

磁场对中碳钢滑动摩擦磨损的影响*

董祥林 简小刚 毕红运 陈金荣

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110015)

摘要 研究了钕铁硼永磁体磁场对中碳钢摩擦磨损的影响. 当磁场为 45 mT 时, 环和块的磨损量分别下降约 50% 和 60%, 进一步增加磁场磨损量则缓慢下降, 至 193mT 时, 环和块平均降低达 70%, 摩擦系数降低约 30%. 分析表明, 磁场导致氧化磨损的比例增加是磨损降低的主要原因.

关键词 磁场, 中碳钢, 磨损

中图分类号 TG142.1, TG132.2

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(1999)06-0577-04

EFFECT OF A MAGNETIC FIELD ON SLIDING FRICTION AND WEAR OF MEDIUM CARBON STEEL

DONG Xianglin, JIAN Xiaogang, BI Hongyun, CHEN Jinrong

Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

Correspondent: DONG Xianglin, senior engineer, Tel: (024)23843531-55487, Fax: (024)23891320,

E-mail: xgjian@imr.ac.cn

Manuscript received 1999-01-07, in revised form 1999-03-12

ABSTRACT The friction and wear behavior of medium carbon steel under magnetic field produced by Nd-Fe-B magnet has been studied. When magnetic flux density of 45mT was applied the wear volume of ring and block decreased by 50% and 60% respectively. As magnetic flux density further increased up to 193mT the wear volume of the ring and block decreased slowly to the maximum of 70% on average and the friction coefficient dropped about 30% simultaneously. The results were explained mainly by the promotive action of magnetic field for the oxidation of the wear particles and rubbing surface.

KEY WORDS magnetic field, medium carbon steel, wear

在摩擦副界面加磁场以改善金属材料的摩擦学特性, 在国外已做了一些工作^[1-7], 但取得的结果并不一致. Paulmier 等^[2]发现直流线圈磁场达 3.62×10^4 A/m 时可使碳钢的磨损率减少二个数量级; Kumagai 等^[3]发现磁场可大大缩短 Ni-Ni 的激烈磨损阶段, 从而降低磨损. Muju 和 Radhakrishna^[4]则认为只有当摩擦副两组元的硬度比为一特定范围时加磁场才能降低其磨损.

目前在这类研究中, 均是采用线圈通电产生磁场, 因而磁体体积较大, 且须一套电源装置. 本文通过钕铁硼永磁体产生磁场, 研究其对中碳钢滑动摩擦磨损的影响, 并探讨磁场对摩擦界面的作用机制.

1 实验方法及材料

磨损试验在 Amsler 试验机上进行, 为了便于加磁场,

对该试验机做了局部改装. 永磁体及试样的安装示于图 1. 为防止漏磁, 接近磁体的框架 (2)、夹具等均由铝合金制成, 立方形永磁体 (3) 置于静止的块状上试样 (5) 的上侧, 由砝码 (1) 加载, 压于环状下试样 (6) 上, 构成环-块接触. 磁体 N 极紧靠块试样. 环、块试样摩擦界面的磁场大小由永磁体和块试样之间塑料垫片 (4) 的厚度调整, 试验前后用 SG3 数字 Tesla 计测定其 mT 值.

每种试验均为有、无磁场条件下对比. 不加磁场的试样, 在试验前有效地去磁; 试验前后严格清洗试样, 并在万分之一的天平上称重, 以测定磨损量. 所有摩擦副均在 200 r/min 的转速下运行 20 min (相对滑动距离 628 m). 试验均不加润滑剂. 加磁场的试验在试验前测定摩擦副之间的吸力, 加载时将其计入, 以保证有无磁场时载荷相同. 每种试验条件重复三次.

永磁体由粉末冶金的钕铁硼永磁材料制成. 尺寸为 13 mm×10 mm×11 mm. 上、下试样全部用中碳钢制成, 上试样尺寸为 20 mm×11 mm×11 mm, 下试样尺寸为直径 50 mm×10 mm. 上试样为退火状态, 硬度 HB211, 下试样

* 国家自然科学基金资助项目 59675032

收到初稿日期: 1999-01-07, 收到修改稿日期: 1999-03-12

作者简介: 董祥林, 男, 1938 年生, 高级工程师

为淬火状态, 硬度 HRC53.

