高速列车用铜铁基摩擦材料的研究

刘倚天

西安诺博尔稀贵金属材料股份有限公司　陕西西安　710201

摘要：铁路运输是我国工业化进程重要的运输方式，随着列车运行速度的提高，对制动系统材料也提出了更高要求。对现役进口高铁制动片进行测试分析，得到其各组元的具体成分及其配比，以此进口配方为基础制定工艺方案，应用热压烧结工艺使性能得到进一步优化。试验结果表明：进口材料样品基体中w_{Cu}为50%、w_{Fe}为23%；润滑组元中w_C（鳞片石墨和团聚型石墨）为15%、w_{MoS_2}为2%；摩擦组元中的Fe-Cr合金比例为10%。根据以上进口样品配方，使用国产原料进行配比，并通过混料预成形、热压烧结等一系列工艺步骤，成功制备样品。将自主制备样品与进口样品的基础性能进行对比分析，自主制备样品的密度为5.29g/cm^3，大于进口样品的4.5g/cm^3，抗弯强度为48.77MPa，高于进口样品的38MPa，而抗压强度为88.42MPa，略低于进口样品的95MPa。综合以上分析，高铁用铜铁基摩擦材料可实现自主制备，且性能相当或优于进口指标。

关键词：摩擦材料；粉末冶金；铜铁基

Research on Cu-Fe based friction materials for high-speed rail

LIU Yitian

Xi'an Noble Rare Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, Shaanxi, China

Abstract: Railway transportation is an important mode of transportation in the industrialization process of our country. With the improvement of speed, higher requirements are put forward for brake materials. This study analysed the current imported high-speed railway brake pads, then obtained the specific components and the ratios of each component. Based on this imported formula, a process scheme was formulated. With the combination of the hot pressing sintering process, the performance was further optimized. The test results show that the content of Cu in the matrix of the imported material sample is 50%, and Fe is 23%; in the lubricating component, the content of carbon (flake graphite and agglomerated graphite) is 15%, and MoS_2 is 2%; the ratio of the Fe-Cr alloy in the friction component is 10%. Domestic raw materials were used for the above ratio of imported sample, and a series of process steps such as mixing, pre-forming, and hot pressing sintering were carried out to successfully prepare the sample. Compared with the imported sample, and the density of the self-prepared sample is 5.29g/cm^3, which is better than the imported sample of 4.5g/cm^3, the bending strength is 48.77MPa, which is higher than the imported sample of 38MPa, and the compressive strength is 88.42MPa, which is slightly lower than the imported sample of 95MPa. Based on the above analysis, the copper-iron based friction material for high-speed railway can be self-prepared, and the performance meets or exceeds the imported indicators.

Keywords: friction materials; powder metallurgy; Cu-Fe base

1 序言

粉末冶金制备摩擦材料由基体、摩擦组元和润滑组元组成[1-5]。基体通常占比为50%～90%，确保承载、耐磨和热稳定性，主要作为摩擦颗粒和润滑剂的机械载体。摩擦组元（增磨剂）由高熔点金属或化合物构成，以提高耐热性和抗磨性，同时平衡固态润滑剂可能降低的摩擦系数。润滑组元又称减磨剂，用以改善抗卡滞性能并降低材料磨损量，延长材料服役时间，其添加比例需适度，过多的润滑组元会损失材料的机械强度和摩擦系数[6]。

摩擦材料以金属材料作为基体，使其具有与金属相似的物理力学特性。材料内部均匀弥散地分布着非金属颗粒，使致密度降低。其具有以下优势。

（1）高机械强度　高温工况下，摩擦材料能够承受诸如弯曲、挤压和剪切等各种形式的单一或多重负荷。尤其在承受重载或冲击负荷时，其性能表现尤为突出，明显超越了其他类型的材料。

（2）服役温度高　得益于基体高熔点金属材料的加入，粉末冶金制备的摩擦材料可以在高温工作条件下维持良好的摩擦特性并维持较高强度。

（3）高热容量　摩擦材料具有较高的密度和比热容，因此可以在单位体积内吸收更多由摩擦产生的热能，使其能够有效应对“尖峰负荷”的工况。

（4）优良的导热性能　摩擦材料基体组元应用Cu、Fe等具有良好导热性的金属。剧烈的摩擦生热可以通过钢制对偶工件传导和扩散降温，此外，热量可以通过与制动片连接的钢制背板传导、吸收和散发。

