复合材料学报 第23卷 第4期 8月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 4 August 2006

文章编号: 1000-3851(2006)04-0036-05

无机填料增强聚苯酯/聚四氟乙烯复合材料的力学和摩擦磨损性能

黄承亚*[1], 龚克成[1], 蔡立芳[1], 李 红[2]
(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510641; 2. 广东工业大学 轻工化工学院, 广州 510090)

摘 要: 采用石墨/二硫化钼填充改性聚苯酯/聚四氟乙烯复合材料, 研究了复合材料的力学性能和摩擦磨损性能。研究表明, 石墨和 MoS_2 的加入不仅能够很好地改善 Ekonol/PTFE 复合材料的力学性能, 使复合材料的拉伸强度、弯曲强度和硬度均有所提高, 而且还使 Ekonol/PTFE 复合材料的摩擦系数增加, 磨损体积减小, 耐磨性能显著提高。当 Ekonol 含量为 5%, 石墨/二硫化钼总含量为 8%时, 拉伸强度、弯曲强度分别提高了 31%和 41%, 硬度值约提高了 7.3%。SEM 分析表明, Ekonol/石墨/MoS_2/PTFE 复合材料的磨损主要以粘着磨损为主。

关键词: 聚四氟乙烯; 聚苯酯; 石墨; 二硫化钼; 性能
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

Mechanics, friction and wear properties of inorganic filled Ekonol/PTFE composites

HUANG Chengya*[1], GONG Kecheng[1], CAI Lifang[1], LI Hong[2]
(1. College of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Faculty of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: The mechanics, friction and wear properties of graphite/MoS_2 filled Ekonol/PTFE composites were studied. The result shows that the addition of graphite/MoS_2 not only increases the mechanical properties of Ekonol/PTFE composites, but also causes the friction coefficient to increase, the wear volume to decrease, and the abrasive resistance to remarkably increase. When Ekonol and graphite/MoS_2 mass fractions are 5% and 8%, the tensile strength and bend strength of composites increase 31% and 41%, and the hardness increases 7.3% too. The wear mechanism of Ekonol/graphite/MoS_2/PTFE composites is adhesive wear, as indicated by SEM analysis of the worn surface.

Keywords: PTFE; Ekonol; graphite; MoS_2; properties

聚四氟乙烯是一种特殊的工程塑料, 具有优异的自润滑性能和低的摩擦系数[1], 是已知固体材料中最好的干摩擦材料之一。但由于 PTFE 的表面能极低, 形成的转移膜在对偶件上的附着能力较差, 导致 PTFE 作摩擦材料时具有严重的磨损[2]。目前人们对 PTFE 磨损性能的改性进行了广泛的研究, 主要的方法是通过向 PTFE 内填充有机高分子、纤维、无机粉末等填料进行改性[3-6]。有机高分子聚苯酯可与任意比例的 PTFE 共混, 聚苯酯是很好的热致型液晶, 熔融状态下易于形成微纤, 有利于提高复合材料的承载能力, 有利于在对偶件表面形成薄而均匀的转移膜, 阻止 PTFE 带状晶体的脱落, 提高了 PTFE 的耐磨性能[4,7], 因此聚苯酯填充 PTFE 是 PTFE 改性的常用方法之一。聚苯酯填充后虽然摩擦磨损性能有所改善, 但力学性能却有所下降, 本文作者研究了石墨/二硫化钼无机填料的加入对聚苯酯/PTFE 力学性能和摩擦磨损性能的影响, 旨在提高聚苯酯/PTFE 复合材料的力学性能和耐磨性能。

1 实验部分

1.1 原材料

聚四氟乙烯(PTFE)粉末, 牌号 M18, 表观密度 0.47 g/mL, 平均粒径 38 μm, 日本大金工业株

收稿日期: 2005-08-18; 收修改稿日期: 2006-01-09
基金项目: 国家自然科学基金(50175026); 广州市科技局专利成果示范项目
通讯作者: 黄承亚, 副教授, 研究方向为功能高分子材料及其改性 E-mail: pshcylh@scut.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式会社；聚苯酯(Ekonol)粉末，牌号 CGZ-351(I)，平均粒径 75 μm，化工部晨光研究所；二硫化钼(MoS_2)：工业品；胶体石墨：工业品。

