

文章编号:1671-6833(2015)01-0087-05

# 工程翻新轮胎多元复合层型及力学模型的构建

王 强, 齐英杰

(东北林业大学 交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:** 为进一步提高工程翻新轮胎的使用性能和奠定理论基础,以 26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎为研究对象,分析并设计了翻新轮胎的基本结构及尺寸,依据复合层型理论,构建了由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型及胎侧层旋转圆环模型为主要构成的工程翻新轮胎多元复合层型,依据地面力学理论,采用极坐标的方式,分析和探讨了多元复合层型力学模型和细观静力学平衡方程的构建,描述了工程翻新轮胎各组成层的应力-应变关系矩阵。

**关键词:** 工程翻新轮胎;多元复合层型;力学模型;细观静力学平衡方程;关系矩阵

**中图分类号:** U4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.01.021

## 0 引言

随着我国采矿业及基础设施建设的快速发展,土、石方作业用工程轮胎需求量不断增加,其成本和使用越来越受到人们的关注,轮胎的费用约占整个露天矿采费用 20%~30%。工程轮胎经常在路面不平坦且有尖锐碎石块、钉子和碎玻璃等环境下工作,受硬物冲击较大,轮胎胎面需具有较高的耐切割和耐磨损性能。93% 的工程轮胎失效是由于非正常磨损而引起的,其中大部分失效后的轮胎可通过胎面翻新使其使用寿命进一步延长<sup>[1-3]</sup>。近年来,我国工程轮胎翻新行业发展极其迅速,但是工程轮胎翻新质量参差不齐,关于工程翻新轮胎的理论研究相对较少,轮胎翻新并没有真正地与轮胎理论相结合。笔者设计了 26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎基本结构及施工要求,构建了由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型及胎侧层旋转圆环模型组成的工程翻新轮胎多元复合层型,并对其力学模型和细观静力学平衡方程进行了分析和探讨。

## 1 工程翻新轮胎结构设计

根据工程机械轮胎标准 GB/T1190—2009 以及工程机械翻新轮胎标 HG/T3979—2007,确定

26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎的技术参数为<sup>[4-6]</sup>:标准轮辋 22.00/3.0,充气外直径 1 750 mm,外直径 1 738 mm,充气后轮胎外直径膨胀率 1.007,充气断面宽 686 mm,断面宽 673 mm,行驶面宽度 565 mm,断面宽膨胀率 1.019,断面高 551.5 mm,行驶面高 27 mm,胎圈着合直径 635 mm,着合宽度 564 mm,断面水平轴位置 1.20;耐磨型花纹,花纹深度为 40 mm,冠部胎面胶厚度为 40 mm,中垫胶厚度为 2 mm,胎侧胶厚度为 5 mm;充气压力(单胎)800 kPa,最大负荷(单胎)19 600 kg,最高行驶速度 65 km/h。胎体层,角度为 90°,采用 1 层 0.20+18×0.18HT 钢丝帘布,安全倍数为 18;带束层采用 5 层结构:1 为过渡层,角度为 25°,钢丝密度为 4 根/cm;2~4 层为工作层,角度为 22°,钢丝密度为 5 根/cm;1~4 层采用 3+8×0.38HT 钢丝帘线;5 为保护层,角度为 23°,钢丝密度为 4 根/cm,采用 1×5×0.38HI 钢丝帘线,带束层安全倍数为 8;钢丝圈为  $\phi 2.0$  mm 钢丝,共 120 根六角形排列,结构形式为 8-9-10-11-12-13-12-11-10-9-8,安全倍数为 6。

## 2 工程翻新轮胎多元复合层型的构建

### 2.1 工程翻新轮胎多元复合层型的结构组成<sup>[7]</sup>

依据 26.5R25 全钢工程子午线翻新轮胎结构设计及施工设计要求,将胎面层、中垫胶层、带

收稿日期:2014-11-10;修订日期:2014-11-25

基金项目:黑龙江省科技攻关资助项目(GC08A208)

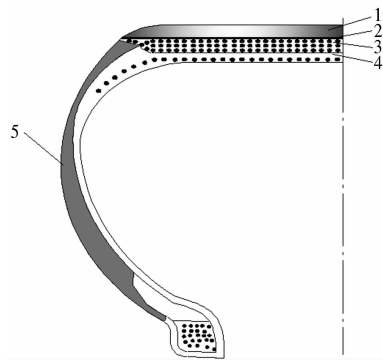
作者简介:王强(1981-),男,黑龙江哈尔滨人,东北林业大学博士研究生,主要从事车辆轮胎技术研究,E-mail:630702666@qq.com.

