

DOI: 10.16078/j.tribology.2018149

中碳钢/不锈钢磁场摩擦中磨屑的行为和作用

石红信, 张永振*, 孙超, 宋晨飞, 杜三明

(河南科技大学 高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: 以45钢销/302不锈钢盘摩擦副为研究对象, 采用自制的销-盘摩擦磨损试验机, 研究了直流磁场作用下磨屑在摩擦过程中的行为及其对摩擦磨损性能的作用. 为此分析了有、无磁场作用下磨屑在磨损面上的分布特点, 利用扫描电镜观察了磨屑及45钢销磨损面的形貌, 采用三维形貌仪表征了磨损面特征区域的相对高度. 与无磁场时的摩擦磨损情况相比, 磁场作用下45钢销的磨损量有所增大, 而摩擦系数稍有减小. 摩擦过程中出现了302不锈钢盘向45钢销的材料转移并形成了不连续的转移层, 该转移层相对高度较大, 承担了主要的摩擦磨损并趋于平滑. 磁场作用下45钢销磨损面吸附少量磨屑并使之细化和氧化, 该吸附磨屑在一定程度上减小了摩擦副的摩擦系数, 并阻碍试样之间的材料转移, 从而增加了45钢销的磨损量.

关键词: 磁场; 不锈钢; 中碳钢; 干摩擦; 磨屑; 材料转移

中图分类号: TH115

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2019)02-0188-09

Behaviors and Effect of the Wear Debris during Friction between Medium-Carbon Steel and Stainless Steel with the Magnetic Field

SHI Hongxin, ZHANG Yongzhen*, SUN Chao, SONG Chenfei, DU Sanming

(National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, Henan University of Science and Technology, Henan Luoyang 471023, China)

Abstract: The behavior of wear debris and its effect on the tribological properties of 45 steel pin against 302 stainless steel disk under the magnetic field were investigated using the self-developed pin-disk tribometer. For this reason, the distribution characteristics of wear debris on the worn surface of specimen were analyzed with and without the magnetic field. The morphologies of the wear debris and worn surface of 45 steel pin were characterized by means of scanning electron microscopy. The relative height of various areas on the worn surface was characterized by using 3-D surface profiler. Compared with the case without the magnetic field, the wear of 45 steel pin specimen increased, whereas the friction coefficient of the couple was reduced with the magnetic field. In the process of friction, the material of 302 stainless steel disk was transferred onto the worn surface of 45 steel pin and the discontinuous transfer layer was observed. The transfer layer on the worn surface bore the vast majority of friction and wear and tended to be smooth. A small amount of wear debris was adsorbed on the worn surface of 45 steel pin and became fine and oxidized with the magnetic field. To a certain extent the wear debris adsorbed on the worn surface reduced the friction coefficient and hindered the material transfer between the tribo-couple and then increased the wear of 45 steel pin.

Key words: magnetic field; stainless steel; medium-carbon steel; dry-sliding friction; wear debris; material transfer

Received 11 October 2018, revised 22 November 2018, accepted 29 November 2018, available online 28 March 2019.

*Corresponding author. E-mail: yzzhang@haust.edu.cn, Tel: +86-379-64231723.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51375146).

国家自然科学基金项目(51375146)资助.

随着电磁技术的应用,大量的机电装置(如电磁制动器、直线电机等)中的摩擦副在磁场环境下进行工作.磁场对摩擦副材料的力学性能、磨损产物特征及气氛环境中氧的行为有着重要影响^[1-2],从而导致材料在磁场环境中的摩擦学性能发生一定的改变^[3-8].

