

硫化模拟分析技术在弹性车轮弹性体元件硫化工艺设计中的应用

邱立言, 侯明, 段小乐, 罗卫军, 黄纲乐
(株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 研究硫化模拟分析技术在弹性车轮弹性体元件硫化工艺设计中的应用。首先采用经验公式计算出弹性车轮弹性体元件硫化时间,在此基础上运用硫化模拟分析技术,通过模型构建、网格划分及过程参数设置,对弹性车轮弹性体元件硫化工艺进一步进行模拟分析,将硫化时间缩短16.7%。弹性车轮弹性体元件溶胀指数、关键尺寸(厚度)和垂向刚度测试结果表明,与经验公式计算结果相比,弹性车轮弹性体元件硫化模拟分析结果与实际生产情况更相符,硫化温度和硫化程度预测更准确,所得产品尺寸和性能更佳。实际生产中,该技术应用于橡胶制品硫化工艺设计可以减少试模次数和研发成本,提高产品质量。

关键词: 弹性车轮;弹性体元件;硫化模拟分析;硫化工艺设计;硫化时间;硫化程度

中图分类号: O241.82;TQ336.4⁺²

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2020)06-0455-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.06.0455



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

橡胶在一定的压力、温度、时间下发生硫化反应而使其内部交联才能具有一定的应用价值,而硫化时间对橡胶内部的硫化程度具有较大影响,适宜的硫化程度能使橡胶具有更佳的使用性能^[1-3]。目前国内大多橡胶制品生产厂家以经验确定硫化时间,这种方法适用于结构简单、形状规则的橡胶制品,若遇到结构复杂的异形橡胶制品,则需耗费较多的时间和财力来摸索最佳硫化条件,生产成本也随之提高。近年来,兴起了一种硫化模拟分析技术,其可对硫化过程中产品任意一处的硫化程度及温度进行预测,极大地提高了硫化工艺设计的效率,降低了生产成本。

弹性车轮(见图1)具有降低车辆运行噪声、缓和轨道冲击、减少轮轨间磨耗、延长车辆使用寿命等优势,被逐渐推广应用。弹性车轮中最重要的弹性体元件是一种异形橡胶件,其性能对弹性车轮的行驶安全至关重要^[4-6]。本工作选择一种弹性车轮用弹性体元件,为确保其生产过程工艺参数的准确性和稳定性,采用经验公式设计硫化时间后,运用德国Magma公司提供的Sigmasoft模拟分

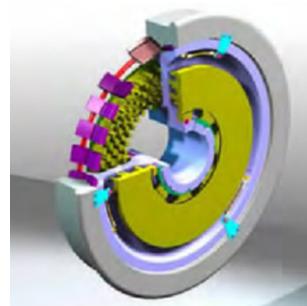


图1 弹性车轮示意(玫红色部分为弹性体元件)

析软件进一步对硫化工艺进行模拟分析,以有效缩短硫化时间,并测试硫化产品的尺寸和性能,验证硫化模拟分析技术的准确性。

1 研究对象

选用的弹性车轮弹性体元件为V形结构的纯橡胶制品,其主体材料为天然橡胶(NR),结构及三维图如图2所示。

2 硫化经验设计

橡胶制品的硫化时间与厚度关系较大,而无转子硫化仪测出的正硫化时间(t_{90})一般只适用于厚度小于6 mm的橡胶制品,若厚度大于6 mm,则硫化时间应在 t_{90} 的基础上延长。延长时间取决于胶料的导热速率,一般认为厚度每增加1 mm,硫

