

气流绕流喷油杆试验研究

蒋志芳 王绍卿 孙万利

摘 要

通过气流绕流喷油杆的大量的冷吹风试验,对所测数据进行了分析及整理,拟合了一个经验公式。试验证明此拟合公式精度良好,误差小于7%。可供设计时参考。

一、前 言

我们所研究的带有总压孔的喷油杆,其喷嘴侧向喷油,杆上有22个喷孔,每侧11个。在喷油杆末端迎风面开有与管径相同大小的圆孔,感受迎面来流总压(见图1)。

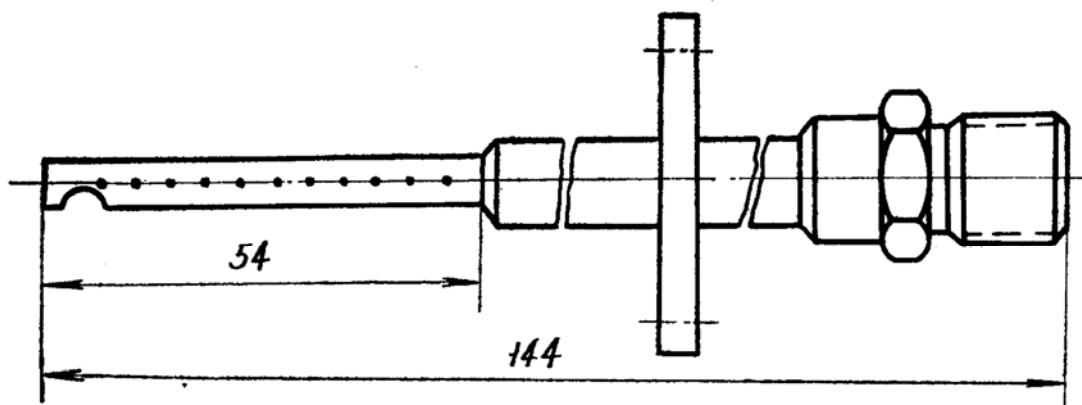


图1 喷油杆简图

当气流绕流喷油杆时,局部静压下降,部份压头转化为动能,致使雾化质量提高。此局部静压的大小是喷嘴流量计算的必要条件。

为了弄清喷油杆圆柱面 $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ 处(该处开有喷孔)局部静压随雷诺数变化的情况,我们对喷油杆进行了大量冷吹试验。本文提供了柱体表面 $\pm \frac{\pi}{2}$ 处无因次压力 $\overline{P_w}$ 随雷诺数 Re 变化的公式和曲线。试验证明,其相对误差小于7%,可供设计该类型喷油杆时参考。

二、理 论 分 析

根据理想流体绕圆柱体的流动(见图2),可以导出柱体表面流动速度的绝对值为

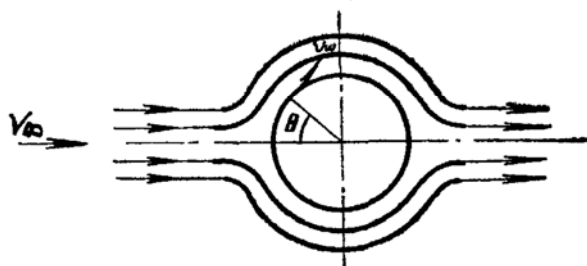


图2 喷油杆在气流中的示意图

$$v_w = 2v_\infty |\sin \theta| \quad (1)$$

其中:

v_w ——柱面上任一点处的速度;

v_∞ ——未受柱体干扰的气流速度;

θ ——通过柱面上的一点与圆心的连线与水平轴的夹角, 即极角。

(1) 式表明, 柱体上任意点处的速度值等于二倍无穷远处的速度乘以相应极角的正弦, 与柱体半径无关。

柱体表面上各处的压力分布规律可由伯努利方程导出

$$p_\infty + \frac{\rho}{2} v_\infty^2 = p_w + \frac{\rho}{2} v_w^2 \quad (2)$$

其中:

ρ ——气流密度;

p_w ——柱面上任一点处的静压;

p_∞ ——未受柱体干扰的气流压力。

将(1)式代入(2)式得:

$$p_\infty + \frac{\rho}{2} v_\infty^2 = p_w + \frac{\rho}{2} (4v_\infty^2 \sin^2 \theta)$$

则

$$p_w = p_\infty + \frac{\rho}{2} v_\infty^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (3)$$

