

Cu-Ni-Si-Cr 铜基复合摩擦材料合金元素正交优化研究

赵龙志^{1,2}, 马现军^{1,3}, 李根¹, 李文佳¹, 赵明娟¹

(1. 华东交通大学材料科学与工程学院, 南昌, 330013;

2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌, 330013;

3. 广东科技学院机电工程学院, 东莞, 523083)

摘要: 本研究旨在开发高性能铜基复合材料, 以满足高速列车提升运行速度后的制动系统要求。采用正交实验法, 系统研究以不同比例 Cu-Ni-Si-Cr 合金为基体的铜基复合材料, 研究合金中 Ni、Cr、Si 的合金元素比例对铜基复合材料的力学性能和摩擦学性能的影响。以 Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr 为基体的铜基复合材料的硬度和强度最高, 分别为 49.90 HBW 和 171.98 MPa。通过对摩擦因数和磨损量正交实验结果分析, 以 Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr 为基体的铜基复合材料综合性能最佳。其在 25~650 °C 条件下, 随着温度的提高, 摩擦因数先增加后减小, 磨损量不断增加, 在 450 °C 下, 铜基复合材料的摩擦因数最高。磨损机理由磨粒磨损向氧化磨损和磨粒磨损转变。通过正交实验法对铜基体合金化, 对有效提升闸瓦用铜基复合材料在高温下的摩擦因数和耐磨性具有重要意义。

关键词: 正交实验法; 基体合金化; 摩擦因数; 磨损量; 磨损表面

中图分类号: TF125 文献标志码: A

Orthogonal optimization study of Cu-Ni-Si-Cr alloy elements in Cu matrix composites for gate tiles

ZHAO Long-zhi^{1,2}, MA Xian-jun^{1,3}, LI Gen¹, LI Wen-jia¹, ZHAO Ming-juan¹

(1. School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2.State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

3.School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Science and Technology, Dongguan 523083, China)

Abstract: The purpose of this study is to develop high-performance copper matrix composites to meet the requirements of the braking system of high-speed trains after the operating speed is increased. The orthogonal experimental method was used to systematically study the copper matrix composites with different ratios of Cu-Ni-Si-Cr alloys as the matrix, and to investigate the effects of the alloying element ratios of Ni, Cr, and Si in the alloys on the mechanical properties and tribological properties of the copper matrix composites. The hardness and strength of the Cu matrix composites with Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr as the matrix were the highest, 49.90 HBW and 171.98 MPa, respectively. The results of the orthogonal experiments on the friction factor and the amount of wear were analyzed, and the comprehensive performance of the Cu matrix composites with Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr as the matrix was the best. Its friction coefficient increases and then decreases with the increase of temperature under the condition of 25~650 °C, and the amount of wear increases, and the highest friction coefficient of Cu-matrix composites is found at 450 °C. The wear mechanism changes from abrasive wear to oxidative wear and abrasive wear. The alloying of copper matrix by orthogonal experimental method is of great significance to effectively improve the friction factor and wear resistance of copper matrix composites for brake pads at high temperatures.

Key words: orthogonal experimental method; matrix alloying; friction coefficient; wear volume; wear surface

1 引言

铜基复合材料因具备出色的导热性、耐高温、耐磨性以及稳定的摩擦因数等特性, 在风电、高铁、航天、航空机械离合器的制动领域得到广泛应用^{[1]-[3]}。随着高速列车运行速度的持续提升, 制动材料所承受的热负荷亦随之增加。因此, 列车高速化趋势对铜基复合材料在高温下的力学性能、耐磨性及摩擦因数的稳定性提出了更高的要求^{[4]-[6]}。

在高温制动摩擦过程中, 铜基复合材料的软化现象是导致其摩擦因数不稳定的关键因素。为了解决这一难题, 采用铜基体合金化方式是提升材料耐高温软化能力的有效手段之一。合金化是通过在高温条件下合金元素的溶解扩散, 进而形成固溶强化或高温强化相, 这不仅增强了基体在高温下的强度, 还优

基金项目: 国家自然科学基金(51265014)、江西省自然科学基金(20151BAB206044)、江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ210661)和江西省研究生创新专项基金(YC 2022-S567)

化了其摩擦学特性^{[7]-[9]}。魏东彬^[10]等人发现，将铜铁预合金粉末加入铜基复合材料中，可在界面处形成珠光体硬质相，从而显著提升材料的摩擦磨损性能。含 30%铜铁预合金粉末的复合材料展现了最优的性能，其良好的塑性和适量的硬质相共同强化了摩擦表面。此外，Zhao^[11]等人通过纳米 Al_2O_3 颗粒弥散强化的铜基复合材料，表现出较高的摩擦因数及稳定性，尽管硬质颗粒的脱落可能导致增加的磨损。Zhang^[12]等人的研究表明，向铜基复合材料中添加镍能够提高连续紧急制动的性能，并在摩擦表面形成坚固的机械混合层以及厚实的氧化层，增强对塑性变形的抵抗力。刘建秀^{[13]-[14]}等人通过添加镍、铬元素，并通过固溶强化机制作用于基体，可以使材料组织细化，晶粒分布更加均匀，从而有效提升了铜基复合材料的强度和硬度，增加了摩擦因数的稳定性，并降低了磨损率。文国富^[15]等人指出，镍在基体强化效果上优于铬，能有效降低摩擦因数和磨损率。此外 Cu-Ni-Si-Cr 合金是一种具有优异高温性能的铜合金，表现出高强度、高导热率、高耐热性和优异的抗软化能力^[16]。Rdzawski Z^[17]等人研究通过向 Cu-Ni-Si 合金中添加 0.8%的铬元素，形成了在高达 800 °C下仍保持稳定性微米级 Cr_3Si 相。

