

密炼机混炼胶粘度预测数学模型的建立^{*}

朱 锋 峰 张 海 贺德化 马铁军 陈 薇

(华南理工大学, 广州 510641)

蒋 辛 魏向阳 沈杏发

[上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司载重轮胎厂 200245]

摘要 依据密炼机流变学理论, 运用回归分析方法, 从单台密炼机的角度, 研究了混炼胶的粘度 μ 与排胶

功率 P 、转速 N 和填充因数 γ 之间的关系, 即 $\mu = \frac{2P}{\pi N^2 A}$; 建立了单台机粘度预测模型, 即 $\mu = \frac{P}{N^2} \times 1\,000 \times (-138\,729 + 151\,444/\sqrt{\gamma} - 20\,681.1/\gamma^2)$ 。此模型预测值与实测值之差的绝对值的平均值为 1.410 5 个门尼, 且预测结果与按每种胶料所建模型的预测值非常接近。

关键词 粘度, 密炼机, 混炼胶, 填充因数

前文^[1]介绍了在密炼机橡胶混炼过程中, 使用微机监控系统采集有关数据, 再根据不同种类的胶料建立相应预测粘度的数学模型, 收到了良好的预测效果。但是, 1 台密炼机通常要混炼数十种胶料, 若对各型号密炼机上混炼的每种胶料都要建立预测粘度的数学模型, 可想而知建模的工作量是非常大的。因此经过进一步的研究, 又建立了固定转速单台机预测粘度的数学模型。它适用于在该密炼机上混炼的各种胶料的粘度预测, 但要求混炼时转子的转速都相同。受其启发, 以密炼机流变学理论为依据, 当密炼机转子的转速不同时, 又建立了单台机粘度预测的数学模型。下面介绍我们所做的一些初步工作。

1 实验设备与数据

本试验是在转子转速可调控的 BB370 型密炼机上进行的, 随机采集两批样本, 分别为 86 和 18 个。每个样本观测值共有 4 项指标, 即排胶时转子轴的功率 P 、转子的转速 N 、填充因数 γ 和胶料门尼粘度 μ 。 P 、 N 和 γ 值是由华南理工大学自制的 MLJ-300 型密炼机智能控制系统在生产过程中自动记录的, 而 μ 值是按 GB/T 1232—92 标准快检的结果。

2 BB370 型密炼机粘度预测模型的建立

根据密炼机流变学理论公式^[2], 密炼机转子轴的瞬时功率 P 与密炼室胶料的粘度 μ 有如下的关系:

$$\mu = \frac{2P}{\pi N^2 A}$$

式中, A 只是与密炼机几何尺寸有关的常数。对于某一台密炼机而言, A 是一固定常数, 因此 μ 并不依赖于胶料的种类, 它只是同 P/N^2 呈正比关系。但该公式是在假定 γ 恒等于 1 的前提下成立的, 即假定密炼机内部完全充满。而在实际生产中, 每种配方的 γ 并非恒等于 1, 因此在建立粘度预测模型时, 还应考虑 γ 这一因素。

利用首批获得的 86 个样本数据, 计算出 μ 与 γ 的样本相关因数为 -0.508 460, γ 与 P/N^2 的样本相关因数为 -0.424 412。由此看出, μ 和 γ 是相关的, 而 γ 和 P/N^2 并不是高度相关的, 因此应将 γ 引入粘度预测模型中。

在 BB370 型密炼机上第 1 批取得的 86 个样本点分别来自 3 种不同的胶料, 其中有 27 个样本点来自第 1 种胶料, 36 个样本点来自第 2 种胶料, 23 个样本点来自第 3 种胶料。由于 BB370 型密炼机的转速可调控, 混炼这 3 种胶料时密炼机的转速也不完全相同, 于是建立如下形式的粘度预测模型:

$$\mu = \frac{P}{N^2} \times 1\,000 \times (C_1 + C_2/\sqrt{\gamma} + C_3/\gamma^2)$$