（5）耐蚀性优异　粉末冶金制备摩擦材料能够在油、水等混合的复杂环境下工作而不会受到损坏，显示出强大的环境适应能力，且被认为是唯一能够同时适应干燥、湿润或二者交替服役环境下的摩擦材料。

（6）稳定的摩擦特性　在服役温度持续上升的工况下，这种材料的摩擦系数也保持稳定，不会发生剧烈变化，并且在温度下降后，它能迅速恢复原有的性能。

（7）可制作出薄形制动片　粉末冶金摩擦材料的加工性能优越，可制造出薄型制动片，这为减轻重量和提高性能提供了可能[7-10]。

周海滨等[11]研究了SiC（碳化硅）含量对铜基摩擦材料（粉末冶金制备）摩擦性能的影响。研究显示，铜基金属摩擦材料在不含SiC的情况下，其摩擦界面会形成许多凹坑，表现出较为严重的磨损现象，这主要是由于材料间的黏着作用导致的磨损。SiC的添加量增至6%以下时，虽然材料表面仍然会出现一定数量的凹坑和浅层的犁沟，但伴随SiC添加量的进一步提高，凹坑的数量按比例减少并最终消失。与此同时，材料表面的犁沟变得更深更宽，表面和次表面区域开始出现裂纹。研究表明，伴随SiC添加量的升高，摩擦材料的磨损机制从开始的黏着磨损和轻微的犁削磨损，逐渐升级为剥层磨损和严重的犁削磨损；熊翔等[12]对航空用铜基摩擦材料的工艺开展了研究；杨堃[13]对高铁用Cu-Fe基摩擦材料进行深入研究，得出此种材料是通过热压烧结等粉末冶金工艺制备的结论。材料中各组分的具体含量已经被精确测定，而这些成分的配比关系对于摩擦材料的力学特性、摩擦特性以及其他关键性能指标有着显著的影响。为了深入探究这些影响，研究团队参考了国际上粉末冶金制动材料的相关研究，并采用成熟的制备技术[14]。通过进行对照试验和配方优化等试验手段，他们专注于揭示并控制粉末冶金摩擦材料中润滑相的微观形貌特征。这项研究可以被视为一种针对国际先进粉末冶金摩擦材料的逆向工程分析。通过这项研究，杨堃及其团队不仅提高了对铜铁基刹车材料性能影响因素的理解，而且为进一步优化材料配方和提升材料性能提供了科学依据，这对于高速列车制动材料的研发和应用具有重要的实际意义，有助于推动高性能制动材料的发展和创新。

2 试验材料与方法

试验依据对国外样品中各个组成元素形态的分析结果，运用现行的工艺方法，独立完成了对粉末冶金摩擦材料的制备工作。本试验材料是以人造石墨作为团聚态石墨原材料。Fe-Cr合金，这种合金以质量占比15%Fe和85%Cr为其主要成分，经过专用热处理工艺，可直接制取并用于本次研究。工业纯铜粉、铁粉、天然鳞片石墨及分析纯MoS_2粉末等基础试验原料，均可通过国内采购获得并用于试验。

应用SSX-505型扫描电镜对样品的表面形貌和

断口形貌进行观察，并通过JSM-6510A型扫描电镜对样品的表面形貌进行细致的微观结构分析，应用该设备的EDS能谱分析材料的成分构成。使用CMT5105型微机控制电子万能试验机对材料样品进行拉伸性能测试。采用MM1000-Ⅱ型摩擦磨损试验装置，对摩擦材料样品进行模拟高速列车制动条件下的试验，并评估其摩擦性能。使用PANALYTICLB.V/PW3040/60型X射线衍射仪对材料的晶体相结构进行分析。

3　结果与讨论

3.1　进口材料的成分分析

采用ICP测定各个元素含量，对进口制动片样品的化学成分进行定量分析，测试结果见表1。

表1　进口样品的化学成分（质量分数）　（%）

Cu	Fe	C	Cr	其他
49.7	23.2	14.6	2.69	9.81

化学成分分析结果显示，该进口样品主要包括Cu、Fe、Cr等3种金属元素及非金属元素C。从表1可知，Cu、Fe元素合计含量约占到总量的75%左右，依据粉末冶金摩擦材料基体材料特性，可以推断出这种制动片摩擦材料的基体为Cu、Fe元素。

