

技术讲座

充气轮胎配方设计

第10讲 轮胎的生热及其对寿命的影响

薛虎军*

(化工部北京橡胶工业研究设计院 100039)

车辆上的轮胎承受着车辆本身和所载货物的重量,并将车辆启动时的驱动力、停车时的制动力传递给地面。为了减小车身震动,保持乘坐舒适性,轮胎需具有缓冲性能以及转向时对路面的抓着能力等。在这种情况下,接地旋转的轮胎各部位就会产生各种应力和变形。而作为轮胎组成材料的橡胶和帘线,其损失模量远大于金属,所以会引起较大的能量损失。这种能量损失转变为热能,将导致轮胎温度上升。

关于轮胎生热的本质,有关文献已进行详细的阐述。通常认为,影响轮胎生热和升温的因素主要包括轮胎的工作条件(滚动速度、径向负荷、内压、路面、气温)和轮胎的结构、材料。近几年来,借助于有限元等数学手段预测轮胎滚动过程中的平衡温度场分布也是一个活跃的研究领域。本讲主要介绍轮胎生热的起因、建立滚动温度场分布的物理模型以及轮胎生热升温对寿命的影响,重点阐明有关轮胎生热的一些物理概念和胶料因素对生热的影响。

1 轮胎应力应变与温度的关系

就轮胎特性而言,轮胎应力、应变的分析与轮胎温度状态的分析是一致的。

假设给橡胶类粘弹性材料施加周期性应变,则

$$\epsilon = \epsilon_0 \cos \omega t \quad (1)$$

式中 ϵ, ϵ_0 分别为瞬时应变和最大应变。应力 σ 可表示为

$$\sigma = \epsilon_0 (E' \cos \omega t + E'' \sin \omega t) \quad (2)$$

式中 E', E'' 分别为贮能弹性模量和损失弹性模量。此时每个周期对物体所做的功 H 可用下式表示:

$$H = \int_0^{2\pi\omega} \sigma \frac{d\epsilon}{dt} dt \quad (3)$$

将式(1)和(2)代入式(3),则得到

$$H = \pi \epsilon_0^2 E'' \quad (4)$$

即每个周期消耗掉式(4)所示的能量,该能量转变成热而使物体温度上升。同理,轮胎在接地旋转时,每旋转一周所产生的热量 Q 用下式表示:

$$\begin{aligned} Q &= \pi \epsilon_0^2 E'' = \pi E' \epsilon_0^2 \frac{E''}{E'} \\ &= 2\pi (1/2 E' \epsilon_0^2) \tan \delta \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\tan \delta$ 称为损耗角正切。从式(5)可以看出,生热量 Q 等于变形能量 $(1/2 E' \epsilon_0^2)$ 与 $\tan \delta$ 之积。

另外

$$T = T_0 + \frac{QL}{\lambda F t} \quad (6)$$

式中 T ——轮胎温度;
 T_0 ——环境温度;
 L ——轮胎厚度;
 λ ——导热系数;
 F ——放热面积;
 t ——时间。

* 现已调杜邦中国集团有限公司工作。

从上面的推导过程可以看出,作用于轮胎上的变形能量,通过损耗角正切,按式(5)转变成热量,再由式(6)表现为温升。由此可见,轮胎的应力、应变与轮胎温度之间具有密切的关系。

2 轮胎滚动时内部温度场分布

轮胎反复变形,引起轮胎材料产生滞后损失而转变成热能。热量向下面几个方向散出(见图 1):

- (1) 轮胎内部空气;
- (2) 从轮胎表面向周围环境;
- (3) 通过轮辋向周围环境。

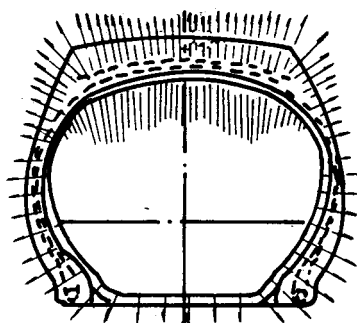


图 1 热量的迁移

这些热量将随轮胎的规格、结构及使用条件不同而异。轮胎自身的温度随行驶时间的延长而上升,达到某一时间呈平衡温度状态。此时,轮胎断面上各点的温度并非完全一样,而是呈现出一定的分布。

