

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.03.027

CNTs/纤维增强树脂基复合材料制备及取向设计进展

刘方彪¹,王丹勇¹,李晓燕²,高迪¹,李树虎¹,徐井利¹,孙士祥¹,魏化震¹,陈以蔚¹

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 山东城市建设职业学院, 济南 250103)

摘要: 综述了随机方位分布碳纳米管 (CNTs)/纤维增强树脂基复合材料和取向方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料的制备方法,并对 CNTs 在纤维增强复合材料中取向设计方法进行了归纳分析。最后,对其研究发展动向进行了展望。

关键词: 碳纳米管; 复合材料; 制备; 取向; 设计

中图分类号: TB330.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)03-0137-05

Review on Aligned Design and Fabrication of CNTs / Fiber Reinforced Composites

Liu Fangbiao¹, Wang Danyong¹, Li Xiaoyan², Gao Di¹, Li Shuhu¹, Xu Jingli¹, Sun Shixiang¹, Wei Huazhen¹, Chen Yiwei¹

(1. CNGC Institute 53, Jinan 250031, China; 2. Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan 250103, China)

Abstract : Reviews on the fabrication methods of random CNTs / fiber reinforced composites and aligned CNTs / fiber-reinforced composites are presented respectively. The design methods of aligned CNTs in fiber reinforced composites are also summarized and analyzed. Finally, the trends of future research are outlined.

Keywords : CNTs ; composite ; fabrication ; alignment ; design

纤维增强树脂基复合材料虽然具有低密度、高强度的性能优势,但其纤维间和层间性能较弱,降低了其结构设计的灵活性,使其应用范围受到限制。为了进一步提高纤维增强树脂基复合材料的力学性能,复合体系由两相向三相甚至多相复合体系转变已成为该领域的研究方向之一。其中,碳纳米管 (CNTs) 由于具有优异的物理化学性能,与聚合物复合后可以极大地改善材料的力学性能^[1-2],其作为第二增强相被引入,能得到可灵活设计的精细耦合协同强韧化复合材料^[3],从而得到广泛研究。

目前, CNTs/纤维增强树脂基复合材料可以根据 CNTs 的分布方位不同分为随机方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料和取向方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料,其中后者更能发挥 CNTs 长径比大、比模量高的性能优势,进一步提高材料层间性能及特定方向的力学性能。

1 随机方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料制备方法

随机方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料往往是基于纤维增强树脂基复合材料成型工艺,引入颗粒共混法进行制备。

1.1 基于纤维涂敷工艺共混制备方法

该方法主要是将 CNTs 与树脂直接共混,得到 CNTs 增强的混杂基体以代替原树脂基体,然后采用涂敷工艺将其与纤维复合,得到 CNTs/纤维增强树脂基复合材料。

王柏臣等^[4]将羧基化的多壁碳纳米管 (MWNTs-COOH)

在环氧树脂 (EP) 中超声分散后,加入固化剂混合均匀,采用手糊/层压成型工艺制备了 MWNTs-COOH/T700 增强 EP 复合材料,并对其力学性能进行表征。研究发现当 MWNTs-COOH 含量为 1% 时,改性效果最好,弯曲强度和层间剪切强度分别提高了 51.8% 和 34.2%。当含量继续增加, MWNTs-COOH 主要以团聚体形式存在,导致复合材料力学性能下降。

陈秋飞等^[5]配置了不同比例的 MWNTs/EP 胶液,将其涂敷在碳纤维 (CF) 表面后,固化制备 MWNTs/CF 增强 EP 复合材料。研究发现, MWNTs 含量为 0.2% 时,复合材料的剪切强度和弯曲强度最大,分别为 99.2 MPa 和 1811.4 MPa,但其弯曲弹性模量下降了 8.7 GPa; 当 MWNTs 添加量为 1% 时,其弯曲弹性模量达到 135.9 GPa,较未加入 MWNTs 时提高了 11.1%,但层间剪切强度和弯曲强度分别降低了 5.5 MPa 和 359.5 MPa。

B. Ashrafi 等^[6]也利用 CNTs 改性 EP,然后与 CF 复合制备 CNTs/EP/CF 复合材料,对其进行力学性能表征发现: CNTs 含量为 0.1% 时,材料 I 型和 II 型层间断裂韧性 (G_{IC} 和 G_{IIC})、冲击后压缩强度分别提高了 13%、28% 和 3.5%。

