复 合 材 料 学 报　　第24 卷　第6 期　12 月　2007 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 24　No. 6　December　2007

文章编号: 1000-3851(2007)06-0019-07

# 微纳米$SiO_2$/PP 复合材料增强增韧的实验研究

郑艳红, 蔡楚江, 沈志刚*, 麻树林, 邢玉山
(北京航空航天大学 北京市粉体技术研究开发重点实验室, 北京 100083)

**摘　要:** 为了研究无机刚性颗粒对通用塑料聚丙烯(PP) 的力学性能的影响, 采用熔融共混方法制备了经硅烷偶联剂A-151 处理的$SiO_2$/PP 复合材料, 并通过其缺口冲击、拉伸、弯曲试验和冲击断面的形貌观察, 分析研究了微纳米$SiO_2$ 颗粒大小、填充量、表面改性以及不同颗粒大小$SiO_2$ 混合物对PP 复合材料增韧、增强效果的影响。实验结果表明: 纳米$SiO_2$ 的加入可以同时改善其韧性、刚性和强度; 填充量相同, 颗粒越细, $SiO_2$/PP 复合材料的力学性能越好。$SiO_2$ 经改性后填充到PP 基体中, 明显改善了颗粒在基体中的分散性及基体与颗粒之间界面结合性能, 使复合材料的综合力学性能得到提高。不同颗粒大小的$SiO_2$ 混合后填充到PP 基体中, 混合$SiO_2$ 的协同效应使复合材料拉伸、弯曲性能进一步提高, 对PP 基体具有更好的增强效果, 但其冲击性能下降。

**关键词:** $SiO_2$; PP; 力学性能; 复合材料
**中图分类号:** TB332; TQ325.1+4　　**文献标志码:** A

## Toughening and strengthening of micro- and nano-$SiO_2$/PP composites

ZHENG Yanhong, CAI Chujiang, SHEN Zhigang*, MA Shulin, XING Yushan
(Beijing Key Laboratory for Powder Technology Research and Development, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties of commercial plastic polypropylene (PP) reinforced with inorganic rigid particles, the PP composite material filled with the surface-modified silica particles by silane coupling agent A-151 was prepared by the melt blending method. The effects of the particle size, mass fraction of silica, surface modification of silica and mixture of the silica particles with different sizes on the toughening and strengthening of PP matrix were investigated based on the results of mechanical properties testing and the observation of the impact fracture surface morphology of the composites. The results show that the toughness, strength and rigidity of the composites can be improved simultaneously by filling nano silica particles into polypropylene. The finer the size of the particles is, the higher the mechanical properties of the composites are. When the modified silica particles are filled into PP, the dispersion of the silica in PP matrix and the compatibility between the silica and matrix are improved, and the mechanical properties of the composites are improved. The composites reinforced with the mixture of the silica particles with different sizes have higher tensile and flexural properties. The mixture has a better reinforcing effect on PP matrix, but the impact property of the composites decreases.

Keywords: silica; PP; mechanical properties; composites

聚合物材料的增强增韧一直是高分子材料领域备受关注的一个重要问题。自从Kurauchi 等人[1-2]于1984 年首次提出将脆性塑料用于具有一定韧性的基体中, 能进一步提高聚合物材料的强度和韧性后, 引起了人们极大的关注。近年来, 国内外很多研究者[3-10]尝试采用无机刚性颗粒作为聚合物材料的填充剂, 试验结果表明, 填充超细的无机刚性颗粒可以使聚合物材料获得更好的强度与韧性。影响颗粒 聚合物材料力学性能的因素很多, 主要包括: 颗粒大小、颗粒的填充量、颗粒的表面特性、颗粒在聚合物中的分散度等。无机刚性颗粒填充对聚合物力学性能的影响是复杂的, 尽管国内外很多研究

收稿日期: 2007-03-27; 收修改稿日期: 2007-06-15
基金项目: 北京市教育委员会共建项目建设计划资助项目(JD100060518)
通讯作者: 沈志刚, 教授, 主要研究方向为微纳米颗粒的制备与应用研究　E-mail: shenzhg@buaa.edu.cn

者[9, 11-21]已经开展了大量的研究，但是有很多问题尚无法解释，同时很多结果是相互矛盾的。这可能是由实验条件不同造成，如颗粒不同、颗粒表面特性不一样、聚合物基体材料的差异、材料配方的差异等。

本文作者将微纳米 $SiO_2$ 填充到聚丙烯(PP)基体材料中，通过研究其缺口冲击、拉伸、弯曲等力学性能和用扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)观察分析其断面微观特征，探讨微纳米 $SiO_2$ 颗粒大小、填充量、表面改性以及不同颗粒大小 $SiO_2$ 混合物对PP复合材料力学性能的影响。