从胎体中取出一个小体积单元,通过传热方程考察其温度变化过程。分别用 ρ , C_p , K 和 q 表示该单元的密度、热容、导热系数和升热速率(单位时间的热量变化),假设在所考虑的温度范围内,导热系数 K 为常数,则温度 T 随着时间 t 的变化速度可用下式表示:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + q \quad (7)$$

式中 ∇^2 称为拉普拉斯算子, $K \nabla^2 T$ 代表传热效果。

胎体中的生热速率 q 起因于橡胶和帘

线,若用下标 r 和 c 分别代表橡胶和帘线,则

$$q = q_r V_r + q_c V_c \quad (8)$$

式中 V 表示体积分数, q_r 和 q_c 取决于有效应变幅度 e 、温度 T 和频率 n ,即

$$\begin{aligned} q_r &= f_r(e_r, T, n) \\ q_c &= f_c(e_c, T, n) \end{aligned} \quad (9)$$

方程(7)中, q 越大, T 上升越快越高。因此,轮胎在周期性滚动应变条件下,橡胶和帘线产生的热量越多,其温度上升越快越高。

如果能给出各种 e_r, e_c, n 和各温度下的 q_r, q_c , 则可通过合理选择边界条件,用数学法对方程(7)求解。然而,事实上我们无法知道胎体中各点的 e_r 和 e_c 值,因此,方程(7)的求解仍是不可能的。只有在用有限元法通过动态应力分析获得有效应变幅度后,方程(7)的求解才变得可能。

轮胎滚动时的温度变化还可通过直接测量而获得。不论轮胎类型和规格如何,均可采用以下两种方法测量:

(1) 接触法(主要测量轮胎内部温度)

接触法测温,一般是在轮胎内部开孔,轮胎行驶后插入热电偶测量轮胎的内部温度。若测量轮胎行驶中的温度,则需将热电偶预先埋入轮胎,或者将热电偶由气门嘴插入,测定轮胎内部空气的温度。上述这些均必须通过滑环进行测定。

(2) 非接触法

非接触法测温一般采用红外线测温仪。该方法是通过测定被测物体的红外线辐射量,确定被测物体的表面温度。其最大优点是不用接触即可测得被测物的表面温度分布图。红外线测温仪不断发展,目前它不仅可测得表面温度,而且借助计算机可对等温线图、同一温度的面积比率进行分析,还能对故障探测、故障增长等进行研究。也有人从导热的角度,对滚动中轮胎内部空气的流动进行了研究。

利用硫化胶的粘弹性能也可预测轮胎的滚动温度。对于胎体和带束层骨架材料为人

造丝的 185SR14 轮胎, Willett 根据轮胎耐久性实验数据, 通过回归计算导出了如下的胎肩部位温度方程:

$$\Delta T = 1.22E''_1 + 1.26 \times 10^4 C''_1 \quad (10)$$

式中 E''_1 ——胎面硫化胶损耗模量;

C''_1 ——胎面硫化胶损耗柔量。

方程(10)的置信水平较低, 仅达 40%, 如果采用较高的置信水平(99%)重新做回归分析, 方程可变为:

$$\Delta T = 1.33 \times 10^4 C''_1 \quad (11)$$

利用方程(11)预测的温度与实测值具有良好的相关性(见图 2)。钢丝带束层轿车轮胎也具有类似结果。

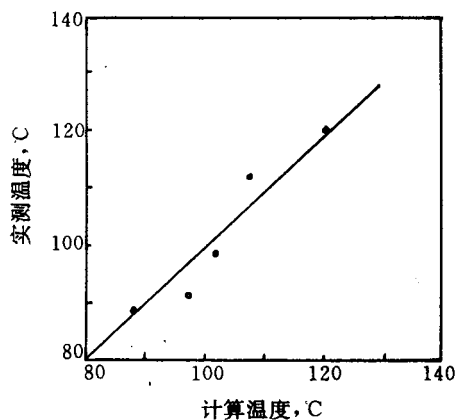


图 2 185SR14 轮胎实测温度与计算温度的关系

有关文献对载重轮胎也做出这样的研究。Kainradl 对全钢 12.00R20 轮胎所做的回归分析表明, 胎肩部位温升可用下式表示:

$$\Delta T = 2.12E''_1 + 1.57E''_p + 50.4 \quad (12)$$

式中 E''_1 ——胎面胶的损耗模量;

