

试
验
检
测

高速综合检测列车头车气密性评估

李国清¹, 李明¹, 郭伟², 韩璐¹, 孔繁冰¹

(1. 唐山轨道客车有限责任公司 产品研发中心, 河北 唐山 063035 ;

2. 北京航空航天大学, 北京 100111)



作者简介：李国清（1979-），男，工程师，从事高速列车内外流场研究。

摘要：以高速综合检测列车头车为研究对象，根据车体上不同类型的开孔型式所采取的不同密封方式，研制了1台可以对不同密封开孔进行试验的设备，并根据试验数据以及气密性评估方法对高速综合检测列车车体密封进行了评估。车体气密性评估表明：通过测试压力变化可得到不同开孔部位和整车的允许泄漏面积；高速综合检测列车头车的气密性符合相关标准要求。

关键词：高速铁路；检测列车；气密性；评估方法；等效泄漏面积

中图分类号：U273.94；U292.91+4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)03-0045-04

Leading Car Air Tightness Assessment of High-speed Inspection Train

LI Guo-qing¹, LI Ming¹, GUO Wei², HAN Lu¹, KONG Fan-bing¹

(1. R&D Center, CNR Tangshan Railway Vehicle Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063035, China;

2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100111, China)

Abstract: Aimed at head car of EMUs, according to different types of seals used for different types of openings on the car body, test equipment was designed for testing air tightness of different holes, and air tightness of EMUs was evaluated by the experiment data and evaluation means. Through the results, the following conclusions about air tightness was understood: pressure alteration testing could evaluated the leakage area of whole car-body and different hole part, air tightness of EMUs accorded with interrelated standards.

Key words: high-speed railway; inspection train; air tightness; evaluation means; equivalent leakage area

0 引言

近年来高速列车在中国发展迅速，运行速度已经由原来的160 km/h提高到300 km/h。随着列车速度的提高，许多在低速时可以忽略的问题，在高速时却变得十分严重，其中之一就是列车空气动力学的影响^[1]，这一问题在隧道内又要比在明线上更加突出，并由此产生了一些新的空气动力学研究课题^[2-3]，其中之一就是对高速动车组车体气密性的要求，它已成为高速列车质量控制的一项基本要素，也是高速列车质量控制的一项关键技术。

人耳对压力波动的感觉非常敏感，列车高速行驶时，如果车厢内压力波动达到较大程度，旅客会感到很不舒适，轻者压迫耳膜，重则头晕恶心，甚至造成耳膜破裂，与乘飞机情况相似。对低于150 km/h速度运行

的列车来说，气密性还不是一个主要的问题，在这样的时速下，车内的压力波变化幅度不会很大，也不是很剧烈，人体不会感到特别的不适。而对于速度大于300 km/h的高速列车，当列车高速交会或高速通过隧道（尤其是在隧道内交会）时，周围空气的流速和压力都会发生急剧的变化而形成很大的空气压力波。如果压力波通过车体缝隙并引起车内较大的压力波动，就有可能冲击旅客耳膜，造成旅客耳鸣、耳痛，使人难以忍受，严重时，甚至可使门窗遭到损坏。

此外，列车在高速行驶时，为使车内具有良好的空气质量，需要通风换气。从保证通风换气效果及列车空气阻力的因素考虑，高速列车不能通过开窗和其他自然通风方式换气，故采用了机械通风装置进行强迫通风换气的方式。这也要求车体具有一定的气密性，否则会产生渗透风。因此，在满足通风换气要求时，仍然要对车体提出气密性要求。

在高速列车车体设计和制造过程中，易影响车体

收稿日期：2011-11-08

基金项目：国家863计划资助项目(2009AA110303)

气密性的关键是车体各种接口的密封技术,因此,迫切需要采用一种合适的方法对整个车厢进行气密性评估。目前最基本的评估方法是以给定车内外压差的条件下车内的泄压时间来衡量车厢的气密性,本文对该评估方法具体实施进行了重点论述。

