

某型模压硫化小尺寸金属-橡胶件橡胶面凸出量控制研究

王翠红

(国营芜湖机械厂, 安徽芜湖, 241007)

摘要 针对某型小尺寸金属-橡胶件硫化后, 环形橡胶面呈内外圈高, 中间下凹的弧面, 不满足设计要求, 影响密封性问题, 通过测量金属-橡胶件胶面最高点和最低点相对金属端面的凸出量以及橡胶本身的下凹量的方法, 间接描述橡胶面整体凸出量。采用控制变量法, 从模具设计、模压硫化过程和测量前停放时间等维度进行试验, 经试验发现, 模具成型面设计成半径为 50 mm 左右的弧面可有效补偿胶面中间的下凹量, 将橡胶坯料厚度控制在设计厚度的 130% 以上, 硫化压力控制在 6 MPa 以上, 加压速率控制在 40%~60%, 测量前停放不少于 24 h, 可保证橡胶面凸出量满足设计要求, 保证密封性能。试验结果表明, 改进模具成型面设计, 调整橡胶坯料尺寸、硫化压力、加压速率, 延长测量前停放时间可有效控制小尺寸金属-橡胶件橡胶面凸出量。

关键词 金属-橡胶件; 凸出量; 橡胶坯料尺寸; 硫化压力; 加压速率

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.004

中图分类号 V255.3; TQ330.6 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)01-0026-06

Research on Control of Rubber Surface Protrusion with Small-Sized Metal-Rubber Product by Molded Vulcanization

WANG Cuihong

(Wuhu State-Operated Mechanical Factory, Wuhu 241007, Anhui, China)

Abstract A small sized metal-rubber part being vulcanized, the annular rubber surface is a curved surface with high inner and outer rings and a concave middle part, and such a product is not only out of keeping with the design requirements but also an affection of sealing performance. By measuring the protrusion amounts of the highest and lowest points of the rubber surface of the metal-rubber part relative to the metal end face and the concave amount of the rubber itself, the overall protrusion amount of the rubber surface is indirectly described. In this paper, the control variable method is utilized for conducting experiments from the dimensions of mold design, molding vulcanization process and stay time before measurement. It appears from these experiments that the mold molding surface designed to about R50 arc surface can effectively compensate the concave amount in the middle of the rubber surface, the thickness of the rubber blank is controlled at more than 130% of the design thickness, the vulcanization pressure is controlled at more than 6 MPa, the increasing pressure controlled at 40%~60%, and the stay before measurement is not less than 24 hours, ensuring the protrusion amount of the rubber surface for meeting the design re-

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4601703)

作者简介: 王翠红(1977—), 女, 江苏泰兴人, 高级工程师, 研究方向为橡胶成型工艺。E-mail: 249538147@qq.com

引用格式: 王翠红. 某型模压硫化小尺寸金属-橡胶件橡胶面凸出量控制研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 26-31. WANG Cuihong. Research on Control of Rubber Surface Protrusion with Small-Sized Metal-Rubber Product by Molded Vulcanization[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 26-31.

quirements and the sealing performance. The experimental results show that thanks to the improvement of the design of the mold forming surface, adjustment of the size of the rubber blank, the vulcanization pressure and the pressurization rate, and prolongation of the stay time before measurement, it has become possible to effectively control the protrusion amount of the rubber surface of small sized metal-rubber parts.

Key words metal-rubber parts;protrusion;rubber billet size;vulcanization pressure;pressure rate

橡胶与硫化剂发生交联,从线状结构变成网状结构^[1-2],即成硫化橡胶。硫化橡胶属于弹性体,其不仅是一种不可压缩的、质地轻盈、性能优良的高分子材料,而且还拥有大变形而损耗能量的作用,具有高弹性和抗压变性能^[3-4]。硫化橡胶件广泛应用于工业、生活、国防、交通、运输等多个领域。以飞机举例,在飞机上,硫化橡胶件主要起到密封、减震、隔热、防火、传输、支撑等作用,应用在飞机的燃油、滑油、救生、着陆、液压静、动密封等多个系统^[5-9]。相对于金属而言,硫化橡胶的硬度低、耐磨性差的特点限制了橡胶件的使用范围^[10-11]。为此,借助胶粘剂将硫化橡胶与刚性和强度较高的金属材料进行连接,形成金属-橡胶零件,便成为了一种趋势。这种类型的复合零件同时具备了金属和橡胶的特性,刚柔结合、强韧兼备,广泛应用于飞机的液压、燃油系统,起到了重要的作用^[12-13]。