为了利用磁场对材料摩擦过程进行主动控制,相关研究者就磁场对金属材料摩擦学性能的作用机制进行了探索性研究.在既往的研究中,磁场促进摩擦副磨损面的氧化^[9-12]与磨屑的吸引^[13-16]被认为是磁场影响材料摩擦学性能的两个重要因素.一些研究显示磨损面氧化也是和磨屑密不可分的^[17-20].这表明磨屑是上述两个影响因素中的关键环节.因此,有必要阐明磨屑在摩擦磨损中的角色.为了对比分析磨屑的影响,一些去除磨屑的措施被采用.Varenberg等^[21]在试样表面预制直径为100~120 μm的微孔使磨屑从磨损面去除,但磁场作用下磨损表面吸引有大量的磨屑,使得微孔易于填满从而削弱了去除磨屑的效果;Mosleh等^[22]在盘试样表面预制径向沟槽用于在其旋转过程中甩掉磨屑,而磁场对磨屑产生较强的吸附力,径向沟槽无法完全甩掉磨屑;Xu等^[23]和Sheasby等^[24]采用机械力或磁场力清除磨损面上的磨屑,但采用机械力去除方法使磨屑在摩擦副周边飞散而影响环境,而采用磁场力的方法则使两种磁场之间会产生相互干扰.

不锈钢属于顺磁性材料,置于磁场中磁化程度较弱,在摩擦过程难以吸附磨屑.因此,该研究采用中碳钢销/不锈钢盘摩擦副以利用不锈钢的磁性特点去除摩擦过程中的磨屑,在磁场作用下进行摩擦磨损试验,并结合前期对中碳钢销/中碳钢盘磁化摩擦磨损特性的研究^[2,20,25],对磨屑在摩擦过程的行为进行分析,以探讨其在摩擦磨损过程中的作用.

1 试验部分

试验采用自制的销/盘摩擦磨损试验机,其摩擦副装配、运动及产生磁场的主要部分如图1所示.盘试样2在垂直平面内以转速 n 旋转,而销试样3固定不动,从而实现了销/盘滑动摩擦磨损试验.通过在线圈5中施加直/交流电从而在销、盘试样的接触面上产生垂直方

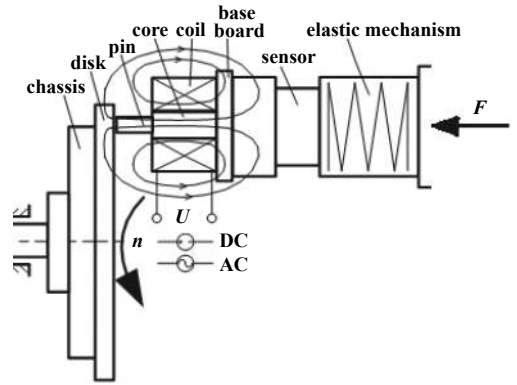


Fig. 1 Main parts of the friction test equipment

图1 摩擦磨损试验设备主要部分示意图

向的稳恒直/交流磁场,本试验施加到线圈的电流为直流电从而在销、盘试样的接触面上产生所需的稳恒直流磁场.

摩擦副类型为45钢销/302不锈钢盘,其中销试样规格为 $\phi 10\text{ mm}\times 40\text{ mm}$;盘试样规格为 $\phi 165\text{ mm}\times 10\text{ mm}$;销试样和盘试样相对运动的回转半径为72.5 mm.试验材料302不锈钢为退火态,45钢为正火态,其化学成分列于表1中.

试验参数如下:外加载荷为100 N,摩擦速度为0.54 m/s,摩擦时间为1 800 s,磁场强度分别为8.7、17.4和34.8 kA/m.为了对比分析,对摩擦副进行了无磁场时的摩擦试验,除了磁场强度,其他试验参数均相同.

试验前用WLM-TB60型退磁器对销、盘试样和摩擦试验设备中固定试样的相关部件进行退磁处理,对销和盘试样预摩擦端面用1 000#砂纸进行打磨以去除表面异物,然后用丙酮清洗、风干后安装到试验机上.摩擦试验机的试样固定装置靠近试样侧表面的位置刻有一标志线,试验前使用电刻笔在试样侧表面做一标志,安装时使两者的标志线对正,以保证试样多次安装时其位置一致.

