

子午线航空轮胎缠绕带束层结构设计

王超群¹, 齐立平²

(1. 黄埔轮胎(广州)技术有限公司, 广州 黄埔 510700;
2. 青岛双星轮胎工业有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要: 带束层是子午线航空轮胎的主要受力骨架材料, 航空轮胎的多种性能与带束层密切相关, 如高速性能、滑移操控性能、安全性能、滚动阻力等。缠绕带束层工艺方法较层贴带束层具有结构设计优越性, 在子午线航空轮胎结构设计中是新型运用形式。本文从缠绕带束层选材、生产工艺、结构设计、强度计算等方面进行论述, 为子午线航空轮胎缠绕带束层结构设计提供技术理论支持。

关键词: 缠绕带束层; 生产工艺; 结构设计; 强度计算

引用论文: 王超群, 齐立平. 子午线航空轮胎缠绕带束层结构设计 [J]. 橡塑技术与装备, 2026, 52(4):35-43.

中图分类号: TQ330.46

文章编号: 1009-797X(2026)04-0035-09

文献标识码: B

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2026.04.008

0 概述

子午线航空轮胎带束层承载由内压引起的初始应力值约占 60%~70%, 是航空轮胎的主要受力部件。在航空轮胎由斜交系列更新换代为子午线系列过程中, 带束层的设计运用, 是一个划时代的变革, 带来了结构设计受力的优化完善和整体材料分布更趋合理, 同时, 结合 ABAQUS 等有限元分析软件的应用, 提供了子午线航空轮胎多样化的结构轮廓设计。

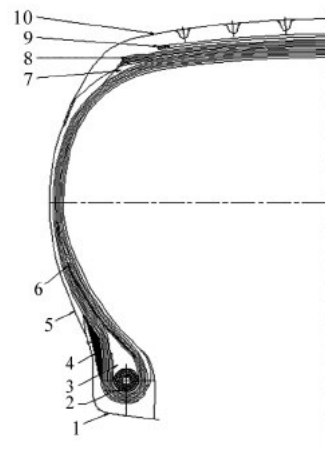
根据轮胎最佳滚动轮廓理论 (RCOT), 带束层帘线承载的内压应力在整个宽度范围内并不均等, 呈现出中间部位最大、边部位置最小, 且与轮胎中心面对称分布等特点。为防止航空轮胎径向伸张过大, 带束层要有足够的刚性, 还要具有优越的高速性能、与橡胶良好的黏合性能以及耐疲劳特性。带束层设计是子午线航空轮胎结构设计的核心, 包括带束层选材、箍紧系数、带束层结构、带束层强度计算等方面的内容。

1 缠绕带束层的性能要求

常见的载重或轿车子午线轮胎带束层采用多层钢丝帘线, 或者钢丝帘线、尼龙帘线、芳纶帘线中的一种或多种帘线交错层贴而成。早期的子午线航空轮胎带束层多采用尼龙、芳纶等一种或多种混合纤维帘布层贴工艺方法, 近些年来, 在国内通常采用一种新型的缠绕带束层结构形式, 其合理的部件承受应力分布曲线、突出的耐高速安全性能, 较层贴法带束层具有不可比拟的优越性。经过试验验证, 采用缠绕编织带

束层取代普通层贴式带束层结构, 在耐久性能、高速性能方面提升 14% 以上^[1]。

缠绕带束层结构分布如图 1, 位于胎体帘线上部、防刺扎保护层下方。



1—耐磨胶; 2—圆形钢丝圈; 3—三角胶芯; 4—填充胶;
5—胎侧胶; 6—胎体帘线; 7—肩垫胶; 8—缠绕带束层;
9—被纹保护层; 10—胎面胶

图 1 缠绕带束层结构分布图

子午线航空轮胎缠绕带束层与载重、轿车子午线轮胎层贴式带束层同样主要承载轮胎周向应力, 为了加强带束层对轮胎的紧箍作用, 充气外缘尺寸膨胀值

作者简介: 王超群 (1974—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事橡胶设备、结构研发技术工作, 已发表论文 33 篇。

与带束层骨架材料有直接关系，对帘线的性能要求如下^[1]：

(1) 带束层紧固轮胎胎体，承载较大的拉伸周向应力，因此带束层帘线必须具有高强度、高模量、定伸变形小特性。

(2) 多层结构的带束层与橡胶的黏合水平会直接影响到子午线航空轮胎的使用性能和寿命，因此带束层帘线与橡胶的黏合性能要好。

(3) 子午线航空轮胎的带束层周期性地承受拉伸、弯曲、剪切等变形，带束层帘线必须具有良好的耐疲劳性能。

2 缠绕带束层的生产工艺

子午线航空轮胎使用上述综合性能优越的纤维帘线作带束层骨架材料，由5~10根帘线经整齐排列，挤出法覆胶生产出宽度8~14 mm的带束条，再由成型机上配套专用自动缠绕装置单条多圈“Z”形缠绕形成环形网状带束层组合件。

