

# 基于机械物理法的废旧热固性酚醛树脂回收工艺的试验研究

宋守许 胡 健 石 磊 杨雪峰

合肥工业大学,合肥,230009

**摘要:**基于机械物理法的基本原理,以废旧热固性酚醛树脂为研究对象,分析其回收机理。采用响应面法中的 Box-Behnken 模式,对回收工艺参数中最主要的三个因素(转速、时间和入料粒径)进行试验优化设计,并建立了多元二次模拟方程。试验结果表明:转速、时间和入料粒径对热固性酚醛树脂降解的显著程度由高到低分别为转速、入料粒径、时间,热固性酚醛树脂降解率最大时的回收工艺参数是转速 2940r/min、时间 95min、入料粒径 0.71mm。

**关键词:**热固性酚醛树脂;机械物理法;响应面法;回收

中图分类号:X705

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.007

## Research on Recycling Technology of Waste Thermosetting Phenolic Resins Based on Mechanical Physical Method

Song Shouxu Hu Jian Shi Lei Yang Xuefeng  
Hefei University of Technology, Hefei, 230009

**Abstract:** Based on the fundamental of mechanical physical method, the waste thermosetting phenolic resins was researched and the recovery mechanism was analysed. By using Box-Behnken model of response surface methodology, a series of experiments for optimizing three main factors (speed, time and size) of recovery process parameters were designed and a quadratic polynomial equation model was constructed. The results show that: the order of the important effects of speed, time and size on the degradation of thermosetting phenolic resins is speed>size>time, when the degradation rate is the biggest, the recovery speed, time and size for waste thermosetting phenolic resins recycling are 2940r/min, 95min, and 0.71mm respectively.

**Key words:** thermosetting phenolic resin; mechanical physical method; response surface methodology; recycling

### 0 引言

热固性酚醛树脂(thermosetting phenolic resin, PF)是一种以酚类和醛类化合物经过缩聚

反应而制得的一大类合成树脂。热固性酚醛树脂固化前是线形或带支链的,固化后分子链之间形成化学键,成为高度交联的网状结构,不仅不能再熔融,在溶剂中也不能溶解。热固性酚醛树脂以其优良的粘接性、耐热性、阻燃性和绝缘性等特性被广泛应用于工业<sup>[1]</sup>。大量的热固性酚醛树脂伴

收稿日期:2011-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975074);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAF11B06)

[15] 范丽,周洪伟,张育林. 飞行器多学科优化设计中基于产品模型的数据集成[J]. 中国空间科学技术,2002(4):51-56.

Fan Li, Zhou Hongwei, Zhang Yulin. Data Integration Based on Product Model for Aircraft Multidisciplinary Design Optimization [J]. Chinese Space Science and Technology, 2002(4):51-56.

[16] 龚金科. 汽车排放污染及控制[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[17] 龚金科,周立迎,梁昱,等. 三效催化转化器压力损失对发动机性能的影响[J]. 汽车工程,2004,26(4):413-416.

Gong Jinke, Zhou Liying, Liang Yu, et al. A Study on the Effect of Pressure Loss in Three-way Cat-

alytic Converter on Engine Performance[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4):413-416.

[18] 戴莱 J W, 哈里曼 D R F. 流体力学[M]. 郭子中,译. 北京:北京理工大学出版社,2011.

[19] 刘孟祥. 三效催化转化器高效长寿低排放优化设计理论及方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2008.

(编辑 张 洋)

作者简介:刘孟祥,男,1973年生。湖南涉外经济学院机械工程学院副教授、高级工程师,中南大学能源科学与工程学院博士后研究人员。主要研究方向为汽车排放控制及新能源汽车。刘湘玲,女,1978年生。湖南大学机械与运载工程学院博士研究生。龚金科,男,1954年生。湖南大学机械与运载工程学院教授、博士研究生导师。

