

商用客车密封性能对空调能耗的影响及优化措施

赵明文, 毛 翰, 田南炆, 秦源沣, 坝仕宏

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要:本文针对商用客车生产中的密封性问题进行研究,通过深入分析车辆密封性与空调能耗之间的关系,提出了相应的优化措施。这些措施能够通过降低空调系统能耗来提高整车能效,从而为商用客车的节能设计与制造提供参考。

关键词:密封性能; 空调能耗; 压强; 等效计算

中图分类号: U469.1

文献标志码: A

DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.01.010

Impact of Commercial Bus Sealing Performance on Air Conditioning

Energy Consumption and Optimization Measures

ZHAO Mingwen, MAO Han, TIAN Nanyang, QIN Yuanfeng, BA Shihong

(BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: This paper addresses airtightness issues in the production of commercial buses. It provides an in-depth analysis of the relationship between airtightness and energy consumption in air conditioning, and proposes corresponding optimization measures. These measures can enhance vehicle energy efficiency by reducing the energy consumption of the air-conditioning system, providing a reference for the energy-saving design and manufacturing of commercial buses.

Key words: sealing performance; air-conditioning energy consumption; pressure; equivalent calculation

为响应国家新时代发展战略,我国正大力推行有助于新能源汽车发展的政策,与此同时,全球许多国家也在积极布局相关产业。然而由于缺乏技术创新和成熟的质量管理,新能源商用车长期面临大而不强的发展困境^[1]。在此背景下,一场以“高端化、智能化、绿色化”为主题的论坛于广州召开。与会者普遍对未来趋势表示乐观^[2-3];论坛讨论集中指出,产业在迈向高端化的进程中,已展现出多项具体的技术优势,其中就包括整车密封性。该项性能直接关系到车内噪声水平与空调能耗这两项关键指标。提升整车密封性,既能有效降低空调能耗,也能显著改善车辆的 NVH 性能。因此,整车密封性构成了产品高端化的重要技术基础。

密封性能受多种因素综合影响,主要包括过孔的结构设计、打胶密封工艺及空调、散热器、除霜等空气调节系统自身的制造质量。因此,本文旨在系统探究整车气密性的管控方法,定量评估泄漏量对空调能耗

的影响,并由此提出一套有效的密封性能改善方案。基于此,该方案可为提升新能源商用车的能效与高端化品质提供理论与工程支撑。

1 整车气密性泄漏量等效计算

1.1 整车气密性试验原理

气密性试验的核心过程是在整车密闭空间内建立稳定压差,并据此测量泄漏程度;该压差主要通过充气或抽气手段形成,其根本目的在于对整车密封性能进行量化评估。其测试原理基于空气的流动特性,即当车内外存在压差时,空气会自然从高压区流向低压区。基于此特性,试验通过压力传感器精准监测该压差值,并借助流量传感器实时检测空气流量,最终通过关联分析两者数据来量化评估整车的气密性^[4-6]。商用车气密性试验旨在确保整车泄漏量满足设计目标。其标准测试方法为:在车厢内建立并保持一个稳定的测试压力(目前商用客车的主流标准为

收稿日期: 2025-03-15。

第一作者: 赵明文(1984—),男,工程师,主要从事商用车生产导入及密封性能科学管理工作。E-mail: zhaomingwen@sina.cn。

通信作者: 毛 翰(1997—),男,硕士,主要从事商用车密封性能研究和总装工艺研究相关工作。E-mail: 934202324@qq.com。

62.5 Pa),在此恒定压差下进行测量。泄漏量的控制与评估,依赖于对压差与流量的同步监测。试验所用气密性检测设备如图 1 所示。



图 1 气密性检测设备

1.2 动压强公式和伯努利方程校验

压差与泄漏量的关系由动压强公式^[7]计算,其相关计算公式见式(1)~(4),该公式组基于倒推逻辑,核心实质是通过梳理各参数关联,将实测压差与等效泄漏面积代入其中,进而完成泄漏量的求解。

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2 \frac{P}{\rho_1}} \quad (2)$$

$$A = L/v \quad (3)$$

$$L = Av = A \sqrt{2 \frac{P}{\rho_1}} \quad (4)$$

式中: P 为流体中某点的压强,Pa; v 为流体在该点的流速,mm/s; A 为泄漏面积,mm²; L 为泄漏量,L/min; ρ_1 为经过某点时的流体密度,kg/m³。

