

# 啮合式转子密炼机中转子的模拟和设计

尹清珍, 宗殿瑞  
(青岛化工学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 对聚合物在啮合式转子密炼机中的流动进行了模拟分析, 并分析了 4 种不同类型啮合式转子的混炼作用, 还将模拟分析结果与分离式转子密炼机的实验结果进行了比较。结果表明, 啮合式转子密炼机的填充因数比分离式转子密炼机大。

关键词: 啮合式; 转子; 密炼机; 混炼; 设计

中图分类号: T Q330. 4<sup>+</sup>4      文献标识码: A      文章编号: 1000-890X(2001)05-0287-06

F. H. 本伯里在其早期的专利中建立了现代密炼机的设计基础, 这种设计方式目前已被全世界的密炼机制造商所接受。本伯里设计的这种密炼机的转子是分离的<sup>[1]</sup>。20 世纪 30 年代, 在本伯里密炼机的基础上, Francis Shaw Werner 和 Pfleiderer 发明了用于橡胶混炼的啮合式转子密炼机, 它如同双辊开炼机, 不同的是它有加强胶料纵向运动的凸棱螺旋<sup>[2]</sup>。到 70 年代, 凸棱转子又有所改进, 其性能已明显优于分离式转子。

本工作对聚合物在啮合式转子密炼机中的流动进行了模拟分析。

## 1 模型的建立

本工作中所用的模型是建立在柱坐标中以公式表示的流体动力理论基础上的。柱坐标的坐标轴与其中一个转子的轴线重合。密炼机中的物料流动可以表述为

$$\boldsymbol{V} = V_{\theta}(r)\boldsymbol{e}_{\theta} + V_z(r)\boldsymbol{e}_z \tag{1}$$

式中  $\boldsymbol{V}$ ——流体的流动速度;

$\theta, z, r$ ——柱坐标参数;

$\boldsymbol{e}$ ——单位矢量;

径向的速度分量可忽略不计,  $\theta$  和  $z$  方向上的速度梯度远小于  $r$  方向的速度梯度, 即

$$\frac{\partial V_i}{\partial r} \gg \frac{\partial V_i}{\partial z} \tag{2a}$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial r} \gg \frac{\partial V_i}{\partial \theta} \tag{2b}$$

运动方程有以下形式:

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\partial z} \frac{\partial}{\partial r}(r, \sigma_{zr}) = 0 \tag{3a}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{\partial z} \frac{\partial}{\partial r}(r^2, \sigma_{\theta r}) = 0 \tag{3b}$$

式中  $P$ ——压力;

$\sigma$ ——剪切应力。

假设高聚物熔融为牛顿流体。因为非牛顿流体的剪切粘度对密炼机转子的捏炼特性几乎没有影响<sup>[3]</sup>, 所以可得到

$$\sigma_{\theta r} = \eta r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_{\theta}}{r} \right) \tag{4a}$$

$$\sigma_{zr} = \eta \frac{\partial V_z}{\partial r} \tag{4b}$$

## 2 分析计算方法

### 2.1 转子与室壁之间的聚合物

转子与室壁之间分析时的边界条件是:

$$V_z(R_i, z) = 0 \tag{5a}$$

$$V_{\theta}(R_i, z) = 0 \tag{5b}$$

$$V_{\theta}(R_0, z) = U_0 \tag{5c}$$

$$V_z(R_0, z) = 0 \tag{5d}$$

式中  $R_i$ ——转子半径;

$R_0$ ——密炼室内径。

式(1)中的速度可由式(3)~(5)确定:

作者简介: 尹清珍(1950-)女, 山东德州人, 青岛化工学院副教授, 主要从事高分子材料加工机械和模具设计的教学及研究工作。

$$V_{\theta}(r) = U_{\theta} \left[ \frac{r/R_i - R_i/r}{R_0/R_i - R_i/R_0} \right] + \frac{R_i}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial \theta} \left[ \frac{r}{R_i} \ln \frac{r}{R_i} - \frac{(R_0/R_i) \ln(R_0/R_i)}{R_0/R_i - R_i/R_0} \left( \frac{r}{R_i} - \frac{R_i}{r} \right) \right] \quad (6a)$$

$$V_z(r) = -\frac{R_i^2}{4\eta} \frac{\partial P}{\partial z} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 + \frac{(R_0/R_i)^2 - 1}{\ln(R_0/R_i)} \ln \frac{r}{R_i} \right] \quad (6b)$$

从速度场的变动中可以计算出:

$$R_i^4 - \frac{(R_0^2 - R_i^2)^2}{\ln(R_0/R_i)} \quad (8c)$$

$$q_{\theta} = \int_{R_i}^{R_0} V_{\theta} dr = \frac{U_{\theta}}{2} (R_0 - R_i) f_{d\theta} -$$

$$\frac{(R_0 - R_i)^2}{12\eta} \frac{\partial P}{\partial \theta} f_{p\theta} \quad (7a)$$

$$q_z = \int_{R_i}^{R_0} \frac{r}{R^*} V_z dr = -\frac{R_0}{R^*} \frac{(R_0 - R_i)^3}{12\eta} \frac{\partial P}{\partial z} f_{pz} \quad (7b)$$

式中  $R^*$  ——特性半径;

$f_{d\theta}$ ,  $f_{p\theta}$  和  $f_{pz}$  ——弯曲形状因子。

弯曲形状因子的定义如下:

$$f_{d\theta} = \left[ 1 - \frac{2R_i^2 \ln(R_0/R_i)}{R_0^2 - R_i^2} \right] \frac{R_0}{R_0 - R_i} \quad (8a)$$

$$f_{p\theta} = \frac{R_0^2}{(R_0 - R_i)^2} \left\{ \frac{3}{2} \left[ 1 - \left( \frac{R_i}{R_0} \right)^2 \right] - \frac{6R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \left( \ln \frac{R_0}{R_i} \right)^2 \right\} \quad (8b)$$

$$f_{pz} = \frac{3}{4} \frac{1}{R_0(R_0 - R_i)^3} \left[ R_0^4 -$$

$$V_{\theta}(r) = \frac{U_{\theta 1} r}{R_i} - \frac{R_i U_{\theta 1} - R_0 U_{\theta 2}}{R_0} \frac{r/R_i - R_i/r}{R_0/R_i - R_i/R_0} - \frac{R_i}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial \theta} \left[ \frac{(R_0/R_i) \ln(R_0/R_i)}{R_0/R_i - R_i/R_0} \left( \frac{r}{R_i} - \frac{R_i}{r} \right) - \frac{r}{R_i} \ln \frac{r}{R_i} \right] \quad (12a)$$

$$V_z(r) = -\frac{R_i^2}{4\eta} \frac{\partial P}{\partial z} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_i} \right)^2 - \frac{(R_0/R_i)^2 - 1}{\ln(R_0/R_i)} \ln \frac{r}{R_i} \right] \quad (12b)$$

流动变量是:

$$q_{\theta} = \int_{R_i}^{R_0} V_{\theta} dr = U_{\theta 1} (R_0 - R_i) - \frac{1}{2} (R_0 U_{\theta 2} - R_i U_{\theta 1}) f_{d\theta} - \frac{(R_0 - R_i)^2}{12\eta} \frac{\partial P}{\partial \theta} f_{p\theta} \quad (13a)$$

$$q_z = \int_{R_i}^{R_0} \frac{r}{R^*} V_z dr = -\frac{(R_0 - R_i)^3}{12\eta} \frac{\partial P}{\partial z} f_{pz} \quad (13b)$$

啮合型转子啮合区的平衡方程与 Hu 等<sup>[3]</sup>所提出的关于分离式转子密炼机的方程相似, 不同之处是增加了  $U_{\theta}(R_0 - R_i)$  一项, 这项与

