

压气机叶栅密流比效应试验研究

刘 占 民

[提要] 本文讨论了在压气机叶栅中实现二元流动的条件, 二元流动的判别标准, 影响密流比的因素和密流比对叶栅性能的影响。通过大量试验结果表明, 多孔壁与实体壁叶栅在数据与数据变化规律方面存在不可忽视的差别。如不注意密流比效应, 可能导致设计错误。

主题词 压气机 叶栅 气动力试验

符 号

l	叶片弦长	t	栅距
V	气流速度	M	马赫数
P	全压	p	静压
q	动压		
β	气流角 (气流方向与叶栅轴向的夹角)		
$\Delta\beta$	转角 ($\beta_1 - \beta_2$)		
i	冲角 (中弧线前缘切线与栅前气流方向夹角)		
α	攻角 (栅前气流方向与弦线的夹角)		
ξ	全压损失系数 ($\int_0^t (P_1 - P_2) du / tq_1$)		
C_D	阻力系数 ($\frac{t}{l} \cdot \xi \cdot \frac{\cos^3 \beta_m}{\cos^2 \beta_1}$)		
C_L	升力系数 ($\frac{2t}{l} (\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \cos \beta_m - C_D \tan \beta_m$)		
C_p	压力系数 ($(p_1 - p) / q_1$)	ρ	气流密度
r	安装角 (弦线与叶栅轴向夹角)	u	叶栅切向
上标: ,	非二元流动		
下标: 1	叶栅前	m	平均值, 主流
2	叶栅后	a	叶栅轴向

一、引 言

为设计气动性能完善的叶栅，首先应进行平面叶栅的理论和试验研究。理论研究通常忽略可压缩性、粘性、不稳定性等因素影响。试验研究可以显示气流与叶栅相互作用的真实情况。它能测量某一参数单独影响，把各种影响因素区别开来。而单、多级压气机动试验，只能得到总影响结果。

试验中存在问题，不同风洞得到的数据常不一致。采用实体壁叶栅的风洞，由于附面层影响，试验区叶栅进出口的密度流量不能保持一致，因而测试数据的准确性、重复性差。采用多孔壁叶栅的风洞，通过抽气控制附面层，可得出纯二元流动准确数据，使试验与理论能进行有意义的比较和分析。得出几何与气动参数间的通用关系，并可减少试验工作量。这两类装置得出的数据及其变化趋势不同。忽视这种差别能导致设计错误。本文在试验基础上讨论了实现二元流动的条件，判别二元流动的依据，影响密流比的因素以及密流比对叶栅性能的影响。本试验用的叶栅风洞，可通过抽吸附面层在低速吹风条件下将密流比控制到1.0。试验特别注意了出气角的测定，因其微小误差可能导致升力系数的明显差错。为保证尾迹中测量精度，选用两方向测孔的中心在探针旋转线上的探针。出气角取栅距内各测值的算术平均值。

二、压气机平面叶栅中实现二元流动的条件

试验中除要求在叶栅前能获得稳定的、均匀的、低紊流度的气流之外，还要求流经叶栅的气流能够模拟无限多叶片叶栅和无限高叶片叶栅的流动条件。

1. 模拟无限多叶片叶栅流动状态

模拟无限多叶片的叶栅流动状态，就是要叶栅中所有叶片都处于同样流动条件下。实际上，就是要叶栅中的流动不要受叶片数目的影响。试验叶栅在一般情况下，由于试验段上下壁附面层的存在，接近上下壁的叶栅通道的效率下降，所以叶栅两端通道的压升小于中部通道的压升，即两端的栅前静压要大于中部的静压，于是气流方向自叶栅两端偏向中心。在进气角较大($\beta_1 > 60^\circ$)情况下，叶栅与下壁成锐角的部位，会出现气流分离，甚至倒流，会使叶栅中心叶片的流入角方向有更大的改变，从而使所要求的叶片数无限多状态受到破坏，影响叶栅性能。增大叶片数目可以有效地改善这种情况。但叶数增大会受动力和装置尺寸的限制，叶数一般不应小于7枚。活动上下壁或利用上下壁吸缝和多孔壁适量地抽除附面层，可保证气流出口参数沿栅距方向变化的规律一致。在试验条件下，至少应有三个叶片的流动状态保持一致。叶栅的中心叶片与其相邻叶片之间的气流速度和方向的差别，分别保持在1%和 0.2° 以内时，即可看做达到了要求的流动条件。

