

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.05.002

碳粉粒度对腰果壳油改性 PF 基摩擦材料性能的影响

葛波^{1,2}, 何春霞^{1,2}, 刘军恒^{1,2}, 徐伟悦^{1,2}, 陆德荣^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘要: 为研究碳粉粒度对腰果壳油改性酚醛树脂 (PF) 基摩擦材料性能的影响, 采用热压成型工艺制备出 4 种不同碳粉粒度 (48, 25, 18, 9 μm) 的 PF 基摩擦材料, 分别对摩擦材料的密度、硬度、压缩强度、冲击强度、热性能和摩擦磨损性能进行了测试。结果表明, 碳粉粒度越小, 摩擦材料的密度和硬度越高, 力学性能越好, 高温下的摩擦系数越稳定, 且磨损率及 200℃ 时的热膨胀系数越小, 热稳定性越好; 当碳粉粒度为 9 μm 时, 摩擦材料密度为 1.725 g/cm^3 , 洛氏硬度值为 92, 压缩强度为 109.8 MPa, 冲击强度为 3.72 kJ/m^2 , 350℃ 下的磨损率为 $1.12 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 200℃ 下的线膨胀系数为 $1.55 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 失重速率最大时的温度为 441.3℃, 750℃ 质量保持率为 88.6%。摩擦材料中碳粉适宜的粒径为 9 μm 。

关键词: 摩擦材料; 碳粉粒度; 摩擦磨损; 热性能

中图分类号: TQ323.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)05-0007-06

Effect of Particle Size of Carbon Powder on Properties of Cashew Nut Oil Modified Phenolic Resin Matrix Friction Materials

Ge Bo^{1,2}, He Chunxia^{1,2}, Liu Junheng^{1,2}, Xu Weiyue^{1,2}, Lu Derong^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210031, China;

2. Key laboratory of Intelligence Agriculture Equipment of Jiangsu Province, Nanjing 210031, China)

Abstract : In order to figure out the effects of particle size of carbon powder on properties of cashew nut oil modified phenolic resin matrix friction materials, four kinds of carbon powder with different particle sizes (48, 25, 18, 9 μm) used as the strength agents were added into the friction materials through hot compression molding process. The density, hardness, compression strength and impact strength of the materials were tested, the thermal properties, friction and wear performances were measured by thermal instruments and friction tester. The results show that when the particle size of the carbon powder is smaller, the material has higher density, hardness and mechanical properties, more stable friction coefficient under high temperature with less wear rate, less linear expansion coefficient under 200℃ and better thermal stability. When the particle size of the carbon powder is 9 μm , the density, Rockwell hardness value, compression strength and impact strength of the material is 1.725 g/cm^3 , 92, 109.8 MPa and 3.72 kJ/m^2 respectively, the wear rate is $1.12 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ under 350℃, the linear expansion coefficient is $1.55 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ under 200℃, the temperature at highest weight loss rate is 441.3℃, and the residual mass ratio is 88.6% under 750℃. The appropriate particle size of the carbon powder in the friction material is 9 μm .

Keywords : friction material ; particle size of carbon powder ; friction and wear ; thermal property

复合摩擦材料广泛应用于汽车制动器衬片、离合器面片以及闸瓦、闸片等,其性能的优劣对汽车行驶安全性有极大的影响。复合摩擦材料一般由树脂基体、增强剂、摩擦性能调节剂以及填料 4 类组分混合后经热压而成^[1]。增强剂是摩擦材料中最重要的组成部分之一,对摩擦材料的力学性能起决定性作用。增强剂一直是国内外摩擦材料研究的热点^[2-5]。关于增强剂粒度对材料的影响国内外也进行了很多研究^[6-8]。陈健等^[9]考察了纳米铜粉粒度及含量对酚醛树脂 (PF) 基摩擦材料摩擦磨损性能的影响,得

出随着纳米铜粉尺寸的减小,摩擦材料的摩擦系数稳定性提高,磨损率也逐渐减小,在高温段 (350℃) 时,磨损率仅为 $0.199 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,是添加微米铜粉的 70%。M. Kumar 等^[10]对比分析了铜形态和含量对无石棉的有机复合摩擦材料性能的影响,结果表明:铜粉 (粒度 280~430 μm) 增强复合摩擦材料比铜纤维 (长度 2.09~2.35 mm) 增强复合摩

