

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.010

轨道客车用低成本阻燃复合材料裙板制造技术

苑晓洁^{1,2}, 陈旭^{1,2}, 蔡烨梦¹, 胡孝才¹, 肖志远¹, 孙树凯¹

[1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300; 2. 中航复材(北京)科技有限公司, 北京 101300]

摘要: 为推进新型阻燃蜂窝夹层结构复合材料在轨道交通领域低成本高效制备, 采用有限元仿真设计了一款全高度蜂窝夹层结构复合材料裙板, 评估了不同克重国产化阻燃玻纤增强环氧树脂预浸料制备的蜂窝夹层结构裙板性能和直接成本、成型方式对成型裙板质量的影响、胶膜对蜂窝夹层结构复合材料阻燃性能的影响。结果表明: 综合制造周期、模具成本、人工成本和设备成本, 相比于模压工艺、真空袋压工艺成本较低。通过使用阻燃胶膜制备的夹层复合材料的燃烧热释放较普通胶膜得到显著延迟, 改善复合材料的阻燃性能并减少燃烧有毒气体的释放。使用大克重的预浸料(EW600), 会对复合材料的拉伸弹性模量产生约20%的劣化, 但其压缩及层间剪切性能得到提高; 裙板的单件质量为8.57 kg, 较传统片状模塑料(SMC)工艺制备得到复合材料裙板实现了33.01%的减重, 制造成本相当; 裙板的直接成本为1 033.37元/m², 较EW300的1 208.4元/m²降低了14.5%, 在满足使用要求的基础上大克重预浸料的使用有助于进一步降低复合材料裙板的制造成本。总的来看, 采用真空袋压工艺并选用大克重阻燃玻纤增强环氧树脂预浸料和阻燃胶膜, 有助于轨道交通用蜂窝夹层结构复合材料的降本增效。

关键词: 轨道客车; 夹层结构; 复合材料; 阻燃; 力学性能

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0062-06

Manufacturing Technology of Low-Cost Flame-Retardant Composite Apron for Railway Vehicles

Yuan Xiaojie^{1,2}, Chen Xu^{1,2}, Cai Yemeng¹, Hu Xiaocai¹, Xiao Zhiyuan¹, Sun Shukai¹

[1. AVIC Composite Co., Ltd., Beijing 101300, China; 2. ACC (Beijing) Science and Technology Co., Ltd., Beijing 101300, China]

Abstract : To promote the low-cost and efficient preparation of new flame retardant honeycomb sandwich structure composite materials in the field of rail transit, a kind of full-height honeycomb sandwich structure composite apron was designed by adopting finite element simulation. It was evaluated that the performance and direct cost of honeycomb sandwich structure composite apron prepared with domestic flame-retardant glass fiber reinforced epoxy resin prepreg with different weight, the influence of molding methods on the quality of molded apron and the effect of adhesive film on the flame retardancy of honeycomb sandwich structure composite. The results show that compared to the molding process, the vacuum bag pressing process has lower costs due to its comprehensive manufacturing cycle, mold cost, labor cost, and equipment cost. The combustion heat release of sandwich composite prepared by using flame-retardant adhesive film is significantly delayed compared to the ordinary adhesive film, improving the flame retardancy of the composite and reducing the release of toxic gases during combustion. The use of large-weight prepreg (EW600) can degrade the tensile modulus of the composite by about 20%, but compression and interlayer shear properties are improved. The single piece weight of the apron is 8.57 kg, which achieves a weight reduction of 33.01% compared to the composite apron prepared by traditional sheet molding compound (SMC) process, but the manufacturing cost is equivalent. The direct cost of the skirt board is 1 033.37 RMB/m², which is 14.5% lower than the 1 208.4 RMB/m² of EW300. On the basis of meeting the usage requirements, the use of large-weight prepreg can further reduce the manufacturing cost of composite apron. Overall, the use of vacuum bag pressing process, large-weight flame-retardant glass fiber reinforced epoxy resin prepreg and flame-retardant adhesive film can contribute to reduce costs and increase efficiency of honeycomb sandwich structure composite for rail transit.

Keywords : railway vehicles ; sandwich structure ; composite ; flame-retardant ; mechanical property

基金项目: 中航复合材料有限责任公司创新基金(轨道交通用功能化蜂窝夹层结构外饰研究)

通信作者: 苑晓洁, 硕士研究生, 主要从事树脂基复合材料应用研究工作

收稿日期: 2023-03-01

引用格式: 苑晓洁, 陈旭, 蔡烨梦, 等. 轨道客车用低成本阻燃复合材料裙板制造技术[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5): 62-67, 80.