2. 模拟无限高叶片叶栅流动状态

模拟无限高叶片叶栅流动状态，就是要在沿叶展方向扩大同一流动状态的范围，使在

叶片中部测试区实现二元流动。沿叶展至少二个弦长内的流动状态须一致。附面层对透平叶栅试验影响小,但对压气机平面叶栅试验影响很大。透平叶栅通道中的端部损失主要是二次流引起的,一般在其展弦比大于0.5至1.0时,该影响即可忽略。压气机叶栅中虽然由于气流转角小,二次流影响不大,但扩压性使叶栅侧壁附面层急剧增厚和过早分离,因此出口附面层较厚,迫使气流自叶片两端挤向叶展中心。转角越大,气流收缩越严重。这种收缩产生同叶栅扩压性相反的加速流动,增大了出口试验区的密度流量,破坏了流动二元性,影响叶栅性能。用吸缝或多孔壁吸除侧壁附面层是获得二元流动的最有效方法。叶栅多孔壁可由密布 $\phi 1\sim 2\text{mm}$ 小孔的钢板与通气性、光滑性和强度良好的绸布组成。若组成合理,相当于风洞流量10%甚至5%的抽气量,就可形成二元流动,否则用高达25~30%的抽气量也不满足要求。在满足气流雷诺数进入自模区($>2.5\times 10^5$)条件下,应利用展弦比较大的叶片。其它方法,如:增大叶片相对高度法,隔除附面层增大来流紊流度法^[1]和向附面层吹注高压气法^[2]不宜采用。

三、二元流动的判别标准

要获得完全二元流动,试验时须实现下列要求:*a*,气流的压力、速度和方向沿叶高保持不变;*b*,气流经叶栅的静压升的测定值与按照测定的转角算出的静压升数值相同;*c*,在栅后,除叶片尾缘后的尾迹区外,不应再出现低能区,叶片尾迹区大小沿叶高应保持不变;*d*,按测出的转角求得的升力与按测出的动量和压力变化求得的升力应相同;*e*,叶栅气动性能的各测定值应与叶片相对高度、叶片数目和风洞装置现有结构因素无关。经调试确认能满足上列各项条件的风洞,可用如下方法来判定二元流动。

1. 密流比

以流经叶栅中央叶片中间截面的气流出入口密度流量比

$$K = \int_0^t \rho_2 V_2 \cos\beta_2 du / t \rho_1 V_1 \cos\beta_1$$

判定二元流动程度。 $K=1.0$ 时为纯二元流动。 $M\leq 0.3$ 时可直接以轴向速度比判定:

$$K = V_{2am} / V_{1a} = \int_0^t V_2 \cos\beta_2 du / t V_1 \cos\beta_1$$

2. 静压升

测定的静压升与由测定的转角算出的静压升相等,

$$\Delta p_{\text{测定}} = \Delta p_{\text{计算}} = \frac{1}{2} \rho V_1 \left[1 - \left(\frac{\cos\beta_1}{\cos\beta_2} \right)^2 \right]$$

3. 轴向速度比的临界值

限于设备能力,试验时常常不易实现 $K=1.0$ 。因此有必要按轴向速度比对叶栅性能的影响程度,规定出轴向速度比的临界值 K_{lim} 。松木[3]建议取 $K_{lim}=1.1$ 。对于

NACA65叶栅, 通常 $K = 1.1$ 时的转角比 $K = 1.0$ 时的转角约大 1° , 但此 1° 之差对于进气角较大的叶栅造成的升力系数误差较大。

据[4]综合不同装置的试验结果, 可把轴向速度比与出气角写成直线关系式

$$K = 2 \tan \beta_2 / \tan \beta'_2 - 1$$

我们知道叶片的负荷参数为

$$C_L \frac{l}{t} = 2(\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \cos \beta_m$$

不同 K 值下叶片负荷的误差为

$$\Delta C_L \frac{l}{t} = (C_L - C'_L) \frac{l}{t}$$

如果由于轴向速度比变化而引起转角不同, 它所造成的误差小于允许误差 $\Delta C_L \frac{l}{t}$ 时, 就可认为是二元流动。按照上述关系可画出 K_{lim} 、 β_1 、 $C_L \frac{l}{t}$ 和 $\Delta C_L \frac{l}{t}$ 的图线。图线表明 K_{lim} 随 β_1 增大而减小。因此在大进气角下实现二元流动较困难。例如对于 $\beta_1 = 60^\circ$ 的叶栅, 只有在 $K \leq 1.02$ 条件下才可视为二元流动。