联系人: 何春霞,教授,主要从事新型工程材料和木塑复合材料的应用与研究

收稿日期: 2015-03-13

擦材料有更好的摩擦磨损性能。

碳粉价格低廉,表面积大,具有很强的润滑功能及良好的耐热性、耐酸性和耐碱性,能稳定摩擦系数,是摩擦材料良好的增强剂^[11]。若将碳粉代替高成本的纤维应用于汽车摩擦材料,有可能在保证较高性能的基础上,降低材料的总成本,但目前国内将碳粉添加到摩擦材料中的相关研究报道很少^[12]。笔者选用陶瓷纤维、芳纶纤维和碳粉为增强剂,以腰果壳油改性PF为基体,添加碳酸钙、石墨和碳化硅等填料,制备出复合摩擦材料,研究碳粉粒度(9, 18, 25, 48 μm)对摩擦材料力学性能、摩擦磨损性能、热膨胀性能以及热稳定性的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

碳粉、陶瓷纤维、芳纶纤维、二氧化硅粉(粒径小于10 μm)、碳化硅粉(粒径小于10 μm)、碳酸钙粉(粒径约为8.47 μm):南京智宁塑料填料研究所;

石墨:粒径30 μm ,锦州斌宏隆塑料有限公司;

腰果壳油改性PF:桓台县永汇化工有限公司;

丁腈橡胶:黄山华兰科技有限公司;

硅烷偶联剂:KH550,上海中艺塑料制品厂。

1.2 主要设备、仪器

自动平板硫化机:XLB-D400型,上海奇才液压机械有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9140A型,上海慧泰仪器制造有限公司;

电子天平:JY502型,上海浦春计量仪器有限公司;

搅拌机:K600型,德国博朗电气有限公司;

电子比重计:DH-300,东莞市宏拓仪器有限公司;

塑料洛氏硬度计:XHR-150型,上海联尔试样设备有限公司;

电子万能试样机:CSS-44100型,长春试样机研究所有限公司;

简支梁冲击试样机:XJJ-5型,承德市金建检测仪器有限公司;

定速式摩擦试样机:XD-MSM型,西安明克斯检测设备有限公司;

变焦距体式显微镜:SMZ1000型,日本尼康仪器有限公司;

低温热膨胀仪:PCY-D型,湘潭湘仪仪器有限公司;

热重(TG)分析仪:STA449F3型,德国耐驰仪器制造有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC204型,德国耐驰仪器制造有限公司。

1.3 试样制备

取适量的碳粉、陶瓷纤维、芳纶纤维、石墨、二氧化硅粉、碳化硅粉以及碳酸钙粉称重,混合均匀后用硅烷偶联剂处理,用超声波振荡清洗机振荡30 min,并放入80℃鼓风干燥箱干燥4 h,加入腰果壳油改性PF和丁腈橡胶,用搅拌机混合均匀,采用模压法压制成型PF基摩擦材料,模压温度180℃,模压压力12 MPa。摩擦材料中碳粉的质量分数为20%,其粒度分别为9, 18, 25, 48 μm ,陶瓷纤维的质量分数为10%,芳纶纤维为8%,石墨为8%,二氧化硅粉为6%,碳化硅粉为8%,碳酸钙粉为15%,丁腈橡胶为5%。

1.4 性能测试与结构表征

用电子比重计测量试样的密度;

洛氏硬度按GB/T 5766-2007测试;

压缩强度按GB/T 1448-2005测试,试样尺寸为18.8 mm×10 mm×6.5 mm;

冲击强度按GB/T 1043-1993测试,试样尺寸为50 mm×6 mm×4 mm;

摩擦磨损性能按GB 5763-2008测试;

采用变焦距体式显微镜观察摩擦磨损表面的微观形态;

线膨胀系数按GB/T 2572-2005测试,试样尺寸为100 mm×10 mm×10 mm,测试温度范围为-30~200℃;

TG分析:氮气气氛,温度范围为50~750℃,升温速度为10℃/min;

DSC分析:氮气气氛,温度范围为50~750℃,升温速度为10℃/min。

2 结果与讨论

2.1 碳粉粒度对摩擦材料物理与力学性能的影响

图1~图4为不同碳粉粒度对摩擦材料密度、硬度、压缩和冲击强度的影响(图1~图4中的C1, C2, C3和C4分别表示碳粉粒度为48, 25, 18, 9 μm)。由图1可以看出,随着碳粉粒度的减小,摩擦材料的密度逐渐增大。当碳粉粒度从48 μm 减至9 μm 时,摩擦材料密度从1.654 g/cm³增到1.725 g/cm³,增大了4.3%。原因是碳粉粒度较小时,材料在压制过程中产生的密闭气孔会被碳粉较

