

不同硫化体系对载重轮胎胎面胶性能影响的正交试验分析

李爱娇¹, 李 伟¹, 李 健², 蒋松涛²

(1. 山东华勤橡胶科技有限公司, 山东 济宁 272000; 2. 合肥万力轮胎有限公司, 安徽 合肥 231100)

摘要: 利用正交试验分析法研究硫黄、促进剂TBBS、氧化锌用量对载重轮胎胎面胶各项性能的影响。结果表明: 硫黄用量对300%定伸应力、撕裂强度、老化后耐磨性能影响高度显著, 对抗切割性能及老化前耐磨性能影响显著; 促进剂TBBS用量对300%定伸应力、门尼焦烧时间(t_3)和正硫化时间(t_{90})、老化后耐磨性能影响高度显著, 对老化前撕裂强度和耐磨性能影响显著; 氧化锌用量对 t_3 和 t_{90} 影响显著; 促进剂和氧化锌的交互作用对老化后耐磨性能影响显著; 硫黄、促进剂TBBS、氧化锌用量对拉伸强度、拉断伸长率、回弹值、老化系数无明显影响。

关键词: 载重轮胎; 胎面胶; 硫黄; 促进剂; 氧化锌; 正交试验; 极差分析; 方差分析

中图分类号: TQ330.38⁺5; U463.341⁺.3 **文章编号:** 2095-5448(2022)04-0172-11

文献标志码: A

DOI: 10.12137/j.issn.2095-5448.2022.04.0172



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着交通运输业的迅猛发展, 市场对高性能轮胎需求迫切。目前, 安全轮胎、节能轮胎、冬季轮胎和全天候轮胎等各种新型轮胎已涌入市场, 并深受大众喜爱^[1-3]。近年来, 国内外轮胎行业对轮胎性能的研究重点不仅包含滚动阻力、抗湿滑性能和耐磨性能, 对轮胎高性能及综合性能方面也开展了许多研究。

本工作主要利用正交试验分析法, 研究在中长途载重轮胎胎面胶配方中, 300%定伸应力、耐磨性能、抗切割性能等的主要影响因素和不同硫化体系对胶料各项性能的影响, 对设计载重轮胎高性能配方或综合性能配方具有指导作用。

1 实验

1.1 主要原材料

混合天然橡胶, 泰国联谊橡胶有限公司产品; 炭黑N234, 龙星化工股份有限公司产品; 硬脂酸, 泰柯棕化有限公司产品。

作者简介: 李爱娇(1992—), 女, 山东济宁人, 山东华勤橡胶科技有限公司工程师, 硕士, 主要从事轮胎配方设计工作。

E-mail: 1070197397@qq.com

1.2 试验配方

混合天然橡胶 100, 炭黑N234 52, 石蜡 1, 氧化锌 变量, 硫黄 变量, 促进剂TBBS 变量。

1.3 主要设备

BTM-2型密炼机, 广州华工百川自控科技有限公司产品; XK-160型开炼机, 无锡市第一橡塑机械有限公司产品; XLB-D600×600型平板硫化机, 益阳新华美机电科技有限公司产品。

1.4 试样制备

胶料按常规工艺混炼, 混炼胶停放24 h后硫化制样。

1.5 性能测试

胶料各项性能均按相应国家标准进行测试。

2 正交试验设计

采用正交试验分析法确定硫黄、促进剂TBBS和氧化锌的最佳配比, 以优化胎面胶配方。各试验因子与水平如表1所示, 其中, 因子A为硫黄, B为促进剂TBBS, C为氧化锌。

考虑因子的交互作用 $A \times B$, $B \times C$, 选用 $L_8(2^7)$

正交试验(见表2),其两列间的交互作用见表3。

表1 正交试验因子与水平

水 平	因子		
	A	B	C
1	1. 2	0. 9	4. 0
2	1. 0	1. 3	2. 0

表2 $L_8(2^7)$ 正交试验方案

试验代号	A	B	A×B	C	空	B×C	空
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

表3 $L_8(2^7)$ 两列间的交互作用

列 号	1	2	3	4	5	6	7
1	(1)	3	2	5	4	7	6
2		(2)	1	6	7	4	5
3			(3)	7	6	5	4
4				(4)	1	2	3
5					(5)	3	2
6						(6)	1
7							(7)

