

某风洞充气密封系统设计与应用研究

熊建军, 赵照, 冉林, 赖庆仁

(中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 某风洞充气密封系统用于试验期间隔离大门内外气压环境或填充移动部件间隙, 保证风洞回路最高可以模拟 2 万米高空以下气压环境; 密封围带基体材料采用植入增强纤维的硅橡胶, 围带截面为“凹”型带两侧固定基座, 采用直线型带芯分段模压硫化成型, 成功研制了适用于高低温环境、长寿命、高膨胀、大尺度环状充气密封围带; 充气/放气气路、电磁阀和变送器基于集成块安装设计; 充气/放气控制系统采用 PLC+电磁阀+真空发生器; 系统通过 Profinet 接入风洞测控光纤环网, 实现本地/远程自动化控制; 解决了围带结构、气密泄漏、大尺度密封面平面度和金属气嘴结构设计等问题; 系统应用效果好, 自动化水平高, 有较大推广应用价值。

关键词: 结冰风洞; 充气密封系统; 围带; 充气; 放气

Design and Application of Inflatable Sealing System for a Certain Wind Tunnel

XIONG Jianjun, ZHAO Zhao, RAN Lin, LAI Qingren

(China Aerodynamics Research & Development Center low speed institute, Mianyang 621000, China)

Abstract: The inflatable sealing system for a certain wind tunnel is used to isolate the air pressure environment inside and outside the gate or fill the gap between moving parts during the test, and ensure that the wind tunnel circuit can simulate the high atmospheric pressure environment up to 20 thousand meters. The base material of the ore belt is silicone rubber with reinforced fibers, and the cross section of the enclosure is concave with fixed bases on sides. It is formed by linear segmented molded vulcanization molding, the annular inflatable sealing tape is successfully developed in high and low temperature, long life, high expansion, and large scale environmental conditions. The inflation/deflation gas circuit, electromagnetic, and transmitters based on the integrated block are designed. The inflation and deflation control system adopts the PLC and electromagnetic and vacuum generator; The system is connected to the wind tunnel measurement and control optical fiber ring network by through the Profinet to realize the local or remote automatic control, which solves the the problems of enclosure structure, airtight leakage, and structural design of large-scale dense metal air nozzle. The system has a good application effect, high automation level, and great popularization and application value.

Keywords: icing wind tunnel; inflatable sealing system; enclosure; inflation; deflation

0 引言

某风洞是一种性能复杂的大型特种回流式低速风洞, 风洞设备多, 工作环境特殊, 试验流程复杂, 是国内综合性能最优的高空低雷诺数试验平台。该风洞可以模拟最低 -40°C 、最高 2 万米高空 5 kPa 负压、最大 0.15 MPa 正压环境, 有 3 个可更换试验段。风洞洞体不同部位设计了多个检修人孔和进出大门, 为满足风洞试验环境和移动部件密闭性要求, 对不常开启的检修人孔和蒸发器更换大门采用橡胶条密封, 螺栓连接固定; 对喷雾架和阻尼网进出的稳定段大门、试验段进出的驻室大门、人员进出驻室的隔离门, 以及固定收缩段和可变收缩段间、收缩段出口和试验段入口间, 要求采用密封系统隔离大门内外气压环境或填充移动部件间隙, 保证风洞回路最高可以模拟 2 万米高空以下气压环境^[1-3]。密封系统是风洞重要组成部分, 密封

系统工作时, 移动门体内部气压环境与大气环境隔离, 要求泄漏量小; 密封系统不工作时, 移动门体可以自由打开。根据我国密封技术的现状与发展趋势, 参考水电站机组空气密封技术和其它风洞密封系统设计, 某风洞各洞体门研制了充气密封围带系统^[4-7]。由于充气围带应用环境特殊, 移动门体尺度大, 密封面积大, 安装拆卸困难, 温度范围宽, 围带充气/放气频繁, 每条围带都是单件定制研制, 必须解决围带设计、材料选型、结构优化、自动化等问题, 保证围带密封效果, 延长围带使用寿命, 提高充气/放气控制系统自动化水平。

1 空气密封系统结构及原理

某风洞试验期间, 通过启动与洞体回路管道连接的水环泵和罗茨泵机组等抽气设备, 洞体内气压越来越低, 风洞所有门体或开孔四周必须可靠密封, 隔离洞体内外气压

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-10-10。

作者简介: 熊建军(1971-), 男, 硕士, 正高级工程师。

引用格式: 熊建军, 赵照, 冉林, 等. 某风洞充气密封系统设计与应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 220-224, 233.

