

# 航空子午线轮胎波纹保护层的结构设计和生产工艺

王超群,臧云红,吴洪全

(青岛双星轮胎工业有限公司,山东 青岛 266400)

**摘要:**骨架材料是航空轮胎的主要受力部件,其性能直接关系到航空轮胎的整体耐负荷、抗冲击和耐变形特性。波纹保护层是在航空子午线轮胎环形筒状带束层外侧设计的一层胎体补强材料,可以提高航空轮胎抗刺扎和机械损伤性能,同时还能优化航空轮胎胎体结构,起到保护缠绕带束层的作用。本文从波纹保护层的设计、骨架材料选择、胶料配合体系、生产工艺等方面进行论述,为航空子午线轮胎波纹保护层的设计和生提供借鉴。

**关键词:**航空子午线轮胎;波纹保护层;结构;选型;骨架材料;生产工艺

**中图分类号:**U463.341<sup>+</sup>.6

**文章编号:**2095-5448(2022)01-0031-06

**文献标志码:**A

**DOI:**10.12137/j.issn.2095-5448.2022.01.0031



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

2000年7月,协和飞机制造商欧洲公司(简称EADS公司)飞机发生坠毁事件。在飞机起飞过程中,跑道上的异物造成轮胎爆破,震波传至油箱使其破裂起火,导致飞机坠毁,机上人员全部遇难。EADS公司原来使用斜交轮胎,轮胎骨架材料抗刺扎特性不足是造成轮胎爆破的主要原因。EADS公司接洽法国米其林公司,米其林公司开发出接近零膨胀的航空子午线轮胎,优化改进轮胎骨架层结构,轮胎膨胀率只有3%,使轮胎抗刺扎性能大大增强,之后该轮胎广泛应用于空客A340-500/600和380等10多种机型,得到世界多家航空公司认可。

为了提高航空子午线轮胎承受大负荷、大加速度和大冲击变形的性能,改善轮胎抗外物刺扎和机械损伤性能,需要在环形筒状缠绕带束层外侧设计胎体补强材料以起到保护带束层的作用。

## 1 波纹保护层结构

### 1.1 波纹保护层的设计原理

研究表明,在带束层外侧相对轮胎的赤道面夹角成 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的范围内,铺设2层左右方向

交叉的有机纤维帘布,能够较好地保护带束层并有效防止较小异物侵入。当纤维帘线角度超过 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 范围时,轮胎充气并负载后可能引起抗切割性能下降。当纤维帘线相对于轮胎赤道面的角度为 $\theta$ 时,帘线在周向上的受力应乘以 $\cos\theta$ ,因此可以保证2层加强材料周向刚度较带束层刚度足够小,即使轮胎充气并加大负荷,轮胎径向膨胀,缠绕筒状带束层仍能起到优良的保护作用,2层加强材料不会受到大的力,从而保证轮胎具有良好的抗机械损伤性能。

基于以上原理,设计开发出一组波纹状高强度纤维帘线经过压延覆胶且预成型的半成品,其周向层贴在缠绕筒状带束层外侧,称为“波纹保护层”。

### 1.2 波纹保护层结构设计

波纹保护层的三维效果和局部效果图分别如图1和2所示。

波纹保护层是利用特殊用途骨架材料经过特制专用设备压延而成的用于航空子午线轮胎的专用半成品胶部件<sup>[1]</sup>。根据不同规格并排108~120根帘线,间距为2.65~3.6 mm,波幅为7~8 mm,波长为28~35 mm,帘线上下面覆胶,总厚度控制在2.3~3.5 mm。波纹保护层展开如图3所示。

