DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.06.001　　文章编号：1000-128X(2023)06-0001-10

受电弓滑板材料研究进展及展望

吴广宁，伍　瑶，黄桂灶，董克亮，高国强，魏文赋，杨泽锋
（西南交通大学 电气工程学院，四川 成都　610031）

摘　要：受电弓滑板是列车获取能量的核心装备，良好的滑板材料性能是保障列车安全稳定运行的关键，高速列车具有大功率、高运能、长距离运行等特点，随着高速列车速度进一步提升，对受电弓滑板材料性能提出更高要求。文章首先介绍了国内外受电弓滑板材料的发展历程，包括金属滑板、纯碳滑板、粉末冶金滑板、浸金属滑板，以及新型复合材料滑板；然后综述各阶段滑板材料的工艺技术及其优缺点；最后结合中国电气化铁路发展实际，对高性能受电弓滑板材料的发展进行了展望。

关键词：高速列车；受电弓滑板；滑板材料；研究进展
中图分类号：U264.3^{+}4；U292.91^{+}4　　**文献标识码：**A

Research progress and prospect of pantograph slide materials

WU Guangning, WU Yao, HUANG Guizao, DONG Keliang, GAO Guoqiang, WEI Wenfu, YANG Zefeng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The pantograph slide is the core equipment for the train to obtain energy, and the good performance of its material is the key to ensuring the trains' safe and stable operation. With the further improvement in speed of high-speed trains that are characterized by high power, high capacity, and long-distance operation, higher requirements has been put forward for the performance of pantograph slide materials. This paper starts with an overview of the development history of pantograph slide materials in China and abroad, including metal slide plates, pure carbon slide plates, powder metallurgy slide plates, metal-impregnated carbon slide plates, and composite slide plates. The processing technologies, as well as pros and cons are also reviewed for these pantograph slide materials at different stages of development. This paper concludes by outlining the prospects for the future development of high-performance pantograph slide materials, taking into account the actual development conditions of China's electrified railways.

Keywords: high-speed train; pantograph slide; pantograph slide materials; research progress

0　引言

受电弓滑板是列车获取能量的核心装备，通过与接触网导线（简称“接触线”）的滑动接触传输电能，为列车稳定运行提供牵引能量。良好的滑板材料性能是保证列车安全稳定运行的基础，“受电弓–接触网”关系（简称“弓网关系”）是高速铁路三大基础关系之一。随着列车运行速度的提升，弓网接触状态会逐渐劣化，出现振动冲击、电弧烧蚀和摩擦磨损等情况，因此对滑板的性能有着十分苛刻的要求。此外，随着列车大功率、高速度、长距离运营需求的提升，对滑板材料的性能提出了更高的要求，包括需要具备足够的抗冲击强度、优越的导电性、良好的耐磨性、耐烧蚀性、优良的自润滑性，对接触线的磨损小[1-2]。早期，日本、法国、德国等各国对受电弓滑板作了大量的研究，取得很多重要成果，为滑板材料后续研究奠定了良好的基础。

基金项目：国家自然科学基金项目（51837009）
通信作者：吴广宁（1969—），男，教授，博士生导师，从事先进功能电工材料、设备绝缘材料、过电压技术及防护技术方面研究；E-mail: gzhuang@swjtu.edu.cn
引用格式：吴广宁, 伍瑶, 黄桂灶, 等. 受电弓滑板材料研究进展及展望[J]. 机车电传动, 2023(6): 1-10.
Citation: WU Guangning, WU Yao, HUANG Guizao, et al. Research progress and prospect of pantograph slide materials[J]. Electric drive for locomotives,2023(6): 1-10.

受电弓滑板主要经历了金属滑板、纯碳滑板、粉末冶金滑板、浸金属碳滑板、复合材料滑板等发展阶段[3]。中国自1961年首条电气化铁路开通以来，对受电弓滑板的研究取得一系列成就。在20世纪60年代，中国列车最高运行速度不超过70 km/h，主要采用软钢滑板，其具有机械强度高、电阻率低等优点，但润滑性差，对接触线的磨损十分严重[4]，因此中国铁道科学研究院等单位研制了机械磨损小的纯碳滑板，并投入使用[5]。随着列车速度提升至100 km/h，纯碳滑板材料由于机械强度和冲击韧性不佳，在列车运行过程中容易折断和破裂，使用寿命短，在速度达100 km/h的干线上难以得到应用[6]。针对此问题，以金属粉末为基础的粉末冶金滑板得到研发，这种滑板的抗冲击性能、耐磨性能等得到了极大的提升，是100 km/h干线列车的理想选择[7]。当列车速度到达160 km/h时，受电弓离线率增加，拉弧频繁，已有的粉末冶金滑板因组织疏松、耐拉弧性差而不能满足运行要求[8]。因此，在20世纪90年代，中国高速电力机车开始采用组织致密的浸金属碳滑板，其兼具机械强度高、电阻率低、自润滑性好等诸多优点[9]，是与接触线适应性最优的滑板，在速度200 km/h及以上的高速动车组上广泛使用。但现有的浸金属碳滑板并不能满足未来速度超过350 km/h的高速列车运行要求，研发综合性能高的新型复合材料滑板是必然趋势。

本文将主要介绍受电弓滑板材料的发展历程，对纯碳滑板、粉末冶金滑板、浸金属滑板、新型复合材料滑板进行归纳总结，并对能够满足未来超高速列车发展需求的新型复合材料滑板进行展望，以期促进高速受电弓的发展。

1 纯碳滑板与粉末冶金滑板

在电气化铁路发展初期，列车受电弓滑板由金属材料制成，如铜、钢等材料，但由于其与接触线之间的接触力大，容易导致接触线严重磨损，不能满足电气化铁路的发展需求，逐渐被纯碳滑板取代，纯碳滑板具有良好的自润滑性能，是低速电气化铁路（列车速度小于100 km/h）受电弓滑板的最佳选择。随着列车速度的进一步提升，纯碳滑板也暴露了诸多问题，例如机械强度低、使用寿命短等问题，因此世界上多个国家尝试在纯碳基体中添加金属，使滑板兼具导热、导电、耐磨、抗冲击热等性能，随后研发出的粉末冶金滑板在车速不小于100 km/h的领域广泛使用。

1.1 纯碳滑板

纯碳滑板主要由以沥青焦、石油焦和碳黑等为基体的材料组成，生产过程是先将基体按一定的比例在混料机中均匀混合，制成骨料粉末，然后在其中添加黏结剂沥青进行混捏、模压或等静压成形后焙烧成坯料，利用沥青浸渍坯料，并再次焙烧。

1.1.1 发展历史

日本是研制与开发滑板材料最早的国家之一，从1925年开始碳滑板在日本已经被开发、使用，并在1945年以后大量应用于私营铁路[4]。自20世纪30年代以来，欧洲各国快速发展高速铁路，广泛使用纯碳滑板，荷兰与意大利分别在1934年和1937年开始使用纯碳滑板[10]，德国ICE列车（最高速度达280 km/h）在1991年开始运营[11]，在运营初期一直采用使用寿命为2万km左右的纯碳滑板[8]。