## 1 实　验

### 1.1 主要原材料

PP基体树脂选用北京燕山石化股份有限公司提供的PP粉料(燕山石化PP 4220)，熔融指数为1.5 g/10 min，密度0.897 $\times10^3$ kg/m$^3$。$SiO_2$ 颗粒选用Degussa公司Aerosil R972、Sipernat 22LS、Sipernat 22，平均粒径分别为16 nm、3 μm、100 μm，比表面积分别为130 m$^2$/g、175 m$^2$/g、190 m$^2$/g。Sipernat 22LS和Sipernat 22填料的表面改性处理剂均选用硅烷偶联剂A-151(乙烯基三乙氧基硅烷，南京曙光化工集团有限公司)，溶剂为无水乙醇(北京化学试剂厂)。润滑剂选用芥酸酰胺(荷兰阿克苏·诺贝尔公司)。抗氧剂选用YD-10(北京迪龙化工有限公司)。

### 1.2 复合材料制备工艺流程

$SiO_2$/PP复合材料的制备工艺流程如图1所示。首先在室温下用高速混合机改性Sipernat 22LS和Sipernat 22 $SiO_2$(Aerosil R972 $SiO_2$，出产时已经用DDS即二甲基二氯硅烷改性)，改性剂溶剂为酒精，改性剂浓度为20 wt%，改性剂用量为1 wt%，改性剂种类为硅烷A-151。改性后的 $SiO_2$ 和PP粉料分别用电热鼓风干燥箱(101-3A，杭州蓝天仪器有限公司)在80 ℃下烘干3 h，烘干后的 $SiO_2$、PP和润滑剂、抗氧剂在室温下用高速混合机(SHR-5A，张家港强大塑料机械有限公司)混合3～5 min；经混合后的PP材料在双螺杆挤出机(TE-35型，南京科倍隆科亚机械有限公司)中挤出成丝状；丝状PP复合材料被切碎成颗粒状；经干燥后在注射机(CJ108 M3V，震德塑料机械厂有限公司)上注射成型；测试试样(缺口冲击、拉伸、弯曲试样)经过人工修边、打磨处理，每组分别测试5个缺口冲击、拉伸、弯曲试样，最终结果取平均值。

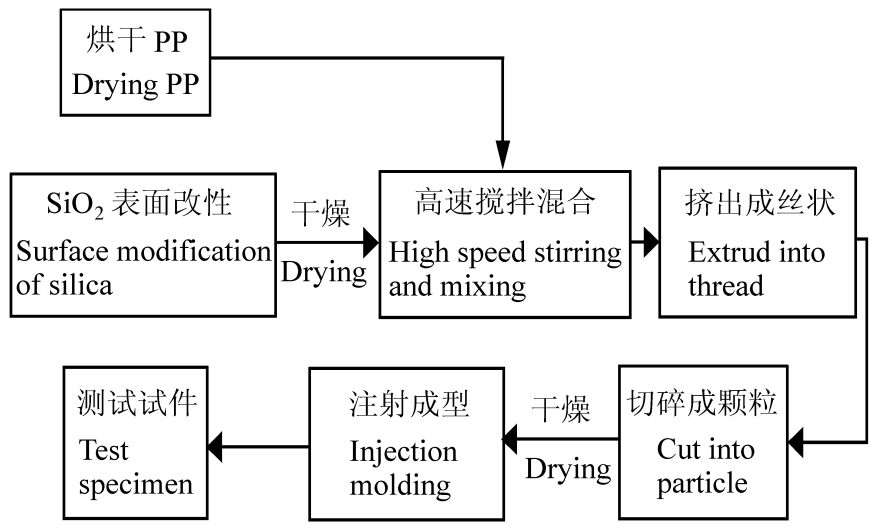



图1　$SiO_2$/PP复合材料制备工艺流程

Fig.1　The preparation process for the $SiO_2$/PP composites

### 1.3 力学性能测试与分析方法

实验中主要测试了纯PP及 $SiO_2$/PP复合材料的拉伸性能、弯曲性能和冲击性能。采用万能电子拉力实验机(DXLL-10000，上海化工装备有限公司化工机械四厂)在室温下测试复合材料的拉伸强度、拉伸模量(GB/T 1040-1992)和弯曲强度、弯曲模量(GB 9341-2000)；采用塑料冲击试验机(XJ-300，吴忠材料试验机厂)在室温下测量复合材料的缺口冲击强度(GB/T 1843-1996)。并用场发射扫描电子显微镜(LEO 1530 VP，德国LEO公司)和原子力显微镜(Nanoscope Ⅳ，美国Digital Instrument公司)观察复合材料冲击断面形貌。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 $SiO_2$/PP复合材料的力学性能

#### 2.1.1 拉伸性能

表1列出了不同配方的 $SiO_2$/PP复合材料试样，其中试样0为纯PP试样，试样1～13中加入了一定量的抗氧剂和润滑剂，试样12、13中的 $SiO_2$ 未经过表面改性处理，试样1～11中的 $SiO_2$ 均经过了表面改性处理。从表1中可以看出，填充了 $SiO_2$ 的试样1～13的拉伸强度和拉伸模量都比未填充 $SiO_2$ 的试样0(纯PP试样)高。

