

液压衬套非线性特性计算及影响因素分析

李 林^{1,2}

(1. 广东轻工职业技术学院 汽车系, 广东 广州 510300; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要:采用双向液-固耦合有限元方法,分析液压衬套静态、动态力学特性以及内流体特性分布规律。有限元计算结果与试验结果较吻合,验证了该方法有效,且有限元计算方法直观体现了液体的运动分布情况。众多集总参数中,液压衬套动特性对等效活塞面积的变化最为敏感,随着等效活塞面积的增大,液压衬套动刚度、滞后角均有较大幅度的增长。

关键词:液压衬套;非线性动态特性;液-固耦合有限元分析;集总参数

中图分类号:TQ336.4⁺2;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2015)07-0412-06

液压衬套力学特性在传统橡胶衬套非线性力学性能的基础上,又增加了内部液体阻尼机构的运动特性,表现出频率相关性和振幅相关性的耦合特征^[1]。这种非线性力学性能较好地满足了底盘系统相互矛盾的隔震要求,当受到低频、大振幅激励时,它能够提供大刚度和大阻尼,从而衰减了由于路面或车轮的不平衡激励通过悬架传递到车身的动态力;而当受到高频、小振幅激励时,它的动刚度和阻尼有所降低,有效地减小了动力总成与车架或车身间的振动传递率^[2-4]。

近年来,人们对液压衬套复杂的非线性特性进行了相关研究,采用的典型分析方法以试验法、集总参数法、键合图法以及单向液-固耦合有限元分析方法为主^[5-12]。这些方法在应用过程中表现出某些局限性及弊端,不利于深入系统研究液压衬套减震机理。例如,试验法周期成本较高,其精度受人为因素干扰,流场内特性试验无法实施;集总参数法在液压衬套静态特性分析方面无能为力,更不能获取内部流体运动规律等特征信息;键合图法相当复杂,工程推广应用价值较低;单向液-固耦合有限元法对液压衬套动态特性预测精度不足,缺乏实用性。

本研究以底盘隔震系统广泛应用的径向型液

压衬套为研究对象,采用 ADINA 软件平台提供的双向液-固耦合有限元分析方法,对液压衬套的静、动态特性以及内流体特性进行综合计算分析,初步探讨各个集总参数对液压衬套动态特性调整优化的影响规律。

1 径向型液压衬套静、动态特性的有限元计算分析

径向型液压衬套结构见图 1(a),与金属内管和外管硫化结合在一起的橡胶主簧起减震缓冲及支撑作用;橡胶主簧形成了两个对称布置的液室,内部密封有乙二醇;当受外部激励作用时,液体在连通两液室的惯性通道内流动,产生摩擦阻尼和质量阻尼。进行液压衬套力学性能有限元计算时,为避免浪费计算资源,需合理简化对结构变形和流场形态影响较小的局部结构。液压衬套固体和液体有限元计算简化模型分别见图 1(b)和(c)。

固体模型中与液体接触的壁面定义为固-液耦合面,选用 2 阶 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型描述橡胶材料;液体模型与固体接触部分定义为液-固耦合面,液体不可压缩;静态特性、动态特性计算分别选择静态或动态显式算法。

1.1 径向型液压衬套静态特性计算分析

静态特性分析时,在固体有限元模型内管施加静态径向位移载荷,计算得到所需作用力。液压衬套径向静刚度的计算值与试验值对比结果见图 2。由图 2 可见,计算值与试验值误差较小。

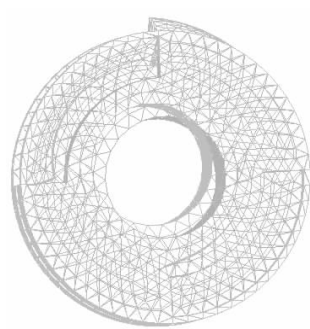
图 3(a)为固体模型的网格变形情况,图 3(b)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305085)

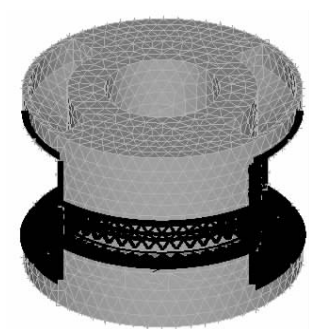
作者简介:李林(1980—),女,山西大同人,广东轻工职业技术学院讲师,博士,主要从事车辆振动分析与控制技术的研究工作。



