

用准稳态法测定橡胶及橡胶基复合材料的导热系数和比热容

卢建航, 孙 宏, 尹海山

(桦林轮胎股份有限公司, 黑龙江 牡丹江 157032)

摘要:介绍了用准稳态法测定轮胎材料导热系数和比热容的基本原理、试验装置和步骤, 对 9.00 - 20 16PR 外胎、内胎、垫带、胶囊材料进行测试, 利用计算机实现数据自动处理, 为轮胎热学性能的进一步研究准备了基础数据。

关键词:准稳态法; 橡胶; 橡胶基复合材料; 导热系数; 比热容; 轮胎

中图分类号: TQ330.7+3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2001)05-0305-05

导热系数 λ 和比热容 C 是研究材料热学性能的重要物理参数, 随着轮胎行业对轮胎热学性能研究的深入, 准确测定轮胎结构材料的热学性能已成必要。橡胶及橡胶基复合材料是热的不良导体, 其导热系数和比热容的测定比较困难, 我们采用准稳态法对 9.00 - 20 16PR 轮胎的外胎、内胎、垫带、胶囊材料进行了较完整的实验测试, 结果很理想。现将研究测试过程及结果分析简介如下。

1 实验

1.1 测试原理分析

本试验是根据第二类边界条件, 即无限大平板的导热问题来设计的。设平板厚度为 δ (见图 1), 初始温度为 θ_0 , 平板两面受热流密度 q_0 恒定的热流均匀加热。任何瞬间沿平板厚度方向的温度分布 $\theta(x, t)$ 的导热微分方程式、初始条件和第二类边界条件为:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2}$$

$$\theta(x, 0) = \theta_0$$

$$\left. \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right|_{x=\delta} + \frac{q_0}{\lambda} = 0$$

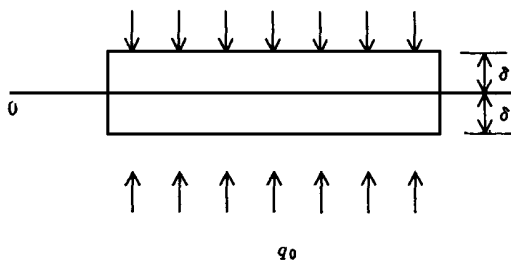


图 1 第二类边界条件无限大平板导热的物理模型

$$\left. \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

解^[1]为:

$$\theta(x, t) - \theta_0 = \frac{q_0}{\lambda} \left[\frac{x^2}{2\delta^2} - \frac{1}{6} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \cos \frac{n\pi}{L} x \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2}{\delta^2} \alpha t \right) \right] \quad (1)$$

式中 t ——时间;

q_0 ——沿 x 方向从端面向平板加热的
恒定热流密度;

λ ——平板的导热系数;

α ——平板的导温系数;

θ_0 ——初始温度。

根据傅立叶准则

$$F_0 = \frac{q_0 t}{\lambda \delta}$$

随着时间 t 的延长, F_0 变大, 式(1)中的级数和项变小。当 $F_0 > 0.5$ 时, 级数和项变得很小, 可以忽略, 式(1)变成:

作者简介: 卢建航(1968-), 男, 黑龙江牡丹江人, 桦林轮胎股份有限公司工程师, 工学学士, 主要从事轮胎 CAD 和轮胎结构有限元分析工作。

$$\theta(x, t) - \theta_0 = \frac{q_0 \delta}{\lambda} \left(\frac{ax}{\delta^2} + \frac{x^2}{2\delta^2} - \frac{1}{6} \right) \quad (2)$$

由此可见,当 $F_0 > 0.5$ 时,平板各处的温度与时间呈线性关系,温度随时间变化的速率是常数,并且各处相同,这种状态称为准稳态。

在准稳态时,平板中心面 $x = 0$ 处的温度为:

$$\theta(0, t) - \theta_0 = \frac{q_0 \delta}{\lambda} \left(\frac{ax}{\delta^2} - \frac{1}{6} \right)$$