颗粒的大小也影响 $SiO_2$/PP复合材料的拉伸性能。试样1、2、3的拉伸强度分别为32.75、32.59、33.03 MPa，比试样4～9的拉伸强度高，表明纳米 $SiO_2$/PP复合材料的拉伸强度比微米 $SiO_2$/PP复合材料高。相同填充量(10%)、不同颗粒大小的试样3、5、8的拉伸强度分别为33.03、29.27、28.04 MPa，表明颗粒越细，改善PP复合材料拉伸

表1 $SiO_2$/PP 复合材料的拉伸性能

Table 1 Tensile property of the $SiO_2$/PP composites

| Specimen | $SiO_2$ size | Mass fraction/ % | Tensile strength/ MPa | Tensile modulus/ MPa |
|---|---|---|---|---|
| 0 | - | 0 | 22.42 | 411.85 |
| 1 | 16 nm | 2 | 32.75 | 454.30 |
| 2 | 16 nm | 5 | 32.59 | 472.30 |
| 3 | 16 nm | 10 | 33.03 | 498.95 |
| 4 | 3 μm | 5 | 27.90 | 485.11 |
| 5 | 3 μm | 10 | 29.27 | 537.46 |
| 6 | 3 μm | 20 | 26.45 | 578.35 |
| 7 | 100 μm | 5 | 30.18 | 469.43 |
| 8 | 100 μm | 10 | 28.04 | 479.84 |
| 9 | 100 μm | 20 | 26.69 | 568.00 |
| 10* | Silica mixture 1 | 16 | 28.93 | 569.73 |
| 11* | Silica mixture 2 | 32 | 29.34 | - |
| 12 | 3 μm | 10 | 28.00 | 530.49 |
| 13 | 100 μm | 10 | 26.94 | 522.85 |

* The mass ratio of silica mixture is 16 nm:3 μm:100 μm = 0.2:1:2

强度的效果越好。

表面改性对$SiO_2$/PP 复合材料的拉伸性能同样有影响。在填充质量分数为10 %时，平均粒径为3 μm 的$SiO_2$改性前，拉伸强度为28.00 MPa(试样12)，而改性后，拉伸强度变为29.27 MPa(试样5)；平均粒径为100 μm 的$SiO_2$改性前，拉伸强度为26.94 MPa(试样13)，而改性后，拉伸强度为28.04 MPa(试样8)。表明$SiO_2$表面改性后，改善了其在PP 基体中的分散性、与基体之间的相容性和界面粘结性，因此改性后的$SiO_2$/PP 复合材料的拉伸性能得到了提高。

不同颗粒大小$SiO_2$混合物同样也影响$SiO_2$/PP 复合材料的拉伸性能。从表1 中可以看出，试样10(含1% 16 nm $SiO_2$、5% 3 μm $SiO_2$、10% 100 μm $SiO_2$混合物)的拉伸强度为28.93 MPa，而试样4(含5% 3 μm $SiO_2$)的拉伸强度为27.90 MPa、试样8(含10% 100 μm $SiO_2$)的拉伸强度为28.04 MPa；试样11(含2% 16 nm $SiO_2$、10% 3 μm $SiO_2$、20% 100 μm $SiO_2$混合物)的拉伸强度为29.34 MPa，而填充单一粒径$SiO_2$的试样5(10% 3 μm $SiO_2$)的拉伸强度为29.27 MPa、试样9(含20% 100 μm $SiO_2$)的拉伸强度为26.69 MPa。由此可见，不同颗粒大小$SiO_2$混合物的综合协调效应改善了复合材料的拉伸性能。

### 2.1.2 弯曲性能

表2 试样的配方和表1 相同。从表2 中可以看出，填充了$SiO_2$的试样1～13 的弯曲强度和弯曲模量都比未填充$SiO_2$的试样0(纯PP 试样)大，但是没有拉伸强度明显，说明复合材料的弯曲性能对$SiO_2$的加入不敏感，变化没有拉伸性能明显；颗粒大小对$SiO_2$/PP 复合材料弯曲强度的影响也很小；表面改性后$SiO_2$/PP 复合材料的弯曲性能比未改性前稍低一些。这是由于拉伸和弯曲过程中裂纹的产生过程不同。

