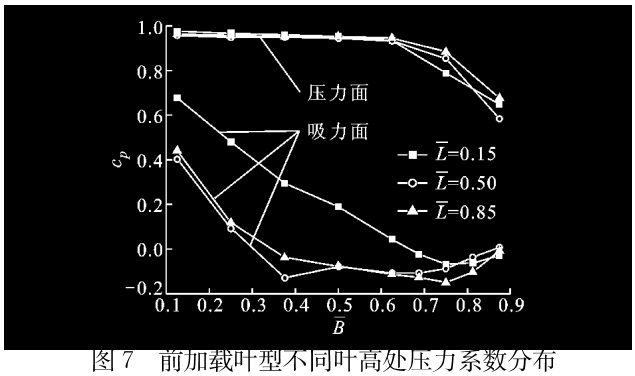


图7 前加载叶型不同叶高处压力系数分布

静压较中部高,这是由于弯曲引起的顶部附面层的压力升高,并抵消了由于栅距加大使吸力面附面层压力下降所致. 这样,沿叶高基本上形成了"C"形静压分布,这里相对叶高取值分别是0.15、0.5、0.85,如果根部截面的高度再往下降,顶部截面的高度再往上升,沿叶高的"C"形静压分布特征应更加明显.

从图8可看出,后加载叶型吸力面上的压力在进口段下降较慢,在吸力面的后半段下降较快,呈明显的后加载特性. 后加载叶型的最大气动负荷位置在汽道的下游方向,叶栅流道前段压力面与吸力面的压差减小,横向压力梯度减小,从而推迟了根、顶部端壁二次流的生成和发展,而且叶栅流道后半段因汽流膨胀加速,主流区的速度较高,减小了根、顶部附面层汽流的堆积,使二次流损失降低,这就是后加载叶型减小端部损失的机理.

图9给出了2种叶型的能量损失系数沿叶高的变化. 前加载叶型由于其前加载特性,在流道进口

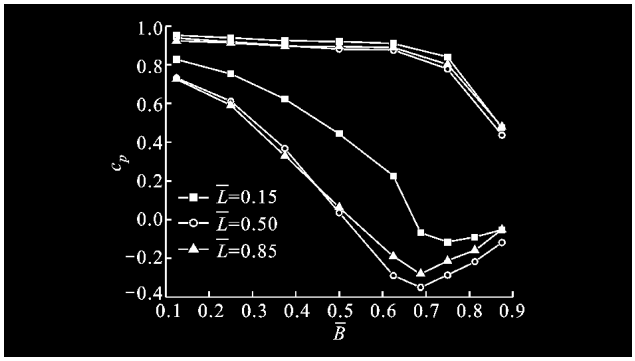


图8 后加载叶型不同叶高处压力系数分布

表2 试验方案及参数

叶型	内通道	外通道	叶高 L/mm	安装角 β_y/(°)	叶片数 Z	相对栅距 $t \cdot b^{-1}$			理论出口角 α_{1g}/(°)			Ma	$10^{-5} \times Re$
						根	中	顶	根	中	顶		
前加载	平	斜	82	33.761	68	0.767	0.803	0.840	15.015	15.377	15.763	0.37	8.97
后加载	平	斜	82	42.715	104	0.654	0.685	0.716	15.001	15.355	15.742	0.37	6.87

处内外弧的负荷就较大，如果采用与后加载叶型相同的三维成型规律，端部损失可能较后加载叶型大. 从图 9 可以看出，前加载叶型叶根、顶部的端部损失都较后加载叶型小，说明了前加载叶型通过对三维弯曲成型生成线的控制，减小了通道涡的强度，有效地抑制了端部二次流 . 从试验结果来看，前加载叶型采用的弯曲较好地抑制了端部二次流，也说明前加载叶型可通过较好的弯曲成型来减小由于其内外弧压差大而可能导致的横向二次流的加大，从本次试验结果也说明前加载叶型宜采用较大的弯曲量和较大的根、顶部正负倾斜角度.

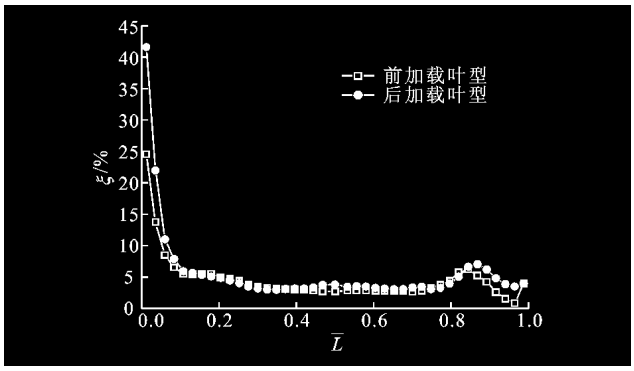


图 9　能量损失系数沿叶高的变化

3　结　论

采用平面叶栅和环形叶栅吹风试验技术，测量和研究了后加载叶型和高负荷前加载叶型的气动性能. 平面叶栅试验结果表明了后加载和前加载叶型均具有优良的设计工况和变工况的气动性能. 环形叶栅试验证明了对于前加载叶型宜采用弯曲量较大的设计方案，以抑制端部二次流. 平面叶栅和环形叶栅的试验结果均表明了前加载叶型相对于后加载叶型具有更大的负荷，并减少了叶片数目，降低了制造成本. 研究结果对于拓宽高性能叶型在汽轮机中的应用提供了理论基础和技术支持.

致谢　感谢上海发电设备成套设计研究所的危奇、史进渊、陈洪溪、张兆鹤和崔琦在环形叶栅试验中给予的帮助和支持.

参考文献：

[1] Hashimoto K, Kimura T. Preliminary study on forward loaded cascades designed with inverse method for low pressure turbine[C]//29th International Gas Turbine Conference and Exhibit. New York: ASME, 1984.

[2] 徐星仲，朱斌，蒋洪德，等. 一种“后部加载型”透平静叶设计[J]. 工程热物理学报，1997，18(1)：48-51.
Xu Xingzhong, Zhu Bin, Jiang Hongde, et al. Design of aft-loaded turbine blade[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(1): 48-51.

[3] 李卫华. 后加载叶栅气动特性的环形叶栅试验研究与数值模拟[D]. 西安：西安交通大学能源与动力工程学院，2004.

[4] Howell R J, Ramesh O N, Hodson H P, et al. High lift and aft-loaded profiles for low-pressure turbines [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123 (2): 181-188.

[5] Jouini D B M, Sjolander S A, Moustapha S H. Midspan flow-field measurements for two transonic linear turbine cascades at off-design conditions[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 176-186.

[6] Corriveau D, Sjolander S A. Influence of loading distribution on the performance of transonic high pressure turbine blades[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(2): 288-296.

[7] 孙奇. 前加载和后加载叶栅气动特性的试验和数值研究[D]. 西安：西安交通大学能源与动力工程学院，2005.

（编辑　王焕雪）

本刊实行开放阅读，浏览请到本刊网站

http://journal.xjtu.edu.cn/zrb/