

厢式汽车车厢新材料

——FRP复合保温厢板的研制

王 维

(交通部公路科学研究所 北京 100088)

摘要 本文简要阐述了轻量化材料对汽车节约燃料的重要意义,概括地介绍了新一代厢式车车身材料——FRP复合保温厢板的特点及研制目的,详细说明了FRP复合保温厢板的结构、设计制作及主要技术指标。

关键词 车身材料 FRP 复合保温厢板

Research and Development of FRP Thermal Insulating Van Wall

Wang Wei

(Research Institute of Highway, Beijing)

Abstract This paper outlines the characteristics of the thermal insulating van wall made of fibre reinforced plastic (FRP) and its development. The structure, design and manufacture of the FRP casing wall are discussed in detail, as well as its major technical specifications.

Key words Van body material Fiber reinforced plastic (FRP)
Combined thermal insulating van wall

1 前言

进入80年代,世界汽车工业面临能源、公害及安全三大问题,围绕这三大问题发展汽车技术。其中,能源问题尤为突出,要求降低车辆自重,提高汽车的燃油经济性以节约能源。以载货汽车为例(总质量为16~20t),车辆质量每降低1000kg,平均油耗可下降6%~7%。

为了降低汽车的整备质量,发达国家采用轻量化的汽车结构件和运动件的比重越来越大。采用轻质高强铝合金板、高强度优质钢板及纤维增强塑料复合板组成载货汽车厢体结构。

较之常用的汽车轻量化材料——玻璃纤维增强塑料(FRP)复合板具有以下优点:

① 质轻(高强度钢密度为 $7800\text{kg}/\text{m}^3$,铝合金密度为 $2400\text{kg}/\text{m}^3$,而FRP密度仅为

参加本课题研究的还有:交通部公路科学研究所的温品文、牛会明、何勇,及江苏省海安玻璃纤维厂的朱修余、吴桂香、王耀武。

2000kg/m³);

- ②比强度高 (高强度钢为 90~179MPa, 铝合金为 189MPa, FRP 为 570MPa);
- ③设计灵活;
- ④一次成型, 无需框架结构, 减少装配工序;
- ⑤耐磨蚀、耐冲击、寿命长、安全性好、易修补;
- ⑥耐化学性好, 着色、装璜方便;
- ⑦厢板保温性能好, 厢体密封, 防尘性好。

研制以塑代钢的大型汽车用 FRP 复合厢板, 替代进口材料, 实现载货汽车车身材料的轻量化一直是国内汽车制造和 FRP 复合材料行业极为关注的课题, 与国家“八五”重点企业技术开发项目同步。交通部公路科学研究所与江苏省海安玻璃纤维厂共同合作, 在国内有关单位的配合和支持下, 经过一年多的努力, 研究开发成功了大型 FRP 复合保温厢板, 并填补了国内大型载货汽车及汽车列车车身材料的一项空白。

2 FRP 夹层结构

夹层结构至少是由三大块材料构成, 即由两块强度和弹性模量较大的面层材料 (内、外蒙皮) 中间夹着轻而厚的芯层材料 (芯材), 经复合组成整体结构, 使内、外蒙皮保持一定的间距, 从而增大蒙皮截面的惯性矩, 提高复合层材料的刚度。

根据复合厢板应具有质轻高强、隔热保温、防腐、防尘、防渗、防盗、新颖美观、组合方便、修补容易等综合性能的特殊要求, 在借鉴国外先进技术的基础上, 考虑到外蒙皮表面的平整光洁和阻燃要求, 玻璃钢外蒙皮以阻燃型树脂为基材。冷藏、保温、保鲜车厢体应符合有关食品卫生法的规定, 故玻璃钢内蒙皮选用食品级树脂为基材。

由于隔热芯材的综合性能是影响热工性能的主要因素, 而选择导热系数小的隔热材料和增加隔热层厚度都可以达到降低总传热系数的目的, 因此, 合理选择隔热芯材品种及芯材厚度十分重要。比较众多的隔热材料, 硬质聚氨酯的导热系数 $\lambda=0.029\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$, 约为聚苯乙烯泡沫塑料的 60%, 且前者容重约轻 25% 左右, 强度及耐热、耐寒性也均优于后者, 可在保证厢体总传热系数不变的前提下使平均壁厚减薄 30% 左右, 但价格约为后者的两倍。考虑到我国化学工业的进一步发展, 硬质聚氨酯塑料的生产成本将会逐步降低, 故选定硬质聚氨酯为夹芯层。

