

矿山机械活塞摩擦磨损性能研究

谢长钊^{1*}, 王振生², 苏新², 肖凌¹, 刘奕¹

(1. 中国长安汽车集团股份有限公司湖南江滨活塞分公司, 湖南 湘潭 411102;

2. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 本文对比研究了一种可广泛应用于矿山机械活塞的 B 型铝合金与 ZL109 摩擦磨损性能的差异。B 型铝合金是在 ZL109 的基础上, 熔炼过程中加入增加 Cu, Ni, RE 等元素的含量制备而成。研究表明, B 型铝合金耐磨性优于 ZL109, 组织中的 Al₂Cu 等强化相在实验过程中起到了硬化作用, 表现为 B 型铝合金的磨损率较低, 但摩擦系数较高。在高温下, 2 种铝合金的磨损率和摩擦系数均高于室温, 因为 Al₂O₃ 颗粒造成犁削作用加深, 且磨损面上出现更多的剥落和磨屑。2 种铝合金在室温和高温下的磨损机制均为磨粒磨损, 有明显的磨粒划痕。高温下的划痕深度增加。

关键词: 活塞; 矿山机械; 摩擦磨损

中图分类号: TG146.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2018)02-0068-05

Research on Friction and Wear Performance of Mining Machinery Piston

Xie Changzhao¹, Wang Zhensheng², Su Xin², Xiao Ling¹, Liu Yi¹

(1. Hunan Jiangbin Piston Branch, Chang'an Automobile Group Co. Ltd. of China, Xiangtan 411102, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: This paper compares the friction and wear properties of a B-type aluminum alloy and ZL109 which can be widely used in mining machinery pistons. The B-type aluminum alloy is based on ZL109 and is prepared by adding elements such as Cu, Ni and RE during the smelting process. The research shows that the wear resistance of B-type aluminum alloy is better than that of ZL109. The strengthening phase of Al₂Cu in the structure plays a hardening role in the experimental process. The wear rate of B-type aluminum alloy is lower, but the friction coefficient is higher. At high temperatures, the wear rate and friction coefficient of the two aluminum alloys are higher than room temperature, because the Al₂O₃ particles cause the ploughing effect to be deepened, and more flaking and wear debris appear on the wear surface. The wear mechanism of the two aluminum alloys at room temperature and high temperature is abrasive wear, and there are obvious abrasive scratches. The scratch depth at high temperatures increases.

Keywords: piston; mining machine; friction and wear

矿山机械是指直接用于矿物开采和富选等作业的机械, 包括采矿机械、选矿机械和探矿机械等。同时, 矿山作业中还需使用起重机、输送机、通风机和排水机械。矿山机械使用的活塞主要包括钢和铝合金 2 种材料。其中, 铸造铝合金高温力学性能良好, 质量小, 且便于回收利用^[1-3], 目前使用较为广泛。

为了获得更好的力学性能, 克服 ZL109 在硬度和抗拉强度方面的不足, 我们在 ZL109 的基础上进行改良, 增加了 Cu, Ni, RE 元素, 制备了型号为 B 的铝合金。通过研究, B 型铝合金硬度和抗拉强度全面优于

ZL109^[4],本文主要对 2 种材料的摩擦磨损性能进行对比研究.

1 实验材料及方法

本文实验采用的材料有:铝锭、阴极铜、电解镍、金属锰、结晶硅、打渣剂、镁锭、氮气和某型号变质剂,采用工艺流程为:熔炼-精炼-浇铸-水淬-锯浇冒口-粗车外圆-锯冒口-时效处理.最终得到 ZL109 和 B 型铝合金活塞(化学成分见表 1).

采用 HRS-2M 型高速往复摩擦磨损试验机测试 ZL109 和 B 型铝合金试样的摩擦磨损性能,机加工制备 ZL109 和 B 型铝合金摩擦磨损试样,将试样逐级打磨至 1 000# 砂纸,酒精脱水后烘干,对磨件为氮化硅(Si_3N_4)磨球,载荷为 10 N,温度分别为 25 °C 和 200 °C,实验时间为 60 min.摩擦系数由设备监控记录,取 3 次磨损实验的平均值.磨损体积采用 NanoMap-500LS 三维接触式表面轮廓仪测量,按公式 $W=V/(F \cdot L)$ (W 为磨损率, V 为磨损体积, F 为载荷, L 为滑动距离)计算磨损率,取 3 次磨损实验的平均值.采用配置了能谱仪(EDS)的 JSM-7001F 型与 S-3400N 型扫描电镜(SEM)观察合金组织形貌和磨损表面形貌.

