

半钢子午线轮胎胎圈强度的设计方法研究

蔡莹莹,余本祎

[佳通轮胎(中国)研发中心,安徽 合肥 230601]

摘要:针对半钢子午线轮胎钢丝圈采用钢丝根排和单根钢丝缠绕两种结构形式,研究半钢子午线轮胎胎圈强度的计算公式。结果表明:钢丝圈为根排结构且标准充气压力大于 340 kPa 的半钢子午线轮胎,需修正钢丝圈安全倍数的计算公式,修正系数为 0.789;钢丝圈为根排结构且标准充气压力不大于 340 kPa 以及钢丝圈为单根钢丝缠绕结构的半钢子午线轮胎,不需要修正钢丝圈安全倍数的计算公式,利用公式可以实现半钢子午线轮胎胎圈水爆压力值的预测与计算,规避产品设计风险。

关键词:半钢子午线轮胎;胎圈强度;钢丝圈

中图分类号:TQ336.1⁺.1;U463.341⁺.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2015)10-0592-05

随着社会的发展,人们对轮胎负荷能力的要求不断提高。对于半钢子午线轮胎,尤其是适配 355.6 mm(14 英寸)以上轮辋的轮胎,其负荷能力和速度级别不断提高,同时客户更注重轮胎的安全性能。为了增强轮胎的性能,尤其是胎圈强度,防止胎圈断裂、钢丝圈断裂以及胎圈爆破等现象的发生,越来越多的轮胎产品开始使用单根钢丝缠绕的钢丝圈,而不是传统的根排结构钢丝圈。然而在两种钢丝圈缠绕结构并存的情况下,其理论强度与水压爆破实测情况差异较大,理论上看似满足要求的胎圈强度,轮胎产品在实际水压爆破试验中却无法通过,这引起了我们对胎圈强度计算公式的质疑。为此,我们对半钢子午线轮胎胎圈强度的设计方法进行了研究。

1 根排结构胎圈强度的计算

钢丝圈根排结构(见图 1)与单根钢丝缠绕结构最大的不同是缠绕方式不同而带来的材料接头量的差异,而接头量的差异从本质上引起胎圈部位的应力不同。根排结构的钢丝圈因存在大量的钢丝接头,易产生胎圈部位的应力集中。由于半钢子午线轮胎为无内胎轮胎,为保证轮胎的充气

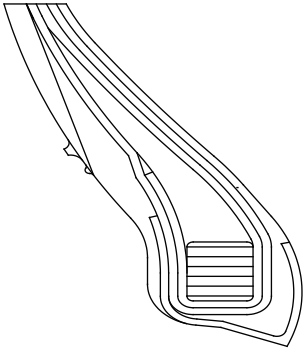


图 1 胎圈根排结构示意图

压力和气密性,轮胎与轮辋处于过盈配合状态,因此应同时考虑过盈应力。

1.1 钢丝圈安全倍数公式的推导

将钢丝圈对轮辋的过盈力记为 T_h ,那么钢丝圈在内压作用下所产生的应力(T_1)等于钢丝圈总应力(T_b)减去 T_h ,即:

$$T_1 = T_b - T_h \tag{1}$$

$$T_b = FN \tag{2}$$

式中, F 为单根钢丝张力, N 为根排因数,即排数与根数的乘积。

根据参考文献[1-2]可知, T_h 的经验公式及轮胎在标准充气压力下产生的钢丝圈应力(T_0)的计算公式分别为

$$T_h = \frac{E_1 b_c r_c \delta_H}{2h} \tag{3}$$

作者简介:蔡莹莹(1986—),女,安徽合肥人,佳通轮胎(中国)研发中心工程师,硕士,主要从事半钢子午线轮胎产品开发和结构设计工作。

$$T_0=\frac{10^3P_0(R_a^2-R_c^2)K_0}{2}\tag{4}$$

式中 E_1 ——钢丝圈底部材料的平均压缩模量
(一般为 30~50 MPa),MPa;
 b_c ——钢丝圈宽度,m;
 r_c ——钢丝圈中心半径,m;
 δ_H ——胎圈对轮辋的过盈量,m;
 h ——钢丝圈底部材料厚度,m;
 P_0 ——轮胎标准充气压力(即胎侧标示的
充气压力),kPa;
 R_a ——胎里半径,m;
 R_c ——轮胎零点半径,m;
 K_0 ——校正因数(对子午线轮胎 $K_0=$
0.95)。