**作者简介:**王超群(1974—),男,安徽颍上人,青岛双星轮胎工业有限公司工程师,学士,主要从事橡胶设备技术工作。

**E-mail:**1410004241@qq.com



图1 波纹保护层的三维效果图

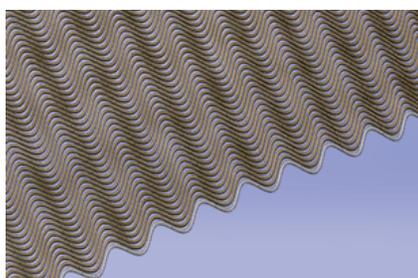


图2 波纹保护层的局部效果图

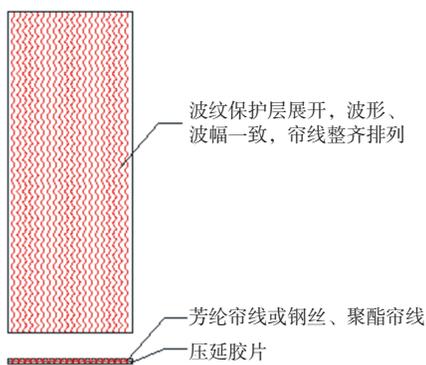


图3 波纹保护层展开示意

波纹保护层结构设计和局部放大分别如图4和5所示。

波纹保护层宽度设计一般大于两侧最外侧沟槽,小于胎肩。航空轮胎翻新时要刨除并更换新的波纹保护层。

波纹保护层贴合工艺(见图6):波纹保护层平铺在最外层缠绕带束层上面的翻新基部胶片上,周向一圈层贴,对接角度为45°,接口部位使用薄片包边,对接接头并压实。

## 2 波纹保护层材料的设计选型

### 2.1 骨架材料选择

目前,适合用作波纹保护层的骨架材料有芳

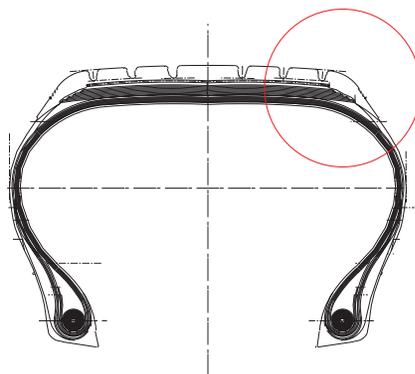


图4 波纹保护层结构设计示意

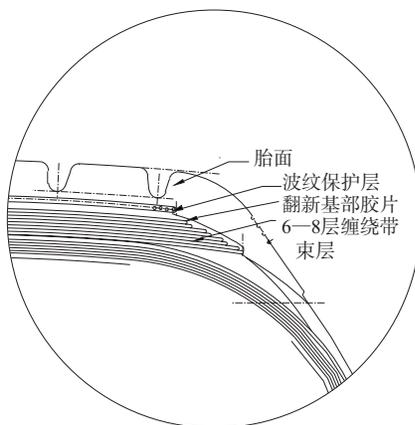


图5 波纹保护层局部放大示意

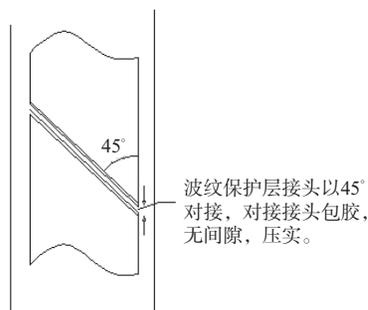


图6 波纹保护层贴合工艺示意

纶纤维、钢丝和聚酮纤维帘线。

#### 2.1.1 芳纶纤维帘线

芳纶纤维及其复合帘线在航空子午线轮胎中应用趋势日益广泛。芳纶纤维帘线采用专用配方表面浸渍处理,具有耐高温、高强度、高模量以及变形小等特性,是目前航空轮胎波纹保护层最理想的骨架材料。

航空子午线轮胎使用的芳纶纤维属于对位芳酰胺纤维,分子链排列呈直线状,全称为聚对苯二甲酰对苯二胺(PPTA),是一种新型合成纤维,具有良好的耐老化和绝缘性能。芳纶纤维强度达到

