

高速磁浮列车三明治复合裙板强度研究

吴秋宇 王明猛 肖守讷 杨 冰 阳光武 朱 涛 王万静

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 三明治复合板结构具有比强度高、比刚度大、优良的隔热和隔声性能等特点, 广泛应用于轨道交通等多个领域。进行了三明治夹层板仿真方法的探究, 得到与试验结果相吻合的适用于高速磁浮裙板结构的仿真建模方法, 验证了三维实体单元建模法在裙板结构静强度分析中的准确性。通过对螺栓校核的两个标准——《机械设计手册》和《VDI 2230—2003 螺栓强度校核标准》, 进行对比分析, 选择了更适合螺栓连接结构校核的标准。利用三维实体建模法建立了高速磁浮列车裙板的有限元模型, 对裙板结构在直线工况、过小曲线半径工况下的结构强度和关键连接部位螺栓连接区域强度进行分析, 验证了裙板结构的合理性, 得到了在各工况下的应力敏感区域和所设计连接结构在《VDI 2230—2003 螺栓强度校核标准》下的安全性。

关键词 高速磁浮列车; 裙板结构; 三明治夹层板; 仿真建模方法; 强度分析

中图分类号 U266.4

DOI:10.16037/j.1007—869x.2020.09.022

Research on the Strength of Sandwich Composite Skirt for High-speed Maglev Train

WU Qiuyu, WANG Mingmeng, XIAO Shoune, YANG Bing, YANG Guangwu, ZHU Tao, WANG Wanjing

Abstract The sandwich composite panel structure features advantages like specific strength, specific stiffness, excellent thermal insulation and sound insulation performance, therefore is widely applied in many fields of rail transit. In this paper, the sandwich panel simulation method is explored, and a simulation modeling method suitable for high-speed maglev skirt structure is obtained, which is very close to the experimental result and is used to verify the accuracy of the 3D solid element modeling method in the static analysis of the apron structure. Then, the Mechanical Design Manual and the VDI 2230-2003 Bolt Strength Checking Standard two standards for bolt calibration are compared and analyzed, a standard more suitable for bolting structure check is selected. Finally, a finite element model of the high-speed maglev train apron is established by using the 3D solid modeling method, in order to analyze the

structural strength of the apron and the strength of the bolt connection area of key connection parts under different working conditions, such as the straight line and small curve radius. Thus, the rationality of the apron structure is verified, the safety of stress sensitive area under various working conditions and the designed connection structure under the VDI 2230 Standard are obtained.

Key words high-speed maglev train; apron structure; sandwich plate; simulation modeling method; intensity analysis

Author's address State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

高速磁浮交通作为一种全新的轨道交通模式, 展现出巨大的发展空间和广阔前景^[1]。考虑到列车高速运行时气动载荷的影响, 在磁浮列车走行机构外侧采用裙板包裹, 以保护走行机构, 且有较好的空气动力学性能。受悬浮力的限制, 轻量化是现阶段磁浮车辆部件设计的重要关注点之一^[2]。

随着绿色节能环保经济的发展, 轻量化设计成为各行各业关注的热点课题^[3]。目前针对结构减重主要从两个方面入手: 材料减重和拓扑优化。在材料减重方面, 现阶段主要采用镁合金、碳纤维增强材料、铝蜂窝夹层板、三明治泡沫夹层板等新材料减轻结构质量。镁合金的使用需解决其在加工成型、焊接及耐腐蚀等方面的诸多问题^[4]; 碳纤维增强材料价格昂贵, 回收环节存在环保等相关问题; 铝蜂窝夹层板在蜂窝心成型、心材与面板的焊接方面制作工艺复杂。相较于以上 3 种材料, 三明治复合夹心板易加工成型, 价格便宜, 在满足强度要求下, 轻量化效果好, 进而已被广泛应用。

1 三明治复合板结构

1.1 三明治复合板结构

三明治夹层板结构通常由两层较薄的上下面板、上下胶合层和中间厚度较厚的轻质心材构成。在三明治复合结构中, 面板主要承受拉压力与弯

矩,较厚的芯材在结构上增加了端面模量和弯曲刚度,既满足强度要求又能提供较大的刚度,不需要再附加筋板来提高构件的承载能力。三明治复合板结构如图 1 所示。

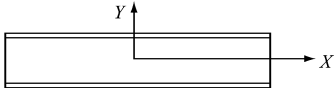


图 1 三明治复合板结构

1.2 三明治复合板结构有限元建模方法

现阶段三明治复合结构有限元建模方法主要有 4 种:三维实体单元建模法、基于经典层合理论的建模法^[5]、等效截面法^[6]、等效材料法^[7]。三维实体单元建模法是目前比较通用的仿真方法^[8]。

