

SiBN₄ 陶瓷与灰铸铁配副的摩擦学性能*

斯 松 华

(华东冶金学院科研处科技开发部 马鞍山 243002)

方 亮 高义民 周庆德

(西安交通大学机械工程学院耐磨材料研究所 西安 710049)

摘要 在M-200磨损试验机上于无润滑、蒸馏水润滑、乳化液润滑和10[#]机械油润滑4种条件下,对SiBN₄陶瓷分别与灰铸铁HT和T8钢配副进行了摩擦磨损性能的对比试验研究。结果表明:SiBN₄陶瓷与灰铸铁HT配副时的摩擦因数和磨损体积在几种润滑环境中均表现出同样的顺序——无润滑的>蒸馏水润滑的>乳化液润滑的>10[#]机械油润滑的;SiBN₄陶瓷与灰铸铁HT配副时在蒸馏水润滑下的摩擦因数仅为0.02,而在乳化液润滑下的为0.13;在无润滑和蒸馏水润滑下,铸铁中的石墨能起不同程度的固体润滑作用,而在乳化液或10[#]机械油润滑下,石墨的润滑作用得不到发挥,此时起润滑作用的分别是极性分子的化学吸附膜和油分子吸附膜。

关键词 水润滑 陶瓷 灰铸铁 摩擦磨损 乳化液 石墨

分类号 TQ 174.758.12

陶瓷材料因其具有优异的性能,如高硬度、耐高温和耐腐蚀等,已经在工程实际中日益得到广泛应用。一般地说,铸铁在机械制造用材料中所占的比重相当大。由于铸铁中含有一定量的石墨固体润滑剂,因而当SiBN₄陶瓷与铸铁配副时在某些条件下可以表现出良好的摩擦学性能。研究表明,铸铁与SiAlON陶瓷配副在无润滑下的磨损严重,在甲醇和油润滑下的磨损均有所降低,在蒸馏水润滑下,铸铁的磨损量很小,但陶瓷的磨损量增大^[1]。这说明润滑状况能严重地影响陶瓷与铸铁副的耐磨特性。但是,至今尚未见到有关铸铁中石墨在不同润滑条件下作用如何的研究报道。作者分别于无润滑、蒸馏水润滑、乳化液润滑和10[#]机械油润滑下,对SiBN₄陶瓷与灰铸铁HT配副时的摩擦磨损特性进行了对比试验研究,并且还与含C量(以质量分数计)为8%的T8钢作了比较,探讨了铸铁中石墨对摩擦磨损的影响。

* 国家自然科学基金和中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑开放研究实验室基金资助项目

1995-05-13 收到初稿,1996-09-23 收到修改稿,本文通讯联系人斯松华

斯松华 男,1988年毕业于安徽学院铸造专业,分配到马鞍山市铸造厂,1991年考入西安交通大学研究生院铸造专业,获工学硕士学位后于1994年7月到华东冶金学院科研处技术处技术开发部工作,已发表论文4篇,现为助理研究员

方 亮 男,1957年1月生,浙江省永康市人,1991年在哈尔滨工业大学材料科学与工艺系获工学博士学位,目前主要从事磨损理论、耐磨材料和陶瓷摩擦学研究,发表论文37篇,现为西安交通大学副教授

高义民 男,1957年11月生,山西省天镇县人,1995年在西安交通大学铸造及耐磨材料研究所获博士学位,目前主要从事磨损理论、耐磨材料和陶瓷摩擦学研究,发表论文32篇,现为西安交通大学副教授

周庆德 男,1930年7月生,江苏省太仓县人,毕业于上海交通大学,目前主要从事磨损和耐磨材料的研究,发表论文82篇,专著1部,现为西安交通大学教授

1 试验材料与方法

摩擦磨损试验在M-200 磨损试验机上进行 上试样是尺寸为 3 mm ×4 mm ×12 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷块,表面粗糙度 $R_a < 0.04\text{ }\mu\text{m}$, 其基本性能见表 1; 下试样的材料有 2 种,即灰铸铁 HT 和 T8 钢,尺寸均为外径 40 mm,内径 16 mm 和厚度 10 mm,表面粗糙度 $0.8\text{ }\mu\text{m}$. 灰铸铁 HT 和 T8 钢的化学成分、硬度与组织见表 2 所列 液态润滑剂分别为蒸馏水、乳化液系和 10[#] 机械油 其中,乳化液由防锈乳化油加水调制而成 防锈乳化油的组成、分子结构式和作用见表3 试验用乳化液所含乳化油的体积分数为5%, 其它试验条件: 负载为30N, 环试样

