

环境温度和载荷对 CuNi6Sn6 合金摩擦磨损性能的影响

徐少男, 张 立, 李兴忠, 薛 晏

(山西大同大学 机电工程学院, 山西 大同 037003)

摘要: 为研究 CuNi6Sn6 合金在高温高载工况下的摩擦磨损性能, 采用 MMU-10G 端面摩擦磨损试验机对 CuNi6Sn6 合金进行摩擦磨损试验, 使用 LEXT OLS5000 3D 激光扫描共聚焦显微镜检测磨损后的表面形貌并分析磨损机理。结果表明: 该合金在载荷为 45 N 的工况下, 摩擦系数随环境温度的升高先增后减。在载荷为 75 N 的工况下, 当环境温度小于 150 °C 时摩擦系数稳定; 当环境温度为 200 °C 时摩擦系数波动剧烈。在载荷为 105 N 的工况下, 当环境温度小于 100 °C 时摩擦系数稳定; 当环境温度小于 150 °C 时磨损质量随着载荷的增大而增大; 当环境温度为 200 °C 时, 磨损质量较大。环境温度较低时, 通常表现为磨粒磨损, 当载荷增大, 磨损以疲劳点蚀及剥层磨损的形式出现; 在高温低载工况下, 以黏着磨损为主; 在高温高载工况下, 出现严重塑性变形及表面烧伤; 当环境温度大于 150 °C 时, 磨损程度加剧。因此, CuNi6Sn6 合金适用于环境温度低于 150 °C、载荷低于 75 N 的工况。

关键词: CuNi6Sn6 合金; 环境温度; 摩擦系数; 磨损机理

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.015

中图分类号: TH117; TB331 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0126-07

铜合金具有比纯铜更优异的导电性、导热性、耐腐蚀性和耐磨性, 因此被广泛应用于电子、电气、通信等领域。又因其具有良好的强度和延展性, 在大型军用发动机及航天、航空、航海发动机等领域也得到广泛应用^[1-3]。随着装备性能要求不断提高, 发动机、电动机等原动机性能向集成化、智能化方向发展, 这就对原材料的摩擦磨损性能提出了更高的要求^[4], 例如在高温高载、贫油润滑等工况下要有良好的耐磨性。摩擦幅因相对运动造成摩擦发热, 从两方面影响其磨损特性: 其一, 摩擦面温度上升导致润滑油黏度下降; 其二, 局部温度升高改变材料表面的摩擦磨损性能。CuNi6Sn6 合金常用于军用发动机的连杆衬套处, 但其摩擦磨损性能有待提高。樊文欣等^[5]研究表明, 降低 Ni 元素含量可改善铜镍锡合金的摩擦磨损性能。徐少男等^[6-7]研究了经过渗碳处理的对磨材料对铜镍锡材料磨损性能的影响, 以及铜镍锡材料干摩擦滑动磨损行为, 但是均没有考虑到环境温度和载荷双重作用下的摩擦磨损性能。

关于铜基材料的摩擦磨损问题, 已有大量相关研究。为了满足更苛刻的工况, 相关学者进行了表

面处理、复合添加剂等方面的研究^[8-15], 以提高铜基材料的摩擦磨损性能。李波等^[16]研究了 20Cr13 不锈钢高温微动摩擦磨损特性, 结果表明高温促使微动滑移区界面松散的磨屑形成特殊的“黏质层”, 虽能缓解不锈钢材料磨损, 但对上磨副的磨粒磨损与黏着磨损不能忽视。潘盈卓等^[17]研究了高温环境下 Si3N4 陶瓷与 M50 钢的球-盘配副以及润滑油量对摩擦学行为的影响, 研究表明, Si3N4(球)-M50(盘)配副在高温润滑情况下会在 M50 钢盘表面生成含磷反应膜, 能起到保护金属表面的作用。Cai 等^[18]研究了不同磨损试验参数对铜镍锡合金晶体结构和结构转变的潜在影响。Sathishkumar 等^[19]研究了热处理对铜镍锡合金的摩擦磨损性能。但由于高温高载工况日益增多, 相关研究缺乏, 因此本研究就环境温度和载荷对 CuNi6Sn6 合金摩擦磨损性能的影响进行探讨, 以填补相关空白, 为实际应用提供理论依据。

