

Development of New Friction Materials for Automotive

Yan-ping Liu, Wei Xie, Chun-guang Long, Bo Liang, Man-yu Hua, Ting Tang, Hai-jia Lin

(College of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan)

Abstract: Brake pads are an important vehicle brake system components, along with the car safety, environmental protection and energy saving requirements continue to increase and brake friction material manufacturing industry is also faced with severe challenges. This paper introduces a few friction materials for domestic and international situation, outlines the new friction materials and foreign research gaps, and that the trend of new friction materials is also discussed.

Keywords: New friction material; fiber; whisker

新型汽车摩擦材料研究进展

刘燕平, 谢炜, 龙春光, 梁波, 华燮煜, 唐婷, 林海佳

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院 湖南长沙 410114)

摘要: 刹车片是汽车制动系统中的重要部件, 随着对汽车安全、环保节能要求的不断提高, 制造刹车片的摩擦材料行业也面临着严峻的挑战。本文主要介绍了国内外新型摩擦材料的研究现状, 简述了我国新型摩擦材料与国外的研究差距, 并指出新型摩擦材料的发展方向。

关键词: 摩擦材料; 纤维; 晶须

1 前言

继2009年中国汽车市场产销量跃居世界第一之后, 新版汽车产业发展政策重心将立足自主品牌和新能源汽车, 做大做强汽车产业集团。在这一发展进程中, 汽车零部件的配置, 特别是摩擦零部件的发展举足轻重。随着各发达国家汽车工业的发展和现代社会环保意识提高, 对摩擦材料性能要求越来越高。由于石棉无法满足制动要求且易致癌^[1], 在70年代初期各国就已纷纷开发研制无石棉摩擦材料。我国无石棉摩擦材料研究始于80年代中期, 目前已开发出许多新型汽车摩擦材料^[2-4]。

汽车摩擦材料通常是指由纤维增强材料、树脂粘结剂、摩擦学性能调节剂及填料等组合而成的复合材料, 主要用于车辆和动力机械制动传动。本文主要介绍国内外研究较多的两种新型摩擦材料: 纤维增强摩擦材料和晶须增强摩擦材料。

基金项目: 长沙理工大学公路工程省部共建教育部重点实验室开放基金(kfj090109), 长沙理工大学“国家级大学生创新实验项目”(091053615)。

2 纤维增强摩擦材料

纤维增强摩擦材料主要包括编织类和纸基类, 不仅具有树脂基摩擦材料弹性好, 比重小的优点, 并且能克服树脂基摩擦材料热传导性差, 材料耐高温性能差的缺点, 最近十多年来在西方发达国家发展非常快。纤维摩擦材料弹性模量低, 系统工作时对相关零部件冲击小, 操作柔和舒适。

2.1 植物纤维摩擦材料

植物纤维由于具有很多优异的特性而逐渐地被研究者所熟悉, 比如其拉伸强度和断裂强度高、耐摩擦磨损、生态环保、可自然降解、是可再生资源以及轻质价廉等等。目前, 植物纤维增强聚合物基复合材料用在汽车内饰件的研究比较多, 而用于增强聚合物作为摩擦材料使用在国内外则比较少见, 研究中一般都将植物纤维作为摩擦材料的一个组分^[5]。J L G Silva等^[6]研究了天然植物纤维增强聚合物树脂, 建立了数学模型估测单纤维与树脂之间的接触角, 从而知道其对复合材料机械性能的影响, 同时研究表明了处理过的天然纤维增强聚合物基的拉伸强度和弯曲强度比没处理的要高; P Antich等^[7]研究了短剑麻纤维增强聚苯乙

烯的机械性能, 研究表明随纤维的增加, 硬度呈现增加的趋势, 在断裂处, 拉伸强度和变形强度却下降; C P L Chow等^[8]研究了剑麻纤维增强聚丙烯复合材料的吸湿性, 研究了纤维的水浴(90℃)处理对复合材料的拉伸性能和冲击性能, 研究结果表明拉伸强度和拉伸模量随水浴时间增加而逐渐下降, 冲击强度却在升高, 直到最大值; Bayer与其子公司Hennecke公司合作开发了一种利用亚麻纤维增强聚氨基甲酸酯生产汽车装饰物的技术。国内西安交通大学徐欣^[9]等人研究了剑麻纤维增强聚合物基摩擦材料, 比较研究了经过改性处理和未经处理的剑麻纤维增强摩擦材料的特性, 并与无机矿物纤维/钢纤维混杂纤维增强摩擦材料进行了对比, 得出剑麻纤维增强摩擦材料在不同温度条件下摩擦系数适中, 摩擦系数随温度变化波动平稳, 但与矿物纤维/钢纤维增强摩擦材料相比, 其磨损率仍然偏高。