Yuan Xiaojie, Chen Xu, Cai Yemeng, et al. Manufacturing technology of low-cost flame-retardant composite apron for railway vehicles[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 62-67, 80.

为推动我国“力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的战略目标,各行业发展过程中对节能环保、轻量化相关的材料技术创新与应用提升提出了更高的要求。树脂基复合材料因其密度小、比强度和比模量高,抗疲劳性能、耐腐蚀性能、损伤容限和碰撞吸能性能优异,在航空航天、国防军工、风力发电等领域获得了广泛的关注和应用^[1-2]。近年来,随着轨道交通车辆装备的迅猛发展,对节能减排、减振降噪、安全舒适、耐腐蚀、运营速度、载客能力等综合性能要求日益提升,轻质高强的复合材料在轨道交通领域也得到了越来越多的关注,其应用范围也从传统的复合材料内饰件过渡到列车车体外饰件及车身结构件领域,为未来轻量化交通工具的发展指明了方向^[3-10]。

一般情况下,轨道交通车辆由车体、转向架、车体连接装置等部分组成,其中车体采用整体承载结构,组成部分包括底架、侧墙(车梯、车门)、车顶、内外饰裙板等;目前国内外轨道客车外饰件主要采用铝合金型材、片状模塑料(SMC)和手糊玻璃钢材料,但通过这些材料直接制备得到的制件密度仍然较大,隔声效果差,已无法满足不断提升的舱内舒适性的要求,有进一步减重优化的空间^[11-17]。

蜂窝夹层结构通常指一种三明治结构的复合材料构型,由两层蒙皮(也称“面板”)与芳纶纸蜂窝芯材通过胶黏剂或胶膜再二次胶接、共固化或共胶接等工艺下粘接而成,因其夹芯部分为较为轻质的纸蜂窝材料,在实现结构减重的同时能够大幅提高复合材料的比强度和抗弯刚度,并具有抗失稳能力强、耐疲劳老化、减震性好、隔音吸音、防火性能好的优点,其应用逐渐由飞机次承力结构向轨道交通车辆零部件衍生^[18-23]。

轨道客车内饰件所用的复合材料蜂窝夹层结构仍存在两大方面的问题:一是蒙皮材料主要为酚醛预浸料层合板,因酚醛预浸料在固化时释放小分子污染环境,且易造成产品分层等质量问题;二是目前蜂窝夹层结构的隔声效果仍不能满足舱内舒适性的要求。为了解决这些问题,国内外一方面已开始采用环氧预浸料面板替代酚醛预浸料面板,另一方面尝试通过选用消音蜂窝和隔声结构设计等提升复合材料蜂窝夹层结构的隔声效果。

设备舱外饰件(统称为“裙板”)有“封闭”和“不封闭”两种结构,通过安装座连接到车体,下部通过

锁销与设备舱底板相连,与车下设备的布置整体化设计、模块集成,是轨道客车降低空气阻力、保护和检修车下悬挂设备、确保轨道车辆高速运行的关键附属装备,对结构强度、防水防尘、防火安全性、外观等方面均有较高的设计标准和要求^[24-26]。

笔者选取一种典型轨道客车复合材料蜂窝夹层结构裙板作为研究对象,从不同克重国产化环氧阻燃玻纤预浸料的性能评估、胶膜对蜂窝夹层结构复合材料阻燃性能的影响、复合材料蜂窝夹层结构的低成本材料和高效制造技术四个方面开展了研究,考察了阻燃蜂窝夹层结构复合材料裙板的设计、制造及装车验证,以期对未来低成本复合材料裙板的研制提供参考。

1 夹层结构复合材料裙板的结构设计

研究的轨道客车用上部裙板主体结构的主要设计技术目标如下:

裙板结构总成如图1所示,需安装三个支架,因此在裙板成型时需在相应位置预埋不锈钢预埋件。此预埋件上预先加工出M5的螺杆,装配时将裙板支架用螺母固定在裙板上。

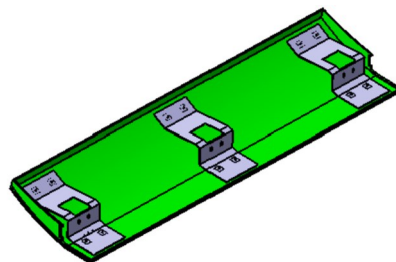


图1 裙板总成示意图

采用CATIA软件设计复合材料裙板总成,其构型基本采用原SMC裙板构型,并根据夹层复合材料特点适当做连接方式改进,复合材料裙板内部结构如图2所示,主体结构为全高度蜂窝夹层结构,其中上、下蒙皮各2 mm厚,采用玻璃纤维预浸料制造。夹芯层厚度6 mm,采用芳纶纸蜂窝材料进行制造。

考虑到裙板结构的阻燃性能要求,其上下蒙皮材料选定为阻燃玻纤增强环氧树脂预浸料,牌号为

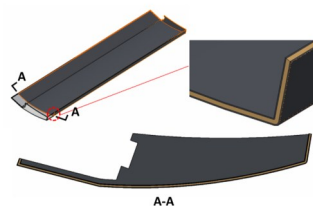


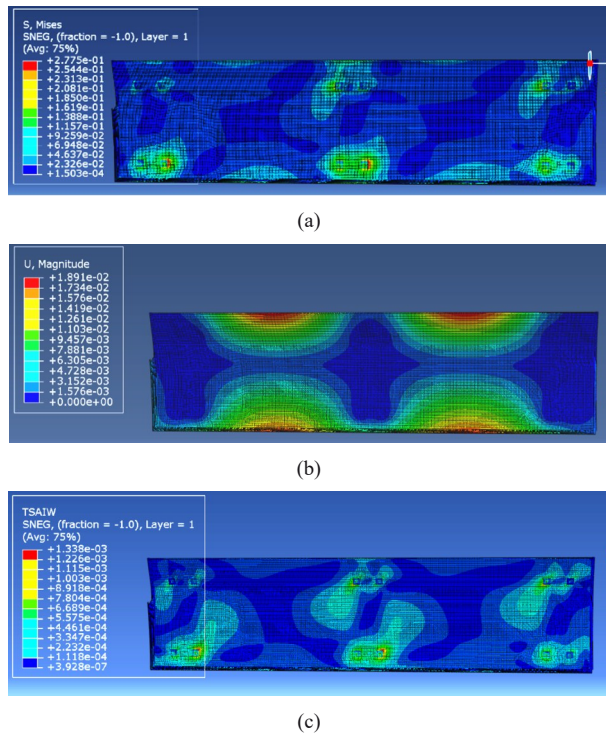
图2 裙板内部夹芯结构示意图

ACTECH®1201FR/EW600 或 ACTECH®1201FR/EW300,其基本信息见表1。胶膜选用常规环氧胶膜 LJM-170 或阻燃环氧胶膜 ACTECH®1201R300。装饰板芯材选定为芳纶纸蜂窝,牌号为 NH-1-1.8-48-6,密度为 48 kg/m^3 ,厚度为 6 mm。

表1 ACTECH®1201FR/EW600和ACTECH®1201FR/EW300预浸料性能

项目	ACTECH®1201FR/ EW600	ACTECH®1201FR/ EW300
单层厚度/mm	0.5	0.25
纤维面密度/(g·m ⁻²)	600	300
树脂质量分数/%	40	40

对于裙板而言,其最主要的受力在于列车运行时会产生气压:根据伯努利方程,设定列车车速为 80 km/h ,空气密度取 1.25 kg/m^3 进行计算,可得裙板在该工况下的气压载荷为 $2.775 \times 10^{-5} \text{ MPa}$ 。将该载荷作为边界条件代入已建立好的有限元模型中,并设置约束点为安装架与裙板的固定位置,进行固支约束,仿真结果如图3所示。



a—应力分布;b—变形分布;c—失效系数分布

图3 裙板结构有限元分析结果

从图3a可以看出,在设计工况下,裙板最大应力分布于裙板下侧的3个连接位置,但最大应力值仅为 0.28 MPa ,处于较低应力水平上,远低于表1的复合材料性能,因而不会发生失效。从图3b所示的变形分布云图中可以看出,整个裙板的最大变形分布于紧固件之间的位置,对应最大变形量仅为 0.02

mm。采用 Tsai-Wu 失效准则进行校核,如图3c所示,最大失效系数为 1.34×10^{-3} ,远低于设计要求的失效系数1,设计满足要求。上述结构静力学仿真结果表明,结构强度满足设计指标要求,裙板服役时危险区域位于预埋件周围。

