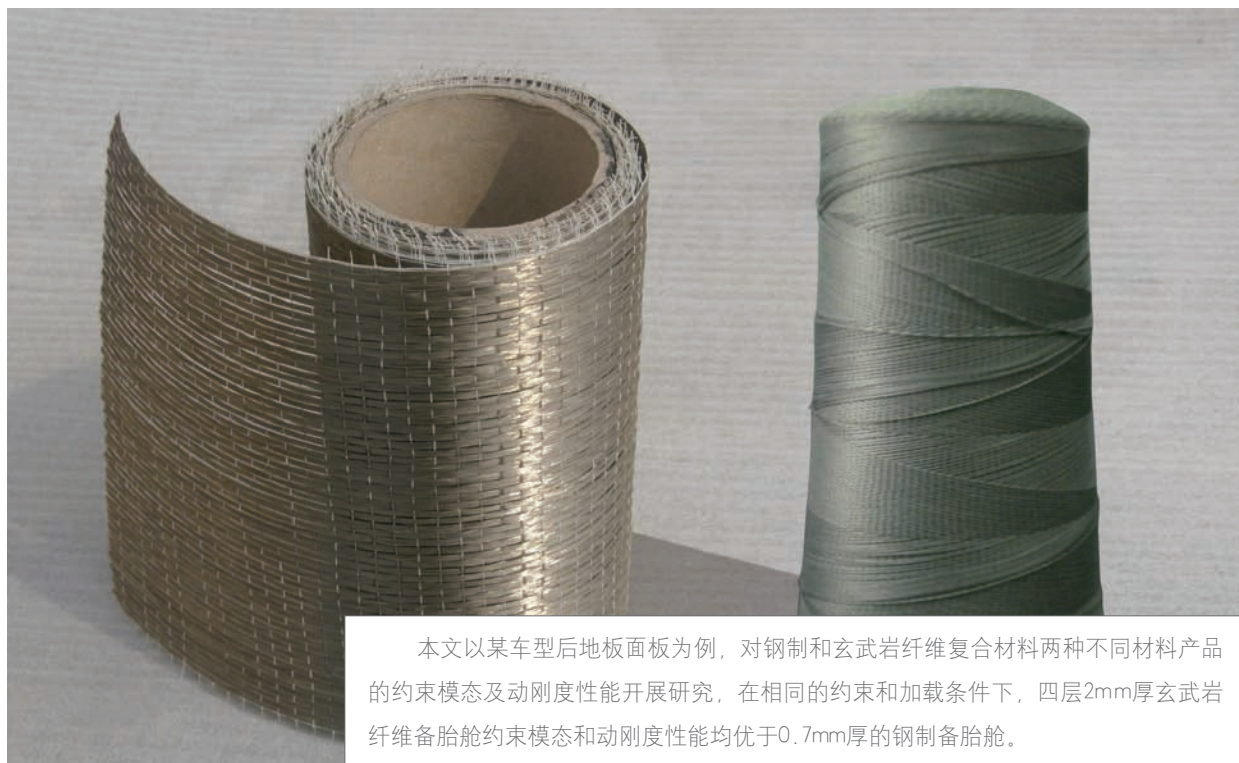




本文以某车型后地板面板为例，对钢制和玄武岩纤维复合材料两种不同材料产品的约束模态及动刚度性能开展研究，在相同的约束和加载条件下，四层2mm厚玄武岩纤维备胎舱约束模态和动刚度性能均优于0.7mm厚的钢制备胎舱。

玄武岩纤维增强复合材料 后地板面板产品结构动力学特性研究

□ 广汽集团汽车工程研究院 / 李能文

复合材料由于具有较高的比强度和比刚度，在航空工业上已得到大规模应用。现阶段，随着汽车保有量的增加，节能减排成制约汽车发展的主要因素之一，通过复合材料来逐步替代原有的金属产品，实现汽车的轻量化是解决这一问题的重要途径。玄武岩纤维是以天然的玄武岩矿石为原料，经过高温熔融拉丝制成的绿色环保的无机纤维，其力学性能高于普通玻璃纤维但价格远低于碳纤维，且降解产物为玄

武岩矿石对环境无影响，近年来在欧美市场备受关注。

模态分析是研究结构动力特性的重要方法，通过模态分析可以清楚结构在某一易受影响的频率范围内的各阶主要模态的特性，从而预测在此频段内在外部或内部各种振源作用下产生的实际振动响应。本文以某车型后地板面板为例，对其进行约束模态和动刚度特性进行测试，同时与钢制后地板面板进行对比，以探讨玄武岩增强复合材料产