移动边界的正位移有关。

在转子啮合区的上顶点, 流体从两转子间加入。

$$q_{\theta}^{IR}(\theta - \Delta\theta, z)\Delta z + q_{\theta}^{IL}(\theta - \Delta\theta, z)\Delta z + q_z^{IL}(\theta, z - \Delta z)R^* \Delta\theta + q_z^{IR}(\theta, z - \Delta z)R^* \Delta\theta = q_{\theta}^{IR}(\theta + \Delta z, z)\Delta z + q_z^{IR}(\theta, z + \Delta z)R^* \Delta\theta \quad (14)$$

$q_{\theta}^{IR}$  与  $q_{\theta}^{IL}$  是来自右和左传动转子上的单位流量,  $q'$  是两转子间的流量。转子间有如下方程:

转子与室壁之间的动平衡  $q_{\theta}$  和  $q_z$  有如下关系:

$$q_{\theta}(\theta - \Delta\theta, z)\Delta z + q_z(\theta, z - \Delta z)R^* \Delta\theta = q_{\theta}(\theta + \Delta\theta, z)\Delta z + q_z(\theta, z + \Delta z)R^* \Delta\theta \quad (9)$$

## 2.2 转子之间的聚合物

对转子之间聚合物进行分析时采用的边界条件是:

$$V_z(R_i, z) = V_z(R_0, z) = 0 \quad (10a)$$

$$V_{\theta}(R_i, z) = U_{\theta 1} \quad (10b)$$

$$V_{\theta}(R_0, z) = U_{\theta 2} \quad (10c)$$

其中

$$U_{\theta 1} = 2\pi R_i N \quad (11a)$$

$$U_{\theta 2} = 2\pi R_0 N \quad (11b)$$

式中  $N$  ——转子速度(近似值)。

由式(3), (4)和(10)决定的速度场如下:

$$q_0^I(\theta - \Delta\theta, z)\Delta z + q_z^I(\theta, z - \Delta z)R^* \Delta\theta = q_0^I(\theta + \Delta\theta, z)\Delta z + q_z^I(\theta, z + \Delta z)R^* \Delta\theta \quad (15a)$$

如果按 Hong<sup>[4]</sup> 的假设分析转子间区域的正位 移流动影响, 那么式(15a)必须修改为

$$q_0^I(\theta - \Delta\theta, z)\Delta z + U_\theta(R_0 - R_i)_{(\theta - \Delta\theta, z)} + q_z^I(\theta, z - \Delta z)R^* \Delta\theta = q_0^I(\theta + \Delta\theta, z)\Delta z + U_\theta(R_0 + R_i)_{(\theta + \Delta\theta, z)} + q_z^I(\theta, z + \Delta z)R^* \Delta\theta \quad (15b)$$

在下顶点, 流体借助两转子排出, 必须被考虑为

$$q_0^I(\theta - \Delta\theta, z)\Delta z + q_z^I(\theta, z - \Delta z)R^* \Delta\theta = q_0^{IR}(\theta + \Delta\theta, z)\Delta z + q_0^{II}(\theta + \Delta\theta, z)\Delta z + q_z^{IL}(\theta, z + \Delta z)R^* \Delta\theta + q_z^{IR}(\theta, z + \Delta z)R^* \Delta\theta \quad (16)$$