M. M. Rahman 等^[7]将不同含量的氨基化 MWNTs 与 EP 混合,室温下用超声粉碎机处理 1 h,再经三辊机研磨后

联系人: 刘方彪, 硕士, 主要研究方向为计算机辅助材料设计

收稿日期: 2014-12-12

与固化剂以 10/3 的比例混合,机械搅拌均匀后涂敷在 GF 布表面,最后用热压成型工艺制备层合板,并对该材料的力学性能进行研究,发现当 MWNTs 的质量分数为 0.3% 时,拉伸强度和拉伸弹性模量的提升效果最好,分别提高了 37% 和 21%。该分散工艺虽然达到了不错的分散效果,但严重破坏了 MWNTs 的形貌结构,减小了 MWNTs 的长径比,降低了增强程度。

基于纤维涂敷工艺共混制备方法是制备随机方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料最直接的方法,过程简单,操作方便,但 CNTs 在树脂中容易团聚,影响材料性能提升效果。目前,研究中大多利用超声波打破 CNTs 之间范德华作用力,以达到比较好的分散效果^[8]。

1.2 基于树脂传递模塑工艺 (RTM) 共混制备方法

该方法的一般过程是将纤维织物等增强材料铺放在封闭的模腔内,利用压力将 CNTs/树脂胶液注入模腔,完全浸透后固化,脱模成型得到制品。

Wang Baichen 等^[9]利用 RTM 工艺成功制备出 CNTs/CF 增强 EP 混杂多尺度复合材料,并研究 CNTs 含量对其力学性能的影响,发现 CNTs 的含量为 0.025% 时,材料的弯曲强度和层间剪切强度分别为 895.1 MPa 和 38.8 MPa,好于未添加 CNTs 的复合材料。

C. Fernandez 等^[10]研究了 CNTs 的加入对 EP/CF 复合材料剪切性能的影响,实验利用 RTM 工艺制备 EP/CF/CNTs 三相混杂复合材料,发现 CNTs 的含量为 0.3% 时,复合材料的剪切弹性模量较未添加 CNTs 时提高了 5%。

F. Elisabete 等^[11]将玻璃纤维 (GF) 铺放在 RTM 模腔内,然后注入 EP/CNTs 进行复合,制备出 EP/CNTs/GF 混杂复合材料,并研究 CNTs 的加入对材料导电性能的影响,实验发现,由于 CNTs 的加入,材料的电导率至少提高了一个数量级。

基于 RTM 工艺共混制备方法虽然具有低成本、半机械化的优点,但对树脂体系的黏度要求较高,限制了其进一步的应用。

1.3 其他方法

除上述方法外,赵艳文等^[12]对真空灌注工艺和超声波辅助真空灌注工艺进行了研究,分别采用两种方法制备了 200 mm × 200 mm 的四层单向铺叠 GF 复合材料,对比了 MWNTs 及工艺方法对材料力学性能的影响。结果表明,与传统真空灌注工艺相比,超声波辅助真空灌注工艺能促进树脂在纤维内部的流动,提高树脂对纤维的浸润,减少层合板孔隙缺陷;MWNTs 的加入可以提高层合板的力学性能。

Jin Jie 等^[13]利用静电吸附方法在 GF 上覆盖 CNTs,然后与尼龙 (PA) 66 复合得到 PA66/GF/CNTs 复合材料。实

验发现,与单纯的混合制备方法相比,CNTs 接枝工艺制备的 PA66/GF/CNTs 复合材料拉伸弹性模量提高了 10%。

另外,研究者们还根据一维 CNTs 纤维^[14-15]、二维 CNTs 薄膜^[16-18]和三维 CNTs 阵列^[19]等 CNTs 宏观聚集体更能发挥 CNTs 优异性能的原理,开展了利用 CNTs 聚集体改性纤维增强树脂基复合材料的研究,如 R. J. Sager 等^[20]在 CF 织物的层间添加 CNTs 薄膜,使 CF 增强复合材料的 G_{IC} 得到小幅提高。

2 取向方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料制备方法

目前,CNTs 在纤维增强树脂基复合材料中的取向方法可以根据作用对象的不同分为两类:一类是化学方法,一类是物理方法。其中化学方法的作用对象是构成 CNTs 的碳原子,而物理方法的作用对象是 CNTs 整体。

