

纤维织物增强树脂基复合材料的重载摩擦性能

姜卫陵 高 阳 陈江涛 王立峰 丁浩亮

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 采用高强纤维与聚四氟乙烯纤维混编织物增强树脂制成自润滑复合材料,在重载摩擦工况下进行了摩擦试验,研究了不同的高强纤维、基体树脂对表面温度、应力、摩擦因数及压缩强度的影响,并对自润滑复合材料的“PTFE 转移润滑膜”的减摩机理进行了分析。结果表明,重载条件下织物 A /改性酚醛树脂综合性能优异,摩擦过程中摩擦表面形成“PTFE 转移润滑膜”,摩擦因数达到 0.018。

关键词 重载,摩擦试验,自润滑复合材料,聚四氟乙烯

Lubricating Properties of Composites Based on Resins Reinforced by Fiber Fabric at High Loads

Jiang Weiling Gao Yang Chen Jiangtao Wang Lifeng Ding Haoliang

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The self-lubricating composites which were made up of enhanced resins and blend fabric woven by high strength fiber and PTFE fiber were investigated. Moreover, wear experiments were carried out by using specimens made of the composites at high loads. The influence of surface temperature, stress, frictional coefficient and compressing properties in terms of different kinds of high strength fibers and resins was also studied. In addition, the mechanism of reducing friction coefficient was analysed because of “PTFE transferd lubricating films of the composites”. The results showed that the comprehensive properties of the composites made by blend fabric A and modified phenolic resin were excellent, and the films were found on the surface of the composites in the course of the friction at high loads. The friction coefficient arrived at 0.018 eventually.

Key words High loads, Frictional experiments, Self-lubricating composites, PTFE

0 引言

聚四氟乙烯(PTFE)是常用的自润滑材料,但其承载能力低,耐磨性差,国内外学者在提高 PTFE 耐磨性方面开展了大量研究^[1-4]。

Shin, Jen Shiao^[5]和 Alireza Khoddamza-deh^[6]分别采用玻璃纤维和 40wt% PTFE + 15wt% T401 + 45wt% 青铜制成的复合材料用于滑动轴承表现出优秀的综合性能。Wang 等^[7]研究了钛钾化合物和短碳纤维改性的 PTFE 复合材料在干、湿和含碱条件下的摩擦磨损行为、机理以及力学性能。Su 等^[8]将混合型玻璃-PTFE 织物浸入含有 4% 纳米 TiO₂ 的酚醛

树脂制成复合材料。

Xiang 等^[9]研制出含有 PTFE60% 表面比例的一种新的 16MnNb 钢-PTFE 复合材料并证实了其充分的润滑性。上述研究主要通过添加碳纤维、玻璃纤维、特种金属、纳米材料、二硫化钼等填料来减小复合材料的磨损率。

本文采用高强纤维与 PTFE 纤维混编织物增强树脂基体制成自润滑复合材料加工成轴衬产品,将其粘接在轴承座摩擦表面上(图 1),研究不同方案的自润滑复合材料在重载摩擦工况下的摩擦磨损性能。

收稿日期: 2011-05-13

作者简介:姜卫陵,1957 年出生,研究员,主要从事含氟复合材料的研究。E-mail: dinghl826@126.com

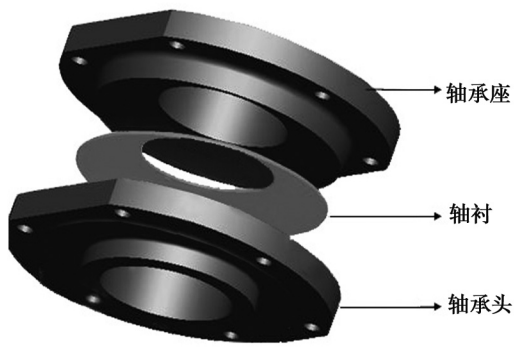


图1 轴承试验组件示意图

Fig. 1 Schematic illustration of bearing components

1 实验

1.1 原材料

织物用(有机)高强纤维 A、织物用(无机)高强纤维 B; 织物用 PTFE 纤维, 无碱玻璃布; PTFE 树脂, 酚醛树脂, 环氧树脂, 聚酰亚胺树脂。

1.2 试验设备

摩擦试验设备及加载情况如图 2 所示。将自润滑复合材料轴衬粘接在轴承座表面上制备不同方案的自润滑复合轴承试验件。试验件安装在试验台上, 轴承座固定, 轴承头可移动。在垂直方向施加轴向力, 在横梁水平方向施加一定频率的往复作用力, 使轴承头相对轴承座产生移动。

