DOI:10.11973/jxgccl240010

风电机组制动片材料摩擦学性能的研究进展

纪铭亮,马生辉,黄浩洋,赵 燊,吉政甲
(青海大学机械工程学院,西宁 810016)

摘 要:制动系统作为风电机组的关键部件,对风电机组的安全运行和发电效率起到重要作用,高性能风电制动系统的制动可靠性和使用寿命成为了重点研究课题。从风电制动系统材料组分、服役工况和摩擦磨损性能等方面阐述了制动片的设计要点,总结了试验与有限元仿真结合评估制动温度和稳定性等方面的研究进展,并展望了风电机组制动片材料的发展趋势。

关键词:风电制动系统;复合材料;摩擦磨损性能;制动温度;稳定性
中图分类号:TK83 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-3738(2025)01-0008-08

0 引 言

与传统化石能源(如石油、煤炭、天然气等)相比,风能资源具有清洁无污染、可再生、分布广泛等优点[1]。我国是世界上风力资源最多的国家之一[2],根据国家能源局公布的数据,从2018年到2023年我国风电系统的装机总量逐年增长,从1.84×10^9 kW增加至4.04×10^9 kW,未来风电系统的装机增长率将会迎来新的突破。

风电制动系统是维持风电机组正常工作的重要部分,主要作用是通过改变叶片角度以及降低风电机组的旋转速度,确保风电机组安全稳定地紧急减速或停止运行,避免设备损坏,同时有效保障操作人员和周围环境的安全。目前,广泛使用的制动系统主要分为空气制动系统和机械制动系统两类,一般会同时采用这两类制动系统以保证风机的日常运行和停机操作。空气制动系统能够降低风机叶片转速,但不能使叶片完全停止转动,难以满足紧急迅速停机的要求,此时机械制动系统的不可替代性便凸显出来。机械制动系统分布在主轴、偏航及变桨系统中,主轴和偏航两处制动器通常由安装在高速轴和偏航系统上的圆盘与布置在四周固定有制动片的制动夹钳构成。通常情况下,制动夹钳不动,制动圆盘随轴旋转,当需要停机时执行机构通过液压或电动机构使制动片压紧制动盘,制动片的磨损通常远大于制动盘面。

为了给相关研究人员提供参考,作者主要从材料、工况、摩擦磨损性能等方面对风电机组制动片研究进展进行综述,重点总结了制动片的材料体系和摩擦学性能的研究进展,介绍了有限元方法在制动片研究中的应用,在此基础上分析并讨论其今后的发展方向。

1 风电机组制动系统的结构及工况

1.1 风电机组制动系统的作用与要求

风电机组制动系统除了在风机发生故障时使其停止运行,以便维修外,其高速轴制动器可以在风速异常增大时有效减缓风机旋转,避免风机损坏,保障其在极端气象环境中稳健运行,偏航制动器的作用则是确保风机叶片朝着风的方向,从而提高发电效率。大型风力发电机运行时叶片的转速一般只有15 $r\cdot min^{-1}$左右,但经齿轮箱加速传递到高速轴上往往可以达到2 000 $r\cdot min^{-1}$[3],因此高速轴制动力矩大、速度高,摩擦材料多为金属粉末冶金材料,特定场合也可用有机复合材料。偏航制动器力矩小、速度低,摩擦材料一般为有机复合材料。

风电制动系统在工作过程中会产生大量的热,在热应力作用下,制动片易磨损和变形,同时还可能发生“热衰退”,造成摩擦因数降低,影响制动器的制动效率。若使用液压制动,润滑油泄露还可能导致制动片/盘间的摩擦因数降低而引发制动失效,产生安全隐患。因此,制动器应满足摩擦因数稳定、耐磨性和耐高温性好等性能要求,此外,还应满足低噪声要求,以降低对环境的影响。

风电制动系统是确保机组正常运行的关键部分,通过对制动摩擦材料的选择优化、材料结构的设

收稿日期:2024-01-05;**修订日期**:2024-11-13
基金项目:青海省自然科学基金青年基金资助项目(2022-ZJ-946Q)
作者简介:纪铭亮(1996—),男,江苏盐城人,硕士研究生
通信作者(导师):吉政甲副教授

计优化和制造工艺的过程优化，能够有效提升制动系统的可靠性和稳定性并延长其服役寿命，使得风电机组在各种复杂工况下正常运行。

1.2 风电机组制动系统的典型工况

我国风电场主要分布在西北地区、东部沿海地区和东北地区等地区，气候条件多样，在设计和选择风电机组时必须充分考虑到风机将面临的特定环境[4]。

我国西北地区常常受到沙尘暴的侵袭，沙颗粒会磨损和腐蚀风机叶片，对制动系统产生不利影响，加剧其磨损消耗[5]。为了应对这种情况，制动系统常采用密封结构以隔离沙粒，使用耐磨材料以降低制动片/盘摩擦磨损，延长制动系统寿命。海洋环境具有高盐、高湿等特点，制动系统的设计应考虑采用耐腐蚀材料，并提高风机密封性，以降低海水进入制动系统的可能性。