1.2 PTFE 复合材料的制备

将干燥后的聚苯酯、石墨和 MoS_2 与 PTFE 粉料在高速混合机中充分混合，过筛，筛去在混合过程中团聚过大的粒子，将混合的物料倒入自制的模具压缩腔内，置于压力机上进行冷压成型，然后烧结成型，自然冷却后得到 PTFE 复合材料坯样。所得到的 PTFE 复合材料坯件应表面光滑、无裂纹、无明显变形。将所得坯料用裁样机制成标准试样用于性能测试。

1.3 分析和测试

采用 JSM-5910 型扫描电子显微镜观察试样表面形貌，试样表面真空喷 Pt 后直接观察。采用德国 ZEISS 公司的 Axiolab Polarizing Microscope 光学显微镜观察。采用日本岛津公司 AG-1 型电子万能实验机 SFIMADZU 测定试样的拉伸强度和弯曲强度。采用营口材料实验机厂型号为 XHS 的邵氏橡塑硬度计测定。在国产 MM-200 型磨损实验机上测得。实验按 GB 3960-83 测定，摩擦磨损实验接触形式为环-块式，试环为 45# 钢，试样尺寸为 20 mm ×7 mm ×4 mm，室温下干摩擦，对磨时间 30 min，负荷为 200 N。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

在前期实验工作的基础上，本文中选择了石墨与 MoS_2 总含量为 8 %(质量分数，下同)，改变聚苯酯(Ekonol)含量考察了三元填料聚苯酯/石墨/二硫化钼对 PTFE 力学性能的影响。图 1(a)、图 1(b)分别为复合材料的拉伸强度和弯曲强度与 Ekonol 含量的关系曲线(其中 Ekonol 含量为零的点分别为纯 PTFE 的拉伸强度和弯曲强度)，可以看出在 PTFE 中加入 Ekonol 后，复合材料的力学性能有所下降，加入石墨/MoS_2 后，复合材料的拉伸强度和弯曲强度在 Ekonol 含量相同的情况下均比 Ekonol/PTFE 复合材料的拉伸强度、弯曲强度有所提高，尤其是在 Ekonol 含量为 5 %时，力学性能提高最为显著，其中拉伸强度、弯曲强度分别提高了 31 %和 41 %，表明石墨/MoS_2 的加入能有效改善 Ekonol/PTFE 复合材料的力学性能。复合材料力学性能的改善，一方面是由于加入了具有层片状的石墨，能在 Ekonol 和 PTFE 之间起到润滑作用，有利于 Ekonol 在 PTFE 中的分散[8]，且石墨具有很好的导热性能(石墨的导热系数为 116.3～235 W/(m·K))[9]，热容量大，热强度高，能够很好地改善复合材料的烧结性能；另一方面石墨和 MoS_2 的加入能够填补 Ekonol 与 PTFE 之间的空穴，可使非晶区由于粒子填充而变得密实[10]，在受外界作用力的时候，不易变形断裂，所以石墨和 MoS_2 的加入对基体具有协同作用，提高了 Ekonol/PTFE 复合材料的力学性能。从图 1 还可看出，当 Ekonol 含量大于 10 %时，随着 Ekonol 含量的增加，Ekonol/石墨/MoS_2/PTFE 复合材料的力学性能的提高幅度有所减小，但仍提高了 12 %～15 %，这可能是因为当 Ekonol 含量较高时，石墨和 MoS_2 在复合材料中的作用效果相对减小所致。