E''_p ——肩垫胶的损耗模量。

图 3 示出按式(12)所计算的温度与实测温度之间的关系。

3 轮胎生热和升温的影响因素

轮胎的生热值, 与轮胎的结构和配方设计、原材料选择以及使用条件等均有关系。国

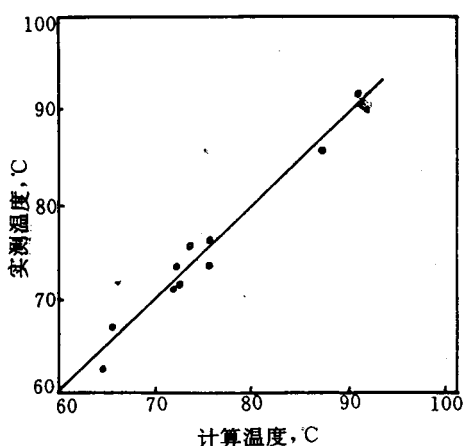


图 3 12.00R20 轮胎实测温度与计算温度的关系

外对此已进行了全面系统的研究, 结果大体相同。

3.1 结构设计

轮胎的热状态主要取决于滚动损失。热量除散失于周围介质外, 其余全部表现为轮胎的温升。滚动损失是由轮胎材料部件的内摩擦和胎面与路面间的摩擦产生的, 因此胎冠、胎肩所产生的热量占整个生热量的大部分。子午线轮胎的带束层增大了胎冠部分的刚度, 大大减小了轮胎滚动中的变形, 同时减小了行驶面与路面间的相对滑移, 因此子午线轮胎在胎冠部位的滞后损失比斜交轮胎的小得多。此外, 无内胎轮胎比有内胎轮胎的滞后损失小 20%—25%; 大规格、高层级和横向花纹轮胎分别高于小规格、低层级和纵向花纹轮胎, 见图 4—6。

有关文献报道了断面形状(用高宽比 H/B 表示)对大规格轮胎热状态的影响。文章指出, H/B 等于 0.75 和 0.65 轮胎的载荷量比 $H/B=0.9$ 轮胎的载荷量分别大 22% 和 41%。尽管 75 系列和 65 系列轮胎的重量各自比 90 系列轮胎的重量大 19% 和 29%, 但它们在两种负荷(80kN, 100kN)下的最高温度均随 H/B 的减小而下降。此外, 轮胎的最大热应力区也因 H/B 的不同而异。90 系列轮胎的最大热应力区位于行驶面的边缘

