

摩擦材料文集

上册

杭州汽车摩擦材料研究所

78. 1134

摩擦材料文集（上册）

出版日期：1984年5月

印刷册数：800

字 数：182,400

主 办：杭州汽车摩擦材料研究所

责任编辑：俞 佩 琛

地 址：杭州中山北路大桥北

承印单位：浙江省统计局附属印刷厂



前言

摩擦材料是一种广泛用于汽车、火车等交通工具，拖拉机、石油钻机、锻压机、挖掘机等各种工程机械，以及食品、造纸、纺织等各种轻纺机械的工程材料。以摩擦材料为主要部份而构成的制动、离合装置通常是决定各种机械安全性能、工作效率和承受载荷的重要部件。随着我国交通运输、机械工业的不断发展，摩擦材料已越来越显示出它的重要作用。

摩擦材料是一种高分子复合材料，由于这种材料通常是在极高剪切力和摩擦温度的苛刻条件下工作，因此它具有与其他一般复合材料所不同的特殊性。摩擦材料表面在工况条件下的物理化学变化，以及这种变化对摩擦、磨损性能的影响机理是属于摩擦学的研究范围，摩擦材料制动、离合性能的测试，以及模拟各种工况条件的台架试验方法则是属于机械工程学的研究范围，而摩擦材料的配方、工艺等又是属于高分子复合材料科学的研究范围。因此，摩擦材料本身就是一门涉及到多种科学的交叉科学。

我国摩擦材料工业的发展已有三十多年历史，但对它进行比较深入地研究还是近年来的事。近几年来我国广大摩擦材料行业的科技人员曾在开发新材料新品种、新工艺和机理、测试技术研究方面作出了不少贡献，取得了一定成绩。我们出版这套《文集》的目的就是要对这段时期内我国在摩擦材料领域中的研究和发展作一客观、集中地反映，以作为对以往工作的回顾和对今后工作的促进。本《文集》也可以作为参考资料，供从事摩擦材料有关各生产、科研、教育工作的同志们借鉴。

本《文集》由俞佩琛同志主编，参加编辑工作的有江世履、严浙生、张德林、陈晓云同志，由于水平有限，加之经验不足，错误、不当之处，请大家批评、指正。

杭州汽车摩擦研究所



一九八四年五月



目 录

(上 册)

一、综述、概论

- 有机摩擦材料进展.....张元民 (1)
- 国外摩阻材料的研究现状及发展.....周顺隆 (8)
- 我国汽车摩擦材料技术的现状及与国外差距.....章永信等 (15)
- 我国汽车摩擦材料的使用及标准概况.....国际起草小组调研组 (19)
- 日本汽车用制动器衬片标准评述.....江世覆 (32)
- 苏联石棉摩擦材料工业概况.....徐申二 (45)
- 石棉摩擦材料对用户适应性的探讨.....严浙生 (45)
- 摩擦材料的特性与测试方法.....俞光燮 (51)
- 摩擦材料热影响机理研究综述.....俞佩琛 (65)

二、机理研究

- 有机摩擦材料基体及其研究方法.....张元民 (70)
- 酚醇树脂增韧与微观相态.....王延孝等 (75)
- 有机摩擦材料摩擦后表面层结构变化.....龚克成等 (82)
- 有机摩擦材料热影响表面层及热衰退机理初探.....俞佩琛等 (91)
- 半金属摩阻材料特性及表面层研究.....周顺隆等 (96)
- 石棉摩擦材料内度分布的有限元法分析.....孟凡力等 (107)
- 石油钻机绞车刹车块工况条件下及摩擦磨损破坏机理分析.....阎凤珍 (114)

有机摩擦材料进展

华东化工学院 张元民

本文将综述摩擦材料中摩阻材料的一些进展，较多的内容是有机基的。解放后，特别是近八年来我国摩阻材料的发展不但已经建立了大规模的生产系统，而且在新产品开发、机理研究、仪器制造等方面都进展很快。下面介绍的各类摩阻材料，我们亦都有自己的工作经验，在本文中均未列出。

自上世纪末本世纪初出现石棉摩阻材料以来，其发展过程历经三个阶段，即：
天然材料为主→合成材料为主→多种材料复合使用

目前在科学研究、尖端技术及各个国民经济部门使用的制动、传动及控制速度用的摩阻材料是一种多组分的功能性复合材料，以其结构可以分为下面五类。^[1]

一、有机基(即聚合物基或高分子基)摩阻材料

主要采用石棉为增强剂，是一个石棉——聚合物——摩擦性能调节剂组成的三元复合体系。欧美国家目前正在转向有机基的无石棉摩阻材料。

二、金属基摩阻材料

主要是采用粉末冶金方法制成的金属陶瓷材料，以金属粉末的烧结形成基体，而不是象第一类那样以聚合物的粘结形成基体。

三、半金属基摩阻材料

介于上述一、二类之间，采用高组分的金属粉末、纤维(少量石棉、金属纤维或其它纤维，有的不用纤维)及摩擦性能调节剂，并用有机型或无机型粘合剂粘在一起。

四、无机基摩阻材料

主要是以无机非金属材料经配制、成型及焙烧制成的陶瓷类摩阻材料。

五、碳—碳摩阻材料

主要是以碳为基体或加以碳纤维增强的全碳型摩阻材料。

还有一些特殊应用的摩阻材料，有时要将它们列入以上分类中，如，

1. 湿式摩阻材料

主要是油介质中工作的摩阻材料，大多是多孔性的。以上一、二、三类都可制成湿式摩阻材料。

2. 电磁摩阻材料

主要是具备电磁及摩擦两种性能的摩阻材料，采用电磁机构来操作。

目前使用最多的是第一类，部分高速及特种情况用第二类或第五类，含大量金属粉末的第三类较多用于火车闸瓦，第四类主要用于某些飞机中。而今后的发展方向比较明显的在于第一类的无石棉摩阻材料、第三及第五类，其它各类相应也在发展。摩阻材料的发展与下面一些因素是有关的。