在夏季多风天气下长时间服役后，风电制动系统摩擦产热且热量积累较多，材料受高温影响易发生软化导致制动不稳定。因此，制动系统应采用耐高温材料，以提高耐久性和稳定性。在极寒气候条件下，低温使得制动材料更加脆硬，摩擦性能和制动效果降低，因此，在设计风机制动系统时应考虑材料低温极寒工况下的力学及耐磨性能等[6-7]。

综上，设计和选择风电制动系统需要考虑其服役环境对风机的特殊要求，通过合适的材料选择和结构设计，提高制动系统的耐久性和稳定性。

2 制动片材料种类与制备方法的研究进展

目前，国内外风电制动系统的制动片主要以金属基摩擦材料为主，同时树脂基复合摩擦材料也得到快速发展。金属基摩擦材料具有稳定的摩擦因数，基本不受湿度、温度和压力等因素影响，表现出良好的耐磨性和导热性，但金属基摩擦材料制成的制动片会对制动盘造成较大损伤，一般用于高速轴制动。树脂基摩擦材料硬度高、耐磨性好，能有效克服上述缺点，在制动过程中更加稳定，但易受湿度影响，在湿润环境下摩擦因数大幅下降[8]，一般用于偏航制动。

2.1 金属基摩擦材料

铜基粉末冶金摩擦材料具有高导热系数、高摩擦因数和低磨损率以及优异的力学性能等优点，在风力发电制动系统所有摩擦材料中一直占据主导地位。LI等[9]采用湿法造粒技术和冷压烧结方法制备了铜基摩擦材料，结果显示，造粒技术可以通过控制颗粒粒径大小改善材料的摩擦学性能，粒径为5～8 mm时表现出最低的摩擦因数，比粉末制备材料降低了22.49%，此外，造粒技术还能提高摩擦因数稳定性。在制动器工作过程中，颗粒脱落会导致磨损机理由黏着磨损转变为磨粒磨损，从而增加磨损率。为解决该问题并提高制动器性能，研究具有高强度和相容性的连续纤维增强铜基复合材料成为需求。RAMALINGAM等[10]采用铸造工艺成功制备了以SS304钢纤维为增强体的铜基金属复合材料，在30 N载荷下该材料的摩擦因数在0.4～0.6间变化，比传统制动片摩擦材料具有更好的耐磨性，磨损机理表现为黏着磨损和磨粒磨损的复合。KESHAV等[11]通过粉末冶金制备了短切不锈钢纤维和连续碳纤维增强的铜基摩擦材料，结果表明，该材料具有良好的耐磨性，在49 N法向载荷下摩擦因数在最佳范围(0.3～0.4)。石墨对铜基摩擦材料的影响一直备受关注。WEI等[12]研究发现，质量分数10%、尺寸300～600 μm石墨改性的粉末冶金铜基摩擦材料表现出稳定的摩擦因数，摩擦表面仅出现轻微的犁沟，具有最佳的摩擦磨损性能。ESSWEIN等[13]对比了质量分数10%石墨增强铜基复合材料制动片和酚醛树脂制动片的摩擦学性能，结果表明，铜基复合材料制动片相比酚醛树脂制动片具有更低的磨损率和更高的摩擦因数。

梯度功能金属基摩擦材料是一种新型复合材料，是指由两种及以上性能不同的金属、陶瓷等材料通过特定方式组合使得复合材料的组成和结构呈连续变化的材料。梯度功能金属基摩擦材料在内外部温差较大的情况下的内应力较小，拥有优于常规材料的耐磨性，在国外已成功应用于制动片制造[14-16]。其中，梯度功能铁和铜基复合材料制动片因具有较高的导热率和良好的耐磨损性能而受到广泛的关注。GOVINDARAJU等[16]采用热成型法制备了梯度功能铁基材料，该材料的磨损机理为磨粒磨损，其磨损率和摩擦因数远远小于常规材料。KANNAN等[17]采用粉末冶金法制备了梯度功能金属基摩擦材料，通过销-盘试验发现，在载荷增加的情况下，其磨损率减小，磨擦因数增大，其主要磨损机理为磨粒磨损。KANNAN等[18]还进一步采用液相烧结技术制备了梯度功能材料，利用铜作为液相烧结剂高效烧结粉煤灰，在氩气中烧结时材料没有发现空隙、裂纹和孔隙等缺陷，最大硬度为830.18 HV，远大于在