19 cN · dtex<sup>-1</sup>,是钢丝的5~6倍,模量为钢丝或玻璃纤维的2~3倍,韧性是钢丝的2倍,而密度不到钢丝的1/5,在487 ℃以上碳化,不分解、不熔化。1972年,杜邦公司最早生产出各种用途的PPTA纤维,商品名为Kevlar,我国分别于1981和1985年生产芳纶14和芳纶1414。

芳纶纤维具有显著的性能优势,但缺陷也非常明显。由于分子呈沿轴向排列的规则褶皱层结构,因此芳纶纤维存在表面化学惰性、抗压缩性能差的问题,提高芳纶纤维帘线与橡胶的粘合性能成为波纹保护层骨架材料必须解决的技术难题,可采用如下措施。

(1) 纤维表面的粘合活化可提高纤维的粘合强度,例如用氨气和氧气等气体对芳纶纤维进行等离子体改性处理;用酰氯类、酸碱类等化学刻蚀剂处理芳纶表面使其发生水解,生成可与橡胶分子反应的一COOH、一OH等极性基团<sup>[2]</sup>。

(2) 帘线二浴浸渍法是目前芳纶纤维帘线供货厂家普遍采用的方法,用环氧树脂、异氰酸酯、离子型聚氨酯的粘合活化剂作底涂,间苯二酚-甲醛-胶乳(RFL)浸渍液作表涂<sup>[3]</sup>。

(3) 采用适当的粘合体系,通过配方改进可以将芳纶纤维帘线与胶料的粘合性能提高20%以上。

### 2.1.2 钢丝帘线

航空子午线轮胎波纹保护层所用钢丝帘线规格可以按照子午线轮胎常用钢丝帘线规格进行选择,选择原则是:钢丝直径小、强度高、根数尽量少、镀铜量严格限制,选择开放或半开放型钢丝帘线结构,钢丝与胶料粘合性能相对较高<sup>[4]</sup>。

钢丝帘线通常选择强制机械变形时不分叉、有2种捻向的钢丝帘线,以防止在压制成波浪形钢丝过程中散开;选择耐冲击钢丝帘线意味着钢丝帘线抗拉强度大,压制波浪线过程不便控制成型。

钢丝帘线的生产工艺流程为:盘条→粗丝拉拔→中丝气体保护热处理→中丝拉拔→电镀黄铜→单丝拉拔→捻股→外绕→重卷→包装,关键工序是电镀黄铜和单丝拉拔。

盘条是生产钢丝帘线的原料,其力学性能对于波纹保护层钢丝选材起着关键性作用,一般钢

丝中含碳量越高,抗拉强度越大,用作波纹保护层的钢丝原料盘条一般选取LX80B等级及以上盘条,抗拉强度在1 070~1 350 MPa。

在中丝拉拔的钢丝上镀上一层合金黄铜,其主要作用是提高钢丝帘线与橡胶之间的粘合力。GB/T 11181—2016中对不同直径钢丝含铜组分、镀层厚度有严格规定。一般来说,低铜镀层钢丝帘线与橡胶的粘合性能远优于高铜镀层钢丝帘线<sup>[5]</sup>。

单丝拉拔就是把电镀黄铜的钢丝拉拔成0.22,0.25和0.28 mm等不同直径的单丝,高强度钢丝帘线生产过程有3次拉拔,在工艺计算中要考虑总压缩率和部分压缩率的分配问题。高强度钢丝帘线单丝的抗拉强度、屈服强度比普通强度钢丝帘线高10%以上<sup>[6]</sup>。

高强度钢丝帘线在压制波纹线过程中,单丝强度高、残余应力和形状控制难度大,对压制钢丝波纹保护层的特种压延机提出更高的技术性能要求。

### 2.1.3 聚酮纤维帘线

聚酮纤维是由一氧化碳和乙烯合成的新型绿色材料。聚酮纤维冲击强度比锦纶和聚酯纤维高230%,与锦纶66拉伸强度相当,但聚酮纤维在足够的拉伸强度下具有优异的冲击强度和伸长率,极高的耐磨性能、韧性和弯曲模量;抗化学介质(酸碱溶液)性能稳定,热变形温度是200 ℃,与锦纶66相当,优于锦纶6、聚酯和聚甲醛等材料<sup>[7]</sup>。

