

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.08.015

钢 / 碳纤维复合材料混合管式全地形车架设计

方圆¹, 马其华^{1,2}, 胡润超¹, 孙佳睿¹, 孙雨昊¹

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 东华大学机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 基于轻量化原则, 提出将碳纤维增强复合材料 (CFRP) 与钢材包裹套接的管式全地形车架设计方案。根据等刚度原则对全地形车架管件进行替代性设计, 通过 Hyper Laminar 模块分析得出最优的碳纤维增强复合材料铺层方案, 并分析钢 / CFRP 混合管件在静态载荷下的性能。为测试其抗弯刚度等性能, 制作样件进行实物测试并进行相关模拟仿真。建立全地形车架三维模型及有限元模型, 在多工况环境下对复合材料车架进行有限元分析, 验证该方案满足相关设计要求。在多刚度自由尺寸优化后得到最终的钢 / CFRP 混合管式全地形车架设计方案, 为研究复合材料在全地形车架中的应用起到了较好的借鉴作用。

关键词: 全地形车; 碳纤维增强复合材料; 有限元分析; 轻量化设计; 三点弯曲试验

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)08-0073-05

Design of Steel / CFRP Hybrid Tubular All-terrain Vehicle Frame

Fang Yuan¹, Ma Qihua^{1,2}, Hu Runchao¹, Sun Jiarui¹, Sun Yuhao¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. School of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract : Based on the lightweight principle, a tubular all-terrain vehicle composite frame program was proposed, combining carbon fiber reinforced composites (CFRP) with steel. The steel / CFRP hybrid pipe units, as the replacement of steel tube were designed according to the principle of equal stiffness, which performance was analyzed under static loading. At the same time, the optimal carbon fiber-reinforced composite layup design was sought through the Hyper Laminar module. In order to achieve the bending stiffness and other properties, samples were made for physical three-points bending test, and related simulation was performed. The three-dimensional model and finite element model of the hybrid tubular all-terrain vehicle frame were established to do the finite element analysis under multiple operating conditions, so that the programs can be proved to meet the relevant design requirements. After the multi-stiffness free size optimization, the final designs of the steel / CFRP hybrid tubular all-terrain vehicle frame were obtained, which is a good reference for studying the application of composite materials in the frame of all-terrain vehicles.

Keywords : all-terrain vehicle ; carbon fiber composite materials ; finite element analysis ; lightweight design ; three-point bending test

汽车轻量化技术对于实现节能减排有重要意义。碳纤维增强复合材料 (CFRP) 因具有高轴向强度^[1]、高弹性模量且轻质等优点^[2], 被广泛用于工程实践中。在汽车领域, 利用其对车辆结构进行轻量化设计, 可大幅降低整车质量并提升整车动力性与经济性。

CFRP 已经逐渐从车身覆盖件、单个部件的替

代逐渐转向整体式车架结构中的应用。Liu Qiang 等^[3] 基于某电动汽车分析斜纹织物复合材料在其车架中的应用, 得出复合材料车架具有优良的碰撞特性。G. K. Ermias 等^[4] 通过实物试验与有限元仿真研究织物碳 / 环氧树脂 T 型车架复合结构的承载能力与失效模式。G. Pedro 等^[5] 基于巴士车架对比了传统焊接与替代钢 / CFRP 混合连接结构的力

基金项目: 纤维材料改性国家重点实验室开放课题项目 (KF1826), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2232018A3-02), 上海工程技术大学研究生科研创新项目 (19KY0144)(18KY0605)

通讯作者: 马其华, 在读博士, 副教授, 主要从事汽车轻量化材料优化设计研究 E-mail: mqh0386@163.com

收稿日期: 2019-06-06

引用格式: 方圆, 马其华, 胡润超, 等. 钢 / 碳纤维复合材料混合管式全地形车架设计 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(8):73-77, 81.

Fang Yuan, Ma Qihua, Hun Runchao, et al. Design of steel / CFRP hybrid tubular all-terrain vehicle frame[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):73-77, 81.

学性能,认为复合材料混合结构在刚度、疲劳强度与轻量化等方面具有明显优势。

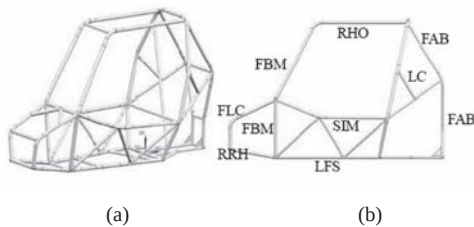
CFRP受模具及制造工艺等方面的限制,对于复杂的空间框架式车架结构运用纯碳纤维仍存在诸多困难。因此,针对车架中常用的薄壁管件采用金属/CFRP的混合结构实现制造与轻量化的多目标。宋凯等^[6]在薄壁铝方管外铺设CFRP并对混合方管结构进行轴向冲击试验证实了复合材料对金属的强化作用。D. K. Shin等^[7]通过三点弯曲试验分析了铝/CFRP混杂方管的破坏特性,并得出不同碳纤维铺层方式对混杂管整体性能有显著影响。K. Roozbeh等^[8]也对金属/CFRP混杂方管进行压缩试验,对比多变量组合下方管的吸能特性。

针对全地形车架采用的圆管结构,将钢/CFRP混合管件应用于承载式车架中各工况的替代性分析研究较少。笔者基于等刚度原则以轻量化为目标设计,采用钢/CFRP混合结构替代原有钢制车架,结合单个管件的力学性能要求,确定了钢/CFRP混合管件的铺层设计方案,采用三点弯曲实验对比不同铺层方案和钢管的弯曲性能,据此采用最优方案管件分别在三种典型工况下对混杂式车架进行力学评价。考虑到轻量化与车架的多刚度目标要求,建立车架加权柔度响应与质量响应的自由尺寸优化模型,在多工况加载下求解最佳钢/CFRP混杂全地形车架设计。

1 全地形车车架替代性设计

1.1 全地形车车架结构

全地形车架通常为空间框架,一般选用圆形钢管制造。图1为全地形车车架结构示意图。



a—全地形车架轴测图; b—全地形车架侧视图

图1 全地形车架结构示意图

主要结构件包括:后部防滚环(RRH)、防滚环头顶构件(RHO)、前端支撑构件(FBM)、后端侧向横梁(LC)、前端侧向横梁(FLC)、下端车架边梁(LFS)等;次要结构件包括:侧向斜撑(LDB)、侧防撞构件(SIM)、车首/车尾支撑构件(FAB)等。一般要求结构件材质不低于20#碳素钢,主结构管件规格不低于 $\varnothing 25\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,次结构管件规格不低于

$\varnothing 25\text{ mm} \times 1\text{ mm}$;对于非纯钢结构,要求壁厚高于1.57 mm,抗弯刚度与弯曲强度超过或等于20#碳素圆钢。

1.2 等刚度材料替换的近似方法

考虑到全地形车车架为空间结构形式,对其实现整体替代必将会遇到模具难以设计以及碳纤维管件连接可靠性很难保证等问题。故选择以薄壁钢管作为骨架,外部通过铺设碳纤维复合材料进行加强实现轻量化的目的。根据材料替换等刚度原则确定外层复合材料的铺设厚度,其近似关系为^[9]:

$$K = \beta(\eta)Et^n \quad (1)$$

式中, $\beta(\eta)$ 表示不同零件形状及其工况系数, E 为材料的弹性模量, t 为零件厚度, η 则是厚度指数系数。结构刚度与厚度的关系为非线性函数,且该公式适用于各工况下各形状的片体。若原材料的弹性模量为 E_0 , $E_1(E_0 > E_1)$ 即为拟替换材料的弹性模量,则由式(1)可得:

$$\delta_t = \frac{t_1}{t_0} = \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/\eta} \quad (2)$$

$$\delta_m = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/\eta} \quad (3)$$

式中, δ_t , δ_m 分别为等刚度材料替换前后的厚度和质量之比, t_0 与 t_1 指材料替换前后的厚度, m_0 与 m_1 为材料替换前与替换后的质量, ρ_1 , ρ_0 表示材料替换后与替换前的密度。式(2)表明,在利用上述等刚度原则时,交替材料的厚度比为弹性模量反比的 $1/\eta$ 次方,其中 η 即厚度指数系数,在汽车领域中取值范围为1~2,式(3)则表示利用等刚度原则时的材料轻量化水平。

1.3 车架管件设计方案

在保持原结构下,通过改变薄壁材料厚度,使用轻质材料替换是实现整体轻量化的有效手段之一。基于实际管件材料,原车架主管材为外径31.75 mm、壁厚1.6 mm的高强4130钢管。欲设计为内层为外径25.4 mm、1.2 mm壁厚,外层采用碳纤维复合材料进行缠绕加强。即选择对直径较小的钢管作碳纤维包裹强化处理,使之与较大直径钢管作刚度比较以验证替代性设计可靠性。基于等刚度原则,应铺设壁厚为0.68 mm~1.17 mm的碳纤维复合材料增强层,根据现有纤维缠绕可知,平均每层纤维厚度约为0.3 mm。考虑到其外径较小,则初选铺设8层碳纤维布,如图2所示,碳纤维与4130钢具体材料属性见表1和表2。

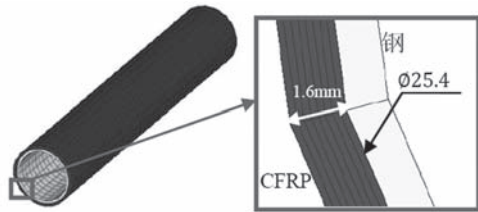


图2 钢/碳纤维增强复合材料混杂管示意图

表1 碳纤维属性

项目	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7850
弹性模量/MPa	210 000
泊松比	0.3
剪切模量/MPa	76 923
屈服极限/MPa	785

表2 4130 钢材属性

项目	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 518
X 方向弹性模量/MPa	123 340
Y 与 Z 方向弹性模量/MPa	7 780
泊松比 XY, XZ	0.27
泊松比 YZ	0.42
剪切弹性模量 XY, XZ/MPa	5 000
剪切弹性模量 YZ/MPa	3 080
X 方向拉伸应力极限/MPa	1 632
Y 与 Z 方向拉伸应力极限/MPa	34
X 方向拉伸应变极限/mm	0.0143
Y 与 Z 方向拉伸应变极限/mm	0.0026

2 钢/碳纤维复合材料混合管件设计

2.1 碳纤维铺层设计

在完成初步替代性设计后,确定了碳纤维层的厚度及层数,但仍需定义其铺层角度与铺层顺序以保证碳纤维层可发挥最优性能。冯振宇等^[10]对复合材料薄壁圆管进行轴向准静态压缩试验,在 0° 与 90° 铺层角度中加入 $\pm 45^\circ$ 铺层后,导致圆管的轴向强度增强并提高吸能量。刘昭特等^[11]研究发现 $0^\circ/90^\circ$ 铺层组对复合材料层合板的弯曲强度呈正增长趋势,而 $45^\circ/-45^\circ$ 铺层组则会增强层合板承受变形的能力。对于全地形车的工况而言,车架管件更易于受到垂直于轴向的应力影响,则碳纤维层合板的弯曲性能成为判别整体强度与刚度的关键。

常见的碳纤维复合材料铺层角度为 $-45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$,若以四层复合材料铺层为例,可在 Hyper Laminate 中作出相关设置,见表3。

在软件中对不同铺层的层合板均赋予Y方向1 000 N的面内载荷与100 mm的弯矩,其铺层分析结果见表4,应力为正时表示受拉力作用,压力为负则受压,当剪应力为零时,对应正应力即为主应力,最大主应力为 σ_1 。

表3 碳纤维层合板铺层方案

序号	铺层方式	单层厚度/mm	总厚度/mm	铺层材料
1	$0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$	0.2	0.8	CFRP
2	$45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ$	0.2	0.8	CFRP
3	$0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ$	0.2	0.8	CFRP
4	$0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ$	0.2	0.8	CFRP

表4 四种铺层方案下的主应力、应变分析结果

序号	应变值 ε_1 /mm	应变值 ε_2 /mm	应力值 σ_1 /MPa	应力值 σ_2 /MPa
1	-7.757e-4	1.591e-2	2.395e+3	4.057e+1
2	-4.482e-2	6.294e-2	1.750e+3	-6.745e+1
3	-1.421e-2	3.532e-2	3.348e+3	2.963e+2
4	-2.596e-2	3.416e-2	1.400e+3	-1.262e+2

同时比较了四种铺层方案的层合板弯曲性能,见表5, E_{11} 为纵向弹性模量, E_{22} 为横向弹性模量, G_{12} 为面内剪切模量, V_{12} 为泊松比。通过横向对比可得铺层方案2与4的应力较小,而方案2的应变较方案4略大,同时综合来看方案4的弹性模量与剪切模量也较大,则决定选取方案4为最佳铺层方案,即铺层角度定为 $0^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ$ 。

表5 四种铺层方案下的层合板弯曲性能对比

序号	E_{11}	E_{22}	G_{12}	V_{12}
1	7.631e+4	7.631e+4	5.800e+3	4.105e-2
2	2.025e+4	2.025e+4	3.665e+4	7.456e-1
3	7.191e+4	7.191e+4	9.657e+3	9.636e-2
4	7.373e+4	2.826e+4	1.680e+4	3.899e-1

2.2 车架管件有限元分析

根据实际工况,全地形车架易于受到侧向碰撞,管件表现为轴向压缩与径向弯曲,则对混合管进行相关静态载荷分析。Kim Sang-Young 等^[12]通过铝/CFRP混合方管的弯曲冲击试验对比了准静态和动态试验结果,发现两者载荷-位移曲线基本一致,准静态试验峰值力略高于动态冲击试验,验证了静力分析对评价混合管件力学性能具有一定参考价值。基于混杂管设计方案,在 Hyper Mesh 中建立总长200 mm的样管有限元模型,并对比混合管件与钢管件轴向压缩与径向弯曲性能,结果如图3所示。

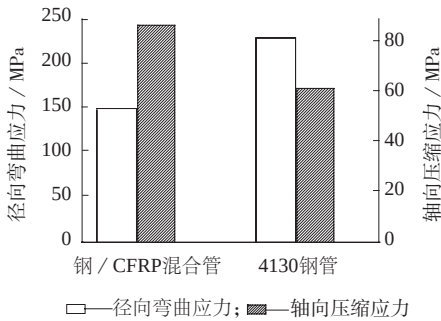


图3 CFRP/钢混合管与原4130钢管的静力分析对比

结合图3可知,将管件两端固定,中点处施加1000 N且垂直向下的径向弯曲载荷,钢/CFRP混合管件最大径向弯曲应力为141 MPa,小于钢管测试结果;固定管件左端,在右端施加360 N且水平向左的轴向压缩载荷,得出最大轴向压缩应力为87.4 MPa,略大于钢管的62 MPa。

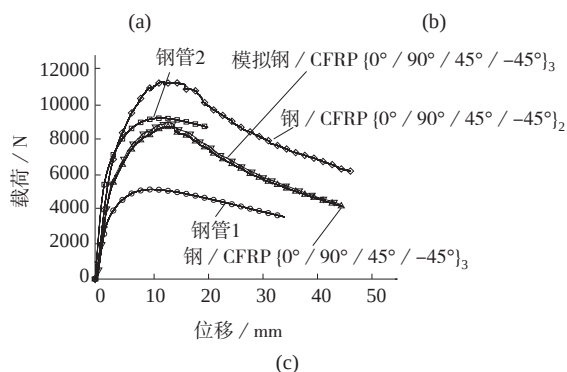
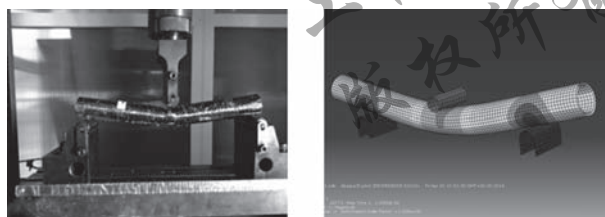
2.3 车架样件三点弯曲试验

在车架结构中,各管梁相互固定连接成空间结构。因此,进行三点弯曲测试可有效观察到车架受到横向载荷作用下的溃缩行为。实验方案见表6。利用万能试验机对管件进行三点弯曲测试,加载速度依据国标相关试验方法GB/T 1449-2005,测定样件弯曲强度时压头下降速度为10 mm/min。同时在ABAQUS中对该试验进行有限元仿真模拟,加载情况与边界条件等均与实际情况相同。

表6 三点弯曲试验方案

样件类型	外径/mm	总壁厚/mm
钢管1	31.75	1.6
钢管2	25.4	1.2
钢/CFRP{0°/90°/45°/-45°} ₃	30.2	3.6
钢/CFRP{0°/90°/45°/-45°} ₂	28.6	2.8

图4为试验过程及不同管件间的载荷-位移弯曲试验对比。



a—实际试验过程;b—仿真模拟过程;c—试验结果

图4 准静态三点弯曲试验

由图4可知,钢管1(1.6 mm壁厚)可承受的极限载荷为9354.19 N,钢管2(1.2 mm壁厚)则为5213.86 N,钢/CFRP{0°/90°/45°/-45°}₃混合管最大压力约为11330 N,而钢/CFRP{0°/90°/

45°/-45°}₂混合管则约为8870 N,均出现于位移量13.7 mm处附近。可以看出,8层、12层混合管的最大抗弯压力均大于钢管件,且随着层数的增加抗弯压力显著提高。在{0°/90°/45°/-45°}₂铺层情况下,软件仿真结果与实际试验基本相同,一定程度上验证了有限元分析的可靠性。

根据圆形管弯曲强度公式:

$$\sigma_{bb} = (8F \times L) / (\pi d^3) \quad (4)$$

式中, F 为三点弯曲试验时样件最大载荷,N; L 为三点弯曲试验机两支点跨距,cm; d 为待测构件直径,cm; σ_{bb} 为弯曲强度,MPa。计算可得钢/CFRP{0°/90°/45°/-45°}₃混合管弯曲强度为14114.40 MPa,钢/CFRP{0°/90°/45°/-45°}₂混合管弯曲强度为18028.88 MPa,均满足相关要求。

3 混合管式全地形车架有限元分析

基于单人全地形车相关结构设计要求,将替代性设计的碳纤维包裹强化式钢管移植于整体车架中,建立碳纤维增强复合材料-钢混杂全地形车架三维模型。

3.1 建立车架总成的有限元模型

在Hyper Mesh中建立车架有限元模型并计算质量,得到该方案下全地形车混杂车架则约为24.20 kg,与原全钢结构车架29 kg的质量比较,减重明显。

3.2 车架满载弯曲工况分析

满载弯曲工况是指全地形车在完整负载的状态下,四轮着地在道路上正常速度行驶时的工况。如图5所示即为满载弯曲工况。

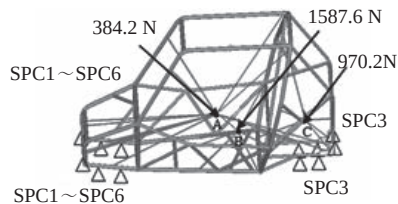


图5 满载弯曲工况示意图

车架左右前轮处均布全自由度约束,图5中以SPC1~SPC6表示各方向单点自由度约束,两后轮约束垂直方向,即Z向自由度,图中以SPC3表示。为模拟该工况下受力,取动载系数 $\alpha=1.8$,在车架重心点A施加384.2 N的车架等效自重,驾驶员与座椅重心点B处施加1587.6 N的等效质量,以及于动力总成重心点C处施加970.2 N的等效质量。

3.3 车架急转弯工况分析

车辆在转弯时会产生向心力,在侧向载荷作用下,车架前部会向弯心移动,同时制动,车架受与前进方向相反载荷。以全地形车设计最高时速约为 60 km/h,急转弯时速约 20 km/h,最小转弯半径约为 3.6 m,则理论上向心加速度约为 $a=8.6 \text{ m/s}^2$,整车总重约为 166.78 kg。全地形车的制动力可由重力加速度和制动力系数的乘积计算,并取制动力系数为 0.6,动载系数为 1.5。模拟该工况下车辆向 Y 轴方向急转,则以右后轮为轴心固定,其余三轮以其为圆心作近似圆周运动则在两前轮位置施加 2151.5 N 的向心力并约束其 X 与 Z 向自由度,后轮部分施加 1471.0 N 的制动力并约束右后轮 Z 向,左后轮全部自由度,如图 6 所示。

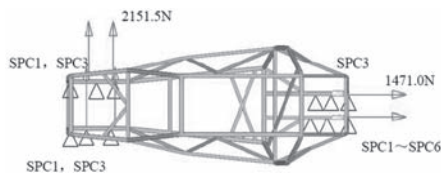


图 6 急转弯工况示意图

3.4 车架紧急制动工况分析

紧急制动工况是指在直线运动的情况下,全地形车前轮与后轮同时抱死的工况。车架不仅要承受来自驾驶员与座椅、动力系统与传动系统的静态载荷,还需承受一定大小的惯性力,以相关研究为基础,全地形车制动时可以减速度 $a=1.6 \times 9.8^{[13]}$ 计算,取动载荷系数为 1.6,如图 7 所示,前轮占据约 70% 制动力,为 2928.9 N,后轮占据约 30%,为 1255.3 N。此工况状态模拟前后轮同时抱死滑行,需约束前轮处各向自由度,约束后轮处 Y 及 Z 向自由度。

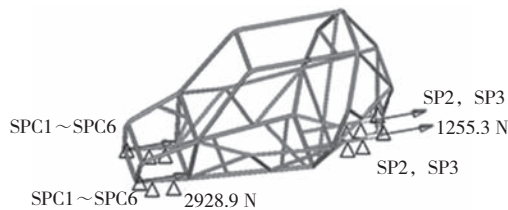


图 7 紧急制动工况示意图

各工况下分析结果见表 7。材料屈服极限通常在拉伸试验中测得,碳纤维材料 X 轴拉伸极限,即 0° 铺层时沿轴向最大应力高达 1632 MPa,远高于钢管屈服极限,也有相关研究^[13]通过测试验证碳纤维复合材料管抗拉强度可达 800 MPa 以上。则取混合管金属部分 4130 钢屈服极限 785 MPa 为管件最小屈服极限计算安全系数。

表 7 碳纤维增强复合材料-钢混杂车架多工况分析结果

工况	最大应力 / MPa	最大位移 / mm	安全系数
满载弯曲	198.3	0.17	3.96
急转弯	530.1	10.3	1.48
紧急制动	61.6	0.10	12.74

对混合管车架的碳纤维加强的铺层实现优化。主要分自由尺寸优化、尺寸优化和铺层顺序优化 3 个过程^[15]。

4 结论

提出了以 CFRP-钢混合管件为基础的全地形车车架设计方案,实现了整车轻量化的要求。对混合管进行静力分析与三点弯曲试验以验证其刚度符合设计要求,对比分析多种碳纤维铺层方案,将最优方案导入设计中,完成典型极限工况下的混合管式全地形车架分析,结果证实其已满足相关要求。

参考文献

- [1] Biral F, Da Lio M, Bertolazzi E. Combining safety margins and user preferences into a driving criterion for optimal control-based computation of reference maneuvers for an ADAS of the next generation [C]// Proceedings of 2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Las Vegas: IEEE, 2005: 36-41.
- [2] Bertolazzi E, Biral F, Da Lio M, et al. Supporting drivers in keeping safe speed and safe distance: the SASPENCE subproject within the European framework programme 6 integrating project PReVENT[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 525.
- [3] Liu Qiang, Lin Yongzhou, Zong Zhijian, et al. Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle[J]. Composite Structures, 2013, 97: 231-238.
- [4] Ermias G K, Giovanni B. An experimental and finite element study of the transverse bending behaviour of CFRP composite T-joints in vehicle structures[J]. Composites Part B, 2015(79): 430-443.
- [5] Pedro G, Alejandro Q, Miguel A M. Study of the behaviour of adhesive joints of steel with CFRP for its application in bus structures[J]. Composites Part B Engineering, 2017(129): 41-46.
- [6] 宋凯, 吴永强, 姚威, 等. 复合材料层合板加强薄壁铝梁吸能特性试验研究 [J]. 汽车工程学报, 2016, 4(6): 277-285.
- [7] Song Kai, Wu Yongqiang, Yao Wei, et al. Experimental study on energy absorption characteristics of composite laminates reinforced thin-walled aluminum beams[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2016, 4(6): 277-285.
- [8] Shin D K, Kim H C, Lee J J, et al. Numerical analysis of the damage behavior of an aluminum / CFRP hybrid beam under three point bending[J]. Composites Part B, 2014, 56: 397-407.
- [9] Roozbeh K, Hossein A, Scott W C. Numerical modeling of the effects of FRP thickness and stacking sequence on energy absorption

- [4] 李学章,郭奕崇. 管材挤出模具新型压缩段流道的研究[J]. 北京化工大学学报, 2005, 32(3):103-105.
- Li Xuezhong, Guo Yichong. Study on the new compression section runner of tube extrusion mold[J]. Journal of Beijing University of Chemical Engineering, 2005, 32(3):103-105.
- [5] 袁丽军,杜群贵. 基于 ANSYS 二次开发的注射模模架参数化有限元分析[J]. 模具工业, 2012, 38(3):25-27.
- Yuan Lijun, Du Qungui. Parameterized finite element analysis of injection molding frame based on secondary development of ANSYS[J]. Mould Industry, 2012, 38(3):25-27.
- [6] Zhang Dewei, Shen Bo, Li Shaoming. Finite element analysis of extrusion flow field of short fiber rubber composites[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 40(2):76-81.
- [7] 王彬. 图形化实时控制系统设计软件 (GRTCS) 的实现[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.
- Wang Bin. Implementation of graphical real-time control system design software (GRTCS)[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2002.
- [8] 牟淑志,杜春江,牟福元. 基于 RAMP 和 ANSYS 二次开发的结构拓扑优化[J]. 机械工程师, 2010(1):59-61.
- Mou Shuzhi, Du Chunjiang, Mou Fuyuan. Structural topology optimization based on RAMP and ANSYS secondary development[J]. Mechanical Engineer, 2010(1):59-61.
- [9] 刘洁,张和平,王丽娟. 基于 Visual C++ 的 ANSYS 参数化设计[J]. 机电工程技术, 2003(5):83-84.
- Liu Jie, Zhang Heping, Wang Lijuan. ANSYS parametric design based on Visual C++[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2003(5):83-84.
- [10] 赵峰,贾明印,薛平. 基于 Polyflow 模拟的塑木建筑墙板异型材机头流道设计[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(6):35-39.
- Zhao Feng, Jia Mingyin, Xue Ping. Design of die head runner for plastic wood building wallboard profile based on Polyflow simulation[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(6):35-39.
- [11] 郭凯,郭顺生,黄浪. 塑料异型材挤出定型模三维参数化设计方法[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6):84-88.
- Guo Kai, Guo Shunsheng, Huang Lang. 3D parametric design method of plastic profile extruding die[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(6):84-88.
- [12] 汪鹏跃,黄剑,孙华丽. CPVC 管材高速挤出模设计[J]. 模具工业, 2015, 41(10):53-55.
- Wang Pengyue, Huang Jian, Sun Huali. Design of high speed extrusion die for CPVC pipe[J]. Die and Mould Industry, 2015, 41(10):53-55.
-
- (上接第 77 页)
- of metal-FRP square tubes[J]. Composite Structures, 2016(147):231-246.
- [9] Richard P, Fang Li, Micael E. Causes of weight reduction effects of material substitution on constant stiffness components[J]. Thin-Walled Structures, 2004, 42:613-637.
- [10] 冯振宇,周建,张雪晗,等. 复合材料薄壁圆管压溃吸能机理分析及层叠壳建模方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(23):268-275.
- Feng Zhenyu, Zhou Jian, Zhang Xuehan, et al. Mechanism analysis and laminated shell modeling for crushing energy absorption of composite thin-walled circular tubes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(23):268-275.
- [11] 刘昭特,张彦飞,杜瑞奎,等. 铺层结构对复合材料层合板弯曲强度及失效行为的影响[J]. 工程塑料应用, 2014(1):56-61.
- Liu Shaote, Zhang Yanfei, Du Ruikui, et al. Effect of layered structures on flexural strength and failure behaviors of composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2014(1):56-61.
- [12] Sang-Young Kim, Ju-Won Jeong, Jun-Yeob Kim, et al. Energy absorption characteristics of aluminium / CFRP hybrid beam under impact loading[J]. International Journal of Crashworthiness, 2016(22):190-201.
- [13] 于森,杜俊廷,鲁植雄. 基于 ANSYS 的 FSC 车架有限元分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2014, 52(9):20-22.
- Yu Miao, Du Junting, Lu Zhixiong. Finite element analysis of FSC racing car frame based on ANSYS [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2014, 52(9):20-22.
- [14] 张亮泉,宋立华,毛晨曦. 碳纤维复合材料管的强度特性试验研究[J]. 低温建筑技术, 2008(3):17-18.
- Zhang Liangquan, Song Lihua, Mao Chenxi. Experimental study on pseudoelastic property of shape memory alloy[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2008(3):17-18.
- [15] 孙冬鸣,马其华,孙佳睿. 基于等刚度原理的碳纤维汽车 B 柱抗撞性分析[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2018, 298(11):60-65.
- Sun Dongming, Ma Qihua, Sun Jiarui. Crashworthiness analysis of carbon fiber automobile B-pillar based on equal stiffness principle [J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2018, 298(11):60-65.