δ_H 的计算公式为

$$\delta_H=d_r-d_t+2a(\tan\alpha_t-\tan\alpha_r)\tag{5}$$

式中 d_r ——轮辋标定直径,m;
 d_t ——轮辋着合直径,m;
 a ——轮辋边缘到胎圈中心的距离,m;
 α_t ——胎圈底部倾斜角,(°);
 α_r ——轮辋底部倾斜角,(°)。

由以上公式可以推导出钢丝圈安全倍数
(S)为

$$S=\frac{T_1}{T_0}=\frac{T_b-T_h}{T_0}=\frac{FN-E_1b_cr_c\delta_H/2h}{10^3P_0(R_a^2-R_c^2)K_0/2}\tag{6}$$

1.2 钢丝圈安全倍数计算实例

以半钢 SUV 系列产品 P265/75R16 114S 轮
胎为例计算钢丝圈安全倍数。已知数据和结构信
息如下:产品结构为 2P2S1JF(2 层聚酯帘布+2
层钢丝帘布+1 层锦纶帘布),钢丝圈排列方式为
6×6(排×根),单根钢丝直径为 0.95 mm, F 为
1 400 N,钢丝圈内周长(C)为 1.288 m, P_0 为 300
kPa; R_a 为 0.385 26 m, R_c 为 0.300 30 m; E_1 取
40 MPa, b_c 为 8.6×10^{-3} m, r_c 为 0.209 292 m, h
取 8×10^{-3} m; d_r 为 405.6×10^{-3} m(根据 GB/T
12939—2002《车辆轮辋规格系列》确定); d_t 为
0.404 2 m, α_t 为 7°, α_r 为 5°, a 为 8.25×10^{-3} m。

将已知数据带入上述公式进行计算得到:
 $T_0=8\,299.389\text{ N}$, $\delta_H=1.982\times10^{-3}\text{ m}$, $T_b=$

$8\,920.270\text{ N}$, $T_b=50\,400\text{ N}$, $T_1=41\,479.730\text{ N}$,
 $S=4.998\cong5.0$,即钢丝圈安全倍数约为 5.0。

1.3 试验验证

水压爆破试验是用清水作为试验介质,将轮
胎水压缓慢增大至轮胎爆破为止,并记录轮胎爆
破时压力测量值。轮胎水压爆破时产生的爆破压
力理论上即为钢丝圈在内压作用下所产生的应力
 T_1 (见公式 1)值。对于每条轮胎而言,轮胎的标
准充气压力(胎侧标示的压力值)是恒定不变的,
即水压爆破试验的意义等同于检验胎圈强度安全
倍数。因此,为验证上述公式的准确度,对 P265/
75R16 轮胎(2 条)进行了水压爆破试验,对比结
果见表 1。

表 1 P265/75R16 轮胎水压爆破试验
实测值与计算值对比

项 目	计算值	实测值 ¹⁾	
		轮胎 1	轮胎 2
钢丝圈安全倍数	5.00	5.00	5.33
爆破压力/kPa	1 499.38	1 500	1 600

注:1)轮胎损坏现象为胎圈折断。

从表 1 可以看出,公式计算值与试验实测值
很接近,上述公式可以作为预测和计算水爆压力
值的有效方法。假设爆破时的压力为 P_1 ,且对于
同一条轮胎的受力面积是相同的,则有

$$P_1=\frac{T_1}{10^3\times(R_a-R_c)\times(K_0/2)}$$

代入相关数据计算得 $P_1=1\,499.38\text{ kPa}$ 。通
过比较理论计算的 P_1 与水爆压力标准值(此规
格轮胎属 SUV 轮胎,水爆压力标准值为 1 200
kPa),可判定胎圈强度是合格的,计算结果与实
测结果相符。水爆压力与钢丝圈安全倍数关系的
明确化以及数据准确性的提升,有助于在前期轮
胎设计中降低设计风险,预知并计算出理论水爆
压力,规避设计风险。