2 实验结果

2.1 磁场对磨损量及摩擦系数的影响

图 2 为有、无磁场条件下磨损量与滑动距离的关系. 可以看出, 除开始的短暂时间外, 加磁场后环、块试样的磨损量在各阶段均明显低于无磁场时的磨损量. 随着滑动距离的增加, 磨损量差别加大, 至 628 m 时两者相差 1 倍以上.

图 3 为有、无磁场时摩擦系数与滑动距离的关系, 图中各点为该点至前一点之间的平均值. 初期阶段两者差别不

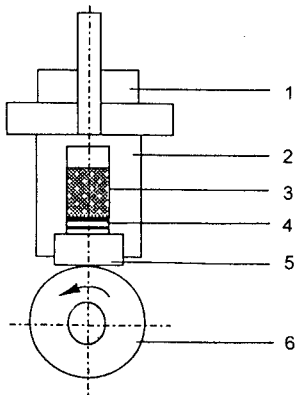


图 1 永磁体及试样安装示意图

Fig.1 The sep-up diagram of the magnet and speciment
1 — load, 2 — supporting frame, 3 — permanent magnet,
4 — adjusting pieces, 5 — block specimen, 6 — ring specimen

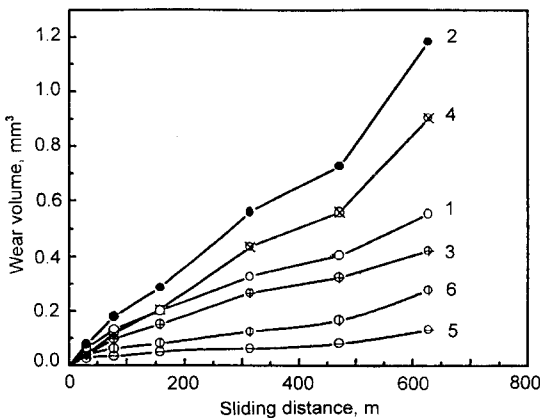


图 2 有、无磁场时磨损与滑动距离的关系 (磁通密度 123 mT, 载荷 30.9 N)
Fig.2 Relationships between wear volume and sliding distance with and without a magnetic field (magnetic flux density 123 mT, load 30.9 N)

- 1 — total, with magnetic field
- 2 — total, without magnetic field,
- 3 — nlock, with magnetic field
- 4 — block, without magnetic field,
- 5 — pin, with magnetic field
- 6 — pin, without magnetic field

大, 滑动约 30 m 后差距很快加大, 至稳定磨损阶段, 加磁场后摩擦系数比无磁场时降低约 0.2.

2.2 磨损量减少与磁通密度之间的关系

当其它条件相同时磁通密度对磨损量的影响如图 4 所示. 与无磁场时相比, 当加 45 mT 的磁场时, 环和块的磨损量分别降低 50% 和 60%, 进一步增加磁场至 193 mT 时, 环和块磨损量最大降低分别达 66% 和 74% 左右 (平均 70%). 这说明仅需较低磁场即可使磨损量明显下降, 若进一步加大磁场, 磨损量则缓慢下降.

2.3 磨痕和磨屑的观测

从上述结果可知由永磁体产生的磁场能显著减少碳钢的摩擦和磨损. 为了探索磁场的作用机制, 对比分析了有、无磁场磨损试验后的磨痕和磨屑. 肉眼即可看出两者明显差

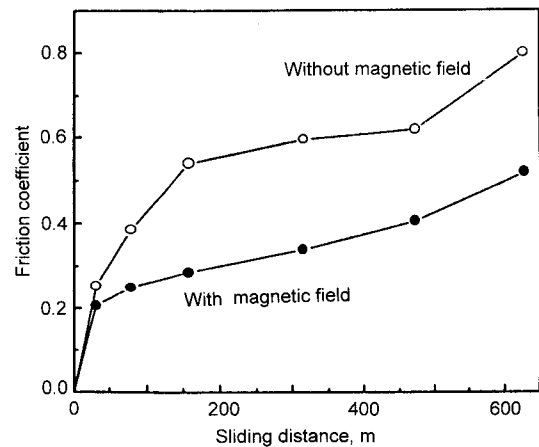


图 3 有、无磁场时摩擦系数与滑动距离的关系 (磁通密度 123 mT, 载荷 30.9 N)
Fig.3 Relationships between friction coefficient and sliding distance with and without a magnetic field (magnetic flux density 123 mT, load 30.9 N)

