

# RCAD2003 配方优化系统在 NBR 密封制品配方研究中的应用

辛振祥, 刘 莉, 桂 亮, 管林舟, 高立君

(青岛科技大学 高分子材料科学与工程学院, 山东 青岛 266042)

**摘要:**运用 RCAD2003 配方优化系统对 NBR 密封制品配方进行研究。对于三变量配方, 仅用 8 次试验即可通过优化得到综合性能满足要求的配方。另外, 利用本系统考察了丙烯酸锌对 NBR 与金属骨架材料粘合性能的影响。实验结果表明, 丙烯酸锌的加入大大提高了胶料与金属骨架材料的粘合强度。

**关键词:**CAD; 配方优化系统; 均匀试验设计; NBR

**中图分类号:**TQ333.7; TQ336.4+2 **文献标识码:**B **文章编号:**1000-890X(2004)09-0527-04

均匀设计法是将数论用于试验设计而创立的一种新的试验方法, 由于抛开了正交试验的整齐可比性, 只考虑试验点在试验范围内的均匀分布, 大大减少了试验次数, 试验次数与各因素所取水平数相等。均匀设计法的特点是能够以较少的试验点获得最多的信息<sup>[1]</sup>。但均匀设计法由于试验次数少, 试验数据处理显得尤为重要。人们围绕这一问题进行了广泛研究, 形成了多种数据处理方法, 例如逐步回归、遗传算法和神经网络等。由于橡胶配方性能数据多采用二次多项式模型拟合, 因此多元线性或二次回归分析是常用的处理方法, 而当多水平因素试验采用二次回归模型时, 均匀设计法更具优越性<sup>[2]</sup>。均匀设计目前大多采用逐步回归分析法。逐步回归分析虽能给出性能-因素的定量关系, 但试验次数仍不能少于  $1+m(m+3)/2$  ( $m$  是因素数), 在因素数为 6 时仍需做 28 次试验。这使得均匀设计优势不能得到最佳发挥。为解决这一问题, 我们开发了基于均匀设计的 RCAD2003 配方优化系统, 用少于逐步回归的试验次数即可优化得到准确的回归方程。

另外, 还应用此系统考察了锌盐、硫化剂 DCP 和硫黄三因素对 NBR 硫化胶性能及其与金

属骨架材料粘合性能的影响, 并对优化结果进行了验证。

## 1 试验安排及结果

与其它试验设计方法类似, 均匀设计通过均匀设计表安排试验, 但与正交试验设计法不同, 均匀设计法不仅使用均匀设计表, 还同时使用均匀设计表的使用表。为方便应用, RCAD2003 配方优化系统具有一般 Windows 界面(见图 1), 用户只需输入因素数、水平数及各因素的取值范围, 系统自动根据使用表建立相应的均匀设计表, 形成均匀设计试验表。本试验首先根据偏差表选用  $U_8(8^2 \times 4)$  表, 然后将锌盐、硫化剂 DCP 和硫黄用量(份)  $X_1$ ,  $X_2$  和  $X_3$  的范围 ( $0 \leq X_1 \leq 21$ ,  $0.4 \leq X_2 \leq 1.8$ ,  $0 \leq X_3 \leq 0.6$ ) 输入即可得到试验安排表。试验安排及试验结果见表 1。

## 2 性能-因素回归方程

由于均匀设计法只强调均匀分散性而不考虑整齐可比性, 因此表 1 中的数据不能直接进行比较。均匀设计法的数据分析比较复杂, 一般要用回归分析法并借助计算机进行。应用 RCAD2003 配方优化系统进行数据处理, 得到拉伸强度( $Y_2$ )、撕裂强度( $Y_3$ )、拉断伸长率( $Y_4$ )、邵尔 A 型硬度( $Y_5$ ) 和 100% 定伸应力( $Y_6$ ) 的回归方程:

**作者简介:**辛振祥(1963-), 男, 山东胶南人, 青岛科技大学教授, 硕士, 主要从事橡胶制品设计有关计算机 CAD 技术应用研究及相应的教学工作。

Form1

均匀设计 回归设计 退出

正交和水平均匀设计

变量范围

|     | X1    | X2   | X3   | X4   |
|-----|-------|------|------|------|
| 变量名 | 丙烯酸锌  | DCP  | S    |      |
| MIN | 0.00  | 0.40 | 0.00 | 0.00 |
| MAX | 21.00 | 1.80 | 0.80 | 0.00 |

|         | Syys | S1   | S2   | S3   | S4    | S5    | S6 |
|---------|------|------|------|------|-------|-------|----|
| 丙烯酸锌水平  | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00  | 6.00  |    |
| 丙烯酸锌实际用 | 0.00 | 3.00 | 8.00 | 9.00 | 12.00 | 15.00 |    |
| DCP水平   | 4.00 | 8.00 | 3.00 | 7.00 | 2.00  | 6.00  |    |
| DCP实际用量 | 1.00 | 1.80 | 0.80 | 1.60 | 0.80  | 1.40  |    |
| S水平     | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 1.00 | 4.00  | 3.00  |    |
| S实际用量   | 0.80 | 0.40 | 0.20 | 0.00 | 0.80  | 0.40  |    |

根据偏差表选择

试验次数/水平数 8/8\*3\*4

☐ 二因子 ☒ 三因子 ☐ 四因子

生成表格

打印预览

打印

加载配方

保存配方

关闭

偏差表

二因子

三因子

四因子

| 水平数     | 偏差     | 水平数        | 偏差     | 水平数           | 偏差     |
|---------|--------|------------|--------|---------------|--------|
| 6/3*2   | 0.3750 | 6/6*3*3    | 0.3634 | 10/10*5*5*5   | 0.3075 |
| 6/8*2   | 0.3125 | 6/6*3*2    | 0.4271 | 10/10*5*5*2   | 0.4229 |
| 6/8*3   | 0.2361 | 6/6*6*3    | 0.2996 | 10/10*10*5*5  | 0.2890 |
| 8/8*4   | 0.1797 | 6/6*6*2    | 0.3698 | 10/10*10*5*2  | 0.3908 |
| 8/8*2   | 0.2969 | 6/3*3*2    | 0.4792 | 10/10*10*10*2 | 0.3570 |
| 10/10*5 | 0.1450 | 8/8*8*4    | 0.2310 | 10/10*10*10*5 | 0.2284 |
| 10/10*2 | 0.2875 | 8/8*4*4    | 0.2822 | 12/12*6*8*2   | 0.3961 |
| 10/5*2  | 0.3250 | 8/8*4*2    | 0.3848 | 12/12*6*8*3   | 0.3285 |
| 12/12*4 | 0.1615 | 8/8*8*2    | 0.3408 | 12/12*6*8*4   | 0.2954 |
| 12/12*2 | 0.2813 | 10/10*5*2  | 0.3588 | 12/12*6*8*6   | 0.2618 |
| 12/4*3  | 0.2708 | 10/5*5*2   | 0.3925 | 12/12*6*4*4   | 0.3274 |
| 12/6*4  | 0.1979 | 10/10*5*5  | 0.2305 | 12/12*6*4*3   | 0.3594 |
| 12/12*3 | 0.2014 | 10/10*10*2 | 0.3231 | 12/12*4*4*4   | 0.3580 |
| 12/12*6 | 0.1354 | 10/10*10*5 | 0.1878 | 12/12*4*4*3   | 0.3888 |

