

石墨含量对铜基材料摩擦磨损性能的影响^①

浩宏奇 丁华东 李雅文 金志浩

(西安交通大学材料科学与工程学院 西安 710049)

摘 要 探讨了石墨含量对铜基材料摩擦磨损性能的影响和材料的摩擦磨损机理。结果表明:不含石墨时,材料的摩擦系数和磨损率均较大,磨损主要为粘着磨损;添加石墨后,材料的摩擦系数和磨损率均显著降低,且随石墨含量增加,摩擦系数逐渐降低,在一定石墨含量范围内($< 3.5\%$),磨损率也逐渐减小,这与材料的强度、硬度有关。材料的磨损以应变疲劳磨损为主。随载荷增加,摩擦系数和磨损率均增加。

关键词 铜基石墨材料 摩擦 磨损 自润滑

石墨是一种良好的固体润滑剂,且具有良好的导电性能,常用来制造各种电接触部件^[1]。日本研制了一些金属基滑动电接触材料^[2],其中以石墨和铅等为固体润滑剂,铜为基体的粉末冶金铜基滑板已在电力机车上普遍使用。目前,我国也已使用了粉末冶金滑板,但其使用寿命与日本的相比尚有不少差距。随着机车运行速度的提高,对滑板性能的要求也越来越高。石墨不仅具有较好的润滑和导电性能,而且具有高的耐电弧烧蚀能力,因此,在保证足够强度条件下,加入石墨可改善材料的机械磨损与电弧烧蚀性能。

本文主要探讨石墨含量对铜基材料机械磨损性能的影响,并分析其磨损机理,为研制高质量的滑动电接触材料提供依据。

1 实验方法

以添加一定量的Fe、Sn、Ni等元素的铜合金为基体,以石墨为固体润滑剂($0 \sim 4.0\%$),试样制备工艺见文献[3]。按国家有关标准测定材料的密度、硬度、抗弯强度。磨损前,试样在真空度为 1×10^2 Pa的密闭容器中浸油。磨损试验在M-200型磨损试验机上进

行,试验条件为:纯滑动摩擦,对偶件为淬火45[#]钢,其硬度值为 $HRC50 \pm 3$;摩擦速度为 0.84 m/s ;载荷分别为49、98、147、196 N,摩擦时间为2 h;取稳态时的摩擦系数值 μ ,磨损量为试样的磨损失重 ΔW 。用扫描电镜分析磨损表面形貌。

2 实验结果与讨论

2.1 石墨含量对密度、硬度和抗弯强度的影响

图1为材料密度 ρ 、硬度HB和抗弯强度 σ_{bb} 随石墨含量的变化曲线,可见,随石墨含量升高,材料的 ρ 、HB和 σ_{bb} 值均逐渐下降。由于烧结时石墨在Fe、Ni中的溶解度很低(在Fe中小于 0.01% ,在Ni中小于 0.2%),且石墨与Cu、Sn间不互溶,均匀分布于压坯中的金属粉末之间,烧结过程中石墨对金属原子间的扩散起阻碍作用,阻碍烧结颈的形成,增大材料的孔隙度^[3],孔隙常出现在石墨与金属的界面处,且呈狭长的扁孔,易引起应力集中^[4];另外,石墨本身强度低,故石墨含量上升,材料的 ρ 、HB和 σ_{bb} 值下降。

2.2 石墨含量对摩擦磨损性能的影响

① 收稿日期:1996-10-04;修回日期:1996-12-09

浩宏奇,男,38岁,副教授,博士

表 1 为不同石墨含量材料在载荷为 98 N 时的摩擦磨损性能,可见,随石墨含量升高,摩擦系数 μ 逐渐减小,而磨损量 ΔW 在石墨含量为 0~ 3.5% 范围内也呈下降趋势,石墨含量高于 3.5% 时,磨损量反而呈增加趋势,这说明石墨含量过高或过低均不利于材料的耐磨性能。

