

工艺·设备

隔震橡胶支座的硫化工艺优化

张远喜,任 姝,黄兆明,袁维娜*,唐 均,管庆松

(震安科技股份有限公司 云南省工程结构减隔震应用工程研究中心,云南 昆明 650041)

摘要:采用TP700多路数据记录仪对隔震橡胶支座(以下简称支座)的硫化过程进行温度监测,利用阿累尼乌斯方程式计算支座各胶层的硫化效应、等效硫化时间以及硫化程度,并对支座的硫化工艺进行优化。支座的优化硫化条件为120℃×7 h,在该优化硫化条件下支座的硫化时间大幅缩短,硫化设备利用率提高,生产成本降低,产品性能满足设计要求。

关键词:隔震橡胶支座;温度监测;硫化工艺;硫化效应;等效硫化时间;硫化程度;硫化条件

中图分类号:TQ336.4⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2021)12-0933-04

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2021.12.0933



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

隔震橡胶支座(以下简称支座)是由多层橡胶与多层钢板叠层组合而成的橡胶厚制品。在模压加热硫化时,橡胶厚制品的不同部位因与热源距离不同而存在明显温度梯度,从而导致硫化程度不同,直接影响制品的使用性能。因此,支座的硫化工艺制定除应考虑硫化三要素(压力、温度、时间)外,还须保证支座各胶层均能获得最佳的硫化程度。合理的硫化工艺条件对改善支座的使用性能、提高硫化设备利用率、节约动力和能源至关重要^[1-4]。

本工作利用TP700多路数据记录仪对硫化过程中支座各胶层的温度进行监测,记录胶层的温度随时间的变化;利用阿累尼乌斯方程式计算各胶层的硫化效应,并换算成等效硫化时间,求得各胶层的实际硫化程度^[5-6],并根据各胶层的性能确定支座的硫化工艺条件。

1 实验

1.1 试样

直径为600 mm的支座由28层橡胶和27层钢板叠层组合而成。

剥离支座每层钢板均涂抹适量硅油,测试剥离胶层的物理性能。

1.2 试验设备

TP700多路数据记录仪,深圳市拓普瑞电子有限公司产品;500 t平板硫化机,无锡锦和科技有限公司产品;1 500 t电液伺服压剪试验机,北京富力通达科技有限公司产品。

1.3 支座测温埋线位置

支座中热电偶测温埋线的位置为从上往下第2,4,6,8,10,12,14胶层,第14胶层为中间胶层。

1.4 性能测试

邵尔A型硬度按照GB/T 531.1—2008进行测试;拉伸性能按照GB/T 528—2009进行测试。

支座的刚度按照GB/T 20688.1—2007进行测试,面压为12 N·mm⁻²,水平剪应变为±100%,循环次数为3。

1.5 数据分析公式

(1)硫化强度表示胶料在一定温度下单位时间所达到的硫化程度,其取决于胶料的硫化温度,即:

$$v = e^{\frac{E}{R}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \quad (1)$$

作者简介:张远喜(1984—),男,云南昭通人,震安科技股份有限公司高级工程师,硕士,主要从事建筑隔震制品的技术研究工作。

*通信联系人(442307657@qq.com)

引用本文:张远喜,任 姝,黄兆明,等.隔震橡胶支座的硫化工艺优化[J].橡胶工业,2021,68(12):933-936.

Citation: ZHANG Yuanxi, REN Shu, HUANG Zhaoming, et al. Optimization of vulcanization process of isolation rubber bearing[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(12): 933-936.

式中, v 为硫化强度; E 为硫化反应活化能, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为气体常数, 其值为 $8.3143 \times 10^{-3} \text{ kJ} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T_0 为基准硫化温度, K ; T 为测试温度, K 。

(2) 硫化效应是胶料的硫化强度与硫化时间的乘积, 其表达式 $E_v = v \cdot t$ 。

$$E_v = \int_0^{t_e} v dt = \int_0^{t_e} e^{\frac{E}{R}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} dt \quad (2)$$