上述研究多关注单一或少量元素对铜基体的影响，而忽视了多元素间的协同作用。本文通过采用正交实验法对 Ni、Cr、Si 元素含量进行优化，实现了多元素组分与性能之间的高效筛选和分析，提供了一种快速、准确确定最佳合金组成比的新途径。采取铜基体合金化，研究合金最优比例的铜基复合材料在不同温度下的摩擦学性能，对闸瓦用铜基复合材料的实际应用，提供理论依据。

2 实验材料和方法

2.1 实验材料

采用粉末冶金法制备铜基复合材料，通过正交实验法确定 Ni、Cr、Si 的具体含量，Ni、Cr、Si 的含量作为正交实验的 3 个因素，每个因素设置 3 个水平，以摩擦因数和磨损量作为指标，采用 $\text{L}_9(3^3)$ 正交表进行实验，各组元素比例如表 1 所示。

表 1 正交实验设计表
Table 1 Orthogonal experimental design table

Level	Experimental factors		
	A	B	C
	Ni /wt%	Si /wt%	Cr /wt%
1	6.0	1.25	0.25
2	7.0	1.75	0.5
3	8.0	2.25	0.75

将 Cu-Ni-Si-Cr 各粉体分别按设计含量称量，置入球磨罐中，在行星式球磨机上混合均匀，转速 350 r/min，时间 10 h。表 2 为铜基复合材料成分组成，将铜基复合材料各原料粉末经 V 型混料机混合 4 h，混合均匀的粉末倒入冷压模具内，并在 460 MPa 的压力下进行冷压成型，保持该压力的时间为 30 s。进行高温高压烧结，烧结温度为 1000°C，压力 5.9 MPa，保温时间为 5 h，然后随炉冷却至后取出。

表 2 铜基复合材料成分组成 (wt%)
Table 2 Composition of copper matrix composites (wt%)

FeCu30	CrFe	Graphite	MoS ₂	SiO ₂	Cu-Ni-Cr-Si alloy
29	9	11	1.5	1.5	48

2.2 实验方法

本文旨在利用 MPT-3G 型国产高温摩擦试验机进行系统的摩擦学实验研究，实验装置如图 1 所示。该试验机集成了高温腔体、温度传感器以及温度控制系统，共同构成了一个精确控制的高温实验环境。在高温腔体内部，安装了一套销-盘式摩擦磨损测试装置，用以模拟高温环境下材料的摩擦环境。

在摩擦实验中，设定摩擦半径为 15 mm，并选用直径为 4 mm、高度为 12 mm 的圆柱形销试样进行测试。摩擦副是直径为 75 mm、厚度为 5 mm 的圆盘，该摩擦副由 24CrNiMo 合金钢制造而成。为确保实验结果的准确性，每次摩擦试验开始前，都会进行预磨试验，具体操作步骤为：在 20 N 的恒定压力和 400 r/min 的转速下，使销与摩擦副充分接触并进行磨合，磨合时间持续 5 min。在试验开始前，通过精确的温度控制系统，将试样和摩擦副加热至预定的温度，随后进行摩擦磨损试验。

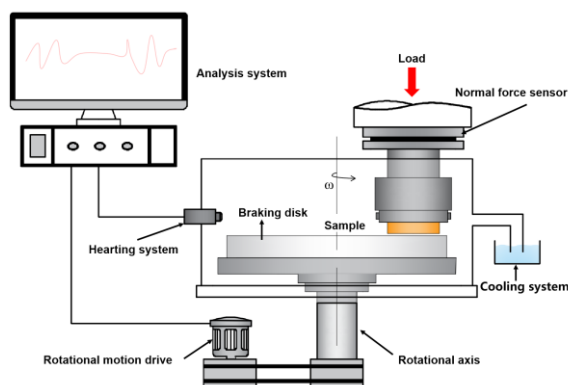


图 1 MPT-3G 型高温摩擦磨损试验机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MPT-3G high temperature friction and wear tester

使用 DHB-3000 型布氏硬度计测量试样的硬度，实验结果取 5 次测试的平均值。在 68TM-50 型万能试验机上测试铜基复合材料的压缩强度，取 3 次测试的平均值。采用金相显微镜（Zeiss Axio Vert.A1）观察材料的组织形貌；采用 X 衍射仪射线（XRD; XRD-6100, Shimadzu, Japan）对材料表面进行物相分析；采用扫描电子显微镜（SU8010, Japan）分析材料表面的摩擦形貌。

