叠层橡胶隔震支座硫化工艺有限元仿真与试验研究

杨 俊^{1,2},陈 平¹,付金伦¹,吴志峰¹

[1. 苏州海德新材料科技股份有限公司, 江苏苏州 215500; 2. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东深圳 518000]

摘要:通过橡胶硫化热传导方程和硫化动力学模型建立叠层橡胶隔震支座硫化工艺有限元仿真模型。通过支座硫 化热电偶测温试验,验证了所建有限元模型的正确性。该有限元模型可用于橡胶支座硫化工艺的制定和优化。通过有 限元模型对支座是否采用预热处理及是否采用辅助加热等4种硫化方案进行数值模拟,发现对支座进行预热处理比辅助 加热更能有效地提高硫化效率。

关键词:橡胶;隔震支座;硫化动力学;热传导;有限元仿真;热电偶测温试验
中图分类号:TP391.9;TQ336.5 文献标志码:A 文章编号:1000-890X(2018)11-0000-06

传统的隔震技术是在结构物底部与基础面之 间设置柔性隔震层,解除结构与地面运动的耦联 关系。地震时,隔震结构可以在柔性隔震层上整 体平动,有效降低其地震反应。目前,叠层橡胶隔 震支座是隔震结构常用的隔震元件,由若干层橡 胶和钢板交错叠合而成,具有粘弹性、阻尼和结构 刚度的特性。橡胶层与钢板层之间通过热硫化工 艺实现粘接,而隔震支座的性能直接关系结构安 全与隔震效果,因此隔震支座金属板与橡胶层之 间的粘接尤其重要。

热硫化是叠层橡胶支座生产过程中最关键的 一道工序,其目的是:(1)使橡胶内部产生交联反应、 力学性能达到最佳,形成超弹性耐久材料;(2)使金 属板与橡胶层之间获得足够的粘接强度。然而,建 筑、桥梁结构所用叠层橡胶支座尺寸较大,硫化过 程中需要往往出现橡胶不能均匀、同步受热,内外 胶料硫化程度差异明显,硫化效率低等问题^[1-4]。 因此,在支座生产过程中须制定合适的硫化工艺, 一方面确保支座各部位胶料硫化充分,另一方面 确定最短硫化时间,提高生产效率。

设计支座硫化工艺需要确定硫化三要素,即 硫化温度、压力和时间。硫化温度和压力通常根 据技术人员生产经验确定,最佳硫化时间可以通

E-mail:469676456@qq. com

过热电偶测温法、气泡点法等确定。这些方法的 缺点在于需要做大量试验,工作量大、成本高、周 期长^[5-6]。有限元仿真技术可以模拟硫化过程中橡 胶支座各个部位温度随时间的变化规律,进而得 到橡胶支座受热最低部位,并获取该部位的温度 变化曲线,根据该曲线确定硫化时间,从而大大减 小硫化工艺试验次数和缩短时间,提高产品开发 效率,节约成本^[7-10]。

本工作建立直径为1 200 mm的叠层橡胶隔震 支座硫化仿真模型,获取各温度监测点的温升曲 线,并通过与热电偶测温试验结果进行对比,验证 硫化仿真模型的正确性。通过确定支座受热最低 部位,采用支座受热最大部位与受热最小部位的 温差随时间的变化曲线表征硫化效率,提出支座 硫化工艺的改进方案。

1 硫化工艺理论模型

G. A. Prentice 等^[11]、A. I. Isayev 等^[12]和 J. S. Deng等^[13]分别利用数值仿真技术计算橡胶在 硫化过程中的温度场; W. J. Toth等^[14]首次利用有 限元技术模拟了轮胎硫化过程,并研究了初始温 度对硫化的影响; M. H. R. Ghoreishy等^[15]研究了 橡胶制品硫化的三维有限元模拟方法。

橡胶硫化是热传导和交联反应相互作用的结 果,需要运用热力学与硫化动力学知识建立硫化仿 真模型。橡胶硫化的热传导方程如公式(1)所示。

作者简介:杨俊(1986一),男,江苏高邮人,苏州海德新材料 科技股份有限公司工程师,博士,主要从事建筑结构减隔震产品的 研发。

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{r \partial r} \left(\frac{r k \partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k \partial T}{\partial z} \right) + Q \qquad (1)$$