3 分析计算结果

图 1~4 所示为 4 种不同类型的啮合式转子。

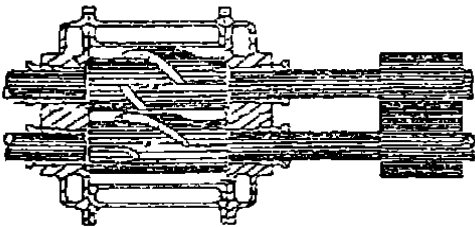


图 1 A 型啮合式转子

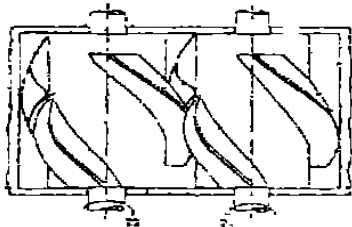


图 2 B 型啮合式转子

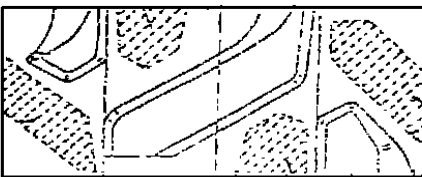


图 3 C 型啮合式转子

图 1~4 所示的转子图例是他人设计的, 我们通过图纸确定了转子的尺寸。转子凸棱高度  $H$  与凸棱处转子半径  $R$  的比值取 0.337; 室壁与转子凸棱间隙  $\delta$  与  $R$  的比值假定 4.6

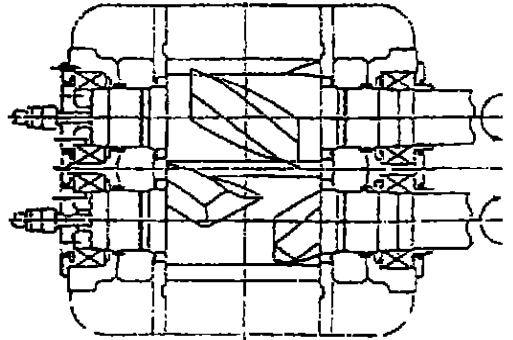


图 4 D 型啮合式转子

$\times 10^{-2}$ ; 转子间间隙  $\Delta$  与  $R$  的比值取  $2.3 \times 10^{-2}$ 。

与确定式(7)和(13)中的单位量  $q_z(\theta, z)$  和  $q_0(\theta, z)$  一样, 本工作中的计算确定了整个密炼室的压力场。在整个密炼室中, 把这些变量集中到 3 个因子上, 它们分别是: 沿转子的纵向流量  $Q_L$ , 绕转子的周向流量  $Q_C$  和流体在上面两室壁及另一转子间分散流动的流量  $Q_D$ 。进而引入 3 个新的参数  $F_L, F_C$  和  $F_D$ :

$$F_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_C + Q_D} \quad (17a)$$

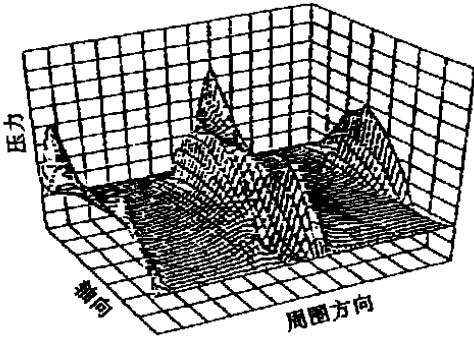
$$F_C = \frac{Q_C}{Q_L + Q_C + Q_D} \quad (17b)$$

$$F_D = \frac{Q_D}{Q_L + Q_C + Q_D} \quad (17c)$$

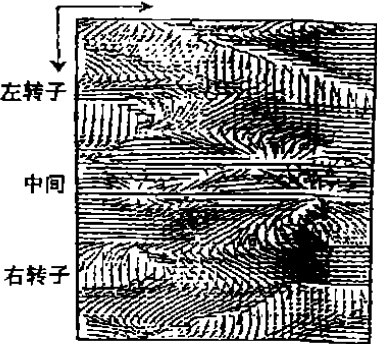
$F_L$  为纵向流动参数, 是单调增函数;  $F_C$  为周向流动参数;  $F_D$  为法向流动参数。

由式(17)可见,  $F_L + F_C + F_D = 1$ 。

通过式(9), (13)和(16)计算来描述的 A 型转子压力场及运动场如图 5 所示。相应地, B, C 和 D 型转子的压力场和运动场描述如图 6~8 所示。