好地填充,使密闭气孔数量减少,摩擦材料密度增大。由图2、图3和图4可以看出,随着碳粉粒度逐渐减小,摩擦材料的硬度、压缩强度以及冲击强度也逐渐增加,这是由于偶联剂KH550提高了碳粉与有机树脂界面粘结性能,相同质量下,碳粉粒度越小,接触表面积越大,从而粘结性能越好^[13]。碳粉粒度为9 μm 的摩擦材料的洛氏硬度值为92、压缩强度为109.8 MPa、冲击强度为3.72 kJ/m^2 。当碳粉粒度进一步减小时,在试样制备过程中发现碳粉在摩擦材料中不易分散,材料成型难度大,这表明,碳粉粒度不宜过小。

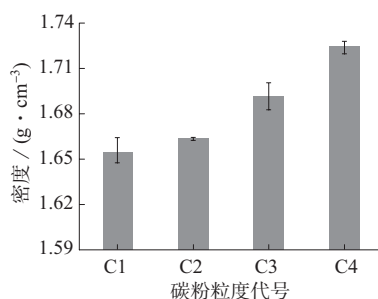


图1 不同碳粉粒度的摩擦材料密度

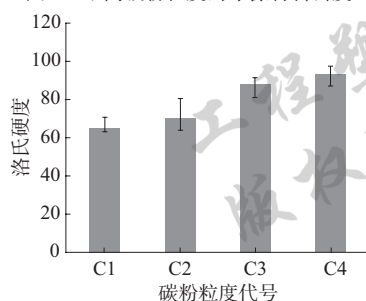


图2 不同碳粉粒度的摩擦材料硬度

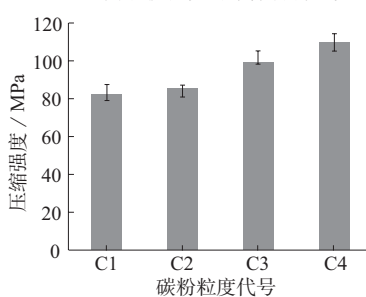


图3 不同碳粉粒度的摩擦材料压缩强度

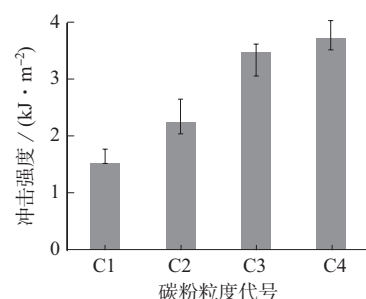


图4 不同碳粉粒度的摩擦材料冲击强度

2.2 碳粉粒度对摩擦材料摩擦磨损性能的影响

(1) 摩擦系数和磨损率。

图5为不同粒度碳粉的摩擦材料在不同温度下的摩擦系数和磨损率。由图5a可以看出,在100~350 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,摩擦材料的摩擦系数在0.35~0.5之间波动,低温摩擦系数高于高温摩擦系数,到250 $^{\circ}\text{C}$ 时摩擦系数大幅降低,原因是温度达到250 $^{\circ}\text{C}$,树脂热降解反应加剧,导致纤维与树脂粘结性下降,造成摩擦系数下降幅度增大。碳粉粒度为48 μm 的摩擦材料摩擦系数随着温度的升高降低很快,其波动范围为0.491~0.363,波动幅度为0.128;碳粉粒度为25 μm 和18 μm 的摩擦材料的摩擦系数波动幅度相近,波动幅度均为0.072;碳粉粒度为9 μm 的摩擦材料摩擦系数变化相对平缓,250 $^{\circ}\text{C}$ 后虽然有小幅下降,但波动幅度总体较小为0.026。比较波动幅度可知,随着碳粉粒度的减小,摩擦材料的摩擦系数稳定性逐渐提高。其中当碳粉粒度为9 μm 时,摩擦材料可以得到相对较小且稳定的高温摩擦系数,高温衰退现象很小,此时摩擦材料具有优良的高温摩擦性能。原因在于同样含量的碳粉,粒度越小,颗粒数目增多,当均匀分散在摩擦材料中与对偶件摩擦时,更容易形成润滑膜,微凸体间的机械啮合力减小,从而摩擦系数减小^[14]。

