

# 氧化石墨烯对 GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副 润滑效应试验

张丽秀<sup>1,2</sup>, 张馨月<sup>2,3</sup>, 王俊海<sup>1</sup>, 屈鑫<sup>2,3</sup>

(1. 沈阳建筑大学分析与检测技术研究中心, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程试验室, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究氧化石墨烯添加剂对 GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副润滑效应影响, 提高陶瓷球轴承的运行特性. 方法 以 GCr15 圆盘和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球组成摩擦副, 选用 40 ℃ 时黏度为 79.43 mm<sup>2</sup>/s 的润滑油作为基础油, 并添加氧化石墨烯. 使用摩擦磨损试验机球面接触式旋转环块考察氧化石墨烯作为润滑油添加剂在 GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副中的润滑效应; 用摩擦磨损试验系统自动记录摩擦系数, 温升检测系统实时记录摩擦位置温升, 利用电镜对磨痕进行表征; 试验分析转速、载荷及氧化石墨烯含量对 GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副摩擦系数、温升及表面磨痕的影响. 结果 氧化石墨烯的质量分数为 0.15% 时对低转速及高载荷有较好的润滑效果; 氧化石墨烯的质量分数为 0.3% 时对高转速的温升有较好的控制作用, 温升降低了 3.55 ℃. 结论 转速、载荷及氧化石墨烯含量对 GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副的摩擦系数、温升及表面磨痕均有影响. 在润滑油中添加适当的氧化石墨烯后可以起到减磨作用, 对低转速有较好的润滑效果, 对高转速温升有较好的冷却作用.

**关键词** 石墨烯; 摩擦系数; 温升; 磨痕

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Experimental on Lubrication Effect of Graphene Oxide on GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Tribological Pairs

ZHANG Lixiu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinyue<sup>2,3</sup>, WANG Junhai<sup>1</sup>, QU Xin<sup>2,3</sup>

(1. Test and Analysis Center, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of NC Machining Equipment and Technology of High-Grade Stone, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The effect of graphene oxide additive on the lubrication effect of GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tribologi-

收稿日期: 2018-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375317)

作者简介: 张丽秀(1970—), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事数控机床电主轴关键技术及摩擦磨损理论方面研究.

cal pair was studied to improve the operation characteristics of ceramic ball bearings. GCr15 disc and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball were selected as tribological pair and lubricating oil with viscosity of  $79.43 \text{ mm}^2/\text{s}$  at  $40^\circ\text{C}$  was selected as base oil. The friction coefficient was automatically recorded by tribometer system, and the temperature rise of the friction position was recorded by the temperature rise detection system. The wear scar was characterized by electron microscopy. The effects of three parameters, including speed, load and graphene oxide content on the friction coefficient, temperature rise and surface wear of GCr15- $\text{Si}_3\text{N}_4$  tribological pair were analyzed. When the quality score of graphene oxide is 0.15%, it has better lubricating effect on low speed and high load. When the quality score of graphene oxide is 0.3%, it has better cooling effect on the temperature rise of high speed, and the temperature rise decreased by  $3.55^\circ\text{C}$ . Speed, load and graphene content have an influence on friction coefficient, temperature rise and surface wear scar of GCr15- $\text{Si}_3\text{N}_4$  tribological pair. Adding appropriate graphene oxide in the lubricating oil can reduce surface wear scar, it has a good lubricating effect on the low speed and a better cooling effect on the temperature rise of the high rotational speed.

**Key words:** graphene; coefficient friction; temperature rise; wear scar

高速电主轴通常以陶瓷轴承为主,其结构通常是氮化硅陶瓷( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )为滚动体,内外圈为轴承钢(GCr15)材料.高速电主轴轴承在高速旋转时,轴承内部将产生大量摩擦热,这将影响到轴承的刚度性能及高速性能,而良好的轴承润滑可以减少热量的产生,降低温升<sup>[1]</sup>.石墨烯是由碳原子以  $\text{sp}^2$  杂化连接的单原子层构成的新型二维原子晶体,单层厚度仅为  $0.335 \text{ nm}$ ,是目前世界上公认的最薄二维材料<sup>[2]</sup>.由于石墨烯优良的物理性能<sup>[3-7]</sup>,故将其添加到润滑油中将会对轴承润滑效果产生影响.近几年来,基于石墨烯优异的力学特性,使其作为润滑材料添加剂的发展成为摩擦学领域的研究热点<sup>[8-11]</sup>.