四、密流比对叶栅性能的影响

1. 对叶栅出口截面能量损失的影响

图1是实体壁叶栅和多孔壁叶栅在设计攻角下出口能量损失分布对比图。由图可见, 不抽气时高损失区范围和其中的损失系数值都大。抽气时低能区全压损失系数大大降低, 附面层外的主流区, 从原占通道出口面积的40%扩大到80%, 相应的轴向速度比 K 值从1.2降到1.0。就实体壁叶栅来说, 扩压流动使侧壁附面层增厚, 出口低能区较

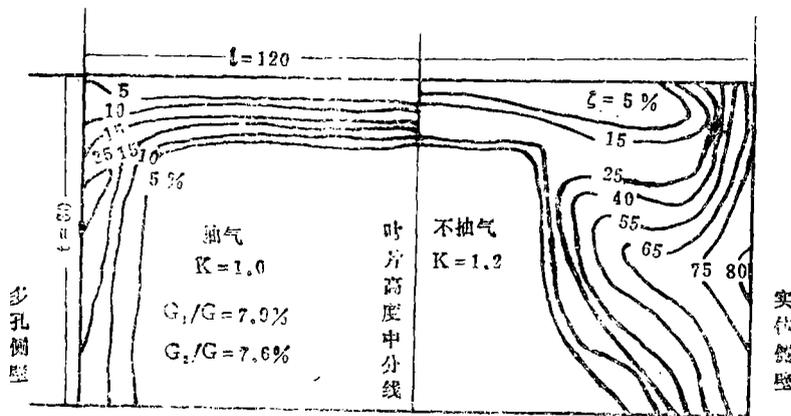


图1 多孔壁与实体壁叶栅出口截面全压损失系数分布图的比较

10C4/30C50, $r=31^\circ$, $l/t=1$, $e=60\text{mm}$, $\beta_1=45^\circ$, $M=0.2$,

G —风洞总流量, G_1 —多孔壁抽气量, G_2 —栅前吸缝抽气量

大, 迫使气流收缩, 密流比增大。多孔壁叶栅连续抽吸附面层后, 测试区实现 $K = 1.0$ 的纯二元流动。

2. 对叶面压力分布的影响

图2是 $A40$ 叶型实体壁叶栅和多孔壁叶栅测量叶面压力分布曲线。它们的轴向速度比不同。压力分布也不同。 $K = 1.0$ 时吸力和压力面上压力系数曲线均下移(静压升高)。实体壁时不利的气流分离趋势缓和。试验表明^[4], 不同抽气形式和不同抽气量对压力分布的影响不同。抽气量越大, 曲线下移量越大。抽气有稳定滞止点的作用, 限制滞止点移向凸面。在达到二元流动前, 与升力成比例的压力系数曲线内的面积随抽气量的增大而增大。