用电子天平对摩擦试验前、后的销、盘试样进行称重.采用配有能谱分析仪(EDS)的JSM-5610LV型扫描电子显微镜检测销试样磨损面和磨屑的形貌及化学成分;采用Nanofocus AG型三维形貌仪测试、分析

表1 302不锈钢和45钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 302 stainless steel and 45 steel

Material	Weight fraction/%							
	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Fe
302 stainless steel	0.11	17.15	8.19	1.18	0.45	0.035	0.016	Balance
45 steel	0.44	-	-	0.60	0.25	0.04	0.04	Balance

销试样磨损面的形貌特征;利用XRD射线衍射仪检测销试样磨损面的物相结构. 销、盘试样磨损量的计算公式为 $\Delta K = K_1 - K_2$. 其中 K_1 为摩擦试验前销或盘的重量(g), K_2 为摩擦试验后销或盘的重量(g).

2 结果与讨论

2.1 磨损量和销位移

对45钢销/302不锈钢盘摩擦副进行阶段性摩擦试验(每300 s为一阶段), 图2描述了45钢销试样磨损量随摩擦时间的变化. 曲线中数据是3次摩擦试验的平均值, 同一试验条件下试样磨损量一致性较高, 偏差范围在 $\pm 5\%$ 以内. 摩擦时间1 000 s以前, 磁场(8.7、17.4和34.8 kA/m)作用下的磨损量小于无磁场作用下的磨损量;而当摩擦时间约超过1 000 s时, 磁场(三种磁场强度)作用下的磨损量大于无磁场作用下的磨损量;并且在试验摩擦时间内, 无磁场作用下销试样的磨损量随时间的增加基本上呈先增加后减小的趋势, 转变时间点为900 s, 而磁场作用下销试样的磨损量随时间大致呈指数关系增长.

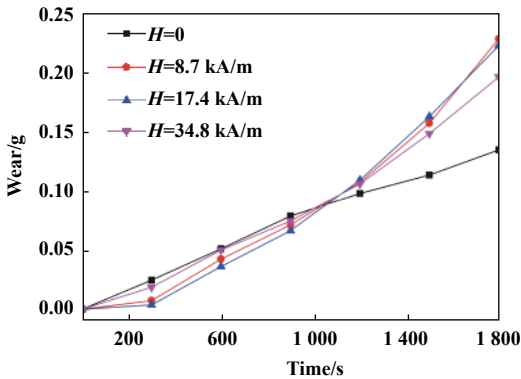


Fig. 2 Stage wear of 45 steel pin

图2 45钢销的阶段磨损量

对摩擦副在 $H=0$ 和17.4 kA/m作用下进行摩擦时间为1 800 s(预摩时间为600 s)的连续摩擦试验. 有、无磁场条件下45钢销试样的磨损量分别为0.250 1 g和0.102 0 g, 可见销试样在磁场作用下其磨损量大于其在无磁场作用下的磨损量, 磁场导致45钢销磨损量的增加率约为145.2%. 因此磁场显著增加了该摩擦副中45钢销的磨损.

值得注意的是: 以上试验结果和磁场作用下45钢销/45钢盘摩擦副中45钢销磨损量的影响规律相反. 磁场作用下45钢销/45钢盘摩擦副的45钢销的磨损量显著小于无磁场作用下该摩擦副的45钢销的磨损量, 即磁场对45钢销有明显的减磨作用^[8, 25].

图3为摩擦副在整个连续摩擦过程中(预摩时间为600 s)的销位移对摩擦时间的变化曲线. 此处销位移指的是在载荷作用下由于磨损造成销试样沿轴向的位移. 根据销位移-摩擦时间曲线的斜率大小, 无磁场作用下该曲线可分为 D_{01} 和 D_{02} 两个阶段. 在 D_{01} 阶段, 销位移-时间曲线的斜率非常大, 其位移随摩擦时间增加快速增长, 属于摩擦过渡阶段;在 D_{02} 阶段, 销位移-时间曲线的斜率有所减小, 但其位移随摩擦时间增加仍以一定速率增长, 属于摩擦稳定阶段, 此阶段试样的磨损较为严重. 而在磁场作用下, 销位移-时间曲线可分为 D_{H1} 、 D_{H2} 和 D_{H3} 三个阶段. 其前两个阶段 D_{H1} 和 D_{H2} 和无磁场作用时的销位移-时间曲线变化特点基本相同, 分别属于过渡阶段和稳定阶段(试样的磨损也较为严重), 不同的是 D_{H1} 持续时间小于 D_{01} 的持续时间, 且 D_{H2} 段斜率稍小于 D_{02} 段的斜率. 有、无磁场作用下的销位移-时间曲线显著不同的是: 当摩擦时间约大于800 s时, 销位移-时间曲线进入第三个阶段 D_{H3} , 该阶段的曲线斜率明显增大, 销位移随摩擦时间增加快速增长, 摩擦过程进入更为严重的磨损阶段.

