地铁车辆铝蜂窝盲窗脱落原因及加固方案浅析

文 | 中车南京浦镇车辆有限公司 张国旺 李斌斌 常虹 张玉娟

一、前言

随着轨道交通车辆的发展和人们对车辆运营要求的提高，轨道交通车辆的设计和工艺水平已受到国内外的广泛关注。因此提高轨道交通车辆的设计和工艺水平势在必行。根据我国轨道交通车辆结构设计情况看，降低自重、改进防寒及隔热性能和提高防火能力等都是需要迫切解决的问题。因此，铝蜂窝板由于其重量轻、强度高、刚性好、平整度高和不变性等优势，被广泛应用于轨道交通车辆，尤其是轻轨和地铁车辆，如地铁车辆的地板和盲窗就广泛采用铝蜂窝板结构。但是，铝蜂窝板存在一定的缺陷，例如，有铝蜂窝板面板脱落的风险，若地铁车辆在运营过程中，盲窗面板脱落，就有可能造成不必要的财产损失或人员伤亡。因此，改善铝蜂窝盲窗的结构显得尤为重要。

二、铝蜂窝板盲窗结构

地铁车辆铝蜂窝板盲窗是由面板、底板和蜂窝芯组成的三明治夹心结构。铝蜂窝板盲窗的面板和底板均采用优质的 5052-H32 铝合金板为基材，厚度分别为 2mm 和 1mm；盲窗的蜂窝芯采用正六边形 3003-H18 铝箔，六边形的边长约为 3mm，铝箔厚度为 0.04 ~ 0.06mm，如图 1 所示。面板与蜂窝芯之间以及底板与蜂窝芯之间均采用粘接胶粘接，四周采用密封胶、腻子或铝合金板进行封边。

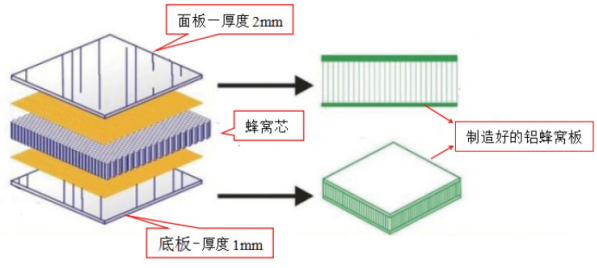

图 1 铝蜂窝板结构图

三、铝蜂窝板盲窗面板脱落原因分析

总的来说，铝蜂窝板盲窗面板脱落主要是由于蜂窝板盲窗面板与蜂窝板盲窗蜂窝芯之间的粘接胶粘接不良导致，从某城市现有的地铁车辆铝蜂窝板盲窗现场脱落的情况来看，原因分析如下。

（1）如图 2 和图 3 所示，盲窗面板脱落情况为整块脱落，且脱落后盲窗的蜂窝芯与面板之间的粘接胶在铝蜂窝盲窗面板上大面积黏附破坏。由此可知，铝蜂窝板盲窗蜂

窝芯与铝蜂窝板盲窗面板之间的粘接胶粘接失效导致铝蜂窝板盲窗面板脱落。

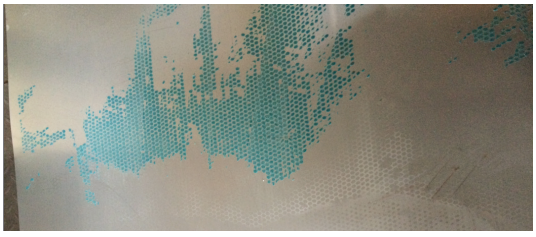

图 2 蜂窝板脱落全貌

图 3 面板大面积胶粘附破坏

（2）如图 4 和图 5 所示，盲窗周边粘接胶的颜色与中间部位截然不同，由此可以判断盲窗面板脱落的过程是从四周向中间扩散，而盲窗面板四周脱落主要是由盲窗四周封的边失效导致。

