

子午线航空轮胎圆形钢丝圈的应用选型

王超群

(黄埔轮胎(广州)技术有限公司, 广州 黄埔 510700)

摘要: 航空轮胎在飞机起飞和着陆过程中产生的巨大冲击载荷造成充气内压增大主要由钢丝圈承受, 提高航空轮胎胎圈的耐疲劳性和优化结构受力是子午线航空轮胎设计和研发的重要工作。采用圆形截面的钢丝圈相比较多边形钢丝圈, 在受力状态的应力变化方面有显著优势, 其生产应用日趋成熟。本文从圆形钢丝圈结构原理、应用、选型等方面逐一论述, 为优化产品结构, 提高产品质量奠定良好的理论基础。

关键词: 航空轮胎; 圆形钢丝圈; 应用; 选型

中图分类号: TQ330.66

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2026)03-0029-05

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.03.006

0 引言

随着国家对子午线航空轮胎“卡脖子”类科技攻关项目的研发越来越重视, 航空轮胎的结构设计日益精细, 正在逐步进入现代化设计阶段。目前, 计算机辅助设计 CAD 技术、ABAQUS 有限元分析技术被广泛应用, 但是国内航空轮胎结构设计仍主要通过反复验证试验方案, 在试验中获取最佳应用效果。

在国内, 航空轮胎研发和制造企业的技术力量、研发和设计水平与国外航空轮胎龙头企业的差距逐步缩小, 而建立一套航空轮胎结构设计的理论与研究方法, 是我国航空轮胎技术领域最迫切的任务。

在航空轮胎的结构设计中, 钢丝圈是承受载荷的主要构件, 其结构设计的应力分析也属于变形引起的几何非线性分析, 因此, 前期的设计理论研究更加重要。

1 子午线航空轮胎圆形钢丝圈的应用

目前, 轮胎使用的钢丝圈类型, 从成型后的截面形状可分为正六边形、斜六边形、斜七边形、矩形、圆形钢丝圈等。多边形钢丝圈成型工艺相对简单, 缠绕过程中单根钢丝覆胶后在缠绕盘设计沟槽中自下而上盘绕成型, 截面呈现不同的多边形形状。单根钢丝覆胶可增强整体力学性能, 根与根之间排列成线性结构, 但每层钢丝之间为分离状态, 钢丝圈应力变化集中, 多使用在汽车、工程机械车辆和斜交航空轮胎中。

1.1 圆形钢丝圈结构

圆形截面钢丝圈分为钢丝圈芯和外缠钢丝, 钢丝

圈芯稍粗, 对焊后呈圆柱环状。根据不同规格, 外缠钢丝分成多层, 第一层钢丝紧贴钢丝圈芯依次相邻排列, 直至该层排满。第二层缠绕与第一层的钢丝排布方向相反, 紧贴第一层钢丝圆周表面, 依次相邻排满完成第二层缠绕, 依此类推, 第三层、第四层等等^[1], 如图 1 所示。

1.2 圆形截面钢丝圈缠绕参数

钢丝圈缠绕参数的选取, 主要包括: 钢丝圈芯直径、外缠钢丝直径、缠绕导程数、缠绕层数、单层根数、缠绕角等, 其选取结果可形成圆形钢丝圈不同规格和不同钢丝排布规律。

圆形钢丝圈缠绕过程可表述为: 钢丝圈芯绕其轴线 OZ 在 XOY 平面内做圆周运动, 外缠钢丝沿钢丝圈芯轴向做往复曲线运动 (即在 XOZ 平面内环绕钢丝圈芯做圆周运动), 二者耦合而成螺旋运动。如图 2、图 3 所示。

在缠绕过程中, 钢丝圈芯在 XOY 平面内旋转 1 周, 外缠钢丝刚好在 XOZ 平面内完成 N 个导程的螺旋缠绕, 而外缠钢丝每缠绕 1 个导程, 钢丝旋转为 1 周多一点的角度, 完成 N 个导程后才能保证外缠钢丝尾部与该层钢丝头部相接。在一层缠绕完成后, 出现一个外缠钢丝首尾相连接点, 并安装铜套连接^[1]。