中国对列车受电弓滑板的研究起步较晚，在1967年开始使用纯碳滑板取代软钢滑板，在2004年中国铁路第五次大提速后，引进了国外的受电弓滑板，纯碳滑板开始占主导地位[12]。目前，国内生产纯碳滑板的厂家主要有哈尔滨电碳厂有限责任公司（简称哈尔滨电碳厂）和东新电碳股份有限公司（简称东新电碳厂）。滑板材料由碳、石墨和沥青组成，与国外碳滑板相比，国内碳滑板的物理力学性能与国外产品相近，但使用寿命存在较大差异，例如上世纪60、70年代电力机车使用的哈尔滨电碳厂C23系列碳滑板，其使用寿命仅为1万km左右，而广深线准高速电力机车与“九龙—广州”的KTT机车使用的碳滑板（分别由摩根公司和逊克公司生产）寿命均达（7～8）万km[1]。表1展示了不同国家纯碳滑板性能参数。

表1 纯碳滑板的关键性能参数[13-15]

Table 1 Key properties of pure carbon slide plate[13-15]

国家或地区	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	硬度HBS	电阻率/($\mu\Omega\cdot m$)	抗弯强度/MPa	冲击韧性/($J\cdot cm^{-2}$)
欧美	1.70	75	0.30	50	0.35
日本	1.65	65	0.29	35	0.15
中国	1.70	80	0.29	45	0.36

1.1.2 优势与局限性

纯碳滑板是理想的电能量承载、传输部件，由于其良好的自润滑性和减磨性，当滑板与铜接触线摩擦时容易在“滑板–接触线”面间形成润滑碳膜[4]，从而减轻接触线磨损，延长接触线使用寿命。此外，纯碳滑板还具有在承载、传输电流的整个过程中电磁噪声小、耐高温、与接触线之间不会出现焊附问题等优点。因此，在列车发展的早期阶段，纯碳滑板被世界多国采用。

纯碳滑板也存在一些缺点和局限性，例如在运行过程中，滑板容易开裂、掉块[16]；同时，由于纯碳滑块是由多孔碳材料通过压实烧结制成的，其基体内部不可避免地存在许多细小开口和孔隙，使其力学性能较差，阻碍了运行速度的提高。此外，纯碳滑板的自然电阻大、集电容量小、接触区温度高，容易引起导线过热氧化腐蚀、加速磨损，从而缩短受电弓和接触

导线的使用寿命[2]，在列车速度达到100 km/h的干线上无法使用。因此，日本在20世纪40、50年代就推出了电阻系数、冲击韧性均比纯碳滑板优良的粉末冶金滑板材料。

1.2　粉末冶金滑板

粉末冶金滑板由金属粉末（如铁、铜）和润滑成分（例如C, Pb, MoS_2）机械混合，经液压压力机压制成形，最后高温烧结而成。粉末冶金滑板可分为铁基材料和铜基材料，其中铁基钢常与钢铝导线匹配使用，铜基钢主要与铜导线匹配使用[1]，铜基滑板的一般组成如表2所示。与纯碳滑板相比，粉末冶金滑板具有优异的抗冲击性能、导电性能、耐电弧性能和耐磨性能[17]。

表2　铜基滑板组成成分的质量百分比[18-19]

Table 2　Mass percentages of constituents in copper matrix slide plate[18-19]　　%

成分	金属粉末				润滑成分		
	Cu	Fe	Ni	Sn	Pb	C	其他
质量百分比	60~80	0~5	1~5	2~6	0~3	0~2	1~2

1.2.1　发展历史

1949年，日本铁路电气化协会首先研制出了铜粉末冶金滑板，以此代替纯碳滑板；随后由于电气化铁路里程增加，在1953年后又发展了磷铜粉末冶金滑板（TM103）和铁基粉末冶金滑板（DM）[2]；到1964年新干线开通后，人们发现铜系合金烧结材料在使用中出现了沟状磨损，特别是在低温环境下，磨损加重，可能引发熔断等问题[4]，因此当时常用的是铁基粉末冶金滑板，其次是铜基粉末冶金滑板[20]。1981—1984年日本的高速列车最高运行速度达到了210~240 km/h，铁基粉末冶金滑板已不能满足使用要求，出现严重磨损的现象，磨耗值增加了2倍左右[4]，因而滑板的使用寿命较短，为此日本又开发了新铁系滑板材料[16]，即在铁系烧结合金材料中加入耐磨的FeMo, FeCr, FeTi, Cr等材料。此外，1969年，苏联还研制出可用于1 500 V直流电气化铁路的粉末冶金滑板。

20世纪60年代末，中国研制出导电率高、冲击韧性好的粉末冶金滑板，该滑板材料在使用中可形成润滑膜，并且摩擦因数较低，能较好地代替纯碳滑板材料[7]，20世纪80年代初，铜基粉末冶金滑板已在15个机务段得到应用[4]（例如“北京—秦皇岛”“大同—秦皇岛”），成为列车运行速度小于100 km/h的受电弓滑板的主要产品。自20世纪90年代以来，中国列车开始提速，但是当时大部分的电气化线路还不能满足碳滑板的使用要求[9]，因此粉末冶金滑板仍然占据主导地位。

1.2.2　优势与局限性

粉末冶金滑板中应用最广泛的是铜基粉末冶金滑板与铁基粉末冶金滑板，前者机械强度较好、硬度较高、抗冲击性能稍强、不易出现磨损不均匀与断裂等问题，自身含有润滑成分，可减轻对接触线的磨损，从而在钢铝导线区段得到广泛应用；后者可用于钢铝导线、铜导线区段，但成本较高[12]。相较于纯碳滑板，粉末冶金滑板在列车运行过程中可连续形成润滑膜，减少接触线的磨损，提高滑板使用寿命。

粉末冶金滑板也存在一定的局限性，经研究发现，由于其利用在滑板间隙浸入润滑组分以达到润滑、减摩的目的，润滑组分的含量决定了滑板与接触线的匹配度，例如当润滑组分过多时，滑板的力学性能难以满足高速列车的需求，而当润滑组分过少时，滑板会严重磨损接触线，难以保证受电弓滑板与接触线之间的光滑接触[21-22]，尤其在冬季，“滑板–接触线”的接触状态进一步恶化，造成电弧频发[23]，从而导致受电弓滑板对接触线的严重磨损。因此，后续研究者在粉末冶金滑板中加入了耐磨减磨的组分和固体润滑组分[19,24]，以获取耐磨性能更好的滑板。虽然对粉末冶金滑板进行了改进，但仍不能满足高速铁路快速发展对受电弓滑板性能的要求，制约了滑板应用范围。

