

# 轨道交通空调机组压力气密性的解决方案研究

李继洋<sup>1</sup> 王长喜<sup>2</sup>

1 中车大连机车研究所有限公司, 辽宁大连, 116041;

2 中国铁路哈尔滨局集团有限公司, 黑龙江齐齐哈尔, 161099;

**摘要:** 轨道交通空调机组的压力气密性有很多部分组成, 最主要的两个部分分别是机组箱体气密性和机组内电缆走线的气密性。其中机组箱体气密性又包括钣金与钣金之间的气密要求, 机组箱体与箱体盖板之间的气密要求。气密性本身就涉及到很多方面的要求, 针对介质材料, 加工工艺, 配合尺寸, 新元器件等几个维度, 通过试验机组的试制, 一次、二次气密试验的检验, 实验结果达到要求, 证明方案的思路正确, 具有实用性。

**关键词:** 气密性; 焊接工艺; 多孔连接器

**DOI:** 10.69979/3041-0673.26.03.050

## 引言

列车在高速穿越隧道或者两车交会时, 不可避免地要产生压力波动, 随着列车运行速度的提高, 所产生的压力波也不断增大。而传入车内的压力波对乘客的乘坐舒适度有重大的影响。因此, 如何实现消除压力波, 提高乘车舒适度, 时高度列车必须加以考虑的一个总有重要环节。常用的消除压力波的方法是增加压力波保护系统, 包含新风压力波风阀、废排压力波风阀、压力波控制器、空调控制器等组成。对于空调机组而言, 新风阀压力波一般会安置于机组内, 进而就对压力波所在机组腔室产生了气密性的要求。

## 1 空调机组的气密要求

### 1.1 一次气密试验(例行)的核心要求

一次气密试验的核心检测对象为空调机组壳体, 试验时机设定在空调各部件组装前, 目的是提前排查壳体自身的气密性缺陷(如焊接缝隙漏点、壳体板材破损、预留接口密封不良等), 避免壳体问题随后续组装工序放大, 增加返工成本与质量风险, 该试验属于机组生产过程中的例行必检项目, 每一台机组壳体均需通过检测。一次气密试验的具体操作流程与判定标准需严格遵循规范, 确保试验结果的准确性与一致性, 核心步骤与要求可分为四个环节: 第一, 试验前期准备。需将待检测的空调机组壳体精准安装在专用气密工装上, 确保壳体与工装之间贴合紧密, 无间隙、错位等情况——工装与壳体的密封贴合是试验的基础, 若此处存在间隙, 会导致后续加压过程中气体泄漏, 直接影响试验结果判定。同时, 需对空调壳体上的各排水孔进行全面封堵, 采用专用密封塞或密封胶条封堵, 封堵后需逐一检查, 确保

无遗漏、无松动, 防止排水孔成为气体泄漏通道, 干扰试验数据。第二, 加压操作控制。准备工作完成后, 启动气密工装的加压系统, 向工装与壳体形成的密闭空间内缓慢加压, 直至空间内外的压差达到4000帕。加压过程中需控制加压速率, 避免加压过快导致壳体瞬间受力不均, 出现临时变形, 进而误判为气密性缺陷; 当压差达到4000帕后, 停止加压并保持该压差稳定30秒, 在此期间需实时监测压差变化, 确保压力无异常波动, 为后续泄漏检测奠定基础。第三, 蒸发腔泄漏检测。在加压与压力稳定的全过程中, 需重点监测蒸发腔的气密性情况, 确保无漏气现象发生。蒸发腔作为空调机组实现热交换的核心部件, 其气密性直接影响机组换热效率, 若此处存在漏点, 会导致换热介质泄漏或外部空气侵入, 降低机组运行性能, 因此需将其作为一次气密试验的核心检测点之一。第四, 试验灵活调整原则。考虑到不同型号轨道交通空调机组的蒸发腔结构、安装方式存在差异, 部分机组蒸发腔在部件组装前暂不具备独立密封检测条件, 行业内允许根据蒸发腔的具体结构特点、后续组装工序安排, 灵活确定其是否与壳体同步进行一次气密试验——若暂不具备检测条件, 需在后续二次气密试验中强化对蒸发腔的泄漏检测, 确保无气密性隐患遗漏。