式中, E_v 为制品实际硫化时某部位胶料的硫化效应, t 为硫化经历的时间, t_e 为硫化至结束所用时间。

(3) 等效硫化时间是胶料的硫化效应与硫化强度之比, 其表达式为:

$$t_d = E_v / v \quad (3)$$

式中, t_d 为制品硫化时某部位胶料的等效硫化时间。

(4) 硫化程度可以衡量胶料经过一定的硫化历程后获得的相对交联程度。制品的基准硫化温度为 T_0 , 某部位胶料在该温度下的工艺正硫化时间为 t_{90} , 等效硫化时间为 t_d , 则它们的比值即为硫化程度 (DOV):

$$\text{DOV} = t_d / t_{90} \quad (4)$$

(5) 硫化反应活化能。可以利用硫化仪测试法, 根据阿累尼乌斯方程 ($K = Ae^{-E/RT}$) 线性拟合得出 (K 为反应速率常数, A 为频率因子)。

2 结果与讨论

2.1 硫化反应活化能

半成品胶料的硫化特性见表1。

表1 胶料的硫化特性
Tab. 1 Curing characteristics of compound

项 目	温度/℃				
	150	140	130	120	110
t_{90}/s	604	1 123	2 078	4 104	8 287
140℃硫化平坦期/s	123~4 740				

胶料的阿累尼乌斯方程线性拟合曲线见图1, 曲线拟合数据如下: 斜率为 1.0572×10^4 , 截距为 -18.583 , 活化能为 $87.899 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, A 为 $1.176 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。由此可知, 半成品胶料的反应活化能为 $87.899 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

2.2 温度监测

支座的暂定硫化条件为 $120^\circ\text{C} \times 8.5 \text{ h}$, 图2为 TP700 多路数据记录仪记录的硫化过程中支座各胶层的测试温度与硫化时间的关系曲线。

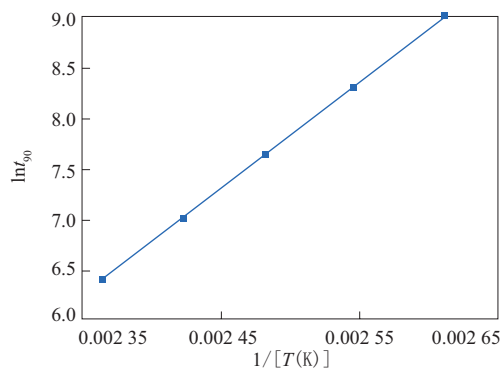
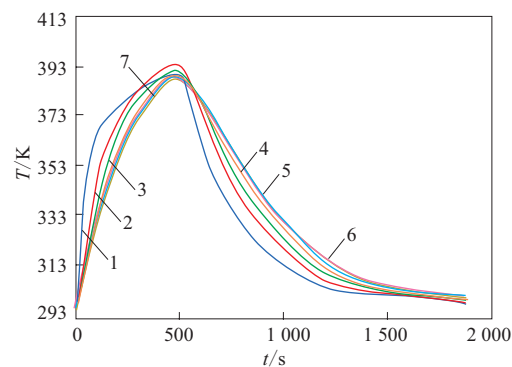


图1 胶料的阿累尼乌斯方程线性拟合曲线

Fig. 1 Linear fitting curve of Arrhenius equation of compound



胶层位置: 1—第2层; 2—第4层; 3—第6层; 4—第8层; 5—第10层; 6—第12层; 7—第14层。

图2 硫化过程中支座各胶层的测试温度与硫化时间的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between test temperature and vulcanization time of each compound layer of bearing during vulcanization process

由图2可知, 硫化过程中的传热主要通过硫化机的上下平板, 因此越接近平板的胶层硫化速度越快, 中间胶层传热慢, 硫化速度较慢。支座脱模后降温时间长, 特别是中间胶层降至室温需要约 22 h, 因此模压硫化效应和后硫化效应同等重要。

2.3 等效硫化时间

利用公式(1)~(4)对试验数据进行处理, 结果见表2。

由表2可知, 支座第4胶层的等效硫化时间为 82.47 min, 超出平坦期, 处于过硫状态。第14胶层的等效硫化时间虽在平坦期内, 但远超过 t_{90} 。此外, 各胶层的硫化程度较大, 均达到3以上。因此, 可推断整个支座的硫化时间较长。