3 试验结果

试验各项性能数据如表4所示。

4 结果与讨论

4.1 300%定伸应力

4.1.1 极差分析

以300%定伸应力为例,老化前正交试验方案

表4 试验各项性能数据

项 目	试验代号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
老化前300%定伸应力(J)/MPa	13. 9	13. 8	14. 6	14. 7	12. 8	12. 5	13. 8	13. 7
老化后300%定伸应力(V)/MPa	15. 8	15. 6	17. 7	17. 2	14. 6	13. 9	16. 4	15. 8
老化前拉伸强度(K)/MPa	29. 4	27. 9	28. 9	28. 6	28. 0	27. 7	29. 3	28. 5
老化后拉伸强度(W)/MPa	24. 1	23. 2	25. 9	24. 3	23. 9	22. 2	24. 8	25. 3
老化前拉伸伸长率(L)/%	570	550	551	552	567	579	581	563
老化后拉伸伸长率(X)/%	467	458	459	441	500	483	450	479
老化前撕裂强度(N)/(kN·m ⁻¹)	69. 1	68. 4	60. 3	65. 6	93. 5	90. 0	84. 8	87. 7
老化后撕裂强度(Y)/(kN·m ⁻¹)	54. 8	54. 5	57. 5	58. 6	55. 0	57. 0	55. 5	59. 4
老化系数(O)	0. 672	0. 692	0. 747	0. 679	0. 753	0. 669	0. 656	0. 755
邵尔A型硬度(M)/度	66	65	68	67	65	65	66	66
动态切割体积(T)/cm ³	1. 130	1. 052	1. 500	1. 200	0. 920	0. 908	1. 121	1. 024
温升(E)/℃	56. 0	54. 8	47. 3	51. 2	54. 3	58. 2	50. 8	52. 4
老化前磨耗指数(U)	120. 7	133. 0	112. 6	118. 2	133. 6	137. 5	125. 4	131. 2
老化后磨耗指数(UU)	94. 6	93. 4	85. 2	87. 3	103. 7	103. 3	94. 3	96. 6
回弹值(G, 25℃)/%	46. 0	46. 3	47. 2	46. 2	45. 2	46. 8	46. 8	46. 2
门尼焦烧时间t ₃ (P, 125℃)/min	31. 95	28. 37	25. 28	22. 48	31. 55	28. 26	26. 16	21. 48
t ₉₀ (Q)/min	14. 86	13. 95	13. 61	12. 44	15. 33	14. 09	14. 10	12. 52

注:括号中字母为性能代号。
与试验结果如表5所示(R为极差,S为方差,f为自由度,下同)。

根据表5,采用直观分析法(极差分析法)可以得出各因子对胶料300%定伸应力的影响从大到小的顺序为A、B、A×B、C、B×C。极差越大,表明该因子对试验指标的影响越大,因此也越重要。

对于老化前300%定伸应力,C、B×C是次要因子,可忽略;A、B为重要因子;A×B为较重要因子。B与A和C有交互作用,其二元效应如表6所

示。表6中,A₁B₁为A因子1水平与B因子1水平的300%定伸应力均值,结合表5进行计算得到,其他计算类似。

4.1.2 方差分析

老化前300%定伸应力的F检验如表7所示,m_S=S/f。

虽然极差分析法简单易懂、计算量小,但它不能区分某因子不同水平所对应的试验结果差异究竟是由因子水平引起的,还是由试验误差引起

表5 老化前300%定伸应力正交试验方案与试验结果

试验代号	A	B	A×B	C	空	B×C	空	300%定伸应力
1	1	1	1	1	1	1	1	13.9
2	1	1	1	2	2	2	2	13.8
3	1	2	2	1	1	2	2	14.6
4	1	2	2	2	2	1	1	14.7
5	2	1	2	1	2	1	2	12.8
6	2	1	2	2	1	2	1	12.5
7	2	2	1	1	2	2	1	13.8
8	2	2	1	2	1	1	2	13.7
J_1	57.0	53.0	55.2	55.1	54.7	55.1	54.9	
J_2	52.8	56.8	54.6	54.7	55.1	54.7	54.9	
$J_1/4$	14.250	13.250	13.800	13.775	13.675	13.775	13.725	
$J_2/4$	13.200	14.200	13.650	13.675	13.775	13.675	13.725	
R	4.2	3.8	0.6	0.4	0.4	0.4	0	
S	2.205	1.805	0.045	0.020	0.020	0.020	0	
f	1	1	1	1	1	1	1	

表6 老化前300%定伸应力的B与A和C之间有交互作用的二元效应

因子	B_1	B_2
A_1	13.85	14.65
A_2	12.65	13.75
C_1	13.35	14.20
C_2	13.15	14.20

表7 老化前300%定伸应力的F检验

方差来源	S	f	m_s	F值	显著性
A	2.205	1	2.205	220.5	***
B	1.805	1	1.805	180.5	***
A×B	0.045	1	0.045	4.5	—
C	0.020	1	0.020	2.0	—
B×C	0.020	1	0.020	2.0	—
误差	0.020	2	0.010		

的,也不能作为考察和判断各因子的影响是否显著的标准^[4-6]。

方差分析法尽管复杂,但可以弥补极差分析法的不足。为了评估各因子的影响显著性,本研究还进行了方差分析的F检验。

表5中第5和第7列为空列,视为误差列,则误差平方和及误差自由度分别为0.020和2。

f_1 和 f_2 分别表示因子和误差的自由度。

α 表征显著性水平, α 为0.005,0.01,0.025,0.05,0.10的置信几率分别为99.5%,99.0%,97.5%,95.0%,90.0%。

$F_\alpha(f_1, f_2)$ (α 取0.01,0.05,0.10)是F的临界值。 F_A 表示A因子的F值。当 $F_A \geq F_{0.01}(f_1, f_2)$ 时,A

因子水平变化影响高度显著,表示为“***”(下同);当 $F_{0.01}(f_1, f_2) > F_A \geq F_{0.05}(f_1, f_2)$ 时,A因子水平变化影响显著,表示为“**”(下同);当 $F_{0.05}(f_1, f_2) > F_A \geq F_{0.10}(f_1, f_2)$ 时,A因子水平变化有一定影响,表示为“*” (下同);当 $F_{0.10}(f_1, f_2) > F_A$ 时,A因子水平变化影响不显著,表示为“—”^[7](下同)。