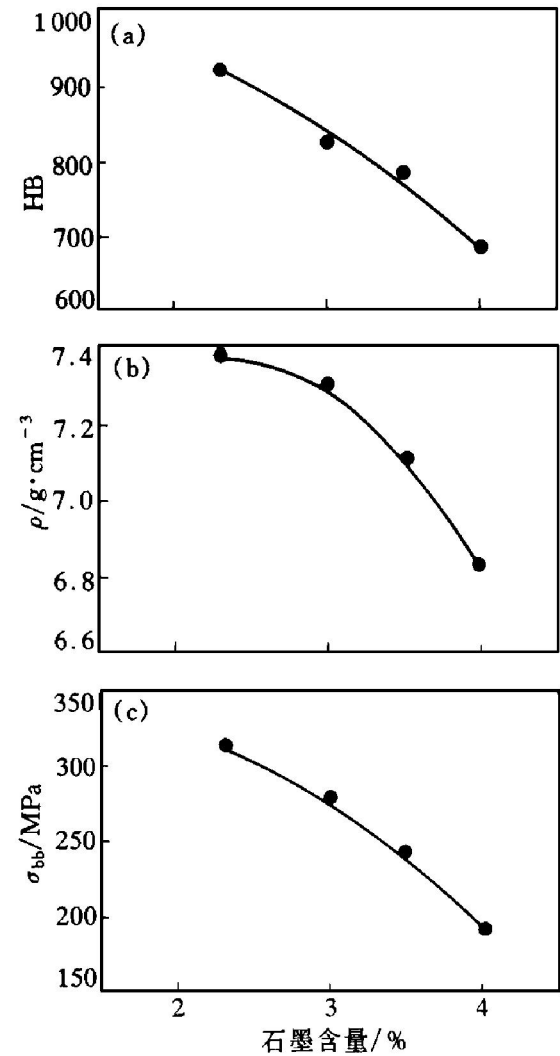


图 1 硬度(a)、密度(b)及抗弯强度(c)与石墨含量的关系

材料的摩擦系数主要取决于材料的减摩性能,而耐磨性能不仅与材料的减摩性能有关,还与材料的强度和硬度有关。不含石墨时,材料孔隙度低,且孔隙主要为闭孔隙^[5],材料的浸油量很低,使材料的自润滑减摩性能很差, μ 值较高; 尽管此时材料的 HB 和 σ_{bb} 值较高,但由于摩擦力较大,材料的磨损率较高。含有石墨时,随石墨含量升高,材料孔隙度升高,

而且孔隙中开孔隙所占的比例急剧升高,材料浸油量升高,摩擦时易形成油-石墨复合润滑膜,可有效降低 μ 值,同时使 ΔW 值降低; 但石墨含量高,材料强度和硬度值下降,材料的耐磨性能降低,这又导致 ΔW 值升高。故材料的减摩性能与耐磨性能存在一配合效果,以使材料的磨损率取一期望值。

表 1 石墨含量对材料磨损性能的影响

石墨含量/%	磨损率/ $mg\cdot m^{-1}$	摩擦系数
0	1.43×10^{-1}	0.68
2.3	1.06×10^{-3}	0.22
3.0	2.74×10^{-4}	0.22
3.5	1.37×10^{-4}	0.17
4.0	1.83×10^{-4}	0.19

表 2 为外加载荷 P 对材料的 ΔW 和 μ 值的影响。随 P 值升高, ΔW 和 μ 均逐渐增加,摩擦表面的油-石墨复合润滑膜完整性破坏程度也增大,对摩偶件微凸体压入试样中产生的塑性变形量也大,从而材料表面损伤增大,与摩擦力相结合,使材料的磨损量急剧升高。

表 2 载荷对含 4.0% 石墨材料的磨损性能的影响

载荷/N	磨损率/ $mg\cdot m^{-1}$	摩擦系数
49	1.15×10^{-4}	0.12
98	1.83×10^{-4}	0.19
147	7.50×10^{-3}	0.59
196	2.73×10^{-1}	0.71