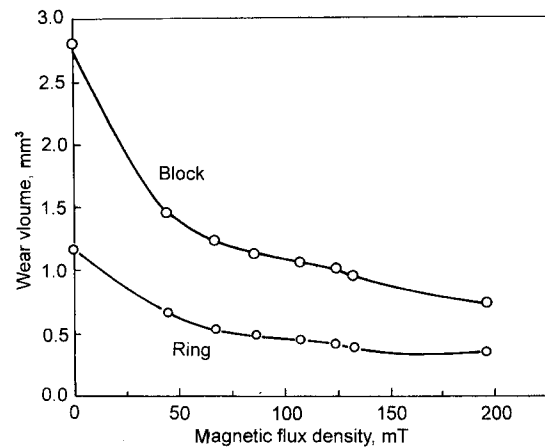


图 4 磨损量与磁通密度的关系 (载荷 40.7 N, 滑动距离 628 m)
Fig.4 Wear volume of ring and block as a function of magnetic flux density (load 30.9 N, sliding distance 628 m)

别, 加磁场试验后的磨痕一般较无磁场试验的光滑, 并有较多的棕红色氧化物覆盖其表面, 与之同时产生的磨屑亦为棕红色. 无磁场试验后的磨痕和磨屑虽亦可观察到氧化现象, 但其范围或比例远较前者为小. 扫描电镜和 X 射线衍射分析进一步显示了这种差异. 图 5a,b 分别为有、无磁场试验后典型磨痕形貌, 前者较光滑, 因氧化导致颜色较深. 后者沟痕明显, 可看到粘着和撕裂的形貌, 并有较多的金属光泽.

图 6a,b 分别为有、无磁场试验时收集的磨屑, 前者颗粒细小, 且大小较均匀, 多呈圆形. 后者颗粒较大, 多呈块状, 并有金属光泽.

图 7a,b 分别为有、无磁场试验后的磨屑的 X 射线衍射图 (因每次试验产生的磨屑很少, 分析样品为多次试验合并而成). 在有磁场的试验的磨屑中, 除 α -Fe 谱线外, 还有大量的 Fe_2O_3 谱线, 说明氧化比例很大, 而未加磁场试验的磨屑, 则以 α -Fe 为主, 氧化物 (主要是 Fe_2O_3) 所占的比例较小.

3 讨论

在同种金属的干滑动磨损中, 粘着磨损机制往往起主要作用, 但一般也存在氧化磨损、剥层和微切削等^[8], 因此多表现为混合机制, 在不同条件下, 各种机制所占的比例和严重性可能不同, 宏观上则表现为摩擦、磨损量的差别. 从图 5-7 的观测可知, 磁场导致了磨痕和磨屑氧化比例明显增加, 且使磨屑变细、变圆滑. 加磁场试验中也观察到磨痕处聚集大量磨屑, 可推断造成这种变化是由于磁场对磨屑的吸引所致. 当有磁场时, 磨损产物能较长时间被吸附在摩擦界面, 难以逸出, 形成了三体磨损. 作为第三体的磨屑在接触面间经受反复研磨而变得更细、更圆滑, 因表面积增大, 较之刚脱离母体时更易于氧化, 同时它们在不断摩擦过程中吸收了较多的机械能, 使氧化比例大大增加. 这种磨屑对母体造成磨料磨损的作用较弱, 而它覆盖在摩擦面上起了一种隔离作用, 在很大程度上阻止了对磨面的直接接触, 因而有效

