

有限元分析计算在涂布模具腔体中的应用

中国乐凯胶片集团公司研究院工程室：王凯

摘要：通过有限元计算软件在涂布模具腔体中的计算可知，同时变截面、变驻留间隙的模具均流效果第一；适当增加出口间隙长度 X 及驻流间隙有利于均流；驻流间隙的宽窄对均流影响很大；副腔选择合适的形状对均流有一定的影响；当高速涂布时，腔体的变化显得非常敏感，相反，低速涂布时，对腔体的要求较低。

关键词：有限元分析 **finite element analysis** 涂布模具 **coathanger dies**
均流腔 **distribution channel** 驻留间隙 **slot region of resistance**

背景资料：

乐凯公司在技术领域内，主要是乳剂和涂布，而涂布模具是整个涂布工艺的主控部位，是整台涂布机的核心，目前公司使用的涂布模具主要是从日本引进的 70 年代的技术，由于面临车速的提高，薄层涂布的应用以及乳剂配方的改变等等，目前使用的涂布模具是否适用，我们只是理论猜测，结果不得而知；来自各方报道，柯达已用了变截面衣架形腔体模具，富士使用的涂布模具层高已达 400mm，瑞士 TSE、爱克发、东方都在涂布模具上申请了各种各样的专利，根据涂布知识我们只能判断部分，孰是孰非必须通过实践检验。因为制作一套涂布模具成本价是 40-70 万元，周期是 10 个月，而签定一套模具性能的化工试车费是 40-100 万元，不可能制作许多涂布模具实物做试验，这种代价风险太大。于是为了将风险降到最底，我们于 2000 年 5 月份开始，根据乐凯公司涂布的实际情况，就涂布模具的腔体及间隙问题与梁国平老师的软件公司进行了合作。

论述：

因为模具的主要目的就是分配液体，所有涉及液体分配方面都被概括为“内部模具设计”，从进料口圆管接头到腔体，阻流间隙、出口间隙等等，具有内部几何结构设计良好的模具不仅能完成液体分配，还可以同时完成其它附加的任务。液体分配均匀度是通过测量模具出口涂到片基上液体横截面方向的均匀性来评估。

1. 关于等流量分布腔体：

在普通等截面的分布腔体中，当乳剂由计量泵送入涂布咀，通过腔体阻流间隙流出，坡流到片基表面上，沿着涂布咀宽度 L 各点的流量应该是均匀的，然而乳剂在进料端涂布厚度偏厚，沿分布腔体流动逐渐降低，到达封闭端时，涂布厚度逐渐又偏厚，这种情况在乳剂粘度较大，咀子间隙较宽时明显这是由于乳剂流动的动能转化为静压力而产生，这种缺点往往造成同一轴号不同位置的涂布银量及照相性能不均，因此需要找到一种等流量分布的新结构。

- 设 P 为乳剂进口压力 (g/cm^2)
- Q_0 为乳剂进口流量 (ml/s)
- Q 为乳剂中部的流量 (ml/s)
- R 为腔体的半径 (cm)
- L_0 为涂布咀的宽度 (cm)
- L 为涂布咀中部距进料端宽度 (cm)
- μ 为乳剂粘度 (泊)

根据数学关系： $Q_0=Q(B-L)/L_0$

$$Q=dp \pi R^4 / 8\mu dL \quad (\text{圆管内压力、流量、直径、长度及粘度的公式})$$

得到： $R^2 = k(L-L_0)$ (1)

根据公式 (1) 我们得到一种抛物线圆锥体等流量分布槽的新结构。

根据 N-S 方程 $\rho du/dt = \rho f - \nabla p$

可知距进料口越远，压力损失越大，流速越低。这就出现了涂布物料在咀子出口缝隙处出现了出口速度的不一致的问题，均流腔体——一种边界面腔体成为必要。

2. 关于驻流间隙

模具性能标准提出了模具驻留时间特性问题。举例说，如果涂布液在高速涂布时产生化学反应的话就会出现这种情况。为了保证横截面方向的相同产品性质，所有模具内外的流体路径必须相同，从而使得所有流体成分具有相同的速度、相同的压力、相同的驻留时间。短的驻留时间和狭窄的驻留时间光谱能通过模具内各处壁的高剪切应力获得。这样就产生了变截面腔体后驻留时间的一致性。

那么，边截面腔体究竟变多少？驻留间隙究竟留多少？整个咀子腔体优化到什么程度合适？我们用有限元软件进行计算，并用我们目前掌握的腔体知识进行验证。

3. 计算

3.1 涂布模具几何参数介绍

表 3.1 涂布模具几何参数

咀宽 W	[mm]	主腔两端小圆与中央两端大圆半径之比 Z
堰板高 T	[mm]	主腔中央圆弧半径 R [mm]
堰板厚 H	[mm]	最大与最小阻流间隙之差 [mm]
进料管偏心距 E	[mm]	副腔类型
出口间隙宽度 C	[mm]	副腔圆弧直径 D1 [mm]
进料管直径 D	[mm]	出口间隙长度 X [mm]
进料管长度 L	[mm]	三角区短边长度 s [mm]
圆弧到角半径 r	[mm]	三角区长边长度 l [mm]

