

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.10.010

CF布包裹工艺对CFRP弹簧刚度的影响

朱玉坤¹,周细应¹,吴德振¹,戚文²

(1. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海中国弹簧制造有限公司, 上海 201901)

摘要: 采用拉挤和模压成型工艺制备了碳纤维(CF)增强塑料(CFRP)弹簧,采用CF布包裹工艺对弹簧进行了强化。使用微机控制电液伺服万能试验机对弹簧进行了静态压缩实验,使用扫描电子显微镜(SEM)对实验弹簧裂纹处微观形貌进行了观察分析,运用理论模型对实验结果进行了验证。研究表明,CF布是很好的补强材料,可以在不明显增大CFRP弹簧尺寸、质量的情况下,通过包裹强化工艺有效地提高弹簧的刚度。CF布包裹角度对CFRP弹簧刚度的影响很大,其中90°CF布包裹工艺最优,CFRP弹簧刚度达到 $11.78 \times 10^3 \text{ N/m}$,较未包裹强化CFRP弹簧刚度提升了164.7%。通过理论模型计算发现,实际实验结果偏低,表明减小拉挤过程中CF布包裹角度的偏移量,是CF布能充分发挥强化作用的关键因素。

关键词: 碳纤维增强塑料; 弹簧; 碳纤维布; 包裹工艺; 刚度

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)10-0052-05

Effects of CF Cloth Wrapping Process on CFRP Helical Spring Stiffness

Zhu Yukun¹, Zhou Xiyang¹, Wu Dezhen¹, Qi Wen²

(1. College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. China Spring Corporation Limited, Shanghai 201901, China)

Abstract: Carbon fiber (CF) cloth wrapping CF reinforced plastics (CFRP) helical spring were produced by compression molding and pull extrusion processes, the static compression experiment was carried out on the spring by using the microcomputer control electro-hydraulic servo universal testing machine. The scanning electron microscope was used to observe and analyze the micro morphology of the crack at the experimental spring. The theoretical model is used to verify the experimental results. The research shows that CF cloth is an excellent reinforcing material. The stiffness of the spring can be effectively improved by the wrapping process without obviously increasing the size and weight of the CFRP spring. The wrapping angle of CF cloth has a great influence on the stiffness of CFRP spring, of which 90° CF cloth wrapping process is the best, CFRP spring stiffness reaches $11.78 \times 10^3 \text{ N/m}$, compared to CFRP without CF cloth cladding, spring stiffness increases by 164.7%. Through theoretical model calculation, it is found that the actual experimental results are on the low side. It shows that the deviation of the CF cloth wrapping angle during the pultrusion process is the key factor for CF cloth to give full play to the strengthening effect.

Keywords: carbon fiber reinforced plastic; spring; carbon fiber cloth; wrapping process; stiffness

汽车轻量化是实现汽车行业节能环保的关键技术^[1],碳纤维(CF)因其轻质高强的特性成为实现汽车轻量化的理想材料^[2-5]。目前,国内外研究人员在CF增强复合材料(CFRP)汽车弹簧的制造工艺方面仍处于探索阶段^[6-8]。目前,CFRP弹簧与同尺寸金属弹簧相比,轻量化效果明显,但同尺寸情况下的刚度差距很大^[9]。隋刚等^[10]对纤维增强复合材料弹簧的制备工艺及力学性能进行了研究,发现纤维增强复合材料弹簧的力学性能同弹簧的内径、直径及纤维束的股数、捻度等有直接关系。S. H. Oh等^[11]研究了CF铺层角度对CFRP弹簧刚度的影响,结果表明,纤维铺层角度为45°的CFRP弹簧性能

最佳,但其刚度仍只有金属弹簧的16.8%,不能满足实际应用的需求。因此提升CFRP弹簧的刚度是十分有必要的。

弹簧压缩时受力情况如图1所示,图中 F 为弹簧载荷, T 为弹簧所受扭矩, D 为弹簧中径, d 为簧丝直径, τ 为簧丝截面所受剪切应力。从图1可知,应力最大处为簧丝内侧表面,其次为外侧表面^[12]。因此表层强化工艺能有效提升弹簧的力学性能。CF布因其轻薄的特性,作为表层强化材料用于

联系人:周细应,博士,教授,硕士研究生导师,研究方向为碳纤维复合材料制备和性能的研究

收稿日期:2017-08-07

CFRP 弹簧,可在质量、尺寸没有明显增加的情况下显著提高 CFRP 弹簧的刚度^[13-15]。

基于此,笔者采用 CF 布包裹 CFRP 弹簧的工艺来提高弹簧的刚度。探讨了不同包裹角度对 CFRP 弹簧刚度的影响,并运用理论模型对实验结果进行了验证,使用扫描电子显微镜 (SEM) 对弹簧的开裂处进行了形貌观察及误差分析。最终得到了较为优化的 CFRP 弹簧制备强化工艺。

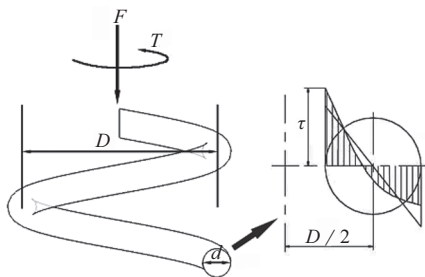


图1 弹簧受力图

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂: 328, AG-80, 上海华谊树脂有限公司;

CF 丝: T700 SC (12000-50C), 弹性模量为 180 GPa, 泊松比为 0.3, 日本东丽公司;

CF 布: T700 120g 1k 平纹布, 弹性模量为 180 GPa, 泊松比为 0.3, 日本东丽公司;

二乙烯三胺 (DETA): 化学纯, 国药集团化学试剂有限公司;

无水乙醇: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子天平: FA 2104 型, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

超声波清洗仪: SK-1200H 型, 上海科导超声波仪器有限公司;

微机控制电液伺服万能试验机: WAW-600 型, 上海三思纵横机械制造有限公司;

SEM: S-3400N 型, 日本日立公司;

硅胶软管: 内径 10 mm, 绮业实业 (上海) 有限公司;

半橄榄型弹簧模具: 自制。

1.3 CFRP 弹簧的制备

将 AG-80 和 328 环氧树脂按照质量比为 4:1 复配后作为 CFRP 弹簧的树脂基体, 选用 DETA 作为固化剂, 固化后树脂基体弹性模量为 4.8 GPa, 泊

松比为 0.4。选用 CF 丝作为增强材料, CF 布作为补强材料。

在室温常压的干燥环境中进行 CFRP 弹簧的制备。CF 丝与 CF 布同时浸润复配树脂 10 min, 充分浸润后将 CF 丝合拢为一束, 两端 (A, B 端) 扎紧并施加一定拉力, 保证 CF 丝束呈紧绷状态后将两端固定, 并在 A 端固定牵引线, 此即弹簧芯棒未包布状态, 如图 2 所示 (样品编号为 T1)。CF 丝束固定后立即进行单层 CF 布的包裹工艺。CF 布包裹工艺如图 2 所示 (样品编号为 T2~T4)。其中 T2 为 45° 包布强化, T3 为 60° 包布强化, T4 为 90° 包布强化, 角度为 CF 布与簧丝轴线的夹角。CF 布按需求裁剪后呈矩形长条状, 首端在 CF 丝束 A 端扎紧固定, 按工艺角度包裹至 CF 丝束 B 端后扎紧固定。包裹过程中 CF 布要保持适当的拉力和包裹速度。包裹完成后, 解除 A, B 端固定, 使用牵引线, 将弹簧芯棒拉进准备好的硅胶软管中。该过程中需对硅胶管外壁施加一定的压力, 以避免拉挤过程中混入空气。拉挤完成后将硅胶软管置入弹簧模具。对模具施加一定压力保证模具处于合并状态, 室温固化 8 h 后脱模成型。采用刚性模具模压成型, 以保证各工艺弹簧的尺寸保持一致, 避免尺寸误差对实验的影响, 簧丝直径误差不超过 0.5 mm。成型后 CFRP 弹簧参数如下: 弹簧中径 $D=70$ mm, 簧丝直径 $d=10$ mm, 有效圈数 $n=3.4$ 圈, CF 丝和 CF 布体积之和占总体积的 50%, 即 CF 的体积分数 $V_f=0.5$ 。

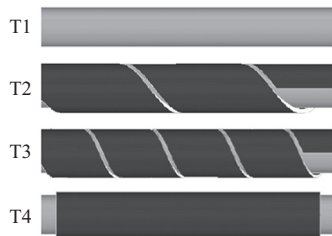


图2 CFRP 弹簧的裹布工艺

1.4 性能测试与表征

在相同的外部条件下, 使用万能试验机对 CFRP 弹簧进行静态压缩实验, 压缩速度选择为 5 mm/min。根据实验结果绘制各工艺所制备弹簧的压缩曲线。

CFRP 弹簧在压缩过程中开裂, 使用切割机将簧丝开裂部位切下以制备 SEM 试样。切取开裂部位时, 左右切口应距裂纹处 20 mm, 以避免切割工艺对开裂部位产生影响。切下的试样置于无水乙醇中超声波清洗 15 min, 干燥后进行喷金处理。使用

SEM 对裂纹部位进行观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 CFRP 弹簧静态压缩实验结果

纤维复合材料在小变形情况下,其载荷曲线是线性的。随着变形的增大,有效刚度随之减小,其载荷曲线呈非线性^[16]。不同工艺制备的 CFRP 弹簧的静态压缩实验结果如图 3 所示。

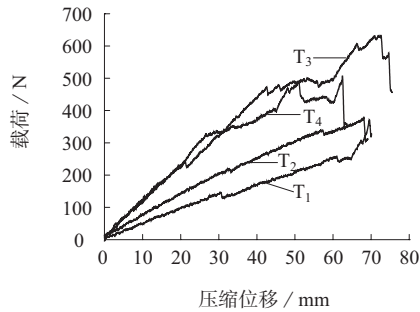


图3 不同工艺制备的CFRP弹簧的载荷-压缩位移曲线

从图3中可以观察到,T1,T2的曲线在压缩位移 $\lambda \leq 60$ mm时,曲线保持线性;而T3的曲线在压缩位移 $\lambda \geq 43$ mm,T4的曲线在压缩位移 $\lambda \geq 26$ mm后,其曲线呈非线性。根据弹簧刚度的计算公式:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta \lambda} = \frac{F_1 - F_0}{\lambda_1 - \lambda_0} \quad (1)$$

式中: k ——弹簧刚度;

ΔF ——载荷差值;

$\Delta \lambda$ ——位移差值;

F_0, F_1 ——根据计算所需选取的载荷值;

λ_0, λ_1 —— F_0, F_1 对应的压缩位移量。

在线性阶段,曲线的斜率即为弹簧的刚度。由图3可看出,T3,T4弹簧的刚度明显大于T1,T2弹簧。在实验过程中,弹簧内圈首先开裂并伴有脆响声,对应的即为曲线图中各曲线的转折处。其破坏形式为首先表层树脂基体开裂破坏,再纤维断裂,裂纹由簧丝表面向芯部扩展。此过程中弹簧的有效刚度降低,载荷曲线失去线性关系。实验过程中的脆响并非一声,而是随着压缩量的增加伴随多次脆响。说明弹簧并非一次性整体破坏,而是多次部分破坏。从图3还可看出,随着压缩量增大,未破坏部分与破坏部分共同承受载荷,载荷曲线下降后呈波动上升趋势。在压缩实验过程中,弹簧不断重复该过程,直至弹簧完全破坏失效。

弹簧在静态压缩实验中承受载荷 F 的情况下,压缩位移为 λ 。根据圆柱螺旋弹簧设计计算标准

GB/T 23935-2009 计算刚度,计算弹簧刚度时所选取的 λ_0, λ_1 应在压缩位移 λ 的20%~80%之间。结合实际实验结果,4种工艺制备的弹簧在压缩位移 $\lambda \leq 26$ mm时均处于曲线的线性阶段。选取各工艺制备的CFRP弹簧,取压缩位移 $\lambda_0=5$ mm至 $\lambda_1=25$ mm的线性阶段计算弹簧的刚度。根据式(1)计算,各工艺制备的CFRP弹簧的刚度列于表1。

表1 不同工艺制备的CFRP弹簧的实际刚度

项目	样品编号			
	T1	T2	T3	T4
实际刚度/ $(\times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$	4.45	8.59	10.16	11.78

由表1结果可以看出,不同角度的包布工艺均能提升CFRP弹簧的刚度,其中90°包裹工艺制备的CFRP弹簧(T4)的效果最佳,较未包裹强化CFRP弹簧(T1)的刚度提升了164.7%;其次为60°包裹工艺制备的CFRP弹簧(T3),其刚度提升了128.3%;而45°包裹工艺的CFRP弹簧(T2),其刚度只提升了93.0%。从实验结果可知,90°包裹为提升CFRP弹簧刚度的最优工艺。

2.2 CFRP 弹簧刚度理论验证及分析

对各向同性材料制成的均质实心圆截面的圆柱螺旋弹簧,其刚度的计算方法有两种。式(1)为根据实验结果计算弹簧的刚度,该算法在实际生产中应用广泛;第二种为根据弹簧材料本身的切变模量及弹簧尺寸来推算弹簧的刚度:

$$k = \frac{G_T d^4}{8nD^3} \quad (2)$$

式中: G_T ——制备弹簧所用复合材料的切变模量;

d ——簧丝的直径;

D ——弹簧的中径;

n ——弹簧的有效圈数。

不同于传统的金属材料,复合材料因增强相同基体之间的力学性能差异很大,需经过推导计算才能得出复合材料整体的切变模量 G 。其中树脂基体的切变模量 G_m ,CF布和丝的切变模量 G_f 可以通过经典公式进行计算^[17]

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \mu_m)} \quad (3)$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \mu_f)} \quad (4)$$

式中: E_m ——树脂基体的弹性模量;

E_f ——CF丝和CF布的弹性模量;

μ_m ——树脂基体的泊松比;

μ_f ——CF丝和布的泊松比。

当 CF 丝和树脂基体形成 CFRP 复合材料并通过 CF 布包裹工艺加强后,复合材料的切变模量 G_T 需做进一步的计算。

无包布簧丝(T1) 可视为单向纤维增强的复合材料,对于其切变模量 G_1 采用 J. C. Halpin-S. W. Tsai 经验公式^[18-24] 进行计算:

$$G_1 = G_m \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (5)$$

$$\text{其中: } \eta = \frac{\frac{G_f}{G_m} - 1}{\frac{G_f}{G_m} + \xi}$$

式中: V_f ——CF 的体积分数;

ξ ——纤维增强效果的度量参数,根据材料的宽厚比进行计算。本实验中簧丝为圆柱体,因此取 $\xi=1$ ^[18];

η ——计算参数。

CF 布包层弹簧(T2~T4) 可视为薄壁管,对于其切变模量 G_2 采用植村-山胁公式进行计算^[20]:

$$G_2 = (1 - C) \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} + C(G_f V_f + G_m V_m) \quad (6)$$

$$\text{其中: } C = 0.4V_f - 0.025$$

式中: V_m ——树脂基体的体积分数;

C ——接触系数^[25]。

当 CF 布与簧丝轴线呈 θ 角时,CF 布实际受力为与弹簧截面剪切应力 τ 呈 θ 角的分力,即 CF 布包层的实际切变模量 G_θ 近似计算为:

$$G_\theta = G_2 \sin \theta \quad (7)$$

将 CF 与树脂基体参数带入式(5)~式(7)中,可得计算结果为: $G_1=4.82$ GPa, $G_{45^\circ}=6.34$ GPa, $G_{60^\circ}=7.76$ GPa, $G_{90^\circ}=8.96$ GPa。

CF 布增强 CFRP 弹簧的切变模量 G_T 为:

$$G_T = G_1 + G_\theta \quad (8)$$

将上述结果带入式(8)即可得到各工艺制备的 CFRP 弹簧的切变模量: $G_{T1}=4.82$ GPa; $G_{T2}=11.16$ GPa; $G_{T3}=12.58$ GPa; $G_{T4}=13.78$ GPa。根据公式(2)计算出弹簧的理论刚度见表 2。

表 2 不同工艺制备的 CFRP 弹簧的理论刚度

项目	样品编号			
	T1	T2	T3	T4
理论刚度 / ($\times 10^3$ N·m ⁻¹)	4.49	10.14	11.73	12.85

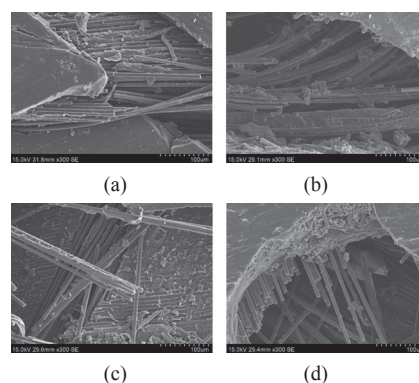
由表 2 可知,同表 1 实验结果相比较,弹簧刚度的理论计算值均偏大,误差列于表 3。其中 T1

刚度的实验结果和理论分析值最为接近,误差仅为 0.9%,其次为 T4,误差为 8.3%,其余两种工艺制备的弹簧误差较大,均超过了 10%。误差的主要来源是在进行拉挤工艺时,CF 布的包裹方向发生了改变。

表 3 CFRP 弹簧刚度理论计算值与实验结果误差

样品编号	实际刚度 / ($\times 10^3$ N·m ⁻¹)	理论刚度 / ($\times 10^3$ N·m ⁻¹)	误差 / %
T1	4.45	4.49	0.9%
T2	8.59	10.14	15.3%
T3	10.16	11.73	13.4%
T4	11.78	12.85	8.3%

图 4 为不同工艺制备的 CFRP 弹簧在静态压缩实验后的微观断口 SEM 形貌。试样均为水平放置拍摄,即图片水平方向为簧丝轴线方向。规定图中水平方向为 0°,水平轴上方为正角度,下方为负角度。从图 4 可清晰观察到簧丝表层纤维的走向,T1 试样中的 CF 丝大部分为水平走向;T2 试样中有小部分与轴线呈 43.0° 的 CF 布和更少量的与轴线呈 -46.1° 的 CF 布,但是大部分的 CF 布与轴线夹角只有 16°。T3 试样中有部分与轴线呈 60.2° 的 CF 布和与同轴线呈 -26.2° 的 CF 布,但是在底部有部分 CF 布与轴线夹角只有 8°。T4 试样中主要有与轴线呈 -70.1° 的 CF 布和少量与轴线呈 47.8° 的 CF 布。



样品: a—T1; b—T2; c—T3; d—T4

图 4 不同工艺制备的 CFRP 弹簧的微观形貌

从图 4 各断口的 CF 布形貌可以看出,拉挤工艺对丝线排布方向有明显影响。T1 的 CF 布整体取向保持同轴线一致,同理论模型十分贴合,故误差极小。在 T2, T3 试样中 CF 布的偏斜较为明显,导致实验结果同理论计算结果出现较大的误差。T4 的大部分 CF 丝的方向同轴线 90° 角偏差不大,故实验结果同理论计算结果误差较小。

3 结论

(1) CF 布包裹 CFRP 弹簧工艺可以有效地提

升弹簧的刚度。未包裹强化 CFRP 弹簧 (T1) 的刚度为 $4.45 \times 10^3 \text{ N/m}$; CF 布 90° 包裹 CFRP 弹簧 (T4) 的刚度为 $11.78 \times 10^3 \text{ N/m}$, 较未包裹强 CFRP 弹簧 (T1) 的刚度提升了 164.7%。

(2) 经过理论计算验证, 未包裹强化 CFRP 弹簧 (T1) 的刚度同 J. C. Halpin-S. W. Tsai 经验公式计算结果的误差极小, 而包布强化所提升的 CFRP 弹簧刚度同植村-山胁公式则有不同的误差, 在接近 90° 理想模型的情况下, T4 的误差较小, 为 8.3%; 而 T2 的 45° 包裹工艺和 T3 的 60° 包裹工艺的误差较大, 均超过 10%。

(3) CF 布包层的角度对 CFRP 弹簧刚度的影响很大。在包布强化拉挤进入模具后, CF 布按照设计角度固化成型是获得理想刚度弹簧的关键技术。

参考文献

- [1] 王明建, 夏申琳, 潘恒沛. 汽车轻量化技术现状及展望 [J]. 汽车工艺师, 2016 (7): 56-59.
Wang Mingjian, Xia Shenlin, Pan Hengpei. Research status and prospect of automotive lightweight [J]. Auto Manufacturing Engineer, 2016 (7): 56-59.
- [2] 王俊峰, 马祥林, 张兴龙, 等. 碳纤维在汽车轻量化中的应用 [J]. 新材料产业, 2015 (2): 20-22.
Wang Junfeng, Ma Xianglin, Zhang Xinglong, et al. Application of carbon fiber in automotive lightweight [J]. Advanced Materials Industry, 2015 (2): 20-22.
- [3] 刘万双, 魏毅, 余木火. 汽车轻量化用碳纤维复合材料国内外应用现状 [J]. 纺织导报, 2016 (5): 48-52.
Liu Wanshuang, Wei Yi, Yu Muhuo. Current Situations of carbon fiber reinforced composites used for lightweighting of automobile at home and abroad [J]. China Textile Leader, 2016 (5): 48-52.
- [4] 赵艳荣, 胡平, 梁继才, 等. 碳纤维复合材料在汽车工业中的应用 [J]. 合成树脂及塑料, 2015 (5): 95-98.
Zhao Yanrong, Hu Ping, Liang Jicai, et al. Application of carbon fiber composites in automobile industry [J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2015 (5): 95-98.
- [5] 张方超, 杨建忠, 乔卉, 等. 碳纤维及其复合材料在汽车行业的应用及展望 [J]. 合成纤维, 2013 (6): 26-29.
Zhang Fangchao, Yang Jianzhong, Qiao Hui, et al. Application and Prospect of carbon fiber and its composites in automobile industry [J]. Synthetic Fiber in China, 2013 (6): 26-29.
- [6] 于今, 陈虹, 张婧, 等. 日本碳纤维复合材料在汽车领域应用的新进展 [J]. 高科技纤维与应用, 2013 (6): 49-54.
Yu Jin, Chen Hong, Zhang Jing, et al. New progress in the application of carbon fiber composites in the automotive field [J]. High Tech Fibers and Applications, 2013 (6): 49-54.
- [7] Manjunatha T S, Budan D A. Manufacturing and experimentation of composite helical springs for Automotive suspension [J]. International Journal of Mechanical Engineering & Robotics Research, 2012, 1 (2): 229-241.
- [8] Sancaktar E, Gowrishankar S. Apparent nonlinearities in mechanical behavior of epoxy based composite helical springs [C]// 2nd Canadian Conference on Nonlinear Solid Mechanics. Vancouver, Canada: Simon Fraser University, 2002: 1-13.
- [9] Budan D A, Manjunatha T S. Investigation on the feasibility of composite coil spring for automotive applications [J]. World Acad Sci Eng Technol, 2010, 4 (10): 1 035-1 039.
- [10] 隋刚, 范勇峥, 仲伟虹, 等. 复合材料圆柱螺旋弹簧的制造与实验研究 [J]. 复合材料学报, 2001, 18 (1): 46-49.
Sui Gang, Fan Yongzheng, Zhong Weihong, et al. Manufacture and experimental study of composite cylindrical helical spring [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001, 18 (1): 46-49.
- [11] Oh S H, Choi B L. Analytical and Experimental study for development of composite coil springs [J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 2014, 38 (1): 31-36.
- [12] 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册 [M]. 第 2 版 (精), 北京: 机械工业出版社, 2010: 280-322.
Zhang Yinghui, Liu Huihang, Wang Decheng. Spring Handbook [M]. Second Edition. Beijing: China Machine Press, 2010: 280-322.
- [13] Akroush N, Almahallawi T, Seif M, et al. CFRP shear strengthening of reinforced concrete beams in zones of combined shear and normal stresses [J]. Composite Structures, 2017, 162: 47-53.
- [14] Poul M K, Nateghi-Alahi F, Zhao X L. Experimental testing on CFRP strengthened thin steel plates under shear loading [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 109: 217-226.
- [15] Colotti V. Mechanical shear strength model for reinforced concrete beams strengthened with FRP materials [J]. Construction & Building Materials, 2016, 124: 855-865.
- [16] 杨庆生, 刘夏, 刘健. 大变形条件下纤维增强复合材料的有效性 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010 (12): 1 521-1 531.
Yang Qingsheng, Liu Xia, Liu Jian. Effective Properties of fiber-reinforced composites under large deformation [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2010 (12): 1 521-1 531.
- [17] 黄小清, 陆丽芳, 何庭蕙. 材料力学 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2007: 73-74.
Huang Xiaoqing, Lu Lifang, He Tinghui. Mechanics of materials [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2007: 73-74.
- [18] Halpin J C. Effects of environmental factors on composite materials [R]. Oh: Air Force Materials Lab, 1969: 1-53.
- [19] 王耀先. 单向复合材料弹性模量预测新式 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 1995 (4): 26-31.

- ondary ejection release mechanism with built-in type needle side core-pulling and it's injection mould[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3):79-83.
- [2] 何柏海,何骏. 一种带推管侧顶脱模机构的注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):92-95.
- He Baihai, He Jun. Design of injection mould with pushing tube side ejection demoulding mechanism[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):92-95.
- [3] 张建卿. 洗涤剂屏蔽盖双滑动三次抽芯注塑模脱模机构设计[J]. 塑料科技, 2016, 44(1):87-89.
- Zhang Jianqing. Demoulding mechanism design for the injection molding of washing machine shield cover with thrice slide-drawing and double T-grooves[J]. Plastics Science and Technology, 2016, 44(1):87-89.
- [4] 王胜利. 带内侧凸体塑件三板注射模双脱模机构设计[J]. 模具制造, 2014(2):46-48.
- Wang Shengli. Design of three plate injection mold for plastic part with internal concave and with double mold mechanism[J]. Die & Mould Manufacture, 2014(2):46-48.
- [5] 池现荣,王宏斌. 斜推管脱模机构设计[J]. 模具技术, 2008(3):18-20.
- Chi Xianrong, Wang Hongbin. Design of a demolding device with slanting push tube[J]. Die and Mould Technology, 2008(3):18-20.
- [6] 李振宇. 多种抽芯机构脱模的护帽注塑模设计[J]. 塑料科技, 2015, 43(11):82-86.
- Li Zhenyu. Design of injection mould for protective cap with various pulling core demoulding mechanism[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(11):82-86.
- [7] 杨安,肖国华,韩立艳,等. 汽车油封盖内螺纹脱模机构及注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4):68-72.
- Yang An, Xiao Guohua, Han Liyan, et al. Design of Car Oil Seal Cover Internal Thread Demoulding Mechanism and Injection Mould[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4):68-72.
- [8] 周铭杰. 滑块设置推出机构的注塑模设计[J]. 中国塑料, 2013, 27(5):100-103.
- Zhou Mingjie. Design of injection moulds with ejection mechanism set in slider block[J]. China Plastics, 2013, 27(5):100-103.
- [9] 杜小清,陶筱梅. 带二次脱模机构的注射模设计[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(12):72-74.
- Du Xiaoqing, Tao Xiaomei. Design of injection mould with the mechanism of secondary ejection[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(12):72-74.
- [10] 黄桂坚,伍晓宇,梁雄,等. 抽芯滑块内嵌防粘模机构的注射模设计[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(5):64-67.
- Huang Guijian, Wu Xiaoyu, Liang Xiong, et al. Design of injection mould with mechanism set inside core-pulling slide preventing plastic parts from adhering to mould[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(5):64-67.
- [11] 海争平,杨志红. 电机轴承半圆盒状顶盖翻转式顶出脱模机构设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(7):84-88.
- Hai Zhengping, Yang Zhihong. Design of rotary demoulding mechanism for motor bearing semicircle box-shaped cover[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(7):84-88.
- [12] 韩宝菊. 强力电锤仿生手柄注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(5):60-64.
- Han Baoju. Injection mould design of strong hammer boionic-handle[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(5):60-64.
- [13] 杨安,肖国华,肖钟理,等. 淋浴喷头手柄旋转式抽芯脱模机构及注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(7):89-93.
- Yang An, Xiao Guohua, Xiao Zhongli, et al. Design for rotary core pulling demoulding mechanism and injection mould of shower spray handle[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(7):89-93.
- [14] 杨少增,李国富,刘剑,等. 多段位圆弧状导流管抽芯机构设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(1):85-87.
- Yang Shaozeng, Li Guofu, Liu Jian, et al. Design of pulling mechanism for multi-arc-shaped guide tube[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(1):85-87.

(上接第56页)

- Wang Yaodian. New Prediction of modulus of elasticity for unidirectional composites[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composite, 1995(4):26-31.
- [20] 周祝林,甄华生. 高模量碳纤维复合材料平板及管子性能分析[J]. 玻璃钢, 1997(3):1-9.
- Zhou Zhulin, Zhen Huasheng. Analysis of FRP high modulus carbon fiber composite plate and pipe performance[J]. Fiber Reinforced Plastics, 1997(3):1-9.
- [21] 孙炳君,王俊,迟蕾. 碳纤维复合材料面内剪切性能试验研究[J]. 材料导报, 2008(S3):187-189.
- Sun Bingjun, Wang Jun, Chi Lei. Research of Test for in-plane shear response of carbon fiber reinforced composites[J]. Materials Review, 2008 (S3):187-189.
- [22] Roy A K, Tsai S W. Three-dimensional effective moduli of orthotropic and symmetric laminates[J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59(1):39-47.
- [23] Al-Khalil M F S, Soden P D. Theoretical through-thickness elastic constants for filament-wound tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1994, 36(1):49-62.
- [24] 金达锋,熊志远,杨永宝. 复合材料圆柱螺旋弹簧的刚度分析[J]. 汽车工程, 2013, 35(8):755-758.
- Jin Dafeng, Xiong Zhiyuan, Yang Yongbao. Stiffness and strength analysis of composite cylindrical helical spring[J]. Automotive Engineering, 2013, 35 (8):755-758.
- [25] 孙淮松,崔文勇. 斜交轮胎三维有限元模型的建立及充气轮胎的有限元分析[D]. 北京:北京化工大学, 2001.
- Sun Huaisong, Cui Wenyong. The 3-d finite element model of bias tire and the finite analysis of aerated tire[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2001.