

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.12.017

多向 GF/CF 混杂复合材料拉压力学性能研究

徐欢欢,李晨,古兴瑾

(南京航空航天大学航空宇航学院,南京 210016)

摘要:采用工程上常用的铺层角度,设计 7 组不同的铺层方式,通过拉伸与压缩实验研究了多向玻璃纤维 (GF)/碳纤维 (CF) 混杂复合材料的拉伸和压缩性能,得到了拉伸与压缩过程中力-位移曲线图及相应的破坏形貌。提出了铺层角度混杂比 (CF 相对体积分数) 的概念,研究了不同铺层角度的混杂比对复合材料拉伸和压缩性能的影响。结果表明,多向纤维混杂复合材料的拉伸与压缩性能与总混杂比无明显关系,而与不同铺层角度各自的混杂比有关。其中,0° 铺层混杂比对其影响最大,90° 铺层混杂比影响最小,±45° 铺层混杂比的影响介于两者之间。当 0° 铺层混杂比为 100% 时,复合材料的拉伸与压缩性能最高,拉伸破坏表现为一次破坏,破坏时层间分离的程度最低;当 0° 铺层混杂比低于 100% 时,复合材料的拉伸破坏表现为二次破坏。复合材料的压缩破坏大多表现为一次破坏,且在破坏时 GF 的破坏大多表现为“屈曲失稳”的形式,从而减缓了 CF 的脆性断裂程度。

关键词:多向混杂复合材料;混杂比;铺层角度;拉伸;压缩

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)12-0075-05

Tensile and Compression Properties of Multi-directional Carbon / Glass Fiber Hybrid Composite

Xu Huanhuan, Li Chen, Gu Xingjin

(College Of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : Seven group lay-up means were designed using common lay-up angle in in engineering and the tensile and compression properties of multi-directional hybrid composites reinforced by glass fiber (GF) and carbon fiber (CF) were gained, the force-displacement curves and corresponding damage morphology were got by experimental research. A conception of lay-up angle hybrid ratio (the relative volume fraction of CF) was proposed and the influences of different lay-up angle hybrid ratio on the tensile elastic modulus, tensile strength, compression elastic modulus and compression strength of the composites were also studied. The results show that the tensile and compression properties of the composites have little relation with the total hybrid ratio, but are related to the angle hybrid ratio. Among which, the 0° hybrid ratio affects the properties the most while 90° hybrid ratio the least, 45° hybrid ratio is between both. When the 0° hybrid ratio reaches 100%, both the tensile and compression properties of the composites show the best, it's fracture mode is disposable damage and delamination is not the most obvious. When the 0° hybrid ratio is lower than 100%, the tensile failure mode turns out to be a secondary damage. Most of the compression failure modes are disposable damage. The fracture of most GF is buckling so that the brittle fracture of CF is slowed down.

Keywords : multi-directional hybrid composite ; hybrid ratio ; lay-up angle ; tension ; compression

纤维混杂复合材料综合了两种纤维各自的优点,与单一纤维复合材料相比,有更加良好的综合力学性能。自纤维混杂复合材料问世以来,就有众多的国内外学者对其力学性能进行了研究^[1-6]。大多数的研究都是针对单向铺层的混杂纤维复合材料进行的,而在实际工程应用中,纤维的铺层角度不可能只有一种,而是由多种角度铺设而成。因此需要在单向铺层的基础上进行进一步的研究。

目前研究多向纤维混杂复合材料的文献较少,仅在 20 世纪 90 年代有一些文献对多向纤维混杂复合材料的拉伸、压缩性能进行过研究^[7-9]。由于多向

纤维混杂复合材料的结构本身就比较比单向纤维混杂复合材料复杂,加之界面等因素的影响,使得对其基本力学性能的研究更加困难。综合来看,目前多向混杂复合材料的研究还不是很成熟,并没有形成一个完整的体系。