2　浸金属碳滑板

2.1　发展历史

有关国家对浸金属碳滑板的研究开展较早，日本就是比较有代表性的国家之一，在20世纪80年代就开始研制金属浸渍碳滑板材料，并逐渐取代粉末冶金滑板[25]。1987年，英国开通电气化铁路，最高速度为239 km/h，使用的滑板主要是浸金属碳滑板，英国研制的浸金属碳滑板具有低电阻率、低磨损率的优点，因此在欧洲各国得到广泛应用，但仍存在韧性差的缺点[26]。中国在20世纪60年代中期开始浸渍金属方面的研究，1991年，东新电碳厂研制出SK_2新型浸渍金属碳滑板[23]，弥补了纯碳滑板和粉末冶金滑板性能上的不足，近年来，中国受电弓滑板的制造技术迅速发展，其中哈尔滨电碳厂研制的金属浸渍碳滑板已实现量产，并被北京铁路局、广州铁路局广泛应用于货运铁路，以替代进口金属浸渍碳滑板[27]。

2.2　工艺技术

浸金属碳滑板的制备主要以金属及合金熔体浸渍纯碳基体为主，采用类似纯碳滑板的工艺先制得多孔碳坯料，然后在碳基中渗透金属或合金熔体来填补碳基中的空隙，提高碳基的机械强度和导电性，其生产工艺流程如图1所示。

制备高性能浸金属滑板的主要问题是金属与碳基体的润湿性差。润湿性是金属与碳基体界面结合强度的关键，而界面结合强度决定了金属浸渍碳滑板材料

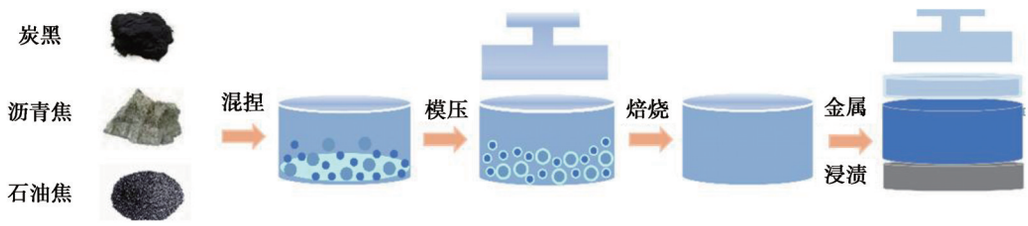
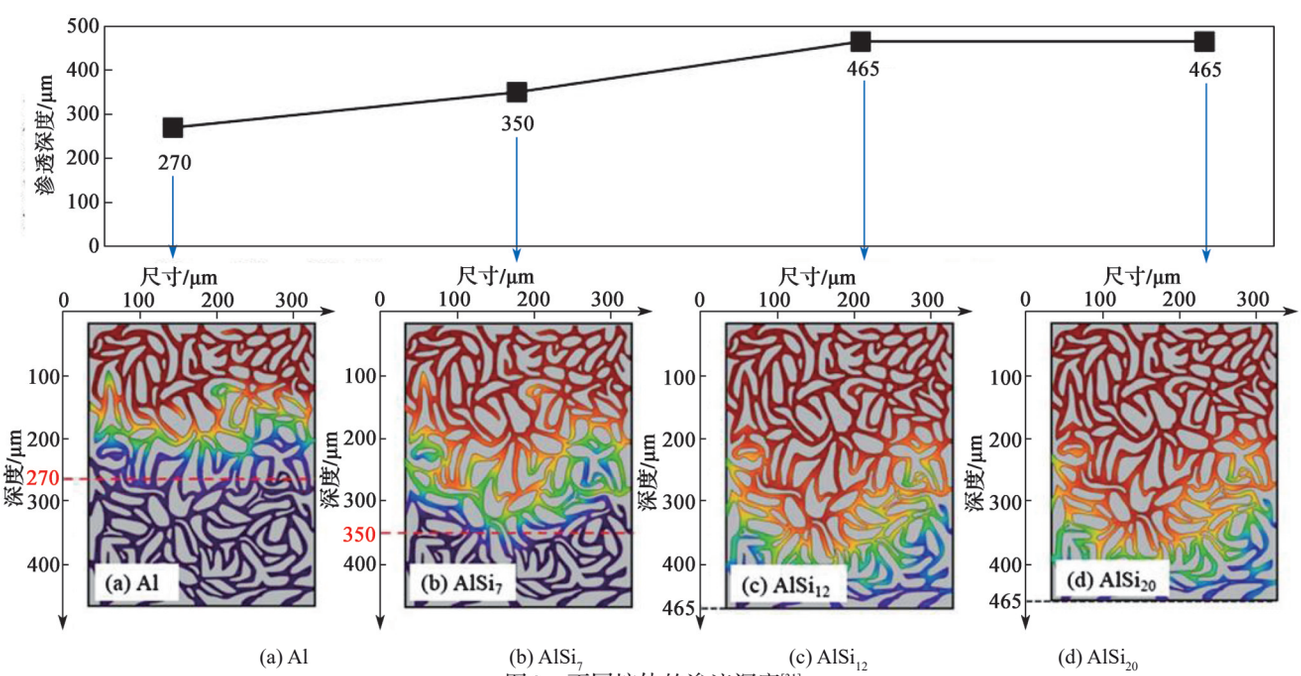


图1 浸金属滑板制作流程

Fig. 1 Production process of metal-impregnated carbon slide plate

的综合性能，因此对润湿性能的检测对于验证金属浸渍滑板综合性能的提升具有重要意义[28]。通常，用接触角描述润湿性，其中接触角小于90 °表示润湿性良好，接触角大于90 °表示润湿性较差，例如在纯铜/碳体系中，接触角为140 °，这意味着碳与液体铜之间润湿性不佳[29]。

为了解决这一问题，西南交通大学高压团队[13,15,28,30-32]对滑板材料碳/铜两相界面润湿性问题进行了大量研究。文献[30]通过压力浸渍法制备了碳/铜复合材料，均匀掺杂镍，以增大碳基体密度，从而降低复合材料间隙率，有效改善了界面润湿性，经测试，改性后的复合材料抗压强度和抗折强度也显著提升；同时，文献[28]提出的铜硼合金化策略也增强了界面润湿性能，C/Cu接触角由123.6 °下降到21.3 °，实现复合材料从疏水到亲水的巨大改变。进一步地，文献[31]借助试验测试和数值模拟，发现添加硅元素能显著提升铝合金熔体在多孔石墨结构中的渗透深度，随着硅元素含量的增加，渗透深度从270 μm上升至465 μm，并基本稳定在该数值左右，同时还探明了复合材料致密化程度与导电率最佳时的元素掺杂含量与渗透温度，具体如图2所示。文献[32]介绍通过在构建的铜/石墨/Mo_2C三相协同增强复合材料中促进驱替压力的传递，以及减小铜熔体在石墨基体中的毛细管阻力，可促进熔体在基体中的渗流，明显改善润湿性能。上述工作，一方面通过创造性地添加P、Al、Si等元素，开辟润湿性能提升的新道路，另一方面通过构建多相协同增强复合材料，有效地解决了滑板材料碳/铜两相界面润湿性差的问题。此外，文献[32]介绍通过改进合金熔体渗入结构，在真空高温下将Al-Mg合金液体以“网状”结构渗入基体中（如图3所示），相较于原始方法制备的复合材料，该方式下金属与碳基体润湿性良好，通过观察复合材料断口形貌，发现C/C-Al-Mg微观组织发生变化，在1 200 °时Al-Mg合金在碳基体中浸润深度、复合材料抗弯性能达到最大[33]。