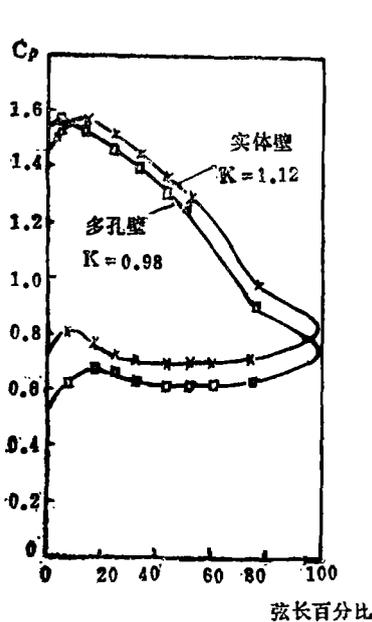


图2 A_{40} 叶型叶栅叶面压力分布曲线

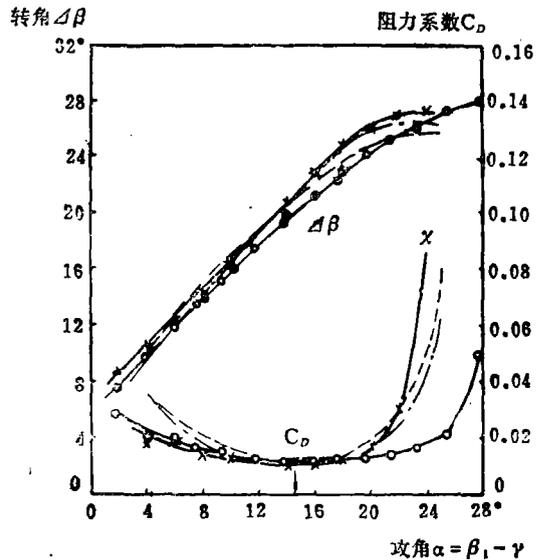


图3 实体壁叶栅与多孔壁叶栅的转角和阻力系数的比较
 $10C4/30C50, \beta_1 = 45^\circ, l/t = 1.0, M_1 = 0.2,$
 $\text{---}\text{O}\text{---}$ NACA多孔壁[6], --- NACA实体壁,
 ... NGTE实体壁, $\text{---}\times\text{---}$ 一本试验实体壁,
 $\text{---}\cdot\text{---}$ 一本试验多孔壁, 箭头指设计攻角

3. 对转角和损失的影响

图3是 $C4/30C50$ 叶型多孔壁叶栅 ($K = 1.0$) 与实体壁叶栅的转角和阻力系数随攻角的变化曲线。实体壁转角比多孔壁的转角偏高, 在设计攻角下偏高约 2° , 最小损失基本一致。图4是用 $NACA65(216)810$ 叶型测出的不同进气角下转角和损失与攻角的关系^[5]。曲线同样表明, 实体壁的转角大于多孔壁的转角。转角偏差随攻角增大而增大。而且, 实体壁的转角随进气角的增大而增大, 多孔壁叶栅却相反, 转角随进气角增大而减小。进气角越大, 两种叶栅的转角偏差量越大。当 $\beta_1 = 80^\circ$ 时, 实体壁叶栅的转角约为多孔壁叶栅的两倍。[7]、[11]按位流理论解释其不同是轴向速度增大造成的。

应注意的是，其最小损失有效攻角工作范围随着进气角的增大而变得明显不同。当进气角很大，叶栅工作范围变窄时，忽视这种失速攻角的差别，可能导致一系列错误。

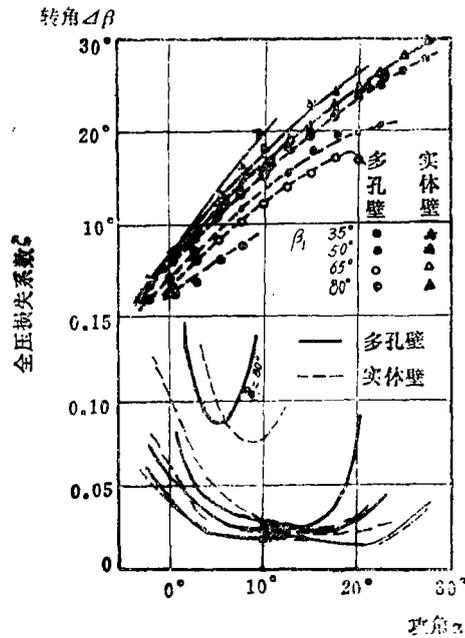


图 4 多孔壁叶栅与实体壁叶栅的转角和全压损失系数的对比曲线

4. 对静压升的影响

图 5 对在实体壁叶栅和多孔壁叶栅试验中不同轴向速度比下测定的静压升与按二元流计算的静压升作了比较。当 $K > 1.0$ 时，测定值小于计算值，偏差量随 K 增大而增大；当 K 接近于 1.0 时，两值接近一致；而当抽气量过大， $K < 1.0$ 时，测定值大于理论