3 结果与讨论

3.1 铜基复合材料的组织形貌

图 2 为铜基复合材料的组织形貌，大面积的白色为 Cu-Ni-Si-Cr 基体，起到支撑对偶件和镶嵌其他组元的作用。不规则的大块黑色的组织是团聚后的石墨作为润滑组元，有效减少了材料的磨损。浅灰色为 CrFe 和黑色有规则形状的 SiO₂ 作为摩擦组元，可有效提高材料的摩擦因数，改善复合材料的摩擦磨损性能，各组元共同提高复合材料的综合性能^{[18]-[19]}。

图 3 铜基复合材料 Cu-Ni-Si-Cr 基体的能谱面扫描分析结果和 XRD 分析结果，图 3(b)~(d)分别为 Si、Cr、Ni 元素的面分布。Si 元素和 Cr、Ni 元素分布与第二相的分布几乎吻合，证明了第二相析出物的主要成分是 Si、Cr 和 Ni 元素。结合 3(f)的 XRD 分析，基体中存在的相主要是 Cu、Ni₂Si、Cr₃Si 相。Cr₃Si 和 Ni₂Si 粒子与周围产生了共格应变场并与位错发生了交互作用，从而阻碍了位错运动，提高了复合材料的硬度和强度^[20]。

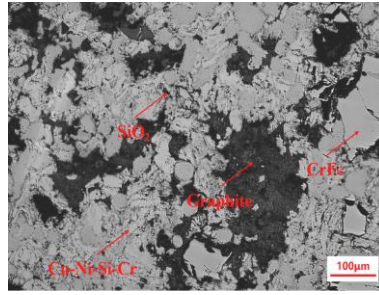


图2 铜基复合材料的组织形貌

Fig. 2 Microscopic morphology and energy spectrum analysis of copper matrix composites

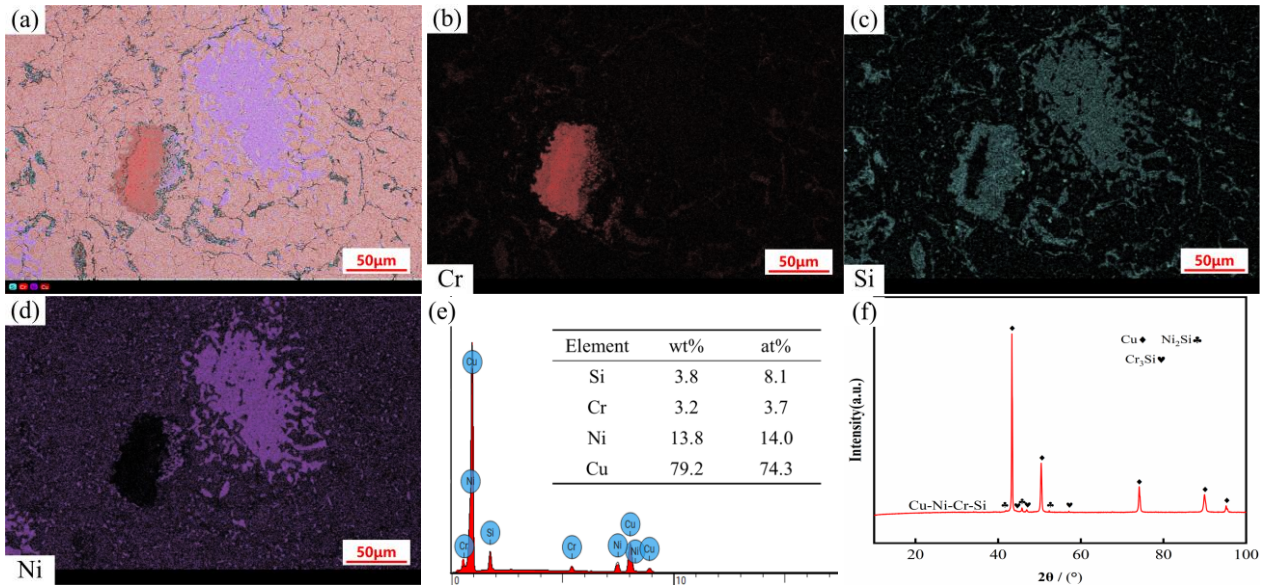


图3 铜基复合材料中 Cu-Ni-Si-Cr 基体的能谱面扫描分析结果和 XRD

Fig. 3 Energy spectral surface scanning analysis results and XRD of Cu-Ni-Si-Cr matrix in Cu matrix composites

3.2 铜基复合材料的力学性能

表 3 为铜基复合材料的硬度和压缩强度的测试结果，硬度和强度最高的为 CA5 试样，其硬度达到 49.90 HBW，压缩强度为 171.98 MPa。适量的 Cr 还能够提高 Cu 与石墨接触面的润湿性，提高金属基体与非金属组元之间的结合强度，改善烧结性能，降低孔隙率^[21]。Ni 进入 Cu 晶格中并替换 Cu，致使 Cu 晶格出现畸变，增加区域的弹性畸变能，使得原子位错运动的阻力加强，提高了材料的硬度和强度。此外，Ni₂Si、Cr₃Si 相强化也是提高复合材料力学性能的关键因素，基体中析出的第二相弥散分布在基体中阻碍位错运动从而强化复合材料，提高复合材料的硬度和压缩强度。