环境,才能保证洞体内气压快速达到设定值,达到风洞试验模拟高度参数。当试验结束,抽气设备停机,打开洞体与大气环境间回压阀门,将洞体回路气压尽快恢复到常压,再打开洞体门的密封系统,进入洞体开展相应工作。

充气密封系统是洞体密封设备,主要包括空气密封围带、供气管路、电磁阀和控制系统等。空气密封围带是依靠压缩空气推动橡胶膨胀形变贴紧密封面来达到阻断介质流动的一种静密封,围带有安装底座,嵌入门框四周凹槽内,通过安装底座固定。围带整体呈环形空心结构,空心部分是空气流动通道,围带四周通常采用橡胶或复合橡胶材料制作。通过向围带空气通道供给一定压力空气,围带一侧是可以膨胀;当空气通道压力为负压时,围带膨胀部分自由缩回。围带截面有多种,膨胀部分可以为单凸或多道齿形,通常根据密封间隙大小、密封形式、凹槽尺寸和密封要求等设计。充气密封系统工作时,在控制系统作用下,压缩空气通过供气管路和阀门向围带供气,围带受压膨胀后凸出部位紧贴移动门体,达到一定压力后电磁阀关闭,使洞体内外空气隔离,围带停止供气后保压;充气密封系统停止工作时,在控制系统作用下,电磁阀打开,抽气设备将密封围带内压缩空气排空成负压,围带受压膨胀的凸出部位凹进,围带密封面与移动门体完全分开,打开移动门体时不会发生围带与门体摩擦受损。

某风洞各条充气密封围带呈“回”型带底座的“凹”型结构,围带截面如图1所示,主要由内外胶层、膨胀部分、围带腔体、围带底座及充放气嘴等部件组成。其工作原理是:均匀分布螺杆穿过围带两侧金属压条和围带底座螺孔,将围带固定在门框四周边缘的凹槽内;围带采用压缩空气经过减压过滤后沿管路、电磁阀、充放气嘴进入围带腔体,围带放气采用真空发生器为控制器件。移动大门关闭后,控制压缩空气经过气嘴给密封围带充气至规定压力,围带膨胀而紧压门体密封面,填充移动大门密封面和门框间间隙,实现移动大门密封;围带放气时,密封围带内部被抽接近真空,围带膨胀部分缩至围带腔体内,围带脱离与门体密封面接触,恢复移动大门与门框之间的间隙,移动大门开启时围带不与密封面刮擦,保证围带安装。

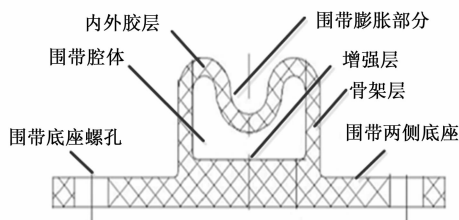


图1 充气密封围带截面结构示意图

2 空气密封围带材料

密封学是研究密封规律、密封装置设计以及密封工程应用的科学与技术,是一门多学科交叉的学科。密封的分

类很多,通常分为静密封、动密封、准静密封或微动密封、转化为静密封的动密封等4大类。根据系统技术要求,系统采用的充气密封围带属于静密封,依靠空气压力推动围带膨胀形变贴紧密封面达到阻断介质流动的目的。

