

# 胶料配合剂用量对橡胶减震器减震性能的影响

曾宪奎<sup>1</sup>, 贾伟臣<sup>1\*</sup>, 陈洪帅<sup>1</sup>, 滕彦理<sup>1</sup>, 曾佳<sup>2</sup>

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 西南交通大学 利兹学院, 四川 成都 611756)

**摘要:**以胶料配方中的炭黑N330、云母粉、蒙脱土、加工油和硫黄用量作为因子进行正交试验, 研究胶料配合剂用量对橡胶减震器减震性能的影响。结果表明, 炭黑用量对橡胶减震器性能影响最大, 蒙脱土用量对橡胶减震器的动态性能(动刚度、损耗因子和阻尼系数)影响较为显著, 加工油和硫黄用量对橡胶减震器减震性能影响相对较小, 云母粉用量对橡胶减震器减震性能的影响最小。

**关键词:**橡胶减震器; 配合剂; 用量; 减震性能; 刚度; 损耗因子; 阻尼系数; 正交试验

**中图分类号:** TQ336.4<sup>+</sup>2; TQ330.38

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-890X(2020)03-0192-04

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.03.0192



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

橡胶减震器的减震性能取决于胶料的性能和产品结构, 而胶料性能的影响更大, 故胶料配方设计在橡胶减震器的设计中至关重要<sup>[1]</sup>。因此研究胶料配合剂用量对橡胶减震器性能的影响十分必要。

天然橡胶(NR)的物理性能优异且具有良好的加工性能, 被广泛应用于橡胶减震器。本工作针对橡胶减震器的工作环境, 采用正交试验法设计胶料配方, 考察胶料配方中的炭黑N330、云母粉、蒙脱土、加工油和硫黄用量对橡胶减震器性能的影响, 旨在为今后设计橡胶减震器胶料配方提供参考<sup>[2]</sup>。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

NR, SVR10L, 越南进口产品; 炭黑N330, 上海卡博特化工有限公司产品; 云母粉, 德化县美龙矿业开发有限公司产品; 蒙脱土, 灵寿县天晨矿产品加工厂产品; 加工油, 山东隆盛达新材料科技有限公司产品。

### 1.2 配方

NR 100, 氧化锌 5, 硬脂酸 2, 防老剂

**基金项目:** 山东省自然科学基金资助项目(ZR2016XJ003)

**作者简介:** 曾宪奎(1967—), 男, 山东青州人, 青岛科技大学教授, 博士, 主要从事高分子材料加工技术与装备的教学及科研工作。

\*通信联系人(1062626394@qq.com)

4020 2, 促进剂DM 0.4, 促进剂TMTD 0.1, 炭黑N330、云母粉、蒙脱土、加工油和硫黄变量。

### 1.3 主要设备和仪器

XK-160E型开炼机和X(S)M-1.7 L型密炼机, 青岛科技大学产品; MM4130C型无转子硫化仪, 北京环峰化工机械实验厂产品; QLB-400×400×2型平板硫化机, 上海第一橡胶机械有限公司产品; UD-3601-A-100H型动态疲劳试验机, 中国台湾优肯科技股份有限公司产品。

### 1.4 试样制备

胶料混炼采用两段混炼工艺。一段混炼在密炼机中进行, 密炼室温度为60℃, 转子转速为60 r·min<sup>-1</sup>。混炼工艺为: NR(45 s)→1/2炭黑和除硫化体系外的所有小料(45 s)→剩余1/2炭黑和加工油(30 s)→提压砑, 压压砑(180 s)→清扫(30 s)→排胶。二段混炼在开炼机上进行, 混炼工艺为: 一段混炼胶→均匀包辊, 且辊筒间隙处有适量的积胶→硫化体系→左右割胶8次→混炼均匀, 调小辊距→薄通8次→下片, 混炼胶停放8 h后进行性能测试。胶料采用注射硫化机进行硫化, 硫化条件为160℃/5.88 MPa×25 min。

### 1.5 性能测试

采用UD-3601-A-100H型动态疲劳试验机测试橡胶减震器的静刚度、动刚度、损耗因子和阻尼系数。

## 1.6 正交试验设计

本研究以胶料配方中的炭黑N330、蒙脱土、云母粉、加工油和硫黄用量(份)分别为试验因子A, B, C, D, E, 建立五因子四水平正交试验表(见表1)进行正交试验。