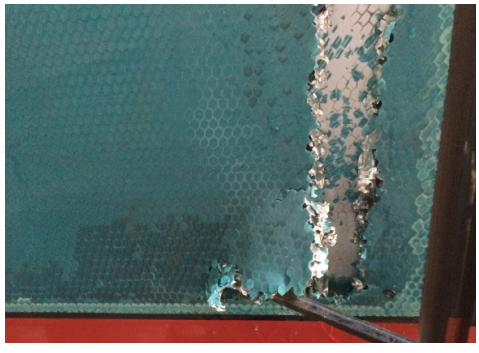

图 4 盲窗面板脱落全貌

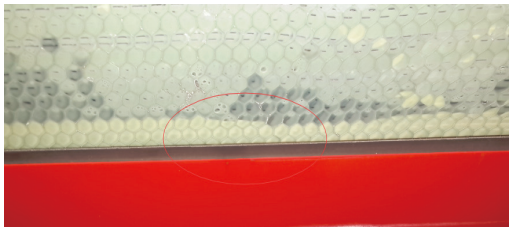

图 5 蜂窝板脱落周边情况

（3）如图 6 所示，在盲窗的蜂窝芯内部存在大量积水，而积水影响铝面板与蜂窝芯之间的粘接胶的粘接效果，从而加速铝蜂窝板盲窗面板脱落的进程。

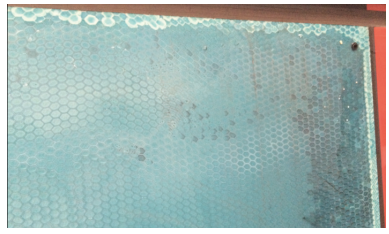

图 6 蜂窝芯内渗水情况

综上所述，铝蜂窝板盲窗面板脱落的过程为铝蜂窝板盲窗面板与铝蜂窝板盲窗蜂窝芯之间的粘接胶开裂，随着车辆运行时间延长，盲窗四周的腻子封边失效，水汽从盲窗四周进入盲窗蜂窝芯并累积在一起，对面板与蜂窝芯之间的粘接胶产生腐蚀，从而导致面板边缘起翘，由图 3、图 4 可以看出，盲窗周边的胶粘胶的颜色受水汽的影响，已经明显与周边颜色有区别。随着蜂窝芯中水汽积累，水汽对面板与蜂窝芯之间的粘接胶腐蚀加速，最终导致整块面板粘接胶整体开裂，在外力作用下而脱落。因此，铝蜂窝板盲窗面板脱落主要是由蜂窝芯与铝蜂窝板盲窗面板之间的粘接胶粘接不良导致，而导致面板最终脱落的力主要有两种——车辆运行过程中的风压和车辆交汇或者车辆进入隧道后形成的负压差。

◎ 车辆运行过程中的风压：车辆运行过程中风压从面板与铝蜂窝板盲窗蜂窝芯之间的分界面进入，在这种风压的长期作用下，面板与蜂窝芯之间的粘接胶粘接失效，从而导致面板瞬间脱落。