普通空气中烧结材料的硬度(777.15 HV)，但其磨损率却比空气烧结材料高出95.05%，这是因为硬度较高的磨损碎屑颗粒作为第三体颗粒参与，在磨损表面形成犁沟，磨损机制由初始的黏着磨损转变为磨粒磨损。

金属基摩擦材料的硬度和耐磨性满足制动片使用要求，但会对制动盘造成较大的损伤；金属件之间的摩擦也会产生极大的噪声，还易导致制动不稳定，从而影响风电机组发电效率；此外，制动过程中产生的铜颗粒等磨屑还会对环境和人体造成影响。

2.2 树脂基摩擦材料

树脂基摩擦材料由树脂基聚合物、纤维增强体、无机或有机填料以及稳定剂、增强剂、阻燃剂等改性剂组成，树脂基聚合物为黏结剂，可分为热固性树脂(如环氧树脂、酚醛树脂、聚酯树脂等)和热塑性树脂(如聚酰胺树脂、聚酰亚胺树脂等)两种，增强体纤维主要有碳纤维、有机纤维和陶瓷纤维等[19]，无机填料(氧化铝、氢氧化铝等)和有机填料(碳黑、硅橡胶等)的作用是降低成本并改善材料的导热性、耐磨性、阻燃性，添加改性剂是为了调节材料的摩擦因数，提高耐磨性能。

MULLAIKODI等[20]制备了不同含量天然碳纤维增强环氧树脂制动片，当碳纤维质量分数为40%时，材料硬度最高，在腐蚀磨损时表现出良好的耐磨性能。TAO等[21]将线性圆筒状碳纤维增强室温硫化硅橡胶(Cf@RTVSR)芯鞘弹性体作为高性能添加剂来改性酚醛树脂基复合材料，在0.5 MPa制动压力和2 000 $r \cdot min^{-1}$制动转速下，改性后酚醛树脂复合材料的摩擦因数与未改性时相比显著上升，磨损率下降了84.8%，且在摩擦表面出现裂纹偏转现象，圆筒状Cf@RTVSR芯鞘弹性体在酚醛树脂基复合材料的强化和增韧过程中发挥了重要作用，并在一定程度上有利于材料表面的应力松弛，而且改性后酚醛树脂基材料回收率提高27.14%。RAVI等[22]制备了玻璃纤维和香根草纤维共同增强环氧树脂材料，该材料的拉伸强度高达4.9 MPa，最大断裂载荷达到0.4 kN。李辉等[23]制备了2.5D碳纤维织物增强树脂基摩擦复合材料，结果显示，材料的摩擦因数在0.12～0.26间波动，且呈现波动性下降趋于稳定的现象。矿物纤维增强树脂基复合材料经两次水洗除渣循环后的高温摩擦因数提高了约22.22%[24]。腰果壳油增强树脂基复合材料的摩擦因数在0.3～0.5间并随制动负荷和速度的增加而降低[25]。刘浪等[26]研究发现，当玄武岩纤维和钢纤维质量比为1∶1时，二者复合增强的树脂基摩擦材料摩擦因数稳定且大小适宜，磨损质量损失最小。

树脂基摩擦材料应用于风电制动器方面，不仅满足性能方面需求，还具有低噪声、环保等优点，符合风电行业可持续发展理念。此外，树脂基制动片具备良好的适应性，能适应风电机组复杂的工况环境。目前，风电机组偏航制动片普遍采用树脂基摩擦材料[27]。

3 制动片摩擦磨损性能的研究进展

3.1 材料成分和工况对制动片性能的影响

制动片性能对风电机组的安全性和发电效率有着重要的影响。在正常工作条件下，风电制动片摩擦因数通常要求在0.3～0.5之间，以确保较好的制动效果；同时还需要保证低磨损率，以减小停机更换制动片的频率，保障风力发电机的发电效率。此外，风力发电机在使用过程中会受到风速和温度等各种工况条件的影响。