2.3 摩擦磨损机理

不同石墨含量材料的摩擦磨损表面形貌如图 2。石墨含量为 0 时,磨损表面有大量的磨屑,并伴有少量犁削现象,与母体材料相比,磨屑中铁和氧的含量相当高; 铁从 10% 增至 61% 时,氧从 0 增至 6.2%。磨屑上的铁只可能来自于母体和对磨件 45[#] 钢。显然,大量的铁是从对磨件上转移来的,说明磨损时存在粘着磨损。摩擦时,两对摩偶件金属直接接触,在载荷的作用下易产生焊合而导致粘着发生; 此时不仅无石墨的固相润滑,且由于材料孔隙度低,孔隙中又主要是闭孔隙^[4],材料含油率很低, μ 值较高,表面温度升高,使磨损所裸露的新鲜金属表面易于氧化,说明也存在一定程度的氧化磨损。由图 2(b) 可见,石墨的加入

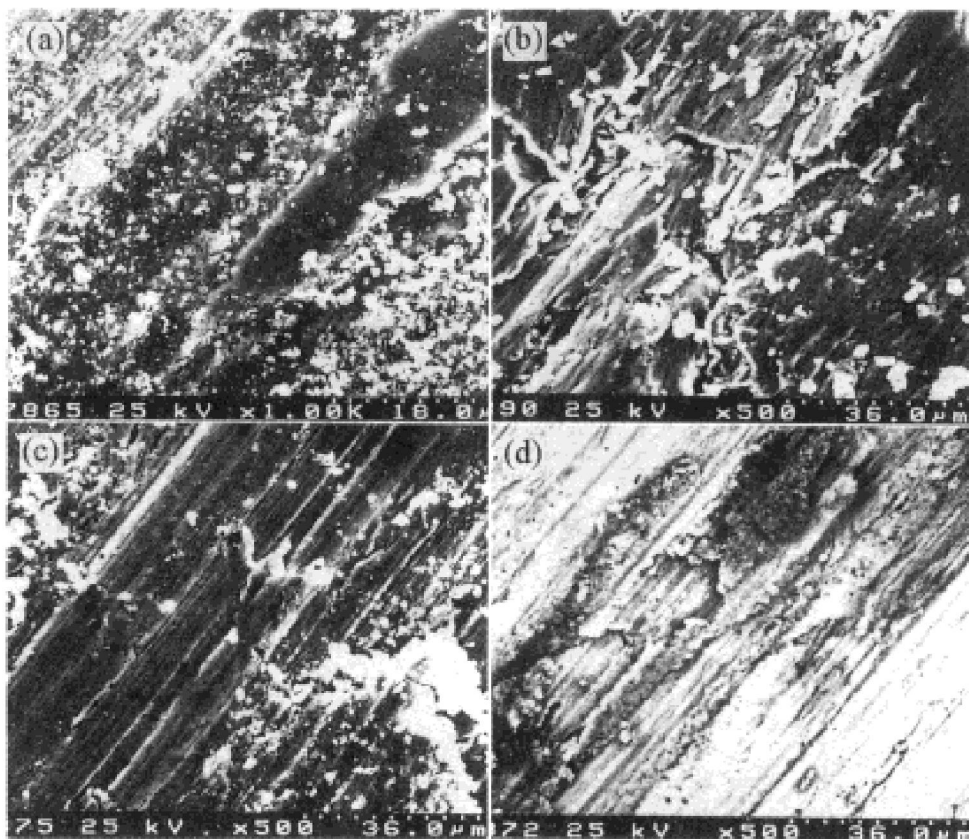


图2 不同石墨含量材料的磨损表面形貌

(a) —0%; (b) —2.3%; (c) —3.0%; (d) —4.0%

可改变材料的磨损机理。

当石墨含量为2.3%时,磨损表面发生了较大塑性变形,有较多的犁沟,疲劳裂纹已经扩展至表面,有的表面材料即将剥落,在已剥落处有疲劳痕迹。与未加石墨时(图2(a))相比,磨损表面磨屑要少得多,磨屑成分分析表明有的磨屑与母体成分相同,说明是从母体上剥落下来的;有的磨屑中铁的含量相当高,说明存在粘着磨损。石墨的加入会在摩擦表面形成油-石墨复合润滑膜,减少对偶件中金属的直接接触,从而减少粘着磨损,使磨损从无石墨时的粘着磨损向有石墨时的疲劳剥层过渡。由图2(c)、(d)可见,随石墨含量提高,同样可观察到疲劳裂纹并伴有犁沟现象,但磨屑的数量显著减少,并为明显的层状叠加结构(见图3),其成分与母体基本相同,是磨损过程中出现疲劳的有力依据,这说明随石墨含量升高,油-石墨润滑膜趋于完整,避免了粘着的发生,而以疲劳剥层磨损为主。