聚酮纤维生产可以采用溶液纺丝法,但最经济可行的途径是熔纺法,可以在短暂超过聚酮熔点(220 ℃)40 ℃的情况下熔纺成单丝和复丝。

在高温时聚酮纤维帘线与橡胶的粘合性能比芳纶纤维帘线高,将聚酮纤维帘线用作波纹保护层骨架材料,既可以保持与芳纶帘线同等的抗切割性能,还能作为带束层和胎面之间过渡层,提高层间抗剥离性能。用于波纹保护层的聚酮纤维帘线的拉伸强度应大于5 cN · dtex<sup>-1</sup>、初始模量大于21 cN · dtex<sup>-1</sup>,定伸应力大于1 cN · dtex<sup>-1[8]</sup>。

### 2.1.4 综合性能对比

几种骨架材料的综合性能对比如表1所示。

锦纶66的拉伸强度、张力模量明显偏低,显然不适合用作波纹保护层骨架材料。芳纶纤维的拉

表1 几种骨架材料的综合性能对比

项 目	芳纶纤维	钢丝	聚酯纤维	锦纶66
密度/( $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.44	7.85	1.24	1.14
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	$\geq 487$	1 600	220	260
拉伸强度/( $\text{cN} \cdot \text{dtex}^{-1}$ )	18~19	3.0~3.5	13	7.2
张力模量/( $\text{cN} \cdot \text{dtex}^{-1}$ )	410	180~250	363	44~46
断裂伸长率/%	4.0	1.7	270.0	19.0
粘合强度 <sup>1)</sup> /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	140~160	510	165	185

注:1) 纤维帘线规格为1670dtex, 钢丝帘线规格为2+2×0.25ST。

伸强度和张力模量最高,验证了上述高强度、高模量、低密度、耐高温等性能特点。但芳纶纤维的明显缺陷是抗压缩变形性能差,抗扭转性能差,不耐加捻,捻度越大,强度损失越大,因此芳纶纤维不适合直接用在航空轮胎胎体变形特别大的部位,而且芳纶纤维帘线与橡胶的粘合性能需要大大提高。目前,国内芳纶生产企业通常采用二浴浸渍方法,结合橡胶配方的改善,芳纶纤维帘线用作波纹保护层骨架材料成为航空子午线轮胎厂家的普遍工艺。

聚酯纤维综合性能优异,适合用作波纹保护层骨架材料。聚酯纤维帘线目前在国内尚处于试制验证阶段,没有形成批量化生产,但其是替代芳纶纤维帘线用于波纹保护层的理想骨架材料。

钢丝密度最大,这无疑对航空子午线轮胎轻量化造成较大风险,镀铜钢丝帘线与橡胶的粘合性能较芳纶优越。目前,美国固特异公司的航空子午线轮胎普遍采用钢丝帘线作为波纹保护层骨架材料。钢丝帘线在拉伸强度和断裂伸长率等方面表现差,决定了钢丝帘线经过波纹压制处理后仅用在航空子午线轮胎波纹保护层部位。

以某规格民用航空子午线轮胎为例,不同骨架材料波纹保护层的具体参数如表2所示。

从表2可以看出,钢丝帘线直径较小,但质量

表2 不同骨架材料航空子午线轮胎波纹保护层的参数

项 目	芳纶纤维帘线	钢丝帘线
规格	3000D/3	2+2×0.25ST
半成品宽度/mm	265	220
帘线总根数	100	188
压延密度/( $\text{根} \cdot \text{dm}^{-1}$ )	39.0	88.5
帘线直径/mm	1.25	0.65
波纹波长/mm	28	17
波纹波幅/mm	15.0	7.5
骨架材料理论质量/kg	0.87	1.34