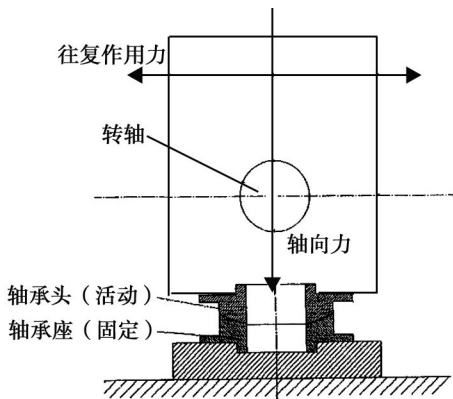


图2 摩擦试验设备示意图

Fig. 2 Schematic illustration of friction tester

1.3 测量分析方法

1.3.1 温度、应力应变测量

采用铂电阻测量轴承内外壁的温度变化及内腔的空气温度, 采用高温应变片测量轴承内外壁的应力变化, 用 PAC6000 型数据采集系统记录温度及应力/应变数据。

1.3.2 载荷测量

采用 3.5 MN 载荷传感器测量轴向载荷的大小, 同时采用美国世全公司生产的 400 kN 载荷传感器跟

踪测量往复作用力的大小, 两路载荷信号通过变送器送入数据采集系统。

1.3.3 摩擦因数计算

由测量的某时刻下往复作用力和轴向力之比, 可得到该时刻下的摩擦因数, 做出摩擦曲线, 摩擦时间为 170 ~ 175 s。

1.3.4 压缩强度测量

压缩强度测试采用 GB/T1041—2008。

1.3.5 微观结构分析

采用扫描电镜/X 射线能谱仪表征自润滑复合材料摩擦前后表面形貌和化学成分。

2 结果与分析

2.1 基材材料对压缩性能的影响

采用高强纤维 A 作为承力增强材料, 采用酚醛树脂、PTFE 树脂、聚酰亚胺树脂和改性酚醛树脂作为基材材料。考察基材树脂对复合材料压缩性能的影响, 结果如图 3 所示。

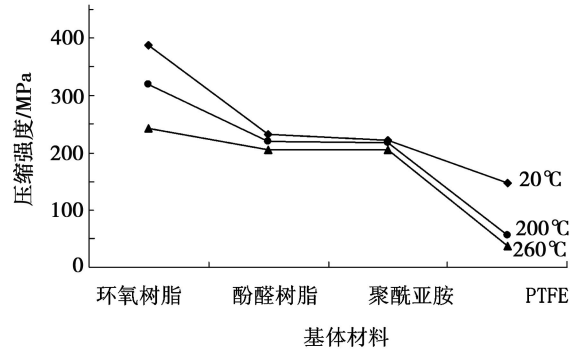


图3 基材树脂对材料压缩性能的影响

Fig. 3 Effect of skeleton resin on compressive properties

由图 3 可知, 酚醛树脂和聚酰亚胺树脂耐热性较好, 从 20 ~ 260°C 其压缩强度未见明显变化; 可见采用压缩性能优异的环氧树脂进行改性, 可在保持耐热性同时大幅度提高复合材料压缩强度; PTFE 树脂作基材材料能进一步提高复合材料的润滑性能, 间接增强复合材料的耐磨性。

一般来说, 环氧树脂在改性酚醛时贡献良好的力学性能, 酚醛树脂则保持较高的耐热性。在开展环氧树脂对酚醛树脂改性的配方研究时, 为节约成本, 采用无碱玻璃布替代混编织物, 探索了两种树脂不同配比对压缩强度的影响, 见图 4 和图 5。

由图 4 可知, 环氧树脂达到 29wt% 时, 压缩强度开始提升; 当达到 50wt% 时, 压缩强度最大; 环氧树脂质量分数继续增大时, 压缩强度呈现下降趋势。而图 5 则说明了改性酚醛中环氧树脂质量分数对材料