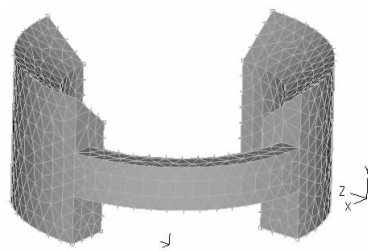
(a) 结构



(a) 固体模型变形示意

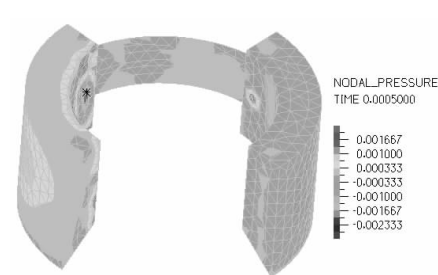


(b) 固体有限元模型



(c) 液体有限元模型

图 1 径向型液压衬套



(b) 液体模型压力分布

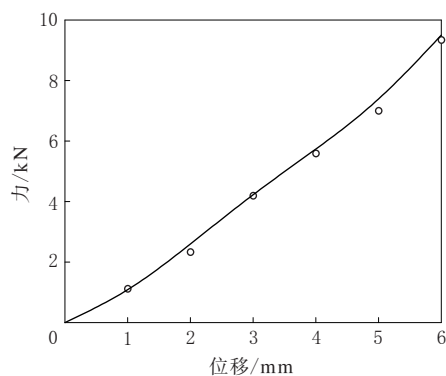
图 3 液压衬套静态特性有限元分析

励作用通过液体传递给外管,导致橡胶外管和液室壁面变形。

1.2 径向型液压衬套动态特性计算分析

液压衬套动态特性有限元计算时,在固体有限元模型内管表面施加振幅为 0.1 mm 的径向谐波位移载荷,分析其低频和高频的液体阻尼特性。液压衬套动态特性有限元计算结果与试验结果的对比见图 4~5。由图 4 和 5 可见,计算值与试验值较吻合。

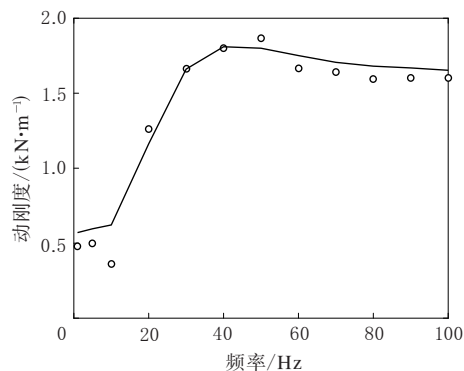
图 6 为激振频率 60 Hz 时两侧液室内压力分布,图 7 所示为激振频率 40 Hz 时惯性通道内液体



