

文章编号: 1000-8055 (2008) 12-2308-06

变工况下非轴对称端壁环形叶栅流场特性实验

郑 金¹, 李国君¹, 贾海东¹, 汪传美¹, 董康田²

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049;

2. 西安热工研究院有限公司, 西安 710032)

摘 要: 通过风洞实验对三角函数非轴对称端壁造型法和压差非轴对称端壁造型法设计的环形叶栅在设计工况和非设计工况下的流场参数进行了测量与分析. 结果表明: 不同进出口条件时, 非轴对称端壁造型对于流场参数影响呈现出一些新特点. 由于压力面与吸力面上压力改变的幅度大小会因为来流条件的变化而不同, 当地总压损失系数会随着出口马赫数的降低而减小, 二次流速度矢量分布规律不会随着出口马赫数的变化而不同, 但二次流速度大小及通道涡系强度会随着出口马赫数的降低而减小.

关 键 词: 非轴对称端壁; 环形叶栅; 变工况; 总压损失系数

中图分类号: TK261

文献标识码: A

Experimental investigation on flowfields of non-axisymmetric endwall of annular cascades in multi condition

ZHENG Jin¹, LI Guo-jun¹, JIA Hai-dong¹, WANG Chuan-mei¹,
DONG Kang-tian²

(1. School of Energy and Power Engineering,
Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China;

2. Xi 'an Thermal Power Research Institute Company Limited, Xi 'an 710032, China)

Abstract: Aerodynamic performance of two kinds of annular turbine cascade with non-axisymmetric endwall profiling methods, which are designed by trigonometric function controlling method and pressure difference controlling method, was experimentally studied in the annular cascade wind tunnel test rig under designed condition and off-designed condition. The results show that some new characteristic are present under different flow conditions: amplitude of pressure distribution between pressure side and suction side is changing with different flow conditions, total pressure loss coefficient will decrease with increase of outlet Match number, secondary flow vector distribution will remain unchanged with outlet Match number, but the strength of secondary flow and passage vortex will decline with reduction of outlet Match number.

Key words: non-axisymmetric endwall; annular cascade; multi condition;
total pressure loss coefficient

透平机械作为目前主要的能耗设备, 提高它的运行效率有着重要的意义. 叶栅二次流损失在

收稿日期: 2007-11-23; **修订日期:** 2008-05-23

基金项目: 国家自然科学基金 (50476052)

作者简介: 郑金 (1982 -), 男, 陕西宝鸡人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学研究.

通讯作者: 李国君 (1963 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事叶轮机械气动热力学研究.

叶栅总损失中占相当大比例,非轴对称端壁成型技术已被证明是降低二次流损失的有效手段.非轴对称端壁技术是对轴对称端壁叶栅进行造型,使叶栅通道的压力面侧形成凸的曲壁,在吸力面侧形成凹的曲壁,以此减少通道端壁压力面与吸力面的压差,减弱二次流,进而降低二次流损失.自从 1994 年 Rose 提出了非轴对称端壁成型涡轮静叶栅^[1]的新概念后,一些研究人员通过数值模拟和实验研究了非轴对称端壁对叶栅二次流损失的影响.文献[2]以 DURHAM 叶栅为实验叶栅,实验结果显示非轴对称端壁叶栅削弱了通道涡强度,匀化了出口气流角,总损失也有所降低.文献[3]以高压透平为研究对象进行实验研究,结果表明对低展弦比和大转折的叶片采用非对称端部技术可以有效的减少叶栅流道中的二次流损失,提高透平级效率,效率提高达到了 $(0.59 \pm 0.25) \%$.文献[4]以中压透平的低展弦比为对象,对动叶和静叶进行了端壁非轴对称设计,并做了实验研究,效率提高达到了 $(0.9 \pm 0.4) \%$.文献[5]以低损失叶栅为基础进行端壁造型,进行了数值优化,并且在高速风洞中进行试验验证,结果表明:优化后的叶栅出口处总压损失减少了 22%,二次流动能损失减少了 60%.