2 单根钢丝缠绕结构胎圈强度的计算

为进一步验证上述公式的准确性、适用性及
不同钢丝圈结构(根排和单根钢丝缠绕结构)的
影响,对不同类别轮胎分别选取其代表规格产品

(每种规格各 2 条轮胎)进行水压爆破试验验证。表 2 示出了验证产品规格信息。表 3 和 4 分别示出了验证规格产品采用根排结构和单根钢丝缠绕结构钢丝圈时水爆压力实测值与计算值的对比。

从表 3 和 4 可以看出:对于钢丝圈为根排结构的轮胎,当充气压力大于340 kPa时(表3中的前 5 个规格),按公式(6)计算的理论水爆压力和钢丝圈安全倍数均大于实测值,且 K_1 的平均值为 0.789,而当充气压力不大于 340 kPa 时,实测值与计算值几乎相等;对于钢丝圈为单根钢丝缠

表 2 验证产品规格信息

类别	代号	规格
LT	A1	7.00R16 12PR LT 115/110N
LT	A2	6.50R16 10PR LT 107/102N
VAN	A3	LT245/75R16 10PR 120/116S
VAN	A4	235/65R16C 8PR LT 115/113R
VAN	A5	205/70R15C 8PR LT 106/104R
SUV	A6	205/70R15 100H XL
SUV	A7	P265/75R16 114S
UHP	A8	195/55R15 85V
UHP	A9	225/50ZR16 96W XL
UHP	A10	195/50R16 88V XL

表 3 验证规格产品采用根排结构钢丝圈时水爆压力实测值与计算值对比

代号	标准气压/ kPa	钢丝排列 方式	水爆压力实测值/kPa		实测安全倍数		最大水爆压力 计算值/kPa	计算安全 倍数	实测值与计算值之比(K_1)	
			轮胎 1	轮胎 2	轮胎 1	轮胎 2			轮胎 1	轮胎 2
A1	670	8×7	2 019	2 127	3.0	3.2	2 658	4.0	0.760	0.800
A2	560	7×6	1 721	1 903	3.1	3.4	2 629	4.7	0.655	0.724
A3	550	7×7	2 041	2 301	3.7	4.2	2 675	4.9	0.763	0.860
A4	475	6×6	2 043	2 090	4.3	4.4	2 570	5.4	0.795	0.813
A5	450	6×5	2 060	2 198	4.6	4.9	2 480	5.5	0.831	0.886
A6	340	5×5	1 782	1 744	5.2	5.1	1 845	5.4	0.966	0.945
A7	300	6×6	1 500	1 600	5.0	5.3	1 499	5.0	1.001	1.067
A8	300	4×5	2 030	2 112	6.8	7.0	2 150	7.2	0.944	0.982
A9	340	5×5	2 409	2 388	7.1	7.0	2 468	7.3	0.976	0.968
A10	340	4×5	2 429	2 375	7.1	7.0	2 370	7.0	1.025	1.002

表 4 验证规格产品采用单根钢丝缠绕结构钢丝圈时水爆压力实测值与计算值对比

代号	标准气压/ kPa	单根钢丝缠绕	水爆压力实测值/kPa		实测安全倍数		最大水爆压力 计算值/kPa	计算安全 倍数	K_1	
			轮胎 1	轮胎 2	轮胎 1	轮胎 2			轮胎 1	轮胎 2
A1	670	4+5+6+5+4	2 477	2 583	3.7	3.9	2 595	3.9	0.955	0.995
A2	560	3+4+5+4+3	2 072	2 067	3.7	3.7	2 338	4.2	0.886	0.884
A3	550	4+5+6+5+4	2 504	2 583	4.6	4.7	2 603	4.7	0.962	0.992
A4	475	3+4+5+4+3	2 755	2 708	5.8	5.7	2 751	5.8	1.001	0.984
A5	450	3+4+5+4	2 656	2 642	5.9	5.9	2 585	5.7	1.027	1.022
A6	340	4+5+4	2 134	2 128	6.3	6.3	1 861	5.5	1.147	1.143
A7	300	4+5+4+3	1 600	1 600	5.3	5.3	1 299	4.3	1.232	1.232

绕结构的轮胎,水爆压力实测值与计算值也是几乎相等, K_1 的平均值为 1.033。

由上述分析可知,对于钢丝圈为根排结构且标准充气压力大于 340 kPa 的轮胎,其钢丝圈安全倍数的计算不宜采用公式(6),应对其进行修正[见式(7)]。式中 K_1 取 0.789。

$$S=\frac{FN-E_1b_c r_c \delta_H/2h}{10^3 P_0 (R_a^2-R_c^2) K_0/2} \times K_1 \tag{7}$$

