

·学科进展·

涡轮叶栅端壁区的流动显示

董志锐 刘松龄

(西北工业大学,西安 710072)

[摘要] 在大尺寸低速开式叶栅传热风洞中对一种高压涡轮导向叶栅中的流场进行了流动显示实验研究。分别采用线簇和小球浮动法对5个雷诺数下的叶栅端壁区三维流场、叶片表面和端壁表面的流动进行了显示。实验结果表明:涡轮叶栅中有强烈的二次流动,并存在复杂的涡系;三维流动区约占叶栅通道的40%;雷诺数的增大将增强端壁区的三维流动。流场显示图片表明:叶片吸力面靠近端壁有角涡形成与发展,并存在一个三角形区域;流场显示的通道涡大小与流场测量结果吻合。实验结果可用于分析端壁表面和叶片表面换热特性的形成机理。

[关键词] 涡轮叶栅,叶栅端壁区,端壁区流动,涡轮叶片,流动显示

引言

涡轮叶栅端壁区的流动十分复杂,存在着马蹄涡、通道涡和角涡组成的涡系,呈现出强烈的三维性。该区域的流动损失比较大,流动形态对叶片近壁区和叶栅端壁表面的换热有直接而重要的影响。随着低展弦比、高载荷涡轮叶片的实用化,端壁三维流动区占整个叶栅通道的比例增大。因此,研究和掌握端壁区流动的规律和特点对组织端壁区气流结构、降低流动损失,以及安排端壁的有效冷却有十分重要的意义。参考文献[1—5]对不同几何结构叶型组成的涡轮直叶栅中的流场进行了实验研究,参考文献[6—8]采用不同的方法对叶栅中的流动进行了流场显示。

1 实验装置与条件

图1为实验所用的大尺寸低速开式传热风洞示意图,其主要性能参数为:实验段进口气流速度:3—23 m/s,雷诺数范围:40 000—300 000,实验紊流度可调范围:0.4%—15%,实验叶片及端壁可加热温度范围:0℃—50℃,实验段进口气流不均匀性:小于5%。F1和F2截面可用于加装紊流发生器。

图2为实验段平面示意图,为了便于观察和测量,整个实验段由有机玻璃制成。X和Z向如图所

示,Y向为叶高方向。顶板上在距叶栅通道进口225 mm(X向的零点)处开有3个测量孔,以便测量来流温度、速度和来流边界层的分布情况。实验直叶栅

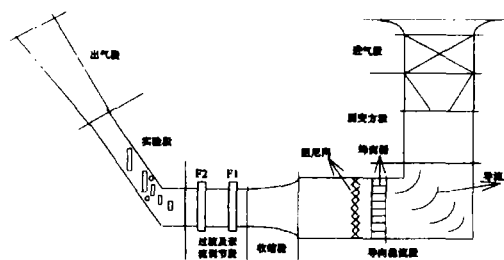


图1 大尺寸低速开式传热风洞示意图

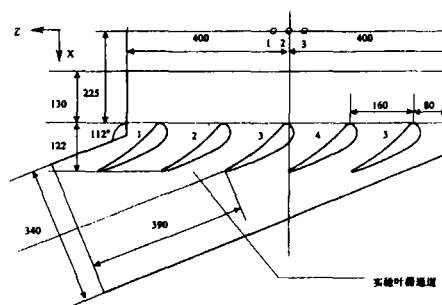


图2 实验段示意图

由5个叶片构成,测量通道位于2、3叶片之间。实验叶片型面坐标取自某发动机高压涡轮导向叶片。实验叶栅的主要几何参数为:有效出气角 68° ,叶片弦长205 mm,叶片轴向弦长122.1 mm,叶栅栅距160

本文于1999年6月14日收到。

mm, 叶片高度 300 mm。实验雷诺数定义为 $Re = V_{\infty} C / \nu$, 其中 V_{∞} 为来流速度, C 为叶片弦长, ν 为空气运动粘性系数。本文流场测量和显示的工况雷诺数分别为: 100 000、150 000、200 000、250 000 和 300 000。

2 流场显示结果及分析

为了摸清叶栅通道内复杂的流场, 我们在实验过程中分别采用线簇法和浮动小球法, 对叶栅通道流场作了显示, 并用 CCD 摄像机进行了记录, 记录总长度 2 小时 10 分, 可实现动态再现和分析。图 3、图 4、图 5 和图 7、图 8、图 9 是经计算机转换后的图片。