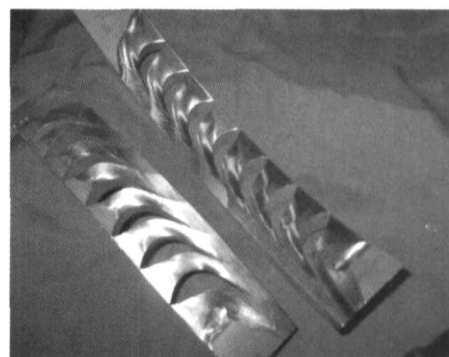
关于非轴对称端壁成型技术,国外学者进行了相当程度的实验研究,但研究工作提供的在设计工况和非设计工况下非轴对称端壁成型叶栅流动特性的数据比较少.鉴于此,本文将非轴对称端壁三角函数造型法^[6]和压差造型法^[7]应用于环形叶栅的非轴对称端壁设计,通过风洞实验对设计工况和非设计工况下的非轴对称端壁环形叶栅流场参数进行测量与分析,从实验角度揭示非轴对称端壁叶栅在变工况条件的流动特性.

1 实验叶栅及非轴对称端壁

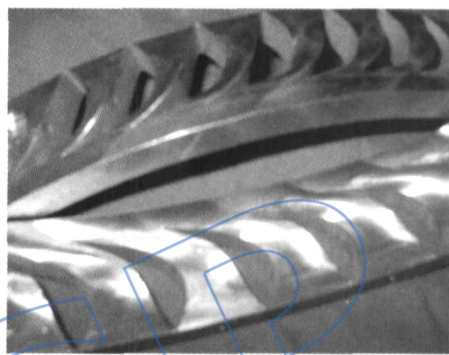
本文实验中采用的后加载叶栅与文献[8-9]的后加载叶栅几何条件完全相同.非轴对称端壁成型方法采用文献[8-9]提出的三角函数非轴对称端壁造型方法和压差非轴对称端壁造型方法.图 1 给出了两套非轴对称端壁示意图,其中利用三角函数非轴对称端壁造型方法设计得到的非轴对称端壁记为 SIN-PEW,压差非轴对称端壁造型方法设计得到的非轴对称端壁记为 PL-PEW.

2 风洞实验

本文在环形实验台上对经过三角函数法和压



(a) SIN-PEW



(b) PL-PEW

图 1 非轴对称端壁示意图

Fig.1 Sketch map of nonaxisymmetric endwall

差法设计的非轴对称端壁环形叶栅流道进行了设计工况和变工况下的风洞实验.实验中将“L”型五孔探针安装于三维坐标架系统,由位移机构带动探针沿栅距方向、叶高方向和轴向移动、旋转及绕探针轴旋转.采用水银测压管测量由五孔探针获取的压力值.利用校准曲线并结合连续方程、运动方程、能量方程求出包括总压、静压、气流速度和大小、总压损失系数以及二次流速度和大小等流场参数^[10].实验中选取与文献[10]相同的叶栅出口截面位置:叶栅出口下游段距叶栅尾缘 2 mm 截面(如图 2 和图 3).探针沿叶高方向从叶根向叶顶移动,栅距方向为顺时针方向,每个出口截面上测点数为 17(展向) $\times$ 23(周向).

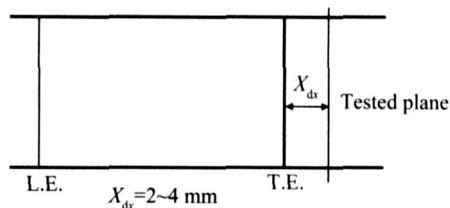


图 2 叶栅出口测量面位置示意图

Fig.2 Sketch map of out test section

表 1 给出了两种实验工况下的进出口条件,其中 p_{t0} 为气流入口总压, T_{t0} 为入口总温, Ma 为叶栅出口马赫数, p_{s2} 为出口背压, α_0 为相对周向

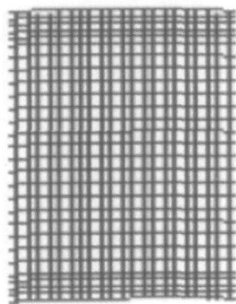


图 3 出口测点布置

Fig. 3 Distribution of out test points

的轴向进口气流角. 为了保证数据稳定, 每个工况下的进口总压参数进行了两次测量并取其均值.