^{*} 国家自然科学基金资助项目。
作者简介 朱锋峰, 女, 35 岁。讲师。1990 年毕业于西安交通大学应用数学系, 获理学硕士学位。

利用 STATISTICA 统计软件的非线性回归过程, 将得到的 C_1 , C_2 和 C_3 三个参数估计的结果列于表 1^[3]。

表 1 非线性回归结果

项 目	C_1	C_2	C_3
估计值	- 138 729	151 444	- 20 681. 1
标准误差	20 237. 13	22 133. 54	3 053. 493
$t(83)$	- 6. 855 19	6. 842 285	- 6. 772 94
p -值	0. 00000	0. 000000	0. 00000

注: μ 的损失= (观测值- 预测值)², 总损失= 209. 509 50;
 $R=0. 870 14$; 解释的方差= 75. 715%。

因此, 粘度预测模型为:

$$\mu=\frac{P}{N^2}\times 1\,000\times (-\,138\,729+151\,444/\sqrt{\gamma}-20\,681.1/\gamma^2)$$

(1)

此模型的复相关因数 $R=0. 870 14$, 表示该模型与 86 个样本数据拟合的效果较好, 且从表 1 还可以看出, P/N^2 和 γ 对 μ 的影响均显

著。

3 粘度预测模型的误差分析

3. 1 预测值与实测值比较

为了对所建的粘度预测模型进行检验, 将对第 2 批从现场随机抽取的 18 个样本点进行粘度预测, 对预测值与快检结果进行比较, 并将预测值、实测值及残差列于表 2。

从表 2 可以看出, 预测值与实测值比较的平均差值为 1. 410 5 个门尼。差值在 $\pm 2. 5$ 个门尼之内的预测值有 14 个, 占 77. 78%; 差值在 $\pm 2. 5\sim\pm 3$ 个门尼之内的预测值有 3 个, 占 16. 67%; 差值在 $\pm 3\sim\pm 3. 5$ 个门尼之内的预测值有 1 个, 占 5. 56%。由于胶料粘度值的波动大约在其平均值的 3 个门尼之内, 因此得到的粘度预测模型的预测误差可以接受, 预测效果也令人满意。

表 2 胶料粘度预测与残差分析

样本号	P	γ	N	粘度实测值	粘度预测值	粘度残差
1	0. 368	0. 681 3	35	58. 5	58. 124	0. 376
2	0. 370	0. 681 3	35	60. 8	58. 440	2. 360
3	0. 376	0. 681 3	35	59. 5	59. 338	0. 112
4	0. 376	0. 681 3	35	58. 6	59. 388	- 0. 778
5	0. 374	0. 681 3	35	61. 5	59. 072	2. 428
6	0. 372	0. 681 3	35	60. 5	58. 756	1. 744
7	0. 368	0. 681 3	35	58. 4	58. 124	0. 276
8	0. 374	0. 681 3	35	59. 0	59. 072	- 0. 072
9	0. 382	0. 681 3	35	60. 8	60. 336	0. 464
10	0. 342	0. 664 0	35	57. 7	60. 404	- 2. 704
11	0. 344	0. 664 0	35	58. 1	60. 757	- 2. 657
12	0. 352	0. 664 0	35	59. 6	62. 170	- 2. 570
13	0. 358	0. 664 0	35	60. 1	63. 230	- 3. 130
14	0. 362	0. 664 0	35	61. 5	63. 936	- 2. 436
15	0. 344	0. 664 0	35	58. 3	60. 757	- 2. 457
16	0. 412	0. 693 3	40	56. 4	56. 389	0. 011
17	0. 418	0. 693 3	40	55. 7	56. 488	- 0. 788
18	0. 420	0. 693 3	40	57. 5	57. 484	0. 016