表 3 铜基复合材料的力学性能

Table 3 Mechanical properties of copper matrix composites

试样编号	A	B	C	平均硬度 (HBW)	平均压缩强度 (MPa)
CA1	1	1	1	44.30	138.45
CA2	1	2	2	47.10	148.42
CA3	1	3	3	44.50	138.97
CA4	2	1	2	45.40	163.25
CA5	2	2	3	49.90	171.98

CA6	2	3	1	44.50	148.47
CA7	3	1	3	44.70	135.31
CA8	3	2	1	46.60	159.96
CA9	3	3	2	48.00	161.75

3.3 铜基复合材料的摩擦学性能

(1) 合金元素含量的影响

从表 4 的极差分析可知, $R2 > R1 > R3$, 3 个影响因素按显著程度依次为: Ni、Si、Cr, 最优方案为 A2B2C1。结合 9 组实验中三元素的比例, 摩擦因数最佳的试样编号为 CA5, 即 7.0Ni-1.75Si-0.75Cr。

表 4 摩擦因数的正交实验结果及分析

试样编号	A	B	C	摩擦因数
CA1	1	1	1	0.27103
CA2	1	2	2	0.28347
CA3	1	3	3	0.28540
CA4	2	1	2	0.30161
CA5	2	2	3	0.32364
CA6	2	3	1	0.30998
CA7	3	1	3	0.28120
CA8	3	2	1	0.36183
CA9	3	3	2	0.28131
均值 k_1	0.280	0.285	0.314	
均值 k_2	0.312	0.323	0.280	
均值 k_3	0.308	0.292	0.297	
极差 R	0.032	0.038	0.025	
优方案	A2	B2	C1	

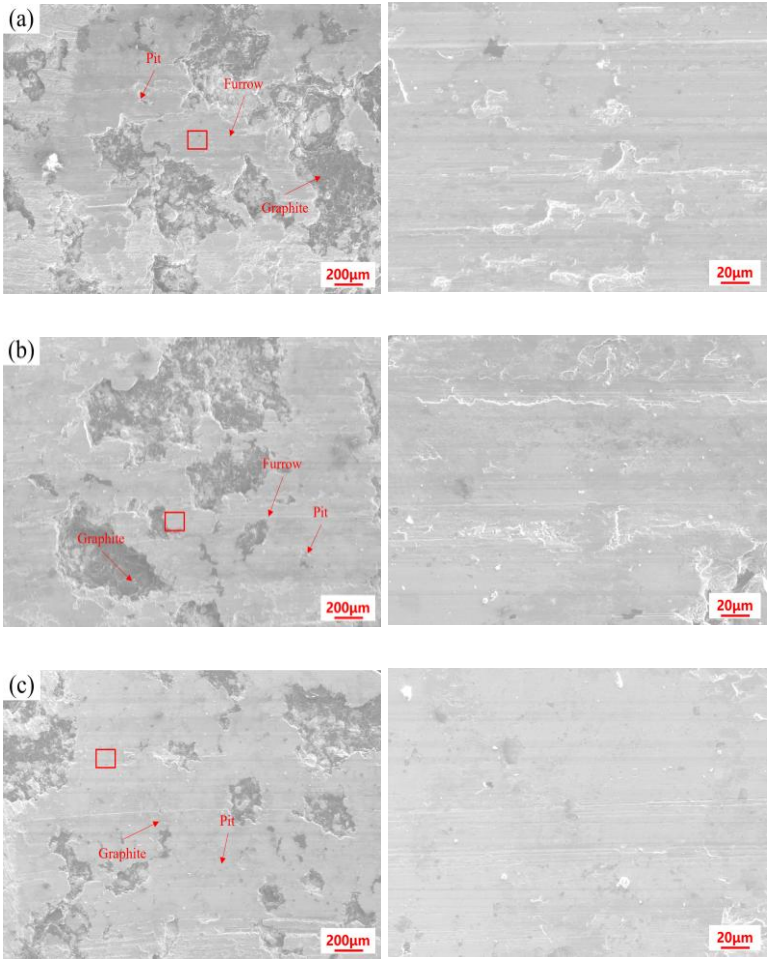
从表 5 的极差分析可知, $R1 > R2 > R3$, 3 个影响因素按显著程度依次为: Ni、Si、Cr, 最优方案为 B2A2C1。结合 9 组实验中三元素的比例, 摩擦损量最低的试样编号为 CA5, 即 7.0Ni-1.75Si-0.75Cr。根据摩擦因数和磨损量的正交实验结果, 试样 CA5 的综合性能最佳。