表 1 ZL109 和 B 型铝合金的

元素	Si	Cu	Ni	Mg	Fe	Mn	Ti	RE	Al
ZL109	11~13	0.8~1.5	0.8~1.3	0.8~1.3	≤0.7	<0.3	<0.2	/	其余
B 型	11~13	2.8~4.0	2.0~3.0	0.6~1.2	≤0.7	0.15~0.25	0.06~0.15	0.15~0.25	其余

2 实验结果及讨论

2.1 磨损性能

磨损率可直观的反映出材料的耐磨性能.图 1 是 2 种材料的磨损率对比,可以看出在室温和高温状态下,B 型铝合金磨损率均低于 ZL109.经过分析认为,B 型铝合金硬度和力学性能高于 ZL109,同时,B 型铝合金中含有较多的 Al_2Cu 等强化相,在实验过程中起到了硬化作用,提升了材料的耐磨性,使 B 型铝合金磨损率相比 ZL109 有所降低.在高温状态下,ZL109 和 B 型铝合金的磨损率较室温状态下均有上升,这是因为随着温度的升高,ZL109 和 B 型铝合金的强度和硬度均明显降低,导致其磨损率升高.

高温下 2 种铝合金磨痕表面都分布着大量白色颗粒.EDS 分析,确定该颗粒为 Al_2O_3 .在 200 °C 下, Al_2O_3 有着较高的硬度.在实验过程中, Al_2O_3 颗粒部分被挤压嵌入硬度相对较低的 Al-Si 合金基体表面.随着试样与磨球的高速往复运动,磨痕表面的 Al_2O_3 颗粒和对磨件表面的微凸体犁削铝合金,从而导致铝合金表面呈现显著的犁沟特征,犁削作用增强将导致磨损率上升;随着温度升高,磨损面上出现大面积的凹坑,凹坑边缘伴随裂纹,且磨屑尺寸更大,磨损表面的剥落现象更加明显,这也是磨损率上升的原因.

通常情况下,铝合金的抗磨性能同材料的硬度成正比^[5].B 型铝合金的硬度高于 ZL109,且组织中的强化相在磨损过程中还可以有效的传递应力和起到支撑作用^[6],减轻了材料的磨损.特别是生成了较多的 Al_2Cu 颗粒,作为耐热强化相弥散分布在基体中,有效提升了颗粒与基体的结合强度.因此,不论室温或高温状态下,B 型铝合金磨损率均低于 ZL109.

2.2 摩擦系数

摩擦系数是反映摩擦过程实质的一个重要参数^[7].在材料相同时,摩擦系数 μ 与正压力、温度、相对运

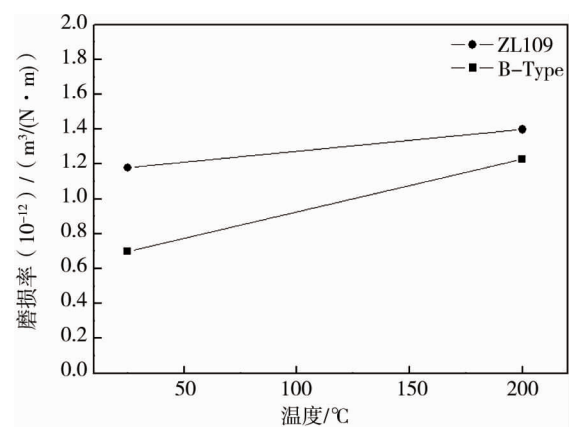


图 1 ZL109 与 B 型铝合金的磨损率

动速度、表面光洁度、污染膜等因素有关^[8]。

ZL109 铝合金的摩擦系数见图 2。ZL109 铝合金在室温和高温下的平均摩擦系数分别为 0.22 和 0.27。可以看出,实验前 5 min 时的磨合阶段,摩擦系数波动较大。随后,试样逐渐进入稳定磨损阶段,摩擦系数稳定在 0.2 附近。直到 40 min 后,试样开始进入剧烈磨损阶段,摩擦系数再次开始波动。而高温状态下的摩擦系数变化相比室温更明显。