3. 2 预测值与按每种胶料所建模型的预测值比较

为了分析由式(1)所确定的粘度预测模型的预测精度, 将其与按每种胶料所建立的预测模型进行比较。由于两批数据均来自 3 种胶料, 故利用第 1 批数据(即 86 个样本值)分别对每种胶料都建立相应的预测模型, 得到的 3 个粘度预测模型(M1, M2, M3)如下:

M 1: $\mu=\frac{P}{N^2}\times 1\,000\times 193. 065\,5$

M 2: $\mu=\frac{P}{N^2}\times 1\,000\times 215. 935\,3$

M 3: $\mu=\frac{P}{N^2}\times 1\,000\times 218. 562\,9$

用上述 3 个模型对第 2 批从现场随机抽取的 18 个样本点进行粘度预测, 且每个模型只对来自相应胶料的样本点进行预测。用预测值 1

和残差 1 分别表示单种胶料预测模型得出的预测值以及预测值与实测值之差；用预测值 2 和

残差 2 分别表示由式(1)确定的粘度预测模型得出的相应结果，并把这些结果列于表 3。

表 3 粘度预测结果比较

样本号	实测值	预测值 1	预测值 2	残差 1	残差 2	预测值 1－预测值 2
1	58.5	57.998	58.124	0.502	0.376	－0.126
2	60.8	58.314	58.440	2.486	2.360	－0.127
3	59.5	59.259	59.388	0.241	0.112	－0.129
4	58.6	59.259	59.388	－0.659	－0.788	－0.129
5	61.5	58.944	59.072	2.556	2.428	－0.128
6	60.5	58.629	58.756	1.871	1.744	－0.127
7	58.4	57.998	58.124	0.402	0.276	－0.126
8	59.0	58.944	59.072	0.056	－0.072	－0.128
9	60.8	60.205	60.336	0.595	0.464	－0.131
10	57.7	60.286	60.404	－2.586	－2.704	－0.118
11	58.1	60.638	60.757	－2.538	－2.657	－0.119
12	59.6	62.048	62.170	－2.448	－2.570	－0.122
13	60.1	63.106	63.230	－3.006	－3.130	－0.124
14	61.5	63.811	63.936	－2.311	－2.436	－0.125
15	58.3	60.638	60.757	－2.338	－2.457	－0.119
16	56.4	56.280	56.389	－0.120	0.011	－0.109
17	55.7	57.100	56.488	－1.400	－0.788	0.611
18	57.5	57.373	57.484	－0.127	0.016	－0.111

从表 3 可以看出，利用式(1)预测出的粘度值与使用单种胶料建立相应的粘度预测模型预测出的结果十分接近，两种方法算出预测值之差的绝对值的平均值为 0.150 5 个门尼，这也说明式(1)预测出的结果令人满意，且具有应用价值。

3.3 预测值与固定转速单台机粘度预测模型的结果比较

现将式(1)确定的粘度预测模型的预测结果与固定转速单台机粘度预测模型的预测值进

行比较。由于采集到的样本虽然来自 3 种胶料，但其中两种胶料在密炼机上混炼时 N 都相同，利用第 1 批样本值中 N 相同的 53 个样本点(N 为 $35\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)建立了如下的预测模型：

$$\mu=P\times (1\ 618.651-1\ 770.09\sqrt{\gamma})\quad (2)$$
$$0<\gamma<0.836$$

用根据式(1)和(2)确定的粘度预测模型对第 2 批 N 为 $35\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的 15 个样本点进行粘度预测，并将预测结果列于表 4。式(1)和(2)所确定的模型分别称为模型 A 和模型 B。