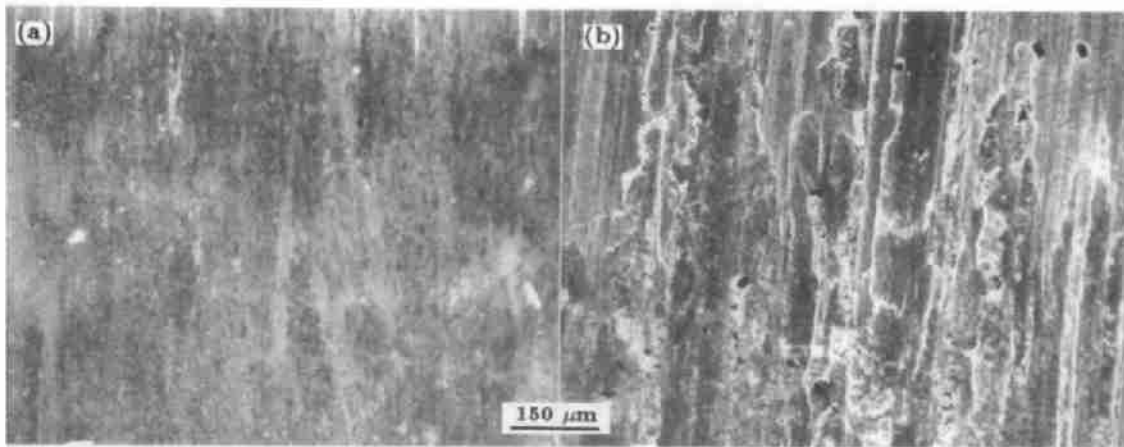


图 5 块磨痕形貌 SEM 照片 (载荷 12.35 N, 滑动距离 628 m)
Fig.5 SEM photographs of the rubbing surface of block (load 12.35 N, sliding distance 628 m)
(a) with magnetic field (b) without magnetic field

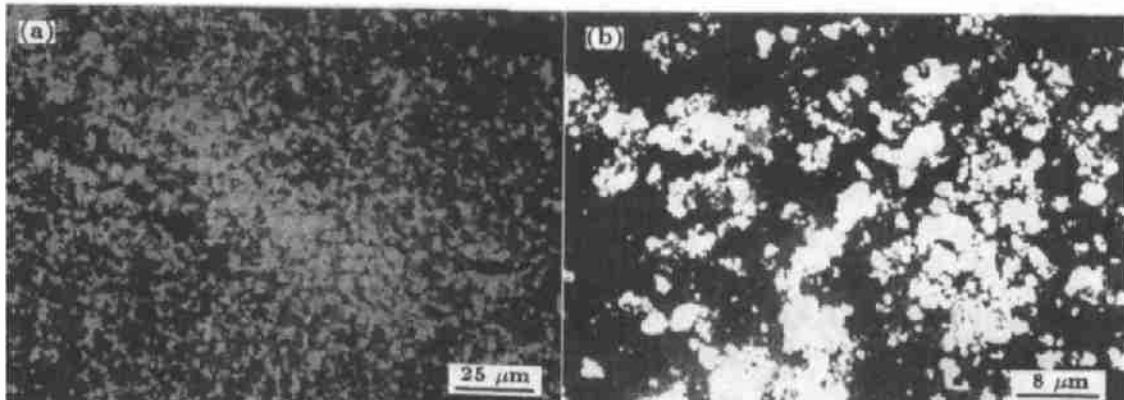


图 6 磨屑形貌 SEM 照片 (载荷 12.35 N, 滑动距离 628 m)
Fig.6 SEM photographs of the wear particles (load 12.35 N, sliding distance 628 m)
(a) with magnetic field (b) without magnetic field

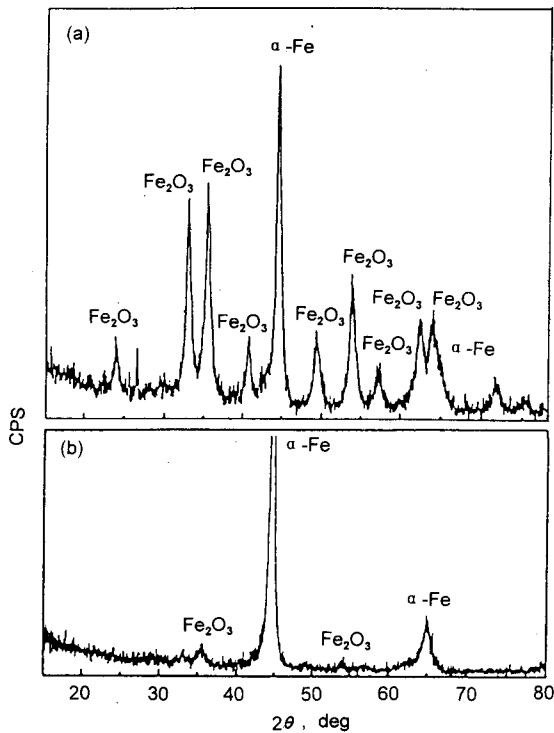


图7 磨屑的X射线衍射图

Fig.7 XRD patterns of wear particles

(a) with magnetic field (b) without magnetic field

地减少粘着和犁削,从而减少磨损。从加磁场磨损时磨屑细小而圆滑的形态,还可推断,它们在摩擦界面可能起类似滚珠或固体润滑剂的作用,减少摩擦和磨损。对比图 5a,b 可看出,因磁场的作用使磨损机制或几种机制的比重发生了变化,未加磁场时,粘着、犁削形貌较明显,使之在稳定阶段摩擦、磨损量较有磁场时高,在最后阶段开始出现严重磨损(见图 2)。当加磁场后,主要表现为氧化磨损机制,因而属轻微磨损。因产生磨屑和随之氧化需要一定时间过程,所以在滑动初始阶段,有、无磁场的摩擦系数和磨损量差别不大,随着滑动距离增加,两者的差别才变得显著(见图 2、3)。

