

摘 要

随着列车运行速度的不断提高,对制动装置及制动材料也提出了更高的要求。一方面,列车时速的提高,对传统的列车基础制动装置及车辆制动系统技术提出了更新观念、引进先进技术的客观要求。另一方面,对列车制动技术的关键部件闸瓦和制动圆盘/闸片的性能和制备技术也提出了越来越严格的要求。正是由于列车时速朝高速化的发展,给列车制动摩擦材料及其部件制备工艺技术的研究开发提供了原始推动力,展示了广阔的市场。其中制动元件材料性能的优劣,将直接影响到制动效果的好坏。正确的选择树脂基复合材料的配方,进行合理的结构设计,以达到最佳的综合使用效果十分重要。本文采用铸钢作为对偶,研究了树脂基摩擦材料的基体、填料等方面对铸钢/树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响,探求出了较为合理的闸瓦配方。

对增摩组元研究表明:增加硬质相填料铬铁矿、刚玉的含量,都能在一定程度上提高闸瓦的摩擦系数,磨损量也相应增加。铬铁矿的含量少于 7%时,试样在高制动初速度下测得的摩擦系数较低;高于 8%时,在各个制动初速度下的摩擦系数均低于含量为 7%~8%的试样,而且磨耗稍大。铬铁矿的含量控制在 7%~8%之间时试样的摩擦磨损性能较好,在高制动初速度下的摩擦系数有较大的提高,且摩擦曲线很平稳,制动噪声较低,基本达到了实验的预期目标。加入少量的刚玉能提高闸瓦的摩擦系数,但效果不很明显。刚玉含量在 3%较佳,含量多于 3%时,导致钢纤维的拔出,在制动时产生火花和较大噪声。

对减摩组元研究表明:煅后焦含量为 3%试样的制动曲线在不同的制动初速度下都很平稳,其高速下摩擦系数无明显减低。但是当煅后焦的用量增加到 5%时,曲线出现波动,同时产生过恢复、损伤制动对偶和制动噪音等问题。对填料进行硅烷偶联剂的表面处理后增强了无机填料和有机物之间的亲和力,提高了无机填料与树脂基体的界面粘结强度,使摩擦材料有良好的成型加工性能,同时材料的磨损量减少了一半,摩擦系数提高。润滑组元为煅后焦,质量百分数为 3%,并且对填料进行硅烷偶联剂的表面处理的树脂基摩擦材料的综合性能最好。

关键词: 基体; 填料; 摩擦材料; 摩擦磨损性能

Abstract

Brake device and brake materials have been improved with the acceleration of the train speed. On one hand, the objective requirements of updated concept of technology and advanced technology on the basis of the traditional train brake and vehicle braking systems are present with the improvement of train speed. On the other hand, more and more strict requirements for the performance and preparation of technology of the brake pad and the brake disc/brake shoe as key components for train braking technology are present. The original impetus and a broad market are provided for the research on brake friction materials and preparation of the components with the advancement of high speed train. Braking performance of the material components will directly affect the quality of the braking effect. In order to achieve the best effect, it is very important to choose the correct resin-based composite formula and design rational structure. In this paper, a dual steel was set as antithetic. Effects of the resin-based friction materials matrix, filler, etc. on steel/resin-based friction material friction and wear properties were investigated and a more reasonable formula brake pad was gained/achieved.

Research on the increasing the friction element shows that: an increase of packing rigid chromite, corundum content, to some extent, are able to raise the brake shoe friction coefficient and increased wear volume. The sample in which content of Chromite less than 7% in the beginning of the high-speed braking measured a lower coefficient of friction; More than 8 percent, at the beginning of the various braking speeds were lower than the content of the friction coefficient of 7% ~ 8% of the sample, but slightly larger wear. When the content of chromite is control between the 7% ~ 8% , the friction and wear properties of the sample is better, in the beginning of the high-speed braking friction coefficient had a greater increase in friction and a very smooth curve, and a lower brake noise, and the basic experiment is expected to reach the goal. Adding a small amount of corundum can increase the friction coefficient of brake pad, but the result is not obvious. Corundum content in the 3% is better than 3% concentration, resulting in the pull-out of steel fiber in the braking noise and larger sparks.

The study of friction-reducing element shows that: the sample curve of the braking calcined 3% coke content with the brake in the beginning of different speeds

are stable under the high-speed with no significant reduction in friction coefficient. However, when the amount of calcined coke increasing to 5%, the curves fluctuation at the same time have been restored, damaged dual brake and brake noise. The affinity between inorganic filler and organic is enhanced through surface treatment on Silane coupling agent and interface viscosity between inorganic filler and resin-based is improved in order to achieve a fiction materials with excellent properties. Friction coefficient can be improved when the amount of materials abrasion reduce by half. With element for lubricating calcined coke, the quality percentage 3%, and silane coupling agent on the filler to the surface treatment of resin-based friction materials shows the best comprehensive performance.

Key Words: Matrix; Filler; Friction material; Friction and wear properties

第1章 绪论

1.1 前言

在当今时代，火车、汽车、城轨等已毫无例外地成为人类陆地客货运输无可替代的现代化工具，在社会生活中发挥着举足轻重的作用，并在可以预见的未来相当长的时间内，车辆工业仍将是国民经济重要的支柱产业，人类对车辆的要求越来越高，如高速、重载、安全可靠、乘坐舒适、操作方便、低能耗、无公害、轻量化等，车辆工业相应呈现出蓬勃的多元发展态势^[1]。

车辆高速重载发展，使得其制动工况发生了很大的变化。其中列车提速后所带来的制动工况的变化，可以从制动功的变化和防抱死系统的装配两方面加以描述。在制动方面，由于列车的运行动能与其行进速度的2次方成正比，制动功率与列车的运行速度的呈3次方关系（因为制动功率还与减速度有关），所以列车运行速度每提高1倍，其制动功率将增加到原来的8倍^[2]。这意味着制动系统要在相同的停车距离内吸收更多的制动功。要求配备的摩阻材料应能耐受更高速度下的强力摩擦作用。在防抱死系统的装配方面，提速车辆都装备了防抱死系统，该系统可以根据车轮转动情况，随时调节制动力以防止抱死。该系统的引入使摩阻材料和对磨偶滑磨时间增加，滑磨生热增加，制动频度增加。这要求摩阻材料有更好的散热性和耐磨性，以及足够高的冲击强度和剪切强度^[3]。

因此，列车运行速度的不断提高，对制动装置及制动材料也提出了更高的要求。一方面，列车时速的提高，对传统的列车基础制动装置及车辆制动系统技术提出了更新观念、引进先进技术的客观要求。另一方面，对列车制动技术的关键部件闸瓦和制动圆盘/闸片的性能和制备技术也提出了越来越严格的要求^[4-6]。正是由于列车时速朝高速化的发展，给列车制动摩擦材料及其部件制备工艺技术的研究开发提供了原始推动力，展示了广阔的市场。

1.2 铁路货车闸瓦材料

1.2.1 铸铁闸瓦

铸铁闸瓦在铁道车辆上使用的历史最长，应用也最广。铸铁价格低廉，摩擦系数较为稳定，且不受气候的影响，它的导热性好，对车轮损害小，可使车轮踏面粗化，从而获得较大的粘着力。然而普通铸铁闸瓦的摩擦系数较小，并随列车车速的提升而迅速下降，进入高速运行时特别明显。各国科技工作者对此进行了大量的研究^[7-9]，从提高铸铁的含磷量和加入少量合金元素两方面来改进其性能。现在使用的有多种特种铸铁闸瓦，铸铁闸瓦已形成由普通铸铁向特殊铸铁闸瓦发

展的形势。

提高铸铁中的含磷量，既能提高闸瓦的摩擦系数，又可增加耐磨性。但高磷铸铁脆性大，使用中不可避免产生裂纹，故需采用钢背来补强。从使用灰铁瓦到中磷铁瓦（ $P < 1.0\%$ ），至高磷铁瓦（ $P: 1.5 \sim 2.5\%$ ）发展至今的含磷量在 3% 以上的超高磷铸铁闸瓦，使列车制动效果不断得到了提高。在广泛使用的含磷量较高的闸瓦中进一步加入少量合金元素（如 Cu, Ni, Cr, Ti, V），既可进一步提高摩擦系数，又可强化铸铁基体，提高闸瓦的耐热裂性。如日本将特种铸铁闸瓦应用于北海道高速动力车上，时速为 130km 时，即使在降雪条件下，也能在 600m 以内使列车制动^[10]。

国内 70 年代以前主要推广中磷铸铁闸瓦，1985 年以后开发出了高磷铸铁闸瓦。近年来，又研制成功了超高磷闸瓦^[11]，含磷量达 3.0~4.5%，并含有 Cu, Cr, Ni 等合金元素，这种闸瓦可以满足准高速内燃机车制动性能的要求。

1.2.2 粉末冶金闸瓦

采用粉末冶金技术生产闸瓦与闸片，不但在性能质量上具有突出的优点，在组分的设计、产品的多样化上也极具灵活性。采用粉末冶金技术可以任意改变材料的组分，可以避免传统制造工艺中的疏松、缩孔、材料组织的枝晶偏析及晶粒长大等铸造缺陷，有助于提高零件的各项力学性能。

用粉末冶金技术制备列车制动闸瓦和闸片已取得了很大的成功^[12-14]，形成了粉末冶金铁基^[12]、铜基^[13]、铁-铜基^[14]为主体的粉末冶金摩擦材料体系。对材料的组成、工艺等与性能之间的关系进行了很多研究^[15-17]，这些研究使得粉末冶金摩擦材料的生产技术与产品性能不断提高。

粉末冶金闸瓦由原料粉未经混和、压制、烧结而成。它既具有铸铁闸瓦的摩擦系数不受天气气候影响的优点，又具有合成闸瓦的摩擦系数不随列车速度变化的优点，并且耐磨性和导热性都好。瑞典、加拿大等国的高速列车，大功率机车和法国 TGV 高速列车等均使用这种闸瓦，且都取得了优异的制动效果。但粉末冶金闸瓦对车轮的磨损较为严重，成本比铸铁及合成闸瓦高，这些方面尚有待进一步研究与改进。

1.2.3 复合闸瓦

为满足铁路运营高速化、重载化、车辆的轻量化以及在规定范围内刹车的要求，材料学家已研究、应用了新型复合材料闸瓦，主要有 C/C 纤维复合材料和金属基复合材料。C/C 纤维复合材料是用碳纤维强化碳基体的复合材料，具有质轻、高强度、高模量、低热膨胀、高抗裂性和优良的耐高温性能，能在 1000℃ 温度下正常工作^[18]。它已在飞机和赛车上得到了广泛的应用，法国已在 TGV 高速列车上使用了这种复合材料制动装置，效果显著。金属基复合材料是以铝为基体、以

均匀分布的陶瓷颗粒为强化相，它克服了铝材热稳定性差、耐磨性欠佳的缺点，具有较高的强度、优良的耐热性与抗裂性。法国的尤里达、克诺尔等公司及德、美、日、英等国正在高速列车上研究应用这种陶瓷增强铝基复合材料新型闸瓦^[19-20]。

1.2.4 合成闸瓦

合成摩擦材料是将金属粉末、酚醛树脂和摩擦调节剂等经充分混炼后加热压制而成，它将材料与制品工序合二为一。所用摩擦调节剂，一般是采用腰果壳油制成的颗粒。按形状与制动方式的不同，又分为合成闸瓦和合成闸片。合成闸瓦与闸片的配方与工艺相同，改变其配比工艺，可获得不同的摩擦系数。我国目前研制的合成闸瓦分低摩擦系数合成闸瓦和高摩擦系数合成闸瓦。

合成摩擦材料具有如下明显的特色：可通过改变材质配方和工艺在一定范围内可调整其物理机械性能，耐磨性好，使用寿命可达铸铁闸瓦/闸片的四倍以上，制动时无火花，重量轻，高速区摩擦系数大且不随列车速度的改变而变化。合成摩擦材料也存在如下几个不足之处^[21]：一是导热性差，制动量热量难以散发，因而车轮产生温升，甚至导致热裂。其次是在湿润状态下，摩擦系数大为下降，受天气影响大，在雨雪天气制动能力下降。此外，这类闸瓦与车轮踏面反复磨合后，使二者间的粘性降低；有机合成摩擦材料的使用温度一般不能超过 250℃。当制动处温度达 250℃时，其磨损率急剧增加。温度较高时，由于其组分的改变，摩擦系数也将改变。有机合成摩擦材料推荐使用在时速 160~200km 的列车上。

1.3 高摩合成闸瓦

高摩合成闸瓦研究工作开展最早的有英国、美国和前苏联。1907年，英国飞洛多公司用棉毛混纺条层压成闸瓦，并用于伦敦地铁。以后逐渐改进，至50年代已改用以石棉等为增强材料和酚醛树脂为黏合剂的合成闸瓦。美国早在1924年就开始研制以层压木为非金属摩擦材料，并应用于铁路车辆制动。1954年以后，“Cobra”牌号合成闸瓦作为商品形式在铁路上大量使用，其主要成分为合成橡胶、石棉等，摩擦系数在每小时140公里速度时为0.26，耐磨性为铸铁闸瓦的5倍。苏联在合成闸瓦的研究上开始也很早，在地下铁道中早就使用层压木的塑料闸瓦。不过新的合成闸瓦的材质研究是从1956年开始。曾用三种类型的黏合剂，分别为酚醛树脂、合成橡胶、酚醛树脂和合成橡胶混合物。试验结果表明：采用合成橡胶为黏合剂的高摩合成闸瓦的制动性能优异。已广泛应用于快速旅客列车上。

1.3.1 高摩合成闸瓦的基本组成

高摩合成闸瓦是以矿物为主的无机材料复合而成,以高聚物(橡胶与树脂)为黏结剂、有机和无机纤维为增强材料,矿物粉体和有机粉体为填料,经过复合、加工而制成的功能材料。这种材料的特点是具有良好的摩擦系数和耐磨损性能、同时还具有一定的耐热性和机械强度,能满足车辆或机械的传动与制动性能要求。它们被广泛应用在火车、汽车、农用车辆、飞机、舰船、石油钻机、矿山机械及各类工程机械设备以及自行车、洗衣机等生活用品方面,作为动力的传递或制动减速用不可缺少的材料^[22-23]。

(1) 基体

树脂基摩擦材料中的树脂基体亦称粘结剂,是其重要组成部分。它不仅起到粘结纤维和填料、有效传递载荷和使载荷均衡的作用,而且对材料的摩擦磨损性能、抗冲击性能、耐高温性能都有很大影响,因此选择合适的树脂基体是制备良好性能树脂基摩擦材料的前提^[24-26]。选择基体的要点是,要求基体应具有^[27]:①合适的模量以保证在摩擦时有大的实际接触面积,并使摩擦对偶工作稳定;②足够高的热分解强度,以防止引起严重的“热衰退”现象;③分解后的残余物质要有一定的摩擦性能;④与纤维要有优良的浸润性、高的黏附强度;⑤良好的成型加工性能。

(2) 增强体

增强体在树脂基摩擦材料中不仅对基体起增强作用以提高材料的强度、耐热性与耐磨损性等,而且还可以调节与改善材料的摩擦磨损特性。增强体一般应具有足够的高温强度,保证在制动过程中不燃烧、不产生有害气体,无公害,有适宜的摩擦性能^[27]。增强体按几何形状划分,有纤维状、粒状与片状,按属性划分,有无机增强体和有机增强体,其中有合成材料也有天然材料^[28-30]。

纤维状增强体是目前应用最为普遍的一种。纤维在摩擦材料中不仅对基体起增强作用,它还在摩擦界面上同摩擦材料中其它组分一起承受摩擦力的作用,并影响摩擦材料的摩擦磨损特性^[31]。

(3) 填料

填料是组成摩擦材料的主要成分,包括多种摩擦性能调节剂和其它配合剂。填料在摩擦材料中主要起改善材料的物理与机械性能、调节摩擦性能及降低成本的作用,对摩擦材料的磨损性能进行多方面调节,使摩擦材料制片(刹车片和离合器面片)能更好地满足各种工况条件下的制动和传动功能的要求。此外,还常常通过加用不同的填料来控制调节摩擦材料制品的硬度、密度、结构密实度、制品外观以及改善制动噪音、降低制品成本等。

1.3.2 高摩合成闸瓦的特点

高摩擦系数合成闸瓦具有下列特点：

(1) 高摩擦系数合成闸瓦的摩擦系数可随需要而进行相应的配置，同时可使其摩擦系数随速度的变化与轮轨间的粘着系数的变化基本相吻合，以达到缩短制动距离、提高列车的制动限速的目的^[32]。

(2) 能节约能源，可用小直径制动缸，节省了用风量，并可减少列车初充风和再充风时间，使列车再制动的制动力不衰竭，保证了行车安全。

(3) 减轻了车辆自重，货车的制动装置可以减轻，不但降低了车辆的自重，同时也减轻了转向架的簧下重量，避免或减轻制动梁断裂和脱落事故。

(4) 经磨耐用，高摩合成闸瓦的使用寿命是高磷铸铁闸瓦的 3~18 倍，使长大坡道地区列检的铲托工作量近于零，并保证了列车正点运行，并因此可以减轻列检人员的体力劳动。

(5) 高摩擦系数合成闸瓦制动无火花，可避免长大坡道上车辆地板着火和森林地区制动火花而引起的火灾事故。

(6) 对车轮踏面磨耗小，且踏面很光亮。因此可延长轮对的使用寿命，和便于检查踏面上的擦伤、剥离、热裂和毛细裂纹^[33]。

(7) 高摩擦系数合成闸瓦的摩擦材料不导电或导电率很小，因此其磨屑不会使轨道电路短路和不会引起机车牵引电机的故障^[34]。

(8) 使用高摩擦系数合成闸瓦每年可节约数十万吨生铁。

(9) 高摩合成闸瓦的粘着利用效果好。

高摩擦系数合成闸瓦除了具有上述优点外，也存在一些缺点，导热系数低，大量摩擦热量需由轮对散去，故不良闸瓦会使轮对产生热裂：某些配方的高摩擦系数合成闸瓦在摩擦面上会产生金属镶嵌（即金属瘤），使车轮踏面产生磨耗^[35-36]。世界各国对此都有报道，同时都在采取各种方式力图改进，防止金属镶嵌的产生^[37]；此外，高摩擦系数合成闸瓦的强度较铸铁闸瓦低，因此搬运、安装和检查时要改变原来的操作习惯。

1.3.3 高摩合成闸瓦的摩擦磨损理论

(1) 摩擦理论

摩擦是普遍存在于自然界以及人类日常生活和生产劳动中的一种现象，研究这种现象的科学即为摩擦学（Tribology）。我国国家标准（GB2889—82）对摩擦学给出的定义为：关于做相对运动的相互作用表面的理论与实践的一门科学技术^[38]。曾经有多种理论来解释滑动摩擦中摩擦力产生的原因。

① 机械啮合论 此为古典摩擦理论，该理论认为任何物体表面总是凹凸不平的，当两个凹凸不平的表面接触时，就会凹凸交错彼此啮合，若发生相对运动时，

互相交错啮合的凹凸部位就要阻碍物体的运动。摩擦力就是所有这些啮合点切向阻力的总和。此理论适用于一般粗糙度表面，但无法解释当摩擦表面研磨达到极为光洁时，摩擦力反而上升的事实^[39]。

② 分子吸引论 此理论认为接触两表面上分子间的吸引力是产生摩擦的原因，它可以解释表面研磨达到极为光滑时，摩擦力上升的现象，因为此时接触两表面更为接近，分子间吸引力增大。

③ 分子-机械论 分子-机械论实际是上述机械啮合论和分子吸引论两个理论的综合，所以更全面和正确，也就是认为摩擦力是表面间机械啮合作用和表面间分子相互吸引作用所产生的切向阻力的总和。二十世纪三十四年代，Bowden和Tabor等人^[40]从机械-分子联合作用的观点出发，经过系统的实验研究，在研究金属与金属摩擦的基础上建立了较完整的粘着摩擦理论，对于摩擦磨损研究具有重要的意义。

④ 粘着论 粘着论认为摩擦阻力由两部分组成，即剪断固相焊合连接点的力和硬质微凸体在相对较软对偶表面上犁沟的阻力。前者为摩擦力的粘附分量 F_A ，后者为摩擦力的犁沟分量 F_P ：

$$F = F_A + F_P \quad (1.6)$$

以金属为例，在很大法向压力作用下，摩擦副中硬的或较韧的金属就会发生塑性变形，使真实接触面积增大，直至大到真实接触面积恰好能承受所加法向压力为止。因上述高压和变形将导致发生强烈的界面粘着，又称焊合。摩擦过程中，一方面要克服粘着点（焊合点）的粘附阻力，另一方面还要克服较硬的微凸体在相对较软对偶表面上的犁沟阻力。粘着论是在前3种理论基础上的进展，对树脂基摩擦材料的研究也很有指导意义。

（2）磨损理论

① 磨粒磨损 一对摩擦副相对滑动时，粗糙表面的硬质凸起或滑动摩擦面间硬质粒子划过摩擦对偶软表面，对软表面起犁削作用产生犁沟，即发生磨粒磨损^[41]。其中硬质凸起犁削造成的磨损称为二体磨粒磨损，摩擦面间硬质颗粒造成的磨损称为三体磨损。如果粘着磨损粒子保留在摩擦表面间，聚集长大并经过加工硬化作用，成为硬的粒子，也将导致磨粒磨损。磨粒磨损是最为普遍的磨损形式。

② 粘着磨损 摩擦材料与对偶在法向压力作用下，表面上微凸体受到很大的压应力，发生塑性变形，两接触表面将通过分子间的作用发生粘着。当摩擦材料与对偶相互滑动时，粘着点发生剪断破坏，如果两种材料之间的粘着力大于任一材料内在的结合力，这一材料表面上一些小颗粒将会从粘附到对偶表面上，造成磨损^[41]。

③ 疲劳磨损 疲劳磨损包括机械疲劳和热疲劳磨损。摩擦材料与其对偶相对

滑动时，在两者的接触区将产生很大的应力和塑性变形。在反复的交变应力下，摩擦材料与其对偶表面薄弱环节将会引发疲劳裂纹，并逐步扩展，最后以微细薄片形式断裂剥落下来。此外，摩擦过程中都伴随着材料表面层温度的升高，导致材料的热疲劳，长期反复的热应力作用，将加速材料表面裂纹的产生与扩展^[42]。

1.4 本研究的背景

1.4.1 我国货车采用高摩合成闸瓦的必要性

(1) 我国铁路货车提速技术发展概况

我国铁路货车提速技术发展起步较晚。自 20 世纪 90 年代中期开始，铁道部组织铁路货车设计、制造单位和有关科研院所着手提速货车及相关技术的研发工作，并积极引进、吸收国外先进的设计理念和技术，推出了转 K2 型、转 K4 型等满足 120km/h 运行速度要求的货车转向架^[43]。

① 1995 年，研制开发出转 K1 型货车转向架。运行速度达到 120km/h，在早期的 P65 型行包快运棚车上装车使用。

② 1997 年，借鉴欧洲 Y25 型转向架技术，研制开发了转 K3 型转向架。最高线路试验速度达到 140 km/h，并在 X1k 型集装箱平车上装车使用。

③ 1998 年，引进了美国交叉支撑转向架技术，以齐车公司为主的设计组研制了转 K2 型转向架。商业运行速度达到了 120km/h，并首先在 P65 型行包快运棚车上装车使用。