近年来,国内外许多学者对石墨烯材料的研究做了许多研究:宋应金等<sup>[12]</sup>对石墨烯在发动机润滑油液中的应用做了分析,并找出了影响石墨烯应用的因素.润滑油的氧化衰变是影响石墨烯在润滑油中使用效果的关键因素之一,发动机润滑油中的氧化物、胶质、积碳、烟炱都是影响石墨烯的使用效果的因素.乔玉林等<sup>[13]</sup>考察了石墨烯的减摩抗磨性能,分析了磨损表面的形貌,初步探讨了石墨烯的润滑机理;程嘉兴等<sup>[14]</sup>概述了石墨烯的机械剥离法、加热  $\text{SiC}$  基底法、化学气相沉

淀法、氧化石墨还原法等制备方法及作为润滑添加剂在摩擦领域中的应用;蒲吉斌等<sup>[15]</sup>详细介绍了石墨烯的纳米摩擦学性能,以及作为纳米润滑薄膜、润滑添加剂和润滑填料的研究进展,指出石墨烯具有特殊的低维层状结构、超高的力学强度、优异的导热性能和摩擦学性能以及化学惰性,因此非常适合作为润滑添加剂,用于提高润滑剂的摩擦学性能,尤其强化润滑剂在高载下的承载抗磨性能;赵磊等<sup>[16]</sup>研究了在不同温度和不同织构面积率下的石墨烯作为润滑油添加剂的摩擦磨损性能,结果表明:在润滑油中添加石墨烯能显著改善摩擦学性能,降低磨损,温度为  $60^\circ\text{C}$  和  $100^\circ\text{C}$  时的效果最明显;V. Eswarai-ah 等<sup>[17]</sup>发现,当石墨烯质量分数为 0.025% 时,其摩擦因数和磨痕直径分别比基础油降低了 80% 和 33%;J. S. Lin<sup>[18]</sup>等发现,用硬脂酸和油酸改性的石墨烯表现出良好的摩擦学性能,磨痕也更加平滑整齐.

以上研究多是研究石墨烯的润滑机理,较少针对 GCr15- $\text{Si}_3\text{N}_4$  摩擦副的研究,特别是没有考虑转速、载荷及石墨烯含量这三个参数对 GCr15- $\text{Si}_3\text{N}_4$  摩擦副的影响.基于此,笔者以高速电主轴轴承为背景,利用 Rtec 摩擦磨损试验机,选用  $40^\circ\text{C}$  时黏度为

79.43 mm<sup>2</sup>/s 的润滑油,以此为前提来研究在润滑油里添加纳米级颗粒石墨烯材料对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副的润滑性能、冷却性能及表面磨痕的影响,找寻变化规律.

1 试验设计

1.1 试验系统

摩擦磨损试验机主要结构包括测试仪、基本框架、控制系统、样品台及传感器. 本试验以如图 1 所示的 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副为研究对象,试验机如图 2 所示. 试验前将 GCr15 材料加工成以 50 mm 为半径,5 mm 为厚度的试样,选用直径为 9.525 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球. 试验时采用 GCr15 与 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 对磨,将圆柱销上试样放入销夹头中固定,盘下试样放入试验机试环内部通过定位销固定,通过旋转转动轴来实现销 - 盘试样的相对滑动.

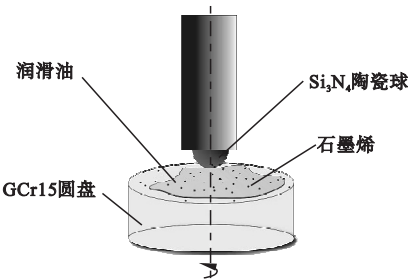


图 1 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦学行为试验原理图  
Fig. 1 Test schematic diagram of GCr15-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

