

# 碳纳米管对汽车刹车片用陶瓷摩擦材料性能的影响

谢茂青<sup>1,2</sup>,王雷刚<sup>1\*</sup>

1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 2120013
2. 浙江铁流离合器股份有限公司, 浙江 杭州 311101

**摘要:** 设计研发安全环保和高性能的汽车刹车用摩擦材料是当前的研究重点。本文以碳纳米管作为增强剂制备了汽车刹车片用陶瓷摩擦材料, 分析了碳纳米管含量对摩擦材料的微观结构、力学性能和摩擦磨损性能的影响, 利用扫描电子显微镜对摩擦材料的磨损前后微观形貌进行了观察。研究表明: 碳纳米管能够显著增强材料间的黏合作用, 随着含量增加(15%以内), 摩擦材料的抗压和抗剪切强度提高; 材料摩擦因子和磨损率小且稳定, 热稳定性好, 350 °C 下无明显热衰退, 但是当碳纳米管含量继续增加 (>15%), 材料的综合性能会衰减。

**关键词:** 碳纳米管; 刹车片; 陶瓷; 摩擦材料; 力学性能

**中图分类号:** U463.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2020)04-0764-03

## Effects of Carbon Nanotubes on the Friction Property of Ceramic Brake as Auto Motive Braking Pads

XIE Mao-qing<sup>1,2</sup>, WANG Lei-gang<sup>1\*</sup>

1. School of Materials Science and Engineering/Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. Zhejiang Tieliu Clutch Co., Ltd, Hangzhou 311101, China

**Abstract:** Design and development of ceramic brakes with safety, environmental friendliness, and high performance for auto motives are current research focuses. Carbon nanotubes were used as boosters to prepare ceramic brakes for auto motives. The effects of the content of carbon nanotubes on microstructure, mechanical behavior, and wear rate of the friction materials were investigated. Microstructures before and after wear testing were observed by using scanning electron microscopy (SEM) technique. The results showed that carbon nanotubes can dramatically enhance the material cohesion. With increasing their content (<15%), the compressive and shear strength of the friction material increased, together with the low and stable friction coefficient and wearing rate. The friction material exhibited excellent thermal stability, and negligible thermal decay under 350 °C. However, further increase in content of carbon nanotubes will decay the overall performance of the friction material.

**Keywords:** Carbon nanotube; brake pad; ceramic; friction material; mechanical property

近年来, 汽车制造逐步向安全环保、高速高寿命方向发展, 这对汽车制动系统的综合性能和刹车片材料的高温稳定性及可靠性提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。作为摩擦传动制动系统的重要材料, 摩擦材料需要具备较高的抗压强度、较大的摩擦系数、较低的磨损率以及优异的稳定性等<sup>[2]</sup>。与传统的有机摩擦材料相比, 陶瓷材料在寿命、环境及稳定等方面具有巨大的优势, 从而成为重要的研究方向<sup>[3]</sup>。

陶瓷刹车片通常由基体材料、摩擦改进剂、增强材料和填料组成。作为摩擦材料的骨架, 增强材料对刹车片的机械强度和力学性能起着关键作用<sup>[4]</sup>。广泛使用的石棉增强材料具有一定的致癌性, 在生产和使用过程中容易危害人体健康和造成环境污染。因此, 寻找可替代石棉的增强材料来研制出安全环保和高性能的汽车刹车用摩擦材料是当前的研究重点。

碳纳米管是由 sp<sup>2</sup> 杂化的碳原子键合而成的一维管状碳纳米结构, 具有很高的比表面积(理论值为 1315 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) 和非常出色的热学、力学性能, 其热导率为 3500 Wm<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, 杨氏模量为 1 TPa, 拉伸强度达到了 300 GPa<sup>[5]</sup>。本文采用碳纳米管作为增强材料, 通过调节碳纳米管含量获得了不同的新型陶瓷摩擦材料。探究了碳纳米管含量对摩擦材料的物理、力学和磨损性能的影响, 旨在为设计开发出高性能的新型陶瓷摩擦材料提供实验指导。

### 1 材料与方法

**收稿日期:** 2019-03-05

**修回日期:** 2019-05-04

**基金项目:** 国家自然科学基金:金属热成形过程接触界面换热特性与氧化机制多尺度研究(51775249)

**作者简介:** 谢茂青(1974),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为汽车零部件新材料新技术新工艺。E-mail:xiemaoqing@126.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:lgwang@uj.sjtu.edu.cn