2 夹层结构复合材料裙板的工艺设计及优化

2.1 成型方式对成型裙板质量的影响

蜂窝夹层复合材料的成型工艺主要包括袋压成型及模压成型两大类,笔者分别针对两种工艺对裙板制造工艺进行了对比研究。两种工艺在工序数量、制造周期、制造成本、表面质量等方面的对比见表2。由表2可以看出,尽管模压成型能够获得两面光滑、尺寸精度高的复合材料制件,但其组装过程中需要使用更多复杂的模具,模具成本较高昂,人工和设备成本较高,且总的成型周期与袋压成型相比优势不大。而袋压成型的优势在于使用成本较低的半模,且成型过程只需一个真空压力,是一种成本较低的工艺方案。

表2 模压及袋压成型复合材料裙板工艺对比

项目	模压成型	袋压成型
工序数量	16步	16步
制造周期	固化时间与袋压成型相近,但双面模具铺贴、合模和脱模步骤导致单件周期较袋压成型多1 h左右。	从清理模具到检测的16个工序,总耗时约为4 h。
模具成本	上下模,成本约为袋压单面模具的2倍。	单面模具,成本约为模压上下模具的一半。
人工成本	需上下模双面模具铺贴,合模步骤需叉车配合,且脱模繁琐,人工成本较高。	仅需在单面模具铺贴,无需叉车合模步骤,脱模便捷,人工成本较低。
设备成本	由于裙板构型通常非平板,上下模合模后整体模具厚度大于200 mm,难以采用多层压机,多使用单层压机,一台压机单次成型一件产品,设备成本较高。	选取尺寸较大烘箱,可实现多件(2件以上)产品同时固化成型,节约能耗,降低设备使用成本。
表面质量	产品上下表面及侧面光滑,尺寸精度高。	贴模面表面光滑,尺寸精度较低,厚度存在偏差。

综合考虑,选用袋压成型作为复合材料裙板成型工艺进行产品研制,其制造流程如图4所示,固化工序为由室温升温到 $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 $(45 \pm 5) \text{ min}$ 后降温,产品降温至 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下关闭真空系统,打开烘箱门并拆模取件,整个成型周期为 3.5 h ,加之型修和检测,单件制造周期约为 4 h 。袋压成型裙板过程示意图如图5所示。

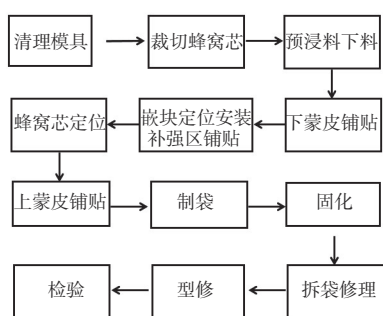


图4 蜂窝夹层复合材料裙板真空袋压工艺流程



图5 袋压成型的蜂窝夹层结构裙板

2.2 胶膜对夹层结构复合材料阻燃性能的影响

轨道交通对所用的非金属材料有明确的阻燃需求,就复合材料夹层结构而言,胶膜的使用是工艺控制过程中的关键环节之一。为探究不同类型胶膜对夹层结构复合材料阻燃性能的影响,根据ISO 5660-1:2015及EN ISO 5659-2:2017标准,对无胶膜粘接(试样编号为S1)、普通胶膜粘接(试样编号为S2)、阻燃胶膜粘接(试样编号为S3)的复合材料试样分别进行了热释放速率及燃烧物烟密度测试,测试结果分别见图6和图7。从图6可以看出,无胶膜粘接对应的试样S1及普通胶膜粘接的试样S2的热释放速率在第57 s附近就已经达到第一个峰值,后续第二个放热峰对应时间则分别为159 s和224 s,而使用阻燃胶膜的S3试样第一个峰值放热峰出现在79 s左右,较S1及S2晚了20 s左右,且其第二个峰值对应时间也延迟到284 s,表明阻燃胶膜的使用延缓了燃烧过程中的热释放。

