

# 乳剂的非牛顿流体性能对单层挤压涂布工艺的影响

范 椿

(中国科学院力学研究所)

挤压涂布是美国伊思曼·柯达公司生产彩色胶片的新工艺,国外在这方面开展了大量的研究工作。我国化工部第一胶片厂于七十年代初采用了这种新技术。七十年代中中国科学院力学研究所等单位在这方面进行了科学研究。

本文只限于讨论乳剂的非牛顿流体性能对单层挤压涂布工艺的影响,并总结出对实际生产有指导意义的定性意见。

## 一、彩色胶片挤压涂布工艺简介

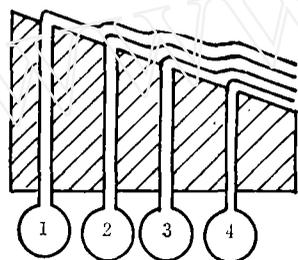


图1 坡流面挤压咀简图

挤压涂布工艺与彩色胶片生产中的老式浸涂工艺是完全不同的。其工作原理如图1所示:不同颜色的乳剂通过计量泵1、2、3、4分别进入坡流面挤压咀的不同腔室,然后流到坡流面上一层一层地叠加起来,再进入干燥装置。此种工艺过程的关键问题之一是乳剂沿斜面的流动是否稳定。如流动不稳定则乳剂层会产生波状,影响彩片质量<sup>[1]</sup>。

由于这一问题的复杂性,研究工作开始时将乳剂看成是牛顿流体,然后再考虑乳剂的非牛顿流体性质的影响。本文只限于说明乳剂的非牛顿流体性质对一层乳剂沿斜面流下时稳定

性的影响。流动情况如图2所示。斜面的倾角为 $\beta$ 。乳剂流体层的厚度为 $d$ 。 $x_1$ 轴取成与斜面平行, $x_2$ 轴与斜面垂直,原点取在未受扰动的自由表面上, $u_1, u_2$ 分别是 $x_1, x_2$ 方向的速度分量。 $\eta d$ 是扰动波的振幅。 $g$ 为重力加速度。

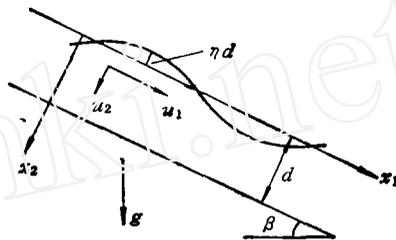


图2 流动简图

## 二、幂律流体与牛顿流体的比较

文献[2]、[3]表明三重非线性流体和幂律流体的流动将比牛顿流体更不稳定。

这里只对幂律流体而言,其本构方程为:

$$S_{ij} = -p\delta_{ij} + k(\text{II})^{(n-1)/2} A_{ij} \quad (1)$$

其中 $S_{ij}$ 为应力张量, $\delta_{ij}$ 是Kronecker张量, $A_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i$ 是Rivlin-Ericksen张量,

$$\text{II} = \sqrt{\frac{1}{2} A_{ii} A_{ii}}$$

是张量 $A_{ij}$ 的第二不变量, $p$ 是一数量, $k$ 是模量指数, $n$ 是幂律指数。

文献[3]所得之临界雷诺数是:

$$(\text{Re})_{cr} = (1 + 3n/2)[n/(1 + 2n)]^{2-n} \cot\beta \quad (2)$$

假如雷诺数 $\text{Re} > (\text{Re})_{cr}$ ,流动不稳定,反之, $\text{Re} < (\text{Re})_{cr}$ ,流动稳定。

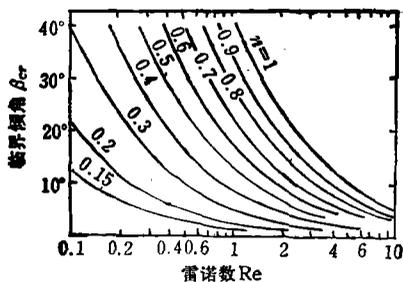


图3 临界倾角  $\beta_{cr}$  和雷诺数  $Re$  的关系  
——幂律流体 ---Yih 的三重非线性流体 ( $M = -0.2$ )