笔者从实验出发,采用工程上常用的铺层角度,设计了 7 组不同角度的铺层方式,研究了不同铺层角度混杂比及混杂方式等因素对多向纤维混杂复

联系人:李晨,工学博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为结构强度与完整性评估

收稿日期:2014-10-10

合材料的拉伸与压缩性能的影响,为后续的研究提供了一定的实验依据。

1 实验部分

1.1 原材料及铺层方式

本实验的试样由玻璃纤维 (GF) 和碳纤维 (CF) 增强树脂基复合材料的单层板铺设而成。试样按照 ASTM D 5687-95(02) 标准要求加工。其中基体树脂均为北京航空材料研究院的牌号为 5528A 的氰酸酯树脂,两种增强纤维分别采用菲利华石英玻璃有限公司的牌号为 QF210 的 GF 以及日本东丽公司的 T700 CF,两种单层板所用材料的基本性能如表 1 所示。

表 1 单层板所用材料基本性能

材 料	5528A/QF210	5528A/T700
纤维面密度/(g·m ⁻²)	130±5	132±4
树脂质量分数/%	32±3	33±2
单层厚度/mm	0.11	0.125
拉伸弹性模量/GPa	41.8	127
拉伸强度/MPa	1354	1420

采用工程上常用的铺层角,设计了 7 组不同角度铺层的多向 GF/CF 混杂复合材料层合板,如表 2 所示。表 2 中除 P01 组外,其它各组中不同角度铺层的层数均相同,仅混杂比和界面数发生变化;P01 组仅作为破坏模式的对照组,GF 铺层数与其它组不一致,不参与力学性能讨论。从 P02~P07 组分别取 6 件试样进行拉伸和压缩实验。其中拉伸试样尺寸为 250 mm×25 mm,压缩试样尺寸为 140 mm×12 mm。

表 2 铺层方式

组号	铺层顺序	界面数	备注
P01	[0 _C /45 _C /90 _C /-45 _C /(0 _G /45 _G) ₂ /0 _G] _S	2	夹芯混杂
P02	(0 _C /45 _C /-45 _C /90 _C /0 _G /45 _G /-45 _G /90 _G) _S	2	夹芯混杂
P03	(45 _C /0 _C /-45 _G /90 _G /0 _C /45 _G /-45 _C /90 _G) _S	10	层间混杂
P04	(45 _C /0 _C /90 _C /-45 _C /0 _C /90 _C /45 _G /-45 _G) _S	2	夹芯混杂
P05	(45 _C /0 _C /-45 _G /90 _G /0 _G /45 _C /-45 _C /90 _G) _S	6	层间混杂
P06	(45 _C /-45 _C /45 _C /-45 _C /0 _G /90 _G /0 _G /90 _G) _S	2	夹芯混杂
P07	(0 _C /45 _G /-45 _G /90 _C /0 _G /45 _G /-45 _G /90 _G) _S	6	层间混杂

注:表中下标 C 表示为 CF,下标 G 表示为 GF,下标 S 表示对称铺层。

1.2 实验仪器及实验方法

拉伸与压缩实验采用的仪器分别为 MTS 工业系统(中国)有限公司的 CMT5504 型微机控制电子万能实验机和江苏东华测试技术有限公司的 DH3818 型静态应变测试系统。拉伸与压缩实验分别按标准 ASTM D3039/D3039M-2000 和 ASTM D6641/D 641M-2001 进行,实验环境均为室温干态环境。加载过程采用位移控制加载,加载速率为 2 mm/min。

2 结果与分析

2.1 不同铺层方式下的拉伸与压缩性能分析

P02~P07 组在不同铺层方式下相应试样的拉伸与压缩性能结果见表 3。

表 3 P02~P07 组在不同铺层方式下相应试样的拉伸与压缩性能

组号	总混杂比/%	拉伸弹性模量/GPa	拉伸强度/MPa	压缩弹性模量/GPa	压缩强度/MPa
P02	53.2	31.75	541.43	27.93	396.52
P03	53.2	44.08	879.26	40.03	576.09
P04	77.3	42.64	838.63	39.03	544.12
P05	53.2	34.02	645.89	30.81	475.01
P06	53.2	19.17	559.99	21.14	414.40
P07	27.5	24.32	487.72	28.57	405.85

