作者：Airocéan[1,2]

质量含气率：$x = M''/M$

$$i = xi'' + (1-x)i'$$

$$x = \frac{i - i'}{i'' - i'}$$

容积含气率：$\beta = V''/V$

$$\beta = \frac{x/\rho''}{x/\rho'' + (1-x)/\rho'}$$

截面含气率：$\alpha = A''/A$

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$\rho' = \frac{M'}{V'}$$

$$\rho'' = \frac{M''}{V''}$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{(1-x)}{x}\frac{\rho''}{\rho'}}$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{(1-x)}{x}\frac{\rho'' W''}{\rho' W'}}$$

质量流速：$G = M/A$

$$G' = M'/A \quad G'' = M''/A$$

平均速度：

$$W' = V'/A' \quad W'' = V''/A''$$

折算速度：

$$j = \frac{V}{A} = j_{\mathrm{g}} + j_{\mathrm{l}} = \frac{V'}{A} + \frac{V''}{A}$$

$$j_{\mathrm{g}} = \alpha W'', \quad j_{\mathrm{l}} = (1-\alpha)W'$$

气相漂移速度：$W_{\mathrm{gm}} = W'' - j$

液相漂移速度：$W_{\mathrm{lm}} = W' - j$

气相漂移通量：

$$\begin{aligned} j_{\mathrm{gm}} &= \frac{A''}{A}(W'' - j) \\ &= j_{\mathrm{g}} - \alpha j \end{aligned}$$

液相漂移通量：

$$\begin{aligned} j_{\mathrm{lm}} &= \frac{A'}{A}(W' - j) \\ &= \alpha j - j_{\mathrm{g}} \end{aligned}$$

这 2 飘移通量是逆向过程，提前在后面知道好用，才弄过来的。

循环速度：两相混合物总质量流量 M 相等的液相介质流过同一截面的通量时的速度

$$W_{\mathrm{o}} = \frac{M}{\rho' A} = \frac{\rho''}{\rho'} j_{\mathrm{g}} + j_{\mathrm{l}}$$

循环倍率：单位时间内，流过通量某一截面的两相介质总质量与其气相总质量的比

$$K' = \frac{M}{M''} = \frac{1}{x} = \frac{W_{\mathrm{o}}\rho'}{j_{\mathrm{g}}\rho''}$$

滑速比：$S = W''/W'$

相对速度：$W_{\mathrm{xd}} = W'' - W'$

影响 S 的因素很多，一般根据实验得到。当两公式竖直上升流动时，由于浮力作用，使得 $W'' > W'$，$S > 1$，则 $\beta > \alpha$，下降时相反。

两相介质的流动密度：指单位时间内流过流道某一横截面的两相介质质量和体积之比

$$\rho_{\mathrm{m}} = \frac{M}{V} = \beta\rho'' + (1-\beta)\rho'$$

两相介质的真实密度：单位体积内两相介质的质量，来源于：

$$\rho'' A''\Delta L + \rho' A'\Delta L = [\rho''\alpha + \rho'(1-\alpha)]A\Delta L$$

$$\rho_{\mathrm{o}} = \alpha\rho'' + (1-\alpha)\rho'$$

两相介质比体积

$$v_{\mathrm{m}} = \frac{V}{M} = \frac{1}{\rho_{\mathrm{m}}} = xv'' + (1-x)v'$$

截面平均比体积

$$\begin{aligned} v_{\mathrm{A}} &= \frac{(1-x)v'S + xv''}{x + (1-x)S} \\ &= \frac{1}{\alpha\rho'' + (1-\alpha)\rho'} \end{aligned}$$

动量平均比体积

$$v_{\mathrm{M}} = \frac{(1-x)^2 v'}{1-\alpha} + \frac{x^2 v''}{\alpha}$$

竖直上升不加热管 P9：

泡状、弹状、搅浑、环状、（细束环状流）

竖直上升加热管 P10

单相液、泡状、弹状、环状、雾状、单相气

水平管不加热：

泡状、塞状、分层、波状、弹状、环状

单相连续方程：

$$M = \rho W A = \mathrm{Const}$$

单相动量方程、定常流动：

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\tau_{\mathrm{o}} P_{\mathrm{h}}}{A} + \rho g \sin\theta + \rho W \frac{\partial W}{\partial z}$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\tau_{\mathrm{o}} P_{\mathrm{h}}}{A} + \rho g \sin\theta + \frac{1}{A}\frac{\partial (MW)}{\partial z}$$

其中右一摩擦压降梯度，二重力压降梯度，三加速度压降梯度

单相能量方程：

$$\mathrm{d}q_{\mathrm{o}} = \mathrm{d}U + \mathrm{d}\left(\frac{W^2}{2}\right) + \mathrm{d}(pV) + g\sin\theta \mathrm{d}z$$