束层、胎体层及胎侧层视为不同材料组分的单元体,各层之间通过先胶合后硫化的方式粘合在一起,使工程翻新轮胎成为一个由多元材料构成的复合层型,其结构组成如图 1 所示.多元复合层型工程翻新轮胎的结构组成为:胎面层、中垫胶层及胎侧层视为由各项同性的一元橡胶材料构成,带束层和胎体层视为由各项异性的橡胶单元及钢丝帘线二元复合材料构成.

2.2 工程翻新轮胎多元复合层型的构建

胎面层、中垫胶层及胎侧层可视为橡胶各向同性材料,各层的抗拉强度、弹性模量和断裂伸长率等主要力学参数不同;带束层和胎体层由橡胶基体和钢丝帘线组成的正交各向异性复合材料,可视为“加强筋”模型<sup>[8]</sup>.如图 2 所示,工程翻新轮胎多元复合层型主要由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型、胎侧层薄壁圆环模型

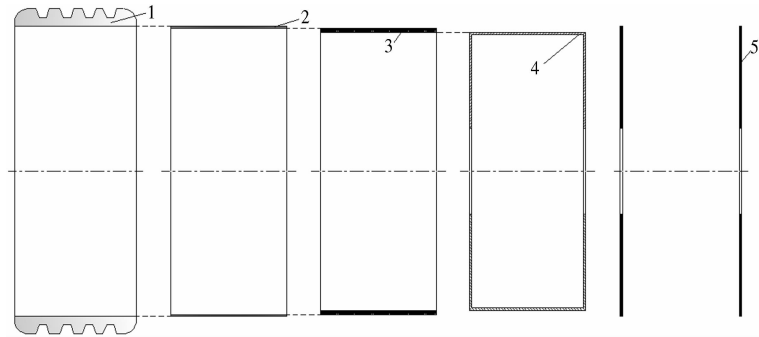
体模型及胎侧层旋转圆环模型构成,当轮胎承载时,各层分别会产生复杂的弹性变形,研究中将各层模型视为紧密的弹性过盈配合连接.



1—胎面层;2—中垫胶层;3—带束层;4—胎体层;5—胎侧层

图 1 多元复合层型的结构组成

Fig.1 Structure and composition of multiple composite layer type



1—胎面层厚壁圆筒模型;2—中垫胶层薄壁圆筒模型;3—带束层薄壁圆筒模型;4—胎体层薄壁壳体模型;5—胎侧层旋转圆环模型

图 2 工程翻新轮胎多元复合层型的构成

Fig.2 Constitute of engineering retreaded tire multiple composite layer type

3 工程翻新轮胎多元复合层型力学模型的构建

工程翻新轮胎多元复合层型的受力状况(如图 3 所示)与轮胎结构形式及尺寸、胎压、载荷和行驶速度等因素有关,其力的平衡条件为<sup>[9]</sup>

$$T - F \cdot e = 0;$$

$$F \sin \alpha - F_T = 0;$$

$$F \cos \alpha - W = 0.$$

式中: $T$ 为扭矩; $F$ 为合反力; $F_T$ 为驱动力; $W$ 为径向载荷; $e$ 为合反力偏心距.