④ 1999 年，株洲车辆厂与美国 ABC—NACO 公司联合设计开发出转 K4 型转向架。商业运行速度达到 120km/h，2002 年起在通用货车上装车使用。

⑤ 1999 年，由齐车公司设计，在既有转 8A 型转向架基础上加装交叉支撑装置，定型为转 8AG 型转向架，其运行速度达到 100km/h。

⑥ 2003 年起，新造载重 60t 级货车全部装用满足提速要求的转 K2 型、转 K4 型转向架，并在车型后加标记“K”、“H”，商业运行速度达到 120km/h。

⑦ 2004 年开始，结合货车厂修对既有货车进行换装转 K2 型转向架 120km/h 的提速改造，当年完成 2 万辆。

(2) 货车提速改造制动系统及使用高摩合成闸瓦的必要性

随着铁路运输的不断发展，货车重量，速度不断增加，制动能随之加大，而闸瓦尺寸一直未变，因而闸瓦压力成倍增加，从而导致闸瓦磨耗加快。目前，每块闸瓦压力已接近 40kN，对铸铁闸瓦而言，其承受的压力已经达到了极限。如果使用铸铁闸瓦实现货车的提速，只能延长制动距离，此铸铁闸瓦本身固有的局限性（摩擦系数小，质量大，耐磨性差），难以满足快速货车的运用要求。

高摩合成闸瓦具有高摩擦系数合成闸瓦由于摩擦系数高，质量较轻，耐磨性

较好，可降低闸瓦压力，从而使车辆基础制动装置轻量化，并能节省一定的压缩空气，且摩擦系数可随需要而进行相应的配置，成本较低，而粉末冶金闸瓦对车轮的磨损较为严重，复合闸瓦成本较高，所以对高摩擦系数合成闸瓦的研制及使用势在必行。

1.4.2 本课题已有的研究和存在的问题

前期对高摩合成闸瓦中基体，增强体等进行了系统研究：

对树脂基体的研究表明，硼-腰果壳油双改性酚醛树脂具有良好的热性能，所制备的摩擦材料硬度较低，摩擦系数平稳，磨损量较小，因此适合作为树脂基摩擦材料的基体。采用化学溶液法改性丁腈橡胶制备的摩擦材料具有更好的摩擦磨损性能，且丁腈橡胶中 BMI 含量为 6% 的改性橡胶制备的摩擦材料具有最佳的摩擦磨损性能。

对钢纤维、紫铜纤维、黄铜纤维及钢纤维/紫铜纤维四种增强体系对摩擦材料的摩擦磨损性能的影响。结果表明，钢纤维增强的摩擦材料硬度较高，铜纤维增强效果没有钢纤维好，且由于铜纤维较易变形，其增强的摩擦材料硬度较低。紫铜纤维增强摩擦材料具有最高的摩擦系数及磨损量，黄铜纤维增强摩擦材料摩擦系数及磨损量最小，钢纤维增强的摩擦材料摩擦磨损居于前两者之间。钢纤维/紫铜纤维混合增强的摩擦材料具有较好的摩擦磨损性能。铜纤维增强的摩擦材料制动时的扭矩曲线有较大波动，钢纤维及钢纤维/紫铜纤维混合增强的摩擦材料扭矩曲线平缓，无较大波动。综合比较，钢纤维/紫铜纤维混合增强的摩擦材料具有较好的性能。

针对市售的钢纤维粗细不均衡，增强效果及对摩擦材料的摩擦磨损性能影响不同的缺点，提出将钢纤维分级，分别制备摩擦材料，比较其性能。结果表明，钢纤维为-60~+200 目范围制备的摩擦材料制动平稳，磨损量小，能满足聚合物基复合材料的增强纤维的要求。

由此得出了此项目的基本配方，但通过 1:1 台架实验，结果表明：125 公里初速制动距离为 1200 米，表明为实现制动距离小于 1000 米，所制得的闸瓦摩擦系数不够。

1.5 本论文研究目的及内容

在树脂基摩擦材料制备中，材料的选择和组合方式繁多。且不同的使用条件，对于树脂基体、增强填充组元的选择、组分及其制备加工技术都有一定影响。正确的选择树脂基复合材料，添加物的配方，进行合理的结构设计，以达到最佳的综合使用效果十分重要。

本文的研究目的是：在前期研究的基础上，调整各基体，填料等的配伍，找

到合适的配方，使之做出来的闸瓦到达该项目要求的各项指标。

本文主要研究了以下内容：

(1)研究树脂基摩擦材料中添加不同的组元比例对摩擦材料摩擦磨损性能的影响。主要是增减石墨，煨后焦， MoS_2 ，刚玉和铬铁矿等的比例。

(2)研究不同的基体比例对摩擦材料摩擦磨损性能的影响。主要是调整橡胶和树脂以及摩擦粉等的比例。

第 2 章 材料制备及实验方法

2.1 实验总体方案

树脂基摩擦材料一般由基体（树脂、橡胶及它们的各种改性物）、增强剂（石棉、玻璃纤维、钢纤维等纤维状填充材料）、摩擦性能调节剂（重晶石粉、粘土、长石粉等粉末状填充材料）三大部分组成。树脂及增强纤维对材料的摩擦磨损性能起决定性作用，在材料组成方面，本文主要研究了基体、填料等方面对摩擦材料摩擦磨损性能的影响。具体方案如下：

（1）通过改变硬质相填料的配伍，达到提高闸瓦的摩擦系数的目的，同时还要综合考虑闸瓦的磨耗、制动噪声等问题。通过对无机填料的分析，选用莫氏硬度为 9 的特硬质填料刚玉和莫氏硬度为 5 的中等硬质填料铬铁矿作为研究对象。改变它们在前期配方中的质量百分数，探讨其含量对闸瓦综合性能的影响。

（2）通过改变润滑相填料的配伍，比较它们的摩擦系数和制动扭矩曲线，并对填料进行硅烷偶联剂的表面处理，制备树脂基摩擦材料试样，与填料未进行表面处理的摩擦材料试样进行对比，探讨润滑相的含量及硅烷偶联剂对闸瓦综合性能的影响。

（3）通过改变基体及润滑相的种类和含量，比较它们的摩擦系数和制动扭矩曲线，使闸瓦性能达到该项目各项指标，完成项目。

2.2 实验原材料

1. 基体

海沃斯酚醛树脂：悬浮法，-200 目，济南圣泉化工有限公司生产。

丁腈橡胶：4002 交联型，结合丙烯腈 37~40%，挥发分 \leq 1%，-60 目，兰州石化研究院生产。

2. 增强纤维

钢纤维：DF00-3.5 型低碳钢纤维，平均直径 70~80 μ m，平均长度 3.5mm，南阳军龙公司生产。

硅灰石纤维：长径比 $>$ 18，黄石鑫溢矿产公司生产。

3. 填料

腰果壳油摩擦粉：NX-2020-30 型，丙酮抽提率 $<$ 6%，灰分 $<$ 2%，挥发分(370 $^{\circ}$ C) $<$ 35%，卡德莱化工（珠海）公司生产。

重晶石： $\text{BaSO}_4 > 93\%$ ，-325目，黄石鑫溢矿产公司生产。

沸石：-325目，黄石鑫溢矿产公司生产。

膨润土：-325目，黄石鑫溢矿产公司生产。

铬铁矿： $\text{Cr}_2\text{O}_3 38\sim 41\%$ ，-325目，黄石鑫溢矿产公司生产。

氧化锌：分析纯，市售。

Fe_2O_3 ：分析纯，市售。

石墨：鳞片石墨，-325目，市售。

煅后焦：-200目，市售。

MoS_2 ：分析纯，市售。

硅烷偶联剂

2.3 试样制备

采用二次压制工艺^[44]对材料进行压制成形，其工艺流程如图 2.1 所示。

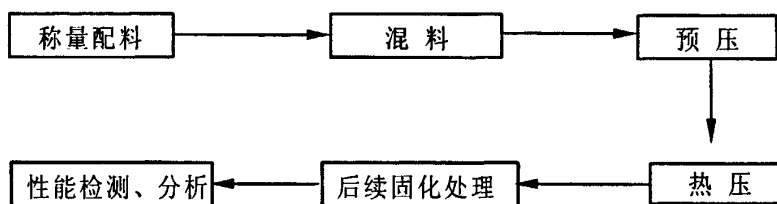


图 2.1 摩擦材料制备工艺流程

1 配料：在确定原料质量百分比后，按总量 100 克来换算，进行称量配料。

2 混料：为了防止原料在存放过程中难免会出现受潮的情况，在混料前需要把备料在 100°C 烘干 10 分钟左右，由于树脂在此温度下容易发生交联，所以在烘干时暂不加树脂，待烘干后再把树脂加进去均匀搅拌约 5 分钟。因为刚纤维很难混匀，所以等到其它原料混匀后，最后加进去，再次搅拌均匀。混料这一步骤很关键，如果混料不均匀会导致树脂与其它填料不能充分黏结，很大程度上影响了样品的性能。

3 预压：将原料混均匀后，进行一次预压，主要目的是使各种原料粉末进一步充分的黏结，减少制品压制及后处理过程中的起泡现象。采用的温度是 $120^\circ\text{C}\sim 160^\circ\text{C}$ 。

4.热压：热压过程中的压制温度、压制压力和保压时间对摩擦材料的最终性能有很大影响，被认为是成型工艺的三个最主要控制参数^[45]。热压时上模板温度控制在 $160^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ ，下模板温度控制在 $180^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ 。在压制过程中，压制压力需要一步步上调，分别为 5MPa、10MPa、15MPa、20MPa、25MPa，分五步压制。在压力为 5MPa、10MPa、15MPa 这三个阶段的保压时间都是 30 秒；20MPa 时保压 1 分钟；25MPa 时先保压 2 分钟再中间放气，接着再用 25MPa 的压力压制，这

期间保压 15~20 分钟。

5.后续固化处理：热处理工艺为 $120^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}+150^{\circ}\text{C}\times 2\text{h}+200^{\circ}\text{C}\times 10\text{h}$ 。

图 2.2 为二次压制工艺示意图。

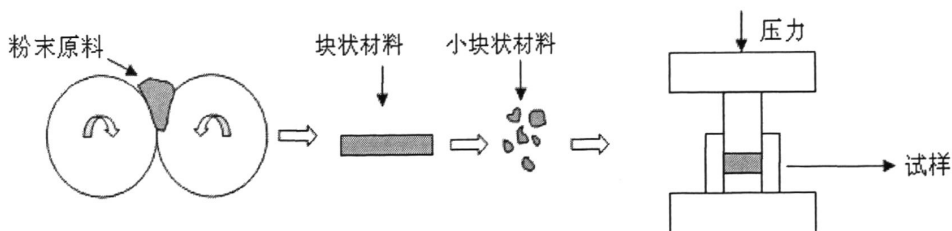


图 2.2 二次压制工艺示意图

图 2.3 为正常压制工艺下实验用的样品，表面平整无裂纹，图 2.4 为压制压力不足，造成样品在烧结后表面形成裂纹。



图 2.3 实验用正常样品

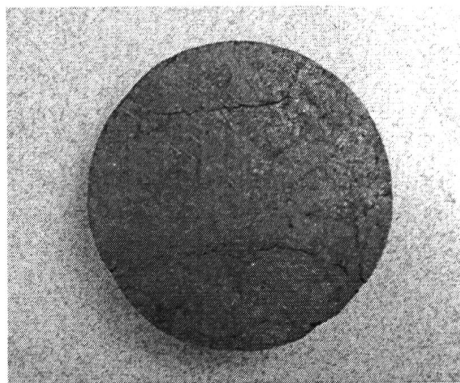


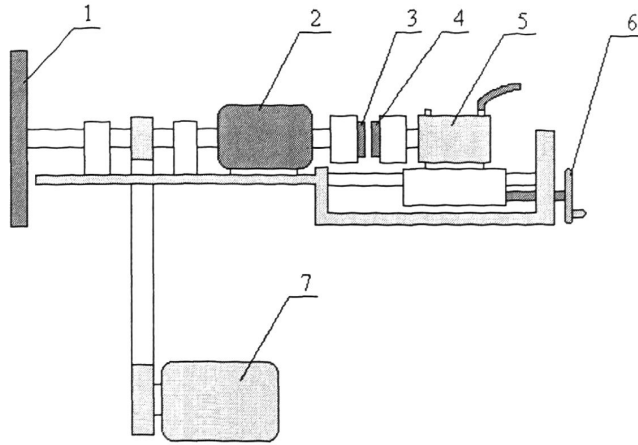
图 2.4 实验用开裂样品

2.4 摩擦材料性能测试方法

摩擦磨损性能测试

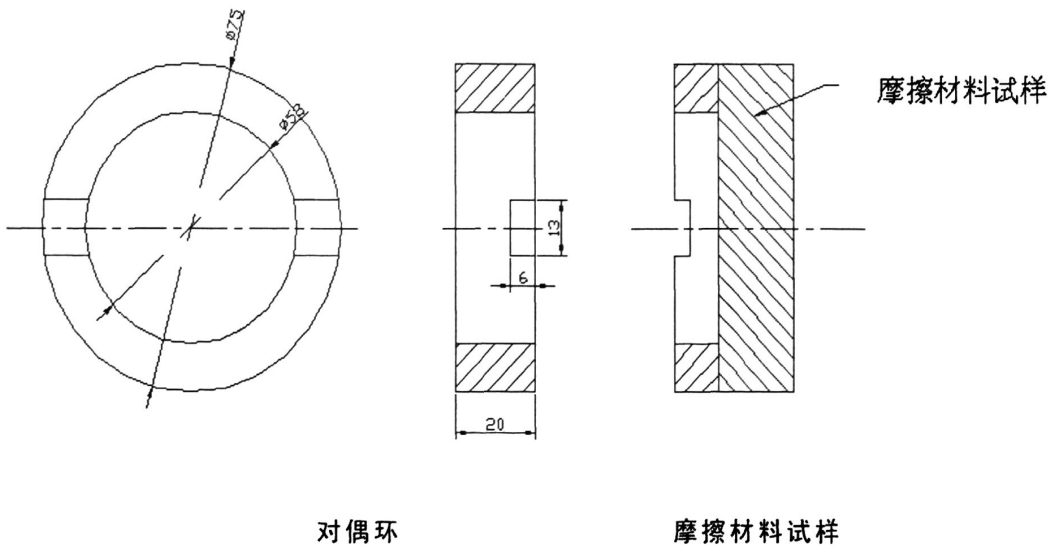
1 实验设备

本实验采用铸钢为对偶材料，实验在自制的 MM1000 摩擦磨损试验机上进行惯性制动实验，其结构如图 2.5 所示。该摩擦磨损试验机为环—环式配副，可改变转动惯量、制动速度和制动压力等参数，能够较好地模拟制动工况，考察摩擦副的制动性能。对偶环及摩擦材料试样尺寸如图 2.6 所示。



1.惯量飞轮 2.扭矩仪 3.铸钢对偶环 4.摩擦材料试样环
5.气缸 6.间距调节装置 7.三相电机

图 2.5 MM1000 试验机结构示意图



对偶环

摩擦材料试样

图 2.6 对偶环及摩擦材料试样

2 实验过程

实验选用 MM1000 摩擦磨损测试仪的飞轮转动惯量为 $0.1\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ ($1\text{Kgf}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^2$), 制动初速度 $6000\text{r}/\text{min}$, 制动压力为 0.36MPa 。摩擦材料试样直径 75mm , 对偶环外径 75mm , 内径 53mm 。在正式实验前, 依次在 $3000\text{r}/\text{min}$ 、 $4000\text{r}/\text{min}$ 、 $5000\text{r}/\text{min}$ 和 $6000\text{r}/\text{min}$ 的转速下制动磨合, 每一转速磨合 2 次。在正式实验中, 摩擦材料试样与对偶环制动 20 次, 每次制动后将试样冷却至室温, 再进行下一次制动。

模拟制动过程为: 首先启动电机, 电机带动对偶环高速旋转, 达到一定转速

后，使用离合器将电机动力脱离，然后开启电气阀，在气缸压力作用下使摩擦材料试样与对偶环贴合，实现制动目的。在此过程中，扭矩仪自动测出制动初速度和扭矩数据，并将数据输出给计算机。通过绘图软件可绘制出摩擦系数曲线图。使用此试验仪可测定出制动初速度、制动时间、摩擦副的摩擦系数和摩擦系数稳定性等。

3 实验数据的获得

(1) 摩擦系数 采用扭矩仪测量摩擦材料试样与对偶环之间的制动扭矩，并用公式 2.1 换算成摩擦系数。

$$\mu = \frac{M}{N \cdot r} \quad (2-1)$$

式中： M —摩擦力矩(N·m)；

N —加载载荷(N)；

r —摩擦回转半径(m)。

(2) 扭矩曲线 通过扭矩仪测量制动时间内的所有扭矩，并释放到计算机中，用特定的绘图软件绘制出扭矩随时间变化的曲线。

(3) 磨损量 摩擦材料试样磨损量的测量方法，是在摩擦材料试样侧面选取互呈 120° 的三个点，用精确度为 0.01mm 的外径千分尺测量制动前后的厚度值，三点的平均厚度差即为摩擦材料试样的磨损量。其值取 5 次摩擦后的磨损值。

(4) 压力和速度敏感性 对于摩擦材料来讲，在实际使用过程中希望在不同制动条件下都具有较为恒定的摩擦系数，因此摩擦系数的压力和速度敏感性是摩擦材料性能的重要评价指标。测试压力敏感性时，保持制动初速度为 4000r/min，考察压力分别为 0.32MPa、0.34MPa、0.36MPa、0.38MPa 和 0.4MPa 时的摩擦系数。每个点制动 3 次，取平均摩擦系数。测试速度敏感性时，保持恒定压力为 0.36MPa，考察速度分别为 3000r/min、4000r/min、5000r/min 和 6000r/min 时的摩擦系数。同样，每个点制动 3 次，取平均摩擦系数。

(5) 表面形貌 采用 FEI Quanta 200 环境扫描电镜 (SEM) 观察摩擦材料的摩擦表面形貌。

第 3 章 刚玉与铬铁矿对闸瓦试样摩擦系数的影响

3.1 引言

填料是组成摩擦材料的主要组分，包括多种摩擦性能调节剂和其他配合剂。其主要作用是对摩擦材料的摩擦磨损性能进行多方面调节，使摩擦材料制品—刹车片和离合器面片，能更好地满足各种工况条件下的制动和传动功能的要求。此外，还常常通过加用不同的填料来控制、调节摩擦材料制品的硬度、密度、结构密度、制品外观，以及改善制动噪音、降低制品成本等。

刚玉属高硬度填料，是增摩效果最有效的填料之一，故被摩擦材料行业广泛使用，特别有助于提高高温摩擦系数；铬铁矿粉具有较好的低温和高温增摩效果。在摩擦材料中常用的铬铁矿的 Cr_2O_3 含量为 25%~40%， Cr_2O_3 含量越高，增摩效果也越大，铬铁矿的颗粒度越大增摩效果越大。使用时应注意控制其用量和粒径，过多的用量和过粗的粒径固然能提高摩擦系数，但也会导致磨损明显增大。本实验选用的铬铁矿粉 Cr_2O_3 含量 38~41%，-325 目。由于前期研究摩擦系数较低，本章选用铬铁矿和刚玉，讨论它们对树脂基摩擦材料的摩擦磨损性能。

本章工作在前期闸瓦配方的基础上，针对台架试验表明的摩擦系数较低的问题，对填料中的硬质相进行配伍改造，使闸瓦的摩擦系数提高 20%~30%。要求不改变现有配方的组成，通过对其中的硬质相填料（铬铁矿、刚玉）含量的调整，达到提高摩擦系数的目的，同时比较闸瓦的磨损和制动现象，探求最适合闸瓦的树脂基摩擦材料增强体系。

3.2 铬铁矿对摩擦磨损性能的影响

为简化研究过程，保持摩擦材料其它配料的组分不变，仅改变硬质相填料（铬铁矿）的含量，研究它们对摩擦材料综合性能的影响，表 3.1 为试验的配方设计。

表 3.1 添加铬铁矿树脂基摩擦材料的组成成分

树脂基体	钢纤维	硅灰棉	重晶石	铬铁矿	刚玉	氧化铁	其它填料
(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(wt%)
15~30	35~45	5~10	8~15	5~10	0	3~8	15~25

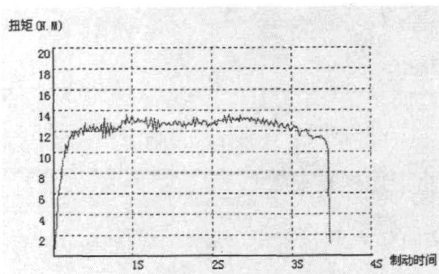
不同硬质相填料制备的摩擦材料的试样编号及含量如表 3.2 所示。

表 3.2 添加铬铁矿摩擦材料试样编号及含量

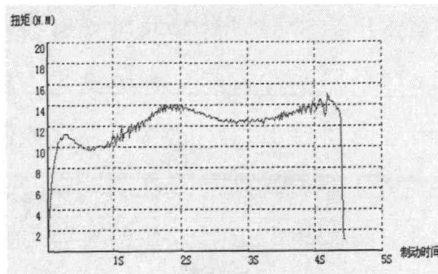
试样编号	A1	A2	A3	A4	A5
铬铁矿(wt%)	6	7	8	9	10

3.2.1 扭矩曲线

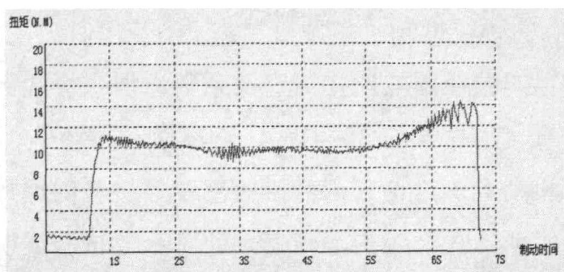
图 3.1 为试样 A1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a) 制动初速度 4000r/min



(b) 制动初速度 5000r/min

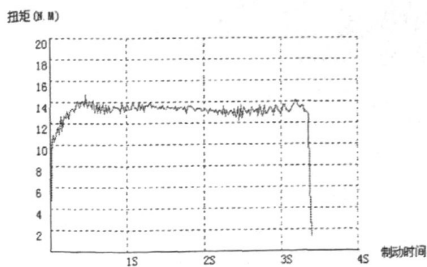


(c) 制动初速度 6000r/min

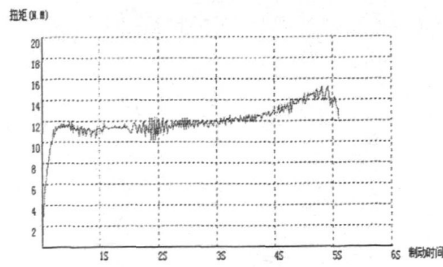
图 3.1 试样 A1 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.1 可看出, A1 在低制动初速度下, 测得的摩擦系数较高, 曲线很平稳, 制动噪声很小; 在中等制动初速度下, 测得的摩擦系数还是维持在较高水平, 但摩擦曲线出现波动, 中间出现了两次“塌腰”, 制动噪声较小; 在高制动初速度下, 摩擦系数很低, 在曲线末端呈上扬趋势(说明在接近最低转速时摩擦系数高于测得的平均水平), 由于平均摩擦系数太低, 达不到实验要求。