3.1.1 材料成分的影响

由于不可避免的磨损现象，在风电制动系统中，制动片/盘摩擦副表面会产生微小的金属颗粒或碎屑。黄琳等[5]通过销-盘试验，使用变质油和第三体颗粒混合来模拟油液泄漏后在制动盘表面扩散的情况，研究了风电制动过程中沙、铁、铜等第三体颗粒对摩擦磨损性能的影响，结果表明：相比沙和铁颗粒，铜颗粒造成的磨损更小，但也可能因摩擦因数较低而制动力不足，制动时间延长，同时铜对环境也有危害；沙颗粒会导致摩擦因数产生较大波动，铁颗粒会使摩擦副表面产生较大的犁沟，两者都会加速摩擦副达到剧烈磨损阶段。第三体颗粒对风电制动系统存在很多不利影响，应采取相应措施来降低其影响。SAI等[28]研发了一种酚醛树脂基复合材料制动片，制动时摩擦因数的波动相比商用制动片更小，表现出更好的稳定性和耐磨性，而且成本降低了近40%，可回收性增强。MURALIDHARAN等[29]在制动片和制动钳之间采用纯铜接触，制动片和制动盘之间采用复合材料接触，研究了质量分数3.5%SiC和3.5%Y_2O_3增强树脂基复合材料制动片的摩擦磨损性能，发现其体积磨损率相比商用风电机组制动片最高降低了84%。

3.1.2 外部工况的影响

风电制动片摩擦材料性能的优劣不仅取决于

材料的成分与组织，还受到工况和环境的影响。制动片的摩擦因数受到载荷、速度和湿度的影响较大，一般随着载荷和湿度的增大而降低，受速度影响的情况则比较复杂，并且存在一定的波动[30-32]。MOHAMED等[33]研究发现，随着工作环境中沙砾尺寸增加或湿度降低，制动片的摩擦因数增大。张长坤等[34]研究发现：随着载荷增加，制动片的摩擦因数几乎不变，磨损率增大后趋于平稳；随着转速增加，摩擦因数迅速降低，磨损率不断增大。由于风向会不断改变，风电机组工作过程中经常遇到制动系统往复摩擦的情况。PENG等[35]采用热压成形法制备了酚醛树脂复合材料，发现单向摩擦条件下材料的磨损质量损失是往复摩擦条件下的12～16倍，磨损机理主要为黏着磨损。

风沙暴雪等极端环境会对风机制动系统性能产生重大影响，并对风机安全性产生潜在威胁，但目前有关外部工况对制动系统影响的研究较少。在未来的研究中，应关注这类特殊环境对制动系统的影响。

3.2 制动片摩擦磨损性能有限元仿真

有限元仿真是一种用于评估和预测材料、结构或系统在实际工作条件下行为的工程分析方法。该技术基于有限元法，将复杂的连续体划分成许多单元(如三角形、四边形单元等)，每个单元都由一组方程来描述行为，并与相邻单元相互连接。通过求解方程，可以推导出结构在受力情况下的应力、应变以及温度分布等重要信息。有限元仿真可用于模拟各种工程问题，可以节省成本，帮助工程师更好地改进产品或系统的性能，在工程设计、优化和验证过程中起着重要的作用。试验虽然可以获得制动片在实际工况下的摩擦因数、磨损率等性能指标，但对于一些实际难以测试的参数，如内部应力分布和温度分布等，则可以通过有限元仿真预测。

3.2.1 制动温度

温度是影响制动片制动效果的一个关键因素。风电制动系统在工作过程中，制动片/盘之间摩擦产生的高温会影响制动片的力学性能和化学性质等，温度超过材料可承受范围还可能导致制动片的制动性能降低甚至引起火灾，产生安全隐患。研究人员利用有限元仿真对制动过程中的温度场开展了大量研究。尚振国等[36]基于多载荷步和热流密度的方法对国内某1.5 MW风力发电机用盘式制动器进行了有限元分析，研究发现：制动力矩对温度影响显著，当制动力矩达到110%额定制动力矩时，制动片的最高温度可能超过烧结金属的许用温度，达到1 026 ℃；而当制动力矩为85%额定制动力矩时，制动片最高温度仅为852 ℃。SOLOMIN等[37]研究了制动模式对工作温度的影响，发现风电机组每运行15 min，制动片释放约123 kJ的热量；通过对风电制动系统几种模式的仿真，确定了最优运行方式为风机制动并保持30 s，然后每4次制动后进一步保持风机制动300 s，摩擦材料的温度将不超过350 ℃。SIROTKIN等[38]分析了紧急制动的重要性，提出了一款可靠性高且方便集成到现有风电系统中的电动机械装置，通过热分析发现，制动600 s后制动器最高温度只有150 ℃左右，远低于金属基摩擦副的400～600 ℃，使用寿命长，可维护性好。制动压力也是影响制动温度的重要因素之一。王保安等[39]通过热力耦合法模拟了偏航制动片在制动工况下的等效应力和温度变化特性，通过直观分析与方差分析研究了偏航压力、偏航速度、摩擦因数对制动片等效应力和温度的影响，结果表明：偏航压力对制动片最高温度影响最大，最高温度随偏航压力的增大而增大；制动片的磨损主要集中在温度更高的进口处，制动过程中制动片/盘之间产生的温度变化引起的热效应是导致其失效的主要原因。孙煊广等[40]基于传热性能分析理论，建立有限元三维模型，发现实际制动过程中制动盘的温度场和其结构紧密相关，当制动盘材料承受超过其屈服极限的热应力和温度耦合时，可能会出现热裂纹而导致制动盘失效；制动片的极限温度和应力往往比制动盘低，因此在制动过程中更容易受到磨损而损坏。ZHANG等[3]采用位移梯度循环法解决了制动盘因径向/周向摩擦效应差异导致耦合结果偏差的问题，并对制动过程中摩擦副进行了热-结构耦合分析，研究发现，非均匀温度场产生的热应力对制动盘应力分布有显著影响，而摩擦区域的应力差容易引起材料不均匀变形，导致制动盘失效。