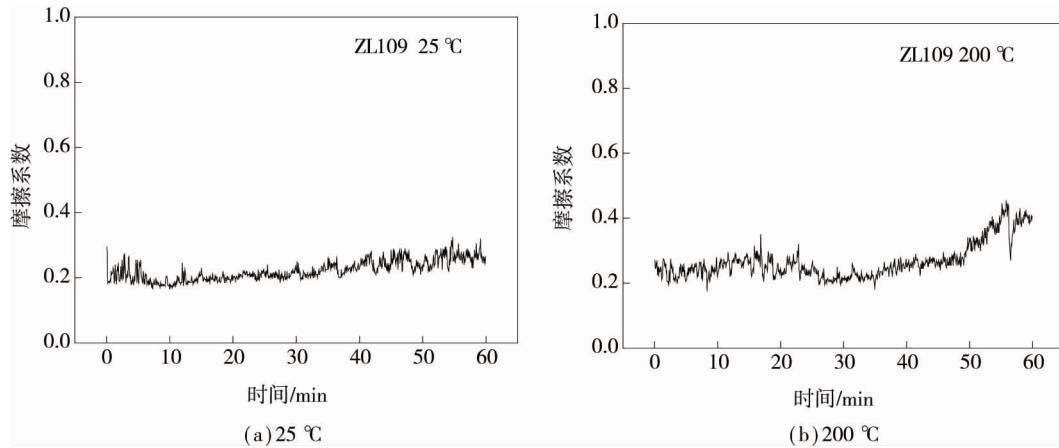


图 2 不同温度下 ZL109 的摩擦系数

图 3 是 B 型铝合金在室温和高温状态下的摩擦系数。室温和高温状态下,B 型铝合金平均摩擦系数分别为 0.26 和 0.32。在 40 min 内,B 型铝合金同 ZL109 相似,摩擦系数在 0.2 左右。进入剧烈磨损阶段后,B 型铝合金摩擦系数波动更明显,上升幅度也更大。而相比室温,在高温状态下 B 型铝合金剧烈磨损阶段不明显,摩擦系数上升平缓,波动也相对稳定。

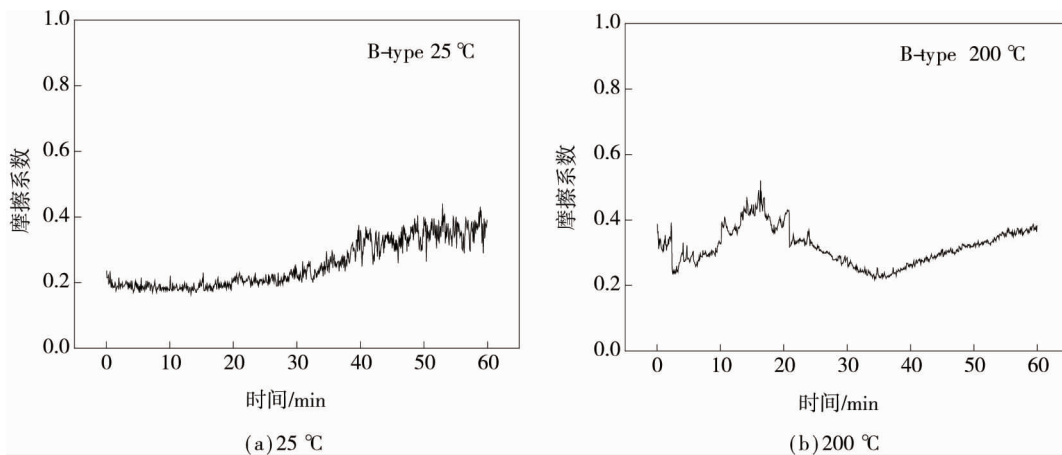


图 3 不同温度下 B 型铝合金摩擦系数

分析认为,摩擦磨损过程中,随着铝合金的磨损,B 型铝合金中的强化相容易在磨损表面形成很多微凸点,在实验过程中,凸点和氮化硅磨球接触,形成硬点与硬点的磨损,故 B 型铝合金表现出较大的摩擦系数。而 ZL109 硬度和强化相相对 B 型铝合金较少,表面微小凸点在实验过程中被挤压变形,从而使得接触面积增加,导致摩擦系数较 B 型铝合金降低^[9]。