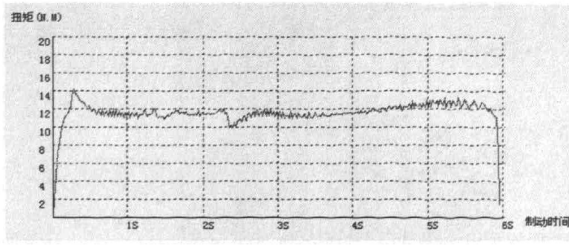
图 3.2 为试样 A2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a) 制动初速度 4000r/min



(b) 制动初速度 5000r/min

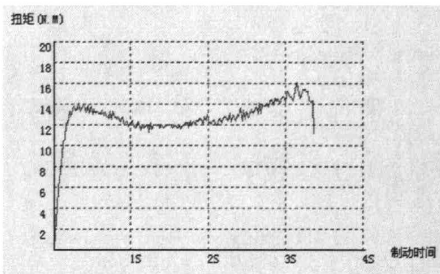


(c)制动初速度 6000r/min

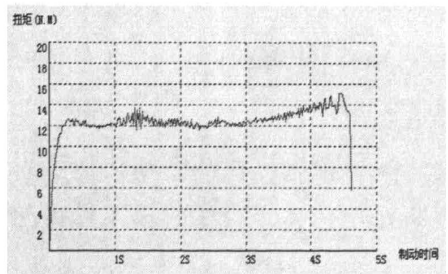
图 3.2 试样 A2 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.2 可看出, A2 在低制动初速度下, 测得的摩擦系数很高, 曲线很平稳, 制动噪声很小; 在中等制动初速度下, 测得的摩擦系数维持在较高水平, 且摩擦曲线较平稳, 制动噪声较小, 虽然末端出现小幅度的上扬, 但总体效果比较理想; 在高制动初速度下, 测得的摩擦系数比较理想, 摩擦曲线较平稳, 制动噪声较小, 达到实验要求。

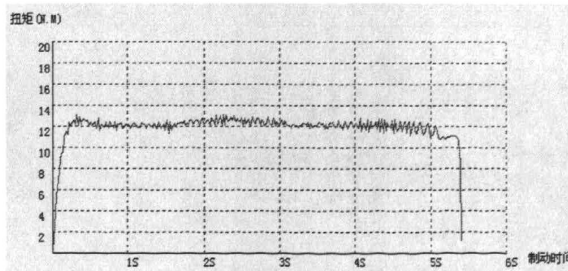
图 3.3 为试样 A3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 4000r/min



(b)制动初速度 5000r/min

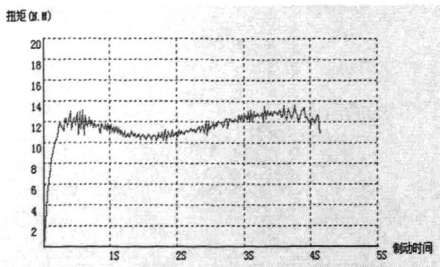


(c)制动初速度 6000r/min

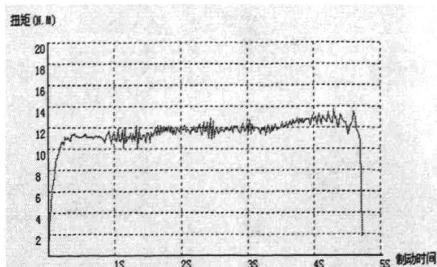
图 3.3 试样 A3 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.3 可看出, A3 在低制动初速度下, 测得的摩擦系数很高, 曲线有波动, 制动噪声较小; 在中等制动初速度下, 测得的摩擦系数还是维持在高水平, 基本和低转速制动时测得的结果持平, 且摩擦曲线平稳, 噪声保持在较低水平, 总体效果好; 在高制动初速度下, 测得的摩擦系数依然保持很高的水平, 摩擦曲线相当平稳, 制动噪声较小, 总体效果很好, 达到实验要求。

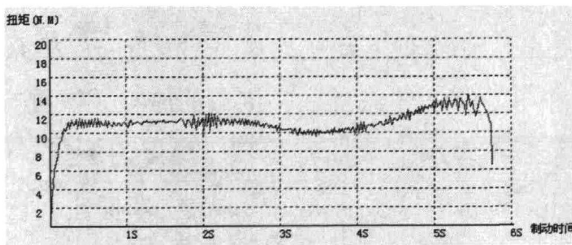
图 3.4 为试样 A4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 4000r/min



(b)制动初速度 5000r/min

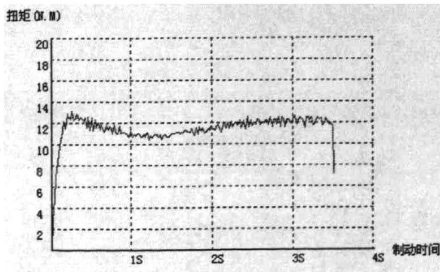


(c)制动初速度 6000r/min

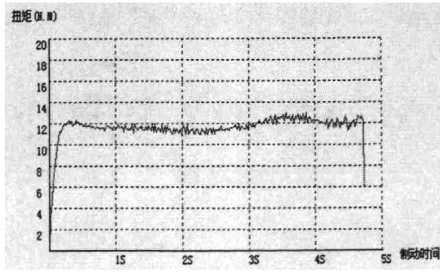
图 3.4 试样 A4 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.4 可看出，A4 在低制动初速度下，测得的摩擦系数较低，曲线不够平稳，制动噪声稍大；在中等制动初速度下，测得的摩擦系数一般，摩擦曲线很平稳，噪声稍大；在高制动初速度下，测得的摩擦系数低，摩擦曲线出现“塌腰”，制动噪声稍大，总体效果不够理想。

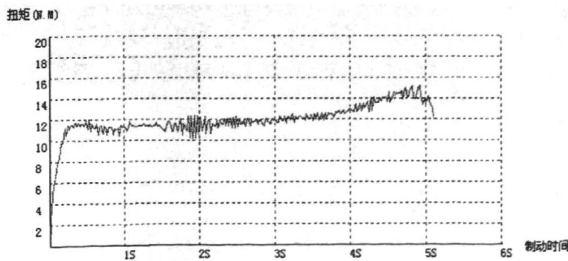
图 3.5 为试样 A5 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 4000r/min



(b)制动初速度 5000r/min



(c)制动初速度 6000r/min

图 3.5 试样 A5 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.5 可看出, A5 在在较低的制动初速度下, 测得的摩擦系数低, 曲线稍有波动, 制动噪声较大; 在中等制动初速度下, 测得的摩擦系数一般, 摩擦曲线很平稳, 但噪声较大; 在高制动初速度下, 测得的摩擦系数较低, 摩擦曲线末端有轻微的上扬, 制动噪声较大, 达不到实验要求。

3.2.2 摩擦系数及磨损

表 3.3 为加入铬铁矿的各试样和原配方试样摩擦系数的比较:

表 3.3 不同含量铬铁矿的试样和原配方试样在各转速下的摩擦系数

试样	制动转速 4000r/min	制动速度 5000r/min	制动速度 6000r/min
A1	0.342	0.341	0.266
A2	0.371	0.339	0.327
A3	0.360	0.351	0.337
A4	0.325	0.327	0.314
A5	0.324	0.329	0.305
原配方	0.342	0.306	0.297

表 3.4 为加入铬铁矿的各试样和原配方试样磨损的比较:

表 3.4 不同含量铬铁矿的试样和原配方试样的磨损

试样	试样磨前 (mm)	试样磨后 (mm)	磨损 (mm)	平均每次磨损 (mm)
A1	24.783	24.708	0.075	0.015
A2	24.498	24.422	0.076	0.015
A3	25.232	25.146	0.086	0.017
A4	25.007	24.898	0.109	0.022
A5	24.749	24.623	0.126	0.025
原配方	24.627	24.562	0.065	0.013

*注: 表 3.4 的数值均为摩擦试样上取互呈 120° 的三个点的平均值。

由表 3.3 和表 3.4 可以看出: A1 试样虽然磨损较小, 但在高制动初速度下的摩擦系数太低, 且摩擦曲线不够平稳, 不能达到实验要求; A2 试样摩擦曲线较平稳, 在高速制动速度下的摩擦系数比较理想, 而且磨损和制动噪声也较小; A3 试样在高制动初速度下的摩擦系数仍能保持很高的系数, 摩擦曲线在这种情况下还保持特别平稳, 磨损较 A1、A2 稍大, 制动噪声也满足要求; A4 和 A5 试样在各个制动初速度下的摩擦系数相比 A3 试样要低, 它们高速制动下的摩擦曲线相对出现波动, 磨损和制动噪声较以上三个试样都要大。通过综合分析得出 A2、A3 的效果较佳, A3 最佳。

3.3 刚玉对摩擦磨损性能的影响

为简化研究过程，固定摩擦材料其它配料的含量，仅仅改变硬质相填料（刚玉）的含量，研究它们对摩擦材料综合性能的影响，表 3.5 为试验的配方设计。

表 3.5 树脂基摩擦材料的组成成分

树脂基体 (wt%)	钢纤维 (wt%)	硅灰棉 (wt%)	重晶石 (wt%)	刚玉 (wt%)	氧化铁 (wt%)	其它填料 (wt%)
15~30	35~45	5~10	8~15	1~5	3~8	15~25

不同硬质相填料制备的摩擦材料的试样编号及含量如表 3.6 所示。

表 3.6 摩擦材料试样编号

试样编号	B1	B2	B3	B4
刚玉 (wt%)	2	3	4	5

3.3.1 扭矩曲线

图 3.6 为试样 B1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

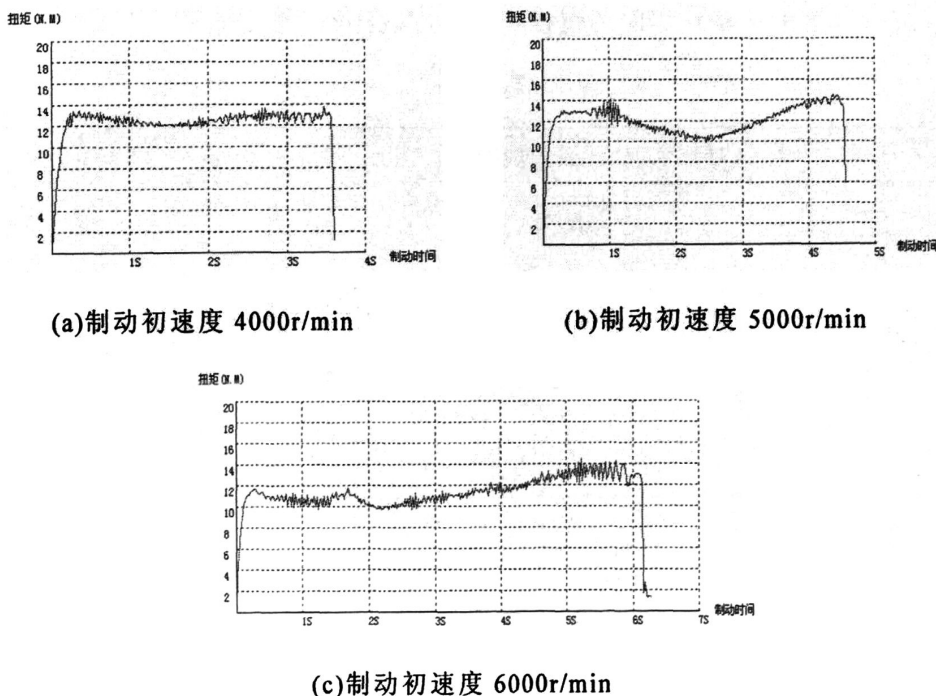
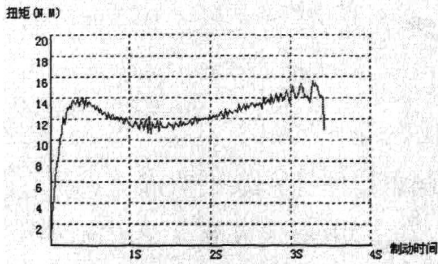


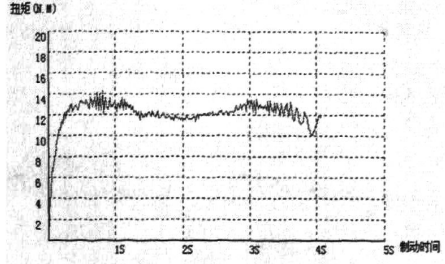
图 3.6 试样 B1 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.6 可看出，B1 在低制动初速度下，测得的摩擦系数一般，曲线很平稳，制动噪声稍大；在中等制动初速度下，测得的摩擦系数较高，摩擦曲线较大波动，“塌腰”明显，噪声稍大；在高制动初速度下，测得的摩擦系数不理想，摩擦曲线相对平稳，制动噪声较大，总体效果不理想。

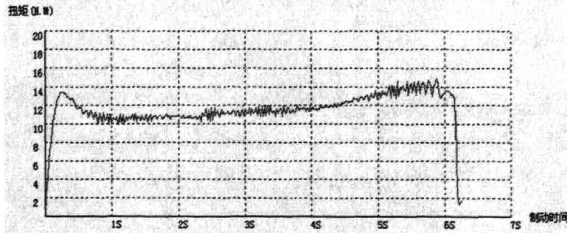
图 3.7 为试样 B2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a) 制动初速度 4000r/min



(b) 制动初速度 5000r/min

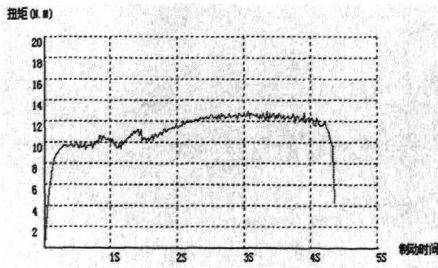


(c) 制动初速度 6000r/min

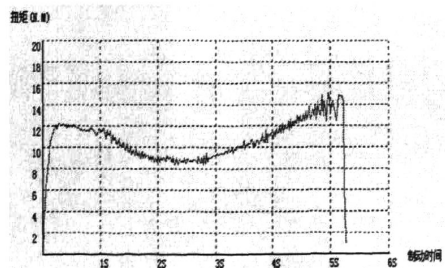
图 3.7 试样 B2 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.7 可看出，B2 在低制动初速度下，测得的摩擦系数较高，曲线稍有波动，制动噪声稍大；在中等制动初速度下，测得的摩擦系数较高，摩擦曲线平稳，噪声稍大，总体效果理想；在高制动初速度下，测得的摩擦系数比较理想，摩擦曲线平稳，制动噪声较大，基本达到实验要求。

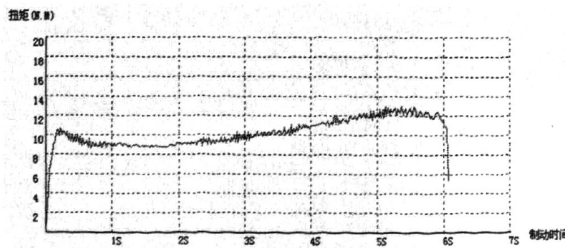
图 3.8 为试样 B3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a) 制动初速度 4000r/min



(b) 制动初速度 5000r/min



(c) 制动初速度 6000r/min

图 3.8 试样 B3 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.8 可看出, B3 在较低的制动初速度下, 测得的摩擦系数低, 曲线有很大波动, 制动噪声大, 而且在制动过程中出现较大的成圈火花; 在中等制动初速度下, 测得的摩擦系数很低, 摩擦曲线出现大范围“塌腰”, 噪声很大, 在制动过程中出现成圈火花; 在高制动初速度下, 测得的摩擦系数仍然很低, 摩擦曲线末端出现小幅度上扬, 制动噪声很大, 在制动过程中出现成圈火花的同时还有黑烟冒出, 达不到实验要求。

图 3.9 为试样 B4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

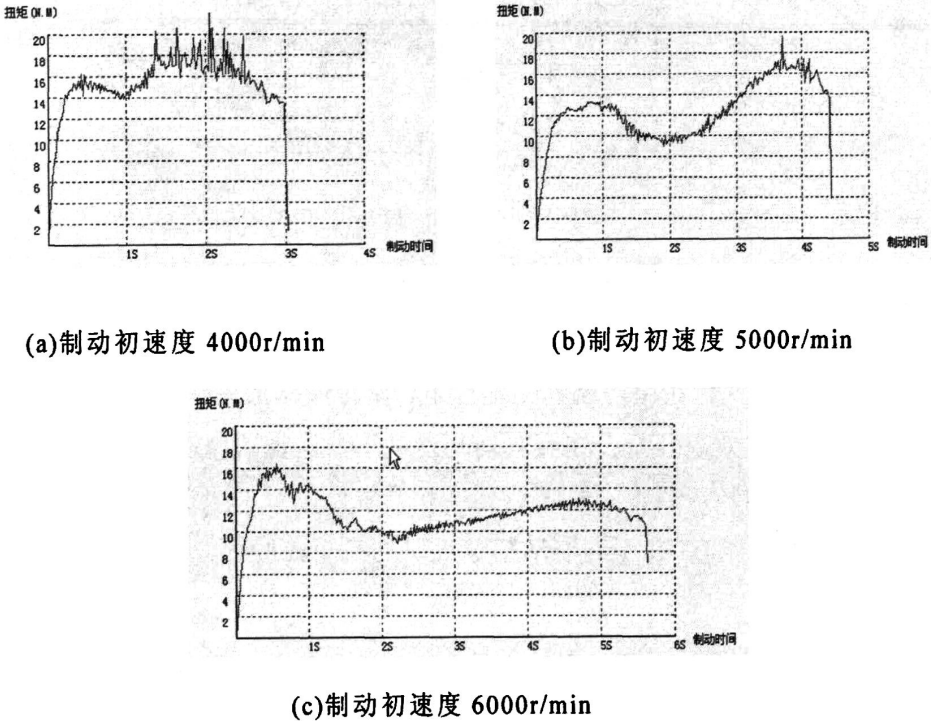


图 3.9 试样 B4 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 3.9 可看出, B4 在低制动初速度下, 测得摩擦系数出现异常高的情况, 曲线出现异常波动, 噪声极大, 且在制动过程中火花明显, 样品中的钢纤维被严重拔出; 在中等制动初速度下, 摩擦曲线出现大范围波动, 噪声极大, 在制动过程中出现火花和浓烟; 在高制动初速度下, 摩擦曲线依然出现不规则波动, 噪声极大, 火花明显。

3.3.2 摩擦系数及磨损

表 3.7 为加入刚玉的各试样和原配方试样的摩擦系数比较:

表 3.7 不同含量刚玉的试样和原配方试样在各转速下的摩擦系数

试样	制动转速 4000r/min	制动速度 5000r/min	制动速度 6000r/min
B1	0.348	0.338	0.316
B2	0.353	0.341	0.327
B3	0.314	0.300	0.290
B4	0.434	0.352	0.330
原配方	0.342	0.306	0.297

表 3.8 为加入刚玉的各试样和原配方试样磨损的比较：

表 3.8 不同含量刚玉的试样和原配方试样的磨损

试样	试样磨前 (mm)	试样磨后 (mm)	磨耗 (mm)	平均每次磨耗 (mm)
B1	24.692	24.603	0.089	0.018
B2	24.901	24.802	0.099	0.020
B3	25.011	24.869	0.142	0.028
B4	24.903	24.749	0.154	0.031
原配方	24.627	24.562	0.065	0.013

*注：表 3.8 的数值均为摩擦试样上取互呈 120° 的三个点的平均值。

由表 3.7 和表 3.8 可以看出：B1 试样虽然磨损比较理想，但在高制动初速度下的摩擦系数稍低，且制动噪声较大，不达到实验要求；B2 试样在高制动初速度下的摩擦系数和磨损都达到实验要求，摩擦曲线平稳，制动噪声较大；B3 试样在制动过程中出现较大的成圈火花，摩擦曲线出现很大波动，噪声很大，在高制动初速度下，测得的摩擦系数很低，在制动过程中还有黑烟冒出，而且磨损量很大，试验配方效果不佳。B4 试样在较低的制动初速度下，测得的摩擦系数出现异常高的情况，在各个制动速度阶段，曲线出现不规则的异常波动，制动噪声极大，而且在制动过程中火花四溅和冒出浓烟，样品表面被严重损坏，钢纤维被严重拔出，磨损严重超标，没有达到实验要求。通过综合分析得出 B2 的效果相对较佳。

3.4 结果分析

闸瓦的主要性能要求是在高速制动时仍能保持较高的摩擦系数，本研究中要求在 0.32~0.35 之间，同时磨损控制在平均每次 0.01mm~0.02mm 为佳，且测得的扭矩曲线要保持较平稳，制动噪声还要控制在一定范围内。

(1) 通过对上述试样在不同制动转速测得的摩擦系数的比较，可以看出随着硬质相填料含量的增加可以在一定程度上提高闸瓦的摩擦系数。从表 3.3 和表 3.7 可以看出，同一个配方制动初速度越高，摩擦系数越低，这符合经验关系式^[46]：

$$\mu = \mu_0 e^{-cv} \quad (3-1)$$

式中 μ_0 为静摩擦系数, v 是速度, c 是常数。这是因为提高摩擦材料与摩擦面之间的相对滑动速度, 可以增加摩擦膜的厚度, 这样就降低了摩擦系数^[47]。上述九个试样都符合此规律。

(2) 由表 3.3 和表 3.7 可以看出: 随着硬质相填料含量的不断增加, 在同样的制动初速度下, 摩擦系数出现了先上升后下降的现象。这可能是因为随着硬质相填料含量的增加, 填料比表面积不断增大, 当硬质相填料达到一定含量而又混料十分均匀时, 几乎不存在任何较厚的树脂层, 大量存在的是包覆于刚纤维、硬质相填料组分上的薄薄一层树脂膜, 有利于提高摩擦材料的摩擦系数和稳定扭矩曲线。填料含量继续增加时, 摩擦材料中的钢纤维和其它填料不能很好连接在一起, 摩擦系数降低。树脂浸渍纤维不均匀, 容易产生局部应力集中, 导致摩擦系数不稳定。对于 B4 试样出现的异常现象, 可能是由于刚玉的含量过高, 树脂不能满足它们的充分黏结, 又因为刚玉的硬度很高, 容易导致钢纤维的拔出, 试样本身强度和表面遭到严重破坏的缘故。