高温性能的影响。

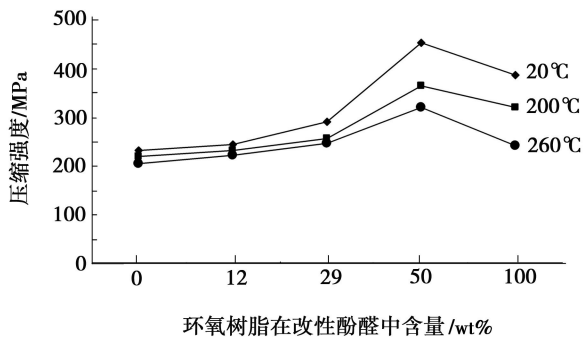


图4 环氧树脂质量分数对材料压缩性能的影响

Fig. 4 Effect of epoxy resin content on compressive properties

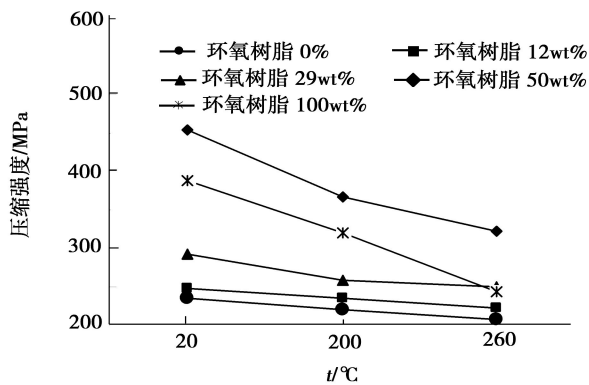


图5 环氧树脂质量分数对高温性能影响

Fig. 5 Effect of epoxy resin content on high temperature properties

由图5可知,改性酚醛中环氧树脂低于30wt%时,曲线随温度变化的斜率不大,即温度对材料压缩性能的影响很小;当环氧树脂>29wt%以上时,材料压缩强度明显提高,同时对温度的敏感性也随环氧树脂质量分数增大而增大;环氧树脂为50wt%时,曲线在最上方,此时材料高、低温压缩强度最高;当环氧树脂为100wt%时,曲线的斜率最大,力学性能对温度的敏感性最大。因此,改性酚醛中环氧树脂控制在50wt%,压缩强度和高温性能最佳。不同的树脂增强无碱玻璃纤维布压缩强度如图6所示。

由图6可知,无碱玻纤/PTFE的压缩强度最低,这是由于PTFE树脂自润滑特性使复合材料在受压过程中纤维间发生相对滑动,材料的整体结构遭到破坏;无碱玻纤/酚醛树脂和无碱玻纤/聚酰亚胺树脂压缩强度曲线几乎重合,在260°C以下两种材料对温度变化均不敏感,即耐温性较好,同时也表明聚酰亚胺树脂与酚醛树脂相比无明显优势,两种树脂的结构强度介于PTFE和环氧树脂之间;无碱玻纤/环氧树脂在20°C具有较高的压缩强度,但随温度升高,压缩强度显著下降,表明环氧树脂耐热性能较差;无碱玻纤/

改性酚醛的压缩强度最高,虽然温度升高强度有所下降,但下降的幅度较小,其中酚醛树脂具有抑制高温下压缩强度下降的作用。

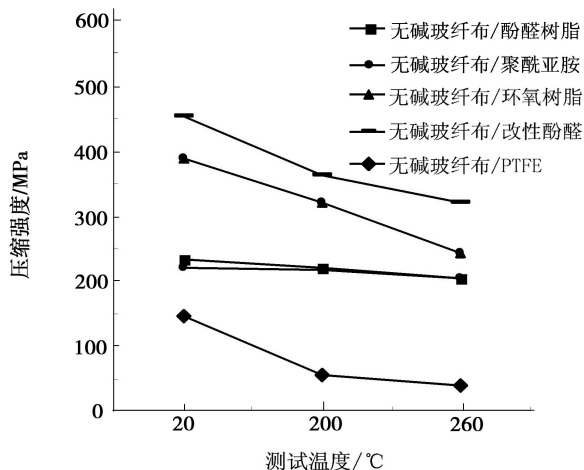


图6 不同树脂增强无碱玻璃布的压缩强度

Fig. 6 Compressive strength of glass fabric without alkalescence enhanced by different kinds of resin