表 1 Si₃N₄ 陶瓷的基本性能

Table 1 Basic properties of Si ₃ N ₄ ceramics				
Density /g · cm ⁻³	Hardness HV	Bending strength /MPa	Fracture toughness /MN · m ^{-3/2}	Elastic modulus /GPa
3.23	1 065	190	9.55	210

表 2 灰铸铁 HT 和 T8 钢的化学成分、硬度及组织

Table 2 Chemical composition, hardness and structure of gray cast-iron and steel							
Material	Mass fraction of elements/%					Hardness HB	Structure
	C	Si	Mn	S	P		
Gray iron HT	3.340	2.180	0.360	< 0.040	< 0.037	200	Pearlite
T8 steel	0.780	0.220	0.300	< 0.030	< 0.020	180	Pearlite

表 3 防锈乳化油的配方、分子结构式和作用

Table 3 Composition structural formula and function of rust-preventive emulsified oil			
Composition	Volume fraction/%	Structural formula	Function
Oil sulphonic sodium	1.0	(RSO ₃)Na	Surface active agent
Oil sulphonic barium	12.0	(RSO ₃) ₂ Ba	Surface active agent
Dodeceny succinate	2.0	$\text{C}_{10}\text{H}_{21}\text{CH}=\text{C}(\text{COOH})_2$	Surface active agent
Triethanolamine	6.5	$\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$	Rust preventer
Oleic acid	11.5	C ₁₈ H ₃₃ COOH	Oily additive
10 [#] machinery oil	67.0		Lubricant

的转动速度为 200 r/min, 行程为 5 km, 室温, 环境的相对湿度约为 40%. 由于 Si₃N₄ 陶瓷的磨损量很小, 直接用体积测量法测定, 并且用下式计算其磨损体积:

$$V = \frac{LR^2}{a-b} \left[a \sin^{-1} \left(\frac{a}{2R} \right) + (4R^2 - a^2)^{1/2} - b \sin^{-1} \left(\frac{b}{2R} \right) - (4R^2 - b^2)^{1/2} \right]$$

式中: L 表示陶瓷试块的长度(4 mm), a, b 均表示磨痕的宽度 (a > b), R 表示环试样的半径 (20 mm). 环试样的磨损量用感量为 0.000 1 g 的分析天平称量, 然后用灰铸铁 HT 的密度除以磨损质量损失, 求出磨损体积 采用浮力法测定环试样的密度, 灰铸铁 HT 和 T8 钢的密度

分别为 7.144 g/cm^3 和 7.800 g/cm^3 . 试验后对摩擦副的磨损表面进行扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析

2 结果与讨论

图 1 给出的是 Si_3N_4 分别与灰铸铁 HT 和 T8 钢配副在几种不同条件下行程 5 km 时的摩擦磨损试验结果. 可以看出: Si_3N_4 在无润滑下的摩擦因数和磨损体积都最大, 而其分别在几种润滑剂润滑下的摩擦磨损都显著降低. 在这 2 种摩擦副中, Si_3N_4 的磨损体积均随蒸馏

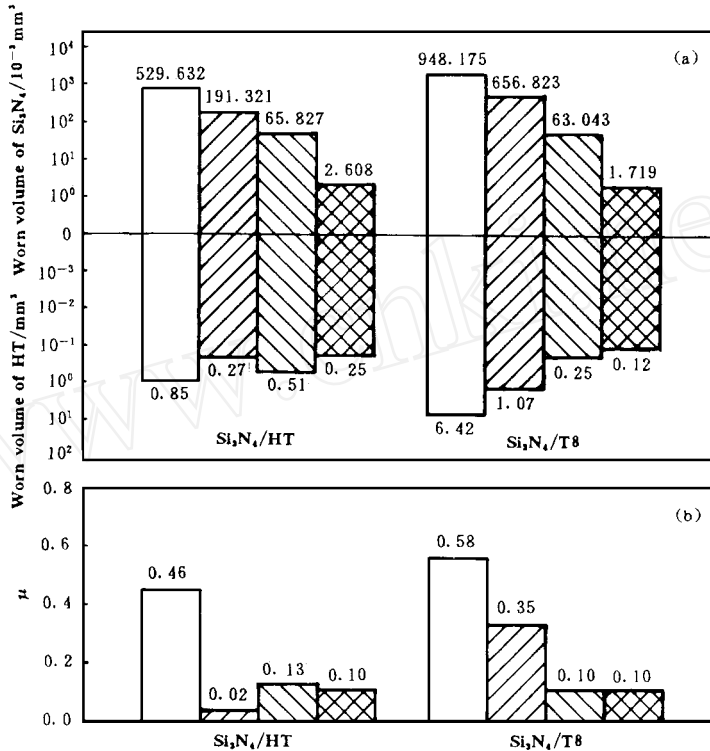


Fig 1 The results of friction and wear of Si_3N_4 /gray iron HT and Si_3N_4 /T8 steel pairs under different lubricating conditions (sliding distance of 5 km)