表2 $SiO_2$/PP 复合材料的弯曲性能和冲击性能

Table 2 Flexural and impact properties of the $SiO_2$/PP composites

| Sample | Flexural strength/ MPa | Flexural modulus/ MPa | Notch impact strength/ ($kJ \cdot m^{-2}$) |
|---|---|---|---|
| 0 | 20.059 | 831.536 | 33.63 |
| 1 | 21.589 | 1029.151 | 53.27 |
| 2 | 22.029 | 1023.364 | 50.65 |
| 3 | 22.965 | 1060.268 | 47.68 |
| 4 | 22.554 | 958.800 | 37.61 |
| 5 | 22.571 | 994.527 | 13.32 |
| 6 | 26.204 | 1245.380 | 4.46 |
| 7 | 22.280 | 954.075 | 32.28 |
| 8 | 22.807 | 1033.823 | 12.08 |
| 9 | 25.811 | 1110.557 | 4.44 |
| 10 | 26.052 | 1050.030 | 7.44 |
| 11 | 32.776 | 1565.009 | 2.20 |
| 12 | 24.496 | 1004.987 | 10.11 |
| 13 | 24.076 | 1110.970 | 9.14 |

不同颗粒大小$SiO_2$混合物对$SiO_2$/PP 复合材料的弯曲性能的影响与对拉伸性能的影响相似。从表2 中可以看出，试样10 的弯曲强度为26.052 MPa，而试样4 的弯曲强度为22.554 MPa、试样8 的弯曲强度为22.807 MPa；试样11 的弯曲强度为32.776 MPa，而试样5 的弯曲强度为22.571 MPa、试样9 的弯曲强度为25.811 MPa。由此可见，不同颗粒大小$SiO_2$混合物的综合协调效应改善其复合材料的弯曲性能。

2.1.3　冲击性能

表2 中列出了不同配方的$SiO_2$/ PP 复合材料的冲击强度。从表中可以看出，颗粒大小影响$SiO_2$/ PP 复合材料的冲击性能。不同含量的纳米$SiO_2$ 试样1、2、3 的冲击强度分别为53.27、50.65、47.68 kJ/ $m^2$，而纯 PP 试样0 的冲击强度为33.63 kJ/ $m^2$。显然，填充了纳米$SiO_2$ 以后，$SiO_2$/ PP 复合材料的冲击强度高于纯PP，且比不同填充量的微米$SiO_2$ 试样4～9 的冲击强度都高。这是由于纳米$SiO_2$ 表面活性高、与PP 基体界面强度高等优点，使纳米$SiO_2$/ PP 复合材料在冲击过程中吸收了大量的能量，因此纳米$SiO_2$/ PP 复合材料的韧性提高。

从表2 可看出，$SiO_2$/ PP 复合材料，相同填充量(5%)、不同颗粒大小的$SiO_2$ 增强试样2、4、7 的冲击强度分别为50.65、37.61、32.28 kJ/ $m^2$；在相同的填充量下(10%)、不同颗粒大小的$SiO_2$ 增强试样3、5、8 的冲击强度分别为47.68、13.32、12.08 kJ/ $m^2$。表明颗粒越细，改善PP 冲击性能的效果越好。

表面改性同样影响$SiO_2$/ PP 复合材料的冲击性能。在填充量为10% 时，平均粒径为3 μm 的$SiO_2$ 改性前，冲击强度为10.11 kJ/ $m^2$(试样12)，而改性后，冲击强度为13.32 kJ/ $m^2$(试样5)；平均粒径为100 μm 的$SiO_2$ 改性前，冲击强度为9.14 kJ/ $m^2$(试样13)，而改性后，冲击强度为12.08 kJ/ $m^2$(试样8)。表明$SiO_2$ 表面改性后，改善了其在PP 基体中的分散性，及与基体之间的相容性和界面粘结性，因此改性后的$SiO_2$/ PP 复合材料的冲击性能得到了提高，与表面改性对$SiO_2$/ PP 复合材料的拉伸性能的影响一致。

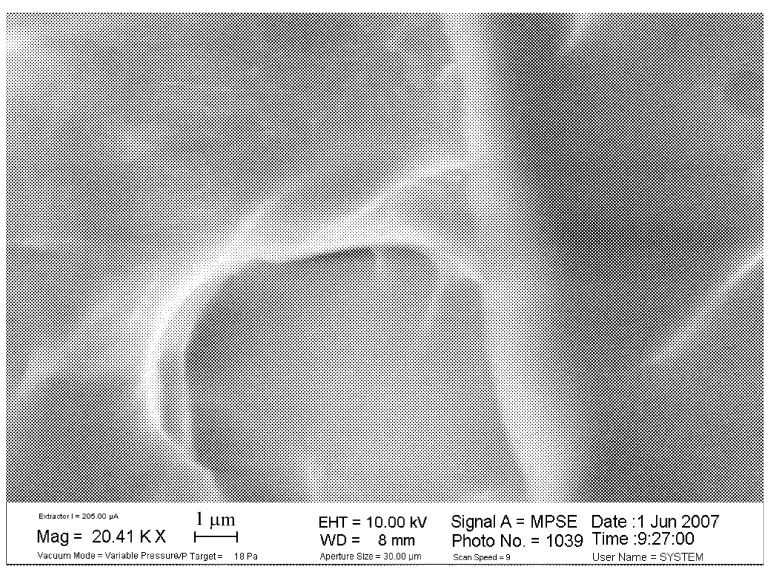
不同颗粒大小$SiO_2$ 混合物对$SiO_2$/ PP 复合材料的冲击性能影响见表2。可以看出，试样10 的冲击强度为7.44 kJ/ $m^2$，而试样4 的冲击强度为37.61 kJ/ $m^2$、试样8 的冲击强度为12.08 kJ/ $m^2$；试样11 的冲击强度为2.20 kJ/ $m^2$，而试样5 的冲击强度为13.32 kJ/ $m^2$、试样9 的冲击强度为4.44 kJ/ $m^2$。可以看出，填充不同颗粒大小$SiO_2$ 混合物的复合材料冲击强度比填充其混合物中任一种粒径$SiO_2$ 的复合材料的冲击性能都低，并且更接近粒径较大的试样的冲击性能。由此可见，不同颗粒大小$SiO_2$ 混合物在冲击过程中并没有很好地发挥协同效应。