平板加热面 $x = \delta$ 处的温度为:

$$\theta(\delta, t) - \theta_0 = \frac{q_0 \delta}{\lambda} \left(\frac{ax}{\delta^2} + \frac{1}{3} \right)$$

此两面的温差 $\Delta\theta$ 为:

$$\Delta\theta = \theta(\delta, t) - \theta(0, t) = \frac{q_0 \delta}{2\lambda} \quad (3)$$

如果已知 q_0 和 δ ,再测出 $\Delta\theta$,就可以由式(3)求出导热系数 λ :

$$\lambda = \frac{q_0 \delta}{2\Delta\theta} \quad (4)$$

实际上,无限大平板是无法实现的,试验总是用尺寸有限的试样。一般情况下,试样的横向尺寸为厚度的 6 倍以上,两侧散热对试样中心温度的影响在一般工程误差允许范围之内,试样两端面中心处的温差可认为等于无限大平板时两端的温差。

根据热平衡原理,在准稳态时有下列关系:

$$q_0 F = \rho \delta F \frac{d\theta}{dt}$$

式中 F ——试样的横截面积;

C ——比热容;

ρ ——密度;

$\frac{d\theta}{dt}$ ——准稳态时的温升速率。

因此可得:

$$C = \frac{q_0}{\rho \delta F \frac{d\theta}{dt}} \quad (5)$$

根据式(5)可求出试样比热容,试验时 $\frac{d\theta}{dt}$ 以试样中心处为准。

1.2 试验装置

按上述理论模型设计的试验装置见图 2。

(1) 试样

试样尺寸为 100 mm × 100 mm × δ , 共 4 块,尺寸完全相同, $\delta = 10 \sim 16$ mm。每块上下表面平行、平整。

(2) 加热器

采用高电阻康铜箔平面加热器,康铜箔厚度为 20 μm 。电阻值稳定,在 0~100 °C 范围内几乎不变。加热器加热面为正方形,面积和试样相同,为 100 mm × 100 mm。两个加热器的电阻值应尽量相同,相差应在 0.1 % 以内。

(3) 绝热层

用导热系数比试样小得多的材料作绝热层,力求减少通过它的热量,使试样 1,4 与绝热层的接触面接近绝热。这样可假定式(4)中的

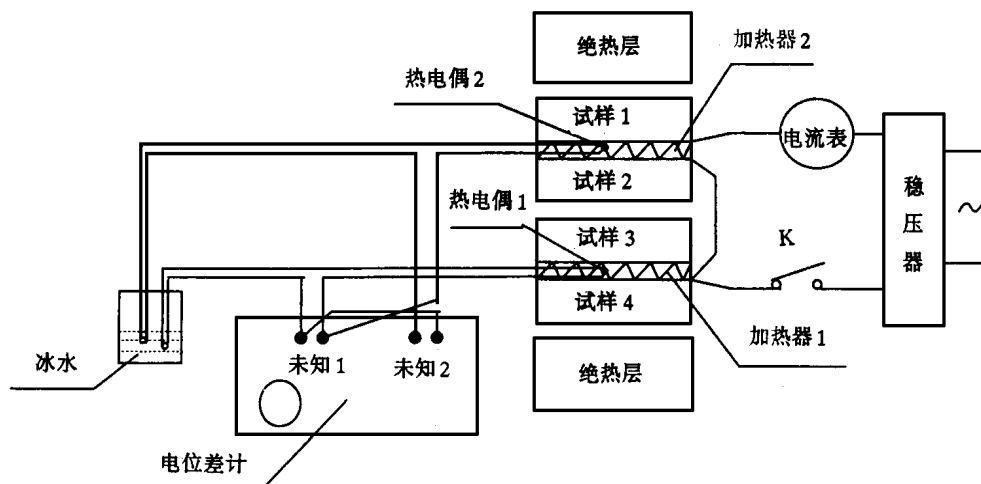


图 2 试验装置

热量 q_0 等于加热器发出热量的 $1/2$ 。

(4) 热电偶

利用热电偶测量试样 2 两面的温度及试样 2 和 3 接触面中心处的温升速率。热电偶由直径为 0.1 mm 的康铜丝制成。其接线如图 2 所示,热电偶冷端放在冰水瓶中,保持 0 °C。

