

## 潮湿条件下 Cu-PM-C/C-SiC 摩擦副摩擦磨损性能分析

夏振凯<sup>1</sup> 符蓉<sup>2</sup>

1. 大连交通大学詹天佑学院 辽宁大连 116208; 2. 大连交通大学 连续挤压教育部工程研究中心

DOI: 10.12238/ems.v7i5.13254

**[摘要]** 在雨季,降水可能使制动系统暴露于湿润环境中,进而引发制动性能减弱,严重时可能导致制动失效。为探究潮湿条件下铁含量对摩擦性能的影响,本文采用铁含量分别为 17wt%、19wt%、21wt%、23wt% 的铜基粉末冶金材料与 C/C-SiC 试环配副,利用 MM-3000 摩擦磨损性能试验机(水流量 6ml/min)模拟雨天制动,分别进行制动压力 0.25kN,制动速度 50km/h、80km/h、120km/h 的制动试验。结果表明:在 50、80、120km/h 速度下,随着铁含量的增大,摩擦稳定系数分别提升了 13.4%、12.5%、7.9%。

**[关键词]** Cu-PM; C/C-SiC; 摩擦磨损; 潮湿

## 引言

我国高速线路已跨越南北、东西区域,多样性的地理特征导致高速列车服役环境涵盖了种复杂气候条件,复杂服役环境严重影响高速列车的制动效果与服役性能<sup>[1-2]</sup>。高速列车制动系统需要在雨雪天气等复杂多变的环境工况下,保证列车运行的安全性与稳定性。铜基粉末冶金材料因其具有良好的热传导性、热稳定性和摩擦磨损性能,被广泛应用于高速列车的制动系统之中<sup>[3]</sup>。研究人员通常通过改变其成分含量来优化材料的摩擦性能。陈洁等<sup>[4]</sup>研究了 Fe 在铜基粉末冶金中的摩擦磨损作用及机理,研究表明:Fe 能促进摩擦表明氧化膜的形成,减小材料磨损量。赵刚等<sup>[5]</sup>研究了铁含量对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响,结果表明:铁含量 11wt% 时摩擦稳定性最好。碳陶复合材料具有密度小、强度高等优点,在诸多领域具有广泛应用前景<sup>[6-8]</sup>。

本文以不同铁含量铜基粉末冶金材料与 C/C-SiC 复合材料配副,研究其在湿摩擦条件下的摩擦性能,揭示铁含量对摩擦性能的影响规律,为摩擦副优化改进提供数据支撑。

## 1 试验材料与方法

摩擦材料选用铁含量分别为 17wt%、19wt%、21wt%、23wt% 的铜基粉末冶金材料,对偶环为 C/C-SiC 复合材料,其组成的摩擦副示意图如图 1 所示。利用 MM-3000 摩擦磨损性能试验机进行不同工况下的制动试验,水流量 5ml/min,制动惯量 0.85kg·m<sup>2</sup>,制动初始温度 60℃,制动压力 0.25kN,制动速度 50、80、120km/h,每个制动程序重复三次。

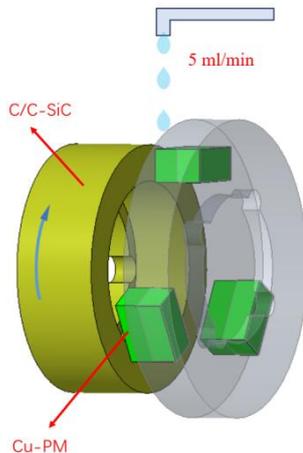


图 1 摩擦副示意图

## 2. 结果与分析

## 2.1 铁含量对摩擦系数的影响

图 2 为制动压力 0.25kN,潮湿条件下平均摩擦系数随铁

含量的变化情况,从图中可以看出不同速度下平均摩擦系数随着铁含量由 17wt% 增至 23wt% 均表现为先减后增趋势。其中制动速度为 50km/h 时,铁含量由 17wt% 增至 19wt% 时,平均摩擦系数由 0.231 降至 0.200,降低了 0.031,当铁含量增至 23wt% 时,平均摩擦系数增至 0.258,其变化幅度为 0.058;制动速度为 80km/h 时,当铁含量由 17wt% 增至 19wt% 时,平均摩擦系数由 0.254 降至 0.246,降低了 0.008,当铁含量增至 Fe23wt% 时,平均摩擦系数增至 0.39,其变化幅度为 0.144;制动速度为 120km/h 时,铁含量由 17wt% 增至 23wt%,平均摩擦系数由 0.374 降至 0.33,降低了 0.044,当铁含量增至 23wt% 时,平均摩擦系数上升至 0.422,其变化幅度为 0.092。