很多研究者^[3,5,9]均注意到磁场导致金属摩擦界面氧化和氧化物增加,但对磁场是如何起作用的却有不同的解释。Kumagai 等^[3,5]提出了磁场可直接促进金属氧化的观点,并设计了几种静态试验试图证明。其一是从氧比其它气体的磁导率高出发,假定磁场促进氧化是由于磁场使空气氧浓度升高,为此测定了磁化铁芯边缘空气中氧的浓度,并和无磁场的空气中氧浓度对比。结果是磁场(250 mT)使空气中氧浓度增加了约 0.07%,与空气含氧约 21%的基数相比,250 mT 的磁通密度使之增加了约 1/300,如此微小的增加对表面氧化的贡献显然也是极微小的。其二是将

1g 钢锉屑置于管式炉中加热,管外绕线圈,通电使管内产生 $H=2.7 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 的磁场。当在 250 °C 下保持 6 h 后,测定氧化质量增加,结果是有磁场的增加质量 4.5 mg,未加磁场的对比试样增加 3.5 mg。即加磁场使氧化增加质量 1 mg 或提高 29%。其三是将两组 10 mm×10 mm×5 mm 厚的钢片分别置于无磁场和永磁体磁场中,后者可在钢片表面产生 49—58.9 mT 的磁通密度。试样在室温下暴露 780 d 后,分别用电子探针测定被氧化的表面积。结果是被磁化的钢片较未被磁化的氧化面积增大 16—27%。这两种实验一个是高温下经 6 h,一个是常温下经几百天,虽然说明磁场可直接促进氧化,但是极缓慢或其作用极微小,难以作为在磨损试验的短时间即出现大量氧化的证明。而本文提出的磁场间接地促进氧化,即磁场吸引磨屑使之在界面不断摩擦过程中吸收机械能,促进其活化进而氧化似更合理。当然 Kumagai 等人证明的磁场在静态下缓慢促进氧化在摩擦时同样起作用,只是其作用比前者小得多。因此磁场促进磨损和磨屑氧化进而使磨损机制转变的作用是多方面的。

关于磁场影响磨损的机制,有的学者还提到了磁场降低表面能^[6],加速摩擦面氧化,或磁场加速位错运动^[7],从而影响摩擦面微裂纹萌生,但未提供实验证据。本文提出的磁场使界面吸附磨屑、促进氧化减少摩擦和磨损的机制并不一定是唯一的,但本文作者认为是主要的。

4 结论

(1) 用钕铁硼永磁体产生的磁场可使中碳钢的磨损量减少近 70%,摩擦系数也明显降低。

(2) 当加 45 mT 的磁场时,可使磨损量降低 55% 以上,进一步增加磁场则仅使磨损量缓慢下降。

(3) 磁场吸引磨损产物至表面,使其经受反复研磨,促进其氧化和细化,从而减少粘着和微切削并改变其磨损机制。

(4) 加磁场后碳钢氧化磨损机制的比例增加,因而降低磨损。

参考文献

- [1] Zaidi H, Pan L, Paulmier D, Robert F. *Wear*, 1995; 181: 799
- [2] Paulmier D, Pan L, Zaidi H. *Proc 4th Int Conf on Technology of Plasticity*, Beijing, 1993: 146
- [3] Kumagai K, Takahashi M, Kamiya O. *Tribology Int*, 1992; 25: 91
- [4] Muju M K, Radhakrishna A. *Wear*, 1980; 58: 49
- [5] Kumagai K. *Bull Jpn Soc Prec Eng*, 1985; 19(1): 43
- [6] Yamamoto Y, Gondo S. *Tribology Int*, 1987; 20: 342
- [7] Muju M K, Ghosh A. *Wear*, 1977; 41: 103
- [8] LI J M. *Metallography on Wear*. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1990: 108
(李建明. 磨损金属学. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 108)
- [9] Hiratsuka K, Sasada T, Norose S. *Wear*, 1986; 110: 251