表 1 实验叶栅进出口参数

Table 1 Inlet and outlet parameters of experiment cascade

叶栅进出口参数	设计工况	非设计工况
p_{t0}/Pa	113 791. 4	106 081. 5
T_{t0}/K	314. 25	300
Ma_2	0. 45	0. 3
p_{s2}/Pa	98 145	98 145
$\alpha_0/(\text{^\circ})$	90	90

3 实验结果分析

分别对叶栅出口马赫数 $Ma_2 = 0. 45$ (设计工况) 和 $Ma_2 = 0. 3$ (非设计工况) 两种工况下的两种非轴对称端壁环形叶栅的 50 % 叶高处叶片表面压力分布、叶栅出口下游段距叶栅尾缘 2 mm 处的流动参数进行了测量、数据整理和分析.

3.1 叶片表面压力分布

图 4 给出了出口马赫数为 0. 3 时三种叶栅 50 % 叶高处叶片表面压力分布 (Num 表示数值模拟值, Exp 实验测量值). 由图看出, 无论那种端壁叶栅通道的实验测量值与数值计算值的吻合程度都很好. 另外, 端壁造型流道 50 % 叶高处叶片表面压力分布与环形轴对称叶栅基本重合, 这表明即使在变工况条件下, 合理的非轴对称端壁造型不会对叶栅的做功能力产生大的影响. 图 5 给出了两种工况下叶栅 50 % 叶高处叶片表面压力分布的比较图. 可以看出: 出口马赫数为 0. 45 时叶栅所承受的载荷比出口马赫数为 0. 3 时叶片所承受载荷大, 此时叶栅压力面与吸力面之间的横向压差要比出口马赫数为 0. 3 时的叶栅压力面与吸力面之间的横向压差大.

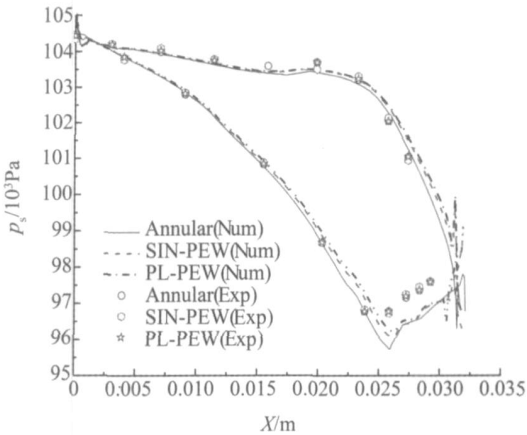


图 4 $Ma_2 = 0. 3$ 时三种叶栅 50 % 叶高叶片表面压力分布

Fig. 4 Pressure distribution of 50 % span of three blades under $Ma_2 = 0. 3$

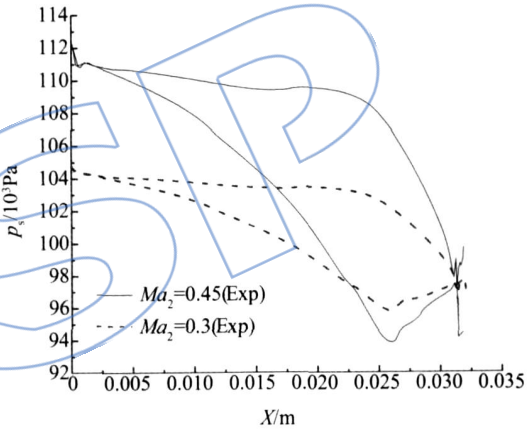


图 5 不同工况下叶栅 50 % 叶高叶片表面压力分布

Fig. 5 Pressure distribution of 50 % span of blades under conditions

3.2 总压损失系数分布

图 6 给出了两种工况下三套叶栅 (包括轴对称环形叶栅) 在出口下游段距尾缘 2 mm 位置截面上质量加权总压损失系数平均值沿叶高的变化情况. 出口马赫数为 0. 3 时, 三套叶栅流道总压损失系数沿叶高分布曲线变化规律基本相同, 并且非轴对称端壁造型的两种叶栅和轴对称环形叶栅相比较, 在同一叶高处的当地总压损失系数值均小于轴对称环形端壁, 降低幅度相当明显. 在出口马赫数为 0. 45 工况下, 三套叶栅的总压损失系数分布规律互不相同, 而且在同一叶高位置上, 三套叶栅的当地总压损失系数值之间的差别不是特别明显. 此外, 比较两种工况, 出口马赫数为 0. 3 的当地总压损失系数远小于出口马赫数为 0. 45 的工况, 这是因为随着马赫数增大, 叶栅内部驱动二次流产生的横向压差变大, 二次流流动更加剧烈, 由此带来的二次流损失也更大.

