文章编号:1005-0523(2024)06-0099-07

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,江西 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,江西 南昌 330013; 3. 广东科技学院机电工程学院,广东 东莞 523808)

摘要:【目的】开发高性能铜基复合摩擦材料,以满足高铁提速后的制动系统要求。**【方法】**制备Cu-Ni-Si-Cr合金为基体的铜基复合材料,采用正交实验法探究合金中Ni,Si,Cr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。**【结果】**结果显示:以Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr为基体的铜基复合材料硬度和强度最高,分别为49.90 HBW和171.98 MPa;摩擦系数和磨损量综合性能最佳。在25~650 ℃条件下,随着温度的提高,摩擦系数先增加后减小,磨损量不断增加,在450 ℃下,铜基复合材料的摩擦系数最高,磨损机理由磨粒磨损向氧化磨损和磨粒磨损转变。**【结论】**通过正交实验法得到最优元素配比的铜基复合摩擦材料,对有效提升其高温摩擦性能具有重要意义。

关键词:正交实验法;基体合金化;摩擦系数;磨损量;磨损表面

中图分类号:U270.35;TF125　　**文献标志码:**A

本文引用格式:赵龙志,马现军,李根,等. Cu-Ni-Si-Cr铜基复合摩擦材料合金元素正交优化研究[J]. 华东交通大学学报,2024,41(6):99-105.

Orthogonal Optimization Study of Cu-Ni-Si-Cr Alloy Elements in Copper Composite Friction Materials

Zhao Longzhi[1,2], Ma Xianjun[1,3], Li Gen[1], Li Wenjia[1], Zhao Mingjuan[1]

(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. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Science & Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract:【Objective】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. **【Method】**The orthogonal experimental method was used to study the copper matrix composites with Cu-Ni-Si-Cr alloys as the matrix systematically, 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. **【Result】**The hardness and strength of the copper 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 copper 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

收稿日期:2024-04-17

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(GJJ 210661);江西省研究生创新专项基金(YC2022-S567);广东科技学院自然科学项目(GKY-2024KYQNK-11)

under the condition of 25~650 ℃, and the amount of wear increases, and the highest friction coefficient of copper matrix composites is found at 450 ℃. The wear mechanism changes from abrasive wear to oxidative wear and abrasive wear.【**Conclusion**】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

Citation format: ZHAO L Z, MA X J, LI G, et al. Orthogonal optimization study of Cu-Ni-Si-Cr alloy elements in copper composite friction materials[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 99−105.

【**研究意义**】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系数等特性，在风电、高铁、航天、航空机械离合器等的制动场景得到广泛应用[1]。高速列车运行速度持续提升，制动材料所承受的热负荷亦随之增加。列车高速化对铜基复合材料在高温下的力学性能、耐磨性及摩擦系数的稳定性提出了更高的要求[2]。

【**研究进展**】在高温制动摩擦过程中，铜基复合材料的软化是导致其摩擦系数不稳定的关键因素。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。合金化是高温条件下合金元素在基体中通过溶解扩散，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，还优化了其摩擦学特性[3]。魏东彬等[4]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。Zhao等[5]发现纳米Al_2O_3颗粒弥散强化的铜基复合材料，表现出较高的摩擦系数及稳定性，尽管硬质颗粒的脱落可能导致磨损增加。Zhang等[6]的研究表明，向铜基复合材料中添加镍能够提高其连续紧急制动性能，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。刘建秀等[7-8]通过添加镍、铬元素，并通过固溶强化机制作用于基体，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，增加了摩擦系数的稳定性，并降低了磨损率。文国富等[9]指出，镍在基体强化效果上优于铬，能有效降低摩擦系数和磨损率。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、高耐热性和优异的耐高温软化能力[10]。Yang等[11]系统比较CuNiSi与Cu-NiSiCr合金发现由于Cr_3Si相的生成使CuNiSiCr合金出现更显著的晶粒细化，增强了其结构稳定性。

【**创新特色**】上述研究多关注单一或少量元素对铜基体的影响，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。【**关键问题**】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，对铜基复合摩擦材料的实际应用，提供理论依据。

1 实验材料和方法

1.1 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，以摩擦系数和磨损量作为指标，采用$L_9(3^3)$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（质量分数/%）

Tab.1 Orthogonal experimental design table (mass fraction/%)

Level	Experimental factors		
	A	B	C
	Ni	Si	Cr
1	6.0	1.25	0.25
2	7.0	1.75	0.50
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，转速为

350 r/min，时间为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，保压30 s后进行高温高压烧结，烧结温度为1 000 ℃，压力为5.9 MPa，保温时间为5 h，然后随炉冷却后取出。