随着我国国民经济的持续快速发展,对充气密封带需求急速增加,使用范围越来越广,尤其是长寿命、高膨胀、耐油及高低温等使用环境。我国充气密封制品的研制正经历仿制到自主开发创新阶段。充气密封围带主体胶料为橡胶,橡胶是具有可逆形变的高弹性聚合物材料,通常分为天然橡胶和合成橡胶两种,各种类别橡胶适合不同的应用场景。多年来,行业并未有明确规定空气围带该使用何种橡胶胶料。考虑到成本等因素,绝大多数厂家采用丁腈橡胶作为本体材质,这种胶料具有价廉、耐油、较高强度等优点。但其耐低温性差,材质易老化,工作气压容易破损、开裂,回缩性较差,放气后不能迅速回到原状态。部分厂商采用氯丁橡胶作为基体橡胶材料,氯丁橡胶回缩性好、耐高低温,又有一定的耐油性能。硅橡胶具有宽广的工作温度范围,使用寿命较长,从耐高、低温及使用寿命方面考虑,硅橡胶成为充气密封围带主体材料首选。据国内外资料介绍^[8-11],20世纪80年代国外即采用硅橡胶研制生产充气密封围带。硅橡胶最大的弱点是拉伸强度和撕裂强度都较低,可以在本体植入骨架材料增加强度。

为防止供气控制系统失效造成密封围带爆破受损,密封围带设计爆破压力大于0.8 MPa。采用有限元计算模拟密封围带充0.8 MPa压力后,围带最大拉伸强度达到14 MPa。为增加充气耐压强度,必须在围带中增加骨架层,骨架层材料为锦纶经针织布,保证围带拉伸强度达到17 MPa以上。通过优化骨架层织物涂胶配方和施工工艺,增强骨架层与硅橡胶的粘接性,提高围带机械强度。

项目围带主体材料选用含硅特种橡胶制造充气密封围带,具有耐寒、耐老化、耐热性,能在-55℃~60℃范围内正常使用。主要技术参数:拉伸强度 ≥ 17 MPa,拉伸伸长率 $\geq 530\%$,热空气老化(100℃×24h)后拉断伸长变化率 $< -14\%$,-55℃拉伸耐寒系数 < 0.42 ^[12-14]。

3 充气密封围带和门体结构

为保证每条围带的几何形状精度,最好使用整体模具硫化出一条围带。本系统各条充气密封围带截面形状一致,线性尺寸大,每件都是单品,采用整体模具成本太高。为降低生产成本,避免大型设备及大型模具的使用。根据围带的外形尺寸要求,将每条围带分成带体、转角、带芯等三部分,设计带体、转角、带芯等3套硫化模具,每条围带都由以上3部段不同数量组合分段模压硫化成型。

每段充气围带采用直线型带芯分段模压硫化成型方法,用同一个模具在硫化机上分段硫化出一段围带半成品,最后将分段硫化的半成品连接成要求尺寸的充气围带产品。通过优化控制分段硫化接头胶料、分段硫化有效长度和硫化机规格,可以保证产品分段接头没有痕迹,保证围带的

尺寸和几何精度达到要求。

驻室大门和稳定段大门采用推拉门结构，门体沿宽度方向的轨道左右移动实现开关，门体靠门框面的四周为密封面。移动门体重量近 100 t，最大门体面积超 100 平方米。为保证充气密封效果，必须保证大门门框与门体密封面的平面度。大门平面尺寸大，门体密封面如果整体设计、焊接后采用大型机械加工，可以保证密封面平面度，但成本太高。大门门体密封面设计加工时，先将门体四周密封面设计成若干块状单元，各密封块机械加工，保证各密封块平面度。再将各密封块采用沉头螺钉基本定位到门体密封面四周，各密封块均可以通过底部垫块厚度调整平面度。以某密封块的密封面为基准面，采用激光平面度测量仪定位，通过逐块调整垫块高度，保证所有密封块的密封面在一个平面。待所有垫块密封面调整完毕后，将沉头孔、垫块之间的间隙分别采用密封焊和低温胶填充并修平，保证大门门体密封面平面度在 ± 1 mm 内，从而保证大门门体密封面的平面度。驻室隔离门采用平开门结构，由门框、门扇、充气密封围带、转轴机构等组成，充气密封围带安装在门框四周凹槽内，门扇内侧四周为密封面。固定/移动收缩段间、收缩段和试验段间密封围带，用于定位后充气围带膨胀填充部件间隙，保证风洞回路路面气动结构。