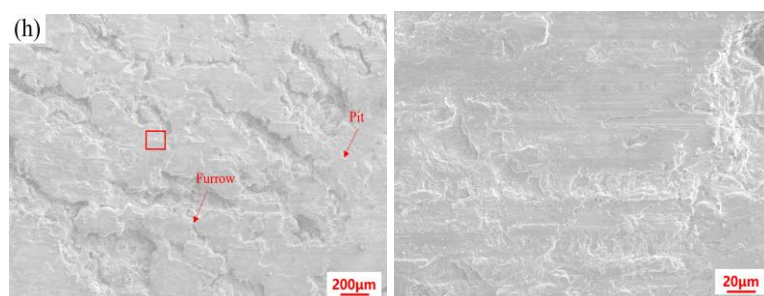
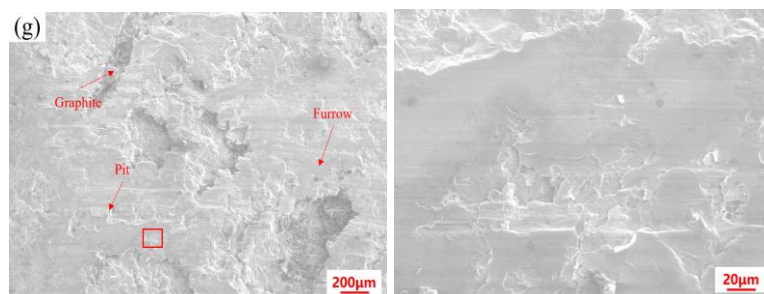
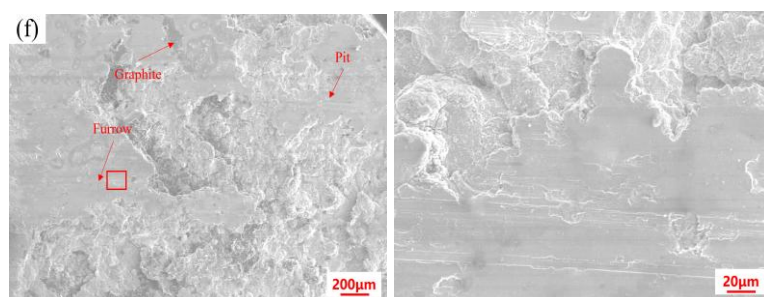
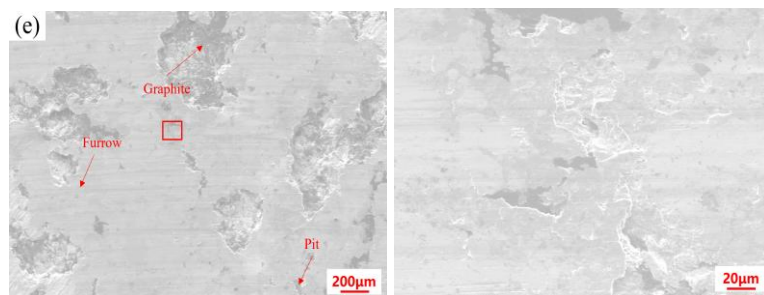
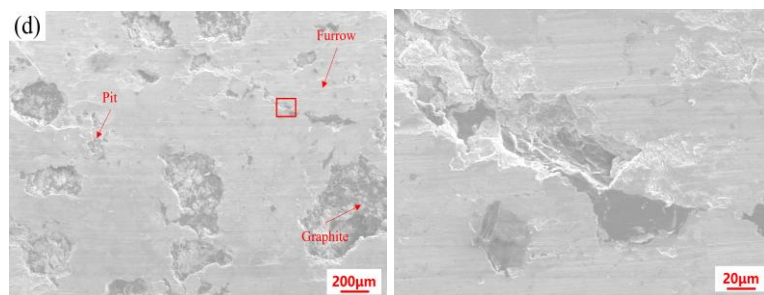
表 5 磨损量的正交实验结果及分析

试样编号	A	B	C	磨损量 / 10^{-3}g
CA1	1	1	1	4.2
CA2	1	2	2	3.6
CA3	1	3	3	6.1
CA4	2	1	2	5.2
CA5	2	2	3	3.1
CA6	2	3	1	4.4
CA7	3	1	3	8.1
CA8	3	2	1	6.8
CA9	3	3	2	7.1

均值 k_1	4.633	5.833	5.133
均值 k_2	4.233	4.500	5.300
均值 k_3	7.333	5.867	5.767
极差 R	3.100	1.367	0.634
优方案	A2	B2	C1

图 4 为各铜基复合材料摩擦表面的 SEM 图像。对于 CA1 与 CA2 试样，摩擦表面出现大量沟槽和剥落坑，这些沟槽深浅不一，有的几乎贯穿整个摩擦面，而剥落坑则是表面被剧烈摩擦的痕迹，粘着磨损使得摩擦表面的材料在相互接触时发生粘结，随后在摩擦力的作用下被撕裂；而磨粒磨损则是由于微凸点在摩擦表面之间滑动，造成表面材料的逐渐磨损，磨损机理主要是以粘着磨损与磨粒磨损为主，如图 4 (a)和(b)所示。CA3~CA5 试样基体中形成的硬质相，摩擦表面形成了相对完整的摩擦膜，在基体软化之后能够承担主要的载荷，降低了粘着磨损，阻碍了磨屑的运动，增加了摩擦表面摩擦膜的覆盖范围，表面上仍然有一些浅而稀疏的沟槽，这种犁沟作用可能是由于摩擦表面之间存在的少量硬质颗粒所造成的，磨损机理主要是磨粒磨损，如图 4 (c)~(e)所示。CA6~CA9 试样的摩擦表面存在宽而深的沟槽，这些沟槽的形状和分布都表明剥层现象在这些试样中显著加剧，还存在大量的剥落坑，硬质颗粒在表面滚动或滑动，造成沟槽的形成，材料摩擦表面在摩擦力的作用下发生层状剥落，磨损机理是磨粒磨损与剥层磨损为主，如图 4 (f)~(i)所示。