为验证其等效性,采用伯努利方程^[8-9]对动压强公式所求得的泄漏量进行校验,具体计算公式见式(5)与式(6)。

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = C \quad (5)$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (6)$$

式中: g 为重力加速度,m/s²; P_1 和 P_2 分别为流体在任意两点处的静压强,Pa; v_1 和 v_2 分别为流体在任意两点处的速度,mm/s; h_1 和 h_2 分别为流体在任意两点处的高度,m; C 为常量。

在能量分析中,由于空气密度较低,其重力势能随高度变化的幅度极小,相比于动能、压力能而言可忽略不计。基于此,当理想流体作定常流动时,流管

中各截面的体积流量保持相等,通过式(7)~(9)推导得到式(10),并在特征测点处验证两种公式的计算结果差异。

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = C \quad (7)$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (8)$$

$$Q = Sv \quad (9)$$

$$S_2 = S_1 Q \sqrt{\frac{\rho}{2 \Delta p S_1^2 + \rho Q^2}} \quad (10)$$

式中: Q 为流量,m³/s; S 为流体通过的横截面积,mm²; S_1 和 S_2 分别为流体在任意两点处通过的横截面积,mm²; Δp 为流体在任意两点之间的压强差,Pa。

本文通过实车测试,验证动压强公式作为整车气密性泄漏量计算方法的可靠性。在车辆保持静止的条件下,通过调整设备保压压差来获取不同压差下的泄漏量数据,进而将实测值与动压强公式的计算值进行对比,以验证该公式的有效性。

表 1 实测数据和动压强计算数据对比

压差/ Pa	孔直 径/mm	泄漏面 积/mm ²	泄漏量/(L·min ⁻¹)		差值/ (L·min ⁻¹)	偏差比
			测量 结果	动压强公式 计算结果		
24.9	132	13 701	5 102.7	5 102.7	0.0	0.0%
37.4	132	13 757	6 275.0	6 249.5	25.5	0.4%
49.8	132	13 575	7 150.0	7 215.1	-65.1	-0.9%
62.3	132	13 772	8 109.9	8 067.5	42.4	0.5%

泄漏量是指在一定时间内通过泄漏通道的气体或液体体积。由表 1 可知,当压差为 24.9 Pa 时,实测数据与动压强公式计算出来的泄漏量完全一致,没有任何偏差;当压差为 37.4 Pa 时,实测数据(6 275 L/min)和动压强公式计算值的(6 249.5 L/min)偏差为 25.5 L/min;当压差为 49.8 Pa 时,实测数据(7 150.0 L/min)和动压强公式计算值的(7 215.1 L/min)偏差为 65.1 L/min,由于客车气密性检测采用的压差一般为 62.3 Pa,根据整车气密性设备的测试精度偏差为 0.5%以内符合测试要求,因此在 62.3 Pa 以内测试整车气密性符合测试规范。

由表 2 可知,动压强公式计算结果与伯努利检验方程相比相差不大,最大误差为 0.14%,符合我司标准误差允许范围(±1%)。因此,动压强公式与气密

性测试仪的工作原理相似,可作为整车气密性的等效计算方法。该公式能够根据实测的压差与泄漏量参数,计算出等效泄漏面积。

表 2 动压强公式计算和伯努利方程校正检验结果

压差/Pa	泄漏量/(L·min ⁻¹)		差值/ (L·min ⁻¹)
	动压强公式计算结果	伯努利方程检验结果	
24.9	5 102.7	5 099.9	2.8
37.4	6 249.5	6 241.0	8.5
49.8	7 215.1	7 209.5	5.6
62.3	8 067.5	8 061.8	5.7

2 试验方案与结果分析

2.1 整车气密性试验方法

1) 负压法(用于气密性能测试)。试验按以下步骤进行:①关闭整车前后门、安全门、安全窗及推拉窗,将空调调至内循环后关闭空调与换气装置,车辆下电;②在右侧第一扇推拉窗安装车窗适配器并连接压力信号管,使用密封胶带对适配器、信号管与窗体的接缝进行密封;③将设备连接调整为负压状态,开启电源,设定目标压差并选择负压测试模式;④观察实时压差与流量数据,待压差达到目标值且流量稳定后记录泄漏量,若压差无法达到设定值则记录实际压差及对应泄漏量;⑤重复 2 次试验并分别记录相关数据。