表2　铜基复合材料成分组成（质量分数/%）
Tab.2　Composition of copper matrix composites (mass fraction/%)

FeCu30	CrFe	Graphite	MoS_2	SiO_2	Cu-Ni-Cr-Si alloy
29	9	11	1.5	1.5	48

1.2　实验方法

使用MPT-3G型国产高温摩擦试验机进行系统的摩擦学实验研究，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24CrNiMo合金钢圆盘。预磨试验后（压力20 N，转速400 r/min，磨合5 min），通过精确的温度控制系统，将试样和摩擦副加热至预定温度，随后进行摩擦磨损试验，时间为20 min，摩擦系数由试验机导出数据计算得出，磨损量由试验前后多次称重求质量差平均值。

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。金相显微镜（Zeiss Axio Vert.A1）观察材料的组织形貌；X衍射仪射线（XRD；XRD-6100，Shimadzu，Japan）对材料表面进行物相分析；扫描电子显微镜（SU8010，Japan）分析材料表面的摩擦形貌。

2　结果与讨论

2.1　铜基复合材料的组织形貌

图1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。不规则的大块黑色组织是团聚后的石墨，为润滑组元，作用为有效减少材料的磨损。浅灰色的CrFe和黑色有规则形状的SiO_2作为摩擦组元，可有效提高材料的摩擦系数，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。

图2为铜基复合材料Cu-Ni-Si-Cr基体的能谱面扫描分析结果和XRD分析结果，图2(b)~图2(d)

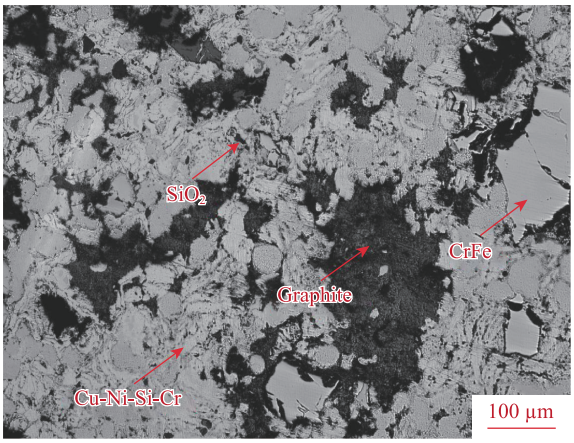

图1　铜基复合材料的组织形貌
Fig. 1　Microscopic morphology of copper matrix composites

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。结合图2(f)的XRD分析，基体中存在的相主要是Cu，Ni_2Si，Cr_3Si相。Cr_3Si和Ni_2Si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[12]。

2.2　铜基复合材料的力学性能

表3为铜基复合材料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[12]。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，Ni_2Si，Cr_3Si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。

2.3　铜基复合材料的摩擦学性能

2.3.1　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3个元素的比例，摩擦系数最佳的试样为CA5，即7.0Ni-1.75Si-0.75Cr。

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3个元素的比例，摩损量

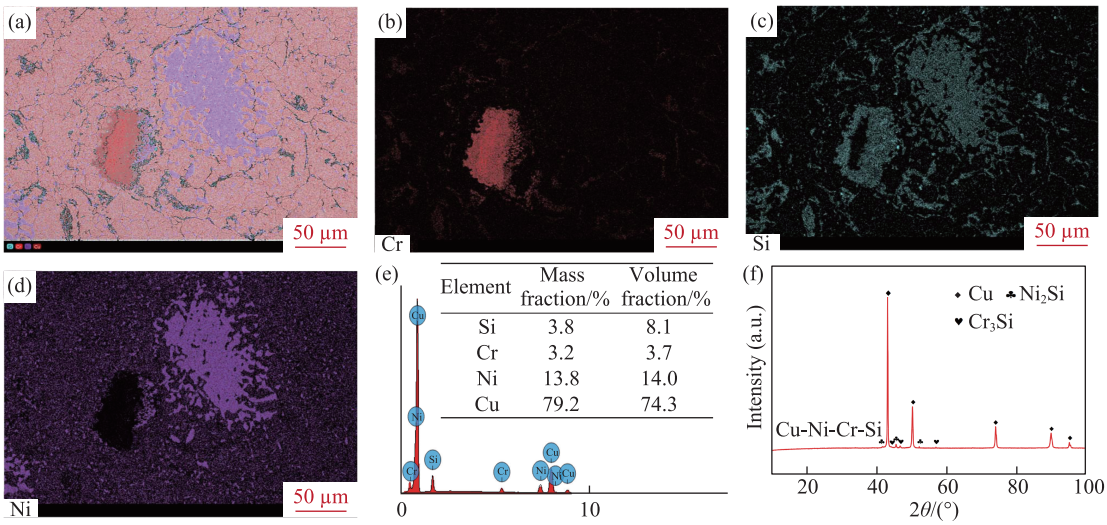

图2 铜基复合材料中Cu-Ni-Si-Cr基体的能谱面扫描分析结果和XRD

Fig. 2 Energy spectral surface scanning analysis results and XRD of Cu-Ni-Si-Cr matrix in copper matrix composites