2.1 带束条挤出工艺

带束条挤出法生产工艺主要包括线辊锭子架安装、整形工位排线、销钉机筒冷喂料挤出机胶料挤出、机头内排线板/口型板覆胶、冷却/牵引、存储、卷取等工艺控制过程。

挤出法获得带束条的工艺流程如图2所示。

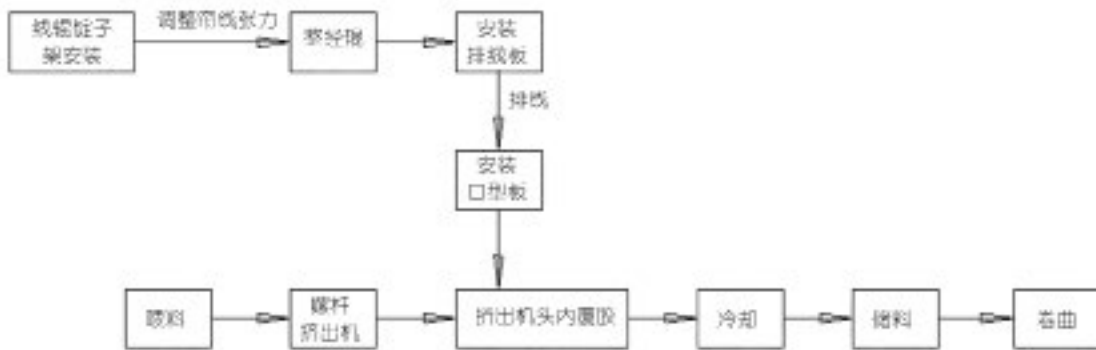


图2 带束条挤出工艺流程

2.2 带束条缠绕工艺

带束条缠绕由航空轮胎成型机上专用自动缠绕装置完成：自动缠绕装置包括储料机构、张力调节机构、缠绕头进给机构、缠绕头平移机构、干层辊压料机构等。进给机构将缠绕头平移机构、干层辊压料机构推向带束鼓鼓面并压紧带束条；平移机构驱动缠绕头沿带束鼓轴方向左右平移。自动缠绕装置利用缠绕头左右平移和带束鼓顺时针匀速旋转的组合轨迹来完成“Z”形缠绕效果，在带束条缠绕左右端部换向过程中，平移驱动机构通过改变速度大小来控制拐弯弧度和高度，保证每1组（2个工作层）缠绕拐弯平稳过渡，外观平整，尽量减小带束层端部重叠现象，更好地优化带束层承载应力分布^[2]。

子午线航空轮胎带束层连续缠绕成型方法，是将一条8~14 mm宽的挤出法获得的覆胶带束条，沿顺时针旋转带束鼓周向、并按一定的缠绕角度的连续缠绕过程。当缠绕带束条缠绕至带束层左右端部时，平移机构转向折返，端部形成弧状缠绕轨迹；当缠绕带束条在此部位缠绕下一圈时，带束条与上圈缠绕的带束

条平行排列并紧密贴靠，遇到上一圈折返的带束条时，跨过上一圈折返带束条直至带束层端部后再折返，从而完成“Z”形缠绕效果。这种没有接头的带束条连续缠绕成型的多层带束层组合件，骨架材料圆周分布均匀、避免了层贴法带束层帘线端头与胶料之间剥离的产生，能提高航空轮胎带束层的稳定性、高速性、耐疲劳性^[3]。

带束条缠绕的工艺流程如图3所示。

带束层结构具有通过在带束鼓周向上螺旋状缠绕拉伸强度为450 N/根或更大的非伸长且高弹性的纤维帘线形成的螺旋缠绕层。缠绕层组数为2~7组不等，1组缠绕周期有2层，共计4~14层。缠绕带束层转换缠绕周期（组）时，采用轮胎轴向截面径向向外递减宽度或明级差/暗级差相结合的方法，即相邻组的宽度各不相同，具有特定的缠绕中心线对称级差。缠绕组之间以半重叠的缠绕方式组合在一起，其帘线角度与轮胎周向成5°~25°不等，多组叠加形成整体环形网状带束层组合件^[4]。缠绕过程中带束条排布如图4所示。

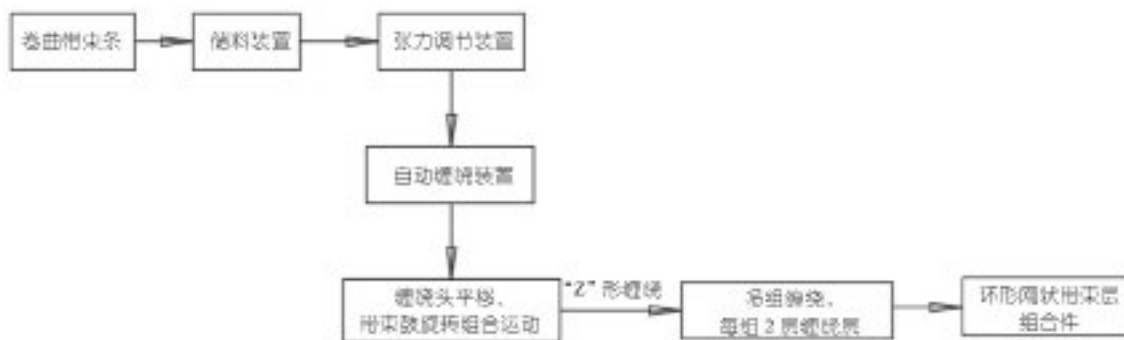


图3 带束条缠绕工艺流程

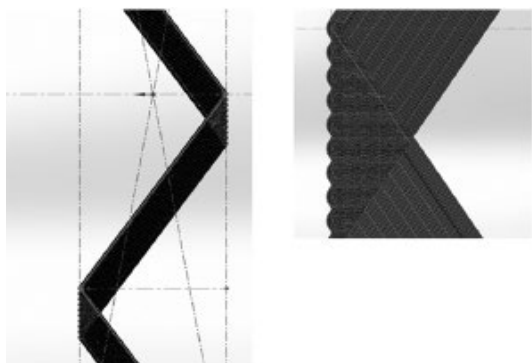


图4 带束条鼓上缠绕展开及局部放大图

单条多圈“Z”形复杂曲线缠绕形成的环形网状带束层结构对胎体、胎冠部具有紧箍作用，有效解决了胎体膨胀的问题，可大大降低航空轮胎胎冠部的离心力，能满足航空轮胎高负荷、超高速的性能要求^[4]。