图7为不同胶膜对应蜂窝夹层复合材料的光透

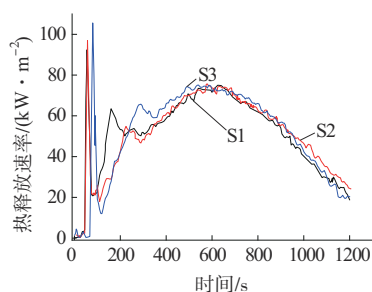


图6 不同胶膜方式时蜂窝夹层复合材料的热释放速率-时间曲线

过率与时间曲线。从图7所示的烟密度测试结果中看出,阻燃胶膜的加入对样品的光透过率无明显影响,表明试样在燃烧过程中发烟的时间及对应浓度差异不大,这可能是由于阻燃胶膜在整个夹层复合材料结构中占比较小,发烟的主要贡献来源于由阻燃预浸料铺叠而来的上下面板及蜂窝夹芯部分。

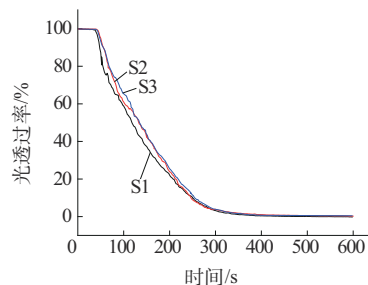


图7 不同胶膜方式时蜂窝夹层复合材料的光透过率-时间曲线

表3为8 min时试样燃烧毒性气体检测结果。由表3中三种试样燃烧毒性气体的检测结果可以看出,使用普通胶膜的S2试样较其它两个试样的燃烧烟气毒性指数(CIT_G)为0.158,显著高于无胶膜及增加阻燃胶膜的S1及S3试样,表明燃烧过程中的毒性气体得到了较好的抑制。相比较而言,使用阻燃胶膜的S3试样具有最低的CIT_G值。

表3 8 min时复合材料试样燃烧毒性气体检测结果

项目	S1	S2	S3
CO ₂	1 265.2	2 569.1	1 047.4
CO	97.6	184.5	73.4
HF	0.6	2.0	0.4
HCl	0.5	4.2	1.0
HBr	0.6	1.3	0.8
HCN	29.0	46.3	31.2
NO _x	16.5	28.9	14.9
SO ₂	4.7	10.7	4.0
CIT _G	0.089	0.158	0.081

从燃烧烟气的成分检测结果来看,CO₂、CO及HCN为主要成分,占比分别为90.2%、6.5%和1.6%,燃烧烟气的组成与试样是否使用阻燃胶膜无明显关联性,这可能是由于三种蜂窝夹层复合材料试样中均含有较大比例的阻燃预浸料,整个材料体系中的基本构成相近,因此其燃烧产物的组成比例较为接近。

2.3 大克重预浸料对夹层复合材料力学性能影响

基于大克重织物制备得到的预浸料相较于同种材料小克重预浸料而言更具有成本优势,其成本仅为同等质量小克重的75%左右。为探究克重对夹层复合材料力学性能的影响,对两种克重织物对

应预浸料制备得到的夹层复合材料的力学性能进行了对比,结果见表4。

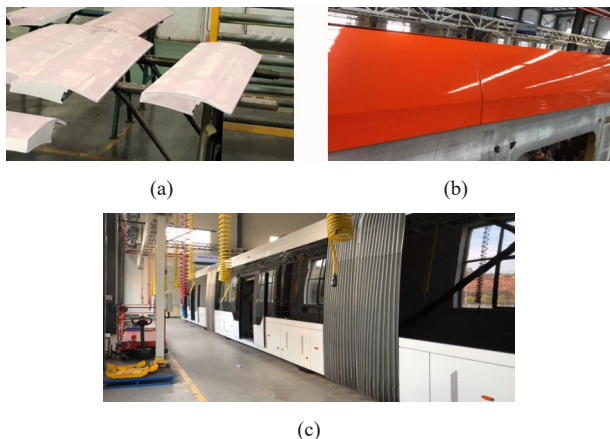
表4 ACTECH®1201FR/EW600和ACTECH®1201FR/EW300夹层复合材料的力学性能

性能	ACTECH®1201FR/ EW600	ACTECH®1201FR/ EW300
拉伸强度/MPa	346	349
拉伸弹性模量/GPa	25.8	32.1
压缩强度/MPa	457	350
压缩弹性模量/GPa	25.9	20
面剪切强度/MPa	83	61.1
面剪切弹性模量/GPa	4.27	3.44
短梁剪切强度/MPa	52.3	40.4