根据F值检验表可知, $F_{0.005}(1, 2) = 198.50$, $F_{0.01}(1, 2) = 98.49$, $F_{0.025}(1, 2) = 38.51$, $F_{0.05}(1, 2) = 18.51$, $F_{0.10}(1, 2) = 8.53$ 。

由表7可知,A,B因子的F值大于 $F_{0.01}(1, 2)$,属于高度显著级别。由于A和B有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。

由表6可知, A_1B_2 和 B_2C_1 或 B_2C_2 的300%定伸应力较大,因此最佳组合为 $A_1B_2C_1$ 或 $A_1B_2C_2$,最佳用量为 A_1B_2 。C因子对300%定伸应力的影响为不显著,C的用量还无法确定,热氧老化后的定伸应力也影响制品的质量,因此通过热氧老化后的300%定伸应力分析进一步确定C。

老化后300%定伸应力的F检验如表8所示。

由表8可知:A和B对于老化后300%定伸应力

表8 老化后300%定伸应力的F检验

方差来源	S	f	m_s	F值	显著性
A	220.240	1	3.92	120.62	***
B	6.480	1	6.48	199.38	***
A×B	0.010	1	0.01	0.15	—
C	0.500	1	0.50	15.38	*
B×C	0.010	1	0.01	0.15	—
误差	0.070	2	0.03		

影响显著; C 有影响但不显著; $A \times B$ 、 $B \times C$ 影响不显著。因此, C 的最佳用量应根据 B 和 C 有交互作用的二元效应来确定。

老化后300%定伸应力的 B 和 C 有交互作用的二元效应如表9所示。

由表9可知, B 和 C 的最佳组合为 B_2C_1 ,结合前面的分析,老化后300%定伸应力的最佳组合为 $A_1B_2C_1$ 。

表9 老化后300%定伸应力的 B 和 C 有交互作用的二元效应

因 子	B_1	B_2
C_1	15.20	17.07
C_2	14.75	16.50

4.2 撕裂强度

4.2.1 极差分析

老化前撕裂强度正交试验方案及试验结果如表10所示。

表10 老化前撕裂强度正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	$A \times B$	C	空	$B \times C$	空	老化前撕裂强度
1	1	1	1	1	1	1	1	69.1
2	1	1	1	2	2	2	2	68.4
3	1	2	2	1	1	2	2	60.3
4	1	2	2	2	2	1	1	65.6
5	2	1	2	1	2	1	2	93.5
6	2	1	2	2	1	2	1	90.0
7	2	2	1	1	2	2	1	84.8
8	2	2	1	2	1	1	2	87.7
N_1	263.4	321.0	310.0	307.7	307.1	315.9	309.5	
N_2	356.0	298.4	309.4	311.7	312.3	303.5	309.9	
$N_1/4$	65.850	80.250	77.500	76.925	76.775	78.975	77.375	
$N_2/4$	89.000	74.600	77.350	77.925	78.075	75.875	77.475	
R	92.6	22.6	0.6	4.0	5.2	12.4	0.4	
S	1 071.845	63.845	0.045	2.000	3.380	19.220	0.020	
f	1	1	1	1	1	1	1	

根据表10,采用极差分析法可以得出各因子对胶料撕裂强度的影响从大到小的顺序为: A 、 B 、 $B \times C$ 、 C 、 $A \times B$ 。对于老化前撕裂强度, C 、 $A \times B$ 是次要因子,可忽略; A 为重要因子; B 、 $B \times C$ 为较重要因子。老化前撕裂强度的 B 与 A 和 C 之间有交互作用的二元效应如表11所示。

表11 老化前撕裂强度的 B 与 A 和 C 之间有交互作用的二元效应

因 子	B_1	B_2
A_1	68.75	62.95
A_2	91.75	86.25
C_1	81.30	72.22
C_2	79.20	76.65

4.2.2 方差分析

老化前撕裂强度的 F 检验如表12所示。
由表12可知: A 因子的 F 值大于 $F_{0.005}(1,2)$,属于高度显著影响; B 因子的 F 值大于 $F_{0.05}(1,2)$ 且

表12 老化前撕裂强度的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	1 071.845	1	1 071.845	630.50	***
B	63.845	1	63.845	37.56	**
$A \times B$	0.045	1	0.045	0.03	—
C	2.000	1	2.000	1.18	—
$B \times C$	19.220	1	19.220	11.31	*
误差	3.400	2	1.700		

小于 $F_{0.01}(1,2)$,属于显著影响; $B \times C$ 的 F 值大于 $F_{0.1}(1,2)$ 且小于 $F_{0.05}(1,2)$,属于有一定影响。且 B 和 A 、 C 有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。

由表11可知, A_2B_1 和 B_1C_1 的老化前撕裂强度较大。通过热氧老化后的撕裂强度分析进一步确定最佳组合。

老化后撕裂强度的 F 检验见表13。
由表13可知, A 、 B 、 C 、 $A \times B$ 、 $B \times C$ 影响均不显著。因此,撕裂强度的最佳组合为 $A_2B_1C_1$ 。

表13 老化后撕裂强度的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	0.281	1	0.281	0.171	—
B	11.761	1	11.761	7.165	—
$A \times B$	1.901	1	1.901	1.158	—
C	5.611	1	5.611	3.418	—
$B \times C$	1.361	1	1.361	0.829	—
误差	3.283	2	1.642		