品在车身上应用的可行性。

性能试验

1. 样件准备

在涂有脱模剂的单面模具上，依次铺放玄武岩纤维平纹布、脱模布、导流网以及管路，固定树脂进出口管路和真空管后，用胶带将四周密封。用真空袋膜将模具包覆，留出褶皱以保证抽真空后被压实。依靠真空泵抽出空气，关闭进出口

管路，检查气密性以维持真空度不变。依靠真空负压吸注环氧树脂并浸润玄武岩纤维布，确保树脂充分浸润纤维后，在室温下固化成型，脱模得到样件。

2. 试验过程

(1) 约束模态测试。将后地板面板水平放置，按区域对后地板面板测试点和激励点进行标识，约束周边五处，具体测试点、激励点和约束位置如图2a所示，用力锤（脉冲）激励6号点位，利用加速度传感器，如图2b所示，分别测试后地板面板上1-14号点位的时域响应，利用快速傅里叶变换（FFT）将时域数据转换到频域，通过模态定阶和模态拟合，最终得到后地板面板约束模态的频率及振型。

(2) 动刚度测试。按图2a相同的约束方式，分别用力锤（脉冲）激励4、6、7、15、16号点位，用加速度传感器测量加速度响应，用力信号作为输入，加速度响

应信号作为输出，得到各点的模态共振频率并计算出动刚度的值。

计算公式如下：

$$F=ma \tag{1}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k \times 10^3}{m}} \tag{2}$$

$$ACC_{dB} = 20 \times \lg(\frac{a}{r}) \tag{3}$$

由公式（1）（2）（3）可以得到：

$$ACC_{dB} = 40 \times \lg f + 20 \times \lg(\frac{4\pi^2}{k \times 10^3}) \tag{4}$$

$$k = \frac{(2\pi f)^2}{10^{(3+ACC_{dB}/20)}} \tag{5}$$

式中 F ——激励力，单位为N；
 a ——激励力产生的加速度，单位为 m/s^2 ；
 m ——质量，单位为kg；
 f ——激励频率，单位为Hz；
 ACC_{dB} ——加速度导纳，单位为 (s^2N) ；
 k ——动刚度，单位为N/mm。

因动刚度是关于激励频率的函数，不能将动刚度看成像静刚度一样为固定值，因此，遵循等效动刚度直线与试验动刚度曲线围成图形

的上下部分面积相等的原则，并定义此数值为该点的等效动刚度。

为了保证结果的可靠性，测试各个点的模态及动刚度时，均敲击多次，直至激励相近的次数达到三次，并取这三次试验结果的平均值。附表中列出了两种不同材质后地板面板的约束模态和动刚度测试结果。

试验结果讨论

1. 约束模态

模态分析可以为结构系统的振动特性分析、振动故障诊断以及结构动力特性的优化提供依据。对于一般结构，要求各阶模态频率远离工作频率或者工作频率不落在某阶频率的半功率带宽内，对结构振动贡献较大的振型，应使其不影响结构正常工作。一般而言，部件结构变刚或质量变轻都会导致产品频率变高。在相同的约束和加载条件下，钢制与玄武岩纤维增强复合材料后地板面板的前四阶约束模态的频率对比如图3所示。从前四阶模态的频率数值上来看，钢制产品