轮胎的强度和刚度主要取决于每一元以及元与元之间所能承受而不致被破坏的最大应力,依据轮胎地面力学特性,笔者构建的工程翻新轮胎多元复合层型力学模型如图 4 所示.其中胎体层薄壁壳体模型内表面承受胎压  $p_1$ ,  $p$  和  $p'$ ,  $p_2$  和  $p'_2$ ,  $p_3$  和  $p'_3$ ,  $p_4$  和  $p'_4$  分别为胎体受力膨胀后,胎

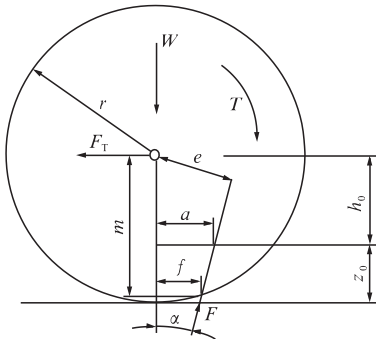


图 3 工程翻新轮胎地面受力状况

Fig.3 Ground force status of engineering retreaded tire

体层与胎侧层、胎体层与带束层、带束层与中垫胶层、中垫胶层与胎面层之间所形成的内在张力,这些张力的大小与各层的弹性模量、泊松比及剪切模量有关.在忽略轮胎弹性体变形产生的滞后能量损失情况下,工程翻新轮胎多元复合层型力学

模型还需要满足下列关系

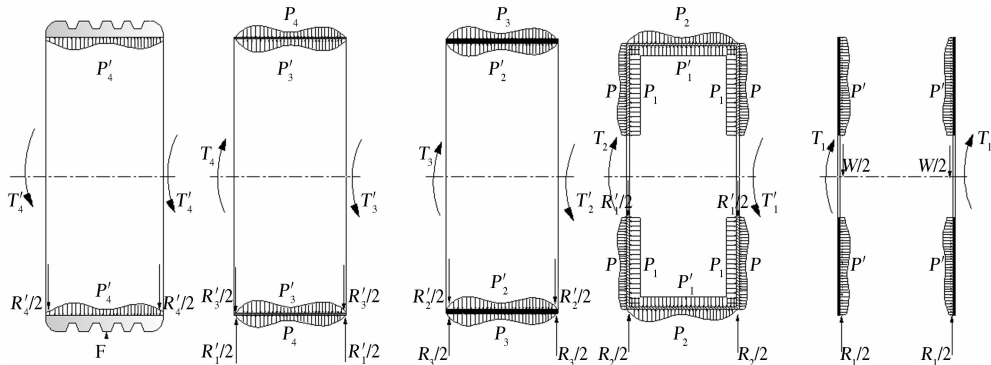
$F \cos \alpha = R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = W;$  (4)

$F \cdot e = T_4 = T_3 = T_2 = T_1;$  (5)

$R_1 = R'_1 R_2 = R'_2 R_3 = R'_3 R_4 = R'_4;$  (6)

$T_1 = T'_1 T_2 = T'_2 T_3 = T'_3 T_4 = T'_4.$  (7)

式中符号含义与公式(1)、(2)、(3)中符号含义相同.



(a) 胎面层力学模型 (b) 中垫胶层力学模型 (c) 带束层力学模型 (d) 胎体层力学模型 (e) 胎侧层力学模型

图 4 翻新轮胎多元复合层型力学模型

Fig. 4 Mechanical model of retread tires multiple composite layer type

4 工程翻新轮胎多元复合层型细观静力学平衡方程

工程翻新轮胎细观静力学模型如图 5 所示,变形与应力对称于轴线,即应力和应变只是坐标  $r$  的函数,与  $\theta$  无关,翻新轮胎各层在同一圆周上的点有相同的径向位移  $u$ ,且  $u$  是  $r$  的函数与  $\theta$  无关,翻新轮胎在各层内可视为轴对称问题,笔者采用极坐标描述其细观力学平衡方程<sup>[10]</sup>.