4.3 硬度

4.3.1 极差分析

硬度正交试验方案及试验结果如表14所示。

表14 硬度正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	$A \times B$	C	空	$B \times C$	空	硬度
1	1	1	1	1	1	1	1	66
2	1	1	1	2	2	2	2	65
3	1	2	2	1	1	2	2	68
4	1	2	2	2	2	1	1	67
5	2	1	2	1	2	1	2	65
6	2	1	2	2	1	2	1	65
7	2	2	1	1	2	2	1	66
8	2	2	1	2	1	1	2	66
M_1	266	261	263	265	265	264	264	
M_2	262	267	265	263	263	264	264	
$M_1/4$	66.50	65.25	65.75	66.25	66.25	66.00	66.00	
$M_2/4$	65.50	66.75	66.25	65.75	65.75	66.00	66.00	
R	4	6	2	2	2	0	0	
S	2	4.5	0.5	0.5	0.5	0	0	
f	1	1	1	1	1	1	1	

根据表14,采用极差分析法可以得出各因子对胶料硬度的影响从大到小的顺序为: $B, A, C, A \times B, B \times C$ 。对于硬度, $C, A \times B, B \times C$ 是次要因子,可忽略; B 为重要因子; A 为较重要因子。 B 与 A 和 C 有交互作用,其二元效应如表15所示。

表15 硬度的 B 与 A 和 C 之间有交互作用的二元效应

因子	B_1	B_2
A_1	65.5	67.5
A_2	65.0	66.0
C_1	65.5	67.0
C_2	65.0	66.5

4.3.2 方差分析

硬度的 F 检验如表16所示。

由表16可知: B 因子的 F 值大于 $F_{0.10}(1,2)$ 且小于 $F_{0.05}(1,2)$,属于有一定影响级别; A 和 C 因子对硬度的影响不显著。且 B 与 A 和 C 有交互作用,因此

表16 硬度的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	2.0	1	2	8	—
B	4.5	1	4.5	18	*
$A \times B$	0.5	1	0.5	2	—
C	0.5	1	0.5	2	—
$B \times C$	0	1	0	0	—
误差	0.5	2	0.25		

应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。

由表15可知, A_1B_2 和 B_2C_1 的硬度较大,因此硬度最大的组合为 $A_1B_2C_1$ 。但是,胎面胶硬度并非越大越好,该配方胎面胶硬度要求在66度左右,根据表15可知,满足硬度要求的组合为 A_2B_2 和 B_2C_2 。因此,硬度最佳组合为 $A_2B_2C_2$ 。

4.4 抗切割性能

4.4.1 极差分析

老化前抗切割性能正交试验方案及试验结果如表17所示。

表17 老化前抗切割性能正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	$A \times B$	C	空	$B \times C$	空	动态切割体积
1	1	1	1	1	1	1	1	1.130
2	1	1	1	2	2	2	2	1.052
3	1	2	2	1	1	2	2	1.500
4	1	2	2	2	2	1	1	1.200
5	2	1	2	1	2	1	2	0.920
6	2	1	2	2	1	2	1	0.908
7	2	2	1	1	2	2	1	1.121
8	2	2	1	2	1	1	2	1.024
T_1	4.882	4.010	4.327	4.671	4.562	4.274	4.359	
T_2	3.973	4.845	4.528	4.184	4.293	4.581	4.496	
$T_1/4$	1.221	1.003	1.082	1.168	1.141	1.069	1.090	
$T_2/4$	0.993	1.211	1.132	1.046	1.073	1.145	1.124	
R	0.909	0.835	0.201	0.487	0.269	0.307	0.137	
S	0.103	0.087	0.005	0.030	0.009	0.012	0.002	
f	1	1	1	1	1	1	1	

根据表17,采用极差分析法可以得出各因子对胶料抗切割性能的影响从大到小的顺序为: $A, B, C, B \times C, A \times B$ 。对于抗切割性能, $B \times C, A \times B$ 是次要因子,可忽略; A, B 为重要因子; C 为较重要因子。抗切割性能的 B 与 A 和 C 有交互作用,其二元效应如表18所示。

4.4.2 方差分析

抗切割性能的 F 检验如表19所示。

由表19可知: A 因子的 F 值大于 $F_{0.05}(1,2)$,属

表18 抗切割性能的B与A和C之间有交互作用的二元效应

因 子	B_1	B_2
A_1	1.091	1.350
A_2	0.914	1.073
C_1	1.025	1.311
C_2	0.980	1.112

表19 抗切割性能的F检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	0.103	1	0.103	18.73	**
B	0.087	1	0.087	15.82	*
$A \times B$	0.005	1	0.005	0.910	—
C	0.030	1	0.030	5.450	—
$B \times C$	0.012	1	0.012	2.180	—
误差	0.011	2	0.005 5		

于显著影响; B 因子的 F 值大于 $F_{0.10}(1,2)$ 且小于 $F_{0.05}(1,2)$,属于有一定影响级别; C 因子对抗切割性能影响为不显著。由于 B 与 A 和 C 有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。由表18可知, A_2B_1 和 B_1C_2 的动态切割体积较小,因此抗切割性能最佳组合为 $A_2B_1C_2$ 。相对来说,硫黄、促进剂、氧化锌对胶料抗切割性能的影响不大。