1 试 验

1.1 试验材料与试样制备

CuNi6Sn6 合金常用于制备大功率柴油发动机连杆衬套, 需耐受高温工况。为此, 本试验以

收稿日期: 2025-12-11; 修订日期: 2026-04-28

基金项目: 山西省基础研究计划(202403021212110)

作者简介: 徐少男(1997—), 男, 山西大同人, 硕士, 助理实验师, 研究方向: 铜合金材料的摩擦磨损, E-mail: 2445262185@qq.com;

通信作者: 张立, 副教授, E-mail: zhangli@sxdtdx.edu.cn

CuNi6Sn6 合金为试验材料, 其成分见表 1。

采用电火花加工方式在 CuNi6Sn6 合金棒料上加工成图 1(a) 所示的圆柱销($\Phi 4.8\text{ mm} \times 12.7\text{ mm}$)。

将对磨材料(12CrNi3A)加工成外径 54 mm、内径 38 mm, 厚 10 mm 的圆环, 如图 1(b) 所示。圆柱销和对磨圆环实物如图 1(c) 所示。

表 1 铜镍锡合金元素的含量

成分	Cu	Ni	Sn	Si	Sc	Mn	Fe	Zn
CuNi6Sn6	Bal.	5.45~6.72	5.38~6.51	1.19	0.356	0.11	0.105	0.153

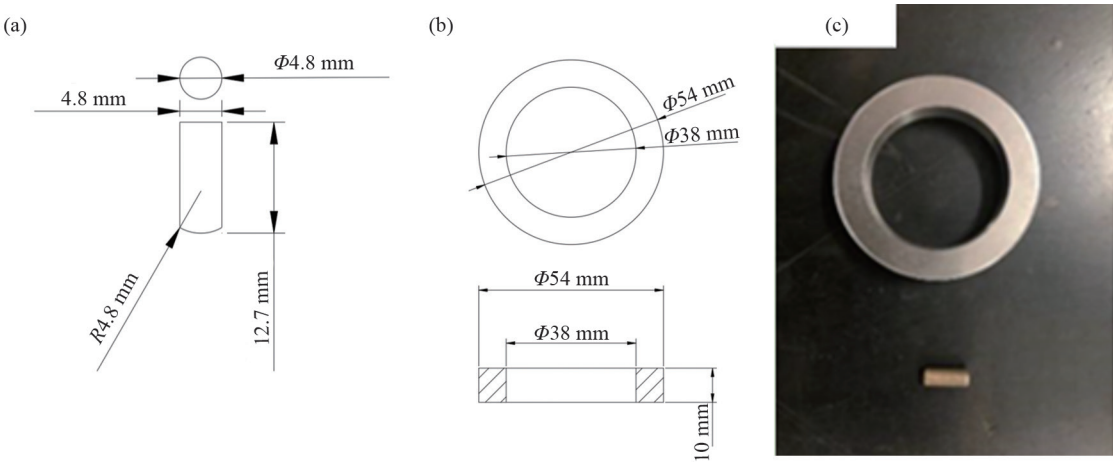


图 1 试样(a)圆柱销、(b)对磨圆环尺寸图与(c)二者实物图

Fig. 1 Dimensional drawing of (a) cylindrical pin, (b) counter-grinding ring and (c) Physical image of both

1.2 试验方法

采用 MMU-10G 摩擦磨损试验机进行磨损试验。试验前后, 分别用精度为 0.1 mg 的电子秤多次测量磨损试样的质量, 取其平均值; 采用 LEXT OLS5000 3D 激光扫描共聚焦扫描显微镜检测摩擦磨损后的表面形貌特征, 可获得磨损表面的三维形貌。摩擦磨损试验参数依据 GB/T35083.1—2018《滑动轴承材料摩擦学特性试验第一部分: 金属轴承材料试验》和 MMU-10G 微机控制温度端面摩擦磨损试验机的参数设定, 具体参数见表 2。为保证试验条件的一致性, 在试验前对所有试样进行超声波清洗、