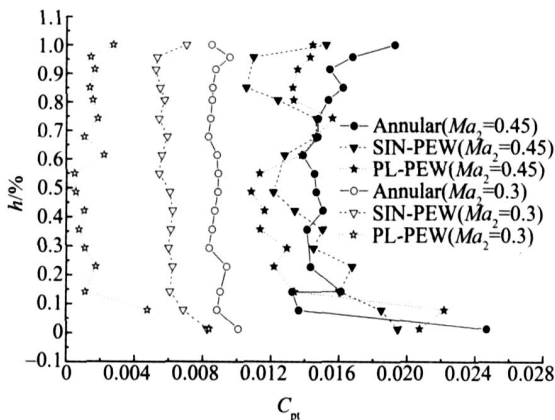


图 6 不同工况条件下总压损失系数沿叶高分布

Fig. 6 Total pressure loss coefficient distribution of conditions along span

3.3 出口气流角分布

图 7 给出了两种工况条件下,三套叶栅在出口下游段距尾缘 2 mm 位置截面上质量加权出口气流角平均值沿叶高的变化情况.从图 7 可以看出:对于轴对称环形叶栅,出口马赫数越大,叶栅出口下游段上出口气流角与设计值之间的差别越大,气流的过偏转和欠偏转现象越显著.对于两非轴对称端壁叶栅而言,出口马赫数大时,非轴对称端壁改善出口气流角的效果越显著,叶栅下游段出口气流角会更加接近设计值.出口马赫数小时,非轴对称端壁造型方法对于改善出口气流角仍有作用,但改善幅度相比于高马赫数时则有所降低,并且在小马赫数时,不同非轴对称端壁造型方法对于出口气流角的作用效果基本相同.图中出口马赫数为 0.3 时,SIN-PEW 端壁流道和 PL-PEW 端壁流道出口截面上气流角沿叶高分布曲线基本重合,而两者唯一的区别在于 SIN-PEW 端壁叶栅的气流偏转角约为 72.5°,而 PL-PEW 叶栅流道的气流偏转角为 73°,这主要由于 PL-PEW 叶栅在削弱二次流流动方面效果更好,从而更好的降低了通道涡的强度.

3.4 二次流速度矢量分布

二次流的定义按照文献[10]定义,即取本地速度矢量在该截面上的投影值与依据平均气流角计算的该截面上的各个方向上速度的差.图 8 给出了不同工况下,三套叶栅端壁出口下游段 2 mm 截面位置上实验测量的二次流速度矢量图,其中 SS 代表吸力面,PS 代表压力面.就两种非轴对称端壁叶栅流道而言,尽管出口马赫数不同,但非轴对称端壁流道对于二次流的抑制作用没有发生变化.从图中圆圈所代表的通道涡区域及范围来看,