2.1 端壁表面流动显示

实验中在叶栅通道底面端壁上贴以黑底为背景的白色细棉线, 线长约 15 mm。在不同实验工况下观察细棉线的运动情况并由此观察气流在端壁表面上的运动情况(图 3)。显示结果发现: 在低雷诺数下, 叶片前缘前方 20 mm 范围内特别是叶片前缘附

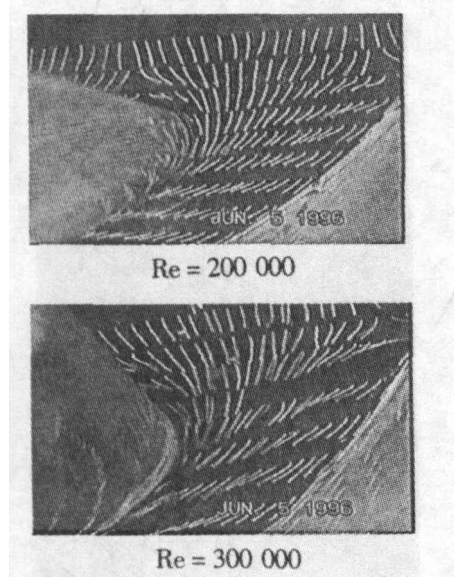


图 3 端壁流动显示

近气流有较大的偏转。在叶片驻点线前方以右(沿气流方向观察、下同)某处能明显看到气流发生了分离, 该处气流向后分离成 2 支: 一支流向压力面(设为 I), 为马蹄涡压力面分支; 另一支流向吸力面(设为 II), 为马蹄涡吸力面分支。气流进入叶栅后, I 逐渐远离压力面并向另一叶片的吸力面运动, 细棉线的运动在通道中形成了一条由压力面向吸力面运动的线迹带, 该带区中气流运动剧烈, 表现在细棉线摆动剧烈; 另一分支 II 向后发展更贴近吸力面, 与来

流方向夹角越来越小。随着雷诺数的提高, 马蹄涡分离点前移。在通道端壁表面, 几乎所有细棉线的排列都与通道方向有一较大偏角且均从压力面指向吸力面, 从叶栅前缘开始到后缘, 偏角逐渐增大, 反映了通道端壁边界层二次流从压力面到吸力面及从前缘至尾缘逐渐增强。在压力面根部除前缘处能观察到马蹄涡的存在外, 其余位置却很难发现有涡的运动; 而在吸力面根部位于叶栅通道中段位置却发现角涡的形成与发展, 分析其位置正好位于端壁上的局间低压力区内。从显示结果中还看到: 气流沿吸力面根部运动较剧烈, 而压力面根部则较为平静, 尤其是在 $S = 70$ mm (S 为吸力面从前缘驻点线起至某点的弧长) 附近的一小范围内气流运动相当强烈, 这是由于马蹄涡压力面分支和吸力面分支在该处交汇所致。各个实验工况下情况相似, 随雷诺数的提高, 上述现象表现更明显。

2.2 叶片表面流动显示

为观察通道中涡的影响高度, 实验中在叶身上贴以黑底为背景的白色细棉线, 考虑到风洞实验段上下对称, 因此贴线高度仅为叶片半高 150 mm。显示结果(图 4、图 5)表明: 在叶片前缘附近表面, 流动形态几乎不受来流雷诺数的影响, 气流贴壁从前向后加速流动, 反映出叶片头部附面层中的流动为二维流动。压力面在较低工况 ($Re \leq 150 000$) 下比较平静, 只是在其前缘靠近端壁附近的极小范围内发生不太强烈的旋转, 反映了压力面上的流动受端壁的影响较小, 基本保持二维流动特性。在高工况下 ($Re \geq 200 000$), 压力面上流场的二维流动特性依然



图 4 端壁流动显示

保持,但在压力面尾缘部,因受压力面与吸力面气流渗混的影响,气流波动性强,并涉及整个叶高。因此尾缘附近的流动具有三维性,并将使尾缘的换热表现出二维特色。相比之下,吸力面上流动受端壁影响较大,表现在吸力面上存在一个较明显的三角区,该区内气流运动剧烈,其起始位置位于 $S = 20 \text{ mm}$ 左

右的根部,往后发展其高度逐渐升高,至出口其高度在低速情况下达 40 mm 左右,在高速情况下,三角区域扩大,影响高度略有增大;仔细观察还发现:叶片后缘下部存在一个较小区域,该区气流运动微弱,几乎是“死区”状态,随着雷诺数的增大,“死区”范围缩小。