干燥和保存, 以排除表面污染对摩擦磨损结果的影响。在试验过程中, 使用微动移液器在对磨圆环上先滴加 2 μL 牌号为 0W-20 的润滑油(模拟边界润滑条件), 再预磨 30 s 以模拟摩擦副磨合阶段, 然后按试验条件进行试验。

2 结果与讨论

2.1 摩擦学性能

CuNi6Sn6 合金的摩擦系数在不同载荷、不同环境温度下的变化过程如图 2 所示。由图 2(a) 可知, 在载荷为 45 N 时, 环境温度为 50、100 $^{\circ}\text{C}$ 时, CuNi6Sn6 合金的摩擦系数在整个磨损过程中保持稳定; 当环境温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ 时, 在磨损前 15 min, 摩擦系数缓慢增大, 材料在环境温度与摩擦升温双重作用下, 表面微凸体发生剪切断裂, 此时出现了较小的摩擦系数; 在 15 min 到 43 min 期间, 摩擦系数突然增大且波动较大。当环境温度为 200 $^{\circ}\text{C}$ 时, 在磨损前 8 min, 摩擦系数急剧上升; 8 min 之后摩擦系数较大, 最后稳定在 0.8 ± 0.1 范围内。

表 2 摩擦磨损试验参数

试验因素	取值
载荷	45、75、105 N
温度	50、100、150、200 $^{\circ}\text{C}$
转速	500 r/min
试验时间	3 600 s
润滑条件	边界润滑

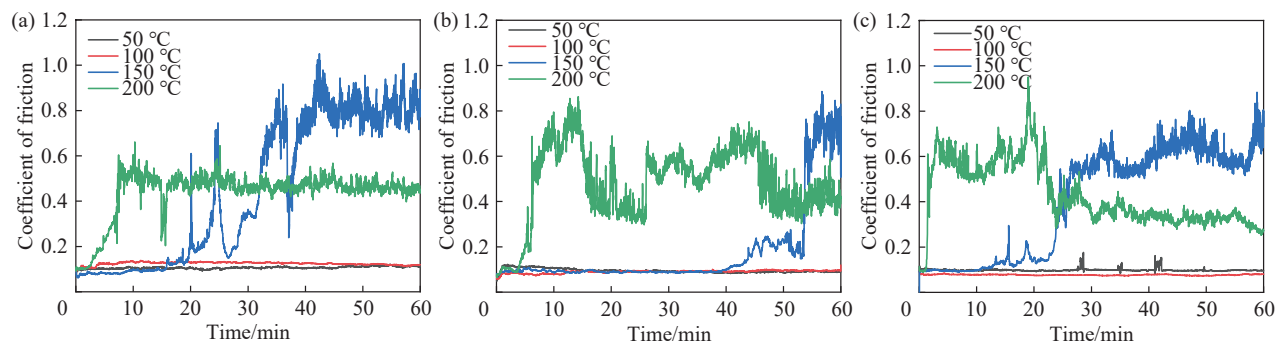


图2 CuNi6Sn6合金材料在不同载荷不同温度下的摩擦系数

Fig. 2 Friction coefficient of CuNi6Sn6 alloy under different loads and temperatures: (a) 45 N; (b) 75 N; (c) 105 N

由图2(b)可知,在载荷为75 N下,环境温度为50、100 °C时,摩擦过程整体平稳,平均摩擦系数分别为0.089 0和0.095 6。当环境温度为150 °C时,在磨损前40 min,摩擦系数较小且平稳,40 min后摩擦系数大幅增大且出现较大波动,这是由于在材料连续的摩擦过程中摩擦热堆积,磨面材料之间发生黏着。环境温度为200 °C时,摩擦系数整体较高且波动较大,不适用于精度要求高的应用场景。

由图2(c)可知,在载荷为105 N下,环境温度为50、100 °C时,摩擦过程平稳,平均摩擦系数分别为0.095 6和0.080 3。当环境温度为150 °C时,摩擦10 min之后,摩擦系数逐步攀升到0.6左右,由于摩擦热堆积,在黏着和剪切作用下形成材料转移层,但材料转移层未在表面形成连续膜,因此摩擦系数较大且波动剧烈。当环境温度为200 °C时,整体摩擦系数先增后减,这是由于摩擦表面金属、黏着对偶材料以及磨屑氧化物经过碾压混合,被压实烧结形成表面复合层并脱落,导致了较高的粗糙度和摩擦系数。但随着温度的升高,复合层作为薄的黏着层逐渐稳定,降低了摩擦系数。