喷油杆的喷嘴在 $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ 处, 此时

$$p_\infty - p_w = 3 \times \frac{\rho v_\infty^2}{2} \quad (4)$$

即该处柱面压力比未受扰动的压力小三个动压头。

定义无因次压力为

$$\overline{p_w} = \frac{p_w - p_\infty}{(\rho/2) v_\infty^2} \quad (5)$$

则可得理想流体绕圆柱体时柱体表面上无因次压力分布规律为

$$\overline{p_w} = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (6)$$

在 $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ 处

$$\overline{p_w} = -3 \quad (7)$$

此表达式表明, 无因次压力分布系数 $\overline{p_w}$ 沿圆柱面的分布, 即与圆柱的大小无关, 也与无穷远处(未受圆柱干扰)的速度和压力无关。

实际流体绕流圆柱体时, 由于流体存在粘性, 在圆柱体表面上产生附面层。由理论分析得出的圆柱表面任一点的速度表达式结合伯努利方程可知, 在圆柱体后侧绕流为增压减速流

动, 形成附面层堆积, 从而产生绕流脱体, 形成涡流区, 此时沿圆柱表面压力分布不再符合下面的规律

$$\overline{p_w} = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (8)$$

即实际流体绕流与理想流体绕流的柱面压力分布有一定的差别。

根据实验表明, 只是在前驻点附近 $\pm 30^\circ$ 左右的区域中, 压力分布与理论计算较一致, 其他区域的压力分布与绕流的雷诺数有关, 即与柱体表面的附面层性质有关, 也与附面层脱体点的位置有关。

在 Re 数较低时, 柱体表面的附面层为层流附面层, 脱体点居前。当 Re 数超过临界值时附面层由层流转变成紊流, 脱体点向柱体后部推移, 从而绕流得到改善。

因此, 对于实际流体, 在柱面 $\pm \frac{\pi}{2}$ 处, $\overline{p_w} \neq -3$ 。设 $\overline{p_w} = c$ 。根据 $\overline{p_w}$ 的定义, 在燃烧室进口截面 (2 截面)

$$\frac{p_w - p_2}{(\rho/2)v_2^2} = C \quad (9)$$

式中:

p_2 、 v_2 为 2 截面处未受柱体干扰的气流压力和速度。

$$\begin{aligned} p_w - p_2 &= c \frac{\rho}{2} v_2^2 \\ p_2 &= p_w - c \frac{\rho}{2} v_2^2 \end{aligned} \quad (10)$$

将上式代入伯努利方程 (2) 则:

$$\begin{aligned} p_{02} + c \frac{\rho}{2} v_2^2 - p_w &= \frac{\rho}{2} v_2^2 \\ p_{02} - p_w &= \frac{\rho}{2} v_2^2 - c \frac{\rho}{2} v_2^2 = a \frac{\rho v_2^2}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 p_{02} 为 2 截面总压; $a = 1 - c = 1 - \overline{p_w}$ 。试验表明 a 值与 Re 数有关。

三、试验结果与结论

试验设备及测点位置简图见图 3

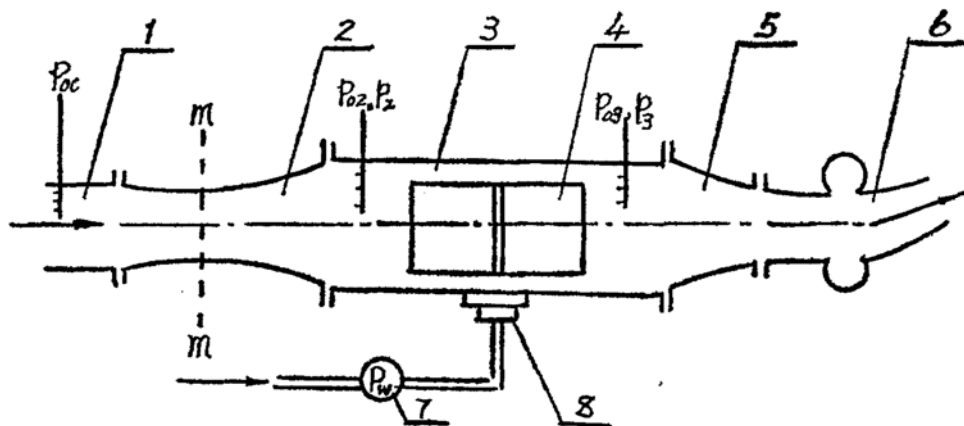


图3 试验设备简图

1. 稳定段 2. 进口喷管 3. 试验段 4. 观察窗 5. 出口喷管 6. 引射器 7. 测 p_w 的压力表 8. 喷油杆

通过对试验用喷油杆冷吹试验, 测出 p_{02} 、 p_2 、 p_w (测量数据见表 1)。对这些数据进行整理, 算出它们的 $\bar{p}_w$ 和 Re , 最后用最小二乘法拟合, 得一经验公式如下:

$$\bar{p}_w = -1.0729 \times 10^{-10} Re^2 + 1.1897 \times 10^{-6} Re - 0.36228 \quad (12)$$