以三维实体单元建模方法的计算结果作为对比基础,同济大学赵洪伦教授团队将现阶段关于三明治结构主要的 4 种建模方法的求解精度进行了对比。研究表明:在相同工况下,几种建模方法所得的应力应变变化趋势与分布大致相同,各阶模态频率也都较为接近^[9];但等效截面法在计算结构承受发生弯曲变形的载荷时,计算误差偏大;等效材料法在计算结构承受拉压变形的载荷时,计算误差偏大;基于经典层合理论的建模法在两种载荷工况中都有较好的吻合度,但在模型承受垂向载荷时,误差在 15%~50% 之间波动。

在本文的有限元计算中,由于高速磁浮列车裙板相较于车体结构尺寸小,主要载荷为面载(针对三明治板结构而言为垂向载荷),为了保证计算精度,采用三维实体单元建模法对裙板结构进行有限元建模仿真计算,并且对心层与面板之间的胶黏结构进行了模拟。

1.3 三维实体单元建模法的数值计算精度

本文采用三维实体单元建模方法建立三明治夹层板三点弯模型。其中将三明治夹层板中较厚的心材采用三维实体单元建模,相较于心材厚度较薄的面板采用壳单元建立模型,并将仿真计算结果与三点弯试验结果进行对比分析,探究仿真模型计算精度。

为减小仿真试验对比过程中由材料引起的误差,仿真采用的材料参数由同一批次材料力学试验测得。由试验所得三明治复合板各部件的具体参数如表 1 所示。

在仿真分析中采用与试验相同的加载边界条件。具体有限元模型如图 2 所示。

表 1 三明治复合板具体参数

具体参数	上(下)面板	心材
弹性模量 E/MPa	70 000	28
材料的泊松比 ν	0.3	0.4
材料屈服强度 σ_s/MPa	175	0.9
材料密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	2 700	91
尺寸(长×宽×高)	600.0 mm×60.0 mm×0.6 mm	600.0 mm×60.0 mm×40 mm

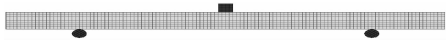


图 2 三明治复合板三点弯有限元模型

根据国标 GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》^[10],对三明治夹层板进行三点弯试验,并将试验所得载荷-位移曲线与有限元仿真所得载荷-位移曲线进行对比分析。两种方法所得载荷-位移曲线如图 3 所示。

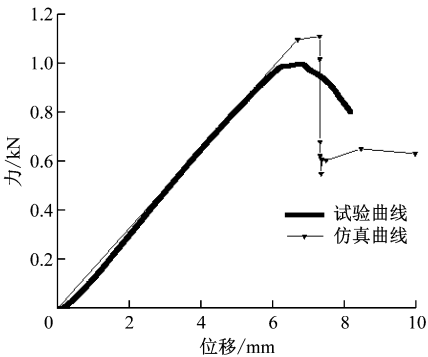


图 3 三点弯试验和仿真的载荷-位移曲线

由 GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》可得夹层结构心材剪切应力计算公式为:

$$\tau_c = \frac{PK}{2b(h - t_f)} \tag{1}$$

面板应力计算公式为:

$$\sigma_f = \frac{Pl}{4bt_f(h - t_f)} \tag{2}$$

弯曲刚度计算公式为:

$$D = \frac{l^2 a \Delta P}{16f_1} \tag{3}$$

式中:

- l ——跨距,mm;
- P ——跨中载荷,N;
- K ——无量纲数,不计面板承受剪切时取值为 1;
- b ——试样宽度,mm;

h ——试样厚度,mm;
 P ——破坏载荷,N;
 D ——夹层结构的弯曲刚度, $\text{N} \cdot \text{mm}^2$;
 a ——外伸臂长度,mm;
 ΔP ——载荷-挠度曲线初始阶段的载荷增量值,N;
 f_1 ——对应 ΔP 的外伸点的挠度增量值(取左右两点的平均值),mm;
 τ_c ——心子剪切应力,MPa;
 t_f ——面板厚度,mm;
 σ_f ——面板中的拉压应力,mm。

根据式(1)一式(3),计算得到三明治复合板在三点弯曲工况下强度指标的实验值和仿真计算值,具体结果如表 2 所示。

表 2 三明治复合板强度计算结果

项目	剪切强度/MPa	弯曲强度/MPa	弯曲刚度/($\text{N} \cdot \text{mm}^2$)
试验值	0.21	85.39	1.81×10^7
模拟值	0.23	93.79	1.94×10^7
误差	9.52%	9.84%	6.70%

由图 3 可以看出:在三点弯工况中,有限元仿真和实验所得的载荷-位移曲线在弹性段重合度极高,最大误差小于 1%;仿真所得的破坏载荷略大于试验中的破坏载荷,但误差小于 10%。由表 2 可知:三明治夹层板在剪切强度、弯曲强度、弯曲刚度 3 个强度指标方面,仿真结果与实验结果有较好的吻合度,误差均小于 10%。以上结果表明:利用三维实体单元建模法的仿真计算结果有较高的精度,在主要考核指标中与实验结果误差均满足工程对误差的要求。

2 螺栓强度评估方法对比

现阶段针对螺栓校核的理论计算主要基于两个标准——《机械设计手册》^[11] 和《VDI 2230—2003 螺栓强度校核标准》^[12](简称 VDI 2230)。两个标准差异最大的方面为螺栓载荷分配系数的确定方式,具体如下:

- 1)《机械设计手册》中给出了不同材质的螺栓与被连接件对应的载荷分配系数的取值范围。
- 2)在 VDI 2230 中,载荷分配系数 = 相对刚度系数 × 载荷导入系数。相对刚度系数通过理论计算得出,该标准引入了变形体的概念,基于螺栓和被连接件变形体的变形量可计算出螺栓连接结构

的相对刚度系数。载荷分配系数主要由被连接件的几何外形和载荷导入位置两个因素决定。最终由相对刚度系数和载荷导入系数共同确定出载荷分配系数。

在进行螺栓强度校核过程中,《机械设计手册》评价指标为螺栓最大拉应力、螺栓杆挤压应力、螺栓杆剪切应力,VDI 2230 评价指标更加全面,分别为螺栓最大装配预紧力、螺栓最大组合应力、承载面挤压强度、螺栓剪切强度、滑移安全系数。

在螺栓强度校核方面,VDI 2230 相较于《机械工程手册》,考虑了螺栓各段尺寸、被夹紧件的弹性变形、接触界面的摩擦系数、预紧力损失和预紧力引起的螺栓扭转应力,还将承载面挤压强度与滑移安全系数作为考核要素,关注了被夹紧件的安全,增强了螺栓连接处强度考核的全面性。另一方面,VDI 2230 相较于《机械工程手册》,在进行强度估计时留有较大的安全余量。因此,利用 VDI 2230 的校核结果进行螺栓连接处设计,可以有效地减少强度浪费,为结构设计留有更大的空间。

3 高速磁浮裙板结构强度校核

某高速磁浮车体三明治复合裙板结构主要由 H 型骨架、边框型材、三明治夹层板等结构组成。为了提高有限元模型仿真结果的准确性,对裙板中黏接胶层、橡胶条等结构进行了有限元建模。

3.1 有限元模型说明与材料参数设定

各部件具体材料参数如表 3 所示。

表 3 裙板结构及材料

部件	结构	厚度/mm	材料	屈服强度/MPa
三明治复合板	上面板	0.9	6 系铝合金	210.0
	下面板	0.7	6 系铝合金	210.0
	芯材	20.0	轻质高强度泡沫	0.9
	胶层	0.2	结构胶	3.2
骨架	H 型骨架	3,4	6 系铝合金	215.0
	边框型材	3,4	6 系铝合金	215.0
结构胶	多层胶粘	0.5	结构胶	3.2

裙板结构有限元模型中单元类型主要有以下 4 种:板壳单元、实体单元、层合板单元、BEAM 单元。各部分有限元模型描述如下:

- 1) 三明治夹层板建模。针对裙板主体结构三明治夹层板,采用第 2 节所验证计算精度的三维实体单元建模法进行建模,三明治复合板心材采用实

体单元进行模拟,面板采用壳单元进行模拟。

2) 螺栓连接结构建模。螺栓连接区域采用实体单元模拟真实螺栓连接处的结构,并对此部分单元进行细化,螺栓采用 BEAM188 单元进行模拟。

3) 多层胶接结构建模。裙板结构中三明治夹层板面板与心层、面板与预埋件、面板与 H 型骨架之间均通过结构胶黏接连接。建模过程中,将胶黏连接区域单独分组,采用层合板单元对多层胶接部位进行铺层设计,以便评价各工况下胶黏部位是否脱胶。

4) 接触单元类型。对于转轴、锁止机构等具有一定自由度的连接部位,建模时保留其真实几何结构,并通过接触单元保留部件间的自由度,从而提高仿真计算精度。采用 TARGE170HE 和 CONTACT174 单元对接触部位进行模拟,根据真实情况选择合理接触类型及接触面间的摩擦系数。

5) 端面橡胶条。裙板端面薄胶条采用 SHELL181 单元进行建模模拟,材料本构采用 ANSYS 中的两参数超弹性材料 Mooney-Rivlin 本构模型,模型参数为 C_{01} 、 C_{10} 和 ν 。且满足:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \tag{4}$$

式中:

- W ——应变能函数;
- ν ——泊松比,取值 0.49;
- C_{01} 、 C_{10} ——材料的正定常数;
- I_1 和 I_2 ——第一和第二 Green 应变不变量。

试验证明,对于绝大多数橡胶,当 $C_{10}:C_{01} \approx 0.1:0.2$ 、应变为 150% 以内时,满足上述本构模型^[13]。由于超弹性包括了几何非线性效应,所以为了提高仿真计算的收敛,在求解过程中,开启大变形效应,同时延缓施加载荷,使用多个子部求解。

3.2 边界条件及载荷设置

基于高速磁浮列车裙板的三维实体模型,建立三明治裙板结构的有限元分析模型。选择 4 种典型直线工况和 1 个过小曲线半径工况。在过小半径曲线工况,在仿真计算时,将载荷等效到裙板两端胶条处,在胶条处施加 X、Y、Z 三个方向的位移载荷 ($X = -23.5\text{ mm}$, $Y = -5\text{ mm}$, $Z = -6\text{ mm}$)。4 种工况具体载荷描述如表 4 所示。

3.3 裙板结构强度计算结果

根据分析 4 个直线运行工况的应力云图可以发现,各个工况下的应力云图分布相似,应力集中部位主要有以下几处:

表 4 4 个直线工况与过小曲线半径工况的载荷描述

工况	惯性力/N			载荷/Pa	载荷描述
	X	Y	Z		
1	$-m \times 3.5$	$m \times 17$	$m \times 26.01$	面载 4 820	面载方向:Y 轴正向
2	$-m \times 3.5$	$m \times 17$	$m \times 26.01$	面载 2 250	面载方向:Y 轴正向
3	$-m \times 3.5$	$-m \times 17$	$m \times 26.01$	面载 -2 250	面载方向:Y 轴负向
4	$-m \times 3.5$	$-m \times 17$	$m \times 26.01$	面载 1 503	面载方向:Y 轴正向

注:m 为质量。

1) H 型骨架的横梁与纵梁连接扣件处。由于连接扣件未进行倒角处理,此处有一定的应力集中,应力梯度变化明显区域主要为 H 型骨架横梁与纵梁连接处、上裙板边框型材中部。

2) 锁止机构与面板之间的撑档处。在大面积光滑三明治内面板上有 4 处锁止机构的撑档块,由于材料与单元类型的不同,此处出现刚度差异,造成了一定程度上的应力集中。除了应力集中区域,靠近中间横梁端的面板应力梯度变化明显。

3) 胶层应力集中区域主要在中间横梁黏接处,下裙板下部的应力梯度变化明显。

当列车过小半径曲线时,外裙板端面胶条处于压缩状态。在最恶劣的曲线工况(工况 5)下,应力集中部位主要有:最大等效力集中在边框型材上胶条安装支架拐角处;胶层应力集中区域为中间横梁与三明治复合板黏接区域中靠近胶条端。

