

高速列车玻璃钢裙板连接角铁失效有限元仿真分析

江兰馨¹,肖守讷²

(1. 四川大学 机械工程学院,四川 成都 610065;

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:研究了高速列车玻璃钢裙板连接角铁处失效情况,列车行驶中存在角铁折断与胶层开裂。介绍了连接角铁的糊制工艺,并根据工艺特点进行连接角铁的建模。对裙板进行有限元仿真分析,施加标准中推荐的最恶劣冲击工况,得到3个连接角铁处的角铁和胶层的应力分布,分析造成失效的原因,并根据结构特点提出3种优化方案。通过增加胶层厚度、增大胶层面积和增大角铁厚度,得到较好的优化结果,优化后的角铁应力和胶层应力均符合设计要求,可有效改善目前存在的断裂问题。

关键词:玻璃钢裙板连接角铁;失效模式;有限元仿真;优化设计

中图分类号:U270.38 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)04-0109-04

Finite Element Analysis of FRP Apron Angle Iron Joint Failure in High Speed Train

JIANG Lanxin¹, XIAO Shoune²

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper studies the failure of the angle iron joint of FRP apron in high-speed train caused by angle iron breaking and adhesive layer cracking in the process of train running. The paste process of connecting angle iron joint is introduced and the joint is built based on the process characteristics. The finite element analysis on the apron is carried out and the worst impact condition recommended in the standard is applied, obtaining the stress distribution of angle iron and adhesive layer at three joints. By analyzing the causes of failure and according to the structure characteristics, three optimization schemes are proposed, which include increases in the thicknesses of adhesive layer, the area of adhesive layer and angle iron. The optimized stress of angle iron and adhesive meets the design requirements, which can effectively improve the fracture problems.

Keywords: FRP apron angle iron; failure mode; finite element simulation; optimization design

0 引言

纤维增强复合材料是由基体和纤维增强复合而成的新型材料,具有质量轻、比强度高、比模量大、可设计性强的特点,由于其优异的性能在航空航天、轨道交通、船舶领域都有广泛应用。近年来特别是在高速列车领域,纤维增强复合材料的应用日益增多,从一开始的车内装饰件、行李架等非承力件,到转向架、司机室、车体等承力结构,高速列车上越来越多的地方能够看到纤维增强复合材料的使用^[1-3]。纤维增强复合材料中目前应用较多的有玻璃纤维(即玻璃钢)、碳纤维、芳纶纤维等,而玻璃钢由于其耐腐蚀、成本低、轻质高强的特点,很早就开始得以应用,直到现在仍占有一席之地。

高速列车的裙板由支撑骨架和导流罩板组成,其中裙板主体结构由模压成型的玻璃钢组成。在列车行驶过程中,玻璃钢裙板在受气动载荷影响下连接强度、开裂问题

一直是研究的热点。张永昌^[4]建立了流体计算模型,分别考察了高速列车在明线行驶与强侧风行驶工况下,设备舱两侧裙板受气动载荷的变化规律,并将此载荷施加到裙板结构中,得到裙板及其支架的变形和应力分布。同样地,范乐天等^[5]研究了不同载荷下,某高速列车头车一位端玻璃钢裙板的应力情况,并对安装座螺栓进行校核。宫高霞等^[6]就高速动车组转向架区域裙板开裂和螺栓松动问题进行了优化研究,并对比优化前后的裙板应力幅值,验证了优化方案的可行性。然而该研究对象主要针对安装座的开裂和螺栓松动,并未考察裙板连接角铁的开裂问题。杨志刚、朱剑月等^[7-8]则研究了裙板对列车气动性能、流场、气动噪声的影响。从目前的研究情况看,高速列车在行驶过程中裙板受气动载荷影响,其开裂等问题常有发生,而目前研究的重点都集中在安装座上,裙板与裙板之间连接角铁的连接问题还未见研究。本文就玻璃钢裙板连接角铁开裂的问题,对玻璃钢裙板进行有限元仿真分

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB1200602-14);国家自然科学基金项目(52175123);牵引动力国家重点实验室自主研究课题项目(2020TPL_T07)