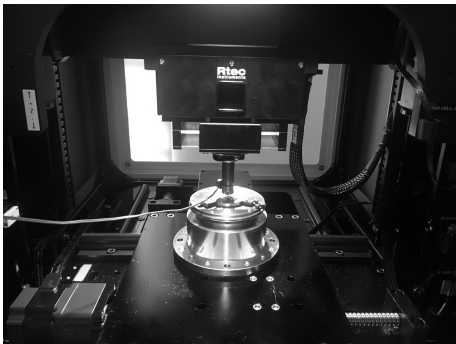


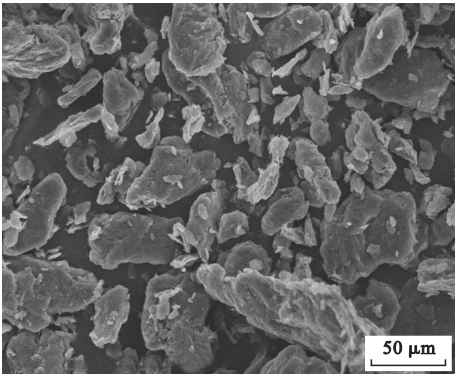
图 2 摩擦磨损试验机

Fig. 2 Friction and wear testing device

1.2 试验材料

笔者以 40 ℃ 时黏度为 79.43 mm<sup>2</sup>/s 的润滑油作为基础油,采用 SE2430 型号的氧

化石墨,配置了质量分数分别为 0.1%、0.15%、0.2%、0.25% 和 0.3% 五种氧化石墨烯添加剂. 配置方法:用 JJ124BC 型电子天平称量石墨烯,每次测量时,重复测量 3 次,取 3 次测量数据的平均值. 将其放入基础润滑油中,经超声至均匀后开始进行摩擦磨损试验. 试验材料如图 3 所示.



(a) 电镜下的氧化石墨烯



(b) 不同质量分数的氧化石墨烯添加剂

图 3 试验材料

Fig. 3 Experimental materials

1.3 试验方案

笔者采用 Rtec 摩擦磨损试验机的旋转环块对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副进行润滑研究. 试验温度为环境温度,每次试验由摩擦磨损试验系统自动记录摩擦系数,由温升测试系统实时记录温升. 根据实际工况,在供油时间间隔为 3 s,每次供油量为 0.03 mL 的情况下,可能影响摩擦系数和温升的因素包括转速、载荷及氧化石墨烯含量. 采用单一因素试验法,针对上述影响因素分别进行 6 组试验,试验参数及水平如表 1 所示.

表 1 试验参数及水平

Table 1 Test parameters and levels			
组别	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	氧化石墨烯的质量分数/%	载荷/N
1	500,1 000,1 500,2 000,2 500,3 000	0	80
2	500,1 000,1 500,2 000,2 500,3 000	0.15	80
3	500	0,0.1,0.15,0.2,0.25,0.3	80
4	2 000	0,0.1,0.15,0.2,0.25,0.3	100
5	3 000	0	40,60,80,100,120,140
6	3 000	0.15	40,60,80,100,120,140

2 试验结果与分析

2.1 氧化石墨烯对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副摩擦系数影响

2.1.1 转速对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副摩擦系数影响

当测试时间为 10 min,其中预加载时间为 0.2 min,供油时间间隔为 3 s,单次供油量为 0.03 mL,载荷为 80 N,转速为 500 r/min、1 000 r/min、1 500 r/min、2 000 r/min、2 500 r/min 和 3 000 r/min,共进行 6 组试验.添加石墨烯质量分数分别为 0 和 0.15% 的摩擦系数变化如图 4 所示.

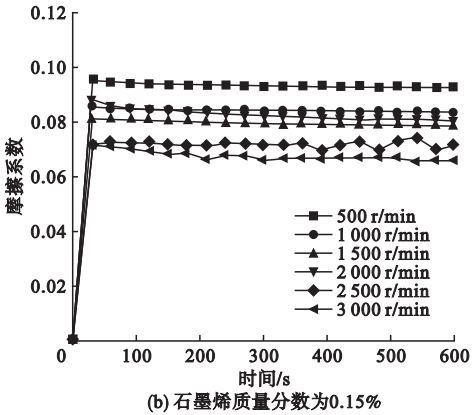
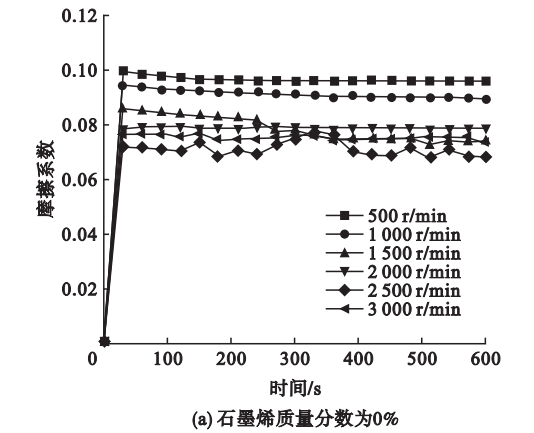