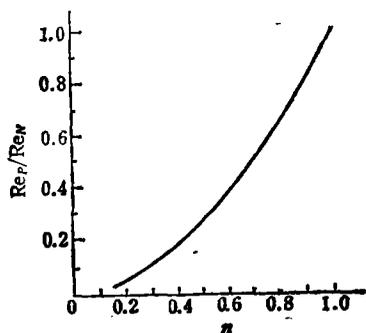


图4 在相同的  $\beta$  下,幂律流体和牛顿流体的雷诺数之比  $Re_P/Re_N$  作为  $n$  的函数

由图3可以看出:在相同的雷诺数时,幂律流体和牛顿流体的临界倾角(超过这一倾角流动将不稳定)有显著的差别。例如,若雷诺数  $Re = 1$ ,则对于牛顿流体 ( $n = 1$ ),  $\beta_{cr} = 40^\circ$ ,对于幂律流体  $n = 0.6$ ,  $\beta_{cr} = 17^\circ$ ;  $n = 0.4$ ,  $\beta_{cr} = 8^\circ$ ;  $n = 0.15$ ,  $\beta_{cr} = 1^\circ$ 。

由图4可以看出,当  $n = 0.6$  时牛顿流体的临界雷诺数是幂律流体的2.7倍,当  $n = 0.15$  时,是38倍。

从以上分析可以看出:对于无弹性的非牛顿流体,其粘度随剪切变稀的性质将使流动比牛顿流体的流动更不稳定。

### 三、粘塑性流体与牛顿流体的比较

粘塑性流体的本构方程可写成:

$$S_{ij} = -p\delta_{ij} + \{K(\Pi)^{(n-1)/2} + \tau_0/\Pi\}A_{ij}$$

$$\text{当 } \frac{1}{2} S_{ij}S_{ij} \geq \tau_0^2 \quad (3)$$

$$A_{ij} = 0 \quad \text{当 } \frac{1}{2} S_{ij}S_{ij} \leq \tau_0^2 \quad (4)$$

其中  $\tau_0$  是屈服应力。

文献[4]所得之临界雷诺数是:  
 $(Re)_{cr} = (1+n)(3n+2)(1+n+n\Theta)/(1-\Theta)[2(1+n)^2 + (4n+3)n\Theta]$  (5)  
 其中  $\Theta = \tau_0/\rho g \sin \beta$ ,  $\rho$  是乳剂的密度。

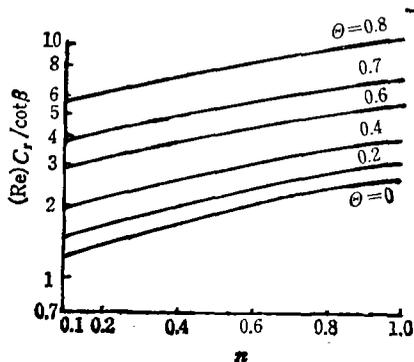


图5 不同  $\Theta$  值时,临界雷诺数  $(Re)_{cr}/\cot \beta$  作为幂律指数  $n$  的函数

由图5可以看出:任意固定一个  $n$  值,临界雷诺数  $(Re)_{cr}/\cot \beta$  将随着  $\Theta$  值的增加而增加。因此,对于粘塑性流体,其塑性将使流动比牛顿流体的流动更稳定。

### 四、粘弹性流体与牛顿流体的比较

文献[5],[6],[7]考虑了这一问题,文献[7]采用了有轻微粘弹性的广义二阶流体,其本构方程为:

$$S_{ij} = -p\delta_{ij} + k(\Pi)^{(n-1)/2}A_{ij} + a(\Pi)^{1/2}A_{ik}A_{kj} + b(\Pi)^{m/2}\delta A_{ij}/\delta t \quad (6)$$

其中:

$$\frac{\delta A_{ij}}{\delta t} = \frac{\partial A_{ij}}{\partial t} + u_k \frac{\partial A_{ij}}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} A_{ik}$$

$$+ \frac{\partial u_k}{\partial x_i} A_{kj} \quad (7)$$

以及  $a, b, l, m$  都是常数,并且  $1 \geq n > 0.6$ ,  $m \geq 2(n-1)$ 。

由于上述本构方程的流体在斜面流动中,Squire 定理成立(证明见参考文献[7]),这里只摘文献[7]中二维扰动的临界雷诺数  $R_2$ :

$$R_2 = [\cot \beta / (1+2n)] / [2/(3n+2)(1+2n) + (1-2n)B/n(m+n+2)] \quad (8)$$

其中  $B = (b/\rho d^2)(-\rho g d \sin \beta/k)^{m/n}$ 。

由图6可以看出,临界雷诺数  $R_2/\cot\beta$  随弹性参数  $|B|$  的增加或随  $n$  值的降低而降低。因此,具有轻微粘弹性的流体,其弹性和粘度随剪切变稀的性质使得流动变得比牛顿流体的流动更不稳定。