表 3.2 涂布咀流场参数

粘度[毫帕.秒] η
密度[克/立方厘米] ρ
进口流量[千克] q
进口压力[千克/平方厘米] P

3.2; 主腔为梯形腔、圆形腔（公司现用）、衣架形变截面圆形腔的计算。

我们用该软件进行了主腔为梯形腔、圆形腔（公司现用）、衣架形变截面圆形腔的计算，见附表 3.3、表 3.4。

表 3.3

名称 参数	W2	125JP	T 形	名称 参数	W2	125JP	T 形
W	1200	1200	1200	Z	0.6	1	0.6
T	140	125	140	R	10	8	90°/85°
H	30	30	30	B	8	0	8
E	15	15	15	副腔	液滴形	*	T 型
C	0.25	0.25	0.25	D1	13	0	45°/45°
D	12	12	12	X	18	27	18
L	80	87	80	s	1	1	1
r	0	0	0	l	3	3	3
$\eta=60$ $\rho=1.03$ $q=2.563$ $P=0.75$							

表 3.4

layer	W2 [mm/s]	125JP[mm/s]	T 形[mm/s]
1	1.71	1.95	2.32
2	1.66	1.94	2.29
3	1.60	1.91	2.24
4	1.58	1.91	2.22
5	1.54	1.95	2.21
6	1.39	2.03	2.21
7	1.36	1.10	2.2
8	1.41	2.19	1.85
9	1.51	2.24	1.82

10	1.59	2.28	3.26
11	1.59	2.27	4.35
12	1.55	2.28	6.62
Ver[mm/s]	1.54	2.09	2.79

计算结果：主腔衣架形出口间隙处平均速度误差 Ver=1.54mm/s;
 公司现用模具 Ver=2.09mm/s;
 梯形腔体 Ver=2.79mm/s。

分析：在当前流场参数条件下，腔体的均流效果衣架形第一，其次为公司现用模具，第三为梯形腔体。这是因为流体进入腔体以后，受到壁对它的阻力产生了速度降和压力降，为了抵消这种现象，采用变腔体截面和变驻留间隙来完成。

结论 1：变截面、变驻留间隙的涂布模具均流效果第一

3.3；以一组参数为基准参数，其余各组只改变其中的一个参数进行计算

我们选择 W2 为基准参数，改变其中的一个参数进行计算见附表 3.5、表 3.6。

表 3.5

名称 参数	W2	C11	11K	11W1	11W4	11W6	11L1	11L2	11L3	11L4
W	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
T	140	140	140	125	140	140	140	140	140	140
H	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
E	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
C	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.2505*	0.25	0.25	0.25	0.25
D	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
L	80	80	80	70*	90*	80	80	80	80	80
r	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
R	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
B	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
副腔	液滴	液滴	圆形*	液滴	液滴	液滴	液滴	液滴	液滴	液滴
D1	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
X	18	15*	18	18	18	18	18	18	18	18
s	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
l	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$\eta=60$ $\rho=1.03$ $q=2.563$ $P=0.75$							$\eta=30*$	$q=2.7*$	$P=0.78*$	$P=0.45*$

表 3.6

Layer	W2	C11	11K	11W1	11W4	11W6	11L1	11L2	11L3	11L4
1	1.71	1.64	1.80	1.95	2.24	1.89	1.75	1.97	1.81	1.32
2	1.66	1.63	1.79	1.94	2.23	1.87	1.74	1.96	1.76	1.30
3	1.60	1.60	1.77	1.90	2.20	1.83	1.71	1.94	1.79	1.27
4	1.58	1.61	1.77	1.90	2.23	1.82	1.71	1.95	1.77	1.26
5	1.54	1.65	1.79	1.93	2.32	1.82	1.74	2.00	1.75	1.35

6	1.39	1.73	1.83	2.00	2.44	1.81	1.81	2.09	1.83	1.42
7	1.36	1.82	1.85	2.07	2.44	1.84	1.88	2.18	1.89	1.50
8	1.41	1.92	1.95	2.16	2.45	1.91	1.96	2.28	1.97	1.57
9	1.51	2.07	1.94	2.14	2.10	1.97	2.05	2.35	2.01	1.64
10	1.59	2.19	1.83	2.07	2.02	2.01	2.12	2.41	2.04	1.65
11	1.59	2.22	1.74	1.98	1.96	2.00	2.12	2.42	2.04	1.62
12	1.55	2.23	1.52	1.84	1.86	2.00	2.10	2.42	2.01	1.29
Ver [mm/s]	1.54	1.86	1.80	1.99	2.21	1.90	1.89	2.16	1.89	1.43
	2	4	3	7	9	6	5	8	5	1