○—计算值;—试验值。

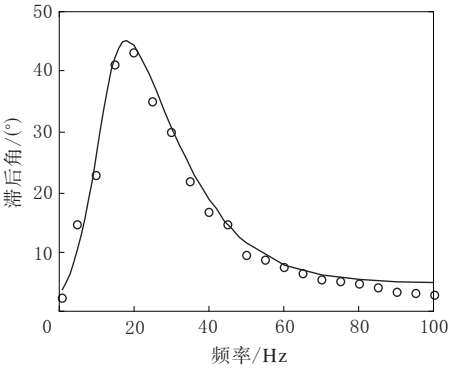
图 2 液压衬套径向静刚度有限元计算结果

为施加径向位移 1 mm 时液体内部压力分布情况,近似均布。由图 3 可见,橡胶内管所受外部激



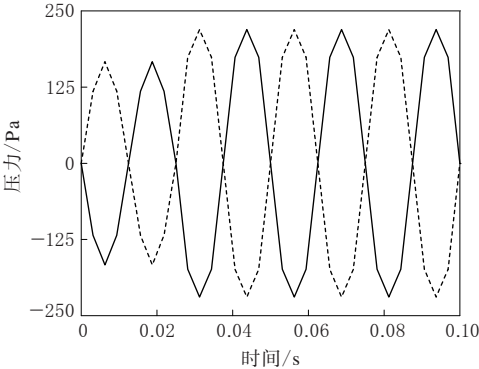
○—仿真值,——试验值;振幅为 0.1 mm。

图 4 液压衬套动刚度计算结果



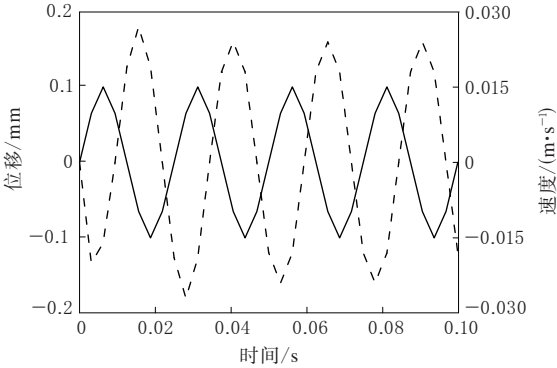
注同图4。

图5 液压衬套滞后角计算结果



——左液室，——右液室；振幅为0.1 mm。

图6 两侧液室压力分布



——位移，——惯性通道截面速度；振幅为0.1 mm。

图7 惯性通道截面速度变化

流速变化情况。由图6和7可见，由于惯性通道的节流作用，两侧液室压力变化迟滞现象明显，并且液体流动的速度方向与加载位移的方向相反。

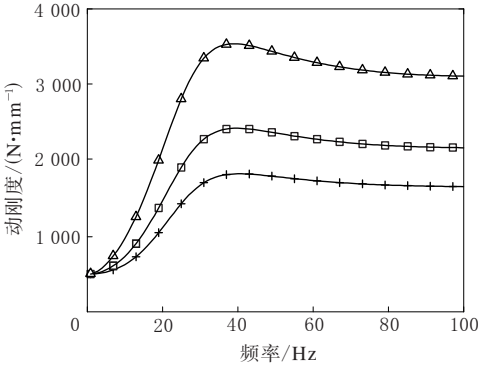
2 径向型液压衬套动态特性的影响因素分析

集总参数可用来描述液压衬套作用机理并与

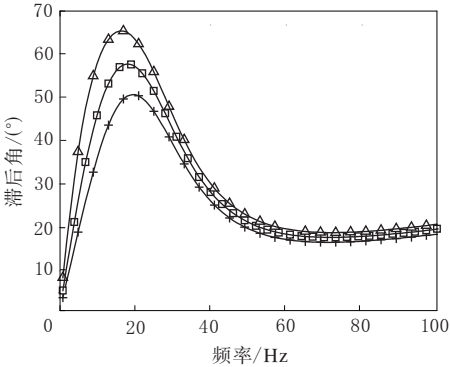
其结构几何特征相关，是影响液压衬套动态特性的主要因素^[13]。为有效地调整液压衬套动态特性，提高产品设计及性能优化的效率，需研究了解集总参数对液压衬套性能的影响规律变化情况。分析时，只研究单个参数变化的影响规律，不考虑参数间的相互作用。

2.1 等效活塞面积(A_p)

承受外部载荷作用时，橡胶主簧变形引起液室内液体流动，其作用类似活塞。活塞等效面积所排出液体的体积等于液室内液体体积的变化量。等效活塞面积变化对液压衬套动态特性的影响如图8所示。由图8可见，液压衬套动刚度和滞后角随着活塞等效面积的增大均呈增大趋势，而动刚度和滞后角达到峰值的频率变化不大。这主要是由于活塞等效面积增大后排出液体体积变大，惯性通道内液柱运动幅度加大，压力波动增加所导致的。



(a)动刚度



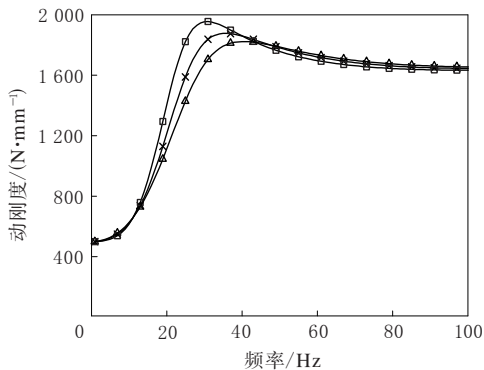
(b)滞后角

—— A_p ；□— $1.2A_p$ ；△— $1.5A_p$ 。

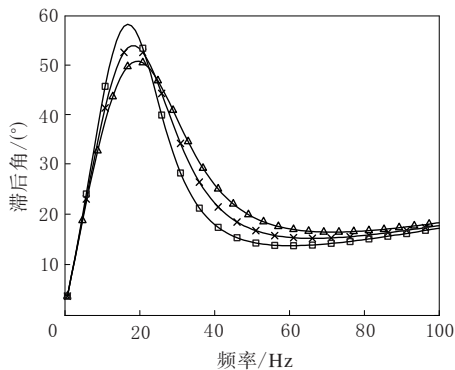
图8 等效活塞面积变化对液压衬套性能的影响

2.2 质量惯性系数(I_i)

