

doi : 10.3969 / j.issn.1001-3539.2018.10.013

动车高压箱顶盖结构优化设计及试验研究

王明星,周洲,王兴伟,刘波

(株洲时代新材料科技股份有限公司,株洲 412007)

摘要: 高压设备的集成式设计,对顶盖密封、尺寸精度与轻量化提出更高要求。采用加强筋与泡沫夹芯结构对高压设备顶盖进行了结构设计与对比分析。结果显示,泡沫夹芯具有更优的刚度与应力分布特性。采用树脂传递成型(RTM)工艺对顶盖进行制造,产品质量为64.2 kg,减重达25%。400 kg垂直在载荷下,产品最大变形为3.26 mm,较仿真设计位移量2.9 mm 偏高12.4%。通过装车测试,满足主机厂对其轻量化、刚度及密封的使用要求。

关键词: 动车;结构优化,高压箱盖,试验测试

中图分类号: O385 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)10-0068-04

Optimum Design and Experimental Study on Top Cover Structure of High-Voltage Box for High-Speed Rail

Wang Mingxing, Zhou Zhou, Wang Xingwei, Liu Bo

(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract : The integrated design of the high-voltage equipment of the high-speed rail puts forward higher requirements for the seal, dimension precision and light weight of the cover. The reinforced bar and the foam sandwich structure for the cover were designed and optimized. The results show that the foam sandwich structure has a better stiffness and stress distribution. The top cover was manufactured by resin transfer molding (RTM) molding process. The weight of the cover is 64.2 kg, the weight reduction is 25%. Under the vertical load of 400 kg, the maximum deformation of the cover is 3.26 mm, which is 12.4% higher than the displacement 2.9 mm of the simulation design. Through loading testing, it can meet the requirement of lightweight, rigidity and sealing of the host plant.

Keywords : high-speed rail ; optimum design ; high voltage box cover ; experiment test

随着我国经济的高速发展与国人消费水平的提高,高铁在我国迅速崛起,列车的提速成为必然的趋势,而轻量化成为了主要途径之一^[1-8]。动车组高压设备是动车核心部件,并占据一定的比重^[9-11]。为避免绝缘子的积污,绝缘子、高压断路器等高压设备被集成在一个箱体中,并用具有绝缘、轻质的箱盖进行密封,从而减少高压设备的绝缘故障^[11-13]。目前该箱盖主要采用手糊玻璃钢与层压板的结合形式,质量大,刚度较低,尺寸精度低,密封性难于控制,从而导致雨水的浸入,且安装不方便,不能满足高速列车提速的高要求。

采用复合材料轻量化设计理念,对加强筋与泡沫夹芯结构进行结构优化,通过计算机有限元仿真

分析对比,选取最优结构方案,并采用树脂传递成型技术(RTM)成型高压设备顶盖,从而达到解决高压箱密封、轻量化的目的。

1 高压箱盖机构设计

1.1 设计要求

高压箱集成了绝缘子、断路器、避雷器等,动车高压箱及内部结构如图1所示。



图1 高压设备箱

通讯作者:周洲,博士,从事复合材料轻量化产品研发 E-mail : zhouzhou3@csrzc.com

收稿日期:2018-08-04

引用格式:王明星,周洲,王兴伟,等. 动车高压箱顶盖结构优化设计及试验研究[J]. 工程塑料应用,2018,46(10):68-71.

Wang Mingxing, Zhou Zhou, Wang Xingwei, et al. Optimum design and experimental study on the top cover structure of high-voltage box for high-speed rail[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):68-71.

目前高压设备箱顶盖原设计采用层压板与手糊玻璃钢成型工艺,产品笨重,达到 90 kg,并且尺寸一致性差,新一代产品需在接口不变情况下满足轻量化需求与使用要求,具体设计要求见表 1。

表 1 高压箱盖设计要求

要求	设计值
减重	20%
长度	$(1\,823 \pm 0.5)$ mm
宽度	$(1\,510 \pm 0.5)$ mm
高度	(59.5 ± 0.5) mm
400 kg 承载下变形	< 4 mm
垂向、纵向、横向分别在 3g, 5g, 3g 载荷加速度下变形	< 4 mm