由表4可以看出,两种不同克重织物对应复合材料的拉伸强度相近,但小克重的EW300预浸料对应复合材料的拉伸弹性模量高于大克重试样,这主要归功于小克重预浸料内部结构中程度更低的纤维屈曲。对于压缩性能而言,可能是由于在相同试样厚度条件下,大克重EW600预浸料对应复合材料内部的铺层数更少,在屈曲过程中产生破坏的界面数量更少,因此其压缩强度及模量较高,类似的规律也体现在两种材料的短梁强度测试结果上。

3 夹层结构复合材料裙板的装车验证

通过采用低成本大克重玻纤织物预浸料结合袋压成型技术研制的夹层结构复合材料裙板经装车及路试考核验证,产品在验证过程中结构无失稳及破坏现象发生,满足使用要求。图8为低成本夹层复合材料裙板及装车验证应用。夹层结构复合材料裙板的单件质量为8.57 kg,较传统SMC工艺制备的复合材料裙板实现了33.01%的减重,制造成本则与SMC工艺相当。



a—型修完成的复合材料裙板;b—复合材料裙板装车局部;
c—复合材料裙板装车整体

图8 低成本夹层复合材料裙板及装车验证应用

4 夹层结构复合材料裙板的成本核算

基于复合材料件项目管理的通用成本核算方法,产品的直接成本(即制造费)由材料费和人工费构成。根据材料供应商提供的全部物料1 000件/年量产需求的报价,统计出分别使用EW600和EW300两种预浸料制作复合材料裙板的直接成本见表5和表6。

表5 夹层结构复合材料裙板的材料成本(EW600,EW300)

材料名称	单位	单价/元	实际 用量	金额/ 元
阻燃玻纤增强环氧树脂预浸料	m ²	63(EW600)	5.76	357.12
	m ²	45(EW300)	11.52	518.4
芳纶纸蜂窝	m ²	123	1.32	162.36
环氧胶膜	m ²	45	2.42	108.9
辅助材料	套	160	1	160
材料费小计/元		788.38(EW600)		
		949.66(EW300)		

表6 夹层结构复合材料裙板的人工成本(EW600,EW300)

工序名称	工时/h	单价/元	总价/元
清理模具	0.5	40	20
裁切蜂窝芯和预浸料下料	0.5	40	20
裙板铺贴	4(EW600)	40	160
	5(EW300)	40	200
固化成型	1	40	40
拆袋、型修、检验	4	40	160
人工费小计/元		400(EW600)	
		440(EW300)	

将表5和表6中材料成本与人工成本相加,计算出夹层结构复合材料裙板直接成本为1 033.37元/m²(EW600),1 208.4元/m²(EW300),均低于项目指标值1 300元/m²。裙板面积为1.15 m²,故单件裙板成本分别为1 188.38元(EW600)和1 389.66元(EW300)。使用大克重预浸料可减少铺层数量,有利于从材料费和人工费两方面降低成本。

5 结论

(1) 论述了一款低成本蜂窝夹层复合材料轨道客车用裙板的研制过程,通过对国产化蜂窝夹层结构复合材料基础力学性能及阻燃性能对比评估、蜂窝夹层结构复合材料裙板袋压及模压制造工艺对比研究及优化,最终得到了一款在刚强度及阻燃性能满足设计要求前提下成本较低(<1 300元/m²)的复合材料轨道客车裙板,该蜂窝夹层结构裙板相较于传统的SMC工艺成型裙板减重33.01%,制造成本则与SMC工艺相当。

(2) 通过使用阻燃胶膜制备的夹层复合材料的燃烧热释放较普通胶膜能够得到显著延迟,改善复合材料的阻燃性能并减少燃烧有毒气体的释放;使

用大克重的预浸料尽管会对复合材料的拉伸弹性模量产生一定程度(约20%)的劣化,但其压缩及层间剪切性能可以获得提高,在满足使用要求的基础上大克重预浸料的使用有助于进一步降低复合材料裙板的制造成本。

