

# 论轮胎结构设计中材料力学的局限 与断裂力学的发展

张士齐 贾红兵

(南京理工大学非金属材料系 210094)

**摘要** 从轮胎的可靠性和安全性出发,分析了目前建立在材料力学基础上的传统强度理论和疲劳强度理论用于轮胎结构设计时存在局限性的原因(即没有考虑材料的缺陷及应力在该处的集中)。认为应该采用断裂力学的疲劳强度理论作为轮胎结构设计的依据,因为这种理论可以计算轮胎缺陷或不均匀处(如带束层和胎圈反包布两处端点)的应力集中程度。提出用作结构部件的橡胶制品的结构设计和配方设计都应当使用这种理论。

**关键词** 轮胎,结构设计,材料力学,断裂力学

70年代全世界的两次经济危机,加剧了轮胎行业的激烈竞争;有限元法成功地用于非线性分析,又为轮胎结构设计提供了强有力的技术基础,促进了轮胎结构设计思想的活跃和设计理论的创新。1984~1989年间,轮胎结构设计理论出现了百花齐放、百舸争流的喜人局面(见表1)<sup>[1~10]</sup>,已从着眼于静态充气的“自然平衡轮廓理论”发展到强调运动状态的“最佳动态轮廓理论”。这里所指的“动态”,一是指动态载荷作用,二是指动态时间过程;而“最佳轮廓”则是指既包括了材料分布(轮廓的几何学),又包括了材料性能(轮廓的力学)等。这些成就带来了“与轿车同寿命的轮胎”的出现,如米其林的“XH4”、普利司通的“Turanza”及住友的“890”轮胎等等。

## 1 轮胎的可靠性和安全性

随着高速公路网的建立,人们普遍关心

**作者简介** 张士齐,男,64岁。1955年毕业于华南工学院橡胶专业。教授。国家橡塑新材料工程研究中心技术委员会委员,《橡胶工业》和《合成橡胶工业》编委。主要从事聚合物力化学和轮胎结构力学的研究。已发表论文50多篇,著书2部。曾获联合国TIPS“发明创新科技之星”奖,两次获得部省科技进步奖。

轮胎的行车安全,北美地区大多数汽车制造商认为轮胎的安全性比寿命更重要。但是,轮胎的可靠性和安全性并不是没有问题的。在前苏联,早期损坏的轮胎中,因脱层和掉块损坏的占10%,因胎体或带束层帘线损坏的不超过2%。1991年,前费尔斯通的Baumgardner D曾在一次轮胎工业会议上敦促轮胎公司解决目前轮胎技术中存在的问题。他指出,80%的与轮胎有关的受伤事件和70%的向轮胎生产厂提出的诉讼事件,主要是由以下原因造成的:①多股胎圈的钢丝圈折断;②一些轿车和轻载车用于子午线轮胎的带束层脱层;③一些中型载重子午线轮胎(多数为低断面)在缺气行驶后再充气时易爆破;④轮胎负荷能力公式和系数 $K$ 已过时。1994年美国翻胎者协会还专门讨论了中型和轻型载重子午线轮胎充气时,胎侧突然出现的拉链式爆破问题。有些汽车公司(如Callway Corvetto公司)就选用固特异的“EMT”(Ex-tented Mobility Tire)和普利司通的“Expedia”作为高级轿车的原配轮胎和替换轮胎,这些轮胎在漏气后仍能行驶一定的距离。目前轮胎的可靠性和安全性尚需进一步提高。