3 缠绕带束层的结构设计

3.1 缠绕带束层的主要参数

缠绕带束层的结构设计参数包括帘线材料、角度、密度、缠绕方式、层数等多方面，其结构设计优劣直接影响航空轮胎的耐磨、安全、高速等使用性能。

2.3 缠绕带束层工艺性能

带束层成型方法包括带束层小角度裁断铺贴技术、近似零度缠绕的螺旋带束条缠绕技术以及带束条与赤道平面成一定周向角度的“Z”形缠绕技术，以及以上缠绕技术中的一种或数种方式组合，是采用不同层间排列方式、不同材料、异层不等宽等多种铺贴、缠绕方式形成的圆形筒状带束层组合件。传统的航空轮胎胎体带束层成型方法是将一定角度的全宽度帘布沿轮胎周向包裹到胎体层上，每块带束层之间形成搭接，搭接接头控制不到位会影响轮胎的静平衡。新型带束层成型方法是将挤出法生产的带束条沿轮胎周向并于轮胎中心面呈一定角度螺旋缠绕到胎体层上，缠绕式无接头带束条组成整体环形网状结构带束层，安全强度显著提升。

与压延法裁割而成的带束条相比，新型挤出法生产的带束条几乎没有接头，覆胶率更均匀，没有漏线问题。经缠绕所制成的航空轮胎，相关物理性能测试结果表明，帘布层间以及与其他胶部件黏着强度更高，结合更加紧密。经激光无损检测，未发现微小气泡，从而解决了缠绕带束层密实性不足、高速行驶条件下航空轮胎肩部 and 冠部生热脱层的问题。

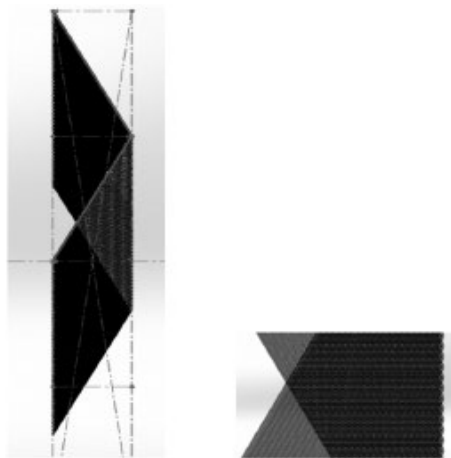


图5 带束条缠绕示意图

将缠绕带束鼓鼓面展开，带束条中心线代表带束条，带束条的宽度 d 可表示为两平行相邻带束条中心线间距。将带束条描述成 1 条直线，缠绕平移 1 个往复、鼓旋转 1 周后的简化效果如下：同时，在缠绕过程中，带束鼓匀速顺时针旋转，缠绕 1 周后的实际跨距 S 比鼓周长 L 有一正增量 Δ ，且 S 刚好是增量 Δ 的偶数倍，才能保证鼓面上的带束条较上 1 周此处的带束条向前推进 Δ 增量，从而确保带束条顺次、并排缠绕下去，并最终完成 1 组（2 个工作层）带束条层间交叉并完

全铺满带束鼓鼓面的缠绕工作，缠绕过程如图 5 所示。依次类推，再进行第 2 组、第 3 组、第 4 组等带束条缠绕^[5]。

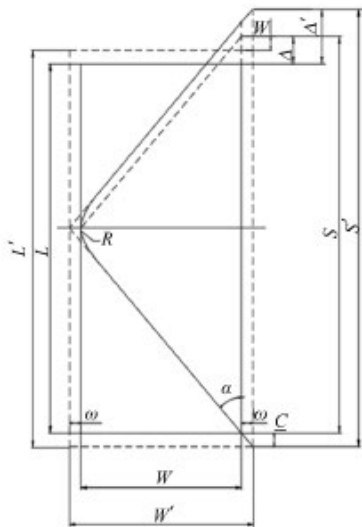


图 6 带束条缠绕原理分析图

带束条在带束鼓上旋转 1 周，平移缠绕进行 1 个往复：

$$\operatorname{tg} \alpha_{01} = 2W/S \quad (1)$$

带束条在带束鼓上旋转 1 周，平移缠绕进行 2 个往复：

$$\operatorname{tg} \alpha_{02} = 4W/S \quad (2)$$

α_{01} 、 α_{02} —带束条的缠绕角度，°；

W —带束条缠绕宽度，mm；

S —缠绕 1 周带束条跨距，mm。

缠绕 1 周跨距正增量：

L —速束鼓周长，mm；

$$\Delta = S - L \quad (3)$$

Δ —缠绕 1 周跨距正增量 mm。

我们分析 1 周一个往复情况由：

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = 2W / (L + \Delta) \quad (4)$$

$$\Delta = d / \sin \alpha_0 \quad (5)$$

(4)、(5) 式中 W 、 L 、 d 已知，可求出 Δ 、 α_0 值。

在实际缠绕过程中，缠绕角度 α_0 不变，平移缠绕头拐角处理成圆弧状，缠绕宽度放大为虚拟宽度 W' ，相应 S 放大为 S' ，如图 6 所示。

实际缠绕过程缠绕角度不变，由式 (4) $\operatorname{tg} \alpha_0 = 2W / (L + \Delta)$ ，由式 (3) 推出 $S' = L + \Delta'$ ，由 $n' = S' / \Delta$ ，取小于 n' 的偶数，初步确定 n 值。