2.4 物理性能

半成品胶料的物理性能如下: 邵尔A型硬度

表2 支座各测温点硫化效应及等效硫化时间
Tab. 2 Vulcanization effect and equivalent vulcanization time at each temperature measurement point

项 目	胶层						
	第2层	第4层	第6层	第8层	第10层	第12层	第14层
模压硫化效应 (E_{v1})	77.99	63.35	51.39	39.50	37.37	35.77	34.91
后硫化效应 (E_{v2})	8.77	19.12	21.91	22.46	23.35	23.47	23.29
总硫化效应 ($E_{v1}+E_{v2}$)	86.76	82.47	73.30	61.96	60.72	59.24	58.20
140 ℃等效硫化时间/min	86.76	82.47	73.29	61.96	60.72	59.24	58.20
硫化程度	4.57	4.34	3.86	3.26	3.20	3.12	3.06

注:140 ℃为基准硫化温度,半成品胶料的 t_{90} 为19 min,硫化平坦期为19~79 min,硫化强度为1,硫化程度范围为1~4.16。

38度,100%定伸应力 0.79 MPa,300%定伸应力
3.22 MPa,拉伸强度 25.0 MPa,拉断伸长率
717%。

支座各胶层的物理性能见表3。

表3 支座各胶层的物理性能
Tab. 3 Physical properties of each compound layer of bearing

胶层	邵尔A型 硬度/度	100%定伸 应力/MPa	300%定伸 应力/MPa	拉伸强 度/MPa	拉断伸 长率/%
第2层	35	0.62	2.36	18.9	717
第4层	35	0.69	2.56	20.2	708
第6层	36	0.70	2.62	21.1	708
第8层	36	0.72	2.96	21.8	707
第10层	36	0.72	2.98	22.0	709
第12层	36	0.74	3.01	22.3	712
第14层	36	0.74	3.02	23.2	735

从表3可以看出,支座第2至第14胶层的硬度、定伸应力和拉伸强度逐渐增大,但较半成品胶料明显降低,说明支座的硫化时间较长,与上述等效硫化时间分析结果一致,特别是外胶层过硫严重,出现分子链断裂,导致拉伸性能下降明显。

2.5 硫化工艺优化

(1) 支座的优化硫化条件。将支座第14胶层的硫化时间作为制定工艺的标准,根据各测温点的硫化温度与时间数据,得出第14胶层的等效硫化时间的理论计算值,见表4。

当支座的硫化条件为120 ℃×7 h,模压时胶

表4 第14胶层的等效硫化时间理论计算值
Tab. 4 Theoretical calculation values of equivalent vulcanization time of 14th compound layer

项 目	硫化条件			
	125 ℃× 8.5 h	125 ℃× 7.5 h	125 ℃× 7.0 h	125 ℃× 6.5 h
140 ℃模压等效 硫化时间/min	34.91	21.31	17.62	10.23
140 ℃后硫化等效 硫化时间/min	23.29	22.26	22.06	21.32
140 ℃等效硫化 时间/min	58.20	43.57	39.68	31.55

层即将达到正硫化,加上后硫化效应,胶层完全可以达到正硫化状态。综合考虑,120 ℃×7 h为支座的优化硫化条件,该优化硫化条件的硫化时间较原定硫化时间缩短1.5 h。

(2) 优化硫化条件下支座各胶层的等效硫化时间及物理性能。120 ℃×7 h优化硫化条件下支座各胶层的硫化效应及物理性能见表5。

由表5可知,在120 ℃×7 h优化硫化条件下支座各胶层的等效硫化时间均在硫化平坦期之内,硫化程度也在要求范围之内,硬度、定伸应力和拉伸强度较原定硫化条件下支座胶层明显增大,即优化条件下支座各胶层的性能均有提高。

(3) 优化硫化条件下支座的性能。在120 ℃×7 h优化硫化条件下支座的性能见表6。

表5 支座各胶层的等效硫化效应及物理性能
Tab. 5 Vulcanization effect and physical properties of each compound layer of bearing