目前,活门类金属-橡胶件存在模压收缩率难控制,导致橡胶压缩量不满足密封要求的问题。文献[14]通过在上、下模成型面加工凹槽,使橡胶面高于金属骨架端面,再用车床对模压后的活门进行车削加工,保证活门尺寸和橡胶表面质量。文献[15]通过设计可调节高度的无边模,解决活门橡胶面外圈有尖边让问题,保证活门的密封性能。文献[16]通过提高模具光洁度和加工精度,提升活门橡胶表面质量,并减少累积公差对橡胶平整度的影响,提高产品密封性。

上述研究虽通过模具设计对活门类金属-橡胶件胶面质量进行了改进,但缺乏成型工艺对金属-橡胶件橡胶面凸出量影响的研究。因此,对于金属-橡胶件橡胶面成型工艺的研究是非常有必要的。本文正是在已有的橡胶硫化工艺研究基础上,提出改进模具设计、硫化工艺和测量方法,并展开对某型小尺寸金属-橡胶件的加工试验,旨在研究模压工艺对橡胶凸出量的影响,以解决飞机液压、燃油系统的活门、活塞类小尺寸橡胶-金属件橡胶面内外圈高,中间下凹的问题,并确保其密封性能。

1 试验材料与设备

1.1 材料

试验过程中使用到的材料见表 1。

表 1 试验材料表

Tab. 1 Main experimental materials

名称	牌号	标准	用途
混炼胶	2-5019	Q/SX6—249—2000	制作橡胶坯料
胶粘剂	JQ-1A	Q/LHH02—2019	金属与橡胶粘接
金属	2Cr13	GJB2294—1995	制作骨架、模具
石英砂	4#		金属表面吹砂
清洗剂	FDS166	Q/FDS02.06—2008	清洗零件
酒精		GB10343—2008	性能试验

1.2 设备

试验过程中使用到的工装与设备见表 2。

表 2 试验工装、设备表

Tab. 2 Main experimental instruments

名称	型号	厂家	用途
炼胶机	XK-200	青岛科高	复炼混炼胶
平板硫化机	P-V-100-2R T-2-PCD	磐石油压	制作金属-橡胶件
橡胶模具	0288	自制	制作金属-橡胶件
自动制坯机	AOL-1612	济南奥镭	制作橡胶坯料
自动影像测量仪	SOVG150 plus	无锡术成	测量胶面凸出量
吹砂机	JCK-1010FK	上海吉川 机械科技	金属表面吹砂
烘箱	KH-150	康恒仪器	骨架烘干 胶粘剂固化
高低温试验箱	ESL-10KA	斯派克 环境仪器	性能试验
冷气试验台	FQFS-7A	启华机电	性能试验

2 试验过程

2.1 骨架和模具加工

用金属材料 2Cr13 加工金属骨架和模具。金属骨架尺寸为直径 9 mm、高度 9 mm,其中一端面加工外径 7 mm、内径 3 mm、深度 2.6 mm 的橡胶槽,加工后的金属骨架见图 1。模具分为上模和下模,上模分别加工半径为 100 mm 和 50 mm 的弧面,两种弧面的型腔尺寸均为外径 7 mm、内径 3 mm,且内、外圈深度为 0~0.1 mm,下模均加工尺寸为直径 9 mm、深度 9 mm 的盲孔,用于放置金属骨架。

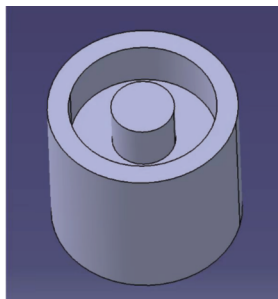


图1 某型模压硫化小尺寸金属-橡胶件骨架

Fig. 1 A certain type of molded vulcanized small-sized metal rubber component skeleton

2.2 试件制作

该金属-橡胶件使用模压硫化工艺压制成型,工艺流程见图2。

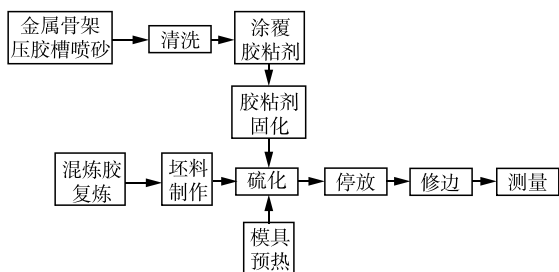


图2 某型模压硫化小尺寸金属-橡胶件工艺流程

Fig. 2 Process flow diagram of a certain type of molded vulcanized small-sized metal rubber