2.2 增强材料对复合材料摩擦性能的影响

摩擦过程中,PTFE纤维在摩擦应力条件下发生“蠕变和转移”,并逐渐在摩擦表面形成“PTFE转移润滑膜”。采用高强纤维A、B与PTFE纤维制成织物A与织物B,再分别与改性酚醛树脂制作自润滑复合材料试验件,在轴向载荷192~260MPa、170s的条件下,均形成“PTFE转移润滑膜”,表现出具有相似的动摩擦因数。两种自润滑复合材料力学性能实测结果见表1,其中织物A/改性酚醛综合性能较优。

表1 自润滑复合材料的力学性能实测结果

Tab. 1 Mechanical properties of self-lubrication materials

材料	动摩擦因数	压缩强度/MPa
织物A/改性酚醛	0.025	600~659
织物B/改性酚醛	0.023	438~501

2.3 自润滑复合材料综合性能

自润滑复合材料摩擦试验结果见表2。可看出,以PTFE为基体材料的试验件表面温度低,承受的应力小,起始摩擦因数小,这是由于以PTFE为基体的自润滑复合材料中PTFE含量较大,对摩擦起始阶段的自润滑特性有较多贡献,使自润滑复合材料的起始摩擦因数较小,相应产生的摩擦热和应力也小。所有试验件中PTFE纤维在摩擦表面均形成了“PTFE转移润滑膜”,使摩擦因数相对稳定,此时基体材料对摩擦因数的影响可以忽略。

表 2 摩擦试验结果

Tab. 2 Results of frictional experiments

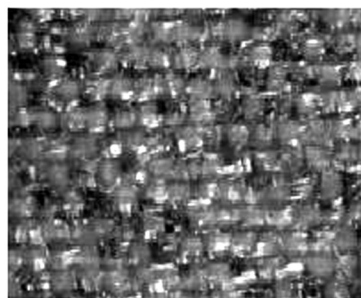
材料	金属阳球温度/℃	金属阴球温度/℃	金属阳球应力/MPa	摩擦因数起始值	摩擦因数稳定值
织物 A / 酚醛	212	112	500	0.15	0.024
织物 A / PTFE	164	86	450	0.08	0.022
织物 A / 聚酰胺	159	94	576	0.14	0.022
织物 A / 改性酚醛	174	88	525	0.14	0.018

2.4 摩擦机理分析

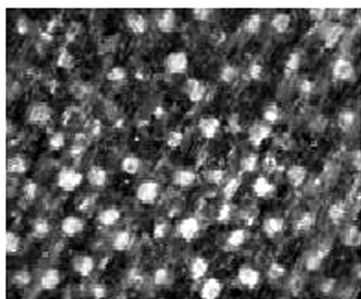
自润滑复合材料全部经过了摩擦试验,观察试验件摩擦表面发现自润滑复合材料表面基本完好。

PTFE 加工成纤维后其力学性能有较大提高。在摩擦中首先接触的 PTFE 纤维束顺着力方向向摩擦表面蠕变和转移,由于 PTFE 纤维与高强纤维混纺织成混编织物后相互间产生了较大摩擦力,阻止了 PTFE 纤维与高强纤维完全脱离,使得蠕变和转移的 PTFE 纤维仍能牢固附着于织物表面。随着摩擦的进行,蠕变和转移不断进行,在摩擦表面逐渐形成“PTFE 转移润滑膜”,蠕变和转移逐渐结束,摩擦力逐渐减小并趋稳,表现为所测得的摩擦因数数值逐渐减小、趋稳并与纯 PTFE 的摩擦因数相近。观察试验后的摩擦表面有明显的转移膜,用脱脂棉不能将其擦去,表明“PTFE 转移润滑膜”能够牢固附着在摩擦表面。

图 7 是摩擦前后自润滑复合材料的 25 倍 *stemi*-*vii* 实体显微照片对比。



(a) 摩擦前



(b) 摩擦后

图 7 材料表面 25 倍体视显微镜照片

Fig. 7 Optical micrograph sample surface before and after testing

图 7(a) 是摩擦前的轴衬表面,可清晰看出深色的 PTFE 纤维束和浅色的高强纤维束具有明显的边界,图 7(b) 是摩擦后的轴衬表面,织物结构完整,白色正方形区域是织物中凸起的纤维束经摩擦后的状