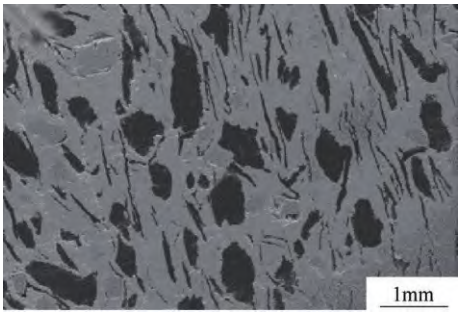
3.2　进口样品的SEM、EDS、XRD分析

在确定进口样品的化学成分后，进一步通过SEM和EDS对国外样品的横截面和纵截面进行分析。这一步骤旨在精确识别材料表面不同相区域的元素组成，并推测其潜在的微观组织结构。通过这些分析，可以获得进口样品表面形貌的详细信息，如图1所示。

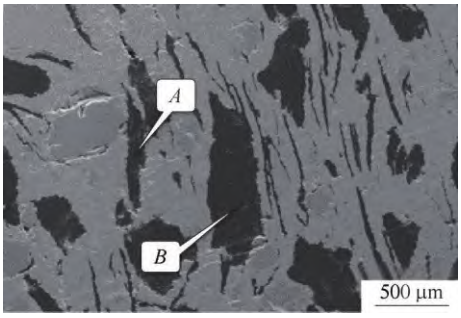
从图1可看出，在可见的区域内，能清晰地区分出不同的部分，颜色呈深浅不一且组织均匀分布。黑色部分主要存在2种形貌：细条状（*A*区）和粗条状（*B*区）形貌，均匀分布于浅颜色基体相区中。但是，仅凭通过ICP分析和SEM形貌观察尚不足以明确每个相区的具体构成。

为了精准确认每个组分的物质构成，对进口样品进行EDS分析，结果如图2所示。

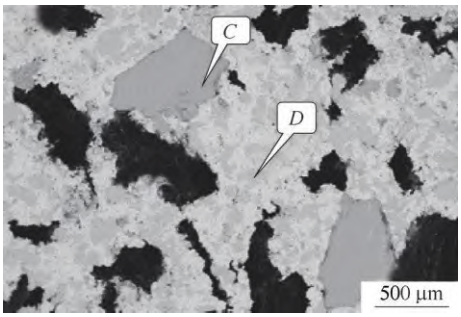
由图2可知，SEM显示棱角分明（大块）的浅灰色区域包含了Fe、Cu元素，组织内无明显边界，分析其为二元合金组织；在摩擦材料中，颜色较浅



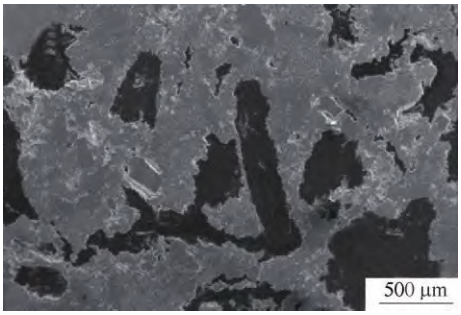
a）纵截面BEC（30×）



b）纵截面BEC（50×）



c）横截面SEM（50×）

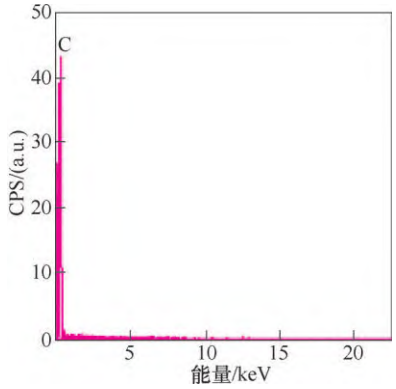


d）纵截面SEM（50×）

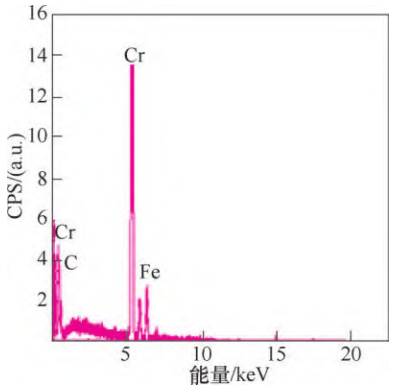
图1　进口样品不同倍数扫描电镜图

的两种组织主要是由Cu、Fe及其他元素组成，考虑到它们的含量较为丰富，推测这些为基体组织。黑色相区为C元素的两种不同形态的单质，根据类似摩擦材料相关文献中的描述，判断为润滑组元，即两种不同性质的石墨组织。