表 1 1984 ~ 1989 年间轮胎结构设计理论

理论名称	创立者/年份	特点	措施	文献
RCOT(Rolling Contour Optimization Theory)	普利司通/1984	提高带束层和胎圈张力, 降低胎侧张力	改变胎肩至胎踵曲率	[1]
TCOT(Tension Control Optimization Theory)	普利司通/1988	提高带束层和胎圈张力, 降低胎侧张力, 但张力变化较平缓	改变胎肩至胎踵曲率	[2, 7]
PSP(Prestress Profile Theory)	住友/1987	减小带束层中部和端部的张力差, 减小带束层端应变	使充气后肩部变形大于胎面中部	[3]
PSP-F(PS-P-Fourth)	住友/1989	平衡带束层和胎体张力分布	使胎面弧平坦, 接地形状最佳	[4]
DSOC(Dynamic Simulation Optimization Contour)	东洋/1988	行驶中接地形状和压力分布变化小且稳定; 胎冠形状变化小, 带束层稳定, 胎圈变形小	胎面用两个半径与 $R_1$ 和 $R_2$ 组合	[5]
DSOCT(Dynamic Stability Optimization Contact Theory)	东洋/1989	提高带束层张力, 控制末端张力, 全段张力均匀, 接地形状变化小	调整带束层刚性, 加包边, 加大胎冠半径	[6]
ITTC(Integrated Tire Technical Concept)	天津/1989	控制带束层和胎体张力, 减小胎圈变形	调整结构和配方	[7]
SBTB(Stress Balance Tire Body)	米其林/1991	应力均匀分布	调整结构和配方	
PDEP(Prestress & Dynamics Balance Profile)	北京橡胶院/1994	对带束层和胎圈施加张力	改变模型内胎体轮廓线, 使动态轮廓平衡	[8]
TECO(Tire Entire Construction Optimization)	上海载重轮胎厂/1994	—	—	—
EOT(Energy Optimization Theory)	大陆/80年代	接地面压力分布均匀	使带束层比胎面宽, 胶料低滞后	
SEMT(Strain Energy Minimization Theory)	横滨/1988	带束层和胎圈包布两端点应变能最小	$R_1 \approx R_2$	[9]
CSSOT(Tire Design Theory Based on Optimization of Stress-Strain Cycles of Its Elements)	前苏联轮胎研究院/1989	应力-应变状态的幅度和不变分量最佳化	改善轮廓和材料分布及其性能	[10]

事实上, 机械工业早就出现过这种低应力下装备早期损坏的问题。由于材料裂纹的疲劳扩展, 自第二次世界大战以来, 世界上已有几千艘焊接船损坏, 几十座桥梁断裂, 几百起铁轨疲劳造成翻车事故, 几十架飞机机毁人亡<sup>[11, 14]</sup>。现在, 人们采用断裂力学理论, 成功地解决了这些问题。

## 2 材料力学的局限性

从近几年提出的具有代表性的轮胎结构设计理论(见表 1)看出, 它们大都是建立在材料力学基础上的传统强度理论。例如, 普利司通的 RCOT 和 TCOT、住友的 PSP 和 PSP-F、东洋的 DSOC 和 DSOCT、天津的 ITTC 以及化工部北京橡胶工业研究设计院

的 PDEP 理论, 都是只把静载荷所产生的应力(或应变)作为力学状态的特征参数, 在强度条件中只包含应力, 而且没有考虑材料缺陷或不均匀性所产生的应力集中。大陆的 EOT 理论, 虽然考虑了应力和应变这些力学性能的综合影响, 而且还可以从材料的热学性能、生热和升温来研究轮胎的使用寿命, 因为轮胎在地面上每滚动一周所产生的热量  $Q = 2\pi(1/2E'\epsilon_0^2)\tan\delta E'$  是贮存模量,  $\epsilon_0$  是应变,  $\tan\delta$  是损耗因子), 而轮胎的温度  $T = T_0 + QL/\lambda Ft$  ( $T_0$  是环境温度,  $L$  是轮胎厚度,  $\lambda$  是传热系数,  $F$  是散热面积,  $t$  是时间), 这比上述 8 种理论提高了一步, 但它仍是以应力和应变作为力学状态的特征参数。前苏联轮胎研究院的 CSSOT 和横滨的