2) 正压法(用于查找泄漏点)。试验按以下步骤进行:①关闭整车前后门、安全门、安全窗及推拉窗,将空调调至内循环模式后关闭空调与换气装置,车辆下电并封堵泄压阀;②在车辆右侧第一扇推拉窗处安装车窗适配器并连接压力信号管,使用密封胶带对适配器、信号管与窗体的接缝进行密封,将设备连接调整为正压状态;③将烟雾发生器置于车内并开启,待车内充满烟雾后,在设备上选择正压试验模式(建议压差设置为 62.3 Pa),向车内缓慢鼓风;④观察整车各部位的烟雾泄漏情况,根据烟雾浓度控制烟雾发生器的启停,并对发现的所有泄漏点进行拍照与录像记录。

3) 各系统泄漏量测试(选做)。试验按以下步骤进行:①使用密封材料对车辆前门、中门、推拉窗、空调出口、安全顶窗及电机检修口等部位进行封堵。②在选定的推拉窗上安装车窗适配器,连接压力信号

管,并使用密封胶带密封所有接缝,将设备连接调整为负压状态后,开启电源并设定目标压差,选择负压测试模式。③观察实时压差与流量,待达到目标值且稳定后记录系统总泄漏量。④在保持压差不变的条件下,依次封堵各主要泄漏点,记录每次封堵后的系统泄漏量。该泄漏量与总泄漏量的差值即为该点的泄漏量。⑤重复 2 次试验并分别记录数据。

2.2 试验方案制定和准备

为明确不同泄漏孔径下的泄漏量对空调能耗的影响,本文采用负压法进行整车气密性试验。首先,关闭所有推拉窗,并通过粘贴具有不同孔径的带孔铝板来人为设定泄漏量。为使车内温度达到稳定状态,试验开始前需打开空调并将温度设定为 24 ℃。

试验一:①在车辆右侧第三排与第五排座椅旁分别粘接带孔铝板(铝板规格为 200 mm×200 mm,孔径直径为 50 mm,总计增加泄漏量约 2 322 L/min)。②准备工作于 9:30 开始。车辆从 1 号门旁公交车站出发,首先拍照记录仪表初始里程、SOC 及功率计界面。③将车辆完全断电 30 s 后重新上电启动,再次拍照记录仪表与功率计数据。至此完成准备工作,车辆达到测试起始状态,随即通知实验员开始正式测试。测试全程须保持所有门窗关闭。④车辆完成一圈测试后,分别拍照记录当前仪表与功率计读数,并告知实验员执行断电操作。⑤为减少车内温度波动,迅速更换带孔铝板,准备后续测试。

试验二:①在车辆右侧第三排与第五排座椅旁分别粘接带孔铝板(铝板规格为 200 mm×200 mm,孔径直径为 80 mm,总计增加泄漏量约 5 947 L/min)。②准备工作于 9:30 开始。车辆从 1 号门旁公交车站出发,首先拍照记录仪表初始里程、SOC 及功率计界面。③将车辆完全断电 30 s 后重新上电启动,再次拍照记录仪表与功率计数据。至此完成准备工作,车辆达到测试起始状态,随即通知实验员开始正式测试。测试全程须保持所有门窗关闭。④车辆完成一圈测试后,分别拍照记录当前仪表与功率计读数,并告知实验员执行断电操作。⑤为减少车内温度波动,迅速更换带孔铝板,准备后续测试。

试验三:接续前一环节,试验按以下步骤进行:①将铝板更换为规格 200 mm×200 mm、孔径直径为 110 mm 的带孔铝板(对应增加泄漏量约 8 580 L/min),通电启动车辆后拍照记录仪表里程、SOC 及功率计界

面;②完成一圈测试后,分别拍照记录当前仪表与功率计的读数。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 孔径大小对泄漏量的影响

基于 2.2 节设计的试验,为验证孔径对整车泄漏量的影响,对 3 种不同孔径的测试数据进行分析。每种孔径均重复试验 3 次,并取其平均值作为最终结果。由表 3 可知,孔径大小直接决定泄漏面积的规模。在相同条件下,孔径越大,整车的气体泄漏量就越大。

表 3 孔径大小对泄漏量的影响

孔直径/mm	泄漏横截面积/mm ²	泄漏量/(L·min ⁻¹)
50	1 963.5	1 156.2
80	5 026.6	2 960.0
110	9 503.3	5 596.2

