

特约来稿

电池包壳体用橡胶密封件密封性能的研究

柯玉超^{1,2,3}, 夏迎松^{1,2,3}, 吴 蕾^{1,2}, 方炳虎^{1,2,3}

[1. 安徽中鼎密封件股份有限公司, 安徽 宁国 242300; 2. 高性能橡胶材料及制品安徽省重点实验室, 安徽 宁国 242300; 3. 清华大学(机械系)-安徽中鼎密封件股份有限公司橡塑密封联合研究中心, 北京 100084]

摘要:设计两种截面结构(方案1为非对称结构, 方案2为对称结构)的新能源汽车动力电池包壳体用橡胶密封件, 利用有限元仿真分析橡胶密封件的力学性能, 并与实测结果进行对比; 通过防水试验验证橡胶密封件的密封效果。结果表明: 与方案2橡胶密封件相比, 方案1橡胶密封件的刚度更小, 有限元仿真结果与实测结果相差很小, 有限元仿真能够较好地分析和预测橡胶密封件的力学性能; 两种方案橡胶密封件的最大应变非常接近, 但方案1橡胶密封件的最大应变在底部, 方案2橡胶密封件的最大应变在直条密封筋与环形密封筋交接处, 且上下面的接触应力相同, 方案2橡胶密封件的截面结构有利于提升密封性能, 并保持长久的密封效果; 两种方案橡胶密封件均具有良好的实际密封效果。

关键词:电池包壳体; 橡胶密封件; 密封性能; 力学性能; 有限元分析; 仿真

中图分类号: TQ336.4⁺2; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)07-0483-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.07.0483



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

新能源汽车动力电池包作为新能源汽车的动力来源, 其内部包含一系列串、并联单体电池和复杂电路, 是新能源汽车的核心部件。为了保证电池包的安全使用, 防止外界物质侵入和内部电流泄漏, 电池包壳体需要进行密封设计, 满足电器设备外壳防护等级要求。电池包的密封一般要达到IP67防护等级, 确保电池组不会因进水而破坏^[1]。因此, 电池包的密封设计是保证电动汽车动力系统安全的重要因素之一^[2]。

目前, 市场上电池包密封件主要分为3类, 分别是橡胶密封件类、胶粘剂类、海绵胶带类。李书鹏等^[3]介绍了海绵胶带在电池包壳体密封上主要的考核指标。虽然海绵胶带在电子设备密封^[4]和汽车车门密封^[5-6]等方面广泛应用, 但海绵类材料

力学性能复杂^[7], 其在电池包中密封性能的系统研究尚未被报道。针对非发泡类密封件, 李东锋等^[8]基于橡胶密封垫片形式提出并分析了3种典型的电池包壳体密封结构的优劣, 验证了满足IP66防护等级以上防水要求的密封结构。橡胶密封件在其他方面应用广泛^[9], 密封要求甚至较电池包更为严格、使用工况更加恶劣, 因此橡胶密封件完全可用于电池包密封。随着电动汽车产量的提高及主要车型的系列化, 橡胶密封件将以其可重复利用、密封可靠和装配方便的优点受到青睐。

本工作将通过有限元仿真分析与试验相结合的方法, 研究两种截面结构(方案1为非对称结构, 方案2为对称结构)的新能源汽车动力电池包壳体用橡胶密封件的力学性能, 获得橡胶密封件的应变与接触应力分布, 并通过密封防水试验对橡胶密封件实际密封效果进行验证, 为橡胶密封件设计和使用提供依据。

1 橡胶密封件的材料性能与结构

电池包壳体橡胶密封件采用的三元乙丙橡胶(EPDM)胶料的邵尔A型硬度为50度, 弹性优异, 耐水和油等介质性能良好。

采用Yeoh本构模型描述橡胶材料在大变形情



作者简介:柯玉超(1988—), 男, 安徽宁国人, 现任安徽中鼎密封件股份有限公司中央研究院先期开发经理, 2016年毕业于清华大学, 获博士学位, 主要从事橡塑密封技术、橡胶制品及相关前沿技术研究, 负责新能源汽车相关密封产品开发, 先后参与多项国家自然科学基金、国家重点专项项目, 主持国家重点研发计划子任务1项, 作为主要负责人参与安徽省科技重大专项1项, 发表学术论文17篇, 授权专利6项。