图 1 RCAD2003 配方优化系统界面

表 1 试验安排及结果

| 项 目                           | 配方 1  | 配方 2  | 配方 3  | 配方 4  | 配方 5  | 配方 6  | 配方 7  | 配方 8  |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 原材料用量/份                       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 母炼胶                           | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |
| 锌盐                            | 0     | 3     | 6     | 9     | 12    | 15    | 18    | 21    |
| 硫化剂 DCP                       | 1     | 1.8   | 0.8   | 1.6   | 0.6   | 1.4   | 0.4   | 1.2   |
| 硫黄                            | 0.6   | 0.4   | 0.2   | 0     | 0.6   | 0.4   | 0.2   | 0     |
| 门尼焦烧时间(120 ℃)/s               | 75    | 58    | 86    | 27    | 56    | 53    | 84    | 26    |
| 硫化仪数据(160 ℃)                  |       |       |       |       |       |       |       |       |
| M <sub>L</sub> /(dN·m)        | 1.32  | 1.13  | 1.04  | 1.32  | 0.99  | 1.02  | 1.00  | 1.20  |
| M <sub>H</sub> /(dN·m)        | 16.29 | 20.85 | 11.74 | 31.34 | 19.37 | 30.72 | 13.77 | 49.07 |
| 硫化胶性能(160 ℃×t <sub>90</sub> ) |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 邵尔 A 型硬度/度                    | 61    | 69    | 66    | 81    | 76    | 84    | 75    | —     |
| 100%定伸应力/MPa                  | 2.29  | 4.15  | 2.99  | 10.67 | 5.74  | 11.41 | 4.93  | —     |
| 300%定伸应力/MPa                  | 12.50 | —     | 11.58 | —     | —     | —     | 14.00 | —     |
| 拉伸强度/MPa                      | 15.80 | 16.68 | 14.02 | 14.84 | 16.36 | 16.51 | 13.94 | —     |
| 拉断伸长率/%                       | 388   | 273   | 393   | 127   | 254   | 142   | 295   | —     |
| 撕裂强度/(kN·m <sup>-1</sup> )    | 38.29 | 35.15 | 43.95 | 26.05 | 42.74 | 38.00 | 41.90 | —     |
| 回弹值/%                         | 32.11 | 33.03 | 31.50 | 32.80 | 31.00 | 30.60 | 30.80 | —     |

注:母炼胶基本配方为 NBR 100,炭黑 86,白炭黑 15,增塑剂 DOP 16。

$$Y_2=13.463\ 1-0.708\ 99X_1-0.578\ 38X_2+1.514\ 5X_3+0.036\ 587X_1^2+0.094\ 101X_2^2-0.079\ 839X_3^2+0.071\ 323X_1X_2+0.079\ 892X_1X_3-0.098\ 017X_2X_3$$

$$Y_3=46.112\ 6+0.594\ 8X_1+0.731\ 41X_2-3.189\ 3X_3-0.262\ 47X_1^2-0.439\ 18X_2^2-0.742\ 77X_3^2-0.347\ 51X_1X_2+0.979\ 82X_1X_3+1.128\ 7X_2X_3$$

$$\begin{aligned}
 Y_4 = & 624.7331 - 80.9549X_1 - 17.7453X_2 + 43.6354X_3 + 3.305X_1^2 - 2.275X_2^2 - \\
 & 21.626X_3^2 - 3.115X_1X_2 + 7.3564X_1X_3 + 6.4379X_2X_3 \\
 Y_5 = & 68.5765 - 5.4086X_1 - 3.8125X_2 + 8.0527X_3 + 0.49131X_1^2 + 0.63122X_2^2 - \\
 & 0.78796X_3^2 + 0.79789X_1X_2 + 0.54742X_1X_3 - 1.4085X_2X_3 \\
 Y_6 = & -1.371 - 0.20638X_1 - 0.060491X_2 + 1.8018X_3 + 0.086256X_1^2 + 0.082832X_2^2 + \\
 & 0.082275X_3^2 + 0.33644X_1X_2 - 0.14034X_1X_3 - 0.41315X_2X_3
 \end{aligned}$$

式中,  $X_1$ ,  $X_2$  和  $X_3$  均为因素水平。

### 3 与金属材料的粘合性能

试样为 45<sup>#</sup> 碳钢, 尺寸为 120 mm×25 mm×2 mm, 磷化处理未涂粘合剂。NBR 与试样硫化粘合后, 在电子拉力机上测定 180° 剥离强度, 结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, 硫黄用量为 0.5 份时, 胶料与金属粘合强度随硫化剂 DCP 用量增大而提高, 并在硫化剂 DCP 用量为 1.36 份时达到最大值。这是由于粘合强度与分子链运动及胶料强度有关, 随着硫化剂 DCP 用量增大, 胶料的交联密度增大, 粘合强度提高, 但交联密度继续增大限制了分子链运动, 粘合强度开始下降<sup>[3]</sup>。