2.3.2 不同泄漏量对能耗的影响

整车密封性能是影响空调制冷与采暖能耗的关键因素。良好的密封性有助于减少车内外的无效热交换,从而显著降低空调系统的耗电量^[10]。为量化这一影响,本文通过一系列试验,对密封性能与空调能耗的关系进行了测试与分析。

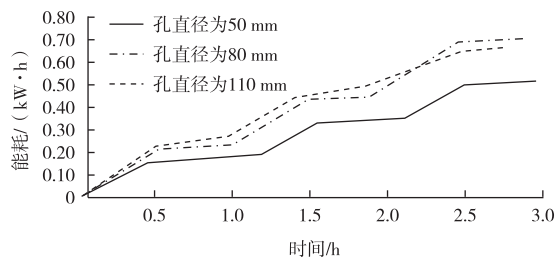


图 2 不同泄漏量与空调能耗关系

如图 2 和表 4 所示,将孔径 50 mm 作为基准工况,继续增大孔径将导致整车泄漏量与空调能耗显著上升。当孔径增至 80 mm 时,相较于基准工况而言:泄漏量增加 128 L/min,空调平均功率增加 0.352 kW,对应能耗上升 0.145 kW·h,城市公交工况下的百公里能耗增加 1.794 kW·h/100 km。当孔径进一步增至 110 mm 时,相较于基准工况而言:泄漏量增加 221 L/min,空调平均功率增加 0.402 kW,能耗增加 0.189 kW·h,百公里能耗增幅扩大至 2.406 kW·h/100 km。结果表明,泄漏面积的增大会系统性地提升空调负荷与整车能耗。

表 4 不同泄漏量对能耗的影响

孔径/mm	泄漏量/(L·min ⁻¹)	平均功率/kW	能耗/(kW·h)	百公里能耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]
50	1 156.2	1.058	0.499	5.197
80	2 960.0	1.410	0.644	6.991
110	5 596.2	1.460	0.688	7.603

如图 3 所示,对比不同泄漏量下不同压缩机启动次数的空调能耗变化。当泄漏量增加 1 156.2 L/min 时,压缩机启动一次,空调百公里能耗平均上涨 0.22 kW·h/100 km;当泄漏量增加 2 960.0 L/min 时,压缩机启动一次,空调百公里能耗平均上涨 0.47 kW·h/100 km;当泄漏量增加 5 596.2 L/min 时,压缩机启动一次,空调百公里能耗平均上涨 0.69 kW·h/100 km。由此可知,当压缩机启动次数相同时,百公里能耗随着泄漏量的增大而上升。

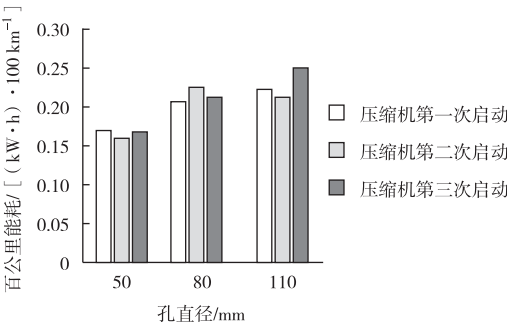


图 3 空调能耗对比

为从另一个角度验证密封性变差对能耗的影响,试验设置了组合泄漏条件,即在安装带孔铝板的同时,保持左侧车窗开启。由表 5 可知,当孔径为 50 mm 时,开启左一侧窗使空调平均功率增大 0.93 kW,百公里能耗上涨 0.83 kW·h;当孔径为 80 mm 时,开启左一侧窗使空调平均功率增大 0.087 kW,百公里能耗上涨 0.168 kW·h。

表 5 泄漏量与能耗关系

泄漏配置	平均功率/kW	能耗/(kW·h)	百公里能耗/[(kW·h)·100 km ⁻¹]
50 mm 孔径	1.058	0.499	5.197
50 mm 孔径和左一侧窗	1.151	0.569	6.022
80 mm	1.410	0.644	6.991
80 mm 孔径和左一侧窗	1.497	0.674	7.159

综上所述,空调能耗与整车密封性能密切相关。当密封性能下降时,空调的运行功率与能耗均会相应

升高。根据表4和表5计算可知,泄漏量每增大2 831.68 L/min,车辆平均百公里能耗将上涨约1.24 kW·h/100 km。

2.3.3 改进措施

上述结果表明,整车泄漏量对空调能耗有显著影响。泄漏量增大会导致空调能耗相应增加,进而直接影响车辆的能效表现与乘客舱的热舒适性。因此,针对泄漏量较大的几个关键零部件进行结构优化后,其密封性能得到提高,从而改善用车体验。

