

应用发泡点分析仪分析胎面胶硫化过程中的温度不饱和度与热扩散系数

李 跃¹, 汪 灵¹, 王朱遗², 户崎近雄³

[1. 双钱集团上海轮胎研究所有限公司, 上海 200245; 2. 弘埔技术(香港)有限公司, 上海 201615; 3. 株式会社上岛制作所, 东京 1638001]

摘要:以载重子午线轮胎胎面胶为例, 应用发泡点分析仪(BPA)测试和计算胶料温度不饱和度及扩散系数, 探讨BPA的测试原理和方法。结果表明, 热扩散系数与热源温度无关, 而与加热时间和厚度相关。应用BPA对胶料进行硫化分析, 有助于硫化工艺设计和生产控制。

关键词:载重子午线轮胎; 胎面胶; 发泡点分析仪; 温度不饱和度; 热扩散系数

中图分类号:U463.341⁺.3/.6; TQ330.7⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2016)09-0553-04

轮胎在硫化测温过程中需在不同部位设置测温点, 埋设热电偶的数量可达20~40个(又称测温通道), 理论上也可按照温度不饱和度公式计算热扩散系数。实际生产中影响测温准确性的因素很多, 如模具和环境变化、胶料及测温点在模具内的位移等。而且埋设热电偶的操作时间长和轮胎硫化时间长, 各热电偶之间也存在差异(一般埋设测温点前都需逐一校对各热电偶, 获取校正系数)。此外, 轮胎体积与质量大(尤其是工程机械轮胎), 需多人配合操作, 人为因素等的影响也占很大比例。因此造成测试的重现性和精准度达不到要求。

发泡点分析仪(BPA)是一种新型检测设备, 应用非稳态导热无限大平板传热理论, 采用特殊构造的模具, 以最大限度降低侧面传热的干扰。通过设置合理的硫化条件, 测试后可以方便地获取各种数据。

运用BPA能够有效地分析橡胶硫化过程中的发泡点以及出现发泡点的等效硫化时间。此外, BPA还能够研究分析橡胶在硫化过程中的热传导。通过BPA在橡胶硫化中所记录的热电偶埋点位置的实时温度变化, 计算其温度不饱和度, 进而

计算相应位置(实际也表征了相应的厚度)的热扩散系数, 并通过热扩散系数与厚度的相关性, 求得任意厚度的热扩散系数。而热扩散系数对设定橡胶厚制品硫化条件起到极其重要的作用。本工作以载重子午线轮胎胎面胶为例, 探讨BPA的测试原理以及硫化过程中胶料的温度不饱和度和热扩散系数的计算分析方法和影响因素。

1 BPA测试试样规格和运算理论

1.1 胶料试样规格

试样与模具纵断面中心线一致, 4个热电偶(C1—C4)热端埋设点分布如图1所示。

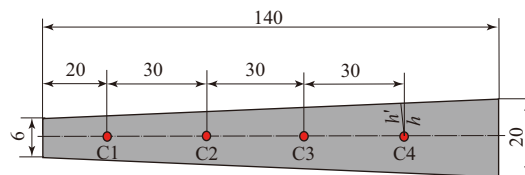


图1 试样梯形纵断面中测温点的位置示意

根据热传导的热场分布, 热传导最短的距离为测温点到梯形腰的垂直距离 h' (两腰为等温面, 视为热源)。直线 h 平行于梯形底边, 由于 $h=1.001\ 25h'$, 两者相差甚小, 因此在计算时可以用 h 表征热传导厚度。

4个热电偶热端点与试样薄端点的距离及热传导厚度如表1所示。

作者简介:李跃(1987—), 男, 山东枣庄人, 双钱集团上海轮胎研究所有限公司工程师, 硕士, 主要从事全钢子午线轮胎配方设计工作。

表1 4个热电偶热端点与试样薄端点的

项 目	距离及热传导厚度				mm
	C1	C2	C3	C4	
与薄端点的距离	20	50	80	110	
h	4.0	5.5	7.0	8.5	

1.2 计算理论和公式

温度不饱和度(α)的计算公式如下:

$$\alpha = \frac{\theta - \theta_c}{\theta - \theta_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 \chi t}{4h^2}} \quad (1)$$

式中 θ ——热源温度, °C;

θ_c ——试样中心即时温度, °C;

θ_0 ——试样起始温度, °C;

χ ——热扩散系数, $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

t ——时间, s。

公式(1)是一个收敛无穷级数。

设 $Z = \frac{\chi t}{4h^2}$, 以 Z 为横坐标, 引用文献[1]表中的原数据, 作 α , $\ln\alpha$ 曲线及 $\ln\alpha$ 拟合直线, 如图2所示。