综上所述,在三种载荷条件下,200 °C时的摩擦系数低于150 °C,这是因为环境温度为200 °C时,在摩擦过程中材料软化黏着、相互转移,并发生氧化反应,形成较硬的氧化层,因此摩擦系数较低。

图3为不同载荷和温度下的磨损质量。由图3可知,当载荷为45 N和75 N时,磨损质量随着环境温度的升高而增大;载荷为105 N时,磨损质量随着环境温度的升高先增大,后减小,再增大。载荷为45 N时,环境温度小于100 °C时,磨损质量较小,

仅为0.010 4 mg;环境温度大于150 °C时,磨损质量大幅上升。载荷为75 N时,磨损质量随着环境温度的升高呈上升态势,环境温度小于100 °C时,磨损质量保持在0.01 mg;环境温度为150 °C时,磨损质量快速上升,达到0.116 mg;环境温度为200 °C时,磨损质量高达0.32 mg。载荷为105 N时,当环境温度为50 °C,磨损质量仅为0.027 mg;当环境温度为100 °C,摩擦系数小,但磨损率较高,可能是由于接触面积增大,发生了疲劳点蚀和轻微黏着;当环境温度为150 °C,摩擦系数大,但磨损质量较低,是由于接触界面形成机械混合层,从而降低了磨损率;当环境温度为200 °C,高速滑动过程中摩擦热在滑动界面处形成液态金属膜并导致熔融润滑,使得摩擦系数显著降低,此时,金属熔融层通过普通的动压效应来承受载荷,摩擦系数低,然而层间摩擦热产生的热量使更多的固体融化,因此磨损率较高。

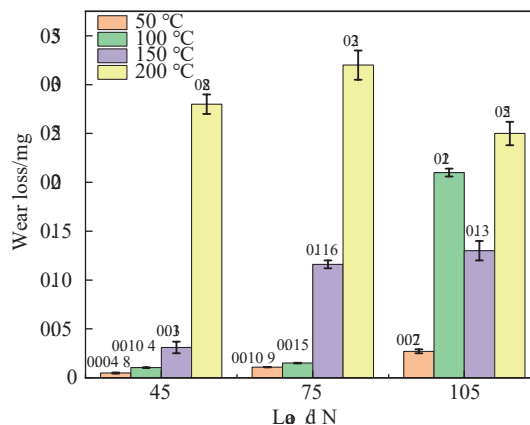


图3 CuNi6Sn6合金材料在不同载荷不同温度下的磨损质量

Fig. 3 Wear loss of CuNi6Sn6 alloy under different loads and temperatures

2.2 摩擦磨损机制

图4为不同工况下的磨痕三维图。其中,绿色表示平整表面,蓝色表示磨痕深度,红色表示磨痕峰高。由图可知,当环境温度为50℃时,磨痕最高峰和最低谷数值均先减小后增大。载荷为45 N时,磨痕较平整,磨痕最高峰和最低谷分别为12.156 μm和13.827 μm;载荷为75 N时,磨痕最高峰和最低谷分别为7.268 μm和4.813 μm;载荷为105 N时,磨痕最高峰和最低谷分别为8.828 μm和7.435 μm。载荷较低时,磨痕最高峰和最低谷数值较大,这是由于接触表面的微凸体未被压溃排出接触区。随着载荷的增大,表面的粗糙峰和微凸体被压溃,导致实际接触面积增大,峰谷值减小。当环境温度为100℃,载荷小于75 N时,磨痕最高峰和最低谷数值小于同载荷、环境温度为50℃时的磨痕;随着载荷的增大,实际接触面积更大,由图4(100℃, 105 N)可知,磨痕最低谷为34.204 μm,此时以疲劳剥层为