1) 优化开活件密封结构。开活件(如安全顶窗、乘客门、车窗等)的密封是机械设计与制造中的长期难点。其困难主要源于两方面:一是部件必须满足开启、逃生这类功能性要求,这与其所需的静态密封性存在固有矛盾;二是最终密封效果高度依赖制造工艺,尤其是打胶工序的质量。以安全顶窗为例,其普遍采用“四周打胶”的密封方式(常采用硅橡胶密封胶与聚氨酯密封胶作为弹性密封材料)。该工艺的密封效果几乎完全取决于打胶的连续性、饱满性和均匀性等细节,而这些细节通常依赖操作工人的经验。目前,安全顶窗漏水问题主要源于两点:一是车辆长期振动导致密封胶层易产生疲劳失效;二是安装螺孔在振动下易发生蠕变松弛,导致间隙扩大。两者协同作用形成渗水路径。

针对此问题,本研究提出一种结构改进方案(见图4):在安全顶窗安装孔周边增设一道止口。为确保密封效果,需在止口、安全顶窗外沿、螺钉及顶窗边框与蒙皮的贴合处施打足量密封胶。该工艺能有效提升防水密封性,同时增强了气密性。根据表6的对比测试数据,优化后安全顶窗的泄漏量平均降低了906.1 L/min,导致对应工况下的百公里能耗平均下降0.135 kW·h/100 km。结果表明,该结构优化方案能有效提升密封性能并降低能耗。

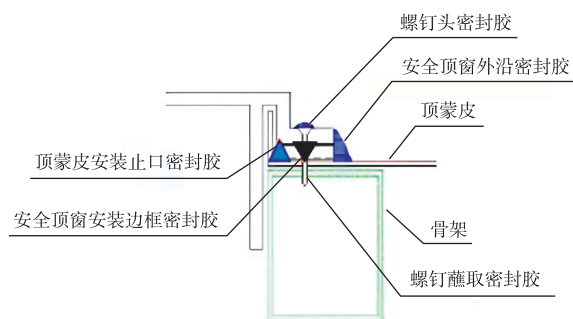


图4 安全顶窗

表6 结构优化与能耗关系

车辆	泄漏量/ (L·min ⁻¹)		百公里能耗/ [(kW·h)·100 km ⁻¹]		节约能耗/ (kW·h)
	优化前	优化后	优化前	优化后	
A	1 670.7	849.5	0.714	0.698	0.016
B	3 652.9	2 746.7	1.198	1.011	0.187
C	3 794.5	2 831.7	1.234	1.032	0.202

2) 优化过孔处密封结构。车顶部分过孔因结构限制,需采用施胶密封。车顶部分过孔因结构限制需采用施胶密封,但因其孔径过大,密封胶难以充分填充并形成有效粘接,导致密封效果不佳。为解决该问题,提出了如图5所示的改进方案,具体步骤如下:首先,在过孔表面增设一道环形防水凸台作为密封基体;然后,将线束穿过过孔,并利用橡胶垫在凸台内部压合固定;最后,在凸台区域施涂密封胶,完成最终封装。其中,内部增设的橡胶垫可有效缩小实际孔隙直径,从而确保密封胶与封板间形成充分、可靠的粘接。车顶天线、高压线束和顶棚线束过孔的泄漏量分别为5.00、1.98和6.08 L/min,完成结构优化后,三者的泄漏量均降至0 L/min。结果表明,优化后的密封结构可满足密封性能要求。

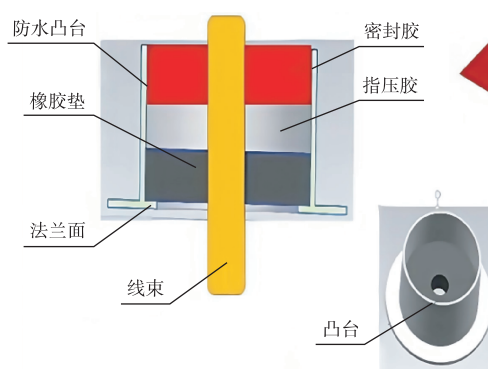


图5 车顶过孔优化

3 结论

本文建立了整车气密封性能的等效计算模型,并通过试验明确了其与能耗的定量关系,在此基础上完成了关键泄漏点的结构优化。结论如下:

1) 动压强公式可用于泄漏量的等效计算与密封性能的系统管控。

2) 提升气密性可有效降低能耗,泄漏量每增加2 831.68 L/min将导致百公里能耗增加1.24 kW·h/100 km。

(下转第63页)

复合材料车身制造效率的关键在于缩短总装时间^[11]。

6 结束语

该 XMQ6115 碳纤维复合材料纯电动客车已实现商业运营,经运行验证,车辆在能耗、站立空间、舒适性等方面得到客户认可,运行三年后仍无结构方面的问题^[12],该设计方案的可靠性得到了有效验证。XMQ6115 车身部分采用碳纤维复合材料,其设计方案具有一定开拓性,为碳纤维复合材料在新能源客车上的应用提供了一定的参考意义,有助于碳纤维复合材料在客车其他部件的推广应用。

参考文献:

- [1] 吴森. 高强度碳纤维复合材料大幅度提升客车安全性[J]. 商用汽车, 2016(5): 108.
- [2] ZHANG J, LIN G, VAIDYA U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications [J]. Composites Part B: Engineering, 2023 (250): 110463.
- [3] 商车. 航天“黑科技”来了金龙客车首批碳纤维地铁巴士交付嘉兴[J]. 商用汽车新闻, 2021(17): 5.

- [4] 康森卫,王青春. 碳纤维增强复合材料在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车测试报告, 2023(22): 94-96.
- [5] NEVES P, FERNANDES A. Advanced bus body-in-white design: a review[J]. International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology, 2018(2): 47-57.
- [6] 陈康达,赵福全,郝瀚,等. 碳纤维复合材料在汽车轻量化上的应用现状及发展前景展望[C]//2018 中国汽车工程学会年会论文集, 2018: 606-611.
- [7] 陈利明,伍豪杰,卫琪琳,等. 城市客车焊接工艺与质量控制[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(5): 56-59.
- [8] 宋燕利,杨龙,郭巍,等. 面向汽车轻量化应用的碳纤维复合材料关键技术[J]. 材料导报, 2016, 30(17): 16-25.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 汽车可靠性行驶试验方法: GB/T 12678—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 7-12.
- [10] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车耐久性行驶试验方法: GB/T 12679—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 4-7.
- [11] 谷杰伟,郭晖,覃盛世,等. 碳纤维复合材料在新能源客车上的应用[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(4): 58-62.
- [12] 民心所向! 半年不到金华就又双叟购买了—批金龙地铁巴士! [J]. 城市公共交通, 2021(3): 102.

(上接第 58 页)

3) 通过对安全顶窗与顶部过孔的结构改进,成功将安全顶窗泄漏量平均降低 32 L/min,使整车密封性能显著提升,验证了该优化方法的工程有效性。

参考文献:

- [1] 陈军桥,张超. 汽车车身的常用密封技术和验证方法[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(16): 137-141.
- [2] 李浩东. 遇见绿色出行——第 4 届广州国际新能源、节能及智能汽车展览会侧记[J]. 商用汽车, 2019(9): 93-95.
- [3] 杜红武. 多款新能源商用车闪耀 2018 广州新能源智能车展[J]. 商用汽车, 2018(8): 66-69.
- [4] 耿建,许林倩. 汽车整车密封机理及 NVH 声学包分析[J]. 汽车测试报告, 2021, 18(20): 103-104.
- [5] 任东军. 应用于地铁车辆的 IPX5 防水试验装置设计研究

- [J]. 科技创新, 2020(15): 4-6.
- [6] 曲振毅,倪维尧,付赢毅,等. 配合相对误差对挤压式微流道密封技术的影响规律[J]. 微纳电子技术, 2024, 61(11): 83-90.
- [7] 高伟. 创设真实问题情境在跨学科实践中突破难点——以“气体压强在化学实验中的应用”为例[J]. 化学教与学, 2023(3): 63-66.
- [8] 张雁杰. 关于伯努利方程的一个变形及其应用于挟沙水流泥沙起降分析[J]. 广西物理, 2024, 45(2): 47-49.
- [9] 吴明眼. 伯努利方程原理及其应用[J]. 信息记录材料, 2018, 19(9): 115-117.
- [10] 李育房,王莹莹,同武军,等. 水下井口连接器研发现状及密封关键技术研究进展[J]. 中国海上油气, 2024, 36(5): 187-197.