

分类号 _____
U D C _____

密级 _____
编号 _____

中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕 士 学 位 论 文

论 文 题 目 高性能树脂基半金属汽车摩擦

材料的研制

学 科、专 业 材料学

研 究 生 姓 名 伍朝阳

导 师 姓 名 及

其专业技术人员职务 黄伯云教授

副导师姓名 刘伯威副教授，刘咏教授

摘要

在查阅和分析大量国内外文献的基础上，本论文以自行研制的新型高性能汽车制动盘式片为研究对象，通过理论和试验研究，探讨了钢纤维含量和酚醛树脂含量对摩擦材料的性能影响规律及其摩擦磨损机理，达到了预期的目标。并在前人研究的基础上，建立了树脂基摩擦材料摩擦系数与配方数据的神经网络模型，对摩擦材料摩擦系数进行预测。同时，通过有限元模型对摩擦材料工作温度场进行研究。为新型摩擦材料的研究和应用提供了理论和实验依据。

本工作进行的具体研究工作如下：

本文设计了 7 组钢纤维含量不同的配方和 5 组酚醛树脂含量不同的配方，对它们的摩擦性能进行研究。研究表明，钢纤维含量为 22% 左右的配方，摩擦性能最好，其稳定摩擦系数为 0.425，衰退率为 30% 以下，为 7 组配方中最小的，有一点过恢复，但这对刹车性能的影响较小，磨损率适中。5 组酚醛树脂含量不同的配方中，酚醛树脂含量为 10% 左右的配方性能最好，其稳定摩擦系数为 0.325，衰退是 5 组配方中最小的。

通过对摩擦后的摩擦材料进行扫描电镜研究，发现，低温时，摩擦材料以磨粒磨损为主，高温时，摩擦材料以粘着磨损为主。

建立了预测摩擦材料摩擦系数和成分之间关系的神经网络模型，首先利用已有数据训练网络，然后对未知成分进行预测，预测结果与实验数据的误差在 13% 以下。

对摩擦材料工作温度场进行计算，计算结果表明，摩擦材料等温线在表面分布密集，说明摩擦材料在工作过程中，高温区域只分布在表面很薄的一层。

关键词：衰退性能；速度相关性；酚醛树脂；神经网络；温度场

Abstract

Based on consulting and analyzing lots of internal and overseas documents about friction materials, the paper takes auto disk brake-shoes of self-development as research object, and discusses the influence of content and of steel fiber and phenol formaldehyde resin (PF-resin) on the performances by research of theory and test, at the same time also the mechanism of the friction and wear, attains the anticipated results. Moreover a neural networks (NN) model was created to study the relationship between friction coefficient and components, based on seniorities' research fruits. At the same time, working temperature field of friction materials were studied using Matlab PDE-toolsbox. The paper applies the bases of theory and test for the research and application of the new type of friction material.

Following are the specific work proceeded in the paper.

Seven types of compoundings containing different mass number of steel fibers and five types of compoundings containing different mass number of PF-resin are designed to study their friction performance. The results show that friction performance represented best when the mass number of steel fiber is about 22%. Its steady friction coefficient is about 0.425. Its decay coefficient is lower than 30%, which shows the lowest in the desired seven directions. The results show that friction performance represented best when the mass number of PF-resin is about 10%. Its steady friction coefficient is about 0.325. Its decay coefficient is the lowest in the desired five directions.

The surface of some friction materials were studied using stereoscan photograph. The results showed that grain-abrasion is the main type of abrasion types when low temperature and adhesion-abrasion is the main type of abrasion types when high temperature.

ANN model was created to study the relationship between friction coefficient and components, based on the seniorities' research fruits. The model was trained using the data collected before. Some unknown compoundings' performance were forecasted. The results show mostly

13% error rate.

At last, working temperature field of friction materials was computed. The results show that isotherm of friction material distributed thick and fast on the surface. So the high temperature area of the friction material was very thin.

Key words: recession performance; velocity correlation; phenol formaldehyde resin; neural network; temperature field.

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 文献综述.....	1
1.1 摩擦材料研究与发展概况.....	1
1.1.1 国外汽车摩擦材料的发展.....	1
1.1.2 国内汽车摩擦材料的发展.....	3
1.1.3 汽车摩擦材料的发展趋势.....	4
1.2 树脂基汽车摩擦材料的组成分析.....	5
1.2.1 增强纤维.....	5
1.2.2 粘结剂.....	8
1.2.3 增摩组元.....	11
1.2.4 减摩组元.....	11
1.2.5 填料.....	11
1.3 人工神经网络技术在树脂基摩擦材料成分设计中的应用.....	12
1.3.1 人工神经网络概述.....	12
1.3.2 人工神经网络的形式化描述.....	13
1.3.3 神经网络的功能和特点.....	14
1.3.4 人工神经网络技术在材料科学中的应用.....	14
1.4 树脂基摩擦材料工作温度场的模拟计算.....	15
1.5 本课题研究的主要目的以及选材.....	16
第 2 章 摩擦材料各成分的性能研究.....	18
2.1 粘结剂.....	18
2.1.1 树脂的选用.....	18
2.1.2 丁腈橡胶改性.....	20
2.2 增强纤维.....	22
2.2.1 几种常见纤维的基本性能.....	22
2.2.2 纤维与基体的相容性.....	24
2.3 本章小结.....	26
第 3 章 摩擦材料的成分设计和实验方案.....	27
3.1 摩擦材料的成分设计.....	27
3.1.1 不同成分的摩擦材料配方的设计.....	28
3.2 摩擦材料制备工艺设计.....	29
3.3 树脂基摩擦材料的性能评定及实验方法.....	31
3.3.1 定速实验.....	31
3.3.2 惯性台架实验制度.....	32
3.3.3 其他实验.....	36
第 4 章 树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的研究.....	37
4.1 钢纤维含量对摩擦材料摩擦性能的影响.....	37
4.1.1 惯性台架实验结果及分析.....	37

4.1.2 综合分析及讨论.....	47
4.1.3 小结.....	49
4.2 酚醛树脂含量对树脂基摩擦材料性能的影响.....	49
4.2.1 实验数据及其分析.....	55
4.3 树脂基摩擦材料摩擦磨损机理.....	56
4.3.1 原始粉末与初始摩擦面.....	56
4.3.2 树脂基摩擦材料不同摩擦状态后的表面形貌.....	57
4.4 本章小结.....	60
第 5 章 基于神经网络的树脂基摩擦材料摩擦系数的预测模型.....	61
5.1 实验方法.....	61
5.1.1 实验工艺.....	61
5.1.2 实验检测.....	62
5.2 神经网络模型.....	63
5.2.1 人工神经网络的建立.....	63
5.2.2 主程序的设计.....	64
5.2.3 预测结果.....	66
5.3 应用与讨论.....	68
单一成分对树脂摩擦材料摩擦系数的影响.....	68
5.4 本章小结.....	70
第 6 章 摩擦片工作温度场的计算.....	71
6.1 实验方法.....	71
6.2 物理模型.....	71
6.2.1 模型的简化.....	71
6.2.2 建立物理模型.....	71
6.3 偏微分方程.....	72
6.3.1 热传导问题.....	72
6.3.2 边界条件.....	73
6.3.3 边界条件求解.....	74
6.3.4 偏微分方程求解.....	74
6.4 网络输出与实验数据及其对比分析.....	74
6.5 小结.....	76
第 7 章 主要结论.....	77
参考文献.....	78
致 谢.....	83
攻读硕士学位期间主要的研究成果.....	84

第1章 文献综述

1.1 摩擦材料研究与发展概况

1.1.1 国外汽车摩擦材料的发展

摩擦材料在汽车产生以前就出现了，最初，人们采用天然材料，如软木、动物皮革等材料作为车辆的刹车片，这些材料具有较合理的摩擦系数，但是随着车辆速度的不断提升，这些材料无法满足要求，原因是它们没法抵抗刹车产生的高温。19世纪初，英国人 Mr. H. Frood 开始研究以毛发、棉花等纤维与沥青混合制成的复合材料刹车片，结果表明，刹车性能有所提升，但仍然无法满足高温性能的要求。于是人们开始着力寻找其他耐高温的材料来作为汽车刹车材料^[1]，1908年，石棉布被用做汽车刹车材料的替代品^[2]，但很快由于对摩擦性能要求的不断提高，其它成分陆续加入，石棉短纤维代替了石棉，并与粘结剂配合，在高温高压下成型。20世纪三十年代，石棉有机摩擦材料产生，它具有较好的摩擦磨损性能，良好的工艺性能，因此在以后五六十年内，一直主导着汽车制动摩擦材料领域。被广泛应用于低、中负荷、干式高速等工况下。

上世纪 70 年代以来，随着石棉被定为致癌物质，石棉作为汽车刹车材料增强材料逐渐在各国被禁止使用^[3,4]。汽车制动摩擦材料^[5,6]至此又再次经历一次新的变革。

从这个世纪开始汽车摩擦材料的发展大致经历了以下三个阶段：70 中期以前，汽车制动系统多为鼓式制动方式，多采用石棉摩擦材料；70 中期至 80 年代中期，世界能源危机、汽车速度的加快以及石棉危害性的确认，均促使汽车制动器向盘式制动和无石棉摩擦材料方向发展；80 年代中期至今，盘式制动和新型摩擦材料迅速发展，并实现了工业化生产。随着汽车工业的迅猛发展，摩擦材料也按照环保、安全及速度超高的要求全面提高综合使用性能，相继诞生了第二代和第三代半金属材料^[8-15]，如低导热率半金属基材料，低噪音半金属基材料等。

目前，大多数小客车和轿车都采用前盘后鼓式制动配置。其中盘式制动副^[16]的结构一般是一个制动卡钳和一个铸铁制动组成，如图 1.1。

盘式汽车制动副的优点是，减小了汽车制动副的占用空间和重量，从而满足了当今小型汽车小型化、轻量化的要求。但是由于制动接触面积的缩小，制动材料单位面积吸收的能量要比鼓式制动片大 3~5 倍。因此，对汽车制动材料的摩擦

磨损性能要求很高。



图 1-1 盘式制动器结构

国外对新型汽车摩擦材料的研究开始比较早，上世纪 80 年代中期，石棉纤维在欧美发达国家被禁用，这个时期，美国、欧洲一些发达国家，投入了大量的资金对新型汽车制动摩擦材料进行了研究，使无石棉摩擦材料发展迅速。

德国 ATE 公司曾宣称，该公司先后投入很大资金研制高性能无石棉汽车制动材料。美国 Bendix 公司在摩擦材料研究方面一次性投资就达 2500 万美元。在日本，从发表的专利来看，有一半为无石棉摩擦材料。美国已登记注册的无石棉汽车刹车材料专利也达一百多项。

树脂基汽车摩擦材料具有价格低廉、生产工艺简单、摩擦性能稳定等优点，因此引起广大研究工作者浓厚的兴趣。

Seong Jin Kim^[17]等对树脂改性及芳纶纤维的含量进行了研究，研究认为，改性树脂的高温性能良好，芳纶纤维含量在 10% 时，摩擦材料性能最稳定，更多的纤维含量对摩擦材料性能的影响不大。

H. Jang^[18]等对多种成分的摩擦材料进行了正交分析，分析表明，锆石、钢棉、酚醛树脂含量的上升导致 $\Delta \mu$ ($\Delta \mu = \mu_s - \mu_k$) 升高，Sb₂S₃、腰果壳、岩棉含量的上升导致 $\Delta \mu$ 下降，因此，可以通过调节这两类成分的比例来控制刹车时低频震动和摩擦系数。

J. Bijwe^[19]等分别对以未改性的酚醛树脂、苯烷改性酚醛树脂、腰果壳油改性酚醛树脂、丁腈橡胶共混改性酚醛树脂、蓖麻油改性酚醛树脂作为粘结相的五种组分的摩擦材料进行研究，研究发现苯烷改性酚醛树脂抗衰退性能和恢复性能比较好，但磨损较大；丁腈橡胶共混改性酚醛树脂抗衰退性能和恢复性能都不如未改性的酚醛树脂，但它具有较好的摩擦性能平稳性和较低的磨损率，蓖麻油改

性酚醛树脂是所有材料中综合性能最差的。

R. J. Talib^[20]等对树脂基摩擦材料的磨损进行了扫描电镜分析，分析结果认为，树脂基摩擦材料的磨损主要有以下5种机制：磨粒磨损、粘着磨损、疲劳磨损、脱层、热磨损，磨损率受正压力和磨损时间影响显著。

1.1.2 国内汽车摩擦材料的发展

我国汽车摩擦材料的发展起步比较晚，上世纪80年代后期开始，无石棉摩擦材料被提上研究历程，经过20多年的研究，我国无石棉汽车摩擦材料^[21-25]取得了长足进步。目前，很多刹车片配套厂家都已经生产无石棉汽车摩擦材料。大多数车型都使用了无石棉汽车摩擦材料。上海、杭州、山东、湖北、湖南等地都有一些厂家生产无石棉汽车摩擦材料。

国内汽车摩擦材料的发展与汽车工业发展密切相关，近年来，国内汽车工业飞速发展，给汽车摩擦材料的发展提供了有利的契机。目前，汽车摩擦材料的研究主要在以下几个方面：

- a. 热固性酚醛树脂^[26-29]作为增强材料的酚醛树脂。热固性酚醛树脂的热分解温度在380℃左右，是作为汽车摩擦材料粘结剂理想材料。但是随着汽车对其刹车副制动性能的不断提高，传统不经改性的酚醛树脂耐高温性能已经不能满足材料的使用要求。因此，目前，对酚醛树脂的改性是树脂基摩擦材料研究的热点之一。四川大学李屹等人对酚醛树脂进行改性，通过加入桐油，使酚醛树脂的热分解温度提高了40-70℃。华东理工大学张西奎等人对酚醛树脂加入丁腈橡胶改性，改性前的酚醛树脂在380℃时热解残量为77%，而改性后的酚醛树脂至400℃时的热解残量还高达90%。中国海洋大学尹衍升等人加入腰果壳油对酚醛树脂进行改性，也取得了显著的效果。
- b. 增强纤维的选择也是目前树脂基摩擦材料研究的热点之一。钢纤维强度高，耐热性能好，同时钢纤维和常用铸铁对偶盘的亲和性很好，因此，钢纤维在树脂基摩擦材料中使用非常广泛。但是钢纤维密度大，耐腐蚀性差，以钢纤维作为增强材料的硬度过高，与对偶件摩擦容易产生制动噪音等缺点，影响了它的使用，因此，目前，有些研究工作者找了些其它纤维来替代钢纤维。西安交通大学对剑麻短纤维用作树脂基摩擦材料的增强纤维^[30-32]进行研究，并成功的用剑麻纤维代替钢纤维作为增强材料制造出摩擦性能优秀的摩擦材料。清华大学、中国纺织大学、华东理工大学等单位对芳纶纤维用作树脂基摩擦材料的增强纤维^[33-36]进行了研究，开发出了性能优良的摩擦材料。同时玻璃纤维、各种陶瓷纤维、各种矿物纤维等纤维都被用作增强纤维替代钢纤

维。

1.1.3 汽车摩擦材料的发展趋势

随着汽车工业的飞速发展，人们环保和节能意识的提高，对新一代汽车制动装置提出了更高的要求。新型制动装置一般要具备以下条件：

1) 结构尽可能轻巧：所以近年来，逐渐有一部分制动盘由 Al—MMC(Metal Matrix Composite)^[37,38]材料代替，这种新型复合材料是一种颗粒(SiC)增强铝基复合材料，具有低密度，高比强度，高比刚度，优良的耐磨性能，优秀的导热性能，能减轻制动过程中闸片与制动盘之间的损伤。Nakanishi.H 等人研究了铸铁和 Al-MMC 在制动过程中的摩擦磨损机理(如图 1.2)。对铸铁制动盘，摩擦材料中比铸铁^[39]硬度大的材料颗粒被铸铁表面的粗糙峰磨去，在摩擦材料与铸铁表面较凹的地方聚集，形成摩擦转移膜，摩擦材料对铸铁的擦刮，磨屑的聚集达到平衡的时候，摩擦转移膜将维持在一定的厚度。恒定的摩擦转移膜对摩擦系数

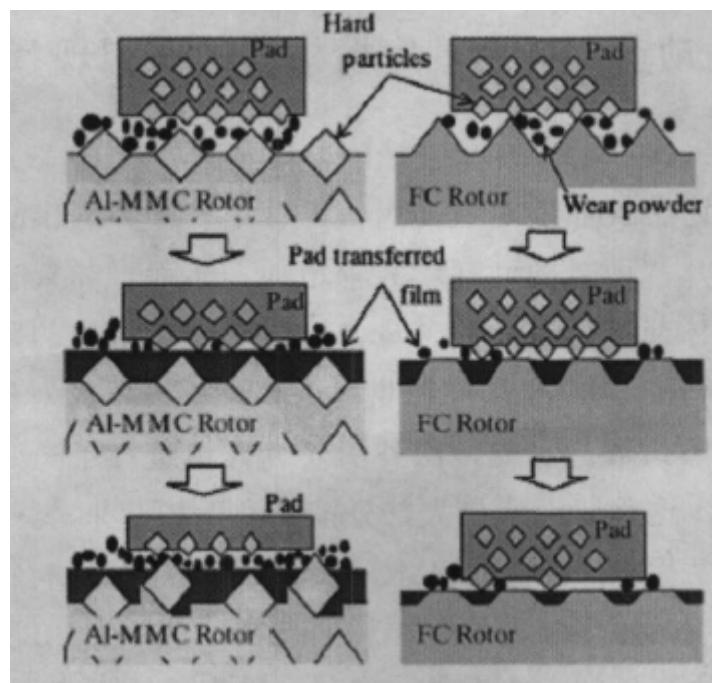


图 1-2 Al-MMC 与铸铁摩擦机理比较

的稳定很有好处。对于 Al-MMC 而言，其硬质增强颗粒 SiC，硬度非常大，摩擦材料中没有比它的硬质点硬度更大的材料，因此其中的硬质点对摩擦材料产生擦刮，大量磨屑填充在 Al-MMC 硬质颗粒之间。由于硬质点的持续擦刮，转移膜会越来越厚，导致摩擦系数持续下降，这是 Al-MMC 摩擦对偶件的一个不足之

处。表面自洁能力不如铸铁。

2) 耐高温性能高: 目前使用的摩擦材料主要有以下3种: ①C/C复合材料刹车材料^[40-46], 主要运用在民航、军用飞机、赛车以及一些对摩擦性能要求非常高的重要领域, 价格非常昂贵; ②各种铁基、铜基粉末冶金烧结复合材料、陶瓷材料^[47-53]主要应用在军工、列车、赛车、飞机等领域的刹车副, 造价也比较高, 而且, 由于金属间容易产生粘结, 导致发生抱死等事故的发生, 低温状态下, 刹车性能也不理想; ③树脂基纤维增强摩擦材料, 在刹车力矩相对较小的情况下使用, 是目前普遍使用的摩擦材料, 它具有价格低廉、摩擦性能优秀、原材料来源广阔等优点。但是, 由于有机粘结剂的耐高温性能不是很理想, 因此, 如何提高树脂基摩擦材料的耐高温性能, 是解决树脂基摩擦材料应用问题的关键所在。

3) 摩擦性能稳定: 刹车件是汽车安全保障中一个非常关键的组件, 现代汽车的整体性能进一步提高, 因此, 作为一个重要组件, 摩擦材料摩擦性能的稳定性是非常关键的。也就是要求材料在制动速度、温度、压力变化时保持较稳定的摩擦系数。

4) 成本低, 环保节能: 在保证刹车性能基本不受影响的前提下, 尽量降低摩擦材料的制造成本; 使用绿色无污染材料, 降低摩擦残留物对环境的污染。

1.2 树脂基汽车摩擦材料的组成分析

1.2.1 增强纤维

摩擦材料中增强纤维的作用主要是使材料具有一定的强度和韧性, 使材料耐得住冲击、剪切、拉伸等机械作用而不致于出现裂纹、断裂、崩缺等机械损伤。因此增强纤维应满足以下性能要求: 足够的强度、较好的韧性; 良好的摩擦磨损性能; 良好的可分散性以及与树脂的黏附能力; 耐热性好, 在一定温度范围内不发生热分解、脱水、相变等等。目前, 广泛采用的纤维有钢纤维、玻璃纤维、炭纤维、有机纤维等。然而非石棉纤维还存在一些问题, 例如混合性不好、易断、结团、分散性差, 或者是价格偏高, 或者是制品性能稳定性差。树脂基摩擦材料中用到的纤维主要有以下几种:

a. 金属纤维

钢纤维是最早使用的非石棉增强纤维。其一个显著特点就是导热性好, 可以使局部表面的热量迅速扩散至内部, 从而降低摩擦面温度, 防止树脂基体因热分解而导致材料磨损加剧, 而且与石棉相比, 具有平稳的摩擦系数。但钢纤维密度相对较大, 易锈蚀, 损伤对偶件, 造价较高, 摩擦系数小等缺点。当钢纤维含

量过大时，在制动时易引起尖叫并产生振颤等问题。研究表明，加入一定量的锌粉和氧化钙等可以增强材料的防锈性能，而对摩擦性能无明显影响。而用酚醛、聚酰亚胺等树脂涂覆钢纤维，干燥后在惰性气体总加热至 600℃使树脂碳化，这种方法处理的钢纤维具有较好的防锈性能，用其所制的摩擦材料在 300℃以上仍具有优良的摩擦性能。目前，国内许多厂家已开始批量生产钢纤维；铜纤维在摩擦材料中具有使铁富集的作用，即摩擦过程中摩擦材料磨损表面上形成了富铁贫铜的表面层，铜能够从磨损表面转移到偶件表面，使偶件表面上分布一定量的铜，从而形成一定厚度的摩擦转移膜，有利于提高摩擦副的摩擦系数稳定性和降低对偶盘对摩擦材料的磨损。但是由于铜的比重比较大，对摩擦材料的低密度化是不利的，价格较贵，所以用量一般不大，应控制在 4%wt 左右。另外由于新型对偶盘 Al-MCC 的出现，Al 纤维作为增强纤维也在一些树脂基摩擦材料中出现，铝具有较好的导热性能，密度小，对 Al-MCC 盘的较好亲和性，所以，在对偶盘为 Al-MCC 盘时代铝纤维具有它独到的优势，但是由于铝的耐热性能不理想，所以应用并不广泛。如何提高铝纤维的耐热性能应该是开发铝纤维增强摩擦材料的一个关键技术。

b. 玻璃纤维

玻璃纤维来源广泛，价格适中，具有强度和摩擦系数高，耐热性好，不绣蚀等优点，但玻纤表面光滑，与树脂、填料的粘接性较差，然而经过表面高温灼烧、等离子体和偶联剂处理后的玻璃纤维，其表面残留的石蜡型浸润剂得到了清除，有利于玻璃纤维表面与其他组分结合；同时，用等离子体处理使玻璃纤维表面得到了刻蚀粗化，并产生了新的表面，比表面积增加，从而改善了玻璃纤维的表面浸润性。有机硅烷偶联剂一方面与玻璃纤维表面反应生成醚键，另一方面则与树脂基团结合，依靠自身的不同基团将玻纤与基体树脂很好地连接起来，其中的氨基也对酚醛树脂的固化起到了促进作用，并提高了界面的结合性能，这样处理后的玻璃纤维增强摩擦材料大大降低磨损量和改善材料的摩擦磨损性能。表面处理工艺的广泛研究，使玻璃纤维在汽车摩擦材料中得到一定范围的应用。LiZhijun 验证了由热处理、等离子处理、偶联剂处理后的玻璃纤维增强的复合材料，可以减小磨损量，并在研究的基础上给出玻璃纤维含量及规格的参考数据：含量在 15%~25%，4~8mm 的玻璃纤维具有最好的性能。玻纤主要存在的不足有：硬度高易损伤对偶件，过热时因熔化会发生衰退现象。

c. 有机纤维

芳纶（Kevlar）、聚丙烯纤维、聚乙烯纤维、聚脂纤维等其本身具有强度高，可燃烧点高，高温热分解不明显，是近年来作为摩擦材料的增强纤维的研究热点之一。有机纤维单独作为增强纤维使用时，有时需经过表面处理，通常将其放在

电解处理液中，使纤维表面镀上薄薄的一层金属。表面处理后的有机纤维，即具有金属纤维的优点，如导热性好，耐磨等；又具有非金属纤维的特点，如密度小，韧性好等。用于摩擦材料的芳纶纤维主要包括长度在 6~13mm 范围内的短纤维和长度在 2~5mm 范围内的浆粕纤维，Kato 等证明了芳纶增强摩擦材料具有很好的摩擦学性能，特别是在高温下具有和半金属摩擦材料相近的耐磨性，噪声低，密度小等优点，指出芳纶纤维在摩擦过程中，对转移膜的形成起着重要的作用，因此少量的纤维即可数十倍地减少其磨损，是无石棉摩擦材料非常好的增强纤维。然而，有机纤维在摩擦材料中的应用还存在价格、表面处理、分散工艺等问题。由于 Kevlar 价格很高，分散又有困难，所以一般用量也不宜太大，5%左右为最佳，使用长纤维混料时应预先把 Kevlar 等有机长纤维打碎。同时由于原材料价格上涨，现在有些研究工作者正把目光投向一些天然有机纤维，使用最多的是剑麻短切纤维。剑麻短切纤维具有价格低廉、取材方便、环保等优点，但是由于天然有机纤维容易热分解，同时由于表面亲水基的存在与树脂等材料粘结性能不好，因此一般在使用前要预先做一些处理，如真空脱水、热脱水、碱液浸泡等。

d. 炭纤维

炭纤维是目前世界上最先进的刹车衬片增强纤维，依据工业化生产的原料不同，可分为沥青基，粘胶基和 PAN 基。由于炭纤维具有碳素材料的耐磨自润滑性，又具有金属材料的导电导热性，陶瓷材料的耐热耐蚀性，纺织纤维的柔韧可编织性及高分子材料的轻质，易加工的特点，其性能十分理想，尤其是以单位面积吸收功率大及比重小而突出。炭纤维增强碳基（C/C）复合摩擦材料在航空航天工业中已得到了广泛应用。目前国内对炭纤维增强摩擦材料随载荷、速度及温度特性变化关系，以及衰退恢复性能都有所研究，结果表明：炭纤维增强摩擦材料有良好的恢复性，在高温及高滑动速度下，比玻璃纤维增强材料有更好的摩擦系数和低的磨损率。但是，炭纤维原料价格偏高，其表面活性低，比表面积小，与基体树脂相容性差，导致了层间剪切强度低，研究其表面，对炭纤维采用预处理办法，如：表面清洁法、气相氧化法、表面涂层法，对改善界面的粘合性都有一定的效果。总之，炭纤维在汽车行业上的发展具有广阔的前景。

e. 矿物纤维

矿物纤维的种类很多，性能也各不同，一般而言，加入矿物纤维后，制动的摩擦性能还是不错的，但磨损量会稍大，强度也会降低。比较常见的有：海泡石纤维、硅灰石纤维、硅酸铝纤维、硅纤维等。因其价格便宜，作为石棉的替代纤维也是摩擦材料研究的一个重要课题。在矿物纤维的使用中，一般都和钢纤维、炭纤维、芳纶纤维等混杂使用，但与后者使用时，在强力搅拌的过程中，固脆性大的矿物纤维往往会被打断或击碎，可能影响其应起的增强效果。黄岳山对硅酸

铝 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) 短纤维增强 ZL109 复合材料滑动磨损性能进行了研究，发现其摩擦磨损性能随纤维含量增加而提高，且这种复合材料的耐磨性和摩擦性均与纤维的取向密切相关：与摩擦面垂直程度越大，复合材料的摩擦磨损性能越好。文献讨论了硅酸铝纤维与钢纤维混杂制作摩擦材料的性能，从给出的数据分析，摩擦系数具有良好的稳定性。另外钛酸盐纤维和填料的出现，为无石棉摩擦材料的开发，提供了又一个可靠的丰富资源，对此日本人申请了很多有关钛酸钾纤维、钛酸钠纤维、钛酸钙纤维、铝钛酸钾纤维等增强摩擦材料的专利。但矿物纤维一般含结晶水，高温制动时易脱水，使材料性能不稳定。

f. 陶瓷纤维

陶瓷纤维以其优秀的力学性能、摩擦性能、价格优势，正越来越受到研究工作者的青睐。如博云制动汽车摩擦材料有限公司采用的 FKF 等陶瓷纤维，通过系统的研究和改性，已经达到了使用要求，现已批量用于生产。陶瓷是无机非金属化合物而不是单质，晶体结构复杂多样，其元素间键合主要是离子键和共价键，实际中绝大多数陶瓷化学键是介于离子键和共价键之间的混和，因此同一般的金属相比，其晶体结构复杂而表面能高。因此其强度、硬度、弹性模量、耐磨性、耐蚀性以及耐热性、低热导、低密度等特殊性能均比金属优越，但某些陶瓷材料的塑性、可加工性、抗震性却不如金属。目前，工程陶瓷材料主要有如下品种①氧化铝(Al_2O_3)；②氧化锆(ZrO_2)；③氮化硅(Si_3N_4)；④碳化硅(SiC)；⑤氮化钛(TiN)；⑥碳化钛(TiC)；⑦赛龙(Sialon)；⑧碳化硼(B_4C)；⑨以及部分稳定氧化锆(PSZ)、四方多晶氧化锆(TZP)、氧化锆增韧氧化铝(ZTA)、氧化锆增韧莫来石(ZTM)、增韧 Si_3N_4 、 SiC 及超塑性氧化锆等方面，其它增韧 AlN 、堇青石、尖晶石等为主的新型的增韧陶瓷。但是由于陶瓷的耐磨性受到硬度、强度、断裂韧性、热传导性、热膨胀和微观结构、粉料粗细、成型方法、烧结温度等内部因素的影响，同时受到温度、湿度、润滑、载荷、速度、磨损时间等外部因素的影响。因此选择合适的成型工艺以及处理工艺对陶瓷纤维增强摩擦性能的好坏有着决定性的作用。

总之树脂基摩擦材料中用到的增强纤维种类繁多，选取何种纤维主要从以下几个方面考虑：(1) 增强效果好，(2) 与粘结剂相容性好，(3) 价格相对低廉，(4) 耐热性能好。一般同一种纤维无法具有以上所述的全部优点，所以在使用时一般选取多种纤维协同增强。

1.2.2 粘结剂

在聚合物基摩擦材料中，树脂起着粘接成型的作用，直接影响着摩擦材料的

各种性能。一般而言对汽车摩擦材料用树脂有下面几点要求：①摩擦材料有稳定的摩擦系数和较低的磨损率；②较高的耐热性能、用作粘结剂制成的复合材料成品具有较好的机械性能和韧性；③耐汽油、水等介质；④噪音低；⑤成本适宜。

由于酚醛树脂具有良好的耐热性能和机械性能以及原料易得，价格便宜，工艺及生产设备简单等优点，因而一直是生产摩擦材料的最基本的树脂成份。热固性酚醛树脂一般采用碱催发生产，加大碱性气氛可以降低树脂中有利酚的含量，从而降低树脂材料的热分解。随着汽车行业向高速安全方向发展，对汽车制动材料提出的更苛刻的要求，而这种性能的提高很大程度上取决于酚醛树脂性能的提高。因此提高酚醛树脂的综合性能一直是人们研究的一个重要课题。增韧改性方法包括：橡胶改性，腰果壳油改性，热塑性树脂改性，桐油、豆油、亚麻籽油改性，新型固化剂改性，马来酰亚胺改性及腰果壳油/双马来酰亚胺复合改性；而耐热改性方法包括：胺类改性，硼酸改性，芳烃改性，钼改性，聚酰亚胺改性，磷改性及氰酸酯化改性。改性后的酚醛树脂可以使制品硬度降低，柔韧性增加，在摩擦发热时可产生塑性变形，增加了摩擦的接触面，从而提高了摩擦系数，并在某种程度上可防止噪音和形成柔软又有韧性的碳化膜，不易脱落，使表面组成和发热均一，从而保证稳定的摩擦性能。

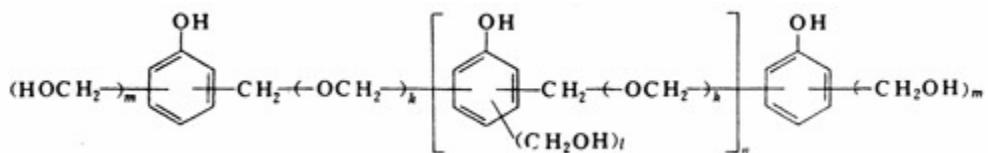


图 1-3 碱催发条件下酚醛树脂分子结构示意图

橡胶改性一般采用丁腈橡胶与酚醛树脂共混，共混效果的好坏取决于两种物质溶解度参数是否接近，丁腈橡胶溶解度参数 $\delta=9.3\sim9.9$ ，酚醛树脂溶解度参数 $\delta=10.5$ ，非常接近，所以这两种物质的共混效果是非常理想的。共混的目的是增韧。研究表明采用共混树脂虽然耐高温性能有些下降，但是材料的硬度、抗弯强度、摩擦稳定性等都有所提高。同时由于丁腈橡胶的热解温度比较低，因此用量不宜太大，一般控制在 5% 左右。

耐热性改进方面，目前主要采用的是硼酸改性、有机硅改性、钼树脂改性、胺类改性等。硼酸改性主要是生成键能较大的B-O键，提高耐热性，有研究表明，通过硼酸改性，酚醛树脂的热分解温度提高100~140℃左右，在700℃时，分解残留物还有63%。有机硅改性酚醛树脂具有耐热性高、热失重小、韧性高等优异性能，用有机硅改性酚醛树脂制得的摩擦材料摩擦性能稳定，磨损率低，在100~350℃温区内，摩擦系数变化很小（ $\mu=0.36\sim0.40$ ）。苯胺改性酚醛树脂热分解温度为

410 °C，三聚氰胺改性树脂为438°C，都比纯酚醛树脂380°C要高，其耐热性提高的原因是引入了较稳定的杂环结构及固化树脂交联密度的提高。制得的摩擦材料在高温下有较好的摩擦性能。钼酚醛树脂（Mo-PF）是在普通酚醛树脂中引入钼的一种改性酚醛树脂，是通过化学反应的方法，使过渡金属元素钼以化学键的形式键合于酚醛树脂分子主链中。由于一般PF主要通过C-C 键连接苯环，而Mo-PF是以O-M-O键连接苯环，其键能大得多的原因，钼酚醛树脂的热分解温度和耐热性比普通酚醛树脂提高了；固化温度在160°C左右；故Mo-PF 成型温度在160°C 左右；六亚甲基四胺为10%的160°C其热分解温度为522°C，600°C下的热失重率为17.5%。

同时由于使用温度的不断提高，目前有研究对聚酰亚胺进行了研究。聚酰亚胺(PI)具有优良的电性能和机械性能，以及很好的热稳定性、高温抗氧化性和化学稳定性，较好的耐溶剂性和尺寸稳定性。但PI最大缺点是难熔，成型加工性差，生产成本高，从而阻碍了这一高性能材料的应用。通过一些改性的方法，可以改变PI的这些缺陷。如：引入大的侧基，可有效降低分子链间作用力，但不破坏分子链的刚性，因而可以提高聚酰亚胺溶解性并同时保持了耐高温性能。引入扭曲的非共平面结构，能防止聚合物分子链紧密堆砌，从而降低了分子间作用力，提高溶解性。增大两个芳香环的二面角能改善聚酰亚胺的溶解性。通过共聚破坏分子对称性和重复规整度。使用两种二酐或二胺的共聚反应，引入第二种二酐或二胺破坏了聚酰亚胺的分子结构对称性和重复规整度，从而可降低刚性聚酰亚胺的链间作用力和结晶度，因此共聚是改善聚酰亚胺溶解性的一种最便利的方法。引入柔性结构单元。在二酐和二胺单体中引入柔性结构单元通常可提高聚酰亚胺分子链的流动性，为了保持聚酰亚胺良好的稳定性，这种柔性单元须有较好的耐热性，诸如O，C=O，SO₂，S 及 C(CF₃)₂（即 6F）等。

H.Czichos^[54]等对比了PI、PTFE、PA 三种聚合物的耐磨性能，发现纯 PI 的摩擦系数和磨损率较大，纯PI不适宜单独作为摩擦材料使用。因此在实际使用过程中通常通过材料的复合化来提高PI的摩擦学性能。

Sheiretov^[55]等研究了低温下在PI中添加PTFE、石墨、MoS₂ 三种固体润滑材料减磨效果，发现由于PTFE 内聚能低，容易形成转移膜，因此有很好的减磨效果，MOS₂ 在有氧的环境中减磨效果较差，在真空中和惰性气氛中有很好的热稳定性和摩擦性能。

West 和 Senior^[56] 研究发现含15Wt%石墨的聚酰亚胺（PI）复合材料的磨损率很低。这不仅在于石墨的低摩擦磨损性，还因为石墨可有效地传导出摩擦中产生的摩擦热，阻止PI的氧化或降解。

1.2.3 增摩组元

增摩材料主要是不会分解的耐热材料粉末，用以改善和提高材料的物理与机械性能和增加材料摩擦阻力。增摩材料包括天然磨粒，如金刚石粉、 SiO_2 、刚玉及其它颗粒和合成颗粒，如 SiC 和 Al_2O_3 ，还有一些天然矿石被用做增摩填料，如磁铁矿、铬铁矿等。另外一些金属粉末被用做增摩材料，如铜粉、铸铁粉、多孔铁粒、还原铁粉、铝粉等。

增摩材料的增摩机理不尽相同，硬质颗粒一般可以起增摩作用，但是铜等软金属粉末也可以用来增摩，主要是因为铜可以在对偶盘表面形成一定厚度的摩擦转移膜，从而提高摩擦系数稳定性，从整体而言，达到增摩效果。

1.2.4 减摩组元

减摩材料主要以提高材料的耐磨性、降低摩擦系数和减少制动噪音为目的，主要有 MoS_2 、 Cu_2S 等硫化物、石墨、低熔点金属、滑石和云母等，添加量通常在10%以下。添加层状结构石墨和 MoS_2 可改善抗磨性能，改善抗衰减性能和在较高温度下稳定摩擦状况。 MoS_2 是辉钼矿的主要成分。棕黑色固体。化学式 MoS_2 ，熔点1185℃，密度4.80克/厘米³(14℃)，莫氏硬度1.0~1.5。1370℃开始分解，1600℃分解为金属钼和硫。315℃在空气中加热时开始被氧化。是非常优秀的润滑材料。Liu^[57]以芳香族聚酰胺基研究了无机填料的摩擦学性能，认为铜的化合物如 CuCl 、 CuCl_2 、 Cu_2O 、 CuO 等填充的摩擦材料具有更大的摩擦系数，尤其是 CuCl 表现出最好的性能，可以形成一层转移膜，使接触面更光滑，从而降低磨损率。

1.2.5 填料

填料在摩擦材料中的主要作用为降低成本，另外有些填料起降低模量、改性及稳定摩擦系数的作用。常用的有橡胶粉、沥青及腰果壳粉等。人们研究的重点是橡胶，它可以以粘结剂形式加入，即作为改性剂的橡胶与树脂化合形成新型的粘结剂；也可以以填料形式加入。橡胶的加入总量一般不超过8%。研究发现，加入少量橡胶通常能明显提高制品的摩擦系数和抗冲击能力，促进某些树脂的固化，降低弹性模量，增大摩擦副之间的实际接触面积，达到提高制动力、缩短制动时间及降低偶件摩擦温升的目的，但同时也引起磨损量增加。作为摩擦材料改性剂的橡胶有丁腈、丁苯、硅橡胶和氟橡胶，以丁腈橡胶使用较多。丁腈橡胶中的腈基含量对粘结强度影响很大。在酚醛-丁腈胶粘剂中，随着丁腈橡胶中丙烯

腈含量的提高，抗剪强度稳定上升。氟橡胶的高温性能虽然最佳，但由于惰性太大，不易与树脂结合，加之价格昂贵而受到限制。硅橡胶具有良好的热稳定性，但其强度及与各种材料的粘结强度都较低。文献介绍了一些无机固体润滑剂和固体混合物，其在许多状况下可改善磨损和稳定摩擦系数。在传统配方中加入1%~5%的润滑性热塑性树脂如PTFE、聚酰亚胺、聚乙烯或聚丙烯树脂，可降低噪音并稳定摩擦系数。

有些填料的加入并不是纯粹的增摩或减摩，有些填料的加入是为了低温减摩，高温增摩如硫铁矿等。有些填料的加入是为了提高高温摩擦系数，如氧化铝等。

1.3 人工神经网络技术在树脂基摩擦材料成分设计中的应用

1.3.1 人工神经网络概述

人脑是宇宙中已知最复杂、最完善和最有效的信息处理系统，是生物进化的最高产物，是人类智能、思维和情绪等高级精神活动的物质基础，也是人类认识较少的领域之一。用机器代替人脑的部分劳动是当今科学技术发展的重要标志。计算机就是采用电子元件的组合来完成人脑的某些记忆、计算和判断功能的系统。现代计算机中每个电子元件的计算速度为纳秒级，而人脑中每个神经细胞的反应时间只有毫秒级，所以现代的计算机具有很强的计算和信息处理能力，但它解决像模式识别、感知、评判和决策等复杂问题的能力却远不如人。特别是它只能按人事先编好的程序机械地执行，缺乏向环境学习的能力。因此，人们自然想到，人脑的组织结构和运行机制必有其绝妙的特点，从模仿人脑智能的角度出发来探寻新的信息表示、存储和处理方式，设计全新的计算处理结构模型，构造一种更接近人类智能的信息处理系统来解决传统的冯·诺依曼计算机难以解决的问题，从而促使神经网络^[58,59]这门学科的出现。

人的大脑实际上是由很复杂的神经元网络所组成，正是由于这些神经元网络的作用，人才能以很高的速度理解感觉器官传来的信息。比如能在喧闹的环境中识别清楚对方的声音，能在不到1秒的瞬间认出多年未见的老友，能归纳出某一篇长篇文章的中心思想等等分别都是人的听觉神经网络、视觉神经网络和智能神经网络在起作用。而且人还有很强的学习能力和创造能力，能从环境中学习，从书本中学习，并能利用所学到的知识去创造新的知识。人脑还具有联想记忆能力、识别能力、很强的分析和判断能力等等。因为人脑具有如此强大的功能，所以人们希望通过模拟人脑的结构和思维方式来实现它所具有的功能。神经网络就是一

门模拟人脑的结构和思维方式的学科。

1.3.2 人工神经网络的形式化描述

神经网络的基本结构如图 1-4 所示。

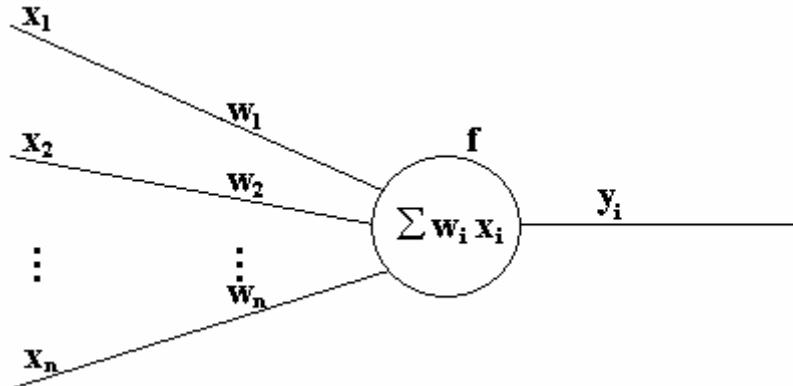


图 1-4 神经元基本结构图

故基本的人工神经元相当于一个多输入单输出的非线性阈值器件。

$x_1, x_2 \dots x_n$ 表示它的 n 个输入。

$\sum w_i x_i$ 表示人工神经元的输入总和。

θ 表示人工神经元的阈值。

人工神经元的输出为: $O = f(\sum w_i x_i - \theta)$ 。

其中的作用函数 f 称之为激活函数, 一般有以下三种形式:

(1) 阈值型

$$f_1(x) = 1, x \geq 0$$

$$f_1(x) = 0, x < 0$$

(2) 分段线性型

$$f_2(x) = 1, x \geq 1$$

$$f_2(x) = \frac{1+x}{2}, -1 < x < 1$$

$$f_2(x) = 0, x \leq -1$$

(3) sigmoid

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha x)}$$

$$f(x) = \frac{1 - \exp(-x)}{1 + \exp(-x)}$$

1.3.3 神经网络的功能和特点

神经网络具有三大特点：

- 信息的分布式存储。
- 数据的并行处理。
- 自学习、自适应能力。

神经网络有两种工作方式：

- 学习期：此时各计算单元状态不变，各连接权值可改变(通过学习样本或其它方法)

- 工作期：此时各连接权值固定，计算单元的状态发生改变，以求达到稳定状态。

神经网络的主要功能：

从 80 年代初神经网络的研究再次形成热点以来，发展非常迅速，在应用上已经扩展到许多重要领域。

- 模式识别与图象处理

印刷体和手写体字符识别，语音识别，签字识别，指纹识别，人脸识别，癌细胞检测，心电图和脑电图分类，RNA 和 DNA 识别，油气储藏勘测，加速器事故检测，目标检测与识别，图象压缩，图象复原等。

- 控制与优化

化工过程控制，机械手运动控制，电弧炉电极控制，半导体生产中掺杂控制，石油精练和食品工业中的优化控制，VLSI(超大规模集成电路)布线设计等。

- 预测与管理

股票市场预测，有价证券管理，借贷风险分析，信用卡管理，机票管理，自然科学中的非线性规律的预测等^[60-62]。

- 通信

自适应均衡，回波抵消，路由选择，ATM 网络中的呼叫接纳识别及控制等。其它应用如导航、光学聚焦、运载体轨迹控制，多媒体技术等。

1.3.4 人工神经网络技术在材料科学中的应用

BP 网络(Back-propagation Network)，在非线性问题的拟合问题上有独到的优势。而在材料科学中，很多问题的影响因素很多，且呈高度非线性特点，传统

的数学工具往往不能建立合适的模型，对问题进行描述和处理，而 BP 神经网络的出现，给广大材料工作者提供了一个有力的非线性拟合工具，因此，神经网络技术在材料科学中的应用非常广泛。

Hulya Kacar Durmus等人建立人工神经网络模型对牌号为AA6351的铝材的抗磨损性能及表面粗糙度进行预测，结果与实验值误差在2.11%以下[63]。

钱汉成等利用实验数据和神经网络模型，建立了材料铸铁含碳量、材料内石墨片层厚度、材料显微硬度、材料树枝晶密度、共晶度等材料的结构特征与材料的拉伸性能的模糊网络模型，通过训练，网络的预测结果与实验值吻合^[64]。

邱明等对4种SiC颗粒增强铝基复合材料在5种速度和4种压力条件下进行了销-盘摩擦磨损试验，运用遗传神经网络技术建立了铝基复合材料在高速干滑动过程中的摩擦行为预报模型，并用该模型对铝基复合材料进行预报。结果表明，蓄热能力较大的铝基复合材料在服役条件下具有较高的摩擦系数，与实际情况相一致^[65]。

李炼等用正交试验设计的方法选择样本点构建神经网络响应面，将神经网络响应面作为优化的目标函数或约束条件，加上其它常规约束条件建立优化模型，应用遗传算法(GA)进行优化，形成一套适用于复杂结构设计的高效优化方法^[66]。

刘立红等将BP神经网络运用到复相结构陶瓷材料抗弯强度预测当中，克服了陶瓷材料研究中单因素实验法不能正确反映抗弯强度与添加组分多因素之间复杂的非线性关系的弱点，通过抗弯强度预测和试验验证，该方法可行有效，为快捷、经济地开发研制新的陶瓷材料提供新的思路和有效手段^[67]。

1.4 树脂基摩擦材料工作温度场的模拟计算

摩擦过程中，摩擦表面产生大量的热，由于高聚物一般导热性比较差，为热的不良导体，随着摩擦过程的进行，摩擦热持续积累，表面温度不断升高。由于材料的结构性能对温度高度依赖，当温度达到一定高度后，材料的结构性能及状态发生变化。

通过对临界摩擦温度下摩擦表面的SEM微观组织及显微硬度值的测定，其特性反映了摩擦磨损试验过程中界面温度对材料性能的影响。在高温下，转移膜对材料磨损率和摩擦系数起十分重要的作用，而转移膜的形成取决于界面热扩散速率。界面摩擦温度 T_c 由 $T_{f\max} + T_b$ 两部分组成。当环境试验温度较低，体积温度 T_b 与界面摩擦温度 T_c 差值大时，滑动过程中界面最大瞬时闪温 $T_{f\max}$ 将迅速扩散使被软化的材料在被剪切后迅速冷却而形成微细的硬磨粒残留在磨损路径

上，结果材料呈现高摩擦磨损特性。当环境试验温度高到一定值时，界面最大瞬时闪温不易扩散，使被软化的材料在界面摩擦温度下被保持在半融化状态，并在相对滑动过程中粘附或涂抹到摩擦路径表面，结果摩擦界面被一层膜覆盖，在这种状态下的摩擦磨损过程是在膜间进行的。因此，材料呈现低摩擦磨损特性。而从微切削到表面膜机理的转化过程中，材料的磨损经历了软化和硬化（反复蠕变的结果）交织过程。软化降低了材料的剪切强度，从而降低了材料的摩擦系数，然而高温下的蠕变硬化加速了材料的表面剥落和磨损。

实验常受具体条件的限制，不能反映某些重要细节，而采用理论计算方法则可较好的实现求解。因此，对摩擦过程中的温度变化及分布进行模拟预测引起了一定的关注，以期改善材料的性能、有效延长其使用寿命。刘豫川、王慧等对三种常用于计算摩擦表面温升的方法进行对比。第一种方法是求解固体的热传导方程和润滑剂的能量方程，这种方法常用于求解颗粒的水润滑和弹性水润滑；第二种方法是热源综合法即有限元法，适用于干摩擦；第三种方法是将第二种方法在高网格雷诺数下进行简化得到的，对于有热源的静止表面，将引入很大误差。

Bolck 第一个研究了移动均匀方块热源的闪温。Francis 得到了光滑 Hertzian 接触稳态温升的分析表达式。Tina 和 Kennedy 得到了在不同网格雷诺数下由不同热的瞬时温度^[68]。董光能等对摩擦销表面的温度分布进行解析运算，所得温度分布结果与实验值有较好的一致性^[69]。对销进行数值求解时，稳态温度理论值 X 与实验值是一致的；对非稳态条件，仍能较好的反映达到稳态所用的时间和温度随时间的变化关系。程西云等计算了含磨屑粗糙表面滑动接触摩擦副温度场分布，探讨了表面接触温度对滑动摩擦副胶合咬死的影响。王营等从制动过程的能量转换及摩擦生热机理出发，建立了制动器的热流密度分配模型，并结合有限元法对盘式制动器摩擦片的温度场进行分析，揭示出摩擦制动时摩擦片内温度分布规律，从而为摩擦制动器的设计提供可靠的依据^[70]。周建钊，高亚明对主离合器摩擦片温度进行了数值求解^[71]。

温度为影响聚合物摩擦学性能的主要因素之一。对摩擦过程中的温度分布进行模拟计算已经引起了一定的关注。由于摩擦过程的复杂性及影响温度变化因素的多样性，没有可以普遍适用的模型，但对于不同类型摩擦行为的温度分布，已有了不同的模拟方法，针对特定的摩擦行为，需要根据具体条件对这些模型进行选择和适当的改进。

1.5 本课题研究的主要目的以及选材

本课题的研究目的是，通过人工优化配方、研究树脂基摩擦材料的摩擦性能

等工作，确定树脂基摩擦材料配方的一些基本规律。由于树脂基摩擦材料的配方规律性不太明显，目前配方研究基本上只是配方师凭个人经验在进行，需要大量的实验，对原材料、设备、能源等消耗非常大，本工作还探索了建立神经网络系统，来初步实现配方研究的智能化，为树脂基摩擦材料的研究探索一条新路。

基于以上树脂基摩擦材料各成分的学习和研究，同时结合生产实际，本课题所用材料选材如下：

粘结剂：选用硼改性酚醛树脂以及腰果壳油改性酚醛树脂与丁腈橡胶共混混合物。共混改性的分子内部原理见图1-4，丁腈橡胶的开链结构与酚醛树脂的苯环发生所谓的反应，从而增强了酚醛树脂的韧性，但在一定程度上又会降低材料的热解温度和耐磨性，因此，丁腈橡胶不宜使用太多，本研究中把丁腈橡胶的量控制在5%左右。

增强纤维：选取钢棉纤维，铜纤维，低品质炭纤维，芳纶纤维，陶瓷纤维等。其中芳纶纤维的质量指标为：纤维长度 $6\sim8\text{ mm}$ ，密度 1.44 g/cm^3 ，单丝直径 $12\text{ }\mu\text{m}$ ，分解温度约 500°C ，线性热膨胀系数 $-3.5\times10^{-6}/\text{K}$ ，断裂伸长率 3.3%，生产厂家为上海胜顺特种纤维科技有限公司；炭纤维的质量指标为：纤维长度 $8\sim15\text{ mm}$ ，单丝直径约 $7\text{ }\mu\text{m}$ ，抗拉强度 $\geq2500\text{ MPa}$ ，断裂伸长 $\geq1\%$ ，含碳量 $\geq90\%$ ，生产厂家为上海合成纤维研究所。

其他材料：所用的的材料主要有：石墨、 MoS_2 、硫化锑、硫铁矿、铬铁矿、磁铁矿、 Al_2O_3 粉末、重晶石、有机轻质填料S2000、生石灰等。其中石墨分天然石墨和人工合成石墨两种，由于使用温度段的不同，通常混杂使用。磁铁矿的主要成分是 Fe_3O_4 ，它和 Al_2O_3 粉末在摩擦材料中属超硬颗粒，粒度不能过大，因为他们的硬度比一般对偶件铸铁盘都要大，因此粒度应控制在200目以下，且用量不能过大，一般控制在2%左右，有研究表明，即使严格控制用量和粒度，它们对对偶盘的磨损还是不可忽略的，因此，这两种材料应尽可能减小使用量。

第2章 摩擦材料各成分的性能研究

2.1 粘结剂

2.1.1 树脂的选用

摩擦材料的基体为有机高分子物质，它将增强体和填料有机粘结在一起，并承载。在各组份中，基体是受热影响最敏感的材料，受热软化分解，不仅失去粘结作用，而且材料的摩擦磨损性能也将受到很大的影响。耐高温基体是耐高温摩擦材料的关键。提高基体材料的粘结性、柔韧性、耐热性以及耐分解是适应摩擦材料发展要求的基体性能目标。

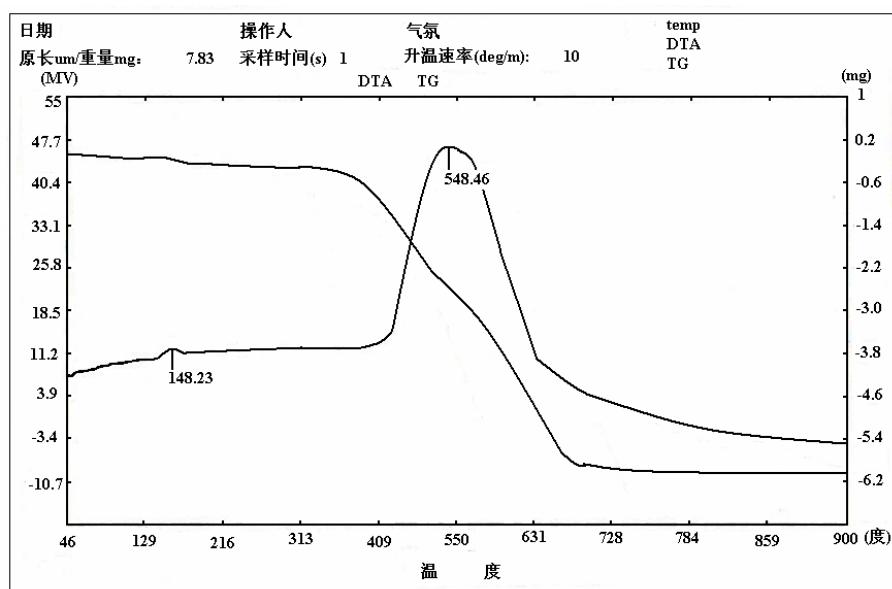


图 2-1 未改性酚醛树脂的 DTA-TG 曲线

图2-1, 图2-2, 图2-3是树脂基摩擦材料常用的几种增强酚醛树脂的DTA-TG曲线, 对比可以看出, 硼改性酚醛树脂的耐热性能是最好的。三组曲线都有个共同的特点, 大部分的质量都在主放热峰附近烧失, 主放热峰的温度分别为: 未改性酚醛树脂—548.46℃, 硼改性酚醛树脂—582.93, 氨基改性酚醛树脂—477.53℃, 硼改性酚醛树脂最高。400℃时失重分别为: 未改性酚醛树脂—23%, 硼改

性酚醛树脂—11%，氨基改性酚醛树脂—37%。硼改性酚醛树脂失重率最低。综合考虑三种树脂材料的性能，硼改性酚醛树脂的性能最好，因此，本研究中所用到的酚醛树脂均采用硼改性酚醛数值。表2-1是实验中用到的硼改性酚醛树脂的一些技术指标。

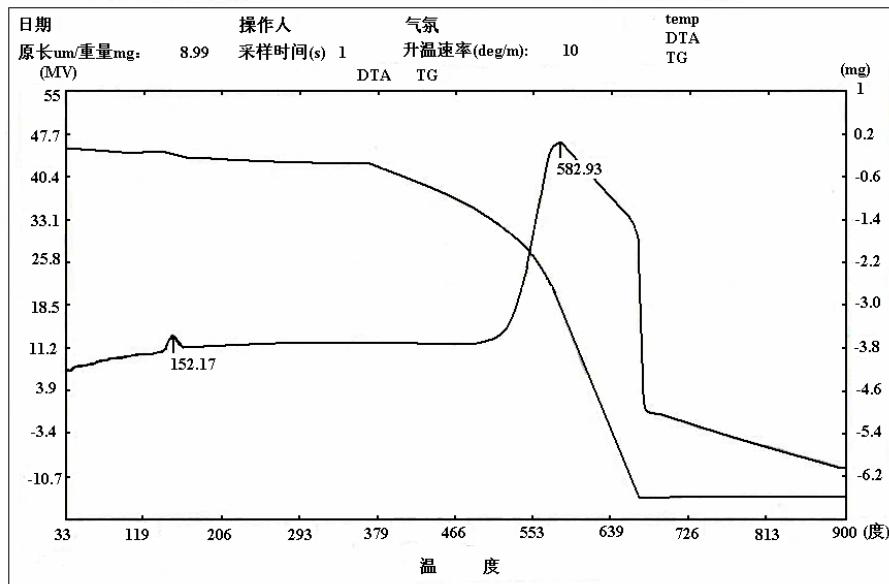


图 2-2 硼改性酚醛树脂 DTA-TG 曲线

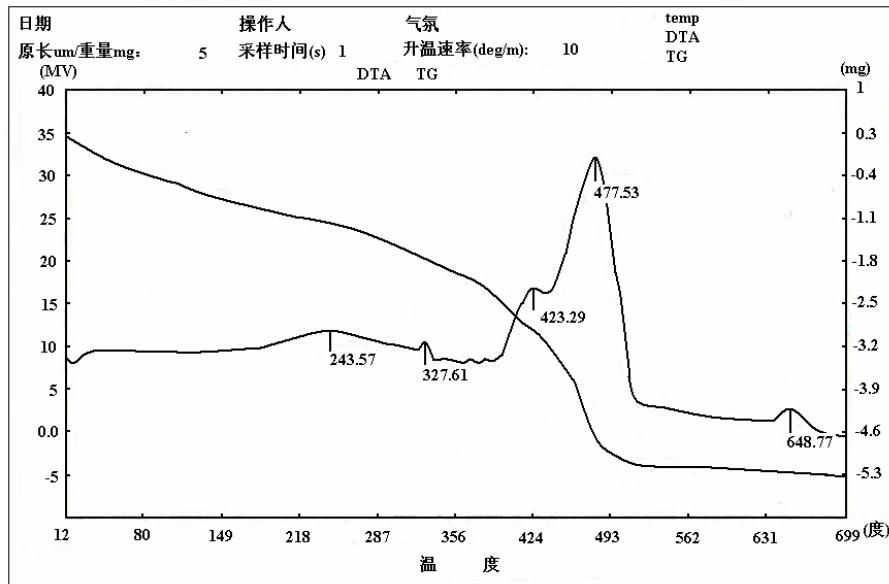


图 2-3 氨基改性酚醛树脂 DTA-TG 曲线

2.1.2 丁腈橡胶改性

以酚醛树脂作为粘结基体的摩擦材料，硬度一般过高，在摩擦过程中容易擦伤对偶盘，也会产生尖叫声等制动噪音，因此，在用酚醛树脂作为粘结剂时，往往加入一些增韧剂来调节材料的硬度。可以作为增韧剂加入的材料有丁苯胶、丁腈橡胶、天然橡胶、腰果壳油等。加入不同的材料增韧具有不同的增韧机理。总的来说，增韧材料的增韧可以分为物理增韧和化学增韧两种。本工作选用丁腈橡胶作为增韧剂。

表 2-1 硼改性酚醛树脂技术指标

指标名称	技术指标	指标名称	技术指标
外观	淡黄色粉末	游离酚含量	$\leq 7\%$
凝胶固化时间	20~80s	水分含量	$\leq 1.5\%$
熔点	95~123 °C	粒度	≥ 200 目(90%)
热分解温度	≥ 535 °C		

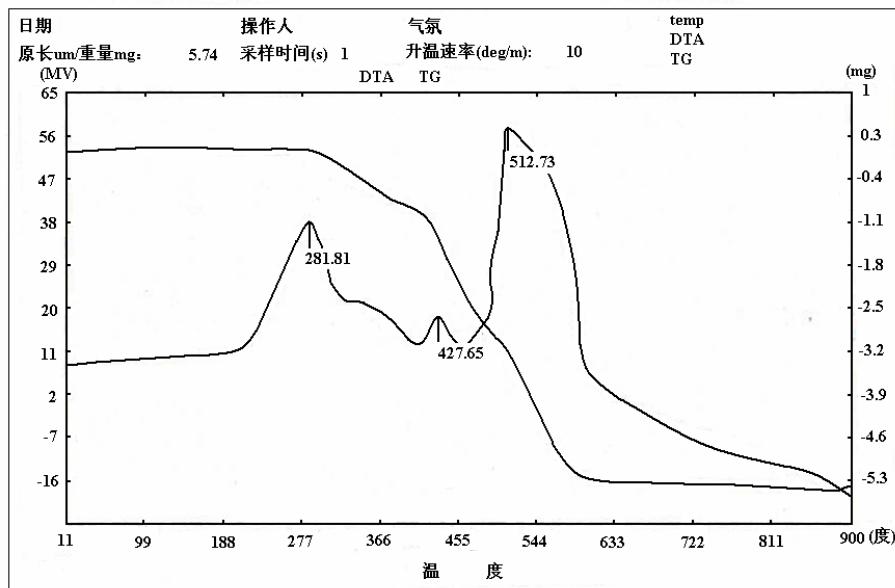


图 2-4 丁腈橡胶 DTA-TG 曲线

丁腈橡胶改性原理：

通过对试样进行热重分析(TG)来证实。由图1可知。未改性的酚醛树脂在380°C时已经分解了25%，而改性的酚醛树脂在400°C时才分解了9%，证明了利用丁腈橡胶改性酚醛树脂不仅能改善树脂的韧性，在一定程度上还能提高它的耐

热性。

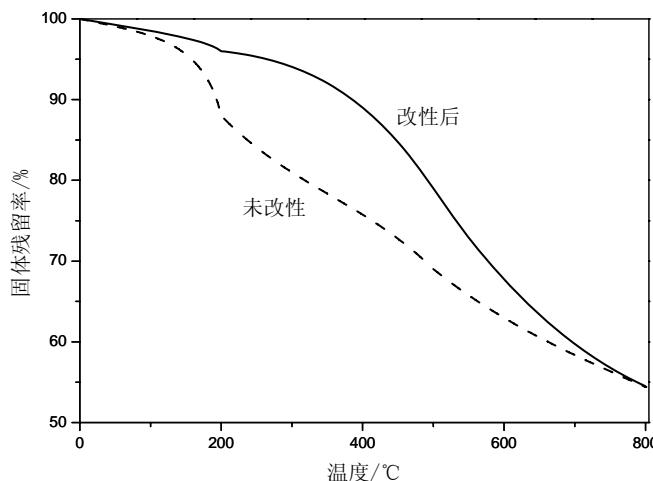


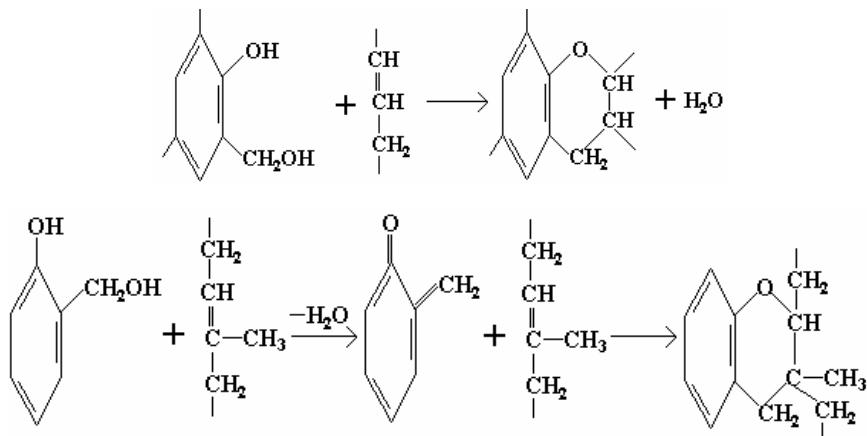
图 2-5 未改性树脂和改性树脂的 TG 曲线

丁腈橡胶的增韧机理有物理增韧和化学增韧两种。

物理增韧的主要原理是：橡胶均匀分散在树脂中形成所谓的高分子合金，从而达到耐热、增韧目的。根据相似相容原理，要使两种混合物达到良好的共混效果，必须保证混合物的溶解度参数(δ)相当。已知热塑性酚醛树脂的 δ 值为 10.5，丁腈橡胶的 δ 值为 9.3~9.9，有较好的相容性，能起到增韧效果，提高其耐热性。

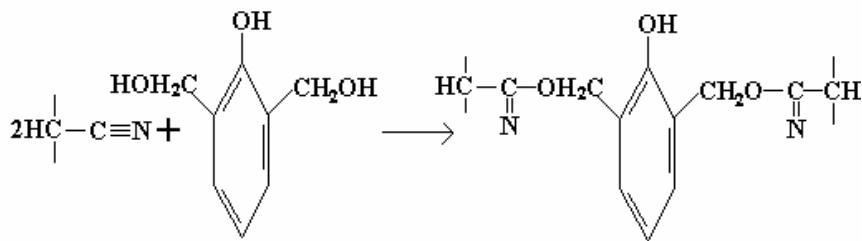
化学增韧的主要原理为：

丁腈橡胶与酚醛树脂发生化学反应起到改性，丁腈橡胶与酚醛树脂之间的反应主要是丁腈橡胶的双键与酚醛树脂的羟甲基酚发生反应，酚醛树脂的羟甲基与丁腈橡胶的腈基与羧基丁腈橡胶的羧基反应。酚醛树脂能硫化丁腈橡胶是由于加热时能生成次甲基醌中间体，故有“次甲基醌”理论。根据羟甲基与稀类反应生成氧杂萘满结构，又称色满结构 (Chroman structure)



羟基与邻近双键的亚甲基氢原子反应，脱水形成亚甲基，因而提出“氧杂萘

满”理论。丁腈橡胶的腈基与酚醛树脂的羟甲基发生如下反应：



丁腈橡胶中，由于碳链的存在，耐热性不高，从图2-4丁腈橡胶的差热分析曲线可以看出，在281.81℃时就出现了一个强烈的放热峰，这个放热峰的出现应该是部分碳链被打开，氧化。尽管主放热峰出现在512.73℃，这是因为腈基键能比较高，打开并氧化腈基释放的能量很高。但是，丁腈橡胶本身在400℃时，失重超过50%。据研究，丁腈橡胶在较低温度(250℃)就会被热解氧化，产生的水蒸汽在摩擦面上凝结，使摩擦面由纯粹的干摩擦变为干摩擦和湿摩擦都存在的混合摩擦，从而大大的降低了摩擦系数，过早产生衰退。因此，在摩擦材料中，丁腈橡胶的用量应控制在较低的水平。

2.2 增强纤维

2.2.1 几种常见纤维的基本性能

通过表2-2和图2-6，我们可以看出，材料的强度值由高到低依次为：玻璃纤维、炭纤维、钢纤维、矿棉、芳纶纤维、石棉。弹性模量由高到低依次为：炭纤维、钢纤维、石棉、玻璃纤维、芳纶纤维、矿棉。玻璃纤维的综合性能比较好，但是由于玻璃纤维的莫氏硬度为6.5，超过对偶盘的莫氏硬度，因此在摩擦过程中容易擦伤对偶盘，因此玻璃纤维在摩擦材料中应用很少。

表2-2 树脂基摩擦材料常用增强纤维性能

性能	石棉纤维	钢纤维	玻璃纤维	炭纤维	芳纶纤维	矿棉
拉伸强度 (GPa)	0.6~0.8	1.8~2.0	2.8~4.5	2.0~3.0	1.2~1.5	1.5
弹性模量 (GPa)	150~170	200	70~90	500	70	70.0
莫氏硬度	2.5~4	5.0	6.5	6.0	—	6.0
密度 (g/cm³)	2.5	7.8	2.6	1.67	1.44	2.7
直径 (μm)	10~25	10~50	10	10	12	10
伸长率 (%)	2.3	2.0~3.0	4.8	2.4	2.5~4.0	—

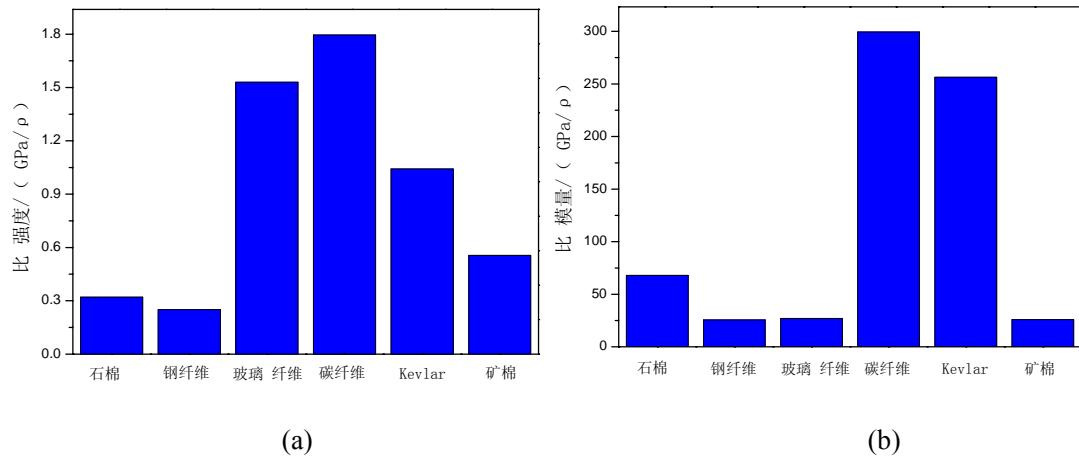


图 2-6 几种常用纤维的比强度和比模量 (a)—比强度; (b)—比模量

钢纤维的强度和模量比较高,但是,密度比较大,比强度和比模量都比较小。因此,从降低摩擦副重量的角度考虑,钢纤维用量应该尽量少。但是从图 2-6 中我们可以看出,钢纤维的比强度和比模量与石棉的比较接近,而且在硬度上,钢纤维为 5,而石棉为 2.5~4,因此在寻找石棉纤维替代品时,钢纤维被作为理想的材料之一。

炭纤维的综合性能是所有材料中最好的,抗拉强度、弹性模量值都很高,比强度和比模量更是所有材料中最好的。而且炭纤维还有很好的耐热性能。从炭纤维的差热分析曲线(图 2-7)可以看出,炭纤维在实验过程中有两个放热峰出现,但在放热峰出现的点,失重都不明显,因此,两个放热峰点上发生的反应只是晶体结构的变化。因此,炭纤维的耐热性能是比较好的。炭纤维的综合性能很好,但是在摩擦材料中应用并不广泛,这是因为炭纤维的价格昂贵,如果可以降低炭纤维的成本,炭纤维在摩擦材料中将得到更加广泛的应用。

芳纶纤维是一种非常优秀的增强纤维,在摩擦材料中应用非常广泛,Kevlar 纤维是高强度、高模量的纤维,其比强度高于任何一种已工业化生产的纤维材料,拉伸模量高出 E-玻纤 1 倍。因此保证了其增强的复合材料具有较高的拉伸、弯曲强度。

纤维的耐热性能非常好,差热分析曲线(图 2-8)说明,芳纶纤维在 455℃时失重率仅为 3%,具有良好的热稳定性。芳纶纤维在摩擦材料中,主要作用是增强基体,另外,芳纶纤维还可以在帮助摩擦材料在工作时形成稳定的摩擦转移层。适当的加入芳纶纤维可以成倍的降低摩擦材料的磨损。

纤维为:“皮-芯”结构(见图 2-9),其皮层是较完善的芯层是串晶聚集体,串晶之间是由较弱的氢键联结。因此在冲击载荷作用下,材料的破坏模式及能量吸收除纤维断裂、基体变形及开裂、纤维脱胶与拔出外,还有 Kevlar 纤维内部在

剪切力作用下导致串晶相对滑移，引发纤维内部轴向裂纹的产生和扩展。表现为表层剥离及劈裂为单丝。

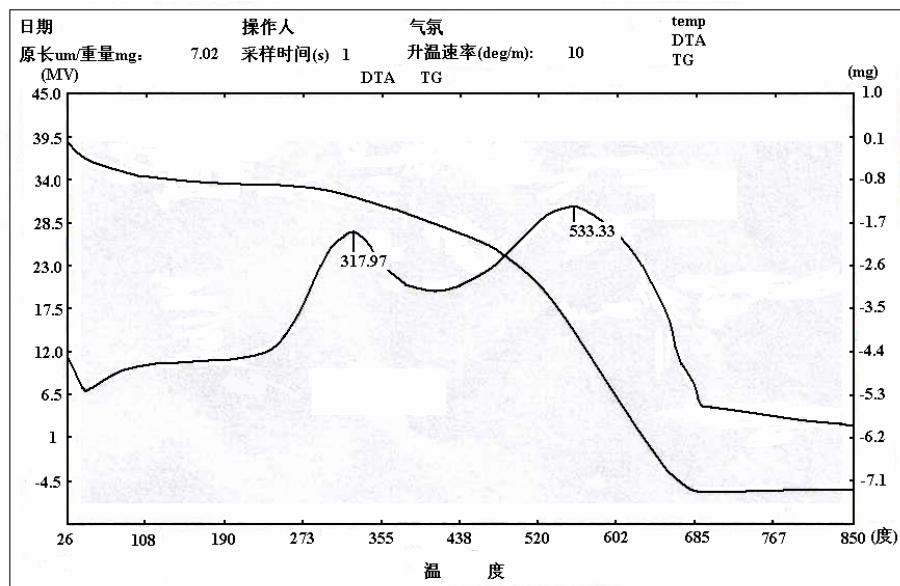


图 2-7 炭纤维 DTA-TG 曲线

2.2.2 纤维与基体的相容性

在选用纤维的时候，还应该考虑纤维与基体树脂的相容性问题以及纤维的分散性等问题。图 2-9 显示的是各种纤维在基体中的形貌。由图 2-9 可见钢纤维在树脂基体中的形貌，可以看出，钢纤维直径为 $50 \mu\text{m}$ 左右，表面形貌粗糙，有很多微裂纹，钢纤维在混好的材料中，表面附着众多树脂颗粒和其他填料，由此可见，钢纤维与树脂的相容性较好，因此，钢纤维是理想的增强纤维之一。

本工作中所用的炭纤维为低品质炭纤维，主要是通过炭化有机生物短纤维得到的，炭化并不完全，因此，本工作中所用到的炭纤维在外观形态上与生物短纤维有些相似，堆放杂乱，纤维直径为 $10 \mu\text{m}$ 左右，在基体中，炭纤维表面光滑，并无明显的附着物，这说明炭纤维与树脂基体相容性不好，几乎没有树脂颗粒附着于炭纤维表面，因此炭纤维在使用时一般要通过特殊处理，如包覆以其他与树脂相容性好的涂层或碱处理等，一般采用后者，成本低，且操作简单。

陶瓷纤维是由钙盐、镁盐、铝盐等以及相应的氧化物在熔融状态下通过喷嘴喷出并冷却得到的，因此，外观比较规则，同时由于陶瓷材料的脆性，陶瓷纤维的微观断口比较整齐，由于陶瓷纤维由氧化物及盐类物质组成，整体呈碱性，因此表面附着比较多的亲碱性颗粒，与基体材料的相容性比较好。但是由于陶瓷纤维直径很小，且容易缠绕在一起成团，给混料带来不便，一般在加入前预先打散。

Kevlar 纤维微观上呈所谓的“皮-芯”结构，芯层直径为 $20\mu m$ 左右。皮层由一些很细的微须组成，独特的纤维结构，使 Kevlar 发散非常困难，皮层微须缠绕在一起，容易结团，适当的纤维含量和混料时间可以改善这一问题。

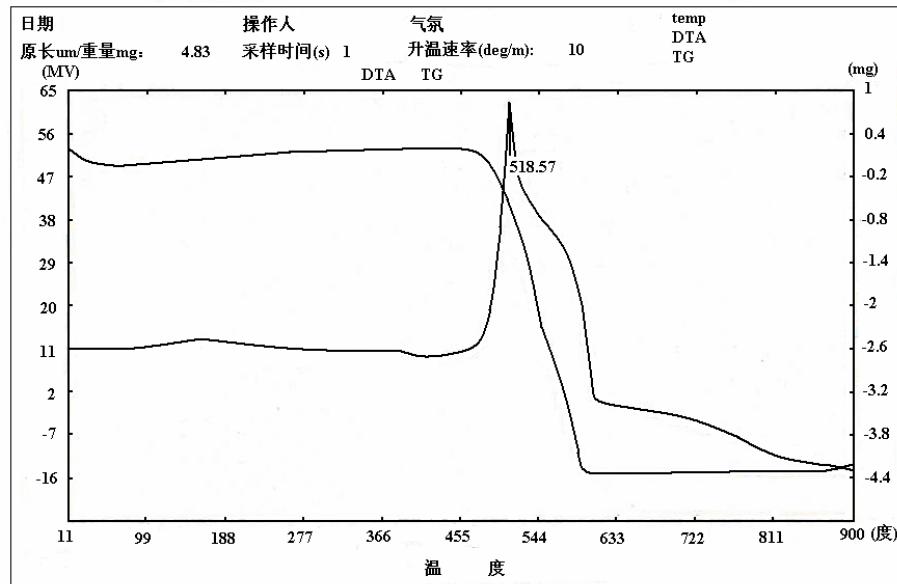
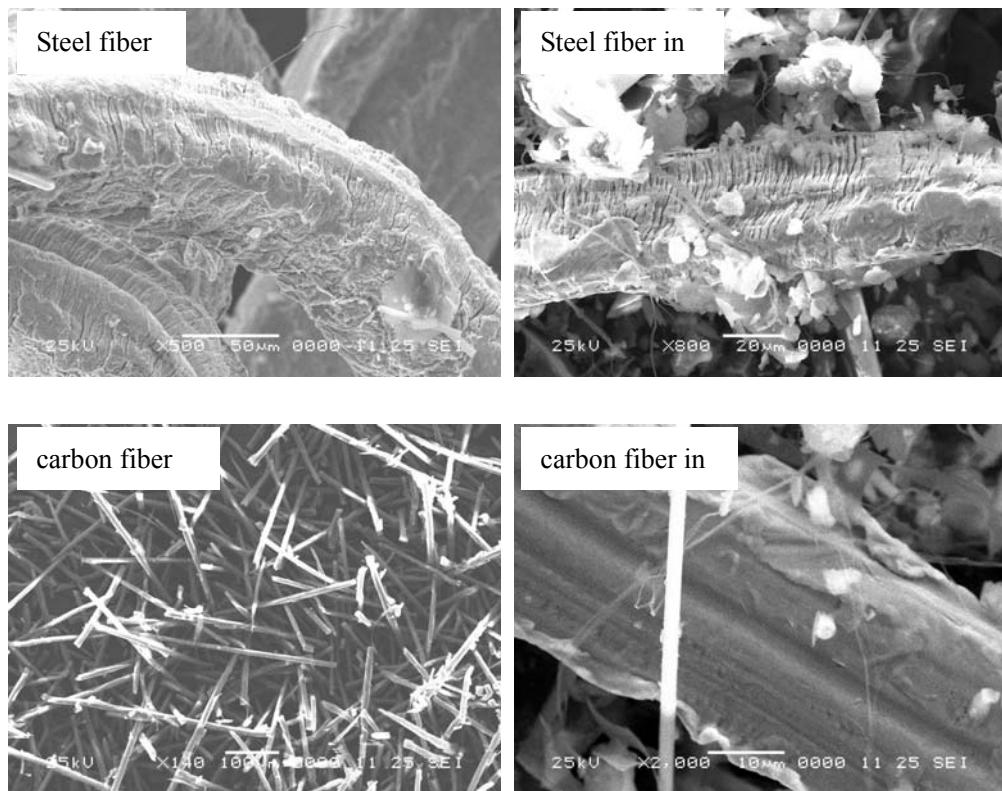


图 2-8 芳纶纤维 DTA-TG 曲线



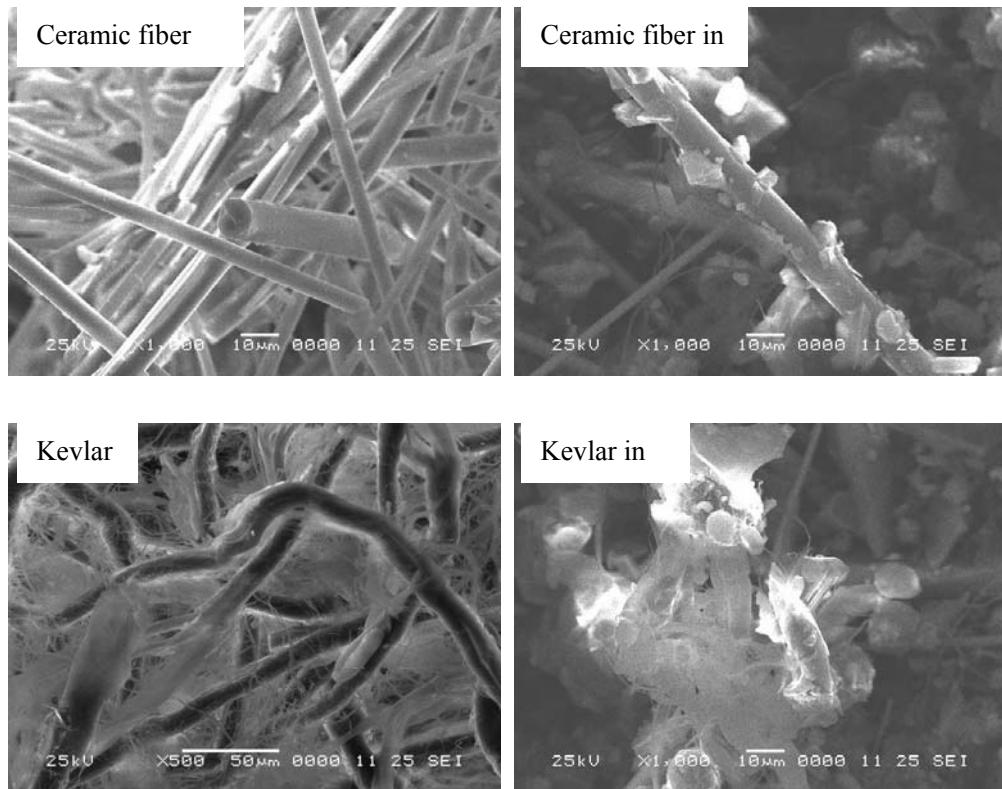


图 2-9 各种纤维形貌及其在基体中的分散形式

2.3 本章小结

这一章主要就摩擦材料中要用到的一些主要材料进行了差热分析和扫描电镜实验，通过研究，可以得出以下结论：

- 1) 硼改性可以大大提高酚醛树脂的耐热性能；
- 2) 加入丁腈橡胶共混该性，可以提高酚醛树脂的韧性，降低摩擦材料的硬度，改善摩擦状况，但是丁腈橡胶的耐热性能不好，因此，应该控制用量。
- 3) 钢纤维、炭纤维、Kevlar 具有优秀的综合性能，因此在摩擦材料中广泛应用，从综合性能、成本、成品密度等方面的因素考虑，各种纤维混合使用，效果最好。

第3章 摩擦材料的成分设计和实验方案

聚合物基摩擦材料是由增强体、基体和多种摩擦性能调节填料组成的多元体系复合材料，因此摩擦材料的摩擦磨损性能取决于各组分材料的合理选择、配方设计及相应的成型工艺。

3.1 摩擦材料的成分设计

摩擦材料是车辆和机械的离合器总成和制动器中的关键安全部件，在传动和制动过程中，主要满足一下技术要求：

- (1)适宜而稳定的摩擦系数:摩擦系数是评价任何一种摩擦材料的一个最重要的性能指标，它不是一个常数，而是受温度、压力、摩擦速度或表面状态及周围介质等因素的影响而发生变化的一个系数。理想的摩擦系数应具有理想的稳定摩擦系数和可以控制的热衰退性。
- (2)良好的耐磨性:摩擦材料的耐磨性是其使用寿命的反映，也是衡量摩擦耐用程度的重要技术经济指标。耐磨性好，表明使用寿命长，但在摩擦材料工作过程中的磨损，主要是由摩擦接触表面产生的剪切力所造成的。磨损也不是一个常数，而是受工作温度、压力、材料的组分性能的影响较大。
- (3)具有良好的机械和物理性能:摩擦材料制品在装配使用之前，需要进行钻孔、铆装、装配等机械加工;在摩擦工作过程中，摩擦材料除了要承受很高的温度，同时还要承受较大的压力和剪切力，因此要求摩擦材料必须具有足够的机械强度，有一定的抗冲击强度、铆接应力、抗压强度等。
- (4)制动噪音:制动噪音关系到车辆行驶时的舒适性，而且对周围环境特别是对城市环境造成噪音污染。一般汽车制动时产生的噪音不应超过 85dB，引起制动噪音的因素很多，就摩擦材料而言，造成制动噪音的因素大致有:①摩擦系数高;②制品材质硬度高;③高硬度材料用量多;④刹车片经高温制动作用后，工作表面形成光亮而硬的碳化膜，在制动摩擦时会产生高频振动及相应的噪音。
- (5)对偶面磨损较小：摩擦材料制品的传动或制动功能，都要通过与对偶件即摩擦盘或制动鼓(或盘)在摩擦中实现，在此摩擦过程中这一对摩擦偶件相互都会产生磨损。但作为消耗性的摩擦材料制品，除自身应该尽量小的磨损外，对偶件的磨损也要小，即使对偶件的使用寿命相对的较长。同时在摩擦过程中不应将对偶件的表面磨成较重的擦伤、划痕、沟槽等过度磨损情况。

针对以上摩擦材料的技术要求和本论文的研究方向即耐高温和低噪音，以自行研制的新型高性能摩擦材料为研究对象，以钢纤维、铜纤维、炭纤维、芳纶纤维、新型陶瓷纤维等作为增强材料，以酚醛树脂和丁腈橡胶共混作为粘结剂，配合以重晶石、石墨、 MoS_2 、硫铁矿、 Al_2O_3 等填料，制成摩擦材料成品。

3.1.1 不同成分的摩擦材料配方的设计

钢纤维在本研究中被用作主增强材料，研究钢纤维含量对摩擦材料摩擦磨损性能的影响具有非常重要的意义。

钢纤维的力学性能非常优秀，和树脂基体的相容性也非常好，因此，在摩擦材料中应用广泛。以钢纤维作为增强材料的树脂基摩擦材料习惯上又被称为半金属摩擦材料。但是由于钢纤维的密度比较大，半金属摩擦材料往往密度比较大，对于越来越轻型化的汽车零部件来说，这一点是很不利的。因此，在设计摩擦材料成分的时候，要尽量减小钢纤维的用量。

热固性酚醛树脂是树脂基摩擦材料的主流粘结剂，也是树脂基摩擦材料的主要粘结相。热固性酚醛树脂的耐热性能较好，在第2章中也作了差热分析研究。但是纯酚醛树脂做为粘结剂，而不做增韧改性，会导致制造出来的摩擦材料硬度过高，容易伤对偶盘和产生噪音。因此，本工作中所提到的酚醛树脂都是硼改性酚醛树脂和丁腈橡胶以3:1的比例共混的混合物。

酚醛树脂作为摩擦材料中的有机组分，耐热性能虽然不错，但是，随着对摩擦材料性能的不断提高，控制其用量，以提高材料的耐热性能，是很有必要的。

填料包括有机摩擦粉、磁铁矿、铬铁矿等无机盐类氧化物。表3-1中所采用的是各成分的质量百分比，其中钢纤维、酚醛树脂、Kevlar、石墨等的选材在第2章中已经提及。

1-7#配方，主要是设计研究钢纤维含量对摩擦材料性能的影响。除钢纤维外，其他成分保持不变，钢纤维从5%wt变化到30%wt。

同时根据文献报道，树脂基体的百分含量一般为10~25%wt，本工作对酚醛树脂的含量变化从10~25%wt。具体成分为见表3-1。

8-9#配方，主要是设计研究酚醛树脂含量对摩擦材料性能的影响。酚醛树脂由6%wt变化到15%wt。

表3-1 实验摩擦材料配方/wt%

编号	钢纤维	铜纤维	Kevlar	酚醛树脂	石墨	硫铁矿	重晶石	填料
不同	1#	5	2	3	10	10	8	12
	2#	10	2	3	10	10	8	12
								45

钢 纤 维	3#	15	2	3	10	10	8	12	40
	4#	18	2	3	10	10	8	12	37
	5#	22	2	3	10	10	8	12	33
	6#	26	2	3	10	10	8	12	29
	7#	30	2	3	10	10	8	12	25
不 同 树 脂	8#	20	2	3	8	10	8	12	32
	9#	20	2	3	10	10	8	12	30
	10#	20	2	3	12	10	8	12	28
	11#	20	2	3	15	10	8	12	25
	12#	20	2	3	20	10	8	12	20

3.2 摩擦材料制备工艺设计

针对本论文所用的原料物理性能并结合生产实践中的经验,选择应用广泛的热压工艺为本论文的生产工艺,工艺路线如图 3-1 所示。

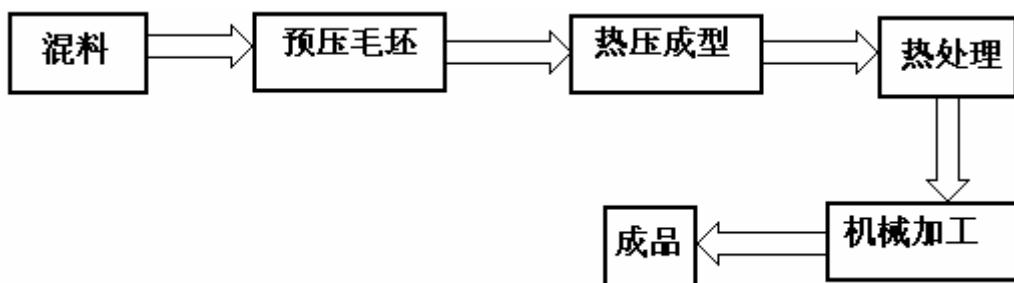


图 3-1 热压工艺流程

其中在混料过程中,采用混料效果最好的犁耙式混料机,可以通过控制其混料的转速以及混料时间来达到控制各种材料的混合均匀度和增强纤维的开松程度。本文确定的混料工艺条件为:首先加入陶瓷纤维和各种无机填料,搅拌约 3 分钟,然后再加入芳纶纤维,在搅拌 10~15 分钟后,再加入其它各种填料搅拌约 5 分钟,最后加入炭纤维、钢纤维并搅拌 5 分钟。加料顺序是依据其电负性不同来确定的(表 3-2)。

表 3-2 各种材料的电负性

材料	电量(nc/g)	材料	电量(nc/g)
Kevlar	-5~12	碳黑	-3.2
FeO	-1.3	玻璃纤维	-8.5
CaCO ₃	-4.57	云母	-2.86
CaO	-7.09	石墨	1.3
ZnO	-2.9	岩棉	-5.7
MgO	0.17	高岭土	-1.2

Al_2O_3	-4.26	树脂	-6.2
Sb_2S_3	4.25	铁粉	-6

在确定的工艺路线情况下，还要确定热压工艺下的压制压力、压制时间以及热处理工艺等。根据实践经验，选择如下的热压成型工艺条件：

1. 压制温度：温度制度包括装模温度和成型温度，应该根据样品的厚度和树脂的固化特性来进行。

①装模温度：当物料挥发物含量高、不溶性树脂含量低时，装模温度宜低些，反之则装模温度应相对较高，实验中，将混料预热到 $70^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ ，又是处于快速压制，装模温度与成型温度接近，因此本文不予考虑。

②成型温度：成型温度主要取决于模压料的树脂系统。固化的时间与温度及树脂的状态有一定的关系，改性树脂的固化温度在 $120^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 之间。一般而言，温度高，固化时间短，尤其在干法热压成形中，缩短固化时间可以大大提高生产率，但经实验分析后发现，高温固化时，原料呈塑性状态的时间很短，同时固化热压过程中，原料产生大量的气体，而整个制品的固化顺序是由外到里，如果排气不良，就会在已经固化的外壳内驻留气体，产生夹层、起泡、分层等现象。在较低温度下固化，由于塑性状态时间长，可以有较充裕的时间采取人工或自然放气的措施，产生上述缺陷的可能性较小。但如果固化工艺温多纤维混杂增强复合摩擦材料的制度过低，热压固化时间太长，影响生产效率。经过多次实验后确定固化温度为 $170^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 。

2. 压力制度：压力制度包括成型压力的大小、加压时机、放气等问题。成型压力的大小主要取决于模压料的种类，实验中用酚醛型模压料，采用 $10 \sim 30\text{ MPa}$ 的成型压力。用酚醛树脂配置的模压料，在固化过程中一般会产生挥发性的副产物，而且在快速压制工艺中，压制时间短，所以在短时间内会产生大量的挥发性物质，压制过程中若不能有效排除，很容易使制品产生气泡、分层等缺陷。因此在设计压力制度时，重点考虑到排气措施：开始压制时，产生的气体较多，则每 5 秒启模排气，然后每隔 15 秒启模排气，这样反复 3 次，进入保压阶段，保压时间可以根据制品厚度 $1 \sim 1.5\text{ mm/min}$ 来确定，本文中样品厚度为 $13 \sim 15\text{ mm}$ ，故确定保压的时间为 $15 \sim 18$ 分钟，同时在保压的期间，每隔 2~3 分钟必须启模放气，再合模加压，最后顶出半成品。

3. 热处理制度：热压完成后的制品，为了保证树脂完全固化，必须经过固化热处理。热处理采用的工艺路线为：缓慢升温至 170°C ，保温 12 小时，然后随炉降温冷却，得到成品。

为了便于研究，减少对摩擦材料的性能影响因素，在本论文的试验过程中，均采用本热压工艺路线和热压工艺成型条件，以保证所测得的试验数据具有可靠

性和可比性。

制动摩擦材料的摩擦磨损性能和冲击强度性能测试依 QC/T479-1999 汽车制动片惯性台架实验标准、GB5763-98 汽车用制动衬片测试标准、GB5765-86 摩擦材料冲击强度测定法，分别在 M1000 惯性台架实验机、D-MS2000 定速式摩擦试验机、XCJ-4 型冲击强度试验机上进行性能测试。材料的硬度在洛氏硬度实验机上进行测试。

3.3 树脂基摩擦材料的性能评定及实验方法

制动衬片的评价指标是一个十分复杂又包含很多抽象因素在内的体系，其中包括摩擦系数及其特性、磨损率、噪音、强度、硬度等方面。

本工作中，对材料的硬度、摩擦磨损性能、抗冲击强度等性能进行研究。再对材料的其他性能做出适当的要求，以求达到优化设计的目的。

目前汽车制动材料摩擦磨损性能测试的手段主要有三种：定速实验、惯性台架实验、道路实验。从效率上来说，定速实验的效率和可重复性是最高的，但是定速实验与实际摩擦工况区别比较大，因此，定速实验的结果只能作为研究工作的一个参考。道路实验成本和风险比较大，而且实验周期很长，对研究工作来说，显然是不合适的。台架实验是模拟汽车实际刹车副按一定缩比或完全模拟汽车制动副制动过程的一种实验手段，实验周期比较短，成本低，而且仿真性好，在本实验中被用作主要检测手段。

3.3.1 定速实验

3.3.1.1 实验条件

①设备标定：这是试验的很关键一步，标定不准的设备将不能正确反映出摩擦力的大小，因此试验中建议每隔一段时间就重新标定：在未放砝码之前调整零点，使摩擦力显示“0”，然后逐一增加砝码，并调整增益电位器，使摩擦力的增加值等于增加砝码的重力。

②摩擦盘转速为 400~500r/min。

③试片从同一制品中取，数量为两个。

④试片摩擦面尺寸为 25mm×25mm，允许偏差-0.2mm。其一面不允许有起泡。

⑤试片厚度为 5~7mm；允许偏差为±0.2mm。

⑥圆盘摩擦表面的磨损深度不允许大于 0.2mm，每次试验结束后要用 4/0 号刚玉

砂布或用 JB/T 7498 中粒度 P240 砂纸处理。处理其表面使之保持光洁，并用洁净软布揩净。

⑦压紧力： $10\text{kgf}/\text{cm}^2(0.98\text{MPa})$ 。

⑧试片的摩擦方向应与制动器衬片的摩擦方向相同。

⑨摩擦力用自动记录仪测定并记录。

3.3.1.2 实验方法

①先把试片的面磨平，然后将试片在常温下进行磨合，至试片与圆盘的接触面达 95% 以上。

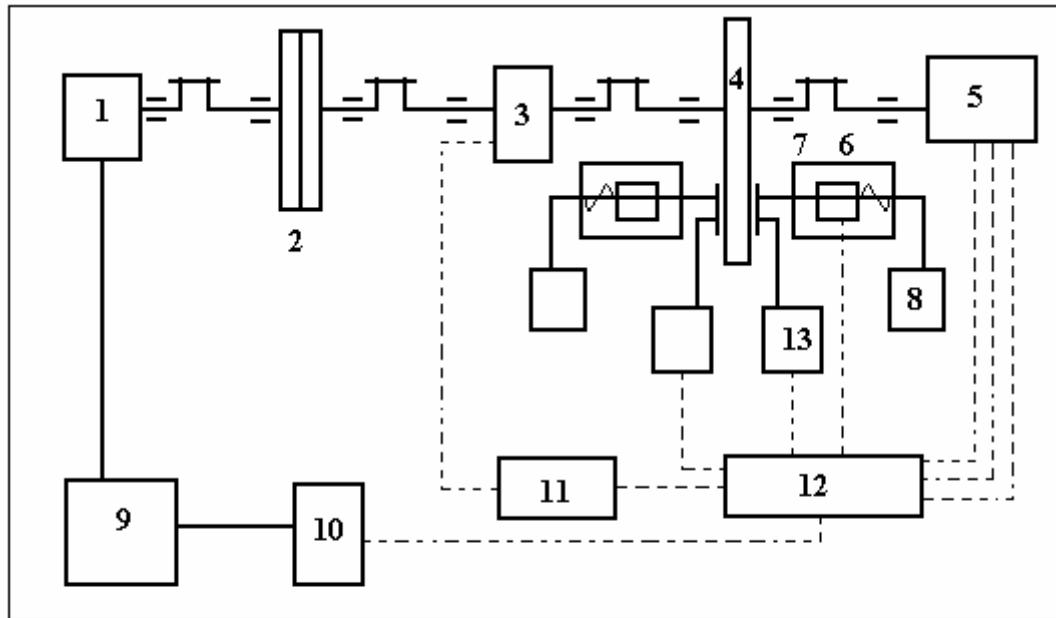
②磨合好的试片用千分尺测量其厚度。每个试片测五点，(即试片的四个角与中央位)，求其算术平均值。

③在盘温为 100℃时记录 5000 转试验期间的摩擦力。待试片冷却至室温时测量其摩擦后的厚度。

④在盘温 150℃，200℃，250℃，300℃，350℃各个规定温度时，进行同样试验。

3.3.2 惯性台架实验制度

惯性台架实验机的工作原理模拟汽车真实刹车状况。对偶盘一般采用汽车原装铸铁盘，对偶盘直径大小以及粗糙度、接触面内外径大小、硬度等与具体车型有关。



1—直流电机；2—惯性盘；3—扭矩传感器；4—制动盘；5—集流环；
6—制动器；7—压力传感器；8—交流电磁铁；9—直流发电机组；
10—励磁调速器；11—转矩转速传感器；12—计算机控制&数据收集系统；
13—温度传感器

图 3-2 台架实验机示意图

台架实验机如图 3-2 所示，是由动力系统、传动轴、惯性盘、摩擦盘、摩擦片及其夹具、众多数据收集仪器和一台控制以及数据收集处理计算机组成。在实验中，可以通过调节不同转速来模拟不同行车速度；通过调节加载惯性盘数量来模拟不同惯性量；通过调节制动油缸的压力来模拟不同刹车正压力情况下的刹车情况。

进行惯性台架实验一般分为以下实验步骤(表 3-3):

- 根据具体车型，以及要检测的性能进行参数的计算，计算标准一般由配套厂方提供。以下是计算相关的参数以及它们之间的关系。

$$\mu = \frac{K_{mu} \cdot M}{P} \quad (3-1)$$

$$K_{mu} = \frac{2}{A_{rz} R_m \eta} \quad (3-2)$$

其中

M —制动扭矩；

P —制动压力；

A_{rz} —制动缸活塞面积；

R_m —制动力臂长;

η —制动效率(一般取 0.8)。

2. 将计算所得参数值输入控制程序，并调整惯性台架实验机。根据具体情况选择惯性盘数量以及对偶盘等。
3. 摩擦片上夹具，然后装机。一般在摩擦片中心处钻空，安装温度传感器，安装时要保持传感器头部在摩擦片表面以内 1.5mm 处。
4. 试机，在正式进行实验之前，要进行试机，在机器正常运转的情况下再进行下一步实验，这是保证实验安全必须进行的一个步骤。
5. 开始实验。

台架实验检测的指标包括稳定摩擦系数、衰退、恢复、速度相关性、磨损率等。这些参数都是在不同的实验步骤下进行检测的。

- 1) 磨合阶段。磨合阶段是模拟汽车在平缓的公路上，刹车次数不多，间隔比较长，刹车压力不大，且基本保持不变的一种工况。磨合实验阶段，设定刹车压力恒定，刹车片表面温度恒定，进行刹车模拟实验。磨合阶段所得到的摩擦系数曲线表现平稳，波动很小，基本上在同一水平线上，因此，磨合阶段的摩擦系数，可以看作摩擦材料的稳定摩擦系数。
- 2) 衰退阶段。台架实验机上的衰退阶段是模拟汽车在路况较差的公路上，行车速度较快，但频繁刹车，且刹车压力比较大。或者是模拟汽车在下陡坡时，为了保持速度，频繁刹车。衰退阶段，设定刹车压力保持不变，刹车频率保持不变。由于刹车频繁，摩擦材料表面温度迅速上升。从摩擦系数与温度的曲线对比上，可以看出摩擦材料随温度的变化趋势和摩擦材料对温度的衰退程度。
- 3) 恢复阶段。恢复阶段是紧跟着衰退阶段而来的，目的是模拟汽车在高速频繁刹车之后，摩擦材料表面温度逐渐下降的前提下，进行制动。一般恢复的刹车压力也保持不变，刹车频率不变，但是刹车压力和频率远小于衰退阶段。恢复阶段的温度曲线是一条随时间下降的曲线，而摩擦系数曲线总体趋势是随时间上升的。对比恢复阶段的摩擦系数变化，可以看出，摩擦材料在高温工况条件过后的恢复情况。
- 4) 效能阶段。效能阶段的设定为压力恒定，车速呈阶梯状变化。模拟汽车在不同速度下刹车工况。树脂基摩擦材料的摩擦系数影响因素非常复杂。实际工作中，不同的刹车状态所对应的刹车速度是不同的，因此，研究摩擦材料性能对刹车速度的敏感性意义非常重大。
- 5) 磨损率的标定。在台架实验机的摩擦副上，一般还有一个红外厚度测量仪，它可以随时标定摩擦片的厚度。通过对厚度变化的测量，来计算磨损率。当然，台架实验机上测定的磨损率与定速实验机上测定的磨损率有一些区别。台架实验

机上，刹车时才是磨损发生的时候，而定速实验中，试样一直在和对偶件对磨当中。因此，台架实验的磨损率表示法与定速实验的磨损率表示法是不同的。式3-3, 3-4分别是台架实验的磨损率和定速实验的磨损率计算公式。

表 3-3 惯性台架实验大纲

序号	试验项目	制动减速度或压力	制动初速 km/h	制动初温	制动次数	制动周期	风机
1	测厚、称重						
2	磨合前检查	0.3g	50	--	10	120S	开
3	第一次效能	0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9g	50, 100	80±5°C	16	--	开
4	第一次磨合	0.35g	65	120±5°C	200	--	开
5	第二次效能	0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9g	50, 100, 130, 180	80±5°C	24	--	开
6	放置后的效能试验	0.8g	100	常温	1	---	开
7	低温效能试验	0.8g	100	0/25/80			
8	第二次磨合	0.35g	65	120±5°C	35	--	开
9	一次衰退基准	0.5g	90	80±5°C	3	--	开
	第一次衰退	0.3g	100	65±5°C	10	35S	关
	高温效能试验	0.5g	100	--	1	120S	开
	冷却效能试验	0.3g	50	--	4	120S	开
	第一次恢复	0.5g	90	--	1	120S	开
	检查点	0.45g	100	80±5°C	2	--	开
10	第三次磨合	0.35g	65	120±5°C	35	--	开
11	二次衰退基准	0.50g	50	80±5°C	3	--	开
	第二次衰退	0.5g	100	65±5°C	15	35S	关
	高温效能试验	0.5g	100	--	1	120S	开
	第二次恢复	0.50g	50	--	12	120S	开
	检查点	0.45g	100	60±5°C	2	--	开
12	温度效能试验	0.6g	50, 100	25/80/1 50/200/ 300/500	各一次		开
							开
							开
13	第四次磨合	0.35g	65	120±5°C	35	--	开
14	第三次效能	0.15, 0.3, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9g	50, 100, 130	80±5°C	24	--	开
15	第五次磨合	0.35g	65	120±5°C	35	--	开
	涉水基准	0.3g	50	80±5°C	3	--	开
	涉水恢复	0.3g	50	--	15	60S	开

“*”：第一次制动初温为 60±5°C

(3-3)

$$V = \frac{d_1 - d_2}{d_1}$$

$$V = \frac{1}{2\pi R} \frac{A}{n} \times \frac{d_1 - d_2}{f_n} \quad (3-4)$$

式中：
 V —磨损率；
 n —试验时圆盘总转数；
 A —试片摩擦总面积， cm^2 ；
 d_1 —试样摩擦前平均厚度， cm ；
 d_2 —试样摩擦后平均厚度， cm ；
 f_n —试验时总平均摩擦力， kg f(N) ；

3.3.3 其他实验

硬度测定在布氏硬度计上进行，钢球直径为 2.5 mm ，压力为 3.2 M Pa 。采用多点测量法，剔除不合理数据，然后取平均值。

冲击强度测定采用XJ240A型塑料冲击试验机，试样尺寸为 $6\text{mm} \times 10\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。同类型的试样从同一块摩擦片中取出，以保证数据的准确性。

第4章 树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的研究

4.1 钢纤维含量对摩擦材料摩擦性能的影响

钢纤维具有优异的性能：质量轻、强度与模量高，而且具有良好的导热性、耐磨性、耐高温性能等等。因此，是很理想的摩擦材料的增强纤维，有必要深入了解钢纤维对摩擦材料性能的影响。

为满足使用要求，性能优良的摩擦材料应同时具有较高的强度、平稳的摩擦性能、较低的磨损以及适宜的硬度等综合性能。本章将对第3章中所设计的配方和工艺所设计的材料进行了定速试验和使用性能台架试验，以综合评价钢纤维对摩擦材料的性能的影响。

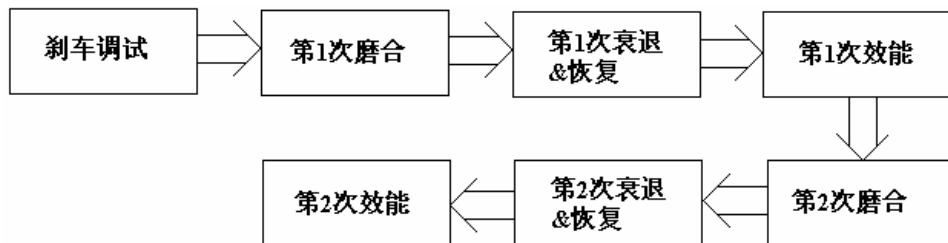


图 4-1 台架实验步骤示意图

4.1.1 惯性台架实验结果及分析

惯性台架实验按 3.3.2 所制定的惯性台架实验制度进行，磨合进行 200 次制动，也可以根据具体实验情况对制动次数进行调整，主要研究树脂基摩擦材料摩擦系数的平稳性。本工作中一般只进行 50 次左右制动。效能进行 15 次制动，每 5 步变换制动初速，主要研究树脂基摩擦材料的摩擦系数与制动速度之间的关系。衰退进行 30 步制动，主要研究树脂基摩擦材料摩擦系数随温度的变化情况，包括抗衰退性和恢复两个阶段。

实验结果包括第 1 次磨合(图 4-2)，第 2 次磨合(图 4-3)，第 1 次衰退(图 4-4)，第 2 次衰退(图 4-5)，效能(图 4-6)。

第1次磨合

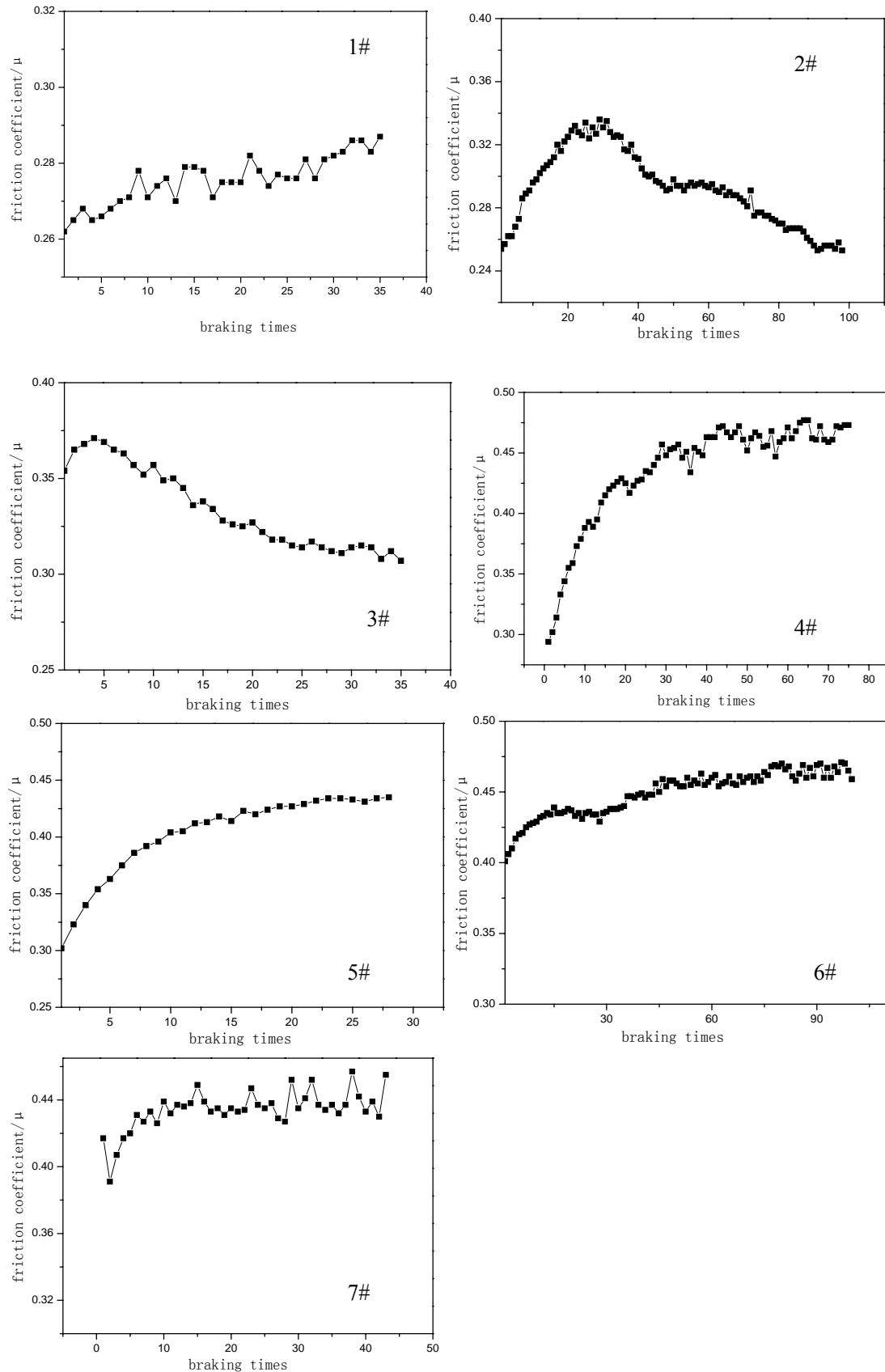
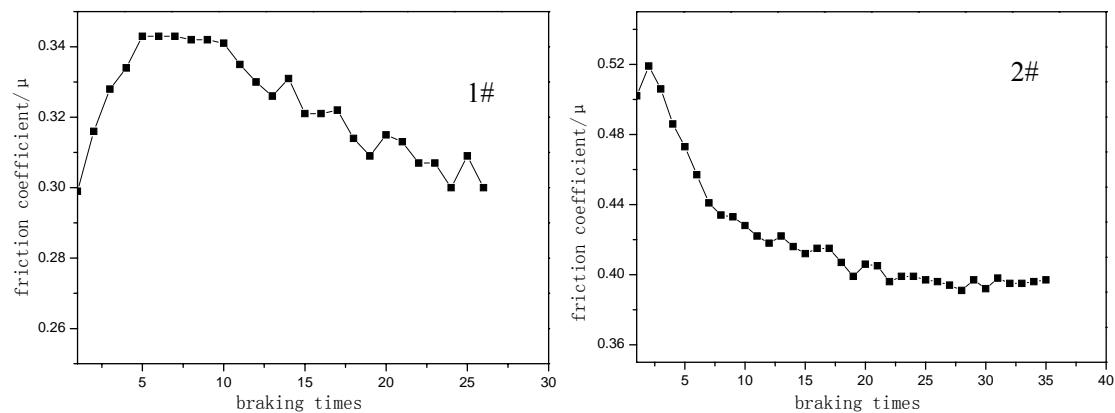


图 4-2 7 种组分的第 1 次磨合曲线

磨合曲线测定的是摩擦材料的低温稳定摩擦系数 $\bar{\mu}$ ，在从上述曲线的比较可知6#、7#的稳定摩擦系数最高，其次依次为4#、5#、2#、3#、1#。其中6#、7#的低温稳定摩擦系数相差不大，都在0.42以上；1#、2#、3#、4#的低温稳定摩擦系数相近，都在0.32左右，4#、5#为0.4左右。在低温稳定摩擦系数，各组分的性能都能达到使用要求，看不出什么差别，但是，从第一次磨合曲线还是可以看出，2#、3#组分的低温稳定摩擦系数曲线在实验进程中呈现下降趋势；而1#和7#组分的低温稳定摩擦系数在实验进程上呈波动变化，而且波动比较大；其它3组组分的低温稳定摩擦系数在实验进程上基本保持稳定，随着摩擦的进行，稍微有些上升，这是由于摩擦片在初始阶段摩擦接触面粗糙度比较高，摩擦面和对偶面的接触部分只局限于一些凸点的接触，实际接触面积小于名义接触面积，从而导致摩擦系数在初始阶段偏低，而随着摩擦的进行，摩擦面逐渐光滑，接触面积增加，摩擦系数也随之升高。基本稳定后，接触面积上升缓慢，这也是后来摩擦系数呈微弱上升趋势的原因。同时从稳定摩擦系数上，可以看出，树脂基摩擦材料的稳定摩擦系数基本上随钢纤维含量的升高而提高，当钢纤维含量为22%wt时，摩擦系数由18%wt时的0.32左右跳跃到了0.42左右，这说明在18~22%wt这段时间范围内，基体和钢纤维的结合的结构有一个重大的变化。

2#和3#组分的摩擦系数在整体趋势上呈下降趋势，这可能是由于摩擦材料中钢纤维含量比较低，而且在本工作一些的配方体系中，其它纤维含量也不高，因此，材料中整体增强纤维含量较低，材料整体抗剪切强度较低，摩擦表面结构强度不够，在摩擦进行过程中，接触表面的更新比较快，新表面的不断生成造成了摩擦系数呈下降趋势。1#配方钢纤维含量最低，但是，由于钢纤维含量很低，基体材料含量相对较高，成型后的材料呈板结状。材料的整体结构强度相对2#和3#来说要高。



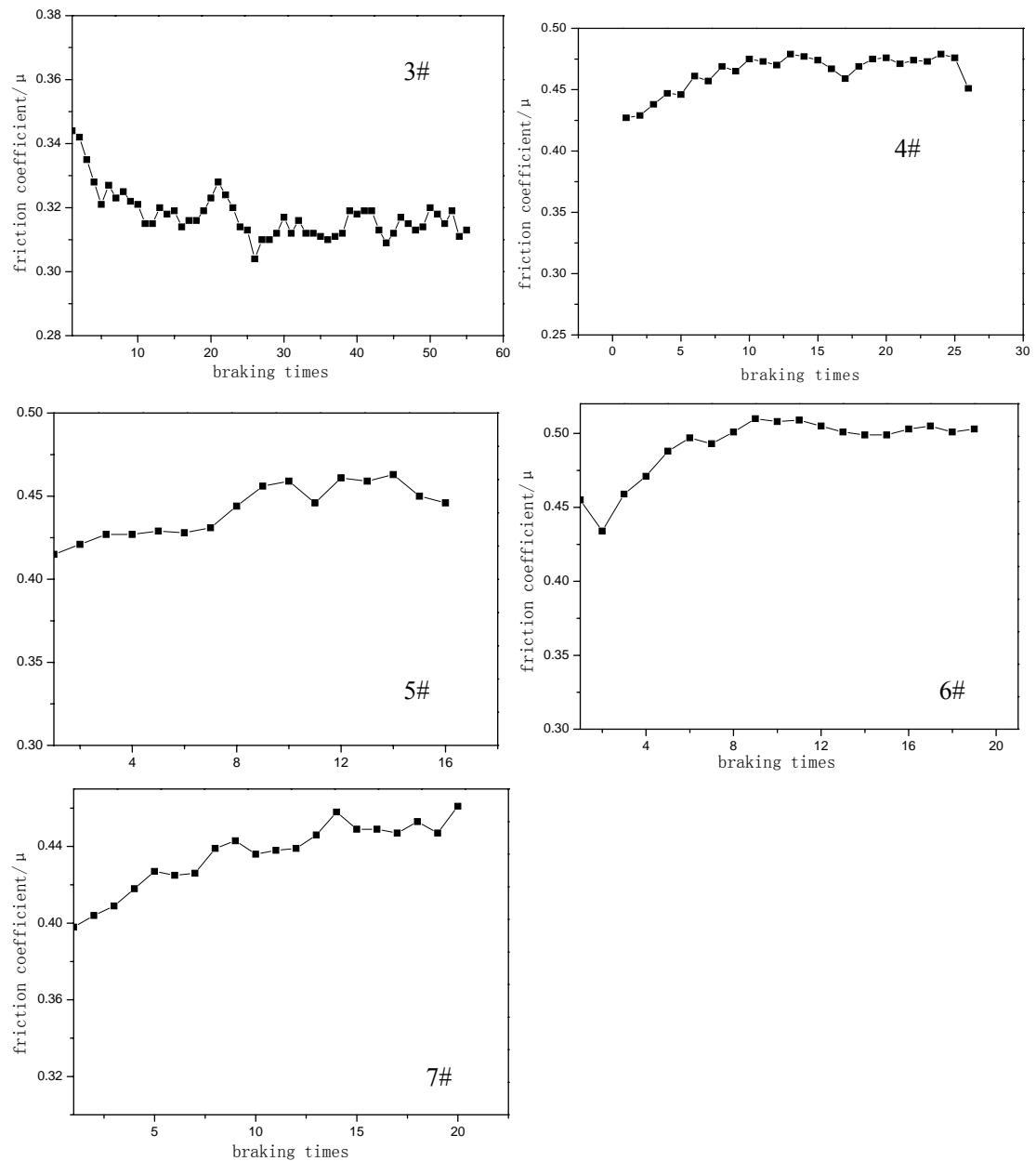
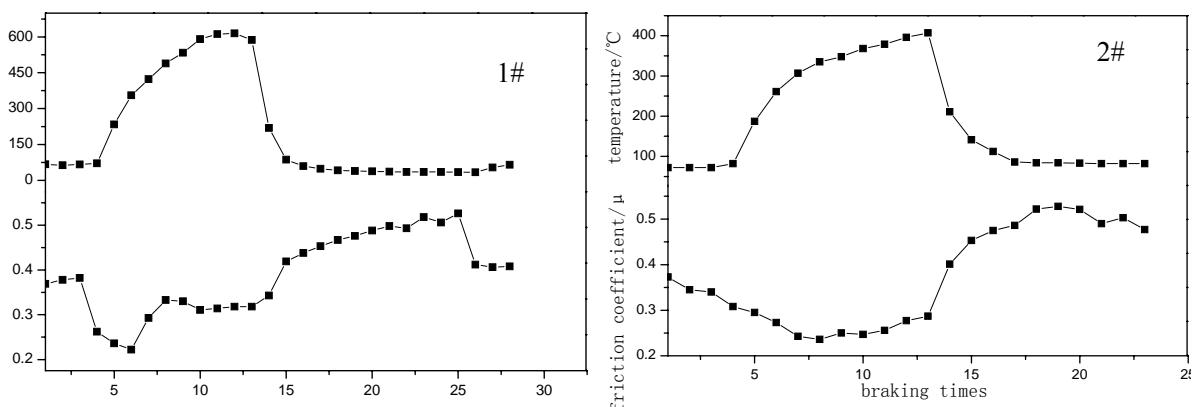


图 4-3 7 种组分的第 2 次磨合曲线



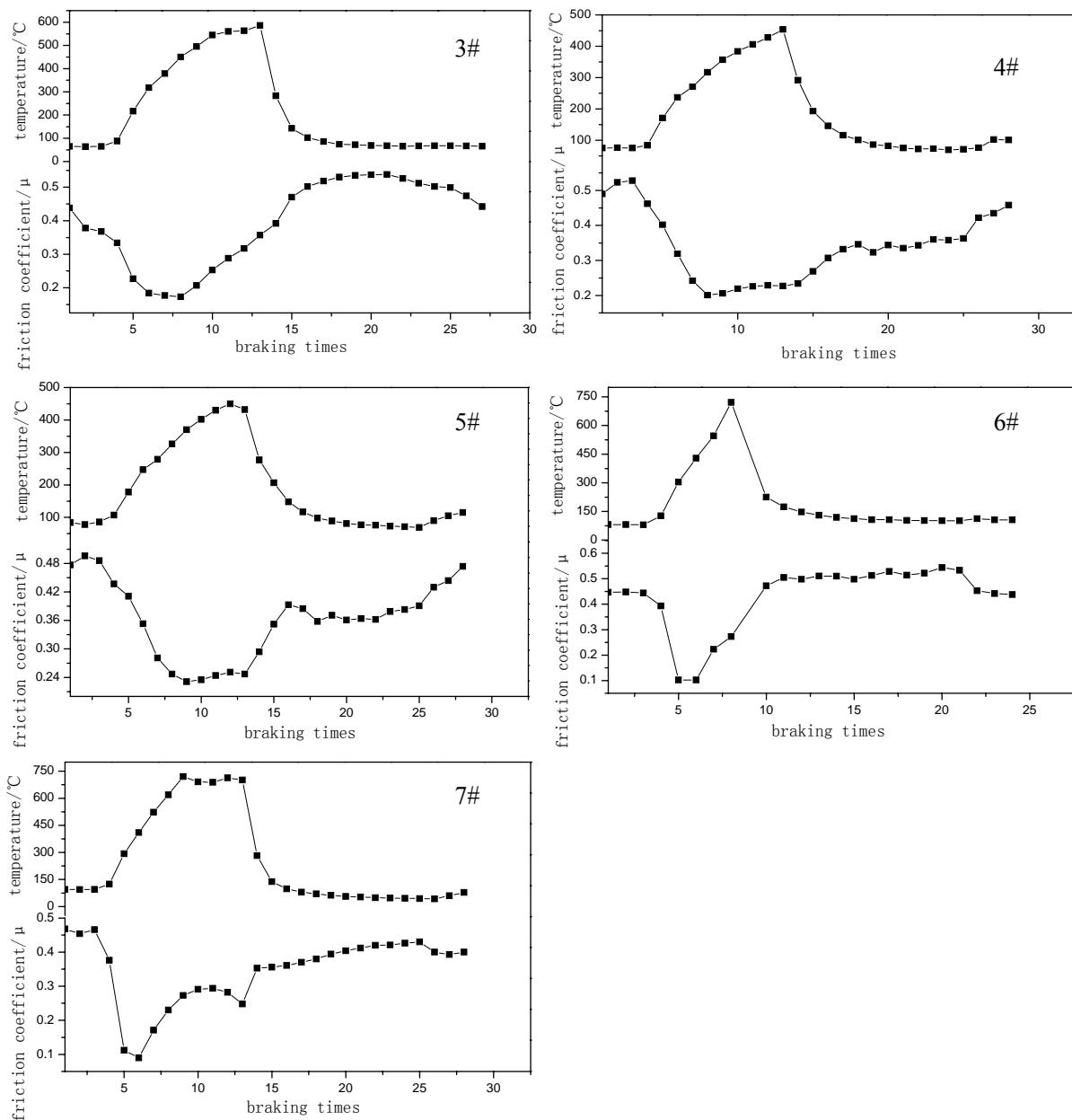
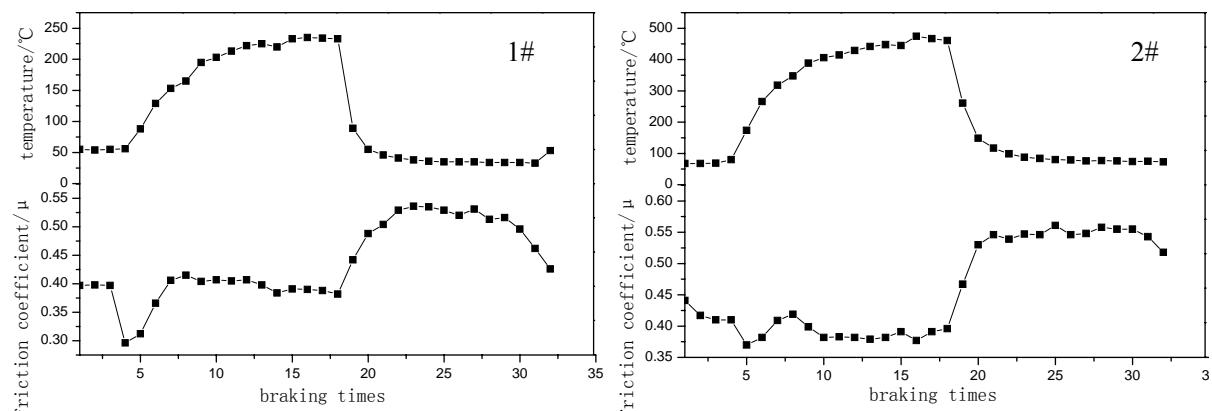


图 4-4 7 种组分的第 1 次衰退曲线



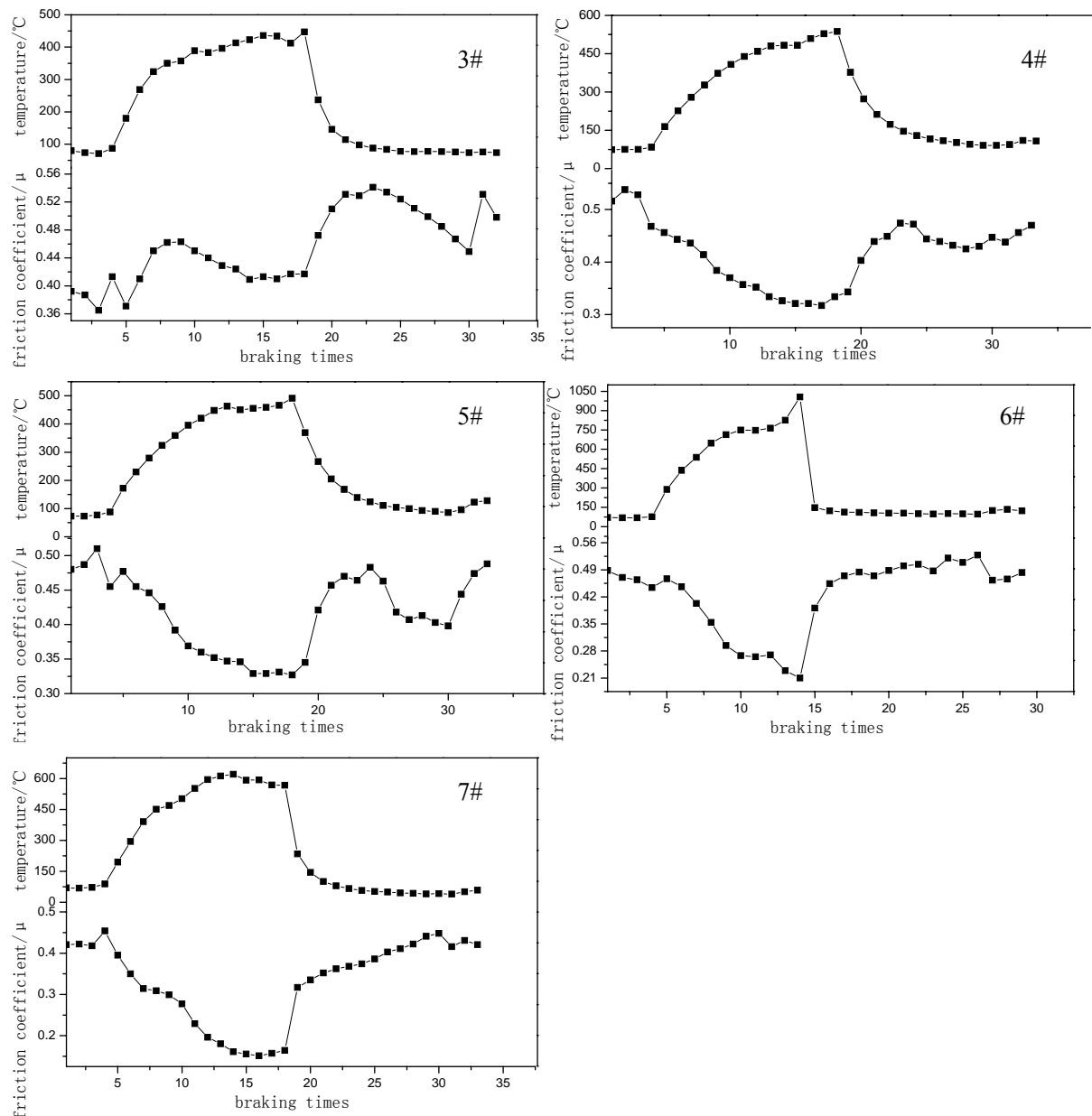
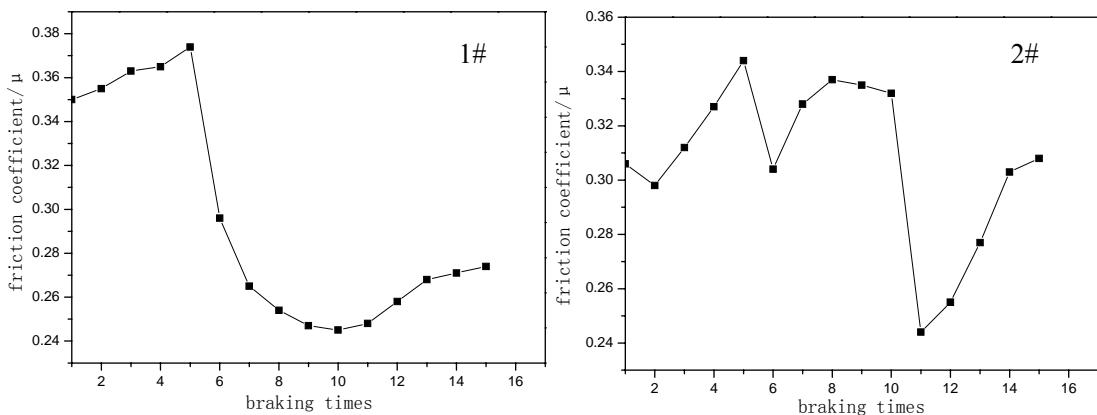


图 4-5 7 种组分的第 2 次衰退曲线



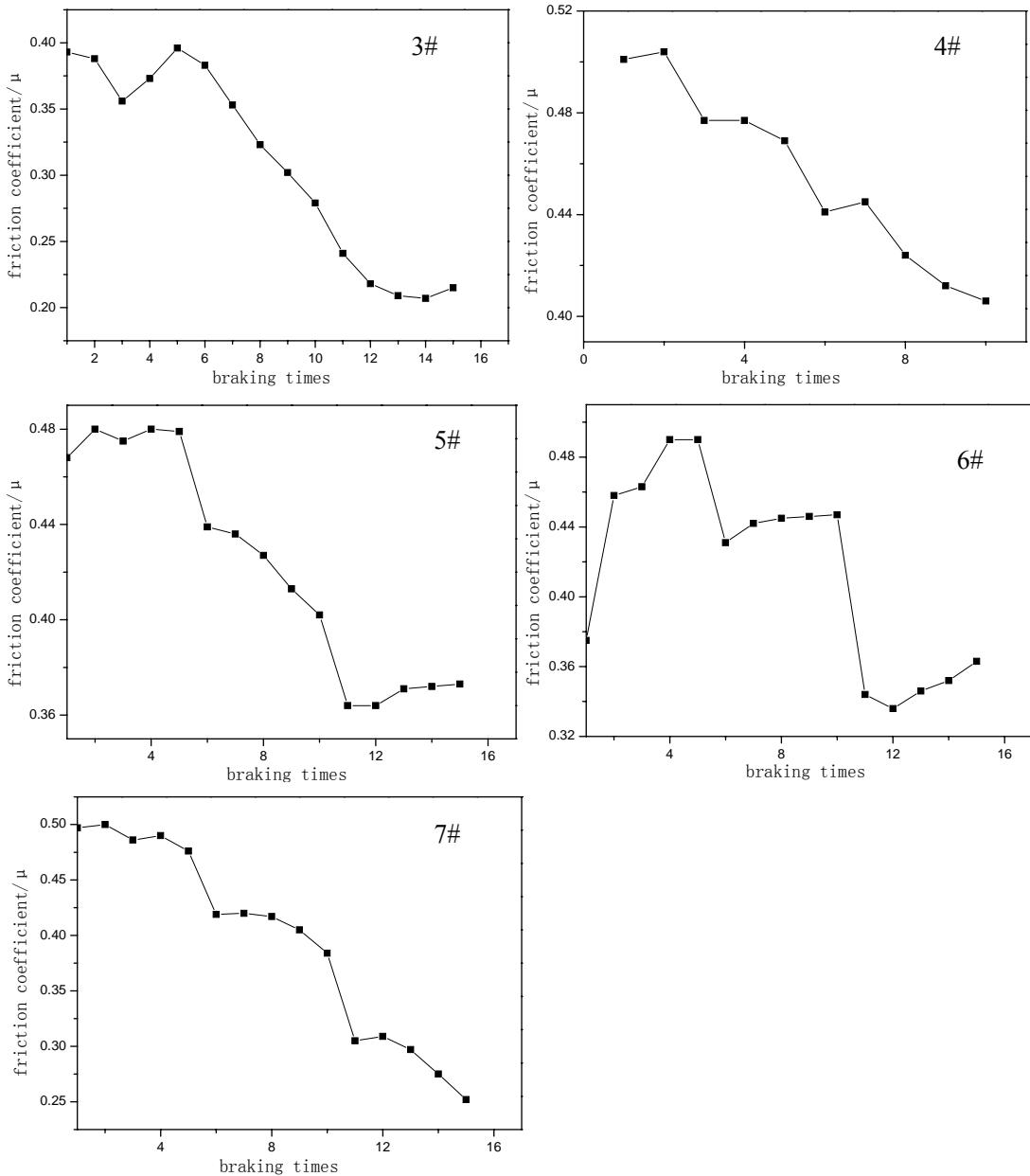


图 4-6 7 种组分的效能曲线

第 2 次磨合

各组组分的第 2 次磨合曲线(图 4-3)要比第 1 次磨合曲线的整体表现好,摩擦系数也在整体上有些提高。这是因为第 2 次磨合是在进行一轮衰退、效能实验之后进行的,这时的摩擦片,表面形成稳定的摩擦层,摩擦系数由于摩擦层的存在趋于稳定,也有些上升。

1# 和 2# 组分的曲线在 7 组材料中表现最差,呈波动下降趋势,可能是因为增强纤维含量低,材料较软,在制动初始阶段,较软的材料在压力下容易贴紧对偶面,实际接触面积比较大,因此在制动初期摩擦系数比较高,但随着摩擦的进

行，钢纤维含量少的 1# 和 2# 材料结构强度不够，从而导致材料容易剥落，摩擦系数因此不断降低。3# 组分波动比较大，与增强纤维的含量比较低也有关系。4-7# 的摩擦系数曲线比较平稳，说明在低温阶段，钢纤维含量在 18%wt 以上的材料摩擦系数表现比较好，18%wt 以下的材料摩擦系数表现不佳。

第 1 次衰退

第 1 次衰退曲线见图 4-4。7 组材料的衰退曲线的共同点在于，在摩擦曲线和温度曲线中分别存在一个低谷和峰值，而且摩擦系数的低谷与温度的峰值差不多出现在同一个区间。摩擦系数的最低点并不是出现在温度最高值的时候，而是在温度最高值以前就会出现摩擦系数的最低值。

衰退曲线中，温度下降的曲线段至最高点为衰退曲线，而温度逐渐上升的阶段为恢复阶段。为评价摩擦材料的衰退和恢复程度，引入两个无量纲参数 S 和 H，其中 S 用来表征摩擦材料的抗衰退性能，H 用来表征摩擦材料的恢复性能。S 和 H 的评定方法见 4-1 式和 4-2 式。由此可知，S 越大，表示摩擦系数随温度变化小，因此抗衰退性能好，反之则不好；H 大表示恢复阶段，摩擦系数的变化大，恢复性能不好，反之则表示恢复性能好，表 4-1。

$$S = \frac{\mu_{\min}}{\bar{\mu}} \quad 4-1$$

$$H = \frac{\mu_{\max} - \bar{\mu}}{\mu} \quad 4-2$$

其中

μ_{\min} —衰退阶段最低摩擦系数；

$\bar{\mu}$ —第一次磨合阶段测定的稳定摩擦系数；

μ_{\max} —恢复阶段最高摩擦系数。

表 4-1 第 1 次衰退参数

参数	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
$\bar{\mu}$	0.32	0.33	0.31	0.325	0.425	0.435	0.435
μ_{\min}	0.222	0.173	0.236	0.236	0.231	0.102	0.09
μ_{\max}	0.518	0.538	0.528	0.528	0.474	0.544	0.43
S	0.694	0.524	0.761	0.726	0.556	0.234	0.207
H	0.619	0.63	0.703	0.625	0.115	0.251	-0.012

表 4-1 中 1#、3#、4# 的衰退率最小，摩擦系数随温度的不同的变化最小，

其次为 2#、5#，摩擦系数岁温度的不同变化也较小，6#、7# 的衰退率最大，摩擦系数随温度的不同的变化最大。

图 4-4 中，1# 曲线的变化趋势整体上都比较平稳，衰退阶段摩擦系数跳跃不大，也可以看到，1# 材料的温度最高点的数值最小，这也是它在衰退和恢复中表现良好的原因之一，这也说明，1# 组分适合低能刹车的情况，并不适合高能刹车。2# 曲线在衰退阶段表现良好，变化较平稳，但恢复阶段摩擦系数跳跃性很大，这样的材料显然不适合用作刹车材料，因为恢复阶段跳跃性变化的摩擦系数会导致制动噪音的产生，严重的将会导致出现抱死等情况，导致安全事故。3# 曲线和 2# 曲线的情形差不多，在衰退上比 2# 稍微好一点，但也是在恢复阶段出现跳跃性变化，且 1#, 2#, 3# 的恢复曲线高点比衰退曲线高点高很多，过恢复严重。4#, 5# 曲线的衰退都比较大，曲线上表现出来的是衰退阶段数据跳跃性较大，但是，如表 4-1 中所示，他们的摩擦系数最低分别为 0.236 和 0.231，还能满足使用要求，因此，这两组材料虽然衰退系数比较高，但在衰退阶段，它的性能还是不错的。恢复阶段，4# 曲线的跳跃性比较大，过恢复比较严重，5# 曲线的恢复曲线是比较平稳的，基本上没有过恢复。6# 和 7# 的曲线上，温度变化最快，这与摩擦系数最大有一定关系，衰退很严重，虽然恢复情况很好，但这样的材料显然是不适合用作刹车材料的。

第 2 次衰退

表 4-2 第 2 次衰退参数

参数	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
$\bar{\mu}$	0.28	0.35	0.35	0.36	0.45	0.42	0.44
μ_{\min}	0.384	0.41	0.379	0.377	0.327	0.21	0.151
μ_{\max}	0.531	0.541	0.555	0.555	0.483	0.528	0.448
S	-	-	-	-	0.727	0.557	0.343
H	0.896	0.546	0.586	0.573	0.095	0.257	0.023

第 2 次衰退曲线如图 4-5 所示，第 2 次衰退的整体趋势与第 1 次基本相同，但对与 1#、2#、3# 的曲线而言，衰退似乎并没有产生，这是一个假象，因为实验条件的限制，不能使这几种材料的接触面温度进一步升高，因此，曲线中表现的只是在温度比较低的情况下趋势，一旦温度与后面的一样，它们的衰退应该是比较严重的，而即使温度并不高的情况下，这几种材料的变软也非常严重，粘着摩擦所产生的摩擦系数的虚高是一个假象。而且，这几种材料在恢复阶段严重的过恢复，显然不满足材料要求。4# 和 5# 材料的第 2 次衰退曲线与第 1 次

差不多，不过都有所改善，这是因为在进行完一轮实验之后，摩擦表面产生了一层稳定的摩擦层，摩擦层与初始材料的成分结构是有所区别的，摩擦层一般含碳量比较高，有机质含量比较低，因此材料耐高温性能就得到了提高，摩擦性能也随之上升了。6# 和 7# 的衰退有所改善，但仍然偏低。恢复情况与第 1 次衰退差不多。

效能

图 4-6 为实验 7 组材料效能曲线，图 4-7 为效能时，主传动轴转速的情况。

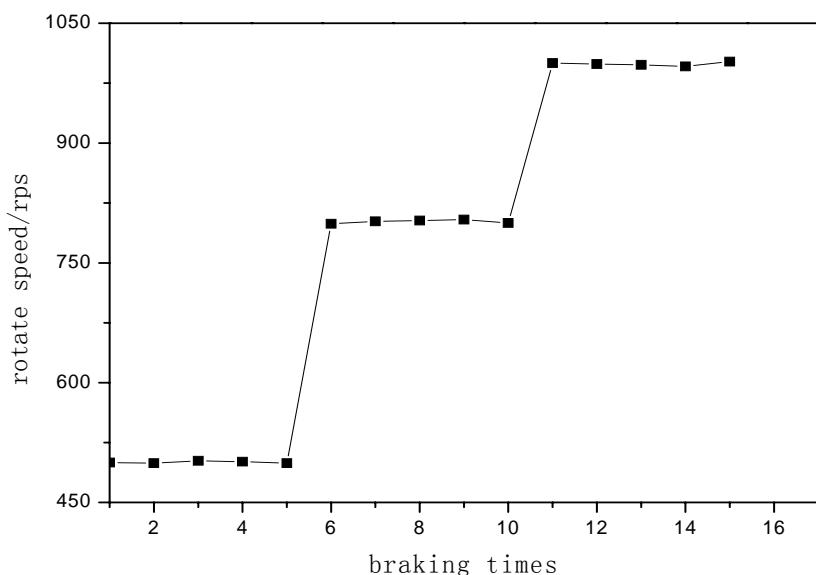


图 4-7 实验设计的传动转速与制动次数的关系

效能时，刹车时的速度成阶梯状变化，同时图 4-6 中，有几组材料的效能曲线也呈阶梯状变化，材料的摩擦系数基本上随制动速度的升高而降低。为了描述方便，在每个速度段取一个具有代表性的点，来表示该速度范围内的摩擦系数情况，见表 4-3。

表 4-3 效能时摩擦系数情况

Rotate speed/rps	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
500	0.355	0.356	0.312	0.327	0.475	0.458	0.476
800	0.265	0.323	0.328	0.335	0.436	0.445	0.416
1000	0.248	0.209	0.277	0.303	0.371	0.346	0.297

由图 4-6 可知，树脂基摩擦材料的摩擦系数随制动速度的变化趋势大致情况为：随着速度的阶梯状上升，摩擦系数呈接替状下降。4#、5#、7# 配方的实验曲

线上，这种趋势尤为明显。其他几个配方的实验曲线阶梯性不明显，其原因应该与实验条件的不稳定有关。

由前面的分析可以知道，摩擦材料的摩擦系数与制动速度成反比，摩擦材料的摩擦系数与速度的关系由下式确定：

$$\mu = \frac{4J(K_1 + K_2)}{vgT\sqrt{WP_m}} \quad 4-3$$

式中 μ 为摩擦系数； W 为正压力； v 为摩擦速度； g 为重力加速度； J 为热功当量系数； P_m 为真正发生摩擦的那些部分的屈服压力； K_1 、 K_2 分别为摩擦片和接触面的导热系数。

4.1.2 综合分析及讨论

图 4-8、图 4-9、图 4-10 分别表示 7 组配方的硬度、冲击强度、磨损率对比情况。其中材料的硬度、冲击强度按 3.3.3 所描述的仪器和方法测得。

由图 4-8 可以看出，材料的硬度基本上随着钢纤维含量的增多而增大，这是因为钢纤维本身的硬度比较高，作为纤维加入到材料中，有强化作用。

由图 4-9 可以看出，材料的冲击强度随着钢纤维含量的增多先升后降，最高点在纤维含量为 22%wt 的时候。钢纤维含量低时，材料冲击强度低，这是由于钢纤维的含量不足以在材料中形成增强网络。而钢纤维含量过高时，材料中的粘结相对就较少，粘结相不足以粘结全部的钢纤维，多余的钢纤维就会破坏增强网络，因此冲击强度也较低，只有钢纤维含量适中时，钢纤维刚好能在材料基体中形成较好的增强网络，此时材料的冲击强度就会提高。

由图 4-10 可以看出，材料的磨损率与材料的强度正好呈相反的变化趋势。

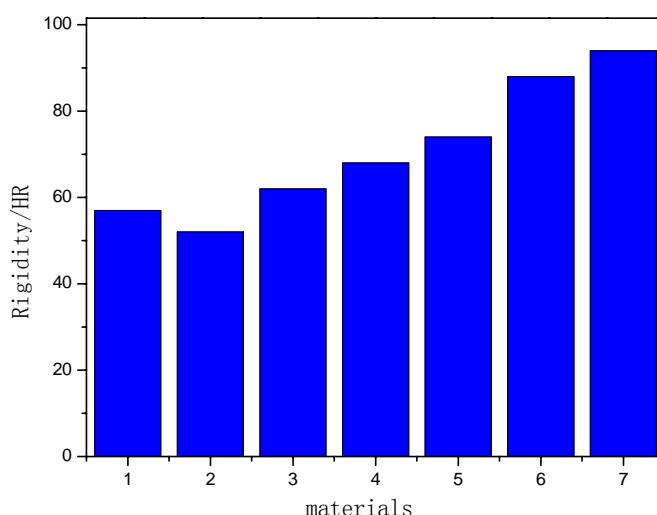


图 4-8 7 种材料的硬度

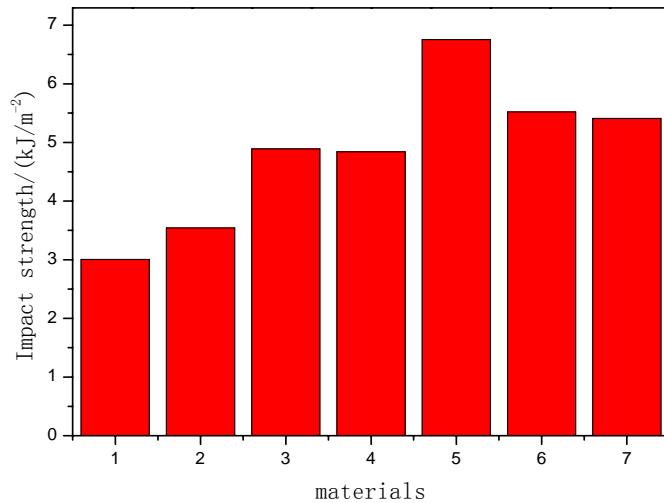


图 4-9 7 种材料的冲击强度

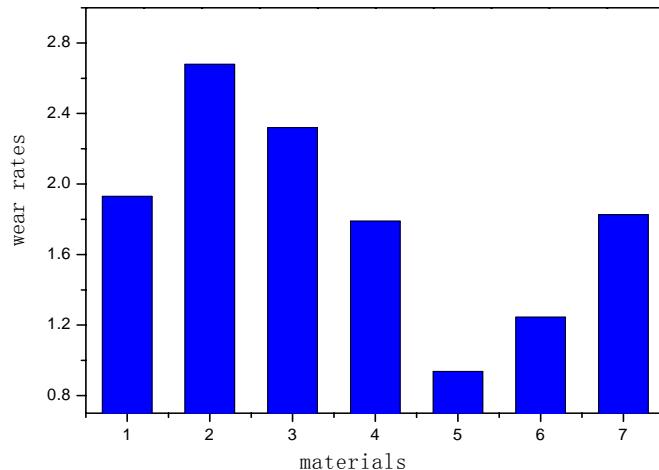


图 4-10 7 种材料的磨损率

综合前面的分析，对摩擦材料的各项性能进行评价。由图 4-2 至图 4-6，表 4-1 至表 4-3，图 4-10 可以考察摩擦材料的稳定摩擦系数、衰退率、恢复性能、速度相关性、磨损率等性能。稳定摩擦系数主要由图中第 1 次磨合的摩擦系数来评价，其数值应该在 0.3-0.4 左右，且在磨合稳定后波动不大。

树脂基摩擦材料的各项性能中，最重要的是摩擦材料的衰退情况，摩擦材料的衰退性能一般用衰退率来表示，衰退率由 4-4 式确定，实验中各种材料的衰退率见图 4-11。

$$\nu = \frac{\bar{\mu} - \mu_{\min}}{\bar{\mu}} = (1 - S) \cdot 100\% \quad 4-4$$

速度相关性由表 4-3 和图 4-6 可以比较出来，速度相关性好的材料，随着速度的变化摩擦系数变化应该不大。

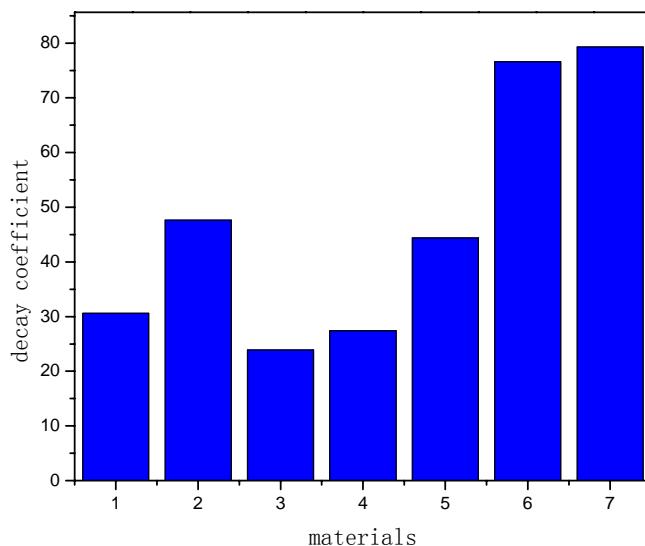


图 4-11 7 种材料的衰退率

4.1.3 小结

1. 树脂基摩擦材料的低温稳定摩擦系数随钢纤维的含量增加呈升高趋势。
2. 通过对树脂基摩擦材料的稳定摩擦系数、衰退率、恢复性能、速度相关性、磨损率、硬度、冲击强度进行了研究，综合性能分析发现，在树脂基摩擦材料中，钢纤维含量为 18% 和 22% 两组组分的整体性能最好，18% 以下和 22% 以上的各组组分的整体性能比较差。
3. 各组组分的抗冲击强度都在 3kJ/m^2 (图4-9)以下，完全符合 GB5783-86。硬度也都在 90 以下，可确保制动时与偶件紧密贴合，从而基本实现“软制动”，降低了制动噪音并减轻偶件损伤。

4.2 酚醛树脂含量对树脂基摩擦材料性能的影响

热固性酚醛树脂是树脂基摩擦材料的主流粘结剂，也是树脂基摩擦材料的主粘结相。热固性酚醛树脂的耐热性能较好，在第 2 章中也作了差热分析研究。但是纯酚醛树脂做为粘结剂，而不做增韧改性，会导致制造出来的摩擦材料硬度过高，容易伤对偶盘和产生噪音。因此，本工作中所提到的酚醛树脂都是硼改性酚醛树脂和丁腈橡胶以 3: 1 的比例共混的混合物。

酚醛树脂作为摩擦材料中的有机组分，耐热性能虽然不错，但是，随着对摩

擦材料性能的不断提高，控制其用量，以提高材料的耐热性能，是很有必要的。材料配方如表 3-1 所示 8-12# 配方。

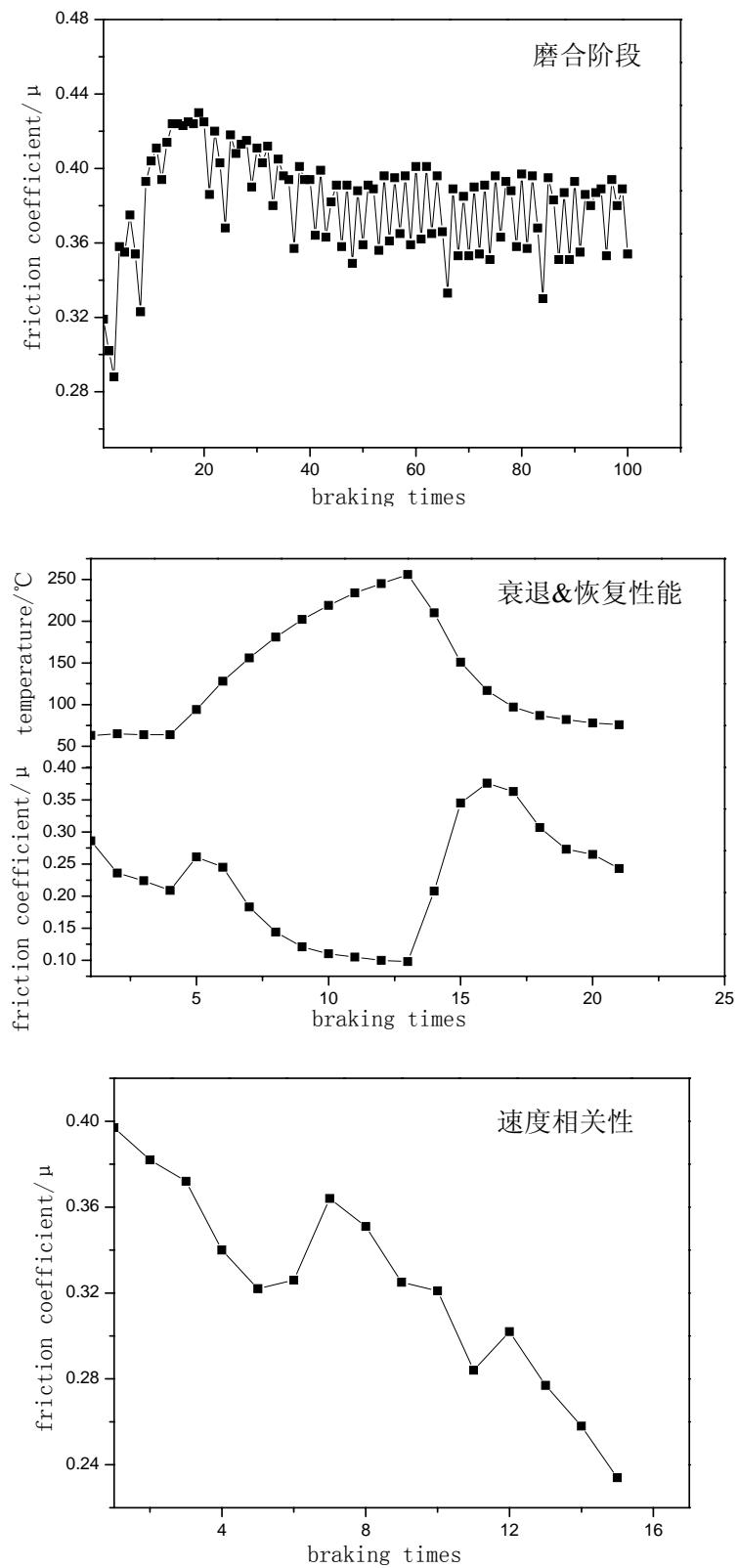


图 4-12 8#配方 3 个阶段的摩擦性能曲线

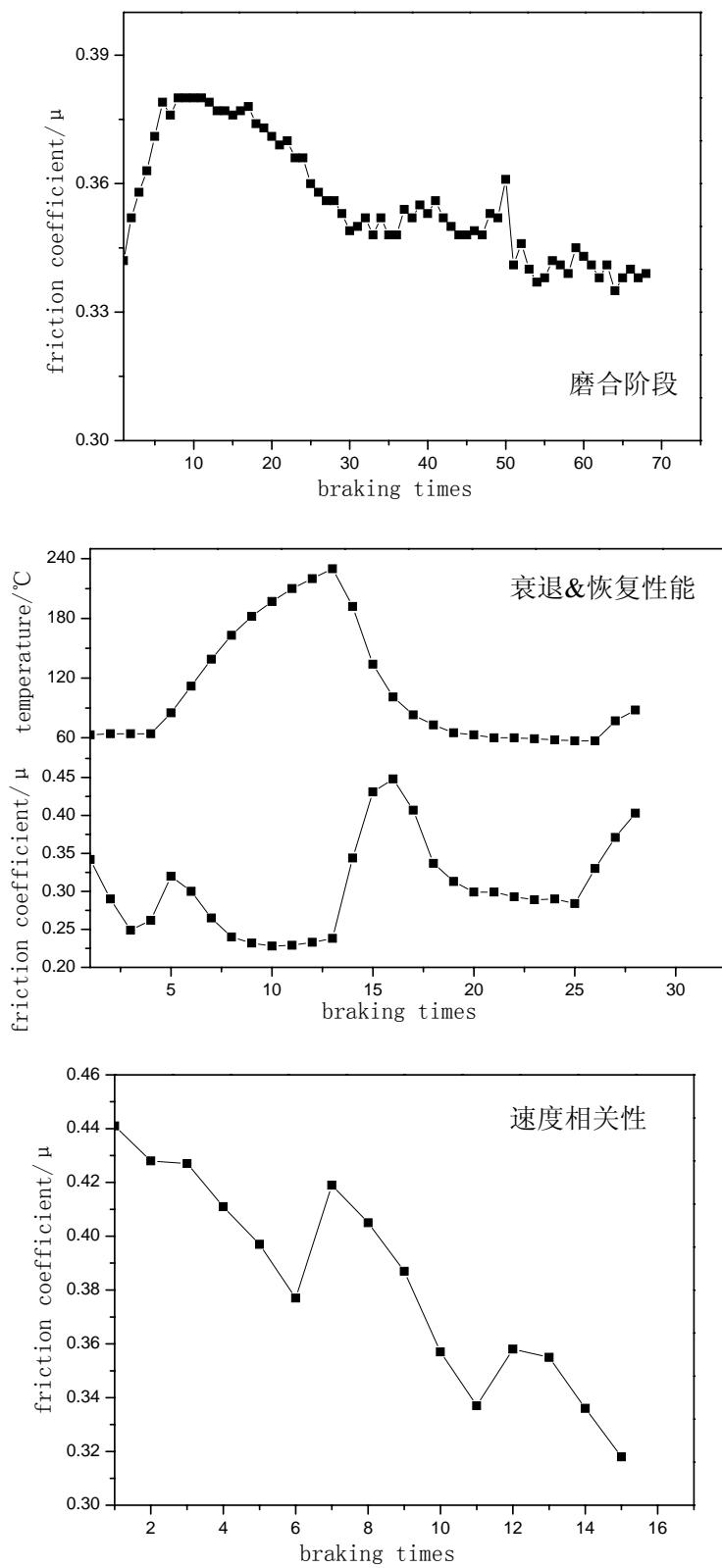


图 4-13 9#配方 3 个阶段的摩擦性能曲线

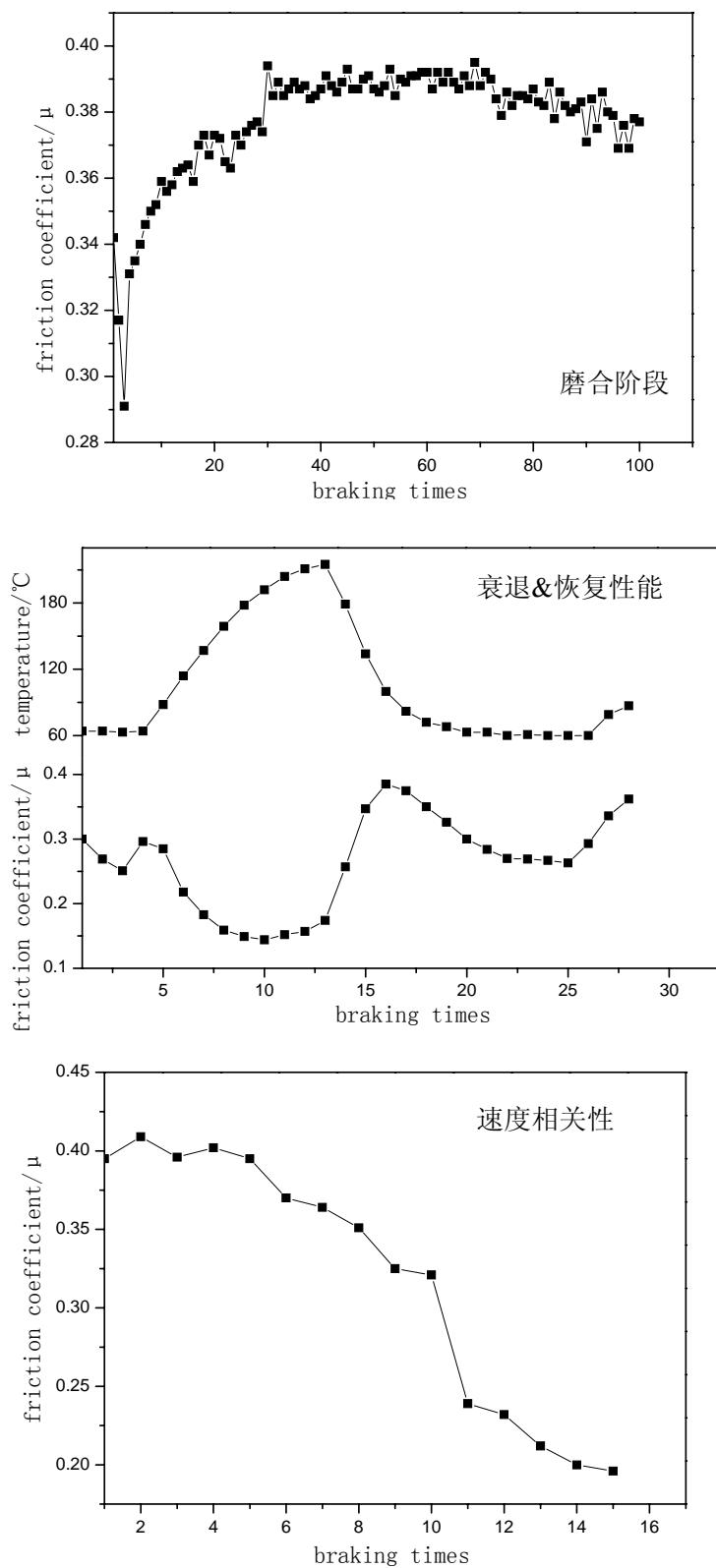


图 4-14 10#配方 3 个阶段的摩擦性能曲线

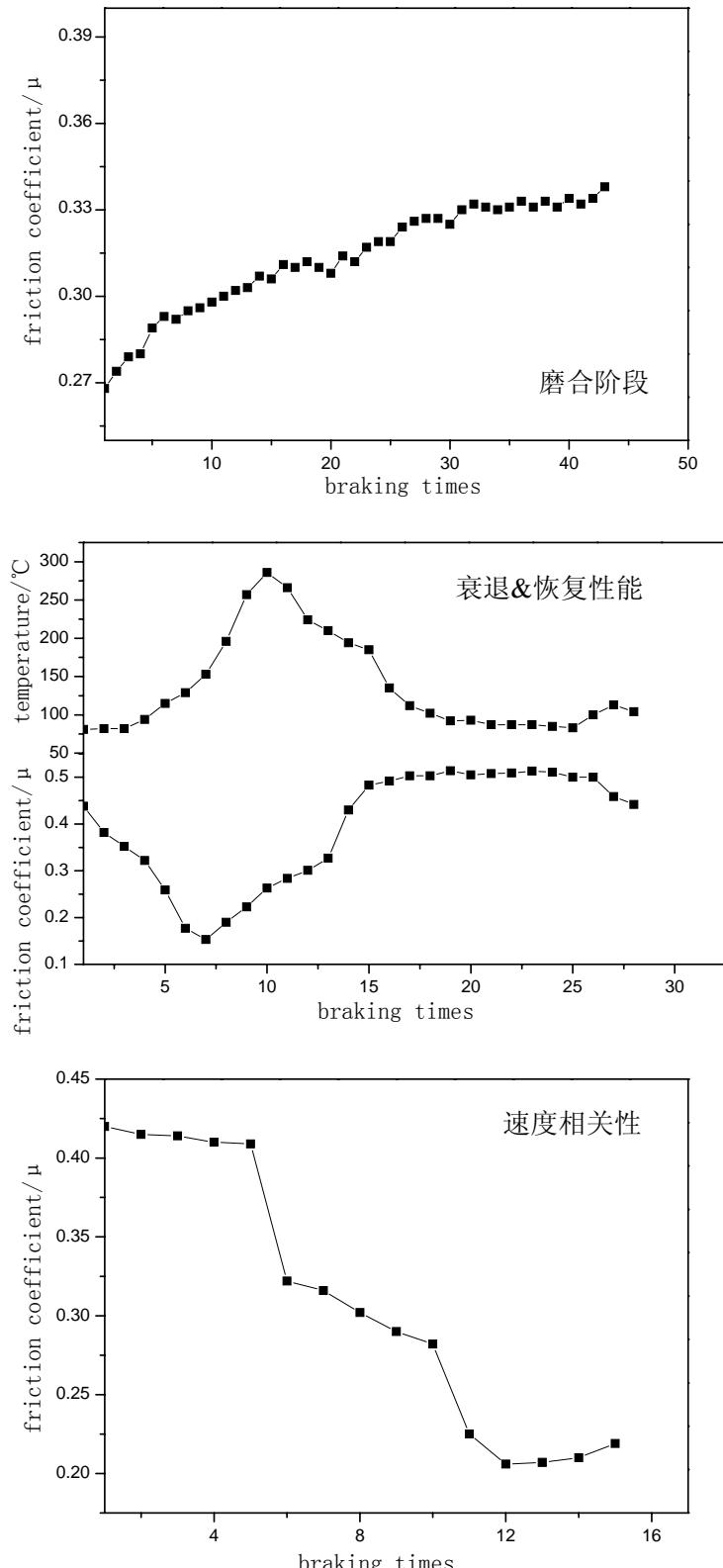


图 4-15 11#配方 3 个阶段的摩擦性能曲线

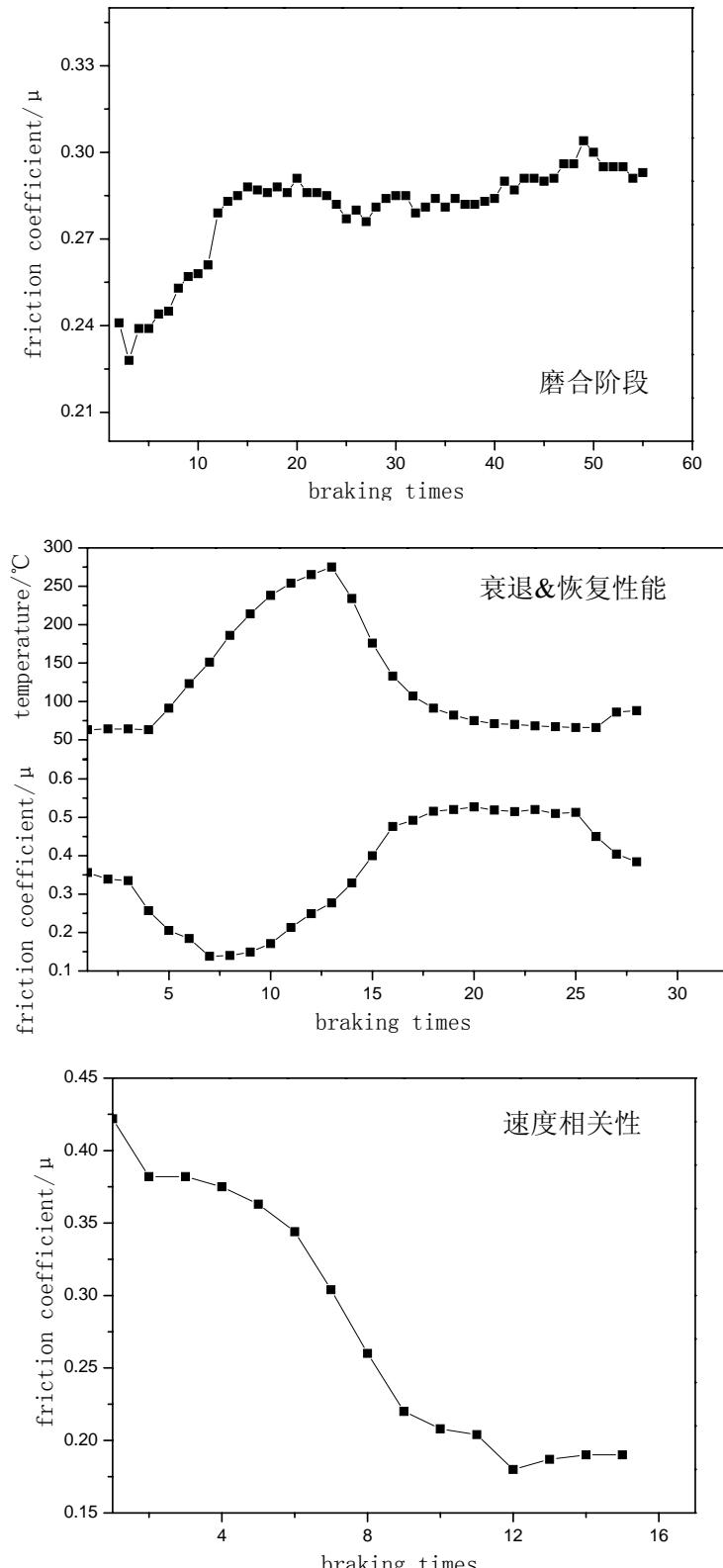


图 4-16 12#配方 3 个阶段的摩擦性能曲线

4.2.1 实验数据及其分析

图 4-12 是 8#配方的台架实验曲线。从磨合曲线可以看出，8#配方的整体摩擦系数都在 0.4 以上，摩擦系数波动较大。这是由于，粘结剂百分比较少，而增强材料和其他填料的百分含量就相对较高，因此，摩擦系数比较高。而由于粘结剂含量少，摩擦材料在摩擦过程中，会出现脱层、磨损比较大等现象。同时由于粘结剂强度不够，在摩擦过程中，表面摩擦层的形成也不稳定，因此摩擦系数波动较大。8# 配方的衰退比较严重，可能与摩擦层不能稳定的形成，摩擦面脱粘严重有关。速度相关性方面，8#配方的性能也表现比较差，在速度由 500rps-800rps-1000rps 的变化过程中，速度变化比较大，由 0.4 左右下降到 0.2 左右，同时在速度变化的过程中，摩擦系数的波动性再次有所表现。

图 4-13 是 9#配方的台架实验曲线。从磨合曲线可以看出，9#配方的整体摩擦系数都在 0.36 左右，摩擦系数随着摩擦过程的进行逐渐上升。9# 配方的衰退比较好，衰退阶段最低摩擦系数在 0.25 左右，但是恢复时有较为严重的过恢复。速度相关性方面，9#配方的性能也表现比较出色，在速度由 500rps-800rps-1000rps 的变化过程中，速度变化不大，由 0.4 左右下降到 0.32 左右。

图 4-14 是 10#配方的台架实验曲线。从磨合曲线可以看出，10#配方的整体摩擦系数比 9#略低，在 0.4 以下，摩擦系数也是随摩擦的进行逐渐上升，没有明显波动。但是 10#配方的衰退比较严重，最低摩擦系数在 0.15 左右，但是恢复性能比 9#配方有所改进。速度相关性也不好，速度由 500rps-800rps-1000rps 的变化过程中，摩擦系数由 0.4 左右下降到 0.2 左右。

图 4-15 是 11#配方的台架实验曲线。从磨合曲线可以看出，11#配方的整体摩擦系数在 0.32 左右，摩擦系数随摩擦的进行逐渐上升，上升比较平稳。同时衰退比较严重，最低摩擦系数在 0.15 左右。速度相关性方面表现也不好，速度由 500rps-800rps-1000rps 的变化过程中，摩擦系数由 0.4 左右下降到 0.2 左右。

图 4-16 是 12#配方的台架实验曲线。从磨合曲线上来看，它是各组材料中摩擦系数最低的，摩擦系数在 0.3 以下。衰退比较严重，最低摩擦系数为 0.1 左右，有微弱的过恢复现象。速度相关性比较差，速度由 500rps-800rps-1000rps 的变化过程中，摩擦系数由 0.4 左右下降到 0.2 左右。

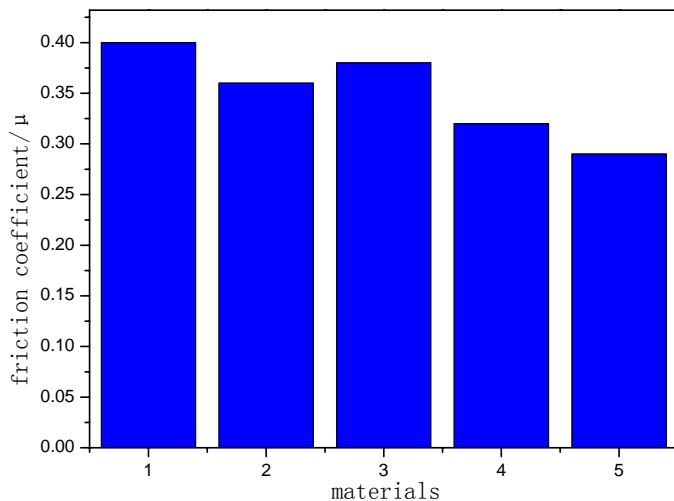


图 4-17 5 组配方的摩擦系数对比

5 组配方的摩擦系数基本上随着酚醛树脂含量的升高而降低（图 4-16）。

4.3 树脂基摩擦材料摩擦磨损机理

4.3.1 原始粉末与初始摩擦面

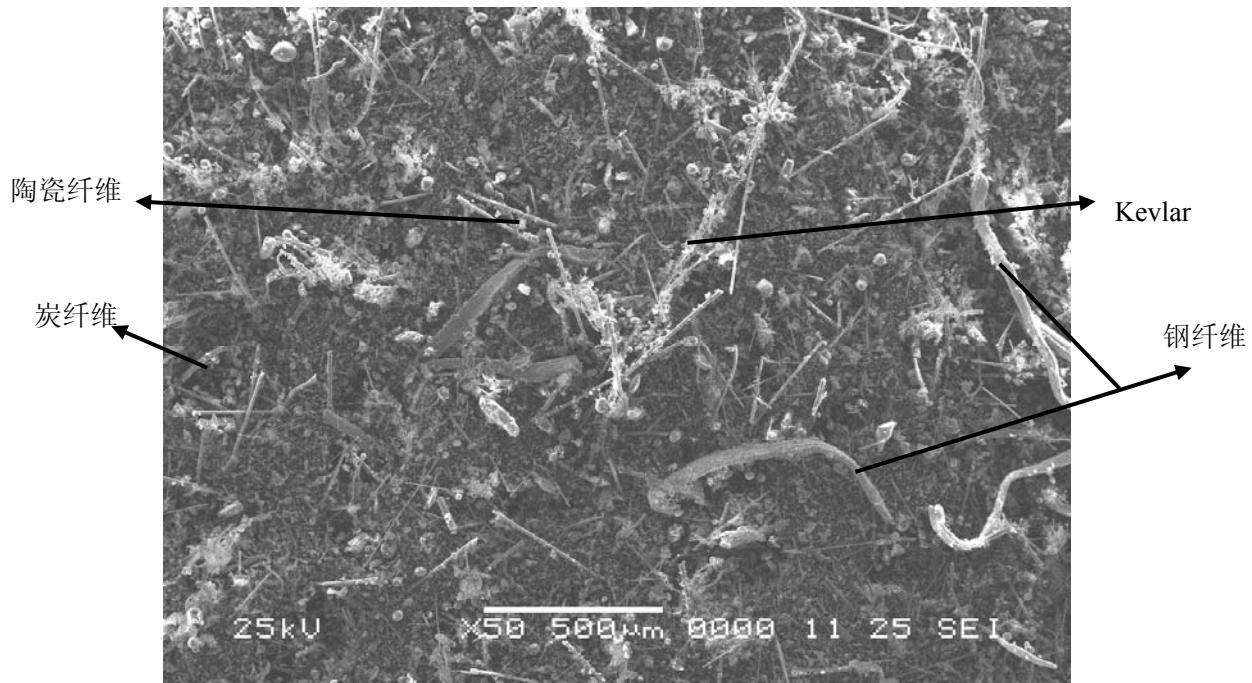


图 4-18 混制粉末的扫描电镜形貌

图 4-18 为混好的树脂基摩擦材料粉末的 50 倍扫描电镜图象，图中可以很清晰的看到钢纤维、炭纤维、陶瓷纤维、Kevlar 等增强材料，从图中可以看出，通

过混料，摩擦材料各种成分分散均匀，Kevlar 长纤维在混料过程中，被混料刀切断，Kevlar、陶瓷纤维等易成团的纤维材料在合理的混料工艺下，分散得比较均匀，为压制做好了充分的准备。

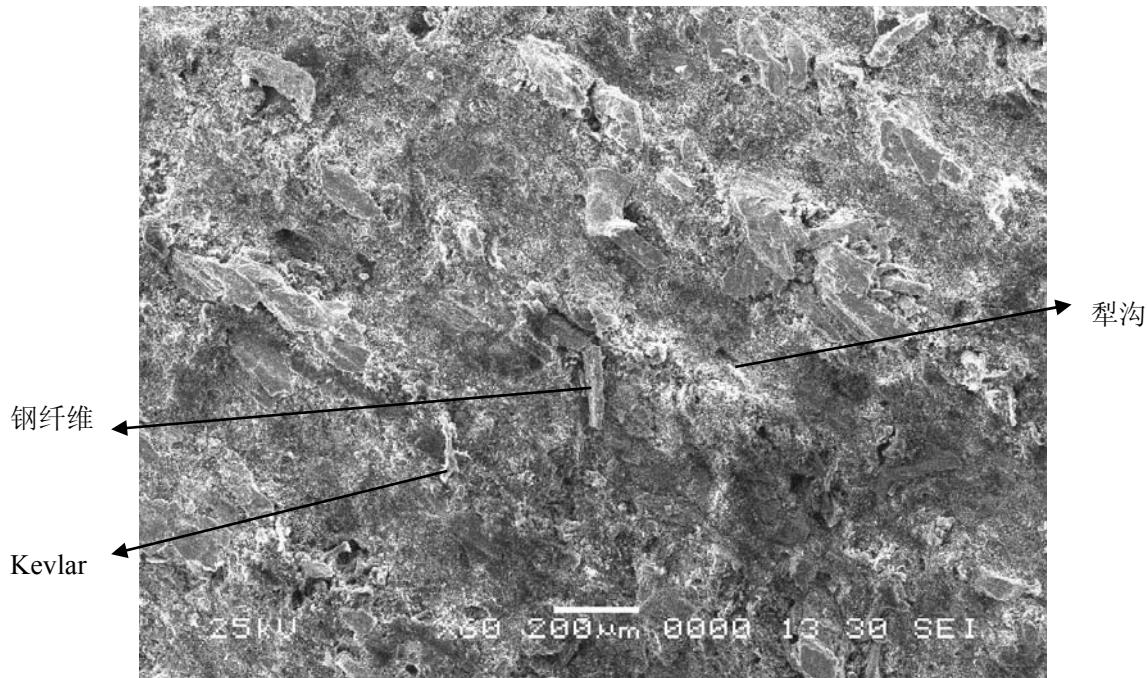


图 4-19 摩擦初始面形貌

图 4-19 所示式样是树脂基摩擦材料压制成型并通过表面磨削之后的表面面貌。在压制成型的摩擦材料表面，依然可以找到钢纤维、Kevlar 等增强材料。摩擦初始表面还有机加工留下的机械加工犁沟，这里的犁沟与后面讲到的磨损犁沟是不同的，犁沟宽度在 $100 \mu\text{m}$ 以上。摩擦初始面表面犁沟等宏观粗糙度的存在，在摩擦初始阶段，对摩擦系数有影响，在摩擦材料摩擦过程初期，摩擦系数之所以比较小，是因为对磨面处在一个点接触状态。随着摩擦的进行，这些宏观粗糙度被慢慢消除，取而代之的是磨粒、粘着、细观或微观犁沟等现象。

4.3.2 树脂基摩擦材料不同摩擦状态后的表面形貌

图 4-20 为两组不同配方的摩擦材料在经历不同的摩擦温度后的表面形貌扫描电镜图。图中深色部分表示该位置表面比周围区域低。a 试样和 b 试样具有相似的变化规律。在温度为 120°C 时，a 和 b 表面都比较光滑，摩擦表面可以明显的看到摩擦转移膜的形成，而且此时摩擦转移膜比较完整。高倍扫描电镜图象(图 4-21)显示，在摩擦转移膜上，吸附着很多微小的摩擦材料颗粒，这些颗粒在摩擦材料表面起到增摩或减摩的作用。且随着摩擦过程的进行，分布在摩擦材料表

面的微小颗粒不断的更新。这就是所谓的磨粒磨损。可以看出，在120℃时，树脂基摩擦材料的磨损以磨粒磨损为主，辅以少部分的粘着磨损以及犁沟磨损，而犁沟磨损又是磨粒产生的一个重要途径。

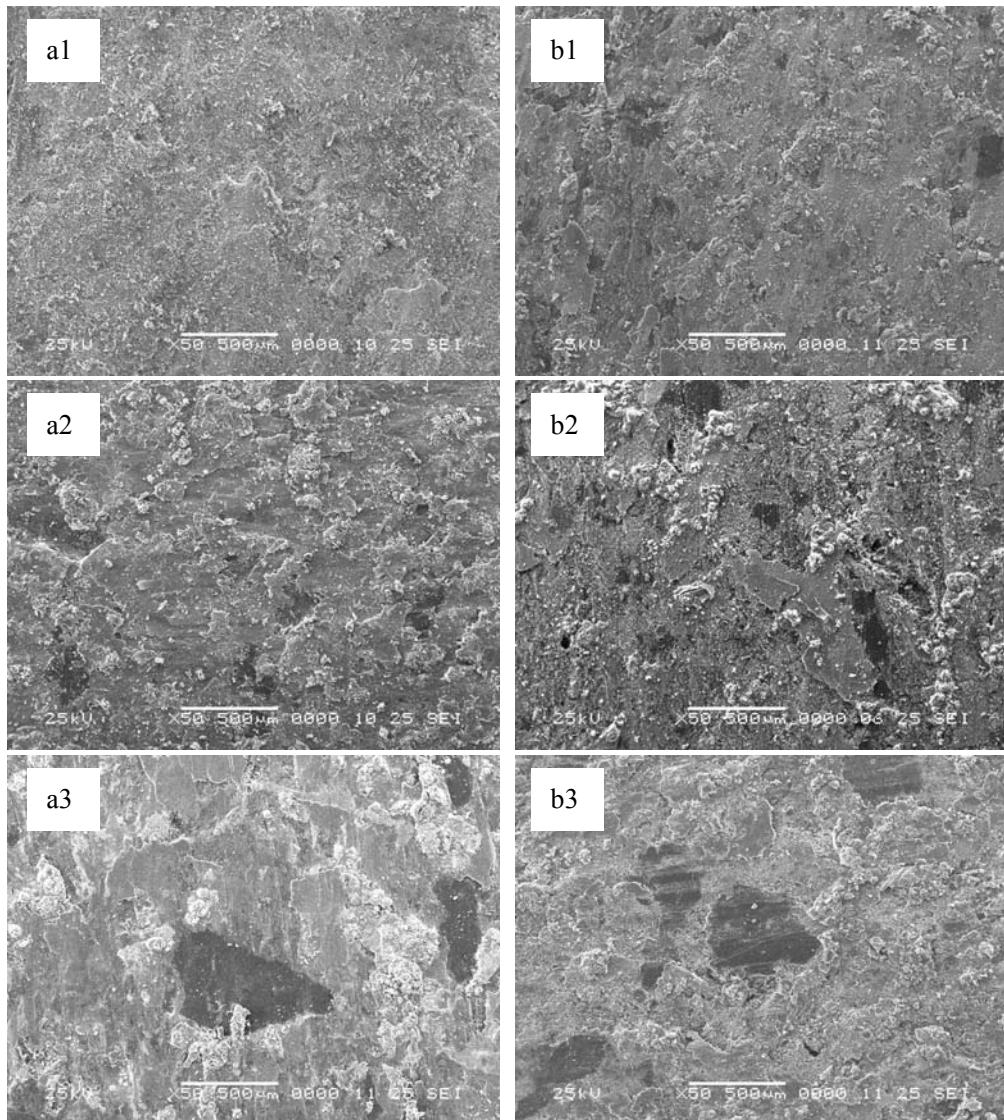


图4-20 两种配方的摩擦材料在不同温度磨合后表面形貌，其中a1-钢纤维含量20%，温度120℃，b1-钢纤维含量10%，温度120℃；a2-钢纤维含量20%，温度250℃，b2-钢纤维含量10%，温度250℃；a3-钢纤维含量20%，温度420℃，b3-钢纤维含量10%，温度420℃。

温度为250℃和420℃时，a和b的摩擦表面开始出现一些明显的低凹区域，而且是随着温度的升高，低凹区域的比面积上升。通过观察低凹区域的高倍放大图象(图4-22)，可以看出，低凹的区域一般都有微小的犁沟存在，这说明，这些低凹的区域是对偶面表面上的突出质点刮擦造成的。树脂基摩擦材料含丁腈橡胶等有机材料，所以材料随温度上升变软比金属材料变软严重，特别是由于混制工艺的限制，混料不可能彻底均匀，因此，在那些有机材料含量多的区域，变软尤

为严重，由此造成了摩擦材料在与对偶件摩擦的过程中，出现较大面积的凹陷。

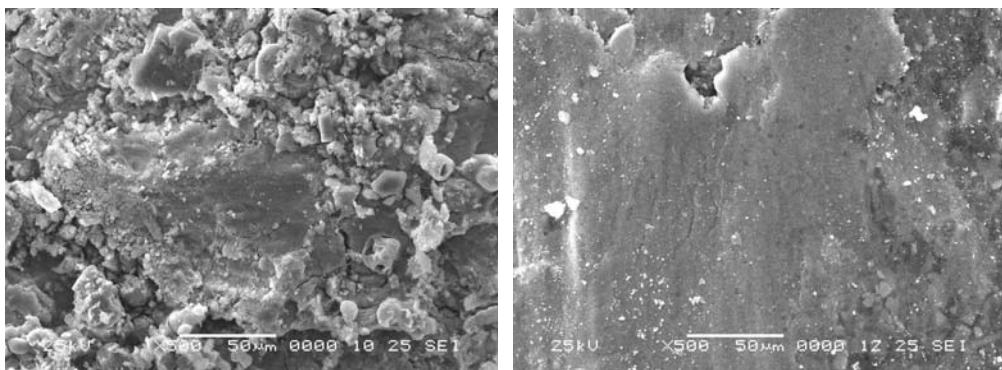


图 4-21 摩擦转移膜与磨粒

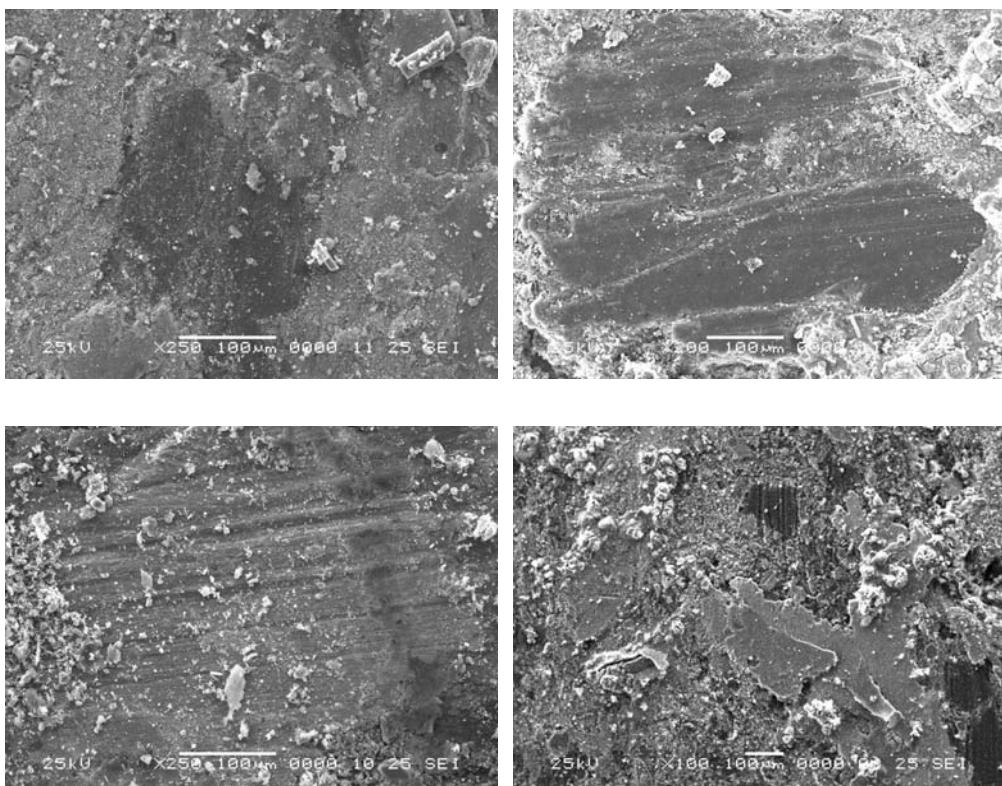


图 4-22 摩擦过程中产生的犁沟

图 4-23 为服役后摩擦材料纵剖面的扫描电镜图象，从图中可以看出，摩擦材料从表面到材料内部有明显的分层现象，在摩擦材料表面，随着摩擦作用和温度场的不断影响，摩擦材料成分和性质发生变化，从而形成一层 $500 \mu\text{m}$ 左右的摩擦作用影响层，内层由于受温度影响不大，材料保持不变。



图 4-23 服役后摩擦材料纵剖面扫描电镜图象

4.4 本章小结

综合以上分析，可以得出以下结论：

1. 低温状态下，整体摩擦系数基本上随酚醛树脂含量的增加而降低。
2. 酚醛树脂含量过低的配方，低温摩擦系数比较高，但是衰退严重。
3. 酚醛树脂含量过高的配方，整体摩擦系数比较低，同时，由于有机成分过多，衰退也较为严重。
4. 实验表明，钢纤维质量百分含量为 18~22%，酚醛树脂百分含量为 10-12%时，摩擦性能较好，摩擦系数为 0.425 左右，衰退率为 30%左右。
5. 对摩擦材料摩擦磨损机理进行研究，分析认为，摩擦面温度较低时，磨粒以及犁沟摩擦磨损占主导作用；摩擦面温度较高时，粘着摩擦磨损占主导作用。

第5章 基于神经网络的树脂基摩擦材料摩擦系数的预测模型

树脂基摩擦材料具有价格便宜，原材料来源广泛，摩擦性能好等优点，在汽车刹车片中一直应用广泛。近年来，由于我国汽车工业的迅速发展，对树脂基摩擦材料的需求量在不断提高^[4]，对其性能也提出了更高的要求，摩擦系数作为摩擦材料性能的一个重要指标，在摩擦材料研究工作中一直受到重视，树脂基摩擦材料成分对摩擦系数起决定性作用。目前，树脂基摩擦材料的研究主要通过“试错法”，依靠个人经验以及大量实验，造成了大量的资源和人力的浪费。

树脂基摩擦材料多种成分混合使用，它们相互影响，相互制约，呈现高度的非线性关系，使用常规的数学方法很难为其建立一个完整精确的数学模型，而神经网络是解决这一问题的有效方法。人工神经网络（ANN）是一种模拟脑神经对外部环境进行学习过程建立起来的一种人工智能模式识别方法，具有自学习、自组织、自适应及很强的非线性函数逼近能力和容错能力，特别适用于研究非线性系统特性。

本工作通过收集30组（表5-1）不同组分的摩擦材料的在100℃时的摩擦系数最小值与最大值，利用神经网络建立树脂基摩擦材料成分与摩擦系数的预测模型，系统研究了摩擦材料成分与摩擦系数之间的关系，为树脂基摩擦材料的成分设计探索了一条新路。

5.1 实验方法

5.1.1 实验工艺

树脂基摩擦材料通常由十几种成分构成，收集到的数据中用到的成分有14种，设计4组成分不同的树脂基摩擦材料，实验材料成分如表5-1所示。

将成分为表5-2所示的几组材料分别用立式V型混料机混合10分钟，将混好的料放入通风良好的干燥箱处理1小时，然后在170℃和10MPa下热压成型，再经160~220℃热处理8 h即制得待测样品。

5.1.2 实验检测

摩擦性能采用惯性台架实验机测量，实验过程执行JASC C406标准，实验数据由计算机控制系统收集。制动压力：3MPa，制动次数：40次。

表 5-1 30 组成分表

编号	酚 膏 树 脂	醛	钢 纤 维	铜 纤 维	芳 纤 维	伦 纤 维	陶 瓷 纤 维	石 墓	硫 化 锑	硫 矿	铁 氧 化 铝	其 他 填 料
1	6.5	20	3	0	6	5	8	7	2	42.5		
2	8	18	3	2	6	5	5	8	1	44		
3	8	21	3	2	6	5	5	8	1	41		
4	8	21	3	2	6	5	5	8	1	41		
5	7	23	3	2	6	5	5	8	1	40		
6	7.5	23	3	2	7	5	5	8	1	38.5		
7	7.3	20	3	2	7	6	6	8	1	39.7		
8	10	25	4	3	7	5	5	8	1	32		
9	9	20	4	3	7	4	4	7	0	42		
10	9	15	4	3	7	5	0	8	0	49		
11	7	20	4	3	7	7	6	8	1	37		
12	7	20	4	3	10	7	6	8	1	34		
13	7	23	4	3	10	10	6	7	1	29		
14	7	21	2	3	13	8	5	6	1	34		
15	7	24	0	3	14	6	7	6	0	33		
16	7	22	0	2	7	7	10	6	2	37		
17	7	22	0	2	7	6	10	6	2	38		
18	6.5	22	0	2	6	7	8	7	2	39.5		
19	6.5	22	0	3	7	6	10	6	2	37.5		
20	6.5	23	0	2	7	8	8	6	2	37.5		
21	6.5	20	3	0	6	5	8	7	2	42.5		
22	9	25	2	2	6	5	6	8	2	35		

23	7	20	3	2	9	10	5	8	1	35
24	7	22	4	0	9	10	5	8	1	34
25	7	22	4	3	8	10	7	6	2	31
26	7	20	3	3	7	7	7	7	1	38
27	7	20	3	3	7	10	8	7	2	33
28	6.5	23	3	2	7	8	8	10	1	31.5
29	6.5	20	3	0	7	7	6	7	1	42.5
30	6.5	30	3	2	8	8	6	6	2	28.5

表 5-2 4 组摩擦材料成分

Materials	1	2	3	4
PF resins	12	10	14	10
Steel fiber	25	15	18	22
Copper fiber	3	5	2	3
Kevlar	2	5	3	3
Ceramic fiber	8	15	12	8
Graphite	7	10	10	7
Sb ₂ S ₃	3	5	5	3
Pyrites	8	8	5	7
Al ₂ O ₃	4	2	2	3
Baryte	12	12	12	16
Organic filler	16	13	17	17

5.2 神经网络模型

5.2.1 人工神经网络的建立

人工神经网络是模拟动物神经系统工作原理的基础上发展起来的，由很多个神经元广泛互连而成的网络。误差反向传播BP网络是目前使用最广的网络模型之一。BP神经网络对每个神经元的输入进行加权求和，对和进行阈值处理，工作原理如图5-1所示。通过样本数据对网络进行训练和学习，不断调节其权值和阈值，从而正确的反应输入和输出的映射关系。通过训练的神经网络模型，可以用来预测给出的输入所对应的输出值。

各层数据的传递函数一般为(0, 1) S型函数

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5-1)$$

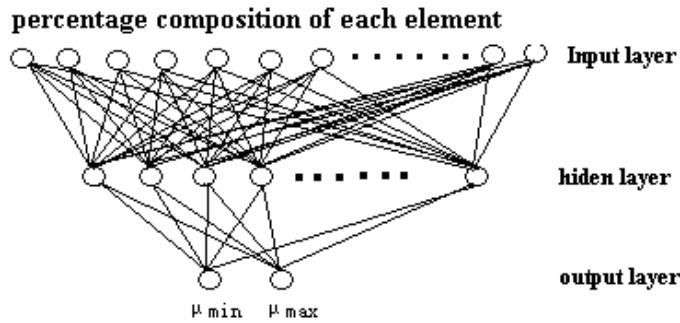


图 5-1 人工神经网络示意图

误差采用均方误差(MSE)

$$E_p = \frac{\sum_i (t_i - O_i)^2}{2} \quad (5-2)$$

其中 t_i 为网络实际输出, O_i 为期望输出。

隐节点的输出

$$y_i = f(\sum_j w_{ij} - \theta_i) \quad (5-3)$$

其中 w_{ij} 为隐层网络权值, θ_i 为网络阈值, 隐节点的 y_i 通过传递函数传递到输出节点, 具体函数关系与网络类型有关。

输出节点的输出

$$O_l = f(\sum_i T_{li} y_i - \theta_l) \quad (5-4)$$

其中 T_{li} 为输出层网络权值, θ_l 为网络阈值, O_l 为对应输出值, 在本工作中对应的是 μ_{\min} 和 μ_{\max} 。

网络训练, 权值和阈值不断调整, 直到达到最大设定训练步数或误差达到设定值。权值和阈值的迭代公式分别为(5)式和(6)式。误差由(2)式所示的均方误差函数(MSE)控制。

$$w_{li}(k+1) = w_{li}(k) + \eta \delta_l y_i \quad (5-5)$$

其中 η 为正比系数, 与训练函数有关, δ_l 为误差函数。

$$\theta_l(k+1) = \theta_l(k) + \eta \delta_l^* \quad (5-6)$$

人工神经网络模型用Matlab语言程序实现, 传递函数采用tansig, 训练函数采用批梯度下降训练函数(traingd)。

5.2.2 主程序的设计

```
%训练程序设计
%.....定义参数变量, 创建数据库;
```

```
%Ptr.m……………输入参数 M 文档， 输入参数为各配方材料体积百分比；  
%Ttr.m……………输出参数文档， 输出参数为各性能指标；  
%矩阵 P……………定义为输入参数矩阵， 调用列向量；  
%矩阵 T……………定义为输出参数矩阵， 调用行向量；  
%尝试采用 BP 网络结构为[15,5]；  
clf;  
clear all;  
echo on; %初始化 M 工作区间，并打开程序显示；  
keyboard; %P,T 导入区  
pause;  
[R,Q]=size(P); %P,T 的行数是相同的；  
for i=1:1:Q;  
    Ps=(:,i);Ts(:,i); %取 P,T 的列向量；  
    t(i)=cputime  
    net=newff(minmax(P),[15,5],{'tansig','purelin'},'traingd');  
    % 创建两层前向型 BP 网络；  
    net.trainParam.show=100; %每 500 次显示一次结果；  
    net.trainParam.lr=0.5; %学习步长；  
    net.trainParam.epochs=5000; %最大循环数；  
    net.trainParam.goal=0.1; %初始化误差值；  
    [net,tr]=train(net,Ps,Ts); %训练网络；  
    Y=sin(net,Ps); %计算输出结果；  
    t=cputime-time(i-1); %计算程序运行一个循环的时间；  
    X=1:0.5:20;n=1:1:5;  
    if i=5*n;  
        plot(X,tr,'+'); %绘制误差曲线；  
        hold on;  
        plot(X,Y); %绘制输入输出曲线；  
        hold off;  
    end  
    echo off  
    Ptm=[]; %网络训练， 测试数据的输入；  
    Ttm==sim(net,Ptm); %检验网络训练效果；  
    Prg=[]; %平均误差在 2% 以内时进行网络预测；  
    Trg=sim(net,Prg); %网络预测。  
    Trg=  
    clear all  
    load Ttr  
    load Ptr  
    [Pn,minP,maxP,Tn,minT,maxT]=premnmx(P,T);  
    net=newff(minmax(Pn),[19,1],{'tansig','purelin'},'traingdx');  
    net.trainParam.show=500;  
    net.trainParam.lr=0.5;  
    net.trainParam.epochs=5000;
```

```

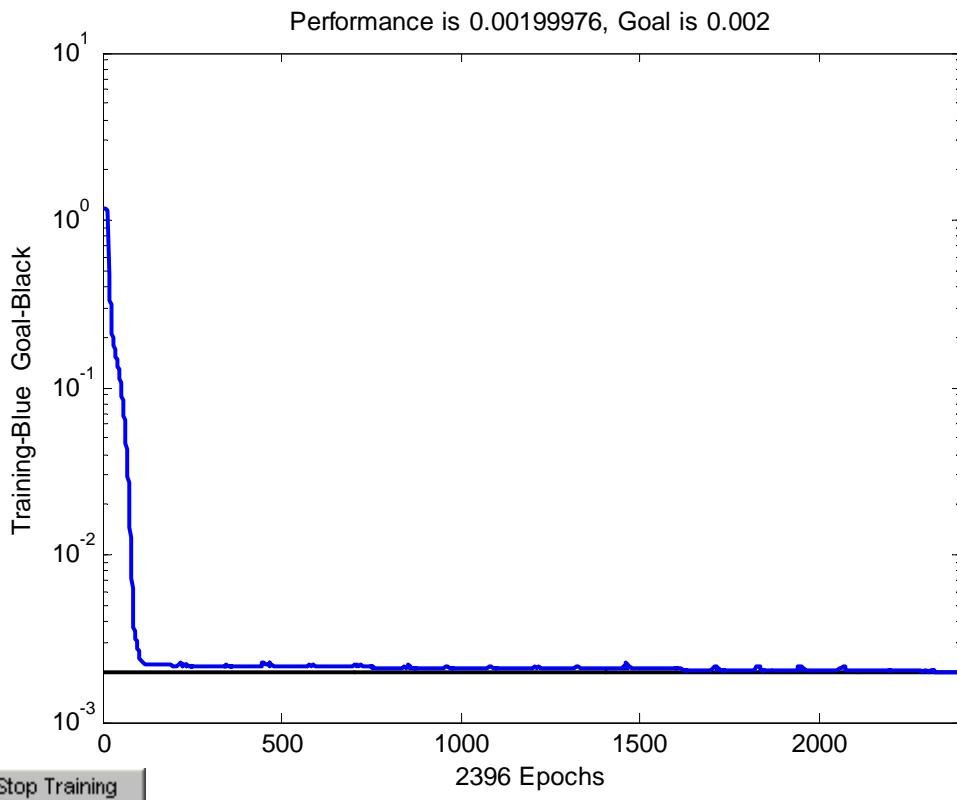
net.trainParam.goal=1e-5;
[net,tr]=train(net,Pn,Tn);
Y=sim(net,Pn);
T_reform=postmnmx(Y,minT,maxT);

```

5.2.3 预测结果

取收集的 30 组摩擦材料组分与摩擦系数数据作为训练样本，对网络进行训练。通过训练，网络不断调整其权值和阈值矩阵，一般训练样本的数量应大于输入样本和输出样本的乘积。神经网络模型是一个非线性逼近模型，完成一次训练的过程中，为了达到预期的误差设定值，网络采用所提供的训练函数，对权值和阈值进行不断的调整，直到达到设定误差，训练过程结束。

本工作中所采用的训练函数为 `traingdx`，该函数的显著特点是训练误差呈梯度下降，图 5-2 是一次成功的训练误差曲线，从曲线上可以看出，训练初始阶段误差收敛很快，而当误差收敛到一个较小的范围内时，误差传递变慢，严重的会陷入局部最小值而不继续收敛(图 5-3)。这既是梯度下降法的特点，同时也是这一训练方法的缺点，为避免训练步数过多，影响训练时间和训练效果，对输入数据进行归一化处理，通过 Matlab 中 `premnmx` 函数，对输入数据和目标数据映射到(-1, 1)区间内。对预测结果，采用 `postmnmx` 函数，将其映射为实际数据。



```
net=newff(minmax(P),[6,4],{'tansig','purelin'},'traingdx');
```

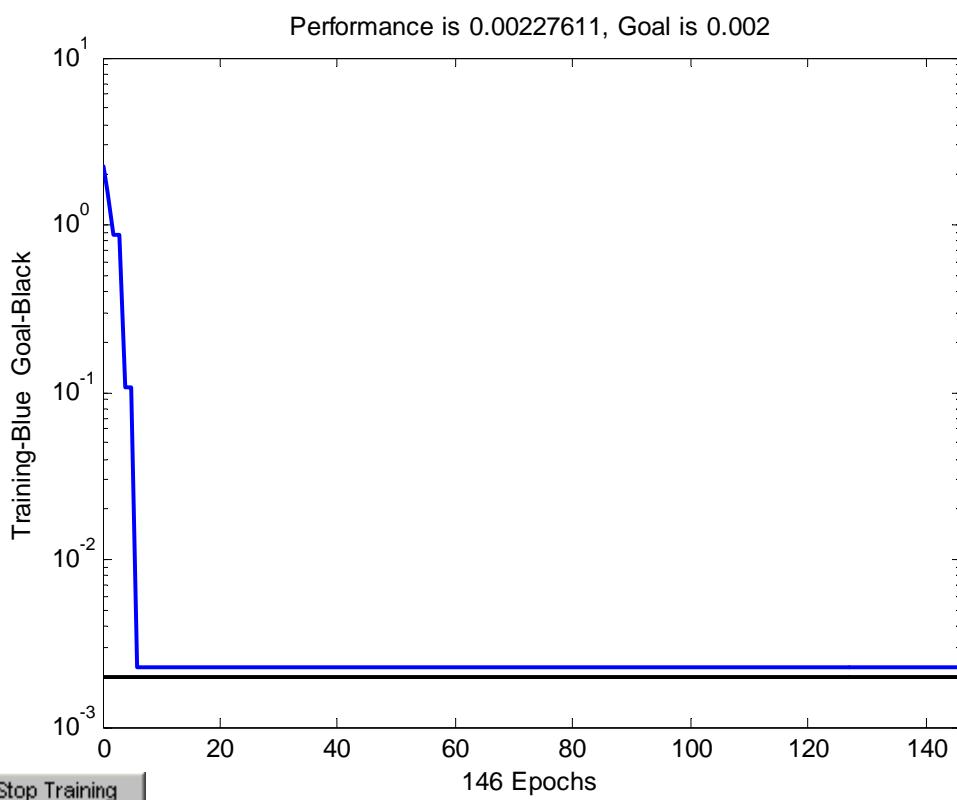
```

net.trainParam.show=50;
net.trainParam.lr=0.5;
net.trainParam.epochs=5000;
net.trainParam.goal=0.002;
[net,tr]=train(net,P,T);

```

图 5-2 训练误差下降曲线

图 5-4 是训练样本预测值与实测值的关系，从图中可以看出，网络预测值与实测值都在等值线附近，这表明网络训练的误差很小，可以作为训练好的网络用来预测新的组分的摩擦系数。将表 5-2 中设计的 4 组摩擦作为检测样本，对训练过的网络进行检验。其预测值与实测值以及相对误差值如表 5-3 所示，该网络的预测的最小摩擦系数 μ_{\min} 的相对误差最大值为：13%。最大摩擦系数 μ_{\max} 的相对误差值为：9%。表 2 中，对应摩擦系数较大的组分为 1 号和 4 号，这两种组分的成分中，钢纤维含量较高，增摩组元硫铁矿、氧化铝等含量也较多，达 10%wt 以上，而减摩组元含量较低，因此摩擦系数较大。而 2 号 3 号组分摩擦系数相对较小，对应表 1 中的成分，可以看出，2 号 3 号组分减摩成分含量相对较多，钢纤维含量较少，增摩组元的含量也较低，因此摩擦系数相对较低。



```

net=newff(minmax(P),[6,4],{'tansig','purelin'},'traingdx');
net.trainParam.show=50;
net.trainParam.lr=0.5;

```

```

net.trainParam.epochs=5000;
net.trainParam.goal=0.002;
[net,tr]=train(net,P,T);

```

图 5-3 陷入局部最小值训练误差曲线

相对其它报道的预测误差而言，本工作中的预测误差相对较大，这可能是因为摩擦系数并不是材料的固有属性，不同材料的摩擦系数不相同，而相同材料在不同条件下摩擦系数也是不同的，有关材料摩擦系数的机理目前还有待进一步研究。

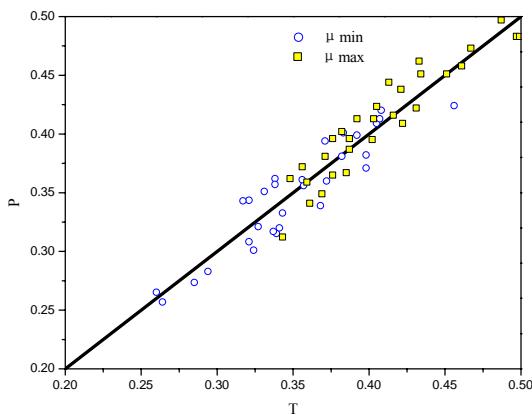


图 5-4 预测值—实验数据

其中横坐标 T 表示实验数据，纵坐标 P 表示预测值

5.3 应用与讨论

本工作中所建立的神经网络，预测最大误差为 13%，基于前面的分析，网络的预测还是可以反映摩擦材料各成分对摩擦系数的影响，因此可以用来指导摩擦材料成分设计。

表 5-3 预测值与实验数据的关系

Sample number	$\mu_{\min p}$	$\mu_{\min t}$	error	$\mu_{\max p}$	$\mu_{\max t}$	error
1	0.51	0.4437	-13%	0.584	0.53144	-9%
2	0.346	0.36676	6%	0.395	0.38315	-3%
3	0.323	0.31331	-3%	0.405	0.4293	-6%
4	0.385	0.36575	-5%	0.429	0.39468	-8%

* μ_{\min} and μ_{\max} followed with p refer to prediction data. μ_{\min} and μ_{\max} followed with t refer to experiment data.

单一成分对树脂摩擦材料摩擦系数的影响

为了研究单一成分对树脂基摩擦材料的影响，只变化其中一种成分的质量百

分数，其它成分的质量百分数保持不变，将各成分的质量百分数导入网络进行预测。以钢纤维为例。当其他成分质量百分数如表 5-2 中 2 号组分所示，钢纤维含量变化范围为 10-30wt% 时， μ_{\min} 与 μ_{\max} 随钢纤维含量的变化规律如图 5-5(a) 所示。由图看出，摩擦系数随钢纤维含量的升高，呈现明显的上升趋势，当钢纤维含量达到 22%wt 时，摩擦系数增长变缓，甚至有先下降。这是因为钢纤维做为树脂基摩擦材料的增强相^[13]，硬度较高，莫式硬度为 5 左右，既是增强相，同时也是摩擦相，因此钢纤维含量升高时，摩擦系数随之上升。当钢纤维含量达到一定量时，材料中增强相与粘结相体积比出现失衡，增强纤维量过多，从而粘结相没有足够的强度把所有的纤维粘结在材料基体上，因此，当纤维量与粘结相达到一定的平衡后，多加入的纤维并没有在摩擦过程中起作用，而是在摩擦过程中由于脱粘而变成磨屑，所以在纤维与粘结相达到平衡后，摩擦系数的变化并不明显，而且，可能因为材料强度的下降，导致摩擦系数有所下降。图中有部分 μ_{\min} 点在 μ_{\max} 点上方，这是由于网络预测存在一定的误差。

当其他成分质量百分数如表 5-2 中 2 号组分所示，石墨的质量百分含量由 5 变化到 15 时， μ_{\min} 与 μ_{\max} 随石墨含量的变化规律如图 5-5(b) 所示。从图中可以看出，石墨的主要作用是减摩。石墨是作为降低磨损的组元加入的，石墨的片层组织是它作为固体润滑剂的一个重要原因。在摩擦材料中，摩擦系数是考察其性能的一项指标，同时，磨损量，摩擦稳定性等也是考察其性能的重要指标^[15]。石墨可以和其他的润滑组元一起，在摩擦材料表面形成一层比较薄的摩擦转移层，从而降低摩擦系数，也有效的控制了磨损率，稳定摩擦系数。因此，石墨的加入量同样是树脂基摩擦材料成分设计中要研究的问题。

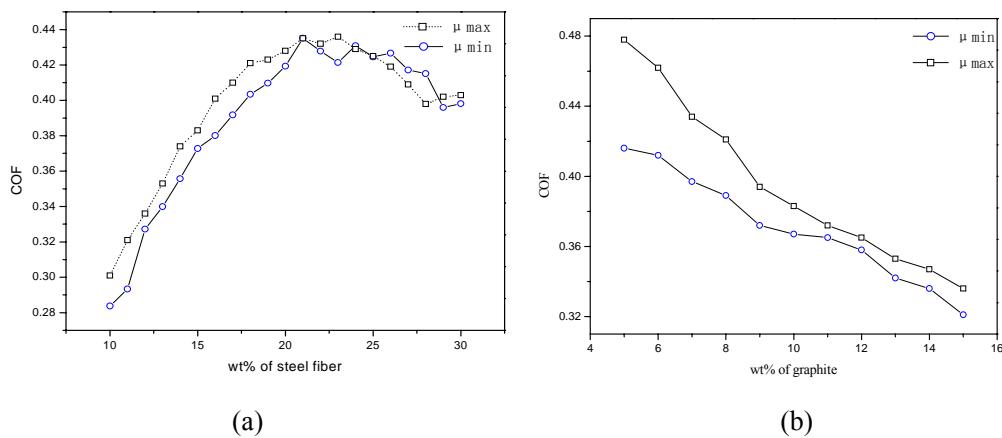


图 5-5 预测摩擦系数与材料成分的关系，(a)钢纤维含量变化与摩擦系数的关系，(b)石墨含量变化与摩擦系数的关系

5.4 本章小结

1. 建立了基于人工神经网络的树脂基摩擦材料摩擦系数的模型，结果表明，模型预测结果与实验结果基本一致。
2. 用训练好的模型对新组分的树脂基摩擦材料进行预测，结果显示， μ_{\min} 预测最大误差为：13%， μ_{\max} 预测最大误差为：9%。
3. 用模型对树脂基摩擦材料成分进行分析发现，摩擦系数基本上随着钢纤维的含量升高而升高，随石墨含量的升高而降低。

第 6 章 摩擦片工作温度场的计算

摩擦片制动的主要原理是把机械能转化为热能、表面能等形式的能量，热能是能量转换的主要形式。而工作温度是影响树脂基摩擦材料工作性能的主要影响因素之一。因此找出摩擦片在摩擦过程中温度的变化规律，具有重要意义。本工作，通过物理模型的简化，建立摩擦片在摩擦过程中温度场的有限元模型，并利用 Matlab 的 PDE 工具箱，解有关偏微分方程，初步得出温度场的三维图形和温度对时间的关系。

6.1 实验方法

摩擦材料的热扩散系数用激光热导率测量仪通过稳态热流法测量，试样尺寸： $\phi 10 \times 4 mm$ 。

在 M2000 型摩擦材料定速实验机上进行，正压力 $0.3 MP$ ，试样尺寸 $20 \times 20 mm$ 。对偶盘半径 $R = 0.25 m$ ，转速 $3000 rpm$ 。测稳热电偶安装在离盘圆心 $0.24 m$ 处。

6.2 物理模型

6.2.1 模型的简化

图 6-1(a)是摩擦片在 M2000 实验机上的工作原理图。图中所示摩擦片在圆柱体的圆周上，对摩擦片进行了近似处理，近似的把摩擦片看成与对偶盘同心的一小段圆环。图 6-1(a)所示的模型，相当于图 6-1(b)所示模型中取一小块。由于柱坐标系的在解决问题时，可以大大简化问题，所以，把图 6-1(a)中的模型转化为图 6-1(b)中的模型。只需界定三维空间坐标范围就可以通过解图 6-1(b)所示的模型来解图 6-1(a)所示的模型。

6.2.2 建立物理模型

以图 6-1(b)中传动盘和摩擦片接触面的圆心点作为柱坐标的圆心点，定义柱坐标系 z-r。图 6-2 表示物理模型的空间柱坐标体系，本问题中，要研究的

对象为原点上方的摩擦片。摩擦片下底面与对偶盘摩擦，产生热量，由于转速恒定，摩擦系数变化很小，可以认为是一个稳定的热源，热流密度 q_v 通过(6-1)式计算。

$$q_v = \mu P \omega R \quad (6-1)$$

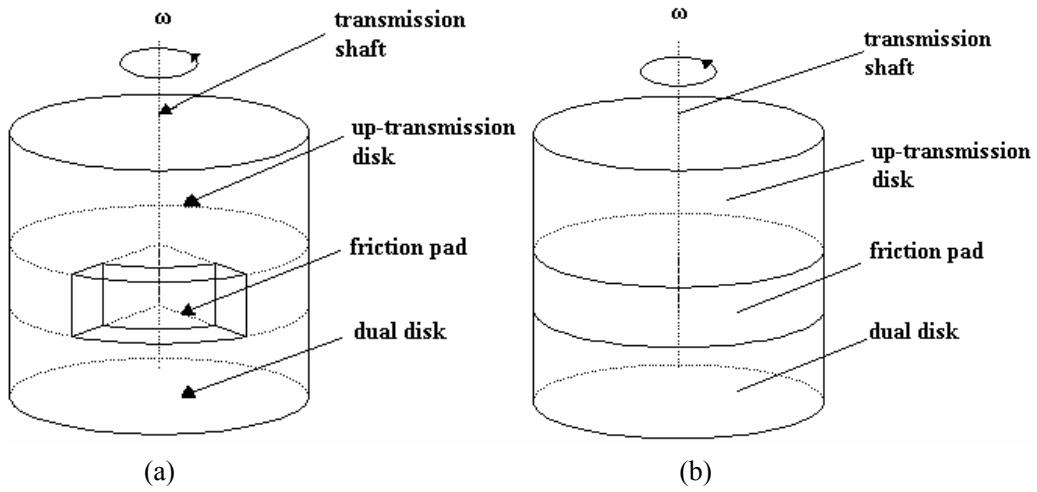


图 6-1 工作原理示意图

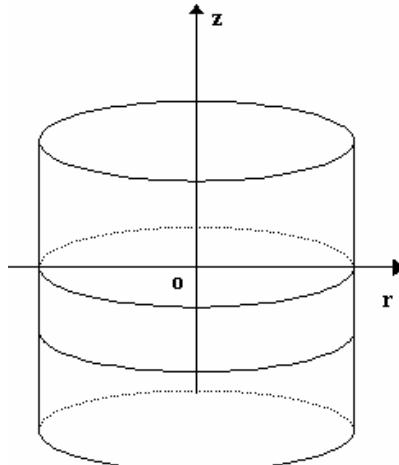


图 6-2 柱坐标体系

6.3 偏微分方程

6.3.1 热传导问题

取柱坐标中一个微单元作为考察对象，由于所取单元体积很小，首先忽略空间影响，在时间上考察温度和能量的变化关系：

$$\Delta W = \rho C_p \cdot \Delta T \cdot \Delta V = n \cdot \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \cdot r \quad (6-2)$$

其中 n 为柱坐标中单位向量, ρ 为材料密度, C_p 为材料的定压热容量。

同时, 由于时间区间也很小, 忽略时间因素的影响, 在空间上考察微单元的能量变化。微单元的能量分两部分, 热传导过来的能量是其中的一部分; 而微单元作为一个热发射源, 对外也有能量的散发, 能量散发密度 q_v 可近似等于摩擦面热发射源的能量散发密度。

$$\Delta W = n\Delta(\lambda r\Delta T(z, r)) + nq_v \cdot r = n \frac{\partial}{\partial r}(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}) + n \frac{\partial}{\partial r}(\lambda r(\frac{\partial T}{\partial z})) + nq_v r \quad (6-3)$$

能量守衡

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \cdot r = \frac{\partial}{\partial r}(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial r}(\lambda r(\frac{\partial T}{\partial z})) + q_v r \quad (6-4)$$

(6-4)式与 Matlab 偏微分方程线性解法中的抛物线问题吻合。

$$d \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (c \nabla u) + au = f \quad (6-5)$$

对比(6-4)式和(6-5)式, 得: $a=0$, $c=\lambda r$, $d=\rho C_p r$

6.3.2 边界条件

Matlab PDE 工具箱定义两类边界条件:

$$hu = r \quad (6-6)$$

$$n \cdot (c \nabla u + qu) = g \quad (6-7)$$

其中 n 为边界上单位向量, h, r, q, g 为常量或与 u 有关的量。(6-6)式为 Dirichlet 边界条件, (6-7)式为 Generalized Neumann 边界条件。

热传导问题有三类边界条件, 其中第一类边界条件为 Dirichlet 边界条件, 第二、三类边界条件为 Generalized Neumann 边界条件。

初始条件:

本问题的初始条件为: $u|_{t=0} = u_{\text{室温}}$ 。

边界条件:

1) 摩擦片的上表面和侧面是本问题的第一类边界, 由于温度恒定, 所以为 Dirichlet 边界条件。相应 $h=0$, $r=0$ 。

2) 在摩擦片的下表面可以近似看做热发散源, 边界条件可以表示为:

$n \cdot (\lambda \nabla u) = h(u_f - u)$, 为 Generalized Neumann 边界条件。由对应关系知道 $q = hR$, $g = hu_f R$ 其中 h 为强对流换热系数, $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; u_f 为外界温度, $^{\circ}\text{C}$; u 为待求解温度, $^{\circ}\text{C}$ 。R 为模型中柱体的半径, m 。

6.3.3 边界条件求解

对于本问题的第三类边界条件，需要求解的是对流换热系数¹ h 。为了简化问题，可以认为摩擦片与铸铁盘以及上传动盘连成一个整体，上表面与外界空气间存在强制对流给热，给热系数按式(6-8) 和式(6-9) 计算。

$$h = \frac{Nu\lambda}{l} \quad (6-8)$$

$$Nu = C\varepsilon R_e^n Pr^{0.4} \quad (6-9)$$

式中， h 对流换热系数； Nu 努塞尔特 (Nusselt) 准数； λ 导热系数； l 定型尺寸； R_e 雷诺准数 (Reynolds) 准数； Pr 普兰特 (Prandtl) 准数； C ， ε ， n 为常数^[15]，查表分别为 1.3，0.171 和 0.6。

通过计算得出在 0~300℃的温度范围内，强制对流给热系数 h 与温度 u 间的关系为：

$$h = 12.62623 - 0.01117u + 2.02977e^{-5u^2} \quad (6-10)$$

6.3.4 偏微分方程求解

利用 Matlab 的 PDEtool 解(6-4)式。摩擦材料密度为 2441kg/m³，热导率 $\lambda = 0.365W \cdot m^{-1} \cdot K$ ，摩擦系数平均值 $\bar{\mu} = 0.343$ 。将对应参数和边界条件输入程序，对偏微分方程进行求解，并输出工作 1 小时时刻的温度场曲面和热电偶所在点(0.24, 0)的温度对时间的变化关系。

6.4 网络输出与实验数据及其对比分析

图 6-3 为摩擦片工作一小时的温度场在三维立体坐标中的形态，由图中可以看出，摩擦片的温度场在空间上成轴对称分布，靠近边界和上底面处，温度梯度小，等温线分布稀疏；靠近下底面和中心处温度梯度大，等温线分布密集。而实际上，摩擦片的导热系数不高，热量的传导比较困难，所以造成热量在摩擦面聚集，摩擦面附近温度比较高，而与外界接触的区域温度比较低。温度场的计算与实际情况比较吻合。

图 6-4 为摩擦面上某点温度随时间的变化曲线实验数据与计算值曲线，由图看出，初始阶段，实验值与计算值比较吻合，温度上升都很快，在 0~8 分钟内，实验值与计算值最大相差 87.79℃，平均误差为 26.64℃，计算值曲线的总体斜率小于实验值曲线的总体斜率。实验温度值在 325℃左右时，上升变缓，且呈波动上升趋势。这是因为此时的能量转换发生了一定的变化，温度低时摩擦产生的能

量主要转化为热能，而温度升高到325℃左右时，材料强度急剧下降，磨损加剧，摩擦产生的能量有相当一部分转化为磨屑的表面能。

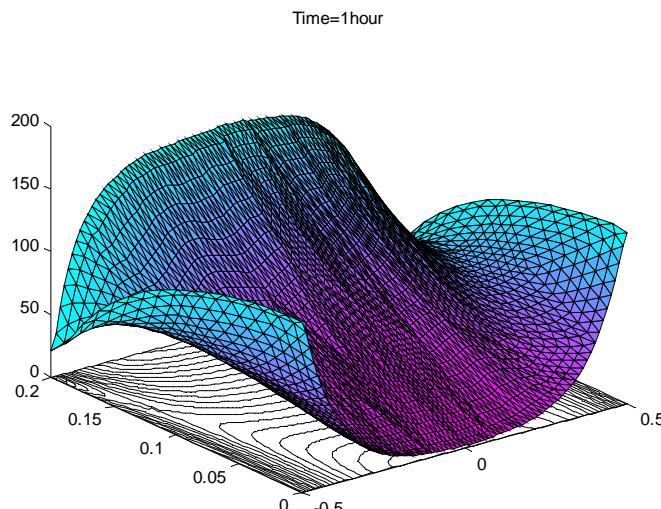


图 6-3 摩擦片温度场

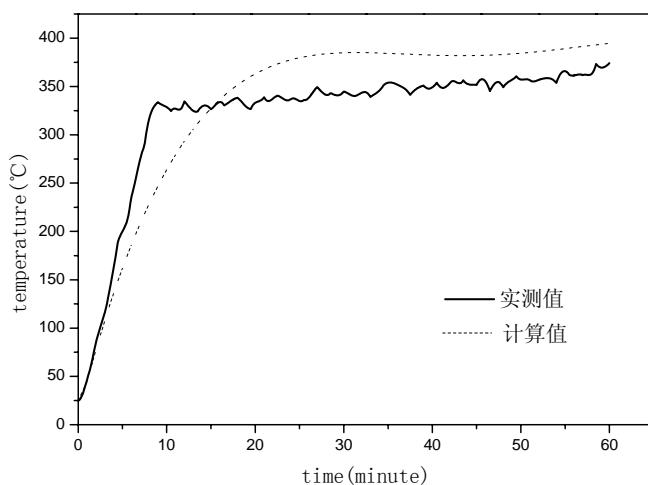


图 6-4 热电偶所在位置计算输出与实验值

同时，随着摩擦片材料强度的下降，摩擦时容易产生剥层等现象，新表面不断生成，也是温度波动的原因之一。而计算值曲线仍然保持上升的趋势，上升趋势有所减缓。这是因为在物理模型中，只考虑到摩擦片本身而忽略了外界对它的影响，事实上，摩擦片的体积很小，而与它相连的铸铁盘和钢质传动盘的体积是它体积的数十倍，因此，对环境因素的忽略是造成计算误差产生的主要原因。另外在模型简化过程中，认为实验所用的摩擦片是图 6-1(b)所示摩擦片的一小部分，这个简化过程也会造成误差，因为分割出来的一小部分和原来它在整体中的效果是不一样的，侧面积大大增加，散热就比原来要快。有关模型的修正，还有

待进一步研究。

6.5 小结

- 1) 摩擦片的温度梯度在柱坐标中成轴对称分布，靠近热发散源的面等温线分布密集，远离热发散源的面等温线分布稀疏。等稳线大部分消逝在与热发散源相对的面。
- 2) 摩擦片工作时，表面温度在初始阶段急剧升高，达到 325°C 左右时，上升变缓，基本上呈波动变化。
- 3) 摩擦初始阶段实验值与计算值最大相差 87.79°C ，平均误差为 26.64°C 。

第 7 章 主要结论

在查阅了大量国内外文献的基础上，本文主要进行了以下几个方面的工作，并得出如下结论：

1. 研究了树脂基摩擦材料各种单一成分的性能，发现通过改性可以提高酚醛树脂的耐高温性能，改性树脂中，硼改性酚醛树脂的综合性能最佳。
2. 研究了两种主要成分钢纤维和酚醛树脂的含量不同的 12 组配方，结果表明，当钢纤维含量为 22%wt、硼改性热固性酚醛树脂含量为 10% 左右的树脂基摩擦材料综合性能最佳，其中摩擦系数为 0.425 左右，衰退率为 30% 左右。
3. 应用神经网络模型，对摩擦材料的配方研究进行了一些试探性工作。拟合结果与实验结论基本相符，误差在 13% 以下。然后利用训练好的神经网络进行单一成分变化情况下摩擦系数的变化趋势的研究，结果表明，网络预测结果与实验规律基本相符。
4. 对摩擦材料表面工作温度场进行有限元计算，计算所得曲线与实验所得曲线变化趋势一致，摩擦初始阶段实验值与计算值最大相差 87.79℃，平均误差为 26.64℃。通过计算，发现摩擦材料在工作过程中，表面温度场从中心位置呈对称分布。

参考文献

- [1] Friedrich K, Lu Z , Hager AM. Overview on polymer composites for friction and wear application[J]. Theoretical and Applied Mechanics, 1993 (19): 1-11.
- [2] Jacko D, T sang P H S, Rhee S K. Automotive friction materials evolution during the past decade[J]. Wear, 1984, 100: 503-515.
- [3] Jacko M G. Physical and chem ical changes of organic disc pads in service[J]. Wear, 1978, 46: 163-175.
- [4] 李邵忠. 汽车摩擦材料的变革与非石棉摩擦材料的发展[J]. 汽车科技, 2004, 2: 4-7.
- [5] J. Bijwe, Nidhi, N. Majumdar. Influence of modified phenolic resins on fade and recovery behavior of friction materials[J]. Wear, 2005, 259: 1068-1078.
- [6] 苏堤, 贺安安, 李度成. 汽车制动摩擦材料的研究[J]. 汽车技术, 1996, 11: 44-46.
- [7] 付华, 孙宝臣, 廖波. 半金属离合器摩擦片性能研究[J]. 机械工程材料, 2005, 9: 23-29.
- [8] 苏堤, 李度成. 不同温度下半金属摩擦材料的摩擦磨损性研究[J]. 摩擦学学报, 2000, 20 (5): 383-385.
- [9] 刘爱萍, 徐粉云. 树脂粒度对半金属摩擦材料的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2000, (1): 31-33.
- [10] 黄小伦, 戴雄杰. 半金属摩擦材料表面层的摩擦性能的探讨[J]. 摩擦学学报, 1986, 19 (4): 33-39.
- [11] 付华, 孙宝臣, 廖波. 半金属离合器摩擦片性能研究[J]. 机械工程材料, 2005, 25(9): 51-57.
- [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] Ho S C, Chern Lin J H, Ju C P. Effect of fiber addition on mechanical and tribological properties of a copper/phenolic-based friction material[J]. Wear, 2005, 258: 861-869.
- [14] Kístková Monika, Filip Peter, Weiss Zdenek, et al. Influence of metals on the phenol-formaldehyde resin degradation in friction composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2004, 84: 49-60.
- [15] Mandal D, Dutta B K, .Panigrahi S C. Wear and friction behavior of stir cast

- aluminium-base short steel fiber reinforced composites[J]. Wear, 2004, 257: 654-664.
- [16] 杨晓明, 邱清盈, 冯培恩等. 盘式制动器的全能优化设计[J]. 中国机械工程, 2005, 16(7): 630-633.
- [17] Seong Jin Kim, Ho Jang. Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp[J]. Wear, 2000, 33: 477-484.
- [18] H Jang, J S Lee, J W Fash. Compositional effects of the brake friction material on creep groan phenomena[J]. Wear, 2001, 251: 1477-1483.
- [19] J Bijwe, Nidhi, N Majumdar, et al. Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials[J]. Wear, 2005, 259: 1068-1078.
- [20] R J Talib, A Muchtar C H Azhari. Microstructural characteristics on the surface and subsurface of semimetallic automotive friction materials during braking process[J]. Materials Processing Technology, 2003, 140: 694-699.
- [21] 肖迎红, 车剑飞, 宋晔等. 无石棉摩擦材料成型工艺研究[J]. 非金属矿, 2002, 25(4): 54-59.
- [22] 孙振亚, 胡纯, 雷绍民等. 纳米材料改性酚醛树脂合成闸片摩擦性能研究[J]. 非金属矿, 2004, 27(5): 51-53.
- [23] 林荣会, 方亮, 孙平. 石油钻机用双层无石棉高性能刹车块研制[J]. 非金属矿, 2004, 27(5): 47-48.
- [24] 郭洪涛, 张佐光, 仲伟虹等. 炭纤维/芳纶浆粕摩阻复合材料初步研究[J]. 复合材料学报, 2001, 18(2): 50-53.
- [25] Li Fei, Hu Ke-ao, Li Jian-lin, et al. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene[J]. Wear, 2001, 249: 877-882.
- [26] 栾维涛, 张振, 赵志鸿等. 2004 年我国热固性工程塑料进展[J]. 工程塑料应用, 2005, 5: 63-69.
- [27] 刘俊先. 热固性树脂[C]. 北京: 化学工业出版社. 2004, 19(1): 5.
- [28] Park Byung-Dae, Wang Xiang-Ming. Thermokinetic behavior of powdered phenol-formaldehyde (PPF) resins[J]. Thermochimica Acta, 2005, 433: 88-92.
- [29] Park Byung-Dae, Riedl Bernard, Hsu Ernest W, et al. Differential scanning calorimetry of phenol-formaldehyde resins cure-accelerated by carbonates[J]. Polymer, 1999, 40: 1689-1699
- [30] 韦春, 牟秋红, 牛永亮等. 剑麻纤维/酚醛树脂复合材料的动态力学性能、力学性能和热性能[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(6): 839-842.
- [31] Wambua Paul, Ivens Jan, Verpoest Ignaas. Natural fibers: can they replace glass in fiber reinforced plastics[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 1259-1264.
- [32] 才红, 韦春, 牛永亮等. 剑麻纤维/玻璃纤维/酚醛树脂复合材料的性能研究

- [J]. 塑料工业, 2004, 32(6):38-45.
- [33] 岳群峰, 任俊芳, 王宏刚等. 固体润滑剂对芳纶纤维增强尼龙 66 材料摩擦学性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(6): 895-897.
- [34] 周雪松, 黄小华, 岳春燕等. 酚醛树脂对芳纶复合纸基摩擦材料的影响[J]. 纸和造纸. 2005, 3: 46-49.
- [35] Corrêa Ronaldo A, Nunes Regina C R, Lourenço Vera L. Investigation of the degradation of thermoplastic polyurethane reinforced with short fibers[J]. Polymer Degradation and Stability, 1996, 52: 245-251.
- [36] Baltussen J J M, Northolt M G. The viscoelastic extension of polymer fibers: creep behaviour[J]. Polymer, 2001, 42: 3835-3846.
- [37] Li J Q, Xiao P. Joining alumina using an alumina/metal composite[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2002, 22: 1225-1233.
- [38] Miyajima T, Iwai Y. Effects of reinforcements on sliding wear behavior of aluminum matrix composites[J]. Wear, 2003, 255: 606-616.
- [39] Cueva G, Sinatra A, Guesser W L. Wear resistance of cast irons used in brake disc rotors[J]. Wear, 2003, 255: 1256-1260.
- [40] 易茂中, 葛毅成, 冯一雷等. C/C 复合材料及高强石墨高温摩擦磨损性能对比研究[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(3): 235-239.
- [41] 葛毅成, 易茂中, 黄伯云. C/C 复合材料与石墨材料干态摩擦磨损行为[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 93-97.
- [42] 谢志勇, 黄启忠, 苏哲安等. CVD 炭/炭刹车材料制备工艺和微观结构研究[J]. 非金属矿, 2005, 28(1): 53-55.
- [43] 李江鸿, 熊翔, 巩前明等. 不同基体 C/C 复合材料的摩擦磨损性能[J]. 2005, 15(3): 446-450.
- [44] Murdie N, Ju C P, Don J. Microstructure of worn pitch-resin-CVI C/C composites[J]. Carbon, 1991, 29: 335—342.
- [45] Savage G. Carbon-Carbon Composite[M]. London: Published by Chapman Hall, 1993: 351-354.
- [46] Hou Xiang-hui, Li He-jun, Wang Can, et al. Internal friction behavior of carbon-carbon composites[J]. Carbon, 2000, 38: 2095-2101.
- [47] 车建明, 项忠霞. 炭纤维铜基复合材料磨损率的定量预测[J]. 天津大学学报, 2005, 38(10): 887-891.
- [48] 刘英才, 李静, 尹衍升. Fe-3Al 金属间化合物基摩擦材料的制备工艺与性能[J]. 机械工程材料, 2005, 29(6): 23-26.
- [49] 刘建秀, 高红霞, 韩长生. 铜基粉末冶金(Cu-PM)摩擦材料冲击破坏机理研

- 究[J]. 润滑与密封, 2004, 4: 5-7.
- [50] Hee K W, Filip P. Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings[J]. Wear, 2005, 259: 1088-1096.
- [51] Talijan Nadezda M, Trifunovic Dušan S, Trifunovic Dejan D. The influence of different iron powders on the friction properties of sintered friction materials based on iron[J]. Materials Letters, 2000, 46: 255-260.
- [52] Li Jing Yin, Yansheng Ma, Hongtao. Preparation and properties of Fe₃Al-based friction materials[J]. Tribology Internationala, 2005, 38: 159-163.
- [53] Biswas S K. Some mechanisms of tribofilm formation in metal/metal and ceramic/metal sliding interactions[J]. Wear, 2000, 245: 178-189.
- [54] Czichos H, Klaffke D, Santner E. Advances in tribology, the materials point of view[J]. Wear, 1995, 190: 155-161.
- [55] Sheiretov T, Van Glabbeek W, Cusano C. Simulative friction and wear study of retrofitted swash plate and rolling piston compressors[J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18: 330-335.
- [56] 邵鑫, 刘维民, 薛群基等. 填料对聚合物基复合材料摩擦学行为的影响[J]. 材料科学与工程, 2001, 19(4): 116-121.
- [57] Liu Y, Wang H, Wang W. Methods Compassion in Computation of Temperature Rise on Frictional Interfaces[J]. Tribology International, 2002, (35): 549-560.
- [58] 陈明. 神经网络模型[C]. 大连: 大连理工大学出版社. 1995, 1: 1-57.
- [59] 闻新, 周露, 李翔等. MATLAB 神经网络仿真与应用[C]. 北京: 科学出版社. 2003: 258-284.
- [60] 徐雪艳, 穆志纯, 汪朝霞等. 神经网络在梯度功能材料制备中的应用[J]. 北京科技大学学报, 1994, 16(50): 464-468.
- [61] 田军, 虞厥邦, 扬灿. 适合于 BP 学习的共轭梯度法[J]. 电子科技大学学报, 1994, 23(5): 462-467.
- [62] Kun Chang Lee, Ingoo Han, Youngsig Kwon. Hybrid neural network models for bankruptcy predictions[J]. Decision Support Systems, 1996, 18: 63-72.
- [63] Hülya Kaçar Durmuş, Erdoğan Özkaya, Cevdet Meriç. The use of neural networks for the prediction of wear loss and surface roughness of AA 6351 aluminium alloy[J]. Materials & Design, 2006, 27: 156-159.
- [64] 蔡安辉, 孙国雄. 基于人工神经网络的材料力学性能的预测与评估[J]. 铸造, 2003, 52(4): 269-271.
- [65] 邱明, 张永振, 朱均. 铝基复合材料高速干摩擦行为的遗传神经网络预测模

- 型[J]. 摩擦学学报. 2005, 25(6): 545-549.
- [66] 李炼, 徐元铭, 张俊. 基于神经网络响应面的复合材料结构优化设计[J]. 复合材料学报, 2005, 22(5): 134-140.
- [67] 孙德明, 刘立红, 鹿晓阳, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cr}_3\text{C}_2/(W, Ti)\text{C}$ 陶瓷材料的力学性能及微观结构[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4): 411-415.
- [68] Liu Y, Wang H, Wang W. Methods Compassion in Computation of Temperature Rise on Frictional Interfaces[J]. Tribology International, 2002, (35): 549-560.
- [69] 董光能, 陈志澜, 谢友柏等. PEEK 塑料摩擦销的温度场理论计算[J]. 摩擦学学报, 2002, 20(1): 34-37.
- [70] 王营, 曹献坤, 姚安佑等. 盘式制动器摩擦片的温度场研究[J]. 武汉理工大学学报. 2001, 23(7): 22-24.
- [71] 周建钊, 高亚明. 主离合器摩擦片温度场的数值解法[J]. 解放军理工大学学报, 2003, 4(1): 58-62.
- [72] 张西奎, 杨桂生, 王成国等. 制动摩擦材料基体树脂的改性研究[J]. 机械工程材料, 2005, 29(2): 37-44.

致 谢

本论文是在导师黄伯云教授、副导师刘咏教授和刘伯威副教授的辛勤指导和孜孜不倦的教诲下完成的。在攻读硕士学位期间，三位导师，特别是黄伯云教授渊博的知识、严谨的治学态度和谦逊的品德对我影响甚深，将永远激励我努力克服今后在学习和工作上的遇到的困难。在三年学习过程中，生活上也得到三位导师的亲切关怀和帮助。在此特向导师表示最衷心的感谢和崇高的敬意。

感谢刘咏教授给我提供了一个宽松而有序的学习和科研环境，课题组给我的感觉更像一个温暖的家庭，而您是一个可以亲近和信赖的家长，在课题组的3年将是我一生难忘美好回忆，谢谢您！

感谢岳、刘祖铭两位老师在论文撰写和编辑过程中给予我的悉心指导和关心，在你们的指导下，我学到了不少知识。

本论文的完成过程中得到了杨兵，黄劲松，张武装，李昆等各位老师给予了悉心指导和亲切的关怀。同时，课题组单小宏、向其军、何世文、刘彬、陈丽芳、郭晟、龙郑易、盛小娴、刘美玲、李占涛、张伟、谭彦妮、何晓宇、方京华和张宁一等各位同学在实验工作和生活上也给予了我大力的支持和帮助。最后，对所有帮助和关心我的老师和同学表示衷心的感谢。

感谢博云汽车制动材料有限公司的领导们，在实验期间，他们在生活和工作上给了我巨大的关心和支持。感谢博云汽车制动材料有限公司摩擦材料研究所全体员工，实验的顺利完成，离不开他们的帮助和支持。

最后还要感谢在幕后关心和支持我的亲人们，我的论文的成果，每一页都蕴含着他们的辛勤付出。感谢女友默默的支持，论文的完成，也离不开她的支持。在此，对所有关心和支持过我的人，表示深深的谢意！

攻读硕士学位期间主要的研究成果

1. 伍朝阳, 刘伯威, 刘咏, 黄伯云. 基于神经网络的树脂基摩擦材料摩擦因数的预测模型. 粉末冶金材料科学与工程, 2006 (已录用)