经过推算, 缠绕过程的缠绕参数关系式:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{N} \quad (1)$$

作者简介: 王超群 (1974-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事橡胶设备、结构研究技术方面的工作, 已发表论文 33 篇。

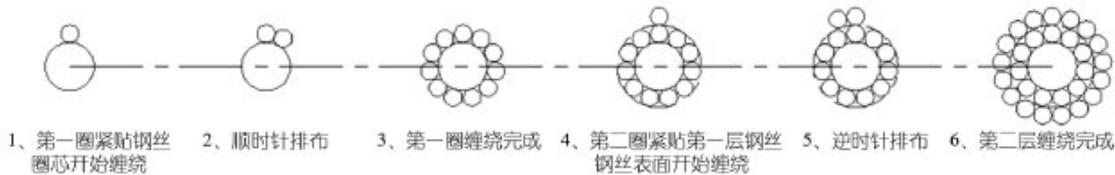


图1 圆形钢丝圈排布形式示意图

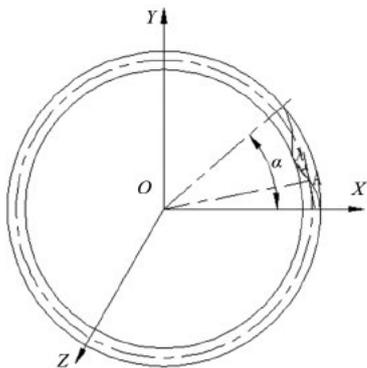


图2 完成一个导程缠绕, 钢丝圈芯旋转角度 α

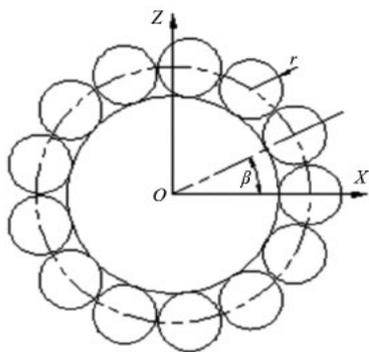


图3 完成第1层缠绕, 钢丝排布示意图, β 为相邻钢丝截面角度

$$\theta = 360^\circ + \frac{360^\circ}{M \cdot N} \quad (2)$$

α —外缠钢丝缠绕1个导程, 钢丝圈芯旋转的角度;

N —该层钢丝缠绕导程数;

θ —外缠钢丝缠绕1个导程, 钢丝绕钢丝圈芯轴向旋转的角度;

M —该层缠完后截面内缠绕钢丝根数。

公式(1)、(2)是圆形钢丝圈缠绕机参数方程。要成型如图3所示的第一层外缠钢丝, 导程设定 $N=6$ (导程设定数值越大, 钢丝应力增大且不均匀; 导程数偏小, 力学性能越好, 但导程过小会导致钢丝之间呈分离状态, 航空轮胎圆形钢丝圈一般取值5~8), 图中 $M=13$, 即可得出 α 和 θ 值。根据以上参数, 设定好缠绕方向, 圆形钢丝圈缠绕机可缠绕出如图3所示

的第一层外缠钢丝, 并能够自动裁切、接头。第二层、第三层以此类推。

1.3 圆形钢丝圈力学性能

圆形钢丝圈受力形式主要表现为拉应力, 且70%以上载荷来自充气压力, 尤其在航空轮胎着陆过程中, 冲击载荷使轮胎产生30%~50%的变形, 轮胎内压强增大, 钢丝圈承受拉应力成倍增加。

采用有限元分析方法可以充分验证, 圆形钢丝圈截面内应力分布呈同心圆环状, 从内层钢丝圈芯向最外层钢丝应力分布逐渐增大, 且受力最大部位在胎圈与轮辋接触处。但与六角形钢丝圈受力性能相比, 圆形钢丝圈及其底部胶料应力变化率小于六角形钢丝圈, 无明显应力集中点, 结构受力更趋优化^[2]。