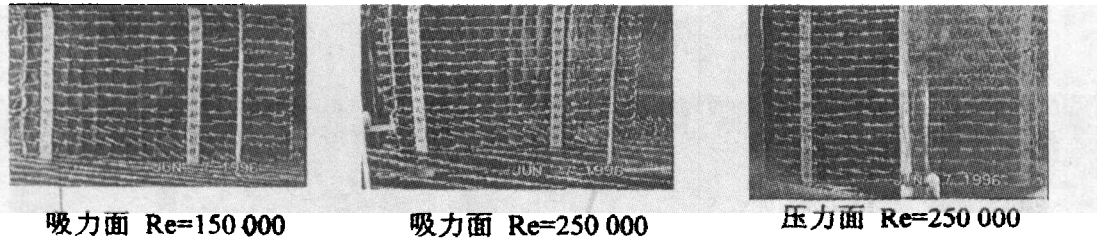


图 5 端壁流动显示

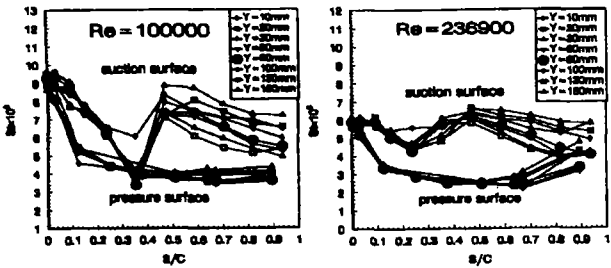


图 6 叶片表面 St 数的分布

叶片表面流动显示结果可以比较好的解释叶片表面的换热特性。图 6 是采用同样的叶型进行叶片表面换热系数测量后获得的斯坦顿数 St ($St = h / (\rho C_p V_\infty)$, h 为对流换热系数, ρ 为气流密度, C_p 为气体定压比热)在叶片表面上的分布规律。由图可以看出:(1)压力面 St 数的大小主要受来流 Re 数的影响,沿叶高的曲线叠合性较好,几乎不受端壁三维流动的影响,仅在高工况下 ($Re = 236\ 900$),由于尾缘气流的剧烈掺混,使得叶片尾缘中心区的 St 数有所增大,这与叶片压力面流动显示结果是统一的。(2)吸力面换热受通道内流动影响较大,吸力面表面边界层流动经历了层流区、过渡区到紊流区的全过程;随着 Re 数的增大,过渡区起点从 $Re = 100\ 000$ 时的 $S/C = 0.35$ 前移到 $Re = 236\ 900$ 时的 $S/C = 0.24$;(3)在紊流区(即叶栅的后部),沿叶高方向,当 $Y \geq 20 \text{ mm}$ 后, St 数沿 S 方向的变化曲线与其它曲线明显不同,由于靠近端壁,换热强度受端壁的影响增大,过渡区换热已不明显,在过渡区和紊流区内, $Y = 10 \text{ mm}$ 高度的换热强度高于 $Y = 20\text{—}100 \text{ mm}$ 范围内的换热强度,这说明在靠近端壁,由于角涡的影响,存在一个高换热区,随着 Y 的减小,换热强度会

进一步增大。在紊流区,从叶根到叶片中高区, St 经历了由大到小然后再增大的过程。叶片吸力面的换热特性显然与图 5 显示的三角区和图 9 显示的角涡有关。叶片表面流动显示结果可以比较好的解释叶片表面的换热特性。

2.3 通道流场显示

用线迹法显示仅能显示端壁和叶身上涡系的运动,而对于通道中的涡系尚不能加以显示。为观察涡系在通道中的运动,实验用一细绳系一直径为 10 mm 的泡沫塑料小圆球置于通道中,从它的运动来观察通道中涡系的运动与发展(图 7)。动态观察可以看出:将小球贴近端壁,由前缘向后缘逐渐移动,可以看到小球在初进入通道进口处于平衡状态,当其移动到 $S = 50 \text{ mm}$ 时小球开始逆时针翻转,向后发展,小球翻转更为剧烈,表明涡向后运动时逐步加强。在不同工况下,通道涡的结构相似,但随工况雷诺数的增大,涡的强度增大;在压力面 $S = 210 \text{ mm}$ 的通道出口,小球翻转最剧烈,一旦将小球移出出口后,其翻转剧烈程度大大衰减,表明通道出口下游涡系运动不明显。