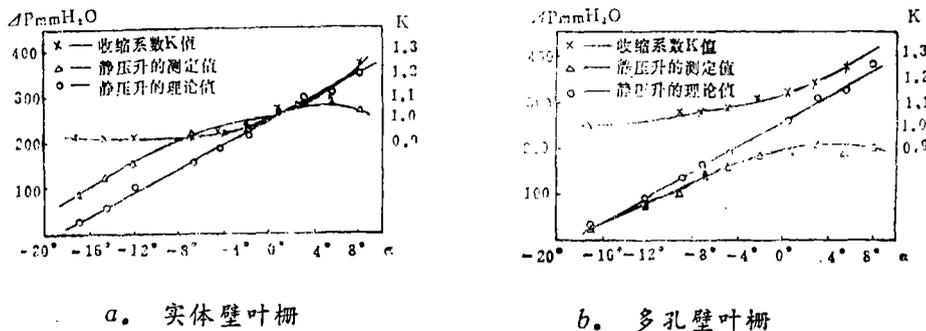


图 5 不同 K 值下测定的静压升与按二元流动计算的静压升的对比图

$$7.5440/22.75\Pi45, l/t=0.963, r=37.5^\circ, M_1 \approx 0.2$$

值。尽管实体壁时转角大，叶栅性能却下降。研究表明，多孔壁二元流的静压升永远大于实体壁非二元流的静压升，其偏差随进气角增大而增大，随马赫数增大而增大^{[4][5]}。

5. 密流比与马赫数

密流比随 M 数增大而增大。试验表明^[15]，二元流动时，在出现激波之前，增大来流 M 数对转角基本没影响；继续增大 M 数，转角急剧下降。看来，如果仅要求转角数据，可直接利用轴向速度比为1.0时的二元流低速吹风数据，而不必高速吹风。但这种看法还需继续证实。高 M 数下损失大体一致，二元流值偏大约0.005。

6. 影响轴向速度比的主要因素

轴向速度比随转角、进气角的增大而增大（见图6）。研究试验叶栅结构和气流进口条件发现， K 仅与 $\cos\beta_1/\cos\beta_2$ 有关，而与叶型、安装角、节弦比等无关^[4]。图7是轴向速度比与进出气角余弦比的关系。为证实这种关系的普遍性，图中示出了多种设备得出的曲线。图中曲线的差别是由于各风洞的结构和工作特点，如进口形式、试验段长度、表面粗糙度、气流紊流度、雷诺数、附面层厚度和栅前抽气量等不同所造成。其中附面层的影响是主要的。抽气的风洞，曲线平坦些。所以不同风洞对同一叶栅测出的数据不尽一致。合理抽气时，可消除 K 的影响。

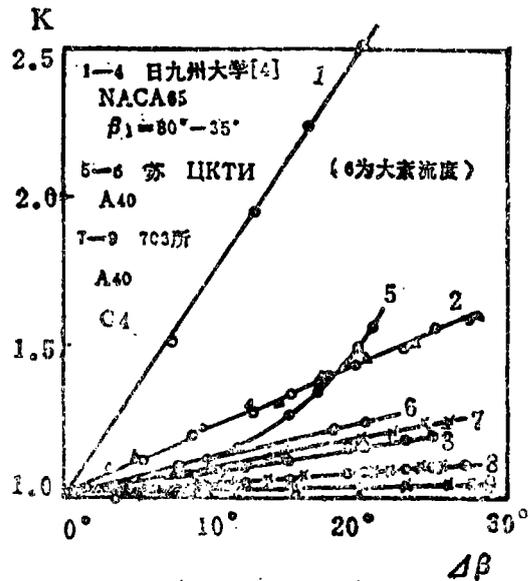


图6 实体壁叶栅 K 与 $\Delta\beta$ 的关系

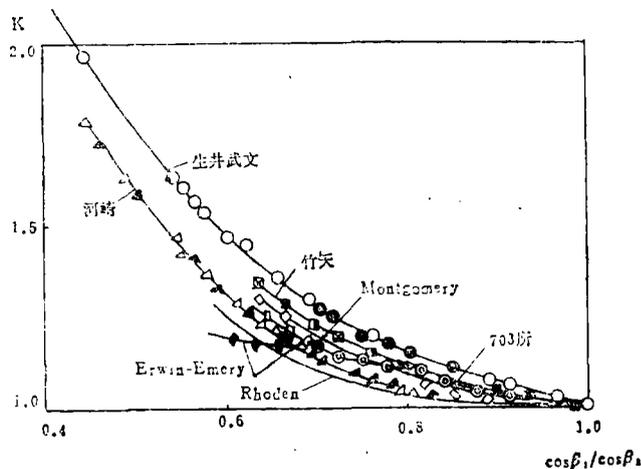


图7 实体壁叶栅的轴向速度比与进出气角余弦比的关系

7. 非二元流数据的修正

能把 $K \neq 1.0$ 时的转角和压力分布修正为二元流数据的方法很多^{[4][8][9][10][11][12][13]}。现有方法对不同风洞的适用效果不同,修正值互不一致,尤其是在大进气角下。不准确的修正方法是无用的,因为转角的微小变化在大进气角下可引起叶栅性能的较大改变。只有在无法使 K 低于 K_{lim} 时,才在试验中尽量使其接近于1.0之后,再采取适当方法修正。