主。当环境温度为150℃,由图4(150℃, 45 N)可知,磨痕深度为21.127 μm,明显大于同载荷下其他温度磨痕深度,且磨面痕迹不规则,说明存在材料之间的黏着和撕扯;随着载荷增大,在磨损区域的中心出现不规则的最低谷,说明存在较大的材料转移和损伤。当环境温度为200℃时,由图4(200℃, 45 N)可知,磨痕最小深度为7.584 μm,但是存在大面积的蓝色区域,结合前文磨损质量的分析可知,材料发生了大面积的转移,在黏着之后裸露的新表面形成了新的黏着,导致材料出现较大程度的损伤。

在不同环境温度和载荷下经过3 600 s摩擦后的磨面形貌如图5所示。由图可知,环境温度为50℃时,载荷较低时磨损表面犁沟痕迹明显,此时磨损机理为磨粒磨损;随着载荷的增大,磨面上出现点蚀坑,此时磨损机理转变为疲劳点蚀;随着载荷进一步增大,点蚀坑连通造成大面积的脱落,此

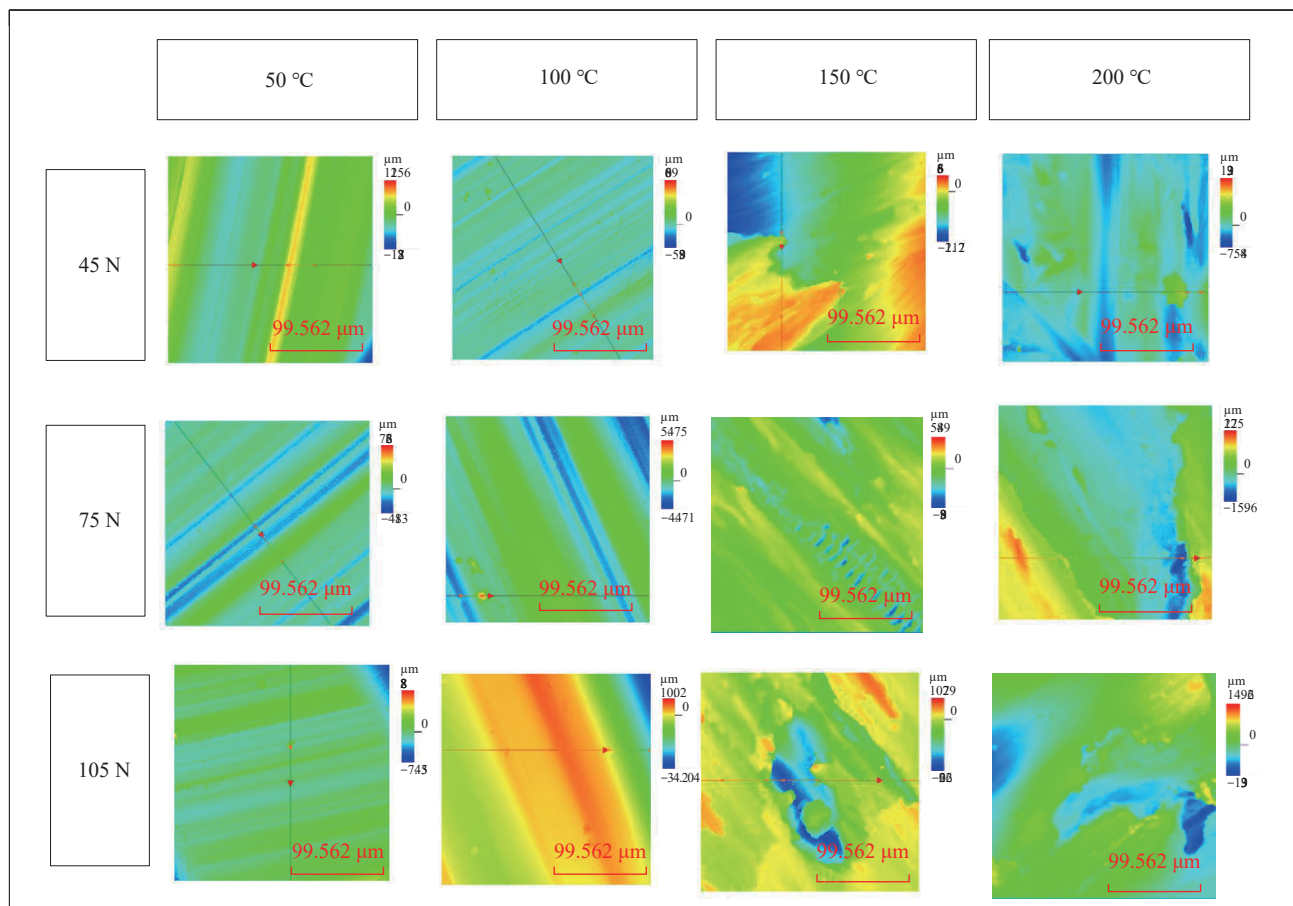


图4 CuNi6Sn6合金材料在不同载荷不同温度下的磨痕三维形态

Fig. 4 Three-dimensional wear track morphology of CuNi6Sn6 alloy under different loads and temperatures