对磨损表面的观察可以发现,疲劳剥落前后表面有较大的塑性流变,因此应为应变疲劳剥落^[6]。当硬表面(淬火45#钢)微凸体在软表面(试样)上滑过一次,便使软表面受到一次循环载荷作用,表面切向力的作用使软表面发生塑性剪切,并不断积累,表面存在三维高压应力和位错映像力,故最大剪切变形发生在亚



图3 磨屑表面形貌

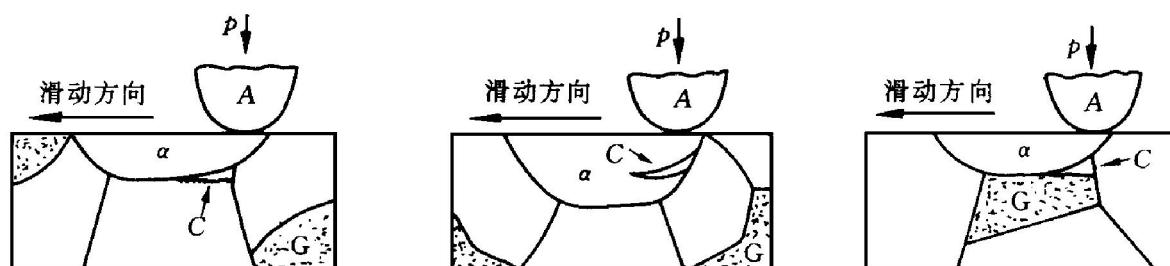


图4 亚表层裂纹的形成与扩展

p —载荷; α —铜基合金; G —石墨; A —表面微凸体; C —裂纹

表面。随着变形的不断积累,亚表层位错堆积,而由于存在孔隙、石墨,促使形成裂纹和扩展,当载荷继续作用时,裂纹将发生扩展,见图4。裂纹最后折向表面,裂纹上的材料将变形为球状或片状磨屑而剥落。

墨含量增加,磨损机制从粘着磨损逐渐转变为疲劳磨损,石墨含量较高时,则以应变疲劳磨损为主。

参考文献

3 结论

(1) 随石墨含量上升,铜基材料的密度、硬度和抗弯强度逐渐降低。

(2) 不含石墨时,铜基材料的摩擦系数和磨损率较大,以粘着磨损为主,并伴有一定程度的氧化磨损。

(3) 石墨的加入降低了铜基材料的摩擦系数和磨损率,并改变了材料的磨损机制;随石

- 1 Holm R. Electric Contacts— Theory and Application. New York: Springer Press, 1967.
- 2 叶山房夫. 润滑, 1985, 30(5): 359.
- 3 丁华东, 浩宏奇, 金志浩. 中国有色金属学报, 1996, 6(3): 106.
- 4 丁华东, 李雅文, 浩宏奇等. 中国有色金属学报, 1996, 6(4): 123.
- 5 黄培云. 粉末冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- 6 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性. 北京: 清华大学出版社, 1993.

EFFECT OF GRAPHITE CONTENT ON FRICTION AND WEAR PROPERTIES OF COPPER BASE MATERIAL

Hao Hongqi, Ding Huadong, Li Yawen, Jin Zhihao

School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

ABSTRACT The effects of graphite content on properties and mechanism of friction and wear of copper base material were studied. The results showed that for the material without graphite, the main wear mechanism was adhesive, the friction coefficient(μ) and wear rate(ΔW) were larger; for the material with graphite, the main wear mechanism was strain fatigue, μ and ΔW decreased remarkably. With the increase of graphite content, μ tended to decrease, so did ΔW up to 3.5% graphite content. This had something to do with the strength and hardness of the material. μ and ΔW increased as the load increased.

Key words copper-base graphite material friction wear self-lubrication

(编辑 彭超群)