表3 铜基复合材料的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of copper matrix composites

Sample	A	B	C	Hardness/HBW	Compressive strength/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

表4 摩擦系数的正交实验结果及分析

Tab.4 Orthogonal test results and friction factor analysis

Sample	A	B	C	Coefficient of friction
CA1	1	1	1	0.271 03
CA2	1	2	2	0.283 47
CA3	1	3	3	0.285 40
CA4	2	1	2	0.301 61
CA5	2	2	3	0.323 64
CA6	2	3	1	0.309 98
CA7	3	1	3	0.281 20
CA8	3	2	1	0.361 83
CA9	3	3	2	0.281 31
Mean value k_1	0.280	0.285	0.314	
Mean value k_2	0.312	0.323	0.280	
Mean value k_3	0.308	0.292	0.297	
Range R	0.032	0.038	0.025	
Optimized solution	A2	B2	C1	

表5 磨损量的正交实验结果及分析

Tab.5 Orthogonal test results and wear loss analysis

Sample	A	B	C	Wear loss/ 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
Mean value k_1	4.633	5.833	5.133	
Mean value k_2	4.233	4.500	5.300	
Mean value k_3	7.333	5.867	5.767	
Range R	3.100	1.367	0.634	
Optimized solution	A2	B2	C1	

最低的为CA5试样，即7.0Ni-1.75Si-0.75Cr。根据摩擦系数和磨损量的正交实验结果，试样CA5的综合性能最佳。

图3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留下的痕迹，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