式中, ρ 为橡胶密度, c_p 为橡胶比热容,T为温度,t为 硫化时间,r为轴对称坐标系下径向坐标,k为橡胶 热导率,Q为胶料单位体积的生热量。

假设硫化过程中密度为常数,考虑硫化程度的影响,橡胶热导率和比热容计算公式如式(2)、 (3)和(4)所示。

$$k_{\rm m} = k_{\rm u}(1-\alpha) + k_{\rm c}\alpha \tag{2}$$

$$c_{\rm m} = c_{\rm u}(1-\alpha) + c_{\rm c}\alpha \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{t^n}{K^n + t^n} \tag{4}$$

式中, α 表示硫化程度,未硫化时 α =0,完全硫化时 α =1; k_m , k_u 和 k_c 分别为部分硫化、未硫化和完全硫 化的橡胶热导率; c_m , c_u 和 c_c 分别为部分硫化、未硫 化和完全硫化的橡胶比热容。

目前,最常用的硫化动力学模型为现象学的 动力学模型,是由试验数据拟合出来的动力学方 程,表征化学反应程度与时间和温度的关系。张 建等^[7]研究认为,对于较厚的橡胶制品,Rafei数学 模型^[16]描述其硫化动力学特性与试验数据吻合最 好,如公式(5)所示。

$$K = A e^{-\frac{E}{RT}}$$
(5)

式中,K为Arrhenius函数,A为试验拟合系数,E为反应活化能,R为气体常数,T为热力学温度。

2 硫化工艺有限元仿真模型

2.1 模型建立

基于热传导方程和硫化动力学特性建立叠层 橡胶隔震支座硫化工艺有限元仿真模型。模拟的 橡胶隔震支座直径为1 200 mm,其结构及温度监 测点布置方案如图1所示。所有温度监测点位于 第14层钢板与第14层橡胶层的交界面上,温度监



测点1为周向橡胶壁的内侧节点,监测点2为第14 层橡胶层最中心节点,监测点3为靠近中间模具芯 棒的节点,监测点4为保护层橡胶的外侧节点。

支座硫化的模具包含上模具、下模具、芯棒和 四周模具。目前,橡胶支座生产采用平板硫化机 硫化,其传热路径分别从模具的上下表面向支座 内部传递。出于提高硫化效率的目的,设计一套 油芯辅助加热系统,即在支座四周模具中预设油 道,硫化过程中保持油道里的油恒温,从支座的圆 周面持续地给橡胶传热。支座硫化模具结构如图 2所示,预设工况如表1所示。

叠层橡胶隔震支座和硫化模具均是轴对称结构,因此在仿真分析时,选取其中半个轴心剖切面 进行分析。轴心剖切面半结构模型如图3所示。

为直径1 200 mm的橡胶隔震支座建立16 h时 长的瞬态热传递分析步,输出橡胶支座中温度监



图2 支座硫化模具结构

表1 1 200 mm直径橡胶支座硫化的预设工况

方案	加热方式	预热温度/℃	支座是否预热
1	上下面平板加热	120	不预热,从20℃开始升温
2	上下面平板加热	120	预热,从60℃开始升温
3	上下面+辅助加热	120	不预热,从20℃开始升温
4	上下面+辅助加热	120	预热,从60℃开始升温



测点随时间变化的关系。单元类型选择四节点线 性轴对称传热四边形单元DCAX4。硫化仿真有限 元模型的材料参数如表2所示。

表2 硫化仿真有限元模型材料参数

项目	钢材	橡胶
密度/(kg•m ⁻³)	7 850	920
热导率/(W・m ⁻¹ ・℃ ⁻¹)	47.560	0.309
比热容/(J•kg ⁻¹ •℃ ⁻¹)	430.57	1785.00

2.2 模型验证

未进行热电偶测温试验前,技术人员认为温度监测点2是整个支座受热最小的部位,因此在进行热电偶测温试验时在监测点2的位置埋设了热电偶,用于监测该点在支座硫化过程中温度随时间的变化。根据经验,110 ℃是理想的支座硫化温度,因此以110 ℃作为硫化参考温度。由于试验在夏季进行,室内温差变化较大,因此进行辅助加热硫化试验时支座初始温度设为25 ℃,未进行辅助加热硫化试验时支座初始温度设为30 ℃。试验结果与仿真分析数据对比如图4所示。