金属骨架采用4#石英砂对金属骨架压胶槽喷砂,喷砂压力为0.5 MPa。喷砂后用清洗剂FDS166对骨架进行清洗,并在143℃的烘箱中烘干。烘干后的金属骨架在冷却后涂覆第1遍胶粘剂,再置于143℃的烘箱中20~30 min,待冷却后涂覆第2遍胶粘剂,然后在温度为18~28℃和湿度不大于65%的环境下停放30 min,方可用于模压硫化。

混炼胶采用炼胶机进行复炼,辊筒温度控制在55℃以下,胶片厚度为3.0~4.6 mm。复炼后的胶片用自动制坯机划制外径7 mm、内径3 mm圆环状方截面的橡胶坯料。

在平板硫化机上将模具预热至151℃,将橡胶批料填入金属骨架压胶槽内,再一起放入模具,将模具放至平板硫化机热板中央进行模压硫化,硫化温度为151℃,硫化时间为40 min,硫化压力为4~12 MPa,合模时加压速率为20%~100%。

硫化结束后,金属-橡胶件停放0~48 h,以金属骨架端面为基准,采用自动影像测量仪测量胶面内外圈和中间的凸出量,进一步测量橡胶其他区域相对金属骨架外侧边沿的橡胶面的下凹量,间接描述橡胶面整体凸出量。

针对模具形状和尺寸、橡胶坯料尺寸、硫化压力、加压速率和测量前停放时间等影响橡胶面凸出

量的因素,控制其他参数不变,分别调整模具弧面半径、胶片厚度、硫化压力、加压速率和停放时间,制作5组试件,即使用控制变量法研究单一因素对橡胶面凸出量的影响,以解决该型金属-橡胶件胶面呈内外圈高,中间下凹的弧面,且胶面最低处低于金属骨架端面,见图3,不符合设计要求(橡胶凸出金属端面不大于0.1 mm,且不低于金属端面)的问题。

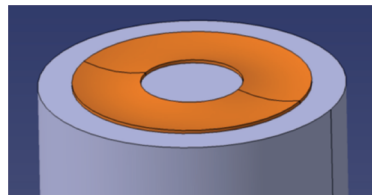


图3 金属-橡胶件胶面内外圈高、中间下凹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the rubber surface inner and outer ring height and middle depression

3 结果讨论

3.1 模具型面的形状及尺寸对胶面凸出量的影响

该金属-橡胶件原有模具型腔即橡胶成型面,为深度0.1 mm的圆环形平面,即半径为 $+\infty$ mm的圆环状弧面。采用弧面半径为 $+\infty$ mm、100 mm和50 mm的模具和涂胶后的金属骨架分别压制试件。测量不同弧面半径的模具压制零件的胶面最高点和最低点相对金属端面的凸出量,试验结果见图4。

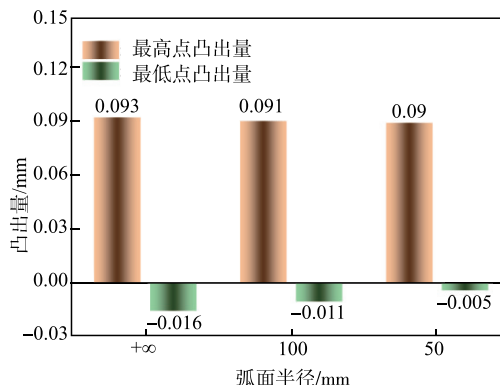


图4 模具的形状和尺寸对胶面凸出量的影响

Fig. 4 Influence of mold shape and size of the protrusion of rubber surface

采用平面型腔压制的试件,其橡胶面与故障零件的胶面凸出情况基本一致,呈内外圈高,中间下凹的弧面。橡胶硫化前后,橡胶的体积会呈现收缩现象,由于金属骨架的压胶槽表面涂覆了胶粘剂,与金属骨架内壁粘接处的橡胶在胶粘剂的作用下,相对其他非粘接区域其收缩程度低,越往中间非粘接区域,收缩程度越高,使得胶面相对金属骨架呈现出图3所示的内外圈高、中间下凹的弧面。随着弧面半径变小,胶面中间的橡胶厚度逐渐变