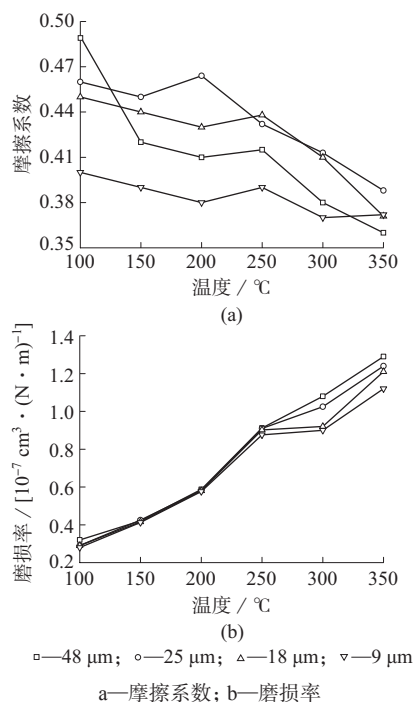


图5 不同碳粉粒度的摩擦材料摩擦磨损性能

由图5b可以看出,摩擦材料的磨损率随温度的升高而增大,但总体数值均低于 $1.4 \times 10^{-7} \text{cm}^3 /$

($\text{N} \cdot \text{m}$),低温时增加比较平缓,200℃后增加幅度明显变大。这主要是低温时碳粉剥离出材料表面,在摩擦界面起润滑的作用,磨损率随温度升高增加幅度相对较小,当温度大于200℃,树脂热降解反应加剧,导致纤维与树脂粘结性下降,造成磨损率大幅增大。当温度小于250℃时,碳粉粒度为48,25,18 μm 的摩擦材料磨损率差距不大,而碳粉粒度为9 μm 的磨损率稍低。当温度高于250℃时,碳粉粒度越小,材料的磨损率越小;350℃时4种复合摩擦材料的磨损率分别为 1.29×10^{-7} , 1.24×10^{-7} , 1.21×10^{-7} , $1.12 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,由此看出碳粉粒度为9 μm 的摩擦材料高温耐磨性较好,碳粉粒度为18 μm 和25 μm 的摩擦材料次之,碳粉粒度为48 μm 的摩擦材料较差。原因是在低温时,树脂基体没有分解,此时的摩擦以磨粒磨损和粘着磨损为主,此时碳粉粒度越小其吸附作用越强,摩擦材料磨屑中的碳粉吸附在对偶件表面,形成相对稳定的润滑层,有效阻止了材料的进一步磨损,所以碳粉粒度为9 μm 的摩擦材料磨损率会稍微小于前三者。随着温度的升高,树脂开始降解,摩擦材料的犁切磨损和疲劳磨损有所增加。而当碳粉粒度减小时,在材料压制过程中产生的密闭气孔会被碳粉较好地填充,摩擦材料更加密实,不易被剥离出试件表面,从而磨损率逐渐降低。由此可见,粒度为9 μm 的碳粉有助于提高摩擦材料的高温耐磨性。