较芳纶纤维帘线仍高54%,与航空轮胎轻量化设计方向相悖。

## 2.2 胶料配合体系

3种骨架材料与胶料的粘合性能不同,配合体系差异明显,以芳纶帘线与胶料的粘合体系为例进行论述。

芳纶帘线与橡胶的粘合强度要求不小于 $200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,配方为:橡胶 100,补强剂 40~50,硫化活性剂 5~7.5,防老剂 2~4.5,粘合树脂 1~2.5,亚甲基给予体 3~4.5,不溶性硫黄 3~5,促进剂 1~1.8,防焦剂 0.1~0.4。

配合体系中基体橡胶选择标准烟胶片(优选泰国标准1#烟胶片),其塑性初值 $\geq 40.0$ ,塑性保持率 $\geq 60$ ,门尼粘度[ML(1+4)100 $^{\circ}\text{C}$ ]为 $83 \pm 10$ 。加强波纹保护层中胶料与芳纶纤维帘线的粘合性能可以提高轮胎抗刺扎性能,改善应力分布。

补强剂选择炭黑,硫化活性剂选择以锌锭为原料间接法生产的氧化锌,防老剂选自对苯二胺类防老剂与噻咪类防老剂的混合物,促进剂选择N-叔丁基-2-苯并噻唑次磺酰胺,粘合树脂优选间苯二酚-甲醛树脂配合亚甲基给予体RA65(HMMM质量分数为0.65,白炭黑质量分数为0.35),两者形成间-甲粘合体系,以提升橡胶与帘线的粘合力。防焦剂优选CTP(N-环己基硫代邻苯二甲酰亚胺),有利于提高胶料的加工安全性。

## 3 波纹保护层的生产及应用

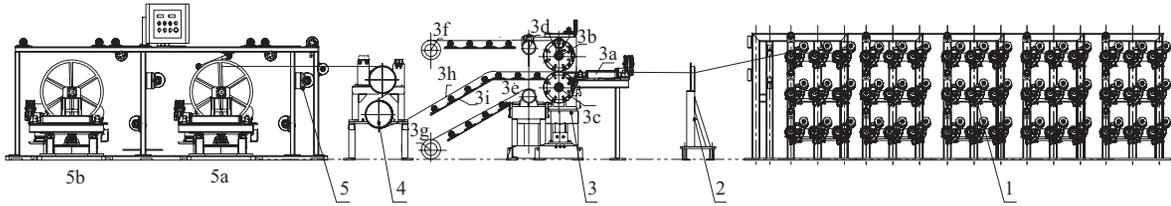
我公司开发了一种压延法生产航空子午线轮胎波纹保护层的工艺技术,波纹保护层压延机是我公司与设备厂家共同开发的特制压延技术装备。

### 3.1 生产工艺流程

波纹保护层压延工艺流程如图7所示。

锭子架有135个工位,每排45个工位,横向共3排,需要投用108~120个工位,压延108~120根帘线、最大宽度为410 mm的波纹保护层,每个工位可将芳纶帘线张力控制在 $2.0 \sim 3.5 \text{ N}$ 。

所有帘线经过整形架后,呈“一”字排列,帘线间距控制在 $2.65 \sim 3.6 \text{ mm}$ ,公差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ ,压延过程中无需调整帘线间距,整形效果一次到位。



1—工位锭子架;2—整形架装置;3—压延主机;3a—波形摆动装置;3b和3c—主辊筒;3d和3e—预热辊筒;3f—上层胶片供料卷;3g—下层胶片供料卷;3h—压延后的波纹保护层;3i—运输架;4—冷却牵引装置;5—卷曲装置;5a和5b—卷曲工位。

