

# 冲角变化对弯掠压气机叶栅壁面静压分布的影响\*

陈 浮, 赵桂杰, 宋彦萍, 王仲奇

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 实验研究了冲角变化对不同掠型叶片组成的平面扩压叶栅壁面静压分布的影响。结果表明, 变冲角时弯掠叶栅端部横向、径向及流向压力梯度分布改善, 正冲角时端壁与吸力面附面层相互作用减弱, 避免了低能流体在吸力面角区的积聚及分离, 同时也使得中径附近损失有所增加, 但其总损失没有明显增大; 负冲角时弯掠叶栅中径附近的损失增加在总损失中占主导地位, 气动性能下降。在较大正冲角时弯掠叶栅仍能保持角区流动的稳定性, 若增大中径处的设计冲角能够获得更好的气动性能。

**关键词:** 压气机; 压气机叶栅; 静压; 弯掠叶片<sup>+</sup>; 冲角<sup>+</sup>

中图分类号: V232.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 06-0521-05

## Influence of incidences on the distribution of static pressure of swept-curved compressor cascades

CHEN Fu, ZHAO Gui-jie, SONG Yan-ping, WANG Zhong-qi

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Inst. of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Four different swept rectangular compressor cascades were experimental studied to clarify the effect of incidences on the cascade aerodynamic performances. The static pressure distribution on the surfaces of cascades at different incidences shows the swept-curved cascade improved the pitchwise, spanwise and axial pressure gradient near endwall while the incidence angle changed. At positive incidence angles, the improved pressure gradient delays the interaction of endwall and suction surface boundary layers, avoids the low-energy fluid accumulating in the suction corner region and thereby flow separation occurring there, while loss increases at midspan, the total loss increases insignificantly. At negative incidences, the energy loss at midspan of swept-curved cascade is dominant and the overall aerodynamic performance decreases. The swept-curved blade is able to sustain the flow in the corner even at higher incidence angles. Better performance can be achieved by increasing the design incidence angle at midspan.

**Key words:** Air compressor; Compressor cascade; Static pressure; Swept-curved blade<sup>+</sup>; Incidence<sup>+</sup>

## 1 引 言

压气机叶栅中的流动分离与端壁及叶片表面附面层的发展密切相关, 而端壁及叶片表面压力分布则对附面层发生、发展有决定作用<sup>[1]</sup>。压气机叶栅中大部分流动为扩压流动, 横向和流向压力梯度决定了端壁及型面附面层的发展, 也决定了由于二者在角区内相互作用引起流动分离的程度。研究表明减小流道前部横向压力梯度, 即减小叶片前缘负荷可有效减弱

附面层内二次流动及其损失<sup>[2]</sup>; 此外, 叶片展向压力梯度对叶片表面新生附面层的发展也有重要影响<sup>[3]</sup>。弯、掠叶栅改变流道内各方向压力梯度分布并改善端部流动已形成共识<sup>[4-7]</sup>, 随着研究的深入正逐步投入实际应用中。但关于弯掠联合成型压气机叶栅中流动状况, 特别是弯掠叶栅变工况性能的研究较为少见。零冲角下的研究结果表明, 叶片前掠和弯掠可在叶片吸力面形成两端部高、中径处低的反“C”型静压分布。这种静压分布形式能够减弱吸力面角区低能

\* 收稿日期: 2003-11-27; 修订日期: 2004-04-02。

基金项目: 国家自然科学基金 (50236020); 国家“九七三”基金 (G1999022307); 哈尔滨工业大学校基金 (HIT. 2001. 22)。

作者简介: 陈 浮 (1970—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为叶轮机械气体动力学研究。E-mail: chenfu@hit.edu.cn

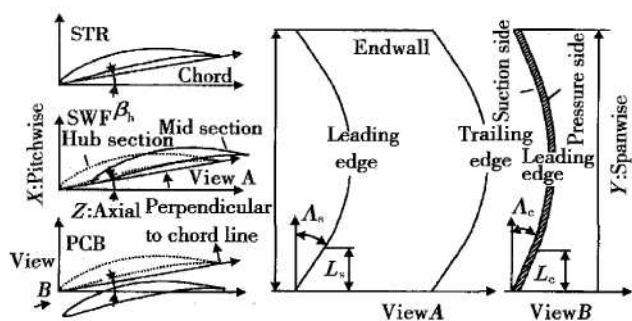
流体堆积,减小叶栅两端部的流动损失<sup>[8,9]</sup>。本文在设计冲角研究的基础上,在 $\pm 5^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ 冲角条件下测量了四种叶栅壁面静压分布,进一步探讨了弯掠叶栅控制端壁三维流动的机理,是对弯掠叶栅气动性能研究的有益补充。