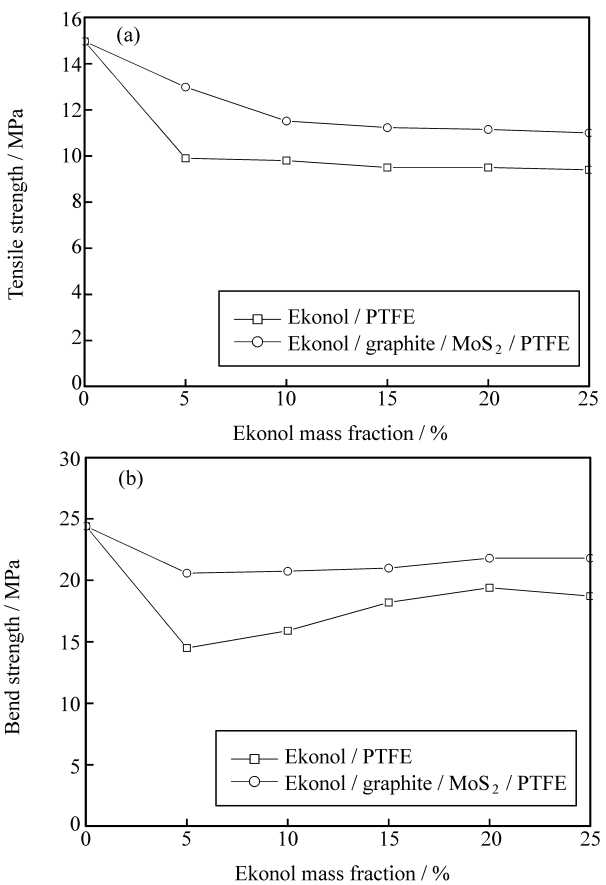


图 1 聚苯酯含量对 PTFE 复合材料拉伸强度(a)和弯曲强度(b)的影响

Fig. 1 Effect of Ekonol mass fraction on tensile strength and bend strength of PTFE composites

图 2 为 PTFE 复合材料的邵氏硬度随 Ekonol

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

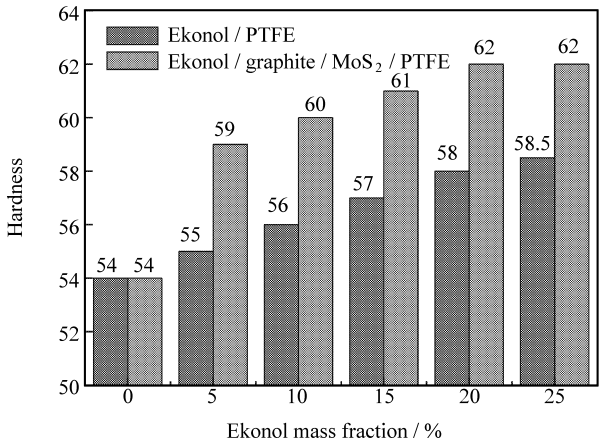


图 2　Ekonol 含量对 PTFE 复合材料邵氏硬度的影响

Fig. 2　Effect of Ekonol mass fraction on the hardness of PTFE composites

含量的变化曲线。由图 2 可知，随着 Ekonol 含量的增加，Ekonol/ PTFE 复合材料和 Ekonol/ 石墨/ MoS_2/ PTFE 复合材料的硬度与纯 PTFE 相比均有所增加，且 Ekonol/ 石墨/ MoS_2/ PTFE 复合材料的硬度增加更为明显，石墨/ MoS_2 的加入使 Ekonol/ PTFE 复合材料的邵氏硬度提高了 7. 3 %，表明石墨和 MoS_2 的加入能有效改善 Ekonol/ PTFE 复合材料的硬度。硬度增加一方面是由于石墨和 MoS_2 本身硬度均大于 PTFE 的硬度，在 Ekonol/ PTFE 中加入石墨和 MoS_2 必然会使硬度进一步提高；另一方面石墨和 MoS_2 的加入填补了 Ekonol 与 PTFE 之间的空穴，也使复合材料的硬度增加。