E-mail: hgckeyuchao14@163.com

况下应力-应变非线性关系。Yeoh模型是一种基于应变能函数(W)来描述橡胶材料超弹性特性的模型,可以表述为

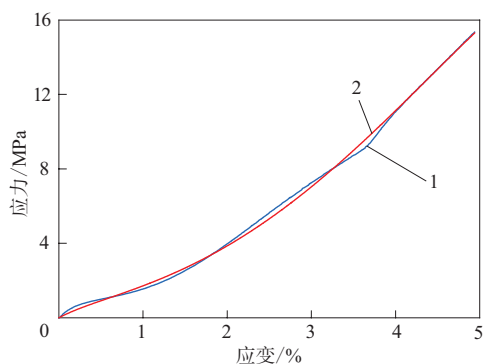
$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (I_1 - 3)^i + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (1)$$

式中, I_1 为第1变形张量不变量, J 为弹性体积比, C_{i0} 和 d_k 为材料参数。

取 I_1 的前3项和 J 的第1项,得到Yeoh模型的三阶形式

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_2 - 3)^2 + C_{30} (I_3 - 3)^3 + \frac{1}{d_1} (J - 1)^2 \quad (2)$$

基于Yeoh本构模型仿真和按照GB/T 528—2009实测得到的EPDM胶料的应力-应变曲线如图1所示。从图1可以看出,仿真曲线和实测曲线重合良好,Yeoh本构模型能够较好地描述EPDM胶料的单向拉伸性能。



1—实测曲线;2—仿真曲线,拟合参数 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 和 d_1 分别为0.409, 2.10×10^{-4} , -1.53×10^{-4} 和 2.45×10^{-4} 。

图1 EPDM胶料的应力-应变曲线

在保证密封效果的同时便于批量安装,电池包橡胶密封件形状应与电池包外边缘吻合,且每隔一定距离设定安装孔,安装孔内部有金属环以限制橡胶密封件压缩量,防止过度压缩。图2示出了试验用电池包壳体橡胶密封件外形,其有内凹与外凸两种拐角,具有代表性。本研究通过截面结构设计来确保电池包上下面板对橡胶密封件的挤压接触。图3示出了两种方案橡胶密封件的截面结构,图4为两种方案橡胶密封件样段。

2 橡胶密封件样段的力学性能分析

橡胶密封件的力学性能直接关系到其使用性能,通过试验与有限元仿真分析,可确定橡胶密

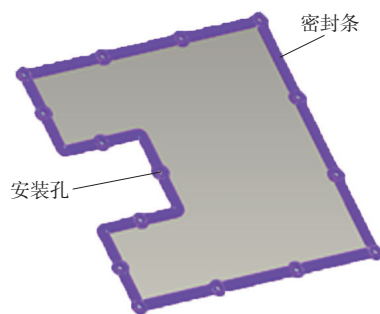
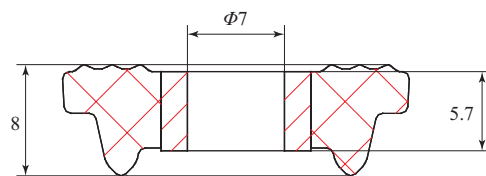
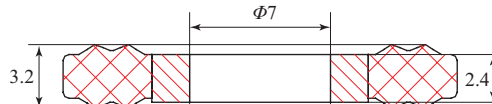