4.5 温升

4.5.1 极差分析

温升正交试验方案及试验结果如表20所示。

根据表20,采用极差分析法可以得出各因子对胶料温升的影响从大到小的顺序为: B, C, A ,

表20 温升正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	$A \times B$	C	空	$B \times C$	空	温升
1	1	1	1	1	1	1	1	56.0
2	1	1	1	2	2	2	2	54.8
3	1	2	2	1	1	2	2	47.3
4	1	2	2	2	2	1	1	51.2
5	2	1	2	1	2	1	2	54.3
6	2	1	2	2	1	2	1	58.2
7	2	2	1	1	2	2	1	50.8
8	2	2	1	2	1	1	2	52.4
E_1	209.3	223.3	214.0	208.4	213.9	213.9	216.2	
E_2	215.7	201.7	211.0	216.6	211.1	211.1	208.8	
$E_1/4$	52.33	55.83	53.50	52.10	53.48	53.48	54.05	
$E_2/4$	53.93	50.43	52.75	54.15	52.78	52.78	52.20	
R	6.40	21.60	3.00	8.20	2.80	2.80	7.40	
S	5.12	58.32	1.13	8.405	0.98	0.98	6.845	
f	1	1	1	1	1	1	1	

$A \times B, B \times C$ 。对于温升, $A \times B, B \times C$ 是次要因子,可忽略; B, C 为重要因子; A 为较重要因子。 B 与 A 和 C 有交互作用,其二元效应如表21所示。

表21 温升的B与A和C之间有交互作用的二元效应

因 子	B_1	B_2
A_1	55.40	49.25
A_2	56.25	51.60
C_1	55.15	49.05
C_2	56.50	51.80

4.5.2 方差分析

温升的 F 检验如表22所示。

由表22可知: B 因子的 F 值大于 $F_{0.10}(1,2)$ 且小

表22 温升的F检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	5.120	1	5.120	1.31	—
B	58.320	1	58.320	14.91	*
$A \times B$	1.130	1	1.130	0.29	—
C	8.405	1	8.405	2.15	—
$B \times C$	0.980	1	0.980	0.25	—
误差	7.825	2	3.913		

于 $F_{0.05}(1,2)$,属于有一定影响级别; A 和 C 因子对温升影响不显著。且 B 与 A 和 C 有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。由表21可知, A_1B_2 和 B_2C_1 的温升较小,因此温升最佳组合为 $A_1B_2C_1$ 。

4.6 t_3

4.6.1 极差分析

t_3 的正交试验方案及试验结果如表23所示。

根据表23,采用极差分析法可以得出各因子对胶料 t_3 的影响从大到小的顺序为: $B, C, A, B \times C, A \times B$ 。对于 $t_3, A, B \times C, A \times B$ 是次要因子,可忽略; B 为重要因子; C 为较重要因子。 B 与 A 和 C 有交互作用,其二元效应如表24所示。

表23 t_3 的正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	A×B	C	空	B×C	空	t_3
1	1	1	1	1	1	1	1	31.95
2	1	1	1	2	2	2	2	28.37
3	1	2	2	1	1	2	2	25.28
4	1	2	2	2	2	1	1	22.48
5	2	1	2	1	2	1	2	31.55
6	2	1	2	2	1	2	1	28.26
7	2	2	1	1	2	2	1	26.16
8	2	2	1	2	1	1	2	21.48
P_1	108.08	120.13	107.96	114.94	106.97	107.46	108.85	
P_2	107.45	95.400	107.57	100.59	108.56	108.07	106.68	
$P_1/4$	27.020	30.033	26.990	28.735	26.743	26.865	27.213	
$P_2/4$	26.863	23.850	26.893	25.148	27.140	27.018	26.670	
R	0.630	24.730	0.390	14.35	1.590	0.610	2.170	
S	0.050	76.447	0.019	25.74	0.316	0.047	0.589	
f	1	1	1	1	1	1	1	

表24 t_3 的B与A和C之间有交互作用的二元效应

因子	B_1	B_2
A_1	30.160	23.880
A_2	29.905	23.820
C_1	31.750	25.720
C_2	28.315	21.980

表25 t_3 的F检验

方差来源	S	f	m_s	F值	显著性
A	0.050	1	0.050	0.110	—
B	76.447	1	76.447	168.944	***
A×B	0.019	1	0.019	0.042	—
C	25.740	1	25.740	56.884	**
B×C	0.047	1	0.047	0.104	—
误差	0.905	2	0.453		

长,因此 t_3 最佳组合为 $A_1B_1C_1$ 。

4.7 t_{90}

4.7.1 极差分析

t_{90} 的正交试验方案及试验结果如表26所示。

根据表26,采用极差分析法可以得出各因

4.6.2 方差分析

t_3 的F检验如表25所示。

由表25可知: B 因子的F值大于 $F_{0.005}(1,2)$,属于高度显著影响; C 因子的F值大于 $F_{0.05}(1,2)$ 小于 $F_{0.01}(1,2)$,属于显著影响; $A, B \times C, A \times B$ 的F值小于 $F_{0.10}(1,2)$,属于影响不显著。且 B 与 A 和 C 有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。由表24可知, A_1B_1 和 B_1C_1 的 t_3 较