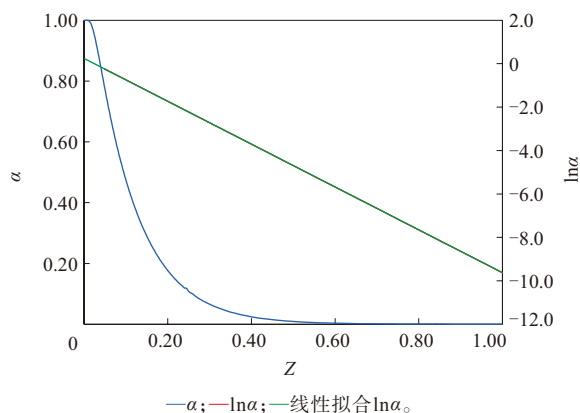


图2 公式(1)的 α , $\ln\alpha$ 曲线及 $\ln\alpha$ 拟合直线

$\ln\alpha$ 在 $Z \in [0.05, 1]$ 区间内的拟合直线方程为

$$y = -9.8677x + 0.2405 \quad (2)$$

此线性方程中自变量为 Z , 相关系数 $R^2=1$, 说明线性相关性很高。方程(2)与方程(1)仅取无穷收敛级数首项的下式方程十分接近。

$$\ln\alpha = -\pi^2 \frac{\chi t}{4h^2} + \ln \frac{4}{\pi} = -9.8696Z + 0.24156$$

这表明公式(1)中首项是整个级数影响最大的项, 起决定作用, 也证实热传导在稳态阶段由于初始温度影响的消失, 温度分布变为光滑连续的曲线, 因而可以用初等函数加以描述。忽略初始温度不稳定的影响, 可以用无穷级数的首项, 即公

式(3)来准确地表示物体内的温度变化^[2-5]。

$$\ln\alpha = -\pi^2 \frac{\chi t}{4h^2} + \ln \frac{4}{\pi} \quad (3)$$

2 胎面胶的温度不饱和度

在156 °C的恒定外温下对胎面胶料进行测试, 试样中4个测温点的温升曲线如图3所示, 由于起始波动较大, 故温升曲线从50 s后开始。 $\ln\alpha$ 随时间的变化曲线如图4所示。

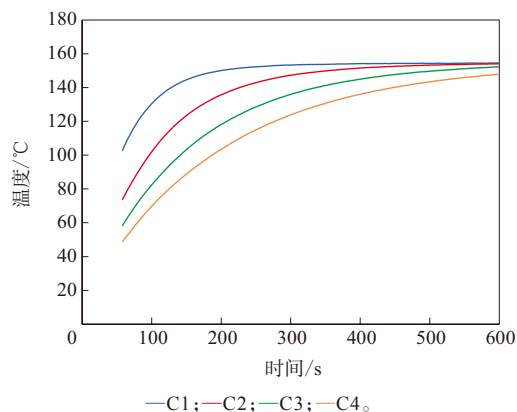


图3 4个测温点的温升曲线

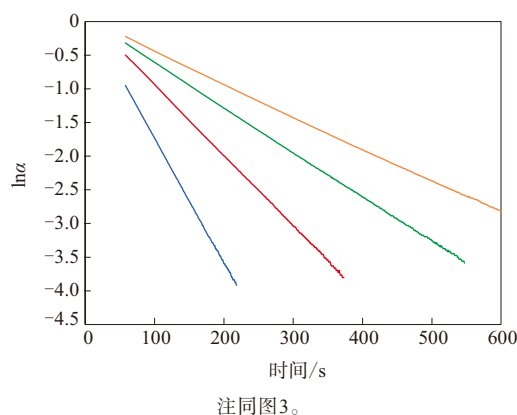


图4 4个测温点 $\ln\alpha$ 随时间的变化曲线

$\ln\alpha$ 对时间的拟合直线如图5所示, 拟合直线方程如下:

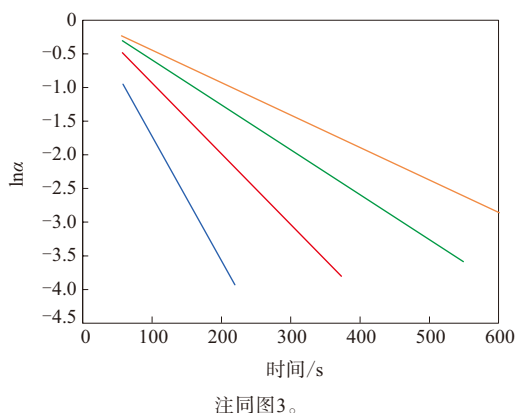
$$C1: y = -0.0185x + 0.1159, R^2 = 0.9999$$

$$C2: y = -0.0105x + 0.1031, R^2 = 0.9999$$

$$C3: y = -0.0066x + 0.0441, R^2 = 0.9999$$

$$C4: y = -0.0048x + 0.0218, R^2 = 0.9996$$

由图5可知, 各测温点的 $\ln\alpha$ 的变化趋势近似呈线性, 并且拟合直线得到的相关系数均近似为1, 说明 $\ln\alpha$ 与时间具有很高的线性相关性。

图5 4个测温点 $\ln\alpha$ 对时间的拟合直线

3 热扩散系数的计算

3.1 计算方法

根据式(3),令 $k = -\chi \frac{\pi^2}{4h^2}$,则

$$\chi = -k \frac{4h^2}{\pi^2} \quad (4)$$

因此根据已知各测温点的 $\ln\alpha$ 与时间的关系,求得 $\ln\alpha$ 与时间的拟合直线的斜率(k),进而可计算 χ 。根据 $\ln\alpha$ 对时间的拟合直线方程可知,C1—C4四个测温点的 k 值分别为 -0.0185 , -0.0105 , -0.0066 和 -0.0048 ,将4个测温点的 k 和 h 值代入式(4),计算 χ 值分别为 0.1200 , 0.1287 , 0.1311 和 $0.1406 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 热扩散系数与水平距离的相关性

热扩散系数与试样水平距离(离试样薄端距离, L)的相关性如图6所示,拟合直线方程为

$$y = -0.0002x + 0.1162, R^2 = 0.9575$$

由相关系数可断定其线性相关性很强。离试样薄端距离越远,胶料厚度越大, χ 值也越大。

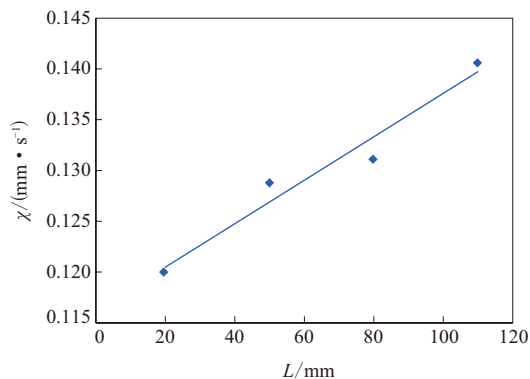


图6 热扩散系数与试样水平距离的相关性

3.3 热扩散系数与温度的关系

根据热扩散系数定义: $\chi = \lambda / \rho c$ (λ 为热导率, ρ 为密度, c 为比热容), λ 与温度相关^[4],因此 χ 也与温度相关^[2]。对胎面胶在温度 $146 \sim 166 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内进行硫化测试,结果如表2所示。

表2 不同测试温度下 $\ln\alpha$ 对时间函数曲线的斜率

项 目	C1	C2	C3	C4
温度/ $^\circ\text{C}$				
146	-0.019 4	-0.010 6	-0.007 0	-0.005 1
151	-0.017 9	-0.010 6	-0.006 9	-0.005 3
156	-0.018 5	-0.010 5	-0.006 6	-0.004 8
161	-0.017 9	-0.010 5	-0.006 9	-0.005 2
166	-0.018 2	-0.009 7	-0.005 4	—
平均值	-0.018 4	-0.010 4	-0.006 6	-0.005 1
标准差	-0.000 6	-0.000 4	-0.000 7	-0.000 2
相对标准偏差	-0.033 8	-0.036 9	-0.101 5	-0.042 4

由表2可以看出,在 $146 \sim 166 \text{ }^\circ\text{C}$ 的测试温度范围内,不同测试温度下各测温点的 k 值变化不大,说明 k 与测试热源外温不相关。但不同测试温度下,试样薄的测温点处(C1)的 k 值小,随着厚度的增加, k 值依次增大。