第一作者简介:江兰馨(1993-),女,四川自贡人,博士研究生,研究方向为复合材料在轨道交通及机械行业的轻量化应用和有限元仿真分析及软件开发、结构强度及可靠性分析,jlx@my.swjtu.edu.cn。

析,重点研究了连接角铁应力、玻璃钢与角铁之间胶层的应力,并提出优化方案,最后对比了优化前后连接角铁应力水平,验证了优化方案的有效性。

1 连接角铁失效现状

图1为某动车组头车一位端玻璃钢裙板与本文的研究对象连接角铁。该裙板由4部分组成,每块裙板下侧安装有连接角铁,见图示位置标记处。

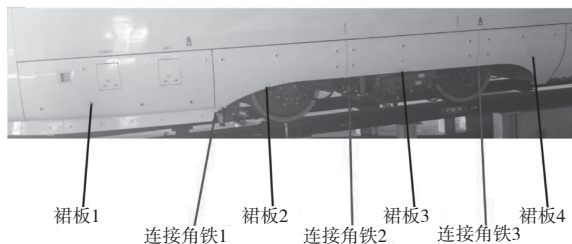


图1 动车组头车一位端玻璃钢裙板与连接角铁

图中3个连接角铁的主要作用是连接4块裙板,减小裙板底部的变形和应力。该角铁为L型,与玻璃钢裙板的连接底部金属表面先进行打磨处理,然后将粗糙底部涂抹粘接剂,再固定到定位好的裙板上。粘接剂固化时需固定L型角铁,不能承受任何载荷。之后再采用错层糊制工艺,每一层依次由下到上糊制短切毡、复合纤维布,每层都需压实,最后得到连接好的角铁和裙板,如图2所示。

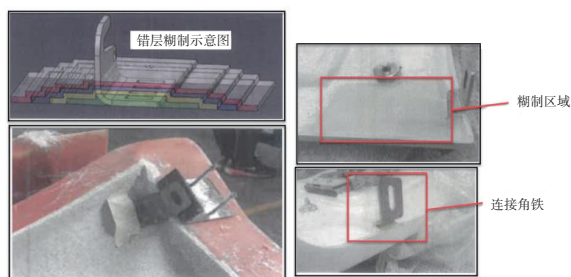


图2 连接角铁糊制工艺图

裙板与裙板之间的角铁采用螺栓连接固定,在列车行驶过程中,出现了连接角铁折断、角铁与裙板之间胶层开裂等现象,如图3所示。长此以往容易造成安全隐患,因此需考察结构件在气压载荷下的应力水平,对该连接结构进行优化,以减少或是杜绝此类问题的发生。

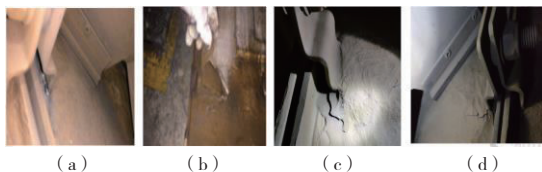


图3 连接角铁折断与胶层开裂示意图

2 有限元模型

2.1 网格划分

首先对裙板模型进行网格划分,如图4所示,整体模型多采用 shell181 号壳单元,在安装座处有少量 solid185

号实体单元。连接角铁和胶层作为重点分析对象采用实体单元划分,一些非受力的连接角铁处采用 shell91 号层合板单元进行简化建模,螺栓连接处采用 beam118 号单元模拟。模型的单元尺寸为 5 mm,整个模型有 245 202 个单元,其中 beam 单元有 112 个。

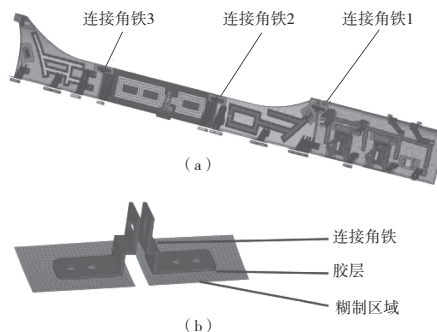


图4 裙板与连接角铁有限元模型

模型材料参数如表1所示,材料涉及玻璃钢裙板、安装座、连接角铁和胶层,后续将重点考察连接角铁与胶层的应力情况。

表1 材料参数

部件	材料	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松比	许用强度/MPa	
					母材	焊缝
安装座	X5CrNi 18-10	7 850	186	0.3	230	230
连接角铁	S30408	7 850	183	0.3	205	205
裙板	玻璃钢	1 800	13.8	0.1	104	—
胶层	HT300	980	10	0.3	20 (拉伸)	18 (剪切)