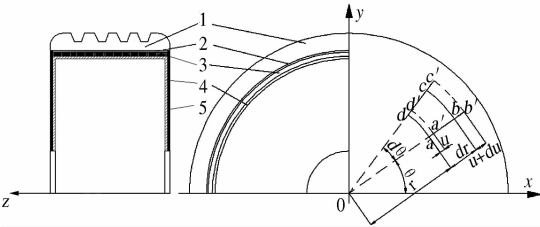


图 5 工程翻新轮胎多元复合层型细观静力学模型

Fig. 5 Meso static model of engineering retreaded tires multiple composite layer type

如图 5 所示,微元  $abcd$  变形后将位移到  $a'b'c'd'$ ,则径向应变为

$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}.$  (8)

圆弧  $ad$  变形后将位移到  $a'd'$ ,则周向应变为

$\varepsilon_\theta = \frac{a'd' - ad}{ad} = \frac{(r + u) d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r}.$  (9)

在平面应力情况下有

$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta);$  (10)

$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r);$  (11)

$\sigma_r = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta) = \frac{E}{1 - \mu^2}\left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r}\right);$  (12)

$\sigma_\theta = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r) = \frac{E}{1 - \mu^2}\left(\frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr}\right).$  (13)

在轴对称问题中,如不考虑体积力,平衡条件则化为

$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0;$  (14)

$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0.$  (15)

边界条件为  $r = a$  时,  $\sigma_r = -p_1$ ,  $r = b$  时,  $\sigma_r = -p_2$

$\sigma_r = \frac{a^2 p_1 - b^2 p_2}{b^2 - a^2} - \frac{(p_1 - p_2) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2};$  (16)

$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_1 - b^2 p_2}{b^2 - a^2} + \frac{(p_1 - p_2) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2}.$  (17)

式中:  $a$  为胎体层内侧半径;  $b$  为胎面层外侧半径;  $p_1$  为胎压;  $p_2 = \frac{W}{A}$  为接地压力,其中  $W$  为径向载荷,  $A$  为接地面积.

$\sigma_r = \frac{a^2 p_1 - b^2 W/A}{b^2 - a^2} - \frac{(p_1 - W/A) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2};$  (18)

$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_1 - b^2 W/A}{b^2 - a^2} + \frac{(p_1 - W/A) a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2};$  (19)

$z$  轴方向可视为平面应变问题,则有

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{2\mu(a^2 p_1 - b^2 W/A)}{b^2 - a^2}; \quad (20)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r) = \frac{(p_1 - W/A)a^2 b^2}{(b^2 - a^2)} \cdot \frac{1}{r^2}. \quad (21)$$

工程翻新轮胎在自由充气工况下,  $p_2 = 0$ , 则有

$$\sigma'_r = -\frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left( \frac{b^2}{r^2} - 1 \right); \quad (22)$$

$$\sigma'_\theta = \frac{p_1 a^2}{b^2 - a^2} \left( \frac{b^2}{r^2} + 1 \right); \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\mu}{E} & \frac{-\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\mu}{E} & \frac{-\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\mu)}{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

工程机械翻新轮胎带束层、胎体层属于正交各向异性材料,其应力-应变关系矩阵可描述为如公式(26)形式。

## 5 结论

笔者构建了由胎面层厚壁圆筒模型、中垫胶层薄壁圆筒模型、带束层薄壁圆筒模型、胎体层薄壁壳体模型及胎侧层旋转圆环模型组成的工程翻新轮胎多元复合层型,并对其力学模型和细观静力学平衡方程进行了分析和探讨,研究成果可为工程翻新轮胎的性能研究提供重要的理论参考,研究中所构建的模型忽略了翻新轮胎的部分细节结构,后续将进一步细化和完善工程翻新轮胎多元复合层型的构建。

## 参考文献:

- [1] 熊伟. 全钢载重子午线轮胎翻新的发展状况[J]. 轮胎工业, 2012, 32(7): 390-393.
- [2] 杨得兵. 大型工程机械轮胎预硫化翻新[J]. 轮胎工业, 2013, 33(6): 323-325.
- [3] 高孝恒. 提高工程机械轮胎翻新胎面胶质量的探讨[J]. 轮胎工业, 2005, 25(8): 451-455.