随着产品的淘汰而废弃,不但对环境造成污染,还造成资源的浪费,因此开展废旧热固性酚醛树脂的回收研究具有重要意义。

目前国内外对废弃热固性酚醛树脂资源化的技术主要有:①物理法,主要是机械粉碎和碾磨;②化学回收法,主要是油化回收和单体回收;③热能回收法,主要是燃烧和燃料化技术<sup>[2-4]</sup>。物理法回收成本低,工艺简单,其回收的产物主要用作填料,这个过程是物理变化,不含有化学变化;化学回收法的投资大,成本高,工艺控制严格,回收方法针对性极强;热能回收法成本低,资源回收利用率低,容易产生有毒的有机气体,造成二次污染。机械物理法是通过机械力的持续作用,打断热固性酚醛树脂的交联键,破坏其高度交联的网状结构,提高活性和塑化成形的能力,这种回收方法的成本低,工艺简单,效率高,对环境的污染很小,是热固性酚醛树脂回收再利用较为理想的方法。

本文分析机械物理法回收热固性酚醛树脂的原理,采用响应面法(response surface method)

ogy, RSM)<sup>[5-7]</sup>进行试验优化设计,研究回收工艺参数对酚醛树脂降解效果的影响,建立多元二次模拟方程,并确定降解效果最佳时的回收条件。

## 1 热固性酚醛树脂的机械物理回收法

热固性酚醛树脂在高速粉碎过程中,在多种强烈的机械力(研磨、压缩、冲击、摩擦、剪切、延伸等)的综合作用下,一方面由于内应力分布不均匀或者冲击能量集中在个别链段上,产生临界应力使得化学键断裂,另一方面,机械力产生的热能促使分子结构中键能较弱的化学键发生断裂,因此,热固性酚醛树脂的分子结构趋于非体型化,交联密度降低,活性及塑化性能增加,材料降解<sup>[8-10]</sup>。

机械力作用有如下形式:基于高压和剪切变形机理的固态高速剪切粉碎;基于剪切、环向和挤压应力多种机械力作用形式的磨盘型研磨粉碎;基于碰撞变形、破裂的高能球磨粉碎;其他机械力作用形式,如振动磨和气流粉碎等<sup>[11-12]</sup>。

### 1.1 试验方法

机械物理法回收的工艺流程如图 1 所示。

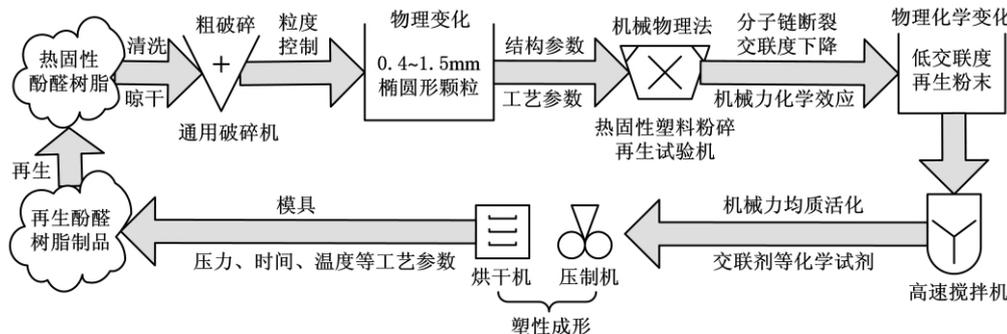


图 1 基于机械物理法的热固性酚醛树脂闭环回收示意图

#### 1.1.1 试验设备

试验在常温常压的条件下,在自行开发的热固性塑料粉碎再生试验机上进行,其结构如图 2 所示。与传统的粉碎设备相比,热固性塑料粉碎再生试验机克服了现有粉碎机粉碎方式较单一、机械力化学反应效果有限的不足,充分利用剪切、挤压、碰撞和摩擦等多种机械力复合作用方式,使热固性塑料受到强烈持久的垂直和环向的多种应力以及摩擦热的共同作用,产生更加有效的机械力化学反应,实现热固性塑料的降解再生。

基于机械物理法的热固性酚醛树脂粉碎再生过程主要分为高速剪切和高速研磨两个过程:

(1)高速剪切过程。热固性酚醛树脂颗粒从入料口 2 进入粉碎再生腔体中,在高速旋转的剪切刀组 7 的剪切刀齿和环形定刀组 8 的定刀齿之间受到强烈的剪切与撞击作用。由于离心力的作

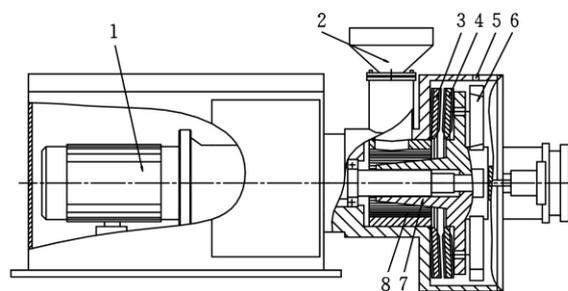


图 2 热固性塑料粉碎再生试验机结构示意图

用,粒径较小的粉碎颗粒进入到静磨盘 3 和动磨盘 4 之间进行研磨,粒径较大的颗粒则继续被反复剪切撞击直至进入高速研磨过程。

(2)高速研磨过程。在这一过程中,酚醛树脂颗粒在高速旋转的动磨盘 4 和静磨盘 3 之间受到强烈的垂直和环向剪切、摩擦和挤压等多种机械

力的进一步作用。同时叶轮式搅拌刀组 6 使得酚醛树脂颗粒可以再次进入磨盘之间进行反复的研磨,使之得到充分的粉碎、分散、混合和固相力化学反应,最终降解再生。

### 1.1.2 试验步骤

将废旧酚醛树脂清洗晾干后,放入复合式破碎机中进行粗破。将收集到的粗破颗粒,放入热固性塑料粉碎再生试验机中进行超细粉碎,调整试验机转速为 2000~3000r/min,入料量为 50~70g,入料粒径为 0.4~1.5mm,试验机工作 60~120min 之后关闭,再用振筛机筛分超细粉碎的再生产物,收集 200 目的酚醛树脂再生粉末。酚醛树脂再生粉末颗粒表面活性提高,物料粉层具有一定的黏性,表现出塑性成形的能力,在挤压应力作用下能发生较明显的固化成形现象。

## 1.2 机械物理法回收热固性酚醛树脂的机理分析

利用傅里叶红外光谱仪(Nicolet 67)分析 60 目、80 目、120 目、160 目和 200 目的酚醛树脂再生粉末,如图 3 所示。波数为 3600~3000cm<sup>-1</sup> 的区域对应氢键缔合酚羟基(-OH)的伸缩振动,波数为 3000~2800cm<sup>-1</sup> 的区域对应亚甲基(-CH<sub>2</sub>-)的伸缩振动吸收峰,波数为 1650~1450cm<sup>-1</sup> 的区域对应苯环 C=C 的伸缩振动,波数为 1300~1000 cm<sup>-1</sup> 的区域对应 C-O 伸缩振动。由图谱变化可以看出,热固性酚醛树脂被粉碎至 200 目时,其分子结构主要发生以下变化:

(1) 酚羟基(-OH)吸收峰逐渐增强,羟基官能团数目有较明显的减小,说明羟基与羟基之间发生了脱水反应。

(2) 波数为 2920cm<sup>-1</sup> 时亚甲基(-CH<sub>2</sub>-)吸收振动收缩峰的位置明显偏移发生很大变化,并且有较大程度增强;此外,波数为 1439cm<sup>-1</sup> 时的苯环上的振动吸收峰表现明显,说明部分亚甲基桥(-CH<sub>2</sub>-)发生断裂,分子网状结构遭到破坏,形成稠环芳香结构。

因此可以得出,在强烈持久的机械力作用下,伴随着粒径的不断减小,热固性酚醛树脂的分子结构也发生较大变化,交联键断裂明显,交联度下降,这主要表现为羟基之间的脱水和亚甲基桥的断裂,高度交联的网状结构遭到破坏,物料发生降解,重新具备塑性成形的能力,从而实现热固性酚醛树脂的回收再利用。

