

端壁造型在叶轮机械中的应用与发展

卢家玲¹, 楚武利¹, 朱俊强², 刘志伟¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072; 2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 对一项新的设计技术—端壁造型技术的发展历史进行了回顾。端壁造型技术可以降低端壁区二次流损失, 其提高效率的作用已经在涡轮中得到了广泛的验证, 相关结论可以直接被工程采用。端壁造型技术在压气机中的研究虽晚于其在涡轮中的研究, 但最新研究表明: 端壁造型在改变跨音压气机激波结构, 改善压气机稳定工作裕度, 以及降低静叶角区分离等领域能够发挥一定作用。端壁造型技术反应了人们利用复杂型面来提高叶轮机械性能的研究趋势, 值得研究者在未来开展更深入的研究。

关键词: 端壁造型; 叶轮机械; 涡轮; 压气机

中图分类号: TK474.7

文献标识码: A

引 言

不同于叶轮机械中传统的端壁设计, 端壁造型技术引入了沿周向(非轴对称)和流向(轴对称)的凸凹设计, 这种设计概念首先出现在涡轮部件中。虽然其起源可以追溯至 20 世纪 80 年代^[1~2], 但利用端壁造型来降低涡轮中二次流损失的正面效果却直到 20 世纪 90 年代^[3~4] 才被找到, 而其真正引起工业界的注意, 并得到迅速发展则只是过去 10 年的事情, 在最近的 3~5 年尤其呈激增之势。涉入研究的机构有: Rolls-

Royce、MTU、Pratt & Whitney、Honeywell、剑桥大学和英国 Durham 大学等世界上最富盛誉的公司和学府。国内相关院校, 如中国科学院工程热物理研究所、清华大学和西北工业大学等也已敏感地注意到了该研究的发展趋势, 并纷纷启动了相关课题。以上趋势说明端壁造型技术在叶轮机械设计领域具有相当值得关注的潜力。本研究对端壁造型技术的发展做了较系统的回顾, 并结合国内外最新研究成果, 提出对该技术发展方向和应用前景的预测。

1 端壁造型技术的发展历史

如前所述, 端壁造型从造型的种类上可分为轴对称和非轴对称两大类。在以旋转为主要特征的叶轮机械中, 两类造型的适用范围和作用各有不同。

1.1 非轴对称端壁造型技术的发展历史

端壁造型首先发展于非轴对称造型概念。其用意为利用叶片通道内沿周向, 即叶片吸力面与压力面方向的压差来调整涡轮叶片通道内的二次流动。英国的 Durham 大学和 Rolls-Royce 公司在这方面做出了先驱性的、系统的研究。在过去 10 年里, 人们利

用 Durham 大学的大型低速线性涡轮叶栅先后进行了两代非轴对称轮毂造型的研究, 如图 1 和图 2 所示。两代造型轮毂的主要差别在于它们的处理范围上: 第一代造型的处理范围延伸至叶片上、下游; 而第二代造型的范围限于叶片通道内。试验和 CFD 模拟结果表明^[5~7]: 非轴对称端壁造型有效降低了压力面与吸力面间的压力梯度, 使得二次流减弱, 近壁区和叶片吸力面附面层的剪切流动减弱, 最终导致了叶栅流动损失的降低。两代非轴对称轮毂造型都能够使叶片通道后部(71%轴向弦长以后)的流动损失大大减小。由于减弱了尾缘的掺混损失, 第二代造型的效果好于第一代, 流道内二次流损失降低了 24%。

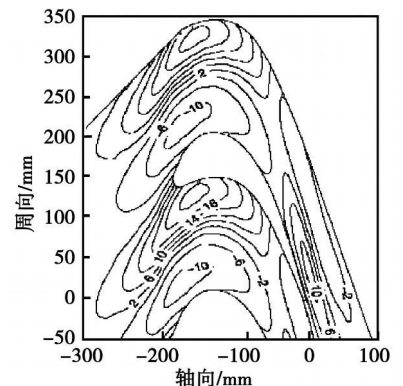


图 1 Durham 叶栅第一代非轴对称轮毂造型^[7]

收稿日期: 2008-12-29; 修订日期: 2009-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50506026); 航空基金资助项目(2007ZB53021)

