

## 高速列车用复合材料国内外现状与趋势

摘要：本文介绍了国内外复合材料在高速列车上应用情况，说明轻质高强复合材料适应城市轨道交通列车提速的发展趋势，是替代或结合钢和铝合金使用的最佳高速列车承力构件的选材。

### 1、前言

复合材料是由基体材料（聚合物材料、金属、陶瓷）和增强体（纤维、晶须、颗粒）复合而成的具有优异综合性能的新型材料，是本世纪中发展最迅速的新材料之一。由于它的各种性能和功能可以根据需要进行设计，通过选择合适的基体和增强体，合适的组成配比，排列分布，充分发挥组成材料性能的优势，获得单一材料——金属、聚合物、陶瓷等材料难以达到的综合性能，如高比强度、高比模量、耐腐蚀、隔热、耐磨等等，为复合材料制品提供了很大的设计自由度。复合材料已在航天、航空、交通运输、基础建设中发挥了巨大的作用，成为这些领域产品性能提高和升级换代的关键材料。

在高速轨道交通领域，复合材料正成为越来越重要的一类材料，除用作内部设备和装饰材料外，在承重结构上的应用也越来越广泛，用复合材料做成的构件，重量轻、强度高、刚性大，是一种理想的结构件。复合材料产品制造工艺多数是近终形成型，制造出的产品，不需进行机械加工，生产效率高，制造成本低。复合材料在轨道交通车辆中广泛应用，对减轻车厢重量，降低噪、振动，提高安全性、舒适性，减少维修等均有重要作用。

### 2、复合材料的优势

#### 2.1 轻质高强

表 1 中对复合材料和金属材料的力学性能进行了对比，可见，复合材料比常用的轨道交通车辆材料——金属材料比强度、比模量要高出 1-5 倍。

#### 2.2 可设计性强

纤维复合材料的最显著特点是高比强度和高比刚度，并且它可以在一个很宽的范围内变化，因此复合材料可以通过材料选择、结构设计、铺层设计等方法解决各种技术难题。

现在使用的纤维从弹性模量为 70000N/mm<sup>2</sup>、强度为 3500N/mm<sup>2</sup> 的玻璃纤维到模数为 600000N/mm<sup>2</sup>、强 2000N/mm<sup>2</sup> 的高模数碳纤，其性能范围很宽。根据已知的有关混合物的定律，通过选择基体材料，可以改变其性能，因此每个结构件都可以根据要求找到一种最佳的铺层结构。

#### 2.3 高安全性（高疲劳强度和低缺口敏感度）

疲劳特性是涉及安全性的主要问题。其实在复合材料被用于轨道车辆的结构件之前，就曾被用于制造航天飞机、军用飞机、民用飞机中的结构件，应用于高应力领域。

若有失效，很多是因为动态承载结构件超过了疲劳强度而致使其破坏。金属材料也面临同样的问题。兵器金属材料的振动强度通常都比其静态强度小得多，但对于复合材料而言，这两个数值几乎没有什么区别。如果承受连续振动的金属结构件上有了缺口，很快就会导致裂纹扩展并出现早期破坏。然而在复合材料中，力被转移到邻近层，因此缺口的影响大大降低。由于复合材料对扩展裂纹的敏感度很低，使出现损伤，也不致被立即破坏。

#### 2.4 低成本

◇随着原材料的发展和工艺的进步，复合材料的成本正在逐步降低；

◇由于采用模块化的设计技术及整体成型技术，大大减少了结构的复杂性、并缩短了生产实际及总装所需要的工作量，降低了总体成本；

◇由于复合材料的耐疲劳、耐腐蚀等特性，降低了维护、修理成本等。

◇由于减重，提高了运营能力，减少了能耗，总寿命周期成本(LCC)得到了降低。

### 3、复合材料在国外轨道交通中的应用开发实例

在国外，复合材料已在轨道交通中广泛应用。随着轨道车辆综合性能的提高，其使用材料也逐渐发生了变化。法国国营铁路公司(SNCF)对于未来的 TGV 高速列车，考虑到迫切需要进一步减轻车体重量，认为只能采用复合材料的双层 TGV 挂车，并进行线路运行试验，对其耐火性、抗冲击强度等进行运行测试。在此前他们对称作为 T1 的第一辆样车上进行了首次计算模型考核试验，证实了复合材料车体的制造工艺是有效的，同时也证实了复合材料车体在振动性能、透声性能和绝热性能方面的优点，提高了车体的舒适性。他们得出的结论，复合材料不可避免最终将取代铝合金。

树脂基复合材料在高速轨道交通领域应用也逐步从车体内部装饰、车内设备等非结构零件材料向车体等结构件延伸、扩大。

#### (1) 车厢内饰件

日本新干线的高速客车中，采用 GFRP（玻璃纤维增强塑料）复合材料制作车窗内饰、洗漱间、厕所、小便池、水箱、集便箱、车前头盖板；双层客车两端顶、兼作空调风道的天花板，餐车空调盖板的天花板等部位亦被采用。为了减少受电弓周围的空气动力噪声，而在车顶上安装的受电弓罩亦采用 GFRP 材料制造。

#### (2) 车头前端部

玻璃纤维增强聚酯的一个典型应用是制造机车流线型外壳的前部，如“欧洲之星”的车头前端部，借助计算机辅助设计，可以得到非常精确的形状。意大利 ETR500 高速列车的车头前突部分采用的是芳纶纤维增强环氧树脂的 FRP 复合材料，用这种材料模型成型的符合空气动力学线型要求的车头具有优异的抗冲击能力，当列以 300km/h 速度行驶时有很好的尺寸稳定性。

#### (3) 车体结构

车辆车体结构的重量在整车中所占的比例较大，通常在 15-30%左右。因此，提高车辆速度要解决车辆轻量化，就必须优先考虑车体结构的轻量化。过去人们习惯把铝合金作为车体轻量化的首选材料，由于车辆轻量化的要求越来越高，于是人们把目光注视到复合材料上来。法国国营铁路公司(SNCF)认为对于未来的 TGV 高速列车，考虑到迫切需要进一步减轻车体重量，只能采用复合材料的双层 TGV 挂车，并进行线路运行试验，对其耐火性、抗冲击强度等进行运行测试。证实了复合材料车体的制造工艺是有效的，它比铝制或钢制车体的强度大，用碳纤维复材预计可比铝制车的重量减少 25%；同时也证实了复合材料车体在振动性能、透声性能和绝热性能方面的优点，提高了车体的舒适性。

在客车生产中最有成效的 Schindler Waggon 公司，应用玻纤或碳纤维缠绕制成轻型的承载结构车体。1995 年首次装于 SIG 活动侧倾式转向架上的 3 辆试验车体在瑞士联邦铁路线上进行运行试验，运行速度达到 140km/h.结果令人满意。车体结构具有重量轻、舒适度好、安全性高、成本低等优良特性，可以取代铝合金结构进行实用化生产。

日本的制造工艺是采用拉挤的方法制造 CFRP 曲面外板，再用铆钉强面板铆接在铝构架架上。实验表明通过优化设计，可以制出满足需求的车体，并且在刚性方面也得到了与铝车体结构相当的结果。

#### (4)转向架

转向架是支承车体的重要部件，转向架的构架是特别重要的高强度部件，关系到整个车辆的安全性。转向架必须满足安全、运行舒适度以及耐磨损和易检修等要求。从不断改善环境方面考虑，它们还要符合低能源消耗、减少重量和提高声学性能的要求。

德国 Dainler Benz 集团的两家企业 AEG 和 MBB 与德国联邦铁路(DB)紧密合作，开发了世界上第一个纤维复合材料的转向架构架。复合材料转向架通过了静态模拟实验、耐久试验、运行试验以及“商业检验”，在运营了 100 多万公里后检测未发现任何损坏、磨损或撕裂。

复合材料转向架与标准的转向架相比，重量大大减轻；零件数减少；运行性能提高（主要指舒适度和受力程度）；减少声扩散；降低了检修成本。

#### (5)复合材料车轴、车轮

德国在研究采用复合材料制造轮心。可减重 2% 以上，并具有降噪以及缓和车轮与钢轨间冲击的效果。

#### (6)复合材料轨枕

Conrail 铁路公司已有试验性的应用。主要在大曲率或重载线等特殊情况下使用。

### 4. 复合材料在国内轨道交通中的应用开发实例

国内的复合材料经过 40 多年的发展，无论在数量还是质量上都得到了长足地进步。在交通领域的应用也逐年增长。正如国外的发展历程一样，在汽车、火车等领域的制造技术和经验将大大促进复合材料在高速轨道交通上的研发和应用。

国内在轨道交通领域开展深入研发工作还处于试验阶段，主要在以下几个方面开展了工作：

#### 4.1 阻燃技术

复合材料的阻燃技术主要包括材料技术和成型技术两个内容。根据阻燃等级和使用要求不同，分为结构型阻燃材料和添加型阻燃材料。

##### (1)结构型阻燃材料

酚醛树脂是典型的结构型阻燃树脂。其阻燃性能极其出色。在伦敦地铁火灾发生后，酚醛制品是唯一获得伦敦地铁和海峡隧道公司批准使用的复合材料。其缺点是工艺性较差。

##### (2)添加型阻燃材料

早期的聚配复合材料是通过添加卤素来提高燃烧等级的。但是卤化树脂在燃烧时会产生烟雾和毒性很高的气体，烟雾会阻碍人们逃生，导致缺氧窒息或中毒而昏迷甚至死亡。通过添加阻燃剂和烟雾抑制剂解决制品阻燃和烟雾问题，并在伊朗地铁支架制品中得到应用。地铁支架最终达到德国设计标准。

#### 4.2 表面技术

国内表面技术研究较晚，技术水平不高，关键材料和应用水平仍处于国外 70 年代水平。

90 年代以来，国家大力支持 RTM、BMC 等工艺制备汽车复合材料制品的 A 级表面技术研究，取得了较大进展，解决了关键材料和工艺控制技术，目前已应用于汽车部件的开发。应用该技术开发出的轿车车灯反光罩、富康轿车后举升门、EQ6400 轿车整体车身等制品均达到 A 级表面，得到了用户认可。

#### 4.3 车用大型构件成型技术

##### (1)拉挤技术

拉挤工艺是将预浸树脂后的纤维拉过加热的金属模具，使之固化成型。其特点是连续成型，效率高；通过更换模具可以制造各种截面的型材。采用该工艺可生产 CFRP 曲面板，制造车体。

##### (2)树脂传递模塑（RTM）技术

RTM 工艺将树脂注入封闭模腔浸渍预铺覆的增强材料，而后固化成型。其特点是初始投资少，产品尺寸稳定性好、两面光洁；可以生产夹芯结构的产品；适于中等批量的制品生产。国内采用该工艺制造高速列车车头前部。

##### (3)SCRIMP 技术

SCRIMP 工艺是针对大型构件成型而开发的一种新型技术。其特点是成型效率高；产品的纤维含量可达到 80%，强度高；原材料使用范围广；适于制造大型结构件。

#### 4.4 主要产品与应用车型

“蓝箭”动车组及“中华之星”高速列车上已经成功应用复合材料，“蓝箭”机车的车头盖是采用 RTM 工艺成型的前鼻端，手糊工艺整体成型导流罩；“中华之星”动力车的车头端盖是手糊成型。

复合材料还用来制作上述高速列车的辅助件，如司机台仪表框、车门窗框、车顶罩、蓄电池箱等，目前还是较局限于车内装修装饰件、座椅和车头罩等。

## 5、复合材料在高速列车上的应用发展方向

从复合材料装饰件到全复合材料的高速列车，复合材料展示了巨大的优势及其在高速轨道交通领域应用的广泛前景。

除应用现有技术和工艺，为高速轨道车辆研发、配套车门、整体卫生间等车体设备和装饰件外，应深入研究具有自主知识产权的复合材料制造技术及其产品，提高复合材料在高速轨道领域的应用水平，促进我国高速轨道交通事业的发展。

结合国内现状，我们认为复合材料要在高速轨道交通领域得到大规模应用，尤其在大型、关键结构件上的应用，尚需解决一系列问题。

### 5.1 优化设计

优化设计是复合材料应用的基础，是实现减重和安全性的保证。

前面已介绍过，就复合材料本身的性能而言，其强度、刚度、耐疲劳等性能均可满足轨道列车的需求，结构的设计、各部位对载荷的要求、铺层的设计、接头的设计等方面才是制约其应用推广的关键。美国、日本和欧洲等国家的产品设计技术成熟，水平较高，而且专业化、计算机辅助设计软件已经商业化。

近年来我国复合材料工业虽然取得了长足的发展，但在产品设计方面，还明显存在着设计不合理、适用性差和原材料浪费严重等现象。大型、复杂、通用的复合材料产品设计软件有待研究开发。

### 5.2 低成本制造技术

低成本制造技术的范围较广，一般将成型效率高、成品率高、原材料适用性广的工艺技术称为低成本技术。

对于高速轨道车辆制品而言，低成本制造技术是指多种成型工艺协作的系统。因为制造大而复杂的高速轨道车辆产品，通常只有应用多种成型技术才能达到理想的效果（比如减重、高性能等）。德国 AEG 和 MBB 公司在开发转向架时同时应用了模压、缠绕、拉挤成型技术以及粘结技术。因此只有将各种工艺、技术有机融合，复合材料才有可能在高速轨道交通领域得到更新、更多地应用。

### 5.3 无损检钎组与监控技术

(1)产品检验：产品在使用前，模拟使用条件，在不损坏构件的情况下采集性能数据，检查产品缺陷，确保构件达到设计要求；

(2)在产品生产时，采取预埋传感器等方法，在产品使用过程中对产品的性能进行连续监控，采集数据并分析，以便及时发现隐患。