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{2\mu a^2 p_1}{b^2 - a^2}; \quad (24)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r) = \frac{p_1 a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2}. \quad (25)$$

工程翻新轮胎为非线性大变形结构,笔者利用线性正交各项同性及各项异性弹性理论近似的预测其刚度,胎面胶层、缓冲胶层及胎侧层属于各向同性材料,其应力-应变关系矩阵可描述为<sup>[11-12]</sup>:

- [4] 陈刚,杨文利,潘岱,等. 29.5R25 全钢工程机械子午线轮胎的研究与开发[J]. 轮胎工业, 2010, 30(5): 268-273.
- [5] 李仁国,张鹏,程刚,等. 14.00R20 20PR 全钢载重子午线轮胎的设计[J]. 橡胶科技, 2013(6): 342-344.
- [6] 焦世新,姜新民,袁燕,等. 10.00—20 18PR 矿山用载重斜交轮胎的设计[J]. 轮胎工业, 2013, 33(2): 90-93.
- [7] 齐晓杰,王强,于建国. 翻新载重子午线轮胎层合结构模型的构建[J]. 橡胶工业, 2011, 58(4): 231-236.
- [8] 辛振祥,邓涛,王伟. 现代轮胎结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 125-126.
- [9] 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 77-78.
- [10] 齐晓杰. 载重车辆翻新轮胎承载仿真及失效机理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010: 24-28.
- [11] 危银涛,李勇,冯希金,等. 轮胎理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 75-78.
- [12] 尚同羊,张苛,商涛涛,等. 橡胶沥青应力吸收层设计方法探讨[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(2): 40-44.

Construction of Multiple Composite Layer Type  
and Mechanical Model of Engineering Retreated Tire

WANG Qiang, QI Ying-jie

(Traffic College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** 26. 5R25 steel engineering meridian retreaded tire was regarded as study object, basic structure composition and dimension requirements of retreaded tires were analyzed and designed in order to lay the theoretical foundation for further improving use performance of engineering retreaded tires, engineering retreaded tire multiple composite layer type mainly composed of tread layer thick-wall cylinder model, medium cushion rubber layer thin-wall cylinder model, belt layer thin-wall cylinder model, carcass layer thin-wall shell model and tire side layer rotating ring model was constructed through theoretical analysis. Polar coordinate mode was adopted for analyzing and discussing construction of multiple composite layer mechanical model and meso-statics equilibrium equation based on ground mechanics theory. Stress-strain relation matrix of engineering retreated tire tread rubber layer, buffer rubber layer, tire side layer, belt layer and carcass layer was described.

**Key words:** engineering retreated tire; multiple composite layer type; mechanical model; meso-statics equilibrium equation; relationship matrix

(上接第 86 页)

[12] 叶光华,王忠伟,谭跃辉. SBS 聚合物改性沥青的  
比较特性研究[J]. 中南林学院学报,2002,22(1):78  
- 81.

[13] 张肖宁. 沥青及沥青混合料的粘弹力学[M]. 北京:  
人民交通出版社,2006.

[14] HEUKELOM W. A bitumen test date chart for showing  
the effect of temperature on the mechanical behavior of  
asphaltic bitumens[J]. Journal of the Institute of Pe-  
troleum,1969,55:404 - 417.

On the Effect of Testing Conditions on the Apparent Viscosity of SBS Modified Asphalt

XU Ou-ming<sup>1</sup>, HAN Sen<sup>2</sup>, NIU Dongyu<sup>1</sup>, LIU Yamin<sup>2</sup>

(1. Engineering Research Center of Transportation Materials of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710061, Chi-  
na; 2. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Education Ministry, Chang'an University, Xi'an 710064,  
China)

**Abstract:** Viscosity is an important property of asphalt, and has a close relationship with the construction tem-  
perature and workability of the asphalt mixtures. In order to evaluate the effect of testing conditions on the vis-  
cosity, the apparent viscosity of SBS modified asphalt under different times, different temperatures, and differ-  
ent shear rates is studied by using Brookfield viscometer. The results shows that the apparent viscosity of SBS  
modified asphalt is tending towards stability with time increasing gradually. The higher the temperature and the  
greater the shear rate, the shorter the time for viscosity stabilizing and the smaller the difference between the  
initial viscosity and stable viscosity. When the testing temperature exceeds 150 ℃, the variation of shear rate  
has little effect on the viscosity. The shear rate should be no less than 20RPM when the viscosity of SBS modi-  
fied asphalt is measured at different temperatures.

**Key words:** SBS modified asphalt; apparent viscosity; time; temperature; shear rate