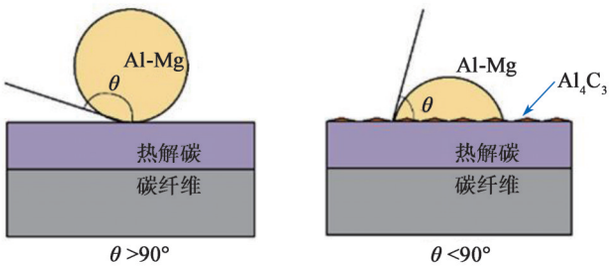


(a) Al (b) $AlSi_7$ (c) $AlSi_{12}$ (d) $AlSi_{20}$

图2 不同熔体的渗流深度[31]

Fig. 2 Seepage depth of different melts[31]

根据熔体浸润法，浸金属滑板的主要制备方法可分为压力浸渍法[34-35]、无压熔渗法[33,36]和负压渗透法[37-38]。高压浸渍是通过一定的压力将金属浸渍到基体颗粒间隙中，实现金属与基体的高效利用。文献[38]介绍在30~32 MPa压力下，将Cu合金渗透到C/C复合材料中，生产出C/C-Cu复合材料，该复合材料的接触角显著下降，材料的润湿性能得到了改善[39]；文献[40]介绍采用压力渗透法[如图4中的(c)所示]，通过重铬酸溶



(a) 原始基体　　(b) 加入Al_4C_3后的基体

图3　接触角比较[33]

Fig. 3　Comparison in contact angles [33]

液浸渍制备C/C-Cu复合材料，在C/C基体表面和内部形成可润湿层[如图4中(a)所示]，固体铜与涂层基体之间的接触角为90 °，在铜熔化后接触角随时间推移逐渐减小至61 °，远低于未涂覆润湿层基体与铜之间的接触角。接触角越小说明两相之间的润湿性越好，该方法显著改善了复合材料的润湿性能。

安全性低、设备昂贵、制备滑板中金属/碳润湿性较差等问题是限制高压浸渍发展的多种因素。因此，后续的研究采用了无压浸渍与负压浸渍，通过增强相与基体之间的润湿性改善以提高复合材料的力学性能。文献[37]介绍通过采用无压浸渍技术使多孔TiC/Ni_3Al预制体完全被Ni_3Al熔体浸润，从而获得致密无缺陷的TiC/Ni_3Al复合材料，并且与同类材料相比，抗弯强度与可靠性大幅提升。

近年来，中国致力于研发性能优异的浸金属滑板，目前生产的滑板力学性能、导电性能等均已达到甚至超过德国、英国等先进国家产品，如表3所示。

2.3　优点与局限性

浸金属碳滑板兼具纯碳滑板与粉末冶金滑板的优点：机械强度高、电阻率低、耐磨性好、抗拉弧性强[1]。当浸金属碳滑板与接触网导线发生滑动接触时，在导线摩擦表面形成有效抑制电弧形成的保护层，保护“滑板–接触线”界面不受电弧损伤，降低列车运行时的噪声[44]。因此，近年来浸金属碳滑板在国内电力机车受电弓领域占据主导地位。

表3　不同国家浸金属滑板性能[23,41-43]

Table 3　Key parameters of the metal-impregnated slide plate in different countries [23,41-43]

国家	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	硬度HBS	电阻率/($\mu\Omega\cdot m$)	抗弯强度/MPa	冲击韧性/($J\cdot cm^{-2}$)
英国	1.70	75	0.48	50	0.35
德国	1.65	65	2.30	35	0.15
法国	1.70	80	3.71	45	0.36
日本	2.61	100	1.11	85	0.31
中国	2.51	118	5.41	85	0.35

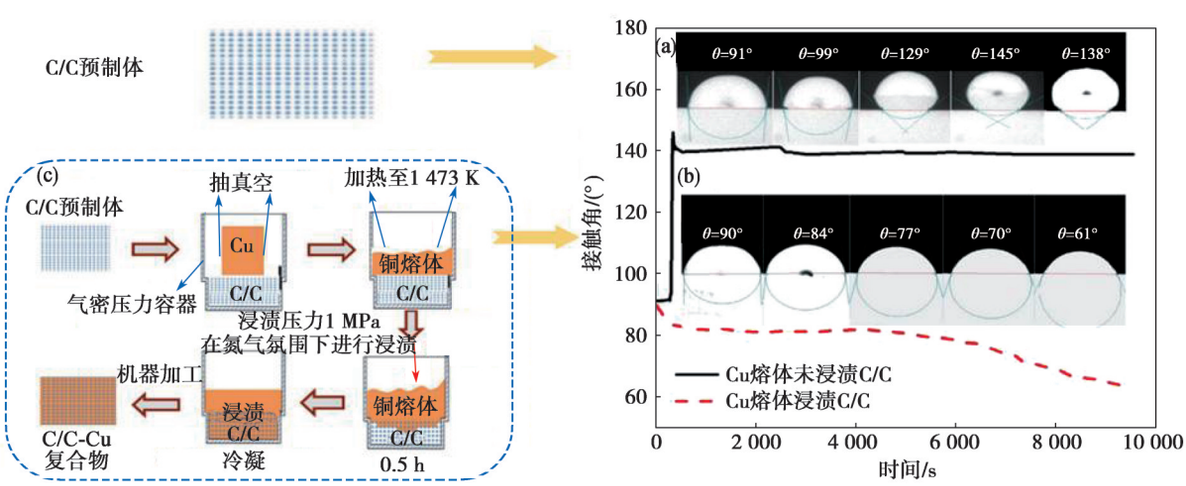
随着列车运行速度提升至300 km/h及以上，浸金属滑板出现一些不容忽视的缺点，例如抗冲击力不足、容易出现崩边或掉块现象、生产维护成本高[2]；其次，碳与铜之间界面结合较差，导致浸金属滑板的力学性能较差，限制了其在未来高速铁路上的应用。因此，亟需开发性能更优异的滑板，提高滑板的力学性能、电气性能和摩擦学性能，以满足高速列车受电弓的要求。

3　新型复合材料滑板

纤维增强型复合材料滑板结合了纯碳滑板优异的自润滑性能和力学性能，相较于浸金属滑板，具有较低的电阻率、更优异的冲击韧性与耐磨性，主要分为碳/金属纤维复合滑板和碳/碳（C/Cs）复合滑板两大类。

3.1　碳/金属纤维复合材料滑板

碳/金属纤维复合滑板的生产过程如图5所示，利用适当的混合方法，使增强物（金属纤维、金属粉末、钢丝网或其混合物组成）均匀分布在基体中，形成混



(a), (b)为浸渍前后Cu熔体与基体的接触角；(c)为Cu合金浸渍复合材料。

图4　重铬酸溶液浸渍法制备的改性C/C-Cu复合材料润湿性示意图[40]