(3) 由表 3.4 和表 3.8 可以看出: 随着同一种硬质相填料含量的增加, 磨损失量基本上也是随着增加。原因是当所添加的填料过多时, 不能使其和树脂进行充分均匀的黏结, 造成组分间结合强度低, 组分材料容易脱落, 磨损率增大。树脂基摩擦材料的磨损包含了剥层磨损、磨粒磨损和粘着磨损、疲劳磨损和热磨损五种磨损机制。S. K. Rhee^[48]建立了树脂基摩擦材料在不同温度下的磨损公式。在摩擦温度低于 230℃ 时, 认为磨损机制主要是磨粒磨损和粘着磨损, 此时的磨损量为:

$$\Delta W = KP^a V^b t^c \quad (3-2)$$

式中, ΔW 为体积磨损量; P 为法向压力; V 为滑动速度; t 为摩擦时间; K 、 a 、 b 和 c 为与摩擦温度、材料种类相关的试验常数。在高温摩擦时, 由于树脂的热分解, 其分解活化能对磨损有较大的影响, 热磨损为主要磨损机制, 此时的磨损量为:

$$\Delta W = \beta P^a V^b t^c e^{(-E/RT)} \quad (3-3)$$

式中, β 、 a 、 b 、 c 为常数; E 为摩擦材料的活化能, 对应于树脂基体热分解的活化能; T 为摩擦时的绝对温度。

(4) 铬铁矿在稳定摩擦系数和扭矩曲线平稳性方面比刚玉要好, 因为刚玉的硬度比铬铁矿要高, 在摩擦制动过程中造成钢纤维的脱落或拔出的可能性要比铬铁矿大, 所以刚玉对摩擦系数的稳定性和扭矩曲线平稳性产生的影响要比铬铁矿大。同样原因, 加入刚玉的试样在制动时产生的噪声也比加入铬铁矿的试样要大。

3.5 本章结论

通过使用 MM1000 摩擦磨损试验机对试样测得的扭矩曲线、摩擦系数、磨损量的综合分析，得出以下结论：

(1) 增加硬质相填料铬铁矿、刚玉的含量，都能在一定程度上提高闸瓦的摩擦系数，磨损量也相应增加。

(2) 铬铁矿的含量少于 7% 时，试样在高制动初速度下测得的摩擦系数较低；高于 8% 时，在各个制动初速度下的摩擦系数均低于含量为 7%~8% 的试样，而且磨耗稍大。铬铁矿的含量控制在 7%~8% 之间时试样的摩擦磨损性能较好，在高制动初速度下的摩擦系数有较大的提高，且摩擦曲线很平稳，制动噪声较低，基本达到了实验的预期目标。

(3) 加入少量的刚玉能提高闸瓦的摩擦系数，但效果不很明显。刚玉含量在 3% 较佳，摩擦曲线较平整，制动噪音和磨损在允许范围内。

第 4 章 石墨与煅后焦对闸瓦摩擦性能的影响

4.1 引言

为改善聚合物的摩擦学性能，人们进行了大量的尝试。把润滑剂与聚合物复合，在摩擦过程中固体润滑剂逐渐转移进入摩擦界面而起润滑作用，这样可提高聚合物复合材料的摩擦学性能—降低摩擦系数、提高耐磨性。聚合物改性中常用的固体润滑剂填料是 PTFE、MoS₂、石墨、聚烯烃类润滑剂等。固体润滑剂填料之所以具有抗磨减摩作用是因为在滑动过程中摩擦界面上形成了低剪切强度的转移膜。

此前选用铬铁矿和刚玉，很好的起到了增摩效果，但是材料制动噪音和磨损较大。本章的主要目标是添加润滑剂降低树脂基摩擦材料的摩擦系数，找到合适的润滑剂及含量，并通过对填料进行硅烷偶联剂的表面处理，改善材料的综合性能。

4.2 石墨、煅后焦的影响

保持摩擦材料其它配料组分不变，仅改变润滑相填料（石墨、煅后焦）的含量，研究它们对摩擦材料综合性能的影响，表 4.1 为试验的配方设计。

表 4.1 添加石墨、煅后焦树脂基摩擦材料的组成成分

树脂基体 (wt%)	钢纤维 (wt%)	硅灰棉 (wt%)	重晶石 (wt%)	铬铁矿 (wt%)	氧化铁 (wt%)	其它填料 (wt%)	润滑剂 (wt%)
15~25	30~50	5~10	10~15	5~10	4~8	8~14	1~5

采用二次成型方法在第一阶段制备石墨、煅后焦的 6 种树脂基摩擦材料试样，不同润滑组元及含量（质量百分含量）的试样编号如表 4.2 所示。

表 4.2 添加石墨、煅后焦摩擦材料各试样的润滑组元及含量

润滑组元	A	B	C	D	E	F
石墨(wt%)	2	3	5			
煅后焦(wt%)				2	3	5

4.2.1 扭矩曲线

图 4.1 为试样 A 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

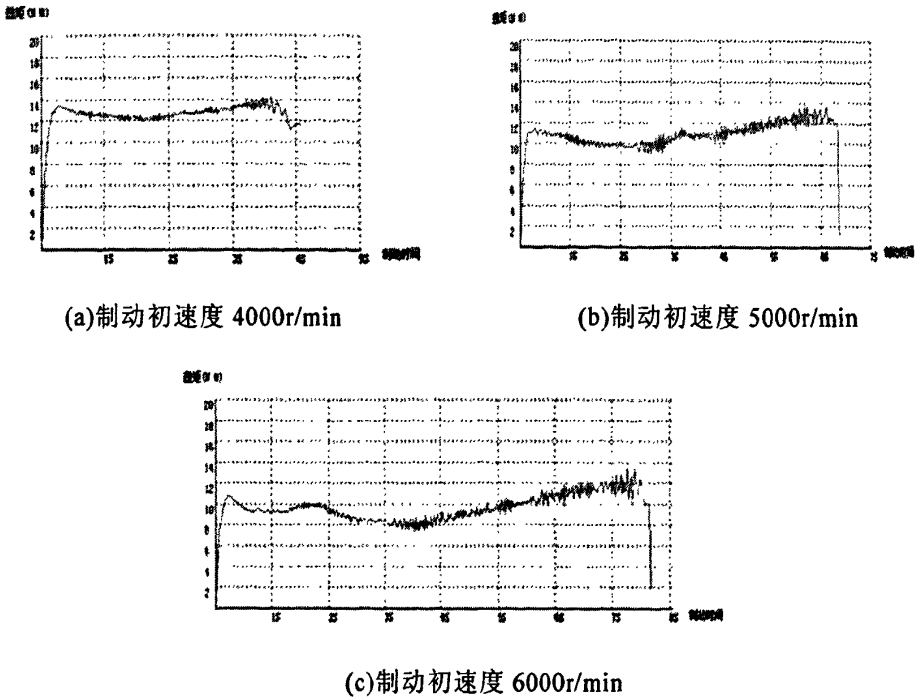


图 4.1 试样 A 分别在不同制动初速度时的扭矩曲线图

图 4.2 为试样 B 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

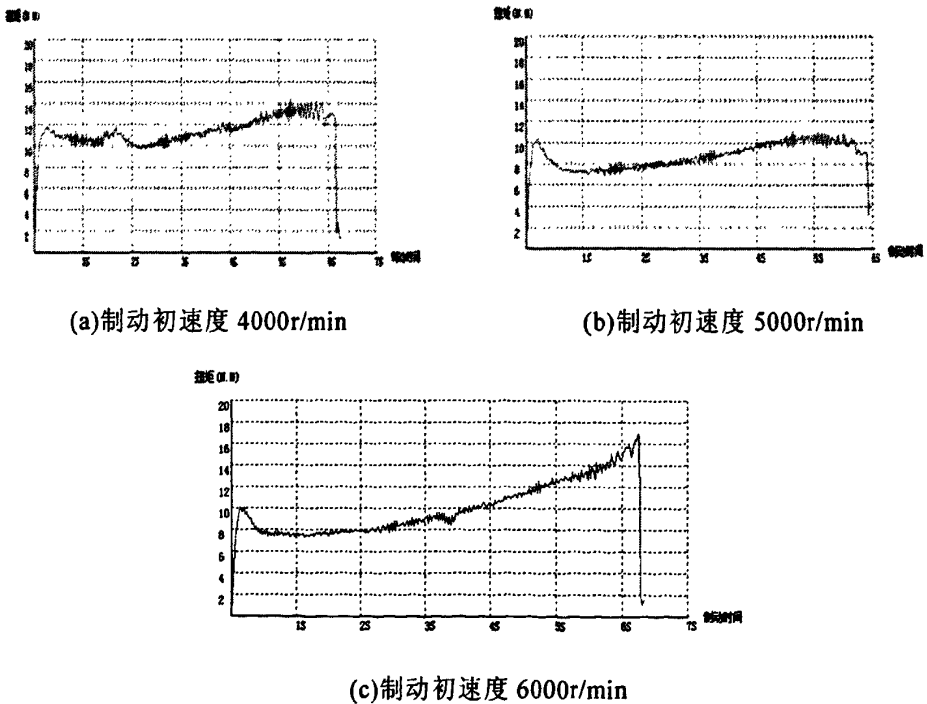
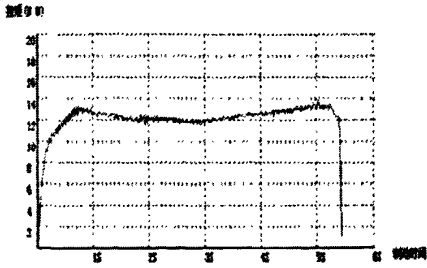
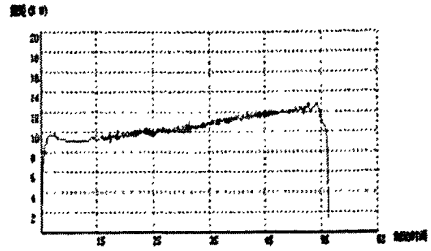


图 4.2 试样 B 分别在不同制动初速度时的扭矩曲线图

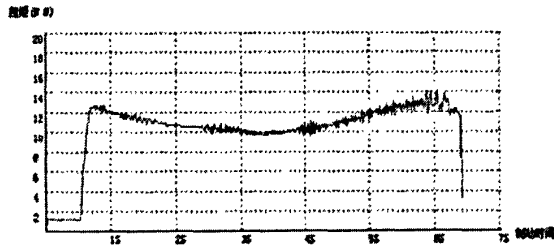
图 4.3 为试样 C 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 4000r/min



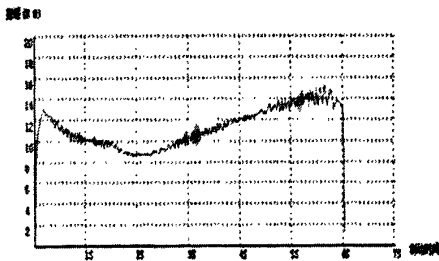
(b)制动初速度 5000r/min



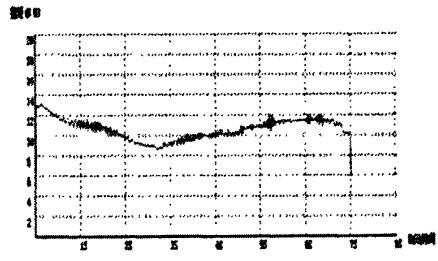
(c)制动初速度 6000r/min

图 4.3 试样 C 分别在不同制动初速度时的扭矩曲线图

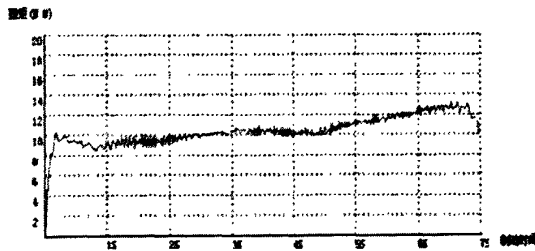
图 4.4 为试样 D 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 4000r/min



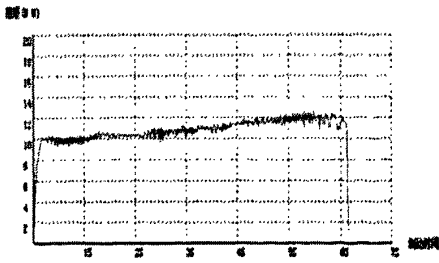
(b)制动初速度 5000r/min



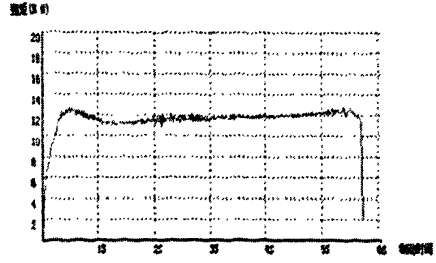
(c)制动初速度 6000r/min

图 4.4 试样 D 分别在不同制动初速度时的扭矩曲线图

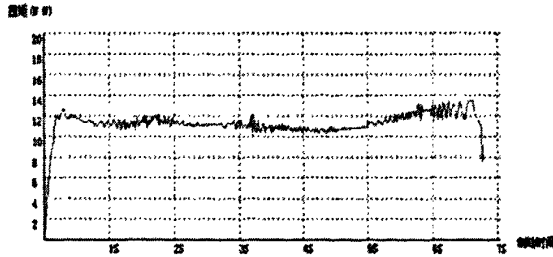
图 4.5 为试样 E 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 4000r/min



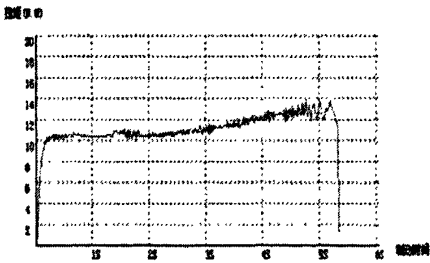
(b)制动初速度 5000r/min



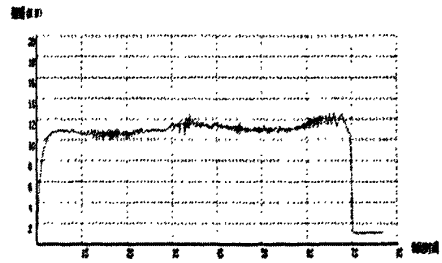
(c)制动初速度 6000r/min

图 4.5 试样 E 分别在不同制动初速度时的扭矩曲线图

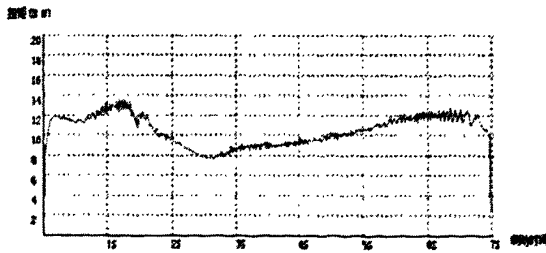
图 4.6 为试样 F 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 4000r/min



(b)制动初速度 5000r/min



(c)制动初速度 6000r/min

图 4.6 试样 F 分别在不同制动初速度时的扭矩曲线图

图 4.1~4.6 分别为试样 A、B、C、D、E、F 在不同的制动初速度下的制动扭矩曲线。从其制动扭矩曲线图可以看出：同一试样高速下的扭矩基本上低于低速，而摩擦系数正比于扭矩，即高速时摩擦系数低于低速，这是由于随着转速的增加，

温度升高,引起摩擦材料产生热衰退性,使系数减低。就稳定性而言,试样 A 的曲线在低速时很平稳,但是随着转速的提高,曲线在制动的后期都有上扬的现象;试样 B 曲线的情况和 A 相似,也是在高转速的制动后期曲线上扬更加明显;试样 C 的曲线在低速和中速时都还是比较平稳,但是在高速时曲线出现了塌腰的现象;试样 D 的曲线不管是在低速、中速还是高速曲线都有塌腰的现象,特别是在低速时这种现象很明显;而试样 E 的曲线不管是在低速、中速还是高速,曲线都比较平稳;试样 F 的曲线在低速和中速时都还比较平稳,可是在高速时曲线有比较多的波动,这在制动过程中是不好的现象,因为这样会使货车在制动过程不平稳,并且在制动过程中有很大的制动噪音,烟尘也较大。

4.2.2 摩擦系数及磨损

表 4.3 为石墨、煅后焦摩擦材料试样在不同制动初速度下的平均摩擦系数。由表 4.3 可看出,随着石墨含量的增加,摩擦材料试样的摩擦系数均呈下降态势,并且在高制动初速度时摩擦系数较低。随着煅后焦含量的增大,摩擦材料试样的摩擦系数开始呈下降趋势,当含量达到 5%时,摩擦系数回升。在高制动初速度下摩擦系数较高;在不同制动初速度下,加入煅后焦的树脂基摩擦材料的摩擦系数变化比较平稳,没有太大的波动。

表 4.3 石墨、煅后焦摩擦材料试样在不同制动初速度下的平均摩擦系数

试样编号	4000r/min	5000r/min	6000r/min
A	0.344	0.324	0.295
B	0.337	0.318	0.295
C	0.320	0.281	0.274
D	0.339	0.327	0.310
E	0.325	0.314	0.305
F	0.348	0.329	0.348

试样的磨损量如表 4.4 所示。

表 4.4 石墨、煅后焦摩擦材料试样的磨损量

试样	A	B	C	D	E	F
磨损 (mm)	0.028	0.020	0.018	0.032	0.025	0.031

*注:表 4.4 的数值均为摩擦试样上取互呈 120° 的三个点在 6000r/min 下磨合 10 次后的平均值。

由表 4.4 可知随着石墨含量的增加,试样的磨损量递减,这是由于石墨材料润滑作用。而添加煅后焦的试样,随着煅后焦含量的增加磨损先降后增,这是由于煅后焦具有多气孔结构,吸附了高温粘结剂分解产生的小分子气体和油状物,

使得摩擦系数降低，导致磨损下降，随着煨后焦的增加，使得基体产生了过恢复，增大了摩擦系数，导致磨损量上升。

4.2.3 结果分析

随制动初速度增大，所有摩擦材料试样的摩擦系数均呈下降趋势，这与酚醛树脂的粘弹性有关^[49]。树脂的链状结构决定其在受到外力作用时，既表现出弹性形变又表现出粘性形变的性质，即为树脂的粘弹性。树脂基体的粘弹性会导致树脂基摩擦材料的摩擦系数随着载荷、速度和温度的不同在一个较大范围内变动。但是在树脂基摩擦材料中添加石墨比添加煨后焦摩擦系数下降的快，特别是在高转速时，添加石墨的树脂基摩擦材料摩擦系数很低，并且当石墨含量比较高时，在高转速下制动有较大的烟尘；而添加煨后焦的树脂基摩擦材料在高转速时还是有比较好的摩擦系数。

石墨材料润滑作用的内在本质是其层状的晶体结构。当受到与层平等方向的剪切力时，层与层之间容易滑动，因而鳞片石墨摩擦系数低，并且因滑动而分裂的微片石墨鳞片，极易在衬片与对偶表面形成连续的光滑的碳质转移膜，起到降低磨损的作用；然而当温度过高时，由于黏结剂的热分解等作用，就会转化为引起摩擦材料的热衰退，所以石墨含量为 5% 的试样在高转速时曲线出现塌腰现象；而且石墨的浸润型不良。鳞片状石墨是天然矿产品，其含碳量、鳞片大小、二氧化硅等硬杂质含量，会因矿藏不同而不同，在摩擦材料使用过程中可能会产生制动噪音和划伤对偶等副作用^[50]。

煨后焦是以生焦为原料，经高温煨烧而得到的产品。它具有多气孔结构，易在摩擦材料和对偶表面形成转移膜，有较强的吸附性，能与粘结剂产生较强的粘结作用，吸附高温粘结剂分解产生的小分子气体和油状物，起到减磨、稳定摩擦系数、减少热衰退、增强恢复性能的作用。同时也能吸收和缓冲因制动作用产生的机械震动和冲击，起到阻尼器的作用，提高摩擦材料的制动舒适度、抑制制动噪音。由于其气孔度较好，与其它物质结合具有很好的结合度，使摩擦片有较高的摩擦系数和强度。摩擦材料中最好选用较软的煨烧石油焦碳粉，但是用量过高可能会产生过恢复、损伤制动对偶和制动噪音等问题^[4]，所以在煨后焦含量为 5% 时虽然摩擦系数很高，但是曲线却不平稳。

4.3 填料表面处理的影响

4.3.1 扭矩曲线及摩擦系数的比较

根据第一阶段的实验结论，选择煨后焦含量为 3% 的 E 试样的配方作为第二阶段试样的基础配方。图 4.7 及图 4.8 是对填料进行硅烷偶联剂的表面处理的试样 G 和未进行表面处理的试样 H 在制动初速度 5000r/min 下的制动扭矩曲线。

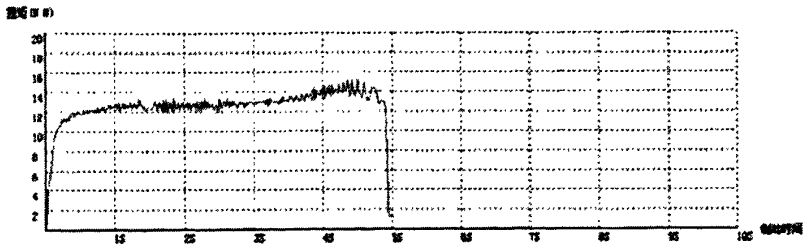


图 4.7 试样 G 在 5000r/min 制动初速度下的扭矩曲线

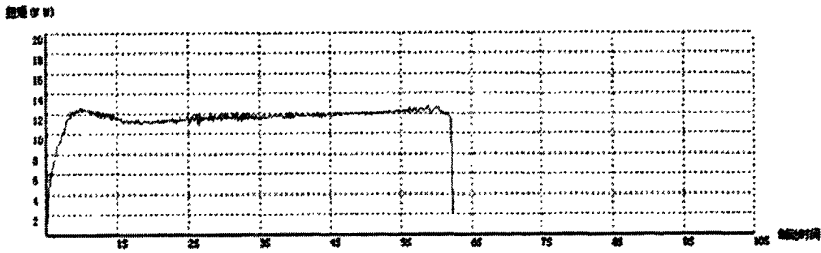


图 4.8 试样 H 在 5000r/min 制动初速度下的扭矩曲线

由图 4.7 和 4.8 可以看出，试样 G 比试样 H 的制动扭矩曲线相比更加平稳，在相同的制动初速度下，试样 G 所需的制动时间比试样 H 短；通过扭矩仪测量制动时间内的所有扭矩，并释放到计算机中，得知在此转速下试样 G 的摩擦系数为 0.342，而试样 H 的摩擦系数为 0.327。

4.3.2 磨损的比较

试样 G 的磨损量如表 4.5 所示。

表 4.5 试样 G 的磨损量

磨前 (mm)	22.882	22.784	23.004
磨后 (mm)	22.864	22.742	22.959
磨耗 (mm)	0.036	0.042	0.045
平均磨耗 (mm)	0.041 (每次 0.008)		

试样 H 的磨损量如表 4.6 所示。

表 4.6 试样 H 的磨损量

磨前 (mm)	24.465	24.200	23.865
磨后 (mm)	24.378	24.110	23.792
磨耗 (mm)	0.087	0.090	0.073
平均磨耗 (mm)	0.083 (每次 0.016)		