## 2 热固性酚醛树脂回收工艺研究

影响热固性酚醛树脂回收的因素很多,如转

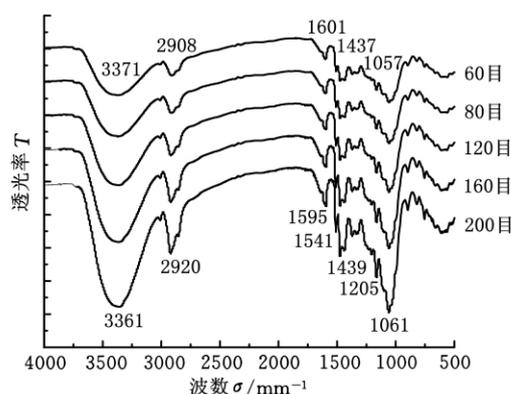


图 3 不同粒度酚醛树脂再生粉末的 FTIR 图谱比较

速、粉碎时间、入料粒径等。因此,需要确定各种影响因素的最优组合,从而获得最佳的回收效果。

### 2.1 热固性酚醛树脂降解效果的评定

热固性酚醛树脂的降解效果是评价其回收效果的重要指标。根据图 3 所示的 FTIR 图谱分析可以得出,热固性酚醛树脂被粉碎至 200 目时,羟基的数目明显减少,交联链(亚甲基桥)断裂明显,因此将 200 目酚醛树脂再生粉末的产率作为评价热固性酚醛树脂降解效果的一个指标。另外,粉碎的过程中,在机械力和摩擦热的持续作用下,在粉末颗粒质量减小的同时伴随有刺激性的气味产生,这是由于酚醛树脂降解过程中生成的一些低分子的醛类、酚类和水分受热蒸发逸出,因此将酚醛树脂的质量损失率作为评价其降解效果的另一指标。

热固性酚醛树脂降解效果评价指标的定义如下:

(1)  $\alpha = (m_1 - m_2) / m_1$ , 其中  $m_1$  为处理前的质量,  $m_2$  为处理后的质量;

(2)  $\beta = m_3 / m_1$ , 其中  $m_3$  为粒径小于 200 目的再生粉末质量。

利用多目标决策中的线性加权和法<sup>[13]</sup> 建立热固性酚醛树脂降解效果 Y 的评价函数:

$$Y = \sum_{i=1}^2 \omega_i f_i(x) = \omega_1 \alpha + \omega_2 \beta \quad (1)$$

式中,  $\omega_i$  为评价指标的权重。

在已有的试验研究中,转速、时间和入料粒径对再生粉末产率有极其显著的影响,相对而言,对质量损失率影响的显著程度则较小;此外,在振筛机上筛分再生粉末的过程中,一些粒径极其细小的粉末会飘散到空气中,造成测量误差,从而使质量的损失率变大,再生粉末的产率变小。因此,综合考虑,将质量损失率的权重系数  $\omega_1$  和 200 目再生粉末产率的权重系数  $\omega_2$  分别确定为 0.1 和 0.9。

根据上述指标的定义可知,各指标的值越大,热固性酚醛树脂的降解效果就越好,因此,当 Y 值

越大时,说明热固性酚醛树脂的可回收性越好。

### 2.2 响应面法(RSM) 试验设计

根据 Box—Behnken 设计方法,选转速、时间和入料粒径这三个重要因素作为自变量(分别用  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  表示),根据现有试验条件和研究经验,确定其取值范围为转速 2000 ~ 3000r/min、时间 60 ~ 120min 和入料粒径 0.425 ~ 1.275mm。每个因素取 3 个水平,按方程  $x_i = (X_i - X_{i0})/\Delta X_i$  编码( $x_i$  为自变量的编码值; $X_i$  为自变量的真实值,其中  $i = 1, 2, 3$ ;  $X_{i0}$  为试验中心点处自变量的真实值; $\Delta X_i$  为自变量的变化步长),以降解效果为响应值设计共 15 个试验点的响应面分析试验,其中 12 个试验点为析因点,3 个试验点为零点,用以估计试验误差。试验自变量因素编码及水平见表 1(其中,  $x_1 = (X_1 - 2500)/500$ ;  $x_2 = (X_2 - 90)/30$ ;  $x_3 = (X_3 - 0.85)/0.425$ ),试验方案及结果见表 2,其中入料量为 50g。