Fig. 4　Schematic diagram of wettability of modified C/C-Cu composites by dichromate solution immersion method[40]

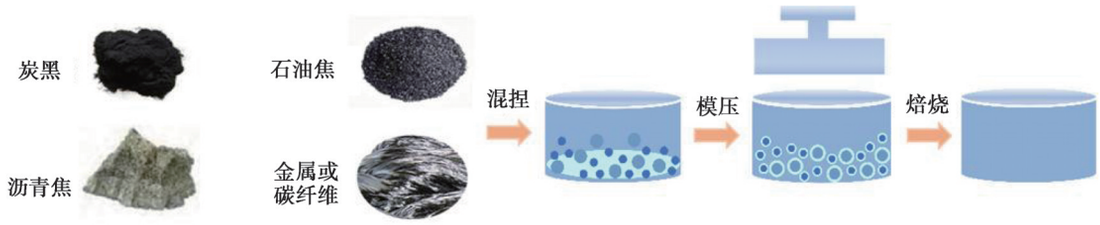


图5　复合材料滑板制作流程

Fig. 5　Production process of composite slide plate

合物，将混合物在一定温度下压制，在高温下烧结，得到对碳基体进行增强的复合材料[45]。

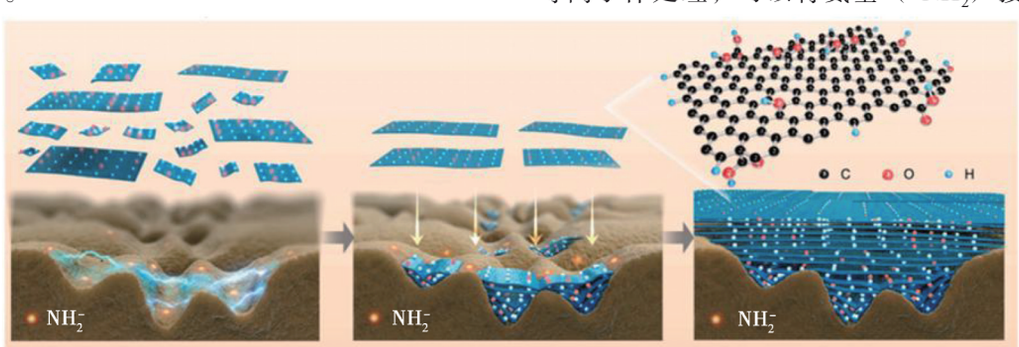
在制备过程中金属纤维出现碳化趋势，为提高复合材料的综合强度，需对纤维进行处理，如使用序贯化学蒸气渗透法（CVI）和呋喃树脂浸渍碳化法（I/C）制备碳纤维（CF）和铜纤维（Cu）织物增强碳基复合材料（CF/Cu/C）[46]。测试结果表明，复合材料具有较低的电阻率、低摩擦因数和低磨损率，无明显电弧烧蚀，碳纤维的存在使得腐蚀坑变小，并可阻碍裂纹扩展。

3.2　碳/碳复合材料滑板

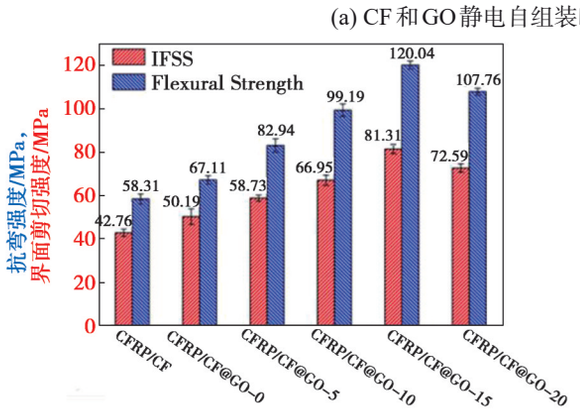
碳/碳复合材料滑板可由2种方法制成：第一种方法是使用连续碳纤维（CF），通过化学气相沉积或树脂/沥青浸渍碳化把碳基体引入坯料中，起到致密化和增强作用，随后将坯料浸渍多次，获得C/Cs滑板[44,46]；第二种方法多用短切碳纤维、连续长碳纤维等作为增强材料，以增强复合材料的综合性能，并改善现有滑板的性能[47-51]。

CF是一种无序的石墨结构，表面光滑，呈化学惰性，导致CF与基体之间的结合较差。因此，有必要对CF进行表面改性（如图6），提高其与基体的界面结合强度。CF表面改性方法一般分为湿化学改性（湿法）、干化学改性（干法）和多尺度改性。湿法包括电化学改性[52]、酸化学改性[53]和施胶[54]。干法包括热处理[55]、高能辐照[56]和等离子体处理[57-59]。CF的多尺度改性包括浸涂[60]、化学气相沉积（CVD）[61]和电泳沉积（EPD）[62]等。这些方法通过增加纤维与基体间润湿性、化学键合性和机械联锁性，形成过渡层，缓解应力集中，以提高复合材料的界面性能[63]。

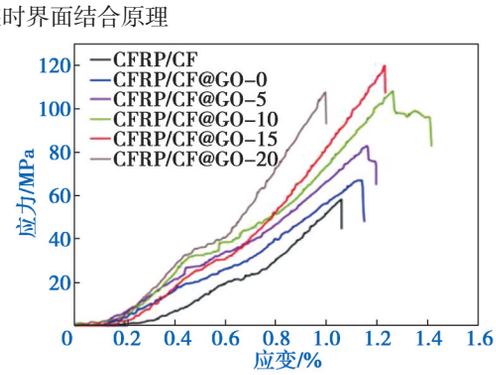
西南交通大学高压团队在碳纤维增强受电弓滑板方面展开了大量研究，如把静电自组装的碳纳米管（CNT）)与纳米炭黑（NCB）作为填料，分散在煤焦油沥青中制成坯料，测试结果表明，其抗压强度为143.2 MPa，抗弯强度为46.3 MPa，抗弯强度比初始的碳/石墨复合材料提高210%[50]。文献[57]介绍通过NH_3等离子体处理，可以将氨基（–NH_2）接枝到碳纤维



(a) CF和GO静电自组装时界面结合原理



(b) 复合材料抗弯强度与界面剪切强度



(c) 复合材料抗弯强度的“应力–应变”曲线

图6　CF/GO静电自组装体增强复合材料力学性能的示意图[57]

Fig. 6　Schematic diagram of mechanical properties of electrostatically self-assembled CF-GO reinforced composites [57]

上，使碳纤维（CF）和氧化石墨烯（GO）在去离子水中带有相反的电荷。在静电力的作用下，两者可以自组装形成GO@CF，CF和GO静电自组装和界面结合原理如图6(a)所示，不同尺寸的GO起到类似“填料”和“胶带”的作用，可填补纤维表面缺陷，达到提升CF机械强度的目的，从而能更好地增强复合材料的性能。经测试，复合材料的界面剪切强度提高了31.23%，抗弯强度约为未改性的2倍，测试结果如图6(b)和图6(c)所示。