试验时,将 4 个试样整齐叠放在一起。分别在试样 1 和 2 及试样 3 和 4 之间放入加热器 1 和 2,试样和加热器对齐。热电偶的放置如图 2 所示。热电偶测温头放在试样中心部位。放好绝热层后,适当加压以保持各试样之间接触良好。

1.3 试验步骤

(1) 用卡尺测量试样的尺寸。

(2) 按图 2 所示放好试样、加热器和热电偶,安装好电源,接通稳压器。预开电源 10 min(此时开关 K 是打开的)。

(3) 校对电位差计的工作电流。将测量转换开关转至“未知 1”,测出试样在加热前的温度,此温度应等于室温。再将测量转换开关转到“未知 2”,测出温差,此值应为零热电势,差值最大不得超过 4 μV ,即相应初始温差不得超过 0.1 °C。

(4) 接通加热器开关 K,给加热器通以恒定电流(试验过程中,电流不允许变化,此数值事先经试验确定)。同时启动秒表,每隔 1 min 测出一个奇数值时刻(1, 3, …… ,5 min)未知 1 端的热电势值。

(5) 测量未知 2 端的热电势和偶数值时刻未知 1 端的热电势。经一段时间(随所测材料不同而不同,一般为 5~20 min)后系统进入准

稳态,未知 2 端热电势的数值,即式(4)中的温差 $\Delta\theta$ 保持不变,记录下电流值。

(6) 第一次试验结束,将加热器开关 K 切断,取下试样及加热器,用电风扇将加热器吹凉,待降至室温后,才能继续做试验,试样不能连续做试验,必须经过 4 h 以上的放置,降至室温后才能做下一次试验。

试验全部结束后断开电源,恢复原状。

2 结果与讨论

2.1 数据处理

(1) 试验测得未知 1 和未知 2 端的热电势值,时间间隔都为 2 min,这就要求用插值法计算未知 1 和未知 2 每分钟分别对应的热电势值。热电势与温度对照如表 1 所示。根据表 1 作出热电势与温度关系曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,热电势与温度基本呈线性关系,因此可以用线性插值法计算热电势所对应的温度。由温升曲线(未知 1 对应的温度)和温差曲线(如图 4 所示)可以看出,温差峰值平坦期一般出现在 4~15 min(参见表 2),因此橡胶材料达到准稳态一般需要 4~15 min,而且与加热器的功率有关。

(2) 计算出准稳态温升速率 $\frac{d\theta}{dt}$ 、平均温差 $\Delta\theta$ 和热流密度 q_0 后即可根据式(4)和(5)计算导热系数和比热容。

根据数据处理程序,以上所有计算由计算机完成并生成数据文件,并可作曲线图以便直观观察试验规律和校验数据。

(3) 以胎冠胶 695-196 为例说明测试数据的处理过程。测试结果见表 2。

表 1 热电势与温度对照表 mV

温度/ °C	时间/ min									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.000	0.039	0.078	0.116	0.155	0.194	0.234	0.273	0.312	0.350
10	0.391	0.431	0.471	0.510	0.550	0.590	0.630	0.671	0.711	0.751
20	0.792	0.832	0.873	0.914	0.954	0.995	1.036	1.077	1.118	1.159
30	1.201	1.242	1.284	1.325	1.367	1.408	1.450	1.492	1.534	1.576
40	1.618	1.661	1.703	1.745	1.788	1.830	1.873	1.916	1.958	2.001
50	2.044	2.081	2.130	2.174	2.217	2.260	2.304	2.347	2.391	2.435
60	2.478	2.522	2.566	2.610	2.654	2.698	2.743	2.787	2.831	2.876
70	2.920	2.965	3.010	3.054	3.099	3.144	3.189	3.234	3.279	3.325