大,弥补了因减少的部分橡胶厚度,因此,橡胶面下凹程度有所改善。

3.2 橡胶坯料尺寸对胶面凸出量的影响

该金属-橡胶件橡胶为外径 7 mm、内径 3 mm、厚度 2.6 mm 的圆环结构,制作外径 7 mm、内径 3 mm 圆环状方截面的橡胶坯料。控制其他影响因素不变,通过调节橡胶坯料的厚度,测量不同厚度的坯料压制零件的胶面最高点和最低点相对金属端面的凸出量,绘制橡胶坯料厚度-凸出量曲线,试验结果见图 5。

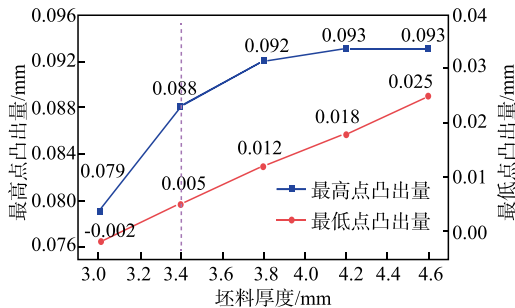


图 5 不同厚度橡胶坯料金属-橡胶件胶面凸出量

Fig. 5 The protrusion of the rubber surface of metal-rubber product with different thicknesses of rubber blanks

随着坯料厚度的增加,零件凸出量增加,但增加速率逐渐减小并趋平,坯料厚度大于 3.4 mm(即金属-橡胶件中橡胶厚度的 130%)时,胶面凸出量符合设计要求。其主要原因是坯料厚度增加后,硫化时橡胶内部的致密度得到提高,橡胶收缩率下降,且受胶粘剂影响较小的中间区域的橡胶相对内外圈的橡胶其收缩率下降更多,故橡胶本身的下凹量降低,橡胶整体凸出量增加,但金属骨架的压胶槽内可容纳的橡胶体积为一个定值,当坯料重量增加到一定程度后,多余的橡胶会溢出。

3.3 硫化压力对胶面凸出量的影响

控制其他影响因素不变,通过调节平板硫化机压力,测量不同硫化压力下压制零件的胶面最高点和最低点相对金属端面的凸出量,绘制硫化压力-凸出量曲线,试验结果见图 6。

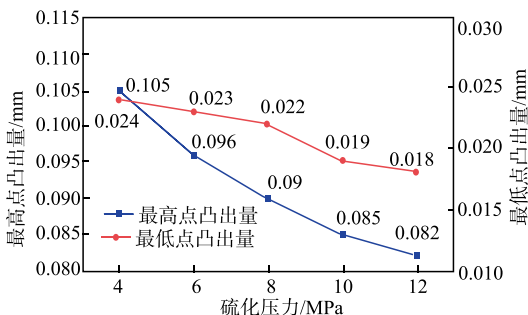


图 6 不同硫化压力金属-橡胶件胶面凸出量

Fig. 6 The protrusion of the rubber surface of metal-rubber product with different vulcanization pressures

随着硫化压力的增加,产品胶面凸出量逐渐减小。橡胶模压硫化时,压力对橡胶收缩率存在影响,橡胶制品完成模压硫化后冷却至室温的过程中,橡胶制品的体积会由于受到热收缩的影响而缩小,但由于橡胶硫化后其内部呈网状交联结构,在去掉压力时,网状交联结构产生的弹性会使橡胶制品产生回弹,而使其体积有所增大,部分抵消热收缩带来的体积减小^[17-19]。由于设计要求橡胶面高于金属端面不超过 0.1 mm,在硫化压力不小于 6 MPa 时,胶面凸出量符合设计要求。

3.4 加压速率对胶面凸出量的影响

控制其他影响因素不变,通过调节平板硫化机的加压速率,测量不同加压速率下压制零件的胶面最高点和最低点相对金属端面的凸出量,绘制加压速率-凸出量曲线,试验结果见图 7。