**2.2**　复合材料的冲击断面表面形貌分析

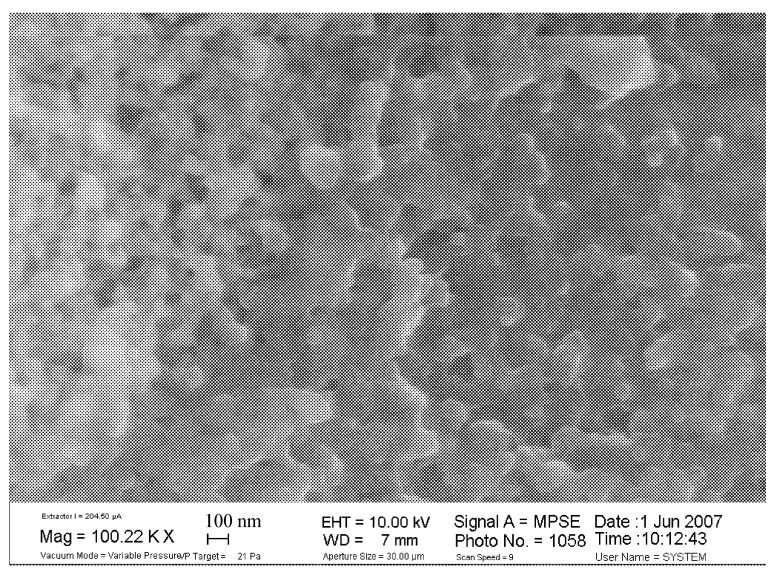
2.2.1　SEM 表征

图2 为填充纳米$SiO_2$ 前后PP 材料试样冲击断面的SEM 照片。纯PP 材料试样冲击断面较平整光滑，呈脆性断裂特征，如图2(a) 所示；而填充纳米$SiO_2$ 后的复合材料试样冲击断面明显变得粗糙，纹路变得细小，有很多小细纹产生，这说明有大量银纹生成，塑性变形明显增多，屈服现象明显，如图2(b) 所示。说明纳米$SiO_2$/ PP 复合材料试样在冲击断裂的过程中发生了大量的塑性变形，吸收了大量的能量，使冲击韧性明显提高。

不同填充量(10%、20%) 的$SiO_2$/ PP 复合材料试样冲击断面形貌的SEM 照片分别如图3(a)、3(b) 所示。填充量为10% 的$SiO_2$/ PP 复合材料试样冲击断面有一定的屈服现象；填充量为20% 的




(a) Pure PP




(b) 16 nm $SiO_2$ (10%, modified)

图2　纯PP 和$SiO_2$/ PP 复合材料试样冲击断面的SEM 照片

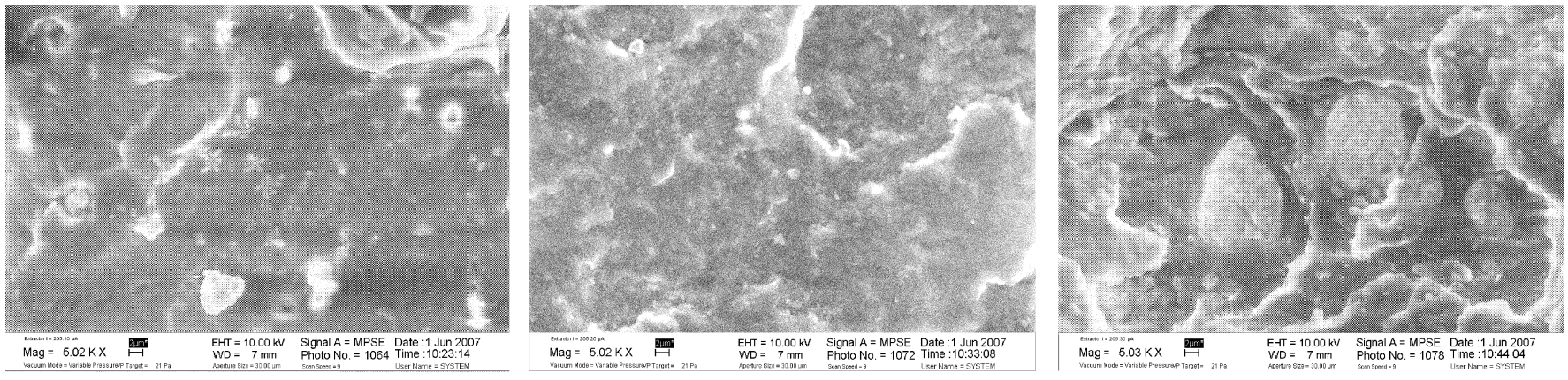
Fig.2　SEM photographs of the fractured surface of pure PP and $SiO_2$/ PP composite