图 4 转速对摩擦系数的影响

Fig. 4 Effect of speed on friction coefficient

由图 4 可知:转速对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副的摩擦系数的影响是整体上摩擦系数随着转速的增加而下降.对比图 4(a)、(b)可知:在添加石墨烯后,可以看出转速为 500 r/min、1 000 r/min 的摩擦系数下降,转速为 1 500 r/min、2 500 r/min、3 000 r/min 的摩擦系数变化很小,转速为 2 000 r/min 的摩擦系数不下降反而升高,这可能是因为基础油黏度太高,增大了摩擦阻力<sup>[19]</sup>.试验表明在 40 ℃时黏度为 79.43 mm<sup>2</sup>/s 的润滑油中添加氧化石墨烯后,低转速的摩擦系数下降明显,对低转速有较好的润滑效果.

2.1.2 氧化石墨烯质量分数对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副摩擦系数影响

当测试时间为 10 min,其中预加载时间为 0.2 min,供油时间间隔为 3 s,单次供油量为 0.03mL,转速为 500 r/min,载荷为 80 N,氧化石墨烯质量分数分别为 0%、0.1%、0.15%、0.2%、0.25%、0.3%,共进行 6 组试验.转速为 500 r/min 和 2 000 r/min 的摩擦系数变化如图 5 所示.

由图 5 可知:随着氧化石墨烯质量分数的增加,低转速和高转速的摩擦系数均有明显的变化,添加氧化石墨烯质量分数为 0.2%时,两者的摩擦系数均最低,润滑效果最好.对比图 5(a)、(b)可知:在转速为 500 r/min 时,添加石墨烯质量分数为 0.1%、

0.15%、0.2%、0.3%的摩擦系数均低于未为添加石墨烯时的摩擦系数,效果较明显.在转速为2 000 r/min时,添加氧化石墨烯质量分数为0.1%、0.2%、0.25%的摩擦系数虽然低于未为添加氧化石墨烯时的摩擦系数,但效果不明显.在只有石墨烯固态膜作用下,同样可以起到润滑作用.在转速为500 r/min时,石墨烯固态膜可以全程起到润滑作用,效果较好.而在转速2 000 r/min时,石墨烯固态膜的作用仅可坚持6 min,虽然作用不明显,但氧化石墨烯对干摩擦起到预防作用.试验表明相比于单纯润滑油,在润滑油中添加适当的氧化石墨烯后,明显改善了低转速的润滑效果.

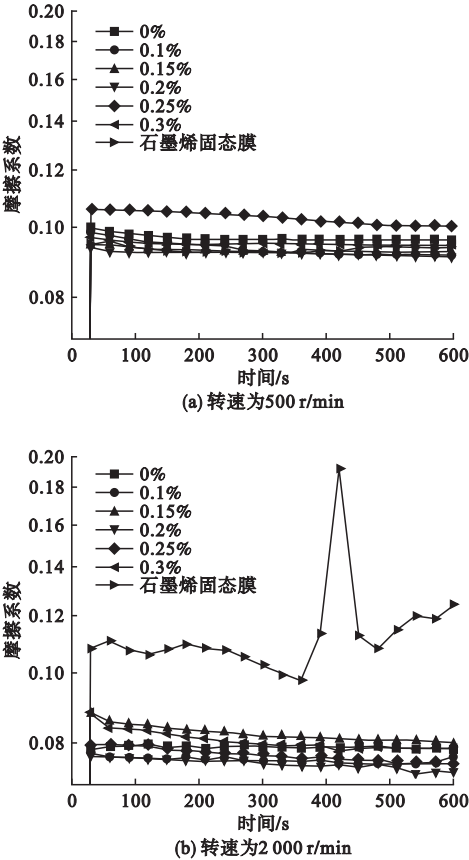


图5 氧化石墨烯含量对摩擦系数的影响

Fig. 5 Effect of graphene content on friction coefficient

2.1.3 载荷对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副摩擦系数影响

当测试时间为10 min,其中预加载时间

为0.2 min,供油时间间隔为3 s,单次供油量为0.03 mL,转速为3 000 r/min,氧化石墨烯质量分数为0.1%,载荷分别为40 N、60 N、80 N、100 N、120 N和140 N,共进行6组试验.添加氧化石墨烯质量分数为0和0.15%的摩擦系数变化如图6所示.