图7 波纹保护层压延工艺流程示意

排列整齐、张力控制统一的帘线由3a(波形摆动装置)进入压延主机,定位精度要求非常高,压出波形公差控制在0.1 mm,由伺服电机驱动摆形架左右匀速、往复运动。调整伺服电机摆动频率与主机辊筒转动速度,使其速度匹配,帘线压延后波形波幅控制在7~8 mm,波长控制在28~35 mm。压延主机的两个主辊筒3b和3c相对旋转,调节两辊筒的间距可控制波纹保护层的压延厚度,厚度控制在2.3~3.5 mm,公差控制在±0.15 mm。两个主辊筒通入蒸汽加热,控制压延工艺温度,辊筒温度控制在120~130 ℃,经过加热的胶片温度控制在90~100 ℃。3f为上层胶片供料卷,上层胶片经过传送辊、预热辊筒3d(预热温度120~130 ℃),从3b上部进入,3b顺时针旋转;3g为下层胶片供料卷,下层胶片经过传送辊、预热辊筒3e(预热温度120~130 ℃),从3c下部进入,3c逆时针旋转;经过定宽压制、到达预热温度的上、下两层胶片与经过3a摆线的帘线一同进入3b和3c之间完成压延。压延主机为波纹保护层压延机核心部件,集机械、电气、程序控制于一体,经过周密计算分析数据,才可满足半成品压延工艺技术要求。

压延后的波纹保护层在冷却牵引装置的牵引力作用下经过冷却、修边,完成半成品压延工作。

卷曲装置5分成前后两个卷曲工位5a和5b,可实现半成品胶部件不停机卷曲工作,卷曲速度控制在15~30 m·h<sup>-1</sup>。

航空子午线轮胎波纹保护层由专用波纹保护层压延机生产,压延后半成品胶部件外观平整,符合工艺、技术要求,线距均匀、波形一致,无并线、压坏、缺胶、露线等质量缺陷。

### 3.2 性能验证

航空子午线轮胎波纹保护层应具有拉伸强度高、定伸应力和撕裂强度较高、压缩疲劳生热低的

性能特点。波纹保护层的最重要作用是作为航空轮胎防刺扎层,束紧带束层,有效提高带束层宽度上应力分布的均匀性,降低带束层边缘应力,从而解决带束层边缘脱空现象。

带束层部件在全部宽度范围内沿周向的总强度 $T_{belt}$ (单位为N)满足式(1)和(2)<sup>[9]</sup>。

$$T_{belt}/WD \geq 1.5 \times 10^6 \quad (1)$$

$$T_{bw}/T_{belt} < 0.5 \quad (2)$$

式中: $W$ 为充气轮胎宽度,m; $D$ 为充气轮胎外直径,m; $T_{bw}$ 为波纹保护层周向断裂强度,N。

以某航空子午线轮胎为例,波纹保护层使用芳纶纤维帘线,规格为3360dtex/3,帘线直径为1.25~1.35 mm,拉断伸长率为3.5%~6.5%,断裂强度 $\geq 1500$  N,芳纶纤维帘线根数为115。该轮胎 $T_{bw}$ 为 $1.73 \times 10^5$  N。

带束层采用缠绕8层设计,各带束层设计宽度自中心向外侧依次为375,375,355,355,335,335,315和315 mm,每根带束条宽度为10 mm,由7根帘线均匀排列,使用芳纶纤维/锦纶混合帘线1660dtex/2+N66 2100dtex/1,断裂强度 $> 600$  N,带束层缠绕角度 $\theta$ 为12°,计算得到 $T_{belt}$ 为 $1.13 \times 10^6$  N。

$D$ 为1.2 m, $W$ 为0.48 m,代入公式(1)和(2),结果均满足设计要求。

芳纶纤维帘线的100 N定负荷伸长率和干热收缩率较低,100 N定负荷伸长率为0.3%~0.9%,与橡胶的粘合强度 $\geq 200$  kN·m<sup>-1</sup>,1%定伸长负荷 $\geq 150$  N,干热收缩率 $\leq 0.5\%$ 。采用本方案设计波纹保护层所制成的航空轮胎安全强度进一步提升,尺寸稳定性好,满足航空轮胎高速、抗冲击的性能。