2 圆形钢丝圈选型

目前, 国家还没有圆形钢丝圈标准, GB/T 14450—2016《胎圈用钢丝》规定了汽车胎圈用回火钢丝的分类代号、尺寸、外形、重量、订货内容、试验方法、检验规则等。本文引用德国奥托·库尔曼汽车系统零部件有限公司生产的部分常用规格的圆形截面钢丝圈, 如表1所示。

表1 部分常用规格圆形钢丝圈

序号	规格	最小理论破断力 KN	直径 mm
1	1×5+(13+19+25)×1.5	196.95	14.00
2	1×3+(7+13+20)×2	239.34	15.00
3	1×5+(10+16+22)×2	290.36	17.00
4	1×6+(11+17+23)×2	311.50	18.00
5	1×6+(11+17+23)×2.2	375.00	19.20
6	1×5+(11+17+23+29)×1.8	393.26	19.40
7	1×5+(10+16+22+28)×2	459.20	21.00
8	1×6+(11+17+23+30)×2	492.40	22.00
9	1×5+(10+16+22+28)×2.2	554.45	22.60
10	1×5+(11+17+23+29+35)×1.8	564.41	23.00
11	1×5+(13+19+25+31+37+41)×1.5	570.17	23.00
12	1×6+(11+17+23+29+35)×2	697.42	26.00

2.1 圆形钢丝圈芯、钢丝选材

钢丝圈芯、外缠钢丝都选用高强度优质碳素结构钢, 高温回火处理。钢丝表面镀低锡青铜或高锡青铜, 镀层厚度控制在 0.12 ± 0.07 mm, 出厂规定直径1

mm 钢丝与胶粘合力不小于 685 N。钢丝圈芯要求具有良好的焊接性能和抗腐蚀性能,特选用 C9D 优质碳素结构钢,碳含量约为 0.09%,抗拉强度在 590~610 MPa,伸长率在 11.8%~13.6%;外缠钢丝特选用 C82D,碳含量约为 0.82%,抗拉强度在 2 050~2 500 MPa,伸长率在 6.0%~6.7%。

采用特选材质钢丝圈芯和外缠钢丝,提高了钢丝圈的强度和抗疲劳特性,并且还具有很高的屈强比,对于优化轮胎结构设计具有重要意义。

2.2 圆形钢丝圈设计选型

参照《橡胶工业手册》第四分册(轮胎)有关航空轮胎章节,对于子午线航空轮胎,目前采用静态安全倍数的设计方法,其强力安全倍数选取不低于 5 倍^[3]。手册中计算钢丝圈受力公式中,轮胎横截面的内轮廓面积没有明确是充气后的断面面积,也没有明确两胎趾之间的距离是装配专用轮辋后的轮胎胎趾之间的距离,现有的计算过程只能按照未充气的轮胎断面轮廓图中相关数据计算,造成数据误差,对钢丝圈选型形成偏差。

图 4 中,具有圆形钢丝圈 1 的子午线航空轮胎,安装至 TRA 规定专用轮辋 2 后,充气至额定气压,轮胎外形轮廓由 K 变成 K' ,轮胎断面轮廓高度和宽度增加,分别由 D 变为 D' 、 B 变为 B' 。子午线航空轮胎胎体层、胎体束带加强层通常包括任何合适的帘线,例如尼龙 66 帘线或芳香族聚酰胺和尼龙帘线的复合结构帘线。轮胎充气后,根据所用骨架材料的不同,断面宽度膨胀率为 1%~10% 的范围,外轮廓直径膨胀率为 0%~7.5% 的范围。图 4 中区域 A' 所示的面积为充气增大后的轮胎轴向截面面积,图示显示出 1/4 区域。轮胎断面区域面积增长率为 8%~15%,较汽车用子午线轮胎大。