项 目	胶层						
	第2层	第4层	第6层	第8层	第10层	第12层	第14层
140 ℃模压等效硫化时间/min	46.57	35.77	27.24	19.53	18.02	16.81	16.46
140 ℃后等效硫化时间/min	7.52	16.62	19.54	20.29	21.25	21.44	21.70
140 ℃等效硫化时间/min	54.09	52.39	46.78	39.82	39.27	38.25	38.16
DOV	2.85	2.76	2.46	2.10	2.07	2.01	2.01
邵尔A型硬度/度	36	36	36	37	37	37	37
300%定伸应力/MPa	2.92	2.96	3.00	3.08	3.10	3.10	3.11
拉伸强度/MPa	22.8	23.1	23.4	24.2	24.4	24.3	24.2

表6 在120℃×7 h优化硫化条件下支座的性能
Tab. 6 Performance of bearing under 120℃×7 h optimized vulcanization condition

项 目	测试值	设计值
竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	3 860	3 500
支座外观	无异常	
100%等效水平刚度	1. 13	1. 20

计算得出,支座的竖向刚度测试值偏差为+11%,100%水平等效刚度测试值偏差为-9%,即支座的竖向刚度和100%水平等效刚度测试值与设计值吻合很好,满足S-A类产品这两项性能测试值偏差±15%要求,说明优化硫化条件下支座的性能满足设计要求。

4 结论

- (1)采用阿累尼乌斯方程式进行等效硫化时间计算,对支座的硫化状态分析评价较为准确。
- (2)支座的优化硫化条件为125℃×7 h,在该优化硫化条件下支座的硫化时间大幅缩短,硫化设备利用率提高,生产成本降低,产品性能满足设计要求。

参考文献:

[1] 李宏男,吴香香. 橡胶垫隔震支座结构高宽比限值研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(2):14-19.

LI H N, WU X X. Study on limit of height-to-width ratio for base-isolated buildings with rubber bearings under earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24 (2) : 14-19.

[2] 刘文光,杨巧荣,周福霖. 天然橡胶隔震支座温度相关性性能试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版),2002,1(6):51-56.

LIU W G, YANG Q R, ZHOU F L. Temperature properties of natural rubber bearings[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2002, 1 (6) : 51-56.

[3] 蒋振武,吴律. 叠层橡胶隔震支座的振动传递特性[J]. 石油地球物理勘探,1995,30(4):495-504.

JANG Z W, WU L. Vibration transmission characteristics of laminated rubber vibration isolation bearings[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1995, 30 (4) : 495-504.

[4] 刘兢兢,吴憬,凌程建,等. 大直径建筑橡胶隔震支座力学性能研究[J]. 四川建筑科学研究,2021,47(4):39-47.

LIU J J, WU J, LING C J, et al. Study on mechanical properties of large-diameter rubber isolation bearings[J]. Sichuan Building Science, 2021, 47 (4) : 39-47.

[5] 傅彦杰. 橡胶厚制品硫化温度与等效硫化时间的测定[J]. 橡胶工业,1997,44(9):552-557.

FU Y J. Determination of curing temperature and ev time for thick walled rubber article[J]. China Rubber Industry, 1997, 44 (9) : 552-557.

[6] 曾钊. 子午线轮胎变温硫化研究及工艺优化[D]. 广州:华南理工大学,2005.

收稿日期:2021-08-16

Optimization of Vulcanization Process of Isolation Rubber Bearing

ZHANG Yuanxi, REN Shu, HUANG Zhaoming, YUAN Weina, TANG Jun, GUAN Qingsong
(Quakesafe Technologies Co. Ltd, Kunming 650041, China)

Abstract: The real-time temperature of the vulcanization process of the vibration isolation rubber bearing (bearing for short) was monitored by using the TP700 multi-channel data recorder, the vulcanization effect, equivalent vulcanization time and vulcanization degree were calculated by using Arrhenius equation, and the vulcanization process conditions of the bearing were optimized. The optimum vulcanization condition of the bearing was 120℃×7 h. Under the optimum vulcanization condition, the vulcanization time of the bearing was greatly shortened, the utilization rate of vulcanization equipment was improved, the production cost was reduced, and the product performance met the design requirements.

Key words: isolation rubber bearing; temperature monitoring; vulcanization process; vulcanization effect; equivalent vulcanization time; vulcanization condition