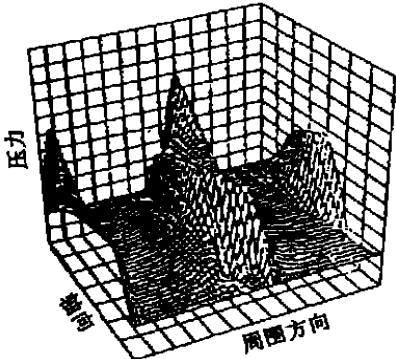


(a) 压力场

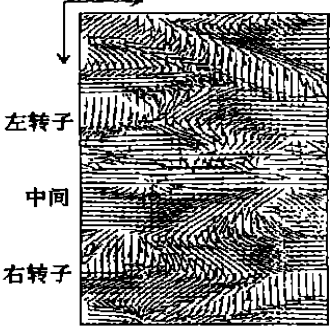


(b) 流动场

图 5 A 型转子的压力场和流动场

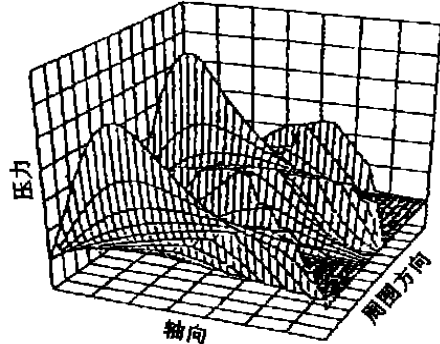


(a) 压力场

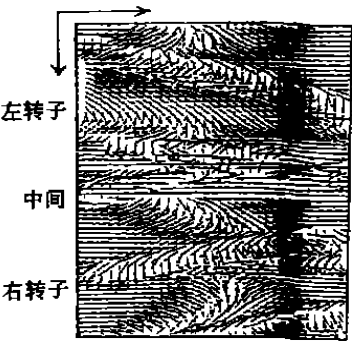


(b) 流动场

图 7 C 型转子的压力场和流动场

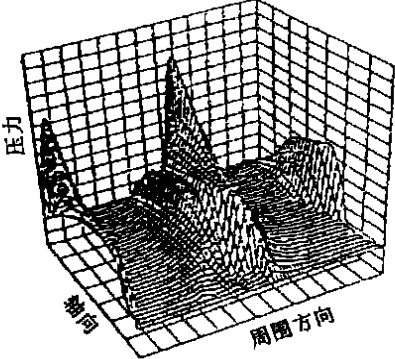


(a) 压力场

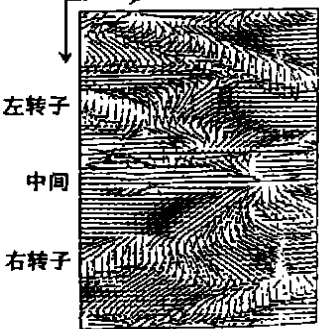


(b) 流动场

图 6 B 型转子的压力场和流动场



(a) 压力场



(b) 流动场

图 8 D 型转子的压力场和流动场

由图 5~8 可见, A 型转子使产量上升, 而同时引起巨大的环流及高度剪切流量。其它 3 种转子则引起了更大的纵向流动, 对混炼起了更大的作用。

4 讨论

4.1 啮合式与分离式转子的比较

表 1 将啮合式转子与经典的二棱和四棱转子的流动特性进行了比较。

表 1 不同转子的流动特性

| 项目        | 转子规格  |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | A 型   | B 型   | C 型   | D 型   | 二棱    | 四棱    |
| 转子类型      | 啮合    | 啮合    | 啮合    | 啮合    | 分离    | 分离    |
| $V_A/V_T$ | 0.127 | 0.261 | 0.216 | 0.286 | 0.474 | 0.424 |
| $F_L$     | 0.231 | 0.600 | 0.434 | 0.429 | 0.321 | 0.398 |
| $F_D$     | 0.148 | 0.074 | 0.131 | 0.039 | 0.005 | 0.014 |
| $F_C$     | 0.621 | 0.326 | 0.435 | 0.532 | 0.674 | 0.588 |

注:  $V_A$  为混炼室有效容积;  $V_T$  为转子体积。

对于代表法向分散流动的  $F_D$  值, A 型转子最大, C 型转子次之, 最低的是 D 型转子。对代表纵向捏炼程度的  $F_L$  值来说, B 型转子最大, C 型转子次之, D 型转子最低。相对于分离转子来说, 啮合式转子的  $F_D$  值更高一些, 这反映出其更高的混炼水平。B、C 和 D 型啮合式转子比分离式转子有着更高的  $F_L$  值, 而 A 型转子的  $F_L$  值较低, 因而混炼能力较弱。

由表 1 还可以看出, 与预测的一样, 混炼效果最佳的为 B 和 C 型转子, A 型转子由于  $F_L$  值太小而落后(与凸棱设计有关), 而 D 型转子却是由于  $F_D$  太小而落后(凸棱没有足够的上表面)。

表 1 还将二棱和四棱转子与啮合型转子进行了比较。分离转子的  $V_A/V_T$  值过高, 大约是 D 型转子的 1.5 倍, 是 A 型转子的 3~4 倍。对分离式转子密炼机来说,  $F_D$  值在 3~30 变化。二棱与四棱转子的混炼能力要落后于所有的啮合式转子密炼机。四棱转子在计算结果上要比二棱转子优越。

4.2 产量分析

像  $F_L$  与  $F_D$  这些参数之间的单独比较不会与密炼机的总体性能比较相一致, 特别是在比较啮合式与分离式转子时。我们尝试了去确

定一个包含机械参数和运动参数的量——密炼室单位体积物料混炼率  $S$ , 或称之为“表观产量”, 它可以表述为

$$S = \frac{V_A}{V_T} \Phi_{F_D} f(F_L) \tag{18a}$$

式中  $\Phi$ ——填充因数。

对一个近似估计的量来说, 可以将  $f(F_L)$  替换为  $F_L^\alpha$ , 即

$$S = \frac{V_A}{V_T} \Phi_{F_D} F_L^\alpha \tag{18b}$$

取  $F_L^\alpha$  为 1.0 和 0.5, 代入式 18(b) 计算各种转子的  $S$  值, 结果列于表 2。

表 2 不同转子的表观产量

| 转子规格 | 转子类型 | 表观产量 $S \times 10^3$ |              |
|------|------|----------------------|--------------|
|      |      | $\alpha=1.0$         | $\alpha=0.5$ |
| A 型  | 啮合   | 4.2                  | 9.0          |
| B 型  | 啮合   | 10.5                 | 11.0         |
| C 型  | 啮合   | 11.0                 | 18.6         |
| D 型  | 啮合   | 5.7                  | 7.3          |
| 二棱   | 分离   | 0.57                 | 1.30         |
| 四棱   | 分离   | 1.66                 | 3.80         |

在相似的试验研究条件下, A 型转子密炼机的生产能力要比分离式转子密炼机高 2~3 倍。然而我们的计算和比较没有包括排放混炼胶及为下一次密炼装入新配料所需的时间。这也是对产量估计过高的原因。

5 结语

通过理论分析计算和试验结果比较得知, 啮合式转子密炼机的混炼效果和生产能力都明显优于分离转子密炼机。同是啮合式转子密炼机, 转子的结构不同, 生产能力也有不小的差别, B 和 C 型为性能较优的啮合式转子。

参考文献:

[1] White J L. Development of internal-mixer technology for the rubber industry [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1992, 65(3): 527.

[2] White J L. Rubber Processing: Technology, Materials and Principles[M]. Hanser, Munich, 1995. 121.

[3] HU B, White J L. The physics of rubber elasticity [J]. Kautsch. Gummi. Kunstst., 1996, 49: 285.

[4] Hong M H, Ph D. Dissertation in Polymer Engineering [M]. Akron: University of Akron, 1996. 36.