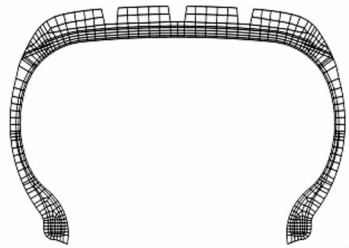
对于钢丝圈为根排结构且标准充气压力不大于 340 kPa 的轮胎以及钢丝圈为单根钢丝缠绕结

构的轮胎,其钢丝圈安全倍数仍可采用公式(6)进行计算,不需要进行修正。

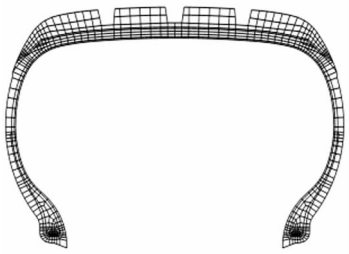
3 轮胎仿真模拟分析

基于上述理论计算与实际水压爆破试验的对比分析,为进一步论证上述理论计算的准确与适用性,运用轮胎有限元仿真软件和 Catia 绘图软件模拟分析钢丝圈采用根排结构和单根钢丝缠绕结构分布时轮胎的应力。

图2和3分别示出了轮胎二维和三维网格模



(a)根排结构



(b)单根钢丝缠绕结构

图 2 轮胎二维网格模型

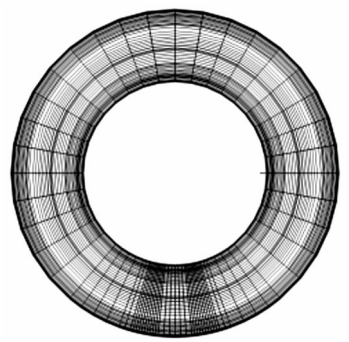


图 3 轮胎三维网格模型

型。图 4 示出了胎圈进行应力分析的各点。图 5 和 6 分别示出了钢丝圈采用根排结构和单缠结构的分析模型。有限元模拟分析结果显示上述公式和结论合理,即钢丝圈安全倍数修正公式是合理的;对于同一规格的轮胎,钢丝圈采用单根钢丝缠绕结构时胎圈强度大于采用根排结构;充气压力越大,胎圈钢丝的受力也越大,但两者关系是非线性的,随着充气压力的增大,胎圈和轮辋间过盈力的影响大幅降低,此时充气压力是影响胎圈和轮辋接触力的主要因素。

4 结语

钢丝圈采用根排结构的半钢子午线轮胎,在充气压力大于 340 kPa 时,根排结构的排列有大量的钢丝接头,会产生应力集中,钢丝圈安全倍数的计算公式不再适用,需要进行修正;充气压力不