作者简介: 邱立言(1995—),男,安徽合肥人,株洲时代新材料科技股份有限公司助理工程师,硕士,主要从事轨道交通产品工艺设计与开发工作。

E-mail: 525912708@qq.com

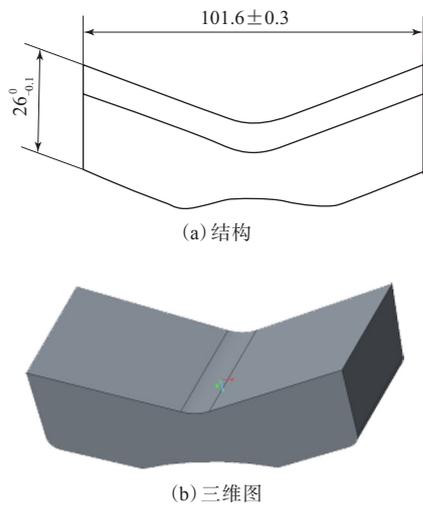


图2 弹性车轮的弹性体元件结构示意图

化时间延长47 s^[7]。本产品的硫化时间(t , min)计算公式为

$$t = (h - 6) \times 47 / 60 + t_{90} \quad (1)$$

式中, h 为产品厚度。

本产品采用NR胶料,其最适宜硫化温度为143 ℃。通过测试,本产品所用胶料在143 ℃时的 t_{90} 为12.67 min,产品最厚处为26 mm,计算得本产品的硫化时间为28.34 min,考虑到进出模操作及合模过程中的热量损失,延长7.66 min的进出模安全操作时间,因此设计硫化时间为36 min。

3 硫化模拟分析

3.1 模拟计算原理

胶料硫化时,在模具将热量传递到胶料的同时伴随着交联反应。因此,胶料内部某个部位的温度与其所在的空间、时间均有关。施斌等^[8]介绍了一种橡胶的瞬态传热方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (k \frac{\partial T}{\partial \varphi}) + Q \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; C_p 为比热容; T 为温度; r, φ, z 分别为圆柱坐标系的3个数轴; k 为热导率; Q 为橡胶的生热率。橡胶的比热容和密度也对其导热性能影响较大^[9]。在Sigmasoft软件中,默认橡胶的密度为常数,比热容可随温度和硫化程度变化。

硫化过程的复杂化学反应可以用动力学模型进行定量描述,选择Sigmasoft软件中提供的Deng-Isayev模型对硫化过程进行描述,其动力学方程为

$$C(t) = n(k_0 e^{-E_a/RT})^{1/n} C^{n-1/n} (1 - C)^{1+1/n} \quad (3)$$

式中: $C(t)$ 为硫化程度关于时间的导数; n 为反应级数; C 为硫化程度; k_0 为反应时间; E_a 为硫化反应活化能; R 为气体常数,数值为8.314 3 J · mol⁻¹ · K⁻¹。

3.2 模型构建

采用弹性体元件结构设计专用高压模具进行硫化,这种模具包含注胶系统、上模、中模、下模。高压模具有注胶系统,为确保模拟分析更符合实际生产情况,需额外创建注胶系统中的流道部分。模具、流道和产品的三维模型纵切剖面如图3所示。

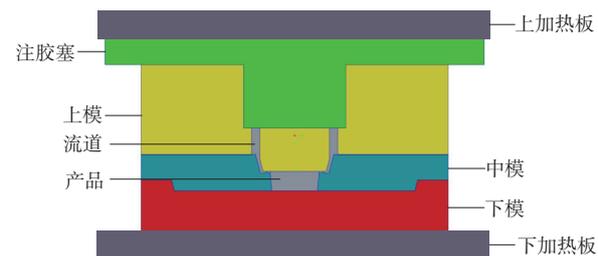


图3 模具、流道和产品的三维模型纵切剖面示意图

根据材料种类的不同,分别测试模具、胶料、流道比热容、热导率和密度等参数,如表1和2所示。其中,注胶塞材料为38CrMoAl,上模、中模和下模材料为42CrMo,流道及产品材料的主体材料为NR。绘制上、下加热板,设置胶料与模具界面间的热传导常数为800 W · m⁻² · K⁻¹,模具与模具(或加热板)界面间的热传导常数为10 000 W · m⁻² · K⁻¹。

表1 金属材料热物性参数

材 料	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	密度/ (Mg · m ⁻³)
38CrMoAl (423.15 K)	37.70	496.0	7.710
42CrMo (413.15 K)	47.70	490.0	7.870

表2 橡胶材料热物性参数

温度/K	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	密度/ (Mg · m ⁻³)
373.15	0.241 5	1 400	1.060
383.15	0.246 7	1 430	1.060
393.15	0.251 9	1 460	1.060
403.15	0.257 0	1 490	1.060
413.15	0.262 2	1 520	1.060
423.15	0.265 7	1 540	1.060

3.3 网格划分

对于形状不规则的模型和产品,将其微分为一个个细小的方形网格,对每个网格采用硫化动力学公式进行计算,这是Sigmasoft软件模拟硫化过程的基本原理。为了使计算更为准确,要求每个部件的单个方向至少划分3层网格,综合网格数量及计算时间,将模具及上、下加热板以 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的精度划分网格,将流道及产品以 $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 的精度划分网格。模具及流道和产品网格化结果如图4所示。