网络首发: <http://www.cnki.net>

## 1.1 材料来源

无机粘结剂, 酚醛树脂, 湖北武汉福斯特科技有限公司; 多壁碳纳米管, 直径为 15~30 nm, 长度为 10~30  $\mu\text{m}$ , 江苏南京先丰纳米材料科技有限公司; 硅酸铝陶瓷纤维, 直径 3~5  $\mu\text{m}$ , 长度 2~5 mm 左右, 山东热盾高温材料有限公司; 工业级石墨, 硫酸钙、三氧化二铝、萤石粉、硅藻土、碳酸钙, 粒度 150~200 目, 市购。

## 1.2 材料的处理

以碳纳米管为增强材料的新型陶瓷摩擦材料采用模压成型工艺制备。简单来说, 将各种原材料进行充分混合并搅拌均匀, 然后采用干法工艺热压成型, 温度为 160  $^{\circ}\text{C}$ , 压强为 50 MPa, 热压时间为 5 min/mm。接着在 80~200  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内进行热处理, 经磨削之后得到实验用样品。实验制备的不同样品的原材料配方如表 1 所示。

表 1 汽车刹车片摩擦材料配方(%)

Table 1 Composition of friction materials (%) for auto motive braking pads				
样品 Sample	酚醛树脂 Phenolic resin	基体材料 Base material	碳纳米管 Carbon nanotube	其它 Others
1	15	15	0	70
2	15	15	5	65
3	15	15	10	60
4	15	15	15	55
5	15	15	20	50
6	15	15	25	45

## 1.3 实验方法

摩擦材料的微观形貌和磨损形貌采用 Hitachi S4800 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察。参照“GB/T1041-2008”和“QC/T473-1999”, 摩擦材料的抗压和抗剪切强度通过 WDW-50 型电子万能试验机进行测试。参照“GB/T5763-2008”, 摩擦材料的摩擦磨损性能采用 XD-MSM 型定速摩擦试验机进行测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 物理和力学性能测试

2.1.1 碳纳米管含量对抗压和抗剪切强度的影响 由图 1 可知, 当碳纳米管含量为 15% 时, 摩擦材料的抗压和抗剪切强度达到最高值, 分别为 223 MPa 和 11.6 MPa。从总体上看, 随着碳纳米管含量的增加, 摩擦材料的抗压和抗剪切强度呈现出类似的变化规律: 均是先增加后降低。当碳纳米管含量低于 15% 时, 碳纳米管可以和其他材料紧密结合, 增强效果越来越明显, 摩擦材料的抗压强度和抗剪切强度均得以提升。当碳纳米管含量进一步增加 (高于 15%), 黏结剂的含量相对不足, 会弱化各组分之间的作用力。此外, 过多的碳纳米管自身会发生团聚, 也会降低增强效果。

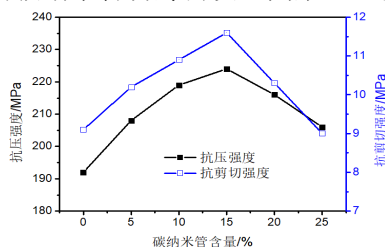


图 1 碳纳米管含量对摩擦材料抗压强度和抗剪切强度的影响

Fig.1 Effects of CNT content on compressive strength and shearing strength of friction materials

2.1.2 摩擦材料表面形貌 图 3 是碳纳米管含量分别为 0 和 15% 时, 所制得的摩擦材料断面高倍 SEM 照片。由图 3a 可知, 基体材料和各种填料呈现微米级颗粒, 尺寸均匀, 在酚醛树脂的作用下团聚在一起。从 3b 中可以观察到碳纳米管均匀覆盖在颗粒表面, 两者通过界面作用力紧密结合, 碳纳米管的增强作用得到充分的发挥, 使摩擦材料的抗压强度和抗剪切强度得到提高。

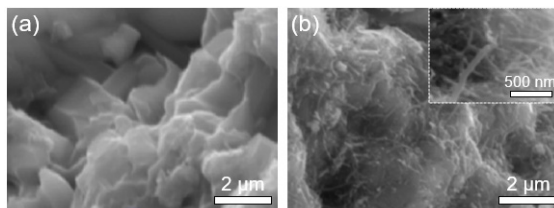


图 2 碳纳米管含量分别为 0 (a) 和 15% (b) 的摩擦材料的 SEM 照片  
Fig.2 SEM images of friction materials with CNT content of 0 (a) and 15% (b)