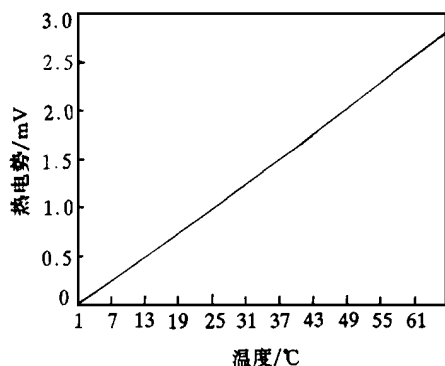


图 3 热电势与温度的对应关系

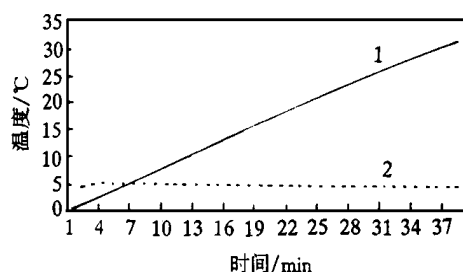


图 4 温升和温差与时间的关系曲线

1—温升;2—温差

根据表 2 数据计算出:温升速率 $\frac{d\theta}{dt} = 0.9154\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,温差 $\Delta\theta = 5.1613\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间 $t = 7\text{ min}$,热流密度 $q_0 = 254.9930\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,导热系数 $\lambda = 0.2727\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$,比热容 $C = 1352.9\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

同理,试验共计 18 种试样,每种试样做 3 次试验,选择其中重现性较好的计算其导热系数及比热容,结果见表 3。

2.2 改进措施

(1) 可采用改变热功率或控制不同的初始温度的手段来调整准稳态出现的温度,进而测得不同温度下的导热系数。

(2) 用硅油涂于橡胶试样表面,可保证试样表面充分接触,以改进测量精度。

(3) 用计算机采集数据可加大数据采集密度,从而提高测试精度,避免人为误差,同时大大降低工作强度。

3 结语

测量轮胎材料的导热系数和比热容是深入

表 2 胎冠胶 695-196 热电势与温度测试结果

时间/ min	未知 1		未知 2	
	热电势/mV	温度/°C	热电势/mV	温度/°C
0	0.034 0	—	0.000 0	—
1	0.000 0	0.000 0	0.131 0	0.000 0
2	0.050 2	1.287 2	0.161 4	4.165 4
3	0.079 1	2.028 9	0.191 9	4.946 2
4	0.108 0	2.789 5	0.196 2	5.055 0
5	0.143 9	3.715 4	0.200 5	5.162 5
6	0.179 8	4.635 9	0.200 6	5.165 0
7	0.215 5	5.537 5	0.200 7	5.167 5
8	0.251 2	6.441 0	0.200 0	5.151 2
9	0.286 6	7.348 7	0.199 4	5.135 0
10	0.322 0	8.250 0	0.198 5	5.113 7
11	0.357 4	9.138 5	0.197 7	5.092 5
12	0.392 8	10.045 0	0.196 7	5.067 5
13	0.427 4	10.910 0	0.195 7	5.042 5
14	0.462 0	11.775 0	0.194 6	5.016 2
15	0.497 4	12.676 9	0.193 6	4.989 7
16	0.532 8	13.570 0	0.192 8	4.969 2
17	0.567 0	14.423 8	0.192 0	4.948 7
18	0.601 1	15.277 5	0.191 0	4.924 4
19	0.635 6	16.135 4	0.190 1	4.900 0
20	0.670 0	16.975 6	0.189 4	4.882 1
21	0.703 8	17.818 8	0.188 7	4.864 1
22	0.737 5	18.662 5	0.188 3	4.853 8
23	0.771 3	19.493 9	0.187 9	4.843 6
24	0.805 0	20.325 0	0.186 9	4.819 2
25	0.837 9	21.143 9	0.186 0	4.794 9
26	0.870 8	21.946 3	0.185 5	4.782 1
27	0.902 9	22.729 3	0.185 0	4.769 2
28	0.935 0	23.525 0	0.184 5	4.756 4
29	0.967 0	24.317 1	0.184 0	4.743 6
30	0.999 0	25.097 6	0.183 5	4.730 8