○一未辅助加热(试验);△一辅助加热(试验)。

图4 监测点2的升温曲线

由图4可知,有限元仿真过程中温度监测点2 的升温趋势与试验过程吻合良好。有限元仿真过 程中,设置辅助加热装置时,温度从25℃升至110 ℃,未设置辅助加热装置时,温度从30℃升至110 ℃;设置辅助加热后支座的升温速率比未设置辅 助加热大,硫化仿真时,设置辅助加热装置工况监 测点2达到110℃需要11.8h,未设置辅助加热装 置工况监测点2达到110℃需要12.51h。试验过 程中,设置辅助加热装置的支座温度监测点2升至 110 ℃需要12 h,硫化仿真与试验数据相差12 min, 误差为1.7%。仿真过程中,未设置辅助加热工况, 温度监测点2升至110 ℃需要12.51 h;试验过程 中,温度监测点2升至110 ℃需要13 h,仿真结果与 试验数据相差30 min,误差为3.7%。

热电偶测温试验结果验证了所建有限元仿真 模型的正确性,该有限元模型可以用于橡胶支座 硫化工艺的改进。

2.3 硫化工艺分析

根据所建有限元模型模拟表1中4种工况,绘制各温度监测点的温升曲线,如图5所示。

由图5可知,支座硫化过程中,各监测点升温 速度由快到慢依次为:监测点4、监测点3、监测点 1、监测点2。其变化趋势符合技术人员预期,在所 有监测点中监测点2为受热最小部位,监测点4紧 贴四周模具,升温速率最大。监测点3与中间芯棒 接触,且处于叠层钢板表面,处于热传导的快速通 道上,温升速率始终比监测点1和监测点2大。硫 化时,中间芯棒的预热温度为120 ℃。因此,监测 点3在100 s内急剧升温,随着热量迅速传递,在上 部模具加热的热量未传递至该监测点时,该监测 点的温度有短暂降温过程,持续时间在400 s左右, 降温幅度在10 ℃左右;当上部加热的温度传递至 该点时,温度持续升高。

理想的硫化方案需要确保支座受热最小部位 充分硫化,受热最大部位不产生过硫化。根据各 监测点温升曲线,用监测点4和监测点2的温差随 时间变化的曲线表征各方案的硫化效率,结果如 图6所示。

由图6可知,支座受热最大部位升温快,受热 最小部位升温慢,硫化初期两点的温差呈上升趋 势,随着热量传递,受热最小部位温度上升,而受 热最大部位温度已升至模具加热温度。因此,硫 化效率曲线呈先上升后下降趋势,温差最先趋于 零的方案硫化效率最高。各硫化方案硫化效率由 高到低依次为:方案4、方案2、方案3、方案1。方案 4和方案2采用了预热支座的措施,方案3和方案4 采用了辅助加热措施,而方案2的硫化效率高于方 案3,说明与辅助加热措施相比,支座预热对提高 硫化效率更有帮助。

各方案温度监测点2升温至110 ℃所需时间







图5 4种方案各监测点的温升曲线

如下:

(1)上下平面加热硫化方案,不进行支座预热处理时,监测点2升温至110 ℃需13.04 h;预热处理时,需10.51 h,两者相差2.53 h。

(2)上下面+辅助加热方案,不进行支座预热 处理时,监测点2升温至110 ℃需11.74 h;预热处 理时,需9.44 h,两者相差2.3 h。 (3)支座不进行预热处理,上下面加热硫化方 案,监测点2升温至110 ℃需13.04h;上下面+辅助 加热方案,监测点2升温至110 ℃需11.74 h,两种 方案相差1.3 h。

(4) 支座进行预热处理,上下面加热硫化方 案,监测点2升温至110 ℃需10.51 h;上下面+辅助 加热方案,监测点2升温至110 ℃需9.44 h,两种方 案相差1.07 h。

(5)进行预热处理,上下面+辅助加热硫化方 案,监测点2升温至110 ℃需9.44 h;不进行预热处 理,上下面加热硫化方案,监测点2升温至110 ℃需 13.04 h,两种方案相差3.6 h。

硫化过程中,不同时间点的温度场云照片如 图7所示。

从图7可以明显看出支座硫化过程中的传热 路径,橡胶的热导率非常小,靠近外层保护胶层的 节点升温缓慢,靠近芯棒的节点率先达到模具温 度,支座中间的薄钢板层与中间芯棒相接触是热 量传递的快速通道,接近橡胶层中心点的最小受