表 4 模型 A 与模型 B 预测结果比较

样本号	实测值	模型 A 预测值	模型 B 预测值	模型 A 预测值－模型 B 预测值
1	58.5	58.124	57.999	－0.127
2	60.8	58.440	58.313	－0.127
3	59.5	59.388	59.259	－0.129
4	58.6	59.388	59.259	－0.129
5	61.5	59.072	58.943	－0.129
6	60.5	58.756	58.628	－0.128
7	58.4	58.124	57.998	－0.127
8	59.0	59.072	58.943	－0.129
9	60.8	60.336	60.204	－0.131
10	57.7	60.404	60.285	－0.119
11	58.1	60.757	60.638	－0.120
12	59.6	62.170	62.048	－0.122
13	60.1	63.230	63.105	－0.124
14	61.5	63.936	63.810	－0.126
15	58.3	60.757	60.638	－0.120

以上分析表明,采用两种不同的模型,从总体上看预测值十分接近。两种预测值之差的绝对值的平均值为 0.211 27 个门尼。

4 结论

按单台密炼机使用 MLJ-300 型密炼机微机智能控制系统采集混炼过程中的有关参数,建立预测粘度的数学模型是可行的,与按每种

胶料所建模型的预测结果非常接近。

参考文献

1 张 海,贺德化,李 华,等. 混炼胶质量在线检测技术的研究. 橡胶工业,1997 44(2): 90
2 Funt I M. Mixing of Rubbers. England PAPRA, 1997. 1~57
3 周纪芎. 回归分析. 上海:华东师范大学出版社,1991. 33~65

收稿日期 1999-03-29

Mathematic Model for Predicting Viscosity of Different Rubber Mixes in Internal Mixer

Zhu Fengfeng, Zhang Hai, He Dehua, Ma Tiejun and Chen Wei

(South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Jiang Zu, Wei Xiangyang and Shen Xingfa

[Shanghai Tire and Rubber (Group) Co. Ltd 200245]

Abstract Using the regression analysis method based on the rheological theory of internal mixer mixing, the relationship of mix viscosity μ to dump power P , rotational speed N and filling factor γ , i. e. $\mu=\frac{2P}{\pi N^2 A}$ was investigated in terms of single internal mixer; and a mathematic model for predicting viscosity of different rubber mixes in single internal mixer, i. e. $\mu=\frac{P}{N^2}\times 1\,000\times (-138\,729+151\,444/\sqrt{\gamma}-20\,681.1/\gamma^2)$, was established. The average absolute difference between the predictive value from the model and the measured value was 1.410 5 Mooney unit, and the predictive values from this model were very close to those from the models established for individual rubber mixes.

Keywords viscosity, internal mixer, mix, filling factor

兰化开发出 HNBR

由兰州化学工业公司化工研究院开发的新型、高性能 HNBR 日前通过技术鉴定。
HNBR 与传统的 NBR 相比,是一种耐热性、耐油性、耐寒性、耐化学性和物理性能优异的橡胶。目前,我国所需的 HNBR 完全依赖进口,每年要耗费大量的外汇。为了实现这一产品和技术的国产化,兰州化学工业公司化工研究院经过艰苦的攻关,开发成功这一橡胶品种。该产品的应用结果表明,其性能达到国际同类产品先进水平,完全可替代进口。专家认为,兰化研究院制备 HNBR 的技术路线合理,工艺技术达到国际先进水平。

(摘自《中国化工报》,1999-05-01)

新型钢丝缠绕钻探胶管开发成功

一种广泛适用于石油钻探使用的新型钢丝缠绕钻探胶管,日前由河北省欧亚特种胶管有限公司研制成功。
目前我国石油行业所使用的大口径钢丝缠绕钻探胶管大多仍依赖进口。欧亚公司与沈阳橡胶设计院联合,借鉴国外先进生产技术,投资 60 多万元,采用国产原材料与设备进行攻关,相继攻克了从试验到工业化生产中的多项难题。
该产品口径大,承载能力强,低压弯曲性能好,爆破压力达 87.5 MPa,关键技术指标优于国外同类产品,具有良好的应用前景。

(摘自《中国化工报》,1999-04-26)