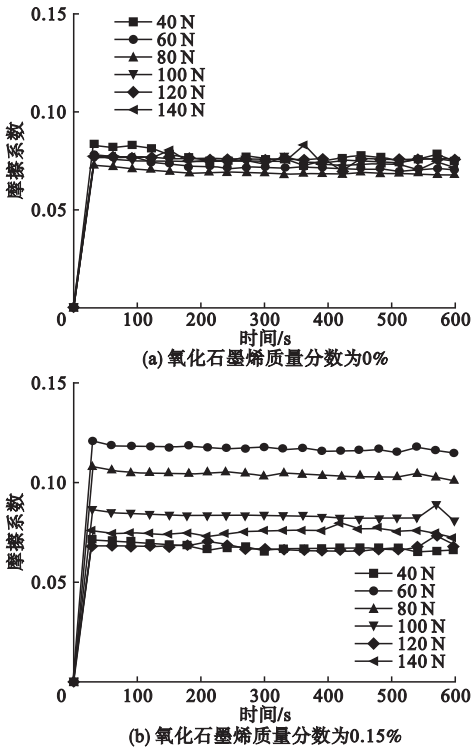


图6 载荷对摩擦系数的影响

Fig. 6 Effect of load on friction coefficient

由图6可知:只在单纯润滑油作用下,随着载荷的增加,摩擦系数变化不明显,这可能是因为基础润滑油黏度较大,承载能力强,所以载荷对摩擦系数不敏感.在载荷为80 N时,摩擦系数最低.在添加氧化石墨烯为0.15%时,载荷对摩擦系数的影响较大,随着载荷的增加,摩擦系数变化非常明显.对比图6(a)、(b)可知:在载荷为60~100 N时,摩擦系数超过了只在润滑油作用下的摩擦系数,在载荷为120~140 N时,摩擦系数低于只在润滑油作用下的摩擦系数.试验表明在润滑油中加入氧化石墨烯后,载荷对摩擦系数的影响较大,可以降低高载荷的摩擦系数,这说明氧化石墨烯起到了润滑作用.

2.2 氧化石墨烯对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副温升影响

2.2.1 转速对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副温升影响

当测试时间为 10 min,其中预加载时间为 0.2 min,供油时间间隔为 2 s,单次供油量为 0.25 mL,载荷为 80 N,转速为 500 r/min、1 000 r/min、1 500 r/min、2 000 r/min、2 500 r/min 和 3 000 r/min,共进行 6 组试验.添加氧化石墨烯质量分数分别为 0 和 0.15% 的温升变化如图 7 所示.

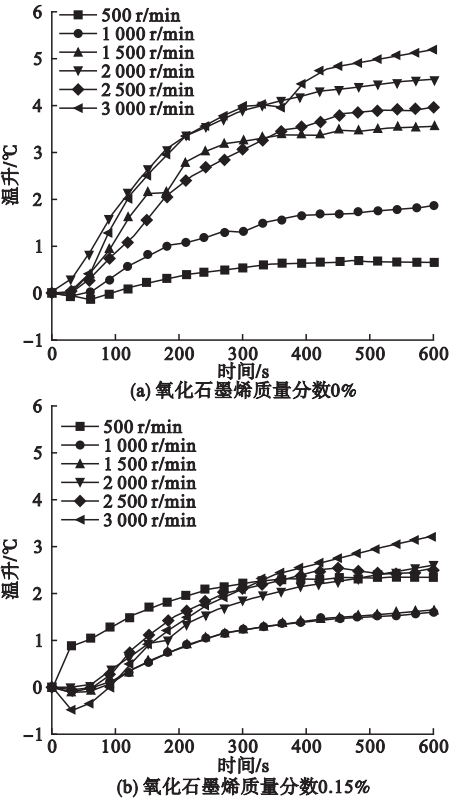


图 7 转速对摩擦位置温升的影响  
Fig. 7 Effect of speed on temperature rise in frictional position

由图 7 可知:在单纯润滑油作用下,随着转速增加,温升变化幅度较大,在转速为 500 r/min 时,温升变化最小,转速为 3 000 r/min 时,温升变化最大.在润滑油中添加氧化石墨烯后,温升变化幅度明显减小,除转速为 500 r/min 外,其他转速的温升明显降低,尤其在 1 500 r/min、2 000 r/min 时,温升降低最明显.可见氧化石墨烯的冷却效果较

好,可以降低温升,尤其对高转速时温升明显.