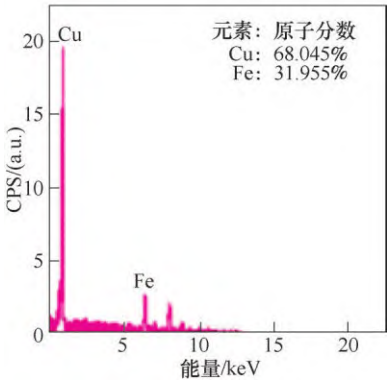
EDS和SEM定性分析了各相的组成、结构和元素分布，并得到初步的定量数据支撑。为明确各相



a）*B*区



b）*C*区



c）*D*区

图2　进口样品不同相区的EDS分析

的物质组成，对进口样品进行XRD分析，结果如图3所示。

从图3可知，进口样品的物相组成有Cu、Fe、Fe-Cr、MoS_2、C。综合以上分析判断：黑色区域为石墨组织；浅灰色且棱角分明部分为Fe-Cr合金；占据主体的浅色区域成分为Fe、Cu，且其中深色区域为Fe元素、浅色区域为Cu元素，两种元素均匀分布但未形成二元合金。结合粉末冶金摩擦材料原理可知，Cu-Fe作为基体组元；MoS_2和石墨的混合物作为润滑组元；Fe-Cr合金作为摩擦组元。对SEM形貌

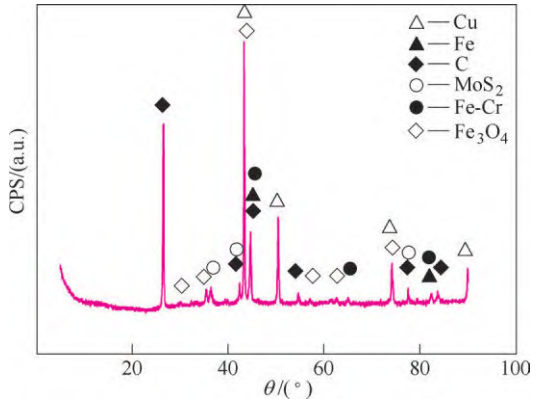


图3　进口样品的XRD图谱分析

进行细致观察发现，石墨（含少量MoS_2）具有两种形貌，结合摩擦材料润滑组元的应用惯例，条索状石墨组织系天然鳞片状石墨（下文简称鳞片石墨）且含量较多，块状石墨则为团聚态石墨。综合以上分析得到进口样品各物相成分见表2。

表2　进口摩擦材料样品各物相成分（质量分数）（%）

Cu	Fe	石墨	Fe-Cr合金	MoS_2
50	23	15	10	2

以上各物质成分作为自主制备粉末冶金制动片的成分依据。

3.3　进口样品的基础性能测试

基于以上分析，应用阿基米德排水法对进口样品的密度进行测定，并使用电子拉伸试验机对样品力学性能进行测试，结果见表3。

表3　进口样品密度及力学性能

密度/（g/cm^3）	气孔率（%）	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa
4.6	9.9	42	91

以上进口样品的基本性能参数将作为后续试验中自制样品的关键对比基准。

3.4　自主制备样品的制备工艺

在进行原料和粉末的混合过程中，遵循特定的顺序。为了选择合适的润滑成分，试验中特别选用了100～300μm粒径的鳞片石墨，作为层状石墨的原料。同时，为了制备颗粒状的团聚型石墨，选择了人造石墨，包括电极石墨和高强度石墨作为原料。

在工艺制备过程中，混料、预压成形和热压烧结，每个步骤均对最终产品的性能和质量起着至关重要的作用。混料是制备材料的关键步骤，各组元的添加顺序与混合的均匀度对摩擦材料的性能可

形成明显影响。预压成形使粉末原料压实致密，将在材料烧结过程中促进紧密结合，提高材料机械强度，便于装入模具。入模工序：将生坯压入石墨模具，使用碳纸和石墨垫片隔离每个坯料。