①摩阻材料的使用工况愈来愈苛刻。通常汽车和工程机械所用摩擦片的比压变化很大，鼓式达10—50公斤/厘米²，盘式可达60—130公斤/厘米²；速度变化亦很大，10~40米/秒；使用温度在300~600℃。火车闸瓦比压达5~20（鼓式）或40~50（盘式）公斤/厘米²，速度30~50米/秒，温度达800℃以上。飞机摩擦片使用时具有自动控制比压装置，其突出要求是温度高达300~1000℃以上。摩阻材料在如此复杂的使用工况时，必须保证良好的摩擦性能。

②由于上面的原因，摩阻材料单位面积吸收能量提高至五十年代的十倍以上，制动结构从鼓式向盘式发展，使用平稳性及使用寿命要求更加突出，耐热性及导热性好的第三类和第五类材料应运而生。

③石棉在一些国家已宣布为有害物质，不允许制造在工作时会散发含石棉大气的摩阻材料，使整个摩阻材料向无石棉体系发展。

④与摩阻材料基体及增强剂有关的科研及工业的迅速发展。

⑤摩阻材料使用机理及应用机理的研究。

下面就四个方面来谈摩阻材料的一些发展情况。

一、有机基摩阻材料仍在发展

鉴于有机基体的模量较低、摩擦时易于磨合、舒适性好，所以各国都十分重视以高分子化合物为基础的有机基体的研究。目前可以适用的使用温度正在提高中，当前发展的无石棉摩阻材料包括半金属及碳—碳材料更对有机基体提出新的要求。要求有500℃以上的分解温度，分解速率要慢，分解前后的基体和残留物都有合适的模量，并有很好的残留物摩擦特性及不影响对偶材料。

酚醛树脂及其改性物能较好地满足这些要求，随着使用条件的提高，促使进一步改进树脂结构及发展新型树脂。树脂耐热性及分解温度提高带来的材料刚性过大的问题，比较多的是采用橡胶共混的方法解决。橡胶的耐分解性及高温时形成环化结构的可能正在充分估价及利用之中，热塑性树脂的熔点正在提高至400℃以上，而且不少具有无明显熔点、分解温度高、分解速率慢、分解同时产生环化结构；有的热塑性树脂在高温时可以进一步交链，形成由于摩擦热产生的“原地形成二次聚合物”，这就使得一些新型的热塑性树脂得到应用。此外由于金属纤维、碳纤维、矿物纤维等的应用，使得对树脂的表面粘结性及延伸率提出新的要求。综合

情况在有机基摩阻材料的基体上出现以下情况。

酚醛树脂及其改性物仍为大量使用的品种,并不断出现新的改性物及不同的使用配方。回顾六十年代后期至七十年代后期国外发表的一些有代表性的配方^[2]。大致上都是以石棉为增强剂,但也出现用玻璃纤维的无石棉配方。石棉大都用纤维,用量一般在20~40%,个别的达45~68%或少至8~17%。粘合剂除各种酚醛及改性酚醛树脂外,不少采用与橡胶共混,并出现采用耐热聚酰亚胺热塑性树脂。树脂用量在逐渐减少,一般在20%以下。摩擦性能调节剂有无机填料、有机摩擦粉及金属三大类。有湿法开松石棉工艺,也有冷压成型工艺。也有配方除有机粘合剂外,再加入特殊填料,以在摩擦热作用下形成硫化镍无机粘合剂。火车闸瓦基本上是有有机基半金属摩阻材料。除了以上这些以树脂为主的配方外,这一时期不少软性摩擦片仍以橡胶为主要粘结剂,有的采用卤素化的丁基橡胶^[4]。苏联广泛采用聚丁二烯、丁苯及丁腈、丁钠橡胶等。此外,还有采用环氧树脂^[5]、三羟基乙基异三聚氰胺盐反应的腰果壳油树脂^[6]、酚树脂异氰酸盐三聚产品^[7]、沥青^[8]、呋喃树脂^[9]、聚酰亚胺树脂^[10]、能硫化的聚硅氧烷树脂^[11]、热塑性摩擦和摩蚀复合物^[12]、加有硅酸钠的芳烷基醚树脂^[13]、聚四氟乙烯^[14]、硅树脂^[15]、邻苯二甲酸二烯丙烯树脂^[16]、氟碳树脂^[17]、氟橡胶及CaO^[18]等,可以说是集耐热的热固、热塑性树脂及橡胶的大成。

这一类摩阻材料中的摩擦性能调节剂的选用方面近年来也有很大发展。金属粉、碎屑的选用可以显著改善导热性,改善高温摩擦特性及延长使用寿命。不少石棉增强的有机基摩阻材料在加有多量金属粉、碎屑(一般高于20%)后可将使用温度提高到500℃甚至800℃以上^[2],亦正是这种金属粉、碎屑高组分量使用的结果导致了半金属基摩阻材料的发展^[1]。有机摩擦粉的使用为近十年多来的明显趋势,除腰果油摩擦粉外,还有采用酚醛微珠^[19]、焦油物残渣^[20]、芳基硼酸酯与醛的反应物^[21]及苏联采用的聚丁二烯粉和一些有机三聚物^[22]等。加有机摩擦粉后可以使材料的摩擦系数—温度曲线趋于平稳,磨损也有下降。

填料中减摩性的一般采用石墨、二硫化钼、滑石、云母、金属和热塑性塑料;摩阻填料采用各种氧化物、硫化物、卤化物、硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐和一些复式盐等约21余种^[2]。此外,还有采用磷化物提高800~900℃摩擦系数^[23]、加浮石以使磨屑变软,加碳化钛以提高材料的导热性^[24]、加氧化铜以稳定高温摩擦系数^[25]、在火车闸瓦中加5~15%冰晶石使之在1100℃的摩擦面高温时起二次粘合剂作用,以降低磨损^[26]。

七十年代后期至目前的几年中这一类材料的发展在欧美是明显地趋向无石棉配方,苏联仍在发展这一类中的石棉摩阻材料。但即使仍使用石棉,而石棉的用量却在减少(少石棉配方),或采用石棉与其它纤维混用,如石棉与纸混用^[27](湿式摩阻材料)、石棉与玻璃纤维混用^[28]等。