注:混杂比是指试样铺层中 CF 相对体积分数,下同。

由表 3 可知,6 组铺层方式下试样的拉伸弹性模量和压缩弹性模量均有较大差别,都在 8% 以上,P02, P06 和 P07 组均超过 10%, P07 组达到 17% 左右。另外,各组对应的拉伸强度和压缩强度也均有很大差别,均超过 16%,最大达到 35% 左右。由此可知,多向纤维混杂复合材料层压板的拉伸与压缩性能相比有较大差异。另外,对比可知, P02, P03, P05 和 P06 这 4 组铺层有相同的总混杂比,但相应试样力学性能指标却差异很大。由此可见,对多向纤维混杂复合材料而言,总混杂比与拉伸性能和压缩性能没有明显的联系,这是由于存在多种铺层角度所致。因此将在下面的论述中分别考虑不同铺层角度下混杂比的影响。

表 4 给出了 P03 和 P04 组在不同角度铺层方式下相应试样的混杂比和拉伸、压缩性能。

表 4 P03, P04 组在不同角度铺层方式下相应试样的

混杂比和拉伸、压缩性能

项 目	P03	P04
V_0 /%	100	100
V_{45} /%	53.19	53.19
V_{-45} /%	53.19	53.19
V_{90} /%	0	100
拉伸弹性模量/GPa	44.08	42.64
拉伸强度/MPa	879.26	838.63
压缩弹性模量/GPa	40.03	39.03
压缩强度/MPa	576.09	544.12

注: V_0 是指所有 0° 铺层下的混杂比, V_{45} , V_{-45} , V_{90} 等依次类推,下同。

由表 4 可知, P03 组和 P04 组的四种混杂比中仅 90° 铺层的混杂比不同, P04 组的 90° 铺层中的纤维全为 CF, 而 P03 组的全为 GF, 但两组对应试样的各项力学性能指标均比较接近,说明 90° 铺层混杂比对试样拉伸和压缩性能影响均较小。

表 5 给出了 P02, P03, P05, P06 和 P07 组在 0° 及 ±45° 铺层方式下相应试样的混杂比和拉伸、压

缩性能。

表 5 P02, P03, P05, P06 和 P07 组在 0° 及 $\pm 45^\circ$ 铺层方式下试样的混杂比和拉伸、压缩性能

项 目	P02	P03	P05	P06	P07
$V_0 / \%$	53.19	100	53.19	0	53.19
$V_{45} / \%$	53.19	53.19	100	100	0
$V_{-45} / \%$	53.19	53.19	53.19	100	0
拉伸弹性模量 / GPa	31.75	44.08	34.02	19.17	24.32
拉伸强度 / MPa	541.43	879.26	645.89	559.99	487.72
压缩弹性模量 / GPa	27.93	40.03	30.81	21.14	28.57
压缩强度 / MPa	396.52	576.09	475.01	414.40	405.85

由表 5 中 P02 和 P03 组的对比不难发现, 0° 铺层混杂比越大, 试样的拉伸和压缩性能越好, 远远大于其它组对应试样的模量值和强度值; P02 组与 P05 组各项混杂比中仅 45° 铺层混杂比不同, 但试样模量差别均小于 10%, 强度差别均在 16% 左右, 说明 45° 铺层混杂比对模量影响较小, 但对强度影响较大。此外, P02 组和 P07 组的 0° 铺层混杂比相同, 而 $\pm 45^\circ$ 铺层混杂比不同, 但试样的拉伸性能相差较大, 而压缩性能相差较小。这说明 $\pm 45^\circ$ 铺层的混杂比对拉伸性能有较大影响, 而对压缩性能影响较小。综合考虑 P02 组、P05 组和 P07 组可知, $\pm 45^\circ$ 铺层混杂比对压缩弹性模量影响最小, 对拉伸弹性模量的影响次之, 对拉伸和压缩强度的影响较大。