SEMT,也是建立在材料力学上的、以光滑构件应力-应变为基础的理论。当然,与大陆的EOT理论相比,它们又有了很大进步,因为它们都是以动、静应变共同影响为主的复合应力状态下试样的抗疲劳强度作为判据,其中包括用动态线性变形幅度和动态变形剪切分量幅度获得的变形能。因此,前苏联轮胎研究院和横滨的轮胎结构设计理论是建立在材料力学基础上的疲劳强度理论。

由此可见,轮胎结构设计理论的发展阶段若从轮胎轮廓设计的角度划分,可分为静态充气的自然平衡轮廓理论和动态最佳轮廓理论两个阶段,第二阶段应以1984年普利司通的Togashi等公开RCOT开始,第一阶段则是在此以前的自然平衡轮廓理论。如果从轮胎强度设计的角度划分,则可分为传统强度理论和疲劳强度理论两个阶段。第二阶段则要以以前苏联轮胎研究院的ТРЕДЯКОВ等发表CSSOT和横滨的齐藤勇一发表SEMT开始。

轮胎结构设计理论在近几年的发展,极大地提高了轮胎质量,为什么还说它有局限性呢?这是因为目前轮胎的可靠性和安全性尚不尽如人意,原因在于它的强度理论是建立在有局限性的材料力学基础上的,而材料力学的强度理论的主要出发点是把应力作为力学状态的特征参数,在强度条件中只包含应力。这意味着任何构件,不论其几何形状和受载状况是否相同,只要它们的应力状态相同,则可看成是一种力学状态,其安全程度相同。材料力学解决构件的安全设计是从以下3个方面进行的:①计算应力 $\sigma$ (或/和应变);②根据静态试验确定材料的极限应力 $\sigma_i$ ,再除以一个针对性很差的普遍打折扣的安全系数,得到许用应力 $[\sigma]$ ;③最后建立强度条件 $\sigma \leq [\sigma]$ 。这种强度理论由于没有考虑材料的缺陷以及应力在该处的集中,因而只适用于静态不变载荷和低强度材料的小型构件,只能保证构件不会因弹性失稳、变形过

大或屈挠而破坏。对于交变载荷下的疲劳损坏,这种理论是不适用的,因为材料大都存在缺陷(它使高聚物的实际强度比理论强度低100~1000倍),而集中应力在该区域的大小与缺陷尺寸的平方根成正比,所以,只用应力(或/和应变)作为确定疲劳强度和疲劳寿命的依据时,数据十分分散,绘成的应力幅度 $S$ 对寿命循环次数 $n$ 的双对数图往往是一些平行曲线,原因是试样有不同尺寸的原始缺陷<sup>[13]</sup>。材料力学没有考虑材料内部缺陷对疲劳寿命的影响。

### 3 应用断裂力学的疲劳强度理论作为轮胎结构设计优化的判据

综上所述,以材料力学为基础的强度理论不能解决轮胎在交变低应力作用下的早期损坏问题。要解决这个问题,只有依靠建立在断裂力学基础上的疲劳强度理论。

断裂力学是研究有缺陷的结构或构件的强度、变形和裂纹扩展规律的学科,它建立了构件的缺陷尺寸、工作应力以及材料抵抗裂纹扩展能力三者之间的定量关系,为安全设计构件或结构,定量或半定量地估计有缺陷构件的寿命以及制订选材规范,研制新材料等奠定了新的理论基础<sup>[11,13]</sup>。

断裂力学强度理论用来度量和控制弹塑性材料强度的判据有以下3条:

(1)按能量方法建立起来的“裂纹扩展力”判据:J积分,或称裂纹扩展能量释放率,与撕裂能等值,它是单位裂纹扩展时,裂纹体内释放出来的贮存弹性变形能,这些能量供给裂纹重新形成表面所需的表面能,以及裂纹顶端附近材料塑性变形所需的功,也就是穿过断裂面的键断裂所需的能量和消耗的滞后损失。