□- Unlubricating, ▨- Distilled water lubricating, ▩- Emulsion lubricating, ▤- $10^\#$ machinery oil lubricating

图 1 不同润滑条件下 Si_3N_4 /HT 与 Si_3N_4 /T8 摩擦副的摩擦磨损试验结果 (滑动距离 5 km)

□- 无润滑, ▨- 蒸馏水润滑, ▩- 乳化液润滑, ▤- $10^\#$ 机械油润滑

水润滑、乳化液润滑和 $10^\#$ 机械油润滑的顺序而大幅度下降, 灰铸铁 HT 的磨损体积也依次减小, 然而 Si_3N_4 /灰铸铁 HT 在乳化液润滑时的例外. 由图 1 所示还可以看出, 分别在无润滑和蒸馏水润滑下, Si_3N_4 /T8 摩擦副的摩擦因数和磨损体积都比 Si_3N_4 /HT 摩擦副的大, 而在乳化液或 $10^\#$ 机械油润滑下, Si_3N_4 /T8 摩擦副的摩擦磨损都比 Si_3N_4 /HT 摩擦副的小 (唯在 $10^\#$ 机械油润滑下的摩擦因数相当). 由表 2 所列数据可知, 灰铸铁 HT 和 T8 钢的硬度之差并不大, 而且基体都是珠光体, 但二者的摩擦磨损性能在 4 种条件下的差别都比较大. 如果按照摩

擦磨损综合性能的优良程度排列次序, 则有: 10[#] 机械油润滑下的> 乳化液润滑下的> 蒸馏水润滑下的> 无润滑下的

分析认为, 产生上述性能差异的原因主要在于无润滑和蒸馏水润滑时仅靠或主要靠铸铁中的石墨起润滑作用, 而在乳化液和 10[#] 机械油润滑下的情形则恰好相反, 此时石墨的润滑作用都可以忽略 值得一提的是图 1(b) 所示 Si₃N₄ 与 HT 配副时在蒸馏水润滑下的摩擦因数仅为 0.02, 这远比在乳化液或机械油润滑下的 0.13 和 0.10 低 这是由于蒸馏水润滑时在灰铸铁 HT 的磨损表面于石墨周边沿滑动方向形成了相当多的黑色薄膜[图 2(a)]的

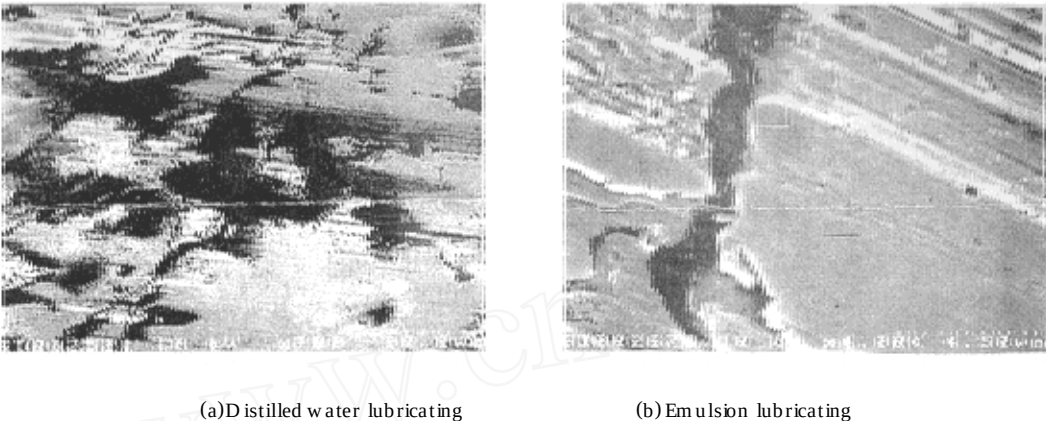


Fig 2 SEM photographs of worn surface of gray iron HT under different lubricating conditions
图 2 不同润滑条件下灰铸铁 HT 磨损表面的 SEM 照片

缘故, 而在乳化液润滑条件下灰铸铁 HT 的磨损表面上则没有[图 2(b)] 表 4 列出的是对图 2(a) 中的黑色薄膜区、白亮区以及图 2(b) 所示灰铸铁 HT 磨损表面进行的 XPS 分析结果 可以看出: 乳化液润滑下灰铸铁 HT 磨损表面和蒸馏水润滑下灰铸铁 HT 磨损表面“白亮区”的各种原子分数相近, 其中 Fe 的含量很高, Si、O、C 的含量都比较低; 相对而言, 在蒸