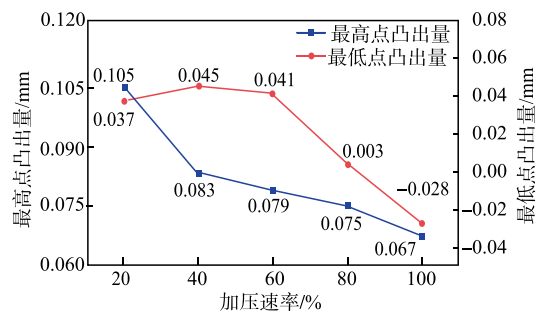


图 7 不同加压速率金属-橡胶件胶面凸出量

Fig. 7 The protrusion of the rubber surface of metal-rubber product with different increasing pressure

当加压速率较低时,橡胶坯料在金属骨架压胶槽和模具型腔中流动的时间较长,在硫化温度的作用下,与模具接触的部分橡胶坯料会提前硫化,造成橡胶内部流动不充分,致密度较低,最终导致收缩率较大,因此,内外圈的橡胶因局部硫化凸出量较大,中间区域的橡胶则因收缩率大抵消了部分局部硫化的影响;当加压速率逐渐提高时,橡胶坯料在金属骨架压胶槽和模具型腔中流动的时间变短,橡胶硫化均匀性和致密度可得到保证,故内外圈的橡胶凸出量逐渐减小,而中间区域的橡胶则先增大后逐渐减小;当加压速率较高时,橡胶坯料在金属骨架压胶槽和模具型腔中流动的时间进一步缩短,部分橡胶坯料在流动的同时会急速溢出压胶槽,留在活门压胶区域的橡胶坯料就会减少,造成橡胶的致密度降低,收缩率再次增加,因此,内外圈和中间区域的胶面凸出量均较低。从试验数据可以看出,在加压速率较低时,凸出量较大,随着加压速率上调,内外圈的橡胶凸出量逐渐减小,而最低点凸出量先增大后减小,当加压速率达到一定值后,橡胶面最低处会低于金属端面,因此最佳加压速率为 40%~60%。

3.5 测量前停放时间对胶面凸出量的影响

控制其他影响因素不变,通过控制测量前零件的停放时间开展试验,测量不同停放时间零件的胶面最高点和最低点相对金属端面的凸出量,绘制停放时间-凸出量曲线试验结果见图 8。

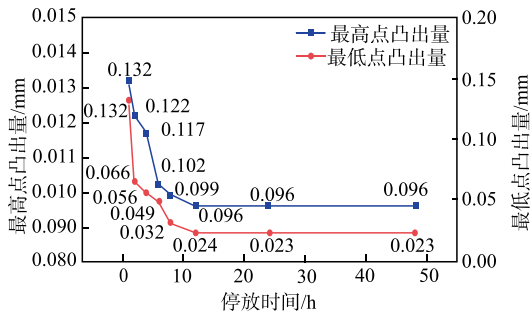


图 8 不同停放时间金属-橡胶件胶面凸出量

Fig. 8 The protrusion of the rubber surface of metal-rubber product with different stay time

硫化后的橡胶属于热的不良导体,硫化完成后橡胶内的温度仍然较高,橡胶会随着停放时间延长逐渐收缩,最后趋于稳定^[20-22]。若停放时间过短,会造成橡胶凸出量检查不准确,即使检测合格,停放后,胶面会逐渐变成下凹的弧面,甚至出现最低点低于金属端面的现象。从试验数据可以看出,凸出量随停放时间逐渐下降,并在 12 h 后趋于稳定。

3.6 试验验证

制作外径 7 mm、内径 3 mm、厚度 3.8 mm 的圆环状橡胶坯料,将硫化压力设置为 8 MPa,加压速率设置为 50%,使用金属骨架压制 5 件试验件,测量金属-橡胶件胶面的最高点和最低点相对金属端面的凸出量以及橡胶本身的下凹量,结果见表 3。

表 3 改进后某型小尺寸金属-橡胶件橡胶面凸出量表

Tab. 3 Data on rubber surface protrusion after improvement of small-sized metal rubber parts for a certain type

序号	最高点胶面 凸出量/mm	最低点胶面 凸出量/mm	橡胶本身 下凹量/mm
1	0.093	0.020	0.073
2	0.093	0.021	0.072
3	0.094	0.024	0.070
4	0.096	0.028	0.068
5	0.092	0.019	0.073