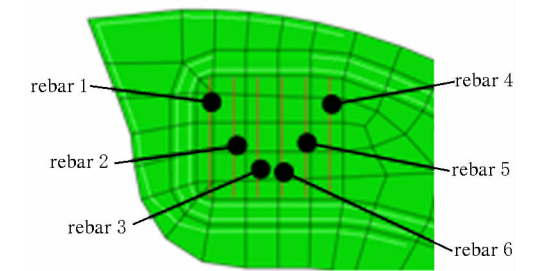


图 4 胎圈进行应力分析的各点

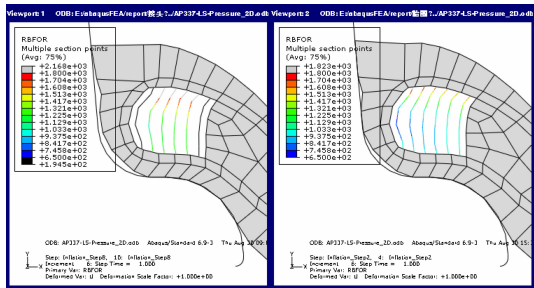


图 5 根排结构胎圈的分析模型

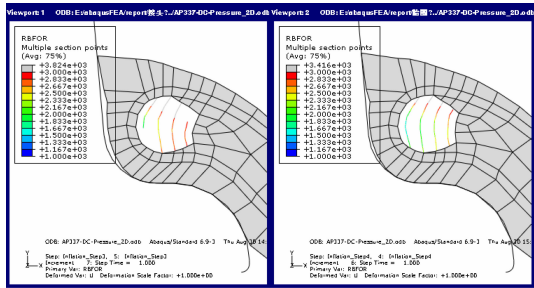


图 6 单缠结构胎圈的分析模型

大于 340 kPa 时,根排钢丝接头产生的压力较小,可以忽略不计,钢丝圈安全倍数计算公式适用,不需要进行修正。钢丝圈采用单根钢丝缠绕结构的半钢子午线轮胎,具有单根钢丝缠绕的优势,钢丝接头较少,不易产生应力集中的现象,钢丝圈安全倍数计算公式适用,不需要进行修正。利用钢丝圈安全倍数计算公式可以实现半钢子午线轮胎胎圈水爆压力值的预测与计算,提高胎圈强度设计的准确性和合理性,有效规避产品的设计风险。

参考文献:

[1] 俞洪,丁剑平,张安强,等. 子午线轮胎结构设计与制造技术 [M]. 北京:化学工业出版社,2006:141-152.
[2] 辛振祥. 现代轮胎结构设计 [M]. 北京:化学工业出版社, 2011.

Design Method for Bead Strength of Steel-belted Radial Tire

CAI Ying-ying, YU Ben-yi

(Giti Tire China R&D Center, Hefei 230601, China)

Abstract: The bead strength calculation formula of steel-belted radial tire was studied based on two types of bead core construction which were rectangle wire bead and single wire bead, respectively. The results showed that, for the steel-belted radial tire, when the bead construction was rectangle wire and at the same time the standard inflation pressure was bigger than 340 kPa, the formula needed to be corrected by a coefficient of 0.789. Otherwise the formula was correct. When the bead construction was a single wire bead, it would not need the correction, either. The water pressure burst value could be calculated by using the formula, which could reduce the product design risk.

Key words: steel-belted radial tire; bead intensity; bead core

BKT 在德国农业技术展上发布新轮胎

中图分类号:TQ336.1 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2015年8月19日报道:

Balkrishna 工业有限公司(BKT)将在2015年11月8—14日德国汉诺威举办的农业技术展上展示其新型农业轮胎并发布新规格。

发布的轮胎如下。

Ridemax IT 697 M+S(见图1):此款为用于拖拉机的冬季轮胎,可确保在冰雪地面上的所有操作具有完美的抓地力而无需防滑链。胎面花纹沟槽设计和特殊胶料可以确保拖拉机在非常艰难和危险的低温冰雪路面上完全稳定、舒适和最优操控性能下行驶。



图1 Ridemax IT 697 M+S 轮胎

Ridemax FL 693 M:这款农用挂车轮胎的新规格为600/55R26.5。BKT公司称,轮胎的自洁功能有利于降低滚动阻力,减少燃油消耗,是高承

载能力、主要道路使用的理想选择。

FL 630 Ultra:该轮胎用于播撒机、挂车和罐式卡车,新规格为710/50R26.5。据BKT称,由于其拥有大量的条形花纹块和加强胎圈,该多功能耐用轮胎是农田和道路混用的理想选择。

FL 630 Super:该轮胎的新规格为750/60R26.5。道路上具有稳定的驱动力和滚动阻力等品质非常令人称道,结构特性和胎面设计使该轮胎可在任何地形下多用途使用。

Agrimax Spargo:该系列轮胎用于喷撒机和作物中耕应用,新规格为VF 380/85R38。据BKT称,与相同规格的标准轮胎相比,Agrimax Spargo系列轮胎可在相同压力下承受更大的负载。

Agrimax Force:该四轮驱动的大功率拖拉机轮胎的新规格为IF 650/85R42。BKT称,Agrimax Force通过特殊理念的IF技术打造,与标准轮胎相比,该轮胎可在低压力下为用户持续提供高承载能力。

(孙斯文摘译 吴秀兰校)

国外简讯 1 则

△阿波罗轮胎有限公司公布截止6月30日其2015财年第1季度年净收入29亿卢比(以6月30日汇率换算为4560万美元),净销售额283亿卢比(4.45亿美元),收益对销售额比率为10.2%。

MTD(www.moderntiredealer.com),2015-08-11