上述研究致力于提高纤维增强型滑板的抗弯强度和冲击强度等性能，综合性能仍有待提高。因此，新型复合材料在滑板上的研究方向应集中在提高综合性能，以满足未来复杂极端运行环境下高速重载列车对受电弓滑板的要求。

3.3　多碳化物复合材料滑板

多碳化物复合材料（MCC）滑板是3层MAX相陶瓷结构，MAX相包括“Mn+1AXn”元素，其中“M”为过渡金属原子，“A”为IIIA或IVA族元素，“X”为C或N元素，$n=1,2,3,\cdots$，以Ti_3SiC_2和Ti_3AlC_2为代表。由于MAX相陶瓷“A”层原子与“Mn+1Xn”层（由过渡金属氮化物或碳化物紧密堆叠组成）分离，其在导电性能、导热性能和自润滑性能等方面兼具金属和陶瓷的优点[49]。

在基体中掺杂Ti_3SiC_2对润滑和分散性强化有显著作用，制备的多碳化物复合材料滑板的力学性能得到提升。文献[64]发现将Ti_3SiC_2加入C/Cu复合材料中，其强度、硬度和耐磨性大幅提高，并且不影响复合材料本身的自润滑性能与导电性能。文献[65]介绍Cu-Ti_3SiC_2复合材料由于其三维网络结构的连续分布而具有优越的物理性能，其抗弯强度得到显著提高（测试数据如图7所示），断裂韧性为5.9 MPa·$m^{\frac{1}{2}}$，电导率为5.73×10^5 S/m，电导率是石墨的5倍。

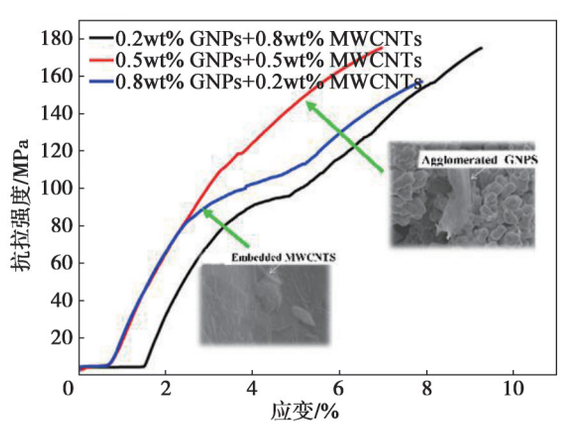


图7　不同质量分数下复合材料的拉伸强度[65]

Fig. 7　Tensile strength of composites with different mass fractions[64]

多碳化物复合材料（MCC）)滑板的使用受到限制，一方面是由于MCC滑板具有陶瓷材料的部分性质，材料密度高于碳滑板，会增加接触线的磨损；另一方面，Ti_3SiC_2粉体在制备过程中受到纯度限制，仍处于试验研发阶段，难以大规模生产。因此，未来进一步提高其稳定性后，有望被运用于超高速列车。

4　结论与展望

受电弓滑板材料经历了金属、纯碳、粉末冶金、浸金属和新型材料复合等发展阶段，随着高速列车运行速度的不断提高，面临的环境日渐复杂，受电弓滑板的电气性能和力学性能提升面临诸多难题，本文为此归纳总结了主要滑板的工艺技术、优缺点和发展趋势，主要结论如下：

①纯碳滑板具有优异的自润滑性能与耐磨性能，但力学性能较差，其抗折强度低、抗冲击强度低，导致使用寿命短，主要用于普速铁路；粉末冶金滑板力学性能优异，具有较高的抗折强度与抗冲击强度，不易断裂，导电性能良好，但是含油量低，结构松散，润滑膜容易失效，主要用于重载货运铁路。

②浸金属滑板目前广泛应用于城市轨道交通、高速铁路等领域，但其综合性能未能满足更高速需求，未来应对其制作方法展开进一步研究，充分利用金属熔体在复合材料内部可被设计成多层状界面结构的特点，有效减少材料内部空隙缺陷，增强其力学性能和电热性能。

③未来列车面向更高速（速度大于400 km/h）、重载、复杂环境的运营需求，要求弓网系统具备更大的电流收集能力和更佳的使用性能。目前，新型复合材料滑板主要有碳/金属纤维复合材料滑板、多元碳化物复合材料滑板和碳/碳复合材料滑板。对于碳/碳复合材料滑板而言，前2种滑板仍处于试验研发阶段，难以大规模生产，而碳/碳复合材料滑板研发历程较长，更易实现工业化量产，耐磨、高温耐受性强，具有更好的潜力与前景。

参考文献：

[1]　潘连明, 张国荣, 钱中良, 等. 电力机车受电弓滑板[J]. 机车车辆工艺, 2001(3): 1-4.
PAN Lianming, ZHANG Guorong, QIAN Zhongliang, et al. Pantograph slide plates for electric locomotive[J]. Locomotive & rolling stock technology, 2001(3): 1-4.

[2]　涂川俊, 陈振华, 陈刚, 等. 炭系电力机车受电弓滑板材料的研究进展[J]. 炭素技术, 2007(4): 23-29.
TU Chuanjun, CHEN Zhenhua, CHEN Gang, et al. Current status and development of carbonic system pantograph strip for electric locomotive[J]. Carbon techniques, 2007(4): 23-29.

[3] MA Yuanyuan, NA Yuting, YANG Longpeng, et al. Computer numerical simulation study of sliding friction temperature of pantograph carbon skateboard[C]//IEEE. 2021 IEEE International Conference on Data Science and Computer Application. Dalian：IEEE, 2021: 724-727.

[4] 肖军, 张鹏, 杜云慧, 等. 电力机车受电弓滑板材料的发展[J]. 铁道机车车辆, 2005(6): 65-68.
XIAO Jun, ZHANG Peng, DU Yunhui, et al. Development of materials for electric locomotive pantograph slide plate [J]. Railway locomotive & car, 2005(6): 65-68.

[5] 钱中良, 盛伟, 张枝苗, 等. 碳滑板发展概况及我国的研究进展[J]. 机车电传动, 2003(增刊1): 5-8.
QIAN Zhongliang, SHENG Wei, ZHANG Zhimiao, et al. Development of carbon contact strips and research progress in China[J]. Electric drive for locomotives, 2003(Suppl 1): 5-8.

[6] 吴广宁, 周悦, 雷栋, 等. 弓网电接触研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3495-3506.
WU Guangning, ZHOU Yue, LEI Dong, et al. Research advances in electric contact between pantograph and catenary [J]. High voltage engineering, 2016, 42(11): 3495-3506.

[7] 邓明丽, 吴广宁, 张雪原, 等. 电力机车受电弓发展综述[J]. 电气化铁道, 2008(1): 43-47.
DENG Mingli, WU Guangning, ZHANG Xueyuan, et al. Overview on development of pantograph of electric locomotive[J]. Electric railway, 2008(1): 43-47.