作者简介: 卢家玲(1973-), 女, 河北献县人, 西北工业大学博士研究生。

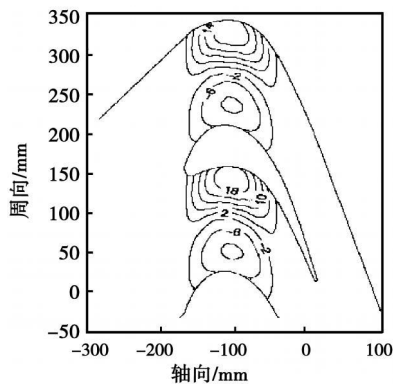


图 2 Durham 叶栅第二代非轴对称轮毂造型^[7]

非轴对称端壁造型的效果在叶栅试验中取得了验证之后, Rolls-Royce 公司将这项技术加入到 Trent500 高压涡轮 (HPT) 和中介涡轮 (IPT) 设计中^[8~10]。部件试验结果表明: 非轴对称端壁造型使高压涡轮级效率在设计状态下增加了 0.59%; 使中介涡轮级效率在设计状态下增加了 0.9%。同时也表明了在该环境下应用非轴对称端壁造型技术的可行性。

此后几年中, 非轴对称端壁造型技术在涡轮部件上的正面效果在不同类型的涡轮上不断被验证^[11~13], 同时其在涡轮传热方面的优势也被一些学者确认^[14~15]。自此, 非轴对称端壁造型技术作为提高涡轮工作效率的一种新的、有力的设计手段的地位得到了确认。

关于非轴对称端壁造型在涡轮中的应用研究, 特别值得一提的是, Torre 等人在 2006 年的研究成果^[16]。在此之前, 研究者都把注意力集中在利用端壁造型来控制流道内横向压差, 造型面基本位于通道内, 以及通道后部。Torre 等人的研究表明, 通道内二次流的强弱还受到马蹄涡的强烈影响, 因此他们在一低速叶栅上设计位于叶片前缘的非轴对称轮

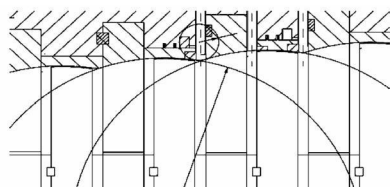


图 3 涡轮轴对称机匣设计^[19]

毂造型, 其目的在于改变马蹄涡左、右支的分布, 进而削弱通道内二次流。试验及数值模拟验证这种设计的正确性: 通道内二次流动能减少了 72%, 近壁区掺混损失减少了 20%。Torre 等人的研究加深了人们对端壁区二次流成因的认识, 同时拓宽了非轴对称端壁造型在涡轮中的应用范围。

分析非轴对称端壁造型在压气机部件的应用得知: 由于压气机特有的逆压环境, 这项技术在压气机中的实施相比较于涡轮而言要复杂得多。目前其研究仅处于探索阶段, 在端壁造型技术的应用一节中, 我们将结合其初步研究结果给出详细的介绍。

1.2 轴对称端壁造型技术的发展历史

轴对称端壁造型在叶轮机械中相对较易实现, 在涡轮和压气机中均有发展。

1.2.1 轴对称端壁造型技术在涡轮中的发展

德国 Aachen 工大以一台 4 级涡轮为原型, 进行了一系列富有成效的研究^[17~19]。他们研究的造型结构如图 3 所示, 机匣采用所谓偏心圆弧设计 (off-set arc), 在级与级之间流道面积达到最小。这样的设计可以使叶片前缘气流减速, 驻点移向吸力面侧; 同时使得转子叶片更趋近于后加载叶片, 即叶顶泄露涡的发生推迟, 最终导致叶顶区域二次流减弱。试验表明, 通过轴对称机匣造型, 该涡轮多变效率提高