1 评估方法

评估目的是用于对高速列车车厢气密性进行评估。

评估方法的基本原理是:在车厢的车门、空调等关闭的情况下,车厢内外压力差由 P_0 降低到 P 时,最少泄压时间不小于 $t_{允许}$ 。

高速列车车体承载结构是由铝合金型材、板材和蒙皮等焊接而成。在车体承载结构上再安装有车门、车窗、空调等大部件,在车体的底架、侧墙、端墙、车顶则布置有各种类型的过线、过管,它们与车体间均有密封接口。

1) 车厢气密性评估原理

首先,把车体内的各种类型的缝隙等效成一种统一的缝隙类型,把车体各个部分的气密性用这种统一缝隙类型的等效泄漏面积来表征。因此首先应确定车厢压力变化与车厢等效泄漏面积的关系。

一个密闭容积的气密性可以用等效泄漏面积的大小来表示,密闭容器等效泄漏面积与容器内的压力变化之间满足以下关系式^[4]:

$$\sqrt{p_0/9.8} - \sqrt{p/9.8} = (2 \times \frac{S}{V}) \times t \quad (1)$$

式中: p_0 、 p ——压力,Pa;

S ——密闭容器的缝隙面积,cm²;

V ——密闭容器的空气容积,m³;

t ——密闭容器的空气压力由 p_0 变至 p 所需时间(即泄压时间),单位为s。

在式(1)中,把车体的各种缝隙类型统一成一种类型的缝隙,并给出了压力变化与泄漏面积的定量关系。利用上述公式,可以通过测试压力变化来评估整车及不同接口密封类型的泄漏面积。

2) 车厢气密性判据

判据1

假设车厢上有 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ 个漏孔,对应的等效泄漏面积分别为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_m$,单位为cm²,则车厢总的实际等效泄漏面积 $S_{实际}$ 为

$$S_{实际} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots + S_m \quad (2)$$

假设最大理论允许泄漏面积为 $S_{允许}$,

等效泄漏面积法判据:

当 $S_{实际} > S_{允许}$ 车辆气密性不合格;

当 $S_{实际} \leq S_{允许}$ 车辆气密性合格。

判据2:

通过式(1)以及系统实际等效泄漏面积 $S_{实际}$ 、压力

变化范围、车厢的体积参数,得到在压力变化范围(由 p_0 到 p)内的泄压时间 $t_{实际}$ 。

假设在同样压力范围内最小允许泄压时间为 $t_{允许}$
泄压时间判据:

当 $t_{实际} \geq t_{允许}$ 车辆气密性合格;

当 $t_{实际} < t_{允许}$ 车辆气密性不合格。

3) 具体评估过程

在高速列车车厢气密性评估过程中,首先要对高速列车车厢的各种密封类型进行分类,然后采用试验的方法测试不同类型、不同尺寸的密封结构的等效泄漏面积,进而评估相同类型密封结构的等效泄漏面积,最后统计高速列车车厢上实际的各种密封接口的类型和数量等信息,并将试验结果对密封接口逐个进行气密性评估,即评估出各个密封的等效泄漏面积。在这些工作的基础上,再根据公式(2),可求得车厢总的等效泄漏面积 $S_{实际}$ (并求得 $t_{实际}$),同时,根据标准还可求得整个车厢的最大允许等效泄漏面积 $S_{允许}$ 。通过判据1或者通过判据2,评估整个车厢的气密性是否满足要求。在实施中应根据标准要求,在关闭车门、车窗及空调设备、封堵废排风机排气口等对外通孔的情况下,检测车内压力由4 000 Pa降至1 000 Pa的时间,要求泄压时间大于50 s。

2 高速综合检测车头车车厢的气密性评估

该车厢的气密性评估共包括以下两个部分:大部件评估(如车门、空调、铝合金车体结构和车窗等)和车体上各连接件接口评估[如车底、端墙、侧墙(1个)、车顶、车头等]。

2.1 大部件气密性评估

1) 车门(塞拉门)