$$n = S' / \Delta' \quad (6)$$

式中：

Δ' —实际缠绕 1 周跨距增量 mm；

n —缠绕时带束鼓旋转圈数，取偶数。

由 (5)、(6) 式，得出 Δ' ，由上式可以推导出：

$$S' = \frac{nL}{n-1} \quad (7)$$

$$W' = \frac{nL \operatorname{tg} \alpha_0}{2(n-1)} \quad (8)$$

设 $\omega = \frac{W' - W}{2}$ ，且缠绕头拐弯过程速度大小不变，方向改变，可推导出：

$$R = \frac{\omega \cos \alpha_0}{1 - \cos \alpha_0} \quad (9)$$

R —缠绕过程拐角处圆弧半径；

ω —虚拟缠绕宽度与实际缠绕宽度差值的二等分值。

进一步确定 S' 、 W' 、 ω 、 R 等值。

子午线航空轮胎的带束层“Z”形缠绕过程中带束鼓相关参数鼓周长 L 已经选取固定，从 (7) 式可以看出，实际跨距 S' 与缠绕时完成一个缠绕周期 (1 周一往复) 带束鼓旋转圈数 n (取偶数值) 直接相关，随着 n 的增加，跨距 S' 略有减小，而 n 的取值与带束条宽度 d 和缠绕角度 α_0 相关，缠绕角度相对固定，带束条宽度被限制在一定范围，对于全系列子午线航空轮胎带束层缠绕参数， n 的取值在 50~200 的范围内。

从 (8) 式可以看出，实际虚拟缠绕宽度 W' 与缠绕时完成一个缠绕周期 (1 周一往复) 带束鼓旋转圈数 n (取偶数值) 直接相关，随着 n 的增加，缠绕宽度 W' 略有减小；同时缠绕宽度 W' 和缠绕角度 α_0 的正切值正相关，随着缠绕角度减小，缠绕宽度 W' 减小。

从 (9) 式可以看出，实际缠绕过程中拐角处圆弧半径 R 与缠绕时虚拟宽度与完成缠绕的实际宽度差的二等分值成正比例关系，且随着缠绕角度 α_0 的增大而减小。缠绕过程中缠绕角度相对固定，实际缠绕过程中拐角处圆弧半径 R 也在一定的取值范围内，通常使用 R/d 的值进行选取，一般取值范围在 10~18 之间，圆弧半径过大，在“Z”形缠绕拐弯处重叠过大，厚度增加，形成应力集中风险；而圆弧半径太小，带束条转弯过急，带束条形成翘边，同样存在带束层脱层隐患，造成航空轮胎肩部耐久性降低的风险。

3.2 缠绕带束层的材料选择及性能分析

子午线航空轮胎的带束层选用尼龙帘线、芳纶 / 尼龙复合帘线、芳纶帘线、聚酯帘线等材料。尼龙 66 拉伸强度、张力模数明显偏低；芳纶纤维具有高模量、

高断裂强度、低热收缩、低延伸率、低密度、比强度高、耐高温等优异性能，但芳纶纤维具有明显缺陷就是抗压缩变形差，抗扭转性能差，不耐加捻。捻度越大，强度损失越大，不适合直接用在航空轮胎如胎体变形特别大的部位。另外，由于芳纶存在表面化学惰性和形成氢键的能力极低的问题，芳纶和橡胶黏合性能需要大大提高。目前，国内芳纶供货厂家通常采用二浴浸渍方法，结合橡胶配方性能的改善，芳纶用作带束层的骨架材料成为子午线航空轮胎研制厂家的普遍技术工艺。

芳纶/尼龙复合帘线，是一种耐疲劳性能优异并可以改善渗胶性能的带束层帘线，采用较细的单丝直径，可以保证在覆胶量不变的前提下，使带束条挤出厚度更薄，胶料用量更省，满足航空轮胎轻量化设计要求。复合帘线的经线由对位芳纶初捻丝与尼龙复捻丝混捻而成，前者的线密度大于后者的线密度，差异性线密度搭配，具有加捻效果，比单一材料更好的综合性能。芳纶/尼龙复合帘线表面摩擦系数大，与橡胶黏合性能良好，是子午线航空轮胎骨架材料的重要选材。

聚酯纤维在各方面表现优异，适合作为子午线航空轮胎带束层骨架材料。聚酯纤维帘线目前国内处于试制验证阶段，相关试验数据还不够完善，没有形成批量化生产，但其优越的综合性能是替代芳纶用于带束层的理想骨架材料。

子午线航空轮胎制造工艺流程中，先有胶部件、骨架材料组合完成成型工艺过程、再到轮胎硫化工艺过程，带束层作为一个整体组合件结构，其膨胀分为两个阶段：一是由成型胎坯装到模具内硫化过程中，带束层由于受到硫化介质的压力向外膨胀，轮胎轴向截面中的胎冠、胎肩部在厚度方向存在径向向外挤压，此时处于轮胎轴向截面中的胎冠、胎肩部中的带束层趋于向外膨胀，称之为“硫化膨胀”，受硫化模具限制，其膨胀率较小；二是，硫化后外胎装配专用轮辋充气、到达额定气压，整体带束层又一次膨胀，称之为“充气膨胀”，其膨胀率相对大一些，其最后膨胀后轮胎最大外表面直径不得大于该规格产品技术要求说明书相关要求。硫化后的轮胎要安装至专用轮辋充气进行外缘尺寸的测试，对于不同规格、不同带束层结构的子午线航空轮胎，其外缘尺寸的膨胀主要取决于带束层的膨胀率，其膨胀率的大小直接和缠绕材料、缠绕方式相关。