图7 不同时间点的温度场云照片

热部位最后完成硫化。

3 结论

第00期

(1)热电偶测温试验结果验证了所建有限元 模型的正确性,该有限元模型可以用于橡胶支座 硫化工艺的分析、改进和优化。

(2)对橡胶支座进行预热处理能够更好地提 高硫化效率。

(3)对于直径1 200 mm的叠层橡胶支座,支座 预热可节省硫化时间2.3~2.5 h,辅助加热可节省 硫化时间1.07~1.3 h,既辅助加热又支座预热可 节省硫化时间3.6 h。

(4) 对叠层橡胶隔震支座硫化工艺进行有限 元仿真分析,能够正确指导实际生产,改进硫化工 艺流程,提高生产效率。

参考文献:

- [1] 刘大晨,王立强,经琳琳,等. 电场下天然橡胶与Fe的热硫化粘[J]. 材料科学与工艺,2015,23(6):46-51.
- [2] 李想,徐明会,魏军光. 丁腈橡胶与钛合金粘接工艺研究[J]. 材料 开发与应用,2006,21(1):31-33.
- [3] 王鹏,苏正涛,赖亮庆,等. 硫化压力对橡胶/金属热硫化粘接剥离 强度的影响[J]. 航空材料学报,2016,36(1):69-74.
- [4] 刘大晨,经琳琳,梁雨,等.导电填料和偶联剂Si69对电场下丁腈橡 胶与铁热硫化粘合性能的影响[J].橡胶工业,2018,65(1):31-36.
- [5] 曾凡伟,张晓鹏,刘志坡,等.数值模拟技术在橡胶制品开发中的应 用[J].世界橡胶工业,2015,42(12):44-51.
- [6] 张波,曾凡伟,张晓鹏,等.有限元模拟技术在橡胶厚制品硫化时间

确定中的应用[J]. 橡塑技术与装备,2016,42(5):61-64.

- [7] 张建,唐文献,王国林,等.一种橡胶硫化有限元分析方法[J]. 橡胶 工业,2012,59(7):401-407.
- [8] 董林福,刘辉. 基于ANSYS的橡胶微波加热的数值分析[J]. 橡胶工业,2016,63(4):245-247.
- [9] 王琳琳,董林福,康智略.橡胶平带硫化机热板温度场有限元分析 与数据拟合[J].橡胶工业,2009,56(5):306-307.
- [10] 李涛,杨广志,陈海龙,等.橡胶微波加热硫化的有限元分析[J].橡胶工业,2013,60(1):42-46.
- [11] Prentice G A, Williams M C. Numerical Evaluation of the State of Cure in a Vulcanizing Rubber Article[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1980, 53 (5): 1023–1031.
- [12] Isayev A I, Sobhanie M, Deng J S. Two-dimensional Simulation of Injection Molding of Rubber Compounds[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1988, 61 (5) : 906–937.
- [13] Deng J S, Isayev A I. Injection Molding of Rubber Compounds: Experimentation and Simulation[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1991, 64 (2): 296–324.
- [14] Toth W J, Chang J P, Zanichelli C. Finite Element Evaluation of the State of Cure in a Tire[J]. Tire Science and Technology, 1991, 19 (4):178–212.
- [15] Ghoreishy M H R, Naderi G. Three-dimensional Finite Element Modeling of Rubber Curing Process[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2005, 37 (1):37-53.
- [16] Rafei M, Ghoreishy M H R, Naderi G. Development of an Advanced Computer Simulation Technique for the Modeling of Rubber Curing Process[J]. Computational Materials Science, 2009, 47 (2) :539–547.

收稿日期:2018-05-16

Finite Element Simulation and Experimental Research on Curing Process of Laminated Rubber Isolation Bearings

YANG Jun^{1,2}, CHEN Ping¹, FU Jinlun¹, WU Zhifeng¹

[1. Suzhou Haider New Material Technology Co., Ltd, Suzhou 215500, China; 2. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China]

Abstract: Based on the equation of heat conduction and curing kinetics model, the finite element simulation model on curing process of laminated rubber isolation bearings was established. The results of thermocouple temperature test verified the validity of established finite element model, so the model could be used in the formulation and optimization of curing process. Four curing schemes (whether the bearings were preheated and whether auxiliary heating was used) were simulated by using the finite element model, it was found that the preheating of bearings could improve the curing efficiency more effectively compared to auxiliary heating.

Key words: rubber; isolation bearing; curing kinetics; heat conduction; finite element simulation; thermocouple temperature test