高速综合检测列车动车组头车共有1对塞拉门。在高速列车的气密性测试中,塞拉门是整个车体气密性最薄弱的部位之一,主要是因为车体密封的工艺范围较窄,对安装调试提出了较高的要求,很容易由于安装不到位等原因造成车门的气密性下降,产生严重漏气现象;另外,塞拉门需要经常开启和关闭,对塞拉门的密封技术提出了特别的要求。塞拉门与车体外表面采用一层密封胶条密封,当车门关好后通过气动压力装置将车门紧紧压在铝合金门框上,塞拉门四周的橡胶结构也紧压在门框上,以保证整个车厢的密封性能。

塞拉门的密封技术首先要满足防止外界的灰尘、雨水等进入车体,同时也要满足整个车体对车门的气密性要求。

塞拉门的密封主要包括以下几个方面:

① 采用密封胶密封门框。试验表明这种密封方式不能满足强度要求,但是密封性能非常好,在质量好的情况下基本上能做到完全密封。

② 采用密封条实现塞拉门本体的密封。利用气动

压力进行密封, 这种密封方法对车体密封面的表面光洁度和质量要求较高, 如果密封面的表面质量很好, 可以保证很好的气密性。但车门密封面表面质量很难达到理想的密封要求, 一方面密封面经常在加工、安装、使用过程中会出现各种表面缺陷, 如划痕等; 另一方面, 车门的密封面并不是一个理想的平面, 而是1个曲面, 2个曲面曲率之间的配合是一个较难解决的问题, 很容易由于2个曲面的不匹配而发生泄漏; 再一方面是塞拉门的安装工艺窗口很小, 容易出现由于安装不到位而产生泄漏的现象。

③ 采用密封胶密封塞拉门上的车门窗。试验表明这种密封方式的密封性能非常优异, 在认真执行工艺的条件下, 基本上能够实现完全的密封。

塞拉门在车厢整体气密性中成为最薄弱的环节, 经常发生严重的泄漏问题。

塞拉门必须满足的保压试验要求为: 密封体积为 10 m^3 , 保压试验, 满足内外压差由 $4\ 000\text{ Pa}$ 下降到 $1\ 000\text{ Pa}$ 和从 $-4\ 000\text{ Pa}$ 上升到 $-1\ 000\text{ Pa}$ 的时间间隔大于 35 s 。

根据有效泄漏面积计算公式:

$$S = \frac{(\sqrt{P_0} - \sqrt{P}) \times V}{2t} = \frac{(\sqrt{4000/9.8} - \sqrt{2200/9.8}) \times 10}{2 \times 35} = 0.745\text{ cm}^2$$

标准车厢的前部有一对塞拉门, 因此, 塞拉门总的等效泄漏面积为:

$$S_{\text{门}} = S \times 2 = 1.49\text{ cm}^2$$

因此, 塞拉门密封技术最大允许等效泄露面积为 1.49 cm^2 。

2) 空调

在头车车顶有一个空调系统, 车厢空调机组需要密封的部位多, 密封长度长, 密封结构较复杂, 主要包括以下几个方面的密封:

① 车体与空调基座的密封。纵向(沿车体方向)采用焊接方法(MIG)密封; 横向(垂直于车体方向)直接用Sika胶密封方法进行连接和密封。在保证焊接工艺稳定的情况下, 焊接接头通常认为是完全密封的, 然而在铝合金的MIG过程中, 经常会出现一些气孔、夹渣等缺陷, 从而影响接头的密封性能, 且由于此部分的焊缝总长度很长, 因此焊缝总的泄漏不能完全忽略。Sika胶密封方法也是一种密封性比较好的密封技术。在车厢整体气密性中, 空调基座和车体间的密封性能较好。

② 空调设备与空调基座的密封。空调设备与空调基座之间采用一系列螺栓固定, 两者之间的密封有2种工艺措施来保证。一种是采用厚度为 8 mm 的泡沫状密封垫(一面粘接在空调设备的密封面上)密封空调设备与空调基座的安装缝隙, 密封垫在螺栓孔处留出相应尺寸的螺栓通孔; 另一种是连接螺栓本身采用螺纹