子午线航空轮胎采用带束层成型方式之一是全部采用铺贴技术完成，帘线结构是尼龙帘线或芳纶/尼龙复合帘线等，帘线覆胶后裁断成 $12^{\circ}\sim 18^{\circ}$ 小角度帘布，采用搭接、周向、分层铺贴在成型机二段带束鼓上，帘线方向与带束鼓周向夹角为 $12^{\circ}\sim 18^{\circ}$ ，交叉、中心对称铺贴，两层为一组，带束层采用一组以上，或3~4组帘布铺贴完成，限于重量考虑，铺贴组数为7组及以下，两组间相邻帘布中的帘线方向同样采用交叉方式铺贴，各组宽度存在差级。出模冷却后的轮胎安装至专用轮辋，充气至额定气压，其轮胎外缘径向膨胀率、带束层胎冠点半径径向膨胀率等变化处于第一等级，等级数值最高，范围在4%~8%的范围。

子午线航空轮胎采用带束层缠绕方式之二，是采用“Z”形缠绕方式的为主带束层，帘线结构是尼龙或芳纶/尼龙复合帘线或聚酯帘线，如芳纶1500D2+尼龙66/1890D1帘线。采用单根线覆胶并且数根并排，即帘线采用挤出法获得的覆胶带束条，挤出宽度8~14mm，缠绕角度 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 螺旋形不间断“Z”形多圈、多层不等宽地缠绕在成型机二段带束鼓上，形成环形筒状带束层组合件。如图7所示为一根带束条沿着带束鼓周向“Z”形缠绕的示意图。出模冷却后的轮胎安装至专用轮辋，充气至额定气压，其轮胎外缘径向膨胀率、带束层胎冠点半径径向膨胀率等变化处于第二等级，等级数值居中，范围在1%~5%的范围。

子午线航空轮胎采用带束层的缠绕方式之三，是采用螺旋形（俗称平铺缠绕或零度缠绕）缠绕方式为主带束层，帘线结构是芳纶或聚酯帘线，如芳纶1500D/1×4帘线。当螺旋带束层由多层组成时，带束条从一个宽度边缘（但不限于边部，可以为边部到带束鼓中心线之间的某一点开始缠绕），沿带束鼓的宽度方向到达对称边缘时折回，开始下一层卷绕在其径向外层周向鼓面上，如此反复，形成多层堆叠。每层螺旋缠绕层可以设计成不同宽度，最终形成多层带束层结构的环形筒状组合件。出模冷却后的轮胎安装至专用轮辋，充气至额定气压，其轮胎外缘径向膨胀率、带束层胎冠点半径径向膨胀率等变化处于第三等级，等级数值最小，范围在0%~1%的范围。

优化子午线航空轮胎的带束层的层间结构，根据带束层层间受力特性，带束层应力主要来源于内压和外部载荷，其中内压是主要因素，在分层受力分析中，径向方向受力最大的是贴近于胎体帘布的带束层，径向方向向外逐层减少，选用尼龙帘线、芳纶/尼龙复

合帘线、芳纶帘线、聚酯帘线等材料时，高强度、高模量的带束层骨架材料放在内层；强度较低、高耐疲劳的带束层骨架材料放在外层，外层帘线断裂伸长率、耐疲劳特性比内层组低，同时采用带束层缠绕角度的变化来很好地解决了带束层层间受力不均匀问题。

3.3 缠绕带束层的宽度确定及性能分析

子午线航空轮胎的带束层宽度设计暂无相关国内标准可以借鉴，可参照汽车子午线轮胎带束层相关参数进行选取，设计时重点关注航空轮胎高速性能磨肩问题、带束层脱空现象。带束层最宽宽度与行驶面宽度之比取值范围为 0.94~1.05。缠绕带束层在端部存

在拐点重叠现象、造成每组带束层两侧端部不同程度地隆起，隆起高度和缠绕带束条端部拐弯圆弧段半径有关，半径越大，重叠程度越大，隆起高度越高，此部位是带束条缠绕重点控制的工艺环节，每组带束层端部控制隆起高度范围在 1~3 mm，隆起宽度范围在 6~12 mm。因此，在设计每组带束层宽度时，相邻组差级为 15~30 mm，最上面带束层可设计缠绕带束层组，也可设计 1~2 层层贴带束层过渡，宽度为最宽带束层的 50% 以上，图 7 是几种常见的带束层缠绕宽度设计形式。