由于大型厢式半挂车的长度大都超过 8m (10t 级, 40m³), 最长的达 12m (20t 级, 60m³), 实际使用时厢体要承担一定的载荷并经历各种动态工况, 因此必须考虑整个厢体具有一定的强度和刚度。设计中根据厢板规格设置了若干 FRP 加强筋, 对其横向、纵向和纵横交错的布设进行了反复的对比试验, 选定了纵向分档布设 FRP 加强筋方案, 并确定了加强筋档距。为便于厢体组合成型, 增强厢体整体强度、刚度, 在复合层的必要部位设置了若干金属预埋件, 并用封边形式使整块夹层板闭合, 以保证芯材不因暴露在空气中而老化。

3 FRP 复合保温厢板的强度设计及热工计算

3.1 强度设计

组合成厢体的厢板承受弯曲应力, 内、外蒙皮分别承受拉、压应力, 芯材承受剪切应力, 以厢体地板处的厢板受力情况最为恶劣, 故仅校核地板强度。

复合板结构简图如图 1 所示。受力方式如图 2 所示。(假定加在复合板上的载荷为均布载

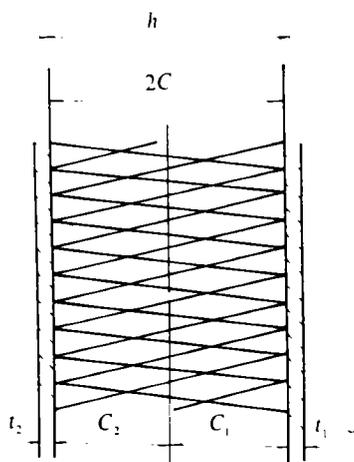


图 1

荷)

内、外蒙皮弯曲刚度为:

$$D = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t_1 \cdot t_2}{t_1+t_2} \cdot h^2 \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量、 μ 为泊松比。

由于 $t_1=t_2=t$; $c_1=c_2=c$

$$\text{因此: } D = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{th^2}{2} \quad (2)$$

式中 $h=2c+t$

因而地板上蒙皮上的最大应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{16q}{\pi^4} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{(a^2+b^2)^2} \cdot (a^2+\mu b^2) \cdot \frac{1}{th} \quad (3)$$

芯材的剪切应力为:

$$\tau = \frac{16q}{\pi^3} \cdot \frac{a^2 b}{a^2+b^2} \cdot \frac{1}{2c} \quad (4)$$

a 、 b 尺寸如图 3 所示。

设地板的尺寸为 $12000\text{mm} \times 2470\text{mm}$ ，地板下小车架的最大距离为 1260mm 。地板上承受的载荷为: 装

载重量 $1.96 \times 10^5\text{N}$ 即 $6.54 \times 10^3\text{N/m}^2$; 地板自重 $1.47 \times 10^2\text{N/m}^2$

则每段地板上的均布载荷为 $q=6.684 \times 10^3\text{N/m}^2$

$$t=2.5\text{mm}=2.5 \times 10^{-3}\text{m}$$

$$\mu=0.2 \sim 0.5 \text{ 取 } \mu=0.5$$

$$2c=45\text{mm}=4.5 \times 10^{-2}\text{m}$$

$$\text{则 } h=2c+t=4.75 \times 10^{-2}\text{m}$$

$$E=1.96 \times 10^{10}\text{N/m}^2$$

3.1.1 计算弯曲刚度 D

由式 (2) 可得:

$$D = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t \cdot h^2}{2} = 7.37 \times 10^4\text{N} \cdot \text{m}$$

3.1.2 计算最大弯矩下的挠度 W_{\max}

由式 (3) 可得:

$$W_{\max} = \frac{16q}{D\pi^6} \cdot \frac{a^4 \cdot b^4}{(a^2+b^2)^2} + \frac{16q}{S\pi^4} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{a+b^2}$$

式中: $q=6.684 \times 10^3\text{N/m}^2$

$$D=7.37 \times 10^4\text{N} \cdot \text{m}$$

$$a=2.47\text{m}$$

$$b=1.26\text{m}$$

$$S=2C \cdot G_c=5.292 \times 10^5\text{N/m}$$

$$\text{因此: } W_{\max}=5.01 \times 10^{-3}\text{m}$$

3.1.3 蒙皮的最大应力

$$\sigma_{\max} = \frac{16q}{\pi^4} \cdot \frac{a^2 b^2}{(a^2+b^2)^2} \cdot \frac{1}{th} (a^2+\mu b^2)$$