表 3 各种型号胶料导热系数和比热容的测试计算结果

型号	$\lambda / \text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	$C / \text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
695-196	0.289 2	1 383.9
692-058	0.224 6	1 393.0
694-127	0.292 0	1 397.0
404-074	0.240 8	1 330.0
415-116	0.250 8	1 338.4
447-128	0.236 2	1 339.6
252-17	0.351 1	1 116.3
024	0.263 3	1 621.7
025	0.189 4	1 419.1
026	0.213 3	1 435.7
629	0.226 3	1 533.1
255	0.255 6	1 439.8
233	0.418 1	1 048.8
412	0.228 3	1 283.6
406	0.320 5	1 262.4
829	0.267 2	1 359.7
V1	0.237 5	1 353.8
V2	0.197 4	1 219.9

研究轮胎热学性能的基础,准稳态法是测试材料导热系数和比热容的一种科学、可靠的方法,且简便易行,可在一般橡胶企业推广应用。对该方法稍加改进,即可测试不同温度下的材料的导热系数和比热容。

参考文献:

- [1] 奥齐西克 M N. 热传导[M]. 俞昌铭译. 北京:高等教育出版社,1984. 45-49.

第11届全国轮胎技术研讨会论文

Determination for thermoconductive coefficient and specific heat absorption capacity of rubber and rubber composite by quasi-steady-state method

LU Jian-hang, SUN Hong, YIN Hai shan

(Hualin Tire Co., Ltd., Mudanjiang 157032, China)

Abstract: The basic principle, test apparatus and procedure for determining the thermoconductive coefficient and specific heat absorption capacity of tire materials by the quasi-steady-state method were described. The materials of casing, inner tube, flap, curing bladder for 9.00 - 20 16PR tire were tested, and the test results were processed by computer to obtain the basic data for further study on the thermal properties of tire.

Key words: quasi-steady-state; rubber; rubber composite; thermoconductive coefficient; specific heat absorption capacity; tire

(上接第301页)

键的作用,过去的成型方法未考虑到各部件接头的分布不同,产生的动力矩也不同的情况,造成轮胎动平衡普遍偏大。

3.2 解决措施

3.2.1 调整成型工艺

(1) 一段成型工艺调整如下:贴合内衬层后,在距内衬层接头180°处贴合1#帘布——扣钢丝圈,反包——在1#帘布接头以下100 mm内贴合2#帘布——以胎肩垫胶1/4处对齐2#帘布接头,贴胎肩垫胶——对齐胎肩垫胶接头,贴胎圈胶——对齐胎圈胶1/2处,贴胎侧胶。

(2) 二段成型工艺调整如下:在带束层贴合鼓上相隔180°贴上1#和2#带束层——转动贴合鼓,调整胎面接头至传递环。

3.2.2 调整成型设备

(1) 一段成型机主轴的跳动对胎坏的质量影响很大,应当将一段成型机主轴的跳动值控制在100 μm以内;

(2) 组织专门的设备技术人员及经验丰富的维修工对二段成型机进行调节和维护,以避

免二段成型机的法兰盘电动导致的夹持环松动现象;

(3) 针对二段定型时法兰盘与胎圈处挤压过大导致胎坏定型不正的现象,对胎圈处的材料进行调整,在保证二段定型压力的前提下尽量减小胎圈与法兰盘间的压缩量,并将法兰盘的R角加大(见图2),以减小胎坏定型时局部偏歪现象。

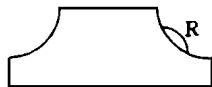


图2 法兰盘的R角示意图

4 结语

通过实施上述措施,并加强对员工责任心和质量意识的培养以及员工技术水平的提高,我公司生产的235/85R16轮胎动平衡A级品率从1999年10月的42%上升为2000年3月的74%,使公司的半钢子午线轮胎的质量得到提高。

收稿日期:2000-11-16