2.2.2 氧化石墨烯含量对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副温升影响

当测试时间为 10 min,其中预加载时间为 0.2 min,供油时间间隔为 3 s,单次供油量为 0.03 mL,转速为 500 r/min,载荷为 80 N,氧化石墨烯质量分数分别为 0%、0.1%、0.15%、0.2%、0.25% 和 0.3%,共进行 6 组试验.转速分别为 500 r/min 和 2 000 r/min 的温升变化如图 8 所示.

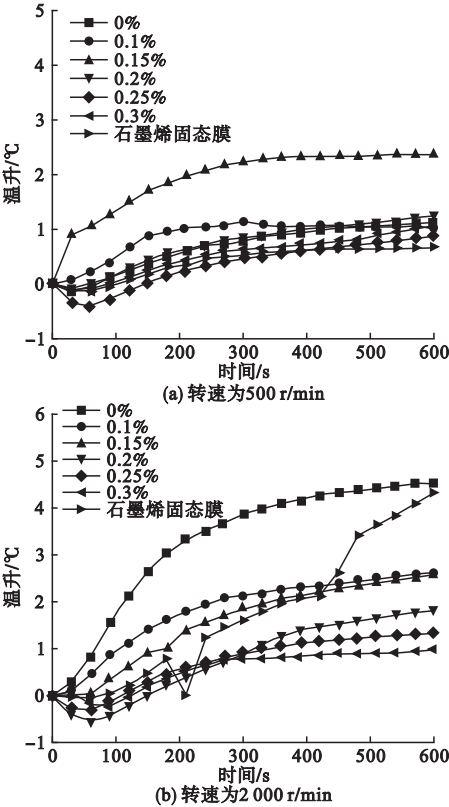


图 8 石墨烯含量对摩擦位置温升的影响  
Fig. 8 Effect of graphene content on temperature rise in frictional position

由图 8 可知:在转速为 500 r/min 时,随着氧化石墨烯质量分数的增加,温升的变化较明显.在 0.15% 时,温升变化最大,0.25% 时,温升变化最小.在转速为 2 000 r/min 时,温升的变化非常明显,温升随着氧化石墨烯质量分数的增加而逐渐减小,在氧化石墨烯质量分数为 0.3% 时,温升变化最小.对比图

8(a)、(b)可知:氧化石墨烯固态膜降低温升的效果也比较好,可以全程起到降低温升的作用. 试验表明氧化石墨烯质量分数对温升影响较大,高速时可以明显降低温升.

2.2.3 载荷对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副温升影响

当测试时间为 10 min,其中预加载时间为 0.2 min,供油时间间隔为 3 s,单次供油量为 0.03 mL,转速为 3 000 r/min,氧化石墨烯质量分数为 0.15%,载荷分别为 40 N、60 N、80 N、100 N、120 N、140 N,共进行 6 组试验. 添加氧化石墨烯质量分数分别为 0% 和 0.15% 的温升变化如图 9 所示.