为方便门体移动，未充气密封时，门体与门框间隙在 5 mm 左右，围带采用带安装底座的充气密封围带固定在门框四周凹槽内。围带截面有多种，膨胀部分可以为单凸或多道齿形。根据现场密封间隙大小、密封形式、凹槽尺寸和密封要求等，系统各条充气密封围带膨胀部分一致采用单凸结构，围带呈封闭环形安装在门框四周边框凹槽内，直角处有一定倒角。围带安装凹槽加工完毕，必须做打磨处理，确保无尖锐物损伤围带。门框围带安装凹槽宽 90 mm、深 30 mm，考虑一定公差，围带截面外型尺寸宽 86 mm、高 26 mm。等间距分布沉头螺钉穿过金属压条和围带两侧底座螺孔，将围带固定在凹槽内。鉴于充气密封围带材料为橡胶，有很大的弹性，根据工程经验，围带实际长度取密封长度的 95%，围带在有一定预紧力下装配^[15-16]，也有利于提高围带的密封寿命。

围带放气状态时（围带内气压低至 1 kPa 以下），围带膨胀部分回落到腔体内，移动门体密封面与门框间隙不小于 5 mm，围带与移动门壁面完全脱开，围带任意部位不超过门框平面高度，保证大门开关时围带不与围带刮擦，提高围带使用寿命。围带放气时移动门体与围带结构如图 2 所示。

围带充气状态时（围带充气压力不大于 0.35 MPa），围带充气膨胀量超过 20 mm，充气围带紧贴移动大门密封面，保证围带与密封面良好密封。围带充气时移动大门与围带结构如图 3 所示。

4 充气密封围带控制系统

围带控制系统实现围带本地/远程充气和放气，提高自

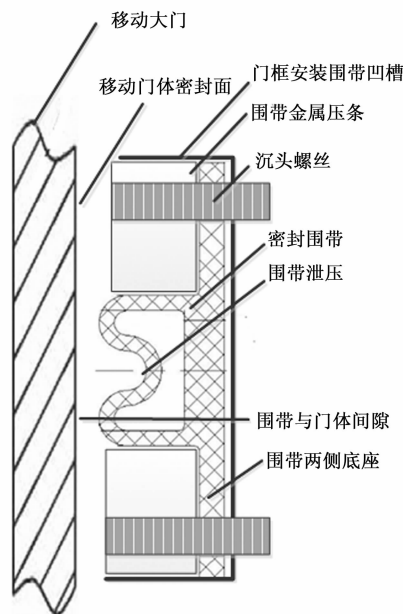


图 2 围带放气时大门密封面与围带结构

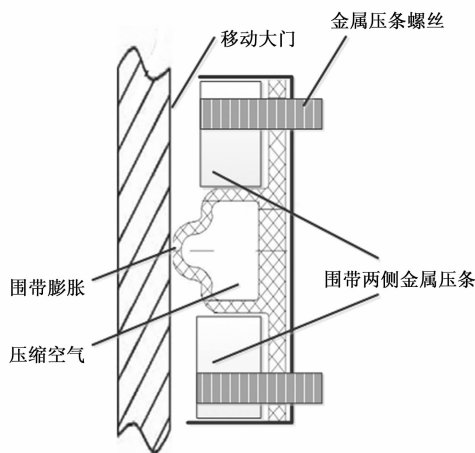


图 3 围带充气时大门密封面与围带结构

动化水平。本地可以启动/关闭系统电源、本地/远程切换外，本地/远程其它操作内容基本一致。

围带充气/放气控制以 PLC 为核心，包括电源模块、CPU、AI 模块、DO 模块、DI 模块等。AI 模块用于实时采集各气路压力，DI 模块用于实时监视各电磁阀开/关状态，DO 模块用于控制各电磁阀开/关。各管路充气气源 1 路供气，采用配气台减压过滤后的干燥空气，气源压力可以根据需要，在 0.1~0.7 MPa 间调节。为保证安全，进气管路设置了过滤器减压阀和安全阀。为保证独立控制，各围带管路分别接入 1 支充气/放气电磁阀。为提高集成度，将所有充气电磁阀、放气电磁阀、压力传感器等集成在一个模组，减少了管路和线路连接。围带控制系统原理如图 4 所示，控制系统集成模组现场如图 5 所示。