由表 3 可知,采用优化后的工艺参数压制的试验件,其胶面最高点和最低点相对金属端面的凸出量均符合设计要求。

选取 5 件性能检测合格的某型飞机高压安全活门进行拆解,换装上述 5 件合格的试验件。对高压安全活门进行常温、低温和高温环境下的性能试验。试验前分别在室温、 $-55 \sim -60$ °C 和 (70 ± 2) °C 的温度下保持 2 h,反复打开、关闭高压安全活门 30

次,然后将高压安全活门连接到冷气试验台上,并对其逐渐加压,逐步进行气密性、打开压力和关闭压力检查。当压力不大于 2.45 MPa 时,在酒精中检查高压安全活门应不漏气;压力达到 2.744 ~ 2.94 MPa 时,高压安全活门应打开(在酒精中连续冒泡视为打开);当压力降至 2.548 ~ 2.646 MPa 时,高压安全活门应关闭(漏气量每分钟不超过 15 个气泡视为关闭),试验结果见表 4。

表 4 性能试验情况

Tab. 4 Performance test results

序号	试验环境	气密性	打开压力/ 关闭压力/ MPa	
			MPa	MPa
1	常温、低温、高温	不漏气	2.88	2.61
2	常温、低温、高温	不漏气	2.89	2.58
3	常温、低温、高温	不漏气	2.91	2.58
4	常温、低温、高温	不漏气	2.92	2.57
5	常温、低温、高温	不漏气	2.85	2.62

由表 4 可知,采用优化后的工艺参数压制的试验件,装配到某型飞机高压安全活门后,在常温、低温和高温环境下的性能试验结果一致,均符合产品性能要求。

4 结语

影响小尺寸金属-橡胶件橡胶面凸出量的因素有模具的形状和尺寸、橡胶坯料的尺寸、硫化压力、加压速率、测量前停放时间。对于飞机液压、燃油系统的活门、活塞类小尺寸金属-橡胶零件,为控制其橡胶面凸出量,可在模具设计时将凸出量成型设计为弧面,用以补偿胶面本身的下凹量;橡胶坯料厚度应大于金属-橡胶件中橡胶设计厚度的 130%;硫化时硫化压力应不小于 6 MPa,最佳加压速率为 40% ~ 60%;零件测量前的停放时间应不小于 24 h。因此,活门、活塞类小尺寸金属-橡胶件在模压硫化前应设计合理的模具,选择合适的工艺参数,并在测量前停放足够的时间,以保证其橡胶面凸出量满足设计要求。

参考文献

- [1] MANSILLA M A, MARZOCCA A J, MACCHI C, et al. Influence of Vulcanization Temperature on the Cure Kinetics and on the Microstructural Properties in Natural Rubber/Styrene-Butadiene Rubber Blends Prepared by Solution Mixing[J]. European Polymer Journal, 2015, 69: 50-61.
- [2] TONPHENG B, ANDERSSON O. Crosslinking Thermal Properties and Relaxation Behaviour of Polyiso-