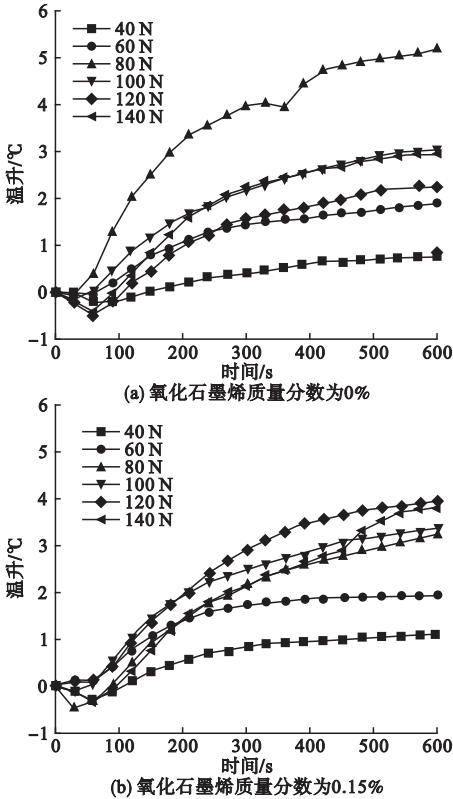


图9 载荷对摩擦位置温升的影响

Fig. 9 Effect of load on temperature rise in frictional position

由图 9 可知:只在单纯润滑油作用时,载荷变化后,温升随载荷变化而变化,变化范围为 -1℃~5.5℃. 在 40 N 时,温升变化最小,80 N 时,温升变化最大. 添加 0.15% 的氧化石墨烯后,温升的变化幅度明显降低. 随着载荷不断增加,温升呈现先上升后下降趋势,

在 40 N 时,温升变化最小,在 120 N 时温升变化最明显. 对比图 9(a)、(b)可知:添加氧化石墨烯后,载荷为 80 N 时的温升降低最多. 试验表明氧化石墨烯对低载荷的温升有较好的控制作用.

2.3 氧化石墨烯对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副减摩效应

当转速为 3 000 r/min,载荷为 60 N,共进行 2 组电镜扫描. 氧化石墨烯质量分数为 0、0.15% 对轴承钢的磨损表面形貌如图 10 所示.

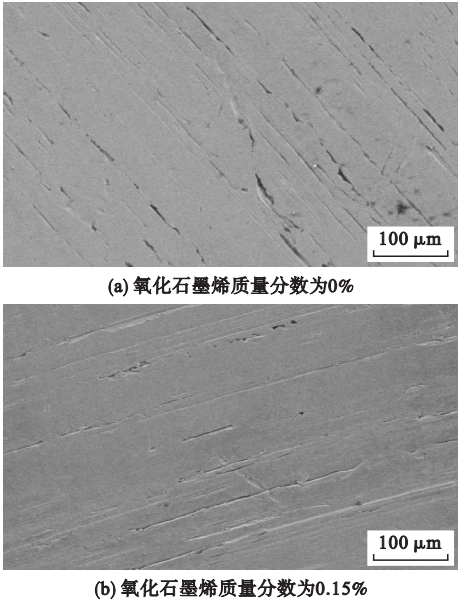


图10 氧化石墨烯含量对轴承钢磨损表面形貌的影响

Fig. 10 Effect of graphene content on wear surface morphology of GCr15

由图 10 可知:对比只在润滑油作用下的试样表面磨痕,添加氧化石墨烯质量分数为 0.15% 时的表面磨痕质量更好,表面相对平整. 只在润滑油作用时磨痕表面有较多的犁沟,且犁沟比较粗糙,痕迹较深. 而添加氧化石墨烯质量分数为 0.15% 时的犁沟更光滑,犁沟较浅. 试验结果表明氧化石墨烯可以起到减磨作用. 这可能是因为氧化石墨烯超薄的层状结构使其极易进入接触面,减少了表面的直接接触<sup>[20]</sup>,因此在基础润滑油中加入

氧化石墨烯后可以达到减磨效果。

### 3 结 论

(1)转速、载荷及氧化石墨烯质量分数以对 GCr15 - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 摩擦副的摩擦系数、温升及表面磨痕均有影响。氧化石墨烯质量分数为 0.15% 时对低转速及高载荷都有较好的润滑效果。氧化石墨烯质量分数为 0.3% 时,对高转速的温升有较好的控制作用,温升降低了 3.55 °C。