表 1 试验自变量因素编码及水平

因素	自变量的编码值( $x_i$ ) 及水平		
	-1	0	1
转速 $X_1$ (r/min)	2000	2500	3000
时间 $X_2$ (min)	60	90	120
入料粒径 $X_3$ (mm)	0.425	0.850	1.275

表 2 试验设计与结果

试验号	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Y(%)
1	-1	-1	0	42.265
2	-1	0	-1	63.765
3	-1	0	1	41.627
4	-1	1	0	60.754
5	0	-1	-1	76.049
6	0	-1	1	56.092
7	0	1	-1	70.487
8	0	1	1	65.626
9	1	-1	0	72.901
10	1	0	-1	77.574
11	1	0	1	73.571
12	1	1	0	82.367
13	0	0	0	75.112
14	0	0	0	75.069
15	0	0	0	71.654

### 2.3 试验结果分析

用 Design Expert7.0 软件对表 2 中的试验数据进行二次多元回归拟合,可得到如下的回归方程:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 \quad (2)$$

其中,方程中各项系数具体数值见表 3。此外,还可以得到回归方程方差分析表(表 4)和回归方程系数显著性检验表(表 5)。作出  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  及其交互作用对响应值影响的响应面图和等高线图,如图 4 ~ 图 6 所示。

表 3 回归方程的系数

系数	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_{11}$
取值	73.54	12.23	3.97	-6.37	-6.13
系数	$a_{22}$	$a_{33}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{23}$
取值	-3.20	-3.68	-2.21	4.53	3.77

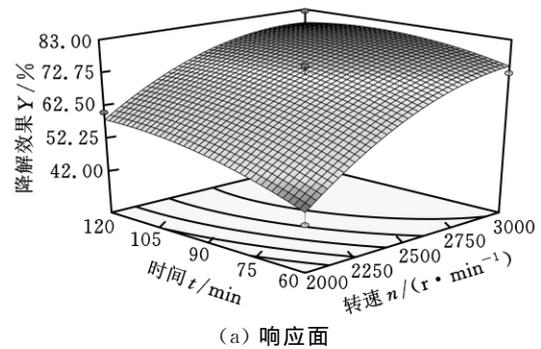
表 4 回归方程的方差分析

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	显著水平
模型	9	2004.92	222.77	13.30	0.0054
参差	5	83.75	16.75		
失拟项	3	75.88	25.29	6.42	0.1377
纯误差	2	7.87	3.97		
总离差	14	2088.68			

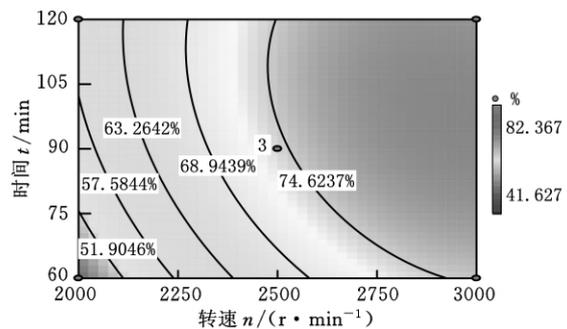
回归模型的确定系数  $R^2 = 0.9599$

表 5 回归方程系数显著性检验表

系数项	自由度	系数估计值	标准误差	95% 置信度的置信区间		显著水平 (P 值)
				低端值	高端值	
常数	1	73.94	2.36	67.87	80.02	
$x_1$	1	12.23	1.45	8.51	15.94	0.0004
$x_2$	1	3.97	1.45	0.25	7.69	0.0408
$x_3$	1	-6.37	1.45	-10.09	-2.65	0.0070
$x_1x_2$	1	-2.21	2.05	-7.47	3.05	0.3303
$x_1x_3$	1	4.53	2.05	-0.73	9.79	0.0776
$x_2x_3$	1	3.77	2.05	-1.49	9.03	0.1245
$x_1^2$	1	-6.13	2.13	-11.60	-0.65	0.0347
$x_2^2$	1	-3.20	2.13	-8.67	2.28	0.1937
$x_3^2$	1	-3.68	2.13	-9.16	1.79	0.1442