态,深色的 PTFE 明显增多,基本形成了连续膜,表明摩擦过程中,PTFE 的易蠕变的特性使其纤维在剪切力作用下发生滑移,随着摩擦的进行,织物中的 PTFE 纤维不断向表面迁移和滑动,直到形成“PTFE 转移润滑膜”。

深色的 PTFE 基本形成了连续“PTFE 转移润滑膜”,由于这层膜是织物中的 PTFE 纤维经摩擦、转移而形成,不容易受到破坏。“PTFE 转移润滑膜”的形成不但达到减少摩擦的效果,而且有效地保护了内部织物结构,提高了自润滑复合材料的承载能力。利用扫描电镜/X 射线能谱仪观察摩擦表面,从元素谱图 8、图 9 中可看出摩擦前表面主要元素是 C 和 O,摩擦后表面主要元素是 C 和 F,更好的证明 PTFE 在摩擦过程中向表面转移,形成了“PTFE 转移润滑膜”。

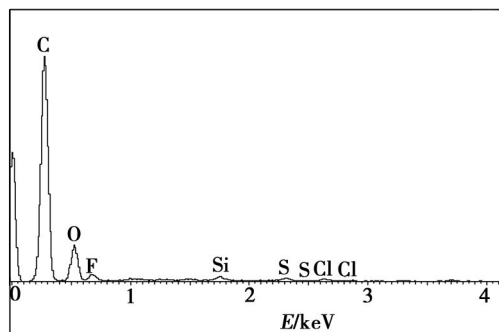


图 8 摩擦试验前试验件表面元素谱图

Fig. 8 EDS spectrum of surface of testing part before friction

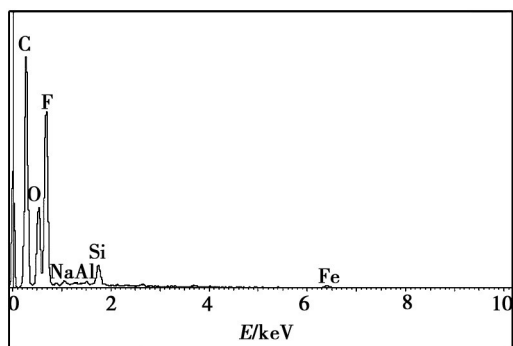


图 9 摩擦试验后试验件表面元素谱图

Fig. 9 EDS spectrum of surface of testing part after friction

正是由于“PTFE 转移润滑膜”的形成,试验件在重载条件的摩擦因数得以迅速下降。图 10 为 200 MPa 压宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2011 年 第 4 期

力下测得的自润滑复合材料原始摩擦因数随时间的谱图,摩擦因数随时间逐渐降低,最终稳定到 0.018。

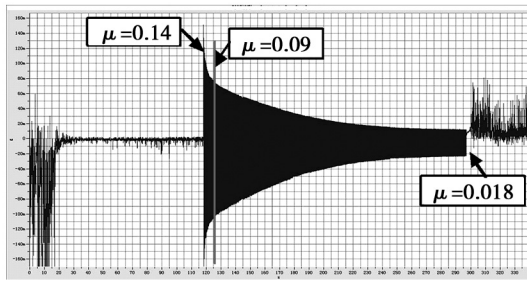


图 10 试验件推动力/轴向力的时间历程曲线
Fig. 10 Relationship between time and force of experimental parts at high loads

3 结论

(1) 重载条件下(轴向载荷 192 ~ 260 MPa, 摩擦时间 170 s), 自润滑复合材料摩擦表面完好, 其中织物 A/改性酚醛树脂材料综合性能最佳。

(2) 摩擦过程中摩擦因数逐渐降低, 最终稳定在 0.018, 与纯 PTFE 的摩擦因数相近, 表明摩擦表面能够形成“PTFE 转移润滑膜”。

参考文献

[1] Sawyer W G, Freudenberg K D, Praveen Bhmiaraj. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with aluminum nanoparticles[J]. *Wear*, 2003, 254: 573-580

[2] Cheng Xianhua, Xue Yujun, Xi Chaoying. Friction and wear of rare-earth modified glass-fiber filled PTFE composites in dry reciprocating sliding motion with impact loads [J], *Wear*, 2002, 253: 869-877