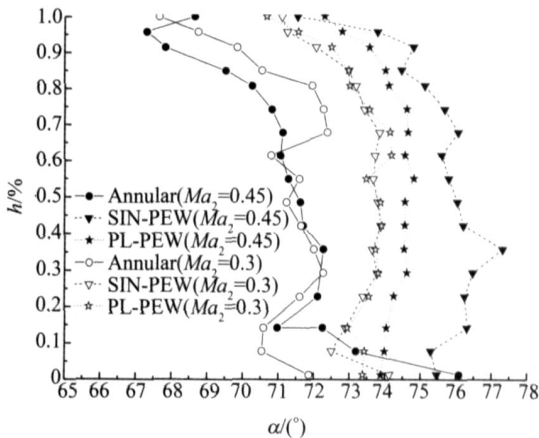


图 7 不同工况下出口气流角沿叶高分布

Fig. 7 Out flow angle distribution of conditions along span

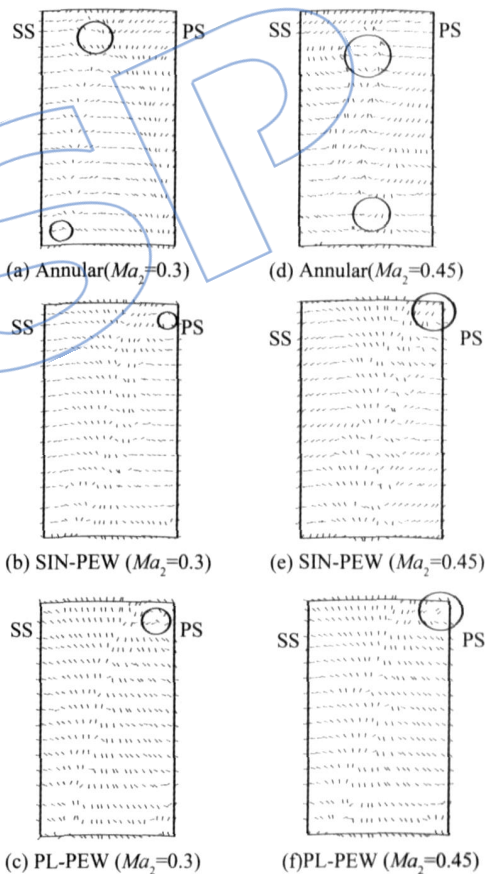


图 8 不同工况下二次流速度矢量示意图

Fig. 8 Secondary flow speed vector sketch map of conditions

不论何种叶栅端壁流道,对于两种工况条件下同一截面而言,在相同位置都出现了结构相同的通道涡系,并且由于削弱了周向二次流,上通道涡向吸力面的偏移程度减小.在出口马赫数为 0.3 时,各个叶栅流道中通道涡系范围收缩,并且通道

涡核心区域都减小。

3.5 二次流动能系数分布

二次流动能系数能够直观的反映出二次流占主流的比重,对于相同的叶栅流道,同一轴向截面位置上二次流动能系数小,表明该截面上二次流流动不明显,二次流速度矢量的大小和强度都要小,占主流的比重小^[11]。图9给出了不同工况下三种叶栅端壁流道出口下游段2 mm截面位置上实验测量得到的质量加权二次流动能损失系数沿叶高分布情况。由图9可以看出,不论何种马赫数条件,非轴对称端壁造型叶栅流道的二次流动能系数都小于轴对称环形叶栅通道的二次流动能系数。不过在出口马赫数为0.3时,对于同一叶栅通道而言,该截面位置上的二次流动能系数都比出口马赫数为0.45时的二次流动能系数小。

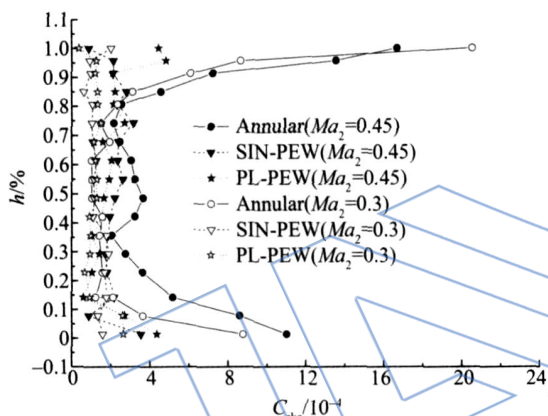


图9 不同工况下二次流动能系数沿叶高分布

Fig.9 Secondary flow kinetic energy coefficient distribution of conditions along span

4 结 论

通过变工况下叶栅出口流场参数的测量与分析可知非轴对称端壁造型技术对于降低叶栅通道内部二次流流动损失、抑制二次流及其涡系的产生和发展的作用并没有因为工况变化而改变。但在不同来流条件时,非轴对称端壁造型对于流场参数影响也呈现出一些新特点,主要体现在以下方面:

1) 在变工况来流条件下,对于任何一种非轴对称端壁成型方法,由于端壁型面凹凸而引起叶栅吸力面与压力面上压力变化的规律不会随着来流条件的变化而改变,但端壁造型方法对于压力面与吸力面上压力改变的幅度大小会因为来流条件的变化而不同。也就是说,当出口马赫数小时,非轴对称端壁降低压力面与吸力面之间横向压差

的幅度要比出口马赫数的大。

2) 对于同一叶栅通道中同一截面,当地总压损失系数会随着出口马赫数的降低而减小。但非轴对称端壁对于当地总压损失系数的降低幅度却随着出口马赫数的减小而增大,即出口马赫数越小,非轴对称端壁造型改善叶栅内部二次流流动,降低叶栅内部二次流损失的效果越好。同样,非轴对称端壁造型对于叶栅出口气流角的改善也随着出口马赫数的减小而更加接近出口气流角的设计值,在高出口马赫数时由于非轴对称端壁的作用会出现出口气流角大于设计值的情况。

3) 在变工况条件下,二次流速度矢量分布规律不会随着出口马赫数的变化而不同,但二次流速度大小及通道涡系范围和强度会随着出口马赫数的降低而减小。

4) 通过设计工况和变工况流场特性参数的比较,进一步证明了非轴对称端壁成型技术之所以能够达到降低叶栅内部二次流流动,抑制二次流流动及其涡系地发展,改善叶栅出口流场,提高叶栅效率,最主要的原因在于非轴对称性端壁改变了端壁近壁面附近区域的压力分布,以至对于三维空间压力场的分布都产生一定的影响。正是由于压力分布特性地改变,才使得叶栅内部流场得到一定程度地改善。

参考文献:

- [1] Rose M G. Non-axisymmetric endwall profiling in the HP NGV's of an axial flow gas turbine [R]. ASME Paper 1994-GT-249, 1994.
- [2] Hartland J, Gregory-Smith D G, Harvey N W. Non-axisymmetric end wall design: Part II Experimental validation [R]. ASME Paper 99-GT-338, 1999.
- [3] Rose M G, Harvey N W, Seaman P. Improving the efficiency of the trent 500 HP turbine using non-axisymmetric end walls: Part 2: Experimental validation [R]. ASME Paper 2001-GT-0505, 2001.
- [4] Harvey N W. 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.
- [5] Marc G N, Ralf-D Baier. Experimentally verified numerical optimisation of a 3D-parametrised turbine vane with non-axisymmetric end walls [R]. ASME Paper GT-2003-38624, 2003.
- [6] 李国君, 马晓永, 李军. 非轴对称端壁成型及其对叶栅损失影响的数值研究 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39 (1): 1169-1172.

LI Guojun, MA Xiaoyong, LI Jun. Non-axisymmetric

- turbine end wall design and numerical investigation of its effect on the flow field in a turbine cascade[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(11): 1169-1172. (in Chinese)
- [7] 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.
ZHENG Jin, LI Guojun, LI Jun, et al. Numerical research on a new non-axisymmetric endwall profiling method[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(9): 1487-1491. (in Chinese)
- [8] 郑金.叶栅非轴对称端壁成型技术的数值模拟及实验研究[D].西安:西安交通大学,2007.
ZHENG Jin. Experimental investigation and numerical simulation of non-axisymmetric endwall profiling technique in cascades[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [9] 郑金,李国君,任光辉.考虑压差影响的非轴对称端壁成型方法及环形叶栅中的应用[R].重庆:中国工程热物理学会学术会议,2006.
ZHENG Jin, LI Guojun, Ren Guanghui. Non-axisymmetric endwall profiling method related to pressure difference in the annular cascade applications [R]. Chongqing: Conference of China Engineering Thermophysics, 2006. (in Chinese)
- [10] 李卫华.后加载叶栅气动特性的环形叶栅实验研究与数值模拟[D].西安:西安交通大学,2004.
LI Weihua. Experimental investigation and numerical simulation about aerodynamic characteristics of rearward-loaded annular cascades[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2004. (in Chinese)
- [11] Hartland J, Gregory-Smith D. A design method for the profiling of end walls in turbines[J]. ASME Paper 2002-GT-30433, 2002.