

软管流量调节器调节特性分析及设计准则

杜嘉陵

(贵州工业大学热工实验室, 贵阳 550003)

摘要 分析了大雷诺数下软管的流量调节行为; 导出了流量随下游压力的函数关系, 即流量调节特性曲线; 提出了以软管作为能动元件的流量调节器设计准则.

关键词 软管, 流量调节器, 调节特性, 设计准则

引 言

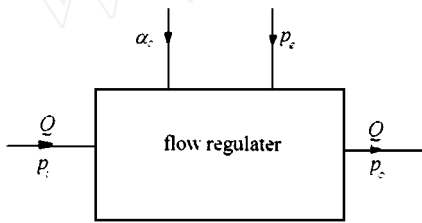


图 1 软管流量调节器
Fig. 1 The collapsible tube flow regulator

软管流动的主要特征是软管结构力学与流体力学相结合. 这种流动在生物医学等领域已显现出广阔应用前景^[1]. 本文分析了软管在大雷诺数下的流量限制行为, 确定了流量调节特性, 以便为流量调节器(图 1)设计提供基本依据.

1 软管定律和摩擦系数

确定软管的流量特性时, 必须考虑软管变形的规律即软管定律和摩擦系数计算公式.

1.1 软管定律

图 2 是实验确定的一均匀乳胶管的软管定律和波速^[2]. 纵坐标是归一化跨壁压力 P , $P = (p - p_e) / K_B$, p 为管内压力, p_e 是管外压力, K_B 是抗弯刚度. 横坐标是面积比 β , $\beta = A / A_0$, A_0 是静面积. 软管开始扁缩成椭圆形时, $P = P_B = -3$. 刚达到点接触和线接触时 P 分别等于 P_p 和 P_L . $P < P_L$ 时, 软管定律是 $P = -\beta^{-3/2}$. $P_L < P < 0$ 区间尚无简单精确公式. 参数有纵向梯度时软管定律是

$$p - \hat{p}_e = K_B P(\beta) \quad (1)$$

其中, $\hat{p}_e = p_e + (p - p_e)_x$, $(p - p_e)_x$ 是参数纵向梯度对 $(p - p_e)$ 的影响. 稳定一维软管流动中控制参数是速度指数 $s^{[3]}$, $s = u / c$, u 是平均流速, c 是波速, $c = \sqrt{(A / \beta) [d(p - p_e) / dA]}$.

1996-04-10 收到第一稿, 1996-11-17 收到修改稿.

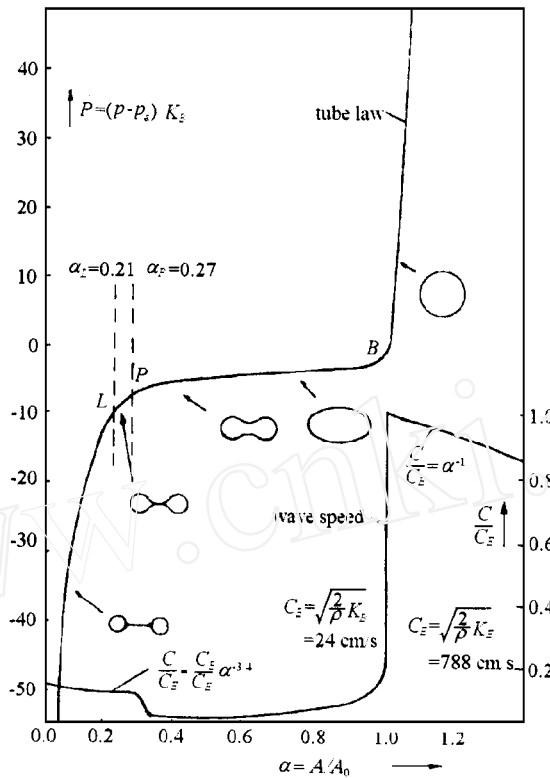


图 2 实验确定的软管定律和波速^[2]

Fig. 2 Experimentally determined tube law and wave speed^[2]

波速随 α 的变化可通过对软管定律求导数确定.