0° 铺层的混杂比是影响多向纤维混杂复合材料模量的重要因素。表 6 为不同 0° 铺层混杂比下复合材料试样的拉伸与压缩性能。

表 6 不同 0° 铺层混杂比下试样的拉伸与压缩性能

组号	$V_0 / \%$	拉伸弹性模量 / GPa	拉伸强度 / MPa	压缩弹性模量 / GPa	压缩强度 / MPa
P03	100	44.08	879.26	40.03	576.09
P04	100	42.64	838.63	39.03	544.12
P02	53.19	31.75	541.43	27.93	396.52
P05	53.19	34.02	645.89	30.81	475.01
P07	53.19	24.32	487.72	28.57	405.85
P06	0	19.17	559.99	21.14	414.40

由表 6 可以看出, 当 0° 铺层混杂比为 100% 时, 复合材料的拉伸与压缩性能最高; 随着 0° 铺层混杂比降低, 试样的拉伸与压缩弹性模量总体上降低; 随着 0° 铺层混杂比由 100% 下降到 53.19%, 拉伸与压缩强度也大幅下降; 但是, 当 0° 铺层混杂比为 53.19% 和 0% 时, 拉伸与压缩强度的变化比较复杂, 例如 P06 组的 0° 铺层混杂比为 0%, 其对应试样的拉伸与压缩强度不是最小, 这可能是因为当 0° 铺层混杂比较低时, $\pm 45^\circ$ 铺层的影响变得显著, 从而使拉伸与压缩强度的变化比较复杂。另外, 对比 P02 组和 P03 组、P05 组和 P06 组可知, 即使总混杂比保

持不变, 0° 铺层混杂比的变化也会导致试样拉伸与压缩弹性模量发生显著变化。这表明, 在总混杂比保持不变的情况下, 提高 0° 铺层混杂比可大幅提高多向纤维混杂复合材料的拉伸与压缩弹性模量, 此结论与文献 [9] 中的结论基本相同。

2.2 不同铺层方式下的拉伸与压缩力 - 位移曲线

P01~P07 组对应的试样的拉伸力 - 位移曲线如图 1 所示。

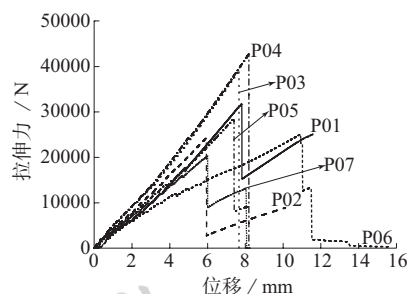


图 1 P01~P07 组对应的试样的拉伸力 - 位移曲线

从图 1 可以看出, 多向纤维混杂复合材料的拉伸存在二次破坏的情况, 并且其非线性并不明显, 此结果与张大兴等^[9]的研究有所不同。其中, P03 组和 P04 组对应的试样表现为一次破坏, 其它铺层形式均表现为二次破坏。对于单向纤维混杂复合材料, 发生二次破坏的条件与混杂比有关, 当 CF 相对含量低于临界混杂比时, 材料发生二次破坏, 高于临界混杂比时, 发生一次破坏^[10]。而对于多向纤维混杂复合材料而言, 似乎发生二次破坏的情况与 0° 方向的 CF 含量有关。对于 0° 方向 CF 体积分数为 100% 的铺层 (P03 组和 P04 组), 其试样发生一次破坏, 0° 方向 CF 含量较低的铺层, 其试样发生二次破坏。

P01~P07 对应的试样的压缩力 - 位移曲线如图 2 所示。

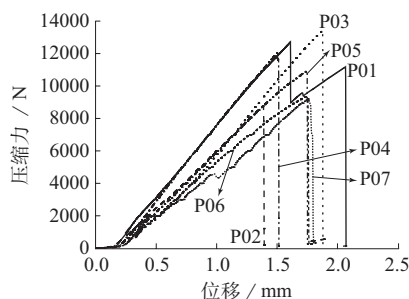


图 2 P01~P07 组对应的试样的压缩力 - 位移曲线

由图 2 可以看出, 除 P01 组所对应的试样为二次破坏外, 其它铺层均为一次破坏。由于 P01 组 GF 铺层的层数比其它铺层多, 故由此可以推测, GF 铺层数过多有可能使多向纤维混杂复合材料的压缩

实验出现二次破坏现象。

2.3 宏观破坏形貌观察

多向纤维混杂复合材料拉伸试样的宏观破坏形貌如图3所示。

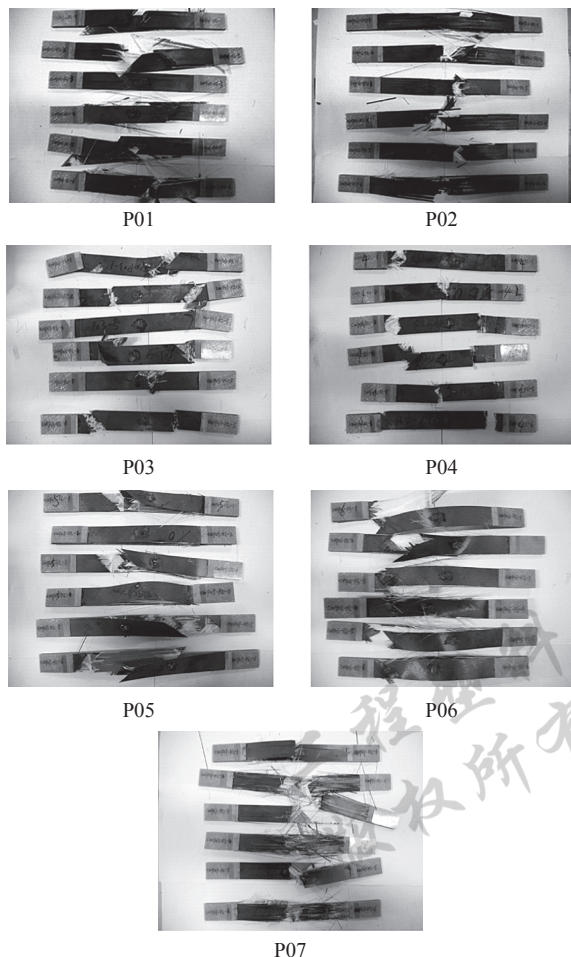


图3 多向纤维混杂复合材料拉伸试样的宏观破坏形貌

由图3可以看出,多向纤维混杂复合材料的拉伸破坏呈明显的脆性断裂形式。其中,P01组对应试样的断口大多呈约 45° ,并且出现了铺层从试样中脱落的现象,这说明GF铺层数如果过多有可能导致纤维混杂复合材料在受到拉伸作用时出现层间脱落的现象;P03组和P04组 0° 铺层中的纤维均为CF,对应的试样大多有两个断口,且除一些断口呈现约 45° 外,其它断口基本垂直于拉伸方向,且试样破坏时层间分离的程度较低。

P02, P05和P07组 0° 铺层中CF相对体积分数为53.19%,因此它们对应的试样破坏形貌大多呈层间分离的形式。其中P02组和P07组对应试样最外层为 0° 铺层的CF,两者的外层均出现了CF“劈裂”的形式,并且破坏方向基本垂直于拉伸方向;而P05组对应试样最外层均为 45° 铺层CF,

破坏也是沿着约 45° 方向发生。

P06组 0° 铺层中没有CF,因此其对应试样在拉伸破坏过程中的层间分离程度最大。另外,尽管P06组的 0° 铺层混杂比(0%)低于P01组的 0° 铺层混杂比(27.47%),但其并未发生层间脱落现象,这说明即使提高了 0° 铺层混杂比,但若GF铺层数过多也可能产生层间脱落现象。

由此可见,多向纤维混杂复合材料的拉伸破坏形貌不仅与 0° 铺层混杂比有关,而且与最外层铺设角度有关, 0° 铺层混杂比越高的试样层间分离的程度越低,且最外层为 0° 铺层时,试样的破坏方向基本垂直于拉伸方向。

多向纤维混杂复合材料压缩试样宏观破坏形貌如图4所示。

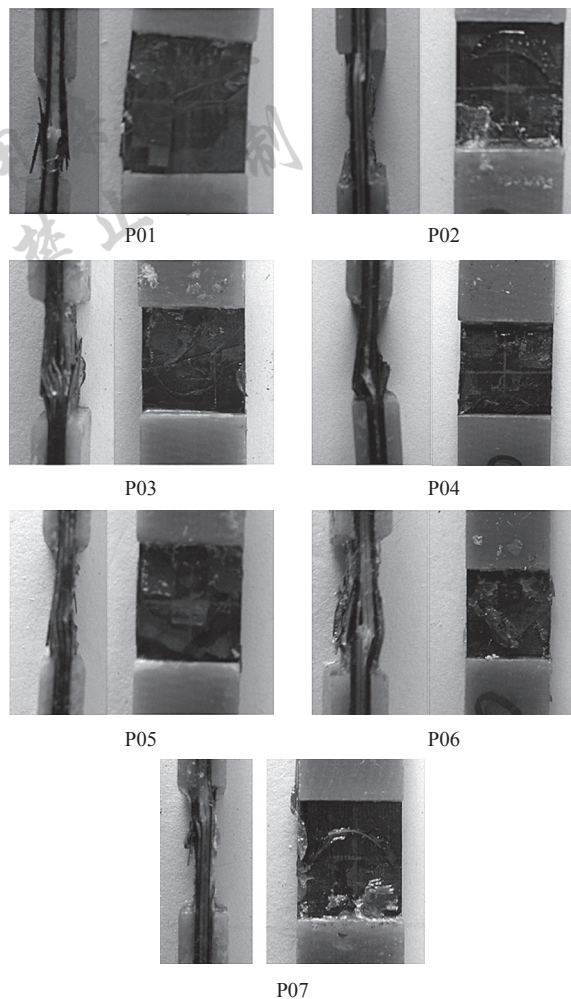


图4 多向纤维混杂复合材料压缩试样的宏观破坏形貌

由图4可以看出,除P01和P06组对应试样的CF呈现明显的脆性断裂外,其余试样中CF的脆性断裂程度较低。另外,P01和P06组对应试样中的GF也呈现明显的脆性断裂,P06组对应试样还出

现了分层现象,而 P02~P05 及 P07 组对应的试样中 GF 大多呈现“屈曲失稳”破坏,破坏发生后,GF 主要发生了屈曲变形。一般来说,GF 的韧性相对 CF 较好,上述现象说明在纤维混杂复合材料的压缩过程中,GF 依靠自己的“屈曲”变形可减缓 CF 的脆性断裂程度,但 GF 铺层数过多或 0° 铺层混杂比过低可能会使 GF 发生脆性断裂,从而使 CF 也发生脆性断裂。

另外,当混杂形式为层间混杂(如 P03 组和 P05 组)时,复合材料的界面数更多,上述 GF 减缓 CF 脆性断裂的效果更明显,因此在 P03 组和 P05 组对应的试样中,甚至能够观察到 CF 发生了一定的“屈曲”现象。

3 结论

(1) 多向 CF/GF 纤维混杂复合材料的拉伸与压缩性能与其总混杂比无明显关系,而与不同铺层角度的混杂比有关。其中,0° 铺层混杂比对其影响最大,90° 铺层混杂比影响最小,±45° 铺层混杂比的影响介于两者之间。当 0° 铺层混杂比为 100% 时,复合材料的拉伸与压缩性能最高。

(2) 当 0° 铺层混杂比为 100% 时,多向纤维混杂复合材料的拉伸实验仅存在一次破坏的现象,而当 0° 铺层混杂比低于 100% 时,复合材料的拉伸实验表现为二次破坏。复合材料压缩破坏大多为一次破坏,GF 铺层数过多有可能使压缩实验出现二次破坏现象。

(3) 多向纤维混杂复合材料的拉伸破坏形貌与 0° 铺层混杂比有关,0° 铺层混杂比越高,破坏时层间分离的程度越低;复合材料在压缩破坏时 GF 的破坏大多表现为“屈曲失稳”的形式,从而减缓了 CF 的脆性断裂程度。

参考文献

- [1] Manders P W, Bader M G. The strength of hybrid glass / carbon fiber composites[J]. Journal of Materials Science, 1981, 16: 2233-2245.
- [2] Zhang Yongli, Li Yan, Ma Hao, et al. Tensile and interfacial

properties of unidirectional flax / glass fiber reinforced hybrid composites[J]. Composites Science and Technology, 2013, 88: 172-177.

- [3] Ramesh M, Palanikumar K, Hemachandra Reddy K. Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 48: 1-9.
- [4] 张普, 朱虹, 孟少平, 等. CFRP/BFRP 混杂效应试验研究和理论分析[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 103-112.
- Zhang Pu, Zhu Hong, Meng Shaoping, et al. Therotical analysis and test research on hybrid effect of CFRP / BFRP hybrid fiber[J]. Industrial Construction, 2011, 41(3): 103-112.
- [5] Dong C, Davies I J. Flexural and tensile moduli of unidirectional hybrid epoxy composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres[J]. Materials & Design, 2014, 54: 893-899.
- [6] 何小兵, 曹勇, 严波, 等. GFRP/CFRP 层间混杂纤维复合材料极限拉伸性能[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013(6): 1153-1156.
- He Xiaobing, Cao Yong, Yan Bo, et al. Ultimate tensile performance of interply hybrid GFRP / CFRP composite[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nature Sciences Edition, 2013(6): 1153-1156.
- [7] Khatri S C, Kocak M J. Thick-section AS4-graphite / E-glass / PPS hybrid composites: Part I. Tensile behavior[J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(2): 181-192.
- [8] 张佐光, 张晓宏, 梁志勇, 等. 多向混杂纤维复合材料压缩及弯曲行为[J]. 材料工程, 1995(11): 22-25.
- Zhang Zuoguang, Zhang Xiaohong, Liang Zhiyong, et al. Compressive and flexural behavior of multi-directional hybrid laminates[J]. Material Engineering, 1995(11): 22-25.
- [9] 张大兴, 张佐光. CF/GF 多向混杂纤维复合材料拉伸特性研究[J]. 新型炭材料, 1997, 12(2): 29-35.
- Zhang Daxing, Zhang Zuoguang. Tensile behavior of multi-directional hybrid laminates[J]. New Carbon Materials, 1997, 12(2): 29-35.
- [10] 周光明, 梁中全, 赵谦. C/G 层内混杂复合材料力学性能的实验研究[J]. 宇航材料工艺, 2004(5): 21-25.
- Zhou Guangming, Liang Zhongquan, Zhao Qian. Experiment research on mechanical properties of C / G interlaminar hybrid composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2004(5): 21-25.

三菱宣布开发出新型注塑机

在近日举办的 2014 年日本国际塑料机械展览会上,三菱重工塑料技术公司宣布开发出新型注塑机。该机器可在即将成型的瞬间添加玻璃纤维及碳纤维等纤维,能够以纤维长度较长的状态来成型。

据悉,要以纤维较长的状态进行注射成型,传统的做法是使用混入了较长纤维的树脂颗粒作为成型材料。而三菱重工塑料此次开发的注塑机则是使用没有添加强化纤维的树脂颗粒,在颗粒于注塑机内熔化的阶段,添加作为强化纤维

的纤维束,省去了制造长纤维颗粒的工序,大幅削减材料成本。

三菱重工塑料将在已有的注塑机“eM”系列中增加混入纤维的机构,并备独创形状的螺杆,推出新商品。利用新开发的注塑机制造的制品的强度与原来使用长纤维颗粒时相比,为同等或以上水平。采用的树脂为聚丙烯和聚酰胺,纤维可使用玻璃纤维和碳纤维,可用于汽车的后门内板、仪表板、油箱罩、翼子板及车顶等大型部件的成型。

该公司表示,此款注塑机将于近期上市。(雅式)