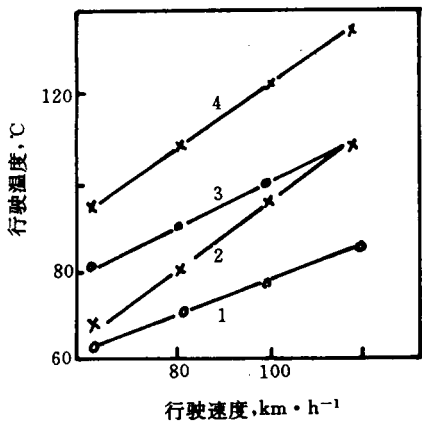


图 4 不同规格和结构轮胎的生热与行驶速度的关系

1—165R13; 2—6.45—13;
3—260R508; 4—260—508

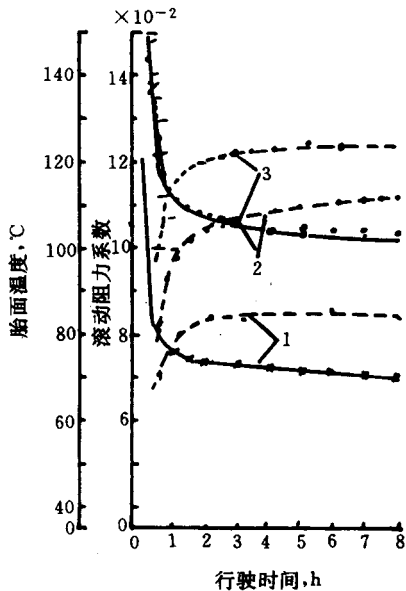


图 5 不同结构和花纹对轮胎生热和滚动阻力的影响

——阻力系数;胎面温度; 1—纵向花纹钢丝
子午线轮胎; 2—纵向花纹斜交轮胎; 3—横
向花纹斜交轮胎; 子午线轮胎为 10.00R20
14PR; 斜交轮胎为 10.00—20
14PR; 车速为 60km·h⁻¹

处,而 75,65 系列轮胎的最大热应力区则位于等于胎面中心线的距离 0.65 和 0.67 倍的半个行驶面宽度处。降低 H/B 值能促使温度更均匀地沿行驶面宽度分布。比如实验

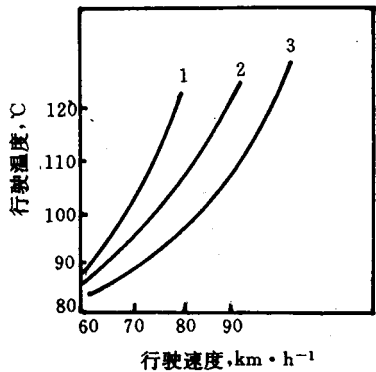


图 6 不同层级 11.00—20 轮胎生热比较
1—14 层级; 2—12 层级; 3—10 层级

负荷为 80kN 时,90 系列轮胎的最高与最低温度之差为 45—50℃,而 75,65 系列轮胎的这一温度差分别为 28—30℃和 22—24℃。实验负荷为 100kN 时,该温差分别为 42,38 和 19℃。由计算机计算得出, H/B 的最佳值为 0.665。但是,轮胎重量随 H/B 值的减小而增大,因此在设计不存在热破坏的轮胎时,应在保持其规定寿命的前提下以载荷量和材料消耗量作为轮胎的主要标准参数。

3.2 配方与原材料

原材料的选择和配方设计,也影响到轮胎生热。尼龙 66 轮胎的行驶温度比尼龙 6 轮胎的高(见图 7 和 8),尼龙帘线轮胎的行驶温度比聚酯帘线 and 人造丝帘线低,采用普通硫化体系比采用半有效硫化体系的高。橡胶

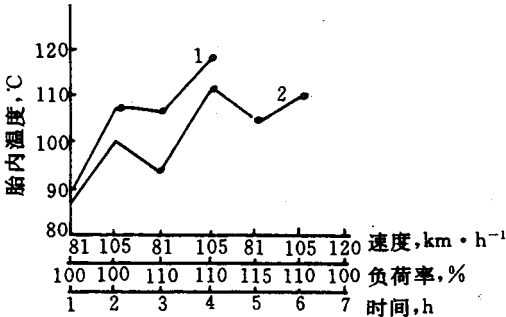


图 7 尼龙 66 和尼龙 6 轮胎的
耐久性试验比较
1—尼龙 66 轮胎(4—5h 损坏); 2—
尼龙 6 轮胎(6—7h 损坏)