(2)从裂纹顶端的应力场出发,建立起来的应力强度因子 $\Delta K$ <sup>[13]</sup>判据。

(3)裂纹顶端张开位移 $\delta$ (COD)判据。

用数学方法可以得到裂纹张开位移、应

力强度因子和裂纹扩展力之间的关系。

橡胶和橡胶/帘线复合材料则用裂纹扩展能量释放率或撕裂能作为强度判据,  $J$  的定义是:

$$J = 1/B (dU/da) \quad (1)$$

式中,  $B$  是试样厚度,  $U$  是由裂纹引起的应变能的减小,  $a$  是裂纹长度,  $J$  积分可由试验测得的撕裂能  $G$  确定。

在交变载荷作用下, 橡胶和橡胶/帘线复合材料疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  是撕裂能  $G$  的唯一函数<sup>[14, 15]</sup>, 即

$$da/dN = f(G) \quad (2)$$

式中,  $N$  是疲劳周期数。对于钢丝, 则用应力强度因子  $\Delta K$  代替上式的撕裂能  $G$ 。

疲劳裂纹的扩展速率  $da/dN$  和撕裂能  $G$ <sup>[16, 17]</sup> (或应力强度因子  $\Delta K$ ) 的双对数图, 是一条三段折线组成的 S 形曲线 (见图 1)。

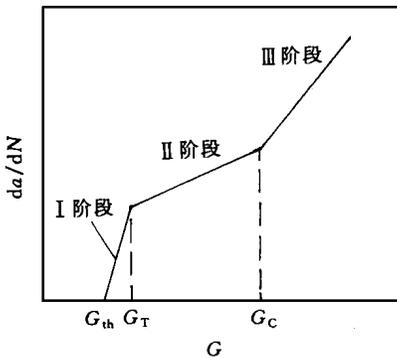


图 1 裂纹扩展速率  $da/dN$  与撕裂能  $G$  之间的关系

(a) 裂纹不扩展。当撕裂能  $G$  小于疲劳裂纹扩展的门槛值  $G_{th}$  时, 裂纹不扩展 (当实际试验难以测出这个门槛值时, 有的把疲劳裂纹扩展速率  $da/dN \leq 10^{-6} \sim 10^{-7}$  mm/周所对应的撕裂能作为门槛值  $G_{th}$ )。即当  $G < G_{th}$  时,

$$da/dN = 0 \quad (3)$$

由  $G_{th}$  值和微裂纹尺寸  $a$  可以计算出轮胎构件无限寿命时的安全应力, 由  $\Delta G_{th}$  值和微裂纹尺寸  $a$  可以计算出轮胎钢丝在此时的安

全应力。加入炭黑的 NR, BR 和 SBR 硫化胶的  $G_{th}$  在  $100 \sim 400 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$  之间, 未加炭黑的 NR 和 SBR 硫化胶的  $G_{th}$  分别为  $39$  和  $58 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(b) 宏观裂纹形成阶段, 或称裂纹扩展第 I 阶段。此时  $G > G_{th}$ , 但  $G < G_T$ , 裂纹扩展缓慢、速率很低、曲线斜率很高, 表明裂纹扩展速率  $da/dN$  随  $G$  值增大而迅速提高。即当  $G_{th} < G < G_T$  时,

$$da/dN = AG^\alpha \quad (4)$$

式中,  $A$  和  $\alpha$  是材料常数,  $G_T$  是裂纹扩展特性变化点的撕裂能。

(c) 宏观裂纹扩展第 II 阶段。它是宏观裂纹稳定扩展阶段, 线段较平, 表明裂纹扩展速率  $da/dN$  随  $G$  值的变化较小。即当  $G_T < G < G_c$  时,

$$da/dN = BG^\beta \quad (5)$$

式中,  $B$  和  $\beta$  是材料常数,  $G_c$  是临界撕裂能。各种硫化胶的  $\beta$  值列于表 2。

表 2 各种硫化胶的  $\beta$  值

橡 胶	未填充	填充
NR	2.0	2.0
SBR	2.3	2.4
NBR	2.7	2.8
BR	3.6	3.0
CR	1.7	3.4
IR	3.8	2.0
EPDM	3.4	3.2