1.2 摩擦系数

若雷诺数足够大,软管内是紊流.可采用 Schlichting^[4]提出的光滑管摩擦系数公式

$$= \left[\frac{0.0791}{Re_{Dh}^{0.25}} \frac{1}{2} u^2 \right] \quad (2)$$

壁面摩擦统一写成

$$\frac{P}{A} = \frac{4f}{D_0} \frac{1}{2} u^2 \quad (3)$$

软管湿周 P , 水力直径 D_h , 雷诺数 Re_{Dh} 和摩擦系数 f 计算如下

$$0.36 \leq \alpha \leq 1 \quad \alpha \leq 0.36$$

$$P = \sqrt{4A_0}, \quad P = \sqrt{8A_0} \quad (4 a, b)$$

$$D_h = \frac{4A}{P} = \sqrt{\frac{4A_0}{\alpha}}, \quad D_h = \frac{4A}{P} = \sqrt{\frac{2A_0}{\alpha}} \quad (5 a, b)$$

$$Re_{Dh} = Re_{D0} = \frac{(Q/A) D_h}{\nu} = \frac{Q}{\nu} \sqrt{\frac{4}{\alpha}}, \quad Re_{Dh} = \frac{Re_{D0}}{\sqrt{2}} = \frac{Q}{\nu} \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \quad (6 a, b)$$

$$f = \frac{0.0791}{Re_{Dh}^{0.25}} \sqrt{\frac{2}{\alpha}}, \quad f = \frac{0.0791}{Re_{Dh}^{0.25}} = \frac{1}{\alpha} \quad (7 a, b)$$

2 流量调节特性

采用图 3 所示的设计方案分析流量特性.

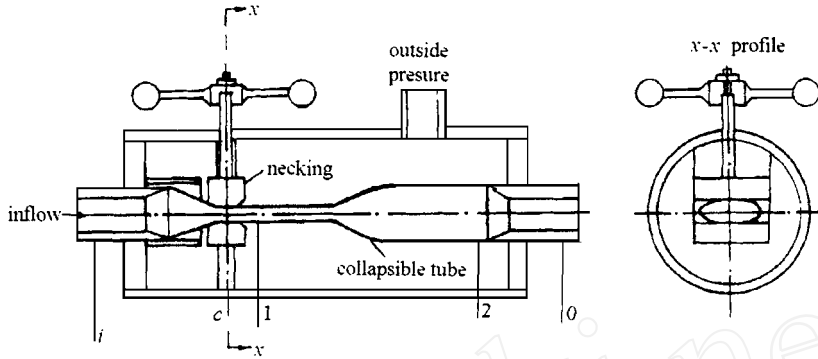


图 3 流量调节器设计方案

Fig. 3 The scheme of flow regulator

连续方程

$$Q = A_0 u \quad (8)$$

不计 i 和 c 点间损失有

$$P_{oi} = p_c + \frac{1}{2} u_c^2 \quad (9)$$

P_{oi} 是进口滞止压力; p_c 是缩颈处管内压力.

$$Q = A_0 \sqrt{2 [(P_{oi} - p_e) - (p_c - p_e)]} \quad (10)$$

当 $(p_c - p_e) (P_{oi} - p_e)$ 和 $(p_c - p_e) - (P_{oi} - p_e)$ (即 $s = 0$) 时有 $Q = 0$. 对应 $s = 1$ 流量存在一最大值. 令 $\frac{dQ}{d(p - p_e)} = \frac{A_0 c}{u_c} (s^2 - 1) = 0$, 可见 $u = c (s = 1)$ 时取得最大值 $Q_{\max} = A_0 c$. 即实际软管定律计算的波速等于平均流速时出现最大值. 流量就被限制在该点. 但由于不知道实际软管定律, 可考虑 1 点.

