

空气弹簧橡胶囊皮核心技术与突破路径分析

吴圣 傅佳艺 姜旭 席劲 刘永齐

(弗迪科技有限公司弗迪科技研究院,深圳 518118)

【欢迎引用】吴圣,傅佳艺,姜旭,等.空气弹簧的乘用车应用及囊皮材料、成型工艺[J].汽车文摘,2025(5):27-33.

【Cite this paper】WU S, FU J Y, JIANG X, et al. The Application of Air Springs in Passenger Vehicles, Materials and Preparation Processes of Rubber Bladders[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(5): 27-33.

【摘要】目前,国产空气弹簧橡胶囊皮的性能与国外仍存在较大差距,其核心技术主要由国外公司掌握。为了研究空气弹簧橡胶囊皮的核心技术难点,分析了空气弹簧再乘用车领域的应用现状和未来发展趋势,并从材料和成型工艺2个方面对橡胶囊皮进行探究。最后归纳了囊性皮囊的核心技术问题,并提出潜在技术突破路径,以期为国内橡胶囊皮技术发展提供参考。

关键词:乘用车;空气弹簧;橡胶囊皮;橡胶;纤维;成型工艺

中图分类号:U463.1 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240126

The Application of Air Springs in Passenger Vehicles, Materials and Preparation Processes of Rubber Bladders

Wu Sheng, Fu Jiayi, Jiang Xu, Xi Jin, Liu Yongqi

(FinDreams Technology Research Institute, FinDreams Technology Co., Ltd., Shenzhen 518118)

【Abstract】At present, there is still a big gap between the performance of domestic air spring rubber capsules and foreign countries', and the core technology is mainly in the hands of foreign companies. In order to study the core technical difficulties of air spring rubber airbags, the paper analyzes the application status and future development trend of air springs in the field of passenger vehicles. The rubber airbags are discussed from two aspects, materials and molding process. This paper finally summarizes the core technical problems of cystic skin, and the potential technological breakthrough paths to provide reference for the development of rubber skin technology in China.

Key words: Passenger vehicle, Air spring, Rubber bladder, Rubber, Fiber, Preparation processes

0 引言

乘用车悬架系统是乘用车车身与车轮之间的传力连接装置总称,相比于传统悬架,其主要作用是传递车身与车轮之间的力和力矩,缓冲路面对车身的载荷冲击,衰减由载荷冲击引起的承载系统振动,确保乘用车的行驶平顺性和乘坐舒适性^[1-2]。按照工作原理分类,乘用车悬架可分为被动悬架、半主动悬架和主动悬架。随着国内新能源汽车和智能驾驶技术的不断发展,乘用车悬架逐渐由被动悬架向主动悬架升级。空气悬架是由空气弹簧和可变阻尼减振器组成的高端主动悬架,具有明显的技术优势,如控制减振器阻尼大小、高度可调节以及提升行驶的平顺性、舒

适性与安全性。空气弹簧是空气悬架的核心弹性元件之一,其利用空气的压缩弹性,实现承载、缓冲、减震等功能^[3-4]。橡胶囊皮^[4]是空气弹簧的核心技术壁垒之一,其热力学性能是保证空气悬架正常运行的关键,耐疲劳性和耐老化性决定空气悬架使用寿命,同时需保证具有足够的强度和较低的刚度以满足汽车行驶过程中的减震与平稳性需求。

橡胶囊皮在使用过程中易出现老化、裂纹等现象,影响其耐用性和功能。实验室研发阶段的技术人员从囊皮的制备配方、填充材料(有机或无机)改性、非线性特性力学研究与数学建模等方面出发研究其性能,吕宁宁等^[5]用气相沉积和电泳沉积制备碳纳米管填料,掺入复合橡胶材料中,解决囊皮材料的老化、

易疲劳问题。同时采用乳液共混法将干、湿材料进一步复合,增强橡胶囊皮的密闭性能。Huh等^[6]利用Abaqus有限元软件对空气弹簧进行建模,用于分析囊皮材料的非线性力学特征和气囊的各项差异。通过改变复合材料中帘线的卷曲角度,分析其应力与应变的变化情况,最终得到准确的仿真模型与计算结果。

国内已具备空气弹簧的研发、制造、验证技术^[7]。但相比国外空气弹簧品牌,在结构与建模技术与经验方面尚且不足,无法计算得出精确参数,导致国内产品大多依赖经验判断或模仿国外产品的相关构造进行设计。因此,国内空气弹簧在耐久性、可靠性方面与国外仍存在较大差距。

本文从材料和工艺方面对空气弹簧橡胶囊皮进行深入探究,旨在识别核心技术难点,指明核心技术突破方向,为缩短与国外的技术差距提供参考,促进空气弹簧在经济车型中的广泛应用。

1 空气弹簧在乘用车领域的应用现状和发展趋势

1.1 应用现状

空气弹簧技术壁垒高,需投入大量的研发费用和人力成本,导致其成本偏高。2020年以前,空气弹簧除红旗品牌外仅配置于国外进口或合资50万元以上高端豪华车型,如表1所示。

1.2 发展趋势

随着国内新能源汽车的发展,自主品牌不断突破原有品牌定位,推出自主高端车型,抢占高端新能源汽车市场。多家自主品牌车企主推配置空气弹簧的高端新能源车型,如红旗、蔚来、理想、岚图、极氪等。目前,空气弹簧已配置50万以下车型,如表2所示。

与传统燃油车相比,新能源汽车具有动力响应快、噪音小、能耗低以及污染小的优势,但新能源汽车的车身质量至少比传统燃油车增加了30%,核心三电系统对冲击和振动更敏感,对新能源汽车悬架的减震提出了更高的要求,空气弹簧成为新能源汽车的最优解决方案之一^[7]。

国内空气弹簧生产企业在技术研发方面落后于国外生产企业。经过多年发展,国内生产企业已掌握从零部件到系统的集成配套能力,但部分核心零部件仍主要依靠国外供应商。从产品的实际使用效果来看,国产空气弹簧在性能、耐久和可靠性等方面不及进口产品。随着核心技术壁垒不断突破,国产化替代所带来的成本优势将有利于空气弹簧的进一步渗透。据盖世汽车的数据^[8],随着国内自主车型的高端品牌

不断推出,以及供应链国产化降本的优势,配置空气弹簧车型的价格将有望进一步下沉至25万元,而25万以上车型的渗透率也将不断提升。表3为国内外主要空气弹簧生产企业统计。

表1 配置空气弹簧的高端豪华车型统计

品牌	车型	指导价/万元	级别
红旗	E-HS9	50.98~77.98	大型豪华SUV
大众	途锐	53.38~79.38	中大型SUV
奥迪	A8	82.98~195.48	大型豪华轿车
	Etron	54.68~64.88	中大型SUV
宝马	6系GT	59.09~69.99	中大型豪华轿车
	X5	61.20~80.00	中大型SUV
	X6	79.99~97.59	中大型SUV
	7系	91.90~126.90	大型豪华轿车
	X7	103.90~172.90	大型豪华SUV
奔驰	GLC	42.78~53.13	中大型SUV
	V级	47.88~64.68	中大型MPV
	GLE	69.98~88.98	中大型SUV
	GLS	108.30~136.88	中大型SUV
	S级	94.72~200.20	中大型豪华轿车
迈巴赫	S级	146.80~682.80	大型豪华轿车
沃尔沃	XC90	63.89~78.19	大型豪华SUV
林肯	飞行家	50.08~76.38	大型豪华SUV
路虎	揽胜	142.80~333.80	大型豪华SUV
特斯拉	Model S	68.89~82.89	中大型轿车
保时捷	Macan	57.30~85.80	中大型SUV
	Cayenne	92.30~250.80	中大型豪华轿跑
	Panamera	99.80~247.60	中大型豪华轿跑
宾利	添越	269.90~353.60	中大型SUV
	飞驰	273.80~377.40	中大型豪华轿车
	欧陆	292.50~414.20	中大型豪华轿跑
劳斯莱斯	库里南	691.00~745.00	大型豪华SUV
	幻影	847.00~986.00	大型豪华SUV

根据华经产业研究院等的研究结果^[9],考虑商用车领域,2025年空气弹簧零部件国内市场规模有望达到100亿元,全球市场规模有望达到250亿元。考虑供应商国产化降本,空气弹簧价格有望降至2800元/辆份。国内渗透率有望提升至15%,全球渗透率有望提升至12%;2030年空气弹簧国内渗透率有望提升至20%,对应市场规模为135亿元,全球渗透率有望提升至18%,对应市场规模为360亿元。

表3 天然橡胶性能分析^[10-11]

性能	评价	分析
力学性能	拉伸性能仅次于聚氨酯橡胶,可达17~25 MPa,经炭黑补强可达25~35 MPa	天然橡胶分子结构规整,结晶性强,自补强性好
耐疲劳性	具有良好的耐屈挠疲劳性能	天然橡胶滞后损失小,变形生热低
耐候性	耐候性能较差	由于电子诱导效应,双键 α -亚甲基氢原子活泼,天然橡胶易与氧、臭氧发生氧化反应
耐温性	耐高低温性能优异	玻璃化温度为零下72℃,受热缓慢软化,直至130~140℃开始流动
耐介质性	不耐环己烷、汽油、苯等介质,耐油性较差	天然橡胶为非极性,易溶于非极性溶剂
加工性	加工性能优异,易进行塑炼、混炼、压延、挤出、成型等	天然橡胶分子链支链甲基活性大,分子链易断裂,生胶中存在一定数量的凝胶成分
气密性	良好的和气密性	天然橡胶渗透系数为 $2.969 \times 10^{-12} \text{H}_2(\text{s} \cdot \text{Pa})$

表4 氯丁橡胶性能分析^[10-11]

性能	评价	分析
力学性能	力学性能优异	氯丁橡胶的主链含电负性较大的氯原子,结构规整,结晶性强,自补强性好
耐疲劳性	具有良好的耐疲劳性	滞后损失小,变形生热低
耐候性	耐候性能良好	氯丁橡胶结构稳定性强
耐温性	高温性能良好,耐低温性能差	氯丁橡胶分子结构规整性、极性、内聚力较大,限制分子的热运动,特别在低温下热运动更困难,玻璃化温度为零下40℃,使用温度一般高于零下30℃,耐低温性能较差
耐介质性	耐油、耐非极性溶剂优异	氯丁橡胶极性较强
加工性	可加工性较差	由于极性氯原子的存在,氯丁橡胶在加工时对温度敏感,当塑、混炼温度超出弹性态温度范围,会产生黏辊现象
气密性	良好的气密性	氯丁橡胶结构紧密,气密性比天然橡胶好
储存性	储存性较差	氯丁橡胶在室温下具有从 α 型聚合物向 μ 型聚合物转化的趋势,在30℃自然条件下,硫磺调节型氯丁橡胶可存放10个月,非硫磺调节型可存放40个月

能,提高耐疲劳、耐撕裂性能,同时降低成本、耐候和耐油。天然橡胶为非极性橡胶,双键活性高,硫化速度快;而氯丁橡胶为极性橡胶,双键活性低,硫化速度慢。天然橡胶和氯丁橡胶并用需解决2种橡胶相容性和反应活性不一致的问题。

目前,国内空气弹簧橡胶囊皮主要以天然橡胶、天然橡胶或氯丁橡胶混合胶为主,加工难度低,成本相对较低。如表5所示,国外空气弹簧橡胶囊皮主要以氯丁橡胶为主,性能优异,成本相对较高,技术难度相对较大,国外相关企业具备成熟的氯丁橡胶加工技术和完善的加工能力。

2.2 纤维增强材料

2.2.1 锦纶66

锦纶66(PA66)由己二胺和己二酸缩聚而成,如图4所示,分子链呈平行排列。酰胺基团具有极强的极性,可以形成氢键,容易结晶,因此锦纶66纤维具有较高的强度,机械加工性能良好。

锦纶66纤维的强度高,耐疲劳性强和抗冲击性优异,且吸湿率较低,但初始模量低,热收缩性

大和滞后,尺寸稳定性差,是橡胶囊皮主要增强纤维材料。

表5 囊皮用橡胶材料性能对比

综合性能	锦纶66	涤纶	芳纶
耐高温性能	$\leq 100^\circ\text{C}$	$\leq 120^\circ\text{C}$	$\leq 100^\circ\text{C}$
耐低温性能	$\geq -55^\circ\text{C}$	$\geq -45^\circ\text{C}$	$\geq -49^\circ\text{C}$
耐臭氧性能	-	+	+
动态疲劳性能	++	++	++
耐油性能	-	+	+
撕裂性能	++	++	++
耐磨性能	++	++	++
与骨架粘合性能	++	++	++
加工工艺性能	++	-	+
成本优势	++	-	+

注:++为优秀、+为较好、-为差

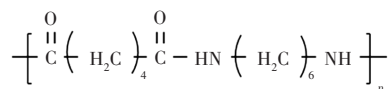


图4 PA66纤维结构式

2.2.2 涤纶

如图5所示,涤纶(PET纤维)是聚对苯二甲酸乙二酯纤维,强度稍低于锦纶,模量为锦纶的3~4倍^[11]。如表6所示,涤纶纤维的尺寸稳定性好、耐热性好,耐疲劳性能好、弹性好、蠕变小和耐腐蚀等,但涤纶纤维与橡胶的粘合性能差,容易氨解、水解。

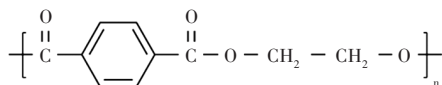


图5 PET纤维结构式

表6 囊皮用有机纤维性能对比^[12]

项目	锦纶66	涤纶	芳纶
密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	1.14	1.38	1.44
断裂强度/ $(\text{cN}\cdot\text{dtex}^{-1})$	8.3	8.1	19
断裂伸长率/%	22	13	4
初始模量/ $(\text{cN}\cdot\text{dtex}^{-1})$	44	140	410
玻璃化温度/ $^{\circ}\text{C}$	50		
熔点/ $^{\circ}\text{C}$	265	260	500
热收缩率(160°C)/%	7.9	4	0.4
吸收率/%	4.5		
回弹率/%	100	100	

2.2.3 芳纶纤维

如图6所示,橡胶囊皮用芳纶纤维是聚对二甲酰对苯二胺纤维,商品名为芳纶1414,兼有合成纤维和钢丝的优点,是一种具有发展前途的新型纤维。

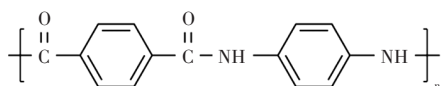


图6 芳纶1414纤维结构式

芳纶纤维密度小、强度高、模量高且热稳定性好,玻璃转变温度为 340°C ,高温不熔且收缩变形小,耐化学介质性能和耐腐蚀性能好^[12]。但芳纶纤维的断裂伸长率低、耐疲劳性能差、与橡胶的粘接性能差且价格极高^[12]。

有机纤维的特性和优缺点如表7所示,目前国内空气弹簧橡胶囊皮主要采用尼龙66纤维,与橡胶粘合强度相对较好,但其模量低。国外已采用PET纤维替代PA66,PET的模量和尺寸稳定性优于PA66。芳纶的强度和模量最高,综合性能最好,但成本高,主要用于高端车型和质量较高的车型。

3 橡胶囊皮成型工艺研究

空气弹簧的橡胶囊皮的成型包括生胶加工、帘布或帘线浸胶、囊皮预成型和硫化成型。其中囊皮预成型工艺可以分为帘布搭接工艺和帘线编织工艺。如图7、图8所示,帘布搭接工艺主要采用2层帘布层相

互搭接,对搭接处进行补强。帘线编织工艺主要采用帘线编织成单层帘布层,因无搭接,单层帘布层的强度足以支撑橡胶囊皮的受力,故囊皮厚度薄、刚度小且承载性能和舒适性能优异^[13]。

表7 有机纤维的特性及其优缺点^[12]

纤维种类	优点	缺点
锦纶66	强度高,耐疲劳性、抗冲击性好,耐水性、耐腐蚀性好,强度利用率高,单位强度成本低	模量低,易伸长,尺寸稳定性差,易产生扁平点,耐湿热性差
涤纶	伸长率小,强度较高,耐热性好,耐疲劳性大,尺寸稳定性好,模量较高,不易产生扁平点	粘合力小,耐湿热性差,易胶解
芳纶	强度非常高,伸长率小 模量非常高,尺寸稳定性好,热稳定性高	粘合性差,屈挠疲劳性差 紫外线敏感,价格高,耐弯曲、压缩疲劳性差

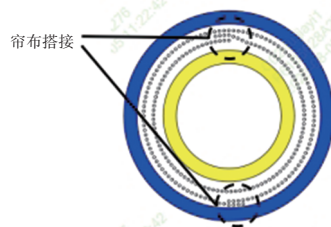


图7 帘布搭接工艺的囊皮截面

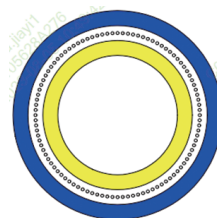


图8 帘线编织工艺的囊皮截面

3.1 生胶加工工艺

空气弹簧橡胶囊皮采用的生胶加工工艺包括塑炼、混炼以及压延等。塑炼通过机械应力、热、氧等方法,降低橡胶弹性,增加橡胶的流动性,以满足后段加工工艺要求。混炼将各种助剂与橡胶混合均匀,获得性能稳定的胶料。压延将混炼胶压制成胶片,以满足成型工艺要求。空气弹簧橡胶囊皮的生产工序如图9所示。

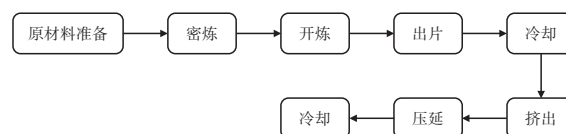


图9 空气弹簧橡胶囊皮生产工序

3.2 帘布或帘线浸胶工艺

帘布或帘线通常采用PA66纤维、PET纤维或者

芳纶纤维,其与橡胶的粘接强度均较差,而橡胶材料与帘布或帘线的粘接强度直接影响囊皮性能和质量稳定性,故帘布或帘线浸胶工艺是囊皮生产的关键技术之一。帘布浸胶工艺包括间苯二酚甲醛胶乳(Resorcino formaldehyde latex, RFL)溶液浸渍、橡胶溶液浸渍、压延贴胶等,帘线浸胶工艺包括RFL溶液浸渍、橡胶溶液浸渍等。

RFL溶液浸渍为帘布或帘线在RFL溶液中浸渍干燥后在纤维表面形成一层粘合剂层,可以增加纤维与橡胶的粘接强度。RFL溶液基本组成是间甲液(间苯二酚、甲醛缩合的预反应液)、乳胶液(丁苯胶、天然橡胶和乙烯基吡啶胶乳的混合液)和氨水。如图10所示,其作用机理是粘合剂中酚醛树脂的羟甲基与纤维分子中的活泼氢发生脱水缩合,实现了RFL粘合剂与纤维之间的粘接^[13]。RFL中的胶乳组分与橡胶相互扩散,在橡胶硫化过程中共同硫化,同时酚醛树脂反应的中间产物亚甲基喹啉与橡胶中双键的 α 活泼氢之间发生反应,实现浸胶帘布或帘线与橡胶牢固粘接^[13]。

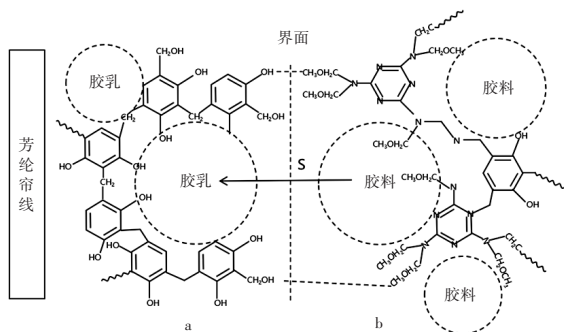


图10 RFL溶液的作用机理^[13]

橡胶溶液浸渍是将胶料溶于有机溶剂制成胶液,然后将帘布或帘线浸入胶液并进行干燥处理,帘布或帘线表面附着一层橡胶层,橡胶层和RLF粘合剂层相互扩散,并在橡胶硫化过程中共同硫化,以提高帘布或帘线与橡胶的粘着力^[14]。

帘布压延贴胶通过压延机2个转速相同的辊筒相互挤压,将一定厚度的胶片贴于帘布表面。压延贴胶通常采用三辊或四辊压延机,三辊压延机一次仅可贴一面,四辊压延机一次可贴两面。图11为帘布搭接工艺-帘布的浸胶工序,图12为帘线编织工艺-帘线的浸胶工序。

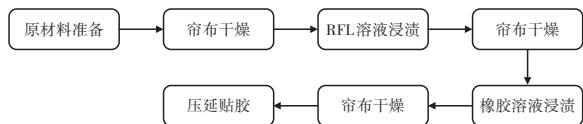


图11 帘布搭接工艺-帘布浸胶工序

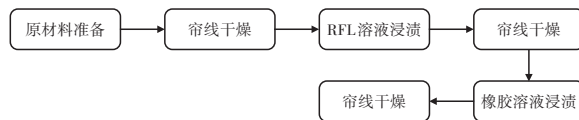


图12 帘线编织工艺-帘线浸胶工序

3.3 橡胶囊皮预成型工艺

橡胶囊皮的预成型工艺包括帘布搭接工艺和帘线编织工艺。帘布搭接工艺主要包括胶片裁剪、贴胶帘布裁剪、预置定位以及缠绕搭接,如图13所示。按照设计形状裁剪胶片和贴胶帘布,置于有红外定位的缠绕设备,利用充气轴的滚动,将胶片和贴胶帘布缠绕搭接,制备橡胶囊皮的预成型体。图14为帘布搭接工艺的生产工序。

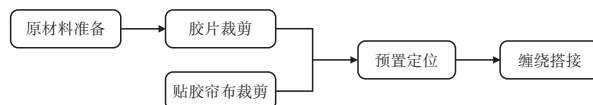


图13 帘布搭接工艺的生产工序

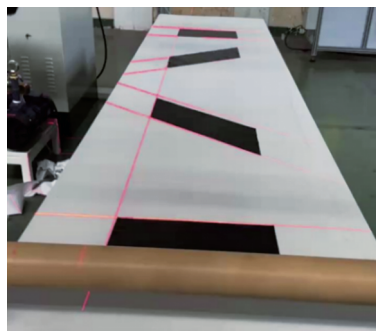


图14 胶片和贴胶帘布缠绕搭接示意

帘线编织工艺包括内橡胶层挤出、帘线编织以及外橡胶挤出层等。通过橡胶挤出设备挤出内橡胶层,编织机进行帘线的三维编织,最后挤出外橡胶层^[15]。帘线编织工艺的生产工序如图15所示。



图15 帘线编织工艺的生产工序

3.4 橡胶囊皮硫化工艺

橡胶囊皮硫化工艺包括模具预热、预成型体预置、合模、气囊充气以及硫化成型。橡胶囊皮硫化工艺是在模腔内部设置一个充气可伸缩的耐高温气囊,然后将橡胶囊皮预成型体置于模具中进行合模,向可伸缩气囊中充气膨胀,橡胶囊皮与模具内腔壁紧密贴合,利用模具温度进行硫化成型。硫化工艺的生产工序如图16所示。



图16 硫化工艺的生产工序

4 结束语

随着国内新能源乘用车市场的不断发展,以及消费

者需求的升级,空气弹簧市场预计进入一个快速增长阶段。然而,其核心技术突破面临新的挑战,空气弹簧橡胶囊皮的核心技术且具有较高技术壁垒,主要体现在以下3个方面:

a. 在结构设计方面,核心技术难点为纤维取向设计与仿真,准确的纤维取向设计对于提升橡胶囊皮的性能至关重要。

b. 在材料选择方面,核心技术壁垒主要包括橡胶材料配方设计和高强度高模量、低收缩纤维材料设计。

c. 在成型工艺方面,核心技术主要包括帘布或帘线表面处理工艺、帘线编织工艺、囊皮预成型工艺和硫化成型工艺等。

目前,国内橡胶囊皮的核心技术相较于国际先进水平尚存在差距,需持续进行技术创新,以下为突破方向建议:

a. 结合橡胶囊皮纤维取向设计、性能测试和仿真技术,构建橡胶囊皮结构模型,研究纤维取向对橡胶囊皮的性能影响。

b. 针对橡胶材料配方,从分子链结构、化学改性和物理改性等维度对天然橡胶和氯丁橡胶相容性、炼胶工艺、硫化工艺进行研究,指导橡胶材料配方设计。

c. 探究纤维、粘合剂、粘合机理、浸胶工艺对纤维或橡胶粘合性能的影响,从而突破纤维或橡胶粘合技术,提升橡胶囊皮的疲劳耐久性能和可靠性。

d. 与设备厂家合作开发定制化设备、模具和工装,突破帘线编织工艺,替代帘布搭接工艺,降低橡胶囊皮厚度,提升空气弹簧舒适性。

参 考 文 献

- [1] 韩冬. 国产空气弹簧悬架迈进巨量市场[N]. 中国汽车报, 2024(27): 6-10.
- [2] 肖磊, 李国洪, 李承亮. 车辆空气悬架的技术研究[J]. 专用汽车, 2023(9): 76-79.
- [3] 刘治澳. 减振制品用天然橡胶在存储和使用过程中的性能与结构演变[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
- [4] 赵宇, 余胜东, 赵昌祥. 空气弹簧气囊的硫化装备及工艺[J]. 河南科技, 2021, 40(32): 54-56.
- [5] 吕宁宁. 空气弹簧用橡胶复合材料制备及疲劳性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
- [6] HUH H, JEONG S, SONG J, et al. 3-D Finite Element Modeling of Fiber Reinforced Rubber Composites Using A Rebar Element[J]. Transactions of the KSME, A, 2006, 30(12): 1518-1525.
- [7] 李毅磊, 闫鹏程, 黄伟, 等. 空气弹簧用橡胶材料的研究进展[J]. 弹性体, 2022, 32(2): 76-82.
- [8] 盖世汽车. 空气悬架巨量市场将开, 国产替代进程加速 [EB/OL]. [2025-1-19]. <https://auto.gasgoo.com/news/202402/20170382909C109.shtml>
- [9] 华经产业研究院. 2024-2030年中国汽车空气弹簧行业发展运行现状及投资战略规划报告 [EB/OL]. [2025-1-19]. <https://www.huaon.com/channel/qclj/1019387.html>.
- [10] 冯帆. 橡胶复合材料制备的空气弹簧性能分析[J]. 粘接, 2022, 49(1): 95-98.
- [11] 高松. 最新橡胶配方优化设计与配方1000例及鉴定测试实用手册[M]. 北京: 北方工业出版社, 2006.
- [12] 于清溪. 轮胎工业用有机纤维帘布现状与发展(一)[J]. 橡胶科技市场, 2008(1): 1-7+11.
- [13] 金红超, 何锋, 杨洪江, 等. 空气弹簧生产工艺及关键控制点的研究[J]. 液压气动与封, 2021, 41(5): 71-74.
- [14] 郭怡, 叶英杰. 提高帘布粘接强度的浸胶液工艺改进探讨[J]. 中国胶粘剂, 2015, 24(3): 57-58.
- [15] PIOTROWSKI I, JAMES C. Systems and Methods of Manufacturing Flexible Spring Members for Gas Spring Assemblies: US11390484B2[P]. 2022-07-19.

(责任编辑 梵玲)