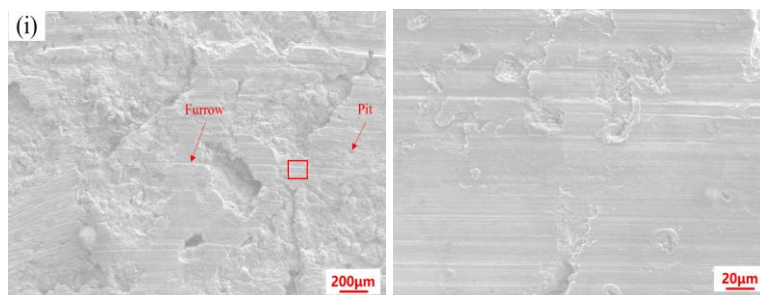


图 4 不同铜基复合材料摩擦表面的 SEM

Fig. 4 SEM of friction surfaces of different copper matrix composites

(2) 温度的影响

图 5 为 CA5 试样在不同温度下的摩擦因数和磨损量。CA5 试样为以 Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr 为基体的铜基复合材料，摩擦因数随着温度的提高而先增加后降低，磨损量随着温度的升高而不断增加。从 25 °C 升高至 450 °C 时，随着温度的提升，耐高温的第二相使得铜基复合材料在高温下保持了优异的机械性能和稳定性，降低了热变形或热疲劳的风险，有效地削弱了纯铜在高温下的软化趋势，有利于增强铜基复合材料在高温下的结构强度，从而提高了铜基复合材料的摩擦因数。当温度提升至 650 °C 时，摩擦因数略低于 450 °C 的情况，这一现象可归因于更高温度下粘合点的剪切抗力减弱。同时，由于铜的软化效应的加剧，其承载能力下降。此外，CrFe 颗粒在高温作用下更易发生破碎与脱落，导致铜基材料表面的 CrFe 颗粒含量降低，从而减弱了其对摩擦副的切削作用。氧化膜的稳定性和平滑性得到增强，进而降低了表面粗糙度，最终导致摩擦因数的降低。随着温度的不断提高，复合材料的强度和硬度降低，使得材料表面更容易被磨损。高温还会导致材料表面发生氧化反应，这些反应产物会作为磨粒参与磨损过程，从而增加了磨损量。

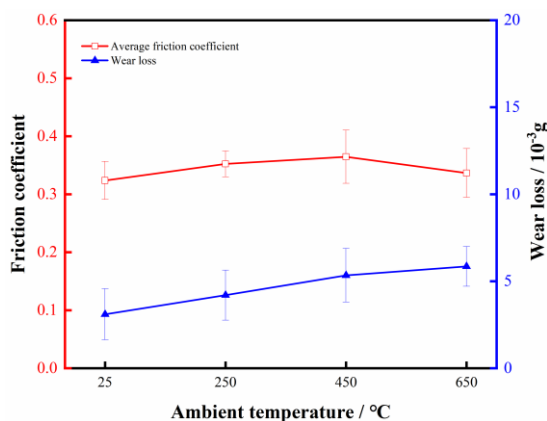


图 5 CA5 试样在不同温度下的摩擦因数和磨损量

Fig. 5 Friction factor and wear of CA5 specimens at different temperatures

图 6 为 CA5 试样在不同温度下摩擦表面的 SEM 图像。在 25 °C 下，摩擦表面相对平整，剥落坑较少，仅有少量浅浅的沟槽，磨损机理主要是磨粒磨损，如图 6 (a)所示。在 250 °C 下，摩擦表面粗糙程度明显增加，摩擦表面出现较深较多的沟槽，剥落坑面积较大，磨损机理主要是以粘着磨损与磨粒磨损为主，如图 6 (b)所示。在 450 °C 下，大量的热能促进材料的表面软化和氧化，温度超过 400 °C 时石墨颗粒逐渐被氧化^[22]，摩擦表面的沟槽更宽更深，剥层现象加剧，磨损量增大，其磨损机理主要以氧化磨损和剥层磨损为主，如图 6 (c)所示。当温度提高至 650 °C 时，摩擦表面整体平整，有较少的沟槽，存在较多坑，

