

不同进气状态对矩形大S弯 扩压器流动特性的影响*

钟易成 陈晓 王伟

(南京航空航天大学动力工程系, 南京, 210016)

摘 要: 通过亚音扩压器内壁面流谱图、有关截面的总压恢复分布图、速度矢量图以及各壁面沿程静压恢复系数分布分析对比了四种进气状态下矩形大S弯扩压器流动特性。试验表明不同进气状态对矩形大S弯扩压器性能有很大影响, 其中均匀核心流进气条件下的流动代表了大S弯扩压器流动的一般特征, 其出口平均总压恢复系数最高, 周向总压畸变指数不大, 旋流很弱。研究腹部或两侧进气道地面起飞进气状态下矩形大S弯扩压器的流动特性更具有实际意义。试验表明其出口平均总压恢复系数较低, 周向总压畸变指数较大, 旋流较强且很不规则。

主题词: 亚声速进气道, 流动特性, 分离流

分类号: V235.113

THE INFLUENCE OF INCOMING FLOW CONDITIONS ON FLOW CHARACTERISTICS IN A LARGE S-BEND RECTANGULAR DIFFUSER

Zhong Yicheng Chen Xiao Wang Wei

(Dept. of Power Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

Abstract: Flow characteristics in a large s-bend rectangular diffuser are analysed and compared under four through incoming flow conditions flow visulization on the walls of the diffuser, distribution plots of total pressure recovery, plots of velocity vector and distribution of static pressure recovery along the walls. As indicated in experiments, the flow characteristics are influnced greatly by incoming flow conditions, of which the incoming flow condition with uniform core velocity represents the common characteristics of the large s-bend diffuser, such as highest average total pressure recovery, smaller circumferential total pressure distortion and weaker secondary flow. The investigation under static condition on flow characteristics in the large S-bend rectangar diffuser with side inlet is more pratically significante. Test results show lower exit average total pressure recovery, larger circumferential total pressure distortion and stronger and more irregular secondary flow.

Subject terms: Subsonic inlet, Flow characteristic, Separated flow

1 引言

具有大偏心距的短S弯矩形扩压器, 由于通道的弯曲和扩张率增大引起通道内发生瞬变

* 本文1995年11月3日收到, 1996年4月20日收到修改稿, 系中国航空学会第五届推进系统气动热力学学术会议优秀论文

的分离流动,从而使流动变得十分复杂。国内外对S弯扩压器特性及其流动控制,已有许多人进行了数值计算^[1~3]和试验^[4,5]研究。对于飞机进气道,常由于飞行状态不同而导致进气道进口流动条件的不同,从而使S弯扩压器中的流动变得更为复杂。本文通过试验在研究矩形大S弯扩压器一般特性的基础上,讨论和分析了不同进口流场对矩形大S弯扩压器流动状态和性能的影响。

2 试验设备、模型和测试系统

试验在吸气式矩形大S弯扩压器中进行,进口核心流 Ma_1 为0.33,以扩压器进口高度为特征尺寸的雷诺数为 $Re=0.538 \times 10^6$ 。试验模型进口段有三种形式:双扭线进气口,薄唇口进气口和一侧是平板的薄唇口进气口。矩形S弯扩压器的几何形状如图1所示(图上标号为上、下、侧壁静压孔位置),进口截面宽高比 $AS=2$,前面有一等直段,沿程面积变化采用 $dA/dS=C$ (常数)的规律,出口面积与进口面积之比 $AR=1.428$,偏心距 e 与转弯段长度 L 之比为 $e/L=0.326$,扩压器出口有一等直段,在其后是等面积变化的方转圆段。两侧用有机玻璃作成以观察流谱。在扩压器的一弯出口段和二弯出口段的上侧可安装总压耙或五孔探针,以测量一弯和二弯出口的总压和旋流场。在圆形截面出口装有可转动的十字形总压耙,在扩压器上、下和侧壁中心线各分布19根 $\phi 1.2\text{mm}$ 的壁面静压测点,以测量模型全程的静压分布。压力测量采用国产48点压力扫描阀,内装涨丝式压力传感器,输出电压信号由直流放大器放大后,进入RC滤波器以消除外界电磁波干扰,经A/D转换后进入微机进行采集。

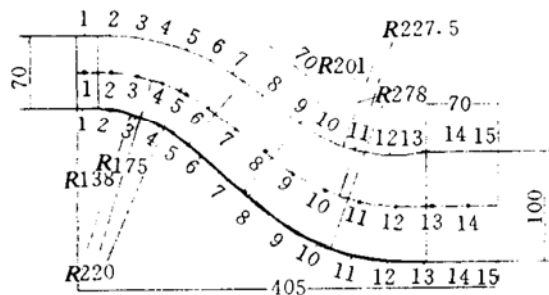


Fig. 1 Geometry of S-bend diffuser

3 试验结果与分析

3.1 均匀进气状态下S弯扩压器的流动特性

双扭线进气口为S弯扩压器进口截面提供均匀的核心流,经过附面层转换带后,其上、下壁面的附面层厚度分别为 $\delta_{\pm}=6.6\text{mm}$, $\delta_{\mp}=5.2\text{mm}$,附面层形状因子 $H_{\pm}=1.44$, $H_{\mp}=1.38$ 。通过丝线和吸入红墨水,观察到扩压器下壁面流动分离区较大,分离起于一弯,跨过平直段,进入二弯。从两侧也可观察到倒流区,其长度是左侧约为40mm,右侧约为60mm,分离区高度约为20mm。

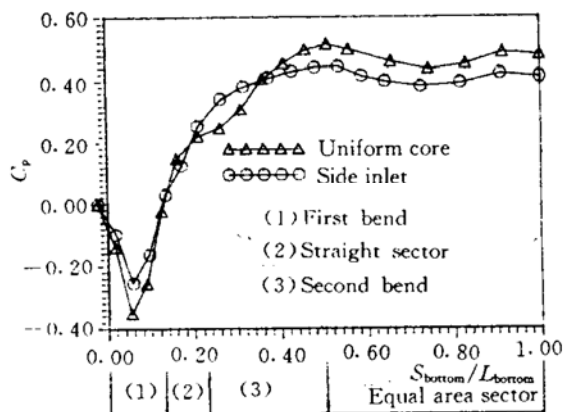


Fig. 2 Comparison of C_p along bottom wall

S弯扩压器上、下壁面及侧壁的沿程 C_p 分布如图2~4所示。由于一弯下壁面弯曲剧烈而曲率较大,使得下壁面 C_p 值在起始段迅速下降到一个很低的值。之后,由于弯曲减小, C_p 值很快上升。在很大的反压梯度作用下,气流在 $S_{\mp}/L_{\mp}=0.11$ 处开始分离。在起始分离点后的较小距离内, C_p 提高依然很快,而在 $S_{\mp}/L_{\mp}=0.16$ 以后,分离区增厚, C_p 提高趋势减慢而形成一个小“平台”。直到分离区结束后,在 $X_{\mp}/L_{\mp}=0.31$ 处由于二弯凹壁的作用, C_p 值才较快地提高,到 $X_{\mp}/L_{\mp}=0.56$,进入平直段,由于上下壁面的 C_p 值

要趋于平衡,使得 C_p 值有所下降。从 C_p 分布图还可以看到,上壁面 C_p 值的变化方向与下壁面刚好相反,即在一弯处上升之后下降,在二弯处下降之后上升,且其波峰波谷介于下壁面的波峰与波谷之间。由于S弯扩压器沿程面积的逐渐增大,侧壁的 C_p 值几乎持续上升,只是在分离区范围内出现了一个“平台”。

图5a为一弯出口总压恢复系数 σ 分布图。从图上可以看到,在该截面处($S_T/L_T=0.161$)下壁面存在分离区,在靠近两侧壁处厚度约为13mm,此处并不是分离区最严重处。从图上还可看到与上壁面相比侧壁的低压区较厚,正说明上壁面附面层内的低压区被壁面二次流扫到了侧壁。图5b为一弯出口横截面速度矢量图,可以看到核心区横向速度向上,而在两侧壁则向下。图6为扩压器出口圆形截面的 σ 分布,此时最低压区已经不在下壁面,而是在上壁面。这表明气流在二弯区域壁面附面层内二次流的作用下,使下壁的低能气流流向上壁,且由于上凸壁后较大的反压梯度作用,附面层变得更不饱满,形成了一个低压区。而在下壁面,由于在凹壁面后的正压梯度的作用下,附面层内分离气流再附以及低能气流的移动,且核心流高压区与壁面低压区掺混而使总压较高。

3.2 下平板薄唇口进气状态下S弯扩压器流动特性

下平板上薄唇口的进气口如图7所示,它的上侧薄唇口及两侧厚唇口采用某型进气道唇口几何形状,下侧是一块长140mm的平板,与两侧唇口有圆弧过渡,其前缘削尖,下侧板的几何相似于某型进气道(腹部进气)的上侧板,以模拟腹部、背部、或两侧进气的进气道靠机身一侧的侧板。这种进气头部在地面起飞状态下的最大特点是:上侧薄唇口分离严重,薄唇口与两侧的角落处有较大角落涡,导致上侧薄唇口有横向二次流,而下侧平板上的气流则很稳定和均匀。上壁面和侧面流谱图见图7a和图7b。这样,在S弯扩压器进口便造成了不均匀的来流条件,靠近薄唇口一边为低压区,而在平板这一边则为高压区,这导致气流在头部与平直段上左右两侧形成二次流,其方向是从平板指向薄唇口。与均匀来流相比,这种进气口对S弯扩压器流动的影响比较复杂。首先,由于上唇口的分离在两侧壁面产生很强的二次流,这个二次流会削弱一弯拐弯产生的二次流,使得下壁面分离区较小;其次,由于头部唇口的强烈分离尤其是上壁面两个角落涡使进口气流总压损失很大,故此情况的各截面平均 σ 都低于均匀来流情形。表现在流谱上为侧壁流线较平缓,流线在一弯处几乎顺着扩压器拐弯而弯曲,显得比较规则。在下壁面上则仅有小块分离区。

从图2~4中可看出,在此进气状态下,上、下、侧三个壁面上的 C_p 沿程分布与均匀进气状态下的 C_p 分布较为相似,都具有明显的一弯、二弯流动特性。在各个壁面上,两种情形的 C_p 最大值和最小值点所处的位置几乎相同。但在不均匀来流条件下, C_p 最大值小于均匀来流的相应值,而 C_p 最小值则大于均匀来流时的最小值,这表明S弯扩压器的 C_p 变化特性被减

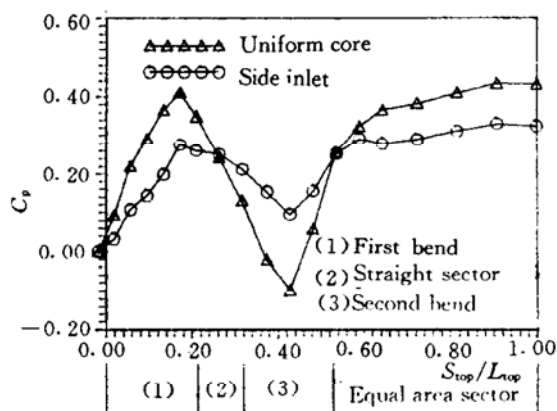


Fig. 3 Comparison of C_p along up wall

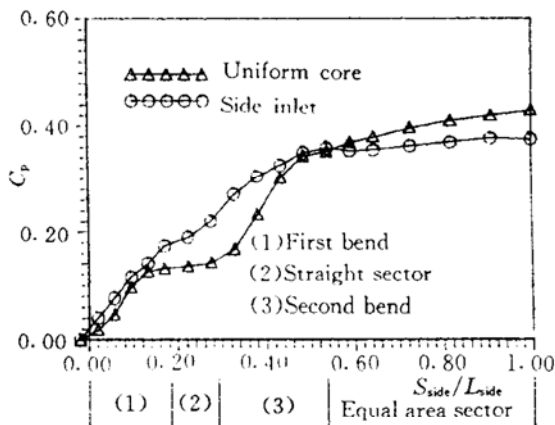


Fig. 4 Comparison of C_p along Side wall

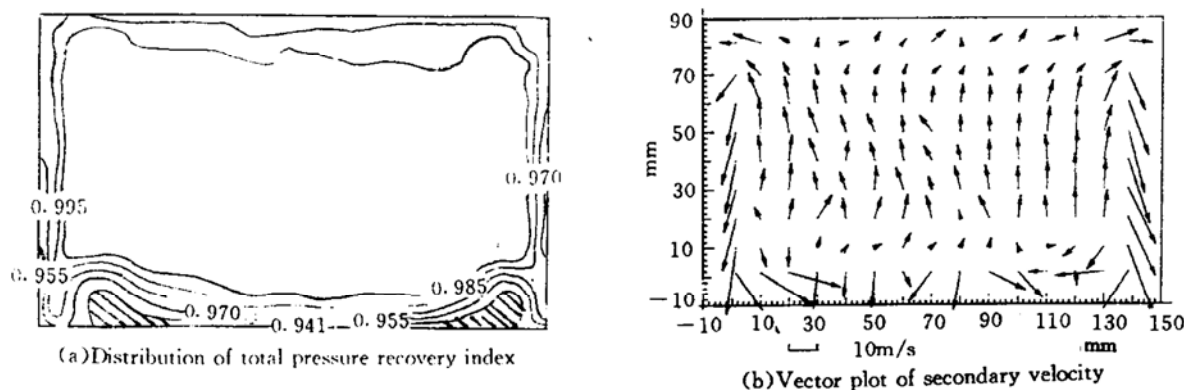


Fig. 5 Flow field of first bend exit of uniform velocity inlet

弱了。在下壁面, 由于下壁面来流的总压较高, 故 C_p 值最低点要比均匀来流时高一些。但在二弯后由于此情况下的总压较低, 且实际流通面积较小, 使得 C_p 值低于均匀来流情况。特别值得注意的是在一弯出口处 ($S_T/L_T=0.16$ 以后), C_p 的分布不再出现“平台”, 这是由于该处的分离区大大减小了。在上壁面, 由于薄唇口处气流的分离, 在该处存在低总压区, 使得一弯处的 C_p 最大值低于均匀来流的 C_p 值, 再由于上壁面的附面层的增厚, 使得一弯后的 C_p 的变化不如均匀来流时那么剧烈。在侧壁 C_p 值也一直表现为上升趋势, 但与均匀来流条件相比, 一个较为明显的特征是消除了在分离区处的“平台”。

图8a 和图8b 为一弯出口 σ 分布及横截面速度矢量图。由于在上壁面两侧进口处存在强烈的分离角落涡, 造成两边较大的总压损失, 加之一弯二次流的作用将壁面低压区扫到了两边, 使该截面在两侧偏上各形成一低压区。又由于进口处上壁右侧分离区较大, 造成了右侧低压区的压力比左侧低得多。另一方面, 中心的横向二次流又将核心流的高压区牵引到了上壁面的边上, 使其 σ 分布图与均匀来流相比大相径庭。从图8b 的速度矢量图可看出, 由于进口上部唇口气流的严重分离, 形成了两个角落涡。在角落涡, 特别是右边较强的角落涡作用下, 其速度矢量图与均匀来流相比很不相同: 由核心流横向速度与右角落涡速度矢量叠加形成了右边的旋流; 而左边角落涡较弱。图9 为出口圆截面总压分布, 在其下方偏左为高压区, 而在右上方则为低压区, 这是由于经过二弯区域, 下壁面静压高于上壁面静压使得下壁面低能气流在壁面二次流作用下流向下壁面, 与上壁面的低压区相叠合。这样的 σ 分布与均匀来流的出口截面 σ 分布相比有较大的差别, 表1 给出了各参数的对比。

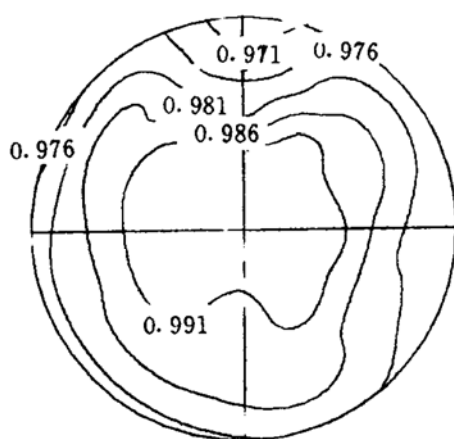
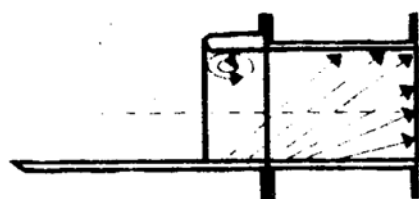
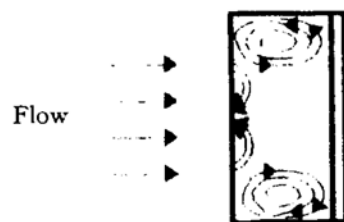


Fig. 6 Total pressure recovery index of circular exit of uniform velocity inlet



(a) Visualization of side wall



(b) Visualization of up wall

Fig. 7 Visualization of walls of side inlet

Table1 Exit variables of s-bend diffuser under four types of Inlet condition

	$\Delta\sigma_0$			DC_{60}			σ_2 (Exit)	M_{UVE} (Exit)
	Lower pressure extent		$\Delta\sigma_0$	Lower pressure extent		DC_{60}		
Uniform flow	39. 10°	126. 05°	. 3190	60°	120°	. 1140	. 9857	. 2036
Side inlet	306. 5°	148. 9°	. 2894	0°	60°	. 23611	. 9668	. 1558
Top plate	25. 93°	257. 26°	. 0987	90°	150°	. 1236	. 9710	. 1427
Thin-lip	174. 39°	318. 98°	. 1232	210°	270°	. 1056	. 9705	. 1400

周向总压畸变指数 $\Delta\sigma_0 = (1 - \sigma_0 / \sigma_2) \%$
式中 σ_2 ——出口截面平均总压恢复系数
 σ_0 ——为径向平均总压恢复值小于 σ_2 的低压区内平均总压恢复系数。

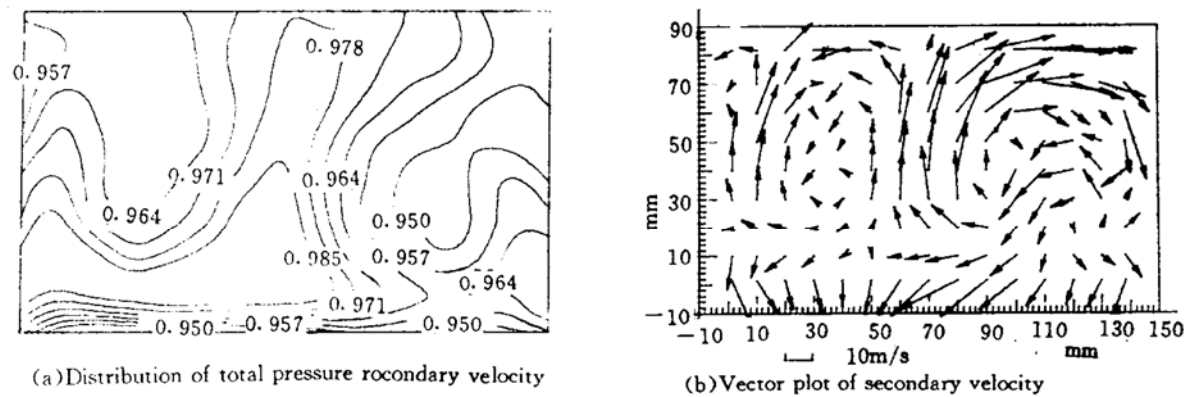


Fig. 8 Flow field of first bend exit of side inlet

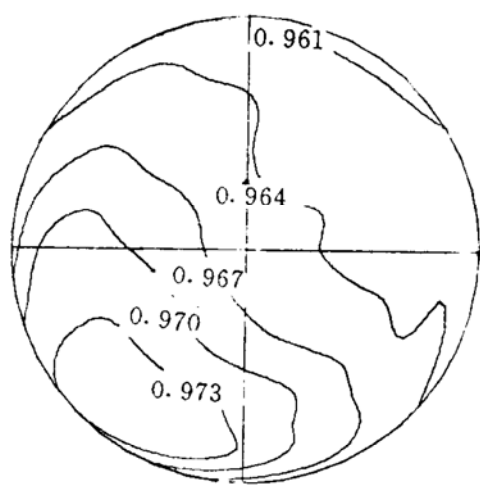


Fig. 9 Total pressure recovery index of circular exit of side inlet

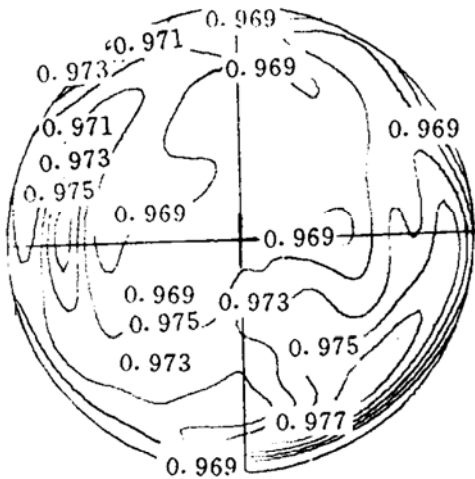


Fig. 10 Total pressure recovery index of circular exit of double thin lip inlet

3.3 其它来流状态下 S 弯扩压器流动特性

上平板下薄唇口进气状态下 S 弯扩压器流动特点是：进口段的侧壁二次流从上指向下加强了一弯二次流的作用，侧壁的流线很陡；下侧薄唇口后的较厚低压区以及一弯侧壁二次流的作用，使得下壁面出现很大的分离区，从一弯出口前发展到接近于二弯出口。图10给出了圆的

截面出口的 σ 分布图。可以看到高压区被低压区分为两个部分,这是由于经过一弯以后,底部气流严重分离,形成了附面层较厚的低压区;在二弯转弯过程中,在上壁面形成低压区的同时,上下部低压区相交,并在方转圆的过渡段中高低压区之间掺混,便形成了两边两个小高压区。周向总压畸变指数都大大小于下侧高压区、上侧低压区进气条件下的扩压器出口相应畸变指数。

上厚唇口、下薄唇口进气状态下S弯扩压器进气头部的四边唇口,相似于某型进气道唇口几何形状,其上壁和两侧唇口较厚,下壁为薄唇口。在地面起飞状态下,由于上壁厚唇口减小了进口气流分离,故上侧为高压区,而下壁薄唇口的严重气流分离形成低压区。这种进气头部的S弯扩压器流动具有平板在上时的S弯扩压器流动特点,在一弯下侧凸壁后气流分离严重,分离区范围较大,形成下壁面很大的低压区,也将高压区分为两半。二者出口截面 σ 分布图相似。与上述各进口条件相比,其平均 σ_1 和畸变指数都最小,即总压损失最大,流场最均匀。

4 结 论

(1) 均匀来流状态下的大S弯扩压器流动代表了该扩压器流动的基本特点:一是有较强二次流;二是有较大的分离区。由于转弯引起的二次流的方向始终是从凸壁指向凹壁,二次流使得上、下壁面 C_p 值各有一个波峰和波谷。在一弯凸壁后(下壁)存在较大的分离区,S弯扩压器出口流场的高压区居中,低压区在上方。

(2) 在下高压区上低压区来流状态下,S弯扩压器的流动特点是:一弯两侧壁二次流减小,凸壁(下壁)后分离区减小。由于进口流场的不对称性,使得出口流场高压区偏左下,而低压区则偏右上;由于进气唇口分离造成损失,使其在相同进口核心流 Ma_1 下,其出口平均总压恢复系数大大低于均匀来流下的值;周向总压畸变指数 DC_{60} 高于均匀来流条件下的值。

(3) 在上高压区下低压区来流状态下,S弯扩压器的流动特点是:一弯两侧壁二次流增强,下侧凸壁后分离区大大增大。这使得下壁面低压区能突破高压区与上壁面低压区汇合而将高压区分为两半。在相同 Ma_1 下,其出口平均总压恢复系数略低于下高压区、上低压区来流状态下的值;但周向总压畸变指数值却明显低于下高压区、上低压区来流状态下的值。

参 考 文 献

- 1 Briley W R & Mcdonald H. Analysis and computation of viscous subsonic primary and second Flows. AIAA Journal, 79:1453
- 2 levy R, Briley W R, Mcdonald H. Viscous/secondary flow analysis for use with nonorthogonal coordinate systems. AIAA 83-0556
- 3 Briley W R & Mcdonald H. Three-dimensional viscous flows with large secondary velocity. J Fluid Mech 1984, 144:47~77
- 4 林麒. 方转圆S弯进气道内气流特性的数值计算与实验研究:[博士论文]. 南京航空学院, 1988
- 5 陈晓, 何文岳. 大宽高比大S弯扩压器流动特性和流动控制. 推进技术, 1991(6)