图2 电池包壳体橡胶密封件外形



(a) 方案1橡胶密封件



(b) 方案2橡胶密封件

图3 两种方案橡胶密封件的截面结构



(a) 方案1橡胶密封件



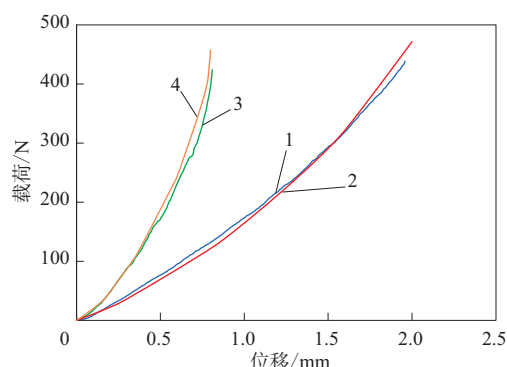
(b) 方案2橡胶密封件

图4 两种方案橡胶密封件样段

封件样段的力学性能,以评估橡胶密封件的密封性能。

基于橡胶密封件样段建立几何模型,以Yeoh模型(拟合参数见图1)对橡胶密封件样段进行受力分析,获取橡胶密封件样段在上下平板压缩下的力学响应。

实测和有限元仿真获得的两种方案橡胶密封件样段的载荷-位移曲线如图5所示。



方案1橡胶密封件样段:1—实测曲线,2—仿真曲线;方案2橡胶密封件样段:3—实测曲线,4—仿真曲线。

图5 两种方案橡胶密封件样段的载荷-位移曲线

从图5可以看出,与方案2橡胶密封件样段相比,方案1橡胶密封件样段的刚度更小,可以允许更大的装配或制造公差。但方案1橡胶密封件所用的胶料和金属材料远多于方案2橡胶密封件:方案1橡胶密封件每200 mm的质量为19.8 g,方案2橡胶密封件仅为6.75 g。

从图5还可以看出,有限元仿真结果与实测结果相差很小,有限元仿真能够比较好地分析和预测橡胶密封件的力学性能。

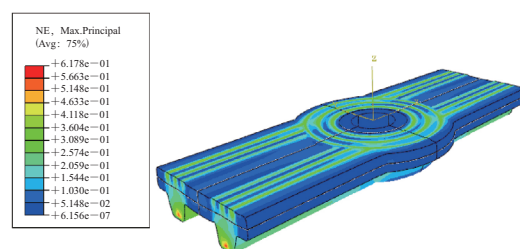
图6和7示出了有限元仿真获得的两种方案橡胶密封件样段在设计压缩率下的应变和接触应力分布情况。

从图6和7可以看出,方案1橡胶密封件样段的最大应变与方案2橡胶密封件样段非常接近,但方案1橡胶密封件样段的最大应变在底部,而方案2橡胶密封件样段的最大应变在直条密封筋与环形密封筋交接处。方案1橡胶密封件样段上部因存在6条密封筋,筋上最大接触应力较小,约为1.8 MPa;底部密封筋接触应力较大,约为2.9 MPa。方案2橡胶密封件样段因上下面结构对称,密封最薄弱区域最大接触应力为3.2 MPa。因此,方案2橡胶密封件的截面结构有利于提升密封性能,并保持长久的密封效果。

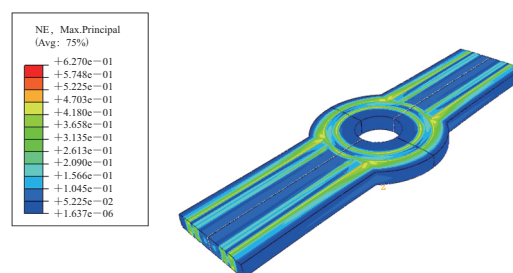
3 橡胶密封件的防水试验

由于密封问题的复杂性,目前还缺乏判定橡胶密封件密封可靠性的标准^[10],只能通过试验来验证橡胶密封件的密封效果。

为测试橡胶密封件是否能够满足防水要求,

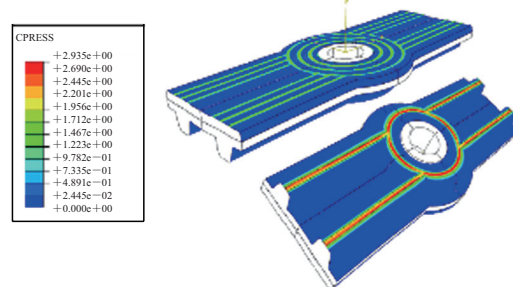


(a) 方案1橡胶密封件样段(压缩率为29%)

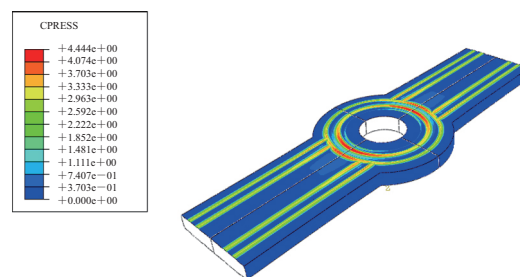


(b) 方案2橡胶密封件样段(压缩率为25%)

图6 两种方案橡胶密封件样段在设计压缩率下的应变仿真分布



(a) 方案1橡胶密封件样段(压缩率为29%)