密封胶进行密封和固定。试验表明, 泡沫状密封垫的密封效果较好。然而由于需要密封的总面积较大, 密封面表面质量或密封面配合等问题也可能产生一定程度的泄漏。

③ 新风口的密封。新风口采用铸铝框架与铝合金车顶连接, 为减少焊接变形, 铸铝件与车体间纵向采用焊接、横向采用密封胶连接的方式, 既可保证连接强度, 又可保证密封性能。耐候栅格安装在铸铝框架上, 采用泡沫密封垫密封。新风口的密封本身包括两部分密封: a. 框架与车体之间的密封采用焊接与胶接相结合的方法, 这种密封方式能够保证较好的密封效果; b. 耐候栅格的密封采用在格栅之间添加泡沫密封垫密封, 方法本身的密封效果较好, 然而泡沫状的密封材料对气体的密封性相对较弱。

总之, 由于空调系统包括大量的密封结构, 且密封面积较大, 采用的密封方法的密封性较差, 因此在车厢整体气密性中空调的总的泄漏面积也较大。

根据空调密封性的生产数据, 可以评估空调本身的气密性, 即: 在 18 s 的时间内, 空调内外压力差由 $3\ 600\text{ Pa}$ 降低到 $1\ 350\text{ Pa}$, 试验体积采用空调本身密封后体积, 约为 3 m^3 。空调的有效泄漏面积为

$$S = \frac{(\sqrt{P_0} - \sqrt{P}) \times V}{2t} = \frac{(\sqrt{3600/9.8} - \sqrt{1350/9.8}) \times 3}{2 \times 18} = 0.622\text{ cm}^2$$

此外, 空调底座与车体的密封面积较大, 长度约为 3 m , 宽度为 2 m , 密封垫宽度为 0.2 m 的密封面积, 另外空调还带有一个冷凝管与车体底部相连, 这部分的有效泄漏面积为 0.2 cm^2 。

综上所述, 空调的等效泄漏面积约为 0.822 cm^2 。

3) 铝合金车体结构和车窗

车窗框为铸铝, 车窗为双层或多层玻璃结构, 两层玻璃之间充惰性气体, 提高车窗的隔热、隔声性能, 并保证其密封性能, 同时车窗应至少能承受 $\pm 6\ 000\text{ Pa}$ 的气动载荷长期作用。

侧窗的密封特点和气密性分析:

① 检测车头车厢两侧有7个固定侧窗, 每个车窗的面积较大, 因此需要密封的总长度较长, 且密封面形状不规则, 采用的密封方法为胶密封。虽然这种密封方式的气密性较好, 但由于需要密封的总长度较大, 侧窗和前窗的安装需要与整个车体的外围轮廓一致, 在实施密封操作过程中, 偶尔也会发生泄漏现象。

② 另外, 许多窗户需要设计成紧急出口, 因此要求在必要的时候能够打开, 这就需要对车窗结构进行专门设计。

③ 头车除了侧窗以外, 还有司机室前窗、司机室固定侧窗、司机室旋转侧窗、盲窗、侧窗(客室)、紧急车窗(客室)、目的地显示窗等。盲窗位于侧窗之间, 与

侧窗高度相同,玻璃颜色也相同,是为列车外观造型的美感而设计的。按安装和密封模式不同可分为4种类型,即司机室前窗、司机室旋转车窗、固定侧窗和目的地显示窗。在实际的生产中,发现目的地显示窗经常发生泄漏现象,主要原因是过线孔的密封以及车窗胶封技术不稳定,目前还没有专门针对该车窗进行产品气密性检验的标准。

根据标准车厢气密性评估结果,头车铝合金车体和车窗缺少了一个端墙密封面,在实际测试中为一个密封圈密封面,由于这个密封圈的长度很大,密封圈的密封效果与车体端面的加工精度有关;同时头车添加了一个驾驶室,标准车厢的等效泄漏密封面积约为 11.224 cm^2 ,头车厢为 11.2 cm^2 。