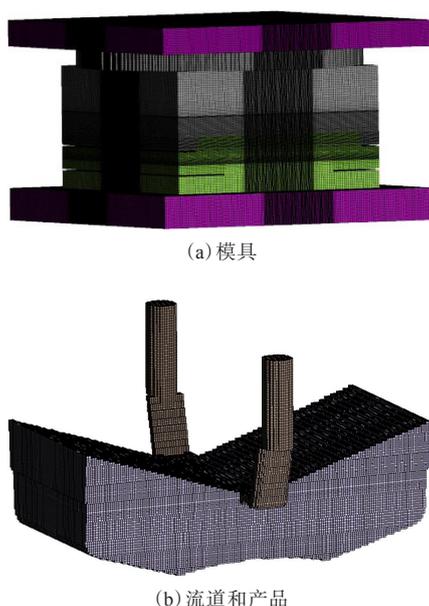


图4 模具及流道和产品网格化结果

3.4 参数设置

为更准确地模拟实际硫化过程,设置模具初始温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$,胶料初始温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (返炼后),进出模时间为 8 min ,模具预热时间为 3 h ,上加热板温度为 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$,下加热板温度为 $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。硫化时间设置为 36 min ,每隔 3 min 取一个测量点输出此时的温度和产品的硫化程度等信息。

3.5 过程模拟

3.5.1 预热阶段

预热 3 h 后模具温度分布如图5所示,可以看出,模具预热 3 h 后,在型腔内任取4点测量温度平均值为 $144.58\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合胶料配方要求,即预热 3 h 后可进行硫化作业。

3.5.2 硫化阶段

在硫化过程中,产品外部由于先接触到热量

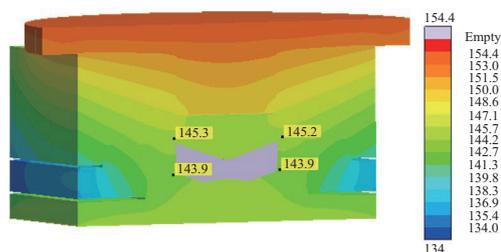


图5 预热 3 h 后模具温度分布云图

而迅速发生硫化反应,与此同时热量逐渐传递至产品内部,由于橡胶热导率较低(如表2所示),热量在橡胶中的传导速度较慢,因此在外表面硫化完成后,产品内部硫化程度还较低。在Sigmasoft软件中,产品最低硫化程度达到95%以上即可视为硫化完成。

硫化 33 min 时产品纵向剖面的硫化程度分布和温度分布分别如图6和7所示。

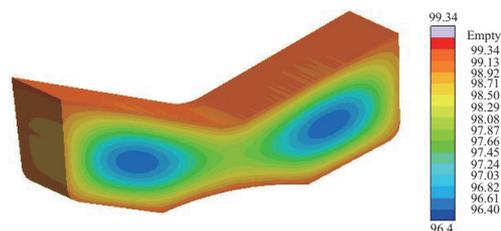


图6 硫化 33 min 时产品纵向剖面的硫化程度分布云图

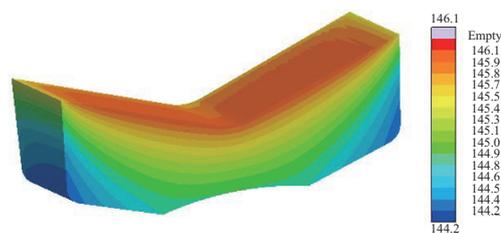


图7 硫化 33 min 时产品纵向剖面的温度分布云图

从图6和7可以看出,当硫化反应进行 33 min 时,产品的硫化程度达到 $96.40\%\sim 99.34\%$,此时产品温度为 $144.2\sim 146.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,也是该配方的适宜硫化温度。因此依据模拟分析技术得出硫化时间 33 min 即可满足硫化条件,较经验公式法设计时间缩短 3 min 。

这是由于产品形状并不规则,在经验公式中选取的 26 mm 厚度是指该产品最厚处的厚度,而其他部位的厚度均小于 26 mm 。且经验公式并没有考虑到模具材料不同和进出模时间对传热的影响。因此,模拟计算分析得出的硫化时间短于经