二、各种结构摩擦材料并存及复用

这里主要谈一下第二类金属基摩擦材料与第一类有机基材料的复用及一些特殊用途的摩擦材料。

采用粉末冶金方法制成的金属基摩阻材料是六十年代前后发展起来的,它的特点是高压下摩擦系数变化小,高温摩擦系数比有机基要好,因此虽然价格较高,工艺复杂,但在

高的使用温度及一些特殊场合还常使用它^[1-3]。它的一些缺点亦正在克服改进中(如噪音大、较脆、低温效率低等)。主要用于高速飞机、坦克、大型工程机械等重负荷的制动器和离合器及湿式机构中。

金属基摩阻材料的配方开始以铜粉为基础、烧结温度较低,以后逐步发展到以铁粉为基础、烧结温度较高,目前二者并存使用,还加入干润滑剂(如石墨、二硫化钼等)以稳定性能,加入石英、金刚砂以增加摩擦系数,其它加入物有铝、铜、合金、锡及锌和矿物组分(如三氧化二铝、硅酸、莫来石等)^[20]。

粉末冶金的金属基材料还被用来制作高热传导率轮鼓^[30]。

一般金属基摩擦片与金属底板(骨架)的连接采用加压烧结,设备庞大、工艺复杂,又化时间^[31]。改进的方法是采用表面摩擦用的金属陶瓷(配方:Fe80~99%、Ni或Cr0~5、Cu0~3、碳0~5、石墨1~10、SiO₂或Al₂O₃0~15)和底面支持用的金属陶瓷(配方:Fe35~80%、Ni或Cr1~22、Cu0.3~15、碳5~20、石墨8~20)二层一起压制一次烧结制成^[32];也有采用等离子体喷射^[33]。有的则用改进配方以简化工艺,如:Cu为主,加4~8%Sn、5~15%Fe、25%石墨、5%Al₂O₃;300℃下温度以2~3吨/厘米²压坯,再800~850℃烧结而成^[34]。

金属基摩阻材料使用时的噪音问题近年来引起人们的注意。有报导认为陶瓷用量20~35%、Cu43~46%、Zn5.5~10%、Fe5~10%及少量Sn、Ni、Ti、石墨、硬炭和铅并加约12.5%的Mo,可使高温摩擦表面层软化而消除噪音^[35]。采用每个制动盘二面装有不同的摩擦系数的摩擦片,使产生不同振动以互相干扰、减少噪音^[36]。亦有的采用减少噪音涂层,如用通用的聚合物乳液(如丁苯橡胶、丙烯酸-醋酸乙烯共聚物、丙烯腈橡胶、氯丁橡胶、乙烯-醋酸乙烯共聚物或聚氨酯水乳液)与纤维素稠厚剂(如羟乙基纤维素)、抗冻化合物、杀菌剂、颜料配成涂料涂在摩擦片上以减少噪音^[37]。或采用由填料及耐热粘合剂组成的表面磨料涂层^[38]。在改进工艺方面如加0.5~12%煤焦油沥青于铜基铁基配方中^[39]。在改进性能方面如表面渗硼^[40]或涂一层硼化物^[41]以提高使用寿命,采用过共晶珠光体的灰铸铁^[42],采用含10~15%石墨及1.5~3.5%周期表V-B金属^[43],加碳化硼以提高稳定性^[44]。在湿式使用金属基材料中亦有采用金属纤维的,如采用直径为0.001~0.005英寸长1~8毫米的碳钢、合金钢或不锈钢纤维经制毡,烧结可得50%以上气孔率^[45],有的采用40~50%金属纤维,采用790~3950公斤/厘米²压力压制及500~1200℃温度烧结^[46]。

采用第一类有机基摩阻材料与金属基摩阻材料复合使用可互补长短获得很好的使用效果。有报导蹄片由二部分材料组成:边缘部分采用较软、但热传导率较低的有机基摩擦材料,中间部分则采用高热传导率的金属基摩擦材料;在一般负载条件下边缘部分材料起作用,充分发挥有机基材料的特点,而当高负载时,由于边缘部分充分变形而使中间的金属基材料发挥其作用^[47]。有的干脆在一片摩擦片上有15%以上表面为有机基材料、50%以上表面为半金属基材料,据说能使磨耗下降、有效性提高并降低价格、噪音和衰退现象^[48]。有的在有机基材料中加入磨成粉的金属基材料(配方:23~82%Cu、36%Zn或Sn、18%Pb、20%石墨或MoS₂、2~48%无机物)^[49]。

除了上述情况外,一些特殊场合使用的摩擦材料也在发展。如采用硬质尼龙短纤维的离

合器片^[50]，采用导电元件/半导体元件制成的在受电压时能互相吸引的离合器片，其中所用的半导体为酞一萤烷聚合物^[51]。还用有聚四氟乙烯与铁粉制成的有磁通量的摩擦片^[52]。

陶瓷质的无机基摩阻材料亦有发展，主要用于超音速飞机等超高热负荷摩擦副及一些电磁装置中。如在电磁摩擦副中的摩擦片，基本上由 Al_2O_3 组成，莫氏硬度在8以上，0至1300°F摩擦系数稳定^[53]。有的采用原地形成的金属硫化物为粘合剂，由配方中的硫和铁反应形成硫化铁^[54]。或用聚硅酸锂13~35%作为无机粘合剂制摩擦材料，有的采用氧化铝或氧化锆，有的用无机粘合物（滑石粉）60、石墨纤维30与金属纤维10制成制动盘^[55]。

从以上不完全的资料可以看出，当前各类摩阻材料并存及复合使用的趋势是十分明显的。

三、无石棉摩阻材料

近二、三年来欧美发表的有关摩阻材料的文献专利已逐渐被无石棉材料所占领，其它有些国家在这方面的发表文献也在增多。美国部分生产的新车已用无石棉摩阻材料，可望近几年中扩大使用；欧州在部分新车中也部分使用。至八十年代后期，无石棉摩阻材料在这些国家将成为主流。

1. 取代石棉的各类纤维：

石棉在摩擦材料中除增强作用外，还有表面活性大、熔点高、硬度适中、摩擦系数较高而且在相当宽的温度范围中比较稳定、价格便宜等优点；存在的问题是450~700℃逸出结晶水及化合水，引起一定的不稳定，以后又有相变化、产生镁橄榄石及二氧化硅，使摩擦系数变化并失去强度，并对树脂粘度及老化有影响，膨胀系数与树脂相差较大。