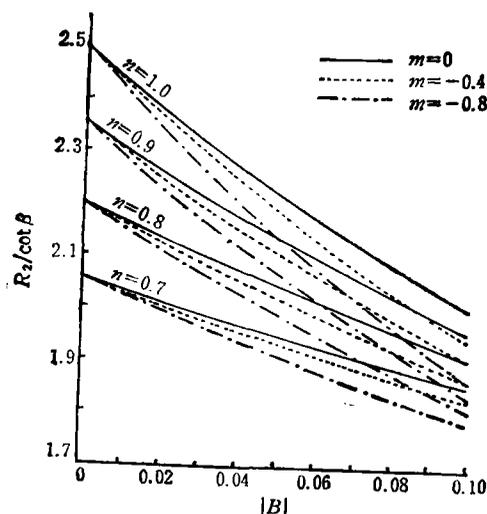


图6 对于不同的  $n$  和  $m$  值,临界雷诺数  $R_2/\cot\beta$  作为弹性参数  $|B|$  的函数

### 五、讨论

很少能见到照相胶片乳剂的非牛顿流体性质的国外资料。文献[8]认为乳剂是一种粘塑性流体,理由是:乳剂中含有卤化银物质,是一种悬浮液,而一般认为,悬浮液具有屈服应力。此文是求解二层粘塑性流体沿斜面的定常流动的速度分布、流量和液层厚度的关系式的理论分析性的文章,故没有给出乳剂的非牛顿流体性质的测量数据。

在国内,北京大学胶体化学教研室在七十年代对乳剂的粘度等进行了测量,随后河北大学也进行了这方面的工作。最近华东化工学院流变教研室对乳剂的流变性质也进行了测量。上述三个单位都认为乳剂为幂律模型,且各层

(上接第8页)

宏观结构分析的思想移植过来,准备对付微观结构发折,加上实验技术已接近于微观结构的测试水平。这一切就给固体力学和材料科学结成联盟创造了条件。当然这不是一蹴而成。复合材料力学性能的研究,在相当长的一段时间里还是解决工业中问题的主要途径。两种途径相辅相成,就可以为材料科学提供更多的服务。

的  $n$  指数不同。

从上述二、三、四节的理论分析中可以得到指导生产的定性意见。对于单层挤压涂布,从稳定性考虑最好照相胶片乳剂具有下列性质:

- (i) 具有一定的屈服应力;
- (ii) 粘度随剪切速率的变化尽可能的小;
- (iii) 弹性尽可能的小。

本文只考虑了单层非牛顿流体沿斜面流动的稳定性问题,在实际生产中还需考虑下列几点:

(i) 彩色胶片挤压涂布工艺是多层涂布,还需要在单层涂布的基础上进一步考虑多层涂布的稳定性问题。

(ii) 本文只考虑了照相胶片乳剂的非牛顿流体性能对斜面流动稳定性的影响,这是涂布工艺中质量问题的关键。还需研究照相胶片乳剂的非牛顿流体性能对进入干燥装置的车速等其他因素的影响。

(iii) 除了从流体力学角度考虑外,还需从感光要求,色彩要求等其他质量问题统筹考虑,以求最佳方案。

卞荫贵教授、陈文芳教授审阅了本文并提出了宝贵意见,作者向他们表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Wang, C. K., Seaborg, J. J. & Lin, S. P., *Phys. Fluids*, **21** (1978), 1669.
- [2] Yih, C.S., *Phys. Fluids*, **8** (1965) 1257.
- [3] 范椿,力学学报, **2**(1982), 155.
- [4] Fan Chun, *ZAMP*, **33** (1982), 181.
- [5] Gupta, A.S., *J. Fluid Mech.* **28** (1967), 17.
- [6] Gupta, A. S. & Lajpat Rai, *J. Fluid Mech.*, **33** (1968), 87.
- [7] Fan Chun, *ZAMP*, **35** (1984), 435.
- [8] Вабчин, А. И., Леви, С. М., *Ж. Научн. И Прикл. Фотогр. и Кинематогр.*, **17** (1972), 321.

(本文于1985年10月8日收到)