### 1.2 二次气密试验(例行、型式)的核心要求

二次气密试验的检测对象为完成所有部件组装的完整空调机组, 试验时机设定在机组部件(如蒸发器、冷凝器、风机、电气控制柜等)全部组装完成后, 目的是排查机组组装过程中产生的气密性缺陷(如部件与壳体连接缝隙漏点、密封胶条安装错位、接口螺栓紧固不足等)。二次气密试验的操作流程与判定标准较一次气

密试验更为严格,需同时兼顾气密性与结构稳定性检测,核心步骤与要求可分为五个环节:第一,试验前期准备。与一次气密试验一致,需将完整空调机组安装在专用气密工装上,确保机组与工装密封贴合,无间隙泄漏;同时,逐一封堵机组所有排水孔,采用与排水孔规格匹配的专用密封件,封堵后需进行压力预测试,确认封堵处无气体泄漏,避免影响后续试验结果。第二,加压操作控制。启动加压系统向工装与机组形成的密闭空间内加压,加压速率需保持平稳,直至机组内外压差达到4000帕,随后停止加压并保持该压差稳定30秒。此环节需实时记录加压过程中的压力变化曲线,若加压过程中压力无法达到4000帕或稳定阶段压力下降过快,需立即停止试验,排查是否存在严重泄漏点,待修复后重新开展试验。第三,机械结构稳定性判定。在压力稳定30秒的过程中,需对空调机组的机械结构进行全面检查,重点查看壳体是否出现凹陷、凸起等永久性变形,部件与壳体的连接部位是否存在螺栓松动、焊缝开裂等机械破损情况。完整机组在4000帕压差作用下,需承受一定的压力载荷,若存在结构强度不足问题,会出现永久性变形或破损,不仅影响气密性,还可能导致机组运行中出现结构失效,因此机械结构稳定性判定是二次气密试验的核心环节之一,只有结构无异常,方可进入后续气密性判定环节。第四,气密性核心判定标准。压力稳定30秒且结构无异常后,开始监测机组压力下降情况,核心判定指标为“压差从4000帕降低到1000帕的时间大于60秒”——该指标通过量化压力下降速率,直观反映机组的整体气密性水平:若压力下降时间超过60秒,说明机组泄漏量处于行业允许的安全范围,气密性合格;若低于60秒,说明机组存在明显泄漏点,需逐一排查漏点位置(如部件连接缝隙、接口密封处等),修复后重新试验,直至满足标准要求。第五,蒸发腔泄漏二次验证。与一次气密试验相同,需在二次气密试验的加压、压力稳定及压力下降全过程中,持续监测蒸发腔的气密性情况,确保无漏气现象发生。此时蒸发腔已与机组其他部件完成组装,具备完整的密封检测条件,无论其是否参与过一次气密试验,均需在此环节完成泄漏检测,彻底排除蒸发腔的气密性隐患,确保完整机组的气密性能无死角。

### 1.3 两类气密试验的协同管控逻辑

一次气密试验与二次气密试验并非相互独立,而是形成“先部件、后整体”“先排查、后验证”的协同管

控逻辑,共同保障轨道交通空调机组的压力气密性。从检测范围来看,一次气密试验聚焦壳体与关键部件(蒸发腔),排查“先天”结构缺陷;二次气密试验覆盖完整机组,排查“后天”组装缺陷,两者结合实现从局部到整体的全维度检测。从质量管控场景来看,一次气密试验与二次气密试验中的例行试验,形成“生产过程检测+出厂检测”的全流程管控,确保每一台机组质量达标;二次气密试验中的型式试验,则为机型设计与工艺优化提供依据,从源头保障批量生产的气密性可靠性。

## 2 机组箱体气密要求

### 2.1 钣金之间的气密要求

空调机组的钣金采用SUS304不锈钢材质,SUS304不锈钢含有8%以上的镍以及18%以上的铬,耐高温达到800摄氏度,密度为7.93g/cm<sup>3</sup>,抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa) $\geq 515-1035$ ,硬度: $\leq 201\text{HBW}; \leq 92\text{HRB}; \leq 210\text{HV}$ ,熔点(°C):1398~1454,比热容(0~100°C, KJ·kg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>):0.50等等属性,有较高的可塑性、韧性和机械强度,耐大气、蒸汽和水等弱介质腐蚀性,所以最终选择使用SUS304不锈钢。