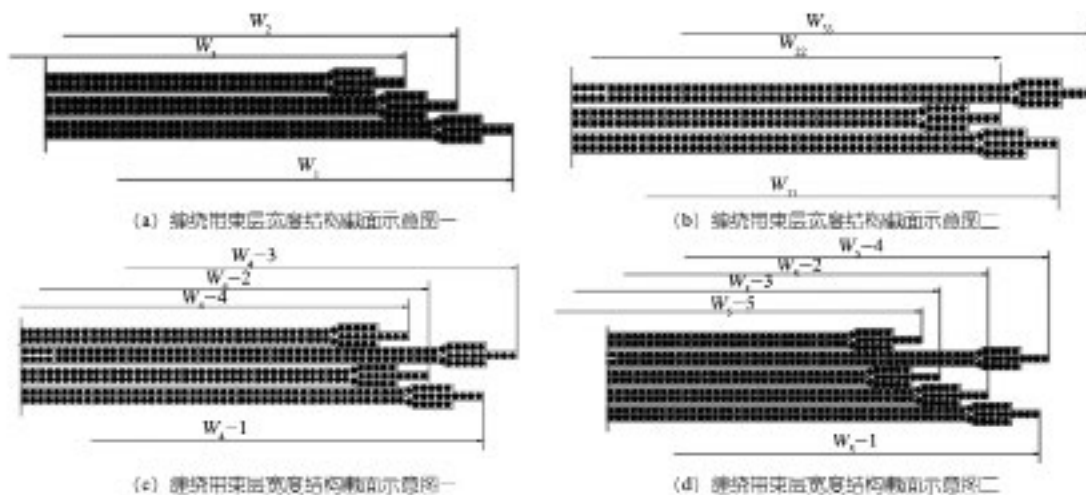


图 7 缠绕带束层宽度结构截面示意图

经过相关试验仿真计算验证，在一定范围内，带束层宽度的增加，子午线航空轮胎径向刚性、纵向刚性、横向刚性、扭转刚性均随着宽度的增加，呈上升趋势。航空轮胎的径向刚性直接影响到飞机起落架降落缓冲性能、摆振稳定性能；侧向刚性直接影响机轮动态侧偏特性，对高速滑跑飞机的操纵稳定性有较大影响。

3.4 缠绕带束层的角度确定及性能分析

子午线航空轮胎带束层膨胀率的定义为：

$$P_{LT} = (r - r_0) / r_0 \quad (10)$$

r_0 和 r 分别为带束层胎冠点膨胀前后的半径。

因子午线航空轮胎带束层结构复杂，缠绕方式变化多端，缠绕材料多种多样，在分析子午线航空轮胎带束层膨胀的过程中，缠绕带束条的缠绕角度直接影响到带束层对胎体的箍紧作用。缠绕角度 α_k （与轮胎周向方向夹角）过大（例如大于 23° ），带束层对于胎

体的箍紧作用变得较差，因为子午线航空轮胎在充气膨胀过程中，带束层的周向强度是由每层每根带束层帘线周向应力分力大小决定的，缠绕角度偏大，周向分力是单根帘线的受力与 $\cos \alpha_k$ 的乘积，显然带束条缠绕角度大的轮胎比缠绕角度小的轮胎在承受相同内压、载荷的条件下，其径向膨胀大。相反，对于缠绕带束条进行螺旋缠绕（或称零度缠绕，与周向夹角接近于 0° ）的情况，轮胎的内压膨胀周向应力同样由每根缠绕帘线承受，缠绕帘线受力在侧向受力接近于零，近似等于周向方向帘线受到的应力，这种缠绕方式对轮胎胎体的箍紧作用更强，这样我们称之为“零膨胀”轮胎。较大的缠绕角度带束层，会带来膨胀过程中帘线与胶料的黏合体系产生较大的应力变化，造成带束层强度减小的问题。但是，接近于零度缠绕的带束层会带来成型困难，在缠绕带束条逐层连续缠绕过程中，缠绕条与缠绕条之间由于没有交叉、带束条覆胶偏少

等情况,会出现一定的间隙量,这种情况尤其在定型滚压过程中,容易将带束条挤压散开,在轮胎胎肩部位更是极易出现,造成子午线航空轮胎的肩空、肩部脱层等致命危害。

缠绕带束层帘线角度的取值,既要考虑到带束层承受大部分周向应力,对胎体的箍紧作用,又要考虑下层胎体和上层防刺扎保护层的层间应力过渡。经论证,对已经确定子午线航空轮胎缠绕带束层宽度的,在选定直径的带束鼓上缠绕,其带束层缠绕角度 α_k 可以通过计算获得。通常通过将宽度 d 的带束条以周期性曲线沿周向“Z”字形缠绕至半径为 R 的成型机带束鼓面上,带束鼓呈圆柱形或中间稍粗、两端稍细、纵切面呈弧形的铺设表面,一个缠绕周期完成一个完整的工作双层。带束鼓圆柱形或弧形铺设表面具有与轮胎旋转轴线重合的回转轴。在完成一组缠绕双层的完整周期内,通过缠绕周期数量为 N 的周期性曲线的周长 S 达到数量为 T 的缠绕圈数而完成工作双层缠绕。可以这样理解:带束条在带束鼓完成旋转圈数 T 的螺旋缠绕(半径为 R 的圆柱形铺设表面的周长 $2\pi R$)与完成同样缠绕量而采用的“Z”字形缠绕(缠绕周期数量为 N 的周期性曲线的周长 S),两者的带束条缠绕长度相同,即:

$$N \cdot S = T \cdot 2\pi R. \quad (11)$$

在通常缠绕过程中,“Z”形缠绕主要是指带束鼓在一定方向上旋转,同时带束条缠绕装置夹持带束条在带束鼓上左右往复摆动完成整个“Z”字形缠绕过程,完成整个工作双层即形成一个圆形筒状、带束层交织排列网状结构。带束条缠绕头夹持带束条完成一个左右往复时,此时带束鼓旋转最大旋转不超过 2.2 周,最小不小于 0.45 周,即 $1/0.45 < N/T < 1/2.2$,化简为:

$$0.45 < N/T < 2.2 \quad (12)$$

当带束鼓旋转半周,带束条缠绕头夹持带束条完成一个左右往复时,我们认为 $N/T \approx 2$;当带束鼓旋转一周,带束条缠绕头夹持带束条完成一个左右往复时,我们认为 $N/T \approx 1$;当带束鼓旋转一周半,带束条缠绕头夹持带束条完成一个左右往复时,我们认为 $N/T \approx 2/3$;当带束鼓旋转两周,带束条缠绕头夹持带束条完成一个左右往复时,我们认为 $N/T \approx 1/2$ 。

