飞机专用橡胶密封型材的研制

雷海军，翟广阳
（西北橡胶塑料研究设计院，陕西 咸阳 712023）

摘要：以舱口密封带为主，简介飞机专用橡胶密封条的研制。通过胶料主体材料和织物骨架材料的选择、结构设计、产品成型、设计验证和工程化配套生产，研制的飞机专用橡胶密封型材与原产品相比具有耐天候老化性能好，对气和水的密封性能优和使用寿命长等特点，实际使用效果良好。

关键词：飞机；橡胶密封型材；硅橡胶；结构设计；有限元分析；工程化

随着国民经济的发展，航空运输以其安全、高效的特点越来越受到人们的青睐，我国民用航空业也迎来了黄金发展期。预计到2015年，我国民用航空飞机每年起降量将达1040万架次，运输总周转量达990亿t·km，旅客运输量4.5亿人次，货邮运输量900万t。伴随着民用航空业的发展，作为其载体的民用飞机需求量也日益增大，对飞机性能与寿命的要求更加严格。飞机的密封性能一直是飞机使用安全性能和可靠性能的基础，设计有效的橡胶密封型材结构并研制适宜的胶料一直是飞机用密封制品的研究重点。本工作对新舟60系列飞机的橡胶密封型材（主要以舱门密封带为主）进行研制。

1 研制背景

新舟60系列飞机是西安飞机工业（集团）有限责任公司（简称西飞公司）设计的涡浆式支线客机，是我国第1批取得国际适航许可证的民用客机。该系列飞机具有良好的燃油经济性和飞行安全性，自生产以来，出口东南亚和非洲等多个地区，累计售出120余架，目前每年的订货量约20架。

新舟60系列飞机现在使用的橡胶密封型材胶料的主体材料一般为丁腈橡胶/氯丁橡胶并用胶。这类密封型材暴露的缺点是：①密封带硬度较大，导致舱门闭合时需要较大的力，影响舱门的操控性和便捷性；②密封带耐天候老化性能较差，在飞机未出厂或刚交付使用后许多密封带就出现表面龟裂现象，造成了安全隐患；③密封带的环境适应性较差，飞机在高寒地区和热带地区使用时密封带寿命大幅缩短；④密封带的结构较老旧，虽然能满足飞行的基本要求，但大部分密封部位存在漏气和渗水问题，对飞行舒适性及安全性有不同程度的影响。为解决现用密封带存在的问题，我院与西飞公司合作，进行了密封带改进的研究。

2 产品研制与开发

2.1 胶料主体材料

飞机橡胶密封型材主要的密封形式为压缩密封，密封型材胶料的主体材料应具有良好的压缩回弹性，同时考虑到飞行环境，主体材料还应具有良好的物理性能、耐高低温性能，同时兼具阻燃和防护性能。

丁腈橡胶/氯丁橡胶密封型材耐天候老化性能较差，且低温柔顺性能不佳。硅橡胶可在–60～200 ℃下长期使用，且无毒无味，是波音公司和空客公司新一代密封型材主体材料。但硅橡胶拉伸强度较低，必须添加补强填料，而补强填料会增大胶料硬度，降低胶料弹性，从而影响胶料的压缩回弹性；同时密封型材胶料需要加入大量的阻燃剂以满足阻燃性能要求，而阻燃剂会降低胶料物理性能和耐压缩永久变形性能。硬度、阻燃性能、物理性能及耐压缩永久变形性能的综合平衡，是研制高性能密封型材的一大难点。

本工作通过大量试验，用硅橡胶作为主体材料、用过氧化物作为硫化剂和协效阻燃剂，制得的密封型材胶料性能已达到国外同类产品水平，其性能见表1。

表1 密封型材胶料性能

项 目	实测值	指 标	测试标准
邵尔A型硬度/度	52	50 ± 5	ASTM D 2240
拉伸强度/MPa	9	≥7	ASTM D 412
拉断伸长率/%	670	≥500	ASTM D 412
脆性温度/℃	≤−55	≤−55	ASTM D 2137
撕裂强度/（kN·m^{-1}）	26	≥20	ASTM D 624
密度/（g·cm^{-3}）	1.25	1.24 ± 0.03	ASTM D 297
阻燃性能/（mm·min^{-1}）	11	≤102	HB 5469
压缩永久变形（150 ℃ × 22 h）/ %	22	≤40	ASTM D 395（B）
200 ℃ × 22 h热老化后			ASTM D 573
邵尔A型硬度变化/度	+2	0 ~ +5	
拉伸强度变化率/%	−9.8	−15	
拉断伸长变化率%	−12.3	−15	
100 ℃ × 22 h水浸泡后体积变化率/%	+0.4	0 ~ +5	ASTM D 471