了近 1%, 同时出口流场变得更加均匀。

1.2.2 轴对称端壁造型技术在压气机中的发展

虽然轴对称端壁造型的概念在压气机中提出的比较早 (可追溯到 1980 年), 但多限于概念性描述。以美国注册专利为例, 一系列关于轴流压气机轴对称端壁造型的专利给出了多种类型的轮毂设计^[20~22]。这些设计理念多基于早期的理论分析, 缺乏试验或数值模拟的验证。直至 2002 年, MUT 的 Horger 等人才在高速跨音叶栅上测试了形如图 4 的轴对称轮毂^[23], 测试结果显示这种凹型轮毂使得流道内斜激波转变为正激波, 同时激波位置提前。提前的激波减弱了叶根的叶型附面层, 使得近壁区的总压损失系数降低了约 30%。

2 端壁造型的设计方法

在对端壁造型技术的发展历史进行了回顾后, 有必要总结一下较成熟的端壁造型设计方法。现有的端壁造型方法大体可分为两类:

第一类是采用优化的方法^[24], 将造型的端壁区域首先离散成若干控制点, 这些控制点的坐标在造型优化过程中允许在一定范围内变动, 寻优过程与 $N-S$ 方程的求解过程循环嵌套, 通过设定合理的优化目标最终确定新的控制点坐标。这种方法可以在对端壁复杂

流动不能完全了解的情况下, 借助

数学方法找到符合流场的最优结构, 其缺点是对计算资源要求较高

和设计时间较长。

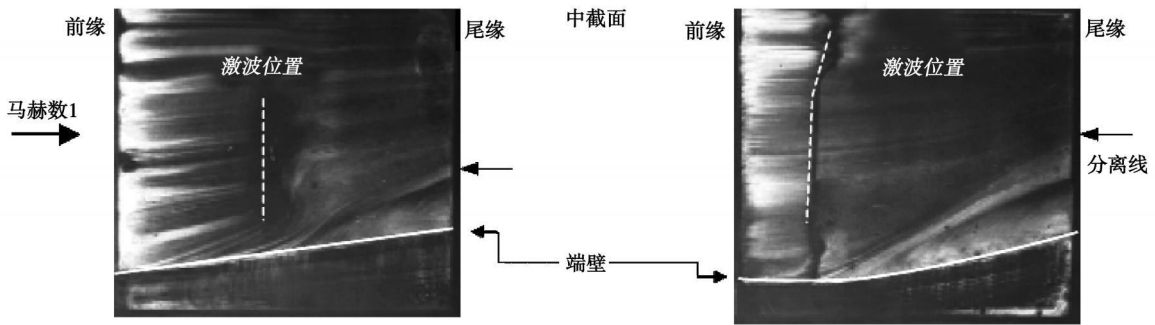


图 4 跨音压气机叶栅轴对称轮毂设计对激波的影响^[23]

第二类方法是结合给定物理流场, 在较好地掌握端壁区气动特点的基础上选择适当的几何控制方程来生成所需的造型结构^[25]。毋庸置疑, 该方法是设计者对流场的理解和把握要求较高, 但其优点是设计时间短, 对预期设计目标的修正性好。

以上两类方法各有千秋, 设计时可按工程实际情况选择适合的设计方法。

3 端壁造型技术在叶轮

机械中的应用前景

对于端壁造型技术在叶轮机械中的应用前景, 针对各部件来讨论更具有实际意义。以下分别对叶轮机械的两大旋转部件—涡轮和压气机进行讨论。

3.1 在涡轮部件中的应用

通过 1.1 节和 1.2.1 节的介绍可知: 无论是非轴对称端壁造型和轴对称端壁造型都在涡轮部件中证实了它们的正面效应。2007 年 Rolls-Royce 公司将端壁造型作为一项核心技术加入了 AVON 系列涡轮的改进设计中^[26], 单从非轴对称端壁造型一项受得到的涡轮部件效率收益为 0.4%。

可以说, 端壁造型技术在涡

轮部件中的研究进入了成熟阶段, 相应的研究结果可以被工业界直接借鉴和采用。该技术已成为下一代高性能涡轮的储备技术之一。

3.2 在压气机部件中的应用

端壁造型技术在压气机中的研究晚于其在涡轮中的研究, 而且至今仍缺乏系统的理论和足以被工业界直接采用的正面研究效果。西北工业大学在过去的两年里, 也针对这一课题进行过一定的研究, 结合国内外最新的研究成果, 我们认为端壁造型技术在压气机中的应用可以从以下几个方面展开。