$$P_{oi} = p_1 + \frac{1}{2} u_1^2 + K_c \frac{1}{2} u_c^2 \quad (11)$$

K_c 是缩颈损失系数. 1 点的软管定律为

$$(p_1 - p_e) = K_B P(1) \quad (12)$$

结合方程 (8), (11) 和 (12) 得

$$\frac{Q}{A_c \sqrt{2 (P_{oi} - p_e)}} = \left[\frac{1 - \frac{K_B P(1)}{P_{oi} - p_e}}{\left[\frac{c^2}{C_1^2} + K_c \right]} \right]$$

特性曲线具有图 4 所示形状. 平直部分对应流量由 (13) 式计算. 考虑缩颈处的收缩和膨胀损失及下游摩擦损失

$$P_{oi} = p_0 + \frac{1}{2} u_0^2 + (K_e + K_c) \frac{1}{2} u_c^2 + \int_0^L \frac{P}{A} dx \quad (14)$$

K_e 是膨胀损失系数; L 是管长; $\left[\frac{P}{A} \right]$ 可作常数. 用连续方程可确定曲线转弯处的 $(p_0 - p_e)^*$ 值

$$\left[\frac{p_0 - p_e}{P_{oi} - p_e} \right]^* = 1 - \left[\frac{Q}{A_c \sqrt{2(P_{oi} - p_e)}} \right]^2 \cdot \left[\left[\frac{c}{0} \right]^2 + (K_e + K_c) + \frac{4fL}{D_0} \left[\frac{c}{2} \right]^2 \right] \quad (15)$$

$K_e = K_L \left[1 - \frac{c}{2} \right]^2$, K_L 可用文献[6]确定的值. 当 $(p_0 - p_e)$ 进一步下降到某个值 $(p_0 - p_e)^{**}$ 时, 激波开始振荡^[5]. 由于振荡开始前下游端先扁缩, 可近似认为

$$\frac{p_0 - p_e}{P_{oi} - p_e} \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{matrix} \frac{p_0 - p_e}{P_{oi} - p_e} \\ \frac{-3K_B}{P_{oi} - p_e} \end{matrix} \quad (16)$$

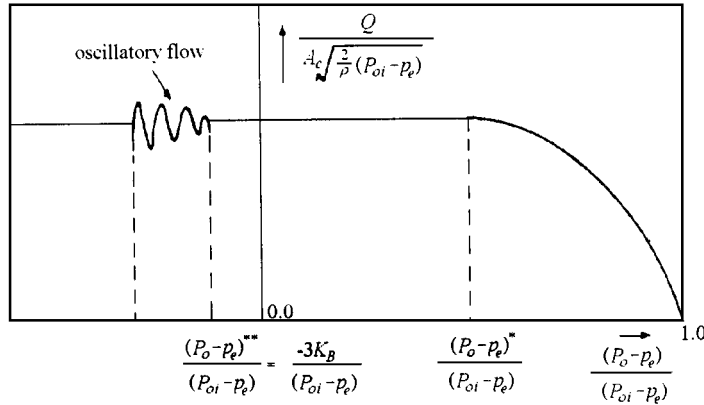


图 4 流量调节器调节特性

Fig. 4 The regulation characteristic for a flow regulator

3 流量调节器设计准则

流量调节器变量见表 1. 如不考虑二次设计变量, 流量可表示成函数

$$Q = f(A_0, L, K_B, \mu, A_c(c), p_i - p_e, p_0 - p_e) \quad (17)$$

设计任务就是适当选择各变量使该函数达到规定值并满足条件:

- 1) 管内紊流 ($Re_{D_0} \gg 1$)
- 2) 紧靠缩颈下游是超临界流 ($s_1 > 1$)

3) 出口压差范围: $\frac{(p_{0max} - p_e)}{K_B} < \frac{(p_0 - p_e)^*}{K_B}$ (激波不消失) 和 $\frac{(p_{0min} - p_e)}{K_B} > \frac{(p_0 - p_e)^{**}}{K_B}$

- 3(激波不振荡)

4) 软管足够长

例如设计一台流量调节器, 要求流量 Q 保持 17.5 l/min, 进口压力 $p_i = 3432.1$ Pa, 出口压

力 $p_0 = 490.3 \sim 1470.9$ Pa, 液体粘度和密度分别为 $\mu = 0.01$ g/cm \cdot s 和 $\rho = 1.0$ g/cm 3 . 用厚度 $t = 1$ mm, $K_B = 40$ Pa, 内径 $D_0 = 2.5$ cm 的乳胶管作软管. 取 $p_e = 490.3$ Pa. $Re_{D_0} = \frac{D_0 u_0}{\mu} = \frac{D_0 Q}{4 D_0^2} = 146\ 000 \gg 1$, 满足条件 1). 取 $\alpha = 0.2$, 由图 2 得 $c_1 = 24$ (cm/s) $\times 0.2^{-3/4} = 268$ cm/s, $u_1 = \frac{Q}{A_0} = 904$ cm/s, $S_1 = u_1 / c_1 = 3.37 > 1$, 满足条件 (2). $\frac{p_{0\min} - p_e}{K_B} = 0 > -3 = \frac{(p_0 - p_e)^{**}}{K_B}$, 取 $\alpha = 0.2$ 和 $L = 40$ $D_0 = 100$ cm, 由式 (15) 计算出 $\frac{(p_0 - p_e)^8}{K_B} = 37.1$, $p_0^* = 1971.0$ Pa, 而 $p_{0\max} = 1470.9$ Pa. 至此设计满足全部要求.

表 1 流量调节器变量

Table 1 The flow regulator variables

give variable	$Q (Q_{\max} > Q > Q_{\min})$	$p_i (p_{i\max} > p_i > p_{i\min})$	$p_0 (p_{0\max} > p_0 > p_{0\min})$	μ	
first scheme variable	$A_0 = \frac{1}{4} D_0^2$	K_B	L	p_e	c
second scheme variable	A_i	A_e	K_c		K_e

表中 A_0 , K_B 和 L 为软管参数; p_e , c 为控制变量.

4 结 论

大雷诺数下软管流量限制特性存在,它是设计流量调节器时选择变量的主要依据.

参 考 文 献

- 1 Shapiro AH. Steady flow in collapsible tubes. *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, 1977, 99: 126 ~ 147
- 2 Kececioglu I, McClurken ME, Kamm RD, et al. Steady supercritical flow in collapsible tubes. Part 1. Experimental observations. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 109: 367 ~ 389
- 3 Griffiths DJ. Steady flow through veins and collapsible tubes. *Med & Biol Engrg*, 1971, 9: 597 ~ 602
- 4 Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. New York: McGraw-Hill, 1968, 561 ~ 575
- 5 Griffiths DJ. Oscillations in the outflow from a collapsible tube. *Med & Biol Engrg*, 1977, 15: 357 ~ 362
- 6 Henry JR. National advisory comm. aeronautics, ARR No. 14F26, June 1944

THE ANALYSIS OF REGULATION CHARACTERISTICS AND THE DESIGN CRITERIA FOR THE COLLAPSIBLE TUBE FLOW REGULATOR

Du Jialing

(Thermal Engineering Laboratory, Guizhou University of Technology, Guiyang 550003, China)

Abstract The flow regulation behavior of collapsible tubes under high Reynolds number are analyzed. The flow rate as a function of downstream pressure, namely the flow regulation characteristic curve is derived. The design criteria for the flow regulator with a collapsible tube as its active element are presented.

Key words collapsible tubes, flow regulator, regulation characteristics, design criteria