2.1 化学方法

化学方法主要应用于三明治型的纤维/取向 CNTs/树脂复合材料构筑^[21],其原理是利用化学气相沉积 (CVD) 在纤维表面生长 CNTs,获得垂直方位分布 CNTs/纤维混杂增强体,然后与树脂基体复合制得垂直方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料。

N. Lachman 等^[22]利用 CVD 方法在 CF(T-300) 表面接枝 CNTs,然后与 EP 复合,制备出垂直取向 EP/CNTs/CF 复合材料。任冲等^[23]也用这种方法成功制备出垂直取向 EP/CNTs/CF 复合材料,研究其力学性能发现,该工艺可以使复合材料层间剪切强度和弯曲强度显著增强,分别提高了 20.6% 和 20%。刘秀影等^[24]也研究了 CF 表面接枝 CNTs 对复合材料界面性能的影响,发现 CNTs 的接枝率为 15% 时,CF 拉伸强度提高 22%,材料界面剪切强度提高 178%。

S. S. Wicks 等^[25]在 GF 锻纹布中纤维表面接枝垂直取向 CNTs,并由此制成 CNTs/GF 增强复合材料,对其进行力学性能表征发现,该种取向方位分布的 CNTs 提升了材料层间界面性能,使其韧性、连接孔挤压刚度和挤压破坏强度分别提高 76%,19% 和 5%。

N. Yamamoto 等^[26]利用该方法将 CNTs 加入到氧化铝纤维增强 EP 复合材料中,使复合材料的导电性能得到大幅度提升。

化学法制得的垂直方位分布 CNTs 可以通过提高纤维与基体之间界面相互作用,进一步提升复合材料力学性能。然而,这种方法也使取向方位分布 CNTs/纤维增强复合材料的制备工艺变得繁琐复杂,实验周期延长,不利于大规模的推广使用。

2.2 物理方法

物理方法制备取向方位分布 CNTs/纤维增强复合材料可以分为物理力场取向技术和“转移-印刷”技术。

(1) 物理力场取向技术。

目前,关于物理力场取向技术的研究刚处于起步阶段,获得的研究成果并不多见。其基本原理是将 CNTs 放入物理场中,利用 CNTs 自身的物理性质,使其受到取向作用力,从而达到取向效果。现阶段研究中出现的物理力场主要有流场、电场和磁场。

①流场取向。

流场取向是利用流体液面的表面张力和内部粘滞力带动 CNTs,使其沿流体流动方向取向分布。

Ye Zhijiang 等^[27]利用重力场,使添加有单壁碳纳米管(SWNTs)的分散液在倾角 20° 的微米级流道中流动,SWNTs 因流体液面的表面张力及内部的粘滞力作用进行取向排列。实验还研究了流道底和流道壁的疏水/亲水性对 SWNTs 取向的影响。结果发现,底部疏水两壁亲水时,以流道轴线分界,两侧的 SWNTs 总体取向方向与流道轴向有一定夹角;底部亲水两壁疏水时,SWNTs 总体取向方向沿着轴向方向,取向效果更好。

V. C. S. Chandrasekaran 等^[28]分别利用真空辅助树脂注射工艺和树脂流动浸润工艺将 MWNTs 增强树脂与 GF 复合制备层合板,前者工艺制备的层合板层间剪切强度无明显提高,后者工艺制备的层合板层间剪切强度提高了 21.3%。原因是树脂流动浸润工艺中的流体剪切作用力使 CNTs 沿流动方向分布,有效提高了层合板层间剪切强度。

该方法对流体流动的孔道尺寸要求较高,且 CNTs 取向效果不理想,在流动过程中, CNTs 会沉积到纤维表面,导致 CNTs 分布不匀,不利于大规模推广。

②电场取向。

电场取向方法利用 CNTs 的轴向高极化率,使 CNTs 受到远大于横向诱导力的轴向诱导力,促使 CNTs 沿电场方向取向分布。

An Qi 等^[29]利用电泳吸附 (EPD) 将 CNTs 包覆在 CF 织物表面,然后用其增强 EP,并对复合材料微观形貌和力学性能进行了研究,发现 CNTs 沿纤维方向有一定的取向排布,对复合材料层间剪切强度和硬度的提升有所贡献。

电场取向方法所需设备比较简单,方便操作,在大尺寸的取向方位分布 CNTs/纤维增强复合材料制备中具有应用潜力。

③磁场取向。

磁场取向方法主要利用 CNTs 磁各向异性进行取向。在强磁场作用下,平行于管轴方向的摩尔磁化率远大于垂直于管轴方向的摩尔磁化率,使 CNTs 受到远大于横向诱导力的轴向诱导力,促使 CNTs 沿磁场方向取向分布。