(d) 裂纹失稳扩展第 III 阶段。当撕裂能  $G$  超过  $G_c$  时, 即当  $G \geq G_c$  时,

$$da/dN \rightarrow \infty \quad (6)$$

裂纹扩展速率急剧增大, 在交变载荷下工作的构件, 例如轮胎是不允许在  $G$  接近于  $G_c$  的条件下工作的。

轮胎是高速运动中的受力构件, 为了保证行车的绝对安全, 可以采用无限寿命设计, 即用  $G_{th}$  作为判据。如果按安全寿命设计, 如轿车轮胎按 12.6 万 km 的保证里程, 以 P185/80R13 轮胎每转一周约行 2 m 计, 则

轮胎的疲劳寿命应大于  $6.3 \times 10^7$  次, 比对火车轴的要求略高; 如果载重轮胎的保证里程为 10 万 km, 要求二次翻新后总里程达到 30 万 km, 以 245/75R22.5 轮胎每转一周约行 3 m 计, 则轮胎的疲劳寿命应为  $10 \times 10^7$  次, 接近对汽车发动机曲轴的要求, 因此可根据实际情况确定撕裂能  $G$  的值作为判据。

在稳定的撕裂条件下, 硫化胶的裂纹扩展速率  $da/dN$  与温度  $T$  有强烈的依存关系<sup>[18]</sup>。即

$$da/dN = A \cdot \exp(-E/R)(1/T - 1/T_0) \quad (7)$$

式中  $A$ ——系数;

$T_0$ ——环境温度;

$E$ ——活化能;

$R$ ——气体常数。

因此, 在选择判据  $G$  值时, 要考虑温度的影响, 即考虑轮胎工作时的温度。

#### 4 结论

(1) 轮胎是非均质的复合材料构件, 其界面力学性能的差异, 极易产生局部应力集中, 而且制造时很难无缺陷, 因此, 用材料力学的传统强度理论或疲劳强度理论作为结构设计的理论基础, 由于没有考虑缺陷的影响, 存在着很大的局限性。

(2) 建立在弹塑性断裂力学基础上的疲劳强度理论, 由于定量考虑了缺陷和缺陷顶端塑性区的应力集中的影响, 因而可以作为轮胎结构设计的理论基础, 撕裂能则可以作为轮胎强度设计的新判据。

(3) 承载橡胶制品的结构设计和配方设计也可用撕裂能作强度判据。

#### 参考文献

1 Togashi M, Kato K, Furllys S. *et al.* Reduced rolling resis-

- tance pneumatic radial tire and method of manufacture. USP4 513 802. 1985
- 2 Ogawa H. 载重和公共汽车子午线轮胎的轮廓研究——最佳张力控制理论 TCOT. 刘大众译. 轮胎工业, 1989, 9(1): 55
- 3 佚名. 住友橡胶公司的轮胎设计新理论. 张卓亚译. 橡胶工业, 1988, 35(1): 55
- 4 丸桥襄司, 落合洁. 先进的タイヤ形状理论“PSP-F”. 月刊タイヤ, 1989(7): 32
- 5 大桥纯一. DSO C 理论. 月刊タイヤ, 1988(9): 30
- 6 出井健雄等. タイヤ走行时接地面理论. 月刊タイヤ, 1989(8): 54
- 7 黄世权. 子午线轮胎设计理论进展述评. 橡胶工业, 1991, 38(7): 427
- 8 吴桂忠. 国内外子午线轮胎设计生产的现状及发展概况. 轮胎工业, 1995, 15(6): 323
- 9 齐藤勇一. タイヤ负荷状态综合性能向上理论 STEM. 月刊タイヤ, 1988(3): 66
- 10 Tretyakov O B. Tire design theory—based on the optimum stress-strain cycle of tire. Tire Sci. & Technol., 1989, 17(2): 100
- 11 Broek D. 工程断裂力学基础. 王克仁译. 北京: 科学出版社, 1980: 1~3
- 12 曾春华. 奇妙的疲劳现象. 北京: 科学出版社, 1986: 1
- 13 王仁东. 断裂力学理论和应用. 北京: 化学工业出版社, 1984: 175
- 14 Gent A N, Lindley P B, Thomas A G. Cut growth and fatigue of rubber. J. Appl. Polym. Sci., 1964(8): 455
- 15 Huang Y S, Yeoh O H. Crack initiation and propagation in model cont-rubber composites. Rubber Chem. Technol., 1989, 62(4): 709
- 16 Lake G J, Lindley P B. The mechanical fatigue limit for rubber. J. Appl. Polym. Sci., 1965(9): 1 233
- 17 Young D G. Application of fatigue methods based on fracture mechanics for tire compound development. Rubber Chem. Technol., 1990, 63(4): 567
- 18 Gent A N. Effect of temperature and oxygen on the strength of elastomers. Rubber Chem. Technol., 1991, 64(1): 96