图 9 示出了质量惯性系数变化对液压衬套动态特性的影响规律。由图 9 可见,质量惯性系数增大,液压衬套动刚度和滞后角的峰值变大,峰值出现的频率略有下降。这也验证了液压衬套的工作机理:质量惯性系数反映了惯性通道内液体阻尼机构的共振频率。



(a) 动刚度



(b) 滞后角

△— I_i ; ×— $1.2I_i$; □— $1.5I_i$ 。

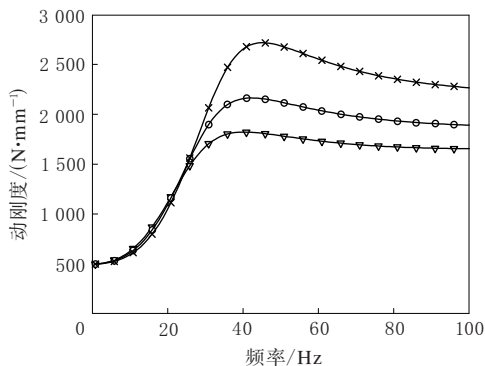
图 9 质量惯性系数变化对液压衬套性能的影响

2.3 体积刚度(K_v)

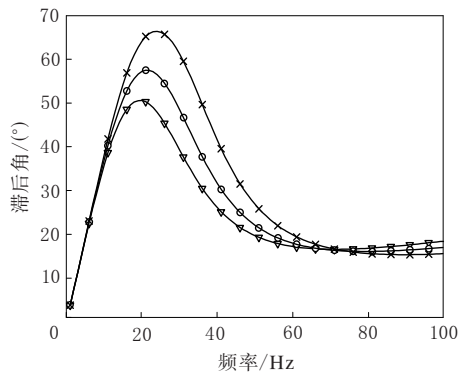
液压衬套液室体积刚度指液室单位体积变化下的压强变化量,可用来表征液室内压强变化时其体积膨胀的难易程度。体积刚度变化对液压衬套性能的影响见图 10。由图 10 可见,随着体积刚度增大,动刚度的峰值及高频稳定值均增大,滞后角峰值增大,峰值出现的频率升高。

2.4 体积膨胀阻尼(B_v)

液压衬套动态特性随体积膨胀阻尼的变化情况见图 11。由图 11 可见,动刚度、滞后角以及滞后角峰值出现的频率对体积膨胀阻尼的改变并不



(a) 动刚度



(b) 滞后角

▽— K_v ; ○— $1.2K_v$; ×— $1.5K_v$ 。

图 10 体积刚度变化对液压衬套性能的影响

敏感。频率大于 50 Hz 后,滞后角随着体积膨胀阻尼的增大而略有增大。

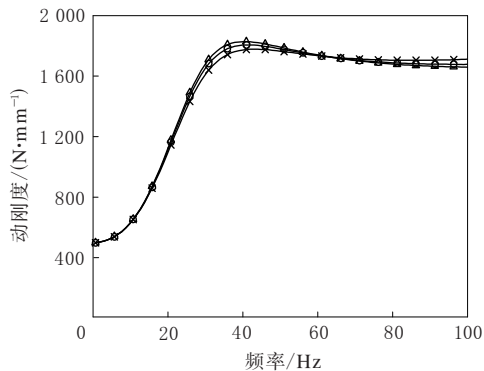
2.5 流量阻尼系数(R_l)

流量阻尼系数变化对液压衬套性能的影响见图 12。由图 12 可见,液压衬套的动态特性随着流量阻尼系数的增大而逐渐减小。

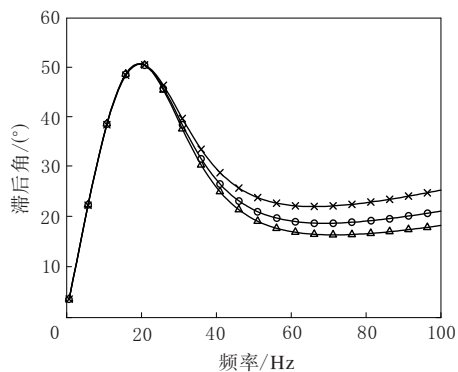
3 结论

(1)采用有限元方法对径向型液压衬套的静态及动态力学性能进行了计算分析,计算结果与试验结果较吻合。有限元静态力学分析直观体现了液压衬套受力后变形情况以及内部液体压力分布情况;有限元动态力学加载实时地反映了液压衬套液室内压力以及惯性通道内液体流速随动态载荷的变化情况。这为液压衬套减震机理和耐久性的研究提供了技术依据。

(2)对液压衬套动力学性能影响较大的众多集总参数进行了定性的分析评估。其中,液压衬



(a) 动刚度



(b) 滞后角

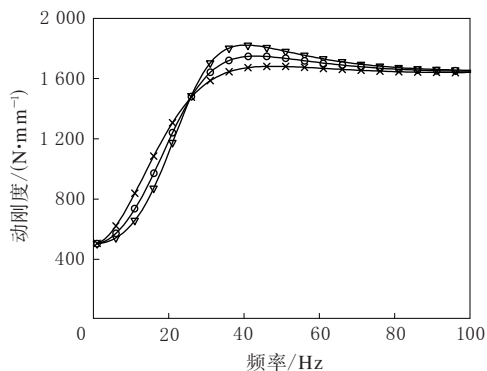
$\triangle-B_v$; $\bigcirc-1.2B_v$; $\times-1.5B_v$ 。

图 11 体积膨胀阻尼变化对液压衬套性能的影响

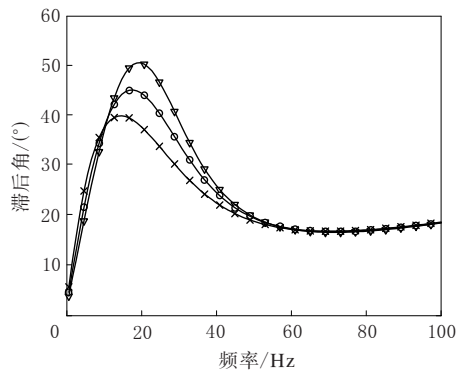
套动态特性对等效活塞面积变化最为敏感,随着等效活塞面积的增大,液压衬套动刚度、滞后角均有较大幅度的增长;液压衬套高频动刚度和滞后角受液室体积刚度变化的影响较为明显;液压衬套动刚度和滞后角的峰值以及峰值出现的频率受惯性通道惯性系数和阻尼系数的影响较为显著。

参考文献:

- [1] 上官文斌,徐驰. 汽车悬架控制臂液压衬套动态特性实测与计算分析[J]. 振动与冲击,2007,26(9):7-10.
- [2] Arzanpour S, Schubert B, Golnaraghi. Dynamic Stiffness Control in Hydraulic Bushing for Vehicle Engine with Cylinder Deactivation System[J]. Journal of Vibration Control, 2006, 16(3):59-67.
- [3] Arzanpour S, Golnaraghi M F. Development of an Active Compliance Chamber to Enhance the Performance of Hydraulic Bushings[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2010, 132(41):1-7.
- [4] Gil-Negrete N. Predicting the Dynamic Behaviour of Hydrobushings[J]. Shock and Vibration, 2005, 12(2):91-107.



(a) 动刚度



(b) 滞后角

$\nabla-R_i$; $\bigcirc-1.2R_i$; $\times-1.5R_i$ 。

图 12 流量阻力系数变化对液压衬套性能的影响

- [5] Brian Mahnken, Matt Borgerson. Application of NVH Countermeasures for Cabin Boom Isolation Using Hydraulic Bushing and Silicone Tuned Mass Absorber[A]. SAE. 2006-01-1681, 2006.
- [6] Svensson M. Hydrobushing Model for Multibody Simulations [D]. Lund, Sweden: Lund University, 2004.
- [7] Lu M, Ari-Gur J. Study of Dynamic Properties of Automotive Hydrobushing[J]. Advanced Vehicle Technologies, ASME Proc., DE, 2000, 106(8):135-140.
- [8] Christopherson J, Nakhaie Jazar G. Dynamic Behavior Comparison of Passive Hydraulic Engine Mounts. Part 2. Finite Element Analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 290:1071-1090.
- [9] Truong T Q, Ahn K K. A New Type of Semi-active Hydraulic Engine Mount Using Controllable Area of Inertia Track[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(4):247-260.
- [10] Shangguan W B, Lu Z H. Modelling of a Hydraulic Engine Mount with Fluid-structure Interaction Finite Element Analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 275(1):193-221.
- [11] Shangguan W B, Lu Z H. Experimental Study and Simulation of a Hydraulic Engine Mount with Fully Coupled Fluid-