(2)润滑油中加入适当的氧化石墨烯后,起到减磨作用的同时也可以改善润滑效果,降低温升。因此应合理添加氧化石墨烯的量。

### 参考文献

- [1] 闫大鹏,吴玉厚,张柯. 高速电主轴轴承油气润滑系统的研究[J]. 机械工程与自动化, 2006(1):37-39.  
(YAN Dapeng, WU Yuhou, ZHANG Ke. Research on oil-air lubrication system of high-speed electric spindle [J]. Mechanical engineering & automation, 2006(1):37-39.)
- [2] NOVOSELOV K S. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. Science, 2004, 306(5696):666-669.
- [3] WEITZ R T, YACOBY A. Nanomaterials: graphene rests easy [J]. Nature nanotechnology, 2010, 5(10):699-700.
- [4] LEE C, WEI X, KY SAR J W. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene [J]. Science, 2008, 321(5887):385-388.
- [5] GEIM A K. Graphene: status and prospects [J]. Science, 2009, 324(5934):1530-1534.
- [6] ZIEGLER K. Minimal conductivity of graphene: nonuniversal values from the Kubo formula [J]. Physical review B, 2007, 75(23):233407-1-8.
- [7] NAIR R R, Blake P, GRIGORENKO A N. Fine structure constant defines visual transparency of graphene [J]. Science, 2008, 320(5881):1308-1308.
- [8] SU C Y, XU Y, ZHANG W. Electrical and spectroscopic characterizations of ultra-large reduced graphene oxide monolayers [J]. Chemistry of materials, 2009, 21(23):5674-5680.
- [9] ARESHKIN D A, WHITE C T. Building blocks for integrated graphene circuits [J]. Nano letters, 2007, 7(11):3253-3259.
- [10] SCHEDIN F, GEIM A K, MOROZOV S V. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene [J]. Nature materials, 2007, 6(9):652-655.
- [11] YOO E J, KIM J, HOSONO E. Large reversible li storage of graphene nanosheet families for use in rechargeable lithium ion batteries [J]. Nano letters, 2008, 8(8):2277-2282.
- [12] 宋应金,刘蕊,于宁. 石墨烯在润滑油(脂)中的应用[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2017, 33(5):593-598.  
(SONG Yingjin, LIU Rui, YU Ning, et al. Application of graphene in lubricating oils [J]. Journal of Harbin university of commerce (natural sciences edition), 2017, 33(5):593-598.)
- [13] 乔玉林,崔庆生,臧艳,等. 石墨烯油润滑添加剂的减摩抗磨性能[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(6):97-100.  
(QIAO Yulin, CUI Qingsheng, ZANG Yan, et al. Friction-reducing and antiwear behavior of graphene oil lubricating additives [J]. Journal of academy of armored force engineering, 2014, 28(6):97-100.)
- [14] 程嘉兴,谢凤,李斌. 石墨烯润滑添加剂的应用研究[J]. 合成润滑材料, 2015, 42(3):19-22.  
(CHENG Jiaying, XIE Feng, LI Bin, et al. Applied research of graphene lubricating additive [J]. Synthetic lubricants, 2015, 42(3):19-22.)
- [15] 蒲吉斌,王立平,薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1):93-112.  
(PU Jibin, WANG Liping, XUE Qunji. Progress of tribology of graphene and graphene-based composite lubricating materials [J]. Tribology, 2014, 34(1):93-112.)
- [16] 赵磊,蔡振兵,张祖川. 石墨烯作为润滑油添加剂在青铜织构表面的摩擦磨损行为[J]. 材料研究学报, 2016, 30(1):57-62.  
(ZHAO Lei, CAI Zhenbing, ZHANG Zuchuan. Tribological properties of graphene as effective lubricant additive in oil on textured bronze surface [J]. Chinese journal of materials research, 2016, 30(1):57-62.)
- [17] ESWARAI AH V, SANKARANARAYANAN V, RAMAPRABHU S. Graphene-based engine oil nanofluids for tribological applications [J]. ACS applied materials & interfaces, 2011, 3(11):4221-4227.
- [18] LIN J S, WANG L W, CHEN G H. Modification of graphene platelets and their tribological properties as a lubricant additive [J]. Tribology letters, 2011, 4(1):209-215.
- [19] 刘长城,姜旭峰,宗营. 润滑油的分类及选用[J]. 广东化工, 2017(1):55-56.  
(LIU Changcheng, JIANG Xufeng, ZONG Ying. Classification and selection of lubricating oil [J]. Guangdong chemical industry, 2017(1):55-56.)
- [20] 贾园,颜红侠,公超,等. 石墨烯的表面改性及其在摩擦领域中的应用[J]. 材料导报, 2013, 27(5):18-21.  
(JIA Yuan, YAN Hongxia, GONG Chao, et al. The surface modification of graphene and its application in the friction field [J]. Materials review, 2013, 27(5):18-21.)