再由求得的 k 值,根据公式(4)计算各测温点的 χ 值,结果如表3所示。

表3 不同测试温度下的热扩散系数

项 目	C1	C2	C3	C4
温度/ $^\circ\text{C}$				
146	0.125 8	0.130 0	0.139 0	0.149 3
151	0.116 1	0.130 0	0.137 0	0.155 2
156	0.120 0	0.128 7	0.131 1	0.140 6
161	0.116 1	0.128 7	0.137 0	0.152 3
166	0.118 0	0.118 9	0.107 2	—
平均值	0.119 2	0.127 3	0.130 3	0.149 3
标准差	0.004 0	0.004 7	0.013 2	0.006 3
相对标准偏差	0.033 8	0.036 9	0.101 5	0.042 4

由表3可以看出,各测温点的 χ 值分布规律不如 k 值明显。 k 的标准差比 χ 低,两者的相对标准偏差相同。各测温点 χ 的平均值随着厚度的增加而增大,即与厚度相关,这验证了公式(4)中 χ 与 h 的平方成正比的关系。

4 结论

根据BPA测试,可计算不同厚度(即不同硫化程度)下的热扩散系数。研究发现,热扩散系数与

热源温度无关,而与时间和厚度相关。BPA操作方便,测试周期短、精度高、重现性好,因此应用BPA对胶料进行硫化分析,有助于橡胶配方技术人员设计橡胶硫化工艺和控制生产。

参考文献:

[1] 梁星宇,周木英. 橡胶工业手册 第三分册[M]. 修订版. 北京:化学

工业出版社,1996:1141.

[2] 王贵一. 橡胶的热扩散系数[J]. 橡胶参考资料,2001,31(1):47-50.

[3] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998:20-40.

[4] 何燕,马连湘,黄素逸,等. 轮胎橡胶材料导热系数的测定及分析[J]. 橡胶工业,2004,51(6):366-368.

[5] 王朱遗,张庆华. BPA橡胶发泡点分析仪测试理论和计算式[J]. 橡胶科技,2015,13(3):45-49.

收稿日期:2016-03-27

Study on Temperature Unsaturation and Thermal Diffusion Coefficient of Tread Compound during Curing with BPA

LI Yue¹, WANG Ling¹, WANG ZhuYi², Tosaki Chikao³

[1. Double Coin Group Shanghai Tyre Research Institute Co. Ltd, Shanghai 200245, China; 2. Hope Technology (Hong Kong) Co., Ltd, Shanghai 201615, China; 3. Ueshima Seisakusho Co., Ltd, Tokyo 1638001, Japan]

Abstract: Taking the tread compound of truck and bus radial tire as an example, the temperature unsaturation and thermal diffusion coefficient were measured and calculated by the blow point analyzer (BPA), and the principle and method of the measurement with BPA were discussed. The results showed that, the thermal diffusion coefficient had no relationship with the temperature of the heat source, but it was related with the heating time and the thickness of the compound. The vulcanization analysis with BPA provided help to curing process design and production control.

Key words: truck and bus radial tire; tread compound; blow point analyzer; temperature unsaturation; thermal diffusion coefficient

Alliance再添3款实心Galaxy轮胎

中图分类号:TQ336.1 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2016年6月7日报道:

Alliance轮胎集团(ATG)推出3款实心Galaxy轮胎:LHD500 SDS L-5, Super Smooth SDS L-5(如图1所示)和YardMaster SDS,这是公司对2015年

推出的第1款实心轮胎Beefy Baby SDS的补充。

这3款新的Galaxy轮胎在2016年6月7—9日拉斯维加斯会议中心举办的WasteExpo 2016上展出。

Alliance轮胎美洲公司营销副总裁Bruce Besancon说,SDS实心轮胎完美契合废弃物管理业。轮胎刺穿破坏发生频率最高和停工费用极高的废料场和转运站的运营商对我们实心轮胎有极大兴趣。

“废物管理公司的堆肥整治工程正在寻求我们的Galaxy和Alliance涵盖的工业甚至农业轮胎产品线。Galaxy Muddy Buddy轮胎非常适宜平滑的堆肥场,而半钢子午线轮胎Alliance Multiuse 550具有全天候性能,是一款高花纹饱和度的垃圾场拖拉机和装载机用轮胎。我们还有用于叉车的Galaxy Bosslift III轮胎和Aeolus系列载重轮胎,我们是垃圾车和垃圾站处理拖车用轮胎的唯一美国经销商。”

(吴淑华摘译 李静萍校)

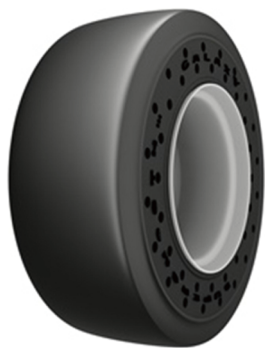


图1 Super Smooth SDS L-5轮胎