采用柔和混料工艺，避免破坏石墨原始形貌，具体过程如下：在混料坩埚中倒入定量石墨和MoS_2粉末进行初步混合，逐渐加入一定量的丙三醇，持续均匀搅拌至混合物表面黏连状态；加入铜粉、铁粉和Fe-Cr颗粒，并利用混合物表面的黏性使金属粉末均匀包裹，避免因不同材质粉末密度和颗粒度差异而导致出现混料不均匀现象。甘油在高温烧结过程中会挥发或碳化，最终以均匀的团聚型碳存在于材料中，不会对摩擦材料性能产生影响。

使用万能试验机匹配200～220MPa压强将均匀混合的原料粉末装入钢制模具，压制成块状生坯。应用直热式热压炉进行热压烧结，使用热电偶接触模具测温孔实时监控试验温度，具体工艺为：10MPa保压3min，升温至400℃；提升压力至14MPa，保压2min，升温至600℃；保温保压15min完成烧结过程；随后断电炉冷至室温，如图4所示。

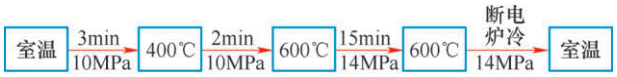


图4　热压烧结工艺流程

直热式热压炉具有升温快、易操作等优点，在确保材料充分烧结前提下保证了试验效率，可应用于中试批量生产。

3.5　自主制备样品的基础性能测试

采用前述的制备工艺和对应的国产原料，成功制备了以Fe-Cr作为摩擦组元、石墨作为润滑组元的粉末冶金摩擦材料。对这些自制的制动片样品进行了基础性能测试，结果见表4。

表4　自制样品密度及力学性能

密度 /（g/cm^3）	气孔率（%）	抗弯强度 /MPa	抗压强度 /MPa
5.3	6.3	49.5	89.5

4　结束语

将自主制备的粉末冶金制动材料与进口样品的基础性能进行对比分析，自主制备样品的密度为5.3g/cm^3，大于进口样品的4.6g/cm^3，抗弯强度为49.5MPa，高于进口样品的42MPa，而抗压强度为89.5MPa，接近进口样品的91MPa。综合以上分析，自主制备磨材料指标相当或优于进口样品。

参考文献：

[1] 王秀飞，尹彩流. 粉末冶金摩擦材料的应用现状及对原材料的要求[J]. 粉末冶金工业，2017，27（3）：1-6.

[2] 刘建秀，张驰，樊江磊，等. 铜基粉末冶金摩擦材料成分设计概述[J]. 粉末冶金工业，2018，28（6）：74-81.

[3] 周海滨，姚萍屏，肖叶龙，等. 铜基粉末冶金摩擦材料特征摩擦组元与基体的界面形成及磨损机理[J]. 中国有色金属学，2016，26（2）：328-336.

[4] 杨永莲. 烧结金属摩擦材料[J]. 机械工程材料，1995，19（6）：18-21.

[5] Dunlop Holdings Ltd. Friction pads：FR19690043473 [P]. British Patent，1284225，1972-06-21.

[6] 姜艳. 湿法造粒生产炭黑新工艺的研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2006.

[7] 盛钢，马保吉. 制动摩擦材料研究的现状与发展[J]. 西安工业学院学报，2000，20（1）：127-132.

[8] 潘运娟. 汽车半金属摩擦材料的摩擦磨损性能及机理研究[D]. 长沙：中南大学，2008.

[9] MARGAN C，PARAMANAND S. Singh Paramanand. Sintered iron-copper-tin-lead antifriction materials-effect of temperature[J]. Materials Science and Engineering：A，2000，292（1）：23-26.

[10] 费多尔钦科 NM. 现代摩擦材料[M]. 北京：机械工业出版社，1983：30-45.

[11] 周海滨，姚萍屏，肖叶龙，等. SiC颗粒强化铜基粉末冶金摩擦材料的表面形貌特征及磨损机理[J]. 中国有色金属学报，2014（9）：2272-2279.

[12] 熊翔，盛洪超，姚萍屏. 铜基航空刹车材料的烧结温度 与烧结压力[J]. 中南大学学报（自然科学版），2007（2）：206-212.

[13] 杨堃. 高速铁路用Cu-Fe粉末冶金刹车材料的研究[D]. 沈阳：东北大学，2011.

[14] FILIP P，WEISS Z. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications[J]. Wear，2002，252：189-198.

MW 20240830