子午线航空轮胎的圆形钢丝圈强度计算,下面采用一种静态承载安全的新算法,更接近于静态承载的实际情况。以轮胎的薄膜-网络理论为基础,考虑到实际充气过程中的断面变形,断面轮廓面积增加以膨胀率平均值 12% 作为计算依据。如图 4 所示,整个子午线航空轮胎及其装配轮辋的轴向截面中,分析钢丝圈 1 (四处中的一处)所受拉力情况,有以下关系式:

$$T_g = P_0 \times (S_A' + S_C) = P_0 \times (K_{\text{截面}} S_A + S_C) \quad (3)$$

$K_{\text{截面}}$ —充气轮胎轴向截面面积增大系数,取值 8%~15%;

T_g —钢丝圈拉力, N;

S_A' —轮胎充气后截面面积的一半, m^2 ;

S_A —轮胎未充气截面面积的一半, m^2 ;

S_C —轮辋直径与胎趾宽度轴向截面面积的 1/4 m^2 。

上式中 P_0 为已知, S_A 、 S_C 的值为图 4 中标准断面尺寸及标准轮辋尺寸通过相关制图设计软件工具分别求出,即可得到 T_g 值,该方法快捷、简便,易于操作。

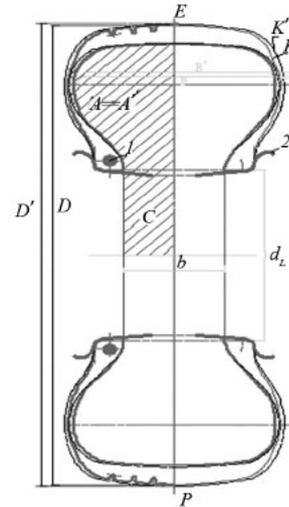


图 4 子午线航空轮胎截面图

$$P_D = S_x \cdot \sigma_x + \Sigma F_d \cdot \sigma_b \quad (4)$$

P_D —钢丝圈名义破断拉力, N;

S_x —钢丝圈芯横截面面积, mm^2 ;

σ_x —钢丝圈芯的名义抗拉强度,这里取值 600 MPa;

F_d —外缠钢丝横截面钢丝面积之和, mm^2 ;

σ_b —外缠钢丝的名义抗拉强度,这里取值 2 100 MPa。

$$5 \leq N_s = \frac{P_D}{T_g} \leq 6.5 \quad (5)$$

N_s —静态安全倍数。

静态安全倍数给予上限限制是基于选型重量减轻的钢丝圈的原因。公式(4)中 P_D 取值为理论值,实际圆形钢丝圈的断裂载荷受多种因素影响。根据公式(4)计算出来的断裂载荷通常要比表 1 中最低限度的理论断裂载荷大 0%~12%,其中包括如下影响因素:

(1) 圆形钢丝圈的外缠钢丝在空间呈螺旋轨迹,各层钢丝层间形成空间网状结构,径向力传递在同层间以挤压形式传递,相邻层间钢丝作用力以空间网格形式传递。相同材料钢丝圈,缠绕导程直接影响钢丝圈力学性能,导程数越大钢丝圈应力分布越不均匀且应力分布较高,导程越小(捻距越大)钢丝圈力学性

能越好。图 2 中, 钢丝在 A 点缠绕方向投影到钢丝圈芯中心面与此处钢丝圈芯中轴线切线夹角 λ 由导程数决定, 导程数越大, 夹角 λ 越大, 钢丝受力不均匀, 影响到整个钢丝圈的破断力。

(2) 公式 (4) 中钢丝圈芯名义抗拉强度 σ_x 、外缠钢丝的名义抗拉强度 σ_b , 厂商供货均值分别达到 610 MPa、2 200 MPa 以上, 这里的取值偏小, 对计算结果有一定影响。

(3) 钢丝圈芯承受总破断力一般不超过 5%, 其接头采用现行对焊工艺, 接头拉伸强度性能下降 10% 左右; 各层钢丝都有一个铜套接头, 虽然对钢丝圈整体性能影响很小, 但制造工艺决定其客观存在着性能影响。