- prene under High-Pressure[J]. European Polymer Journal, 2008, 44(9): 2865-2873.
- [3] 张继华, 任灵. 液压系统橡胶密封件的失效典型案例分析[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(4): 73-75.
ZHANG J H, REN L. Analysis of Typical Cases on Failures of Rubber Sealing Products in Hydraulic Pressure System[J]. Aerospace Materials and Technology, 2009, 39(4): 73-75. (in Chinese)
- [4] LI J C, XIAO H G, YUAN F L, et al. Inorganic and Organic Hybrid Nanoparticles as Multifunctional Crosslinkers for Rubber Vulcanization with High-Filler Rubber Interaction[J]. Polymers, 2018, 10(10): 1138-1138.
- [5] WU J, CHEN L, WANG Y, et al. Effect of Temperature on Wear Performance of Aircraft Tire Tread Rubber[J]. Polymer Testing, 2019, 79: 106037-106037.
- [6] 刘丽萍, 冯志力, 刘嘉. 航空橡胶密封材料发展及应用[J]. 军民两用技术与产品, 2013(6): 13-16.
LIU L P, FENG Z L, LIU J. Development and Application of Aviation Rubber Sealing Material[J]. Dual Use Technologies & Products, 2013(6): 13-16. (in Chinese)
- [7] 白鹏翔, 王建军, 邱艳舞, 等. 耐航空液压油丁腈橡胶密封材料综述[J]. 橡塑技术与装备, 2024, 50(5): 4-9.
BAI P X, WANG J J, QIU Y W, et al. Overview of Aviation Hydraulic Oil Resistant Nitrile Rubber Sealing Materials[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2024, 50(5): 4-9. (in Chinese)
- [8] WU J, CHEN L, WANG Y S, et al. Effect of Temperature on Wear Performance of Aircraft Tire Tread Rubber[J]. Polymer Testing, 2019, 79: 106037.
- [9] 王婧, 韩秀峰, 廉一龙, 等. 含氟橡胶的研究进展及在航空发动机中的应用[J]. 合成橡胶工业, 2021, 44(2): 150-157.
WANG J, HAN X F, LIAN Y L, et al. Research Progress of Fluorine-Containing Rubber and Its Application in Aeroengine[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(2): 150-157. (in Chinese)
- [10] CHOWDHURY S G, CHANDA J, GHOSH S, et al. Impact of Adhesive Ingredients on Adhesion between Rubber and Brass-Plated Steel Wire in Tire[J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(8): 1973-1983.
- [11] REZAEIAN I, ZAHEDI P, REZAEIAN A. Rubber Adhesion to Different Substrates and Its Importance in Industrial Applications: a Review[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012, 26(6): 721-744.
- [12] 夏璐璐, 任义志, 张忠洁, 等. 某型安全活门低温漏气故障分析和改进[J]. 飞机设计, 2023, 43(2): 26-30.
XIA L L, REN Y Z, ZHANG Z J, et al. Analysis and Improvement of a Certain Type of Safety Valve Leakage in Low-Temperature[J]. Aircraft Design, 2023, 43(2): 26-30. (in Chinese)
- [13] 王林, 周承龙, 谢彦飞. 某一胶黏剂在橡胶金属件中的粘接性能研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2020(2): 27-29.
WANG L, ZHOU C L, XIE Y F. Research of the Binding Strength of an Adhesive Used in Rubber-Metal Component[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2020(2): 27-29. (in Chinese)
- [14] 李亚平, 游全营, 陈建冬. 航空用闭锁活门的研制[J]. 特种橡胶制品, 2018, 39(3): 51-53, 68.
LI Y P, YOU Q Y, CHEN J D. Development of Locking Valve for Aviation[J]. Special Purpose Rubber Products, 2018, 39(3): 51-53, 68. (in Chinese)
- [15] 刘明举. 精密活门组件成型工艺技术研究[J]. 特种橡胶制品, 2000, 21(5): 20-21.
LIU M J. Study on Forming Process of Precision Poppet Assembly[J]. Special Purpose Rubber Products, 2000, 21(5): 20-21. (in Chinese)
- [16] 刘红艳. 探究金属橡胶活门质量提升措施[J]. 大众标准化, 2020(24): 8-9.
LIU H Y. Discussion on Quality Improvement Measures of Metal Rubber Valve[J]. Popular Standardization, 2020(24): 8-9. (in Chinese)
- [17] 申一彤. 硫化工艺对橡胶套靴物理性能和收缩率影响的试验研究[J]. 铁道技术监督, 2020, 48(7): 21-25.
SHEN Y T. Experimental Study on Effects of Vulcanization Process on Properties and Shrinkage of the Rubber Sleeve[J]. Railway Quality Control, 2020, 48(7): 21-25. (in Chinese)
- [18] CHAKRABORTY S K, BHOWMICK A K, DE S K. Mixed Cross-Link Systems in Elastomers[J]. Journal of Macromolecular Science, Part C, 1981, 21(2): 313-332.
- [19] KLUEPPEL M, HEINRICH G. Network Structure and Mechanical Properties of Sulfur-Cured Rubbers[J]. Macromolecules, 1994, 27(13): 3596-3603.
- [20] MIAO X H, DUAN X Y, CHENG H T, et al. Green and Energy-Saving Tread Rubber by Constructing Chemical Cross-Linking Interface between Graphene Oxide and Natural Rubber[J]. Composites Communications, 2024, 51: 102067.
- [21] GUO B C, TANG Z H, ZHANG L Q. Transport Performance in Novel Elastomer Nanocomposites: Mechanism, Design and Control[J]. Progress in Polymer Science, 2016, 61: 29-66.
- [22] WANG X X, JIA Y X, FENG L G, et al. Combined Effects of Hot Curing Conditions and Reaction Heat on Rubber Vulcanization Efficiency and Vulcanizate Uniformity[J]. Macromolecular Theory and Simulations, 2009, 18(4/5): 268-276.

(编辑: 陈斐)