式中

$$Re = \frac{v_2 \cdot d \cdot p_2}{R \cdot T_2} \cdot \frac{T_2 + 110.4}{0.1458 \times 10^{-6} \times T_2^{1.5}}$$

其中:

d 为喷油杆外径(m)

$R = 287.05287$ (J/(kg·K))

T_2 为 2 截面静温(K)

该公式曲线见图 4。计算表明该曲线拟合精度为 6.6%。当发动机的状态选定后, 即可算出

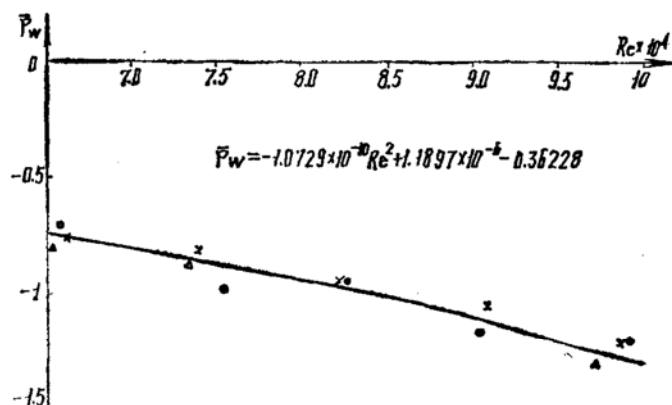


图 4 $\bar{p}_w$ 与 Re 的关系曲线

表 1 喷油杆绕流试验数据

出口喉道面积 \ 参数	P_{0c} (N/m ²)	P_{02} (N/m ²)	P_2 (N/m ²)	P_w (N/m ²)
100 × 100mm ²	58.68	25.16	23.26	21.59
	53.55	23.51	21.19	19.82
	48.88	20.97	19.28	18.43
	44.39	19.17	17.60	16.79
	39.41	16.80	15.46	14.78
100 × 120mm ²	58.62	21.06	18.83	16.99
	54.54	19.68	17.87	16.36
	49.35	17.88	15.79	14.59
	44.39	15.98	14.11	13.20
	39.66	14.40	12.67	11.94
100 × 140mm ²	59.01	18.82	15.70	12.64
	54.01	17.33	14.58	12.63
	49.27	15.79	13.08	11.75
	44.98	14.47	11.83	10.61
	39.20	12.28	10.26	0.9662

Re, 并通过上述公式或查曲线得出 $\bar{p}_w$, 即c值, 从而喷嘴出口处的压力 p_w 也就可以确定, 其值为

$$p_w = \bar{p}_w \times \frac{p_2 \times v_2^2}{2RT_2} + p_2 \quad (13)$$

四、应用举例

根据上面介绍的气流绕流喷油杆壁面静压 p_w 的计算方法, 下面介绍具体应用。当喷油杆放置在气流中喷油时, 如何选取喷嘴喷油压差 Δp_f 呢? 这是一个很重要的问题。喷嘴压降 $\Delta p_f = p_f - p_e$, 其中 p_f 是喷油杆内油压, p_e 是喷油杆外界压力。试验证明喷油杆在静止空气中喷油时, 取 p_e 等于外界大气压力 p_{amb} 即可。这时的理论计算值与试验值十分符合。而当喷油杆放置在具有流动的气流中时, 不能取外界静压 p_2 作为 p_e 值, 同样选用绕流压力 p_w 作为 p_e 值, 也与试验极不符合。试验证明, 用下式表达的 p_{av} 代替 p_e 值在各种工况下均能得到满意的精度。

$$p_{av} = 0.55p_{02} + 0.45p_w \quad (14)$$

文献^[2]对本文结果的应用也说明了本文结论的正确性。

参考文献

1. 洛强斯基Л.Г.: 液体与气体力学。高等教育出版社, 1959, 4。
2. 王绍卿, 孙万利, 蒋志芳: 具有总压孔的喷油杆研究。《自动飞行技术》, 1985年, 第3期。