## 2.2 摩擦磨损性能测试

2.2.1 碳纳米管含量对摩擦因子的影响 由图 3a 可知, 不含碳纳米管时, 摩擦因子在 150 °C 之前上升, 经历 200 °C 的降低后显著增加, 温度达到 300 °C 再次下降。这是因为 300 °C 后摩擦材料开始出现热衰退, 热稳定性降低, 材料间的增强效果下降, 磨损加剧, 从而致使摩擦材料的摩擦因子降低<sup>[6]</sup>。与之相比, 碳纳米管含量为 15% 的摩擦材料的摩擦因子在温度升高过程中表现得很稳定, 一直波动在 0.33~0.40 之间, 这有利于提升刹车片在汽车制动时的车辆稳定性, 避免因为摩擦因子的急剧波动带来的车圈抱死或者刹不住车的后果。然而, 继续增加碳纳米管的含量至 25%, 摩擦材料在升温到 250 °C 的过程中摩擦因子上涨幅度特别高, 随后又出现下降趋势, 这归因于过多的碳管由于自身团聚而减弱增强作用, 高温下摩擦层随之被破坏, 磨损程度严重。

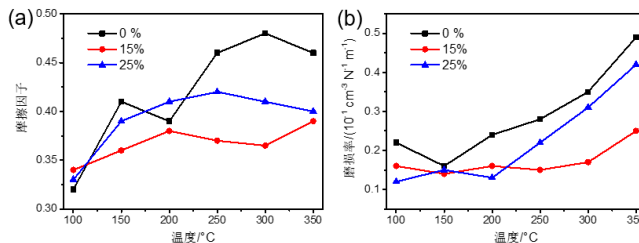


图 3 不同摩擦材料的摩擦因数 (a) 和磨损率 (b)

Fig.3 Friction coefficient (a) and wearing rate (b) of different friction materials

2.2.1 碳纳米管含量对磨损率的影响 图 3b 是碳纳米管含量与摩擦材料磨损率的关系曲线。和摩擦因子类似, 碳纳米管含量为 15% 时, 摩擦材料磨损率最为稳定, 在 100~300 °C 时一直保持在 0.14~0.18×10<sup>-1</sup> cm<sup>3</sup> N<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> 之间, 在 300 °C 后小幅度升高, 表明材料没有出现明显的磨损和热衰退。相比之下, 另外两个对样品磨损率更高, 并且在温度超过 200 °C 就出现显著增大, 说明热稳定性急剧下降。

## 2.3 磨损表面形貌

图 4a 是不加碳纳米管的陶瓷基摩擦材料的断面 SEM 照片, 可以观察到裸露的基体材料、填料以及孔洞结构, 这主要是因为酚醛树脂的黏结作用不够强。与之相对比的是碳纳米管含量为 15% 的摩擦材料的断面 SEM 照片 (图 4b), 各种材料紧密结合, 结构紧实, 没有看到明显的孔洞, 这主要是由于碳纳米管的增强作用得以凸显, 能够和基体材料、填料作用在一起。通过调整摩擦材料的内部结构来提升整体的物理、力学和摩擦磨损性能。

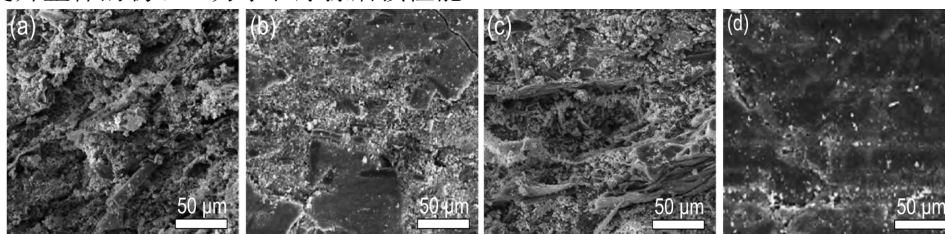


图 4 断面 SEM 照片

Fig.4 Cross-sectional SEM images

磨损前: 碳管含量 0 (a) 和 15% (b); 磨损后: 碳管含量 0 (c) 和 15% (d)  
Carbon tube content of 0 (a) and 15% (b) before abrasion; Carbon tube content of 0 (c) and 15% (d) after abrasion

(下转第 781 页)