S. Aldajah 等^[30]在 CNTs 表面吸附磁性颗粒,然后在其

与 CF 增强复合材料固化过程中施加横向磁场 (场强 0.6T),获得横向方位分布 CNTs/纤维增强复合材料。对其做力学性能表征发现, CNTs 含量 1.5% 时,复合材料刚度和最大承载能力分别提高 46% 和 33%,而随机方位分布 CNTs/CF 增强复合材料仅提高 20% 和 15%。

磁场取向方法对磁场强度的要求非常高^[31],虽然加入其他磁性颗粒可以降低其对磁场强度的要求^[32-34],但同时也提高了 CNTs 的分散难度,影响材料性能的提升,限制了其在大尺寸取向方位分布 CNTs/增强树脂基复合材料制备中的应用。

除上述方法外,还出现了结合流场和电场的静电纺丝取向方法,该方法多用于 CNTs 混杂纤维的制备^[35-36],并不针对利用取向方位分布 CNTs 提升纤维增强复合材料层间剪切性能的研究,且当 CNTs 发生团聚时,会导致纤维直径分布不均,性能下降^[37]。

(2) “转移-印刷”技术。

“转移-印刷”技术的一般过程是直接将取向 CNTs 阵列加入到纤维织物与树脂之间,制备取向方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料。

E. J. Garcia 等^[38]将定向 CNTs 吸附在 CF 增强复合材料预浸带上,使其制备成的层合板层间韧性得到明显改善, G_{IC} 和 G_{IIC} 分别提高了 2 倍和 3 倍。然而,他们使用的 CNTs 阵列高度分别为 60 μm 和 120 μm ,远大于常规的 CF/EP 层合板层间尺寸,使材料成型压力降低,影响了材料力学性能的提升。

“转移-印刷”技术方便快捷,可实现半机械化,可以用于大规模大尺寸取向方位分布 CNTs/纤维增强复合材料的制备。然而,该方法使 CNTs 取向方向局限在垂直方向,且 CNTs 的含量难以控制,影响材料整体性能的提升,有待优化。

3 取向设计技术

近些年来,虽然研究者针对利用取向 CNTs 进一步提高纤维增强复合材料力学性能开展了大量研究工作,但取得的进展远低于预期目标, CNTs 真正潜力并没有在宏观尺度得到应有的体现。并且关于 CNTs 取向制备的实验大多采用“试凑法”来完成工艺参数的选取,过程繁琐,效率低下。为充分发掘 CNTs 在复合材料领域的应用潜力,通过仿真模拟技术和材料设计计算方法对 CNTs 取向进行预先优化设计和模拟计算,获得合适的工艺参数,然后指导实验的进行,将大大缩短实验周期,提高效率。

Wu Ying 等^[39]利用 ANSYS 有限元分析 (FEM) 模拟介电电泳交流电场,研究电极的宽度、形状和电极之间的距离对 CNTs 电场取向的影响。结果表明,针状的电极对利用介

电电泳实现 CNTs 取向效果最好,但是该理论研究尚未经试验验证。

徐井利^[40]利用电磁场有限元模型预测了 MWNTs 扭转力矩,并在此基础上分别引入 Mondi 和 Wiegel 等建立的旋转摩擦系数公式,对 MWNTs 取向时间进行计算。该研究获得了 MWNTs 电场取向参数,但利用经验公式计算得到的 MWNTs 取向时间差别较大。

Fan Chengwen 等^[41]利用代表性体积单元分析方法(RVE)建立取向方位分布 CNTs/纤维增强复合立柱状模型,对其力学性能进行分析。结果表明,添加沿纤维方向分布 CNTs 时,材料纵向剪切强度、横向剪切强度及剪切弹性模量分别提高了 2.7%,9.7% 和 4.5%;而添加随机方位分布 CNTs 时,材料纵向剪切强度、横向剪切强度及剪切弹性模量分别提高了 2.0%,33.1% 和 39.2%。这说明垂直纤维方向分布 CNTs 具有大幅度提升复合材料横向及剪切刚度的潜力,对提升复合材料非纵向性能有一定意义。

S. I. Kundalwal 等^[42-43]分别用 RVE 和 FEM 预测了接枝 CNTs 的 CF 增强复合材料横向有效拉伸性能和热传导性能,计算了定量 CF 应接枝的 CNTs 含量,对 CF 表面接枝取向 CNTs 的实验研究有重要的指导意义。

Liu Zongshin 等^[44]利用 FEM 对静电纺丝制备的取向 CNTs/聚偏氟乙烯纳米纤维压电刺激行为进行模拟,发现纤维固定端有颈缩现象,且由于电极形状原因,CNTs 取向不理想,而在纤维中部,电场相对比较均匀,CNTs 的取向效果较好。

目前,针对 CNTs 在纤维增强复合材料中跨尺度取向设计的理论和方法研究并不多见,且影响该类复合材料性能的因素众多,缺乏对制备工艺参数和材料性能的优化设计。因此,开展纤维增强复合材料中 CNTs 取向、性能控制及跨尺度复合方法等研究工作,将进一步提高复合材料性能有非常重要的意义。

4 展望

近年来,虽然关于 CNTs/纤维增强树脂基复合材料的研究已有初步进展,在一定程度上提升了纤维增强树脂基复合材料力学性能,但多限于小试件的实验制备,尤其对于取向方位分布 CNTs/纤维增强树脂基复合材料尚缺乏可规模化应用且重复性良好的取向制备技术。另一方面,目前这些实验研究多采用“试凑法”确定工艺参数,效率低下、成本高。因此,为了有效地获得较佳 CNTs 取向制备工艺参数,以获取增强效果明显的 CNTs 增强复合材料,未来该方面的发展趋势主要包括:

(1) 利用计算机仿真模拟技术对 CNTs 取向工艺制备参数进行优化设计,科学控制试验过程,提高研发效率,节约研

制成本;

(2) 建立便于工程实际应用的取向 CNTs/纤维增强复合材料工艺制备方法,促进其在多向承载复杂应力状态结构部件中的应用,提升材料综合承载性能。

总之,要充分发挥取向 CNTs 作为增强相的潜力,使其优异的性能在宏观尺度得到应有的体现。未来随着取向方位分布 CNTs/纤维增强复合材料研究的深入,其在军工、航空、航天等高科技领域会展现出更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Hou Ye, et al. ACS Nano, 2009, 3(6):1 057-1 062.
- [2] Mathur R B, et al. Polymer Composites, 2008, 29(7):717-727.
- [3] Wicks S S, et al. Composites Science and Technology, 2010, 70(1):20-28.
- [4] 王柏臣,等. 固体火箭技术, 2011, 34(6):789-793.
Wang Baichen, et al. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(6):789-793.
- [5] 陈秋飞,等. 化工新型材料, 2012, 40(4):75-77.
Chen Qiufei, et al. New Chemical Materials, 2012, 40(4):75-77.
- [6] Ashrafi B, et al. Composites Science and Technology, 2011, 71:1 569-1 578.
- [7] Rahman M M, et al. Composite Structures, 2012, 94(8):2 397-2 406.
- [8] 李玲,等. 材料导报, 1998(4):18-20.
Li Ling, et al. Journal of Materials, 1998(4):18-20.
- [9] Wang Baichen, et al. Composites:Part B, 2013, 46:123-129.
- [10] Fernandez C, et al. Influence of the addition of functionalized MWCNT on mechanical properties on epoxy / carbon fiber and epoxy / carbon-aramid fiber composites[C / OL]:BCCM1, <http://hdl.handle.net/2268/12847>, 2013-10-25.
- [11] Elisabete F, et al. Composites:Part A, 2012, 43(4):593-602.
- [12] 赵艳文,等. 航空材料学报, 2013, 33(4):58-63.
Zhao Yanwen, et al. Journal of Aeronautical Materials, 2013, 33(4):58-63.
- [13] Jin Jie, et al. Polymer Composites, 2013, 34(8):1 313-1 320.
- [14] Deng Fei, et al. Carbon, 2011, 49(5):1 752-1 757.
- [15] Jia Jingjing, et al. Carbon, 2011, 49(4):1 333-1 339.
- [16] Di Jiangtao, et al. ACS Nano, 2012, 6 (6):5 457-5 464.
- [17] Wang Ke, et al. Advanced Functional Materials, 2013, 23(7):846-853.
- [18] Won Y J, et al. Carbon, 2012, 50(2):347-355.
- [19] Raney J R, et al. Carbon, 2011, 49(11):3 631-3 638.
- [20] Sager R J, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 121(4):2 394-2 405.
- [21] Zeng You, et al. ACS Nano, 2010, 4(11):6 798-6 804.
- [22] Lachman N, et al. Composites Science and Technology, 2012, 72(14):1 711-1 717.
- [23] 任冲,等. 基于碳纤维/碳纳米管骨架的环氧树脂基复合材料的层间剪切强度[J/OL]:中国科技论文在线, 2013-10-25.

- Ren Chong, et al. Interlaminar shear strength of epoxy matrix composite reinforced by carbon fiber/carbon nanotubes skeleton[J/OL]:<http://www.paper.edu.cn>, 2013-10-25.
- [24] 刘秀影,等. 新型碳材料, 2012, 27(6):455-461.
- Liu Xiuying, et al. New Carbon Materials, 2012, 27(6):455-461.
- [25] Wicks S S, et al. Composites Science and Technology, 2010, 70:20-28.
- [26] Yamamoto N, et al. Composites Science and Technology, 2012, 72:2 009-2015.
- [27] Ye Zhijiang, et al. Microelectronic Engineering, 2011, 88(9): 2 919-2 923.
- [28] Chandrasekaran V C S, et al. Carbon, 2010, 48:3 692-3 699.
- [29] An Qi, et al. SciVerse Science Direct, 2012, 50:4 130-4 143.
- [30] Aldajah S, et al. Material and Design, 2012, 34:379-383.
- [31] 韩宝忠,等. 新型碳材料, 2013, 28(1):20-25.
- Han Baozhong, et al. New Carbon Materials, 2013, 28(1):20-25.
- [32] Shi Donglu, et al. Composites:Part B, 2011, 42(6):1 532-1 538.
- [33] Younes H, et al. Journal of Nanofluids, 2013, 2(1):4-10.
- [34] Malkina O, et al. AIP Advances, 2013, 3(4):042104(1-11).
- [35] Kang Minsung, et al. Current Applied Physics, 2009, 9(1):95-97.
- [36] Dai Yile, et al. New Carbon Materials, 2013, 28(2):94-100.
- [37] Liao Guiying, et al. Composites Science and Technology, 2012, 72:248-255.
- [38] Garcia E J, et al. Composites:Part A, 2008, 39(6):1 065-1 070.
- [39] Wu Ying, et al. Simulation on electrical field distribution of dielectrophoresis for carbon nanotube[C]. Beijing:Cognitive information & cognitive computing 2012 IEEE 11th international conference, 2012.
- [40] 徐井利. 树脂中多壁碳纳米管电场取向技术研究 [D]. 济南:山东非金属材料研究所, 2013.
- Xu Jingli. Research of MWNTs' alignment in electric field[D]. Jinan:Norinco Group Institute 53, 2013.
- [41] Fan Chengwen, et al. Numerical estimation of the mechanical properties of CNT-reinforcing composites[C]. Taiwan:The Fifth Taiwan-Japan-Workshop on Mechanical and Aerospace Engineering, 2009.
- [42] Kundalwal S I, et al. European Journal of Mechanics A / Solids, 2012, 36:191-203.
- [43] Kundalwal S I, et al. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 76:90-100.
- [44] Liu Zongshin, et al. Sensors and Actuators A:Physical, 2013, 193:13-24.

鞍山君利工程塑料有限公司

鞍山君利工程塑料有限公司是股份制企业,生产以工程塑料为主的改性材料。由教授级高工、中国塑协专家委员会专家负责生产技术。可为用户提供增强、增韧、复合、阻燃、环保阻燃、抗静电、耐磨、塑料合金类系列改性工程塑料。公司竭诚为用户“量身订做个性化需求的产品,为客户创造价值”。公司通过 ISO9001:2000 国际质量管理体系认证。公司宗旨:信誉第一;质量第一。

●改性品种: PA66, PA6, PP, PE, ABS, AS, HIPS, POM, PC, PC/ABS, PBT, PET, PVC 等系列改性塑料。

●适用行业: 家电、汽车、机械、铁路、纺织、石油化工、煤矿、农业等。

欢迎新老客户前来指导、合作!

经理: 徐长旭 13604228259, xuchangxu315@163.com

总工: 赵文聘 13804910274, zhaowenpin315@163.com

地址: 辽宁省鞍山市千山区旧堡

邮编: 114041

电话: 0412-2363259

传真: 0412-2363259