

复合材料夹心结构在轨道车辆领域的应用及研究现状

荣伟 张讷通

中国电子科技集团公司第三十三研究所 太原 030032

摘要: 复合材料层间夹芯类结构因其卓越的力学特性和显著的减重效果,在轨道车辆上被广为采用。本文将讨论三种常见的夹芯复合材料,并列出具在全球轨道交通领域的经典应用案例,同时概述了夹芯复合材料的研究发展情况。本文建议未来在行业标准设定、计算机辅助设计、工艺优化以及功能多样化等方面进行更深入的探索和研究。

关键词: 夹芯复合材料; 轨道交通; 轻量化; 多功能化

1. 概述

随着全球经济和贸易的交流日益加强以及城市化水平的持续提升,轨道交通产业得到了迅速发展,全球的轨道交通规模也达到了前所未有的程度。中国对轨道交通技术和产业的发展也给予了高度的重视。在国家政策的支持和引导以及实际需求的推动下,中国的轨道交通技术和产业发展已经进入了快速发展阶段。从技术引进到自主创新,中国的轨道交通产业完成了对高端制造技术的“引进、消化、吸收、再创新”的过程,高速列车的运营里程和列车数量都占据了全球份额的50%以上,中国已经成为了世界领先的轨道交通大国,并且在全球轨道交通行业的竞争中取得了领先地位。

传统的结构材料已经难以满足轨道车辆轻量化的设计需求,而具有轻量化、高强度、高耐候性和强设计性等优秀性能的复合材料能够为解决轨道交通车辆轻量化问题提供可能性。复合材料是由两种或更多不同材料复合而成的新型材料系统,通常能够结合各种组分材料的优点。复合材料具有轻质高强的特性,在相同的重量下具有更高的抗拉强度和抗拉模量(见表1)。

复合材料作为新型工程装备结构材料,已在航空航天、船舶制造、汽车工业等领域广泛应用。大量丰富的使用经验和实验数据也为其在轨道交通领域的广泛应用打下了坚实的基础。相比传统的金属材料,复合材料更适合用于高速列车的制造。表2对比了几种用于制作列车车体的材料性能^[1]。

将复合材料用于轨道交通领域的结构部件具有如下优势:(1)纤维复合材料的比强度高,用碳纤维复合材料制作轨道车辆部件可在保证强度、刚性的同时有效减轻车体重量,降低能耗。(2)纤维复合材料的耐疲劳性能最高可以达到静态强度的90%,非常适合应用在轨道车辆这种经常受交变载荷作用的场合,可以大大提高部件的安全性和稳定性。(3)纤维复合材料具有良好的耐腐蚀性,从而延长车辆使用寿命,降低维修成本。(4)复合材料具有多功能设计性,可依据结构设计需求,开展复合材料多功能属性的整体设计;(5)复合材料可实现一体化成型,有效减少零部件数量,简化生产工序,控制制造成本;

夹心复合材料是一种特殊的三明治结构复合材料,在这种结构里各种材料都可以充分发挥其优势,从而使得复合

表1 复合材料与金属材料的性能对比

| 材料类型 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ | 密度 | 拉伸强度 | 比强度 | 拉伸模量 | 抗冲击强度 | 线膨胀系数 | |
|--|---------------|--------------------------|---------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------|--------|
| | $/\text{GPa}$ | $/\times 10^7 \text{mm}$ | $/\text{GPa}$ | $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-1}$ | $/(\times 10^{-6}/\text{K}^{-1})$ | | |
| 复合材料 | 碳纤维/环氧 | 1.6 | 1.8 | 11.3 | 128 | - | 58.25 |
| | 芳纶/环氧 | 1.4 | 1.5 | 10.7 | 80 | 76 | 63.43 |
| | 硼纤维/环氧 | 2.1 | 1.6 | 7.6 | 220 | 200 | 70.56 |
| | 碳化硅纤维/环氧 | 2.0 | 1.5 | 7.5 | 130 | 260 | 66.02 |
| | 石墨纤维/铝 | 2.2 | 0.8 | 3.6 | 231 | - | 64.08 |
| 玻璃钢 | 2.0 | 1.5 | 7.5 | 40 | - | - | |
| 金属材料 | 铝合金 | 2.8 | 0.5 | 1.7 | 77 | - | 132.12 |
| | 钛合金 | 4.5 | 1.0 | 2.2 | 110 | - | 86.76 |

表 2 车体材料性能比较

| 性能 | 比能量吸收 | 疲劳强度 | 耐腐蚀性 | 阻燃性 | 易生产性 | 易修理性 |
|------|-------|------|------|-----|-------|------|
| 碳钢 | 差 | 好 | 差 | 好 | 中等 | 好 |
| 不锈钢 | 好 | 好 | 优 | 优 | 好 | 中等 |
| 铝合金 | 好 | 中等 | 优 | 差 | 好(挤压) | 差 |
| 复合材料 | 中等 | 优 | 优 | 好 | 随工艺不同 | 好 |

材料的整体性能得到提升。夹芯复合材料具有比普通复合材料更高的强度好刚度，更好的抗冲击性和吸能性。

2. 复合材料夹芯结构

夹芯复合材料是由上下两层高强度、高模量的薄面板和中间较厚的轻质芯材组成的结构材料，如图 3 所示。夹芯结构与普通单一材料相比具有更高的弯曲强度和刚度，其次夹芯材料还可以通过对芯材的选型，增加隔热、保温、降噪、吸声等附加功能。

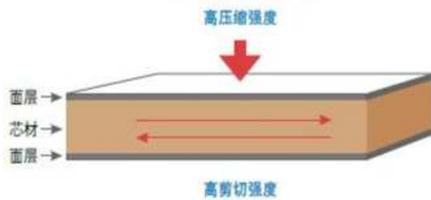


图 3 夹芯复合材料结构示意图

常用的夹芯复合材料有蜂窝夹芯复合材料、泡沫夹芯复合材料和中空夹芯复合材料等。

2.1 蜂窝夹芯复合材料

蜂窝夹层结构通常由两层或多层蒙皮之间夹以一层轻质蜂窝夹芯并采用胶黏剂在一定温度和压力下复合成一个整体刚性结构（如图 4）。蜂窝夹层复合材料具备着复合材料的特点，并且由于其选用了蜂窝材料及其特殊的结构形式，也更拓宽了其应用的范围提升了其优势，蜂窝夹层复合材料具有以下特点：①质量轻，比强度高，抗弯刚度高；②具有较高的表面平面度，且可以制备出形状复杂的曲面结构；③可吸收震动能量，能够具备隔音降噪、减震等效果；④具有复合材料的耐腐蚀、绝缘性和环境适应性^[2]。

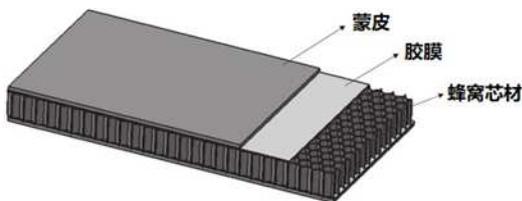


图 4 蜂窝夹芯复合材料结构示意图

2.2 泡沫夹芯复合材料

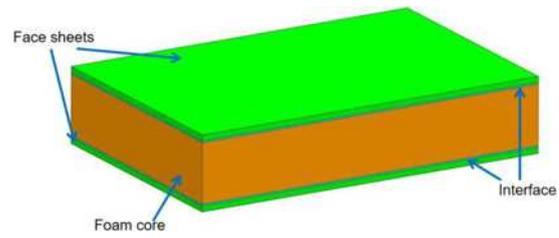


图 5 泡沫夹芯复合材料结构示意图

泡沫夹芯复合材料是由两层面板和中间的泡沫芯层组成（如图 5），在航空、汽车、建筑、运动器材等领域得到了广泛的应用。他的特点是：①具有很高的强度和刚度，比其他材料更加耐用和可靠。②具有很好的隔热性能，在极端温度下仍然可以保持其性能。③具有很好的吸能性能，受到冲击或碰撞时，泡沫芯层可以吸收能量，并将其分散到整个结构中。④具有很好的防火性能。泡沫芯层不易燃烧，可以有效地减缓火势的蔓延。这使得泡沫夹芯复合材料在建筑和交通运输领域得到了广泛的应用。

2.3 中空夹芯复合材料

中空复合材料主要是由增强纤维通过纺织加工成一定结构形状的三维织物，之后经过手糊成型或树脂传递模塑 (RTM) 成型工艺与树脂基体复合而成的一种新型复合材料（如图 6）。它的优点是：①蒙皮与芯层一体成形，不分层与剥离，力学性能优异，长期使用不吸水、不开裂、不塌陷。②结构可设计性强，纤维体系多样。③夹层可填充泡沫、预埋电线、监控与电子元器件等。④织物柔软，可整体贴模仿形成型，尺寸控制精度高，最大限度减少拼接与补强，提升整体性能^[4]。

表 3 夹芯结构复合材料力学性能

| 测试项目 | 测试标准 | 芳纶蜂窝 复合材料 | 泡沫夹芯 复合材料 | 中空夹芯 复合材料 | 铝蜂窝夹芯 复合材料 |
|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 高度 /mm | — | 3 ~ 30 | 1 ~ 100 | 2 ~ 50 | 5 ~ 50 |
| 平拉强度 /MPa | GB/T 1452-2005 | 0.9 ~ 2.5 | 0.4 ~ 1.3 | 4.8 ~ 6.5 | 1.5 ~ 3.5 |
| 平压强度 /MPa | ASTM C365 | 0.4 ~ 2.0 | 0.2 ~ 1.2 | 1.4 ~ 10.2 | 1.5 ~ 6.2 |
| 双层剪切强度 /MPa | ASTM C273 | 0.2 ~ 1.0 | 0.2 ~ 0.5 | 0.7 ~ 3.6 | 0.3 ~ 1.6 |
| 低速冲击 (12mm) /J | SACMA | 9 | 10 | 15 | 12 |
| 四点弯曲 /MPa | ASTM C393 | 37 ~ 94 | 21 ~ 62 | 34 ~ 115 | 60 ~ 165 |



图 6 中空织物和中空夹芯复合材料

3. 国内外应用

夹芯复合材料有轻质、高强、高刚度等特点（见表 3）可以有效降低车体重量，提高车辆的能效，而且夹芯复合材料还具有良好的吸能性能，可以在碰撞事故中起到保护作用，其良好的耐腐蚀性能，还可以提高车辆的使用寿命。因此在轨道交通领域得到了广泛的应用，用于制造轨道车辆车体结构件、车门、车顶、车厢隔音板等部件^[5]。

韩国 Hanvit 200 型列车就大量使用了夹芯结构（如图 7）。列车车体上部结构采用夹层结构，具有质量轻、弯曲刚度、隔热减振等特性。夹层结构由碳纤维环氧树脂层板（CF1263）和铝蜂窝夹芯粘接而成，其中铝蜂窝夹芯的芯材厚度为 37mm，CF1263 层板内、外表层的厚度分别为 1.5mm 和 3.5mm，纤维体积分数为 60%（如图 8）。为了保证车体的防火、隔声、隔热特性，Hanvit 200 列车最外层采用具有

耐高温特性的玻璃纤维层，而车体内层采用由玻璃纤维酚醛树脂层板和芳纶蜂窝夹芯组成的三明治结构。同时，为了防止火焰传播，车体结构与内层之间布置了由玻璃纤维层 / 铝箔夹芯 / 玻璃纤维层组成的阻燃层，其间还置入了具有良好降噪性的玻璃棉（如图 9）^[6]。



图 7 Hanvit 200 型列车车体结构断面示意图

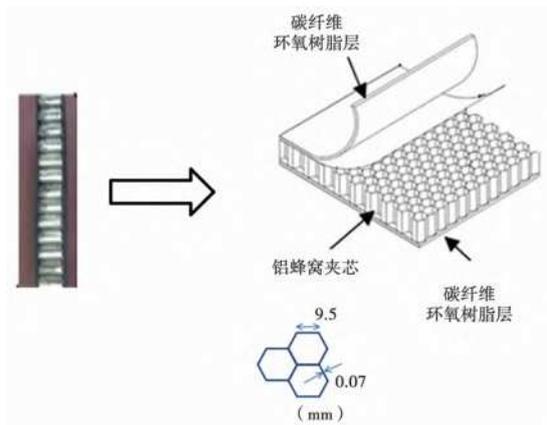


图 8 Hanvit 200 型列车车体结构选用的碳纤维夹层结构

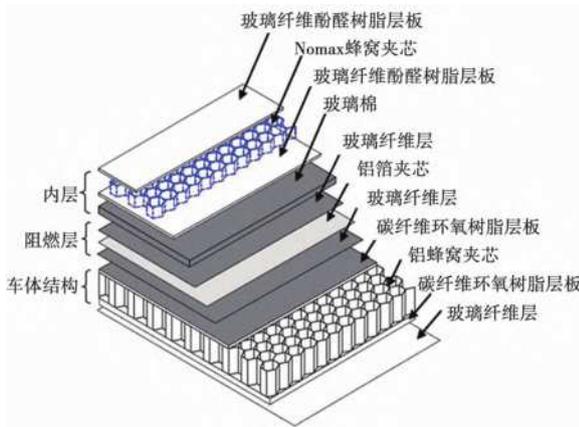


图9 Hanvit 200型列车车体断面材料分布

法国的TGV双层车体(如图10所示)实现CFRP车体结构的重大突破。CFRP双层车体标准模块,5m/节,采用蜂窝夹层复合材料和真空袋压固化成形,较铝制车减重>25%,通过线路运行验证了CFRP在强度、冲击、防火、降噪、隔热等性能方面的优点和工业可行性^[7]。



图10 法国的TGV双层车体列车

长客股份公司研制的新一代地铁车辆全碳纤维复合材料车体结构(如图11),车体的主体材料采用碳纤维预浸料和蜂窝芯材,局部结构芯材采用泡沫芯材。为获得材料力学性能,进行了不同铺层、不同温度、不同湿度和不同工艺的6000多个样件的测试和十余项材料性能测试。测试结果表明,所选材料各项性能均满足地铁车体的使用要求。车体采用“静力覆盖疲劳”和“损伤无扩展”的设计理念,其设计和验证过程均参照航空工业复合材料制件研发流程,并采用试样、元件、细节件、组合件、全尺寸件等多层次的积木式设计验证过程设计而成。



图11 长客股份公司研制的地铁车辆车体



图12 中车青岛四方的500km/h高速试验车

4. 研究进展

尽管夹芯复合材料已经有了广泛的应用,但是夹芯复合材料也仍然存在不足之处,制约了其在某些领域的应用。有众多的研究人员也一直致力于夹芯复合材料的制造工艺、性能、损伤行为等方面的研究,以提高夹芯复合材料的性能和应用范围。

匡宁等^[8]设计了一种双夹层中空夹芯结构用于研制地板(如图13)。通过有限元分析方法对双夹层结构设计方案的合理性进行验证,研究了集中荷载和均布荷载作用下各层受应力情况。开展了研制地板的板芯剥离强度、抗拉强度、抗压强度、四点弯曲强度、隔音性能、防火性能的测试,这种双夹层结构中空复合地板具有更好的承载和抗分层性能,力学性能优于铝蜂窝地板,其燃烧等级达到了SF3级,毒性指数 $FED \leq 1$ (见表4),故防火性能与铝蜂窝地板一样安全,且中空复合地板的隔音性能优于铝蜂窝地板,能满足更高的舒适性和安全需求。

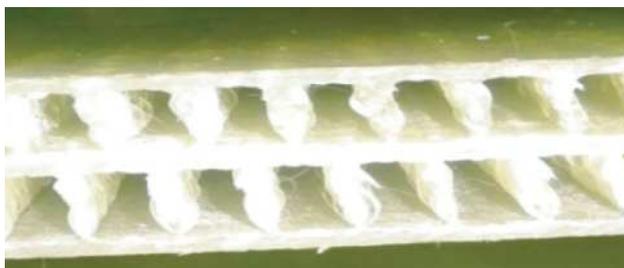


图 13 双夹层中空夹芯复合地板实物图

表 4 双夹层中空夹芯复合地板与铝蜂窝地板的性能对比

| 试验项目 | 双层三维织物夹芯复合地板 | 铝蜂窝地板 |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 抗压强度 /MPa | ≥ 4 | ≥ 3.5 |
| 板芯剥离强度 / $(N \cdot mm) \cdot mm^{-1}$ | ≥ 56 | ≥ 40 |
| 抗拉强度 /MPa | ≥ 4 | ≥ 3.5 |
| 四点弯曲 /MPa | ≥ 60 | ≥ 45 |
| 隔音测试 /dB | $R_w \geq 26$ | $R_w \geq 22$ |
| 防火性能 | 燃烧等级 SF3, 烟毒性 FED ≤ 1 | 燃烧等级 SF3, 烟毒性 FED ≤ 1 |

邬志华^[9]开展了 ATH-GF/UP 复合材料力学性能及其改性研究,建立了 ATH-GF/UP 复合材料夹芯结构抗撞击性能有限元仿真分析模型,并研究了材料参数以及结构参数对其抗撞击性能的影响。通过仿真计算得到一种新型非对称纤维增强复合材料夹芯结构,该结构厚度为 2.52mm,内面板厚度为 0.21mm、泡沫芯子厚度为 25mm,夹芯结构平板件重量为 7.63kg,与原设计方案相比,减轻了 22.3%,很好地解决了司机室轻量化设计与抗撞击性能之间的矛盾。

5. 展望

夹芯复合材料作为一种重要的结构材料,随着复合材料制备技术的不断发展,在轨道交通以及航空航天、汽车、船舶、建筑等领域的应用将更加广泛,也仍有诸多难题需要我们去攻克。目前,在以下几个方面有待深入的研究:

(1) 目前复合材料的规范、标准以航空航天行业为主,缺少轨道交通相关的内容。通常在使用前需进行静强度、疲劳试验以及动力学等一系列试验来验证其可靠性,转向架、车体作为主要承载件,复合材料的设计方法同样缺乏。后期应结合目前复合材料在轨道车辆的应用情况,总结和整理适用于轨道交通行业的复合材料标准体系,同时应进行大量试验获取基础数据,建立数据库,以支撑理论分析,提高理论

验证的精度。

(2) 夹芯复合材料的设计仍然主要依赖于经验和试错,而缺乏系统化的设计方法。因此,需要研究如何利用计算机辅助设计等新技术,提高夹芯复合材料的设计效率和精度,使得夹芯复合材料的设计需要更加精细化和个性化。

(3) 夹芯复合材料的制造过程仍然存在一些问题,例如制造过程中的气泡、缺陷等,这些问题影响了夹芯复合材料的性能和质量。因此,需要研究如何利用新的制造技术和工艺,提高夹芯复合材料的制造效率和质量。其次,夹芯复合材料的制造需要更加高效和可控。

通过对夹芯复合材料从材料、设计、制造到评估更加深入和系统化的研究,将会进一步提升夹芯复合材料的整体力学性能,推动夹芯复合材料在更多领域的发展和应用。

参考文献

- [1] 陈广豪,梁智洪,张芝芳.纤维增强复合材料转向架的研发现状[J].复合材料科学与工程,2020,(3):120-130.
- [2] 范雨娇,王维维.浅谈蜂窝夹层复合材料应用及成型工艺[J].新材料产业,2020,(6):53-56.
- [3] 刘志艳,匡宁,周海丽,等.中空夹芯复合材料的成型工艺及其在轨道交通领域的应用[J].纺织导报,2020,(7):35-37.
- [4] 郑云.中空夹芯复合材料在轨道交通内装上的应用[J].玻璃纤维,2013,(4):19-23.
- [5] 匡宁,陈同海,钱育胜,等.中空复合材料的成型工艺及应用进展[J].工程塑料应用,2015,43:120-123.
- [6] 吕志东,任玉鑫,康兴东,等.韩国复合材料车体结构关键技术分析[J].智慧轨道交通,2022,59(1):89-90.
- [7] Kim J S, Jeong J C, Lee S J. Numerical and experimental studies on the deformational behavior a composite train carbody of the Korean tilting train[J]. Composite Structures, 2007, 81 (2): 168-175.
- [8] 匡宁,朱冬进,张守玉,等.双夹层中空夹芯结构轨道交通地板的设计及性能分析[J].玻璃纤维,2017,(5):7-12.
- [9] 邬志华.颗粒填充纤维增强复合材料动态力学性能及其夹芯结构抗撞击性能研究[D].国防科学技术大学,2016.