磨损量的测试方法为：在开始测试之前，先把试样在低速下磨合三次；再在试样上取互成 120° 的三个点，用千分尺分别测量其厚度，作为磨前数据；然后

把试样在 5000r/min 的转速下对磨 5 次后，还是在之前的三个点上测量其厚度，这次的数据就作为磨后试样的厚度；最后取三点的平均磨耗。

表 4.5 和表 4.6 分别列出了试样 G（填料进行了表面处理）和试样 H（填料未进行表面处理）的磨损量。由表可以看出试样 G 磨损量明显比试样 H 的磨损量少。这是由于在摩擦材料中使用的填料大多为无机物，树脂基体与无机非金属矿物填料是两种性质上完全不同的材料。有机聚合物分子结构及物理形态和无机物（粉体填料）不相同，两种结构不相同的材料不可能结合在一起，它们之间存在着很大程度上的不相容性，这就导致复合体系的界面难以形成良好的粘接，而复合材料的破坏往往是从弱的界面处开始的，因此，对无机填料进行表面改性处理，提高界面间的粘结强度，是改善和提高复合材料性能的重要途径^[51]。摩擦材料中的无机填料经硅烷偶联剂处理表面后，改善了该填料在有机物中的分散性，增加了填料的填充比例，从而降低复合产品的成本；同时，由硅烷偶联剂处理的无机填料增强了与有机物的亲和力，得以使各种复合产品提高强度并分别改善耐候性、耐热性等，减少机械磨损，使复合材料有良好的成型加工性能^[52]。

4.4 本章结论

通过使用 MM1000 摩擦磨损试验机对试样测得的扭矩曲线、摩擦系数、磨损量的综合分析，得出以下结论：

（1）润滑相石墨和煨后焦对树脂基摩擦材料都有润滑作用，均使材料的摩擦系数下降。随着转速的提高，添加石墨试样的摩擦系数下降明显，同时由于石墨的耐热氧化性能较差，对摩擦材料的高温摩擦性能产生了不良的影响，使得摩擦材料的摩擦曲线在高速下有“塌腰”和“上扬”的现象，并且在制动过程中伴有烟尘产生；而添加煨后焦试样的摩擦系数不管是在低速还是在高速都没有太大的波动，并且在高速制动时摩擦系数还能保持在 0.31 左右。

（2）煨后焦含量为 3% 试样的制动曲线在不同的制动初速度下都很平稳，其高速下摩擦系数无明显减低。但是当煨后焦的用量增加到 5% 时，曲线出现波动，同时产生过恢复、损伤制动对偶和制动噪音等问题。

（3）对填料进行硅烷偶联剂的表面处理后增强了无机填料和有机物之间的亲和力，提高了无机填料与树脂基体的界面粘结强度，使摩擦材料有良好的成型加工性能，同时材料的磨损量减少了一半，摩擦系数提高。

由以上 3 项结论得出，润滑组元为煨后焦，质量百分数为 3%，并且对填料进行硅烷偶联剂的表面处理的树脂基摩擦材料具有较好的综合性能。

第 5 章 台架试验

由于前期研究表明摩擦系数偏小，通过对铬铁矿，刚玉并对鳞片状石墨和粒状煅后焦作为润滑相对树脂基摩擦材料性能的影响研究，并通过对填料进行硅烷偶联剂的表面处理，改善材料的综合性能，最终确定配方，通过摩擦磨损测试机 MM1000 测试结果表明闸瓦的摩擦系数显著提高。本章主要介绍采用改进后的配方制备的闸瓦的台架试验结果，并与铁路部门的技术要求进行对比。

5.1 试验配方

基体，增强纤维等（除铬铁矿，刚玉和煅后焦）沿用原始配方组元比例（即表 3.1 中所示）并结合第 3 章对铬铁矿和刚玉的研究结果：铬铁矿的含量控制在 7%~8%之间时试样的摩擦磨损性能较好，刚玉含量在 3% 较佳，第 4 章对石墨煅后焦的研究结果：润滑组元为煅后焦，质量百分数为 3%，并且对填料进行硅烷偶联剂的表面处理的树脂基摩擦材料具有较好的综合性能，所以选定的铬铁矿，煅后焦和刚玉的比例分别在 8%，3%，3% 左右，最终选用配方（命名为：GM01 配方）如表 5.1 所示，闸瓦采用二次压制工艺制备，并对其添加硅烷偶联剂的表面处理。

表 5.1 试验用闸瓦摩擦材料配方

树脂 (份数)	丁腈橡胶 (份数)	金属及矿物增强纤维 (份数)	铬铁矿 (份数)	刚玉 (份数)	煅后焦 (份数)	其他填料 (份数)
10	10	48	9	3	3	28

*注：由于试验材料配方变化较多，为解决配料时各种材料换算困难，以后材料均采用份数。

5.2 样品制备

试样制备过程，先将配置的粉末状材料在 160℃，5MPa 下，预压一下，制得块状颗粒，再将涂好胶的钢背放入预热到 160℃ 的模具底部，加入块状颗粒，热压成型，其中分别在压力为 5MPa，10MPa，15MPa，20MPa，25MPa 保压一段时间，每个压力下压制过程中放气一次。热压成型后的样品，通过 100℃1h+150℃2h+200℃10h 的热处理，保证其高温摩擦性能，最终制得成品试样。

图 5.1 为预压后块状摩擦材料颗粒，采用这种二次压制工艺有利于试样的致密化，减少内部缺陷，有效提高综合性能，图 5.2 为涂过胶后的钢背，厚度 0.1mm 为宜，图 5.3 为二次压制所得 1:1 检测用样品，图 5.4 为基体黏结剂不足，造成样品在烧结后表面形成裂纹。

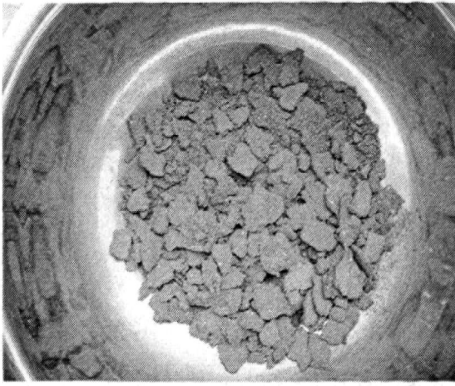


图 5.1 预压后块状摩擦材料颗粒

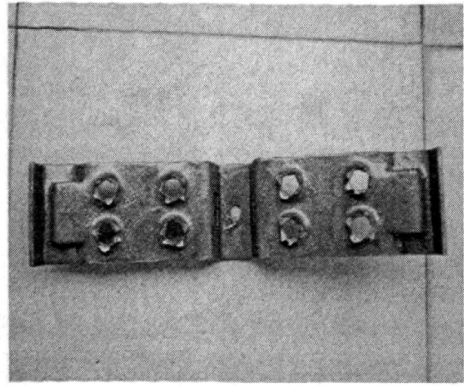


图 5.2 涂胶后钢背

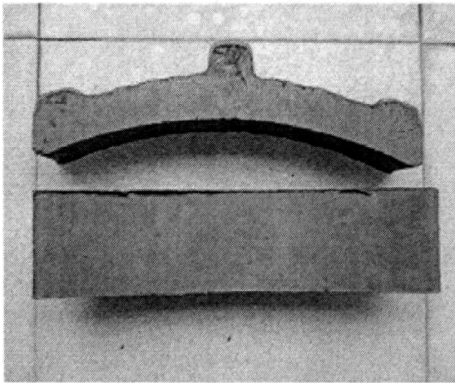


图 5.3.1: 1 台架试验用试样

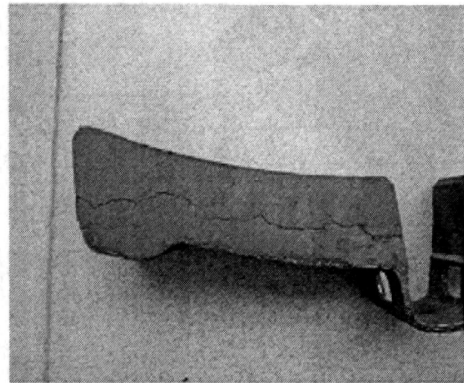


图 5.4.1: 1 台架试验用开裂试样

5.3 台架试验结果

台架试验检验依据铁道部运输局、铁道部科学技术司运装货车[2002]第 11 号文件发布的《铁路货车高摩擦系数合成闸瓦技术条件(暂行)》在铁道部产品质量监督检验中心机车车辆检验站进行。

① 闸瓦压力 $20 \pm 0.5\text{kN}$ 时的平均摩擦系数如下表 5.2。

表 5.2 闸瓦在压力为 $20 \pm 0.5\text{kN}$ 时的平均摩擦系数

速度 (km/h)		35	55	75	95	125
摩擦系数 (技术要求)	上限	0.436	0.422	0.402	0.395	0.386
	下限	0.336	0.322	0.322	0.315	0.306
2 次测量值	第 1 次	0.560	0.531	0.533	0.477	0.373
	第 2 次	0.537	0.580	0.527	0.481	0.374

在闸瓦压力 $20 \pm 0.5\text{kN}$ 时一次停车(干)制动的瞬时摩擦系数-速度曲线如下图 5.5。

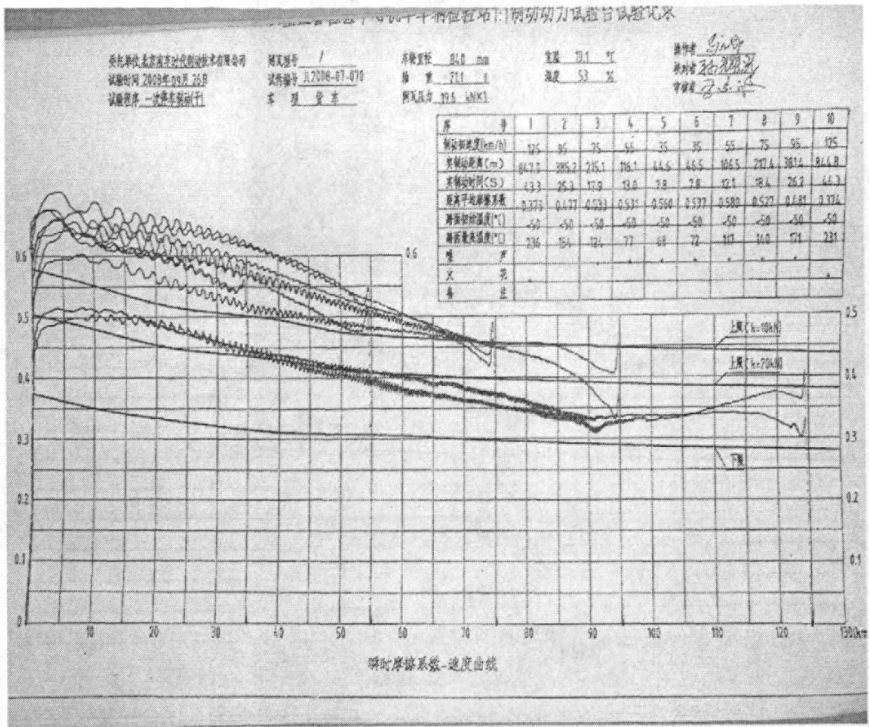


图 5.5 闸瓦压力 19.6kN 时的瞬时摩擦系数-速度曲线

② 潮湿状态的瞬时摩擦系数

制动初速 55~95km/h 的瞬时摩擦系数曲线高于检验依据规定的上限。

在闸瓦压力 10 ± 0.3 kN 时一次停车（湿）制动的瞬时摩擦系数-速度曲线如下图 5.6。

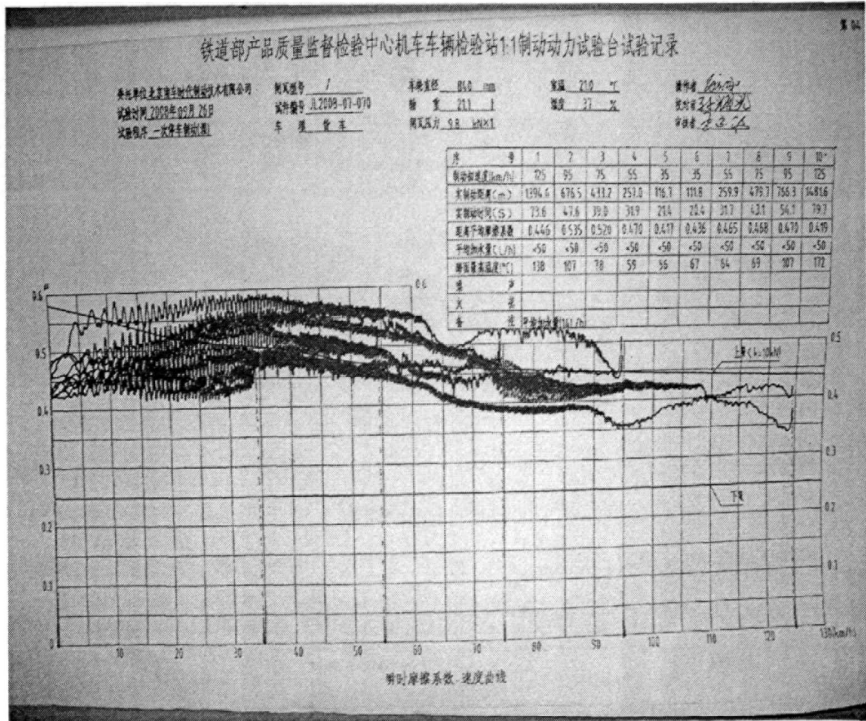


图 5.6 闸瓦压力 9.8kN 时的瞬时摩擦系数-速度曲线

③ 坡道持续制动瞬时摩擦系数

规定匀速持续制动 20min 内的瞬时摩擦系数 ≥ 0.25 ，试样检测最低值 0.36。

④ 静摩擦系数

规定 5 次试验的平均值 ≥ 0.30 ，试样检测平均值 0.62。

⑤ 踏面最高温度

进行各种规定程序试验时，车轮踏面温度 $\leq 400^{\circ}\text{C}$ ，试样检测最高值 236°C 。

⑥ 闸瓦磨损量

规定一次停车制动试验的闸瓦磨耗量总和 $\leq 1.5\text{cm}^3/\text{MJ}$ ，试样检测值 $0.88\text{cm}^3/\text{MJ}$ 。

从台架试验结果可以看出，此配方制得的闸瓦，低速条件下摩擦系数偏高，高速条件摩擦系数达标，其他主要指标也全部符合铁道部规定的标准。

本论文接下来的工作是在原有配方基础上不改变或少改变配方组成情况下，降低低速时的摩擦系数，使各项指标达到铁道部要求标准，完成该项目。

第 6 章 基体填料对闸瓦摩擦性能的影响

6.1 引言

本章针对台架试验结果表明低速时摩擦系数偏高的问题，由于橡胶低温摩擦系数较高，所以通过减少橡胶的含量，及通过对填料中的减摩组元及基体含量进行调整，使之达到降低摩擦系数的目的，同时比较闸瓦磨损和制动现象，探求最适合闸瓦的树脂基摩擦材料体系。

6.2 实验配方设计

本章在前期研究的基础上，针对台架试验表明配方在低速条件下摩擦系数较高的问题，通过增加润滑相总含量以及调整配方中减摩组元石墨和煅后焦比例，调整配方中酚醛和丁腈的比例来进行实验，使低速摩擦系数降低，同时兼顾制动噪音和磨损量。具体试验配方与试样编号及含量如表 6.1 和 6.2 所示。

表 6.1 实验各系列及成分表

	a 系列	b 系列	c 系列	d 系列
酚醛树脂（份数）	10	10~7	11~14	10
丁腈橡胶（份数）	10	10	9~6	10
摩擦粉（份数）	3	4~6	3	3
金属及矿物纤维（份数）	48	48	48	48
铬铁矿（份数）	9	9	9	9
刚玉（份数）	3	3	3	3
MoS ₂ （份数）				1~4
石墨（份数）	1~4	2	2	
煅后焦（份数）	4~1	3	3	4~1
其他填料（份数）	25	25	25	25

表 6.2 实验摩擦材料试样编号及其变化组元含量比

试样编号	石墨: 煨后焦	试样编号	酚醛: 摩擦粉	试样编号	酚醛: 丁腈	试样编号	MoS ₂ : 煨后焦
a1	1: 4	b1	9: 4	c1	11: 9	d1	1: 4
a2	2: 3	b2	8: 5	c2	12: 8	d2	2: 3
a3	3: 2	b3	7: 6	c3	13: 7	d3	3: 2
a4	4: 1	b4	10: 6	c4	14: 6	d4	4: 1

6.3 石墨煨后焦联合对摩擦磨损性能的影响

6.3.1 扭矩曲线

图 6.1 为试样 a1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

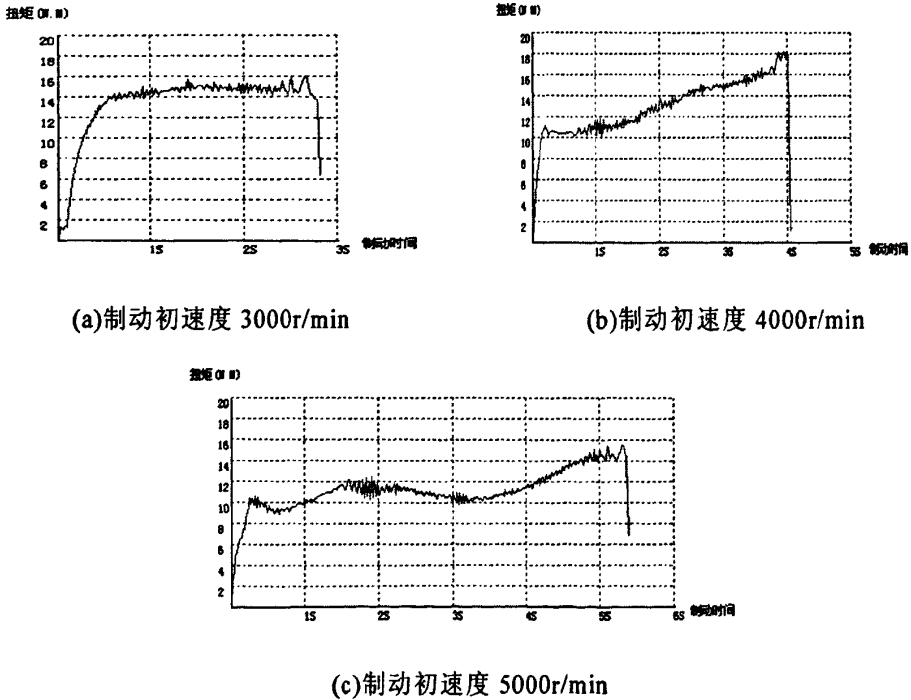
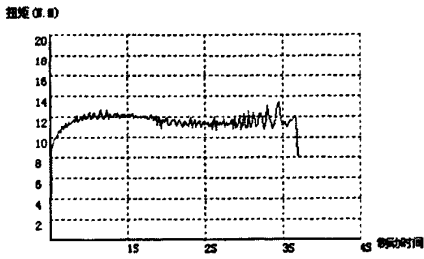


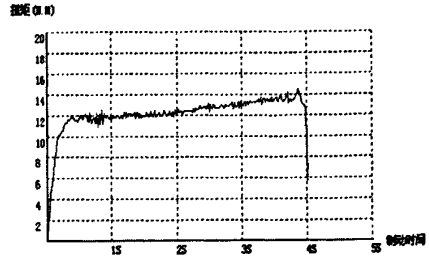
图 6.1 试样 a1 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 6.1 可以看出, a1 试样在低制动速度下, 曲线波动小, 比较平稳。在中速时曲线一直呈上升趋势, 导致扭矩值较大。在高速时扭矩值有所减少, 但曲线不稳定, 出现两次“塌腰”, 且制动过程中噪音较大。

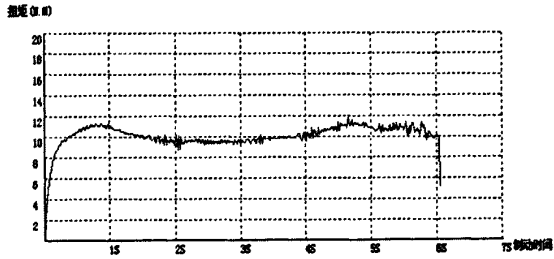
图 6.2 为试样 a2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



(b)制动初速度 4000r/min

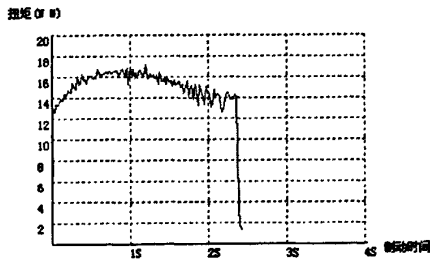


(c)制动初速度 5000r/min

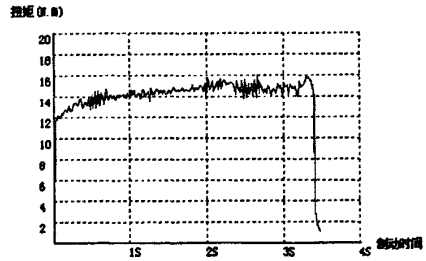
图 6.2 试样 a2 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 6.2 可以看出，a2 试样扭矩图总体很平衡，扭矩值也比较稳定，高速时曲线波动也很小，高速 5000r/min 时制动时间约 6s，制动噪音也不大，是比较理想的货车闸瓦配方。

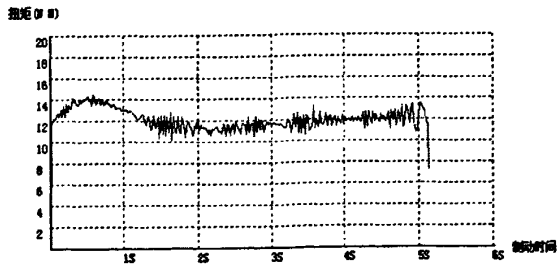
图 6.3 为试样 a3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



(b)制动初速度 4000r/min



(c)制动初速度 5000r/min

图 6.3 试样 a3 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 6.3 可见，a3 试样的扭矩曲线整体波动性也不大，但摩擦曲线不是很稳定且扭矩值都较大，则相应的摩擦系数值比较大，会导致摩擦对偶的过多磨损，影响对偶的寿命，因此该配方不够合理。

图 6.4 为试样 a4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

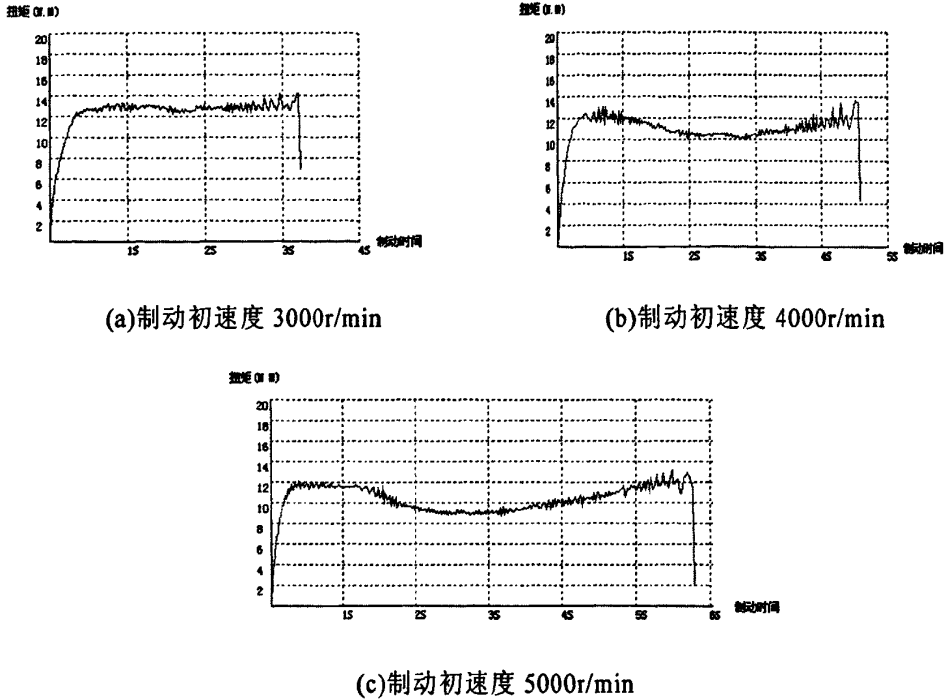


图 6.4 试样 a4 在不同制动初速度时的扭矩曲线

由图 6.4 可以看出，a4 试样在低制动速度下，曲线波动小，比较平稳。在中速时曲线出现“塌腰”，稳定性欠佳。在高速时扭矩值有所减少，但曲线不稳定，也出现“塌腰”，且噪音大。a4 试样从此图反映的信息看，不够理想。