植物纤维增强聚合物摩擦复合材料的研究正引起各国学者的重视。研究工作主要围绕在如何采用其它纤维原料与植物纤维复合, 开展了如下几方面工作: 一是改善表面的摩擦学性能, 包括耐磨性和稳定的摩擦系数。纤维原料种类、材料的弹性模量、材料的多孔性、增强树脂及填料种类是影响摩擦系数的主要因素。二是提高材料的耐热性, 包括热稳定性和耐高温性能; 纤维原料种类和增强树脂是影响耐热性的直接因素, 材料的热传导性虽然是影响耐热性的间接因素, 却非常重要。三是提高材料的热传导性, 它受纤维原料种类和材料的多孔性影响最大。四是提高材料相关强度, 包括剪切强度、耐压强度等; 它主要受纤维原料种类和增强树脂的影响。

2.2 有机纤维摩擦材料

芳纶纤维(Kevlar纤维)被公认为是石棉最佳代用纤维, 因其表现出比半金属基摩擦材料低的侵蚀性, 比石棉型摩擦材料低的磨损率, 具有舒适的刹车性能、良好的摩擦磨损性能和制动噪音性能。摩擦材料所使用的芳纶纤维有短切纤维和芳纶浆粕, 用得最多的是芳纶浆粕, 其主要机理是纤维在摩擦面形成转移膜, 起润滑作用, 降低对偶的不平整度及减小磨粒尺寸。某些有机纤维摩擦学性能虽比植物纤维好, 也可提高材料的强度和多孔性, 但热稳定性差, 在高温下与植物纤维一样易发生炭化现象, 降低材料的使用寿命。但由于Kevlar纤维的制造工艺和处理工艺复杂, 特别是工业化生产时纤维分散较困难, 而且价格昂贵, 因

此在国内的生产和推广受到了限制。武汉工业大学的曹献坤等^[10]采用高速搅拌及依电性顺序加料混合的方法, 较好地解决了Kevlar纤维的开松分散问题, 有效增加Kevlar纤维强度, 提高耐磨性和耐热性, 并使其在摩擦材料中的应用将推广开来。日本及俄罗斯的芳纶纤维已投入市场, 年增长速度达到20%左右, 在国外得到较快发展。芳纶纤维比强度、比模量较高, 因此被广泛应用于航空航天领域的高性能复合材料零部件、舰船、汽车以及耐热运输带、体育运动器材等。

2.3 金属纤维摩擦材料

金属纤维可显著提高材料的热传导性和热稳定性, 也可耐一定温度, 但在高温条件氧化较快, 影响材料的摩擦学性能和使用寿命。哈尔滨工业大学的张少阳^[11]等人研究发现含8%硅酸铝的铝金属基摩擦材料可表现出最好的摩擦磨损性能和更高摩擦水平。美国Bendix公司最早发明钢纤维增强摩擦材料并成功用于盘式制动器中, 这种摩擦材料具有稳定的摩擦学性能, 耐磨性好, 有较高的制动效率和较好的散热性, 钢纤维的导热性能好, 能使摩擦材料表面的热量迅速扩散至内部, 降低摩擦表面温度, 避免因表面温度过高, 使树脂基体发生热分解导致材料磨损加剧, 延长了摩擦材料的使用寿命。H. Jang^[12]等人对不同的金属基纤维摩擦材料进行了实验, 实验表明, 钢纤维在高温下性能稳定, 并表现出极好的抗褪色性。钢纤维的不足之处是密度相对较大; 易锈蚀、锈蚀后发生粘连影响汽车的换档分离; 加剧磨损和损伤对偶; 当钢纤维含量超过一定限度(>10%)时, 易引起制动尖叫和震颤。

2.4 陶瓷纤维摩擦材料

陶瓷纤维对于改善材料的摩擦学性能, 提高材料的热稳定性、耐热性和剪切强度、耐压强度都有非常大的作用。由于机动车对摩擦材料提出更高的要求, 研究工作大量集中如何利用陶瓷纤维来增加材料的强度和耐热性、摩擦学性能等方面。总的来说, 研究工作主要集中在两方面^[13], 一是陶瓷纤维的比重比植物纤维大, 选用的陶瓷纤维长度也比普通的植物纤维长, 在用传统造纸的办法成型时在水中易沉降、絮聚, 材料的匀度和多孔性下降, 从而影响材料的强度和摩擦学性能, 因此, 采用何种有效的技术是研究的焦点; 二是陶瓷纤维的价格较贵, 如何降低成本也是推广这类新材料的关键问题。

2.5 混杂纤维摩擦材料

最近二十年的研究工作表明,没有一种单一纤维原料能完全满足现代机动车对摩擦材料的要求,因此对多种纤维材料复合技术的研究成为研究热点。混杂纤维增强是目前增强体的主要发展方向。混杂复合材料不仅极大地扩展了复合材料的性能和使用范围,使材料充分保留了单种增强材料的优点,同时还增加了材料的可设计性,达到单种增强物所不能实现的效果,使复合材料在低成本下实现了多功能化。通常可取矿物纤维、玻璃纤维、钢纤维等易造成对偶磨损的硬质纤维与芳纶纤维、碳纤维等软质纤维混杂增强。美国的P.Gopal等对芳纶纤维浆粕和钢纤维、玻璃纤维混杂纤维增强摩擦材料性能作出了系统的研究,结果表明该种摩擦材料具有较低的摩擦系数,磨损量明显减少,并可明显降低甚至完全去除高频(频率 $>5\text{kHz}$)^[14]。Amin Salehi-Khojin等^[15]发现芳纶纤维/钛酸钾纤维增强摩擦材料中摩擦界面形成了一层耐用的表面膜,而钛酸钾纤维附着在芳纶纤维上,提高了表面膜的耐热性和强度,使得摩擦材料的摩擦磨损性能稳定;杨富军^[16]等发现陶瓷纤维、钛酸钾晶须和Kevlar纤维混杂制备的摩擦制动材料具有良好的摩擦磨损性能和物理性能。此外,碳纤维/钢纤维、玻璃纤维/有机纤维、钢纤维/芳纶纤维等的混杂增强,都取得了很好效果。据有关资料,采用碳纤维30%、钢纤维15%混杂增强的摩擦材料比石棉型摩擦材料耐磨性提高3倍,在300℃时摩擦系数无热衰退现象^[17]。混杂纤维复合材料在战略导弹、战斗机、直升机与客机等方面也得到了广泛应用。例如,美国波音公司的客机除了发动机和起落架外,飞机的大部分结构材料均采用CF/KF及其混杂复合材料^[18]。

相较于国外情况,目前我国的混杂纤维复合材料需加强以下几方面的研究:一是国内应用的纤维种类比较少,主要是碳纤维和玻璃纤维。见诸报道的有玻璃纤维、芳纶纤维、碳纤维、PBO纤维、高强高模聚乙烯纤维、麻纤维等增强纤维。应尝试将新型纤维如玄武岩纤维及纳米技术等用于混杂纤维混合材料中,以推动混杂复合材料在我国的发展。第二个方面是将某两种纤维进行混杂并研究其性能,但其混杂机理还不是十分清楚。

而将3种及以上的纤维进行混杂应用的报道,在国内几乎没有。山东大学的庄光山等^[19]采用改性酚醛树脂为基体,碳纤维与钢纤维、矿物纤维等三种纤维混

杂使用作为增强材料制成的少金属制动闸片完全满足最高运行速度为120~160km/h的提速列车的使用要求,但对其摩擦增强机理没有说明。又鉴于对混杂纤维复合材料性能的模拟难见报道,因此这方面的研究也需要加强。三是在加强混杂纤维复合材料的研究基础上,应大力拓展其应用领域范围,使产学研相结合,以进一步促进混杂纤维复合材料的发展。

3 晶须增强聚合物基复合摩擦材料

晶须作为一种新型的增强材料在最近的十几年里得到了长足的发展,各种性能优良的晶须聚合物复合材料相继问世,其力学性能、摩擦学性能不断提高。20世纪80年代中期,晶须增强、增韧复合材料的研究取得了重大进展。日本、美国走在前列,国内的研究起步虽晚,但也取得了较大成就,清华大学、上海硅酸盐研究所等进行了晶须增强陶瓷基复合材料的研究;哈尔滨工业大学、沈阳金属研究所等进行了晶须增强金属基复合材料的研究;西北工业大学、西安交通大学、上海交通大学、南京化工大学等则进行了晶须增强塑料、橡胶等复合材料的研究^[20]。

据目前相关实验研究发现,晶须可以提高复合材料承载能力,在摩擦过程中晶须部分代替基体树脂承载,减少了摩擦副表面的粘着,阻止了基体树脂的热塑性变形,从而有效提高了复合材料耐磨性。

晶须改性聚合物已经成为当前聚合物基复合材料研究的热点之一。晶须是在人工控制条件下以单晶结构形式生长、尺寸细小的高纯度针状纤维材料,其结构完美、内部几乎无缺陷,强度和模量均接近晶体材料的理论值,是一类力学性能十分优异的新型复合材料增强增韧剂。迄今为止材料学家们研究开发了数百种晶须,主要包括:(1)金属晶须,如Sn、Fe、Cu、Te、Cd、Ni、Al等;(2)陶瓷晶须,如碳化硅、氮化硅、钛酸钾、硼酸铝、氧化锌、碳酸钙和镁盐、硫酸钙等;(3)有机晶须,如聚4-2羟基丁酸酯(PHB)、纤维素晶须等。陶瓷晶须因其强度和耐热性能均优于其它两类晶须而真正进入工业化生产并在复合材料中得到广泛应用,中国矿业大学的朱真才^[21]等人实验表明质量分数为70%的丁腈橡胶改性酚醛,质量分数为12%硫酸钙晶须和4%芳纶纤维制品可表现出最佳摩擦学性能。钛酸钾晶须具有良好的热稳定性和与树脂粘结剂较好的亲合性,它与芳纶纤维浆粕一起加入摩擦材料里,可以保持摩擦表面上形成的薄膜的强度和耐热性,表现

出极好的摩擦学性能^[22]。然而其中的碳化硅晶须、氮化硅晶须等高性能晶须因价格昂贵而使其规模化应用受到限制,因此,开展钛酸钾晶须、氧化锌晶须、硼酸铝晶须等陶瓷晶须的研究显得尤为重要。

因晶须增强聚合物基摩擦材料的研究时间较短,晶须含量和晶须表面处理对复合材料的影响还没有建立相应的理论模型,使实验缺乏可扩展性和可移植性。再者,晶须与基体材料结合的宏、微观结构以及结构性能方面的研究也未见报道。因此应积极开展晶须与基体结合微观形态的分析,建立微观结构与宏观性能之间的联系,并进一步开发控制界面化学成分的技术;深入探讨晶须聚合物复合材料的制备工艺,进一步优化工艺参数,制备性能优异的复合材料;探索晶须制备新工艺,降低晶须制备成本以促进规模化生产。

4 结语

增强摩擦材料是汽车摩擦材料体系中的一个重要组成部分,它与摩擦磨损等性能密切相关。虽然摩擦材料已经过二十多年发展,但摩擦材料的综合性能仍有待进一步全面提高。为了适应我国汽车工业发展的要求和环保要求,我国的汽车摩擦材料行业应加快改革,改善管理,改进工艺,调整产品结构,提高产品质量。

国外在摩擦材料生产上十分重视采用先进的工艺设备和计算机控制技术,积极采用新技术、新材料、新工艺,不仅产品产量高,而且产品外观、质感和性能都十分稳定。笔者认为我国在未来也将以开发高刚度、高强度、高湿热环境下使用的新型摩擦材料为重点,构筑材料、成型加工、设计、检验一体化的材料系统,充分利用各方面的资源,紧密联系各方面的优势,以推动新型摩擦材料工业进一步发展。

References (参考文献)

- [1] Jacko M G, Tsang P H S, Rhee S K. Automotive friction materials evolution during the past decade[J]. *Wear*, 1984, 100: 503-515.
- [2] Tian Nong, Xue Zhongmin, Zhang Zuoguang. Research Progress of Fiber Reinforced Polymer-based Frictional Materials[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(2):98-101
田农,薛忠民,张佐光.纤维增强聚合物基摩擦材料的研究进展[J].*润滑与密封*,2009,34(2):98-101.
- [3] 赵世海,蒋秀明,淮旭国,等.玄武岩纤维增强酚醛树脂基摩擦材料的摩擦磨损性能[J].*机械工程材料*,2010,5:52-55.
- [4] LI Xiao-hui, JIN Shilei, SUN Lanhui, et al. Tensile and Tribological Properties of Polyester Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites. [J].*Materials for Mechanical Engineering*,2010,3:61-65.
李小慧,金石磊,孙澜晖,等.聚酯纤维布增强环氧树脂基复合材料的拉伸和摩擦学性能[J].*机械工程材料*,2010,3:61-65.
- [5] WU Yin, Zhou Yongzi. Research on Friction Material of Natural Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites[J].*Hunan Nonferrous Metals*, 2008,24(1): 33-36.
吴茵,周拥仔.天然纤维增强聚合物基摩擦材料的研究[J].*湖南有色金属*,2008,24(1): 33-36.
- [6] Silva J L G, Al-Qureshi H A. Mechanics of wetting systems of natural fibres with polymeric resin[J].*Journal of Materials Processing Technology*,1999,92-93:124-128.
- [7] Antich P, Vázquez A, Mondragon I, et al. Mechanical behavior of high impact polystyrene reinforced with short sisal fibers[J].*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006,37(1):139-150.
- [8] Chow C P L, Xing X S, Li R K Y. Moisture absorption studies of sisal fibre reinforced polypropylene composites [J].*Composites Science and Technology*,2007,67(2):306-313.
- [9] XU Xin, CHENG Guangxu, LIU Feiqing. Modifying of sisal and friction performance of the sisal reinforced resin composite.[J].*Acta Materiea Compositae Sinica*. 2006,23(1):129-134.
徐欣,程光旭,刘飞清.剑麻纤维的改性及其在摩擦材料中的应用[J].*复合材料学报*,2006,23(1):129-134.
- [10] CAO Xiankun, LIANG Lei, YAO Anyou, et al. Probe into Multifactor Sensitive Analysis for Evaluation of Project. [J]. *Non-Metallic Mines*, 2000,23(3): 49-50.
曹献坤,梁磊,姚安佑,等.Kevlar增强新型制动摩擦材料研究[J].*非金属矿*,2000,23(3): 49-50.
- [11] Zhang S Y, Wang F P. Comparison of friction and wear performances of brake materials containing different amounts of ZrSiO₄ dry sliding against SiCp reinforced Al matrix composites [J]. *Materials Science and Engineering A*,2007, 443:242-247.
- [12] Jang H, Ko K, Kim S J, et al. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials[J]. *Wear*,2004,256: 406-414.
- [13] Cheng Rong, Hu Jian. Development of-Fiber_Based Friction Material[J].*Guangdong Paper Industrial*, 2000,2:38-40.
陈蓉,胡健.纤维摩擦材料的发展[J].*广东造纸*,2000,2:38-40.
- [14] 刘震云,黄伯云,苏堤,等.汽车摩擦材料增强纤维研究综述[J].*汽车技术*,1999(1):19-22.
- [15] Shi Zhigang. New Development of Automobile Friction Material Industry Abroad[J]. *Non-Metallic Mines*, 2001,24(2):52-53.
石志刚.国外汽车摩擦材料工业的新进展[J].*非金属矿*,2001,24(2):52-53.
- [16] YANG Fujun, HU Yiqiang, LIU Wei. Research on the Friction and Wear Property of Hybrid Fibres.[J].*FIBER COMPOSITES*, 2009,26(2):56-58.
杨富军,胡以强,刘伟.混杂纤维对摩擦材料性能影响的研究[J].*纤维复合材料*,2009,26(2):56-58.
- [17] ZHU Tiehong, GAO Chenghui,. The Development and prospect of friction materials[J].*Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition)*, 2001,29(6):52-56.

- 朱铁宏,高诚辉.摩擦材料的发展历程与展望[J].福州大学学报,2001,29(6):52-56.
- [18] YAN Luke, KOU Kaichang, HA Enhua. New Fibre Material Used in Advanced Composite Material[J].www.mat-rev.com, 2004,18(3):61-62.
颜录科,寇开昌,哈恩华,等.开发高性能复合材料中使用的新型纤维材料[J].材料导报,2004,18(3):61-62.
- [19] ZHUANG Guangshan, WANG Chengguo, WANG Haiqing, et al. Study on Hybrid Fibers Reinforced Braking Pad Based on Modified Phenolic Resin[J]. China Plastics Industry. 2003,31(2):36-40.
庄光山,王成国,王海庆,等.混杂纤维增强酚醛基制动闸片的研制[J].塑料工业,2003,31(2):36-40.
- [20] HUA Manyu, LONG Ghuanguang. Research Development of Ceramic-whiskers Reinforced Polymer Composites[J]. www.mat-rev.com, 2008,22(2): 22-25.
华曼煜,龙春光.陶瓷晶须/聚合物基复合材料的研究进展[J].材料导报,2008,22(2): 22-25.
- [21] Zhu Z C, Xu L, Chen G A, et al. Optimization on tribological properties of aramid fibre and CaSO₄ whisker reinforced non-metallic friction material with analytic hierarchy process and preference ranking organization method for enrichment evaluations [J].Materials and Design, 2010,31:551-555.
- [22] Kim S J, Cho M H, Lim D S, et al. Synergistic Effects of Aramid Pulp and Potassium Titanate Whiskers in the Automotive FrictionMaterial[J].Wear,2001,251:1484-1491.