1.2 结构设计

采用轻量化设计思路中的两个方案进行设计,如图 2 所示为高压箱盖顶部结构。图 3a 为加强筋结构顶盖背面,即在高压箱盖背面通过加强筋的形式提高其整体刚度,顶盖的玻璃钢厚度为 8 mm,加强筋厚度为 10 mm,间距为 240 mm,整体质量为 63.7 kg。图 3b 为夹芯结构,上下蒙皮厚度为 4 mm,顶盖中部泡沫厚度为 23 mm,周边泡沫厚度为 10 mm,整体质量为 64 kg。

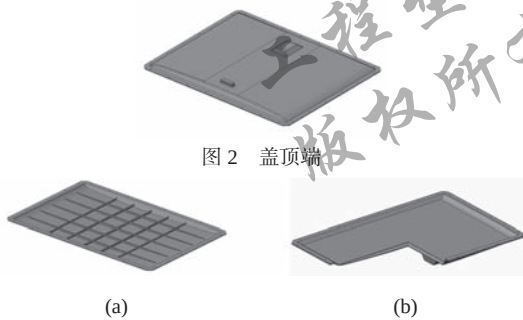


图 2 盖顶端

a—加强筋结构盖;b—泡沫夹芯结构

图 3 加强筋结构盖及泡沫夹芯结构背面

2 有限元分析

2.1 材料参数

玻纤材料采用宏发公司提供的双轴玻璃纤维布,面密度为 400 g/m^2 ,灌注树脂采用惠柏新材公司提供的环氧树脂,牌号为 807AB-1,满足 DIN5510-2-2009 阻燃要求,夹芯用泡沫采用科拉斯公司提供的 60 kg/m^3 阻燃型聚对苯二甲酸乙二酯 (PET)。RTM 成型后材料的性能见表 2 及表 3。其中 1,2 分别代表纤维 0° 方向, 90° 方向,3 代表垂直于 $0,90^\circ$ 平面的厚度方向。 E_{11} , E_{12} 分别为纤维布 0° 与 90° 方向弹性模量, E_{33} 为厚度方向弹性模量, μ_{12} 为 2 方向的应变与 1 方向应变的比值, μ_{13} 为 3 方向的应变与 1 方向应变的比值, μ_{23} 为 3 方向的应

变与 2 方向的应变的比值, G_{12} , G_{13} , G_{23} 为 1,2 平面, 1,3 平面及 2,3 平面的剪切模量。

表 2 玻璃钢性能

参数	数值
拉伸弹性模量 E_{11} , E_{22} / MPa	20 000
拉伸弹性模量 E_{33} / MPa	3 500
泊松比 μ_{12} , μ_{13}	0.217
泊松比 μ_{23}	0.3
剪切弹性模量 G_{12} , G_{13} / MPa	1 200
剪切弹性模量 G_{23} / MPa	800
拉伸强度 / MPa	300
剪切弹性模量 / MPa	40

表 3 泡沫夹芯性能参数

参数	数值
弹性模量 E / MPa	60
泊松比 μ	0.3
剪切强度 G / MPa	0.8

2.2 载荷及边界条件

采用 Hyper Mesh 划分网格,有限元分析运用 ABAQUS6.11 软件进行计算。分析中采用的单位系统为 SI(mm),即 mm, N, MPa, 载荷与边界条件如下:

载荷 1: 400 kg 载荷平均分布在顶盖四个位置,每个点加载 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 均匀载荷,长度方向间距为 1 025 mm,宽度方向间距为 760 mm。将 4 个参考点与加载面进行耦合(如图 4 所示),并分别加载 100 kg 质量,重力加速度为 9.8 m/s^2 。

载荷 2: 给面板垂向(高度方向 Z)、纵向(宽度方向 Y)、横向(长度方向 X)分别加载 3, 5, 3 g 的加速度,其中长垂直方向只加载单向加速度。

边界: 复合材料高压设备上盖板边界四周边界条件为固定(如图 5 所示)。并假设泡沫与玻璃钢接触面不发生相对滑移。

其中,加强筋结构顶盖共有 C3D8R 网格 213 416 个;夹芯结构产品共有网格 223 176 个,其中 C3D8R 网格 133 828 个, C4R 网格 89 348 个;面板采用壳单元,泡沫采用实体单元,面板与泡沫共节点。

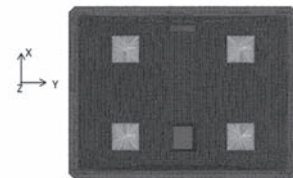


图 4 400 kg 载荷加载点

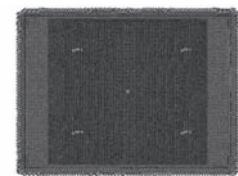


图 5 边界条件

2.3 结果分析

采用 Abaqus 对高压箱顶盖不同结构的均布 4 点 400 kg 垂向载荷,以及在垂向、纵向、横向分别施加 3,5,3 g 的加速度(垂向只考虑单个方向)分别进行有限元仿真分析,顶盖最大变形及各方向应力具体情况见表 4。

表 4 两种方案中各应力数值

垂向、纵向、横向 加速度	最大位 移/mm	最大应力/MPa					
		S_{11}	S_{22}	S_{33}	S_{12}	S_{13}	S_{23}
加 400kg 垂向静载	2.934	-68.49	-18.97	13.59	4.88	2.20	4.53
强 3g,5g,3g 载荷	1.324	-30.17	-8.59	2.74	2.13	0.96	1.96
筋 3g,-5g,3g 载荷	1.327	-30.24	-8.61	2.78	2.14	0.97	-1.96
方 3g,5g,-3g 载荷	1.299	-23.68	-9.00	2.58	-2.11	-1.01	-2.51
案 3g,-5g,-3g 载荷	1.302	-23.69	-9.02	2.61	-2.12	1.02	2.52
400 kg 垂向静载	2.70	-7.37	-4.02	-0.28	0.40	/	/
	2.70	0.098					
泡 3g,5g,3g 载荷	0.75	-2.10	-1.17	-0.14	-0.17	/	/
沫 0.75	0.024(泡沫)						
夹 3g,-5g,3g 载荷	0.75	-2.10	-1.17	-0.14	0.17	/	/
心 0.75	0.024(泡沫)						
方 3g,5g,-3g 载荷	0.74	-2.17	-1.16	-0.12	-0.16	/	/
案 0.74	0.027(泡沫)						
3g,-5g,-3g 载荷	0.74	-2.17	-1.16	-0.12	-0.16	/	/
	0.74	0.027(泡沫)					

在受 400 kg 垂向载荷时,加强筋结构顶盖最大变形出现在顶部中间,位移量为 2.934 mm,如图 6 所示。最大主应力为 S_{11} 方向(X 方向) -68.49 MPa,如图 7 所示,相对于材料拉伸强度 300 MPa,安全系数为 4.38。最大剪切应力为 S_{12} 方向 4.88 MPa,安全系数为 8.19。而夹芯结构顶盖及其中间泡沫最大变形同样出现在顶部中间,位移量为 2.697 mm,如图 6b、图 6c 所示。玻璃钢面板最大主应力为 S_{11} 方向 -7.37 MPa,如图 7b 所示,其安全系数为 40.7,剪切应力较小,可以不用考虑;泡沫芯等效应力为 0.098 MPa,如图 7c 所示,其安全系数为 8.16。因此,可以判定在同等质量的情况下,顶盖在受到垂向 400 kg 载荷时,夹芯结构具有更好的刚度,安全系数更高。

但当顶盖受到垂向、纵向与横向的加速度载荷为 3 g、 ± 5 g 与 ± 3 g 时,加强筋结构顶盖最大位移都在 1.3 mm 左右,且出现在顶盖正中间,而当垂向与横向加速度不变,纵向载荷为 ± 5 g 时,各主应力与剪切应力基本相等,主要是由于在长度方向上,顶盖为对称结构所致。四种情况下最大的主应力 S_{11} 为 -30.24 MPa,安全系数为 9.92。泡沫夹芯结构顶盖最大位移都在 0.75 mm,四种情况下最大的主应力为 -2.17,安全系数为 138;而夹芯泡沫的等

效最大应力为 0.027 MPa,相比于剪切强度小一个数量级。因此,在受到垂向、纵向与横向的不同载荷加速度的情况下,同等质量的泡沫夹芯结构的高压箱顶盖在刚度与应力分布上优于加强筋结构。

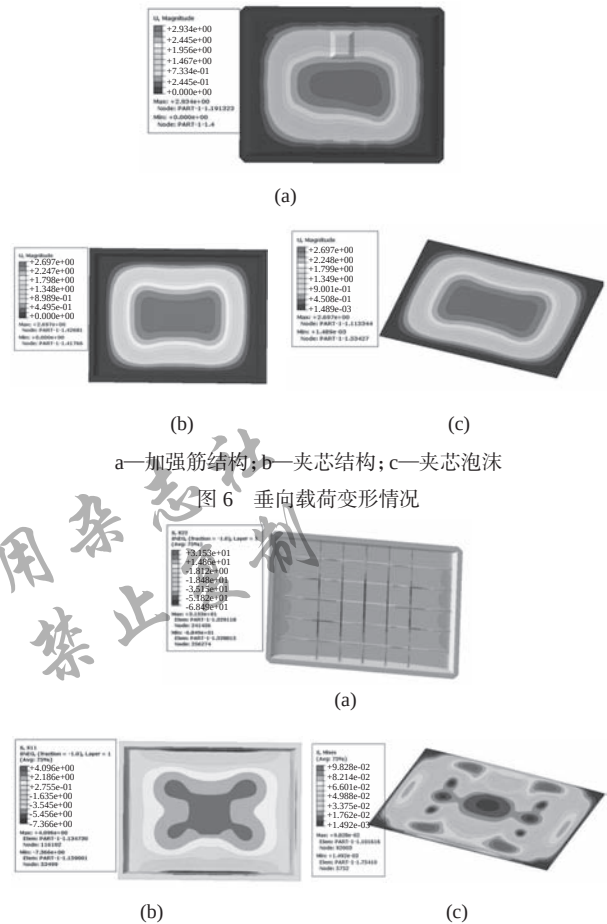


图 6 垂向载荷变形情况
a—加强筋结构;b—夹芯结构;c—夹芯泡沫

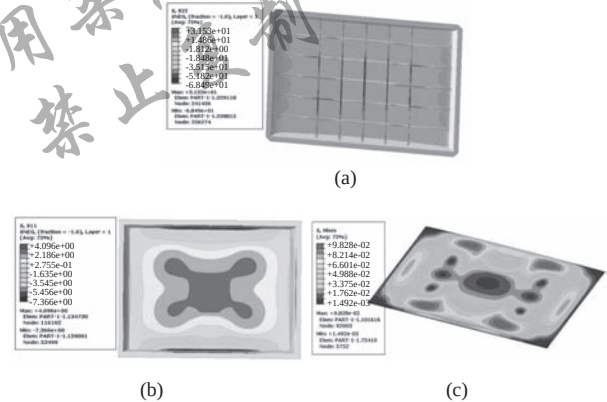


图 7 垂向载荷应力分布
a—加强筋结构 S_{11} 主应力;b—夹芯结构 S_{11} 主应力;c—夹芯泡沫等效应力

3 产品成型及试验测试

通过有限元仿真分析对比与优化,采用泡沫夹芯结构研制高压箱顶盖。为提高产品尺寸精度,保证高压箱顶盖与箱体的配合密封性,顶盖采用 RTM 成型工艺进行制造。产品上下蒙皮采用 400 g/m² 双轴玻纤布,铺 8 层;中间泡沫采用密度为 60 kg/m³ 带导流槽的 PET 泡沫,厚度为 23 mm,周边厚度为 10 mm,保证产品在成型后符合尺寸要求。树脂黏度控制在 150 mPa·s,通过 RTM 灌注设备注射、加热固化与脱模,经后期处理制成最终产品。

制作四点加载工装,加载点的面积为 250 mm×250 mm,通过连杆连接各加载点,在工装上放置适当的砝码使总重在 400 kg,通过中间安装的位移计量器测得 5 个产品的位移量分别为 3.2,

3.5,3.1,3.3,3.2 mm,则平均位移为 3.26 mm,与仿真 2.9 mm 相差 0.36 mm,偏移量为 12.4%,能够较好的预测高压箱盖在垂直载荷情况下的位移量,如图 8 所示。最终将成型好的高压箱顶盖进行油漆处理与连接孔处理,安装在车体高压箱上,如图 9 所示。装车检测发现,配合良好,密封性得到保证。

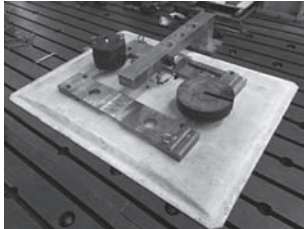


图 8 垂直载荷刚度测试



图 9 高压箱顶盖安装示意

4 结论

(1) 通过有限元分析对比了高压箱顶盖加强筋与泡沫夹芯结构,在减重达 25%、泡沫夹芯结构在垂向载荷以及各方向载荷加速度情况下,刚度与应力分布都优于加强筋结构的顶盖。

(2) 泡沫夹芯结构高压箱顶盖蒙皮及其中间泡沫最大变形出现在顶部中间,位移量为 2.697 mm。玻璃钢蒙皮板最大主应力为 S_{11} 方向 -7.37 MPa,安全系数为 40.7,剪切应力较小,可以不用考虑;泡沫芯应力为 0.098 MPa,其安全系数为 8.16。

(3) 泡沫夹芯结构高压箱顶盖可以 RTM 成型工艺进行制造,从而提高产品尺寸精度与密封性,产品 400 kg 垂向载荷刚度测试平均位移量为 3.26 mm,相比于仿真位移量偏差为 +12.4%,能较好地预测产品垂向载荷变形量。

参考文献

- [1] 杨中甲,梁吉勇,王绍凯,等.轨道交通用轻量化先进复合材料性能研究[J].电力机车与城轨车辆,2015(S1):9-12.
Yang Zhongjia, Liang Jiyong, Wang Shaokai, et al. Performance study of advanced composite materials for lightweight of rail transit[J]. Electric Locomotives & Transit Vehicles, 2015(S1):9-12.
- [2] 贺冠强,刘永江,李华,等.轨道交通装备碳纤维复合材料的应用[J].机车电传动,2017(2):5-9.
He Guanqiang, Liu Yongjiang, Li Hua, et al. Application study of carbon fiber composite material in rail transit equipment[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(2):5-9.
- [3] 单勇,谭艳.复合材料在轨道交通领域的应用[J].电力机车与城轨车辆,2011,34(2):9-12.
Shan Yong, Tan Yan. Application of composite material in the field of mass transit[J]. Electric Locomotives & Transit Vehicles, 2011, 34(2):9-12.
- [4] 田旭鹏.新材料在轨道交通车辆内饰中的应用[J].沿海企业与科技,2013(1):31-33.
Tian Xupeng. Application of new material in the interior of rail train[J]. Coastal Enterprises and Science & Technology, 2013(1):31-33.
- [5] 刘晓波,杨颖.轻量化高性能碳纤维复合材料车体研发关键技术[J].合成纤维,2013,42(10):29-34.
Liu Xiaobo, Yang Ying. Key technologies of lightweight and high-performance carbon fiber composite train carbody[J]. Synthetic Fiber in China, 2013, 42(10):29-34.
- [6] Helms H, Lambrecht U. The potential contribution of lightweighting to reduce transport energy consumption[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2007: 58-64.
- [7] Wennberg D. A light car body for high-speed trains[M]. Skolan for teknikvetenskap, Kungliga Tekniska hogskolan, 2009.
- [8] 马建桥.动车组高压设备绝缘性能及结构优化研究[D].北京:华北电力大学,2016.
Ma Jianqiao. Research on external insulation performance and structure optimization of EMU high voltage equipment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [9] Zhang Zhijin, Zhang Dongdong, Jiang Xingliang, et al. Study on natural contamination performance of typical types of insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1901-1909.
- [10] 王洪波.CRH2型动车组高压设备箱连接线设计[J].科技创新导报,2013(8):103-104.
Wang Hongbo. Design of connection line of high voltage equipment box for CRH2 EMU[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(8): 103-104.
- [11] 程春宇,谢莹莹.高压箱内辅助二极管安装单元的设计优化与改进[J].价值工程,2016(2):105-106.
Cheng Chunyu, Xie Yingying. Design optimization and improvement of the booster diode installation unit in the high-voltage compartment[J]. Value Engineering, 2016(2):105-106.
- [12] 律方成,马建桥,刘宏宇,等.给予优先元的高压设备箱绝缘优化研究[J].系统仿真学报,2015,27(11):2858-2864.
Lyu Fangcheng, Ma Jianqiao, Liu Hongyu, et al. Insulation optimization of high voltage box based on finite element method[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11):2858-2864.
- [13] Sun Jixing, Gao Guoqing, Zhou Lijun, et al. Pollution accumulation on rail insulator in high-speed aerosol[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3):731-738.