围带控制系统监控界面如图 6 所示。需要启动风洞充

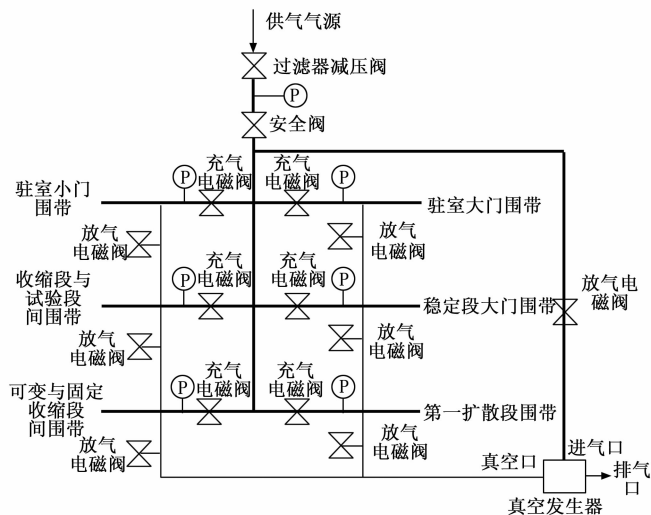


图4 围带控制系统原理图

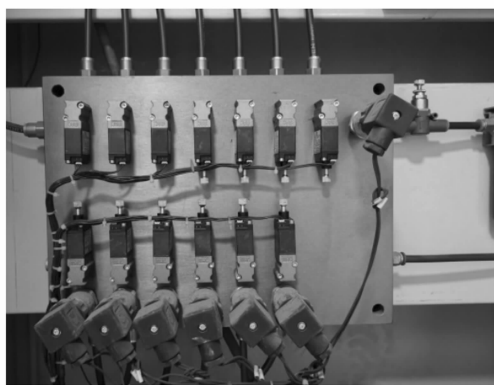


图5 控制系统集成模组现场

气密封系统时, 如风洞开展高度模拟试验, 先关闭各移动门体, 在监控界面点击“围带选定”, 依次选定对应的密封围带, 确认后点击“充气”按钮, 控制系统输出开关量, 控制各气路对应充气电磁阀打开, 气源压力空气随管路进入密封围带, 充气压力会实时显示。到达充气目标后, 点击“停止”, 关闭所有充气电磁阀, 各管路通过密封保持压力稳定, 达到充气密封目的。

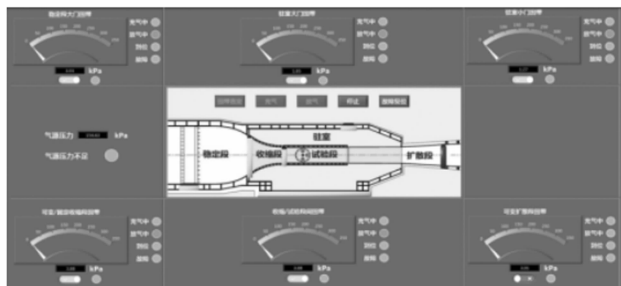


图6 围带控制系统监控界面

需要洞密封放气时, 如高度模拟试验结束风洞回路回到常压环境, 在监控界面先点击“停止”按钮, 各管路对

应充气电磁阀全部关闭, 依次选定对应的密封围带后点击“围带选定”, 确认后点击“放气”按钮, 各管路对应放气电磁阀全部打开。气源压力空气随管路进入真空发生器进气口, 在真空口形成负压。所有放气管路汇集在一起, 接入真空发生器真空口, 排气口直通大气。进气口流动的压缩空气使连通各放气管路的真空吸入口产生负压环境, 利用真空口和排气口压力差, 将各围带管路气压抽吸形成负压, 形成一定的真空度, 围带泄压后膨胀部分回缩至腔体内。放气完毕, 点击“停止”, 关闭所有放气电磁阀。

为了更加形象围带监控过程, 在上位机围带监控界面中, 每条围带添加了状态指示灯, 将该指示灯与各个围带选定按键绑定。在运行过程中, 当操作人员选定围带后, 对应的位置的围带指示灯就会亮起, 形象的展示出操作流程, 也能达到防止误操作的效果。

围带控制系统作为执行层, 通过主干网络的 Profinet 接入风洞测控光纤环网, 上位机作为运行管理层, 实现远程监控围带控制系统^[17-20]。围带控制系统网络结构如图7所示。