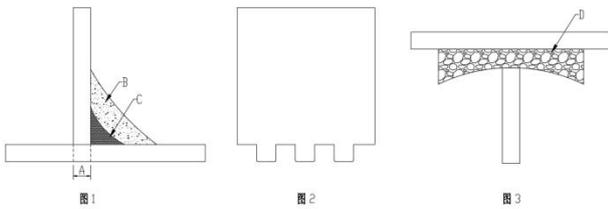
钣金与钣金的焊接,插板采用间断的插口形式,插口两侧倒圆角便于插拔。底板采用相对应的间断豁口形式,两者之间使用过盈配合。间断的过盈配合首先可以保证钣金与钣金之间的紧密性,其次可以有效地改善长距离钣金易弯曲的效果。如图1,2所示。

焊接方式采用氩弧焊,氩弧焊在普通电弧焊的原理的基础上,利用氩气对金属焊材的保护,通过高电流使焊材在被焊基材上融化成液态形成熔池,使被焊金属和焊材达到冶金结合的一种焊接技术,由于在高温熔融焊接中不断送上氩气,使焊材不能和空气中的氧气接触,从而防止了焊材的氧化,因此可以焊接不锈钢等材料。钣金经过焊接之后有效地结合到一起,连续的满焊能有效阻止了气体的泄漏。

焊接后的焊缝,在经过打磨后,均匀涂上一层西卡221聚氨酯密封胶。西卡221聚氨酯密封胶是一种不下垂,高密度的膏状聚氨酯粘结剂,其与大气中的湿气反应固化形成一种永久性的弹性物质,其具有良好的填缝性能,能承受高强度动载荷,无腐蚀,减震,不导电等性能,更可贵的是其工作温度为-40~+70摄氏度,收缩率约为6%。能有效地增强焊气密效果,从而使空调机组内部的腔室保气性达到要求。

至此,空调机组内部的气密性要求基本可以满足要

求。



## 2.2 机组与盖板之间的装配要求

空调机组盖板上贴着带铝箔的保温棉，机组钣金与盖板之间采用间隙配合，再添加上 19mm 厚度保温棉，使保温棉的压缩量在一定的范围之内。如图 3 所示。

福乐斯 NH 系列保温棉是以橡胶为主要原材料发泡而成的柔性闭泡绝热材料，采用独特配方、无纤维粉尘、不含甲醛、不含氯氟烃等破坏臭氧层的工质，适用于车

辆各种管道、设备和车体的保温隔热。除车辆系统以外，还广泛应用于对材料环保性能、安全性能有特殊要求的场所。其外部有一层铝箔，铝箔是柔软的金属薄膜，不仅具有防潮、气密、遮光、耐磨蚀等特性，而且具有很好的可塑性，硬度大，张力强度也大。

机组盖板四周贴密封胶条，确保盖板四周的气密性。

## 3 机组内走线的气密要求

由于有气密要求的腔室要与其他腔室之间有电缆线束的传递，穿线处很容易造成气体的泄漏。针对于这种状况，电缆线束穿过的位置采用金属多孔电缆防水接头的方式，其能有效地阻止气体泄漏，从而实现气密的要求。经过与第三方专业实验室的合作，测试结果符合气密要求。

|      |                                     |  |
|------|-------------------------------------|--|
| 检测项目 | 金属多孔连接器的气密性检测                       |  |
| 检验样品 | 多孔连接器 M20x1.5(6x3.3)                |  |
| 检测设备 | 气密检测仪、数显扭矩扳手、数显卡尺                   |  |
| 检测方法 | 测试前内外压差 4KPa,测试 1 分钟后, 剩余压差不小于 1KPa |  |
| 检测图片 |                                     |  |
| 检测结果 | 经过 60s 测试, 泄漏量 3.44Pa,满足要求          |  |
| 数据分析 |                                     |  |

经过试验发现，使用金属多孔连接器后，气体泄漏的时间及压力基本成稳态形势出现，符合设计的初衷，满足应用要求。

## 4 总结

该轨道交通空调机组压力气密性的方案，在时速 160 公里动力集中空调项目 53Kw 和 45Kw 中使用，经验

证，试验通过，气密效果良好。

## 参考文献

- [1] 姜泽东, 陈保国, 史维琴. 304 不锈钢薄板脉冲激光焊焊热过程数值分析 [J]. 热加工工艺, 2011. 12
- [2] 李明, 张雷, 刘斌, 孔繁冰. 动静态气密性分析方法及其在动车组上的应用 [J]; 力学学报, 2021. 5.