五、结 论

密流比是压气机平面叶栅试验中不可忽视的,标志二元流动程度的参数。不同风洞由于结构和工作特点不同,造成密流比不同,因而试验结果不完全相同。密流比随转角、进气角的增大而增大。密流比对叶栅性能的影响随进气角增大而增大。密流比最大许可值 K_{lim} 随进气角增大而减小。

同一风洞的密流比仅与 $\cos\beta_1/\cos\beta_2$ 有关,与叶栅结构参数基本无关。试验时若控制好附面层,可得出密流比为1.0的准确数据。非二元流时的转角大于二元流时的转角,可实体壁叶栅性能却下降,其静压升小于多孔壁叶栅静压升。该偏差随进气角增大而增大。大进气角时两叶栅最小损失的有效攻角工作区明显不同。如不注意密流比效应,可能导致设计错误。

修正非二元流动数据方法虽多,但没有通用的可靠公式。准确数据只能取自多孔壁叶栅试验。

参 考 文 献

- [1] Н. А. Скварь, Теплообменник и аэрогидродинамика, вып. 6. М. Л. Машиностроение 1952
- [2] F. H. Keast, ASME 1952 July P 685—693
- [3] 松木正胜, 日机论文集27卷180号.
- [4] William B. Briggs, NACA TN2649 1952.
- [5] Tekefumi Ikui, Bull JSME, Vol. 15, No.84(1972—6).
- [6] A. Richard Felix, NACA TN 3937, 1953.
- [7] Shaalan, R. A. and Horlock, J. H. Rep. Mem. Aeron. Res. Comm' No. 3547 (1968).
- [8] Katzoff, NACA TN, No. 1388(1947).
- [9] Hawthorne, W. R. Jour. Aeron. Sci., Vol. 16, No. 4(1949).
- [10] Erwin, J. R. and Emery, J. C., TR NACA, No. 1016(1951).
- [11] Kubota, S., MIT Gas Turbine Laboratory, Rep. No. 56(1959).
- [12] Pollard, D and Gostelow, J. P., Trans ASME, Ser. A Vol. 89, No. 3(1967)P427.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE DENSITY-FLOW RATIO EFFECT OF COMPRESSOR CASCADES

Liu Zhanmin

Abstract

In this paper the author discusses the conditions for realizing two-dimensional flows, the criteria for the discrimination of two-dimensional flows and the effect of density-flow ratio on turbine cascade performance. The results of a considerable number of tests have shown that there exists a significant difference between porous wall cascades and solid wall ones as regards their data and data variation patterns. The neglect of density flow ratio effect can lead to errors in aerodynamic design.

Key words: compressors, cascades, aerodynamic tests

国内电工行业第二家中外合资企业 “湖北—戴蒙德”有限公司成立

继国内电工行业第一家中外合资企业——北京拔伯考克·威尔考克斯公司(BB&W)于1986年7月成立之后,湖北京山锅炉辅机厂与美国拔伯考克·威尔考克斯(B&W)亚洲有限公司经三年谈判,终于1987年7月正式签约成立国内电工行业第二家中外合资企业——湖北·戴蒙德(diamond)有限公司。

该合资厂投资总额495万美元;双方各出资一半;B&W下属的diamond公司以现金与技术出资,京山锅炉辅机厂以现有厂房、设备及现金出资;合资年限30年;20%的产品及零部件出口以平衡外汇;1988年初正式开业。

该合资厂的目标是利用diamond公司的专有技术与专利,按美国ASME规范等国际标准制造,并销售各种锅炉吹灰器、水位表及程控装置等辅机产品,并将在1990年达到该公司同类产品水平,跻入国际市场。

该合资厂现已承接上海锅炉厂生产的30万千瓦锅炉(黄埔电厂)及北京B&W公司生产的30万千瓦锅炉(宁夏大坝电厂)的吹灰器系统制造任务,各报价156万元。据悉哈尔滨锅炉厂的60万千瓦锅炉吹灰器系统正与该厂商谈中。

卓文