摩擦因数降低，但高温下的石墨氧化加剧，磨损量增加，磨损机理主要以氧化磨损和磨粒磨损为主，如图 6 (d)所示。

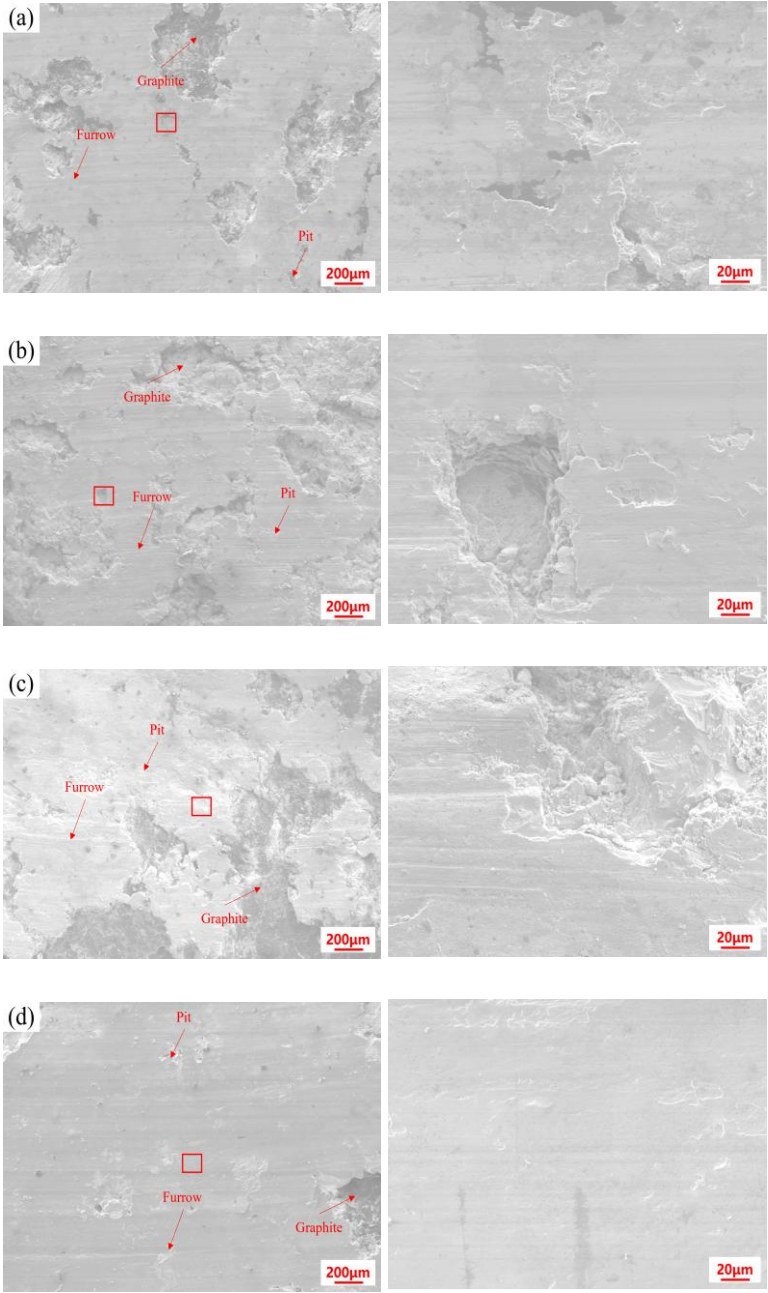


图 6 CA5 试样在不同温度下摩擦表面的 SEM

Fig. 6 SEM of friction surface of CA5 specimen at different temperatures

4 结论

- (1) 本文通过正交实验法，系统地研究了不同比例的 Cu-Ni-Si-Cr 合金对铜基复合材料性能的影响。结果表明，当以 Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr 合金为基体时，铜基复合材料硬度和压缩强度最高，分别达到了 49.9 HBW 和 171.98 MPa。
- (2) 根据对各铜基复合材料摩擦因数和磨损量正交实验结果分析，以 Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr 合金为基体的铜基复合材料的摩擦学性能最佳。在 25~650 °C条件下，随着温度的升高，复合材料的摩擦因数呈