表1 正交试验因子与水平表

水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	45	3	3	2	1.9
2	50	6	6	4	2.2
3	60	9	9	6	2.5
4	65	12	12	8	2.8

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交试验结果

胶料配合剂用量对橡胶减震器减震性能影响的正交试验结果如表2所示。

### 2.2 影响橡胶减震器静刚度的因素分析

橡胶减震器静刚度的极差分析如表3所示。

从表3可以看出,随着炭黑N330用量的增大,橡胶减震器的静刚度呈增大趋势,这是由于炭黑N330在胶料中起补强作用<sup>[3]</sup>。蒙脱土用量超过3份时,随着蒙脱土用量增大,橡胶减震器的静刚度有较大增幅,这是因为蒙脱土为片层材料,具有较

表2 胶料配合剂用量对橡胶减震器性能影响的正交试验结果

方案	因子					减震器性能			
	A	B	C	D	E	静刚度	动刚度	损耗因子	阻尼系数
1	45	3	3	2	1.9	400.92	664.80	0.263	1.343
2	45	6	6	4	2.2	494.25	753.25	0.292	1.674
3	45	9	9	6	2.5	589.04	863.24	0.294	1.935
4	45	12	12	8	2.8	459.87	786.18	0.282	1.696
5	50	3	6	8	2.5	523.25	803.11	0.266	1.642
6	50	6	3	6	2.8	468.62	745.28	0.265	1.512
7	50	9	12	4	1.9	698.07	989.40	0.312	2.341
8	50	12	9	2	2.2	717.40	992.77	0.276	2.102
9	60	3	9	4	2.8	717.20	1040.64	0.290	2.300
10	60	6	12	2	2.5	682.77	1017.40	0.285	2.217
11	60	9	3	8	2.2	484.57	752.04	0.291	1.659
12	60	12	6	6	1.9	508.88	806.35	0.285	1.755
13	65	3	12	6	2.2	869.02	1143.61	0.349	2.992
14	65	6	9	8	1.9	674.30	1016.76	0.340	2.597
15	65	9	6	2	2.8	610.08	905.29	0.291	2.009
16	65	12	3	4	2.5	858.38	1132.21	0.293	2.526

注:静刚度和动刚度单位为 $N \cdot mm^{-1}$ ,阻尼系数单位为 $N \cdot s \cdot mm^{-1}$ 。

大的比表面积,其以纳米尺寸分布于基体之中,具有很强的吸附能力,其表面的活性单元与橡胶分子链之间发生反应,提高了胶料的强度,当蒙脱土用量达到12份时效果较好。可预测继续增大蒙脱土用量,过量的蒙脱土会发生团聚反应,生成团聚体,降低分散性和吸附能力,且会在橡胶基体中形成应力集中点,使橡胶减震器性能下降<sup>[4]</sup>。对橡胶减震器静刚度性能影响最小的是云母粉用量,随着云母粉用量的增大,橡胶减震器静刚度先减小后增大。硫黄和加工油用量对橡胶减震器静刚度性能的影响均存在一个最优值。

综合得出,胶料配合剂用量对橡胶减震器静刚度影响由大到小的顺序为炭黑N330、加工油、蒙

表3 橡胶减震器静刚度的极差分析

水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	486.02	627.60	553.12	602.79	570.54
2	601.84	579.99	534.11	691.98	641.31
3	598.36	595.44	674.49	608.89	663.36
4	752.95	636.13	677.43	535.50	563.94
极差	266.93	56.14	143.32	156.48	99.42
优先级	1	5	3	2	4

注:所列静刚度( $N \cdot mm^{-1}$ )为各因子对应水平静刚度平均值。

脱土、硫黄、云母粉。

### 2.3 影响橡胶减震器动刚度性能的因素分析

橡胶减震器动刚度的极差分析如表4所示。

从表4可以看出,胶料配合剂用量对橡胶减震器动刚度的影响与对静刚度的影响相似。炭黑

表4 橡胶减震器动刚度的极差分析

水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	766.89	913.04	823.58	895.06	869.33
2	882.64	883.17	817.00	978.88	910.42
3	904.11	877.49	978.35	889.62	953.99
4	1 049.47	929.38	984.15	839.52	869.35
极差	282.58	51.89	167.15	139.36	84.66
优先级	1	5	2	3	4