当温度上升至 200 °C 时,两种材料的摩擦系数显著上升。这是因为滑动接触面上产生的热量导致温度超过其临界转变温度时,材料发生由轻微到严重磨损的转变^[10]。又由于随着温度升高,材料硬度逐渐降低,磨球与材料基体犁沟加剧,刨削作用的增强导致摩擦系数高于室温摩擦系数。

2.3 磨损形貌与机理分析

图4和图5分别是ZL109和B型铝合金在100倍金相显微镜下的磨损面形貌.在室温和200℃时,两种材料磨损面均有明显的磨粒造成的划痕,因此判定两种材料的磨损机理均属于磨粒磨损.而在200℃时,表面的划痕比室温下更深.

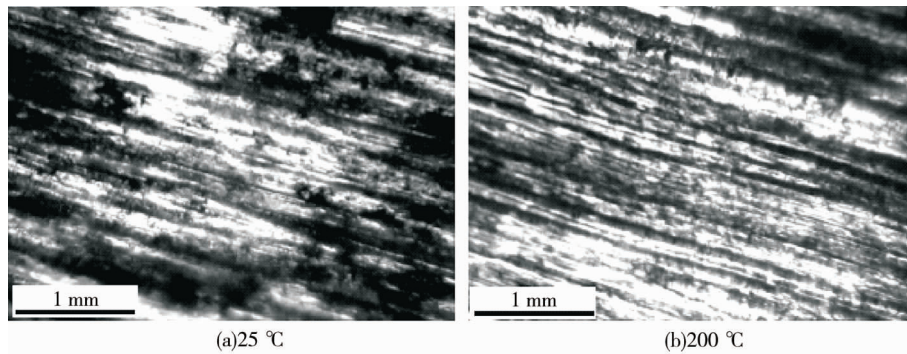


图4 ZL109 磨损面金相显微镜形貌

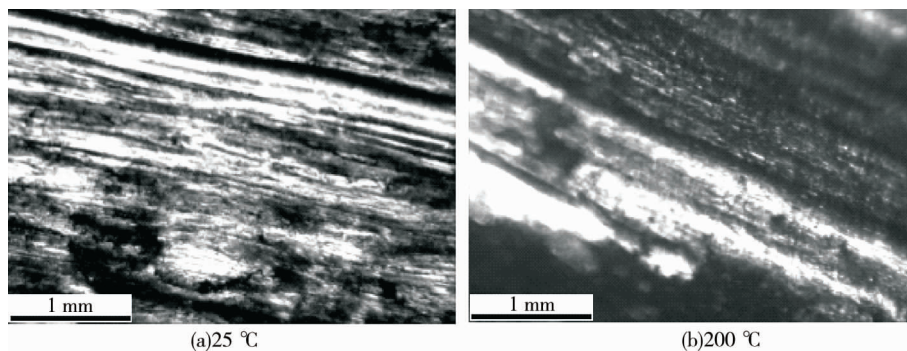


图5 B型铝合金磨损面金相显微镜形貌

3 讨论

由于高温下 Al-Si 合金试样基体硬度降低,在高温和摩擦热的作用下合金中的 Al 元素与空气中的氧气发生反应,生成了 Al_2O_3 (图 6a).图 6b 是 ZL109 磨损面的 SEM 形貌,可以看出,在对磨件的推动下, Al_2O_3 颗粒和组织中部分强化相成为磨屑,与相对硬度较低的试样基体表面接触,造成犁沟和更严重的剥落.这也印证了 ZL109 在 200℃ 下的磨损率和摩擦系数均高于室温.而 B 型铝合金组织中的强化相提高了 B 型铝合金的耐磨性,使其在室温下磨损率低于 ZL109,同时,因为 B 型铝合金 Cu、Ni 等元素含量高,组织中存在更多的强化相,如 Al_2Cu 等耐热相.这些强化相在高温下形成了硬质颗粒,在磨损过程中,颗粒随着试样和磨球相对运动,在材料基体表面会形成与摩擦方向一致的犁沟.