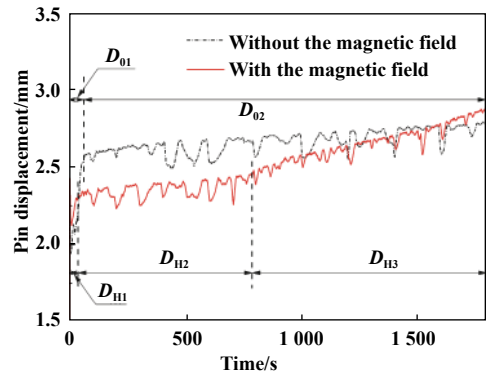


Fig. 3 Pin displacement with and without magnetic field

图3 有、无磁场作用下的销位移

2.2 摩擦系数

图4为45钢销/302不锈钢盘摩擦副有、无磁场时的摩擦系数随摩擦时间的变化. 可以看出: 有、无磁场作用下的摩擦系数随摩擦时间的变化特点基本相似, 而磁场作用下的平均摩擦系数相比于无磁场作用时的平均摩擦系数稍有减小, 由0.447减小为0.417. 对于45钢销/45钢盘摩擦副而言, 其在有磁场情况下的摩擦系数稍大于无磁场情况下的摩擦系数^[25].

2.3 磨屑分布及磨损面宏观特征

有、无磁场作用下45钢销/302不锈钢盘摩擦副磨损面及磨屑分布特征如图5所示. 由于三种磁场强度条件下的磨屑特征较相似, 这里仅以 $H=17.4$ kA/m作

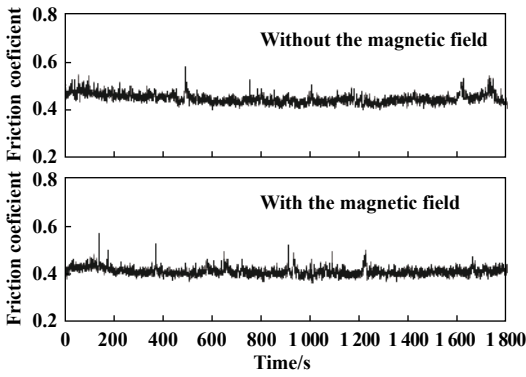


Fig. 4 Dynamic friction coefficient with and without magnetic field

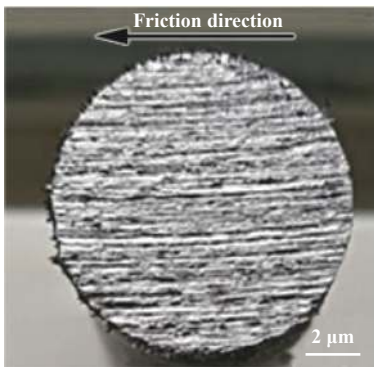
图 4 有、无磁场作用下的动态摩擦系数

用下磨屑为例进行探讨. 无磁场作用下销、盘磨损面上没有观察到吸附磨屑, 且两者的磨损面均呈金属亮白色, 如图5(a~b)所示; 该条件下在摩擦过程中收集到的磨屑呈灰白色, 这说明摩擦过程中销、盘磨损面和产生的磨屑没有发生明显的氧化. 而磁场作用下45钢销磨损面上观察到吸附了少量磨屑, 其磨损面边缘区域吸附有较多的磨屑, 特别是沿摩擦方向的两侧区域, 且磨屑呈黑色, 其磨损面呈现金属亮白色, 如图5(c)

所示; 302 不锈钢盘磨损面没有观察到吸附磨屑, 如图5(d)所示, 这主要和302不锈钢的磁特性有关. 该钢在磁场中的磁化程度很弱, 从而对其表面磨屑的吸引力较弱, 不足以使磨屑吸附在其表面. 另外, 302 不锈钢盘的磨损面也呈现金属亮白色, 这说明销、盘磨损面在该条件下也没有发生明显的氧化; 而摩擦过程中所产生的磨屑呈黑色, 说明该条件下的磨屑在摩擦过程中发生了一定程度的氧化.

在前期有关45钢销/45钢盘磁化摩擦磨的研究中, 在45钢销磨损面观察到有大量的磨屑被吸附, 且磨损面呈现黑色+棕红色两种颜色^[25]. 与本研究相比, 摩擦副磨损面的磨屑分布和颜色特征存在着明显的不同, 这被认为是磁力线在摩擦区域分布的不同造成的, 具体分析见下文.

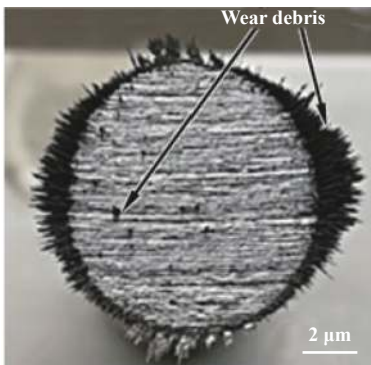
图6(a)为无磁场作用下磨屑形貌的SEM照片, 由图中可以看出: 磨屑主要呈片状, 平均尺寸在几十微米左右(如d1), 除此之外, 磨屑中也有少量的微米级的细小磨屑(如d2). 对部分磨屑进行EDS分析发现: 磨屑表面氧的原子百分数为5.39%, 磨屑表面的氧含量较低. 这说明摩擦副磨损面的金属在摩擦过程中形成的



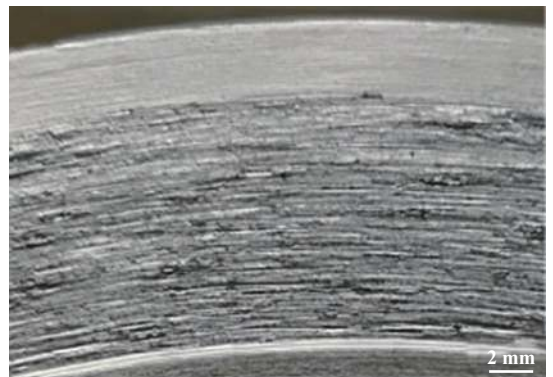
(a) Pin without magnetic field



(b) Disk without magnetic field



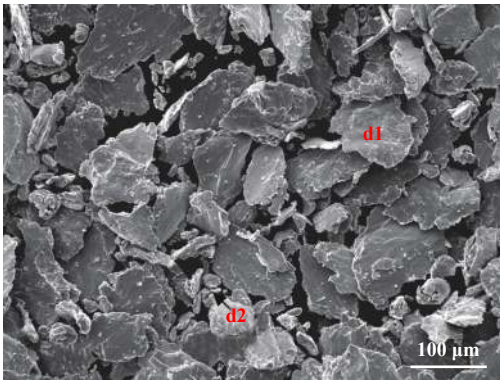
(c) Pin with magnetic field



(d) Disk with magnetic field

Fig. 5 Worn surface and the distribution of wear debris with and without magnetic field