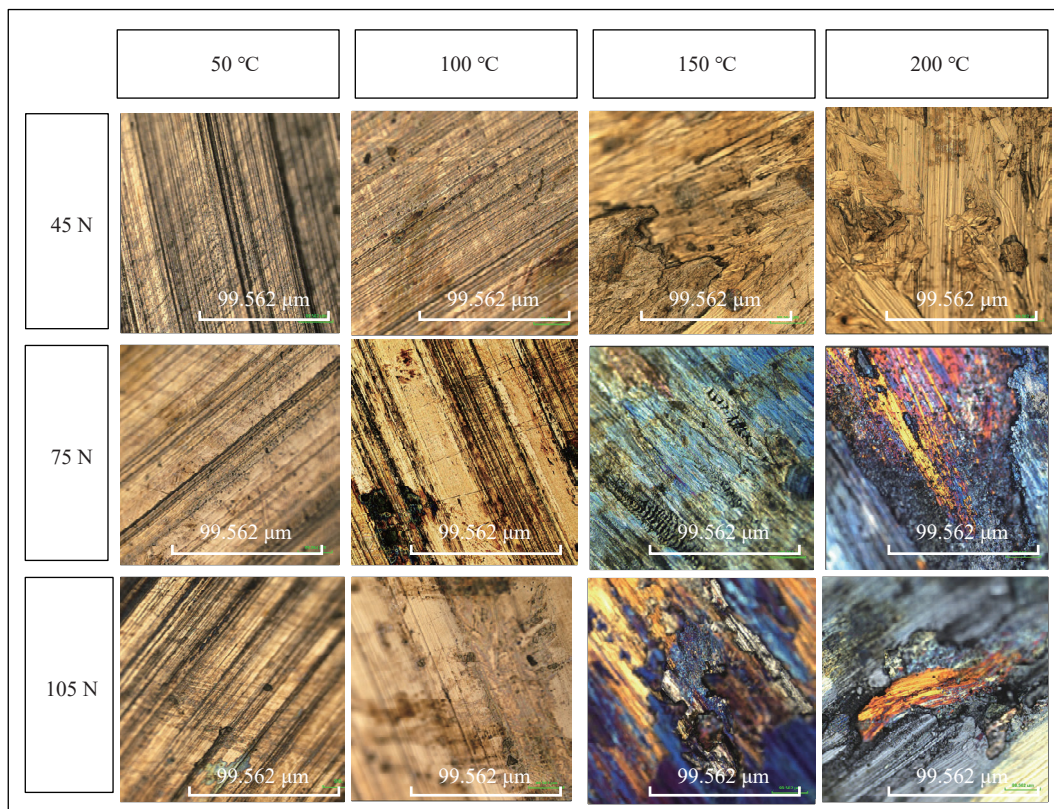


图5 CuNi6Sn6 合金材料在不同载荷不同温度下的磨损表面

Fig. 5 Wear surfaces of CuNi6Sn6 alloy under different loads and temperatures

时的磨损机理为剥层磨损^[20-21]。环境温度为100 °C时,在较低载荷下,磨面出现清晰的犁沟,犁沟表面上有明显的疲劳点蚀坑,说明此时的磨损机理为磨粒磨损伴有疲劳点蚀;随着载荷增大,磨损表面出现较大的剥层脱落,此时的磨损机理为剥层磨损。环境温度为150 °C时,在45 N载荷下磨面出现黑色烧蚀痕迹以及大面积的黏着痕迹,黑色烧蚀痕迹是由局部瞬时高温造成接触点的焊合,图中明显的黏着磨损是由于高温下材料之间发生大面积转移—黏结—撕扯,形成不规则的撕扯痕迹,此时的磨损机理主要为黏着磨损;随着载荷的持续加大,材料表面出现大面积的损伤^[22-23]。环境温度为200 °C时,其磨损机理与150 °C时相似,低载荷时,磨损表面黏着痕迹上出现犁沟,这是由于磨屑在黏着之后形成新表面;随着载荷的不断增大,磨损特征与150 °C时类似,但烧蚀情况更为严重。