[3] 王晓波, 冯治中, 阎逢元. SiO₂ 填充聚四氟乙烯复合材料的摩擦学行为研究[J]. *润滑与密封*, 2002(1): 48-49

[4] 向定汉, 潘青林, 姚正军. 铜-塑自润滑复合材料的设计和性能[J]. *材料研究学报*, 2003, 17(5): 549-553

[5] Shin Jen Shiao. Dry self-lubricating composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1996, 17(5): 459-465

[6] Khoddamzadeh Alireza, Liu Rong. Novel polytetrafluoroethylene (PTFE) composites with newly developed triballoy alloy additive for sliding bearings [J]. *Wear*, 2009, 266(7/8): 646-657

[7] Wang Huaiyuan, Feng Xin, Shi Yijun. Effects of fibrous fillers on friction and wear properties of polytetrafluoroethylene composites under dry or wet conditions [J]. *China Particuology*, 2007, 5(6): 414-419

[8] Su Fenghua, Zhang Zhaozhu, Liu Weimin. Tribological behavior of hybrid glass/PTFE fabric composites with phenolic resin binder and nano-TiO₂ filler [J]. *Wear*, 2008, 264(7/8): 562-570

[9] Dinghan Xiang, Kunlun Shan. Friction and wear behavior of self-lubricating and heavily loaded metal-PTFE composites [J]. *Wear*, 2006, 260(9/10): 1112-1118

(编辑 任涛)

(上接第 66 页)

实验结果表明, 在低热流的条件下玻璃钢板和 PI 蜂窝夹层板的隔热效果相当。在两种试验条件下玻璃钢板背温在 227 ~ 320℃, 玻璃钢高温力学性能保持率低, 并且发生了严重变形, 承载能力差。而 PI 复合材料蜂窝夹层板背温为 296 ~ 320℃, 结合表 1 可以推测此时 PI 复合材料仍旧可以具备较高的力学性能保持率, 承载能力优异。试验结果表明 PI 蜂窝夹层结构具有良好的隔热性能、力学性能和抗热变形能力, 可以作为结构减重和提高结构刚度, 实现结构轻量化和隔热一体化的技术方案, 有望应用于航天航空产品隔热板、天线罩、整流罩等部件。

3 结论

PI 复合材料蜂窝夹层结构具有优异的耐热性和力学性能: UT500/KH370 蜂窝夹层面板的弯曲强度 400℃ 保持率为 58%, 弯曲模量保持率为 85%, 层间剪切强度保持率为 57%; 石英灯静态隔热试验结果表明, 冷壁热流为 300 kW/m² 的条件下, 高度为 29 mm 的蜂窝夹层板的背温为 320℃; 冷壁热流为 168 kW/m² 的条件下, 背温为 296℃。

参考文献

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2011 年 第 4 期

[1] Chuang K. C, Tsotsis T K. 6F-polyimides with phenylethynyl endcap for 315 to 370℃ applications [J]. *High Performance Polymers*, 2003, 15(4): 459-472

[2] Takekoshi T, Terry J M. High-temperature thermoset polyimides containing disubstituted acetylene end groups [J]. *Polymer*, 1994, 35(22): 4874-4880

[3] Gray R A, McGrath L R. The development of high-temperature polyimides for resin transfer molding [J]. *SAMPE Journal*, 2004, 40(6): 23-31

[4] Connell J W, Smith J G, Jr, et al. High temperature transfer molding resins; preliminary composite properties of PETI-375 [J]. *SAMPE Symposium*, 2004, 49(1)

[5] 陈建升, 左红军, 高群峰, 等. 苯乙炔基封端 PMR 型聚酰亚胺树脂的制备与性能研究 [J]. *航空材料学报*, 2007, 27(5): 66-70

[6] 孟祥胜, 杨慧丽, 范卫锋, 等. 高韧性异构聚酰亚胺树脂及其复合材料 [J]. *宇航材料工艺*, 2009, 39(2): 53-57

[7] 曲希明, 冀棉, 赵伟栋, 等. 耐 371℃ PMR 型含异构联苯结构的聚酰亚胺树脂及复合材料 [J]. *宇航材料工艺*, 2009, 39(3): 50-53

(编辑 吴坚)