$$=10.44\text{MPa}$$

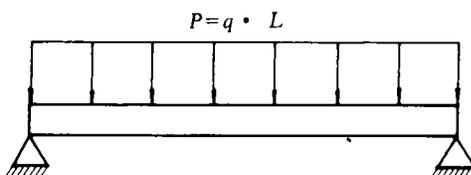


图 2

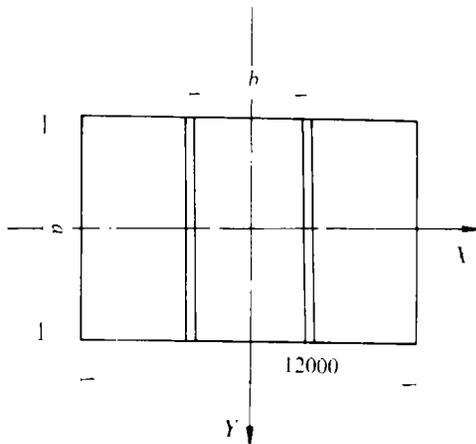


图 3

一般地, 在湿式制品中 FRP 的弯曲强度为:

$$[\sigma] = 196\text{MPa}$$

因此, 安全系数 $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} = 18.72$

可见, 蒙皮的强度是足够的。

3.1.4 芯材的剪切应力

$$\tau = \frac{16q}{\pi^3} \cdot \frac{a^2b}{a^2+b^2} \times \frac{1}{2C} = 0.0766\text{MPa}$$

故剪切应力可忽略不计。

3.2 热工计算

复合保温板的平均传热系数

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_H} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_3}}$$

式中: δ_i —— 各层材料的厚度, 单位 m;

λ_i —— 各层材料的导热系数;

n —— 层合材料层数;

α_B —— 内表面放热系数;

α_H —— 外表面放热系数。

3.3 参数选择与确定

复合保温板共有三层组成, 即两层 FRP 蒙皮。

$$\delta_1 = \delta_2 = 2.5\text{mm} = 2.5 \times 10^{-3}\text{m};$$

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 0.20\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C};$$

一层芯材为硬质聚氨酯

$$\delta_3 = 4.5 \times 10^{-2}\text{m};$$

$$\lambda_3 = 0.027\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C};$$

当空气为自然循环时, $\alpha_B = 6 \sim 8\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$

取 $\alpha_B = 7.5\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$;

$$\alpha_H = 1.16 (4.2 + 13 \sqrt{v})$$

式中 v 为相对风速

$$v = (v_1 + v_2) (v_1 - v_2) = v_1^2 - v_2^2$$

式中: v_1 为车辆平均行驶速度; v_2 为平均风速。

静态时取 $v_1 = v_2 = 0$ 则 $v = 0$

因此:

$$\alpha_H = 4.872\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$$

$$\therefore K = 0.4925\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C} = 0.57\text{w/m}^2 \cdot \text{k}$$

4 蒙皮、芯材的设计与制作

内、外蒙皮的设计经历了材料设计、铺层设计和结构设计三个过程。蒙皮选用阻燃食品级树脂和胶衣树脂为基材。为提高蒙皮表面的耐腐蚀性, 获得富树脂的光滑表面, 防止胶衣层产生细微裂纹, 遮盖蒙皮玻纤纹路使蒙皮表面具有一定的弹性, 改善其抗冲击性和耐磨性,

故选用玻纤表面毡作为面层的增强材料。同时，选择高溶解度型短切原丝毡和无捻玻纤方格布作为增强材料，使树脂得以充分浸透，纵横向强度得以保证。并通过对比试验，确定依照“胶衣层、表面毡、方格布、短切毡……”的反复铺层程序进行制作。由于板材外蒙皮选用阻燃树脂，因而具有阻燃性能（其氧指数 ≥ 26 ）。内蒙皮选用无毒性食品级树脂，加之内胶衣层良好的密封性能，从而保证了整个厢体符合食品卫生法的有关规定。

夹层芯材曾经历了一步法（预聚法）整体发泡的过程，在反复试制过程中，常发生严重烧芯、开裂、起泡等现象，导致机械强度下降，且影响了整体隔热保温性能。后改用硬质聚氨酯芯材预成型，根据不同规格要求，对芯材进行二次加工的方法制作复合层。聚氨酯板材选用 SPU-1 特种硬质聚氨酯，其技术指标均符合有关标准的要求。

夹层厢板整体复合，在下列三种工艺方案中进行选择：

①FRP 面板与聚氨酯芯材粘合成型；

②FRP 内蒙皮、加强筋、封边、硬质聚氨酯一次制作，再与预制的外蒙皮复合成型；

③内、外蒙皮、加强筋、封边一次制作成型。参照上述三种工艺，采用不同的用料及配比制作小样，送国家建材局上海玻璃钢测试中心进行了较全面的对比测试。从测试结果看方案②的测试数据比较稳定，达到或超过了设计指标。

整个板材制作是按设计铺层次序先生产内蒙皮，并在蒙皮内表面富树脂层上铺硬质聚氨酯芯材，预埋件、加强筋与此同步制作埋设，再铺短切毡层，使均匀的树脂充分浸润并与聚氨酯芯层有机粘合，然后覆盖预制的 FRP 外蒙皮，封边后加压，待其充分固化后，再进行加热蒸烘等后处理。