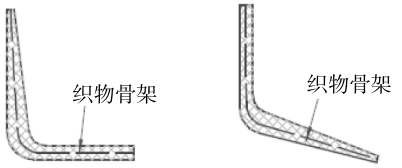
2.2 骨架材料

由于橡胶材料本身强度有限，且表面摩擦力较大，多次使用后表面磨损严重，影响密封效果，在飞机的门窗密封带中多采用织物骨架作增强材料来解决这一问题。20世纪橡胶密封型材骨架材料多采用棉线织物，但其耐温性能、耐天候老化性能和耐磨性能有限。采用耐磨性能和耐天候老化性能良好的涤纶织物骨架材料，可显著提高密封带的耐磨性能；采用高强度玻璃纤维织物，可提高密封带的强度和阻燃性能。本工作根据密封带的结构与功能，可选择摩擦力和拉断伸长率适宜的织物作骨架材料，以满足成型工艺需要，并确保织物连续且无褶皱，密封带性能稳定均一，对织物进行浸泡增粘处理可提高织物与橡胶的粘合强度。

2.3 结构设计

为保证密封带设计的有效性，首先用应力−应变的有限元分析验证产品的结构；再测量产品的外观尺寸（尤其是关键部位的多方位测量），用计量工装验证产品结构；最后，制备不同的试验件送主机厂装机考核，最终确定出适宜的民用飞机舱门密封带结构。

由于机舱应急门门体口框结构和开闭形式无法更改，本工作新设计2种密封带配合使用以达到密封要求：L形密封带断面示意见图1，齿形密封带断面示意见图2。



（a）A型 （b）B型（典型）

图1 L形密封带断面示意

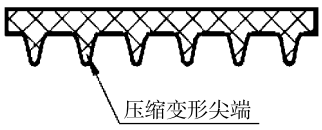


图2 齿形密封带断面示意

通过L形密封带边缘的压缩变形和齿形密封带的多道线密封配合达到密封效果。在应急门门体口框闭合时，L形密封带可随应急门门体装入应急门口框，并产生最大12 mm的旋转压缩变形，口框上固定的齿形密封带可产生最大2 mm的垂直压缩变形，利用2种密封带的组合变形对口框边缘形成遮挡，以保证门体闭合后对水和气的密封。经台架试验及装机飞行试验，产品性能良好，达到了设计要求。产品

装配示意见图3。

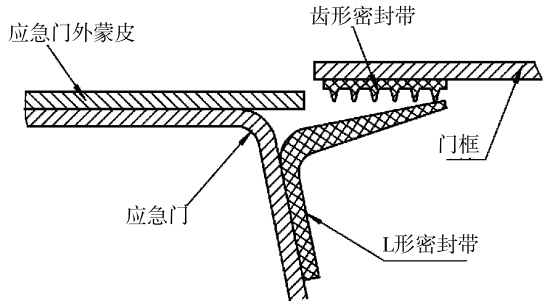


图3　应急门门体口框2种密封带装配示意

2.4　产品成型

由于飞机机体是一个复杂的立体结构，为保证密封带在各个门体口框安装准确，一般采用达索公司的CATIA软件进行密封带结构设计，设计输出的三维数模见图4。

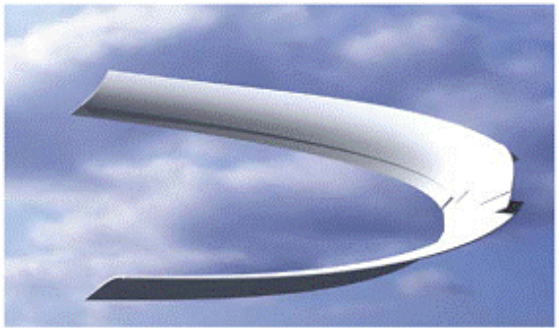


图4　密封带数模截图

与传统密封制品不同，飞机专用密封带的中轴线大多不在同一个平面上，如果按照普通立体结构产品加工，模具成本极高且成型可操作性很差。为解决这一难题，本工作结合多年的密封件成型经验，利用橡胶材料在一定范围内可以随意拉伸、扭曲变形的特性，对密封带三维立体数模进行转化加工，在保证密封带总轮廓尺寸不变的前提下，将其转化为二维平面构形。如果转化的总轮廓尺寸偏大，密封带安装时将出现局部褶皱堆积，影响产品的密封性能和使用寿命；如果总轮廓尺寸偏小，密封带则存在持续拉伸现象，也会影响产品的密封性能和使用寿命。因此，将三维立体数模精确转化为二维平面构形是密封带成型加工的基准和前提。通过多个法平面的刨切组合，以及圆弧过渡段与直段部分的合理相切，最终保证三维数模和二维构形的轮廓线误差不大于0.5 mm。 对中空、闭合、外表面包覆耐磨织物的密封带，在成型加工中也要针对其外形分别计算不同方向的收缩率，考虑织物和橡胶不同的收缩对产品尺寸的影响，通过整体模具构形，完成产品的织物包覆，以确保产品的精度和一致性。