参考文献

- [1] 李军,陈祥宝.通用航空复合材料的发展现状与挑战[J].材料导报,2022,36(14):206–211.
Li Jun, Chen Xiangbao. Development status and challenges of general aviation composites[J]. Materials Reports, 2022, 36(14): 206–211.
- [2] 章潇慧.先进复合材料轨道交通车辆轻量化发展与思考[J].新材料产业,2019(1):51–58.
Zhang Xiaohui. Development and consideration of lightweight of advanced composite rail transit vehicles[J]. Advanced Materials Industry, 2019(1):51–58.
- [3] 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.
Jiang Juhui, Chen Jingju. Application and development of composites in railway transportation[J]. Composites Science and Engineering, 2009(6):81–85.
- [4] 孙春方,薛元德,李文晓.复合材料在现代轨道车辆制造中的应用[J].城市轨道交通研究,2005(2):74–76.
Sun Chunfang, Xue Yuande, Li Wenxiao. The composite materials for railway train manufacture[J]. Urban Mass Transit, 2005(2): 74–76.
- [5] 周骥,丁新静,苏亚玎.碳纤维复合材料在轨道交通领域中的应用[J].纤维复合材料,2021,38(4):90–94.
Zhou Qi, Ding Xinjing, Su Yading. Application prospective of carbon fiber composite materials in rail vehicles[J]. Fiber Composites, 2021, 38(4):90–94.
- [6] 周伟旭.碳纤维增强树脂基复合材料在轨道交通车辆车体中的应用与思考[J].城市轨道交通研究,2018,21(12):10–13.
Zhou Weixu. On the application of carbon fiber reinforced polymer to rail transit composite carbody[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(12):10–13.
- [7] Hua L, Tang A D. Design and application on the composite rail of column-beams in gantry machine[C]//3rd international conference on material, mechanical and manufacturing engineering (IC3ME 2015). Atlantis Press, 2015.
- [8] Zhou Weixu. On the application of carbon fiber reinforced polymer to rail transit composite carbody[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(12):10–13.
- [9] Xie S, Liang X, Zhou H. Design and analysis of a composite energy-absorbing structure for use on railway vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015. DOI:10.1177/0954409714566058.
- [10] Xia Y J, Cai C L, Garcia L P, et al. Development of natural fiber-reinforced composite with comparable mechanical properties and reduced energy consumption and environmental impacts for replacing automotive glass-fiber sheet molding compound[J]. J CLEAN PROD, 2018. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.02.257.
- [11] 江洪,张晓丹,刘义鹤.纤维复合材料在轨道交通中的应用概况[J].新材料产业,2017(2):22–25.
Jiang Hong, Zhang Xiaodan, Liu Yihe. Application of fiber composites in rail transit[J]. Advanced Materials Industry, 2017(2):22–25.
- [12] 马洪光,阎锋,邓海.轨道客车车体结构材料选择分析[J].铁道机车车辆,2015,35(4):54–58,62.
Ma Hongguang, Yan Feng, Deng Hai. Selection and analysis of structural materials for railway passenger car body[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(4):54–58, 62.
- [13] 陈旭.纤维复合材料在我国轨道车辆中的应用概述[J].中国设备工程,2020(10):219–220.
Chen Xu. Overview of application of fiber composite materials in railway vehicles in China[J]. China Plant Engineering, 2020(10): 219–220.
- [14] 康兴东,任玉鑫,高超,等.铁路客车车体结构材料的演变与展望[J].铁道机车车辆,2019,39(2):119–124.
Kang Xingdong, Ren Yuxin, Gao Chao, et al. Evolution and prospect of railway passenger car carbody structure materials[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(2):119–124.
- [15] 丁叁叁,田爱琴,王建军,等.高速动车组碳纤维复合材料应用研究[J].电力机车与城轨车辆,2015,38(S1):1–8.
Ding Sansan, Tian Aiqin, Wang Jianjun, et al. Research on application of carbon fiber composite in high speed EMUs[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(S1):1–8.
- [16] Singh A, Gu Z, Hou X, et al. Design optimisation of braided composite beams for lightweight rail structures using machine learning methods[J]. Composite Structures, 2022, 282:107–115.
- [17] Kaewunruen S, Wang Y, Ngamkhanong C. Derailment-resistant performance of modular composite rail track slabs[J]. Engineering Structures, 2018, 160:1–11.
- [18] 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.
- [19] 贾金荣,汤海涛,陈磊,等.芳纶制品在轨道交通领域的应用概况[J].电力机车与城轨车辆,2015,38(S1):62–65.
Jia Jinrong, Tang Haitao, Chen Lei, et al. Application progress of aramid materials in rail transit[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2015, 38(S1):62–65.

(下转第80页)