5 影响产品质量的主要因素及对策

在试制过程中，对影响产品质量的以下几个主要因素，在反复分析、对比试验的基础上，找到有效的控制办法。

5.1 制品表面发粘

主要原因	对 策
a. 车间湿度太大，水分对树脂固化产生阻聚作用。	改善车间通风环境使制作时相对湿度低于 75%
b. 空气中的氧对树脂有阻聚作用。	在表面层树脂中加入 0.02% 左右的石蜡
c. 固化温度太低。	提高固化温度，适当增加引发剂和促进剂的用量。
d. 树脂中苯乙烯挥发过多。	避免凝胶前温度过高，控制通风，减少挥发。

5.3 厢板脱模后变形，出现厚薄不均或凹凸不平现象。

主要原因	对 策
a. 脱模时固化度不够	掌握好脱模时机。
b. 加强筋不够	改进结构设计，减少加强筋档距，增加加强筋厚度。
c. 加压不均	均匀、逐步地加压并控制加压力。

5.2 蒙皮表面气泡或裂纹过多

主要原因	对 策
a. 树脂用量过多	控制含胶量，注意搅拌方式，减少胶液中气泡含量。
b. 树脂胶液粘度太大	适当增加稀释剂，提高环境温度。
c. 增强材料选择不当	选择容易浸透树脂的增强材料。
d. 模具不够整洁	清理修整模具

5.4 夹层板材出现分层现象

主要原因	对 策
a. 织物未经脱蜡处理或脱蜡不够。	脱蜡处理。
b. 层间结合不紧密或夹持气泡太多。	掌握加压力，制作时排尽层间气泡。
c. 贴近芯材层增强材料的树脂浸透性不够	选择易浸透树脂的增强材料。
d. 胶液配方不合适，导致粘结性能差，树脂固化过快或过慢。	掌握环境温度，适时调整配方。

5.5 夹层板材硬度低、刚度差

主要原因	对策
a. 胶液配方中固化剂、引发剂用量过多或过少。	调整配方
b. 成型时温度低、湿度大。	提高温度, 降低湿度。
c. 增强材料吸水严重	在干燥条件下贮存增强材料。

③厚度公差: $\pm 1.5\text{mm}$;

④对角线公差: $L/1000\text{mm}$ (L 为板材长度);

⑤两外侧表面平面度公差: $L/1000\text{mm}$ (L 为板材长度)。

6.2 外观质量

①板面平整, 无明显凹凸手感;

②表面整洁无胶痕;

③内、外层表面为白色;

④硬质聚氨酯芯材中气泡所占体积不大于 0.5%;

⑤蒙皮与芯材的粘结面积应大于 98%;

⑥板材受力后, 不得在蒙皮与聚氨酯粘结界面破坏, 应在芯材内撕开, 芯材破坏面积应大于 85%;

⑦板材外表面兼有阻燃性能, 组成箱体后内部无毒、无异味, 符合食品卫生法的有关规定。

6.3 技术指标:

平压强度 $\geq 0.28\text{MPa}$;

平拉强度 $\geq 0.30\text{MPa}$;

拉剪强度 $\geq 0.13\text{MPa}$;

侧压强度 $\geq 50\text{MPa}$;

弯剪强度 $\geq 0.30\text{MPa}$;

6 产品技术条件

根据厢式车对厢板的特殊要求, 结合 FRP 复合保温厢板本身的性能, 经过反复试验, 确定了如下技术条件:

6.1 质量要求:

①长度公差: $\pm 8\text{mm}$;

②宽度公差: $\pm 2\text{mm}$;

垂直冲击强度 $\geq 3.4\text{MPa} \cdot \text{cm}$;

水平冲击强度 $\geq 28\text{MPa} \cdot \text{cm}$;

导热系数 $\leq 0.4\text{W}/\text{m} \cdot \text{k}$;

密度 $\leq 300\text{kg}/\text{m}^3$

7 结束语

FRP 复合保温板质轻、高强, 组合方便, 修补容易, 集防腐、防渗、防尘、防盗、隔热保温多功能于一体, 是厢式车理想的车身材料, 是汽车制造业值得推广应用的一种以塑代钢的新型材料。

参考文献

- 1 陆关兴、王耀先编著. 复合材料结构设计. 华东化工学院出版社, 1991年4月.
- 2 欧国荣、仇礼忠编著. 复合材料工艺与设备. 华东化工学院出版社, 1991年4月.
- 3 羊秋林等编译. 汽车用轻量化材料, 机械工业出版社, 1991年9月.
- 4 黄天泽编著. 大客车车身. 湖南大学出版社, 1988年8月.