平均摩擦系数随在铁含量为 19wt% 时有小幅度下降,但平均摩擦系数变化的整体趋势为随着铁含量的增大而逐渐增大。铁含量由 17wt% 增至 23wt% 时,由于铁含量的增加,摩擦温度逐渐升高(如图 4),摩擦界面的水分蒸发速度加快,水膜逐渐被破坏,致使其润滑作用逐渐减弱,摩擦系数逐渐上升;其次水分介入摩擦界面之后,水包裹着表面部分第三体在离心力的作用下脱离摩擦表面,从而使得摩擦表面暴露出更多的微凸体,同时,铁含量的增大使得材料硬度增大,其表面微凸体抗剪切能力增强,增加了铜基粉末冶金材料和碳陶复合材料表面微凸体间的啮合程度,所能提供的摩擦阻力增大,故在湿摩擦条件下,随着铁含量的增大,平均摩擦系数整体呈现上升趋势。

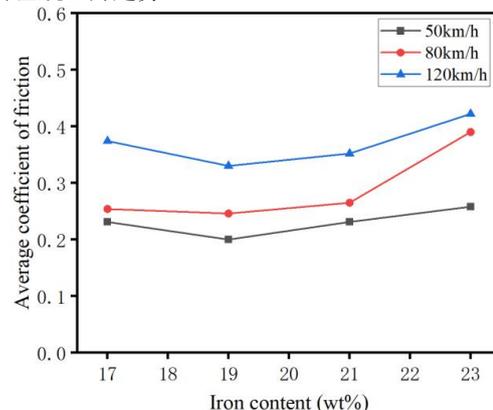


图 2 铁含量对平均摩擦系数的影响

图 3 为制动压力 0.25kN,潮湿条件下摩擦稳定系数随铁含量的变化情况,摩擦稳定系数为平均摩擦系数与最大摩擦系数的比值。从图中可以看出不同速度下的摩擦稳定系数随着铁含量的增大逐渐升高。制动速度为 50km/h 时,摩擦稳定系数由 0.67 增至 0.76,上升了 0.09,增幅 13.4%;制动速度为 80km/h 时,摩擦稳定系数由 0.72 增至 0.81,上升了

0.09, 增幅 12.5%; 120km/h 时, 摩擦稳定系数由 0.76 上升至 0.82, 上升了 0.06, 增幅 7.9%。

随着铜基粉末冶金材料铁含量的增大, 摩擦表面温度逐渐升高(图4), 在高温作用下摩擦界面的水分的蒸发速度加快, 水分的蒸发减弱了对表面第三体颗粒的冲刷, 有利于表面摩擦膜的形成, 进而提高摩擦过程的稳定性, 提高摩擦稳定系数。

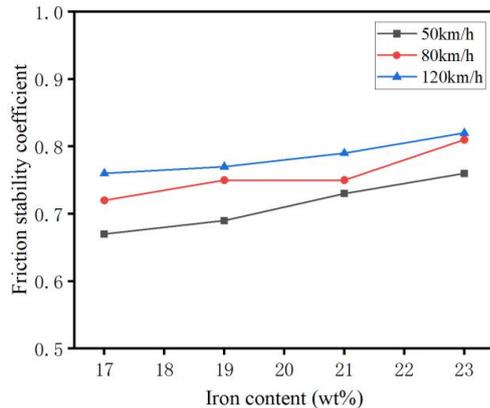


图3 铁含量对摩擦稳定系数的影响

## 2.2 摩擦面峰值温度与磨损量

图4为不同制动速度下摩擦面峰值温度与铜基粉末冶金材料铁含量的关系变化情况, 从图中可以看出不同速度, 摩擦面峰值温度整体变化趋势为随着铁含量的增大呈先减后增, 铁含量为19wt%时温度最低。其中50km/h时, 铜基粉末冶金铁含量由17wt%增至19wt%时, 摩擦面峰值温度由155℃降至137.6℃, 降低了17.4℃, 当铁含量继续增至23wt%时, 摩擦面峰值温度升至178.6℃, 温升41℃, 增幅29.8%; 80km/h时, 随着铜基粉末冶金铁含量由17wt%增至19wt%, 摩擦面峰值温度由的256.8℃降至的243.5℃, 降低了13.3℃, 当铁含量继续增至23wt%时, 摩擦面峰值温度增至314.6℃, 温升71.1℃, 增幅29.1%; 120km/h时, 铜基粉末冶金铁含量由17wt%增至19wt%时, 摩擦面峰值温度出现小幅度下降, 由430.3℃降至397℃, 降低了33.3℃, 铁含量增至23wt%时, 摩擦面峰值温度增至448.2℃, 温升51.2℃, 增幅12.9%。