分相流连续：

$$\begin{aligned} M &= M' + M'' \\ &= \rho'' W'' \alpha A + \rho' W'(1-\alpha)A \\ &= \mathrm{Const} \end{aligned}$$

分相流动量：

$$\begin{aligned} -\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} =& \frac{\tau_{\mathrm{o}} P_{\mathrm{h}}}{A} + \rho_{\mathrm{o}} g \sin\theta + \\ & G^2 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left[\frac{(1-x)^2}{\rho'(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho''\alpha}\right] \end{aligned}$$

动量用得少

均相流连续方程（与焓 i 类似）：

$$v_{\mathrm{m}} = xv'' + (1-x)v'$$

均相流动量方程（能量方程和它相同）：

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} = \frac{\tau_{\mathrm{o}} P_{\mathrm{h}}}{A} + \rho_{\mathrm{m}} g \sin\theta + G^2 \frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}z}$$

截面含气率：

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right)\frac{\rho''}{\rho'} S} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-\beta}{\beta}\right) S}$$

$$Fr' = \frac{G^2}{gD\rho'^2}$$

混合相-单相并流模型：

E 均匀混合物中液相质量和总的液相质量之比，$E = 1$ 时，

$$\alpha = \beta = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'}\left(\frac{1-x}{x}\right)}$$

[1] airocean@mail.ustc.edu.cn, a@airocean.cn, airocean@foxmail.com

[2] https://airocean.cn, https://www.zhihu.com/people/airoceanlyu

$E=0$ 时:

$$\alpha=\frac{1}{1+\left(\frac{1-x}{x}\right)\left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{0.5}}$$

漂移流模型:

加尖括号的是截面取平均:

$$\langle F\rangle=\frac{1}{A}\int_A F\mathrm{d}A$$

横线是加权取平均:

$$\bar{F}=\frac{\langle\alpha F\rangle}{\langle\alpha\rangle}=\frac{\frac{1}{A}\int_A\alpha F\mathrm{d}A}{\frac{1}{A}\int_A\alpha\mathrm{d}A}$$

$$C_\mathrm{o}=\frac{\langle\alpha j\rangle}{\langle\alpha\rangle\langle j\rangle}$$

$$\langle\beta\rangle=\frac{\langle j_\mathrm{g}\rangle}{\langle j\rangle}=\left\langle\frac{V''}{V}\right\rangle$$

$$\langle\alpha\rangle=\frac{\langle\beta\rangle}{C_o+\frac{\langle\alpha W_\mathrm{gm}\rangle}{\langle\alpha\rangle\langle j\rangle}}=\frac{\beta}{C_o+\frac{\bar{W}_\mathrm{gm}}{\langle j\rangle}}$$

$$\langle\alpha\rangle=\frac{\langle\beta\rangle}{C_o+\frac{\langle\alpha W_\mathrm{gm}\rangle}{\langle\alpha\rangle\langle j\rangle}}$$

C_o 表示流速和气相含量的分布规律，$\langle\alpha W_\mathrm{gm}\rangle/\langle\alpha\rangle$ 表示局部位置的相对速度

加热通道内流动区域的划分：单相、深度欠热、轻度欠热、饱和沸腾，其中有壁面效应、容积效应，书 P50。

热平衡关系式:

$$q''\pi Dz_\mathrm{A}=Mc_\mathrm{p}(T_\mathrm{A}-T_\mathrm{i})$$

D-B 公式:

$$h_\mathrm{f}=0.023\frac{k_\mathrm{f}}{D_\mathrm{e}}Re^{0.8}Pr^{0.4}$$

$$Nu=\frac{h_\mathrm{f}D_\mathrm{e}}{k_\mathrm{f}}=\frac{q''D_\mathrm{e}}{k_\mathrm{f}(T_\mathrm{s}-T_\mathrm{B})}$$

$$St=\frac{h_\mathrm{f}}{c_\mathrm{p}W_\mathrm{o}\rho'}=\frac{q''}{Gc_\mathrm{p}(T_\mathrm{s}-T_\mathrm{B})}$$

$$Pe=\frac{Gc_\mathrm{p}D_\mathrm{e}}{k_\mathrm{f}}$$

$$Pe=Re\cdot Pr$$

$$Nu=Pe\cdot St$$

当 $Pe\le 70000$ 时:

$$Nu=\frac{q''D_\mathrm{e}}{k_\mathrm{f}\Delta T_\mathrm{B}}=455$$

$$\Delta T_\mathrm{B}=0.0022\times\frac{q''D_\mathrm{e}}{k_\mathrm{f}}$$

当 $Pe>70000$ 时:

$$St=\frac{q''}{Gc_\mathrm{p}\Delta T_\mathrm{B}}=0.0065$$

$$\Delta T_\mathrm{B}=154\times\frac{\rho''}{Gc_\mathrm{p}}$$

$$S=\frac{\bar{W}''}{\bar{W}'}=\frac{<1-\alpha>}{1\Big/\left(C_0+\frac{<\alpha W_{gm}>}{\langle\alpha\rangle<j>}\right)-\langle\alpha\rangle}$$

$$\langle\alpha\rangle=\frac{x_\mathrm{T}}{C_\mathrm{o}\left[\frac{x_\mathrm{T}(\rho'-\rho'')}{\rho'}+\frac{\rho''}{\rho'}\right]+\frac{\rho''\bar{W}_\mathrm{gm}}{G}}$$

均匀加热情况:

$$\frac{q_\mathrm{z}}{q_\mathrm{t}}=\frac{z}{L}=\frac{(i'+x_\mathrm{z}i_\mathrm{fg})-i_\mathrm{i}}{(i'+x_\mathrm{out}i_\mathrm{fg})-i_\mathrm{i}}$$

$$x_\mathrm{z}=\{i_\mathrm{i}-i'+\frac{z}{L}[(i'+x_\mathrm{out}i_\mathrm{fg}-i_\mathrm{i}]\}/i_\mathrm{fg}$$

当 $x=0$ 时，$z=L_\mathrm{o}$，

$$L_\mathrm{o}=\frac{i'-i_\mathrm{i}}{(i'+x_\mathrm{out}i_\mathrm{fg})-i_\mathrm{i}}L$$

Blasius 公式:

$$\lambda_\mathrm{lo}=0.3164Re_\mathrm{f}^{-0.25}=0.3164\left(\frac{GD}{\mu'}\right)^{-0.25}$$

均相流模型:

$$\left(\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{f}}{\mathrm{d}z}\right)_\mathrm{lo}=\frac{\lambda_\mathrm{lo}}{D}\cdot\frac{\rho'}{2}W_\mathrm{o}^2=\frac{\lambda_\mathrm{lo}}{D}\cdot\frac{G^2}{2}v'$$

$$\Phi_\mathrm{lo}^2=\left[1+x\left(\frac{v''}{v'}-1\right)\right]\cdot\left[1+x\left(\frac{\mu'}{\mu''}-1\right)\right]^{-1/4}$$

$$\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{f}}{\mathrm{d}z}=\Phi_\mathrm{lo}^2\left(\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{f}}{\mathrm{d}z}\right)_\mathrm{lo}$$

$$\frac{1}{\mu}=\frac{x}{\mu''}+\frac{(1-x)}{\mu'}$$

分相流模型:

$$\Phi_\mathrm{l/g}^2=\frac{\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{f}}{\mathrm{d}z}}{\left(\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{f}}{\mathrm{d}z}\right)_\mathrm{l/g}}$$

$$\Phi_\mathrm{l}^2=(1-\alpha)^{\frac{n-5}{2}}$$

$$X^2=\frac{\left(\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{f}}{\mathrm{d}z}\right)_\mathrm{l}}{\left(\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{f}}{\mathrm{d}z}\right)_\mathrm{g}}=\frac{\Phi_\mathrm{g}^2}{\Phi_\mathrm{l}^2}$$

$$\Phi_\mathrm{l}^2=1+\frac{c}{X}+\frac{1}{X^2}$$

系数 c 的值：tt 20, lt 12, tl 10, ll 5.

动量方程的重位压力梯度为:

$$\frac{\mathrm{d}p_\mathrm{g}}{\mathrm{d}z}=\rho_\mathrm{o}g\sin\theta$$

$$\Delta p_\mathrm{a}=G^2\left[x_\mathrm{e}\left(\frac{1}{\rho''}-\frac{1}{\rho'}\right)\right]$$

$$G_\mathrm{c}^2=-\left(\frac{\mathrm{d}V_\mathrm{m}}{\mathrm{d}p}\right)^{-1}$$

$$v_\mathrm{m}=v'(1-x)+v''x$$

$$S^*=\sqrt{v''/v'}$$

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}p}=-\left(\frac{1-x}{i_\mathrm{fg}}\frac{\mathrm{d}i'}{\mathrm{d}p}\right)-\left(\frac{x}{i_\mathrm{fg}}\frac{\mathrm{d}i''}{\mathrm{d}p}\right)$$

对于 L/D 超过 12 的长孔道，临界压比大约为 0.55。