图 5 有、无磁场作用下试样磨损面及其磨屑分布



(a) Without magnetic field

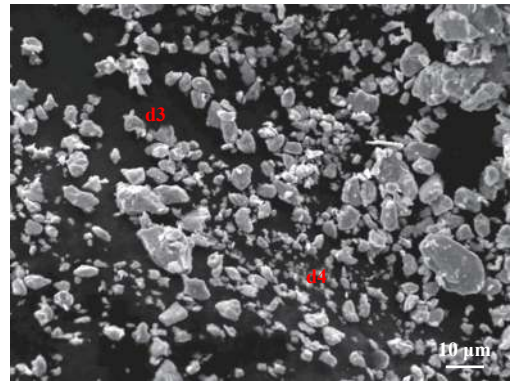
(b) With magnetic field ($H=17.4$ kA/m)

Fig. 6 SEM micrographs of wear debris

图6 有、无磁场作用下磨屑形貌的SEM照片

磨屑大部分直接从摩擦区域脱落,没有反复参与到摩擦过程中,其表面氧化程度较小.

图6(b)是磁场作用下磨屑形貌的SEM照片.磨屑呈细小颗粒状,大部分磨屑尺寸在 $5\ \mu\text{m}$ 左右(如d3),甚至更小(如d4),远小于无磁场作用下磨屑的尺寸.对部分磨屑进行EDS分析发现:磨屑表面氧的原子百分数达到15.2%,是无磁场时磨屑氧含量的2.82倍,这说明磨屑在摩擦过程中产生了明显的氧化.因此,外部磁

场促进了磨屑的氧化和细化.可以推测,上述有、无磁场作用下磨屑的理化性能和行为特点可能是导致45钢销/302不锈钢盘摩擦副在有、无磁场时摩擦学性能变化的主要原因.

2.4 销试样磨损面的SEM形貌及化学成分

图7(a)和(b)为无磁场时销试样磨损面形貌的SEM照片及对应磨损面的Cr元素的面扫描.根据其颜色深浅,45钢销磨损面可分为深色区和浅色区两种特

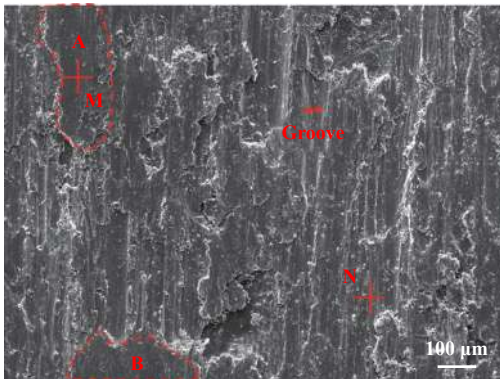
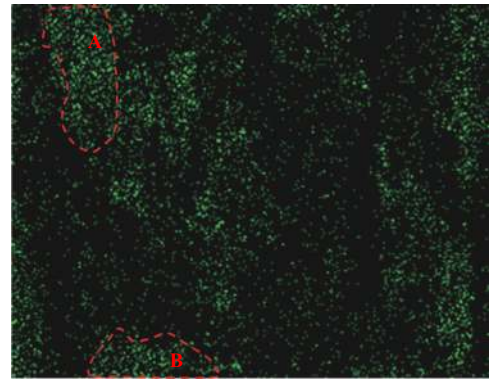
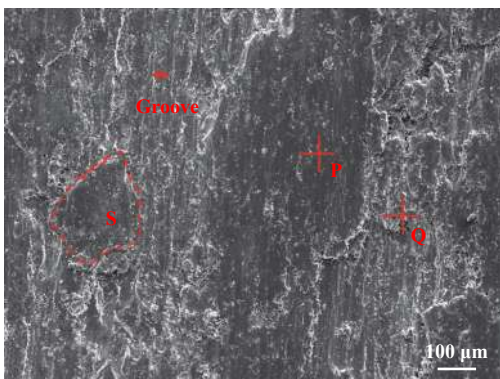
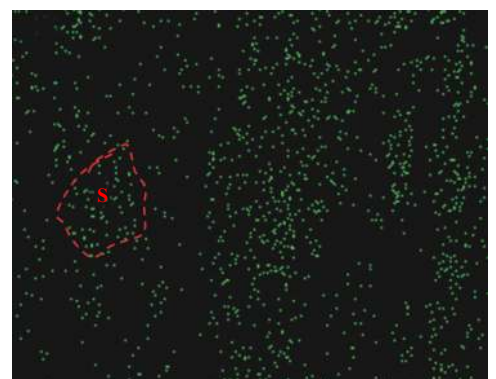
(a) SEM morphology ($H=0$)(b) Mapping of Cr ($H=0$)(c) SEM morpholog ($H=17.4$ kA/m)(d) Mapping of Cr ($H=17.4$ kA/m)