(b) 方案2橡胶密封件样段(压缩率为25%)

图7 两种方案橡胶密封件样段在设计压缩率下的接触应力仿真分布

采用2块平板的夹具代替电池包壳体,夹具上开有与橡胶密封件安装孔对应的通孔,通过螺栓和螺母对夹具进行固定。利用遇水变色的试纸(遇水变色,水挥发后颜色仍然保留)检测是否有水进入

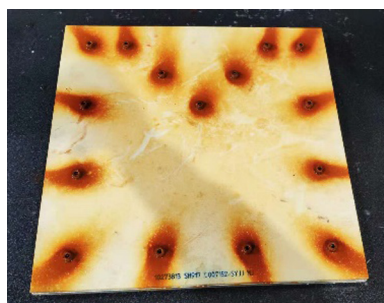
夹具内部。

试验前,在夹具对应的橡胶密封件内边缘处粘贴试纸,试纸将密封边缘处所有可能发生泄漏的点都铺设完成后,将橡胶密封件按孔位装配在夹具之间,通过螺栓螺母连接、固定,在夹具间形成密封。将夹具缓慢浸入深1.5 m的水中开始试验,静置168 h后取出。擦去夹具外表水分后打开,观察试纸是否有颜色变化,确定夹具内部是否有水浸入。

图8示出了夹具在水中的状态及试验后从水中取出时的状态。从图8可以看出,由于浸泡时间(168 h)过长,暴露在水中的螺栓和螺母发生了锈蚀。



(a) 夹具在水中的状态



(b) 夹具从水中取出时的状态

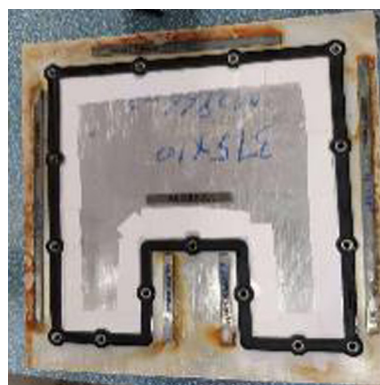
图8 浸泡试验前后的夹具对比

图9示出了浸泡试验前后的橡胶密封件。从图9可以看出,橡胶密封件内侧的试纸没有变化,证明水没有浸入到夹具内部,橡胶密封件的密封性能合格。两种方案橡胶密封件均可以满足在浸水168 h后,夹具内部没有浸水,仍保持良好的密封性能。

两种方案橡胶密封件虽然在接触应力大小与分布上存在差异,但都具有良好的密封效果。方案1橡胶密封件可以提供更多的变形空间,更好地适应电池包壳体的变形和翘曲等,但其上下面不



(a) 试验前



(b) 试验后

图9 浸泡试验前后的橡胶密封件对比

对称,造成上下面的接触应力差异较大。从密封角度看,橡胶密封件上下面的密封要求是相同的,其不对称的结构可能会造成其中一面的密封性能较弱,对整体密封性能不利。

为进一步验证方案2橡胶密封件的极限工况,在橡胶密封件周边增加金属垫片控制加载量。结果表明,在压缩率只有10%(压缩量为0.32 mm)的情况下,橡胶密封件依然能够保持在1.5 m水深下168 h不泄漏的密封性能。

方案2橡胶密封件样段在10%压缩率下的应变与接触应力有限元仿真结果如图10所示。从图10可以看出,方案2橡胶密封件最大主应变为20%,密封筋上最小接触应力为1.6 MPa。方案2橡胶密封件也具有较大的公差包容性。

方案1和2橡胶密封件具有1.5 m水深下168 h不泄漏的密封性能,其密封性能远超IP67防护等级要求(1 m水深下0.5 h不泄漏)。但电池包壳体橡胶密封件的使用是长期的^[11-12],如何确保橡胶密封件在安装后数年乃至数十年仍然保持密封性能