游客体验的真实性。

### 参考文献

- [1] 温碧燕. 旅游服务顾客满意度模型实证研究[J]. 旅游科学, 2006, 20(3): 29-35
- [2] Pizam A. Tourism's Impacts: the Social Costs to the Destination Community as Perceived by Its Residents [J]. Journal of Travel Research, 1978, 16(4): 8-12
- [3] DunnRoss EL, Iso-Ahola SE. Sightseeing Tourists' Motivation and Satisfaction [J]. Annals of Tourism Research, 1991, 18(2): 226-237
- [4] Obenour W, Patterson M, Pedersen P, et al. Conceptualization of a Meaning-based Research Approach for Tourism Experiences [J]. Tourism Management, 2006, 27(4): 34-41
- [5] 李智虎. 谈旅游景区游客服务满意度的提升[J]. 营销企划, 2003(4): 39-41
- [6] 郭玲霞, 张勃, 王亚敏, 等. 兰州市旅游景区游客满意度研究[J]. 经济地理, 2010(9): 1580-1584
- [7] 李旭, 陈德广, 周伟伟. 基于因子分析法的开封市菊展游客满意度研究[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(5): 166-170
- [8] 焦世泰. 红色旅游景区游客满意度及其影响因素研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 115-120
- [9] 曹建春. 超山风景区景观生态规划与管理初探[J]. 现代园林, 2010(10): 43-44
- [10] 李瑛. 旅游目的地游客满意度及影响因子分析——以西安地区国内市场为例[J]. 旅游学刊, 2008, 23(4): 43-48
- [11] 林峰. 基于因子分析的老字号餐饮企业顾客满意度实证研究[J]. 旅游学刊, 2009, 24(7): 53-58
- [12] 林龙飞, 黄光辉, 王艳. 基于因子分析的民族文化旅游产品真实性评价体系研究[J]. 人文地理, 2010, 25(1): 39-43
- [13] 楚金华, 刘冉昕. 基于因子分析法的企业电子商务绩效评价[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(2): 223-226
- [14] 汪侠, 刘泽华, 张洪. 游客满意度综述与展望[J]. 北京第二外国语学院学报, 2010, 177(1): 22-29

(上接第766页)

图4c,d是上述两种摩擦材料磨损后的断面SEM照片。由图4c可知,不含碳纳米管的陶瓷基材料摩擦面有裂纹和明显的材料剥落现象,导致基体材料裸露。这是因为酚醛树脂在摩擦过程中产生的高温下发生分解,粘结作用随之降低,在受到摩擦力和压力后摩擦表面产生疲劳磨损形成裂纹,裂纹不断扩展诱使材料从摩擦面上脱落形成剥落坑<sup>[7]</sup>。由图4d可知,添加碳纳米管的陶瓷材料的摩擦表面仅仅观察到局部凹坑和一些轻微的划痕,表面致密的摩擦层明显提高摩擦系数的稳定性,抑制了摩擦材料的磨损程度。这说明碳纳米管有效降低了热衰退,提升了摩擦材料高温时的热稳定性,从而极大地改善了摩擦材料的综合性能。

### 3 结论

以碳纳米管作为增强材料,可以改善陶瓷基摩擦材料的内部结构,进而提升物理、力学以及摩擦磨损性能。当碳纳米管的含量为15%时,摩擦材料的抗压和抗剪切强度均达到最高值,分别为223 MPa和11.6 MPa,远高于不含碳纳米管的试样。然而碳纳米管含量过高(25%时),其增强作用弱化,导致热稳定性降低,磨损加剧,摩擦材料的摩擦因子和磨损率均高于碳纳米管含量为15%的摩擦材料。该研究结果表明一定含量的碳纳米管对于研制高性能的汽车刹车片用摩擦材料非常有效。

### 参考文献

- [1] Bernát R, Zálezák Z, Tkáč Z. Comparison of quality of braking pads under operational conditions [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1059: 43-51
- [2] Ahmadijokani F, Shojaei A, Arjmand M, et al. Effect of short carbon fiber on thermal, mechanical and tribological behavior of phenolic-based brake friction materials [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 168: 98-105
- [3] Singh T, Tiwari A, Patnaik A, et al. Influence of wollastonite shape and amount on tribo-performance of non-asbestos organic brake friction composites [J]. Wear, 2017, 386: 157-164
- [4] Agunsoye JO, Bello S, Bamigbaiye AA, et al. Recycled ceramic composite for automobile brake pad application [J]. Journal of Research in Physics, 2018, 39(1): 35-46
- [5] Popov VN. Carbon nanotubes: properties and application [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2004, 43(3): 61-102
- [6] Kim YC, Cho MH, Kim SJ, et al. The effect of phenolic resin, potassium titanate, and CNSL on the tribological properties of brake friction materials [J]. Wear, 2008, 264(3-4): 204-210
- [7] Lu W, Chung DDL. Oxidation protection of carbon materials by acid phosphate impregnation [J]. Carbon, 2002, 40(8): 1249-1254