首先, 对于压气机转子: 2008 年 Rolls-Royce 公司率先在一台跨音叶栅上试验了类似于涡轮的非轴对称端壁造型^[27], 结果显示, 虽然非轴对称端壁造型在减少二次流损失和提高近壁区气流转角方面略有收效, 但相比而言其效果远不如在涡轮部件中明显。分析其原因, 主要还在于压气机流场的逆压力梯度对非轴对称造型面的作用产生了限制。

如果再同时考虑到强度问题, 我们认为压气机轮毂的设计应以轴对称造型为主。一些学者虽然在这方面做了有益的探索,

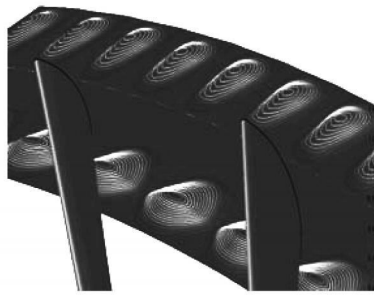
但他们的工作还存在明显的局限性, 即研究工作仅针对叶栅, 或是转子的设计工况进行。西北工业大学以跨音转子 Rotor 37 为载体也对轴对称轮毂造型进行过研究: 轴对称轮毂造型对设计和非设计工况的影响都非常明显(流量范围、压比和效率特性等), 而且同一造型结构在不同工况下对压气机转子性能的影响可能是截然不同的(激波系的变化)。因此, 我们建议未来应对压气机轴对称轮毂造型进行全工况研究, 并探索不同造型形式的不同效应, 为工业界总结出适用的设计经验。

其次, 对于压气机转子机匣(不涉及转动), 本课题组也在 2008 年进行了一项非轴对称机匣设计的研究^[28], 如图 5 所示。因为针对压气机转子, 更艰巨的挑战在于控制失速的发生, 故这里我们只是借用了非轴对称端壁造型的概念, 而实际的用意在于利用造型机匣来调整叶顶泄漏流动, 从而达到扩稳的目的。研究表明: 利用非轴对称造型机匣光滑的几何型面和精心选择的造型范围, 造型机匣可以在基本不损失效率的情况下, 实现一定程度的扩稳, 实际上是对压气机中由

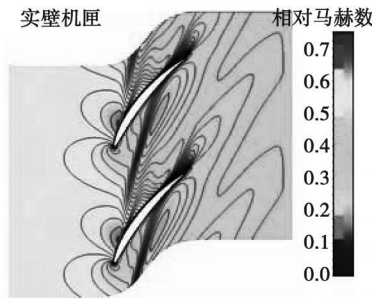
来已久的处理机匣概念的一种更新。对有关文献了解而言,我们

的研究在国内外还属首次,研究的目的在于探索端壁造型技术在

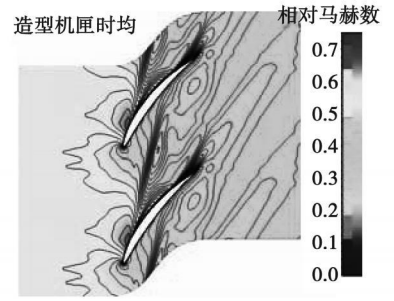
压气机中的一个新的适用领域。



(a) 压气机非轴对称机匣



(b) 设计工况实壁机匣叶顶马赫数



(c) 设计工况造型机匣叶顶马赫数

图 5 亚音转子非轴对称机匣设计及其对叶顶流动的影响^[28]

最后,讨论一下轴流压气机静子部件。由于静子部件没有转动,相对地涉及较少的强度问题,轴对称端壁造型和非轴对称端壁造型都比较有可能实现。

对处于跨音状态的静子,文献^[23]的轴对称端壁造型有望被利用来减少效率损失。但如我们前面分析的,这类造型需要在级环境下进行多工况的效果确认。

轴流压气机静子中常出现的另一类问题是静子角区分离问题,这也是静子中流动损失的主要构成部分之一。对于这个问题,Muller 等人的研究给了我们有益的启示^[29],他们的研究显示:静叶角区分离通常发生在近壁区通道涡到达相邻叶片吸力面的时刻,如图 6 所示。实际上是通道涡干扰了吸力面附面层,促使其分离。这意味着若能利用非轴对称端壁来控制近壁区通道涡的强度和流向,则有可能减弱静叶角区分离。基于这个思路,2007 年,德国宇航中心的 Dorfner 等人用优化方法对一个 3 级压气机的第三级静子进行了非轴对称轮毂造型^[30],结果显示静叶角区反流被有效消除,同时,在近失速工况,级效率提高约 1%,如图 7 所示。2008 年,Rolls-Royce 公司