表1 为头车大部件的等效泄漏面积。

通过对车体开孔面积的统计,可了解车体泄漏面积相对比较大的部分,所以在其他高速动车组的车体密封过程中要对车体的开孔进行重点密封。	表1 头车大部件的等效泄漏面积	
	部件	等效泄漏面积/ cm^2
	车门	1.490
	空调	0.822
	铝合金车体和车窗	11.200

2.2 车体密封接口气密性评估

1) 车底

头车车底的密封接口的密封方式和密封性评估如表2所示。

表2 头车厢车底密封接口气密性评估

密封方式	数量	泄漏面积/ cm^2
灌胶密封(导线)	2	0.200
密封垫	1	0.025
灌胶密封(导线)	4	0.400
密封垫+螺纹(废排)	2	0.348
密封垫	3	0.050
导线本身的气密性	每个车厢上千根线	2.000
总计		3.023

2) 侧墙

头车厢侧墙密封设计除了车窗和车门以外再也没有其他的密封接口,故侧墙的泄漏面积为0。

3) 端墙

头车只有一个后端墙,前部由驾驶室代替。根据气密性评估方法,此部分的等效泄漏面积为0。

4) 车顶

头车车厢主要的密封接口及密封方式如表3所示。

表3 头车厢车顶密封接口气密性

密封方式	数量	泄漏面积评估/ cm^2
密封垫密封	2	0.073 9
密封垫密封	2	0.042 9
密封垫密封	2	0.018 3
密封垫密封	2	0.015 8
总计		0.150 9

5) 驾驶室

头车车厢的驾驶室主要的密封接口及密封方式如表4所示。

表4 头车厢驾驶室密封接口气密性评估

密封方式	数量	泄漏面积评估/ cm^2
密封垫密封	2	0.009
标准件密封	2	0.003
标准件密封,密封垫密封	6	0.010
标准件密封	3	0.003
标准件密封	10	0.010
总计		0.035

2.3 车厢整体气密性评估

头车总的泄漏面积包括大部件泄漏面积和车体的车底、端墙、侧墙、车顶接口的泄漏面积,即 $16.720 9\text{ cm}^2$ 。

头车车厢的体积约为 272 m^3 。

当车厢内外压差由 $4\ 000\text{ Pa}$ 到 $1\ 000\text{ Pa}$,所需时间为:

$$t = \frac{(\sqrt{p_0} - \sqrt{p}) \times V}{2S} = \frac{(\sqrt{4000/9.8} - \sqrt{1000/9.8}) \times 272}{2 \times 16.7209} = 82.149\text{ s}$$

根据高速综合检测列车设计要求,当头车车厢内外压差由 $4\ 000\text{ Pa}$ 到 $1\ 000\text{ Pa}$,所需时间大于 50 s 即为合格。

当 $t_{\text{实际}} \geq t_{\text{允许}}$ 车辆气密性合格

即头车车厢气密性满足气密性要求。

3 结语

①通过对标准和供货技术条件的研究提出了一种评估气密性的方法,该方法通过测试压力变化,利用气密性评估方法来评估整车及不同接口密封类型的泄漏面积。本文的实施过程可为其他高速列车的车厢气密性设计提供参考。

②计算结果和评估结果表明,高速检测车头车车厢的气密性满足相关标准和动车组供货技术条件。

③高速综合检测列车头车气密性评估表明,车体的有效泄漏总面积为 $16.720 9\text{ cm}^2$,泄漏时间为 82.149 s ,大于标准规定的 50 s ,满足相关标准要求。

参考文献:

- [1] Raghu S Raghunathan, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train [J]. Aerospace Science, 2002, 38: 409-514.
- [2] 前田达夫.新干线高速化における空力問題 [J]. JREA, 1994, 37(8): 21-23.
- [3] 山本杉也.列车とトンネルの空気力学 [J]. 铁道技术研究, 1983(1230).
- [4] UIC 660:2002, 保证高速列车技术兼容性的措施 [S].