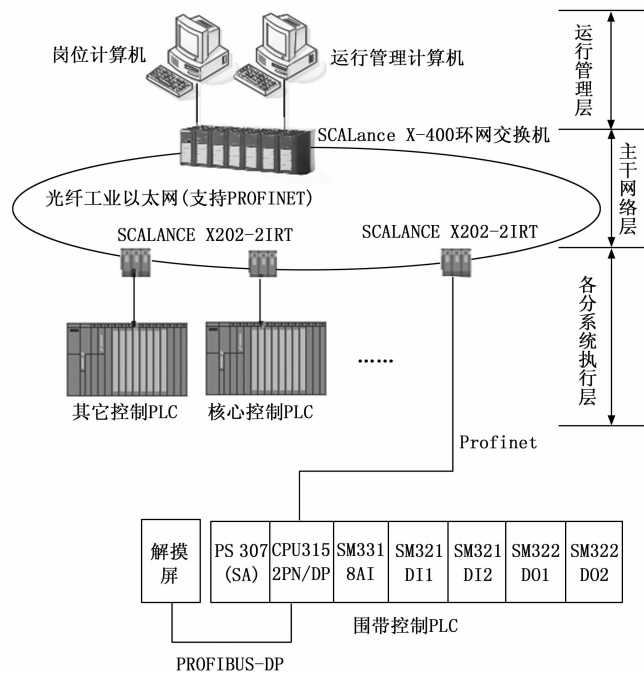


图7 围带控制系统网络结构

5 系统调试及应用

5.1 系统调试

围带研制完成后, 为测试围带性能, 先后完成各条围带气密性试验, 膨胀/回缩试验, 密封试验, 爆破压力试验, 充气疲劳试验等, 通过测试, 围带各项技术指标达到设计要求。风洞现场安装完成后, 先后开展了各条充气围带不受压时充气/放气测试, 主要测试围带固定、围带充气膨胀量、围带放气回缩性能、充气/放气时间等。为保证安全, 充气压力为 0.1 MPa。先测试单条围带, 从测试结果

看, 两侧金属压条紧固, 各各条围带在凹槽内无松动, 安装底座无凸起, 充气后围带膨胀量大于 25 mm, 放气后围带膨胀部分回缩至围带腔体内, 围带任意部位不超过门框密封面。测试发现, 由于各条围带长度不一, 围带腔体容积差别大, 各围带充气/放气时间不一样。充气时, 密封围带各膨胀部分并不同时均匀凸起, 有的部位最先膨胀; 放气时也不同时均匀回缩, 有的部位最后凹进去。经过测试, 尺度最小的驻室隔离门围带充气/放气时间不到 5 s, 尺度最大的驻室大门围带充气/放气时间小于 30 s。单条调试完成后, 开展了多条围带不受压时同时充气/放气测试, 通过监控系统选定所有围带不受压同时充气, 由于充气压力经过各管路和电磁阀同时为围带充气, 围带腔体容积增加, 尺度最小的隔离门充气时间不到 5 s, 但尺度最大的驻室大门围带, 充气时间近 60 s; 放气时时长基本一致。围带不受压充气/放气测试如图 8 所示。结合某风洞试验期间大门开启/关闭需求, 驻室隔离门使用最频繁, 其它大门并不常开启, 因此密封系统开/关时间完全满足使用要求。开启驻室大门/稳定段大门时, 围带放气后, 至少 5 分钟后再开启大门, 以免充气围带与移动门密封面未完全脱开, 导致移动门开启时拉伤围带。

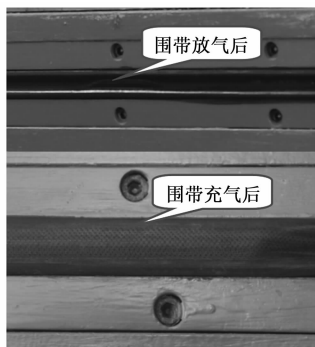


图 8 围带不受压充气/放气测试

根据测试结果, 一定的充气压力就可以保障密封效果。在密封围带设计的充气压力范围内, 只要充气压力足以保证围带膨胀后与门框紧密接触, 充气压力对密封效果影响不大, 不需要增大围带充气压力来提高密封效果。围带设计充气压力不超过 0.4 MPa, 实际使用调整为 0.15 MPa。