## 2 实验装置

实验在哈尔滨工业大学大尺度低速平面叶栅风洞上进行,入口马赫数为0.22,进口弦长雷诺数 $Re \approx 4.7 \times 10^5$ 。分别研究了直(STR)、前掠(SWF)、后掠(SWB)及弯掠(SCB,正弯+前掠)等四套压气机叶栅壁面静压分布及出口流动参数。叶片积迭型式,弯、掠定义见图1,其中前掠、后掠叶片掠角分别为 $+30^\circ$ 和 $-30^\circ$ ,在前掠叶片的基础上正弯得到弯掠叶片。叶栅几何参数见表1。采用五孔探针测量叶栅出口的气动参数,探针偏转角和俯仰角的校准范围为 $\pm 30^\circ$ ,测量的能量损失系数标准误差范围不超过 $3\sigma = 0.04$ 。叶栅壁面静压由U形水排测量,误差主要为读数误差。

Table 1 Geometric parameters of cascades

Chord length $b$	128mm	Stagger $\beta_b / (^\circ)$	10.39
Aspect ratio $h/b$	1.25	Curve angle $\Lambda_c / (^\circ)$	15
Solidity	1.6	Curve height: $L_c/h$	15%
Design inlet angle/ $(^\circ)$	-28.21	Sweep angle $\Lambda_s / (^\circ)$	$\pm 30$
Design outlet angle/ $(^\circ)$	-8.1	Sweep height $L_s/h$	30%



STR: Straight blade SWF: forward swept blade

PCB: Positive curved blade

Fig. 1 Definition of swept and curved stacking line

## 3 实验结果和分析

图2为不同冲角下叶片根部及中径静压系数分布变化。冲角由负至正变化时,直、后掠叶栅根部和中径,及前掠、弯掠叶栅中径处吸力面上最低静压点

移向前缘,沿流向逆压梯度段逐渐加长;压力面压力升高,叶片负荷中心前移。前掠、弯掠叶栅根部逆压梯度段受冲角变化影响较小,最低压力点前移程度不大,吸力面前缘附近始终保持一定长度的顺压梯度段,即正冲角条件下端部吸力面附近流动受扩压减速影响较小,可防止角区流动分离。此外,尽管前掠、弯掠叶栅吸力面中部最低压力点前移程度较根部大,但并没有形成如直叶栅和后掠叶栅那样占据整个轴向弦长的逆压梯度。