验公式计算结果。

3.5.3 空冷阶段

产品在出模后依然具有较高的温度,胶料内部依然进行着交联反应,硫化程度还可进一步增大。因此硫化时间33 min的设定仍有进一步优化的空间。选择产品外表面A和B两点及内部C和D两点作为测量点(如图8所示),设定硫化时间为33 min,观察硫化程度和温度随硫化时间的变化情况,结果如图9和10所示。

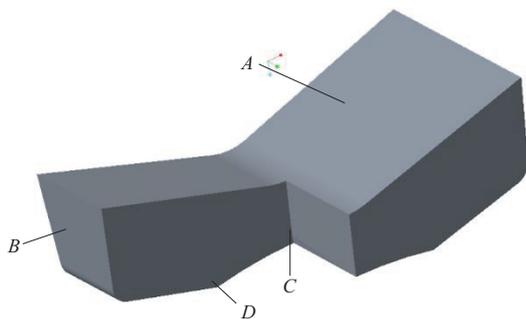
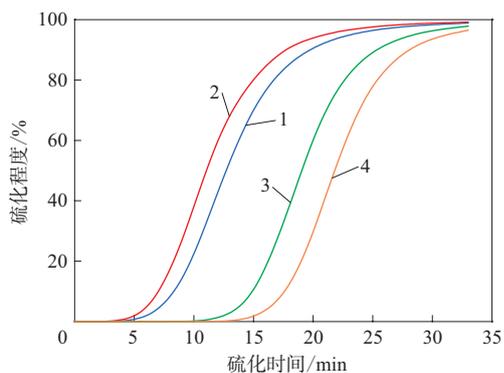
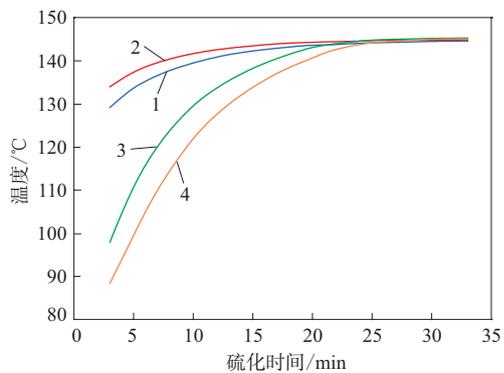


图8 产品外表面和内部测量点示意



测量点:1—A;2—B;3—C;4—D。

图9 硫化程度随硫化时间的变化曲线

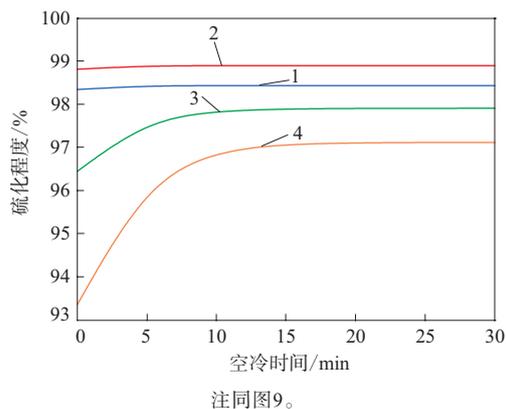


注同图9。

图10 温度随硫化时间的变化曲线

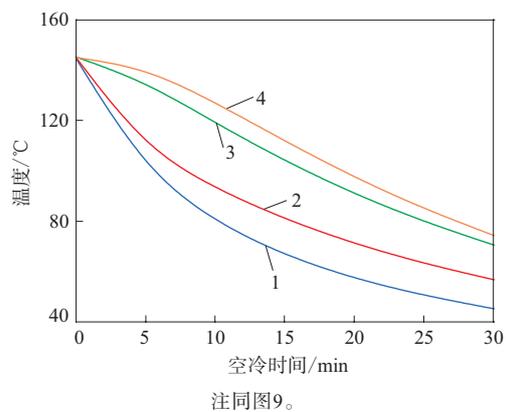
从图9和10可以看出,在相同硫化时间内,产品内部C和D两点的硫化程度较低,但在硫化完成时,其温度较外表面A和B点更高。这是因为橡胶是热的不良导体,硫化反应时热量从产品外表面逐渐传导至内部,因此硫化反应过程中产品外部硫化速率较快,硫化程度较高;待硫化结束时,依然有较多的热量传导至产品内部,此时虽然产品内部还未硫化完全,但温度逐渐升高,促进产品内部胶料继续发生硫化交联,即后硫化效应。综上所述,硫化时间可进一步缩短,使产品内部靠传导的热量继续完成硫化反应。