6.3.2 摩擦系数及磨损

表 6.3 不同比例的石墨和煅后焦的试样在各转速下的的平均摩擦系数。

表 6.3 不同比例的石墨和煅后焦的试样在各转速下的的平均摩擦系数

	3000r/min	4000r/min	5000r/min
a1	0.379	0.363	0.314
a2	0.354	0.341	0.300
a3	0.382	0.378	0.312
a4	0.367	0.310	0.301
GM01	0.401	0.383	0.308

图 6.5 为 a 系列各试样在不同速度下的摩擦系数图，由表 6.3 结合图 6.5 可看出，随制动初速度增大，所有摩擦材料试样的摩擦系数均呈下降趋势。a2 和 a4

试样的摩擦系数总体较小，特别是 a2 试样从低速到高速摩擦系数降低趋势较缓，与 GM01 试样（台架试验样品）比较降低了低速摩擦系数，高速摩擦系数基本没变。结合扭矩图 a4 曲线不够稳定，因此 a2 试样最为理想。

随制动初速度增大，所有摩擦材料试样的摩擦系数均呈下降趋势，即高温摩擦材料热衰退现象，这与酚醛树脂的粘弹性有关^[49]。作为树脂基摩擦材料，形成的界面膜主体是有机物热分解产生的液态物与剥落料子，因此界面膜的形成将有利于减少磨损，但由于界面膜的存在，使摩擦力产生机制由低温条件下主要由表面微凸体的切削力降低，产生热衰退现象^[53]。

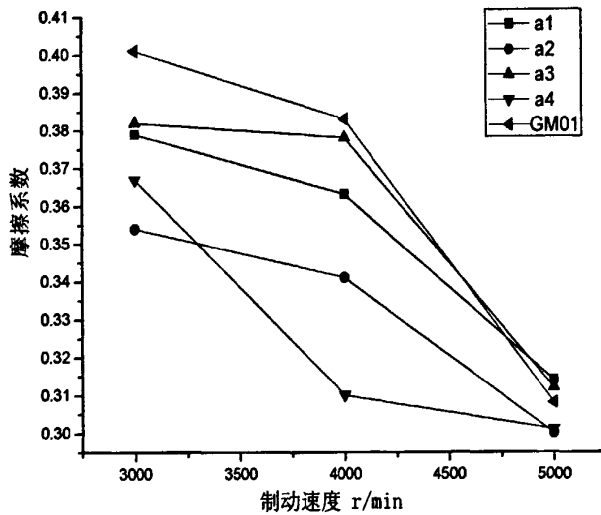


图 6.5 a 系列各试样在不同速度下的摩擦系数

图 6.6 为不同比例石墨和煅后焦试样磨损量的比较。如图所示，a 系列配方中随着石墨含量的增加（煅后焦含量的减少）磨损量逐渐减少，a1 磨损量最小，a4 磨损量最大，这可能是由于高温树脂基体产生热分解，易在摩擦材料表面形成高分子膜，高分子膜阻碍了摩擦材料的磨损。而煅后焦具有疏松的结构，其气孔度较好，对热分解的高分子具有吸附作用，使之表面不易产生高分子膜，所以煅后焦含量越高，摩擦材料表面越不易产生高分子膜，磨损即越大。同时温度也是磨损的关键因素，即当材料表面温度达到有机黏结剂的热分解温度范围时，有机黏结剂如橡胶与树脂产生分解、碳化和失重现象，随着温度的升高，这种现象加剧，黏结作用下降，磨损量急剧增大，称之为“热磨损”。由此图可得知 a3 磨损量虽然不是最小，但较 GM01 配方小，达到技术标准。

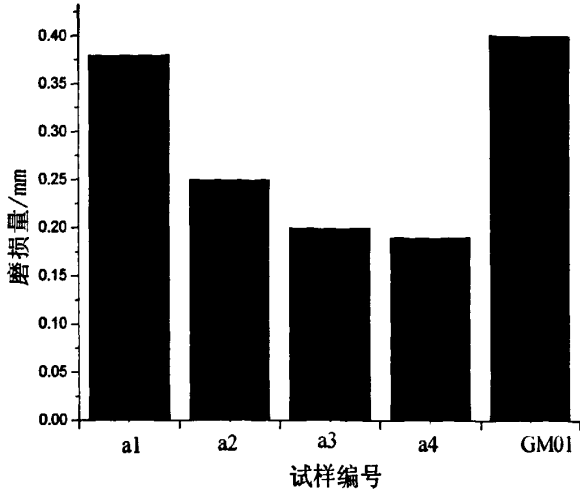


图 6.6 不同比例石墨和煨后焦试样及 GM01 试样磨损量的比较

*注：图 6.6 的数值均为摩擦试样上取互呈 120° 的三个点的平均值。

6.3.3 摩擦系数压力敏感性

图 6.7 为不同压力下的摩擦系数的速度敏感性。由图 6.7 可以看出，随着制动压力的增加各试样摩擦系数也不断增加，a1 和 a4 在压力为 0.36~0.38 时最敏感，a2 在压力 0.34~0.36 时最敏感，a3 在压力为 0.34~0.38 时最敏感。

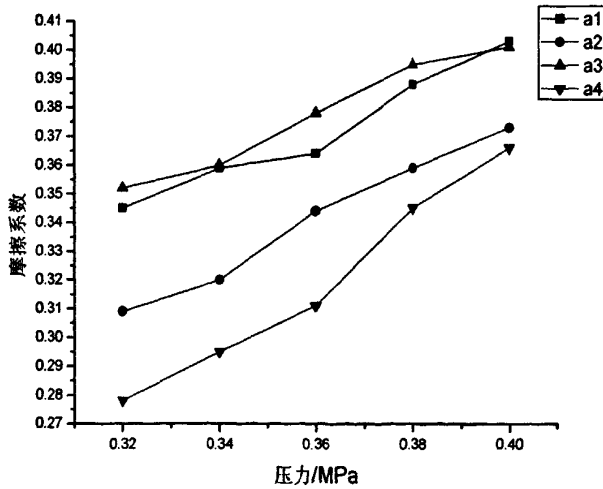


图 6.7 a 系列各试样在不同压力下的摩擦系数

6.3.4 表面形貌

图 6.8 为 a2 试样的 SEM 扫描图。如图所示，a2 试样制动摩擦后表面形貌表面较为平滑，50 倍下看以看出钢纤维与填料结合良好。由图可看出材料中剥落留

下的坑洞，并有细小的磨屑分布在摩擦面上，由于钢纤维对对偶的犁削，粗糙的对偶表面反过来对摩擦材料表面刮削，使得摩擦材料表面有划痕，许多细小的磨屑聚集在摩擦面中凹下的孔洞中。a2 试样中基体、增强纤维和填料相互结合的很好，各自起到了相应的作用。从图可以看出试样大部分区域较光滑，部分光滑界面上有硬质点分布其上，所以 a2 试样主要磨损方式为粘着磨损，伴随有磨粒磨损。

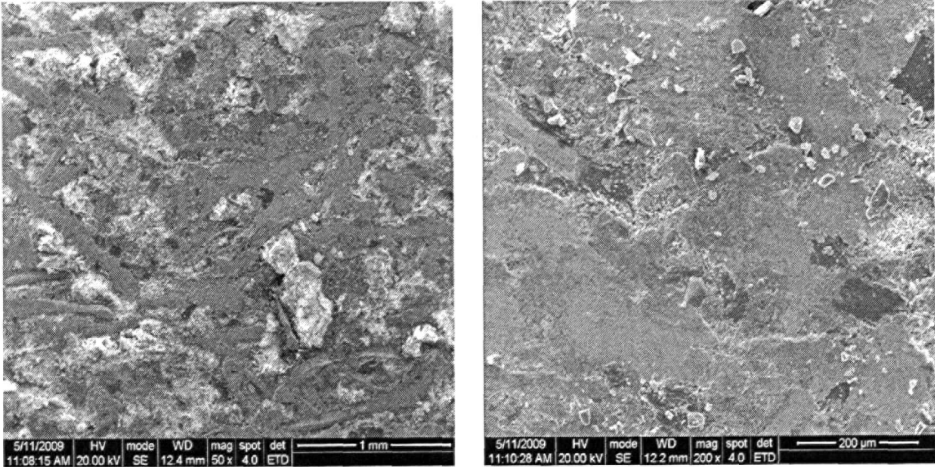


图 6.8 试样 a2 制动后的表面形貌

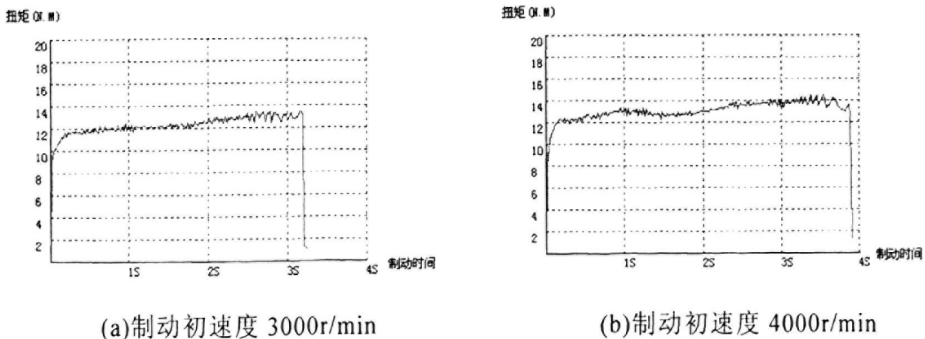
综合本节，通过研究石墨煨后焦对闸瓦试样摩擦磨损的影响得出：

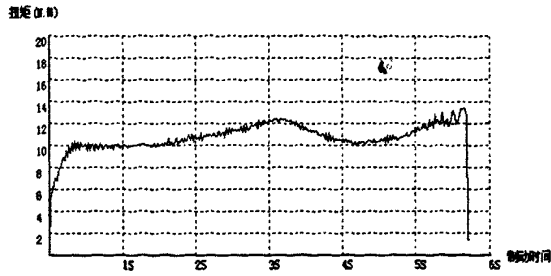
1. 减摩组元石墨和煨后焦对树脂基摩擦材料都有润滑作用，均可使材料的摩擦系数下降，并都一定程度的减少了磨损量。
2. 随着制动初速度的增加，摩擦系数呈下降趋势。这要是因为树脂基体的热衰退引起的。
3. 含 2/113 石墨和 3/113 煨后焦的配方，所得扭矩曲线较平稳，高低速下摩擦系数波动较小。

6.4 酚醛及丁腈比例对摩擦磨损性能的影响

6.4.1 扭矩曲线

图 6.9 为试样 c1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



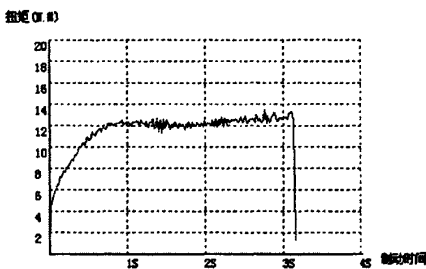


(c)制动初速度 5000r/min

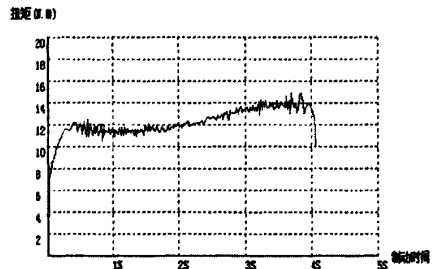
图 6.9 为试样 c1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

由图 6.9 可以看出, c1 试样在低中制动速度下, 曲线波动小, 比较平稳。在高速时曲线失稳, 出现两次“塌腰”, 且制动过程中噪音较大, 冒烟。

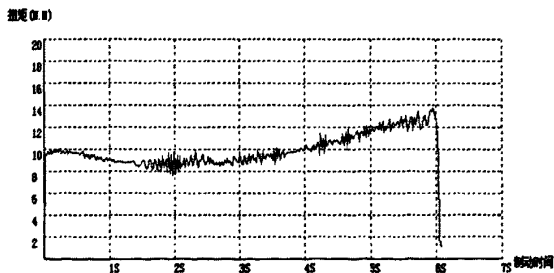
图 6.10 为试样 c2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



(b)制动初速度 4000r/min



(c)制动初速度 5000r/min

图 6.10 为试样 c2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

由图 6.10 可以看出, c2 试样在低制动速度下, 曲线波动小, 比较平稳。在中高速时曲线有轻微的“塌腰”现象, 且制动过程中无噪音, 但是高速时扭矩较小, 对应摩擦系数较 GM01 配方有一定大小。

图 6.11 为试样 c3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

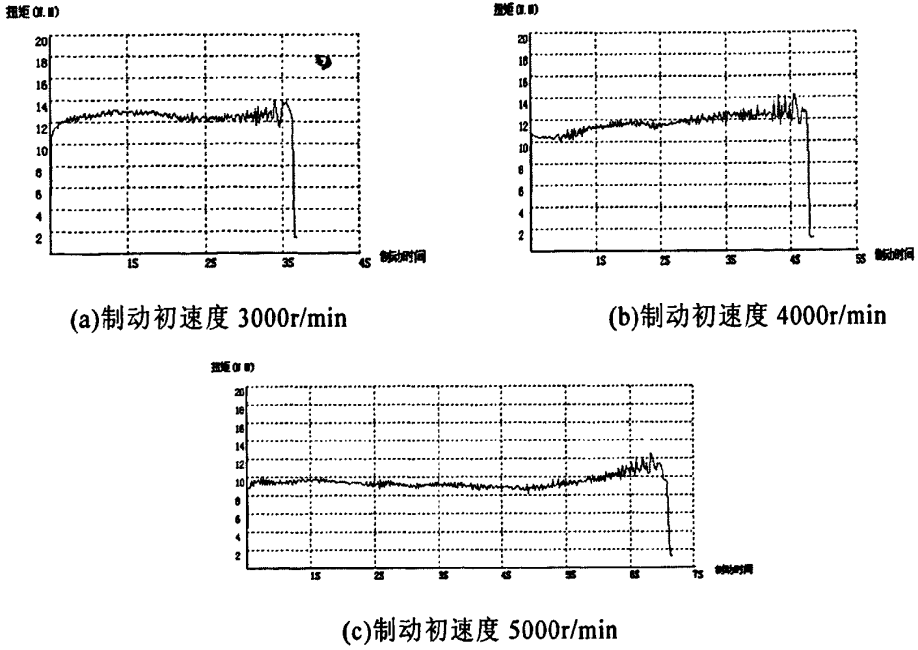


图 6.11 为试样 c3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

由图 6.11 可以看出, c3 试样在低中高速制动速度下, 曲线波动小, 比较平稳, 且制动过程中无噪音, 但是高速时扭矩很小, 对应摩擦系数较 GM01 配方差很大。图 6.12 为试样 c4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

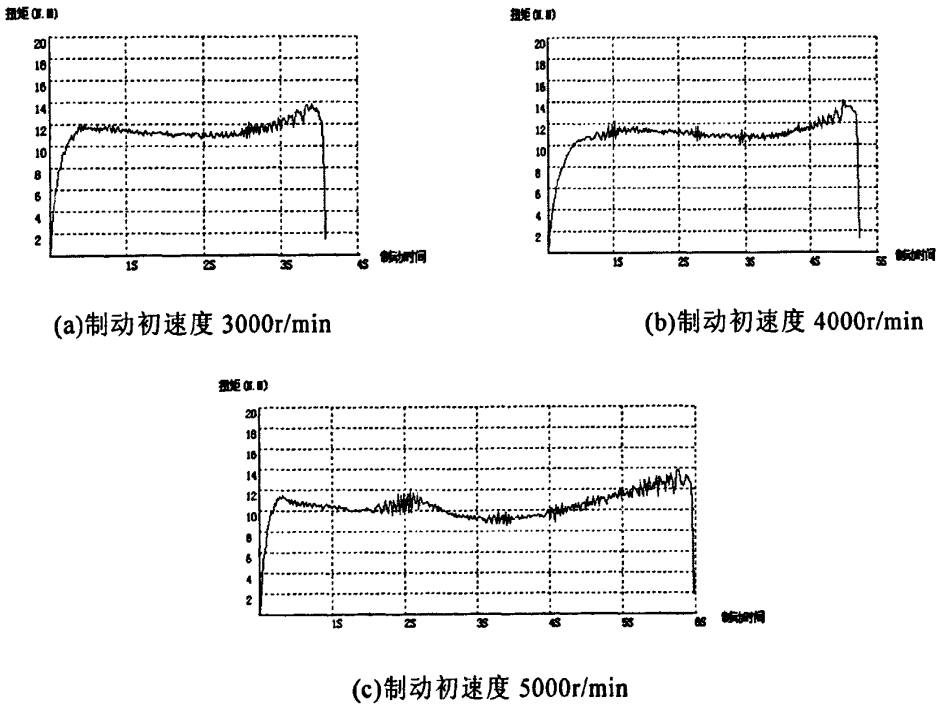


图 6.12 为试样 c4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

由图 6.12 可以看出, c4 试样在低中制动速度下, 曲线波动小, 比较平稳, 曲线有轻微的“塌腰”现象, 且制动过程中无噪音, 高速时曲线有“塌腰”现象,

但是就摩擦系数而言低速时较 GM01 配方小，高速时摩擦系数接近 GM01 配方。综合性能与目标要求最接近。

6.4.2 摩擦系数及磨损

表 6.4 为不同比例的酚醛和丁腈摩擦材料试样在不同制动初速度下的平均摩擦系数。

表 6.4 不同比例的酚醛和丁腈摩擦材料试样在不同制动初速度下的平均摩擦系数

试样编号	3000r/min	4000r/min	5000r/min
c1	0.342	0.368	0.306
c2	0.326	0.347	0.284
c3	0.349	0.326	0.269
c4	0.316	0.307	0.293
GM01	0.401	0.383	0.308

图 6.13 c 为系列各试样在不同速度下的摩擦系数图，由表 6.4 结合图 6.13 可看出，随制动初速度增大，所有摩擦材料试样的摩擦系数均呈下降趋势。c4 试样从低速到高速摩擦系数降低趋势较缓，与 GM01 试样（台架试验样品）比较降低了低速摩擦系数，高速摩擦系数减小较小，因此 c4 是较为理想的配方。

随制动初速度增大，所有摩擦材料试样的摩擦系数均呈下降趋势，这与酚醛树脂的粘弹性有关^[49]。树脂的链状结构决定其在受到外力作用时，既表现出弹性形变又表现出粘性形变的性质，即为树脂的粘弹性。树脂基体的粘弹性会导致树脂基摩擦材料的摩擦系数随着载荷、速度和温度的不同在一个较大范围内变动。

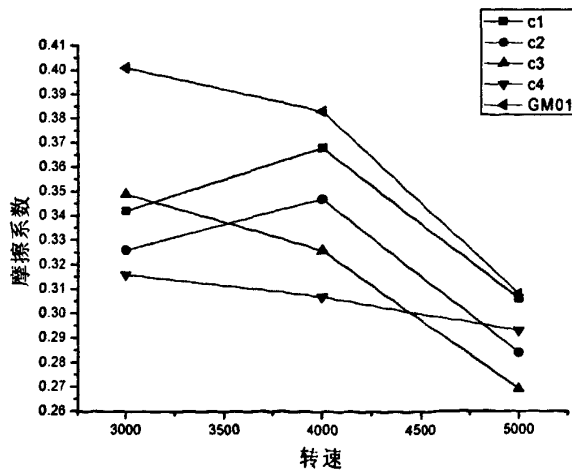


图 6.13 c 系列各试样在不同速度下的摩擦系数

图 6.14 为 c 系列各试样磨损量的比较。总体而言，试样的磨损量比较理想，

大概是 GM01 配方的一半。随着树脂的增加磨损有减小的趋势，这可能是由于随着树脂含量的增加，摩擦材料受热分解，摩擦材料表面更易产生高分子膜。整个系列 c4 的磨损量最为理想，摩擦材料的摩擦系数系数变很平稳。

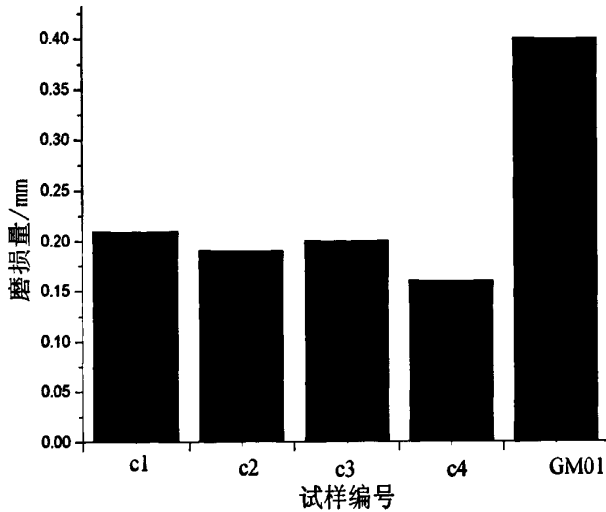


图 6.14 c 系列各试样及 GM01 试样磨损量的比较

6.4.3 摩擦系数压力敏感性

图 6.15 为不同压力下的摩擦系数的速度敏感性。由图 6.15 可以看出，随着制动压力的增加各试样摩擦系数规律性不是很明显，c1 和 c3 的摩擦系数随压力先增后减，c2 和 c4 的摩擦系数随压力增大而增大。