上文 5 个工况下裙板的最大位移与各部件最大等效力值如表 5 所示。

表 5 三明治复合裙板最大位移与各部件应力

工况	最大应力/MPa				最大位移/mm	位置
	面板	心材	骨架	胶层		
1	65.00	0.48	115.16	1.98	10.10	下裙板下端
2	42.95	0.26	62.45	1.89	2.55	裙板整体中部
3	76.46	0.53	157.58	2.87	13.00	下裙板下端
4	23.40	0.12	59.22	1.16	1.54	上裙板顶部
5	23.15	0.08	51.29	1.71	0.55	端部安装座

对比直线工况与曲线工况应力结果可发现:在曲线工况中,端部边框型材上应力梯度变化明显,裙板中三明治复合板与中间横梁受力较小;直线工况中,应力集中区域主要分布在边梁与中间横梁连接尖角处、锁止块处、锁止机构安装座尖角处。

3.4 H 型骨架连接螺栓强度计算结果

利用 VDI 2230 对 H 型骨架连接处的螺栓进行

了强度校核,验证连接结构的安全性。高速磁浮裙板中螺栓结构各指标应力如表 6 所示。

表 6 螺栓结构各指标应力

指标	仿真应力	许用应力
最大装配预紧力/N	9 880	<9 886
最大工作应力/N	512	<640
最大承压面挤压应力/N	189	<230
最大剪切应力/N	94. 9	<520
最小滑移安全系数	1. 23	>1. 20

根据标准,仿真计算结果中螺栓最大剪切应力与滑移安全系数均满足要求。在 5 个工况下,M6、M8 螺栓的静强度、剪切强度、承载面挤压强度和抗滑移均满足要求。

4 结语

本文探讨了三明治夹层板有限元模型不同的建模方法,通过与试验结果对比分析得到了精度较高的仿真方法;同时对比分析了螺栓校核方法和高速磁浮列车三明治复合裙板的结构强度,并对关键部位螺栓连接结构进行了强度校核。具体结论如下:

- 1) 在三点弯试验中,仿真结果与试验结果在剪切强度、弯曲强度和弯曲刚度 3 个指标上的误差均在 10% 之内,采用三维实体单元建模法对三明治夹层板结构进行建模仿真分析,能够保证计算结果的精度。
- 2) 通过对螺栓校核的两个标准——《机械设计手册》和 VDI 2230 的对比分析可以得出,利用 VDI 2230 进行螺栓的校核增强了螺栓连接处强度考核的全面性,运用该标准校核结果指导连接结构设计,可以为结构设计留有更大的空间。
- 3) 分析 4 个直线运行工况应力云图可以发现,

应力集中部位主要在 H 型骨架横梁连接件尖角处纵梁上的定位块处,胶层最大应力主要出现在中间横梁胶层处。相较于直线运行工况,在列车过小半径曲线工况中,裙板结构在最大等效力和最大位移两方面均较小。在直线工况与小半径曲线工况下,裙板关键连接处的螺栓强度均满足 VDI 2230 的要求。

参考文献

- [1] 严陆光. 高速磁悬浮列车技术及其在我国客运交通中的战略地位[J]. 科技导报,1999(8):34.
- [2] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [3] 何凤亿,朱合瑞,王旭初,等. 汽车门饰板轻量化方案浅析[J]. 汽车实用技术,2018(21):145.
- [4] 刘宇,王峰,苏强,等. 轻量化复合材料车体设计与分析[J]. 城市轨道交通研究,2018(1):25.
- [5] TANOV R, TABIEI A. Finite element implementation of a new sandwich homogenization procedure[J]. Composite Structure, 2000, 50(1): 49.
- [6] BOGDANVICH A E, DEEPAK B P. Three-dimensional analysis of thick composite plates with multiple layers[J]. Composite, 1997(28B): 345.
- [7] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,1996:80.
- [8] 俞程亮. 三明治复合板结构高速磁浮列车承载结构优化研究[D]. 上海:同济大学,2006.
- [9] 赵洪伦,俞程亮,王文斌. 高速磁浮列车车体承载结构优化设计研究[J]. 铁道学报,2007(4):43.
- [10] 夹层结构弯曲性能试验方法:GB/T 1456—2005[S]. 北京:中国标准出版社,1978.
- [11] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [12] VDI. Systematic calculation of highduty bolted joints with several cylindrical bol: VDI 2230_2011_BLATT2 [S]. Berlin: VDI, 2003.
- [13] 郑明军,王文静,陈政南,等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定[J]. 橡胶工业,2003(8):462.

(收稿日期:2018-12-11)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. com