设置硫化时间为30 min,此时硫化程度为93.34%~99.07%。硫化结束后在23 °C下空冷30 min,测试A,B,C,D四点的硫化程度和温度随空冷时间的变化情况,结果如图11和12所示。



注同图9。

图11 硫化程度随空冷时间的变化曲线



注同图9。

图12 温度随空冷时间的变化曲线

从图11可以看出,在空冷5 min后,D点的硫化程度已达到96.183%,即硫化程度已符合要求。从图12可以看出:在空冷阶段,产品内部降温较慢;

空冷5 min后,D点温度依然高于140 °C,这些热量使得内部胶料继续发生交联反应。空冷30 min前后硫化程度的分布如图13所示,可以看出硫化时间设定为30 min较为合理。

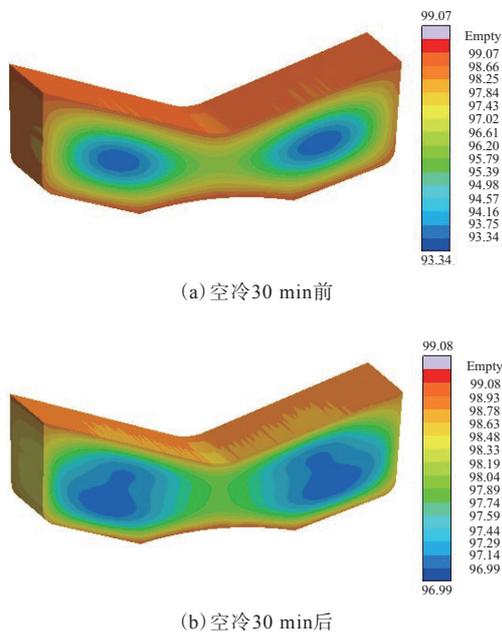


图13 空冷30 min前后产品纵向剖面硫化程度分布云图

4 结果验证

选取4组不同硫化时间(27, 30, 33, 36 min)的弹性车轮弹性体元件,每组5件产品。硫化结束后放置在23 °C恒温室中24 h,测试弹性车轮弹性体元件的溶胀指数、厚度和垂向刚度,结果如表3所示。

表3 硫化时间对弹性车轮弹性体元件溶胀指数、厚度和垂向刚度的影响

硫化时间/min	溶胀指数	厚度/mm	垂向刚度/(kN·mm ⁻¹)
27	2.24±0.01	25.87±0.03	3.533±0.075
30	2.21±0.01	25.94±0.01	4.185±0.053
33	2.22±0.00	25.98±0.02	4.042±0.053
36	2.23±0.01	25.98±0.01	3.967±0.041

本弹性车轮弹性体元件的关键尺寸(厚度)的技术要求为26.0⁰_{-0.1} mm,垂向刚度技术要求为4×(1±10%) kN·mm⁻¹。从表3可以看出:硫化时间为27 min时,弹性元件的厚度与垂向刚度均未达到技术要求;硫化时间为30 min时,弹性元件的溶胀指数最小且垂向刚度最大,即此时橡胶交

联密度最大且性能最佳。综上所述,本产品最适宜的硫化时间为30 min。相较于经验公式设计结果,采用硫化模拟分析技术进行工艺设计,产品的硫化时间缩短了16.7%。

5 结论

本工作采用经验公式法和硫化模拟分析技术对弹性车轮弹性体元件硫化工艺进行设计。考虑到产品形状不规则、模具各层材料热导率存在差异及后硫化效应的影响,采用传统经验公式设计的硫化时间为36 min,但该硫化时间的产品内部交联网络已非最佳状态。而采用硫化模拟分析技术可以最贴近实际生产的情况设置各项参数,如模具材料、进出模时间等,并考虑到产品出模后仍可利用余热继续进行后硫化反应,模拟分析得出的硫化时间为30 min,较经验公式设计的时间缩短16.7%。

弹性车轮弹性体元件的溶胀指数、厚度、垂向刚度测试结果亦证明硫化模拟分析技术准确性较高。因此,在实际生产中,应用硫化模拟分析技术可以更好地减少产品硫化工艺设计的试模次数,降低研发成本。

参考文献:

- [1] 张韬杰,施飞. 橡胶非等温硫化工艺的数值模拟[J]. 橡胶工业, 2016,63(2):111-114.
- [2] 李孝良,邵有国,肖勇明,等. 过氧化物硫化体系对不同构型聚丁二烯橡胶性能的影响[J]. 橡胶科技,2017,15(9):18-24.
- [3] 张刚刚,赵素合,张立群. 橡胶硫磺硫化体系低锌/无锌技术研究进展[J]. 橡胶工业,2017,64(8):503-508.
- [4] Jones C J C, Thompson D J. Rolling Noise Generated by Railway Wheels with Visco-Elastic Layers[J]. Journal of Sound and Vibration,2000,231(3):779-790.
- [5] 倪文波,李芾. 摆式列车倾摆机构选型模式研究[J]. 机车电传动,2003(6):9-12.
- [6] 邢璐璐. 弹性车轮车辆动力学研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [7] 朱鹏刚,曾凡伟,张晓鹏. 橡胶厚制品正硫化时间确定方法的探讨[J]. 橡塑技术与装备,2014,40(5):50-55.
- [8] 施斌,王国林,张建,等. 子午线轮胎硫化过程仿真[J]. 汽车技术,2008(10):56-59.
- [9] 王国林,傅乃霖,张建,等. 基于K-R动力学模型的子午线轮胎硫化过程仿真[J]. 吉林大学学报(工学版),2013,43(3):659-664.

收稿日期:2020-01-14

Application of Vulcanization Simulation Analysis Technology in Curing Process Design of Elastic Wheel Elastomer Part

QIU Liyan, HOU Ming, DUAN Xiaole, LUO Weijun, HUANG Gangle

(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The application of vulcanization simulation analysis technology in the curing process design of elastic wheel elastomer part was studied. Firstly, the empirical equation was used to calculate the curing time of elastic wheel elastomer part. On this basis, the vulcanization simulation analysis technology was used to further simulate and analyze the curing process of elastic wheel elastomer part through model construction, mesh dividing and process parameter setting, and the curing time was shortened by 16.7%. Compared with the results from empirical formula, the results of simulation analysis technology were more consistent with the actual production process, the simulated curing temperature and curing degree were more accurate, and the dimensions, especially the critical ones, and properties, such as swelling index and vertical stiffness, of the resulted products were better. With application of this simulation technology, the number of test and development cost of elastic wheel elastomer part were reduced, and the quality of product was improved.

Key words: elastic wheel; elastomer part; vulcanization simulation analysis; curing process design; curing time; curing degree

青岛市橡胶工业设计研究院诞生 青岛市橡胶工业设计研究院近日常专家现场验收后,正式获得认定。该工业设计研究院由双星集团(简称双星)旗下青岛轮云设计研究院有限责任公司牵头建设。

工业设计研究院面向行业共性需求,开展关键技术研究、建立工业设计资源中心、提供成果转化服务、培养高端设计人才等;采取“平台+公司”运行模式,由工业设计骨干企业或制造业骨干企业牵头成立企业法人,以吸纳高等院校、科研院所以及其他社会资源共同合作。

工业设计研究院建立采取先培育、后认定方式。2019年年初,家电工业设计研究院、橡胶工业设计研究院、智能工程机械装备工业设计研究院作为青岛首批率先培育试点。

双星作为青岛轮胎橡胶企业,具备较强的工业设计资源整合能力。企业汇聚全球技术资源,集研发、设计、检测于一体,建设了开放、交互、高端的研发及测试工业设计平台,涉及轮胎设计、有限元分析/NVH(振动、噪声、声振粗糙度)基础研

究、人工智能和装备开发、废旧橡塑资源循环利用等,拥有较强的专业研究和创新设计能力。

2019年,双星工业设计中心被认定为国家级工业设计中心,是青岛市4个国字号工业设计中心之一。

(本刊编辑部)

一种低压缩永久变形活性氯型丙烯酸酯橡胶及其制备方法 由四川青龙丙烯酸酯橡胶有限公司申请的专利(公布号 CN 110294911A,公布日期 2019-10-01)“一种低压缩永久变形活性氯型丙烯酸酯橡胶及其制备方法”,涉及的活性氯型丙烯酸酯橡胶配方为:活性氯型丙烯酸酯橡胶 100,补强剂(快压出炭黑/沉淀法白炭黑质量比为1:1) 20~100,硅烷偶联剂 1~5,加工助剂 1~5,防老剂 2~5,硫化剂 1~3。该活性氯型丙烯酸酯橡胶不仅具有较好的抗压缩永久变形性能和热稳定性能,还具有较高的硬度和拉伸强度。

(本刊编辑部 赵敏)