◎ 车辆交汇或者车辆进入隧道后，形成的负压差：通过查阅相关文献，得知车辆交汇或者车辆进入隧道后，形成的负压差变化如图 7~9 所示。

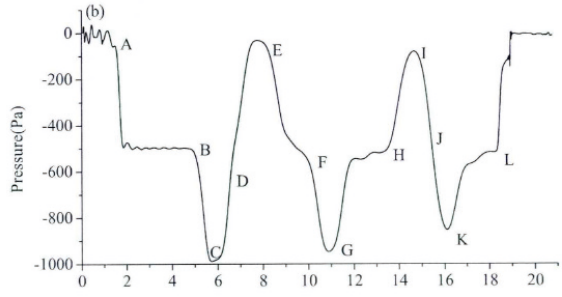

图 7 车辆进入隧道后的车厢外表面的气压变化

投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

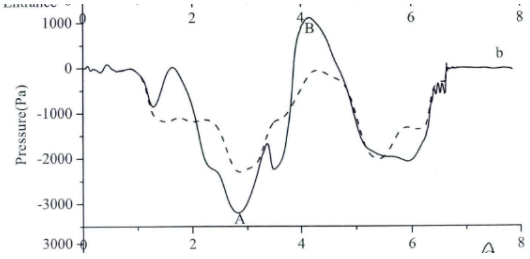

图 8 车辆在隧道内交会时车厢外表面的气压变化

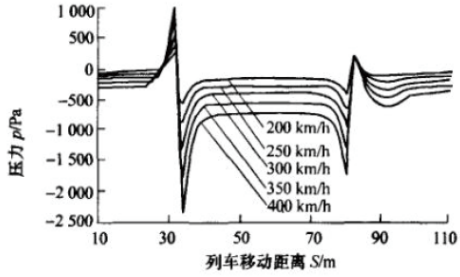

图 9 车辆在明线交会时车厢外表面的气压变化

以上可以看出，在隧道内车辆会车出现的负压是最大的。

根据经验公式：$F=0.5\times Cp\times \rho \times v^2\times A$

式中，Cp 是压力系数，隧道内会车时 $Cp\approx 0.6$，明线会车时 $Cp\approx 0.32$；ρ 是空气密度，$\rho=1.29$ Kg/m；v 是列车行驶速度，v=80Km/h（22m/s）；A 是受力面积，约为 $1m^2$。

注：公式设定交会车辆距离为 1.62m，每列车长度设定为 100m；交汇车辆距离越大，负压形成的力越小。

根据公式计算：隧道内会车负压形成的力 $F=0.5\times 0.6\times 1.29\times 22.3^2\times 1N=192N$。

负压形成 192N 的力虽然不是非常大，但是地铁车辆铝蜂窝盲窗面板在进入隧道、隧道内交汇及明线交汇会时，长时间承受反复的正压与负压而产生疲劳屈服，从而导致面板整体脱落。

四、现场加固方案

为防止铝蜂窝盲窗面板在地铁车辆高速运营时脱落而造成不必要的财产损失或人员伤亡，提出如下加固方案。

此加固方案综合考虑地铁车辆铝蜂窝盲窗面板加固的强度和美观性，在地铁车辆车体窗框型材上攻 M6 螺纹（螺栓对称布置），利用固定螺栓将铝蜂窝板盲窗四角紧固到地铁车辆车体窗框上进行加固（加固点的位置根据地铁车辆的实际情况而定），并制作相应的垫块（称特制垫片）进行美化，固定螺栓具体分布方式如图 10 所示。

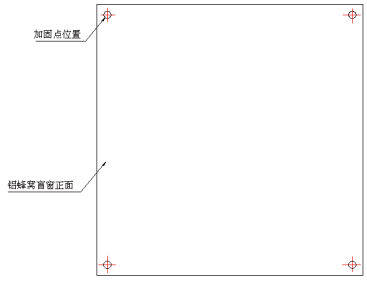

图 10 加固点布局图

为了保证加固方案的密封性，防止雨水从加固位置进入铝蜂窝盲窗，在固定螺栓上涂抹螺纹锁固剂，并且在特制垫片与铝蜂窝板盲窗之间以及固定螺栓与特制垫片接触斜面处涂打密封胶，具体安装密封方式如图 11 所示。

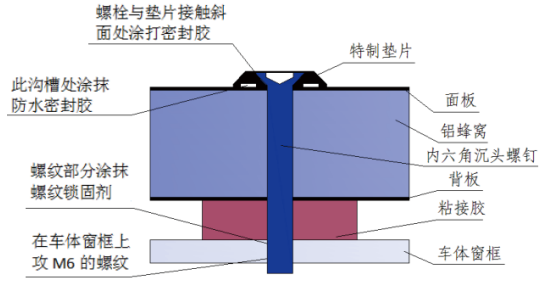

图 11 加固方案截面图

五、强度校核

为确定此加固方案的可靠性，需要对此加固方案进行有限元分析，特建立相应的有限元分析模型，如图 12 所示，进行强度仿真计算分析。

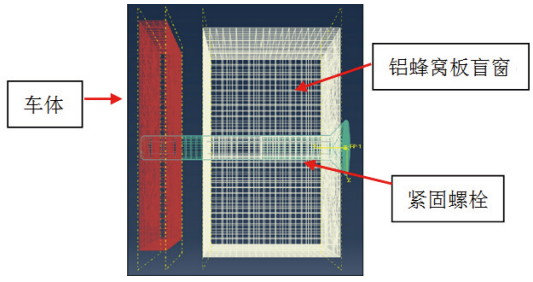

图 12 有限元模型

通过上述计算可知，地铁车辆运营过程中铝蜂窝盲窗所承受的最大负压力值约为 192N。为了安全起见，我们将安全系数设置为 2，则每个铝蜂窝盲窗承受的最大负压力值约为 400N，而每个铝蜂窝盲窗由 4 颗螺栓固定，所以每个固定螺栓承受峰值为 100N 的冲击力。

