

拉瓦尔喷咀外流等压截面气流参数的计算

魏仕英

(成都394信箱)

主题词：真空系统、喷流、设计计算。

内容提要：根据一维流气体动力学理论，在非设计度为0.4—2.2的条件下，计算了喷咀外流等压截面的气流参数。结果已经用于气体引射器的最佳设计之中。这篇论文与本刊1988年第一、第二、第四期上发表的论文构成了目前正在国内推广的PY型水蒸汽喷射泵的设计的理论基础。对水蒸汽喷射泵的设计原理进行了若干修改。

一、符号说明

A：横截面积； k ：气体比热比； n ：喷咀的非设计度； $N(\lambda)$ ：本文定义的气体动力学函数； P ：静压； $q(\lambda)$ ：气体动力学函数； $r(\lambda)$ ：气体动力学函数； $Y(\lambda)$ ：气体动力学函数； $Z(\lambda)$ ：气体动力学函数； $\pi(\lambda)$ ：气体动力学函数； λ ：气流的速度系数； σ ：气流的总压损失系数。

各个下标的含义是： 0 代表喷咀喉道参数； 1 代表喷咀出口截面参数； b 代表背压参数； d 代表设计状态参数； e 代表等压截面参数； s 代表激波截面参数； \bullet 代表气流总参数。

二、问题的提出

迄今为止的气体引射器的有关设计理论都是以工作流体和引射流体的等压混合假设为前提的^[1-3]。同时认为该等压截面与喷咀出口截面重合。然而，在气体引射器的变工况状态或喷咀的非设计状态，气流在喷咀出口截面的静压和背压并不是相同的。在一定的条件下，用非设计状态喷咀代替设计状态喷咀，不但可以改善气体引射器的抽吸性能，而且能够减小引射器的尺寸、重量、加工难度。此外，解决喷咀在扩压器中的安装位置，或通常所说的自由射流的长度问题，也需要喷咀外流的气动参数。

本文的目的就是为采用非设计状态喷咀代替设计状态喷咀提供部分设计依据。

三、不同背压下拉瓦尔喷咀外流流态

气体动力学指出，随着背压的变化，拉瓦尔喷嘴外流存在着图1所示的六种流态。其中在a、b、c三种情况下背压对管内流动无影响，在e、d、f三种状态下，背压影响到管内的流态。下面讨论这几种流动出现的背压条件和流动特点。

• 1989年3月1日收到

1. 完全膨胀状态

完全膨胀状态，亦称喷咀的设计状态，其流动特点是：

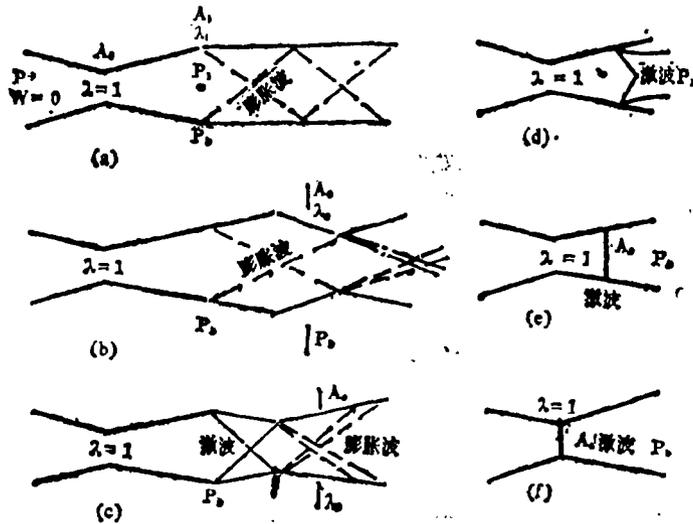


图1 不同背压下拉瓦尔喷咀的流态

(1) 在喷咀出口截面上，气流静压与背压相等。换句话说，气流与环境流体的等压截面即是喷咀出口截面。

(2) 在完全膨胀状态下外流对管内流动无影响。气流在喷咀出口以后产生膨胀波系，无激波存在，流动是等熵的，气流冲量损失最小，在喷咀出口截面上气流具有最大的富余冲量。