能够取代石棉的纤维希望具备石棉一样或可以比拟的耐热性、摩擦性、增强性等基本性能，最好能弥补石棉的一些缺点，而且价格不能太贵。现在还很难找到全部符合这些要求的纤维。近几年的研究及探索不外乎以下方面。

①矿物纤维：矿物纤维耐热性好、价格便宜，而强度低因而必须加强基体。苏联在早年即使用矿渣棉^[56]。美国在1975年^[57]公布采用含 SiO_2 45~50%的火成岩纤维，标准成份为：49.06% SiO_2 、1.36% TiO_2 、15.70% Al_2O_3 、5.38% Fe_2O_3 、6.37% FeO 、6.17% MgO 、8.95% CaO 、3.11% Na_2O ；配方举例：火成岩纤维5、酚醛树脂1、铬铁矿粉1、重晶石2、黄铜粉1；制品70℃时摩擦系数为0.41，240℃时为0.38。

②玻璃纤维：玻璃纤维的强度高、耐热性好、摩擦系数相当高，但制品硬度高、磨损较大，此外玻纤在800℃以上易形成玻珠，摩擦系数在二个温度区域有凹峰而且往往需要偶联剂以改善界面状态。日本在七十年代做了这方面的工作，美国在这方面专利也很多^[58]，以1976年公布^[59]的为例，采用配方为：玻璃纤维40、酚醛树脂15、橡胶3、铜屑10、石墨4、填料24。可以看出此配方采用了橡胶增韧的共混粘结剂以降低基材的模量。

③金属纤维：金属纤维强度大、导热性好、耐热，已成为一种比较理想的摩擦材料增强剂，但要注意工艺处理及界面的结合。在使用上亦有这样的过程，即先与石棉共用或在金属基材料中增强，逐步代用（特别是半金属基材料的发展），再发展到共用。有报导^[60]采用

40~75%石棉中加40~25%钢纤维增强及改性,在较高温度使用时采用全部或几乎全部钢纤维,亦提到采用粘合力强的粘合剂效果好,如橡胶(天然或合成)与酚醛树脂的共混物等。更多的报导是用于半金属基材中。

④碳纤维:轻、导热、强度极高、耐高温及摩擦系数稳定(但较低)使碳纤维成为最好的摩擦材料增强剂之一,除了飞机用的碳-碳摩擦材料中采用碳纤维外,目前其它摩擦材料亦在应用及发展中,特别是沥青基碳纤出现以来,由于价格大幅度下降(18美元以下),目前不但在摩擦材料上,而且不少复合材料领域中也出现碳纤维“热”。在飞机以外的其它摩擦材料中比较多的是碳纤维与其它非石棉纤维混合使用,如与钢纤维混合使用^[61]。

⑤有机纤维:有机纤维的强度高、韧性好、轻,但导热性及耐温性差,一般进行表面金属化或无机化处理,或配入配方后进行后处理(如焙烧)。有报导采用人造丝或聚丙烯腈纤维及无机粘合剂,在40公斤/厘米²压力下成坯后以900℃焙烧成型^[61]。也有报导将有机纤维进行预处理使之表面无机化^[62]。亦有采用酚醛纤维者。最近美国专利报导(USP4,374,211)用“Kevlar”有机纤维与热固树脂、炭粒子、非石棉纤维、有机化合物、无机化合物制成的摩擦材料,摩擦系数为0.39~0.45。

⑥采用晶须:晶须的各种性能都很好,但价格昂贵,只有个别报导^[63]。

⑦其它:如纸质^[64]、棉花纤维表面用金属氧化物处理^[65],如用钛酸钾晶须加入摩擦材料可同时改善热衰退性和磨损^[66]。

目前非石棉纤维使用的趋势之一是各类纤维混杂使用,互补长短。

2.半金属基摩擦材料:

半金属基摩擦材料在五十年代已出现,采用大量的金属粉或屑、丝以改善石棉增强的有机摩擦材料的导热性、摩擦稳定性及磨损,特别在火车闸瓦中占有统治地位。在七十年代由于湿式摩擦材料的发展及孔率提高后增强的需要,开始引入金属纤维,并逐渐在摩擦材料的其它领域中扩大应用。国外很多公司在七十年代发展的新牌号都是这一类产品,七十年代末到八十年代初由于无石棉摩擦纤维在欧美国家的迫切需要,目前已可能上升为第一代无石棉摩擦材料之一。这里有代表性的报导如美国专利3,973,394采用15%的铁粉,3,210,303采用68%铁粉与23%的石墨粉,3,434,998采用30~50%金属或金属氧化物,而3,856,120除加26%金属粉外,还加入15%钢纤维或其它纤维,3,835,118除钢纤维外,还加入10~40%的海绵铁,而DTP 916,609以通电流熔合金属表面来与树脂复合;当前的半金属配方趋向是以有机高分子化合物为粘结剂,加以20%以上的金属粉,以少量金属纤维加强并混合使用一些其它的非石棉类纤维^[1-2]。最近报导(GB2,100,275吴羽化学工业公司)一种半金属基的碳纤维与金属纤维混用材料,配方为:20%酚醛、15%钢纤维、20%碳、9%碳纤维、21%无机填料、15%有机摩擦粉。摩擦系数0.31。

3.无纤维型摩擦材料:

当前以树脂为主橡胶增韧,或橡胶为主树脂改性的共混基体已在理论及实践上有很大进展,填料及有机摩擦粉在摩擦性能的调节上已掌握大量的应用数据;再加上填料表面处理及有机化的技术已日趋成熟^{[1][2]}。因此,无纤维型摩擦材料的研制正在开展中,很有可能在某些应用领域中成为第二代无石棉摩擦材料。