用小球显示法也可以显示出在吸力面根部诱发的角涡(图 8)及马蹄涡的吸力面分支(图 9),当小球靠近吸力面根部时,小球随根部的涡在当地转动,转动方向为顺时针,与通道涡转动方向相反,若将小球移向通道中部,小球则显示出通道涡的运动与发展。

显示结果表明:在涡轮直叶栅通道中,涡系的活动局限于端壁附近约 60 mm 的范围内,即端壁三维流动区约占叶栅通道的 40% ,沿叶高中部 60% 叶栅通道中的气体流动基本上为二维流动。这与参考文

献[5]采用五孔针测量同一叶栅通道中的流场实验 结果相同。

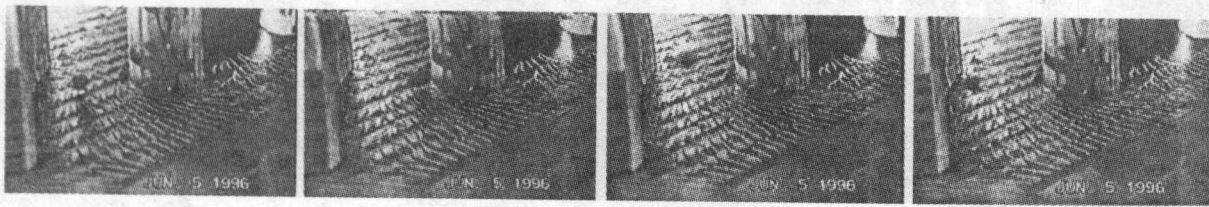


图7 浮动小球显示通道涡(前视) $Re = 100\ 000$

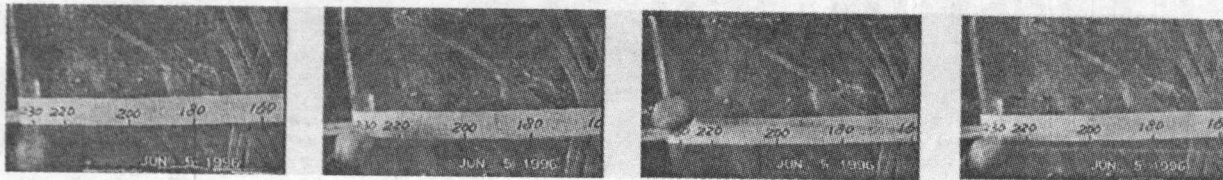


图8 马蹄涡吸力面分支 $Re = 100\ 000$

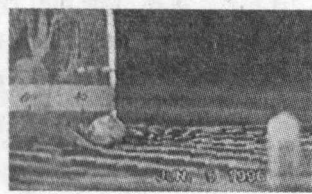


图9 浮动小球显示吸力面根部尾缘角涡 $Re = 100\ 000$

3 结论

通过以上对叶栅通道流场的显示,我们有以下结论:

(1)本文所采用的流动显示方法能动态地显示马蹄涡的压力面与吸力面分支,边界层二次流与马蹄涡压力面分支所形成的通道涡,以及吸力面根部的角涡。

(2)在压力面的根部并未发现角涡。

(3)压力面与吸力面之间的压差强化了马蹄涡压力面分支,并形成通道涡,同时将通道涡推向吸力面。

(4)研究表明:在吸力面的后部靠近根部由于受通道涡和马蹄涡吸力面分支上攀的影响,形成一个三角区,在该三角区域贴着吸力面的表面有向上的气流流动,但在上部并未反映出有向下的收敛流动,三角区以上仍保持二维流动特性。