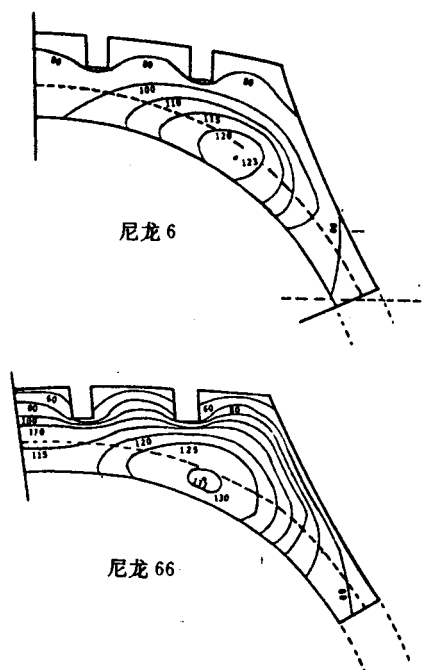


图8 尼龙6和尼龙66载重斜交
轮胎胎肩温度分布图

种类对轮胎生热的影响:低变形时,聚丁二烯橡胶(BR)的弹性最好(滞后损失最小),天然橡胶(NR)次之,聚异戊二烯橡胶(IR)再次,丁苯橡胶(SBR)最差;大变形时,IR的生热最少,NR稍多,BR更多,SBR最多。

4 热量的传导

轮胎滚动时升温是由所用材料的粘弹性决定的,是轮胎固有属性,完全避免是不可能的,但若能有效地将热量传导出去,则可以降低轮胎温度,延长使用寿命。

强化导热的一种方法是采用热导率高的材料和较薄的胎体。胎体越薄,内部热量越易散出。关于采用热导率高的材料,要和轮胎的整体配方设计工作结合起来考虑。有关文献已报道,炭黑的品种和用量均会影响胶料的导热系数。炭黑结构越高,用量越大,胶料的导热系数越大。氧化锌用量越大,胶料的导热系数越大。为提高胶料的导热系数,在不影响

胶料生热的情况下,应尽量采用较高结构的炭黑,并适当增加炭黑和氧化锌用量。

强化导热的另一种方法是生热源置于接近胎体外表面处。轮胎用材料的粘弹性不但是无法避免的,而且有时还是有益的(如为了提高高速轮胎的临界速度,就要求轮胎必须具有一定的阻尼性)。为了使轮胎既具有一定的阻尼效果,同时又保持较低的滚动阻力和生热,一种有效的方法就是将生热源(阻尼源)置于胎体外表面,以便使阻尼效应不会导致较高的温度。

5 轮胎的耐热能力

所谓轮胎的耐热能力,一是指轮胎材料在高温下的性能,二是指轮胎组成材料的耐热老化性能。

轮胎材料高温下的性能与常温下的性能相差很大。图9和10示出了温度对橡胶和帘线疲劳寿命的影响。橡胶与帘线的粘合强度随温度的升高而明显下降,甚至完全丧失。也有一些例外情况,如常温下BR较NR和SBR耐磨,但温度高于60℃时,SBR又比BR耐磨。这些规律在配方设计时应充分考虑,以

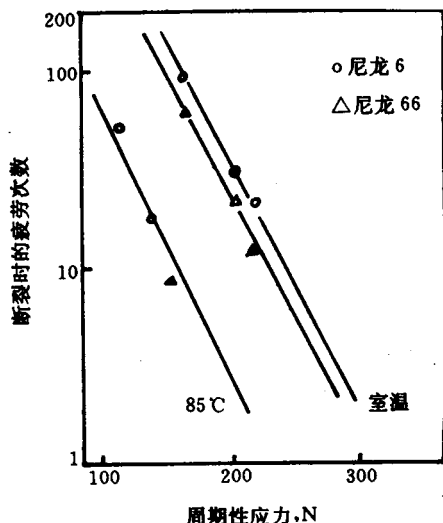


图9 温度和应力对周期性应力作
用下帘线疲劳寿命的影响

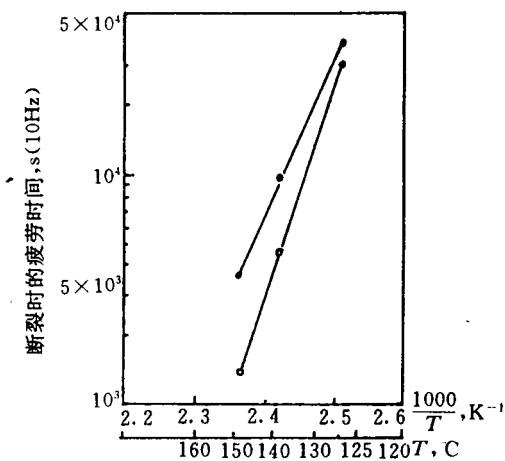


图 10 温度对周期性应变下的轮胎胶料疲劳寿命的影响

提高胶料的耐热性能。

橡胶在热作用下会加速老化。轮胎滚动过程中温升越高,胶料老化越快,因此在设计轮胎胶料时必须合理选用防老剂。另外通过合理调整配方也可获得类似效果,如采用有效或半有效硫化体系就可形成比采用普通硫化体系稳定的交联键,聚合物主链的异构化程度也较轻。