注:所列动刚度( $N \cdot mm^{-1}$ )为各因子对应水平动刚度平均值。

N330用量对橡胶减震器动刚度影响最大,其次是蒙脱土用量对橡胶减震器动刚度的影响。蒙脱土用量较小时,随着蒙脱土用量的增大,橡胶减震器动刚度略有减小,蒙脱土用量较大时,橡胶减震器动刚度显著增大,而且可以预测在蒙脱土用量超过12份之后,橡胶减震器动刚度会减小,这是由于蒙脱土与橡胶形成橡胶-蒙脱土纳米复合材料,增大了橡胶的动刚度性能,但随着蒙脱土用量的增大,蒙脱土团聚,形成应力集中点,在动态载荷的作用下容易发生滑移,从而使橡胶减震器的动刚度减小<sup>[5]</sup>。加工油用量对橡胶减震器动刚度的影响次于蒙脱土用量,随着加工油用量的增大,橡胶减震器的动刚度先增大后减小,这是因为加工油在混炼过程中的作用是塑化胶料,提高混炼效果,促进物料分散,提高胶料性能;但当加工油的用量过大时,塑化作用过大,反而降低了胶料的性能。随着硫黄用量的增大,橡胶减震器的动刚度也先增大后减小,这是由于硫黄用量增大,胶料的交联程度提高,故而橡胶减震器的动刚度增大;但当硫黄用量过大时,胶料过硫,橡胶减震器的动刚度减小。对橡胶减震器动刚度影响最小的是云母粉用量。

综合得出,胶料配合剂用量对减震器动刚度影响由大到小的顺序为炭黑N330、蒙脱土、加工油、硫黄、云母粉。

#### 2.4 影响橡胶减震器损耗因子的因素分析

橡胶减震器损耗因子的极差分析如表5所示。

从表5可以看出:随着炭黑N330用量的增大,橡胶减震器的损耗因子先减小后增大,这是由于炭黑N330用量较小时主要起补强和润滑作用,炭黑N330用量较大时,其与橡胶之间产生更多的结合,使得胶料的交联密度提高,导致橡胶减震器的损耗因子减小;炭黑N330用量进一步增大,在交变

表5 橡胶减震器损耗因子的极差分析

水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	0.283	0.292	0.278	0.279	0.300
2	0.280	0.296	0.284	0.297	0.302
3	0.288	0.297	0.300	0.298	0.285
4	0.318	0.284	0.307	0.295	0.282
极差	0.038	0.013	0.029	0.019	0.020
优先级	1	5	2	4	3

注:所列损耗因子为各因子对应水平损耗因子平均值。

应力的作用之下,其与橡胶大分子之间的滑动增强,橡胶减震器的储能模量降低,导致损耗因子增大<sup>[6]</sup>。随着蒙脱土用量的增大,橡胶减震器的损耗因子增大,这是因为蒙脱土作为纳米材料分散于橡胶基体之中,能够起到成核作用,增强对橡胶大分子链的约束性,减少柔性链段,而且橡胶大分子链插入蒙脱土片层之间,同样约束橡胶大分子链的运动,这两种作用增大了胶料的内摩擦,从而使得橡胶减震器的损耗因子增大。随着硫黄和加工油用量的增大,橡胶减震器的损耗因子先增大后减小,即硫黄和加工油用量对橡胶减震器的损耗因子影响均存在一个最优值。对橡胶减震器的损耗因子影响最小的是云母粉用量,随着云母粉用量的增大,橡胶减震器的损耗因子先增大后减小。

#### 2.5 影响橡胶减震器阻尼系数的因素分析

橡胶减震器阻尼系数的极差分析如表6所示。

表6 橡胶减震器阻尼系数的极差分析

水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	1.662	2.069	1.760	1.918	2.009
2	1.899	2.000	1.770	2.210	2.107
3	1.983	1.986	2.234	2.048	2.080
4	2.531	2.020	2.312	1.898	1.879
极差	0.869	0.083	0.552	0.312	0.227
优先级	1	5	2	3	4

注:所列阻尼系数( $N \cdot s \cdot mm^{-1}$ )为各因子对应水平阻尼系数平均值。

从表6可以看出,随着炭黑N330用量的增大,橡胶减震器的阻尼系数增大,这是由于炭黑N330作为补强材料能够提高胶料的强度,增大炭黑N330用量使其与橡胶之间的相互作用提高,导致橡胶减震器的阻尼系数增大。随着蒙脱土用量的增大,橡胶减震器的阻尼系数也增大,这是因为蒙脱土在橡胶基体中的成核作用,而且蒙脱土以纳