1、仿真输入准备

本次仿真分析依托通用有限元软件 ABAQUS，加载随时间变化的载荷曲线，进行了正负压波谱模型的建立，如图 13、图 14 所示。

$$a = A_0 + \sum_{n=1}^{N}\left[A_n \cos nw(t - t_0) + B_n \sin nw(t - t_0)\right] \quad \text{for} \quad t \geqslant t_0$$

$$a = A_0 \quad \text{for} \quad t < t_0$$

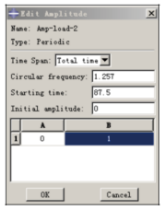

图 13 正负压波谱幅值的设定

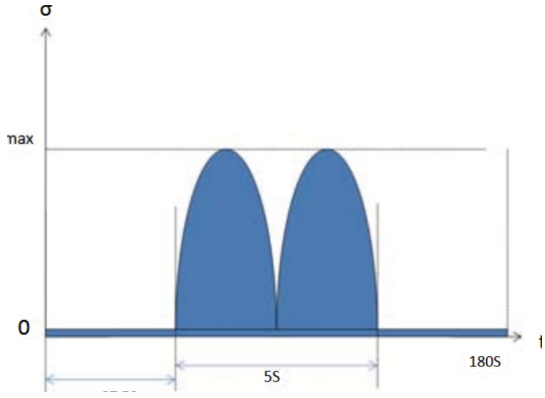

图 14 预置的双波峰交替正负压波谱

为得出正负压周期内各部分应力状态的变化，利用连续介质力学理论，建立相应的有限元模型，如图 15 所示，模拟其在正负压过程中的失效行为，连接件各部分属性如表 1 所列。

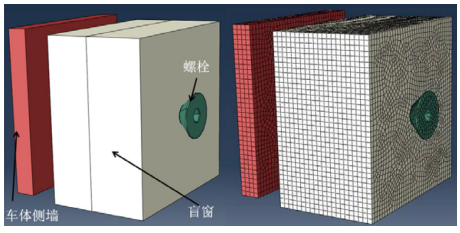

图 15 有限元分析模型

表 1 各部分属性说明

连接件类型	材料名称	备注
车体侧墙	铝合金	其螺纹处为本次分析重点，S-N 曲线
盲窗	铝合金	只作参考，不做分析重点，S-N 曲线
螺栓	不锈钢	只作参考，不做分析重点，S-N 曲线

疲劳性能评估：根据以上计算，疲劳性能可通过 ABAQUS 计算的应力分析结果导入到 FeSafe 中进行联合求解，得到交变应力作用下连接件抵抗破坏的能力，判断其在经历一定程度循环载荷作用后是否发生破坏，间接预测连接件在运行情况的服役行为。

此次仿真分析在 Fesafe 软件中设置疲劳次数 1000 万次，预测该模型的损伤状态，如图 16 所示。

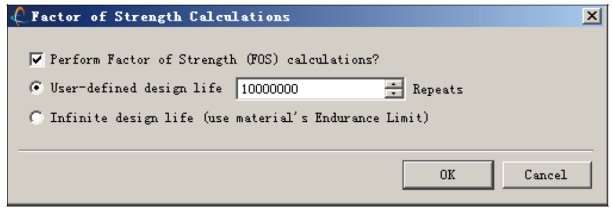

图 16 疲劳次数参数设置

2、仿真分析

将上述工况数据输入 ABAQUS 分析软件中，进行仿真计算，仿真结果见图 17、图 18 所示，在预设载荷作用下，侧墙板产生了较小的接触应力，最大 Mises 应力为 2.45MPa，并通过输出的载荷波形与预置的波形趋势对比，进行模型参数评定。