# Limitation of Material Mechanics and Advance of Rupture Mechanics in Structure Design of Tire

Zhang Shiqi and Jia Hongbing

(Nanjing University of Science and Technology 210094)

**Abstract** In view of the reliability and safety of tire, an analysis has been made for the cause of the limitation which exists in the application of the traditional strength theory and fatigue strength theory based on the material mechanics to the structure design of tire, i. e. the material defects and the stress concentration thereby are not considered in the material mechanics. It is suggested that the fatigue strength theory based on the rupture mechanics should be applied to the structure design of tire because the stress concentration in the defective or ununiform area of tire (e. g. the ends of belt and the ends of turn-up in bead area) can be calculated based on this theory; this theory should be applied to both structure design and formula design of the rubber goods used as the structural components.

**Keywords** tire, structure design, material mechanics, rupture mechanics

## 天津橡塑机械联合有限公司研制成功 全钢载重子午线轮胎一次法成型机

天津橡塑机械联合有限公司研制成功的全钢载重子午线轮胎一次法成型机,系在引进日本三菱公司 HD-3 一次法成型机基础上作了改进的新机型。1997年8月10日在天津进行了负荷试车。11日连续运转,共试制了近20条11R22.5规格轮胎,除第1条轮胎作参数实际调整外,从第2条轮胎开始,操作一切正常,所有在场观看的人都为之折服。该机系为上海轮胎橡胶(集团)股份有限公司载重轮胎厂扩大载重子午线轮胎生产规模而研制的,载重轮胎厂的领导、工程技术人员、成型师傅亲临现场,为该成型机的试车成功也作出了很大努力。他们认为用该成型机生产的胎坯与引进设备成型出来的胎坯是一样的,对该新机型感到满意,并决定当即运回上海,准备马上投入正式生产。

该机型适用性较广,成型效率高。该机的研制成功,为子午线轮胎设备国产化水平的提高作出了重要贡献,也标志着我国的成型机技术水平迈上了一个新的台阶。

(本刊编辑部 陈志宏供稿)

## 辐射硫化天然胶乳即将推向市场

英国《欧洲橡胶杂志》1996年178卷11期21页报道:

德国橡胶公司已在全世界(马来西亚和日本除外)获得了辐射硫化天然胶乳的专利权。

本部位于法兰克福的这家橡胶经销商将把这种未添加促进剂的胶乳产品推向医药界,以解决由促进剂诱发的IV型过敏症问题。

据德国橡胶公司称,因对硫化促进剂,如二硫代氨基甲酸酯或二硫代四甲基秋兰姆过敏而导致的IV型过敏症目前正呈上升趋势,使人们对寻求替代材料的兴趣陡增。德国橡胶公司表示,辐射硫化天然胶乳虽然还不能从根本上消除I型蛋白质过敏症问题,但是该工艺可增大可抽出的蛋白质的量,并可通过充分沥滤和(或)氯化使蛋白质质量分数大大减小。辐射硫化天然胶乳的另一个应用领域是浸渍婴儿奶嘴,在奶嘴中避免使用亚硝酸胺已成为一个重要的问题。

(许炳才译 涂学忠校)