四、碳—碳摩擦阻材料

碳纤维增强、以有机高分子化合物粘结后再焙烧成全碳基材的碳—碳摩擦阻材料可以说是第一类摩擦阻材料的发展，也是陶瓷基材料的分支。它是七十年代以来在飞机用摩擦片中逐渐应用发展的，在一些报导中认为，它对减轻飞机重量也非常有效。一般使用型式是盘式，由于耐热性的提高，盘式制动器可做得很小，有很大的单位面积吸收功率，而且使用寿命大大提高。由于碳纤维价格降低，某些国家已开始用于汽车。可以预计：随着盘式制动器的发展，碳—碳摩擦阻材料不但在离合器中而且在制动器中都将扩大使用。这种材料的主要问题是防止高温时的氧化（尤其是非摩擦部位）及湿态摩擦系数的下降。近年来这方面的报导很多。六十年代早期产品用金属丝屑压入碳基体中并加热使之结合以提高制品导热能力、强度和弹性，或用碳与铁粉混合制成干、湿态摩擦系数稳定的制品，也有用大量石墨加金属的，这些都是碳基制品。以后在七十年代出现了加碳纤维的碳—碳基产品。美国专利中有的报导采用石墨板作盘式制动器的摩擦部分及热吸收部分^[67]，有的用2800℃形成石墨摩擦片^[68]或碳质摩擦片^[69]；有的碳质摩擦片表面用网格型—平型贴合，使湿态所需操作压力减少，减轻制动机构重量^[70]；有的采用凹边结构^[71]；有的采用碳纤维增强碳基材料制成套管以连接碳摩擦片^[72]；有的碳摩擦片的边缘传动部分采用碳纤维增强^[73]；有的用块状石墨作基底，碳纤维增强层作面层以降低价格，一般用聚丙烯腈碳布、酚醛树脂，经160℃固化后在惰性气体气氛中高温碳化而成^[74]；有的用含65%碳纤维增强的底盘制碳质摩擦片^[75]；有的用碳纤维（如HNG—50）涂以树脂石墨混合物，再烧于筒芯、去除溶剂、加热至软化压成坯，最后以1800°焙烧八小时并反覆浸渍糠醇与焙烧以减少气孔^[76]；也有将碳纤维布涂以树脂制成摩擦块^[77]；有的报导专门研究碳摩擦盘的石墨化过程，使结晶和无定型碳的平均层间距在15℃时少于3.39埃，碳盘弯曲强度可大于5000磅/平方英寸^[78]；有的用碳基加硼酚醛树脂，模压后碳化再石墨化^[79]；有的采用带有硬质热解石墨微观复合物的制动摩擦元件，结构中嵌有共沉积的高熔点碳化物结晶（如SiC、ZrC及HfC）^[80]；亦有报导可重复使用^[81]或更换的碳摩擦片^[82]。有的报导在盘式制动器中将铁基摩擦片与碳基片交叉叠放，前者干、湿摩擦系数都是0.2~0.3，后者干摩擦系数0.3~0.4、湿态为0.1，交叉叠放结构可以使制动器在沾水时摩擦系数维持一定水平^[83]。

对碳—碳摩擦阻材料的抗氧化问题也提出了多种方法。有的用金属罩屏蔽于非摩擦部分^[84]；有的碳用布增强罩屏蔽于非摩擦部分^[85]；有的用高碳纤维含量的条带作氧化屏蔽^[86]；也有双片式结构、碳纤维增强，在结构上加抗氧化流剂（如硅和硼的氧化物，钡和钙的氟化物）^[87]；有的用抗氧化涂层（制件表面涂硅、再涂镍及铬）^[88]以铍与碳—碳摩擦片相结合是最新的发展趋势之一，用于代替过去的铍与钢的组合使用，可关关减轻重量。如采用铍芯盘表面上用环形碳质摩擦片^[89]；有将具有高散热特性的铍扇形块作中间层，面片则采用铍摩擦片^[90]；也有用碳质摩擦片与铍对偶相结合的盘式制动器或离合器片^[91]等等。

此外有关摩擦阻材料结构与性能的研究、摩擦机理的研究、测试技术的研究、以及应用理论的研究正处于蓬勃发展之中，这方面的报导很多，这里就不叙述了。

参考文献91篇（略）

国外摩阻材料的研究现状及发展

机械工业部武汉材料保护研究所

周 顺 隆

一、前言

摩阻材料研究和生产者都非常关心国内外的发展情况和今后的发展趋势,以便研究和生产出新型摩阻材料和产品。本文概要地介绍国外摩阻材料研究的近况及其发展趋势。因为离合器摩阻材料和制动器摩阻材料在我国统称为制动材料,而其中汽车用制动材料是量大面广,也是国外集中力量发展的材料。所以这里以汽车摩阻材料为主,介绍它们的研究现状和发展。

二、国外制动材料研究概况

在国外,制动材料大体上分为四类:一类是非金属基的石棉摩阻材料,这是广泛采用的、用于低中负荷条件下的材料,如汽车、拖拉机等大多数采用此材料;二类是金属基的粉末冶金摩阻材料,这是国外六十年代前后发展起来的,主要用于飞机、坦克、大型工程机械等重负荷的制动器和离合器上;第三类是半金属摩阻材料,主要是七十年代中期发展的材料,用于上述两种工作条件之间的离合器和制动器上;第四类是湿式摩阻材料,这是在油解质中工作的摩阻材料。第三类(半金属)和第四类(湿式)又各自可分为有机型和无机型两种。

粉末冶金摩阻材料从它由轴承材料发展

成为一个单独体系以后,由于具有良好的耐热性,在六十年代初期获得迅速的发展。但是,由于工艺复杂、成本高,到七十年代发展又缓慢下来。目前各国都努力在工艺上进行改革,如采用喷敷法代替冷压成型后加压烧结的繁杂工艺,降低了成本,提高了生产效率。另一方面,随着航空技术的发展,对飞机制动材料的性能要求越来越高了。除了铜基粉末冶金摩阻材料外,又发展了铁基摩阻材料。但仍不能满足越来越高的性能要求。造成这一困难局面的主要原因是摩阻材料研究者对制动过程的本质认识不够深入,对材料的比热、密度、膨胀系数、硬度及其与摩擦表面温度之间的摩擦学特性的相互关系,缺乏深入的研究。七十年代初期,美国航天局为了满足航天飞机及巨型喷气客机制动的需要,在航天局 H·Schmitt 领导下,由 B·C·Bill 博士任顾问,以“高能制动系统”为题进行了全面深入的研究。其中以 T·L·Ho 为主的研究者对制动过程的摩擦磨损特性、接触状态、表面温度,制动结构、磨损机理、测试设备等进行了系统地研究。在此基础上研制出几种新型制动材料,有铜基、镍基和钼基粉末冶金摩阻材料,如表 1。