(4) 圆形钢丝圈外缠钢丝表面镀锡青铜在轮胎硫化过程中加强了与橡胶材料的黏合, 从硫化后的产品来看, 橡胶材料已经渗入次外层甚至更深, 在一定程度上优化了钢丝圈整体力学性能。

静态安全倍数设计只采用内压张力计算圆形钢丝圈强度, 航空轮胎在使用过程中不仅受内压, 还包括扭矩产生的张力和高速状态下的离心力, 这是属于动态承载安全倍数的范畴。用 N_D 代表子午线航空轮胎圆形钢丝圈动态承载安全倍数, 对于重载和条件苛刻的 (转矩大) 的汽车轮胎, 钢丝圈设计动态承载安全倍数大于 2.3^[6]。航空轮胎在此方面还没有文献论述, 还需要我们持续探讨。

$$N_D = \frac{P_D}{T_z} \quad (6)$$

N_D — 动态承载安全倍数

P_D — 航空轮胎以实际负荷充气内压、扭转力矩、离心力产生的综合力

因为圆形钢丝圈复杂的结构特性, 要想精确定钢丝圈的破断力, 需要在特制的钢丝圈破断试验机上进行测试, 这只是采取涨伸方法的单一测试。在国内, 多数圆形钢丝圈生产厂家都是单根钢丝进行破断力理论计算, 还有厂家改制工装, 在 60T 以上的双向拉伸试验机上进行测试, 数据误差较大。对圆形钢丝圈特制破断设备, 国内暂没有相关报道。目前, 钢丝圈破断力的计算还是使用静态安全承载倍数。

为保证钢丝圈供货达到性能要求, 在提供钢丝圈采购标准时, 可规定同一采购批次产品强度变化范围不能超过 200 MPa, 同时规定最低抗拉强度: 钢丝圈芯抗拉强度不小于 600 MPa, 外圈钢丝不小于 2 100

MPa; 两种钢丝材质断裂总延伸率不小于 5%, 屈强比应大于 85%^[4]。

2.3 选型验证

以设计某规格军用子午线航空轮胎所用钢丝圈为例, 安装至按照 TRA 规定专用轮辋后, 充气至 882 kPa 额定气压, 轮胎外形轮廓由 K 变成 K' , 轮胎径向向外径 1 200 mm 到 1 235 mm, 径向膨胀率 2.91%, 处于轮廓直径膨胀率 0%~7.5% 的范围; 轴向膨胀由 450 mm 变为 475 mm, 轴向膨胀率 5.55%, 处于断面宽度膨胀率 1%~10% 的范围, 断面轮廓面积增大 13.87%, 图 4 中区域 A' 所示的面积为充气增大后的轮胎轴向截面面积, 图中示出 1/4 区域, 处于断面轮胎区域面积增长率为 8%~15% 的范围。

经成型硫化后的该规格轮胎的子午线航空轮胎所用圆形钢丝圈, 钢丝圈所受拉力, 利用公式 (3) 计算得:

$$T_g = P_0 \times (S_A' + S_C)$$

$S_A' + S_C$ 利用 CAD 制图软件求出面积为 0.0 824 m², $P_0 = 882$ kPa, 代入公式得: $T_g = 72.68$ kN 利用公式 (5), 得出钢丝圈破断力不小于 363.4 kN, 由表 1 初选钢丝圈型号为序号 5 的钢丝圈 $1 \times 6 \times (11 + 17 + 23) \times 2.2$, 最小理论破断力 375 kN, 将钢丝圈相关参数代入公式 (4) 验证, 得理论破断力 404.49 kN, 满足设计需求。

经过设计选型的钢丝圈, 试制子午线航空轮胎, 按照航空轮胎 GBT9747—2008《航空轮胎试验方法》和 GBJ108B—98《军用航空轮胎试验方法》, 经过如下试验验证^[6]:

(1) 水压爆破试验

抽取 5 条航空轮胎, 使用爆破试验机进行水压爆破试验, 验证是否满足爆破压力大于 4 倍标准内压的性能要求。实测爆破压力 4 230~4 650 kPa 不等, 达到标准内压 882 kPa 的 4.8~5.3 倍, 满足设计要求。爆破部位都是胎肩, 钢丝圈完好无损, 钢丝圈强度满足设计要求。

(2) 耐久试验

使用耐久性能试验机, 模拟航空轮胎滑行、耐久试验, 实验数据全部达标, 钢丝圈无变形、损坏, 钢丝圈性能满足设计要求。

(3) 动态模拟试验

动态模拟试验方法包括: 95 次正常滑行—起飞、5 次超载滑行—起飞、95 次正常着陆—滑行、5 次超载着陆—滑行试验; 5 次野战机场滑行—起飞、5

次野战机场着陆—滑行试验；1次2.0倍超载高速起飞试验等。

试制航空轮胎采用 TestingService GmbH（德国亚琛测试服务有限公司）动态模拟试验机进行模拟轮胎在跑道上的各种操作情况。

3 结语

目前，高性能子午线航空轮胎已普遍采用圆形截面钢丝圈。在国内，只有如山东胜通钢帘线有限公司、山东大业股份有限公司等寥寥数家能够生产圆形钢丝圈。哈尔滨工大宏图橡塑科技有限公司与哈工大联合开发圆形钢丝圈生产设备，可生产各种规格尺寸圆形钢丝圈，供应国内航空轮胎生产、研制企业。

圆形截面钢丝圈高抗拉强度、无受力集中特性，对优化子午线航空轮胎的结构受力、减轻了轮胎重量具有关键性的作用。但圆形钢丝圈结构受力分析还需要持续研究和探索，尤其在动态承载的情况下，研究探索空间仍然很大。

在国内，随着航空轮胎关键项目的逐步突破，批量化生产航空轮胎急需配套圆形钢丝圈大量供应，带来生产圆形钢丝圈专用设备的应用需求，同时为参与此方面技术攻关的设备供应厂家提供了研发、制造、供应平台。

参考文献：

- [1] 刘旭峰. 航空轮胎圆形截面钢丝圈缠绕结构设计及仿真 [J]. 哈尔滨工业大学工学硕士学位论文, 10-19.
- [2] 赵延林. 全钢载重子午线轮胎六角形钢丝圈与圆形钢丝圈结构性能对比 [J]. 轮胎工业. 2015(1):25-28.
- [3] 梁守智, 等. 橡胶工业手册, 第四分册 (轮胎) [M]. 北京, 化学工业出版社, 1989:300.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 胎圈用钢丝: GB/T 14450-2016[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2016:3-5.
- [5] 刘伯忠, 李德新, 唐海龙等. 轮胎钢丝圈动态承载安全倍数研究 [J]. 轮胎工业. 2019(1):699-700.
- [6] 齐立平, 周士峰, 王超群, 等. 子午线航空轮胎成型工艺 [P]. 中国: CN202010558934.2, 2020-09-18.

Application and selection of circular bead wire rings for radial aircraft tires

Wang Chaoqun

(Huangpu Tire (Guangzhou) Technology Co. LTD., Huangpu 510700, Guangzhou, China)

Abstract: Aircraft tires endure significant impact loads during takeoff and landing, increasing inflation pressure that is primarily borne by bead wires. Thus, enhancing aircraft tire bead fatigue resistance and optimizing structural stress distribution are crucial for radial aircraft tire design and development. Compared with polygonal bead wires, those with a circular cross-section have significant advantages in stress variation under load, and their production and application are increasingly mature. This paper explores the structural principles, application scenarios, and selection methods of circular bead wires, laying a solid theoretical foundation for product structure optimization and quality improvement.

Key words: aviation tire; circular bead wire; application; selection

(R-03)

《橡塑技术与装备》投稿邮箱: crte@chinarpte.com

欢迎投稿, 欢迎订阅, 欢迎惠登广告