在湿摩擦条件下, 摩擦面峰值温度随铁含量的增大先间后增, 这主要是因为铜的导热性能比铁好, 铁含量的增加使得材料热传导率下降, 使得摩擦热更容易在摩擦表面堆积, 同时, 铁含量的增加, 会增大材料表面微凸体的数量, 水膜易破损, 进而降低了水膜的冷却作用, 故摩擦面峰值温度逐渐升高。

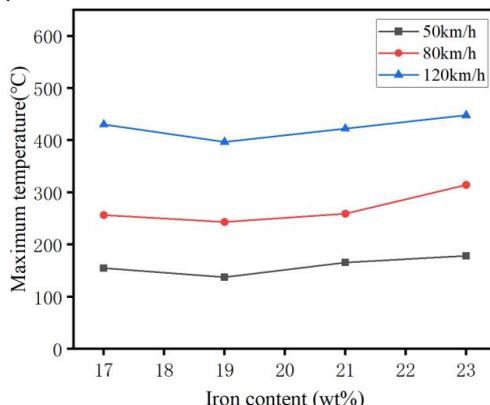


图4 铁含量对摩擦面峰值温度的影响

图5为不同制动速度下, 铜基粉末冶金材料磨损量与铁含量的关系的变化情况, 从图中可以看出不同速度下磨损量随着铁含量的增大而逐渐升高。其中50km/h时, 当铁含量由19wt%增至23wt%, 磨损量由0.1g增至0.24g, 增大了0.14g, 增幅140%; 80km/h时, 铁含量由19wt%增至23wt%, 磨损量由0.15g增至0.55g, 增大了0.4g, 增幅266.7%; 120km/h时, 铁含量由19wt%增至23wt%, 磨损量由1.05g增至1.6g, 增大了0.55g, 增幅52.4%。

随着铁含量的增大, 虽在一定程度上提高了铜基粉末冶金材料的硬度, 但也使其脆性增强, 材料表面的摩擦膜容易在剪切力及热应力的作用下萌生裂纹, 裂纹延伸拓展导致摩擦膜破损脱落形成磨屑, 同时, 由于水分的介入, 水分包裹着磨屑, 在离心力的作用下脱离摩擦界面, 故随着铁含量的增大, 铜基粉末冶金材料的磨耗逐渐增大。

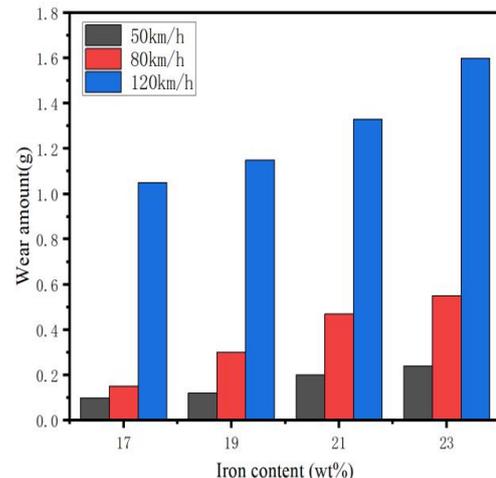


图5 铁含量对磨损量的影响

## 3 结论

随着铁含量的增大, 虽然磨耗增大, 但摩擦面峰值温度逐渐升高, 可减弱摩擦界面水膜的润滑作用, 进而提高制动过程的稳定性。在50、80、120km/h速度下, 随着铁含量的增大, 摩擦稳定系数分别提升了13.4%、12.5%、7.9%。

### [参考文献]

- [1]张超. 低温环境下动车组制动盘/闸片磨损与摩擦制动行为研究[D]. 西南交通大学, 2021.
- [2]石含波. 低温环境下高速列车制动材料摩擦磨损特性分析[D]. 西华大学, 2022.
- [3]王立全, 张向军, 王素焕, 等. 高速列车用铜基粉末冶金摩擦材料摩擦性能的研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(16): 1-4.
- [4]陈洁, 熊翔, 姚萍屏, 等. Fe在铜基粉末冶金摩擦材料中的作用[J]. 粉末冶金工业, 2006, (04): 16-20. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-6543.2006.04.008.
- [5]赵刚, 李强. 铁含量对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J]. 冶金与材料, 2023, 43(11): 151-153+156.
- [6]孙国帅, 刘荣军, 曹英斌, 等. C/C-SiC刹车材料的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(S1): 516-519.
- [7]周晏云, 吴伟萍, 陈钰, 等. 纤维复合材料在轨道车辆中的应用[J]. 纤维复合材料, 2024, 41(02): 104-107.
- [8]王翔, 彭俊飞. 碳纤维复合材料在高速列车车辆制动系统中的应用[J]. 模具制造, 2024, 24(08): 144-146. DOI: 10.13596/j.cnki.44-1542/th.2024.08.047.