Fig. 7 SEM morphology and mapping of element Cr on the pin worn surface

图7 销试样磨损面SEM形貌及面扫描

征区域. 对深色区域中的M区及浅色区域中的N区进行EDS成分分析, 其结果列于表2中. M区的Cr原子百分数为9.56%, Ni原子百分数为1.59%; 而N区的Cr和Ni含量小于其在M区的含量. 图7(b)为对应图7(a)中销试样磨损面中的Cr元素面扫描结果, 可以看出, 图7(a)中深色区域的Cr含量较高, 例如图7(a)和图7(b)虚线包围的A区和B区. 因此, 可以认为磨损面中深色区域是在摩擦过程中摩擦副之间出现了302不锈钢盘向45钢销磨损面的材料过渡形成的. 此外, 45钢销试样的磨损面上分布有大小不一、形状各异的犁沟, 且犁沟一般位于浅色区域, 如图7(a)所示.

表2 销试样磨损面成分分析

Table 2 Composition of pin worn surface

Area	Atomic fraction/%			
	O	Cr	Ni	Fe
M	8.18	9.56	3.48	78.77
N	6.36	1.59	0.68	91.37
P	6.28	5.12	1.71	86.89
Q	13.59	2.12	1.89	82.4

图7(c)和图7(d)分别为磁场作用下销试样磨损面形貌的SEM照片及对应磨损面的Cr元素的面扫描. 和无磁场作用的销试样磨损面相似, 45钢销磨损面也可根据其颜色特征分为深色区域和浅色区域两种类型. 对深色区域中的P区及浅色区域中的Q区进行EDS成分分析, 其结果列于表2中. P区的Cr原子百分数为5.12%, Ni原子百分数为1.71%, 而Q区的Cr含量小于其在P区的含量. 图7(d)为对应图7(c)中销试样磨损面中Cr元素的面扫描结果. 可以看出: 图7(c)中深色区的Cr含量较高, 例如图7(c)和图7(d)虚线包围的S区. 因此可以认为磨损面中的深色区域在摩擦过程中摩擦副也出现了302不锈钢向45钢销磨损面的材料过渡. 同样, 该销试样磨损面也分布着大小不一、形状各异的犁沟, 而犁沟一般位于浅色区.

值得注意的是: 有、无磁场作用下45钢销试样磨损面存在不同之处. 第一, 无磁场作用下销磨损面中深色区的Cr元素含量高于磁场作用下销磨损面中的深色区的Cr元素含量, 另外从面扫描结果也可以定性看出无磁场作用下销试样磨损面Cr元素总体含量较高; 第二, 磁场作用下磨损面上的犁沟宽度小于无磁场作用下磨损面上的犁沟宽度, 这主要是由于磁场作用下磨屑尺寸小于无磁场作用下的磨屑尺寸所致.

对有、无磁场作用下的销试样磨损面进行XRD检测, 所得结果如图8所示. 由图8可以看出: 第一, 销试

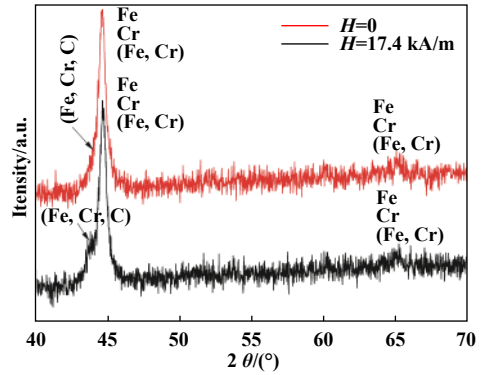


Fig. 8 Phase analysis of pin worn surface

图8 销试样磨损面物相分析

样磨损面除了检测到45钢基体的Fe外, 还检测到了Cr、(Fe, Cr)和(Fe, Cr, C)等相. 值得注意的是: 无磁场作用时销试样磨损面上(Fe, Cr, C)相含量较多, 而磁场作用下销试样磨损面上该相含量较少(该相的峰不十分明显); 第二, 有、无磁场两种情况下销试样磨损面均未检测出任何Fe的氧化物, 这也是销试样磨损面摩擦后均呈金属亮白色的原因.