2.2 约束与载荷

在列车行驶过程中,裙板主要受气动载荷。气动载荷的定义为气流产生压力 q ,描述局部最大压力负荷的表达式为^[5]

$$q = \frac{1}{2} \rho v_a^2 \quad (1)$$

式中: q 为气流产生的冲击压力; ρ 为空气密度; v_a 为入射气流的相对速度。

根据 EN 12663《铁路应用 铁道车辆车体结构要求》及相关技术条件可确定玻璃钢裙板强度工况如表2所示。静强度评价标准依据 EN 12663,安全系数取 1.15。在多个冲击工况中,采用最恶劣工况进行计算,即气动载荷最大值的工况进行加载。

表2 工况参数

加速度			气动载荷/Pa
纵向(x)	横向(y)	垂向(z)	
-3g	0	1g	4 000(向外压)

具体到裙板的有限元模型中,模型中约束全部的安装

座底部,对结构整体加载 $-3g$ 的 x 向加速度, $1g$ 的 z 向加速度,同时在裙板的单元表面施加向外的均匀压力载荷。

3 计算结果分析

图5所示为3个连接角铁的 von mise 应力分布云图,

可知连接角铁1的应力最大,有206.04 MPa,其次是连接角铁3,最大应力169.89 MPa,连接角铁2的最大应力略小一些,有128.25 MPa。角铁1、角铁2的最大应力在螺栓连接处,角铁3的最大应力在底部与胶层相连处,因此角铁1、角铁2更易发生折断,而角铁3开裂的风险较大。

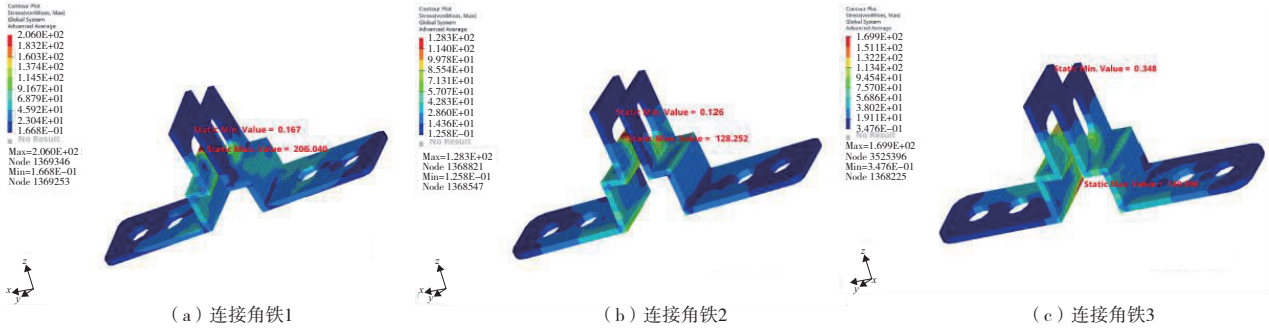


图5 连接角铁应力云图

图6为胶层 von mise 应力分布云图,可以看出与连接角铁相同之处,最大应力均是胶层1>胶层3>胶层2,而最大应力的位置都在边缘处。从左到右取胶层边缘处的节点,提取其应力,可以得到图7所示的应力分布曲线。可

以看出3个位置的胶层应力分布呈现相同趋势,左右两边的应力较小,而中间处应力会陡然增大,这也是造成胶层容易开裂的原因之一。整理计算所得到的结果,分别计算连接角铁与胶层的安全系数,可以得到表3中的数据。