子对胶料 t_{90} 的影响从大到小的顺序为: $B, C, A, B \times C, A \times B$ 。对于 $t_{90}, A, B \times C, A \times B$ 是次要因子,可忽略; B 为重要因子; C 为较重要因子。 B 与 A 和 C 有交互作用,其二元效应如表27所示。

4.7.2 方差分析

t_{90} 的F检验如表28所示。

由表28可知: B 因子的F值大于 $F_{0.01}(1,2)$,属于高度显著影响; C 因子的F值大于 $F_{0.05}(1,2)$ 小于 $F_{0.01}(1,2)$,属于显著影响; $A, B \times C, A \times B$ 的F值小于 $F_{0.10}(1,2)$,属于影响不显著。且 B 与 A 和 C 有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。由表27可知, A_2B_1 和 B_1C_1 的 t_{90} 较长,因此, t_{90} 最佳组合为 $A_2B_1C_1$ 。

4.8 老化前磨耗指数

4.8.1 极差分析

老化前磨耗指数的正交试验方案及试验结果如表29所示。

根据表29,采用极差分析法可以得出各因子

表26 t_{90} 的正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	A×B	C	空	B×C	空	t_{90}
1	1	1	1	1	1	1	1	14.86
2	1	1	1	2	2	2	2	13.95
3	1	2	2	1	1	2	2	13.61
4	1	2	2	2	2	1	1	12.44
5	2	1	2	1	2	1	2	15.33
6	2	1	2	2	1	2	1	14.09
7	2	2	1	1	2	2	1	14.10
8	2	2	1	2	1	1	2	12.52
Q_1	54.860	58.230	55.430	57.900	55.080	55.150	55.490	
Q_2	56.040	52.670	55.470	53.000	55.820	55.750	55.410	
$Q_1/4$	13.715	14.558	13.858	14.475	13.770	13.788	13.873	
$Q_2/4$	14.010	13.168	13.868	13.250	13.955	13.938	13.853	
R	1.180	5.560	0.040	4.900	0.740	0.600	0.080	
S	0.174	3.864	0	3.001	0.068	0.045	0.069	
f	1	1	1	1	1	1	1	

表27 t_{90} 的B与A和C之间有交互作用的二元效应

因子	B_1	B_2
A_1	14.405	13.025
A_2	14.710	13.310
C_1	15.095	13.855
C_2	14.020	12.480

表28 t_{90} 的F检验

方差来源	S	f	m_s	F值	显著性
A	0.174	1	0.174	5.043	—
B	3.864	1	3.864	112.000	***
A×B	0	1	0	0	—
C	3.001	1	3.001	86.986	**
B×C	0.045	1	0.045	1.304	—
误差	0.069	2	0.035		

对胶料耐磨性能的影响从大到小的顺序为:A,B,C,A×B,B×C。对于老化前磨耗指数,A,B,C为重要因子;A×B,B×C为较重要因子;B与A和C有交互作用,其二元效应如表30所示。

4.8.2 方差分析

老化前磨耗指数的F检验如表31所示。

由表31可知:A,B因子的F值大于 $F_{0.05}(1,2)$ 小于 $F_{0.01}(1,2)$,属于显著影响;C因子的F值大于 $F_{0.10}(1,2)$ 小于 $F_{0.05}(1,2)$,属于有一定影响;A×B,B×C的F值小于 $F_{0.10}(1,2)$,属于影响不显著。且B与A和C有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。由表30可知, A_2B_1 和 B_1C_2 的老化前磨耗指数较大,因此老化前耐磨性能

表29 老化前磨耗指数正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	A×B	C	空	B×C	空	老化前磨耗指数
1	1	1	1	1	1	1	1	120.7
2	1	1	1	2	2	2	2	133.0
3	1	2	2	1	1	2	2	112.6
4	1	2	2	2	2	1	1	118.2
5	2	1	2	1	2	1	2	133.6
6	2	1	2	2	1	2	1	137.5
7	2	2	1	1	2	2	1	125.4
8	2	2	1	2	1	1	2	131.2
U_1	484.5	524.8	510.3	492.3	502.0	503.7	501.8	
U_2	527.7	487.4	501.9	519.9	510.2	508.5	510.4	
$U_1/4$	121.125	131.200	127.575	123.075	125.500	125.925	125.450	
$U_2/4$	131.925	121.850	125.475	129.975	127.550	127.125	127.600	
R	43.2	37.4	8.4	27.6	8.2	4.8	8.6	
S	233.280	174.845	8.820	95.220	8.405	2.880	9.245	
f	1	1	1	1	1	1	1	

表30 老化前磨耗指数的 B 与 A 和 C 之间有交互作用的二元效应

因子	B_1	B_2
A_1	126.85	115.40
A_2	135.55	128.30
C_1	127.15	119.00
C_2	135.25	124.70

表31 老化前磨耗指数的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	233.28	1	233.280	26.430	**
B	174.845	1	174.845	19.810	**
$A \times B$	8.820	1	8.820	0.999	—
C	95.220	1	95.220	10.790	*
$B \times C$	2.880	1	2.880	0.326	—
误差	17.650	2	8.825		

最佳组合为 $A_2B_1C_2$ 。

4.9 老化后磨耗指数

4.9.1 极差分析

老化后磨耗指数正交试验方案及试验结果如表32所示。

根据表32,采用极差分析法可以得出各因子对胶料老化后耐磨性能的影响从大到小的顺序为: A , B , $B \times C$, C , $A \times B$ 。对于老化后磨耗指数, A , B 为重要因子; $B \times C$, C 为较重要因子; $A \times B$ 可忽略。 B 与 A 和 C 有交互作用,其二元效应如表33所示。