$SiO_2$/PP 复合材料试样冲击断面很平滑, 几乎看不到基体的屈服。这可能是由于填充量大, $SiO_2$ 粒子增多, 分散困难, 易产生粒子"聚集"现象, "聚集"粒子的表面缺陷容易引起 PP 基体损伤而产生应力集中, 团聚粒子也易产生相互滑移, 使复合材料的韧性变差。

在 $SiO_2$ 含量为 10% 时, 表面改性和未改性 $SiO_2$ 的 $SiO_2$/PP 复合材料试样冲击断面 SEM 照片分别如图 3(a)、3(c) 所示。对比可以看出, 改性后的 $SiO_2$ 均匀地分散于 PP 基体中, 没有明显的团聚现象, 颗粒与基体之间的界面相容性较好, 没有明显界面, 且有一定的屈服现象; 而未改性的 $SiO_2$ 在基体中分散性差, 有明显的团聚现象。因此改性后的 $SiO_2$ 较未改性的 $SiO_2$ 填充 PP 韧性好, 这与前面的力学性能的分析结果一致。

2.2.2 AFM 表征

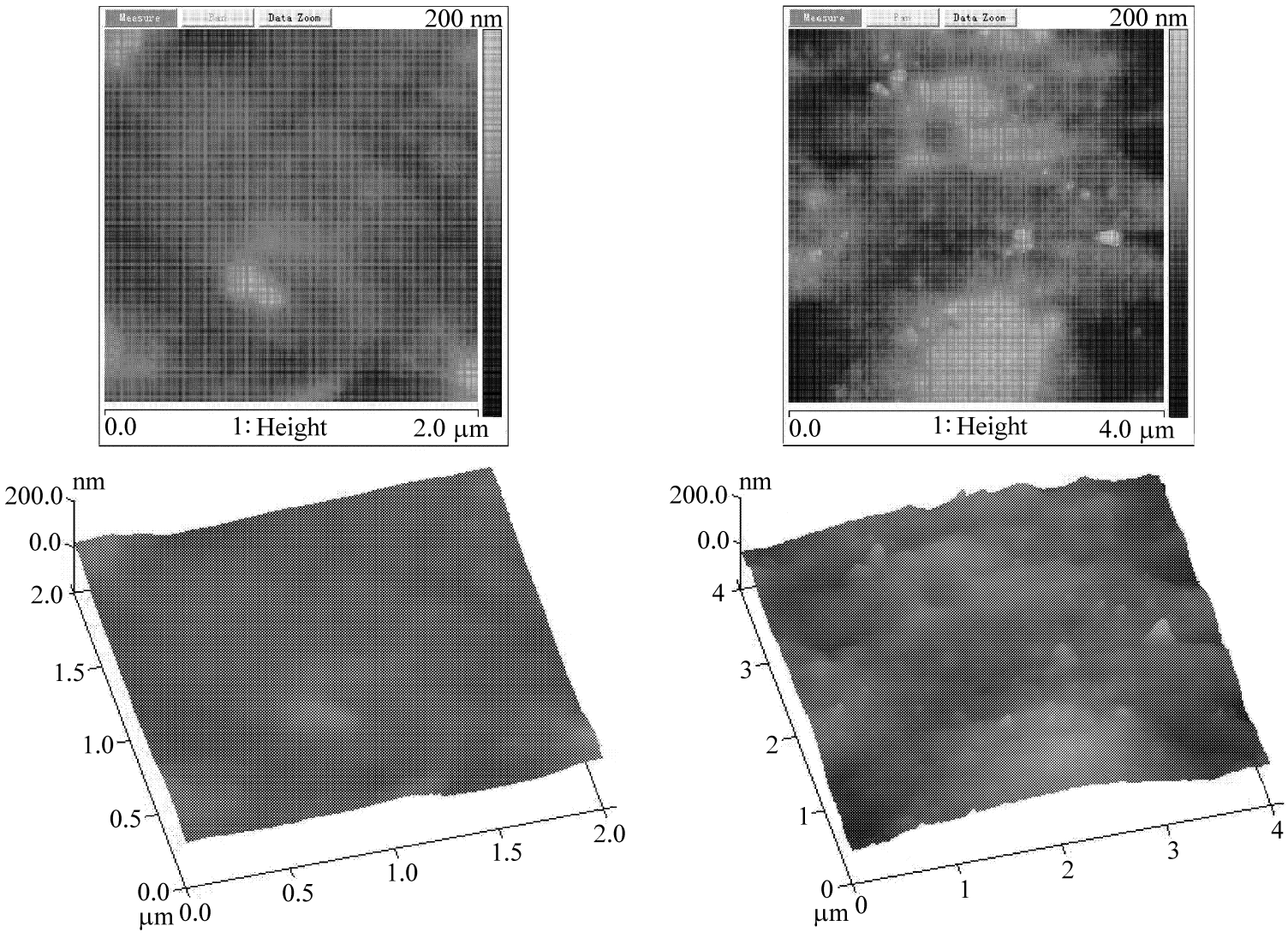
在 2 μm×2 μm 的范围内, 用 AFM 观察高度约为 200 nm 的纯 PP 冲击断面形貌; 在 4 μm×




(a) 3 μm $SiO_2$ (10%, modified) (b) 3 μm $SiO_2$ (20%, modified) (c) 3 μm $SiO_2$ (10%, unmodified)

图 3 $SiO_2$/PP 复合材料试样冲击断面 SEM 照片

Fig.3 SEM photographs of the fractured surface of $SiO_2$/PP composites




(a) Pure PP (b) 16 nm $SiO_2$ (10%, modified)

图 4 纯 PP 和 $SiO_2$/PP 复合材料试样冲击断面的 AFM 形貌

Fig.4 AMF images of the fractured surface of pure PP and $SiO_2$/PP composites

4 μm的范围内，用AFM观察高度约为200 nm的$SiO_2$/PP复合材料冲击断面形貌。从图4(a)可以看出，纯PP冲击断面较平整光滑，呈脆性断裂特征；而填充纳米$SiO_2$(10%)后的复合材料试样冲击断面较粗糙，纹路细小，在PP基体表面有许多超细粒子，且分散均匀，如图4(b)所示。这与SEM的分析结果相一致。

## 3 结　论

(1) 纳米$SiO_2$填充到PP基体中后，可以明显改善PP材料的缺口冲击性能、拉伸性能和弯曲性能，复合材料的韧性、刚性和强度同时得到改善。

(2) $SiO_2$含量相同时，颗粒越细，$SiO_2$/PP复合材料的力学性能越好。

(3) 与未改性$SiO_2$相比，改性后$SiO_2$填充到PP基体中后，明显改善了颗粒在基体中的分散性，基体与颗粒之间界面相容性好，没有明显界面，且有明显的屈服现象，$SiO_2$/PP复合材料的综合力学性能好。

(4) 不同颗粒大小$SiO_2$混合物填充PP基体后，其协同效应改善其拉伸、弯曲性能，对PP基体具有增强效果，但其韧性降低。

## 参考文献:


[1] Kurauchi T, Ohta T. Energy absorption in blends of polycarbonate with ABS and SAN [J]. Journal of Material Science, 1984, 19(5): 1699-1702.

[2] Koo K K, Inoue T, Miyasaka K. Toughened plastics consisting of brittle particles and ductile matrix [J]. Polymer Engineering and Science, 1985, 25(12): 741-746.

[3] 李东明，漆宗能. 碳酸钙增强聚丙烯复合材料的断裂韧性[J]. 高分子材料科学与工程, 1991, 7(2): 18-25.
Li Dongming, Qi Zongneng. The fracture toughness $CaCO_3$ reinforced polypropylene composite [J]. Polymeric Materials Science & Engineering, 1991, 7(2): 18-25.

[4] 冯嘉春，陈鸣才. 无机刚性粒子增韧高分子研究进展[J]. 中国塑料, 2000, 14(11): 10-15.
Feng Jiachun, Chen Mingcai. Advance in polymers toughened by rigid inorganic partides [J]. China Plastics, 2000, 14(11): 10-15.

[5] Jancar J, Dibenedetto A T, Dianselmo A. Effect of adhesion of the fracture toughness of calcium carbonate-filled polypropylene [J]. Polymer Engineering and Science, 1993, 33(9): 559-563.

[6] Fu Q, Wang G H. Effect of morphology on brittle-ductile transition of HDPE/$CaCO_3$ blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1993, 49(11): 1985-1988.

[7] Fu Q, Wang G H, Liu C X. Polyethylene toughened by $CaCO_3$ particles: The interface behaviour and fracture mechanism in high density polyethylene/$CaCO_3$ blends [J]. Polymer, 1995, 36(12): 2397-2401.