米尺寸分散于橡胶中,蒙脱土在橡胶基体中层层排列,提高了对橡胶大分子链的约束,从而增大了胶料的阻尼性能<sup>[7-8]</sup>。加工油在胶料混炼中的作用是提高混炼效果,但加工油用量过大,会产生负面的影响,所以加工油用量对橡胶减震器阻尼系数的影响同样是先增大后减小。硫黄用量对橡胶减震器阻尼系数的影响存在一个最优值,硫黄用量过大导致胶料过硫,降低胶料的减震性能。对橡胶减震器阻尼系数影响最小的是云母粉用量。云母粉用量对橡胶减震器阻尼系数的影响不明显。

### 3 结论

本工作对胶料配合剂用量对橡胶减震器减震性能的影响进行研究,得出如下结论。

(1) 炭黑N330用量对橡胶减震器静刚度的影响最大,其后依次为加工油、蒙脱土、硫黄和云母粉用量。若要提高橡胶减震器最主要的性能——静刚度,可以增大炭黑N330用量,而蒙脱土、硫黄和加工油用量均有一个最优值。

(2) 炭黑N330用量对橡胶减震器动刚度的影响最大,其后依次为蒙脱土、加工油、硫黄和云母粉用量。配合剂用量对橡胶减震器动刚度的影响趋势与对静刚度的影响趋势相似,可以在保证静刚度的前提下,确定各配合剂用量范围。

(3) 炭黑N330用量对橡胶减震器损耗因子的

影响最大,其后依次为蒙脱土、硫黄、加工油和云母粉用量。

(4) 炭黑N330用量对橡胶减震器阻尼系数的影响最大,其后依次为蒙脱土、加工油、硫黄和云母粉用量。

### 参考文献:

- [1] 吕冲. 橡胶减振器疲劳机理及疲劳寿命的研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2015.
- [2] 曾宪奎,韩广文,孙延奎. 配方因素对三元乙丙橡胶密封圈硫化胶性能的影响[J]. 橡胶工业,2016,63(6):336-341.
- [3] Gao Y, Wang X, Liu M, et al. Effect of Montmorillonite on Carboxylated Styrene Butadiene Rubber/Hindered Phenol Damping Material with Improved Extraction Resistance[J]. Materials & Design,2014,58(1):316-323.
- [4] 王建功,魏继军,任慧,等. 有机蒙脱土对NR/NBR阻尼材料性能的影响[J]. 橡塑技术与装备,2018,44(3):6-10.
- [5] 于凯本,李天涯,井源,等. 硫化与补强体系对氯丁橡胶/天然橡胶并用胶性能的影响[J]. 橡胶工业,2018,65(9):1002-1005.
- [6] Li X, Bai T, Li Z R, et al. Influence of the Temperature on the Hyper-elastic Mechanical Behavior of Carbon Black Filled Natural Rubbers[J]. Mechanics of Materials,2016,95(1):136-145.
- [7] Diaz R, Diani J, Gilormini P. Physical Interpretation of the Mullins Softening in a Carbonblack Filled SBR[J]. Polymer,2014,55(19):4942-4947.
- [8] 郑龙,姜健,张立群,等. 不同硫化体系对天然橡胶动静态性能的影响[J]. 橡胶工业,2018,65(4):421-425.

收稿日期:2019-09-04

## Effect of Compounding Agent Dosage on Damping Performance of Rubber Damper

ZENG Xiankui<sup>1</sup>, JIA Weichen<sup>1</sup>, CHEN Hongshuai<sup>1</sup>, TENG Yanli<sup>1</sup>, ZENG Jia<sup>2</sup>

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** The effects of compounding agent dosage on the damping performance of the rubber damper were investigated by orthogonal experiment, using the dosages of carbon black N330, mica powder, montmorillonite, processing oil and sulfur in the compound formulation as factors. The results showed that, the carbon black dosage had the greatest impact on the damping performance of the rubber damper, the montmorillonite dosage had significant impact on the dynamic performance (dynamic stiffness, loss factor and damping coefficient) of the rubber damper, the processing oil dosage and sulfur dosage had relatively small effects on the damping performance of the rubber damper, and the mica powder dosage has the least impact on the damping performance of the rubber damper.

**Key words:** rubber damper; compounding agent; dosage; damping performance; stiffness; loss factor; damping coefficient; orthogonal experiment