对一台 6 级高压压气机的数值模拟显示了相似的结论^[31]。由此看来,利用非轴对称轮毂造型来削弱静叶角区分离似乎是端壁造型技术在压气机中一个比较有应用价值的研究方向。

4 结 论

(1) 通过近年的研究与发展,端壁造型技术在涡轮中的减损增效效果已得到确认。该技术在涡轮中已经作为下一代高性能涡轮设计的储备技术而进入实际应用阶段。

(2) 端壁造型技术在压气机的研究目前尚处于起步阶段。综合现有研究成果,其可能的应用包括如下几个方面:

- 利于非轴对称机匣造型来推迟压气机转子叶尖型失速;
- 利用轴对称轮毂造型来改变跨音压气机激波分布,进而实现性能的改进,以及稳定裕度的提高;
- 利用非轴对称轮毂造型来消除压气机静叶角区分离,提高效率。

(3) 端壁造型的设计和加工是复杂的,在应用这项技术时需要权衡制造成本和性能收益之间的关系。为此,在未来的研究中,应加强对多种造型形式,以及各种造型形式在不同工况下性能特性的认识,并增强对造型端壁强度和传热特性的研究。

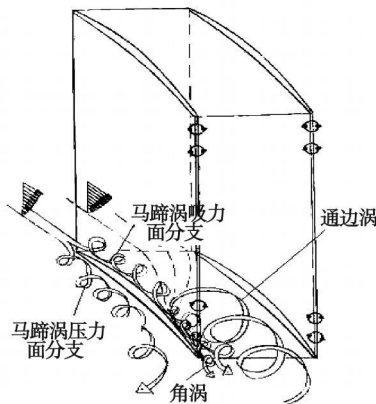


图 6 Muller 等人展示的压气机近壁区涡系结构^[29]

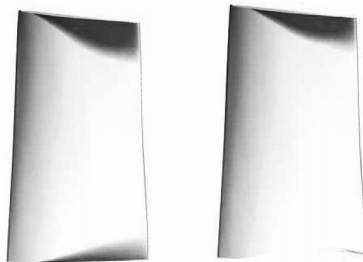


图 7 Dorfner 等人利用静子非轴对称轮毂造型减弱了静子毂区反流(左为原型;右为轮毂造型;阴影区为反流区域)^[30]

参考文献:

- [1] MORRIS A W H, HOARE R G. Secondary loss measurements in a cascade of turbine blades with meridional wall profiling [R] . ASME 75-WA/GT-13, 1975.
- [2] ATKINS M J. Secondary losses and end-wall profiling in a turbine cascade [R] . I Mech E C255/87, 1987.
- [3] ROSE M G. Non-axisymmetric endwall profiling in the HP NGVs of an axial flow gas turbine [R] . ASME 94-GT-249, 1994.
- [4] HARTLAND J C, GREGORY SMITH D G, ROSE M G. Non-axisymmetric endwall profiling in a turbine rotor blade [R] . ASME 98-GT-525, 1998.
- [5] HARVEY N W, ROSE M G, SHAHPAR S, et al. Non-axisymmetric turbine end wall design part I, three-dimensional design system [R] . ASME Paper 99-GT-337, 1999.
- [6] HARTLAND J, GREGORY SMITH D G, HARVEY N W, et al. Non-axisymmetric end wall design part II, experimental validation [R] . ASME Paper 99-GT-338, 1999.
- [7] INGRAM G, GREGORY SMITH D, ROSE M, et al. The effect of end-wall profiling on secondary flow and loss development in a turbine cascade [R] . ASME Paper GT-2002-30339, 2002.
- [8] BRENNAN G, HARVEY N W, ROSE M G, et al. Improving the efficiency of the trent 500 HP turbine using non-axisymmetric end walls part I, turbine design [R] . ASME Paper 2001-GT-0444, 2001.
- [9] ROSE M G, HARVEY N W, SEAMAN B, et al. Improving the efficiency of the trent 500 HP turbine using non-axisymmetric end walls; part II, experimental validation [R] . ASME Paper 2001-GT-0505, 2001.
- [10] HARVEY N W, BRENNAN G, NEWMAN D A, et al. Improving turbine efficiency using non-axisymmetric end walls; validation in the multi-row environment and with low aspect ratio blading [R] . ASME Paper GT-2002-30337, 2002.
- [11] PRAISNER T J, ALLEY BRADLEY E, GROVER E A, et al. Application of non-axisymmetric endwall contouring to conventional and high-lift turbine airfoils [R] . ASME Paper GT2007-27579, 2007.
- [12] SONODA T, HASENJÄGER M, ARIMA T, et al. Effect of endwall contouring on performance of ultra-low aspect ratio transonic turbine inlet guide vanes [R] . ASME Paper GT2007-28210, 2007.
- [13] BAO Q N, KYLE D S. A simple procedure to reduce secondary flow effect in turbine nozzle guide vanes [R] . ASME Paper GT2007-28159, 2007.
- [14] GUSTAFSON R, MAHMOOD G, ACHARYA S. Aerodynamic measurements in a linear turbine blade passage with three-dimensional endwall contouring [R] . ASME Paper GT2007-28073, 2007.
- [15] MAHMOOD G, ACHARYA S. Measured endwall flow and passage heat transfer in a linear turbine blade passage with endwall and leading edge modification [R] . ASME Paper GT2007-28179, 2007.
- [16] TORRE D, VÁZQUEZ R, BLANCO E R, et al. A new alternative for reduction of secondary flows in low pressure turbines [R] . ASME Paper GT2006-91002, 2006.
- [17] BOHN D E, KUSTERER K, SÜRKEN N, et al. Influence of endwall contouring in axial gaps on the flow field in a four-stage turbine [R] . ASME Paper 2000-GT-0472, 2000.
- [18] BOHN D E, FUNKE H, SÜRKEN N, et al. Numerical and experimental investigations on endwall contouring in a four-stage turbine [R] . ASME Paper 2000-GT-0481, 2000.
- [19] BOHN D E, SÜRKEN N, YU Q, et al. Axisymmetric endwall contouring in a four-stage turbine-comparison of experimental and numerical results [R] . ASME Paper GT-2002-30351, 2002.
- [20] WAISH T C. Compression section for an axial flow rotary machine [P] . USA: Patent 4371311, 1983.
- [21] SPEAR D A, BIEDERMAN B P. Flow directing assembly for the compression section of a rotary machine [P] . USA: Patent 5397215, 1995.
- [22] HOEGER M, SCHMIDT EISENLOHR U. Rotary turbomachine having a transonic compressor stage [P] . USA: Patent 6017186, 2000.
- [23] HOEGER M, CARDAMONE P, FOTTNER L. Influence of endwall contouring on the transonic flow in a compressor blade [R] . ASME Paper GT-2002-30440, 2002.
- [24] 高增琦, 高学林, 袁新. 透平叶栅非轴对称端壁的气动优化设计 [J] . 工程热物理学报, 2007, 28(4): 589-591.
- [25] 郑金, 李国君, 李军, 等. 一种新非轴对称端壁成型方法的数值研究 [J] . 航空动力学报, 2007, 22(9): 1487-1491.
- [26] BLACKBURN J, FRENDT G, GAGNE M, et al. Performance enhancement of the industrial AVON gas turbine [R] . ASME Paper GT2007-28315, 2007.
- [27] HARVEY N W. Some effects of non-axisymmetric end wall profiling on axial flow compressor aerodynamics; part I, linear cascade investigation [R] . ASME Paper GT2008-50990, 2008.
- [28] 卢家玲, 楚武利, 刘志伟, 等. 轴流压气机非轴对称机匣造型的研究 [J] . 工程热物理学报, 2009, 30(2): 209-213.
- [29] MÜLLER R, SAUER H, VOGELER K, et al. Influencing the secondary losses in compressor cascades by a leading edge bulb modification at the endwall [R] . ASME Paper GT-2002-30442, 2002.
- [30] DORFNER C, NICKE E, VOSS C. Axisymmetric profiled endwall design using multiobjective optimization linked with 3D RANS-flow-simulations [R] . ASME Paper GT2007-27268, 2007.
- [31] HARVEY N W, OFFORD T P. Some effects of non-axisymmetric end wall profiling on axial flow compressor aerodynamics; part II, multi-stage HPC CFD study [R] . ASME Paper GT2008-50991, 2008.