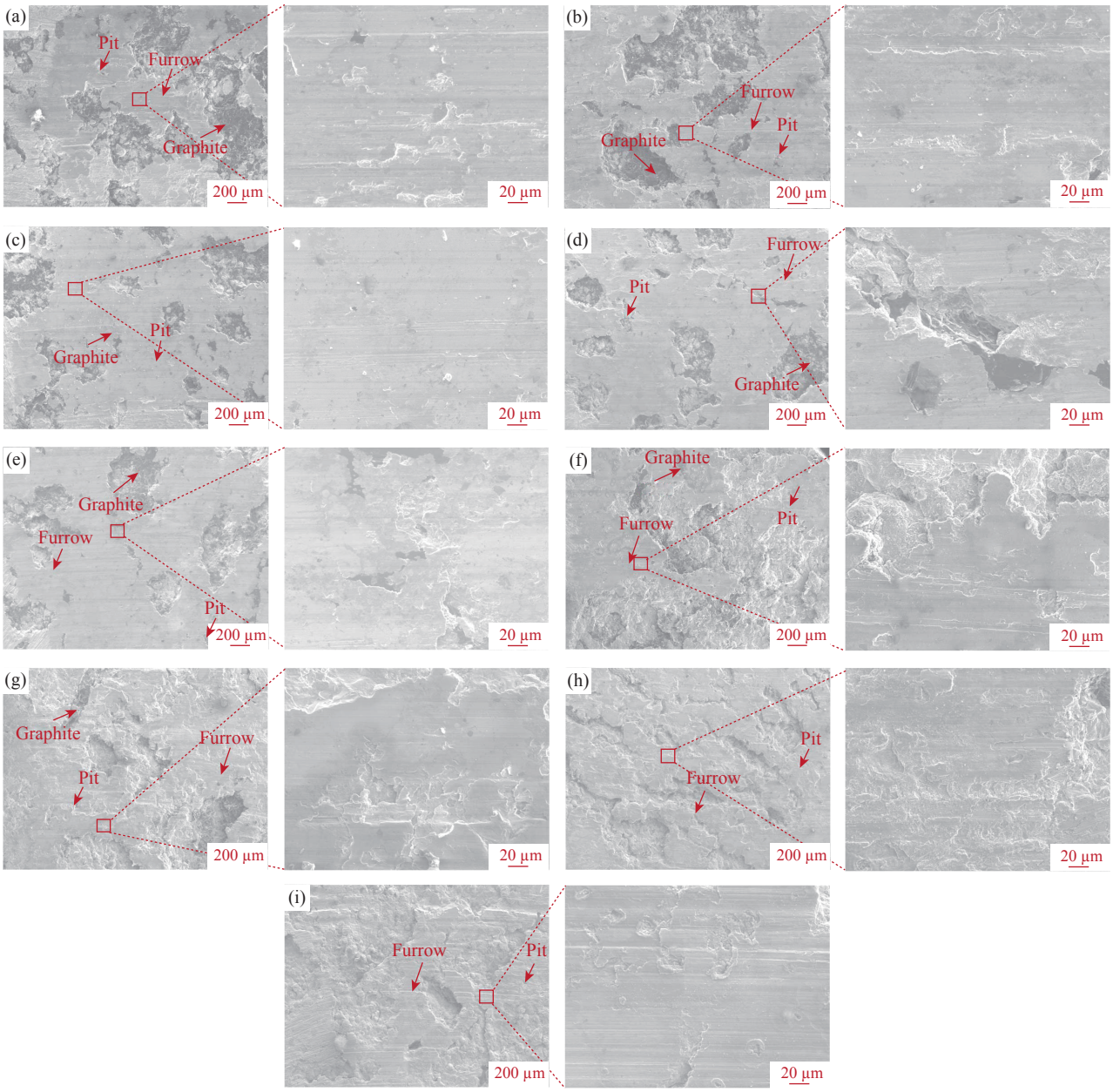

图3　不同铜基复合材料摩擦表面的SEM

Fig. 3　SEM of friction surfaces of different copper matrix composites

的逐渐磨损，磨损机理以粘着磨损与磨粒磨损为主，如图3(a)和图3(b)所示。CA3~CA5试样基体中形成硬质相，摩擦表面形成了相对完整的摩擦膜，在基体软化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，这种犁沟可能是由于摩擦表面之间存在的少量硬质颗粒造成的，磨损机理主要为磨粒磨损，如图3(c)~图3(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，导致沟槽的形成，材料摩擦表面在摩擦力的作用下发生层状剥落，磨损机理以磨粒磨损与剥层磨损为主，如图3(f)~图3(i)所示。

2.3.2　温度的影响

CA5试样在不同温度下的摩擦系数和磨损量见图4。CA5试样为以Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr为基体的铜基复合材料，摩擦系数随着温度的升高先增加后降低，磨损量随着温度的升高而不断增加。从25 ℃升高至450 ℃时，随着温度的提升，耐高温的

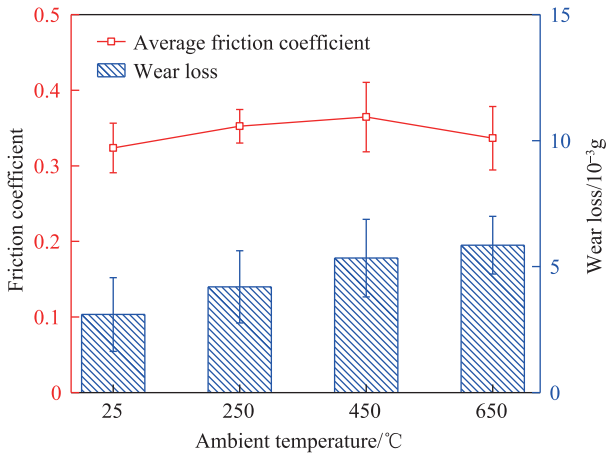

图4 CA5试样在不同温度下的摩擦系数和磨损量

Fig. 4 Friction factor and wear loss of CA5 specimens at different temperatures

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，有效地削弱了基体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，从而提高铜基复合材料的摩擦系数。当温度提升至650 ℃时，摩擦系数较450 ℃时略有降低，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，最终导致摩擦系数的降低。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磨损。高温还会导致材料表面发生氧化，这些氧化产物会作为磨粒参与磨损过程，从而增加磨损量。

图5为CA5试样在不同温度下摩擦表面的SEM图像。在25 ℃下，摩擦表面相对平整，剥落坑较少，仅有少量浅浅的沟槽，磨损机理主要为磨粒磨损，如图5(a)所示。在250 ℃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，磨损机理以粘着磨损与磨粒磨损为主，如图5(b)所示。在450 ℃下，大量的热促进材料的表面软化和氧化，温度超过400 ℃时石墨颗粒逐渐被氧化，摩擦表面的沟槽更宽更深，剥层现象加剧，磨损量增大，其磨损机理以氧化磨损和剥层磨损为主，如图5(c)所示。当温度升高至650 ℃时，摩擦表面整体平整，有较少的沟槽，存在较多坑，摩擦系数降低，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5(d)所示。