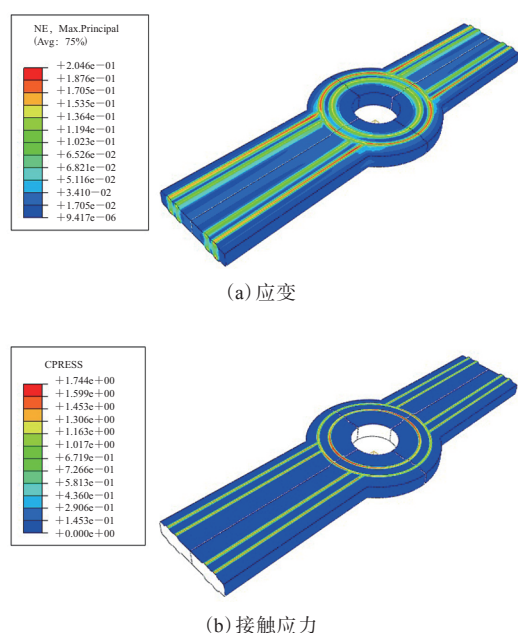


图10 方案2橡胶密封件样段在10%压缩率下的应变与接触应力仿真分布是下一步研究的重点。

4 结论

(1) 采用截面非对称结构橡胶密封件虽然能够提供更大的变形,更好地适应较大的电池包尺寸公差,但是非对称结构橡胶密封件上下密封面接触应力差别很大,接触应力较小的一侧不利于提高密封性能;截面对称结构橡胶密封件上下密封面接触应力相同,有利于提高整体密封性能。

(2) 截面非对称结构和对称结构橡胶密封件均能够在1.5 m水深下168 h不泄漏。

(3) 截面对称结构橡胶密封件在压缩率为10%、最小接触应力为1.6 MPa条件下依然能够在1.5 m水深下168 h不泄漏,密封性能良好。

参考文献:

- [1] 彭睿. 湿热气候下电动汽车动力电池包环境适应性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [2] 何向明, 冯旭宁, 欧阳明高. 车用锂离子动力电池系统的安全性[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 32-38.
- [3] 李书鹏, 李波. 发泡硅橡胶在电池包壳体密封圈上的应用研究[J]. 汽车零部件, 2018(5): 76-78.
- [4] Song L, Lu A, Feng P, et al. Preparation of Silicone Rubber Foam Using Supercritical Carbon Dioxide[J]. Materials Letters, 2014, 121: 126-128.
- [5] Zhu W, Wang J, Lin P. Numerical Analysis and Optimal Design for New Automotive Door Sealing with Variable Cross-section[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2014, 91: 115-126.
- [6] Dikmen E, Basdogan I. Material Characteristics of a Vehicle Door Seal and Its Effect on Vehicle Vibrations[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(11): 975-990.
- [7] 柯玉超, 王识君, 吴蕾. 发泡硅橡胶本构模型与力学性能的研究[J]. 橡胶工业, 2019, 66(3): 177-183.
- [8] 李东锋, 金利芳. 纯电动汽车电池包密封结构研究[C]. 第九届河南省汽车工程技术研讨会论文集. 许昌: 河南省汽车工程学会, 2012.
- [9] 柯玉超. 航空橡胶密封结构关键性能与成型工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [10] 许治国, 周安伟, 王晓英, 等. 橡胶密封圈密封性能预判方法研究[J]. 橡胶工业, 2016, 63(5): 297-300.
- [11] 柯玉超, 王识君, 吴蕾. 基于加速老化的橡胶密封件使用寿命评估[J]. 液压气动与密封, 2018(12): 79-83.
- [12] 丁玉乔, 李成杰, 杨征, 等. 在模拟隧道地层环境介质中三元乙丙橡胶密封条老化行为和老化机理的研究[J]. 橡胶工业, 2019, 66(5): 323-331.

收稿日期: 2020-02-10

Study on Sealing Performance of Rubber Seals for Battery Pack Shell

KE Yuchao^{1,2,3}, XIA Yingsong^{1,2,3}, WU Lei^{1,2}, FANG Binghu^{1,2,3}

[1. Anhui Zhongding Sealing Parts Co., Ltd, Ningguo 242300, China; 2. Key Laboratory of High-Performance Rubber & Products of Anhui Province, Ningguo 242300, China; 3. Tsinghua University (The Department of Mechanical Engineering) - Anhui Zhongding Sealing Parts Co., Ltd Joint Research Center for Rubber and Plastic Seals, Beijing 100084, China]