(编辑 孙显辉)

端壁造型在叶轮机中的应用与发展= **Application and Development of End-wall Profiling in Turbomachinery** [刊, 汉]/LU Jia-ling, CHU Wu-li, LIU Zhi-wei (College of Power and Energy Source, Northwest China Polytechnic University, Xi'an, China, Post Code: 710072), ZHU Jun-qiang (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(6). — 687~691

Reviewed was the evolution of a new design technology—end-wall profiling technology, which can reduce secondary flow losses in the zones around end-walls. The technology may enhance the thermal efficiency of a turbine, and has been widely verified with relevant conclusions being adopted directly in engineering projects. Although the research for applying the above technology in compressors is somehow delayed in comparison with that in turbines, the latest research findings show that the technology has played a definite role in such efforts as changing the shock wave structure of a transonic compressor, improving its stable operating margin and reducing the separation of flows in the corners of stationary blades. The technology in question reflects the research tendency of utilizing complex profiles to enhance turbomachine performance, and merits further study and investigation in the future by researchers. **Key words:** end-wall modeling, turbomachinery, turbine, compressor

CC型一次表面传热与阻力特性试验研究= **Experimental Study of Heat Transfer and Flow Resistance Characteristics of CC (Cross Corrugated) Type Primary Surfaces** [刊, 汉]/MA Hu-gen (College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), DUAN Rui (College of Energy Source and Environment Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(6). — 692~695

Described were the development of primary surface heat transfer and the current status of its research both at home and abroad. By adopting a single-blow transient method, the heat transfer and flow resistance characteristics of three kinds of CC (cross corrugated) type primary surfaces were experimentally studied. A mathematical model was established, and the functional relationship among the fluid outlet temperature, time and NTU (number of transfer units), obtained from numerical solutions. Through a proportioned matching, the NTU value of the heat exchange surface under the relevant measurement conditions was determined with the test correlation of j and f for the three kinds of CC surface being obtained for the first time. Both j and f factor decrease gradually with an increase of Re number, conforming with the general law featuring the heat transfer and flow resistance performance of compact surfaces. After an error analysis, the fit error obtained from the test correlation being provided was assessed as not greater than 15%, offering sufficient engineering precision. The conditions for using the correlation are given as follows; $Re = 120 \sim 800$, the equivalent diameter of the heat exchange surface equals to 1.2~1.4 mm and the staggered angle ranges from 45 degrees to 75 degrees. By using the comprehensive evaluation factor of j/f , the performance of the three kinds of surface was analyzed. The research results show that the profile with a comparatively great width/height ratio can secure a relatively good comprehensive performance. The data thus obtained were also compared with the numerical simulation results of other academics both at home and abroad. The test data are basically in agreement with the numerical simulation results. **Key words:** CC (Cross Corrugated) type primary surface, single-blowing transient change method, heat transfer and flow resistance characteristics, heat exchanger

一次表面回热器动态特性的数值模拟与实验研究= **Numerical Simulation and Experimental Study of the Dynamic Characteristics of a Primary Surface Recuperator** [刊, 汉]/LIU Zhen-yu, SU Yong-kang, CHENG Hui-er (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(6). — 696~699

Numerically analyzed and experimentally studied were the dynamic characteristics of a primary surface recuperator (PSR) when it undergoes a step change of flow rates. In the light of the energy conservation theory and structural features of the PSR, a differential equation was derived, indicating a temperature change of the recuperator in an unsteady state between