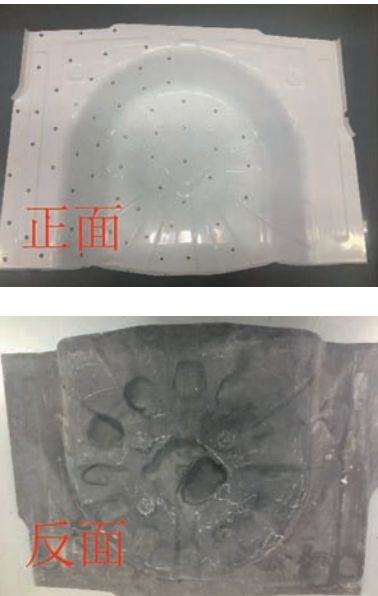


图1 玄武岩增强复合材料后地板面板样件

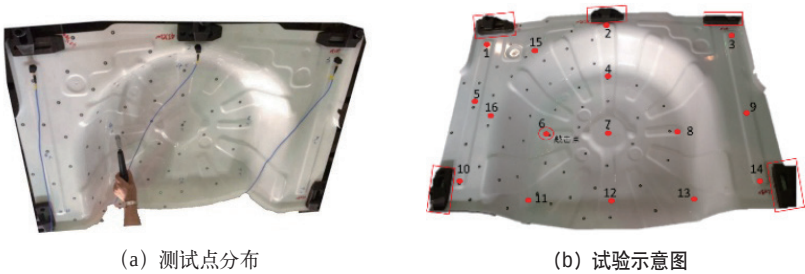


图 2

钢制与玄武岩纤维增强复合材料后地板面板的性能对比表

材料	厚度/mm	质量/kg	约束模态/Hz				动刚度/N·mm ⁻¹				
			一阶模态	二阶模态	三阶模态	四阶模态	P4	P6	P7	P15	P16
钢板	0.7	6	29.0	43.7	52.4	63.4	440	218	68	89	143
玄武岩	2.0	3.7	40.8	55.3	59.4	72.2	234	190	61	298	145

分别为29.0Hz、43.7Hz、52.4Hz、63.4Hz，而玄武岩纤维增强复合材料产品分别为40.8Hz、55.4Hz、59.6Hz、72.2Hz。

图4为玄武岩纤维增强复合材料后地板面板约束模态试验中各点位的振型图，其中实线和虚线分别代表振幅正向和负向最大位置。从图4中可以看出，玄武岩纤维增强复合材料后地板面板前四阶模态的振型类型为中间弯曲（a）、左右扭转（b）、后端扭转（c）和前端弯曲（d），与钢制后地板面板产品前四阶模态的振型基本一致。

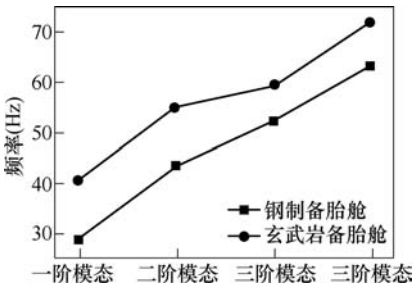


图 3

2. 动刚度

动刚度是衡量结构抵抗预定动态激励能力的特性。如果干扰力变化很慢（即干扰力的频率远小于结构的固有频率），动刚度与静刚度基本相同。干扰力变化极快（即干扰力的频率远大于结构的固有频率时），结构变形比较小，即动刚度比较大。当干扰力的频率与结构的固有频率相近时，有共振现象，此

时动刚度最小，即最易变形，其动变形可达静载变形的几倍乃至十几倍。对于后地板面板而言，动刚度不足会对整车乘坐舒适性和疲劳寿命产生不利的影响。

图5为在相同约束条件下两种材料后地板面板相同测试点的动刚度频谱图。从图5中可以看出，当激励频率较小时，钢制和玄武岩纤维增强复合材料后地板面板的各测试点的频谱图基本一致，而当激励