### 4 结语

采用本设计方案波纹保护层研制的某规格航

空子午线轮胎经过动态模拟试验,试验结果满足中国民航总局(CAAC)的技术标准要求,通过中国技术标准规定(CTSO)和航空轮胎标准GJB 108B动态模拟试验测试。

法国米其林、日本普利司通、美国固特异等国际著名航空子午线轮胎品牌都普遍应用波纹保护层,国内尚处于研发、产品性能验证阶段。应用不同的骨架材料都需要解决好抗冲击、抗刺扎、轮胎轻量化、增强骨架材料与胶料的粘合性能、降低生产成本等方面的问题,这也是未来一段时期航空子午线轮胎主要的技术研发方向。

#### 参考文献:

[1] 齐立平,周士峰,王超群,等.子午线航空轮胎成型工艺[P].中国:CN 202010558934.2,2020-09-18.

- [2] 王泽好,王泽君,宋威.芳纶纤维的性能及在轮胎中的应用[C].第二届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文集.青岛:《橡胶工业》编辑部,2003:182-183.
- [3] 余波.对位芳纶的生产和应用技术进展(Ⅲ)[J].合成技术及应用,2005(12):35-36.
- [4] 张清珍.影响钢帘线与橡胶粘合力的因素分析[J].金属制品,1998(10):40-41.
- [5] 罗之祥,魏丽,陈建龙.镀层对钢丝帘线与橡胶粘合性能的影响[J].轮胎工业,2007,27(7):392-393.
- [6] 胡自明,蒋日勤.高强度钢丝帘线的研制开发[J].轮胎工业,2002,22(11):655-657.
- [7] 晓星钢帘线有限公司.POK聚酮[DB/OL].[2018-10-12].<https://max.book118.com/html/2018/1012/7152030110001152.shtml>.
- [8] 李汉堂.新型高性能聚酮纤维在橡胶工业中的应用[J].橡塑资源利用,2011(5):1-3.
- [9] 矢野岳.航空器用子午线轮胎[P].中国:CN 101678717A,2010-03-24.

收稿日期:2021-08-23

## Structure Design and Production Process of Corrugated Protection Layer for Aircraft Radial Tire

WANG Chaoqun, ZANG Yunhong, WU Hongquan  
(Qingdao Doublestar Tire Industry Co., Ltd, Qingdao 266400, China)

**Abstract:** The skeleton material is the main stress component of the aircraft tire, and its performance is directly related to the overall load resistance, impact resistance and deformation resistance of the aircraft tire. The corrugated protection layer is a layer of carcass reinforcement material designed on the outer side of the cylindrical belt layer of the aircraft radial tire. It can improve the puncture resistance and mechanical damage resistance of the aircraft tire, and optimize the structure of the carcass of the aircraft tire, playing a role in protecting the winding belt layer. In this paper, the structure design, skeleton material selection, compound formulation system and production process of the corrugated protection layer were discussed, which could provide reference for the design and production of the corrugated protection layer of the aircraft radial tire.

**Key words:** aircraft radial tire; corrugated protection layer; structure; selection; skeleton material; production process

### 卡博特推出低多环芳烃含量炭黑

日前,卡博特公司推出一款用于橡胶领域的新型低多环芳烃含量炭黑VULCAN 3-LP,这也是卡博特LP炭黑系列中的第4款产品。

卡博特LP系列炭黑是通过特殊工艺制造,产品中的多环芳烃含量极低且稳定。这符合全球对橡胶制品及其原料的多环芳烃含量日益增加的监管和质量认证要求。

VULCAN 3-LP炭黑是一款补强造粒产品,专为要求比半补强炭黑更高的拉伸强度、耐磨性能和抗撕裂性能的橡胶产品而设计。其主要应用领域为:儿童用品、体育器材、工具等橡胶产品;可能接触口腔或反复接触皮肤的橡胶制品;直接接触饮用水的橡胶制品,包括水管和水箱中的软管和衬套;与食品接触的密封圈、食品输送带等。

(王 雯)