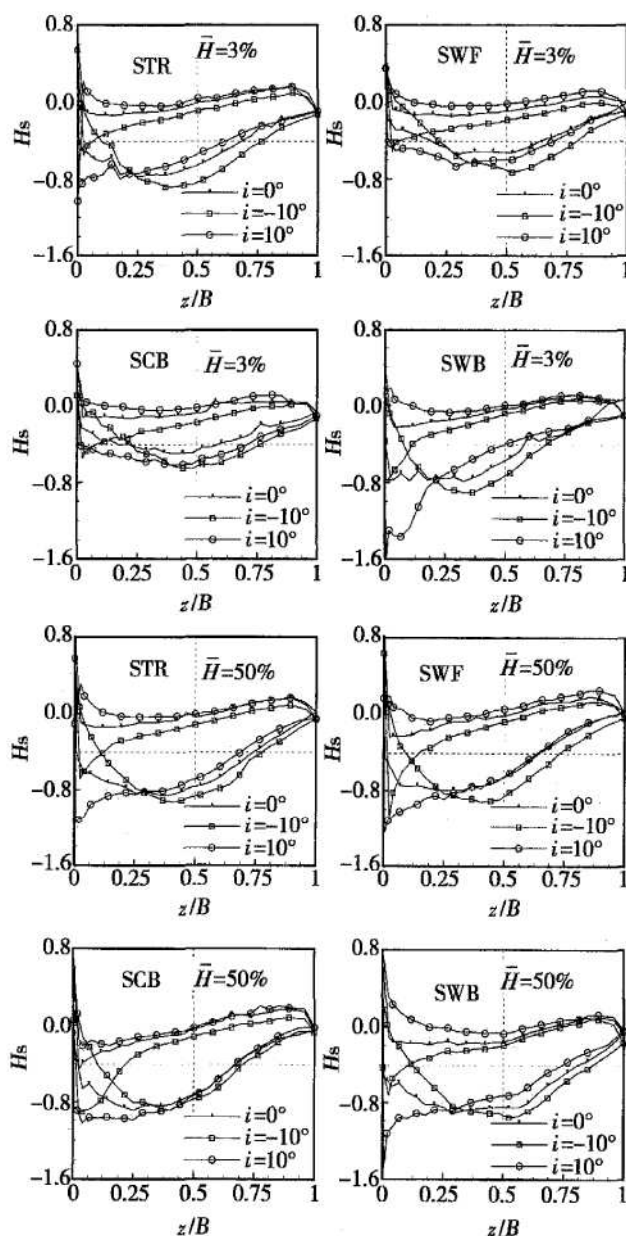


Fig. 2 Changes of static pressure coefficient on blade surface

图3为四种叶栅相同叶高处静压系数分布。-10°冲角时,前掠、弯掠叶栅叶片根部负荷较直、后

掠叶栅后移而中部负荷前移,这使得前掠、弯掠叶栅根部逆压梯度段较直、后掠叶栅短;四种叶栅中径逆压梯度段相差不大。 $+10^\circ$ 冲角时,直、后掠叶栅根部逆压梯度段基本占据整个叶片轴向弦长,其中后掠叶栅前缘附近压力梯度变化最为强烈;与此相比,前掠、弯掠叶栅根部逆压梯度段明显小于前两者;四种叶栅吸力面中部压力分布较接近,前掠、弯掠叶栅在距前缘 25% 轴向弦长范围内压力分布仍较为平缓。如前所述,叶栅端部吸力面附近沿流向逆压梯度段的长短决定了叶栅角区的流动状况,以上四种叶栅在不同冲角下的静压系数分布表明,尽管冲角变化引起了叶栅吸力面压力梯度沿轴向分布的改变,但在相同冲角工况下,前掠、弯掠叶栅吸力面逆压梯度段长度始终小于直、后掠叶栅。此外,与直、后掠叶栅相比较,在前掠、弯掠叶栅吸力面根部绝对静压减小而其压力面中径处绝对静压增大,也就是说前掠、弯掠叶栅端部流动的改善也伴随着中部流动状况的恶化。而这两种叶栅中部损失的增加不仅与吸力面流动情况有关,在负冲角时还来源于压力面前缘的流动分离,如  $-10^\circ$  冲角时,弯掠叶栅前缘压力面过低、过长的负压区造成损失增大。叶栅中部损失增加与端部损失减小将体现出综合效应,因此通过对弯、掠设计自由度的优化匹配以获得最佳气动性能应是下一步工作重点。

向压力梯度的影响(见图 4)。 $\pm 5^\circ$  冲角下弯掠叶栅压力面为两端高中间低的“C”型静压分布,吸力面则为反“C”型;直叶片表面静压系数沿叶高基本为平直分布。弯掠叶片表面“C”型静压分布使端部低能流体向中部主流区迁移,减弱了端部附面层的发展、增厚及其在吸力面角区的积聚趋势。叶栅端壁静压系数