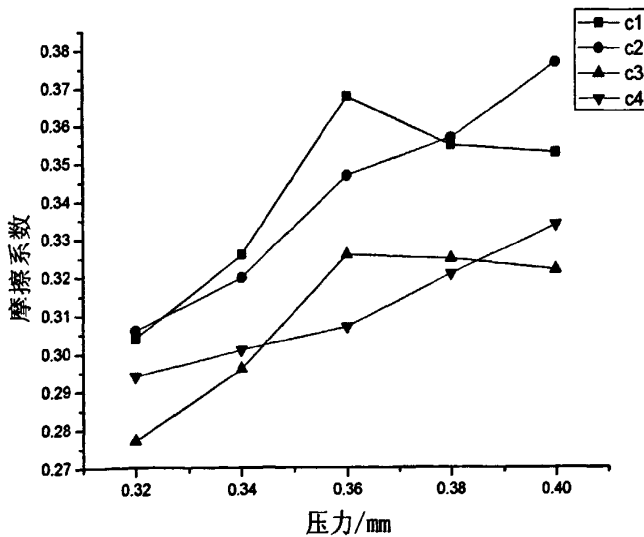


图 6.15 c 系列各试样在不同压力下的摩擦系数

6.4.4 表面形貌

图 6.16 为 c4 试样的 SEM 扫描图。如图 6.16 所示, c4 试样制动后表面形貌表面较为平滑, 且孔洞较少, 在 50 倍下可清楚地看出钢纤维与基体, 填料结合良好。200 倍下可以看出摩擦材料表面比较光滑平整。摩擦材料与对偶在法向压力作用下, 表面上微凸体受到很大的压应力, 发生塑性变形, 两接触表面将通过分子间的作用发生粘着, 形成粘着磨损, 而试样表面基本上没有硬质粒子, 所以磨粒磨损基本上没有。

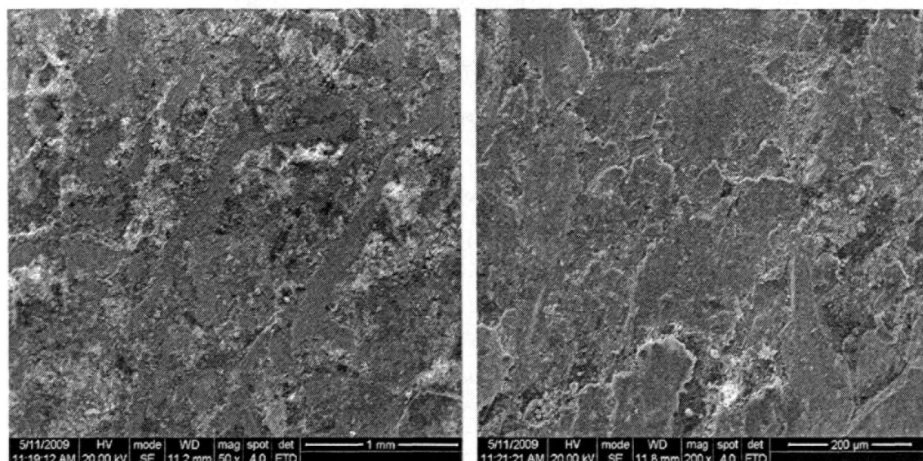


图 6.16 试样 c4 制动后的表面形貌

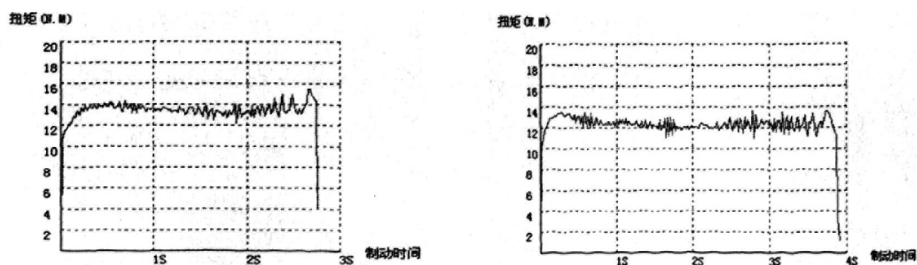
综合本节, 通过研究酚醛及丁腈比例对摩擦磨损性能的影响得出:

1. 通过改变酚醛, 丁腈的含量可以调整高低速摩擦材料的综合性能。
2. 随着制动初速度的增加, 摩擦系数呈下降趋势。这要是因为树脂基体的热衰退引起的。
3. 含 14/113 酚醛和 6/113 丁腈的配方, 高低速摩擦系数较稳, 综合性能最佳。

6.5 二硫化钼煅后焦联合对摩擦磨损性能的影响

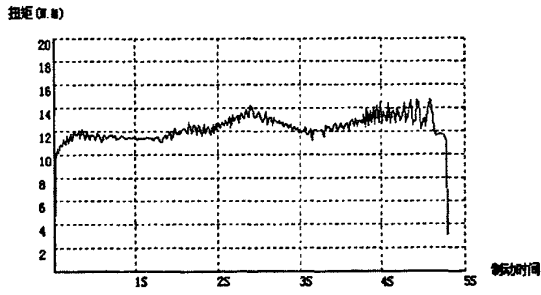
6.5.1 扭矩曲线

图 6.17 为试样 d1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a) 制动初速度 3000r/min

(b) 制动初速度 4000r/min

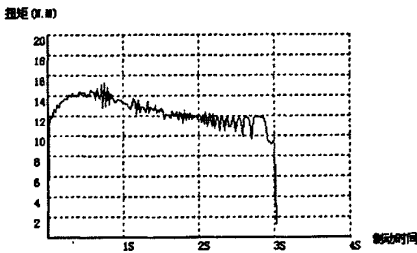


(c)制动初速度 5000r/min

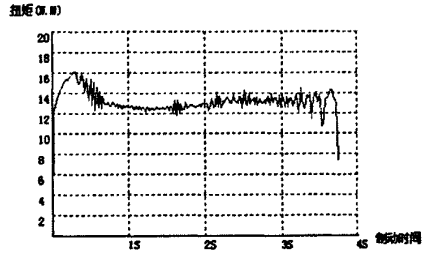
图 6.17 为试样 d1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

由图 6.17 可见，d1 系列总体扭矩值较为合理，由于起稳定摩擦系数的煅后焦含量较多，因此曲线总体波动也很小，摩擦过程中制动噪音也不大，虽然试样在高转速时曲线出现了波动，但程度不大，对闸瓦的正常制动影响不大，是较为理想的闸瓦材料。

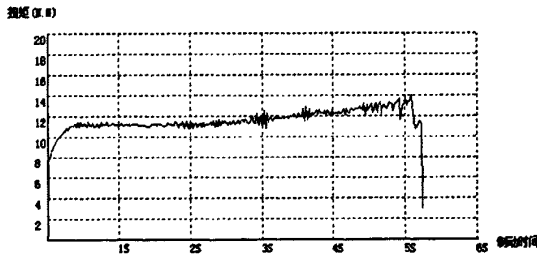
图 6.18 为试样 d2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



(b)制动初速度 4000r/min

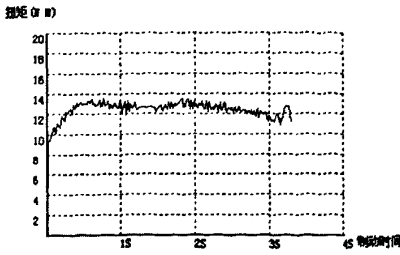


(c)制动初速度 5000r/min

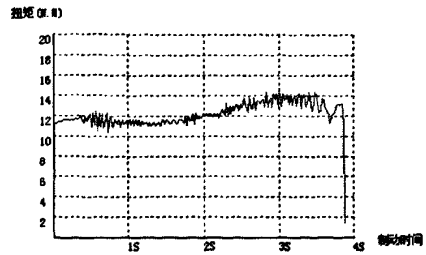
图 6.18 为试样 d2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

如图 6.18 所示，d2 试样的摩擦曲线在低中速时不是很稳定，只有高速时曲线较为平稳，虽然该配方的扭矩值比较合理，但摩擦测试过程中制动噪音较大，不能满足摩擦制动的要求。

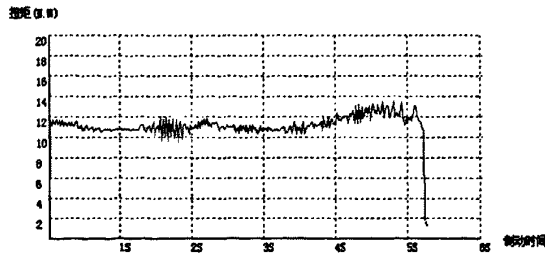
图 6.19 为试样 d3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



(b)制动初速度 4000r/min

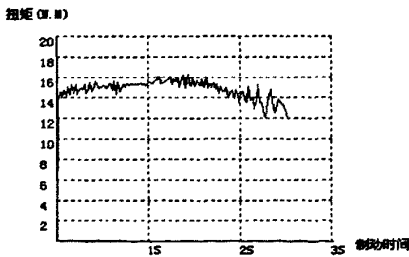


(c)制动初速度 5000r/min

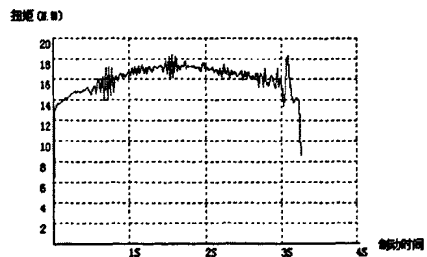
图 6.19 为试样 d3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

由图 6.19 可以看出，d3 试样扭矩值也较为合理，保持在约 12N_m，摩擦过程中噪音较小，虽然扭矩曲线稍有波动，但综合摩擦系数，制动噪音等，是较为理想的闸瓦摩擦材料配方。

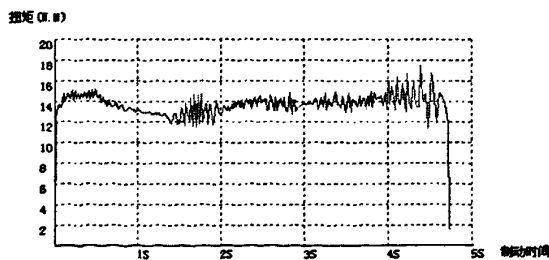
图 6.20 为试样 d4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



(b)制动初速度 4000r/min



(c)制动初速度 5000r/min

图 6.20 为试样 d4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

由图 6.20 可以看出, d4 试样总体曲线不够平衡有波动, 各转速时都有比较明显的“上扬”和“蹋腰”且扭矩值都比较大, 均在 14Nm 以上, 摩擦过程中也会听到较大的噪音, 此配方不够理想。

6.5.2 摩擦系数及磨损

表 6.5 不同比例的二硫化钼和煅后焦的试样在各转速下的平均摩擦系数。

表 6.5 d 系列各转速下的平均摩擦系数

试样编号	3000r/min	4000r/min	5000r/min
d1	0.379	0.348	0.333
d2	0.350	0.373	0.328
d3	0.352	0.345	0.313
d4	0.418	0.455	0.375
GM01	0.401	0.383	0.308

图 6.21 为 d 系列各试样在不同速度下的摩擦系数比较图。

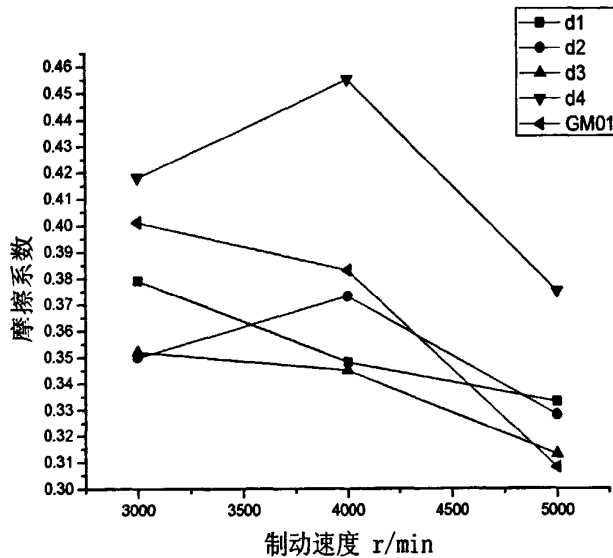


图 6.21 d 系列各试样在不同速度下的摩擦系数比较

如图 6.21 所示, 随制动初速度增大, 所有摩擦材料试样的摩擦系数基本呈下降趋势。d1、d2 和 d3 试样低速时摩擦系数都较 GM01 小, 高速时摩擦系数较 GM01 配方有不同程度的提高, 特别是 d3 试样低速摩擦系数下降较大, 高速摩擦系数增加较小, 因此 d3 试样最符合目标要求。d4 试样整体较大, 予以排除。

d 系列各样高速时摩擦系数都较高, 这是由于填料中添加的二硫化钼可以提

高摩擦体的耐磨性、摩擦稳定性、减少噪声和降低低速摩擦系数，二硫化钼高温快速氧化为 MoO_3 和 SO_2 ，而留下的二硫化钼摩擦系数高达 0.5~0.6，所以低速时能起到降摩作用而高速时能有效的抑制摩擦系数锐减。

图 6.22 为 d 系列各试样及 GM01 试样磨损量的比较，如图所示，总体而言，试样的磨损量比较理想，都较 GM01 配方小。随着 MoS_2 的增加磨损量有上升的趋势，这可能是由于 MoS_2 的高温增摩性导致摩擦系数上升，磨损量加大，但 d1 较 d2, d3 磨损量大这可能是由于 d1 含润滑相 MoS_2 较少导致导致摩擦系数较 d2, d3 大，磨损量也大。

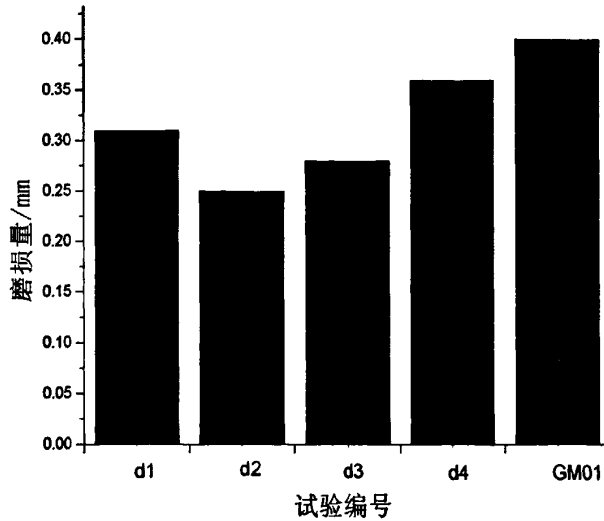


图 6.22 d 系列各试样及 GM01 试样磨损量的比较

6.5.3 摩擦系数压力敏感性

图 6.23 为 d 系列各试样在不同压力下的摩擦系数图，由图可以看出，随着制动压力的增加摩擦系数也不断增加，d 系列各样摩擦系数都呈上升趋势，d2, d4 高速时压力较低速时不敏感，制动效果较稳定，而 d1, d3 高速时压力较低速时敏感，制动效果不如 d2, d4，但是波动不是很大，基本上能满足需求。

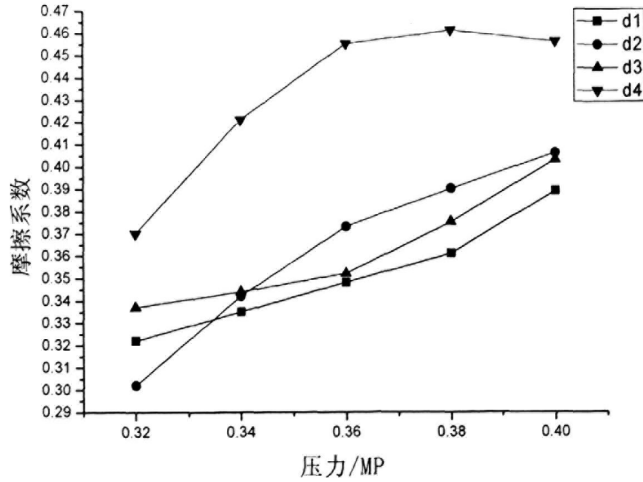


图 6.23 d 系列各试样在不同压力下的摩擦系数

6.5.4 表面形貌

图 6.24 为试样 d3 制动后的表面形貌，如图 6.24 所示，d3 试样制动摩擦后的表面形貌表面较为平滑，50 倍下看以看出钢纤维与填料结合良好，但由图可看出材料中剥落留下的坑洞，这部分是由于 MoS_2 高温分解产生气体所致。试样表面有细小的磨屑分布在摩擦面上，由于钢纤维对对偶的犁削，粗糙的对偶表面反过来对摩擦材料表面刮削，使得摩擦材料表面不是很光滑，有细小的磨屑聚集在摩擦面中凹下的孔洞中。表面颜色较深的区域由于基体填料钢纤维结合很好，在法向压力作用下，表面上微凸体受到很大的压应力，发生塑性变形，两接触表面将通过分子间的作用发生粘着，造成粘着磨损，而颜色较浅的区域是基体填料钢纤维结合较差的区域，滑动摩擦面间硬质粒子划过摩擦对偶软表面，对软表面起犁削作用产生犁沟，即发生磨粒磨损。

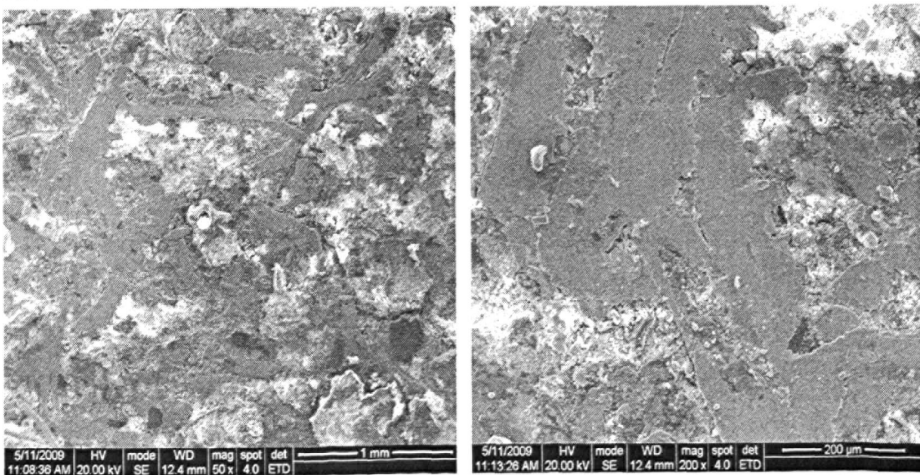


图 6.24 试样 d3 制动后的表面形貌

综合本节，通过研究二硫化钼煅后焦联合对摩擦磨损性能的影响得出：

1. 二硫化钼作为一种高温增摩调节剂，在制动转速为 4000r/min 左右时，一般摩擦系数达到最大值。
2. 随二硫化钼含量的增加，摩擦系数基本呈下降趋势。这与树脂基体的热衰退相关。
3. 综合比较 d3 试样最为理想。
4. 随着煅后焦含量的增加，摩擦材料的制动噪音得以降低。

6.6 酚醛及摩擦粉对摩擦磨损性能的影响

6.6.1 扭矩曲线

图 6.25 为试样 b1 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

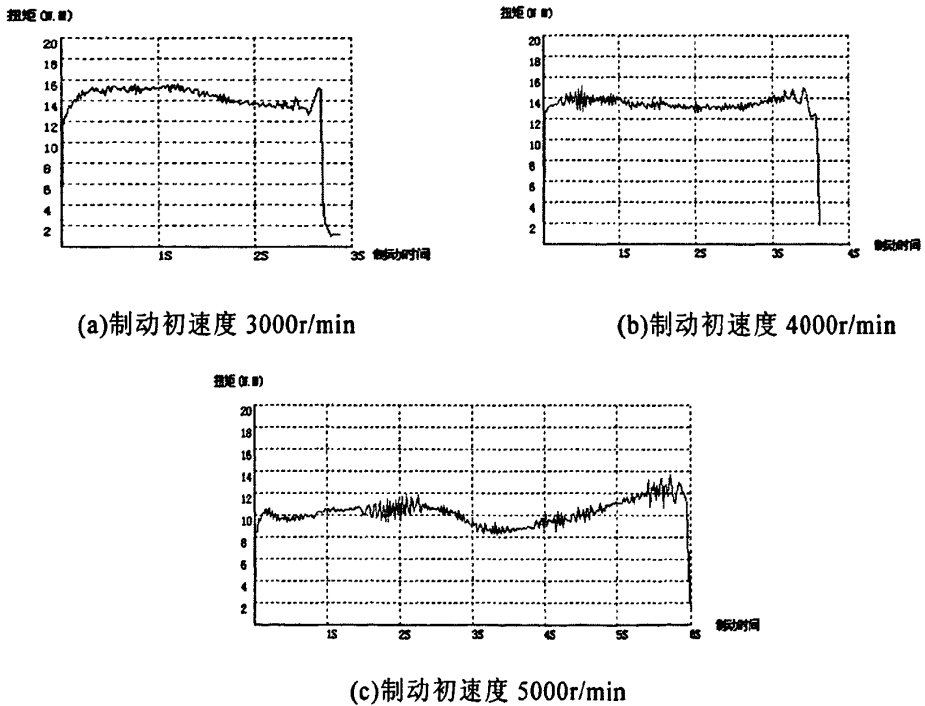
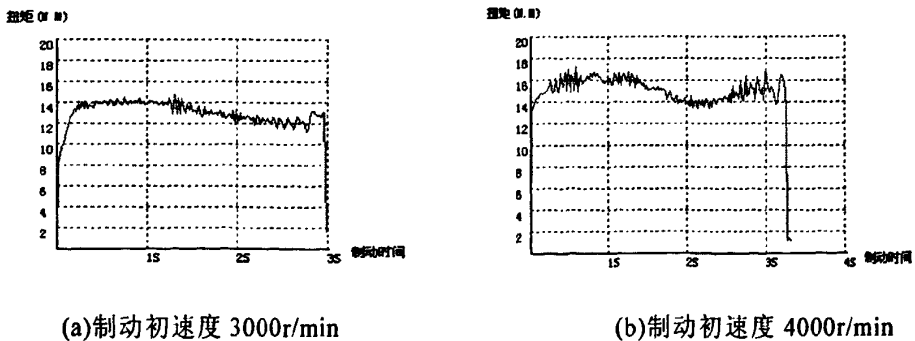
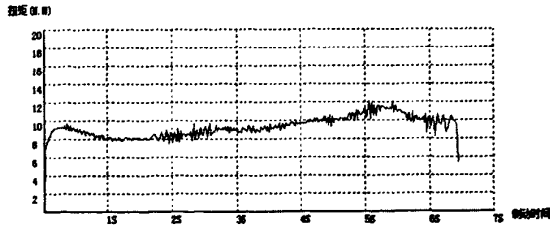


图 6.25 试样 b1 在不同制动初速度时的扭矩曲线

图 6.26 为试样 b2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。

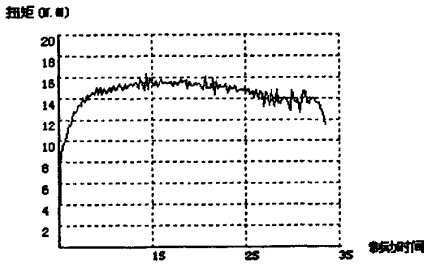




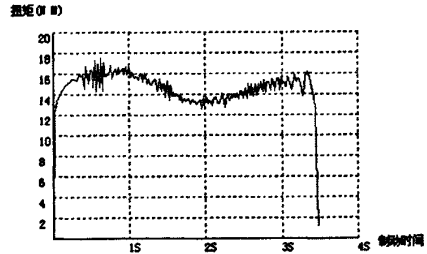
(c)制动初速度 5000r/min

图 6.26 试样 b2 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

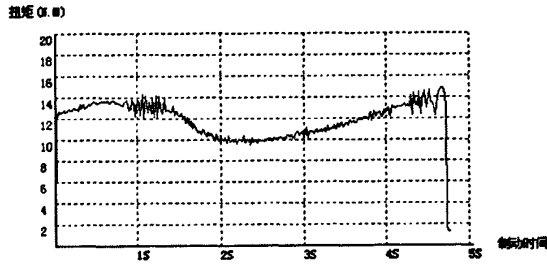
图 6.27 为试样 b3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