(a) 响应面



(b) 等高线

图 4 转速和时间对降解效果的响应面图和等高线图

由表 4 的方差分析可以看出,模型  $F = 13.30 > F_{0.01}(9, 5) = 10.2$ ,模型  $P = 0.0054$ ,表明模型极为显著,回归模型的确定系数  $R^2 = 0.9599$ ,说明该模型可以用来描述热固性酚醛树脂 95.99% 的降解效果,失拟  $F = 6.42 <$

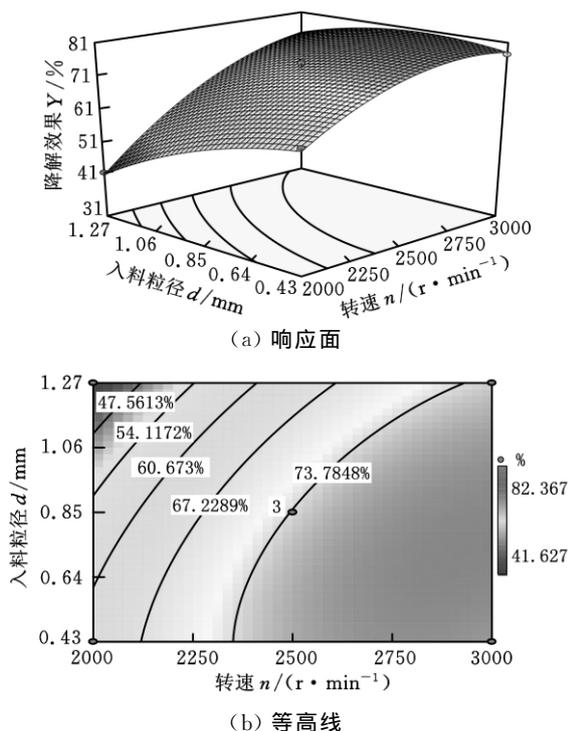


图 5 转速和入料粒径对降解效果的响应面图和等高线图

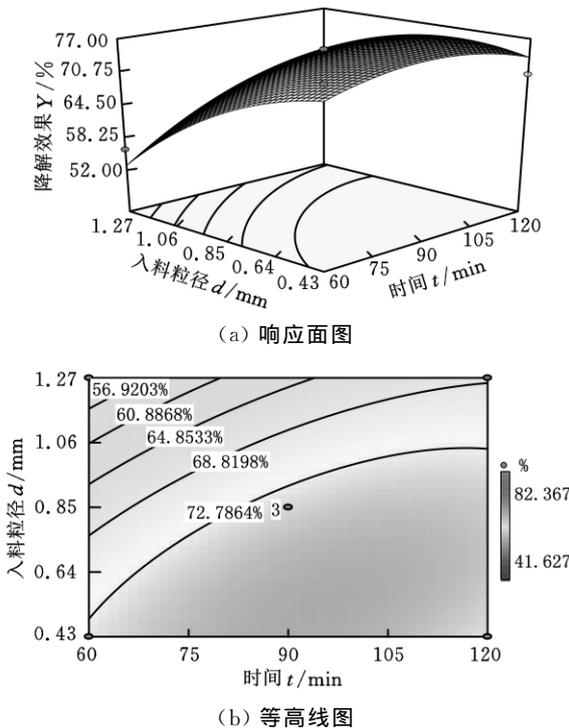


图 6 时间和入料粒径对降解效果的响应面图和等高图  $F_{0.05}(9,3)=8.81$ , 失拟项  $P=0.1377 > 0.05$ , 表明模型失拟度不显著, 使用该方程进行的拟合效果很好, 试验误差小。

由表 5 回归方程系数显著性检验可知, 如果模型中检验项的  $P$  值小于 0.05, 则该项是极显著的, 否则该项不显著。模型中一次项  $x_1(P=0.0004)$ 、 $x_2(P=0.0408)$ 、 $x_3(P=0.0070)$  和二

次项  $x_1^2(P=0.0347)$  极显著, 其余项均不显著。由表 5 中各项系数的  $P$  值并结合对图 4、图 5 和图 6 的响应面图和等高线图的分析可知, 转速、时间和入料粒径是热固性酚醛树脂降解的极显著影响因素, 其显著程度由高到低分别为转速、入料粒径、时间。

为验证回归方程(式 2)的有效性和准确性, 分别进行了 5 组不同因素水平组合的验证试验, 其中各个因素的取值都位于试验水平的范围内(表 6)。

表 6 回归方程验证试验

试验编号	$X_1$ (r/min)	$X_2$ (min)	$X_3$ (mm)	降解效果 $Y(\%)$		相对误差 (%)
				试验值	预测值	
1	2250	75	0.5	70.202	68.707	2.13
2	2250	75	0.6	69.936	67.481	3.51
3	2750	75	0.5	80.967	78.327	3.26
4	2750	105	0.5	81.423	78.101	4.08
5	2750	105	0.6	81.079	78.784	2.83

表 6 中, 相对误差的最大值为 4.08%, 说明采用响应面法进行机械物理法处理对热固性酚醛树脂降解效果的影响试验设计所获得的回归方程是合适有效的。

图 4 所示为入料粒径  $X_3=0.85\text{mm}$  情况下不同转速和时间水平下的热固性酚醛树脂降解效果的变化情况。时间不变, 随着转速的增大, 降解效果  $Y$  值随之增大, 变化梯度大; 转速不变, 随着时间的增大,  $Y$  值也随之增大, 变化梯度小。此外, 由等高线图可知, 转速对降解效果的影响比时间显著。

图 5 所示为时间  $X_2=90\text{min}$  情况下不同转速和入料粒径水平下的热固性酚醛树脂降解效果的变化情况。入料粒径不变, 随着转速的增大, 降解效果  $Y$  值随之增大; 转速不变, 随着入料粒径的增大,  $Y$  值随之减小。当转速较小时, 入料粒径对降解效果的影响较大, 随着转速的提高, 入料粒径对降解效果的影响随之减小。此外, 由等高线图可知, 转速对降解效果的影响比入料粒径显著。

图 6 所示为转速  $X_1=2500\text{r/min}$  情况下不同时间和入料粒径水平下的热固性酚醛树脂降解效果的变化情况。入料粒径不变, 降解效果  $Y$  值着时间的增加而增大; 时间不变, 随着入料粒径的增大,  $Y$  值随之减小。当时间较短时, 入料粒径对降解效果的影响较大, 随着时间的增加, 入料粒径对降解效果的影响随之减小。此外, 由等高线图可知, 入料粒径对降解效果的影响比时间显著。

由 Design expert 7.0 软件分析可知, 曲面斜率为零的点为参数的最佳点, 将回归方程(式(2))

分别对  $x_1, x_2, x_3$  求一阶偏导, 得到如下方程组:

$$\left. \begin{aligned} 12.26x_1 + 2.21x_2 - 4.53x_3 &= 12.23 \\ 2.21x_1 + 6.4x_2 - 3.77x_3 &= 3.97 \\ 4.53x_1 + 3.77x_2 - 7.36x_3 &= 6.37 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

求解方程组得:  $x_1 = 0.8794, x_2 = 0.1800, x_3 = -0.2321$ 。即转速  $X_1$  为 2940.39r/min、时间  $X_2$  为 95.41min、入料粒径  $X_3$  为 0.75mm。为操作方便, 将转速 2940r/min、时间 95min、入料粒径 0.71mm 作为降解效果值最大的回收工艺参数。对上述条件进行了 3 次重复试验, 热固性酚醛树脂的降解效果值分别为 81.637、82.154 和 79.436, 与理论值 80.384 基本一致。

### 3 结论

(1) 热固性酚醛树脂在机械物理法的处理过程中, 在粒度减小的同时, 亚甲基桥发生断裂, 羟基之间发生脱水反应, 高度交联的网状结构遭到破坏, 活性及塑化性能增加。

(2) 转速、时间和入料粒径是热固性酚醛树脂降解的极显著影响因子, 分析表明, 其显著程度由高到氏分别为转速、入料粒径、时间。

(3) 采用响应面法中的 Box—Behnken 模式进行分析, 得到了热固性酚醛树脂降解效果最大时的工艺参数是转速 2940r/min、时间 95min、入料粒径 0.71mm。

#### 参考文献:

- [1] Rudolf R. 热固性树脂[M]. 陆立明, 译. 上海: 东华大学出版社, 2009.
- [2] 李林楷. 热固性塑料的回收利用[J]. 国外塑料, 2004, 22(6): 69-72.  
Li Linkai. Recycling of Thermosets [J]. World Plastics, 2004, 22(6): 69-72.
- [3] 曾一铮, 游长江. 热固性聚合物基复合材料废弃物回收利用进展[J]. 广州化学, 2009, 34(2): 54-60.  
Zeng Yizheng, You Changjiang. Advance in Recycle of Thermoset Composites Wastes [J]. Guangzhou Chemistry, 2009, 34(2): 54-60.
- [4] 卢灿辉, 张新星, 梁梅. 难回收废弃交联高分子材料再生利用新技术[J]. 国外塑料, 2008, 26(2): 66-69.  
Lu Canhui, Zhang Xinxing, Liang Mei. The New Recycling Technology of Waste Crosslinked Polymer Material That is Difficult to Recycle [J]. World Plastics, 2008, 26(2): 66-69.
- [5] 王永菲, 王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民

族大学学报(自然科学版), 2005, 14(3): 236-240.

Wang YongFei, Wang ChengGuo. The Application of Response Surface Methodology [J]. Journal of The Central University for Nationalities (Natural Sciences Edition), 2005, 14(3): 236-240.

- [6] Cui F J, Li Y, Xu Z H, et al. Optimization of the Medium Composition for Production of Mycelial Biomass and Exo-polymer by *Grifola Frondosa* GF9801 Using Response Surface Methodology [J]. Bioresource Technol, 2006, 97(10): 1209-1216.
- [7] Moerman F, Mertens L, Demey L, et al. Reduction of *Bacillus Subtilis*, *Bacillus Stearothermophilus* and *Streptococcus Faecalis* in Meat Batters by Temperaturehigh Hydrostatic Pressure Pasteurization [J]. Meat Science, 2001, 59(2): 115-125.
- [8] 卢灿辉. 聚合物固体在粉碎过程中结构与形态的变化[J]. 中国粉体技术, 2001, 7(6): 34-39.  
Lu Canhui, Wang Qi. Structural and Morphological Development of Polymer Solids During Pulverization [J]. China Powder Science and Technology, 2001, 7(6): 34-39.
- [9] Katritzky A R, Allin S M, Siskin M. Aquathermolysis: Reactions of Organic Compounds with Superheated Water [J]. Accounts of Chemical Research, 1996, 29(8): 399-406.
- [10] Sugeta T, Nagaoka S, Otake K. Decomposition of Fiber Reinforced Plastics Using Fluid at High Temperature and Pressure [J]. The ANTEC, 1996, 58(10): 557-63.
- [11] 陈鼎, 陈振华. 机械力化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [12] 卢灿辉, 王琪. 聚合物固体粉碎过程中力化学效应的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2001, 17(5): 11-15.  
Lu Canhui, Wang Qi. Application of Mechanochemical Effects of Polymer Solids During Pulverization [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2001, 17(5): 11-15.
- [13] 许玖平, 李军. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(编辑 郭伟)

作者简介: 宋守许, 男, 1964 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院副教授、博士。主要研究方向为机电产品绿色设计与制造、产品再资源化和逆向物流等。发表论文 30 余篇, 获中国专利 8 项。胡健, 男, 1985 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。石磊, 男, 1986 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。杨雪峰, 男, 1989 年生。合肥工业大学化学工程学院硕士研究生。