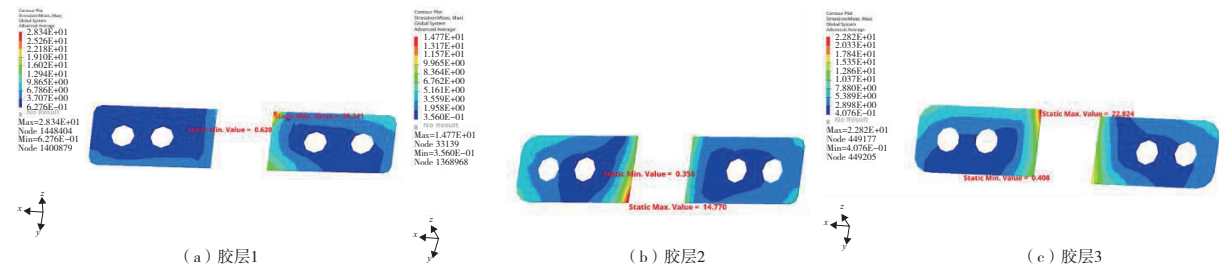


图6 胶层应力云图

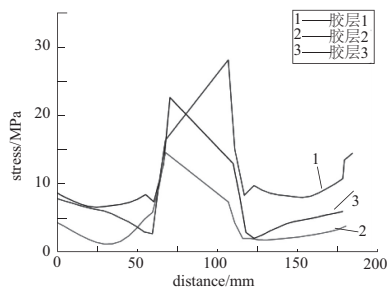


图7 胶层边缘处应力分布曲线

表3 最大应力与安全系数

名称	最大应力/MPa	安全系数
连接角铁1	206.04	0.99
连接角铁2	128.25	1.60
连接角铁3	169.89	1.21
胶层1	28.34	0.71
胶层2	14.77	1.35
胶层3	22.82	0.87

在静强度评价标准依据 EN 12663 中,安全系数取1.15,由此可见连接角铁1风险最大,同时存在角铁折断和胶层开裂的隐患,连接角铁3处存在胶层开裂的可能,只有连接角铁2的位置是符合安全系数标准的。因此需对该裙板的连接角铁进行优化,减小角铁和胶层的应力集中,下章节将对该结构进行优化设计。

4 优化结果对比

根据裙板连接角铁的结构特点,设计了3个优化方案,分别为增加胶层厚度、增大胶层面积和增大角铁厚度。本节将对3个优化方案的优化效果进行对比。

图8(a)为胶层厚度对结构应力值的影响。设置连接角铁与玻璃钢裙板之间的胶层为1.0 mm、1.3 mm和1.6 mm,可以看出随着胶层厚度增大,3个位置处的胶层应力均有所减小。胶层厚度对角铁1、角铁2的影响不大,但却可以显著改善角铁3的应力集中,这是由于角铁1、角铁2的最大应力位置在螺栓处,而角铁3最大应力在底部与胶层的接触处。图8(b)为不同胶层面积下的结构应力值。原结构胶层的面积为75 mm×40 mm,后增加为

80 mm×50 mm 和 85 mm×60 mm,优化后的角铁与胶层的应力均有所减小,同样角铁 2 优化效果明显。除此之外,将角铁的厚度设计为 4 mm、5 mm 和 6 mm,可以得到图 8 (c)中的曲线。角铁厚度的增大可以显著改善角铁应力集中的情况,3 个位置处的角铁应力均改善明显。而角铁厚度对于胶层的影响较小,其应力值略有下降。从 3 种优化方案的结果来看,3 种方案下角铁和胶层的应力值均有

所减小,改变胶层厚度和粘接面积可以减小胶层应力,而增加角铁厚度能够很好地改善角铁的应力集中。然而,从优化结果来看,由于连接角铁结构的特点,单一的优化方案还不能满足标准中对结构安全系数的要求。因此最终选择多种优化方案并行使用,其中参数调整为胶层厚度 1.6 mm,胶层面积 85 mm×60 mm,连接角铁厚度为 5 mm,可以得到表 4 中的最终优化方案。