2.2　摩擦磨损性能

图 3 为 Ekonol 含量对 PTFE 复合材料摩擦系数和磨损体积的影响。从图 3(a) 和图 3(b) 可看出，在一定载荷和摩擦速度下，随 Ekonol 含量的增加，Ekonol/ PTFE 复合材料的摩擦系数表现出先略有减小后有所增加的趋势，磨损体积不断减小；Ekonol/ 石墨/ MoS_2/ PTFE 复合材料的摩擦系数随 Ekonol 含量的增加逐渐增大，磨损体积也逐渐减小。在实验范围内，Ekonol 含量相同的情况下，Ekonol/ 石墨/ MoS_2/ PTFE 复合材料的摩擦系数比 Ekonol/ PTFE 复合材料提高了 4 %～14 %，磨损体积减小了 5 %～40 %，表明填料石墨和 MoS_2 的加入使 Ekonol/ PTFE 耐磨性能显著提高。这是因为添加石墨和 MoS_2 使 Ekonol/ PTFE 复合材料的力学性能和硬度得到了很好的改善。材料强度的增加使得抗塑性变形能力提高，其耐磨性能也提高；硬

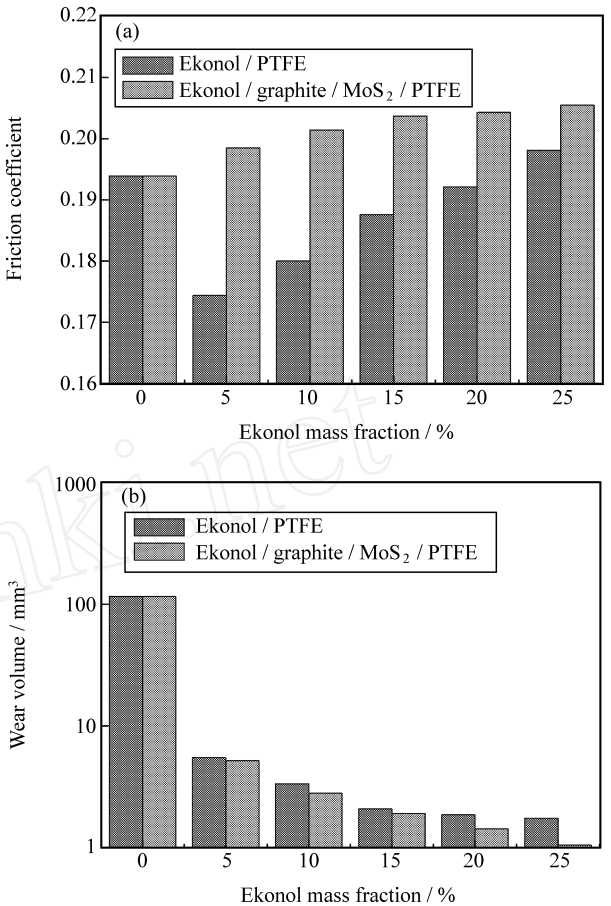


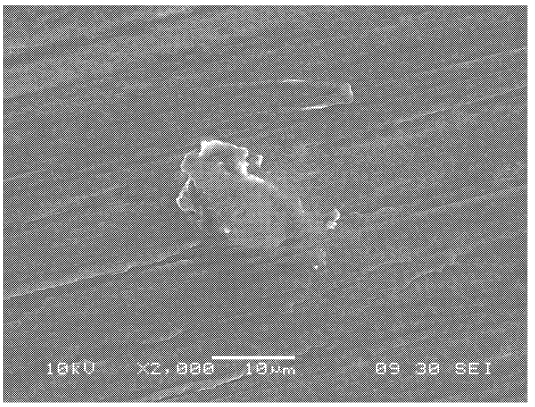
图 3　Ekonol 含量对 PTFE 复合材料摩擦系数 (a) 和磨损体积 (b) 的影响

Fig. 3　Effect of Ekonol mass fraction on the friction coefficient (a) and the wear volume loss (b) of PTFE composites