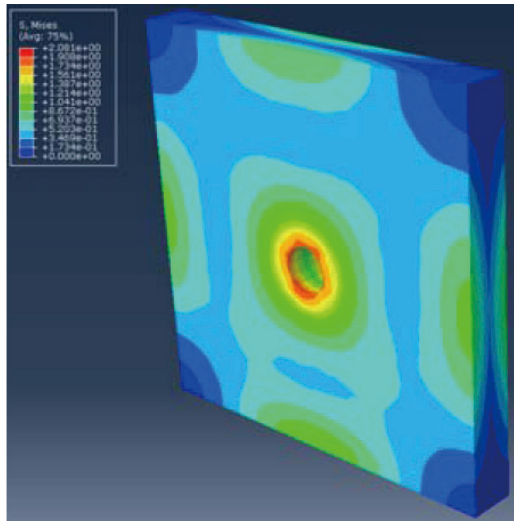

图 17 侧墙板的接触压应力状态

投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

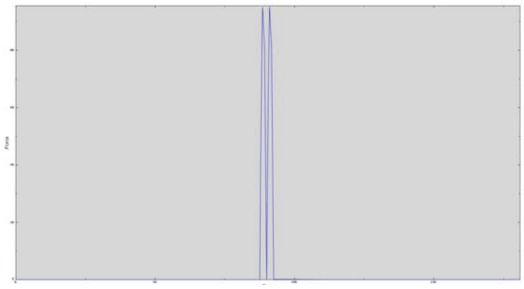

图 18 输出的载荷谱波形

将以上数据模型导入 Fesafe 分析软件中，通过 Fesafe 分析结果看出，该模型各部分材料均未发生损伤，如图 19 所示。

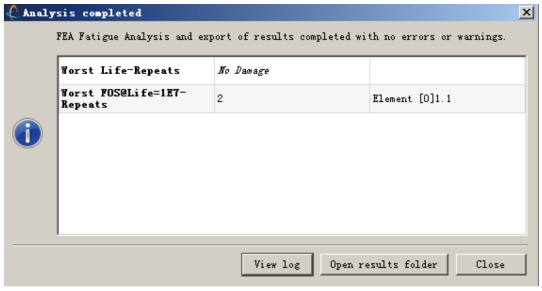

图 19 疲劳评估结果

3、仿真结果

针对利用螺栓将铝蜂窝板盲窗安装于车体侧墙的加固方案，通过 ABAQUS 的有限元分析，在上述条件正负压波谱的服役工况下，螺栓最大 Mises 应力为 16.91MPa，侧墙板最大 Mises 应力为 2.45MPa，盲窗最大 Mises 应力为 4.57MPa，均未超过材料本身的屈服强度，材料不会发生损伤。

因此，针对地铁车辆铝蜂窝盲窗面板脱落的问题，本文提出的加固方案能够满足地铁车辆运营的安全要求。

六、结论

经过上述分析计算可得，铝蜂窝盲窗的面板脱落故障产生的主要原因是面板与蜂窝芯之间的粘接胶粘接不良。而在铝蜂窝盲窗安装面上钻孔攻丝、增加螺栓紧固的加固方式，能够很好的提高铝蜂窝盲窗的结构强度，杜绝了铝蜂窝盲窗面板因粘接不良而导致脱落的现象。此方案已经运用于某城市的某地铁项目，经过该地铁的长时间运营考核，效果良好。

《智能制造》杂志征稿通知

一、征文范围

1.数字化设计与制造
2.智能设计理论、方法及系统
3.自动化与现代制造系统
4.机器人技术及应用
5.虚拟设计与虚拟样机
6.网络化控制与制造技术
7.绿色设计与绿色制造中的智能技术
8.智能加工、智能检测与控制
9.数字企业与数字化工厂
10.制造系统建模、运行、控制、优化与调度
11.先进制造模式与战略
12.制造信息与知识处理
13.数控技术与数字化装备
14.现场总线与无线传感网技术

注：以上内容范畴供参考，围绕智能制造全领域，具体题目请自拟。

二、论文遴选、刊录出版和基本要求

1.《智能制造》编辑部组织编委会有关专家，对投稿进行审查、遴选，择优刊登。审查遴选期限为自编辑部收到稿件后的三个月。对于刊登的论文，编辑部提供正式录用通知。

2.论文内容必须是作者未正式发表过的研究成果，论文主题与智能制造相关，投稿作者须恪守学术道德规范，文责自负，严禁一稿多投及中途撤稿。论文字数4000～7000字。

3.论文应包括以下项目：论文题目；作者简介（200字以内，包括姓名、工作单位、通信地址、电话、手机、电子信箱等）；中文摘要、关键词、标题和正文、参考文献。

编辑部投稿联系方式

联系人：张友苹
联系电话：010-68993880-293
邮箱：imchina@idnovo.com.cn