现先增加后减小的趋势，而磨损量则持续增加。在 450 °C下，铜基复合材料的摩擦因数最高，磨损机理由磨粒磨损向氧化磨损和磨粒磨损转变。

参考文献

- [1] MA X, LUAN C, FAN S, et al. Comparison of braking behaviors between iron-and copper-based powder metallurgy brake pads that used for C/C–SiC disc[J]. Tribology International, 2021, 154: 106686.
- [2] JAYASHREE P, MENAPACE C, TURANI S, et al. Dry sliding behavior of copper based composite materials prepared using conventional compaction and sintering technique and spark plasma sintering[J]. Wear, 2022, 490: 204-209.
- [3] CHE F, LI Z, LUO Y, et al. Braking behaviors of Cu-based PM brake pads mating with C/C–SiC and 30CrMnSi steel discs under high-energy braking[J]. Wear, 2021, 486: 204019.
- [4] 刘思涵, 耿雪骞, 王晔等. Cu 基粉末冶金闸片高速制动性能[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(03): 210-217.
LIU X H, GENG X, WANG Y, et al. High-speed braking performance of Cu-based powder metallurgy brake pads[J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(03): 210-217.
- [5] CHENG Y, XIAO Y L, DU J, et al. Size effect of CrFe particles on tribological behavior and airborne particle emissions of copper metal matrix composites[J]. Tribology International, 2023, 183: 108376.
- [6] 刘英凯, 郝文龙, 刘建刚, 等. Ti₃SiC₂替代石墨对铜基粉末冶金摩擦材料性能的影响[J]. 润滑与密封, 2023, 48(06): 61-65.
LIU Y K, HAO W L, LIU J G, et al. Effect of Ti₃SiC₂ on the performance of copper-based powder metallurgy friction materials by replacing graphite[J]. Lubrication and Sealing, 2023, 48(06): 61-65.
- [7] LI C, FENG X M, SHEN Y F, et al. Preparation of Al₂O₃/TiO₂ particlere inforced copper through plasma spraying and friction stir processing[J]. Materials & Design, 2016, 90: 922.
- [8] BAGHERI G A. The effect of reinforcement percentages on properties of copper matrix composites reinforced with TiC particles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 676: 120.
- [9] 鲍瑞, 李兆杰, 易健宏, 等. 粉末冶金制备高导热铜基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(05): 1-11.
BAO R, LI Z J, YI J H, et al. Research progress on the preparation of high thermal conductivity copper matrix composites by powder metallurgy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(05): 1-11.
- [10] 魏东彬, 章林, 张鹏, 等. 铜铁预铜合金粉末对铜基复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2022, 40(01): 4-12.
WEI D B, ZHANG L, ZHANG P, et al. Influence of Copper-Iron Prealloyed Powder on Friction and Wear Performance of Copper-Based Friction Materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(01): 4-12.
- [11] Zhao X, Guo L, Zhang L, et al. Influence of nano-Al₂O₃-reinforced oxide-dispersion-strengthened Cu on the mechanical and tribological properties of Cu-based composites[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016, 23: 1444-1451.
- [12] ZHANG P, ZHANG L, WEI D, et al. Effect of matrix alloying on braking performance of copper-based brake pad under continuous emergency braking[J]. Journal of Tribology, 2020, 142(8): 081703.
- [13] 刘建秀, 尼炯, 樊江磊, 等. Ni 含量对铜基粉末冶金材料摩擦性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(04): 507-511.

- LIU J X, NI J, FAN J L, et al. Influence of Ni content on the friction properties of copper-based powder metallurgy materials[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2024, 44(04): 507-511.
- [14] 符蓉, 房顺利, 高飞, 等. 铬对铜基粉末冶金材料摩擦磨损性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2013, 38(10): 15-20.
- FU R, FANG S L, GAO F, et al. Effect of chromium on the friction and wear performance of copper-based powder metallurgical materials[J]. *Lubrication and Sealing*, 2013, 38(10): 15-20.
- [15] 文国富, 何锐, 王秀飞, 等. 基体强化元素对铜基粉末冶金摩擦材料显微结构及性能的影响[J]. *粉末冶金工业*, 2020, 30(05): 45-50.
- WEN G F, HE R, WANG X F, et al. Influence of matrix reinforcing elements on the microstructure and properties of copper-based powder metallurgy friction materials[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2020, 30(05): 45-50.
- [16] 雷前, 杨一海, 肖柱, 等. 高强高导高耐热铜合金的研究进展与展望[J]. *材料导报*, 2021, 35(15): 15153-15161.
- LEI Q, YANG Y H, XIAO Z, et al. Research progress and prospect of high-strength, high-conductivity and high-heat-resistant copper alloys[J]. *Materials Herald*, 2021, 35(15): 15153-15161.
- [17] RDZAWSKI Z, STOBRAWA J. The thermomechanical processing of Cu-Ni-Si-Cr-Mg alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 1993, 9.2: 142-150.
- [18] ZHOU H B, Yao P P, Xiao Y L, et al. Friction and wear maps of copper metal matrix composites with different iron volume content[J]. *Tribology International*, 2019, 132: 199-210.
- [19] ZHANG P, ZHANG L, WEI D, et al. Effect of graphite type on the contact plateaus and friction properties of copper-based friction material for high-speed railway train[J]. *Wear*, 2019, 432-433: 202927.
- [20] 夏小维, 吴杰峰, 沈旭. 热处理对 Cu-Ni-Cr-Si 合金性能提升的机理研究[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(02): 35-40.
- XIA X W, WU J F, SHEN X. Mechanism study on the property enhancement of Cu-Ni-Cr-Si alloy by heat treatment[J]. *Thermal Processing Technology*, 2024, 53(02): 35-40.
- [21] 王文芳, 李灿民, 吴玉程等. 石墨/铜铬自润滑复合材料的制备和性能[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(22): 72-73+77.
- WANG W F, LI C M, WU Y C, et al. Preparation and properties of graphite/copper-chromium self-lubricating composites[J]. *Thermal Processing Technology*, 2010, 39(22): 72-73+77.
- [22] XIAO Y L, CHENG Y, SHEN M, et al. Friction and wear behavior of copper metal matrix composites at temperatures up to 800 °C[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19: 2050-2062.