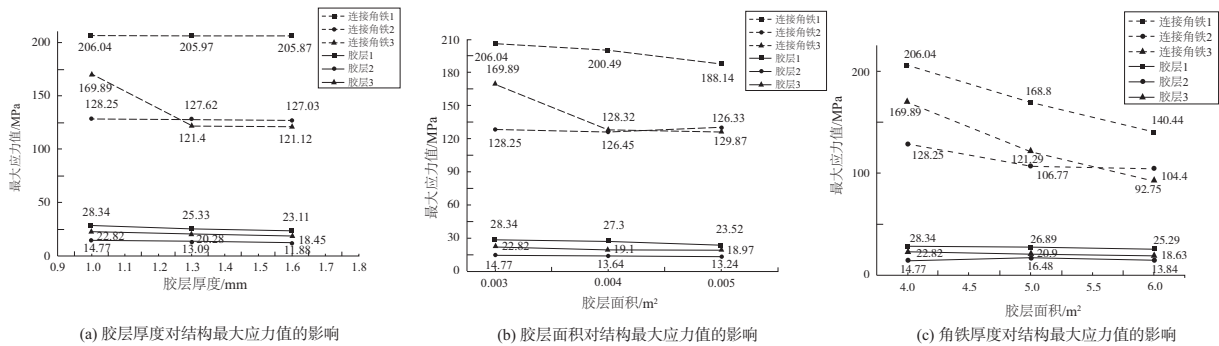


图 8 连接角铁优化结果

表 4 最终优化结果

名称	最大应力/MPa	安全系数
连接角铁 1	149.86	1.37
连接角铁 2	113.21	1.81
连接角铁 3	105.48	1.94
胶层 1	17.12	1.17
胶层 2	10.59	1.89
胶层 3	15.35	1.30

通过对高速列车玻璃钢裙板连接角铁的优化设计,即增加胶层厚度、增大胶层面积以及增大角铁厚度,使连接角铁在车辆行驶过程中的应力集中情况得到改善,从而减少角铁折断和胶层开裂的情况,优化效果较好。角铁最小的安全系数为 1.37,胶层最小安全系数为 1.17,均符合设计要求。在实际应用中,由于增加胶层厚度会增加胶层的缺陷率,而增大胶层面积和角铁厚度又会增加裙板质量,因此在制定优化方案时,还应考虑到轻量化、加工工艺等因素,使裙板性能得到有效提升。

5 结语

本文研究了高速列车玻璃钢裙板连接角铁折断、连接角铁胶层开裂的问题,介绍了连接角铁糊制工艺,并根据工艺特点对其建模。之后对裙板进行整体建模,通过有限元计算得到 3 个角铁和胶层位置处的应力分布,分析造成失效的原因并针对该结构特点进行优化方案设计。通过

增大胶层厚度、增加胶层面积以及增大角铁厚度,计算得到相应结果。胶层厚度和胶层面积的增加可以改善胶层应力,而角铁厚度的增大能有效降低角铁的应力,单一的优化方式无法得到符合设计要求的结构,需综合 3 种方案来进行优化。最终优化结果角铁最大应力值为 149.86 MPa,安全系数 1.37,胶层处最大应力值为 17.12 MPa,安全系数为 1.17,符合 EN 12663 中对结构安全系数的要求。

参考文献:

- [1] 蒋鞠慧,陈敬菊. 复合材料在轨道交通上的应用与发展[J]. 玻璃钢/复合材料,2009(6):81-85.
- [2] 邱桂杰,杨洪忠,高国强,等. 高速列车用复合材料国内外现状与趋势[J]. 高科技纤维与应用,2005,30(6):26-30.
- [3] 肖加余,刘钧,曾竟成,等. 复合材料在高速列车上的应用现状与趋势[J]. 机电传动,2003(增刊1):49-52.
- [4] 张永昌. 高速列车裙板气动载荷仿真识别及结构响应分析[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [5] 范乐天,章国平,管全梅,等. 高速列车玻璃钢裙板结构强度分析[J]. 中国铁路,2013(11):40-43.
- [6] 宫霞霞,许保磊,王力,等. 高速动车组转向架区域裙板结构优化研究[J]. 铁道车辆,2019,57(12):14-16,4.
- [7] 杨志刚,高喆,陈羽,等. 裙板安装对高速列车气动性能影响的数值分析[J]. 计算机辅助工程,2010,19(3):16-21.
- [8] 朱剑月,王毅刚,杨志刚,等. 高速列车转向架区域裙板对流场与气动噪声的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(10):1512-1521.

收稿日期:2022-01-24