2.5　设计验证

为保证橡胶密封型材满足适航要求，需要对其环境适应性、功能可靠性和使用寿命进行验证。对于尺寸及形状各异的飞机用橡胶密封型材，其验证也是一大难点。

胶料的老化速率常数（K）与温度（T）的关系满足阿雷尼乌斯公式$K=Ae^{-Ea/RT}$。根据老化试验数据的回归计算，可确定K等参数，从而推算胶料的失效年限。将计算所得的各个参数外推到常温，即可得到常温下的K，以及常温下胶料性能随时间的变化关系。本工作选择5个不同温度对密封型材的胶料进行加速老化试验，胶料K与T的关系见图5，可以看出ln$K$与1/T呈线形关系。

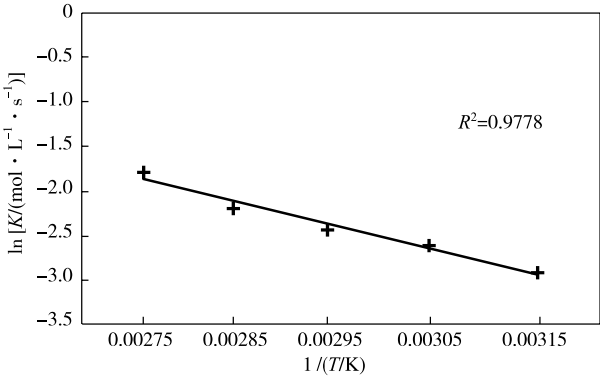


图5　橡胶材料K与T的关系

然后，用ABAQUS有限元分析软件和FE-SAFE软件对橡胶密封型材进行疲劳寿命分析，见图6。疲劳寿命分析对橡胶密封型材的设计和改进至关重要。疲劳寿命分析中的载荷周期不对称、材料成型工艺等，都会影响疲劳寿命分析结果，综合考虑这些因素才能得到精确的结果。通过FE-SAFE软件可以设置这些影响因子，从而按照拟定工艺计算疲劳寿命。

最后，模拟橡胶密封型材的工况，验证胶料加速老化试验和有限元疲劳寿命分析结果。综合分析数据并互相验证，从而推算使用寿命，以确定产品是否满足适航可靠性要求。

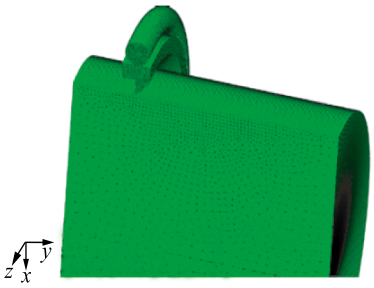


图6 密封型材疲劳寿命建模网格图

2.6 工程化生产

生产民用航空配套产品的重点就是要保证产品的可追溯性和批次间的一致性。本工作在生产和管理中按照AS 9100C质量管理的要求，加强了产品生产的过程控制，确保所有过程都严格按照AS 9100C规定运行，从而保证产品批次的一致性和可追溯性。

3 结语

本工作遵循适航理念，综合考虑产品的功能性、可靠性和一致性，通过以上几个方面的技术攻关，研制出的新橡胶密封型材与原有产品相比具有耐天候老化性能好、对气和水的密封性能优和使用寿命长等特点，经装机和飞行试验，产品性能完全满足使用要求。

在经济效益方面，以新舟60系列飞机的全部橡胶密封型材为例，单机橡胶密封型材的配套需求额可达15万~20万元，按西飞公司年产20架飞机计算，配套橡胶密封型材年需求额可达300万~400万元。另外现在运营的120架飞机都存在橡胶密封型材更换需求，以飞机使用寿命30年、橡胶密封型材使用寿命7年计算，橡胶密封型材在整机使用过程中至少需要更换3次，现有航线飞机的橡胶密封型材替换需求额已超过5000万元。

Development of Rubber Sealing Profiles for Aircraft

Lei Haijun, Zhai Guangyang

（Northwest Rubber and Plastics Institute, Xianyang 712023，China）

Abstract: The development of rubber sealing profiles for aircraft was introduced, by taking hatch sealing tape as an example. The development process included rubber material selection, fabric reinforcing material selection, structural design, product molding process, design verification and production engineering. The developed product showed improved weathering resistance, excellent sealing properties against gas and water, and long service life. The field test results were good.

Keywords: aircraft; rubber sealing profiles; silicone rubber; structural design; finite element analysis; engineering

信息·资讯

新式橡胶扬声器在日本问世

日本东海橡胶工业公司研制成功“智能橡胶”扬声器。该扬声器十分轻、薄，无损声音再现的音质和音量。东海公司称，该扬声器可应用于扁平屏幕装置上。

“智能橡胶”扬声器由2层绝缘橡胶薄片间夹1层导电橡胶薄膜构成。其中，导电橡胶薄膜厚度一般仅为7 mm，当电压施加到薄膜上时，薄膜产生静电力。 谢 立