目前，常通过多载荷步和热流密度、热力耦合、位移梯度循环等有限元仿真方法对力矩、制动模式、速度、压力和摩擦因数等因素对制动过程中的温度的影响进行研究。其中，力矩和压力对温度的影响最为显著，当风机承受较大的制动力矩或较高的压力操作时会产生较高的温度；改变制动模式可以有效降低温度，但同样会导致制动时间的延长；引入制动辅助系统可以降低温度并提高制动效率，但这会增加风机组件大小并增大成本。因此，在制动系统

设计中，需要综合考虑这些因素，在成本允许的条件下确保风机的工作温度在可接受范围内。

3.2.2 制动稳定性

为了确保制动系统安全稳定运行，制动器需要具备一定的稳定性。ZHANG等[41]通过多体动力学方法建立了包含制动弹簧、主动制动钳、被动制动钳和补偿机构在内的兆瓦级风电盘式制动器整机机械装配多体动力学模型，研究了兆瓦级风电机组制动器在紧急制动过程中的振动。杨书仪等[42]根据制动系统刚度矩阵不稳定复特征值和不稳定倾向系数，构建了偏航制动器制动模态耦合模型，分析了制动压力、摩擦因数、偏航速度、弹性模量等因素对制动稳定性的影响，不稳定复特征值个数越多、不稳定倾向系数变化越大代表制动系统越不稳定。沙智华等[43]基于风电制动器刚柔耦合动力学模型仿真分析了不同初始制动转速、制动力、摩擦因数下大功率风电制动器的振动特性，得出风电制动器制动稳定性判定方法。LIU等[44]通过建立风电盘式制动器刚柔耦合模型，模拟风电盘式制动器的实际工况，分析了制动补偿机构对风电制动系统稳定性的影响。

目前，常通过建立多体动力学模型、模态耦合模型、刚柔耦合动力学模型等有限元模型研究转速、制动压力、摩擦因数和弹性模量对风机制动稳定性的影响。转速是一个无法控制的因素，主要受到风速的影响。制动压力是在安装过程中预先设定的，可以根据具体需求调整。因此，为了增强风机制动稳定性，选择合适的摩擦因数和弹性模量非常重要。摩擦因数决定了制动片/盘之间的摩擦特性，合适的摩擦因数可以提高制动稳定性。弹性模量则决定了制动系统的刚度和抗挠性，适当的弹性模量能够提供恰当的制动性能和响应速度。在保证制动效果的前提下，综合考虑摩擦因数和弹性模量的影响，以提高制动片的稳定性。此外，制动片的维护和更换也是保证其稳定性的重要措施，定期检查和更换磨损严重的制动片可以有效避免因制动片失效而导致的安全事故。

4 结束语

风电机组制动片的研究在过去几年取得了显著的进展，为提高风电机组的运行稳定性和安全性提供了重要技术支持。风电机组制动片的材料成分和工况条件对其摩擦学性能有着显著影响，其材料主要为铜基复合材料和树脂基复合材料等，其服役工况多变且复杂，普遍设立在风力资源丰富的东部沿海地区以及西部高原地区。通过试验与有限元仿真结合，可以对摩擦因数、磨损率等指标测定和制动温度、稳定性等参数进行模拟，综合评估风机制动效果。未来研究可以集中在以下几个方面：(1)新型梯度金属基材料的引入，环保型树脂基复合材料的开发；(2)制动片在西部高原风沙环境和东北地区低温环境等极端工作条件下性能的研究；(3)先进摩擦材料研究方法的开发；(4)通过机器学习神经网络等技术来预测和优化材料结构、成分等，降低研究人员在时间、成本上的投入，提高新材料的发现效率。在风电机组制动片领域仍然存在挑战和机遇，通过不断创新和研究，开发和研制高性能风电机组制动片，为风电机组的运行可靠性和风电行业的可持续发展做出更大贡献。

参考文献：

[1] ZHENG C W, LI C Y, PAN J, et al. An overview of global ocean wind energy resource evaluations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1240-1251.

[2] SAHU B K. Wind energy developments and policies in China: A short review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1393-1405.

[3] ZHANG S F, YIN J, LIU Y, et al. Thermal–structural coupling analysis of brake friction pair based on the displacement gradient circulation method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(5): 1-13.

[4] 李宝聚，齐宏伟，傅吉悦，等. 极端气象天气对新能源运行影响分析[J]. 吉林电力，2022，50(1)：10-13.
LI B J, QI H W, FU J Y, et al. Analysis on the impact of extreme weather on new energy operation[J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(1): 10-13.

[5] 黄琳，崔昊，尹剑，等. 基于制动器摩擦副销-盘试验的第三体摩擦磨损特性研究[J]. 润滑与密封，2022，47(6)：59-64.
HUANG L, CUI H, YIN J, et al. Study on the friction and wear characteristics of the third body based on pin-disc test of brake friction pairs[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(6): 59-64.

[6] 李绵基. 海上风电场风力发电机运行维护策略研究[J]. 光源与照明，2022(12)：222-224.
LI M J. Research on the operation and maintenance strategy of wind turbines in offshore wind farms[J]. Lamps and Lighting, 2022(12): 222-224.

[7] SIROTKIN E A, SOLOMIN E V, GANDZHA S

A, et al. Backup mechanical brake system of the wind turbine[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 944: 012109.

[8] 方小亮，郑合静. 铜基粉末冶金摩擦材料的应用及展望[J]. 粉末冶金技术，2020，38(4)：313-318.
FANG X L, ZHENG H J. Application and prospect of copper-based powder metallurgy friction materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38(4): 313-318.

[9] LI L K, ZHUANG J, TONG T J, et al. Effect of wet granulation on tribological behaviors of Cu-based friction materials[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2023, 16(3): 1075.

[10] RAMALINGAM V V, SAI PRANAY V, KOTA P K, et al. Tribological performance of the continuous steel fiber-reinforced Cu based friction material for heavy-duty braking applications[J]. Tribologia-Finnish Journal of Tribology, 2022, 39(1/2): 30-38.

[11] GUHA KESHAV M, HEMCHANDRAN C G, DHARSAN B, et al. Manufacturing of continuous fiber reinforced sintered brake pad and friction material[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 4493-4496.

[12] WEI J D, CHEN H. Effect of graphite on the friction and wear properties of Cu-based friction materials[J]. Materials Science Forum, 2014, 788: 621-626.

[13] ESSWEIN J A L Jr, ARRIECHE F E, SCHAEFFER L. Analysis of wear in organic and sintered friction materials used in small wind energy converters[J]. Materials Research, 2008, 11(3): 269-273.

[14] 刘亚飞，李亚楠，刘奎，等. 金属/高分子梯度材料的研究现状与展望[J]. 化工新型材料，2020，48(2)：15-19.
LIU Y F, LI Y N, LIU K, et al. Research status and prospect of metal/polymer gradient material[J]. New Chemical Materials, 2020, 48(2): 15-19.

[15] 崔雪，张松，张春华，等. 高性能梯度功能材料激光增材制造研究现状及展望[J]. 材料工程，2020，48(9)：13-23.
CUI X, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Research status and prospect of laser additive manufacturing technology for high performance gradient functional materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(9): 13-23.

[16] GOVINDARAJU M, MEGALINGAM A, MURUGASAN J, et al. Investigations on the tribological behavior of functionally gradient iron-based brake pad material[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(12): 2474-2486.

[17] KANNAN K R, VIGNESH R V, KALYAN K P, et al. Development and tribological characterization of fly ash reinforced iron based functionally gradient friction materials[J]. Engineering Review, 2021, 41(3): 20-28.

[18] RAJESH KANNAN K, GOVINDARAJU M, VAIRA VIGNESH R. Development of fly ash based friction material for wind turbines by liquid phase sintering technology[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2021, 235(7): 1463-1469.

[19] 李仲平，冯志海，徐樑华，等. 我国高性能纤维及其复合材料发展战略研究[J]. 中国工程科学，2020，22(5)：28-36.
LI Z P, FENG Z H, XU L H, et al. Development strategies for China's high-performance fibers and their composites[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 28-36.

[20] MULLAIKODI S M, SETHUVELAPPAN P, KAMARAJ M, et al. Development of hybrid friction material for brake pad application[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 923(1): 012039.

[21] YIN T, FU Q G, ZHOU L, et al. Carbon fiber @ silicone rubber core-sheath elastomer for enhancing wear-resisting performance of phenolic resin composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 192: 107991.

[22] RAVI RAJ V, VIJAYA RAMNATH B, SRINIVSAN R, et al. Mechanical properties of hybrid polymers for break pad applications[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 961(1): 012004.

[23] 李辉，杜建华，王浩旭，等. 碳纤维织物增强树脂基摩擦材料摩擦学性能研究[J]. 功能材料，2017，48(4)：4100-4104.
LI H, DU J H, WANG H X, et al. Research of tribological characteristics of resin matrix composites reinforced by woven fabric of carbon fiber[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(4): 4100-4104.

[24] DUAN Y P, SHI Z G, WANG Y C, et al. Effect of mineral fiber slag removal on friction and wear properties of resin-based friction materials[J]. Materials Letters, 2021, 293: 129661.

[25] CUI G J, LIU H Q, SHI R B, et al. Dry-braking properties of resin based friction materials by different fibres[J]. Lubrication Science, 2020, 32(1): 21-29.

[26] 刘浪，栾道成，胡志华，等. 玄武岩纤维和钢纤维含量对树脂基摩擦材料性能的影响研究[J]. 中国塑料，2022，36(3)：33-39.
LIU L, LUAN D C, HU Z H, et al. Effects of basalt

fiber and steel fiber contents on properties of resin based friction materials[J]. China Plastics, 2022, 36(3): 33-39.

[27] 郭振兴，梁志伟. 风电用新型树脂基复合材料摩擦片实验研究[J]. 机械工程师，2018(11)：84-86.
GUO Z X, LIANG Z W. Experimental study on the new resin matrix composite friction plate for wind power[J]. Mechanical Engineer, 2018(11): 84-86.

[28] SAI BALAJI M A, KATIYAR J K, EAKAMBARAM A, et al. Comparative study of sintered and composite brake pad for wind turbine applications[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2023, 237(7): 1430-1445.

[29] MURALIDHARAN K, VAIRA VIGNESH R, GOVINDARAJU M. Tribological characterization of functionally gradient wind turbine brake pads reinforced with rare earth metal oxide[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(14): 3247-3266.

[30] 陈洁，熊翔，姚萍屏，等. 摩擦面温度对铁基摩擦材料摩擦磨损性能影响机理的研究[J]. 粉末冶金技术，2004，22(4)：223-227.
CHEN J, XIONG X, YAO P P, et al. Effect of rubbed surface temperature on frictional behaviour of iron based P/M friction materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2004, 22(4): 223-227.

[31] 朱波，王成国，蔡珣. 影响碳纤维增强复合材料摩擦系数的因素[J]. 材料科学与工程，2002，20(3)：361-363.
ZHU B, WANG C G, CAI X. Research of influence factors on friction coefficient of carbon fiber reinforced composite[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2002, 20(3): 361-363.

[32] 季轩，韩春艳，陈艳. 涤纶短纤维摩擦系数测试及其影响因素的研究[J]. 合成技术及应用，2017，32(1)：56-61.
JI X, HAN C Y, CHEN Y. Analysis of the influence factors on fibers′ frictional coefficient test[J]. Synthetic Technology and Application, 2017, 32(1): 56-61.

[33] MOHAMED A F, OSMAN O O, GHAZALY N M. Study of friction coefficient of wind turbine brake system under environmental conditions[J]. International Journal of Advanced Science and Technology, 2019, 28(12): 169-177.

[34] 张长坤，刘世达，刘豪睿，等. 碳纤维-环氧树脂复合材料的摩擦学性能研究[J]. 纺织导报，2021(10)：55-58.
ZHANG C K, LIU S D, LIU H R, et al. Tribological property of carbon fiber-epoxy resin composite[J]. China Textile Leader, 2021(10): 55-58.

[35] CAI P, LUO Z F, DUAN X H, et al. Effect of reciprocating and unidirectional sliding motion on the friction and wear of phenolic resin based composite[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(4): 573-577.

[36] 尚振国，蔡卫国，高吭. 风电盘式制动器温度场有限元分析[J]. 机械工程师，2018(8)：1-3.
SHANG Z G, CAI W G, GAO K. Finite element analysis on temperature field of disc brake for wind turbine[J]. Mechanical Engineer, 2018(8): 1-3.

[37] SOLOMIN E V, SIROTKIN E A, KIRPICHNIKOVA I M. Efficiency analysis of the friction material for the wind turbine braking system[J]. Solid State Phenomena, 2018, 284: 1321-1326.

[38] SIROTKIN E A, MARTYANOV A S, SOLOMIN E V, et al. Emergency braking system for the wind turbine[C]//2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. Chelyabinsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017: 1-4.

[39] 王保安，王建梅，候建，等. 制动工况下风电偏航摩擦片热力耦合特性[J]. 润滑与密封，2022，47(9)：37-43.
WANG B A, WANG J M, HOU J, et al. Thermal-mechanical coupling characteristics of wind turbine yaw friction plates under braking conditions[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(9): 37-43.

[40] 孙煊广，张锦，殷玉枫，等. 风电高速轴制动器温度场及热力耦合分析[J]. 润滑与密封，2020，45(12)：67-72.
SUN X G, ZHANG J, YIN Y F, et al. Analysis of temperature field and thermal coupling of wind power high-speed shaft brake[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(12): 67-72.

[41] ZHANG S, XUE C, YIN J, et al. Multi-body dynamic analysis of the braking process for megawatt wind turbine disc brake[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 470: 012005.

[42] 杨书仪，赵康康，张鸿泰，等. 风电机组偏航制动器制动稳定性分析[J]. 太阳能学报，2023，44(1)：188-195.
YANG S Y, ZHAO K K, ZHANG H T, et al. Braking stability analysis of wind turbines yaw brake[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(1): 188-195.

[43] 沙智华，薛春燕，尹剑，等. 大功率风电制动器制动稳定性研究[J]. 中国工程机械学报，2017，15(5)：389-395.
SHA Z H, XUE C Y, YIN J, et al. Research on braking stability for large-power wind turbine brake[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2017, 15(5): 389-

395.
[44] LIU Y, HAO J, KANG P L, et al. Research on dynamic characteristics of compensation mechanism for large-power wind turbine disc brake[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2020, 16(3): 595-605.

Research Progress on Tribological Properties of Wind Turbine Brake Pad Materials

JI Mingliang, MA Shenghui, HUANG Haoyang, ZHAO Shen, JI Zhengjia

(College of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: As a key component of wind turbine, brake system plays an important role in the safe operation and power generation efficiency of wind turbine. The brake reliability and service life of high performance wind turbine brake system has become a key research topic. The design key points of brake pad are described from the aspects of material composition, service condition and friction and wear performance of wind power brake system. The research progress in the evaluation of brake temperature and stability by the combination of test and finite element simulation is summarized, and the development trend of brake pad materials for wind turbines is prospected.

Key words: wind turbine brake system; composite; friction and wear property; brake temperature; stability

2025年“材料表面工程”专题征稿启事

材料表面工程技术是一个高度综合的领域，它涉及多种学科知识，包括但不限于物理学、化学、电子学、机械学和材料学。该技术通过改变材料表面的化学成分、组织结构、应力状态或形成特殊的表面覆层，赋予材料优异的耐磨、耐腐蚀、耐高温、隔热、抗氧化和抗疲劳等性能，以及电、磁、光、声等功能。这些改进使材料能够适应各种复杂的服役环境，广泛应用于国家重大工程及战略性新兴产业，如航空大飞机、航空发动机与燃气轮机、重型直升机、载人航天与探月工程、半导体、轨道交通、可控核聚变、高端海洋工程装备、先进装备制造和基础制造技术等领域。此外，在新能源、石油化工、钢铁冶金、交通运输、包装印刷等行业中，材料表面工程技术也发挥着重要作用。为了集中展示我国材料表面工程领域的最新研究进展，促进学术交流，推动研究向纵深发展，《机械工程材料》于2025年第7期推出“材料表面工程”专题报道，现公开征集相关领域的高水平研究论文及综述。

征稿范围：

（1）材料表面工程基础理论研究；

（2）增/减摩、耐磨、超滑、抗氧化、防腐蚀等涂层材料研究；

（3）冷/热喷涂、热扩渗（渗氮、渗碳）、三束（激光束、电子束、等离子体）改性、物理/化学气相沉积、电/化学沉积、阳极/微弧氧化等表面改性技术新进展；

（4）喷丸、滚压、激光冲击等表面形变强化处理技术新进展。

写作要求：

综述文章要求能总结材料表面工程的研究现状并提出前瞻性的发展方向；研究类文章要求能反映该领域的最新研究成果，数据详实、方法新颖、理论分析有深度、结果可靠；模拟类文章要求有相应的试验验证；应用类文章要求具有实际推广价值，研究要有系统性，有理论分析。

时间安排：

投稿截止时间：2025年3月15日

出版时间：2025年7月

投稿方式：

通过期刊网站https://jxgccl.mat-test.com“投审稿系统”进入投稿页面，选择《机械工程材料》，进入“作者投稿”，按系统要求填写信息，上传稿件，请作者备注所投专题。

联系电话：021-65541496；021-65556775-368

E-mail：mem@mat-test.com

《机械工程材料》编辑部