(2) 摩擦磨损机理分析。

图6为350℃环境下不同碳粉粒度的摩擦材料磨损表面微观形貌。

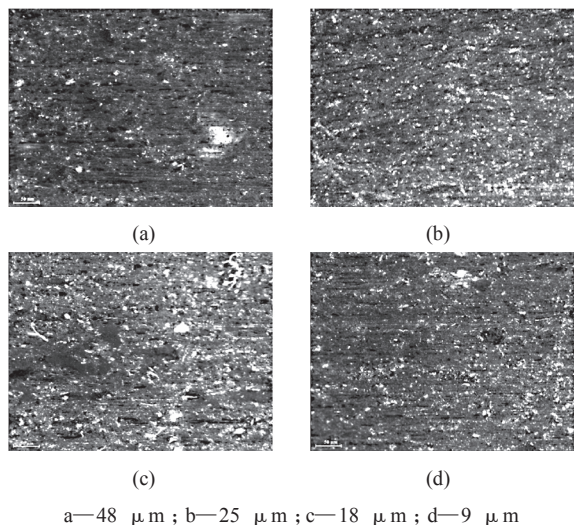


图6 不同碳粉粒度的摩擦材料磨损表面形貌

由图6可以看出,碳粉粒度不同,摩擦材料的

磨损表面微观形貌相差很大。碳粉粒度为48 μm 的摩擦材料磨损表面分布有深浅不同的犁沟,同时较均匀地分布有面积较大且较深的剥落凹坑;碳粉粒度为25 μm 和18 μm 的摩擦材料表面分布有非连续的较浅的犁沟和极少量的银纹;碳粉粒度为9 μm 的摩擦材料表面只有极少量的较浅犁沟,非犁沟部分磨损表面比较平滑。同时可看出,碳粉粒度的减小改善了材料的磨损表面形貌。碳粉粒度为48 μm 的摩擦材料比表面积相对较小,树脂基体足以将填料牢固粘结,使材料在对磨件表面微凸起的犁切作用下向两侧隆起,多次变形后脱落,从而形成犁沟;随着碳粉粒度减小,材料质地越来越密实,材料在摩擦过程中不易被剥离出试件表面,从而犁沟变浅甚至消失。碳粉粒度为9 μm 的摩擦材料磨损表面只有极少量较浅犁沟,其余部分十分平滑,主要磨损形式为涂抹,降低了材料的磨损率。

2.3 碳粉粒度对摩擦材料热性能的影响

图7为不同粒度碳粉增强摩擦材料的热膨胀曲线。

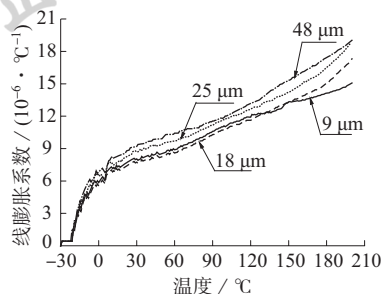


图7 不同粒度碳粉增强摩擦材料热膨胀系数

由图7可以发现,随着温度的升高,4种摩擦材料的线膨胀系数都呈上升趋势。在0℃以下材料的线膨胀系数上升较快,表明材料低温敏感性较强,当温度为0℃~105℃时,摩擦材料线膨胀系数增长缓慢,当温度高于105℃后,摩擦材料线膨胀系数增长加快。其原因是当温度达到105℃时,经过丁腈橡胶二次改性后的树脂基体开始软化^[15],从而在材料中产生热流动,使得线膨胀系数增长加快。可以进一步看出当温度在120℃以下时,4种摩擦材料的热膨胀系数很接近,而当温度继续升高时,随着碳粉粒度的减小,摩擦材料的线膨胀系数依次递减。碳粉粒度为9 μm 的摩擦材料线膨胀系数比前3种摩擦材料的要小很多,200℃下4种摩擦材料的热膨胀系数按碳粉粒度由大到小分别为 1.92×10^{-5} , 1.88×10^{-5} , 1.74×10^{-5} , $1.55 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。出现这个现象的原因是在相同压力下,随着碳粉粒度的减小,压

制出的材料会更密实(可以从密度变化规律看出),从而使材料在高温下抗热膨胀的性能越好,线膨胀系数越小。碳粉粒度为 $9\ \mu\text{m}$ 时,在压制过程中,摩擦材料颗粒间密闭气孔也被碳粉填充,使得压制的材料较前 3 种更致密,从而在高温下更能抵抗热膨胀,表现出较好的抗热膨胀性能。