4.9.2 方差分析

老化后磨耗指数的 F 检验如表34所示。

由表34可知: A , B 因子的 F 值大于 $F_{0.01}(1, 2)$,

表32 老化后磨耗指数正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	$A \times B$	C	空	$B \times C$	空	老化后磨耗指数
1	1	1	1	1	1	1	1	94.6
2	1	1	1	2	2	2	2	93.4
3	1	2	2	1	1	2	2	85.2
4	1	2	2	2	2	1	1	87.3
5	2	1	2	1	2	1	2	103.7
6	2	1	2	2	1	2	1	103.3
7	2	2	1	1	2	2	1	94.3
8	2	2	1	2	1	1	2	96.6
UU_1	360.5	395.0	378.9	377.8	379.7	382.2	379.5	
UU_2	397.9	363.4	379.5	380.6	378.7	378.7	376.2	
$UU_1/4$	90.125	98.750	94.725	94.450	94.925	95.550	94.875	
$UU_2/4$	99.475	90.850	94.875	95.150	94.675	94.050	94.725	
R	37.4	31.6	0.6	2.8	1.0	6.0	0.6	
S	174.845	124.820	0.045	0.980	0.125	4.500	0.045	
f	1	1	1	1	1	1	1	

表33 老化后磨耗指数的 B 与 A 和 C 之间有交互作用的二元效应

因子	B_1	B_2
A_1	94.00	86.25
A_2	103.50	95.45
C_1	99.15	89.75
C_2	98.35	91.95

属于高度显著影响; $B \times C$ 的 F 值大于 $F_{0.05}(1, 2)$ 小于 $F_{0.01}(1, 2)$,属于显著影响; C 因子的 F 值大于 $F_{0.01}(1, 2)$ 小于 $F_{0.05}(1, 2)$,属于有一定影响; $A \times B$ 的 F 值小于 $F_{0.10}(1, 2)$,属于影响不显著。且 B 与 A

表34 老化后磨耗指数的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	174.845	1	174.845	2 057.000	***
B	124.820	1	124.820	1 468.470	***
$A \times B$	0.045	1	0.045	0.529	—
C	0.980	1	0.980	11.529	*
$B \times C$	4.500	1	4.500	52.941	**
误差	0.170	2	0.085		

和 C 有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。由表33可知, A_2B_1 和 B_1C_1 的老化后磨耗指数较大,因此,老化后耐磨性能最佳组合为 $A_2B_1C_1$ 。

4.10 回弹值

4.10.1 极差分析

回弹值正交试验方案及试验结果如表35所示。
根据表35,采用极差分析法可以得出各因子对胶料回弹值的影响从大到小的顺序为: $B \times C, B, A, C, A \times B$ 。对于回弹值, $A, C, A \times B$ 是次要因子,

可忽略; $B \times C$ 为重要因子; B 为较重要因子。 B 与 A 和 C 有交互作用,其二元效应如表36所示。

4.10.2 方差分析

回弹值的 F 检验如表37所示。
由表37可知,所有因子水平变化对胶料回弹值的影响均不显著。

表35 回弹值正交试验方案及试验结果

试验代号	A	B	$A \times B$	C	空	$B \times C$	空	回弹值
1	1	1	1	1	1	1	1	46.0
2	1	1	1	2	2	2	2	46.3
3	1	2	2	1	1	2	2	47.2
4	1	2	2	2	2	1	1	46.2
5	2	1	2	1	2	1	2	45.2
6	2	1	2	2	1	2	1	46.8
7	2	2	1	1	2	2	1	46.8
8	2	2	1	2	1	1	2	46.2
G_1	185.7	184.3	185.3	185.2	186.2	183.6	185.8	
G_2	185.0	186.4	185.4	185.5	184.5	187.1	184.9	
$G_1/4$	46.425	46.075	46.325	46.300	46.550	45.900	46.450	
$G_2/4$	46.250	46.600	46.350	46.375	46.125	46.775	46.225	
R	0.7	2.1	0.1	0.3	1.7	3.5	0.9	
S	0.061	0.551	0.001	0.011	0.361	1.531	0.101	
f	1	1	1	1	1	1	1	

表36 回弹值的 B 与 A 和 C 之间有交互作用的二元效应

因子	B_1	B_2
A_1	46.15	46.70
A_2	46.00	46.50
C_1	45.60	47.00
C_2	46.55	46.20

表37 回弹值的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	0.061	1	0.061	0.265	—
B	0.551	1	0.551	2.380	—
$A \times B$	0.001	1	0.001	0.004	—
C	0.011	1	0.011	0.048	—
$B \times C$	1.531	1	1.531	5.613	—
误差	0.463	2	0.232		

B 与 A 和 C 有交互作用,因此应通过交互作用的二元效应来确定最佳用量。由表36可知, A_1B_2 和 B_2C_1 的回弹值较大,因此回弹值最佳组合为 $A_1B_2C_1$ 。