[8] 曲春浴, 陆宗奎. 浅谈电力机车受电弓滑板发展趋势[J]. 炭素, 2008(3): 45-48.
QU Chunyu, LU Zongkui. On the electric locomotive pantograph skateboards development trend[J]. Carbon, 2008(3): 45-48.

[9] 王继庆. 电力机车受电弓滑板复合材料的选择和性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
WANG Jiqing. Study on the selection and performance of pantograph composite material for electric locomotive pantograph[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.

[10] 王恩信. 工矿电机车碳素滑板的使用和维护[J]. 碳素, 1982(4): 42-45.
WANG Enxin. The use and maintenance of carbon slide of industrial and mining electric locomotive[J]. Carbon, 1982 (4): 42-45.

[11] ZHAO Hongwei, LIANG Jiangying, LIU Changqing. High-speed EMUs: characteristics of technological development and trends[J]. Engineering, 2020, 6(3): 234-244.

[12] 胡建红. 铜基受电弓滑板成分优化及组织性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
HU Jianhong. Study on composition optimization and microstructure properties of copper-based pantograph slide[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2004.

[13] WU Guangning, DONG Keliang, XU Zhilei, et al. Pantograph-catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks[J]. Railway engineering science, 2022, 30(4): 437-467.

[14] BOUCHOUCHA A, CHEKROUD S, PAULMIER D. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper-stainless steel[J]. Applied surface science, 2004, 223(4): 330-342.

[15] WU Guangning, ZHOU Yue, GAO Guoqiang, et al. Arc erosion characteristics of Cu-impregnated carbon materials used for current collection in high-speed railways[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2018, 8(6): 1014-1023.

[16] 王贵青, 陈敬超, 孙加林. 电力机车受电弓滑板的研究状况及发展趋势[J]. 材料导报, 2003(1): 18-20.
WANG Guiqing, CHEN Jingchao, SUN Jialin. Current status and future trends of research on pantograph slide[J]. Materials review, 2003(1): 18-20.

[17] NAGASAWA H, KATO K. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current [J]. Wear, 1998, 216(2): 179-183.

[18] LAWLEY A, MURPHY T F. Metallography of powder metallurgy materials[J]. Materials characterization, 2003, 51(5): 315-327.

[19] SHANGGUAN B, ZHAN Y Z, XING J D, et al. Wear behavior of electrified copper-MoS_2 powder metallurgy materials under dry sliding[J]. Journal of computational and theoretical nanoscience, 2012, 9(9): 1458-1461.

[20] 梁若清, 冯勇祥, 陆木林. 日本电力机车受电弓滑板的发展及浸渍金属碳滑板的开发[J]. 机车电传动, 1994(5): 45-47.
LIANG Ruoqing, FENG Yongxiang, LU Mulin. The development of Japanese electric locomotive pantograph slide and the development of impregnated metal carbon slide[J]. Electric drive for locomotives, 1994(5): 45-47.

[21] MASOOTH P H S, BHARATHIRAJA G, JAYAKUMAR V, et al. Microstructure and mechanical characterisation of ZrO_2 reinforced Ti_6Al_4V metal matrix composites by powder metallurgy method[J]. Materials research express, 2022, 9 (2): 020003.

[22] 马行驰, 何国求, 陈成澍, 等. 现代轨道交通摩擦集电材料及相关载流摩擦磨损研究进展[J]. 材料导报, 2007(3): 63-66.
MA Xingchi, HE Guoqiu, CHEN Chengshu, et al. Research and development of sliding-collecting-current materials in modern railway transportation and related current-carrier friction abrasion[J]. Materials review, 2007(3): 63-66.

[23] 梁若清. 新型浸渍金属碳滑板的性能与应用[J]. 新型碳材料, 1991(2): 10-11.
LIANG Ruoqing. Performance and application of new impregnated metal carbon slide[J]. New carbon materials, 1991 (2): 10-11.

[24] YANG Zhenghai, GE Yuexin, ZHANG Xu, et al. Effect of carbon content on friction and wear properties of copper matrix composites at high speed current-carrying[J]. Materials, 2019, 12(18): 2881.

[25] WEI Qiang, XU Lixin, SHI Huijuan, et al. Study on network structure C-Cu composites of pantograph slide plates [J]. Advanced materials research, 2010, 150/151: 941-946.

[26] 卢文博. 层状结构受电弓滑板的制备及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LU Wenbo. Study on preparation and performance of layer structure pantograph contact strip[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[27] 左浩梓. 碳/铜润湿改性及其复合材料机械电气性能提升研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZUO Haozi. Study on wetting modification and improvement of mechanical and electrical properties of carbon/copper composites[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[28] ZUO Haozi, WEI Wenfu, YANG Zefeng, et al. Performance enhancement of carbon/copper composites based on boron doping[J]. Journal of alloys and compounds, 2021, 876: 160213.

[29] MORTIMER D A, NICHOLAS M. The wetting of carbon by copper and copper alloys[J]. Journal of materials science, 1970, 5(2): 149-155.

[30] WEI Wenfu, LI Xiaobo, YANG Zefeng, et al. Highly conductive graphite matrix/copper composites by a pressureless infiltration method[J]. Journal of applied physics, 2021, 130 (1): 015102.

[31] 黄樟林, 魏文赋, 贾千喜, 等. 铝硅合金熔体在多孔石墨中的浸渗动力学[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2868-2874.
HUANG Zhanglin, WEI Wenfu, JIA Qianxi, et al. Infiltration dynamics of Al-Si alloy melt in porous graphite structure[J]. High voltage engineering, 2023, 49(7): 2868-2874.

[32] 李箫波, 魏文赋, 左浩梓, 等. 基于 Mo_2C 晶粒增强的铜/石墨复合材料浸渗特性与优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7881-7889.
LI Xiaobo, WEI Wenfu, ZUO Haozi, et al. Infiltration characteristics and optimization of copper/graphite composite reinforced by Mo_2C grain[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7881-7889.

[33] CUI Lihui, LUO Ruiying, CUI Guangyuan. Effect of Al-Mg alloy infiltration on mechanical and electrical properties for carbon/carbon composites[J]. Crystals, 2018, 8(5): 196.

[34] YANG Gang, JIANG Yonggang, FENG Junzong, et al. Synthesis of fiber reinforced $Al_2O_3 - SiO_2$ aerogel composite with high density uniformity via a facile high-pressure impregnation approach[J]. Processing and application of ceramics, 2017, 11(3): 185-190.

[35] LI Yaochuan, HUANG Jianxiang, WANG Man, et al. Microstructure and current carrying wear behaviors of copper/sintered-carbon composites for pantograph sliders[J]. Metals and materials international, 2021, 27(9): 3398-3408.

[36] HE Bolin, ZHU Yuefeng. Microstructure and properties of TiC/Ni_3Al composites prepared by pressureless melt infiltration with porous TiC/Ni_3Al preforms[J]. Materials and manufacturing processes, 2011, 26(4): 586-591.