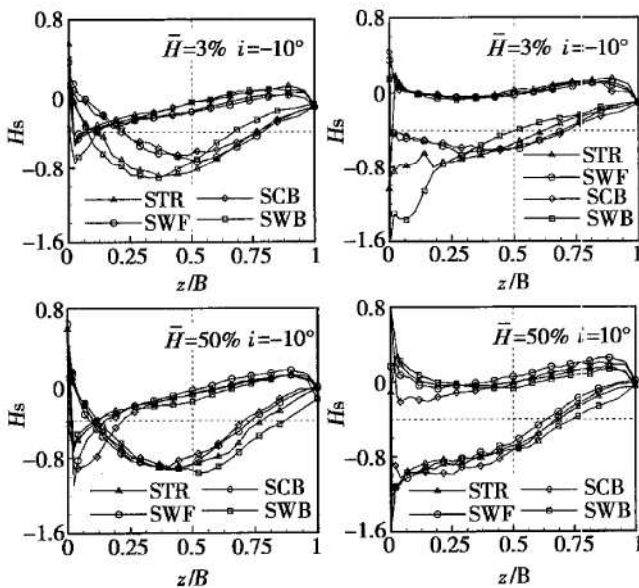


Fig. 3 Comparison of static pressure coefficient at the same blade height

通过  $\pm 5^\circ$  冲角时直、弯掠叶栅叶片表面及端壁静压系数等值线分布来分析冲角对叶栅横向、径向及轴

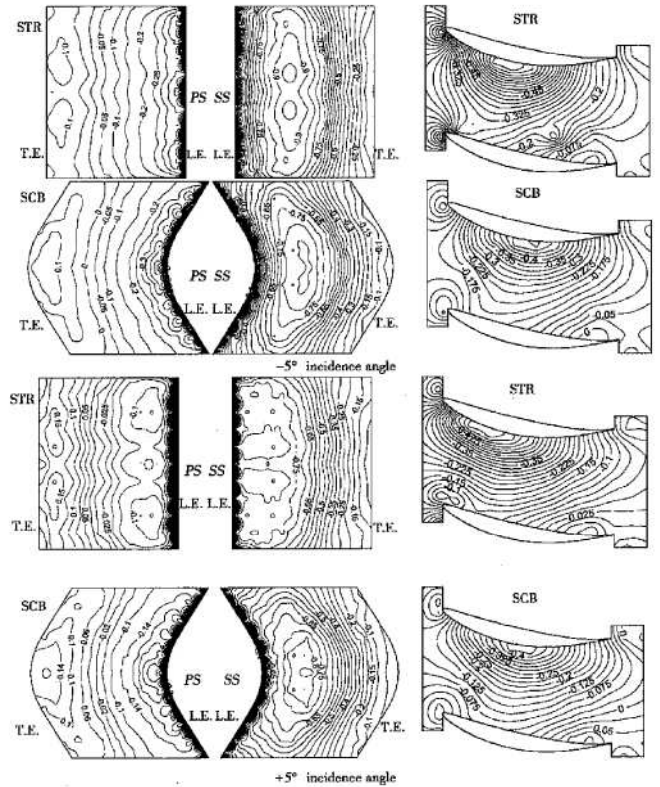


Fig. 4 Contours of static pressure coefficient on the cascade surfaces (PS: Pressure surface, SS: Suction surface)

分布则表明,冲角变化对弯掠叶栅端部吸力面附近最低负压区轴向位置影响较小,而直叶栅负压区随冲角由负至正变化逐渐向叶片前缘移动。最低负压区轴向位置前移使得气流的扩压减速过程相对延长,端部附面层迅速增厚。图 4 还表明冲角增加导致直叶栅入口横向压力梯度增大,气流进入流道后转折加大,造成端壁、叶片附面层相互作用过早进行,端部效率下降。比较而言,弯掠叶栅在任一冲角下的流向逆压梯度段都要短一些,叶栅入口横向压力梯度受冲角变化影响明显小于直叶栅。综合弯掠叶栅对端部压力梯度分布的影响,可以认为,叶片表面“C”型压力分布使得端部低能流体向中部主流区迁移,减弱了端壁附面层的渐厚增长;平缓的横向压力梯度变化削弱了气流转折造成的端壁附面层横向流动趋势,对端壁附面层流体进入吸力面角区具有延迟作用,较短的流向

逆压梯度还减弱了由端壁、吸力面附面层相互作用形成的低能流体过度减速而在角区积聚的可能性。这三种作用的结果是弯掠叶栅最大程度控制了端部低能流体在角区积聚,防止角区流动分离,增大压气机稳定工作区间,可有效防止喘振的发生。

叶栅端部三维流动的改变引起了叶栅出口能量损失分布变化,图5给出了 $\pm 5^\circ$ 冲角下直叶栅和弯掠叶栅出口能量损失等值线分布。叶栅出口能量损失的定义如下:

$$\xi = \frac{(p_s/p^*)^{0.2857} - (p_s/p_0^*)^{0.2857}}{1 - (p_s/p^*)^{0.2857}}$$

式中  $p_s$  为测点静压,  $p^*$  为测点总压,  $p_0^*$  为栅前总压。由图5,冲角增大,直叶栅出口压力面侧端部损失厚度减薄,吸力面角区损失分布范围明显扩大,高