5.2 系统应用分析

通过调试应用, 系统解决了多项技术难题, 达到了较好的应用效果。

优化了围带结构设计。围带结构设计包括围带材料选型和围带截面结构设计两部分。针对某风洞要求密封围带耐低温、膨胀部分回缩性高、使用寿命长等需求, 密封围带主体材料采用植入增强纤维的硅橡胶。为满足围带密封性, 根据现场密封间隙大小、密封形式、凹槽尺寸和安装环境等, 在单凸或多道齿形围带截面中, 系统各条密封围带膨胀部分一致采用单凸结构, 保证了各条围带截面结构的一致性, 降低每条围带单件研制成本, 同时便于围带放气时膨胀部分与门体快速脱开, 门体不与围带刮擦, 提高

围带使用寿命。通过多次试验和优化生产工艺, 解决了硅橡胶在模具中均匀硫化成型、硫化硅胶与半硫化的硅胶在模具中加温加压后粘合性差、围带骨架材料和硅橡胶粘接性差和脱模问题, 使各条围带各项技术指标达到设计要求。

解决了金属气嘴与围带壁面连接设计。干燥压缩空气通过气嘴为围带充气/放气, 通过调研国内其它围带用户, 结合近十年运行维护经验, 气嘴整体脱落或气嘴金属与橡胶结合处漏气是充气围带通用质量问题。一旦气嘴从围带脱落, 整条围带报废, 因此金属气嘴与围带壁面连接设计非常关键。通常气嘴从围带侧面骨架层进入围带腔体, 围带壁面厚度一般不到 5 mm。为保证气嘴与围带可靠连接设计, 主要开展了以下 3 个方面工作: 一是增大气嘴末端与围带连接处接触面, 气嘴伸入围带腔体末端设计为方形法兰结构, 增大气嘴末端金属面与围带内壁面接触面积。二是增大气嘴和围带壁面粘接强度, 气嘴外表面设计为螺纹结构, 气嘴插入围带壁面前, 对气嘴外表面进行处理和预涂胶水, 提高硫化橡胶与金属的粘合强度。三是优化气嘴固定结构, 气嘴伸出围带腔体外定制带螺纹方形螺母, 通过拧紧, 将围带壁面紧固在螺母和法兰结构末端, 保证气嘴与围带可靠连接。

完成了基于集成块的气路、电磁阀和变送器一体化设计。充气/放气控制回路包括 20 多个功能一致的充气/放气电磁阀、变送器和压力表, 如果各管路和电磁阀在柜内分散布置, 管路、线路复杂, 占用空间大, 泄漏点多。为提高智能化水平, 将电磁阀、变送器、充气/放气管路等一体化安装设计, 以上控制器件安装在定制的气路集成块内, 集成块内部实现各气路连接, 采用 PLC 控制各电磁阀通断实现各路充气/放气, 规范安装各控制器件, 减少气密泄漏风险, 充气/放气管理结构简化, 装配简单, 运行稳定, 维护方便, 提高系统可靠性。

5.3 实验结果与分析

通过系统调试与应用, 系统各项技术指标达到设计要求, 主要技术指标如下: 最长充气密封围带周长 45 m, 最短围带周长 8 m。密封围带充气时有足够的膨胀量, 0.35 MPa 压力下膨胀量不小于 25 mm。密封围带放气时膨胀部分缩至腔体内, 围带脱离与密封面接触。围带充气采用干燥压缩空气, 进气压力不大于 0.35 MPa。围带工作环境温度最低 -40 °C。围带最高使用频率: 每 10 分钟充气/放气 1 次。围带充气后全裸露爆破压力大于 0.8 MPa。除尺寸最大一条围带外, 其它围带充气密封及放气收缩时间不大于 30 s。每条围带可以独立控制充气/放气, 具有本地/远程控制功能, 自动化程度高。

6 结束语

根据近十年运行维护经验, 某风洞充气密封围带系统应用效果好, 自动化水平高, 较好地满足了试验期间隔离大门内外气压环境或填充移动部件间隙要求, 系统各项技术指标达到设计要求。由于某风洞充气围带特殊应用环境,

(下转第 233 页)