上述各项的“ \approx ”符号是基于考虑如下几个方面:

(1) 在子午线航空轮胎缠绕过程中,每根带束条在经过带束层轴向缠绕端部时,并不是想象的那样有缠绕头夹持带束条直接折返方向继续缠绕,而是因为

带束条具备一定的宽度 d ,在端部不能直接折返,而是按照相关要求形成一定的弧形折返,这样本工作层带束条缠绕宽度相比较虚拟理论缠绕宽度变小。

(2) 随着缠绕层数径向向上增加,在带束鼓鼓面上带束层缠绕直径也略微增大。

(3) 这里主要还有周向方向的缠绕递进的问题,即在轮胎周向方向上,每个工作层有宽度 d 的带束条并置组成,两个连续的带束条在周向方向上并置意味着在同样的轴向位置(比如右端部),带束条在本次缠绕处于特定的位置,而在下一个缠绕周期在同样的轴向位置,缠绕位置要比本次缠绕位置在周向方向递进 $d/\sin\alpha_k$ 的长度,如此反复,才能进行 1 个缠绕工作双层进而完成一组缠绕周期的完整的缠绕过程。

图 8 为带束条 1 在一个周期的展开图。带束条 1 以周期性曲线 2 沿周向“Z”形缠绕。带束条 1 铺设在周长为 $2\pi R$ 的圆柱形表面 3 上,周期性曲线 2 的周期 S 等于周长 $2\pi R$ 的倍数(取值范围为大于 0.45,小于 2.2,优先取值为 2, 1.5, 1.0, 0.5 等)加上或减去 $d/\sin\alpha$ (图中为加),其中 $d/\sin\alpha$ 为在周向方向 XX' 上投影的带束条 1 的宽度。在展开的鼓缠绕平面内,每个工作双层由宽度 d 的带束条部分周向并置组成,其中 d 为垂直于带束条中线测得的带束条的宽度,并且角度 α 为由条带 1 的中线在鼓展开平面 (XY) 中与周向方向 (XX') 形成的角度。展开图中,工作双层的宽度等于 L ,缠绕振幅为 C ,其中 $L=C+d$ 。

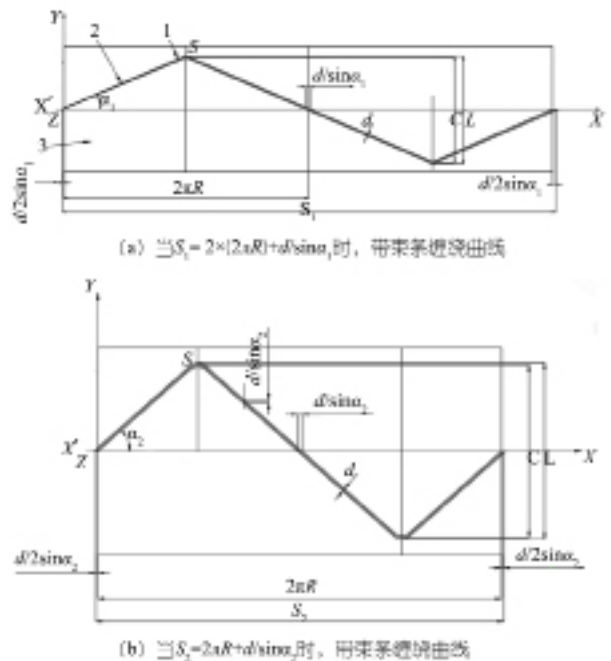


图 8 带束层缠绕曲线图

带束条的周向缠绕角度为 α_n ，缠绕周期 S 最小近似为 0.5 个旋转鼓周长，最大近似为 2 个旋转鼓周长，且缠绕周期 S 越大，缠绕角度越小。缠绕周期小于 0.45 个鼓旋转周长时，缠绕角度 α 变大，这对于子午线航空轮胎使用性能是不利的，缠绕周期大于 2.2 个鼓旋转周长时，缠绕角度 α 过小，缠绕过程实现存在较大困难。常用的缠绕角度为：4~25°，且有相应变化：对子午线航空轮胎来说，最常用的两组缠绕方式为：带束层缠绕角度在旋转带束鼓 2 个圆周上，缠绕头平移 1 个往复，其缠绕带束层角度为 4~8°；在旋转带束鼓 1 个圆周上，缠绕头平移 1 个往复，其缠绕带束层角度为 10~15°，这与不同规格航空轮胎带束层周长 L 、缠绕增量 Δ 、带束层缠绕宽度 W 等参数有关系。

缠绕周期 S 设置为近似 2 个旋转鼓周长： $4^\circ < \alpha_1 < 8^\circ$ ；

缠绕周期 S 设置为近似 1 个旋转鼓周长： $10^\circ < \alpha_2 < 15^\circ$ 。

带束层结构可分为至少 2 个工作双层，至多 7 个工作双层。从径向方向由里向外每组缠绕双层有且只有一个周向缠绕角度，分别为： α_1 、 α_2 、…… α_7 ，通常存在如下关系：即随着缠绕带束层径向向外增加，缠绕角度采用相同缠绕周期设置 S 或减小缠绕周期 S 进行设置。主带束层中至少有 1 组的缠绕双层的缠绕角度小于副带束层中的至少 1 组工作双层的缠绕角度，且每组缠绕双层缠绕角度 α_n ： $4^\circ < \alpha_n < 15^\circ$ 。