图 8 与图 9 分别为不同粒度碳粉增强摩擦材料的 TG 曲线和 DSC 曲线。

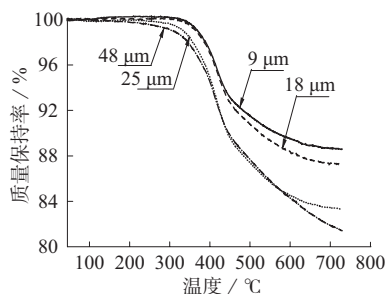


图 8 不同粒度碳粉增强摩擦材料的 TG 曲线

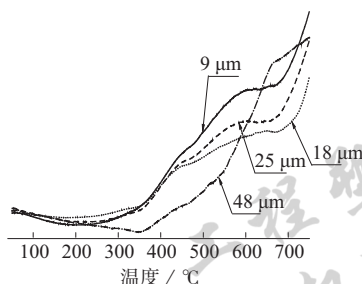


图 9 不同粒度碳粉增强摩擦材料的 DSC 曲线

由图 8 可以看出,温度低于 $280\ ^\circ\text{C}$ 时,4 种摩擦材料热失重现象都不明显,碳粉粒度为 $48\ \mu\text{m}$ 的摩擦材料的起始分解温度较低, $750\ ^\circ\text{C}$ 时质量保持率较小。随着碳粉粒度的减小,摩擦材料的分解温度逐渐提高, $750\ ^\circ\text{C}$ 时的质量保持率也逐渐增加。当碳粉粒度为 $9\ \mu\text{m}$ 时,材料失重速率最大时的温度最高,为 $441.3\ ^\circ\text{C}$, $750\ ^\circ\text{C}$ 质量保持率最大,为 88.6%。由 4 种摩擦材料的 TG 曲线可知,在 TG 曲线中摩擦材料的起始分解温度是 $280\ ^\circ\text{C}$ 左右,这与高温摩擦磨损性能测定中材料热摩擦初始分解温度 ($200\ ^\circ\text{C}$) 有差别。原因在于,摩擦磨损试样中的温度是体积温度,不是真正的表面瞬时温度,而瞬时温度要比体积温度高很多^[16]。

从图 9 可以看出,碳粉粒度为 $9\ \mu\text{m}$ 的摩擦材料的热焓最高,热稳定性最好。这是因为碳粉经硅烷偶联剂处理后,其表面会生成化学键,与 PF 基体间形成“分子桥”^[17],此化学键提高了 PF 分子链在加热过程中断裂需要的能量,而相同质量的碳粉粒度越小其表面积越大,与树脂基体结合的界面越多,

从而使树脂热分解需要更多的能量。

3 结论

(1) 碳粉作为 PF 基摩擦材料增强剂时,在考察的范围内,其粒度越小,摩擦材料的密度、硬度和力学性能越高。当碳粉粒度为 $9\ \mu\text{m}$ 时,摩擦材料的密度、洛氏硬度值、压缩强度及冲击强度分别为 $1.725\ \text{g}/\text{cm}^3$, 92, $109.8\ \text{MPa}$ 和 $3.72\ \text{KJ}/\text{m}^2$ 。

(2) 随着碳粉粒度的减小,摩擦材料的摩擦系数稳定性提高。当碳粉粒度为 $9\ \mu\text{m}$ 时,摩擦材料可以得到相对较小且稳定的高温摩擦系数,高温衰退现象很小, $350\ ^\circ\text{C}$ 下磨损率为 $1.12 \times 10^{-7}\ \text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(3) 随着碳粉粒度的减小,摩擦材料的线膨胀系数依次递减。 $200\ ^\circ\text{C}$ 时碳粉粒度为 $9\ \mu\text{m}$ 的摩擦材料线膨胀系数仅为 $1.55 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。

(4) 随着碳粉粒度的减小,摩擦材料的分解温度逐渐提高, $750\ ^\circ\text{C}$ 质量保持率也逐渐增加。碳粉粒度为 $9\ \mu\text{m}$ 的摩擦材料失重速率最大时的温度为 $441.3\ ^\circ\text{C}$, $750\ ^\circ\text{C}$ 质量保持率为 88.6%。

(5) 由于进一步减小碳粉粒度,会使材料成型难度加大,因此推荐在碳粉增强 PF 基摩擦材料中采用 $9\ \mu\text{m}$ 粒度的碳粉作为增强剂。

参考文献

- [1] 刘莹,王发辉. 增强纤维对陶瓷基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(1):27-33.
Liu Ying, Wang Fahui. Effects of reinforced fibers on friction and wear properties of ceramic-based friction material[J]. Tribology, 2012, 32(1):27-33.
- [2] 于川江,姚萍屏. 现代制动用刹车材料的应用研究和展望[J]. 润滑与密封, 2010, 12(2):103-106.
Yu Chuanjiang, Yao Pingping. Progress and prospect of brake materials for modern brake parts[J]. Lubrication and Engineering, 2010, 12(2):103-106.
- [3] Klinkova O, Rech J, Drapier S, et al. Characterization of friction properties at the work material / cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with carbide tools under dry conditions[J]. Tribology International, 2011, 44(12):2050-2058.
- [4] 宋晓东,杨方,齐乐华,等. 碳纤维长度与取向对纸基摩擦材料热负荷及摩擦学性能影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1):65-72.
Song Xiaodong, Yang Fang, Qi Lehua, et al. Effects of carbon fibers length and orientation on thermal load and tribological properties of paper-based friction material[J]. Tribology, 2014, 34(1):65-72.
- [5] Gai Zhao, Hussainova I, Antonov M, et al. Friction and wear of fiber reinforced polyimide composites [J]. Wear, 2013, 301:122-129.