表 4 灰铸铁 HT 磨损表面的元素含量

Table 4 Elemental content of the worn surface of gray cast-iron HT					
Lubricant	Area	Atom fraction/%			
		C	Si	O	Fe
Emulsion	Worn surface	2.065	4.798	20.340	72.796
Distilled water	Black thin film area	5.966	24.596	43.675	21.226
	“White” area	1.976	4.133	15.132	75.024

馏水润滑下灰铸铁 HT 磨损表面的黑色薄膜区, C 的含量增加约 2 倍, Si 和 O 的含量也都显著增大, 但 Fe 的含量却大幅度降低

对图 1 所示摩擦磨损试验结果可作如下分析:

在无润滑下, 陶瓷表面微凸体对灰铸铁 HT 表面产生犁削作用, 摩擦界面温度较高, 石墨变脆^②, 铸铁表层发生塑性变形, 表层石墨随之变形、折断且被挤出磨损表面, 可在摩擦界面起一定的润滑作用 蒸馏水润滑可以降低摩擦温度, 增加石墨的韧性, 使石墨较易变形, 而且水能

与 Si_3N_4 发生摩擦化学反应形成十分光滑的平面^[6], 促使石墨变形并被挤出铺展在磨损表面上, 加之石墨是层状结构的晶体物质, 能够吸附陶瓷表面摩擦化学反应的产物, 据此并且结合表4所列灰铸铁HT 磨损表面Si和O 原子的明显增多, 大致推断图2所示的黑色薄膜可能是一层含石墨的 SiO_2 或 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 润滑膜, 从而使灰铸铁的磨损减小. 在乳化液润滑下, 油类极性分子和表面活性剂极性分子都可以在灰铸铁HT 磨损表面上形成润滑性能较好的化学吸附膜, 这种膜的外表是非极性分子. 由于极性分子是以化学键吸附在铸铁的磨损表面上, 因而铸铁变形被“挤”出来的石墨主要是以范德华力吸附在膜的表面. 因为范德华力比较弱, 所以膜表面吸附的石墨容易被乳化液冲走. 此外, 由于 Si_3N_4 能够与乳化液中的水发生摩擦化学反应形成很光滑的表面[3(a)], 这也使石墨很难铺展在铸铁的磨损表面

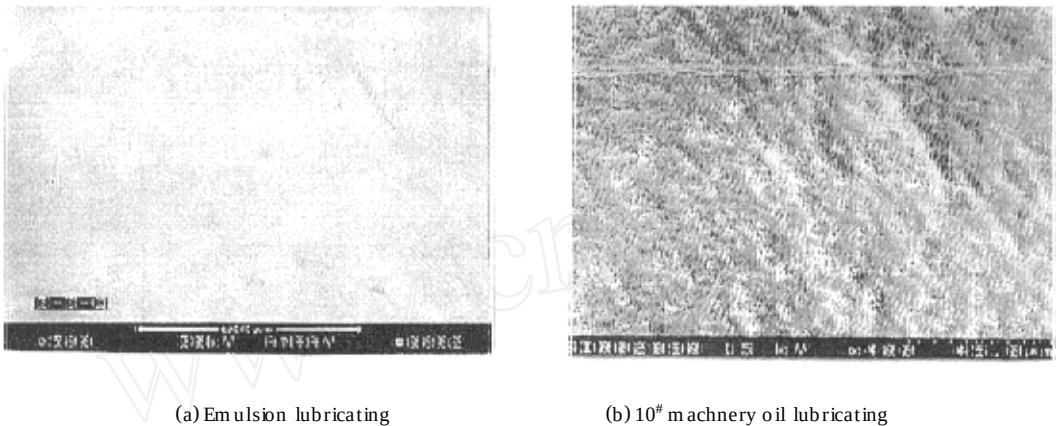


Fig 3 Photographs of worn surface of Si_3N_4 ceramics under different lubricating conditions

图3 不同润滑条件下 Si_3N_4 陶瓷的磨损表面照片

上[参见图2(b)]. 在油润滑下, 由于 Si_3N_4 陶瓷的磨损表面比较粗糙[如图3(b)所示], 很容易吸附油分子而形成润滑性能良好的油膜, 然而在这种情况下石墨基本不会起润滑作用.