表 1

组 分 名 称	金 属 粉	石 墨	填 料	摩 擦 调 整 剂
铜 基	Cu 31.0	32.0	石 粉 22.0	15
镍 基	Ni 47.6	27.5	Al ₂ O ₃ 19.8	5
Mo/LPA100	Mo 50.0	—		50

上述研究小组通过十余年的系统研究,从1972年至1980年先后提出近二十篇研究报告和论文。如“高能滑动接触的热弹性力学与磨损的模拟”^[1],“飞机制动材料的探讨”^[2],“飞机制动材料与对偶钢滑动摩擦的磨损方程式”^[3],“飞机制动材料磨损研究”^[4],“飞机制动材料的研究”^[5],“摩擦材料的热效应”,“盘式制动的表面温度与磨损研究”,“飞机制动材料的评价”,“飞机制动材料的发展”等等研究论文,不仅从磨损理论方面应用和证实了 Bill 的磨损再结晶理论、Suh 的磨损剥层理论,建立了制动摩擦的磨损模型,而且在试验装置、试验方法以及对偶材料方面都进行了有效的研究。在此基础上研制出新型摩擦材料及其混料、压制、烧结、热处理工艺。这些材料已经成功地应用在波音飞机、航天飞机等制动器上。从粉末冶金摩擦材料的研究可以看出:①机理的研究是基础性的必不可少的研究课题;②随着新型材料的研制,对偶材料的研究是很重要的;③在材料配方中,金属的种类向高熔点元素方向发展、石墨的含量也大大增加;④摩擦调整剂的品种增多,由过去的铅、锡等单一元素向金属盐类(如钨酸铝等)方向发展。

三、汽车用制动材料的研究近况

随着车辆向高速、大马力或小型化方向发展,各国注意力集中在解决节能、环境污染、噪音和耐热衰退性能等问题上。制动器结构也从鼓式制动向盘式制动方向发展。离合器也随着转速的提高和结构的紧凑化,对摩擦材料的强度或旋转破坏强度以及耐热性、耐腐蚀性等提出更高的要求。

众所周知,汽车用摩擦材料是由粘合剂、增强纤维和摩擦调整剂组成。过去采用的非金属基摩擦材料主要是以石棉为增强纤维,采用模压树脂型的鼓式制动器衬片。为“提高材料的耐热性,粘合剂从过去的天然橡胶、合成橡胶、亚麻油等及其改性的酚醛树脂发展到三聚氰胺、腰果壳油、丁苯橡胶改性酚醛树脂。因为改性酚醛树脂在耐热性、成型加工性和成本方面比较优越。除了酚醛树脂外,还有研究硅树脂、聚酰亚胺树脂、邻苯二甲酸二烯丙酯等树脂,^[6,7,8]作为摩擦材料的粘合剂。但是,由于它们或者在成型工艺上存在问题,或者由于成本高等存在一些问题,目前仍然不能获得广泛的应用。在摩擦调整剂应用方面,有机填料以腰果壳油摩擦粉和橡胶粉或轮胎粉为主,应用越来越普遍。它不仅对

降低成品的硬度、改善低温摩擦性有利，而且对减少制动噪音也具有良好的作用。润滑剂中石墨含量增加了，也有采用二硫化钼等润滑材料的。填料中金属的含量也在提高，如铜粉、黄铜粉、铸铁粉等。尤其铜粉和黄铜粉在摩擦材料中，由于它们的存在，摩擦时能够在对偶的表面形成转移膜，既能提高摩擦力矩和稳定摩擦系数，又能减轻对偶的擦伤、提高摩擦副的耐磨性，因而受到重视。

增强纤维过去是以石棉纤维即水合硅酸镁 ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 为主。含有石棉的有机摩擦材料在摩擦过程中、在摩擦热的作用下，通常在 400°C 以下尚能维持其增强效果。在 400°C 以上时结晶水不断析出，会明显降低摩擦性能，磨损也急剧增大。而在 550°C 以上时结晶水已基本丧失，完全失去增强效果。自从1972年国际肿瘤学会医学讨论会上确认石棉有致癌作用以后，再加上国际上汽车拥有量不断增加，在环境中石棉纤维含量也不断增加。因此各国都对环境中石棉的含量加以限制。如日本规定不允许超过2根/升，而美国则认为吸入一根纤维也能导致癌。因此研究非石棉基有机摩擦材料，已成为各国研究者的迫切任务。近年来，自1974年至1983年报导了大量的专利，介绍了无石棉摩擦材料。作为无石棉的增强纤维主要有钢和铜等金属纤维和粉末， $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 等陶瓷纤维和粉末，玻璃、尼龙、碳素纤维。这些纤维，有单独使用的，也有混合使用的。其中金属纤维，由于它在高温下具有良好的耐磨性，应用最广泛。通常把钢纤维代替有机摩擦材料中的石棉、再配合如铁粉和石墨等填料的材料叫做半金属摩擦材料。

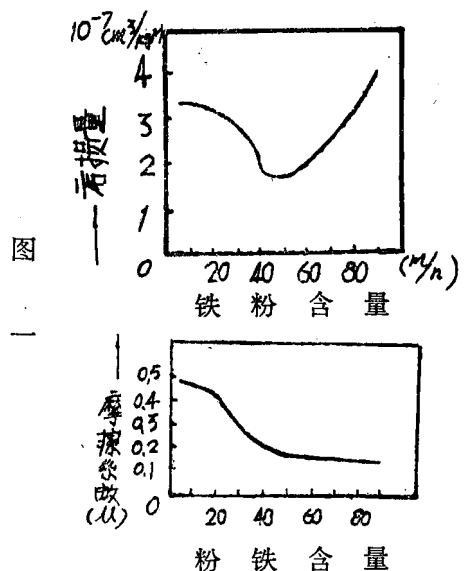
今后，随着使用条件的不断恶化，半金属材料 and 粉末冶金摩擦材料将会越来越引起人们的重视。据预测^[10]，半金属材料将成为汽车制动材料的主流。美国 Bendix 公司材料部主任 S·K·Rhee 博士1982年12月来华