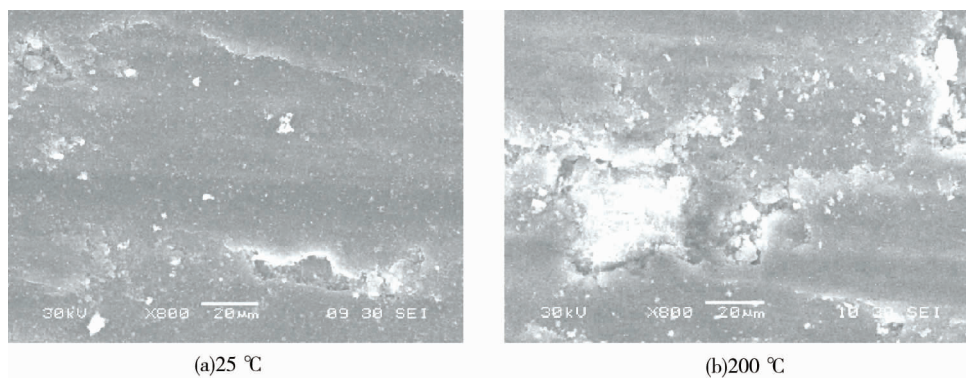


图6 ZL109 磨损面 SEM 形貌

4 结论

1) B型铝合金室温和高温下的耐磨性优于ZL109,因为B型铝合金硬度较高,且组织中的强化相在实验过程中起到了硬化作用,降低了B型铝合金的磨损率.在矿山机械使用过程中,可有效提升设备寿命和工作效率.

2) B型铝合金表面的强化相构成很多微小凸点和氮化硅磨球接触,表现出较大的摩擦系数.而ZL109硬度和强化相相对B型铝合金较少,表面微小凸点在实验过程中被挤压变形,从而使得接触面积增加,降低了摩擦系数,导致B型铝合金摩擦系数高于ZL109.

3) 在高温下,2种铝合金的磨损率和摩擦系数均比室温下高.这是由于高温下的Al-Si合金硬度显著降低,Al₂O₃颗粒部分被挤压入Al-Si合金基体表面,犁削作用加深;同时,磨损面出现更多裂纹导致的剥落坑.

4) ZL109和B型铝合金在室温和高温下的磨损机制均为磨粒磨损,磨损面有明显划痕.而在高温下,磨损面的划痕深度增加,磨损加剧.

参考文献:

- [1] Siaminwe L, Clegg A J. Effect of processing variable on structure and tensile properties of investment cast Al-Si-Mg casting alloy[J]. *Material Science and Technology*, 1999, 15(7): 812-820.
- [2] Qian Z, Liu X F, Zhao D G, et al. Effects of trace Mn addition on the elevated temperature tensile strength and microstructure of a low iron Al-Si alloy[J]. *Materials Letters*, 2008, 62(14): 2146-2149.
- [3] Dinnis C M, Taylor J A, Dahl A K. Interaction between iron, manganese and the Al-Si eutectic in hypoeutectic Al-Si alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, 37(11): 263-283.
- [4] 谢长钊, 王振生, 彭真, 等. 活塞用Cu和Ni增强型铝合金的组织与性能[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(2): 35-39.
- [5] 王振生, 郭建亭, 周兰章, 等. 三种NiAl材料的室温摩擦磨损性能[J]. *材料研究学报*, 2009, 23(3): 225-230.
- [6] 李丹, 张永胜, 周惠娣, 等. MoSi₂增强镍基合金复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2007(4): 336-340.
- [7] 汪志城, 范德恩. 滑动摩擦系数的物理意义剖析[J]. *上海机械学院学报*, 1988(1): 65-73.
- [8] 吴福兵. 板成形摩擦系数测量影响因素的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [9] 金云学, Lee J M, Kang S B. 热处理工艺对A356/SiCp性能及干滑动摩擦磨损特性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1458-1465.
- [10] Zhang J, Alpas A T. Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 1993, 161(2): 273-284.