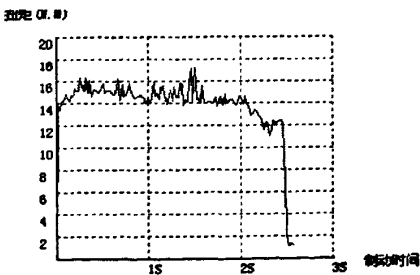
(b)制动初速度 4000r/min



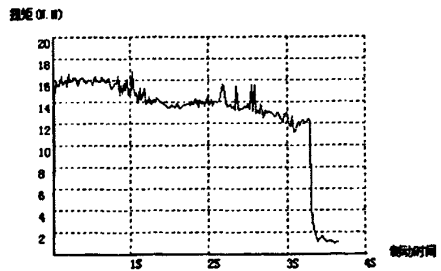
(c)制动初速度 5000r/min

图 6.27 试样 b3 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

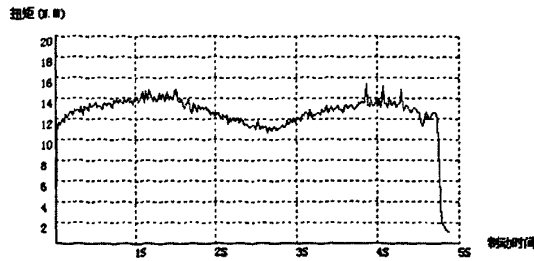
图 6.28 为试样 b4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图。



(a)制动初速度 3000r/min



(b)制动初速度 4000r/min



(c)制动初速度 5000r/min

图 6.28 试样 b4 在不同制动初速度时的扭矩曲线图

图 6.25~6.28 为试样 b1、b2、b3、b4 在不同的制动初速度下的制动扭矩曲线。从制动扭矩曲线图可看出：就整个 b 系列摩擦曲线都不是很稳定，b1 试样相对较稳，其他试样曲线都很不稳定，且制动过程中噪音很大并出现抖动，冒烟的现象较严重，制动效果较差。这是由于随着摩擦粉本身结构较为疏松，随着摩擦粉含量的增加，试样变得越来越不致密，导致钢纤维与填料结合越来越差，曲线失稳。

6.6.2 摩擦系数及磨损

表 6.6 为酚醛和摩擦粉摩擦材料试样在不同制动初速度下的平均摩擦系数。

表 6.6 b 系列各转速下的平均摩擦系数

试样编号	3000r/min	4000r/min	5000r/min
b1	0.381	0.378	0.296
b2	0.366	0.349	0.301
b3	0.409	0.412	0.334
b4	0.390	0.366	0.349
GM01	0.401	0.383	0.308

图 6.29 为 b 系列各试样在不同速度下的摩擦系数比较图。

由表 6.6 结合图 6.29 可看出，随制动初速度增大，所有摩擦材料试样的摩擦系数均呈下降趋势。就摩擦系数而言 b1, b2 基本达到目标要求。但是由于整个系列制动过程中制动噪音大，并出现抖动，冒烟等现象，所以 b 系列不能满足货车闸瓦制动要求。

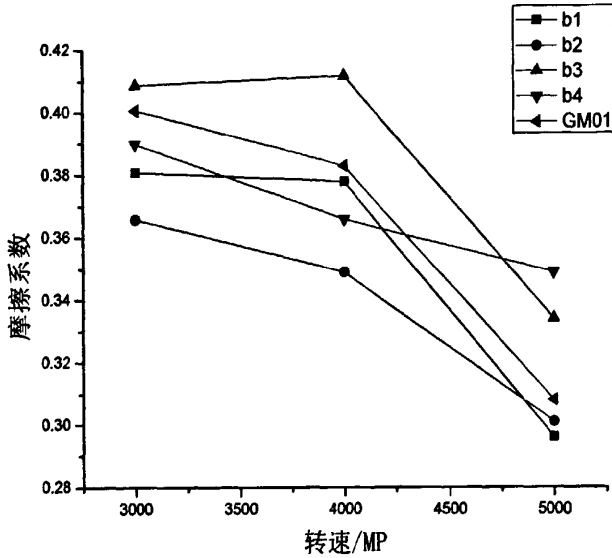


图 6.29 b 系列各试样在不同速度下的摩擦系数

图 6.30 为 b 系列各试样及 GM01 试样磨损量的比较图, 由图所示, 总体来讲, b 系列各样磨损都较大, 这是由于由于摩擦粉本身结构较为疏松, 随着摩擦粉含量的增加, 试样变得越来越不致密, 导致钢纤维与填料结合越来越差, 制动过程中钢纤维拔出较严重, 钢纤维与对偶的刮削, 造成对偶表面粗糙, 而粗糙的对偶表面又反作用于摩擦材料, 因此磨损量也较高。钢纤维较硬, 会在对偶表面形成一定的犁沟, 犁沟又会对摩擦材料产生犁削, 导致摩擦材料中的硬制磨粒脱落, 散布在摩擦表面, 这些磨屑起到三体磨粒磨损的作用, 加剧了对偶和摩擦材料的磨损, 随着摩擦进行, 磨损越来越严重, 最终会导致摩擦材料中的部分钢纤维的脱落。

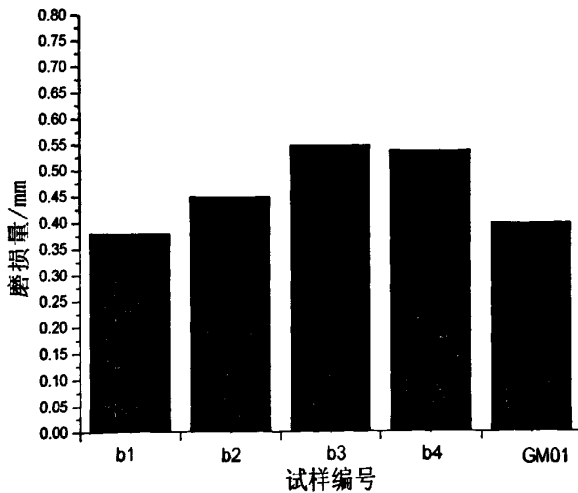


图 6.30 b 系列各试样及 GM01 试样磨损量的比较

6.6.3 表面形貌

b4 试样 SEM 扫描图, 如图 6.31 所示, 由图可以看出, 钢纤维与基体结合的不好, 钢纤维外漏严重, 这也与实验过程中钢纤维拔出严重相吻合。由于制动时, 摩擦材料与对偶接触的瞬间表面温度可达到 800°C , 由于材料比较疏松, 钢纤维与基体, 填料结合不好, 导致材料的导热性能差, 这也解释了 b 系列有冒烟严重现象, 导热性能差使得材料表面温度不易散失, 使得基体烧损严重, 基体烧损又导致钢纤维更加外漏, 形成恶性循环。此种摩擦表面由于基体较疏松, 粗糙表面的硬质凸起划过摩擦对偶软表面, 对软表面起犁削作用产生犁沟, 即发生磨粒磨损。此外, 摩擦过程中都伴随着材料表面层温度的升高, 导致材料的热疲劳, 长期反复的热应力作用, 将加速材料表面裂纹的产生与扩展。

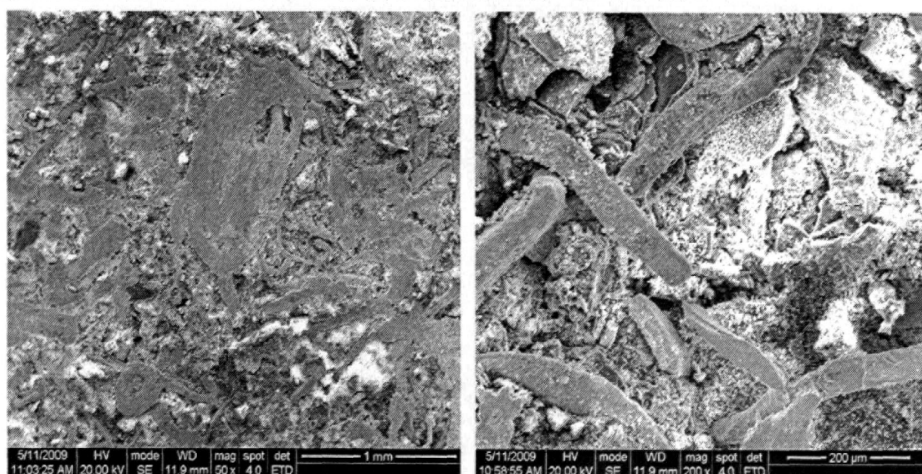


图 6.31 试样 b4 制动后的表面形貌

综合本节, 通过研究酚醛及摩擦粉对摩擦磨损性能的影响得出:

1. 通过添加摩擦粉可以一定程度的稳定摩擦系数, 降低磨损, 但是扭矩曲线随着摩擦粉的增加有越来越失稳的趋势。
2. 随着摩擦粉的增加制动噪音越来越大, 基体与钢纤维结合越来越差, 钢纤维拔出严重。
3. 摩擦粉应控制在 3% 内, 超过 3% 试样制动噪音大, 扭矩曲线失稳。

6.7 本章结论

通过 MM1000 扭矩测试仪上进行测试。实验结果表明:

1. 含 2/113 石墨和 3/113 煅后焦的试样与含 14/113 酚醛和 6/113 丁腈的试样起到了降低低速摩擦系数的效果。
2. 减摩组元石墨和煅后焦对树脂基摩擦材料都有降低摩擦系数的作用, 并一定程度的减少了磨损。含 2/113 石墨和 3/113 煅后焦的配方的试样扭矩曲线较为平稳, 摩擦系数波动最小。由于石墨的耐热氧化性能不好, 对摩擦材料的高温摩

擦性能产生了不好的影响，使得摩擦材料的摩擦曲线在高速下有“塌腰”和“上扬”的现象，并且在制动过程中伴有烟尘产生。

3. 树脂基摩擦材料中含 14/113 酚醛和 6/113 丁腈的试样，高低速摩擦系数较稳，综合性能较佳。

4. 二硫化钼作为一种高温增摩调节剂，在制动转速为 4000r/min 左右时，一般摩擦系数达到最大值，含 3/113MoS₂ 和 2/113 煅后焦的配方综合性能较佳。

5. 摩擦粉应控制在 3% 内，超过 3% 试样制动噪音大，钢纤维拔出严重，扭矩曲线失稳。

结 论

本文采用铸钢作为摩擦对偶,通过 MM1000 摩擦磨损试验机以及台架试验,开展了铁路货车用高摩合成闸瓦的研制,在前期研究的配方体系基础上,调整摩擦材料中增摩组元,润滑相及基体的摩擦磨损性能影响进行研究,得出以下主要结论:

(1) 针对前期研究摩擦系数偏低的问题,通过添加增摩组元,研究得出:①增加硬质相填料铬铁矿、刚玉的含量,都能在一定程度上提高闸瓦的摩擦系数,磨损量也相应增加。②铬铁矿的含量少于 7%时,试样在高制动初速度下测得的摩擦系数较低;高于 8%时,在各个制动初速度下的摩擦系数均低于含量为 7%~8%的试样,而且磨耗稍大。铬铁矿的含量控制在 7%~8%之间时试样的摩擦磨损性能较好,在高制动初速度下的摩擦系数有较大的提高,且摩擦曲线很平稳,制动噪声较低,基本达到了实验的预期目标。③加入少量的刚玉能提高闸瓦的摩擦系数,但效果不很明显。刚玉含量在 3%较佳,含量多于 3%时,导致钢纤维的拔出,在制动时产生火花和较大噪声。

(2) 针对添加增摩组元后制动噪音和磨损较大的问题,通过研究减摩组元等得出:①润滑相石墨和煅后焦对树脂基摩擦材料都有润滑作用,均使材料的摩擦系数下降。随着转速的提高,添加石墨试样的摩擦系数下降明显,同时由于石墨的耐热氧化性能不好,对摩擦材料的高温摩擦性能产生了不好的影响,使得摩擦材料的摩擦曲线在高速下有“塌腰”和“上扬”的现象,并且在制动过程中伴有烟尘产生;而添加煅后焦试样的摩擦系数不管是在低速还是在高速都没有太大的波动,并且在高速制动时摩擦系数还能保持在 0.31 左右。②煅后焦含量为 3%试样的制动曲线在不同的制动初速度下都很平稳,其高速下摩擦系数无明显减低。但是当煅后焦的用量增加到 5%时,曲线出现波动,同时产生过恢复、损伤制动对偶和制动噪音等问题。③对填料进行硅烷偶联剂的表面处理后增强了无机填料和有机物之间的亲和力,提高了无机填料与树脂基体的界面粘结强度,使摩擦材料有良好的成型加工性能,同时材料的磨损量减少了一半,摩擦系数提高。

(3) 针对 1:1 台架试验,低速摩擦系数偏高的问题,通过研究基体和减摩组元等得出:①树脂基摩擦材料中石墨与煅后焦含量分别为 2/113 和 3/113 时所得扭矩曲线较平稳,高低速下摩擦系数波动较小,综合性能较佳。②树脂基摩擦材料中酚醛与丁腈含量分别为 14/113 和 6/113 时所得摩擦材料高低速摩擦系数较稳,综合性能较佳。③摩擦粉应控制在 3%内,超过 3%试样制动噪音大,钢纤维拔出严重,扭矩曲线失稳。

参考文献

- [1] 高惠民. 矿物复合摩擦材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007, 1-2
- [2] 戴雅康. 高速列车摩擦制动材料的现状与发展[J]. 机车车辆工艺, 1994, (2): 1-8
- [3] 石宗利, 杜心康, 丁旺才等. 高速列车制动闸片材料的现状与发展[J]. 兰州铁道学院学报, 1997, 16(4): 48-52
- [4] 易汉辉. 摩擦材料中碳素材料的作用机理研究[J]. 非金属矿, 2007, 30(1): 60-62
- [5] Tsujimura T, Yauda H. Friction materials for rolling stock brakes[J]. Journal of Japanese Society Tribologists, 1996, 41 : 299 - 304
- [6] Mohsen M, Peter J B, Delia D. characteristic and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials[J]. Wear, 2004, 256 : 1128 - 1134
- [7] 钱坤才, 唐石丹. 超高磷合金铸铁闸瓦材质及其摩擦性能的研究[J]. 机车车辆工艺, 1994, (3): 5-10
- [8] 宋志坤, 何庆复等. 车轮制动热疲劳损伤研究综述[J]. 铁道车辆, 1997, 35(9): 43-47
- [9] 冯国铨. 车辆用高磷铸铁闸瓦铸造工艺实践[J]. 机车车辆工艺, 1997, (4): 17-21
- [10] 迁村太郎, 初明玲. 高速车辆用复合铸铁闸瓦的开发[J]. 国外铁道车辆, 1998, (4): 30-33
- [11] Zhang Y. Investigation on tribological properties of brake shoes-phosphorus cast irons with different graphite morphologies[J]. Wear, 1993, 166 : 179 - 186
- [12] 任志俊. 铁基粉末冶金制动摩擦材料耐磨性能的显微分析[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2006, 5(5): 569-572
- [13] 高红霞, 刘建秀, 朱茹敏. 铜基粉末冶金列车闸瓦材料的摩擦磨损性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(6): 871-873
- [14] 张兆森. 一种铁—铜基干式摩擦材料的研制[J]. 非金属矿, 2002, 25(1): 56-57
- [15] 姚萍屏, 熊翔, 余峰. 基体对粉末冶金航空刹车材料摩擦面的影响[J]. 矿冶工程, 2001, 21(1): 66-68
- [16] 姚萍屏, 熊翔, 刘强等. 高速电力机车制动闸瓦用粉末冶金刹车材料研究[J]. 非金属矿, 2002, 25(2): 53-55
- [17] POGGIE R. A., WERT J. J. The role of oxidation in the friction and wear

- behavior of solid solution Cu-Al alloys in reciprocating sliding contact with sapphire and D2 tool steel [J]. *Wear*, 1992, 156(2):315-318
- [18] H Jang, K Ko, S J Kim, R H Basch. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials[J]. *Wear*, 2004, 256:406-414
- [19] Roland Heinisch. 复合材料制动闸瓦[J]. *国外机车车辆工艺*, 2002, (5): 31-33
- [20] 李炳华. 机车车辆制动闸瓦材料的发展[J]. *国外机车车辆工艺*, 2002, (1): 1-5
- [21] 孙福祥, 杨伟君. 50年来我国铁路车辆闸瓦(闸片)的发展[J]. *铁道机车车辆*, 2007, 27(1): 3-4
- [22] Rhee S K, Jacko M G, Tsang P H S. The role of friction film in friction, wear and noise of automotive brake[J]. *Wear*, 1991, (146): 89-90
- [23] David A, Angel E L, Javier D A. Synthesis and characterization of novel polyimides with bulky pendant groups[J]. *Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1999, 37 (6): 805 - 814
- [24] Fusher H, Mengxian D, Lianxun G. Cross linking of polyimides via spirodilactone unit in polymer backbone[J]. *Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1999, 37 (19): 3680 - 3695
- [25] Han H, Chung H, Gryte C C. Effects of precursor origins on water sorption behaviors aromatic polyimides in thin films[J]. *Polymer*, 1999, 40 (10): 2681 - 2685
- [26] Gordon L T, Lon J M. Unexpected thermal conversion of hydroxyl-containing polyimides to polybenzoxazoles[J]. *Polymer*, 1999, 40 (12): 3463 - 3468
- [27] 张佐光. 功能复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004, 210-245
- [28] Gopal P, Dharani L R, Frank D. Blum. Fade and wear characteristics of glass-fiber-reinforced phenolic friction material[J]. *Wear*, 1994, (174):119-127
- [29] Verman A P, Vishwanath B, Kameswaro Rao C V S. Effect of resin modification on friction and wear of glass phenolic composites[J]. *Wear*, 1996, (193):193-198
- [30] Gopal P, Dharani L R, Frank D. Blum. Load, speed and temperature sensitivities of a carbon fiber reinforced phenolic friction material[J]. *Wear*, 1995, (181-183):913-921
- [31] 庄光山, 王成国, 王海庆等. 纤维在聚合物基摩擦材料中的应用[J]. *汽车技术*, 2002, (10): 27-29
- [32] 黄译, 张元民. 论我国发展无石棉摩擦复合材料的途径[J]. *复合材料学报*, 1989, 6(1): 46-54
- [33] 鞠传珍. 无石棉高摩擦系数合成闸片的研究[J]. *中国铁道科学*, 2002, (3):

20-23

- [34] 贾贤. 半金属摩擦材料中铜纤维摩擦磨损行为的研究[J]. 复合材料学报, 1995, (3): 101-105
- [35] 吕换小, 温铁宏, 卜华娜等. 通用货车提速采用高摩擦系数合成闸瓦的研究[J]. 中国铁道科学, 2001, (2): 18-22
- [36] 贾贤, 陈永潭, 凌若飞等. 半金属摩擦材料组成对其摩擦磨损性能的影响[J]. 机械工程材料, 1996, 20(1): 18-20
- [37] 张玉心. 客车高摩合成闸瓦的研制[J]. 铁道机车车辆, 1993, (2): 4-15
- [38] 吴培熙, 沈健. 特种性能树脂基复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 284-410
- [39] 戴雄杰. 摩擦学基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984, 33-100
- [40] Bowden F P, Tabor D. 固体的摩擦与润滑[M]. 陈绍漓, 袁汉昌, 丁雪加译. 北京: 机械工业出版社, 1982, 119-159
- [41] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990, 372-387
- [42] 张明喆, 刘勇兵, 杨晓红. 车用摩擦材料的摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(4): 379-384
- [43] 孙振亚, 傅和平, 刘绍娥等. 160km/h~200km/h 客车高性能合成闸片研究[J]. 铁道车辆, 2006, 44(8): 9-11
- [44] 刘耀宗, 陈刚, 滕杰. 树脂基摩擦材料二次压制工艺研究[J]. 非金属矿, 2004, 27(6): 53-55
- [45] 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): 58-59
- [46] N M 费多尔欣科. 现代摩擦材料[M]. 徐润泽等译. 北京: 冶金工业出版社, 1983, 14
- [47] 李江鸿, 熊翔, 徐惠娟等. 炭/炭复合材料的摩擦磨损性能[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(2): 173-176
- [48] Rhee S K. Wear equation for polymers sliding against metal surfaces[J]. Wear, 1970,(16):413-445
- [49] 陈海燕, 王成国, 王海庆等. 摩擦材料用改性酚醛树脂的研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(8): 51-53
- [50] 樊毅, 张金生, 高游等. 石墨粒度对 Cu-Fe 基摩擦材料性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(6): 475-477
- [51] 冯启明, 张宝述, 彭同江等. 几种非金属矿粉体的硅烷偶联剂表面改性研究[J]. 非金属矿, 1999, 22: 68-70
- [52] 普文. 硅烷偶联剂在无机填料表面处理上的应用[J]. 化工物资, 1992, (5):

21-23

- [53] 田建团, 张炜, 郭亚林等. 酚醛树脂的耐热改性研究进展[J]. 热固性树脂, 2006, 21(2): 44-48

致 谢

衷心感谢导师陈刚教授三年来对我的指导，正是在他的悉心指导和无微不至的关怀下，我才能够顺利完成硕士论文。陈老师深厚的理论功底，严谨求实的科学态度以及对科研问题的敏锐洞察力给我很深的影响和启发，必将使我受益终生。本论文从选题到实验，再到论文的指导和修改，无不凝聚着陈老师的心血。陈老师在治学、工作和为人处事等方面言传身教，使我受益匪浅。导师博大的胸怀，渊博的知识，严谨的治学态度，勇于创新的精神和与人为善的处世作风始终是我的学习榜样，在此再一次向恩师表示最诚挚的敬意和由衷的感谢，并祝师母永远年轻，漂亮，祝其子陈可甄小朋友健康，快乐成长！

论文评审过程中得到了张福全教授，夏伟军副教授的指导和细心修改，使文章得以更加完善，在此表示感谢！

在论文完成的过程中，除了我自己三年多来的潜心学习和研究之外，也凝聚了很多人的心血，在研究生学习期间也得到了金属材料加工系其他老师的指导和帮助，在此向所有金属系的全体教师表示感谢！同时，在实验过程当中得到了师弟高平平及黄在诰，师妹陈聪聪的帮助，没有他们我就不能这么顺利地完成论文的实验工作。在撰写论文期间还得到了杨乐之，秦廷伟同学的帮助，特别是英文摘要部分的修改。在此也向这些帮助过我的所有人表示感谢！

姚 杰

2009年6月于长沙

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] 姚杰, 陈刚. 石墨/煅后焦对合成闸瓦试样摩擦性能的影响. 非金属矿[已录用
将于 2009 年第 4 期刊出]