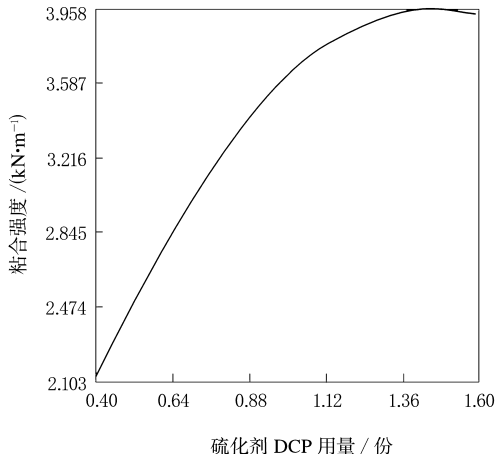


图 2 硫化剂 DCP 用量对粘合强度的影响

从综合性能考虑, 将硫化剂 DCP 的用量固定在 1 份考察锌盐对粘合性能的影响, 结果见图 3。从图 3 可以看出, 胶料粘合强度随锌盐用量增大而显著提高。锌离子的引入在橡胶与金属界面形成了橡胶-金属离子键, 化学键的形成大大提高了界面接合力<sup>[4]</sup>。

锌盐与硫化剂 DCP 存在交互作用, 二者对粘合性能影响的等高线如图 4 所示。根据综合性能要求可从等高线选取合理的锌盐/硫化剂 DCP 用

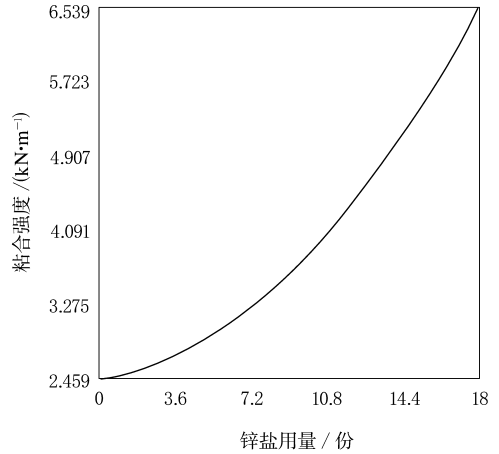


图 3 锌盐用量对粘合强度的影响

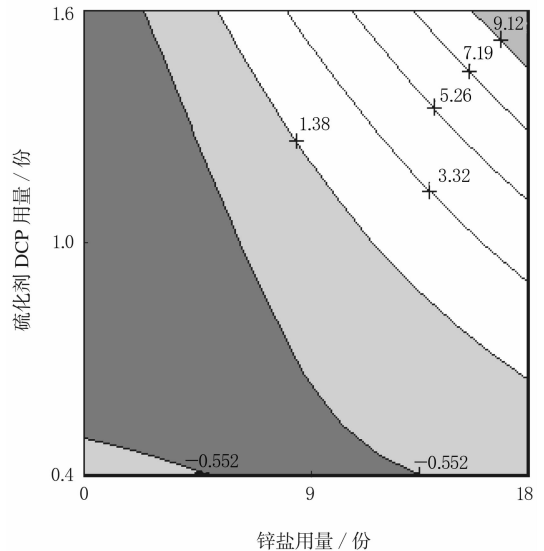


图 4 粘合强度等高线

量配比。

### 4 配方优选

根据综合性能的要求, 选取配方: 锌盐 12, 硫化剂 DCP 0.9, 硫黄 0.4。对其实测值与回归方程预测值进行对比, 结果见表 2。由表 2 可

表 2 回归方程验证结果

| 项 目                        | 预测值   | 实测值   |
|----------------------------|-------|-------|
| 邵尔 A 型硬度/度                 | 72.7  | 71    |
| 拉伸强度/MPa                   | 15.2  | 15.35 |
| 拉断伸长率/%                    | 272   | 281   |
| 撕裂强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) | 43.92 | 43.70 |
| 粘合强度/(kN·m <sup>-1</sup> ) | 4.10  | 4.06  |

以看出,预测值与实测值很相近,说明回归方程具有较好的预测性。

5 结论

(1)均匀设计法可大大减少试验次数,应用 RCAD2003 优化得到的回归方程具有较好的预测性。

(2)锌盐的加入显著提高了 NBR 与金属的

粘合强度。  
(3)用三元二次回归方程优选的 NBR 密封制品配方为:锌盐 12,硫化剂 DCP 0.9,硫黄 0.4。该配方胶料各项性能均达到期望值。

参考文献:

[1] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京:科学出版社, 1994.  
[2] 姚钟尧,蔡清毅,廖 恺. 均匀设计法在 EPDM 配方试验中的应用[J]. 橡胶工业,2001,48(9): 517.  
[3] 张殿荣,辛振祥. 现代橡胶配方设计[M]. 北京:化学工业出版社,2001.  
[4] 刘印文,刘振华,刘 涌. 橡胶密封制品实用加工技术[M]. 北京:化学工业出版社,2002.  
第二届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文

国内外简讯 9 则

△最近,山东兖州市银河集团陆通轮胎有限公司首批大型载重汽车全钢子午线轮胎下线。该公司全钢载重子午线轮胎项目设计规模为年产 300 万套,一期工程年产能力为 120 万套,主要生产设备均为进口,投资 20 亿元。其设备和技术均处于国内领先水平。

(摘自《中国汽车报》)

△双星集团在国际市场竞争激烈、原材料价格上涨的环境下仍保持了强劲的发展态势,2004 年 1~6 月,实现出口创汇 5 082 万美元,同比增长 59.6%。

(双星集团 张艾丽供稿)

△2003 年印度 NR 产量已从上世纪 50 年代初的 1.5 万 t 增至 65 万 t,而每公顷单产由 300 kg 增至 1 600 kg,是所有产胶国里单产最高的。

IRJ,[79],29(2004)

△印度最大的炭黑生产商菲利浦炭黑公司(PCB)与普利司通将签订每年向后者提供 8 万 t 炭黑的供货合同。该公司的炭黑年生产能力为 18 万 t,与普利司通的合同约占其年产能力的 50%。

IRJ,[79],39(2004)

△Dow Reichhold 专用胶乳公司宣布,自 2004 年 4 月 1 日起将在世界各地销售的生产胶乳手套用丁腈胶乳每千克价格提高 0.05 美元,而

且不排除在第 3 季度继续提价的可能。  
IRJ,[79],40(2004)

△莱茵化学美国公司投资 1 000 多万美元改进其在美国沙登和特伦顿厂的生产,除了新混炼设备和齿轮泵挤出技术外,还安装了许多自动输送装置。这些投资不但提高了公司产量,还改进了产品质量。

IRJ,[79],41(2004)

△马来西亚的 NR 种植面积从 1965 年的 205 万 hm<sup>2</sup> 降至 2002 年的 136 万 hm<sup>2</sup>,产量从 1986 年的最高峰 186 万 t 降至 2002 年的 58.9 万 t,在 NR 生产国中居于泰国、印度尼西亚和印度之后排第 4 位。

IRJ,[79],64(2004)

△2002 年全球橡胶总消耗量为 1 811 万 t,其中 NR 消耗量为 739 万 t,世界 SR 与 NR 消耗量的比例为 60:40,过去 10 年此比例一直未发生变化。在 739 万 t 的 NR 中,NR 胶乳消耗量占 12.5%,为 90.8 万 t。

IRJ,[79],64(2004)

△大陆投标并购凤凰公司。凤凰公司位于汉堡,有 1 万名员工,去年销售额为 15.3 亿美元,主要产品包括胶管、输送带和空气弹簧。业内专家估计,大陆公司这次并购将花费 2.27 亿欧元。

TA,[4],6(2004)