(5)目前的显示结果表现出通道涡和马蹄涡吸力面分支沿吸力面的上攀运动,但尚难以区分这两支涡在吸力面上的运动。

(6)马蹄涡的两个分支以及通道涡与角涡的显示与三维流场测试结果一致,涡轮直叶栅通道中的三维流动区约占整个叶栅通道的40%。

(7)叶片表面的流动显示能够较好地解释叶片表面换热特性的形成规律。

参 考 文 献

- [1] Weiss A P, Fottner L. The Influence of Load Distribution on Secondary Flow in Straight Turbine Cascades, *Journal of Turbomachinery*, 1995, **117**:133—141.
- [2] Gallus H E et al. Endwall and Unsteady Flow Phenomena in an Axial Turbine Stage, *Journal of Turbomachinery*, 1995, **117**:562—570.
- [3] Gregory-Smith D G, Cleak J G E. Secondary Flow Measurements in a Turbine Cascade with High Inlet Turbulence, *Journal of Turbomachinery*, 1992, **114**:173—163.
- [4] Perdichizzi A, Dossena V. Incidence Angle and Pitch-Chord Effects on Secondary Flows Downstream of a Turbine Cascade, *ASME Paper 92-GT-184*.
- [5] 董志锐,刘松龄,张玉金等. 涡轮叶栅端壁区流动的试验研究,中国航空学会第十一届燃烧与传热质质学术讨论会论文集,CSAA 98-PC-026,1998.
- [6] Wang H P et al. Flow Visualization in a Linear Turbine Cascade of High Performance Turbine Blades, *Journal of Turbomachinery*, 1997, **119**:1—8.
- [7] Chung J T, Simon T W. Three-Dimensional Flow Near the Blade/End-wall Junction of a Gas Turbine: Visualization in a Large Scale Cascade Simulator, *ASME Paper 90-WA/HT-4*, 1990.
- [8] Russell L M, Hippensteele S A. Visualization Techniques to Experimentally Model Flow and Heat Transfer in Turbine and Aircraft Flow Passages, *NASA TM-4272*, 1991.

FLOW VISUALIZATION OF ENDWALL AREA IN TURBINE CASCADE

Dong Zhirui Liu Songling

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The flow field visualization of a straight HP turbine cascade is conducted in a large-scale low-speed open-loop cascade heat transfer wind tunnel. Three-dimensional flow fields near the endwall of the cascade, the flows over blade surfaces and endwall surface are visualized by using cotton thread and floating small ball. The experimental results show that there are strong secondary flow and a complex series of vortices in turbine cascade. The 3D-flow region occupies 40% flow passage of turbine cascade. The increasing of Re number will strengthen 3D-flow near endwall. The photos of flow visualization show that corner vortex generates and develops near the suction surface of blade/endwall junction, which forms a triangle region. The size of visualized passage vortex agrees well with measurement result. The results of this paper are useful to analyses and explain the heat transfer characteristics of the endwall and blade surfaces.

Key words turbine cascade, endwall of cascade, endwall flow, turbine blade, flow visualization

·资料·信息·

“长江三峡水轮发电机组关键技术基础性研究”成果丰硕

由国家自然科学基金委员会和机械工业技术发展基金会联合资助的重大项目“长江三峡水轮发电机组关键技术基础性研究”,经过14个研究单位200余位科研人员近5年的努力,取得了一批重要研究成果,于1999年6月30日在北京通过专家组验收。

该重大项目共分为5个课题,29个子课题。验收组专家听取课题负责人的报告后,经过认真评议,一致认为该项目按计划、较好地完成了课题的研究任务,取得了丰硕的研究成果,是国内产、学、研相结合进行基础研究的一次成功地尝试。

“三峡水轮机优化设计理论及试验研究”课题,在理论分析、数值计算、图形显示和试验研究方面取得了进展和突破,对发展和提高我国水轮机的设计理论和技术有重要意义和促进作用。

“三峡水轮发电机组动力响应分析及系统稳定性计算”研究,完成了一套可用于三峡及其他大型水轮发电机组动力响应及系统稳定性计算分析的软件系统,并在大型混流式水轮发电机组激振力、主轴系统支承边界条件、主轴系统动力特性及动力响应建模方法与求解技术、整机系统建模方法及高自由度系统动力学求解技术等4个方面有所创新。该软件在

核对从美国Voith公司进口水轮机设计报告时,发现并纠正了扭频和最大扭应力的计算错误,显示了其软件水平,得到国外同行的赞许。

“巨型推力轴承理论及性能研究”解决了巨型轴承性能计算和金属塑料瓦热粘弹流理论的难题,提出了巨型轴承热相似的试验准则,并通过试验证实塑料瓦面上存在的油膜滑移。课题组研制的金属塑料瓦的性能优于俄罗斯的同类产品。

“水轮机转轮制造工艺模拟及质量控制研究”在转轮用马氏体不锈钢焊接行为及材料匹配规律、大型变曲面构件电渣熔铸工艺模拟与优化、热模压成型工艺与叶片数控加工工艺优化等方面取得了进展,为三峡水轮机巨型叶片的铸造、焊接和数控加工提供了理论和技术储备。

“三峡水轮发电机组热变形与冷却技术”研究了发电机组的电磁损耗、冷却变形、热变形和热应力分析计算及测试技术,为发电机组的结构改进以及在消除危害发电机安全运行的局部过热和热变形方面为发电机的设计提供了理论依据。有关成果已在五强溪、小浪底等工程中得到应用。

(工程与材料科学部 雷源忠 供稿)