讲学时也曾提到：“今后汽车制动材料的发展，将集中于各种半金属材料的研究和应用。”

四、半金属摩擦材料

半金属材料同石棉摩擦材料相比，成本略高一点，比重稍大一些，这是它的缺点。但是，它在性能方面具有如下优点：①耐磨性好；②在 400°C 以下摩擦系数非常稳定；③制动噪音低。这些优点不仅仅是因为单纯地以金属代替石棉摩擦材料中的石棉纤维所能得到的。综合文献资料可以认为，复合配方的配比和摩擦调整剂的选择起相当重要的作用。

半金属材料的发展大致经历了三个阶段：第一阶段是从六十年代中末期开始。所谓的少石棉半金属材料，通常为含石棉10~25%，金属粉末30~50%。典型的配方^[10]为：树脂24%、石棉10%、硫酸钡8%、铁粉50%、腰果壳摩擦粉6%、氧化铅2%。这种少石棉半金属材料的耐磨性比一般石棉材料提高一倍。由于金属粉末含量提高了，摩擦系数高而且稳定，摩擦系数差值减小，最大与最小摩擦系数之差值可于0.15。专利资料还列出铁粉含量对磨损率和摩擦系数变化的影响，如图1所示。除了上述的有机半



铁粉含量对磨损和摩擦系数变化量的影响

金属外，还有无机半金属^[11, 12]，即用无机盐硫化铜或硫化铁作为粘合剂，在450℃烧结而成。典型配方如：铁粉29%、硫磺16.5%、石墨18.8%、石棉纤维21.3%、二氧化硅10.4%、氧化铝4%。杭州制动材料厂引进日本三菱水泥建材公司的DB-7配方也是属于少石棉半金属材料。

半金属材料发展的第二阶段是从七十年

表 2

材 料 \ 性 能	摩 擦 系 数				磨 损 量 (吋 × 10 ⁻³ 7)			
	250° F	325°	475°	550°	250° F	325°	475°	550°
少石棉普通半金属	0.32	0.34	0.33	0.32	25	15	5	10
海棉铁钢纤维半金属	0.38	0.36	0.35	0.32	10	8	5	10

注：磨损量是在制动300次后测定的。

半金属材料发展的第三阶段是八十年代初期，在本迪斯公司提出的海棉铁——钢纤维半金属材料基础上发展出品种较多的各类无石棉半金属材料。这种半金属材料的特点是：①采用复合金属纤维，如钢纤维与铜纤维复合、钢纤维与碳素纤维复合、铜纤维与

表 3

半 金 属 材 料 配 方

	组分配比 (%)	例 1	例 2	例 3
1	酚醛系列树脂	8	8	8
2	金 属 粉	1	1	1
3	铁 粉	0	0	42
4	橡 胶 粉	2	2	2
5	石 墨	17	17	17
6	腰果壳油粉	0	5	0
7	钢 纤 维	20	20	20
8	陶 瓷 粉	0	0	10
	高 碳 铁 粉	42	42	0

注：例 1 和例 2 是日本曙制动器公司专利。例 3 是美国本迪斯公司专利。

代初期和中期开始。由美国本迪斯公司首先（1974年）发明^[13]，用钢纤维完全取代了石棉纤维，用20~80目的海棉铁代替了金属粉末。这种无石棉的海棉铁摩擦材料比少石棉半金属材料在100℃~200℃摩擦条件下摩擦性能提高25%，耐磨性提高一倍，如表2所列试验数据。

碳素纤维复合等；②铁粉的含碳量提高了，采用含碳量0.5~1.0%的高碳铁粉或含碳1.5~2.5%的铸铁粉。克服了因石墨含量增加到15%以上时所造成的低温摩擦系数低和高温磨损加剧的缺点。典型的配方如表3所列^[14]。

它们的摩擦性能和制动力矩随温度变化曲线如图 2 所示。

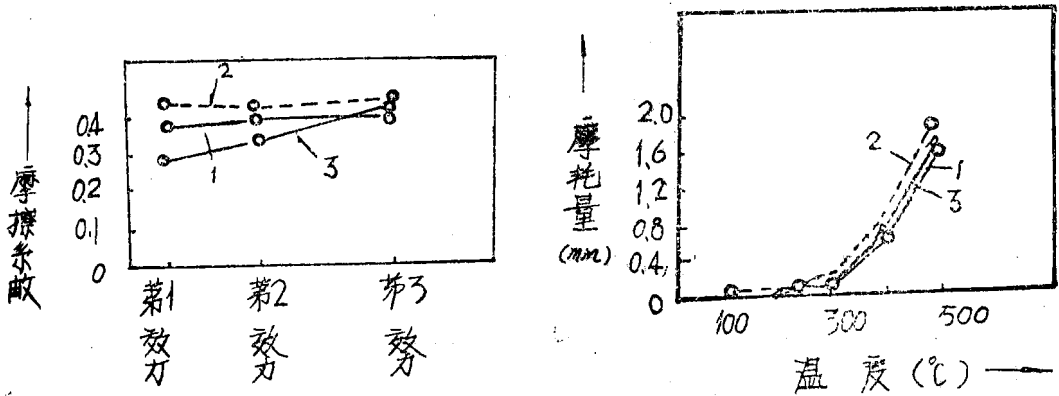


图 2

半金属材料的摩擦磨损性能曲线

综合若干篇专利资料，半金属的配方大致如下：粘合剂 5~15%，铁、铜及其合金的纤维和粉末 40~70%，石墨等润滑材料 10~20%，其他为摩擦调整剂。因为钢纤维比石棉纤维比重大，所以从容重看，虽然粘合剂的重量百分比减少，但容重并没有减少多少。同样，石墨的配比是相当多的。钢纤维的直径即粗细度对半金属材料的摩擦系数、磨损和制动噪音影响很大。从图 3 给出