[8] Bartczak Z, Argon A S, Cohen R E, Weinberg M. Toughness mechanism in semi-crystalline polymer blends Ⅱ: High-density polyethylene toughened with calcium carbonate filler particles [J]. Polymer, 1999, 40(9): 2347-2365.

[9] Lee J, Yee A F. Inorganic particle toughening Ⅱ: Toughening mechanisms of glass bead filled epoxies [J]. Polymer, 2001, 42(2): 589-597.

[10] 季光明，陶　杰，汪　涛，杨斌鹏. 纳米$TiO_2$填充改性PP的力学性能研究[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 100-106.
Ji Guangming, Tao Jie, Wang Tao, Yang Binpeng. Investigation on the mechanical properties of nano-$TiO_2$/PP composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 100-106.

[11] ingh R P, Zhang M, Chan D. Toughening of a brittle thermosetting polymer: Effects of reinforcement particle size and volume fraction [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(4): 781-788.

[12] hio Y S, Argon A S, Cohen R E, Weinberg M. Toughening of isotactic polypropylene with $CaCO_3$ particles [J]. Polymer, 2002, 43(8): 3661-3674.

[13] a Chuanguo, Rong Minzhi, Zhang Mingqiu, Friedrich K. Irradiation-induced surface graft polymerization onto calcium carbonate nanoparticles and its toughening effects on polypropylene composites [J]. Polymer Engineering and Science, 2005, 45(4): 529-538.

[14] han Chiming, Wu Jingshen, Li Jianxiong, Cheung Ying-Kit. Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites [J]. Polymer, 2002, 43(10): 2981-2992.

[15] ang G, Chen X Y, Huang R, Zhang L. Nano-$CaCO_3$/polypropylene composites made with ultra-high-speed mixer [J]. Journal of Materials Science Letters, 2002, 21(3): 985-986.

[16] ang Kun, Yang Qi, Li Guangxian, Sun Yajie, Feng Decai. Morphology and mechanical properties of polypropylene/calcium carbonate nanocomposites [J]. Materials Letters, 2006, 60(6): 805-809.

[17] 曹飞龙，李焕喜，沈志刚. 飞灰空心微珠/聚丙烯复合材料的弹性模量预测[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(6): 678-681.
Cao Feilong, Li Huanxi, Shen Zhigang. Modulus prediction of a polymer matrix composite reinforced with fly-ash hollow microspheres [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(6): 678-681.

[18] 卢子兴，石上路，邹　波，寇长河，张子龙，李鸿运. 环氧树脂复合泡沫材料的压缩力学性能[J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 17-22.
Lu Zixing, Shi Shanglu, Zou bo, Kou Changhe, Zhang

Zilong, Li Hongyun. Compressive behavior of epoxy syntactic foam[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 17-22.

[19] usto Pellegrino, Ragosta Giuseppe, Scarinzi Gennaro, Mascia Leno. Toughness enhancement of polyimides by in situ generation of silica particles [J]. Polymer, 2004, 45(12): 4265-4274.

[20] u S H. A generalized criterion for rubber toughening: The critical matrix ligament thickness [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1988, 35(2): 549-561.

[21] 郑水林, 卢寿慈. 重质碳酸钙/硅灰石复合填料的填充性能与填充增强原理研究[J]. 中国粉体技术, 2002, 8(1): 1-5.
Zheng shuilin, Lu Shouci. Study on ground-calcium carbonate and wollastonite composite fillers filling properties and reinforcement mechanisms [J]. China Powder Science and Technology, 2002, 8(1): 1-5.

# KEYWORDS FOR COMPOSITES

## A: MATERIAL

aramid fibre
carbon fibre
carbon-carbon composites
ceramic fibre
ceramic-matrix composites
discontinuous reinforcement
fabrics/textiles
fibres
foams
glass fibres
glasses
honeycomb
hybrid
intermetallics
lamina/ply
laminates
layered structures
metal-matrix composites
moulding compounds
nano-structures
particle-reinforcement
plates
polymer(textile)fibre
polymer-matrix composites (PMCs)
preform
prepreg
recycling
resins
smart materials
strand
tape
thermoplastic resin
thermosetting resin
thin films
tow
3-dimensional reinforcement
wood
yarn

## B: PROPERTY

adhesion
anisotropy
buckling
chemical properties
corrosion
creep
cure behaviour
damage tolerance
debonding
defects
delamination
directional orientation
elasticity
electrical properties
embrittlement
environmental degradation
fatigue
fibre/matrix bond
fracture
fracture toughness
fragmentation
hardness
high-temperature properties
impact behaviour
interface/interphase
internal friction/damping
magnetic properties
mechanical properties
microstructure
optical properties/techniques
physical properties
plastic deformation
porosity
residual/internal stress
rheological properties
strength
stress concentrations
stress relaxation
stress transfer
surface properties
thermal properties
thermomechanical
transverse cracking
vibration
wear
wettability

## C: ANALYSIS

analytical modelling

(下转146 页)