6 轮胎的温升与寿命

图 11 示出了工程机械轮胎破坏时的寿命及相应破坏发生频率之间的关系。从图中可以看出,初期故障的发生率很高,引起初期故障的主要原因是轮胎内部生热。轮胎变形产生的部分能量转换成热积蓄在轮胎内部,导致轮胎温度上升,当温度超过允许的临界温度时,轮胎将破坏。由于这种生热温度与轮胎的下沉量(与载荷成正比)和转速(与行驶速度成正比)之积的作功量成正比,故用 TKPH($t \cdot km \cdot h^{-1}$)表示轮胎的耐热特性值(即达到轮胎发生热故障的临界温度时形成的最高作功量)。

轮胎的使用条件(气压、负荷、速度等)与轮胎的生热温度之间存在着密切关系。大型轮胎承受的负荷 W 及其速度 v 与轮胎温度

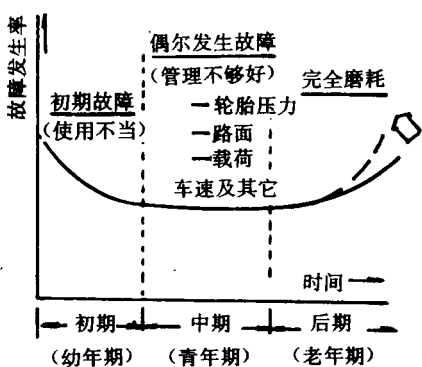


图 11 工程机械轮胎的寿命

T 之间的关系可近似地用下式表示:

$$T=A(Wv)+B \tag{13}$$

式中 A, B 为取决于轮胎规格、花纹型式等的常数; Wv 即 TKPH。式(13)也可写成

$$Wv=\frac{T-B}{A} \tag{14}$$

若设定轮胎的内部温度 T 为安全临界温度(指轮胎不发生脱层等热故障,而能够保证安全行驶的最高轮胎温度,例如日本汽车轮胎协会于 1969 年根据轮胎的热故障试验结果确定此温度为 125℃),则式(14)可写为:

$$Wv=\text{常数} \tag{15}$$

式中的 Wv 称为 TKPH 的临界值。该值随轮胎规格、花纹型式等不同而各异,见图 12。由

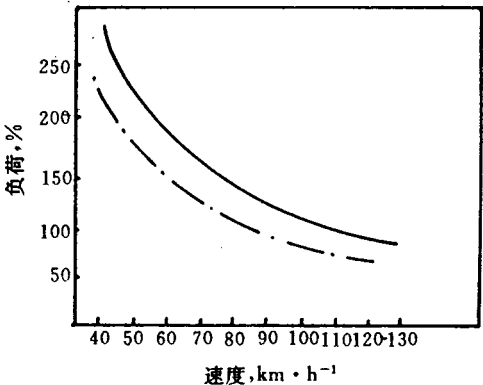


图 12 TKPH 曲线

——HW·J 花纹; - - - HT 花纹;
轮胎规格:10.00R20 14PR

图可见,在曲线上部的速度、负荷条件下轮胎有可能发生热故障,而在曲线以下的行驶条件下,轮胎可正常行驶。

7 结语

轮胎温升是一个复杂过程,要完全揭示其规律,不仅要搞清楚轮胎结构、胶料性能及使用性能对胶料生热的影响,而且还须借助

数学工具,因此,轮胎温升研究是一个综合性很强的领域。

通过本讲可以看出,轮胎的生热、导热、耐热及寿命是有相互关系的,要提高轮胎寿命,就要研究生热的影响因素,强化导热的途径,提高耐热的措施,只有生热低,导热好,耐热性能好的轮胎才有可能获得高寿命。