3 结 论

1) 摩擦系数: 在载荷为45 N, 环境温度低于

100 °C时,摩擦系数稳定;环境温度为150 °C时,摩擦系数逐渐增大并出现波动;环境温度为200 °C时,摩擦系数急剧上升,8 min之后趋于稳定。在载荷为75 N, 环境温度低于100 °C时,摩擦系数较小。环境温度为150 °C时,摩擦系数前40 min平稳且较小,之后出现较大的波动且显著增大。环境温度为200 °C时,摩擦系数整体较高且波动剧烈。在载荷为105 N, 环境温度为50、100 °C时,摩擦过程平稳,平均摩擦系数分别为0.095 6和0.080 3。环境温度为150 °C时,摩擦10 min之后,摩擦系数逐步攀升至约0.6。环境温度为200 °C时,整体摩擦系数先增后减。

2) 磨损质量: 当CuNi6Sn6合金环境温度小于150 °C时,磨损质量随着载荷的增大而增大;环境温度为200 °C时,磨损质量随着载荷的增大而先增后减。在50 °C工况下,磨损质量较小;在100 °C工况下,当载荷为105 N时,磨损质量较大;在150 °C工况下,只有载荷为45 N时,磨损质量较小,其他载荷工况磨损质量均较大;在环境温度200 °C工况下,磨损质量均较大。

3) 磨损机理: 随着载荷的增大, CuNi6Sn6 合金在环境温度为 50 °C 时, 磨损机理为二体磨粒磨损→疲劳点蚀→轻微剥层磨损; 环境温度为 100 °C 时, 磨损机理为三体磨粒磨损→疲劳点蚀→剥层磨损; 环境温度为 150 °C 时, 磨损机理由轻微黏着磨损演变为表面轻微损伤, 最终发展为严重损伤; 环境温度为 200 °C 时, 磨损机理为严重黏着磨损伴有塑性变形。因此, CuNi6Sn6 合金适用于环境温度低于 150 °C、载荷低于 75 N 的工况。

参考文献:

- [1] Kovalchenko A M, Fushchich O I, Danyluk S. The tribological properties and mechanism of wear of Cu-based sintered powder materials containing molybdenum disulfide and molybdenum diselenite under unlubricated sliding against copper [J]. *Wear*, 2012, 290/291: 106-123.
- [2] Ünlü B S. Investigation of tribological and mechanical properties of metal bearings [J]. *Bulletin of Materials Science*, 2009, 32(4): 451-457.
- [3] Senthil Kumar P, Manisekar K, Subramanian E, et al. Dry sliding friction and wear characteristics of Cu-Sn alloy containing molybdenum disulfide [J]. *Tribology Transactions*, 2013, 56(5): 857-866.
- [4] 张永振. 材料的干摩擦学 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012.
- [5] 樊文欣, 郭佩剑, 原霞, 等. 载荷和转速对铜合金材料摩擦磨损性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(6): 821-832.
- [6] 徐少男, 樊文欣, 李睿林. 对磨材料经渗碳处理对衬套材料磨损性能的影响 [J]. *表面技术*, 2022, 51(9): 120-130.
- [7] 徐少男, 樊文欣, 鲍继轩, 等. 铜镍锡合金干滑动磨损行为研究 [J]. *润滑与密封*, 2022, 47(8): 120-126.
- [8] 邵志平. M50 钢与锡青铜对磨副的表面改性及摩擦磨损行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [9] Liu J L, Liao R D, Xie G X, et al. Tribological properties of CrN coating deposited on 20CrMo against tin bronze [J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(11): 1713-1722.
- [10] 商权波. 锡青铜凹坑织构表面的摩擦磨损性能研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2017.
- [11] 周新聪, 钟达, 黄健, 等. ATP 改性 UHMWPE 水润滑轴承材料的摩擦学特性研究 [J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(3): 632-641.
- [12] Tavakoli A, Liu R, Wu X J. Improved mechanical and tribological properties of tin-bronze journal bearing materials with newly developed triboloy alloy additive [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 489(1/2): 389-402.
- [13] 王静轩, 王嘉棋, 尹延国, 等. FeS/Cu-Bi 铜基滑动轴承材料的干摩擦特性 [J]. *轴承*, 2020(3): 39-43.
- [14] 李蓉蓉, 尹延国, 张开源, 等. 机械合金化 FeS/Cu 复合材料的摩擦磨损性能 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(17): 2024-2030.
- [15] 张孝禹, 樊恒中, 黄晓鹏, 等. 石墨相形态对铜/石墨复合材料摩擦学性能和可靠性的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2022, 42(3): 609-619.
- [16] 李波, 黄杰, 杨韬, 等. 20Cr13 不锈钢高温微动摩擦磨损特性研究 [J]. *摩擦学学报(中英文)*, 2024, 44(4): 494-508.
- [17] 潘盈卓, 吕宝华, 马楷, 等. 高温环境 Si₃N₄ 陶瓷与 M50 钢材材料的球盘配副与润滑油量对摩擦学行为的影响研究 [J]. *摩擦学学报*, 2024, 44(2): 200-213.
- [18] Cai W, Bellon P. Microstructural self-organization triggered by twin boundaries during dry sliding wear [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(19): 6673-6684.
- [19] Sathishkumar G, Saravanan S, Navaneethakrishnan G, et al. Microstructural and wear behaviour of heat treated Cu-11Ni-6Sn alloy [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 21: 89-92.
- [20] 席奇豪. 强力旋压 QSn7-0.2 合金微观组织与力学性能的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [21] 李新星. 钛合金在不同滑动速度和介质下磨损行为和机制的研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [22] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2012: 100-153.
- [23] 龙希希, 邹军涛, 薛航宇, 等. BN/Cu 复合材料摩擦磨损性能与磨损机制研究 [J]. *铜业工程*, 2024(1): 38-44.

Effects of Ambient Temperature and Load on Surface Friction and Wear Behaviors of CuNi6Sn6 Alloy

Xu Shaonan, Zhang Li, Li Xingzhong, Xue Yan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

Abstract: To study the friction and wear properties of CuNi6Sn6 alloy under high-temperature and high-load working condition, an MMU-10G friction-abrasion testing machine was used for experiments, and a LEXT OLS5000 3D confocal laser scanning microscope was utilized to examine the worn surface morphology for determination of wear mechanisms. Under a load of 45 N, friction coefficient of the alloy increased and then decreased with rising ambient temperature. Under a higher load of 75 N, friction coefficient remained relatively stable when ambient temperature was below 150 °C, but fluctuated significantly at 200 °C. When the load was increased to 105 N, friction coefficient was only stable below 100 °C. When ambient temperature was below 150 °C, wear mass increased with the load. While at 200 °C, wear mass was relatively large. At lower ambient temperatures, wear mechanism was mainly abrasive wear. As the load increased, it manifested as fatigue pitting and fatigue delamination. Under medium-high temperatures and low loads, adhesive wear predominated; under high temperature and high load, severe plastic deformation and surface burn occurred. When ambient temperature exceeded 150 °C, wear severity increased. Therefore, CuNi6Sn6 alloy was suitable for service conditions with ambient temperatures below 150 °C and loads below 75 N.

Key words: CuNi6Sn6 alloy; environmental temperature; friction coefficient; wear mechanism

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.015

引文格式: 徐少男, 张立, 李兴忠, 薛晏. 环境温度和载荷对 CuNi6Sn6 合金摩擦磨损性能的影响[J]. 铜业工程, 2026(4): 126-132.

Xu Shaonan, Zhang Li, Li Xingzhong, Xue Yan. Effects of ambient temperature and load on surface friction and wear behaviors of CuNi6Sn6 alloy[J]. Copper Engineering, 2026(4): 126-132.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc