复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第28卷 第5期 10月 2011年
Vol. 28 No. 5 October 2011

文章编号：1000-3851(2011)05-0162-06

玄武岩纤维增强木塑复合材料的力学性能

关苏军[1]，万春风[2]，汪丽娜[1]，徐英莲[1]，陈锦祥*[2]
（1. 浙江理工大学 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室，杭州 310018；
2. 东南大学 城市工程科学技术研究院，土木工程学院，南京 210096）

摘 要： 研究了用短切玄武岩纤维(BF)增强木塑(WPC)复合材料(BF/WPC)体系中，BF的含量与BF/WPC力学性能之间的关系，定性探讨了纤维增强机制。结果表明，与WPC相比，除断裂伸长率有所下降之外，BF/WPC的拉伸强度、冲击强度、弯曲强度均有明显提高，且这些性能取得最大值时BF的质量分数分别为15%～30%、15%～25%、20%～30%，提高的幅度约为30%。提出了“弱端面”的定性假说，由此解释了BF/WPC各项强度指标与增强纤维含量之间存在着最大值现象的原因。

关键词： 木塑复合材料；玄武岩纤维；力学性能；弱端面；短纤维；复合材料

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Mechanical properties of basalt fiber reinforced wood-plastic composites

GUAN Sujun[1], WAN Chunfeng[2], WANG Lina[1], XU Yinglian[1], CHEN Jinxiang*[2]
(1. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology of Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. International Institute for Urban Systems Engineering & School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The relationship between the content of basalt fiber (BF) and the mechanical properties of basalt fiber reinforced wood plastic composites (BF/WPC) was studied. The reinforcement mechanism of the materials was also discussed. The results show that except a little decline of elongation, the tensile strength, impact strength and bending strength of BF/WPC are enhanced and the maximum of them increases about 30%, compared with pure WPC, when the content of BF is between 15%～30%, 15%～25% and 20%～30%, respectively. Therefore, a qualitative hypothesis that the end cross section of BF is the "weak link" is proposed, which could explain the maximum range between the strength index and the mass fraction of fiber.

Keywords: wood plastic composites; basalt fiber; mechanical properties; weak link; short fiber; composites

近年来，随着环保意识的提高和森林资源的日益减少，生态材料的研究开发已成为热门话题[1]。木塑复合材料(Wood plastic composites，WPC)以木纤维等植物纤维和热塑性塑料等为原料，经挤出、注塑、模压等成型方法制备而成[2-3]。它继承了木材原有的加工性能、纹理及色泽[4-5]，可广泛应用于家具、地板、托盘、门窗和汽车等领域[6-7]；另外其可以用废弃塑料和废旧木材作为原料，从而直接实现“变废为宝”的转换过程[8-9]。不过，WPC也有不足之处：与实木相比，能耗大、制作成本高，密度大而强度偏低[10-11]，简言之，其性价比较低，目前还很难应用到结构材料等性能要求较高的行业[10,12]。为了克服这些缺点，人们在材质配方[13-14]、玻纤增强[15-16]、改性处理[17]、加工工艺[18-19]等方面作了大量的研究[20-21]，并取得了一些可喜的成果。但前述WPC的缺点仍然未能得到很好地解决，因此，还必须有一些新的突破口。另一方面，玄武岩纤维(Basalt fiber，BF)被誉为“21世纪无污染的绿色工业材料”，是天然玄武岩矿石经高温熔融后通过铂铑合金拉丝制成的一种新型纤维[22]。BF原料来源广、成本低[23]，并具有耐高温、耐腐蚀、隔热、吸音及低吸湿等优良性能[24-26]；而且BF性价比高，被

收到初稿日期： 2010-07-23；**收到修改稿日期：** 2011-04-29；**网络出版时间：** 2011-06-09 10:37:28
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20110609.1037.001.html
DOI： CNKI:11-1801/TB.20110609.1037.001
通讯作者： 陈锦祥，教授，工学博士，目前主要从事生态仿生材料与玄武岩纤维复合材料应用的研发 E-mail：chenjpaper@yahoo.co.jp

认为有望代替价格昂贵的碳纤维[27-28]，成为具有中国特色的新兴高强纤维[29-30]，其已广泛应用于交通路面[31]，建筑加固等诸多领域[22,32-33]。鉴于此，笔者利用交叉学科的优势，在木塑复合的基础上，再利用 BF 增强 WPC，初步实证，这是一种行之有效的方法[34]。

本文作者在探讨玄武岩纤维增强木塑复合材料(BF/WPC)的配方、制备工艺的同时，着重阐述了 BF 含量与复合材料力学性能之间的关系。

1 实验方法

1.1 实验原料与设备

实验中使用的原料为：上海鑫记鑫有限公司生产的木塑料粒，柚木粉∶HDPE(高密度聚乙烯)＝7∶3；浙江石金玄武岩纤维有限公司生产的直径 13 μm，纤维长度为 3 mm 的短切 BF。实验设计了 6 个样号，其 BF 的含量从 0%开始，每增加 6%为一个样号；初次样本容量为 5，在其后的实验中发现制备过程及原料等对样品性能的影响较大，因此，对拉伸性能和弯曲性能又加做了一组样本容量为 5 的实验，即样本容量为 10。实验设计的依据和主要实验设备，参见文献[34]。

1.2 BF/WPC 复合材料的制备及性能测试

采用 SK160－B 型双辊开炼机(上海第一橡胶机械厂)对 BF 和 WPC 进行塑化混炼，前后辊筒温度分别为 160 ℃和 170 ℃，开炼 5～10 min，以混合均匀表面看不到 BF 为宜。将混炼均匀的物料粉碎后，再利用平板硫化机热压成型，成型温度 180 ℃，预热 5 min，保压 5～10 min，压力 8 MPa，卸模后再冷压 15 min。

分别按国标 GB/T 1447－2005 和 GB/T 1449－2005 制备哑铃型拉伸试样和弯曲试样，并在 REGER－200A 型电子万能试验机(深圳市瑞格尔仪器(制造)有限公司)上进行拉伸和弯曲性能试验，试验速率均为 10 mm/min；按国标 GB/T 1043－1993 制备冲击试样，在 XJJ－5 型冲击试验机(承德金建检测仪器有限公司)上选用 1 J 摆锤进行常温冲击性能测试(简支梁)；用 JSM－5610 LV 型扫描电子显微镜(日本岛津公司)观察样品。

2 结果与讨论

2.1 实验结果

2.1.1 力学性能

图 1 为不同 BF 含量时 BF/WPC 的拉伸性能，

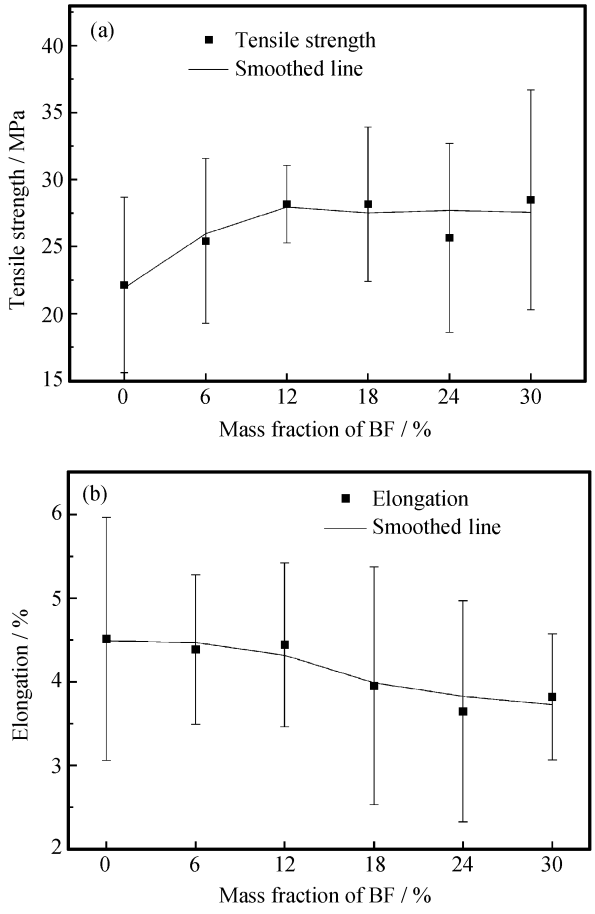

图 1 玄武岩纤维(BF)含量对玄武岩纤维增强木塑复合材料(BF/WPC)拉伸性能的影响

Fig. 1 Relationship between tensile properties of basalt fiber reinforced wood plastic composites (BF/WPC) and the mass fraction of basalt fiber (BF)

并给出了近似曲线。可见，随着 BF 质量分数的增加，BF/WPC 的抗拉强度呈现先上升后略有所下降的现象，如以各自近似曲线的顶部为计算标准，抗拉强度提高了约 28%。然而，断裂伸长率随 BF 含量的增加而有所下降，在拉伸强度达到最大的区间内，其下降的幅度在 20%左右。

图 2(a)和 2(b)分别为不同 BF 含量下的 BF/WPC 弯曲和冲击强度图。可见，随着 BF 含量的增加，BF/WPC 的弯曲及冲击强度都有一个快速上升的过程，然后有一缓慢增加的过程，直到过了某一最大值后，又开始有所下降。其提高的幅度均为 1/3左右，但出现最大值时的 BF 含量不同：弯曲强度出现在 BF 含量为 24%时，而冲击强度则在 BF 含量为 18%。

2.1.2 BF/WPC 断面 SEM

图 3 为复合材料冲击断面扫描电镜图。由图

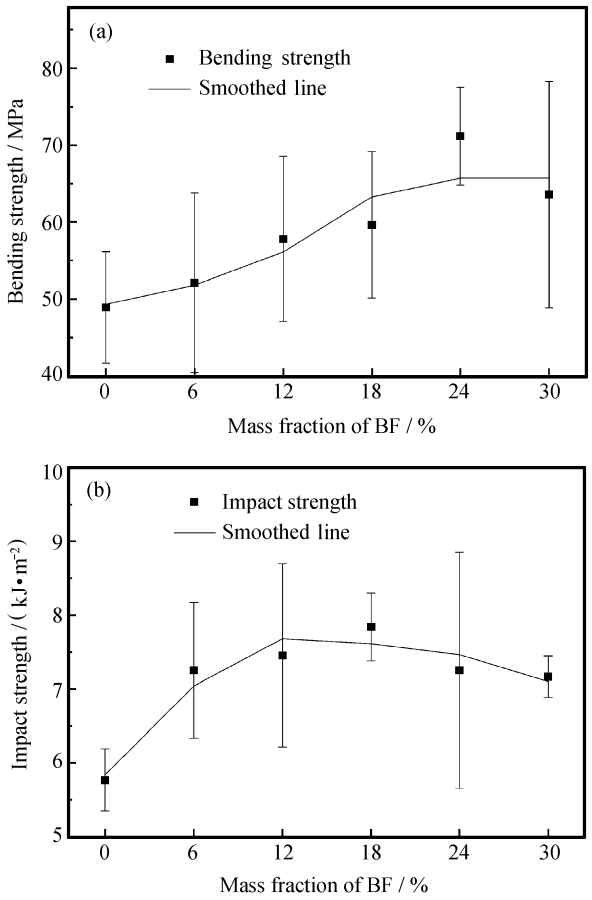

图 2　BF 含量对 BF/WPC 弯曲强度和冲击强度的影响

Fig. 2　Relationship between bending and impact properties of BF/WPC and the mass fraction of BF

3(a)可见，在没有玄武岩纤维增强时，可观察到有相对较长的木纤维(如图中的星号所示)，木纤维总体分布均匀；比较左右两组照片，BF 在纤维中多以平行于端面的形式排列，但从上到下，纤维增密，且纤维与断面成交叉分布的比例也增多。另外尽管部分 BF 周围存在少量间隙(如图中弯箭头所示)，但总体上 WPC 与 BF 混合良好。从图 3(b)～3(f)的断面形态上看，均可见既有外伸的 BF(如图中一般的箭头所示)，也有 BF 被拨出后的孔洞(如图中空芯的宽箭头所示)，还有部分 BF 的断头在断面附近断裂的情况(如图中被六角包围的部分)。

2.2　BF/WPC 的性能与强化机制

据报道，当玻璃纤维增强木粉含量不大于 30% 的 WPC 时，其添加量为 15%时，拉伸和弯曲强度分别提高了约 23%～30%(最高约为 40%[16])和 10%，其他性能因基体材料而异[16,38]。而由图 1、图 2 可知，用 3 mm 短切 BF 进行强化的 BF/WPC，拉伸强度、冲击强度、弯曲强度均有明显提高：取得最大值的 BF 含量区间分别为 15%～30%、15%～25%、20%～30%，在各对应区间提高的幅度虽不完全一致，但都在 30%左右。可见，与玻璃纤维相比，用 BF 增强 WPC 时，WPC 中的增强纤维含量及力学性能均有较大提高，显示出 BF/WPC 独特的一面。

当复合材料受到外部载荷时，纤维与基体界面间的剪切力将载荷由基体传递给增强纤维[39]；同时 BF 与基体相互限制对方变形，起到增强作用[40-41]；从图 3 看，断面上以小孔或外伸的纤维为主，只有少数纤维直接断裂在断面上(图 3 中六角包围部分)，说明在破坏过程中，确实有一个纤维拔出的过程，在此过程中实现了剪切力的传递，消耗了大量的功[42-43]。但是，本实验中没有添加改性剂，而被拨出的纤维表面光滑，说明 BF 对 WPC 的增强效果是通过两表面的物理(吸附)作用产生的摩擦进行传递的，这与纤维对基体材料增强机制的研究所得结论相似[15]。据此，如果 BF 与 WPC 混合均匀，相互挤压越实，则增强效果越好。从图 3 的试样断面中可以观察到，WPC 致密地包覆在 BF 的周围；此外，BF 的强度远大于 WPC。因此，拉伸、弯曲和冲击强度等都有明显的提高，但因 BF 本身比 WPC 脆，断裂伸长率出现下降现象。

对于图 1 和图 2 中存在最大值的现象，传统的解释是：当 BF 达到一定含量后基体与纤维不易均匀结合，产生较弱的界面[46]，当材料受力时，容易产生界面脱附和纤维拔出，应力传递效率降低[44]，从而使材料的性能下降。从图 3 可见，即使 BF 的含量达到 30%，还以 WPC 为主，BF 之间应该具有足够的空间。因此，只要 BF 不过量，尚不至于产生“不易均匀结合”的现象。

本实验中使用的短切 BF 长度为3 mm，直径为 13 μm，长径比为 200 多倍，面积比近 500 倍；因此，纤维截面积极小，从宏观上看前述的剪切力，对强度起贡献的主要是纤维长度方向的表面，而不是纤维端面。相反，纤维端面与木塑间界面的存在会成为“薄弱环节”(简称“弱端面”)。当纤维含量较低时，“弱端面”影响无足轻重，但随 BF 含量的增加而增加。对于拉伸、弯曲和冲击等不同的破坏形式，由于破坏时样品的受力状态不同，都有一个各自的临界值，一旦超过了临界值，其影响增大，直到表现为强度开始下降，从而形成了各自不同的最大值区间[35]。当然，对“弱端面”假说还需要作进

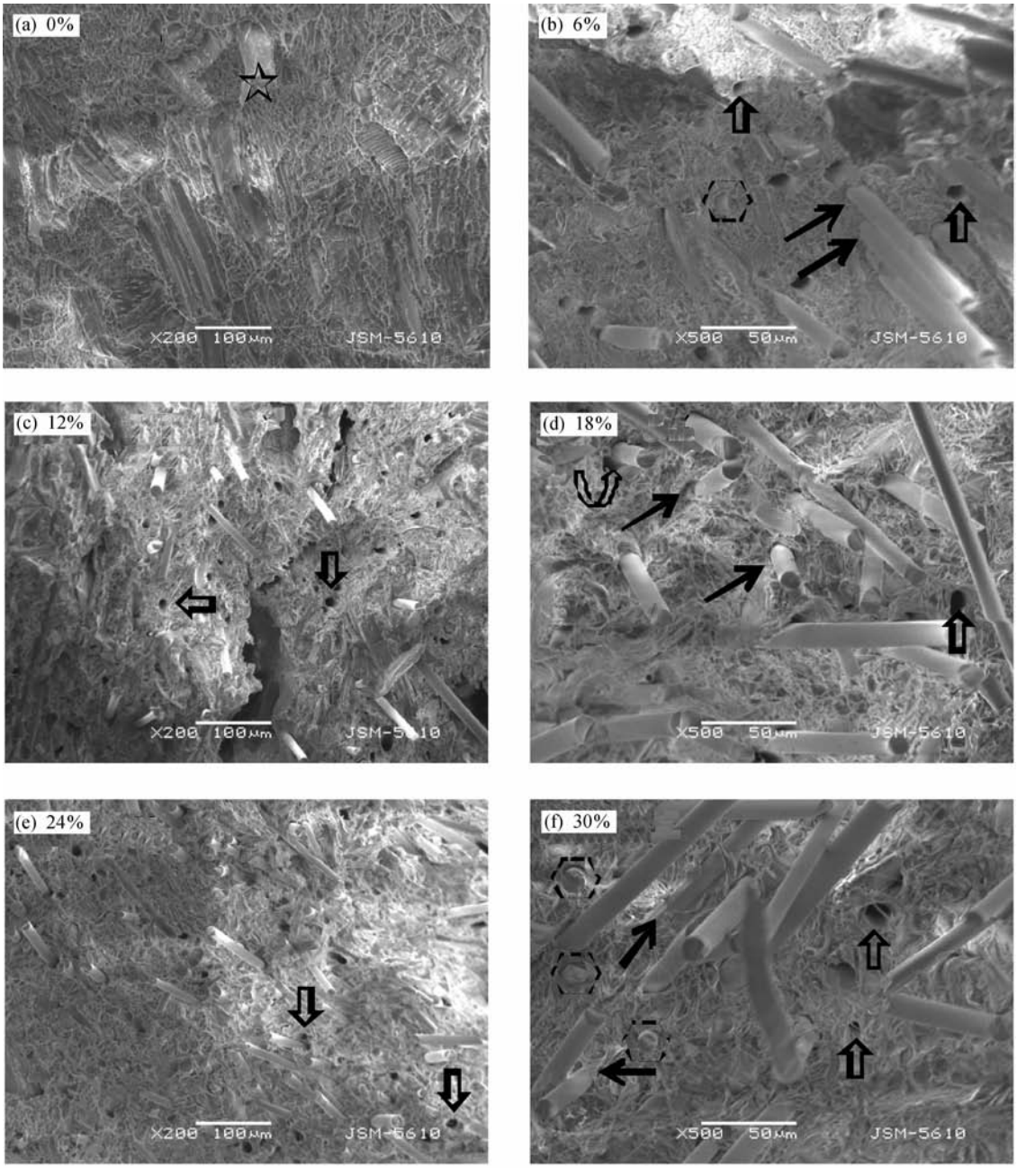

图 3　不同 BF 质量分数的 BF/WPC 复合材料冲击断面扫描电镜图

Fig. 3　SEM images of impact fracture surfaces of BF/WPC composites with different mass fractions of BF

一步定量或半定量的分析探讨。

3　结　论

（1）用 3 mm 短切玄武岩纤维（BF）强化的 BF/WPC，与木塑复合材料（WPC）相比，除断裂伸长率有所下降外，其拉伸强度、冲击强度和弯曲强度均有明显的提高，其性能取得最大值时的 BF 质量分数区间，分别为 15%～30%，15%～25%和 20%～30%，在各对应区间内，提高的幅度均为 30%左右。

（2）提出了纤维端面为“弱端面”的定性假说，解释了 BF/WPC 各项强度指标与增强纤维含量之间存在最大值的现象。

（3）用短切 BF 增强 WPC，是一种切实有效的方法。

致谢：实验中的玄武岩纤维由浙江石金玄武岩纤维有限公司提供，在此致以衷心感谢。

参考文献：

[1] 殷小春，任鸿烈. 对改善木塑复合材料表面相容性因素的探讨 [J]. 塑料，2002，31(4)：25－28.
Yin Xiaochun，Ren Honglie. Investigation of the factors improving the interfacial compatibilities in wood－polymer composites [J]. Plastics，2002，31(4)：25－28.

[2] 方明锋，黄　华. 木塑复合材料的研究及应用 [J]. 现代农业科技，2009(3)：8－10.
Fang Mingfeng，Huang Hua. Study and application of wood-polymer composites [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology，2009(3)：8－10.

[3] 于文东，孙振国，雷湘军. 具有发展前途的木塑复合材料 [J]. 化学建材，2004(9)：14－16.
Yu Wendong，Sun Zhenguo，Lei Xiangjun. WPC of bright development prospect [J]. Chemical Building Materials，2004(9)：14－16.

[4] 涂平涛. 木塑的生产及开发前景 [J]. 新型建筑材料，2001，28(7)：10－12.
Tu Pingtao. Production and developing prospect for wood plastic [J]. New Building Materials，2001，28(7)：10－12.

[5] Adhikary K B，Pang Shusheng，Staiger M P. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood－plastic composites based on recycled and virgin high－density polyethylene (HDPE) [J]. Composites Part B：Engineering，2008，39(5)：807－815.

[6] 郭万良. 国外木塑复合材料研究概况 [J]. 林业勘察设计，2002(3)：59－61.
Guo Wanliang. Study abroad overview of wood plastic composites [J]. Forestry Prospect and Design，2002(3)：59－61.

[7] Markarian J. Wood－plastic composites：Current trends in materials and processing [J]. Plastics Additives & Compounding，2005，7(5)：20－26.

[8] 黄泽雄. 木/塑复合材料的发展趋势 [J]. 国外塑料，2003，21(2)：10－13.
Huang Zexiong. Trend of wood/plastic composites [J]. World Plastics，2003，21(2)：10－13.

[9] Guo Jie，Tang Yinen，Xu Zhenming. Performance and thermal behavior of wood plastic composite produced by nonmetals of pulverized waste printed circuit boards [J]. Journal of Hazardous Materials，2010，179(1－3)：203－207.

[10] 王清文，王伟宏. 木塑复合材料与制品 [M]. 北京：化学工业出版社，2007：295－296.

[11] 赵永生，朱复华，薛　平，等. 木粉对 PVC 木塑复合材料力学性能的影响 [J]. 现代塑料加工应用，2005，17(6)：12－14.
Zhao Yongsheng，Zhu Fuhua，Xue Ping，et al. The influence of wood flour on mechanical properties of PVC/wood flour composites [J]. Modern Plastics Processing and Applications，2005，17(6)：12－14.

[12] Afrifah K A，Hickok R A，Matuana L M. Polybutene as a matrix for wood plastic composites [J]. Composites Science and Technology，2010，70(1)：167－172.

[13] 杨庆贤. 木/塑复合材料的生产配方与工艺研究 [J]. 复合材料学报，1994，11(4)：9－13.
Yang Qingxian. A study on ingredient and processes of wood-plastic composite materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，1994，11(4)：9－13.

[14] James S F，Armando G M. Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites [J]. Composites Part A：Applied Science and Manufacturing，2010，41(10)：1434－1440.

[15] 崔益华，Noruziaan Bahman，Lee Stephen，等. 玻璃纤维/木塑混杂复合材料及其协同增强效应 [J]. 高分子材料科学与工程，2006，22(3)：231－234.
Cui Yihua，Noruziaan Bahman，Lee Stephen，et al. Glass fiber/wood plastics hybrid composites and their synergistic reinforing effects [J]. Polymer Materials Science & Engineering，2006，22(3)：231－234.

[16] 邹汉涛，易长海，刘晓洪，等. 玻纤、木粉组合增强 PP 复合材料的制备及性能研究 [J]. 天津工业大学学报，2008，27(6)：15－19.
Zou Hantao，Yi Changhai，Liu Xiaohong，et al. Preparation and performance research of glass/wood flour/propylene compositions [J]. Journal of Tianjin Polytechnic University，2008，27(6)：15－19.

[17] 秦特夫. 改善木塑复合材料界面相容性的途径 [J]. 世界林业研究，1998(3)：46－51.
Qin Tefu. The approach to improve the interface compatibility between wood and synthetic polymers [J]. World Forestry Research，1998(3)：46－51.

[18] 杨英昌. 浅论木塑新材料对机械设备的要求 [J]. 林业机械与木工设备，2009，37(1)：43－45.
Yang Yingchang. Brief talk about equipment requirement of new wood polymer composite [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment，2009，37(1)：43－45.

[19] Yeh S K，Gupta R K. Improved wood－plastic composites through better processing [J]. Composites Part A：Applied Science and Manufacturing，2008，39(11)：1694－1699.

[20] Lei Yong，Wu Qinglin. Wood－plastic composites based on microfibrillar blends of high density polyethylene/poly－(ethylene terephthalate) [J]. Bioresource Technology，2010，101(10)：3665－3671.

[21] Oksman K. Improved interaction between wood and synthetic polymers in wood/polymer composites [J]. Wood Science and Technology，1996，30：197－205.

[22] 胡显奇，申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用 [J]. 高科技纤维与应用，2005，30(6)：7－13.
Hu Xianqi，Shen Tunian. The applications of the CBF in war

industry & civil fields [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 7-13.

[23] 胡显奇. 我国连续玄武岩纤维的进展及发展建议 [J]. 高科技纤维与应用，2008，33(6)：12-18.
Hu Xianqi. The overview of the present development of basalt fiber in china [J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008, 33(6): 12-18.

[24] Wang Mingchao, Zhang Zuoguang, Li Yubin, et al. Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2008, 27(4): 393-407.

[25] Sim J, Park C, Moon D Y. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures [J]. Composites Part B Eng, 2005, 36(6/7): 504-512.

[26] 霍文静，张佐光，王明超，等. 复合材料用玄武岩纤维耐酸碱性实验研究 [J]. 复合材料学报，2007，24(6)：77-82.
Huo Wenjing, Zhang Zuoguang, Wang Mingchao, et al. Experimental study on acid and alkali resistance of basalt fiber used for composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6): 77-82.

[27] Deak T, Czigany T. Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison [J]. Textile Research Journal, 2009, 79(7): 645-651.

[28] 傅宏俊，马崇启，王 瑞. 玄武岩纤维表面处理及其复合材料界面改性研究 [J]. 纤维复合材料，2007，15(3)：11-13.
Fu Hongjun, Ma Chongqi, Wang Rui. Investigation on surface treatment of basalt-fiber and interfacial modification of composites [J]. Fiber Composites, 2007, 15(3): 11-13.

[29] 黄根来，孙志杰，王明超，等. 玄武岩纤维及其复合材料基本力学性能实验研究 [J]. 玻璃钢/复合材料，2006(1)：24-27.
Huang Genlai, Sun Zhijie, Wang Mingchao, et al. Experimental research on mechanical properties of basalt fiber and composites [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(1): 24-27.

[30] Militky J, Kovacic V, Rubnerova J. Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fiber [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 1025-1033.

[31] 金 冰，吴 刚. 连续玄武岩纤维及其增强混凝土性能研究 [J]. 科技创新导报，2009(13)：74-75.
Jin Bing, Wu Gang. Study on properties of continuous basalt fiber reinforced concrete [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009(13): 74-75.

[32] Černy M, Glogar P, Sucharda Z. Mechanical properties of basalt fiber reinforced composites prepared by partial pyrolysis of a polymer precursor [J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(9): 1109-1120.

[33] Liu Q, Montgonery T S, Richard S P, et al. Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation [J]. Polymer Composites, 2006, 27(1): 41-48.

[34] 关苏军，刘恒山，汪丽娜，等. 玄武岩纤维增强木塑复合材料的力学性能 [C]// 第九届中日复合材料学术会议论文集. 北京：中国复合材料学会，2010：250-256.

[35] 秦志国. 玻璃纤维/木粉/聚丙烯三相复合材料结构与性能研究 [D]. 苏州：苏州大学，2005.

[36] 李 华，陶杰武. 长玻璃纤维增强热塑性复合材料研究 [J]. 工程塑料应用，2009，37(2)：17-19.
Li Hua, Tao Jiewu. Study on long fiber reinforced thermoplastics [J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(2): 17-19.

[37] 王丽雪，尹志娟，刘海鸥. 玻璃纤维增强环氧树脂单向复合材料力学性能分析 [J]. 黑龙江工程学院学报，2009，23(3)：73-74.
Wang Lixue, Yin Zhijuan, Liu Haiou. Study on mechanical properties of unidirectional glass fiber reinforced epoxy resin composites [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2009, 23(3): 73-74.

[38] 许俊强，全学军，高伟斌，等. 短切玻璃纤维增强硬质聚氨酯的弹性模量 [J]. 材料导报：研究篇，2007，23(6)：112-115.
Xu Junqiang, Quan Xuejun, Gao Weibin, et al. Effect of short glass fiber on the elasticity coefficient properties of rigid polyurethane materials [J]. Materials Review, 2007, 23(6): 112-115.

[39] 闰明涛，姚晨光，宋洪赞，等. PEN 短纤维增强 PTT 复合材料的流变性能及力学性能 [J]. 高分子材料科学与工程，2008，24(2)：67-70.
Run Mingtao, Yao Chenguang, Song Hongzan, et al. A study on rheology and mechanical characteristics of short PEN fiber reinforced PTT composites [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(2): 67-70.

[40] 何曼君，陈维孝，董西侠. 高分子物理 [M]. 上海：复旦大学出版社. 1991：276-286.

[41] 谷和平，蒋 英，张 竞，等. 短切纤维增强环氧树脂力学性能研究 [J]. 塑料工业，2007，35(12)：20-23.
Gu Heping, Jiang Ying, Zhang Jing, et al. Study on mechanical properties of epoxy resin reinforced short fiber [J]. China Plastics Industry, 2007, 35(12): 20-23.

[42] 杨庆贤. 木/塑复合材料及其增强机理的研究 [J]. 复合材料学报，1992，9(4)：77-82.
Yang Qingxian. Study on wood and plastics composites as well as its reinforced mechanism [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1992, 9(4): 77-82.

[43] 曾天卷. 玻璃纤维增强热塑性塑料 [J]. 玻璃纤维，2008(4)：33-39.
Zeng Tianjuan. GFRTP-short fiber pellets and long fiber pellets [J]. Fiber Glass, 2008(4): 33-39.