3 结论

1）本文通过正交实验法，系统地研究了不同配比的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系数和磨损量正交实验结果分析，以Cu-7Ni-1.75Si-0.75Cr合金为

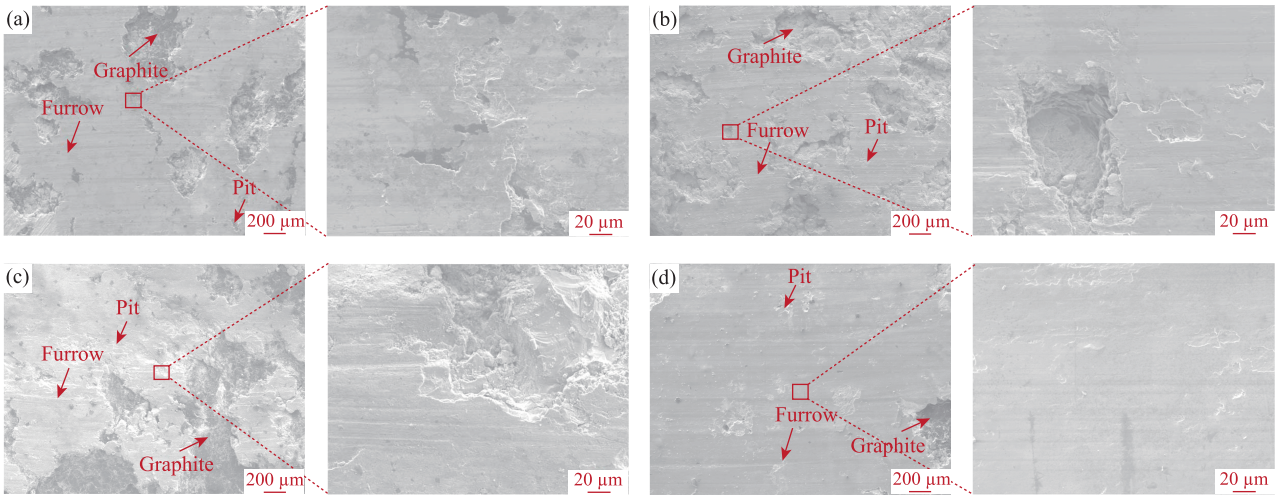

图5 CA5试样在不同温度下摩擦表面的SEM

Fig. 5 SEM of friction surface of CA5 specimen at different temperatures

基体的铜基复合材料的摩擦学性能最佳。在25~650 ℃条件下，随着温度的升高，复合材料的摩擦系数呈现先增加后减小的趋势，而磨损量则持续增加。在450 ℃下，铜基复合材料的摩擦系数最高，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] 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.

[2] 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(3): 210-217.
LIU S H, GENG X Q, WANG Y, et al. High-speed braking properties of Cu-based powder metallurgy brake pads [J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(3): 210-217.

[3] 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(5): 1-11.
BAO R, LI Z J, YI J H, et al. Research progress in preparation of high thermal conductivity copper matrix composites by powder metallurgy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2022, 32(5): 1-11.

[4] 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(1): 4-12.
WEI D B, ZHANG L, ZHANG P, et al. Effect of Cu–Fe pre-alloyed powders on the friction and wear properties of Cu-based friction materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2022, 40(1): 4-12.

[5] ZHAO X, GUO L, ZHANG L, et al. Influence of nano-Al_2O_3-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.

[6] 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.

[7] 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(4): 507-511.
LIU J X，NI J，FAN J L，et al. Effects of Ni content on tribological properties of Cu-based powder metallurgy Materials[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys，2024, 44(4):507-511.

[8] 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. Effects of cr content on friction and wear properties of copper matrix frictional materials[J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(10): 15-20.

[9] 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(5): 45-50.
WEN G F, HE R, WANG X F, et al. Effect of matrix strengthening elements on microstructure and properties of Cu matrix powder metallurgy friction materials[J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(5): 45-50.

[10] 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 resistance copper alloys[J]. Materials Reports, 2021, 35(15): 15153-15161.

[11] YANG Z Y, WU Y K, ZHOU L, et al. Effects of micron-sized Cr_3Si particles on microstructure and properties of CuNiSiCr alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 34: 2273-2284.

[12] 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(2): 35-40.
XIA X W, WU J F, SHEN X. Study on mechanism of alloys properties improvement of Cu-Ni-Cr-Si by heat treatment[J]. Hot Working Technology，2024, 53(2): 35-40.

通信作者：赵龙志（1977—），男，教授，博士，博士生导师，研究方向为金属复合材料。E-mail: zhaolongzhi@163.com。

（责任编辑：龚凯，吴海燕）