在多组缠绕带束层设计过程中，第一缠绕组也可设计成较大缠绕周向角度，以便与胎体层保持较好的层间应力过渡，逐层向上的缠绕带束层周向角度相同或者逐渐变小，最上层缠绕组可以设计成螺旋缠绕方式，增加周向箍紧作用，降低带束层周向膨胀，以便与上层防刺扎保护层和胎面保持良好的层间应力过渡，减少航空轮胎高速度、高负荷旋转过程中甩胎面风险。

经过相关试验仿真计算验证，在一定范围内，带束层周向角度的增加，子午线航空轮胎径向刚性、纵向刚性随着角度的增加，呈下降趋势，而横向刚性、扭转刚性随角度的增加，呈上升趋势。

对于同规格航空轮胎，在一定范围内，带束层周向角度的增加，带束层的箍紧作用变小，在充气过程中，航空轮胎外直径较带束层周向角度小的航空轮胎径向变形大，径向膨胀率变大，而横向伸张变小，横向膨胀率变小；同时，带束层周向角度的增加，轮胎下沉量变大，同样负荷下，带束层安全倍数减小。

对于缠绕周向角度偏大的缠绕带束层，其侧向刚度变大，这对于一些没有特别强调转弯特性的飞机主轮胎是不利的。

3.5 缠绕带束层的帘线线径和密度确定及性能分析

缠绕带束层设计既要考虑确保航空轮胎足够的强度安全倍数，又需考虑带束层之间、带束层与胎体层之间等部位具有 50% 及以上的含胶量，保证足够黏合力。

缠绕带束层是通过挤出带束条进行缠绕的方法获取，带束条线密度根据挤出过程中的帘线排布数量、线径和间距、口型板尺寸和覆胶量确定，同时要考虑帘线的强度以及带束层所受应力。通常在缠绕带束层帘线线径的选取过程中，本着保证帘线强度安全倍数达标的基本原则，线径过大，带束条覆胶占比下降，带束层缠绕端部易出现应力集中，较小线径又不能保证带束层强度达标，所以缠绕带束层所有帘线材料线径一般在 0.75~1.25 mm 范围。

一般而言，为保证工艺执行效率：缠绕第 1 组（过渡层）与第 2、3 组（工作层）的帘线采用相同密度挤出带束条；或还有 1~3 组工作层，帘线采用相同密度或更换帘线材料后使用较低密度的挤出带束条缠绕；若还有缠绕径向外层（保护层）的帘线密度也采用挤出带束条方法缠绕，与邻近前几组帘线密度相同或更换帘线材料采用密度更小的带束条缠绕。总之，材料线密度径向向外逐渐变小。若采用层贴法，要保证与上层翻新基部胶具有良好的附着力，防刺扎层的帘线密度不宜太大，可设计帘线密度较前几组稀疏。

通过研究发现，使用线径大且密度大的帘线制备的航空轮胎，除了重量不易控制之外，会给航空轮胎的高速性能带来不良影响。在确定帘线总强度符合设计要求的基础上，尽量选择线径和密度都合适的帘线，其中需要关注帘线之间的橡胶厚度、带束条层间的橡胶厚度在高速接地滚动变形过程中，带束层端部产生较大的剪切应力致使带束层线间和层间橡胶发热和变形，导致带束层脱层的问题。

3.6 缠绕带束层层数确定及强度分析

子午线航空轮胎安装上专用轮辋，充气至额定气压，在对带束层相关有限元受力分析过程中，多层带束层的层间受力分析发现，临近胎体层的带束层受到周向拉伸应力比较径向向外的带束层大，由内向外呈逐渐减少趋势，这就要求临近胎体层的带束层具有较

高的拉伸刚度或模量。现有技术需要进一步对子午线航空轮胎带束层的层间材料使用进行详尽分析，规范多层带束层的层间拉伸模量的相关技术要求，进而分析带束层整体拉伸刚度，增加航空轮胎的耐冲击性能和使用寿命。

子午线航空轮胎带束层采用多种缠绕方式，缠绕层数要根据带束层单根强度和安全倍数决定。在国内，子午线航空轮胎设计计算暂无相关技术标准可以借

鉴，考虑到子午线航空轮胎带束层采用不同于子午线汽车轮胎骨架材料，参照子午线汽车轮胎相关技术要求，以薄膜-网络理论为基础，以平衡轮廓理论为依据，由于带束层的箍紧作用，胎冠部位的内压由带束层和胎体分担，带束层强度安全系数按照经验值也需取6~9倍核算，如此可直接计算出带束层层数。安全系数给予上限限制，是考虑航空轮胎减重设计。

Design of the winding belt structure for radial aircraft tires

Wang Chaoqun¹, Qi Liping²

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

2. Qingdao Double Star Tire Industry Co. LTD., Qingdao 266400, Shandong, China)

Abstract: The belt layer is the main load-bearing skeleton material of radial aircraft tires. Various properties of aircraft tires, such as high-speed performance, skid control performance, safety performance, and rolling resistance, are closely related to the belt layer. The winding belt layer process method has structural design advantages over the layered belt layer method and is a novel application form in the structural design of radial aircraft tires. This article discusses the material selection, production process, structural design, and strength calculation of the winding belt layer, providing technical theoretical support for the structural design of the winding belt layer in radial aircraft tires.

Key words: wrapped belt; production process; structural design; strength calculation

(R-03)

(未完待续)