- [6] Liu Lei, Li Weiwei, Tang Yingping, et al. Friction and wear properties of short carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Wear, 2009, 266:733-738.
- [7] 王新平, 肖金坤, 张雷, 等. 银合金粉末粒度对 Ag-MoS₂ 复合材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10):2 811-2 817.
- Wang Xinping, Xiao Jinkun, Zhang Lei, et al. Effect of silver alloy particle size on friction and wear properties of Ag-MoS₂ composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10):2 811-2 817.
- [8] Deng Jianxin, Zhang Hui, Wu Ze, et al. Friction and wear behaviors of WC/Co cemented carbide tool materials with different WC grain size at temperatures up to 600℃ [J]. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 31:196-204.
- [9] 陈健, 周柯, 穆丽文, 等. 纳米铜粉粒度对 NAO 型摩擦材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 非金属矿, 2012, 35(4):76-78.
- Chen Jian, Zhou Ke, Mu Liwen, et al. Effect of copper particle size on friction and wear performance of NAO friction materials[J]. Non-Metallic Mines, 2012, 35(4):76-78.
- [10] Kumar M, Bijwe J. Non-asbestos organic(NAO) friction composites: Role of copper, its shape and amount[J]. Wear, 2011, 270:269-280.
- [11] Mmar K, Kevin R, Werner J B. The effect of solvent choice on the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(15):3 158-3 167.
- [12] 王强, 卢巍, 杨昆鹏, 等. 偶联剂改性人造石墨对摩擦材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 润滑与密封, 2013, 38(1):19-23, 27.
- Wang Qiang, Lu Wei, Yang Kunpeng, et al. Effect of coupling agent modified synthetic graphite on the tribological behaviors of friction materials[J]. Lubrication and Engineering, 2013, 38(1):19-23, 27.
- [13] 易汉辉. 摩擦材料中碳素材料的作用及机理研究 [J]. 非金属矿, 2007, 30(1):60-62.
- Yi Hanhui. Research on effectness and mechanism of carbon material in friction material[J]. Non-Metallic Mines, 2007, 30(1):60-62.
- [14] 张翔, 李克智, 李贺军, 等. 石墨粒度对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 无机材料学报, 2011, 26(6):638-642.
- Zhang Xiang, Li Kezhi, Li Hejun, et al. Effect of graphite particle size on friction and wear performance of paper-based friction material[J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(6):638-642.
- [15] 李新明, 李晓林, 苏志强, 等. 丁腈橡胶共聚改性酚醛树脂 [J]. 热固性树脂, 2002(3):11-14.
- Li Xinming, Li Xiaolin, Su Zhiqiang, et al. Phenolic resin modified by copolymerizing with nitrile butadiene rubber[J]. Thermosetting Resin, 2002(3):11-14.
- [16] 张清海. TG、DTA 法评价摩擦材料的热性能 [J]. 非金属矿, 1993, 16(3):56-58.
- Zhang Qinghai. The assessment of thermal properties of the friction materials by TG / DTA[J]. Non-Metallic Mines, 1993, 16(3):56-58.
- [17] Park S J, Jin J S. Effect of silane coupling agent on mechanical interfacial properties of glass fiber reinforced unsaturated polyester composites[J]. Poly SciPol Phys, 2002, 44(1):55-62.

欢迎订阅 2015 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘, 请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊, 是中国合成树脂供销协会会刊, 荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2015 年定价 15 元/期, 全年 180 元。目前杂志社尚有部分 1986 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊, 荣获多项省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2015 年定价 15 元/期, 全年 90 元。目前杂志社尚有部分 1992 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号 (1973 年) 至 2014 年底共 42 卷 302 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售; 同时也将《化学分析计量》自创刊号 (1992 年) 至 2014 年底

共 23 卷 103 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售。分别利用这两种合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文, 又可根据读者自定义的关键词进行全文检索, 非常方便、实用。

《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 530 元; 《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 230 元。

邮局汇款:

收款单位: 济南市天桥区田庄东路 3 号杂志社

邮编: 250031

电话: (0531)85878223 85878057 85878278

传真: (0531)85947355

银行汇款:

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

账 号: 1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>