结果：优劣依次为 11L4, W2, 11K, C11, 11L1, 11L3, 11W6, 11W1, 11L2, 11W4。

分析：不论是增加出口间隙及驻流间隙还是减小压力减小流量都是为了减小流体的动能,使流体能较平稳地往前流动。但当动能小于它的重力势能时,将会出现回流现象。而副腔的作用相当于缓冲罐,在一定范围内其截面形状有一定的影响。

- 结论 2:**
- (1) 适当增加出口间隙长度 X 及驻流间隙有利于均流;
 - (2) 驻流间隙的宽窄对均流影响很大;
 - (3) 副腔选择合适的形状对均流有一定的影响,但不是很大;
 - (4) 进料口过长或过短都不好;
 - (5) 当压力减小时,有利于均流;反之,不利与均流
 - (6) 进咀流量适当减小时,有利于均流。

3.4: 改变流场参数

我们把流场情况调整后计算的一组数据附表 3.7、表 3.8。

表 3.7

名称 参数	125JP	140L	140W	125W
W	1200	1200	1200	1200
T	125*	140	140	125*
H	30	30	30	30
E	15	15	15	15
C	0.25	0.25	0.25	0.25
D	12	12	12	12
L	87*	80	80	75*
r	0	0	0	0
Z	1*	1	0.6	0.6
R	8*	10	10	10
B	0	8	8	8
副腔	*	液滴	液滴	液滴
D1	0*	16	12	0*
X	27*	17*	18*	32*
s	1	1	1	1
l	3	3	3	3

$\eta=10$	$\rho=1.03$	$q=3.18$	$P=0.5$
-----------	-------------	----------	---------

表 3.8 [mm/s]

layer	125JP	140L	140W	125W
1	1.78	1.99	1.94	1.82
2	1.78	1.98	1.94	1.83
3	1.77	1.97	1.92	1.82
4	1.76	2.00	1.91	1.82
5	1.79	2.07	1.94	1.87
6	1.85	2.16	2.08	1.95
7	1.94	2.25	2.16	2.05
8	2.03	2.30	2.13	2.15
9	2.08	2.37	2.00	2.20
10	2.12	2.33	2.11	2.18
11	2.09	2.37	2.09	2.13
12	2.06	1.99	1.99	2.22
Ver	1.92	2.15	2.02	2.00

结果：我公司现用模具情况较好，而双腔体无明显优势。而且通过云图我们观察到双腔模具在驻流间隙上出现了回流现象。

分析：因为高速涂布时，进口压力和流量都大于低速涂布，根据结论 1、结论 2 就可解释这种现象

结论 3：当高速涂布时，腔体的变化显得非常敏感；相反，低速涂布时，对腔体的要求较低。

综合以上计算结果我们的结论是：

同时变截面、变驻留间隙的模具均流效果第一；适当增加出口间隙长度 X 及驻流间隙有利于均流；驻流间隙的宽窄对均流影响很大；副腔选择合适的形状对均流有一定的影响，但影响较小；当高速涂布时，腔体的变化显得非常敏感，相反，低速涂布时，对腔体的要求较低。因为当压力减小时，进咀流量适当减小时，有利于均流；反之不利与均流。

以上的计算结果与我们掌握的模具腔体的知识符合，尤其是本公司现用涂布模具的计算结果与实际使用情况完全符合，软件可以指导我们的模具设计工作。

以上是我在用北京火箭软件公司的有限元计算软件对涂布模具腔体计算中的一些观点，有不妥之处欢迎交流，指正。

参考书目

- 《粘性流体力学》——章梓雄
清华大学出版社
- 《非牛顿流体本构方程和计算解析理论》——韩式方
科学出版社
- 《有限单元法基本原理和数值方法》——邵敏
清华大学出版社
- 《有限元程序自动生成系统》——梁国平

Abstract: Using a finite element analysis software package, calculations have been carried out in terms of coat-hanger dies. The result shows that by changing cross-sections and the slot of flow resistance in dies at the same time the effect of uniform fluid is the best. A proper increase in outlet slot X and the slot of flow resistance is good for uniform fluid. The width of slot of flow resistance affects uniform fluid deeply. Uniform fluid is affected to some extent by the proper shape of a sub-channel. Uniform fluid is highly sensitive to the change of distribution channels in terms of high speed coating. Low speed coating means less demand for distribution channel.

Key words: Finite element changing cross-section distribution channel slot of flow resistance