Suqishita 等^[6]用铸铁/铸铁副进行了无润滑试验, 发现在铸铁磨损表面形成了一层石墨膜, 接着用矿物油润滑继续试验, 石墨膜便逐渐遭受破坏而消失. 作者对 Si_3N_4 /灰铸铁摩擦副先后采用蒸馏水润滑和乳化液润滑, 行程各 5 km, 测得摩擦因数随着滑动距离变化的关系曲线如图4所示. 可以看出: 在蒸馏水润滑下, 摩擦因数由无润滑时的 0.44 急剧下降, 当滑动到 2 km 时便开始稳定在 0.02 基本不变, 直至滑动到 5 km 时仍无变化; 然后改用

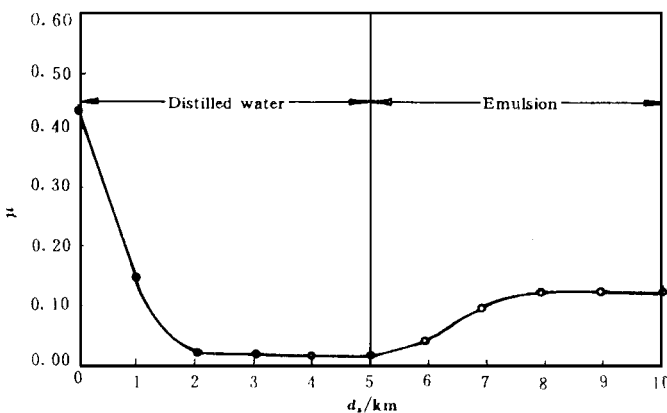


Fig 4 Friction factor of Si_3N_4 against gray iron in distilled water and emulsion vs sliding distance (d_s)

图4 Si_3N_4 /灰铸铁HT 摩擦副在两种润滑条件下的 μ - d_s 曲线

降, 当滑动到 2 km 时便开始稳定在 0.02 基本不变, 直至滑动到 5 km 时仍无变化; 然后改用

乳化液润滑继续进行试验, 摩擦因数便逐渐上升, 而且进入稳定期后基本保持在 0.13 摩擦因数的这种变化过程, 进一步验证了前面所述试验与分析结果是正确的

3 结论

在给定的试验条件下, Si_3N_4 陶瓷/灰铸铁 HT 摩擦副的摩擦学特性基本是依无润滑、蒸馏水润滑、乳化液润滑和 $10^\#$ 机械油润滑的顺序明显提高; 在无润滑和蒸馏水润滑下, 石墨能够在 Si_3N_4 /HT 摩擦副中起不同程度的润滑作用; 在乳化液和 $10^\#$ 机械油润滑下, 石墨的润滑作用得不到发挥, 此时起润滑作用的分别是极性分子的化学吸附膜和油分子吸附膜; 在蒸馏水润滑条件下, Si_3N_4 与铸铁 HT 配副时, 由于在铸铁的磨损表面上形成了含石墨的润滑膜, 摩擦因数仅为 0.02

参 考 文 献

- 1 Nakamura Y, Hirayama S. Effect of liquid lubricants on the wear of gray cast iron againsts sialon ceramics Wear, 1990, 137: 91~97
- 2 Suyishita J, Fujiyoshi S. The effect of cast iron graphite on friction and wear performance I. Graphite film formation on gray cast iron surfaces Wear, 1981, 66: 209~221
- 3 Suqita T, Ueda K. Material removal mechanism of silicon nitride during rubbing in water Wear, 1984, 97: 1~8
- 4 Suqishita J, Fujiyoshi S. The effect of cast iron graphite on friction and wear performance II: Variables influencing graphite film formation Wear, 1981, 68: 7~20

Properties of Friction and Wear of Si_3N_4 Ceramics against Gray Cast Iron

Si Songhua

(Department of Science Research East China Institute of Metallurgy Ma'anshan 243002 China)

Fang Liang Gao Yin in Zhuo Qinde

(Mechanical Technological Institute Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049 China)

Abstract The friction and wear of ceramics Si_3N_4 against gray cast iron and 0.8% carbon steel under four lubricated conditions of dry friction, distilled water, emulsion and $10^\#$ machinery oil have been studied in a ring-block type wear tester. It is concluded that friction factor and wear are deceased in the order of dry friction, distilled water, emulsion and $10^\#$ machine oil. Specially, friction factor is about 0.13 in emulsion and down to 0.02 in distilled water because the lubricating film containing graphite is formed on worn surface of gray cast iron in distilled water. The graphite can be taken as a solid lubricant in air and distilled water, but it can not in emulsion and oil.

Key words water lubrication ceramics gray cast iron friction-wear emulsion graphite

Classifying number TQ 174.758.12