Abstract: Two kinds of the rubber seals were designed for the power battery pack shell of new energy vehicle with different cross-section structure. Scheme 1 had asymmetric structure and scheme 2 was symmetric. The mechanical properties of the rubber seals were simulated and analyzed by using finite element method, and compared with the experimental testing results. The sealing effect was then verified by the waterproof test. The results showed that, compared with the scheme 2 seal, the stiffness of the scheme 1

seal was smaller, the difference between the finite element simulated results and the testing results was very small, and the finite element simulation could effectively analyze and predict the mechanical properties of the rubber seal. The maximum strain values of the rubber seals from these two designs were very close. However, the maximum strain of the scheme 1 seal occurred at the bottom, and the maximum strain of the scheme 2 rubber seal located at the joint of straight sealing bar and ring sealing bar. The contact stress of the scheme 2 rubber seal was the same on the top and bottom, which was beneficial to the sealing performance and long-term sealing effect. Moreover, both seals provided good sealing effect.

Key words: battery pack shell; rubber seal; sealing performance; mechanical property; finite element analysis; simulation

橡胶助剂行业尽快稳供应及拓应用 新冠肺炎疫情使原本低迷的橡胶助剂市场雪上加霜。据统计,第1季度我国橡胶助剂行业销售收入为54.4亿元,同比下降19%;总产量为28.5万t,同比下降12%;出口量为7.9万t,同比下降14%;出口额为11.7亿元,同比下降34%;行业利润率同比下降44%;部分产品价格已经严重倒挂。业内人士建议,橡胶助剂行业要尽快稳定供应、开拓应用新领域以渡过难关。

(1) 出口订单急剧下滑。全球疫情对下游轮胎市场影响很大,消费不旺,出口不畅,再加上美国准备对于原产泰国、越南、韩国、中国台湾地区的轮胎进行反倾销、反补贴调查,国内橡胶助剂企业正面临艰难时刻。

(2) 部分产品严重亏损。疫情让原油价格一落千丈,但防老剂TMQ主要原材料同时也是防老剂6PPD上游原料的丙酮却逆势上行,价格由2020年1月的5 600元,先低位运行至4月初的3 900元,然后一路上扬,目前已涨至8 400元。然而防老剂TMQ和6PPD的价格却没能跟随丙酮价格同步上涨,多数企业处于亏损状态,利润空间早已无从谈起。防老剂价格低位运行的同时,促进剂价格同样跌入谷底。目前促进剂主流产品CBS和TBBS市场低迷,国内外需求大幅下滑,为维持运转,企业基本无利出货。

(3) 保供市场和拓展应用。因产业链传导效应,即使疫情结束,出口形势在较长时间内依然不容乐观。此时信心对行业来说非常重要,越是困难时刻越要激发信心。中国橡胶工业协会橡胶助剂专委会相关领导表示,全球橡胶助剂生产看中

国,一旦行业陷入大面积亏损,将波及整个汽车和轮胎产业链供应,因此号召橡胶助剂生产企业抱团取暖,根据订单情况合理安排生产,稳定市场供应,减少恶性竞争,让橡胶助剂产品价值回归,希望企业持续加大科技创新力度,开拓更多非轮胎终端应用领域,增强企业的抗风险能力,渡过难关。橡胶助剂企业希望政府加强宏观调控,在税收等方面给予企业政策支持,促进行业良性发展;同时希望行业协会发挥政府与企业间的纽带作用,加强互动,推动企业达成共识,齐心协力维护市场健康发展。

(摘自《中国化工报》,2020-05-29)

一种新型车用橡胶管生产设备 由河南方元机电有限公司申请的专利(公布号 CN 209453980U,公布日期 2019-10-01)“一种新型车用橡胶管生产设备”,涉及的车用橡胶管生产设备包括承托固定板、第1和第2电动机、减速机、料筒、进料口、出料口、电动机底座、第1和第2转轴、搅拌叶、刮刀、电热管、吸风机、第1和第2连接管、水汽吸收箱、排风口、螺旋输送片。料筒顶端右部设置进料口,料筒右端底部设置出料口;承托固定板顶端设置电动机底座;减速机的输出端设置第1转轴,第1转轴上设置多组搅拌叶;水汽吸收箱内设置干燥剂吸收层,水汽吸收箱顶端设置排风口;第2电动机的输出端设置第2转轴,第2转轴上设置螺旋输送片。该车用橡胶管生产设备可避免原材料粘附在料筒壁上,并能有效除潮,使料筒内原材料更干燥,混合更均匀,排料更顺畅。

(本刊编辑部 赵敏)