(3) 完全膨胀的条件是：

$$\pi(\lambda_1) = p_1/p^* = p_0/p^* \quad (1)$$

$$A_0/A_1 = q(\lambda_1) \quad (2)$$

2. 欠膨胀状态

(1) 欠膨胀状态出现的条件是喷咀出口截面积与喉部面积之比小于设计状态下出口截面积与喉部面积之比，从而引起出口截面上气流静压大于环境流的背压，即 $P_1 > P_0$ ， $n = P_0/P_1 < 1$ 。

(2) 与完全膨胀状态一样，在欠膨胀状态下流动是等熵的，背压对管内流动没有影响。气流在喷嘴出口之后继续膨胀，并且经过几个圆桶形的膨胀后在某一截面上气流静压与环境流背压达到相等。我们称这一截面为等压截面，并记作 A_0 。

在一维等熵流的条件下，等压截面的面积可以从连续性方程求出。因为 $P_1 Y(\lambda_1) A_1 = A_0 Y(\lambda_0) P_0$ ， $P_0 = n P_1$ ，所以

$$A_0 Y(\lambda_0) = A_1 Y(\lambda_1) / n \quad (3)$$

3. 稍过膨胀状态

稍过膨胀系指在背压的作用下，激波尚未进入喷咀内部的那种过膨胀。这种状态出现的

条件是

$$P_1 < P_b < P_{1r}(\lambda_1^{-1})/r(\lambda_1) \quad (4)$$

在稍过膨胀状态，气流在喷咀出口之后同时产生膨胀波和斜激波。资料〔4〕指出，当喷咀的非设计度 $n < 2.5$ 时，在喷咀内部无流动分离现象存在；可以近似当作等熵流处理。

过膨胀状态的斜激波强度由(5)式确定(式中 M_1 为波前马赫数； α 为斜激波锥角)

$$\frac{P_b}{P_1} = n = \frac{2k}{k+1} M_1^2 \sin^2 \alpha - \frac{k-1}{k+1} \quad (5)$$

4. 斜激波出现在喷咀内部出口截面附近的过膨胀状态，产生流动分离现象。这种状态产生在 $n > 2.5$ 的情况下。

5. 喷咀喉部与出口间存在正激波的过膨胀状态。它的出现条件是

$$\pi(\lambda_1)r(\lambda_1^{-1})/r(\lambda_1) < P_b/P^* < \pi(\lambda_b) \quad (\lambda_b < 1) \quad (6)$$

其激波强度和位置由下列各式确定〔6〕：

$$Y(\lambda_1) = A_0 P^*/A_1 P_b \quad (\lambda_1 < 1) \quad (7)$$

$$\sigma_s = q(\lambda_1) A_0/A_1 \quad (8)$$

$$A_s/A_0 = 1/q(\lambda_1) \quad (9)$$

6. 激波出现在喷咀喉部的过膨胀，其条件是

$$P_1/P^* = \pi(\lambda_1) \quad (\lambda_1 < 1) \quad (10)$$

从引射器设计的角度考虑，图1中d、e、f三种流态是设计中不希望出现的流态。因此，我们只讨论a、b、c三种流态，并将喷咀的非设计度限制在0.4—2.5的范围内，这样便可用一维等熵流的方法处理问题。

四、等压截面与喷咀出口截面气流参数的关系

1. 非设计状态下等压截面的速度系数

文献〔6〕指出：在一维等熵条件下，等压截面上，气流冲量函数与喷咀出口截面上气流冲量函数之间存在如下的关系。

$$Z(\lambda_s) = Z(\lambda_1) + \left(\frac{k+1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{A_s}{A_1} - 1\right) \frac{n}{Y(\lambda_1)} \quad (11)$$

(3)式代入(11)并移项后有

$$N(\lambda) = Z(\lambda_s) - \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{1}{Y(\lambda)} = Z(\lambda_1) - \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \frac{n}{Y(\lambda_1)} \quad (12)$$

根据给定的 λ_1 、 n 、 k 值，由(12)式便可以求出新定义的气体动力学函数 $N(\lambda)$ 值。再按 $N(\lambda)$ 的气体动力学函数表便可以查出 λ_e 值。图2是 $k=1.13$ 时，不同 n 值的 $\lambda_1 - \lambda_e$ 关系曲线。

2. 非设计状态等压截面面积

从(11)式解出 A_0/A_1 ，便可以得到非设计状态下等压截面面积的计算公式。图3是 $k=1.13$ 时，不同 n 值的 $\lambda_1 - A_0/A_1$ 的关系曲线。

3. 等压截面上气流总压损失系数

按总压损失系数的定义有

$$\sigma_* = \frac{P_c^*}{P^*} = \frac{P_0/\pi(\lambda_0)}{P_1/\pi(\lambda_1)} = \frac{P_b/\pi(\lambda_b)}{P_1/\pi(\lambda_1)} = \frac{n\pi(\lambda_1)}{\pi(\lambda_0)} \quad (13)$$

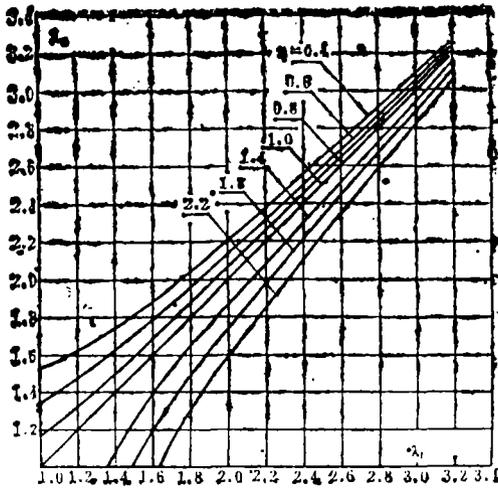


图2 不同设计状态下，喷咀的速度系数关系

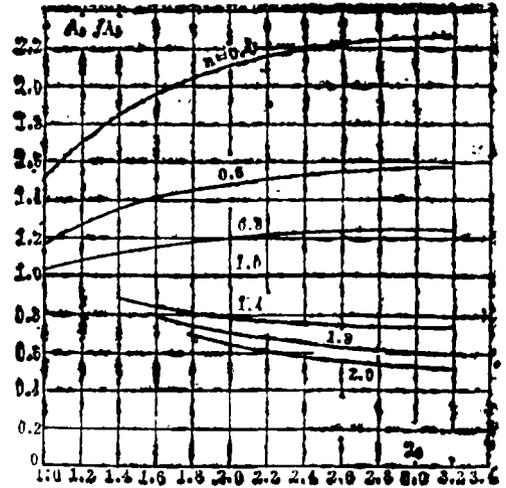


图3 不同设计状态下，喷咀等压截面面积与速度系数的关系曲线

经过我们的分析， n 等于0.4—2.2时，在等压截面上气流的速度系数 λ_1 近似等于设计状态下喷咀出口气流速度系数。因此，(13)式表明 σ_* 主要取决于喷咀的非设计度 n 。在小的非设计度时，欠膨胀状态射流的第一个圆桶形收缩部分的总压损失系数可以相当地小。

从引射器的角度考虑，抽吸作用乃是由于工作流体与引射流体之间的能量和动量交换的结果，只有工作流体减少一部分能量(总压)才能对引射流体产生抽吸作用。这样，作者认为，引射喷咀的设计应不同于推力喷咀的设计，应有一定的非设计度。

五、非设计状态喷咀的速度系数

为了用非设计状态喷咀代替设计状态喷咀，我们计算在给定的设计状态下，非设计状态喷咀出口的 λ_1 值。

按定义，非设计状态喷咀出口截面上气流的压比为

$$\pi(\lambda_1) = \frac{P_1}{P^*} = \frac{P_b P_1}{P^* P_b} = \frac{P_b}{n P^*} = \frac{\pi(\lambda_d)}{n} \quad (14)$$

按(14)算出的关系曲线如图4所示。

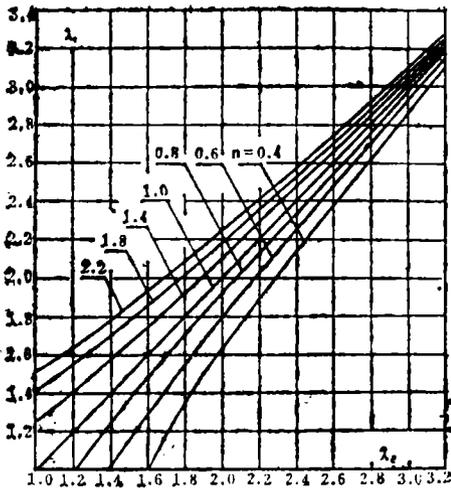


图4 给定设计状态时，喷咀出口的速度系数关系曲线

六、等压截面与设计状态气流冲量函数比

等压截面与设计状态气流冲量函数比的定义值为 $Z(\lambda_s)/Z(\lambda_d)$ 。

其计算步骤是：给定 n 和 λ_d 由 (14) 式算出 $\pi(\lambda_1)$ 值，查气动函数表得 λ_1 值。第二步是根据 n ， λ_1 值查气动函数表得 $Z(\lambda_1)$ 和 $Y(\lambda_1)$ 值，按 (12) 式算出 $N(\lambda)$ 值。第三步，根据气动函数表查出 λ_s 和 $Z(\lambda_s)$ 值。最后求得 $Z(\lambda_s)/Z(\lambda_d)$ 值。当 $k=1.13$ 时计算结果见表 1。

表1 等压截面与设计状态冲量函数表

$\lambda_d \backslash n$	$Z(\lambda_s)/Z(\lambda_d)$						
	$n=0.4$	$n=0.6$	$n=0.8$	$n=1.0$	$n=1.4$	$n=1.8$	$n=2.2$
1.0	/	/	/	1.0000	/	/	/
1.2	/	/	0.9971	1.0000	0.9865	0.9842	0.9836
1.4	/	0.9962	0.9954	1.0000	0.9954	0.9880	0.9786
1.6	0.9815	0.9945	0.9945	1.0000	0.9945	0.9865	0.9737
1.8	0.9714	0.9826	0.9941	1.0000	0.9883	0.9826	0.9714
2.0	0.9705	0.9821	0.9880	1.0000	0.9970	0.9880	0.9763
2.2	0.9763	0.9881	0.9910	1.0000	0.9910	0.9851	0.9763
2.4	0.9766	0.9824	0.9882	1.0000	0.9914	0.9853	0.9795
2.6	0.9829	0.9886	0.9914	1.0000	0.9914	0.9836	0.9829
2.8	0.9889	0.9945	0.9972	1.0000	0.9944	0.9889	0.9834
3.0	0.9920	0.9947	0.9975	1.0000	0.9947	0.9895	0.9840
3.2	0.9949	0.9990	1.0000	1.0000	0.9949	0.9940	0.9900

由表可见，在上述非设计度的条件下，等压截面的气流冲量函数近似等于设计状态冲量函数，换句话说 $\lambda_s = \lambda_d$ 。

七、小 结

等压混合是气体引射器理论的基本假设。它建立在实验观察测的基础上，然而缺乏严密的理论论证。本文的计算结果给出了非设计状态喷咀外流的几个重要的气动参数，这就为用非设计状态喷咀代替设计状态喷咀提供了计算的理论依据，从而就有可能改善气体引射器的抽吸性能。

参 考 文 献

- 〔1〕 日奥芳夫，“铜液真空除气用蒸汽喷射泵”，机械工业出版社（1973）
- 〔2〕 索科洛夫等，“喷射器”，科学出版社（1977）
- 〔3〕 速水惠次等，真空技术报导，1—2（1975）
- 〔4〕 Zccyow M.J.，“Gas Dynamics”（1976）
- 〔5〕 西北工业大学等，“气体动力学基础”，国防工业出版社（1979）
- 〔6〕 希什可夫，“固体火箭发动机动力学”，国防工业出版社（1979）
- 〔7〕 魏仕英，真空与低温，1（1988）25
- 〔8〕 魏仕英，真空与低温，2（1988）5
- 〔9〕 魏仕英、王建国，真空与低温，4（1988）115
- 〔10〕 张瑜，“膨胀波与激波”，北京大学出版社（1983）

（上接第52页）

通过压缩使前级管道的压力升高，与被抽分子的平均自由程相比较，辅助抽气装置的槽和间隙的尺寸很小。每个槽的最大抽速与槽的截面积和转速有关。分子的返流和粘滞流中，抽速有所降低。

如果价格合理，采用磁悬浮系统的话，便能获得无润滑的超高真空抽气系统。可以预料，在通过增加叶片速度来提高抽速方面不会有大的突破。未来的涡轮分子泵将完全是自动操作，并由微型计算机控制传动系统。

（摘译自J. Vac. Sci. Technol. A6(3)（1988）1196，原文作者J. Henning，参考文献略）