损失流体向主流区的扩展趋势明显。而弯掠叶栅端部损失受冲角变化的影响较小,损失分布较为平缓,能量损失主要体现于尾迹,没有出现损失集中核心,且角区损失没有向主流区扩展。弯掠叶栅在 $\pm 5^\circ$ 冲角时中径处能量损失分布范围虽然小,但能量损失系数明显偏大,即具有较强的抽吸端部低能流体能力。图6给出了冲角变化对四种叶栅出口质量平均总损失系数的影响。负冲角时叶栅中径附近较高的损失决定了弯掠叶栅总损失最大。正冲角时,弯掠叶栅改善端壁流动的效应显现,尽管其中径处损失值最大,但两端部较小的损失分布使得其总损失最小。因而应对弯掠叶栅的弯、掠参数匹配进行深入的优化研究,改善负冲角时气动性能,使弯掠叶栅具实际应用价值。

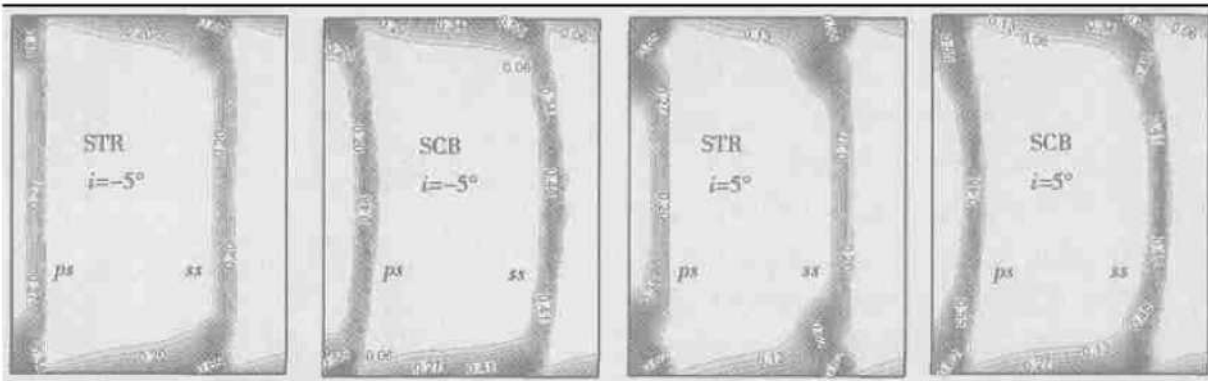


Fig. 5 Distribution of energy loss coefficient contours at cascade exit ( $z/B = 1.414$ , PS: Pressure side, SS: Suction side)

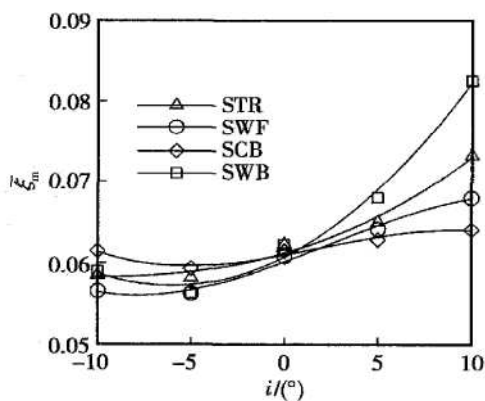


Fig. 6 Effect of changed incidences on overall mass averaged loss coefficient

## 4 结论

(1) 冲角增加,叶片负荷向前缘移动,气流扩压减速过程延长,但弯掠叶栅中始终没有形成占据整个轴向弦长的流向逆压梯度区;

(2) 弯掠叶栅及前掠叶栅吸力面上为反“C”型静

压分布,弯掠叶栅压力面为“C”型压力分布,对端部低能流体抽吸作用增强,弯掠叶栅入口横向压力梯度变化平缓,端壁吸力面侧流向逆压梯度受冲角变化影响较小,这三个方向上压力梯度的综合作用,延缓了端部、吸力面附面层的相互作用,减小了端部低能流体向吸力面角区的积聚,改善了角区流动,防止了流动分离;

(3) 弯掠叶栅端部流动状况的改善减小了端部损失,端部低能流体的径向迁移则造成了中径处损失的增加,其综合结果是在正冲角时具有较佳的变工况性能,因此进行如何改善负冲角时气动性能的研究,如设计时增加叶片中径处的冲角,将使弯掠叶栅的变工况性能进一步得到提升。