4.11 拉伸强度、拉断伸长率、老化系数

拉伸强度、拉断伸长率、老化系数的 F 检验如表38—40所示。

由表38—40可知,各因子水平变化的影响均

表38 拉伸强度的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	0.211	1	0.211	1.00	—
B	0.661	1	0.661	3.13	—
$A \times B$	0.451	1	0.451	2.13	—
C	1.051	1	1.051	4.97	—
$B \times C$	0.061	1	0.061	0.29	—
误差	0.423	2	0.212		

表39 拉断伸长率的 F 检验

方差来源	S	f	m_s	F 值	显著性
A	561.125	1	561.125	3.24	—
B	45.125	1	45.125	0.26	—
$A \times B$	28.125	1	28.125	0.16	—
C	78.125	1	78.125	0.45	—
$B \times C$	10.125	1	10.125	0.06	—
误差	346.25	2	173.125		

不显著。

5 结语

综上,硫黄、促进剂、氧化锌对胎面胶各项性能的影响程度显著性及最佳组合如表41所示。

由表41可知:硫黄用量对300%定伸应力、撕

表40 老化系数的F检验

方差来源	<i>S</i>	<i>f</i>	<i>m_s</i>	<i>F</i> 值	显著性
<i>A</i>	0	1	0	0	—
<i>B</i>	0	1	0	0	—
<i>A</i> × <i>B</i>	0.001	1	0.001	0.004	—
<i>C</i>	0	1	0	0	—
<i>B</i> × <i>C</i>	0.001	1	0.001	0.004	—
误差	0.031	2	0.016		

裂强度、老化后耐磨性能影响高度显著,对抗切割性能及老化前耐磨性能影响显著;促进剂TBBS用量对300%定伸应力、 t_3 、 t_{90} 和老化后耐磨性能影响高度显著,对老化前撕裂强度和磨耗性能影响显著;氧化锌用量对 t_3 和 t_{90} 影响显著;另外,促进剂和氧化锌的交互作用对老化后耐磨性能影响显著。

表41 硫黄、促进剂、氧化锌对胎面胶各项性能的影响程度显著性及最佳组合

因子	老化前300%定伸应力	老化后300%定伸应力	老化前撕裂强度	硬度	动态切割体积	温升	t_3	t_{90}	老化前磨耗指数	老化后磨耗指数
<i>A</i>	***	***	***	—	**	—	—	—	**	***
<i>B</i>	***	***	**	*	*	*	***	***	**	***
<i>C</i>	—	*	—	—	—	—	**	**	*	*
<i>A</i> × <i>B</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>B</i> × <i>C</i>	—	—	*	—	—	—	—	—	—	**
最佳组合	A_1B_2	$A_1B_2C_1$	$A_2B_1C_1$	$A_2B_2C_2$	$A_2B_1C_2$	$A_1B_2C_1$	$A_1B_1C_1$	$A_2B_1C_1$	$A_2B_1C_2$	$A_2B_1C_1$

注:3个因子对拉伸强度、拉断伸长率、回弹值、老化系数无明显影响。

(2):233-234.

参考文献:

- [1] 任福君.高性能轿车轮胎胎面材料应用发展趋势[J].轮胎工业,2021,41(3):162-166.
- [2] 孙鸿洋,王文军,梁荣亮,等.冬季新胎与磨耗胎的冰雪路面抓地性能研究[J].中国汽车,2020,338(5):58-63.
- [3] 陈义中,胡白杨,罗吉良.聚酯帘线的发展趋势[J].橡胶科技,2020,18(3):125-127.
- [4] MATHEW T. The analysis of variance[J]. Technometrics, 2018, 43

- [5] 李海洲,张璐,王有镗.橡胶粉-环氧树脂砂浆工作性能的正交试验分析[J].混凝土,2017(11):178-180.
- [6] 覃清仪,范希营,曹艳丽,等.基于正交试验的注塑成型质量多目标影响因素研究[J].塑料科技,2020,48(10):17-20.
- [7] 马妍.正交试验法研究EPDM的常温和高温压缩永久变形[J].橡胶工业,2018,65(9):1066-1069.

收稿日期:2021-10-11

Orthogonal Test Analysis of Effects of Different Curing Systems on Properties of Tread Compound of Truck and Bus Tire

LI Aijiao¹, LI Wei¹, LI Jian², JIANG Songtao²

(1. Shandong Huaqin Rubber Technology Co., Ltd., Jinan 272000, China; 2. Hefei Wanli Tire Co., Ltd., Hefei 231100, China)

Abstract: The effects of different amounts of sulfur, accelerator TBBS and zinc oxide on various properties of the tread compound of truck and bus tire were studied by orthogonal test. The results showed that the amount of sulfur had a highly significant effect on the modulus at 300% elongation, tear strength and wear resistance after aging, and had a significant effect on the cutting resistance and wear resistance before aging. The amount of accelerator TBBS had a highly significant effect on the modulus at 300% elongation, Mooney scorch time (t_3), optimum curing time (t_{90}) and wear resistance after aging, and had a significant effect on the tear strength and wear resistance before aging. The amount of zinc oxide had a significant effect on t_3 and t_{90} . The interaction between accelerator and zinc oxide had a significant effect on the wear resistance after aging. The amount of sulfur, accelerator TBBS and zinc oxide had no significant effect on the tensile strength, elongation at break, rebound value and aging coefficient.

Key words: truck and bus tire; tread compound; sulfur; accelerator; zinc oxide; orthogonal test; range analysis; variance analysis