的试验结果^[15]可以看出：钢纤维直径大于 0.04~0.05mm，会是磨损加剧，噪音升高。但是适当调整配方，也可以采用钢纤维直径为 0.10mm 的半金属。还有在用作离合器片的半金属材料中采用 $\phi 0.10\sim 0.20\text{mm}$ 的铜纤维。这种半金属材料不仅具有较高的旋转破坏强度，而且有良好的摩擦性能，但磨损率较高，350℃ 磨损率达 $20\sim 25 \times 10^{-7} \text{cm}^3/\text{kg}\cdot\text{m}$ 。通常半金属摩阻材料会在使用初期或在 230℃ 以下时出现摩擦系数稍低、磨损较高的情况。但是经历多次制动试验后上述情况会大大的改善。事实上，许多装车使用试验都证明，半金属材料比石棉摩阻材料使用寿命提高 3~5 倍。通过多次制动试验后，摩擦系数回升的现象，可以从转移膜的形成、表面层状态发生变化来解释^[16, 17]。填加高碳铁粉代替低碳还原铁粉或海棉铁能够提高摩擦系数的稳定性和高温 (300℃~500℃) 下的耐磨性，如图 4^[17]。

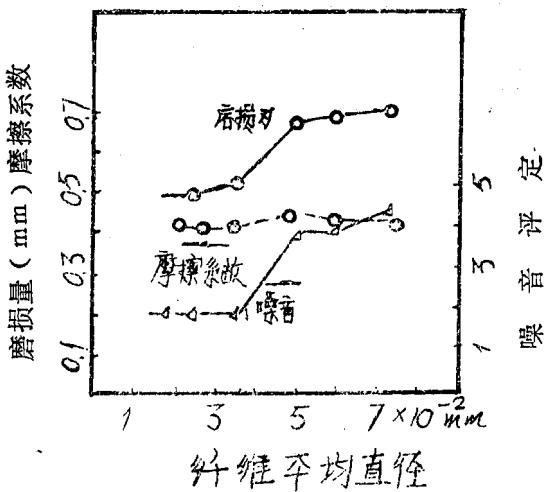


图 3

钢纤维粗细度对半金属的耐磨性及噪音的影响

半金属摩阻材料自七十年代中期研究成功并投入生产以后，已经获得迅速发展。它不仅用作盘式制动器衬块，也用作鼓式制动器衬片和离合器面片。半金属材料的特点是用钢纤维代替石棉纤维。钢纤维的粗细度是非常关键的问题，纤维直径粗则摩擦系数

高，但磨损较快，对偶也易于损伤、噪音大。而这又与钢纤维的柔软性有密切关系。

纤维直径低于0.03mm时，混料和粉尘问题就难以解决。

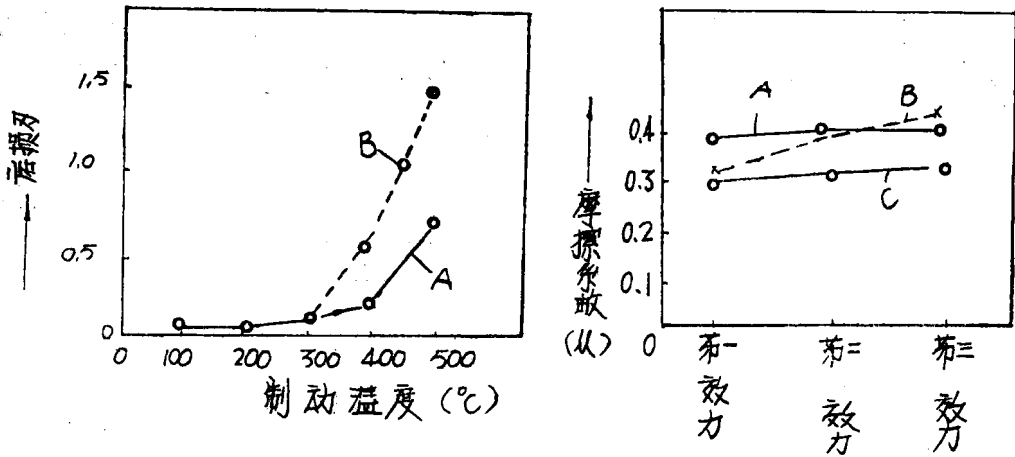


图 4
高碳铁粉半金属的摩擦性能

五、无石棉摩擦材料

有人认为国外有些国家是因为石棉资源贫乏，才研究一些代替石棉的人造纤维，以满足摩擦材料生产的需要。这种推测是不正确的。应该看到：石棉纤维作为一种耐热、隔热材料在国民经济中占有重要的地位。例如在建筑材料、密封制品、防护用隔热编织品、各种绝热填料等方面石棉都是难以取代的良好材料。但是作为制动品，由于石棉的热传导性很差，摩擦热难以迅速传导散失，以致促进摩擦表面变质层（衰退层）变厚、磨损易于加剧。再加上石棉含有结晶水，400℃以上结晶水要开始逸散。因此，在高温下石棉并不是不可缺少、不可取代的材料。特别是当人们发现石棉对人体呼吸器官的有害作用以后，各先进工业国家都迅速地转向无石棉摩擦材料的研究。美国本迪斯公司进行过如下的技术经济分析：无石棉或半金属材料的价格与石棉材料相比：鼓式片贵20~50%，盘式片贵20~100%，但寿命可以提高二倍。因此，Bendix公司花费2500万美元，增加测试设备一倍、研究人员

60%，来发展新型摩擦材料，并且计划在五年内增加基建投资达一亿美元。

国外无石棉摩擦材料的研究大体上可划分为下述四类：第一类是采用其他天然和合成纤维，如云母纤维、玻璃纤维、酚醛纤维、钛酸钾纤维、碳纤维等；第二类是几种纤维混合使用，如钢纤维与碳纤维混合、铜纤维与碳纤维混合、钢纤维与玻璃纤维混合等；第三类是将有机纤维或棉纤维表面镀敷一层金属，即表面处理有机纤维；第四类是用充填大量无机填料的办法完全取代石棉。

第一类无石棉摩擦材料中，采用玻璃纤维比较多，玻纤达40%^[10]，摩擦性能良好。其次是近年来发展的钛酸钾纤维，工艺性与摩擦磨损性能都非常优越，但成本太高。

第二类混合纤维。以一份日本专利为例^[11]，采用碳纤维与钢纤维混合，即碳纤维30%、钢纤维15%、酚醛树脂15%、无机与有机填料40%（包括硫酸钡6%）。其摩擦性能如表4。这种摩擦材料比一般石棉摩