尽管本文研究成果不能直接应用于真实压气机设计当中,但从机理研究的角度看,弯掠叶栅具有控制端部低能流体分离,提高压气机喘振裕度的潜力。因此,弯掠设计可用来控制顶部区域的流动结构从而获得压气机性能的提高。

## 参考文献:

- [1] 韩万金. 端壁与叶片表面静压分布对叶栅气动特性影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1989, 10(3).
- [2] Weib A P, Fottner L. The influence of load distribution on secondary flow in straight turbine cascades[R]. ASME 93-GT-86, 1993.
- [3] 顾发华, 王仲奇, 杨弘, 等. 叶片的周向弯曲与弦向弯曲及其数值分析[J]. 工程热物理学报, 1994, 15(3): 264~269.
- [4] G•mmer V, Wenger U, Kau H P. Using sweep and dihedral to control three dimensional flow in transonic stators of axial compressor[R]. ASME Paper 2000-GT-0491, 2000.
- [5] Hah C. Control of shock structure and secondary flow field inside transonic compressor rotors through aerodynamic sweep [R]. ASME Paper 98-GT-561, 1998.
- [6] Xing X Q, Zhou S, Zhao X L. Probing into the connotation of sweep aerodynamics of transonic fans and compressors [R]. ASME Paper 2001-GT-0352, 2001.
- [7] 王会社, 钟兢军, 王仲奇, 等. 叶片正弯对扩压叶栅气动性能的影响[J]. 推进技术, 2002, 23(4). (WANG Hui-she, ZHONG Jing-jun, WANG Zhong-qi, et al. Effects of blade positive curving on aerodynamic performance of compressor cascades [J]. Journal of Propulsion Technology, 2002, 23(4).)
- [8] 陈浮, 赵桂杰, 宋彦萍, 等. 叶片弯、掠对压气机端壁流动的影响之一: 静压及流场显示[A]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集[C]. 上海: 2003, 280~284.
- [9] 陈浮, 赵桂杰, 宋彦萍, 等. 叶片弯、掠对压气机端壁流动的影响之二: 流场显示[A]. 中国工程热物理学会热机气动热力学学术会议论文集[C]. 上海: 2003, 285~288.

(编辑: 梅 瑛)

## 简 讯

## 致谢 2004 年度审稿专家

2004 年度为《推进技术》审稿的专家与学者共有 145 名(按姓氏拼音顺序排列如下)。他们学术判断力强, 学风严谨, 认真负责, 为《推进技术》的学术、技术水平的不断提高作出了贡献, 《推进技术》编委会与编辑部谨致深深的谢意。

安伟光	边炳秀	蔡国飙	蔡体敏	蔡元虎	常海萍	陈国邦	陈杰
陈海生	陈汝训	陈听宽	程惠尔	程谋森	楚武利	崔海涛	戴耀松
杜磊	杜建科	樊思齐	范玮	方斌	方蜀州	方宗德	冯青
冯文澜	高歌	高德平	顾忠安	何洪庆	胡骏	胡平信	胡永强
怀寿章	黄勇	黄熙君	蹇泽群	蒋浩康	姜培学	李锋	李卓
李凤生	李家文	李明哲	李上文	李疏芬	李舜韶	李越森	廉小纯
梁德旺	梁国柱	林瑞森	林宇震	刘君	刘宇	刘兵吉	刘东升
刘高恩	刘华明	刘火星	刘松龄	刘友宏	刘站国	卢兴福	鲁国林
陆山	米镇涛	乔渭阳	任兴民	单鹏	史亚红	司徒明	苏杰先
孙健国	田维平	汤海滨	汤龙生	汤叔平	汤中权	唐海龙	唐汉祥
陶文铨	汪南豪	王健	王强	王曦	王伯羲	王承尧	王慧玉
王宁飞	王新德	王振国	魏志军	温卫东	吴虎	吴汉基	吴洪鳌
吴建军	吴其芬	武晓松	席光	肖军	谢光华	邢耀国	徐旭
徐国强	严传俊	杨茂林	杨清真	杨荣杰	姚家骧	叶定友	伊寅
于达仁	岳连捷	张津	张平	张炜	张宝炯	张德良	张家骅
张建华	张靖周	张堃元	张蒙正	张青藩	张绍基	张为华	张小平
张义民	张远君	张振鹏	赵鸿	赵伯华	赵凤起	赵坚行	赵建荣
郑剑	郑日恒	周进	周力行	周新海	朱惠人	朱宁昌	朱梓根
邹正平							