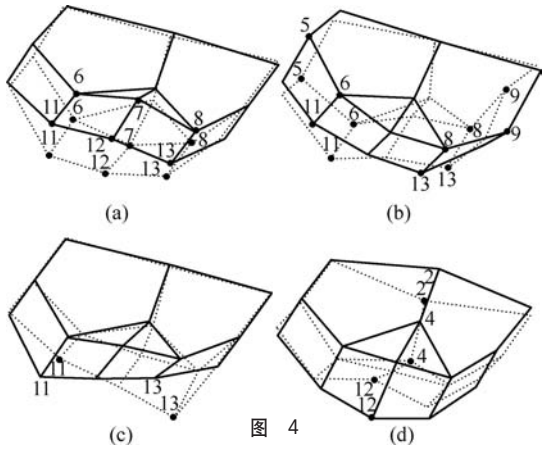


图 4

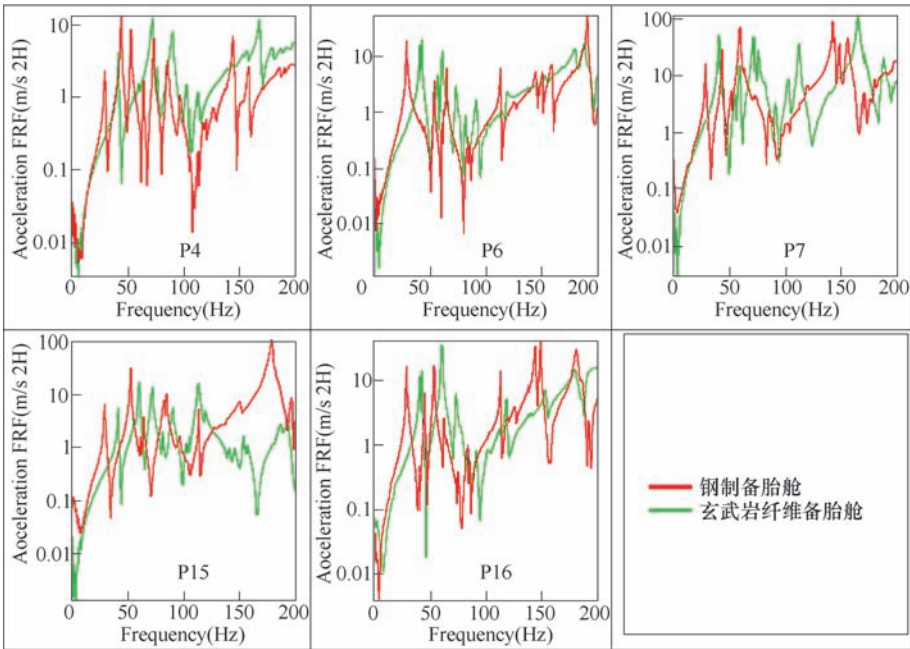


图 5

（下转第56页）

测试的一致性,保持每次试验的发动机工况(关系到经过催化器空速)、尿素喷射量、催化器安装位置不变。实验结果证明,SCR催化器在老化初期,由于硫的影响,转化效率有所升高,至1 000h老化结束,转化效率始终维持在80%以上,未见明显下降。说明SCR催化器能适用于我国高硫柴油的应用环境。

6. SCR技术应用研究

为使SCR技术成功应用于商用车,必须在保证发动机排放满足欧IV限值的前提下,使整车由于安装

SCR后处理装置所造成的动力性、经济性影响降至最低,使得发动机与催化器在整车上实现最佳匹配,即需要研究发动机排温随工况变化趋势及排气管上温度梯度,使催化器安装在距离合适的长度范围内,从而使之工作在合适的温度范围(250~650℃),始终维持合理的催化转化效率(60%~80%)。同时研究由SCR催化器引起的背压变化,对发动机性能的影响。

结语

项目采用SCR技术路线,使重型柴油机排放水平由欧Ⅲ升级到

欧IV,基础发动机不变,有利于Dci11-40发动机进一步商品化;项目选配的SCR催化器经1 000h耐久性试验,表明具有较强的抗老化能力,转化效率对硫不敏感,有利于发动机适应当前市场油品状况;开展后处理方案研究、耐硫老化性能研究等基础技术研究,确定了后处理方案,为今后整车布置SCR系统提供支持。通过本研究,在机内降颗粒、SCR的匹配标定等方面积累了一定的经验,并形成了流程和规范,可以用于指导今后的SCR技术的应用和欧V排放的开发。

AUTO1950

(上接第36页)

超过100Hz,两者的曲线出现较大差异,且钢制后地板面板P15点处在180Hz左右出现了一个明显的峰值。按照等效动刚度计算方法,计算激励频率在0~200Hz范围内各测试点的等效动刚度,如图6所示。

可以看出,后地板面板中心点P4处的等效动刚度数值最小,即最易变形。钢制和玄武岩纤维增强复合材料后地板面板在该测试点的等效动刚度数值分别为68N/mm和61N/mm,需要对该区域进行局部结构优化或增强。钢制后地板面板P15点处在180Hz的模式峰值,导致该点的等效动刚度较弱,而相比之

下,复合材料后地板面板在弯折处的动刚度不弱。对比两种材料,钢制后地板面板局部动态性能略好,但玄武岩产品性能更为平均、方差较小。

结语

玄武岩目前主要填充在消声器里面,车身上的应用还处在研究阶段。为探索玄武岩纤维增强复合材料在车身上应用的可能性,本文采用四层玄武岩纤维复合材料制成后地板面板,并对其约束模态和动刚度进行测试,对比传统钢制后地板面板,可以得出以下结论:

(1) 两种材料的后地板面板

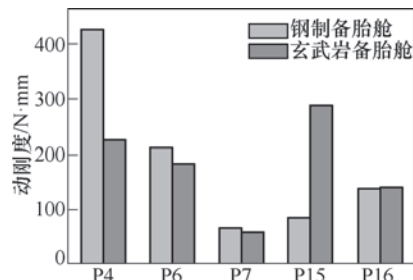


图 6

的约束模态前四阶的振型基本一致,均为中间弯曲、左右扭转、后端扭转和前端弯曲。

(2) 复合材料后地板面板的动刚度与钢制产品相差不大,但减重效果可达40%,导致约束模态数值较高。AUTO1950