- structure Interaction Finite Element Analysis Model[J]. Computers and Structures, 2004, 82: 1751-1771.
- [12] Zhang Y Q, Shangguan W B. A Novel Approach for Lower Frequency Performance Design of Hydraulic Engine Mounts [J]. Computers and Structures, 2006, 84(8): 572-584.
- [13] 李林. 液压衬套动态特性实测分析及其集总参数模型建模研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 183-188.

收稿日期: 2015-01-02

Nonlinear Characteristics of Hydraulic Bushing and Influential Factors

LI Lin^{1,2}

(1. Guangdong Industry Technical College, Guangzhou 510300, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In this study, the static and dynamic mechanical characteristics of hydro-bushing were studied, and the fluid characteristic in hydro-bushing was analyzed using two-way fluid-structure interaction nonlinear finite element analysis (FEA). It was found that the analysis result of FEA was in good accordance with the experimental test result, and this method directly reflected the movement and distribution of the liquid. The change of the dynamic characteristic of hydro-bushing was most sensitive to the equivalent area of piston among all the lumped parameters. With the increase of the equivalent area of piston, the dynamic stiffness and lag angle were greatly increased.

Key words: hydraulic bushing; nonlinear dynamic characteristics; fluid-structure interaction FEA; lumped parameter

天津废轮胎循环利用示范全国

中图分类号: X783.3 文献标志码: D

2015 年 5 月 23 日, 天津海泰环保科技发展有限公司生产的废轮胎改性沥青产品获得交通部同类产品唯一“交通产品认证”。该产品在废轮胎循环利用方面创立国内行业标准 2 项、国内行业施工标准 1 项、地方标准 2 项。

目前, 该公司在全国建立了 7 个废轮胎改性沥青产业化基地, 形成年产 30 万 t 的生产能力, 每年约有 1 200 多万条废旧轮胎被用于制作胶粉改性沥青材料, 可节约燃煤 4 520 t, 减少二氧化碳排放量 65 960 t, 有效解决了废旧轮胎回收与处理难题, 对我国废轮胎循环利用起到了示范作用。

随着我国汽车业的蓬勃发展, 废旧轮胎与日俱增。据中国橡胶工业协会废橡胶综合利用分会统计, 2014 年我国汽车保有量达到了 1.45 亿辆, 由此产生的废旧轮胎达到 2.99 亿条, 质量约为 1 400 万 t, 并以每年 5%~6% 的速度在增长。废旧轮胎的回收与处理已经成为世界公认的难题。

海泰环保从 2003 年开始联合南开大学化学学院、天津市市政工程研究院等单位, 组建了“天津市废轮胎铺面材料技术工程中心”, 聘请国内知名

的行业专家筹建废轮胎胶粉改性沥青课题组, 以废旧轮胎综合利用技术及成套设备技术研发为主要发展方向, 着力解决行业关键技术, 搭建废橡胶资源综合再利用工程化技术服务平台。

该公司专注于废轮胎路面新材料技术研发与产业化应用, 取得了多项行业领先的技术成果, 突破了胶粉与沥青混合料改性、精细分级和纤维分离、热裂解制燃油和活性炭黑、粉碎物料高温动态脱硫和延长胶粉改性沥青有效使用期五大关键技术。该公司还建成了年处理废轮胎 2 万 t 的废轮胎热裂解生产示范基地, 实现了废轮胎综合利用全产业链规划发展, 即从废轮胎回收→废胶粉制造→废胶粉改性沥青+高品质环保再生胶产业化制造。

目前, 该公司自主研发的废轮胎胶粉改性沥青材料和废轮胎胶粉改性沥青成套生产设备及产品制备工艺, 使材料存储使用有效期达到国外同类产品的 45 倍, 同时可以有效降低路面行车噪声, 成本相对较低, 已在荣乌高速、铜黄高速、津汕高速天津段、唐津高速天津段等全国多个省市高速公路、省国道成功铺设里程超过 2 000 km, 取得了良好的环境效益和经济效益。

(摘自《中国化工报》, 2015-05-29)