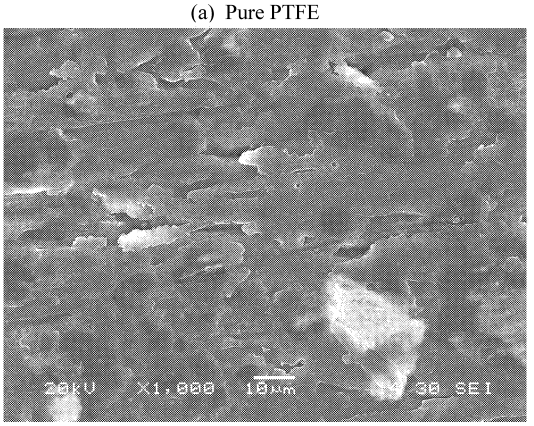
度增加，材料抗外物压入的能力增强，松散磨料难以刺入基体，有效减小了磨料压入复合材料表面的数量和深度，从而减小了磨粒磨损，可使 Ekonol/ 石墨/ MoS_2 在对磨面易形成稳定的转移膜[11]，所以石墨和 MoS_2 的加入对提高 Ekonol/ PTFE 复合材料的耐磨性能起到了很好的作用。当石墨和 MoS_2 总含量为 8 %，Ekonol 含量为 20 % 时，Ekonol/ 石墨/ MoS_2/ PTFE 复合材料的摩擦磨损性能达到了最佳值。

纯 PTFE 和 Ekonol/ 石墨/ MoS_2/ PTFE 复合材料试样的磨损表面的 SEM 照片如图 4 所示，纯 PTFE 磨损后的表面平整，存在着粘着转移痕迹 (图 4(a))，PTFE 是由带状晶片与非晶相构成，两相间的结合力较弱，PTFE 的表面能很低，在摩擦过程中易发生向对磨面上转移，导致 PTFE 片状脱落。复合材料磨损表面具有不同的形貌，当

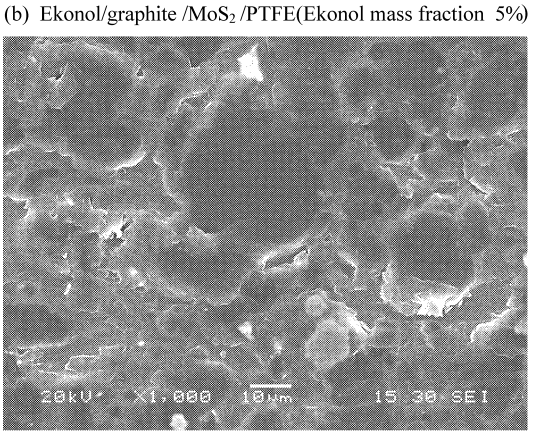
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) Pure PTFE



(b) Ekonol/graphite /MoS_2 /PTFE(Ekonol mass fraction 5%)



(c) Ekonol/graphite/MoS_2 /PTFE(Ekonol mass fraction 20%)

图 4 纯 PTFE 和 Ekonol/石墨/MoS_2/PTFE 复合材料磨损后的表面 SEM 形貌

Fig. 4 SEM images of worn surface of pure PTFE and Ekonol/graphite/MoS_2/PTFE composites

Ekonol 含量较少(5 %)时(图 4(b))，磨损表面存在典型的片状粘着磨损痕迹和硬质填料颗粒，有少量基体脱落；当 Ekonol 含量较高(20 %)时(图 4(c))，基体与填料之间的界面变得模糊密实，磨损表面同样存在片状粘着磨损痕迹和硬质填料颗粒，几乎观察不到基体的脱落，对应的复合材料有较小的磨损体积，表明 Ekonol/石墨/MoS_2 在摩擦过程中不仅提高了基体的承载能力，阻止了 PTFE 与对磨件的直接接触，也有效阻止了 PTFE 从基体中脱落，提高了 PTFE 的抗粘着能力和耐磨性。

3 结 论

(1) 石墨和 MoS_2 无机填料的加入能够很好地改善 Ekonol/PTFE 复合材料的力学性能，使复合材料的拉伸强度和弯曲强度均有所提高，其中最为显著的是当 Ekonol 含量为 5 %，石墨和 MoS_2 总含量为 8 %时，Ekonol/石墨/MoS_2/PTFE 复合材料拉伸强度和弯曲强度比 Ekonol/PTFE 分别提高了 31 %和 41 %。石墨/MoS_2 无机填料的加入还使 Ekonol/PTFE 复合材料的硬度明显提高，邵氏硬度值平均提高了 7.3 %。

(2) 石墨和 MoS_2 无机填料的加入使 Ekonol/PTFE 复合材料的耐磨性显著提高，摩擦系数提高了 4 %～14 %，磨损体积减小了 5 %～40 %。当 Ekonol 含量为 20 %，石墨和 MoS_2 总含量为 8 %时，Ekonol/石墨/MoS_2/PTFE 复合材料的摩擦磨损性能达到了最佳值。

(3) SEM 照片分析得出，Ekonol/石墨/MoS_2/PTFE 复合材料试样的磨损表面主要以轻微的粘着磨损为主，填料的加入提高了 PTFE 基体的承载能力，有效阻止了 PTFE 从基体中脱落，提高了 PTFE 的抗粘着能力和耐磨性。

参考文献：

[1] 石淼森. 固体润滑材料 [M]. 北京：化学工业出版社，2000：182 - 183.

[2] Tanala K, Uchiyama Y, Toyooka S. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene [J]. Wear, 1973, 23: 153 - 172.

[3] Jia J H, Zhou H D, Gao S Q, et al. A comparative investigation of the friction and wear behavior of polyimide composites under dry sliding and water-lubricated condition [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 356: 48 - 53.

[4] Li Fei, Yan Fengyuan, Yu Laigui, et al. The tribological behaviors of copper-coated graphite filled PTFE composites [J]. Wear, 2000, 237(1): 33 - 38.

[5] Cheng Xianhua, Xue Yujun, Xie Chaoying. Tribological investigation of PTFE composite filled with lead and rare earth-modified glass fiber [J]. Materials Letters, 2003, 57(16/17): 2553 - 2557.

[6] 黄 丽，杨 儒，郭江江，等. 微米和纳米 SiO_2 改性聚四氟乙烯的摩擦磨损性能 [J]. 复合材料学报，2004，21(4)：82 - 86.
Huang Li, Yang Ru, Guo Jiangjiang, et al. Friction and wear properties of PTFE-based composites filled with micron and

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

nanometer SiO_2 particles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(4): 82 - 86.

[7] 赵　普, 刘近朱, 王齐华, 等. 聚苯酯、聚酰亚胺填充聚四氟乙烯复合材料的摩擦学性能研究 [J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(6): 851 - 854.
Zhao Pu, Liu Jinzhu, Wang Qihun, et al. Study on the tribological properties of Ekonol-PI-PTFE composites [J]. J Mater Sci & Eng, 2003, 21(6): 851 - 854.

[8] 杨丽君, 王齐华, 宁丽平, 等. 碳纤维及石墨填充聚四氟乙烯复合材料的摩擦学性能研究 [J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(5): 705 - 708.
Yang Lijun, Wang Qihun, Ning Liping, et al. Study on the tribological properties of Cr-Gr-PTFE composites [J]. J Mater Sci & Eng, 2004, 22(5): 705 - 708.

[9] 马希晨, 曹亚峰, 吕秀荣, 等. 石墨、玻纤粉填充四氟乙烯压制品性能研究 [J]. 中国塑料, 1996, 5(10): 45 - 49.
Ma Xichen, Cao Yafeng, Lü Xiurong, et al. Study of properties of PTFE molded products filled with graphite and glass fiber powder [J]. China Plastics, 1996, 5(10): 45 - 49.

[10] Jaydeep K, Ioan N, Efstathios I M. Sliding wear behavior of PTFE composites [J]. Wear, 2002, 252(5/6): 361 - 369.

[11] 豆立新, 龚烈航, 沈　健, 等. 复合材料添加剂对改性 PTFE 的摩擦转移膜的形成和稳定作用 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 65 - 69.
Dou Lixin, Gong Liehang, Shen Jian, et al. Effect of composite additives on the forming and stability of transfer films of modified PTFEs [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 65 - 69.

(上接 28 页)

KEYWORDS FOR COMPOSITES

computational modelling
damage mechanics
finite element analysis (FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/methods

D: TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testing
optical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

E: MANUFACTURING/PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression moulding
consolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up (manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration (RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net