## Simulation and design of rotor in mixer with interlocking rotors

YIN Qing-zhen, ZONG Dian-rui

(Qingdao Institute of Chemical Technology, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** The flow of polymer in an internal mixer with interlocking rotors was analysed by simulation, and the mixing effects of four types of interlocking rotors were investigated. The results from the simulation analysis were compared to those from the mixer with separated rotors. It was found that the filling factor of interlocking rotor mixer was greater than that of separated rotor mixer.

**Keywords:** interlocking; rotor; internal mixer; mixing; design

### SBR 胶乳应用前景看好

中图分类号: TQ330.1 文献标识码: D

SBR 胶乳是合成橡胶工业的主要产品之一, 其产量占合成橡胶总产量的 17% ~ 20%, 广泛应用于地毯、造纸等领域, 具有较好的市场前景。我国现有 SBR 胶乳生产装置 5 套, 总生产能力约 14 万  $t \cdot a^{-1}$ 。其中高桥-巴斯夫公司生产规模最大, 生产能力为 11 万  $t \cdot a^{-1}$ 。另外齐鲁石化公司生产能力为 1 万  $t \cdot a^{-1}$ , 兰州化学工业公司生产能力为 6 000  $t \cdot a^{-1}$ , 燕山石化公司生产能力为 5 000  $t \cdot a^{-1}$ , 山东淄博合力胶乳公司生产能力为 5 000  $t \cdot a^{-1}$ , 其余的厂家生产规模较小。目前我国生产的牌号只有几个, 产品无竞争力。

我国 SBR 胶乳绝大部分用于造纸和地毯领域。我国现有大型地毯厂 50 多家, 生产能力超过 1.2 亿  $m^2 \cdot a^{-1}$ , 每年需 SBR 胶乳 8.4 万 t; 涂布纸生产能力已超过 60 万  $t \cdot a^{-1}$ , 每年需 SBR 胶乳 6 万 t, 以上 2 个领域对 SBR 胶乳年需求约 14.4 万 t。

随着我国涂布纸和纸板市场需求不断增长, 对 SBR 胶乳的需求量逐年增长。为满足市场对 SBR 胶乳的需求, 每年均从国外进口大量 SBR 胶乳。2000 年 SBR 胶乳进口已达 8 万 t, 进口国主要是韩国和印度尼西亚。由于我国 SBR 胶乳的需求缺口很大, 一些国外公司纷纷看好这一市场, 或与我国有关企业合作、合资生

产 SBR 胶乳, 或提高在我国开业企业的生产能力, 积极扩大市场占有率。

世界最大的 SBR 胶乳生产商美国道化学公司在张家港兴建 SBR 胶乳生产基地, 生产能力为 2.2 万  $t \cdot a^{-1}$ , 计划于 2002 年投产。高桥-巴斯夫公司日前计划再次将 SBR 胶乳的年生产能力增加 5 万 t, 使其年生产能力达到 16 万 t。高桥-巴斯夫公司在 2000 年 3 月刚将其生产能力由 5 万  $t \cdot a^{-1}$  增加到 11 万  $t \cdot a^{-1}$ , 此举显示出该公司对我国 SBR 市场容量充满信心。法国莱太西亚公司决定投资 3 000 万美元, 独资在我国镇江动工兴建一套 10 万  $t \cdot a^{-1}$  的 SBR 生产装置, 计划近期开工建设, 力争在 2002 年建成投产, 所生产的 SBR 胶乳产品 80% 供应邻近的金东纸业公司及其它企业。

另外, 目前我国还没有丁苯吡胶乳生产企业, 每年需从国外进口 2 万 t 以上丁苯吡胶乳满足国内市场需求。几年前河南等地有关生产厂曾数次拟采用吉化公司研究院的技术建万吨级丁苯吡胶乳装置, 目前尚无结果。

目前我国 SBR 胶乳生产技术与国外先进水平相比还有差距, 新产品的开发也较滞后, 市场竞争的能力亦不强。我国 SBR 胶乳生产企业要认真分析国内外市场, 积极引进世界先进技术和设备, 努力开发新产品, 满足我国不断增长的市场需求。

(摘自《中国化工信息》, 2001-02-05)