[37] LU T J, CHEN F, HE D P. Sound absorption of cellular metals with semiopen cells[J]. The journal of the acoustical society of america, 2000, 108(4): 1697-1709.

[38] DINAHARAN I, VETTIVEL S C, BALAKRISHNAN M, et al. Influence of processing route on microstructure and wear resistance of fly ash reinforced AZ31 Magnesium matrix composites[J]. Journal of magnesium and alloys, 2019, 7(1): 155-165.

[39] YIN Jian, ZHANG Hongbo, TAN Cui, et al. Effect of heat treatment temperature on sliding wear behaviour of C/C-Cu composites under electric current[J]. Wear, 2014, 312(1/2): 91-95.

[40] KONG Bo, RU Jinming, ZHANG Hongdi, et al. Enhanced wetting and properties of carbon/carbon-Cu composites with Cr_3C_2 coatings by Cr-solution immersion method[J]. Journal of materials science & technology, 2018, 34(3): 458-465.

[41] ZUO Haozi, WEI Wenfu, LI Xiaobo, et al. Enhanced wetting and properties of carbon/copper composites by Cu-Fe alloying[J]. Composite interfaces, 2022, 29(1): 111-120.

[42] HE Dahai, MANORY R. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors [J]. Wear, 2001, 249(7): 626-636.

[43] JARZĄBEK D M. The impact of weak interfacial bonding strength on mechanical properties of metal matrix-Ceramic reinforced composites[J]. Composite structures, 2018, 201: 352-362.

[44] DENG Chaoyong, ZHANG Hongbo, YIN Jian, et al. Carbon fiber/copper mesh reinforced carbon composite for sliding contact material[J]. Materials research express, 2017, 4 (2): 025602.

[45] WU Guangning, GAO Guoqiang, WEI Wenfu, et al. Electrical contact of pantograph and catenary system[M]. Singapore: Springer, 2019: 17-70.

[46] DENG Chaoyong, YIN Jian, ZHANG Hongbo, et al. The tribological properties of Cf/Cu/C composites under applied electric current[J]. Tribology international, 2017, 116: 84-94.

[47] LI Xiang, YANG Zefeng, ZAHO Yang, et al. Excellent interfacial structural integrity of pre-oxidized carbon fiber-reinforced carbon-carbon composites[J]. Composite interfaces, 2022, 29(4): 383-396.

[48] LI Jie, YANG Zefeng, ZHAO Yang, et al. Improving carbon/carbon composites mechanical and thermal properties by the co-carbonization of pre-oxidized carbon fiber and

pitch[J]. Journal of applied polymer science, 2022, 139(13): 51846.

[49] ZHANG Jiangbo, LIU Wenyang, JIN Yiming, et al. Study of the interfacial reaction between Ti_3SiC_2 particles and Al matrix[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 738: 1-9.

[50] LI Jie, LI Hao, GAO Guoqiang, et al. Improving the performance of carbon/graphite composites through the synergistic effect of electrostatic self-assembled carbon nanotubes and nano carbon black[J]. Ceramics international, 2022, 48 (24): 36029-36037.

[51] WU Yadong, WANG Zian, XU Lingyun, et al. Preparation of silver-plated carbon nanotubes/carbon fiber hybrid fibers by combining freeze-drying deposition with a sizing process to enhance the mechanical properties of carbon fiber composites[J]. Composites, Part A, applied science and manufacturing, 2021, 146: 106421.

[52] SARMA P J, MOHANTY K. Epipremnum aureum and dracaena braunii as indoor plants for enhanced bio-electricity generation in a plant microbial fuel cell with electrochemically modified carbon fiber brush anode[J]. Journal of bioscience and bioengineering, 2018, 126(3): 404-410.

[53] ZHENG Yawen, WANG Xiaoyun, WU Guangshun. Chemical modification of carbon fiber with diethylenetriaminepentaacetic acid/halloysite nanotube as a multifunctional interfacial reinforcement for silicone resin composites[J]. Polymers for advanced technologies, 2020, 31(3): 527-535.

[54] ZOU Jialing, SHI Jiangfan, YANG Jianxiao, et al. Electroless copper plating mechanism of mesophase pitch-based carbon fibers by the grafting modification of silane couple agents[J]. Materials today communications, 2022, 32: 104053.

[55] ALMEIDA D A L, FERREIRA N G. Fabrication of binary composites from polyaniline deposits on carbon fibers heat treated at three different temperatures: structural and electrochemical analyses for potential application in supercapacitors[J]. Materials chemistry and physics, 2020, 239: 122101.

[56] ANDRIANOV N N, BORISOV A M, KAZAKOV V A, et al. Modification of polyacrylonitrile carbon fibers by high fluence ion irradiation[J]. Journal of physics: conference series, 2017, 941(1): 012028.

[57] LI Jie, YANG Zefeng, HUANG Xuefei, et al. Interfacial reinforcement of composites by the electrostatic self-assembly of graphene oxide and NH_3 plasma-treated carbon fiber[J]. Applied surface science, 2022, 585: 152717.

[58] WEI Xinyu, ZHANG Wenjin, CHEN Longwei, et al. Evaluation of graphitization and tensile property in microwave plasma treated carbon fiber[J]. Diamond and related materials, 2022, 126: 109094.

[59] ZHANG Wei, CAO Yizhong, YANG Pei, et al. Manufacturing and interfacial bonding behavior of plasma-treated-carbon fiber reinforced veneer-based composites[J]. Composite structures, 2019, 226: 111203.

[60] FU Shanlong, WANG Yanxiang, NIU Fangxu, et al. Preparation and characterization of t-BN coatings on the surface of carbon fibers[J]. Composite interfaces, 2019, 26(6): 479-492.

[61] CHENG Fei, XU Yang, ZHANG Jinheng, et al. Growing carbon nanotubes in-situ via chemical vapor deposition and resin pre-coating treatment on anodized Ti-6Al-4V titanium substrates for stronger adhesive bonding with carbon fiber composites[J]. Surface and coatings technology, 2023, 457: 129296.

[62] HE Yichuan, LIU Yang, LI Bin, et al. The effect of electrophoretic deposition p-aminobenzenesulfonamide grafted CNT on mechanical properties of carbon fiber filled polyamide 6 composite[J]. Surface and interface analysis, 2023, 55(2): 105-112.

[63] ZHENG Hao, ZHANG Wenjian, LI Bowen, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: a review[J]. Composites part B: engineering, 2022, 233: 109639.

[64] JIANG Xiaosong, SONG Tingfeng, SHAO Zhenyi, et al. Synergetic effect of graphene and MWCNTs on microstructure and mechanical properties of $Cu/Ti_3SiC_2/C$ nanocomposites[J]. Nanoscale research letters, 2017, 12(1): 607.

[65] YANG Dexuan, ZHOU Yu, YAN Xingheng, et al. Highly conductive wear resistant Cu/Ti_3SiC_2(TiC/SiC) co-continuous composites via vacuum infiltration process[J]. Journal of advanced ceramics, 2020, 9: 83-93.

收稿日期：2023-09-18
修回日期：2023-10-27