在45钢销/45钢盘磁化摩擦中, 销磨损面检测到了Fe的不同种类氧化物^[2, 25], 而本研究中45钢销磨损面上却没有检测到Fe的氧化物, 这说明试样磨损面吸附有大量的磨屑能促使其氧化.

图9为磁场作用下45钢销磨损面的三维形貌及其CC'截面的轮廓. 图9(a)中的黄色部分对应于图7(c)中深色区域, 其他区域相对于图7(c)中浅色区域, 图9(b)为图(a)三维形貌中CC'的截面轮廓图. 可以看出: 45钢销磨损面深色区域比浅色区域的相对高度大, 且深色区域比浅色区域平坦, 深色区域的高度差基本在10 μm左右; 深色区域中的犁沟尺寸1明显小于浅色区域的犁沟尺寸2. 这说明在摩擦过程中摩擦副磨损面的深色区域承担了大部分的摩擦磨损且该条件下的细小磨屑在该区域引起了磨粒磨损.

2.5 分析与讨论

本试验中所用销材料45钢为铁磁性材料, 其相对磁导率为100~583^[25], 它在磁场中的磁化程度较大, 由于销安装固定在通电线圈的铁芯中, 直流电通过线圈(带铁芯)产生的直流磁场磁力线主要集中于铁磁性材料45钢销试样中, 且其周缘附近磁力线更为集中^[25]. 摩擦过程中磨损面仅在微凸峰局部发生真正的物理接触^[4], 磨损面其他区域(非接触区)则被空气所覆盖. 302不锈钢为顺磁性材料, 具有高磁阻性, 其相对磁导率稍大于但基本接近于1(空气的相对磁导率)^[26]. 故当

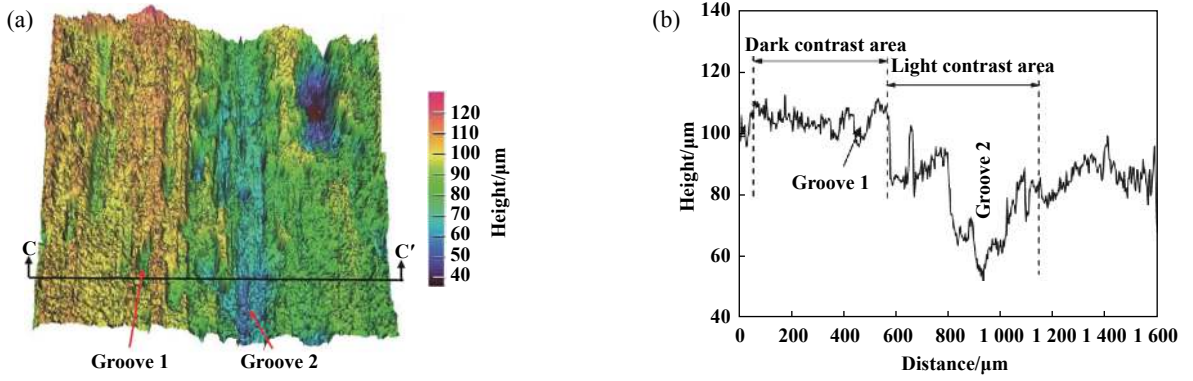


Fig. 9 Three-dimensional morphology and section profile of pin worn surface

图 9 45钢销磨损面三维形貌及截面轮廓($H=17.4$ kA/m)

磁力线穿过45钢销到达磨损面时,大部分磁力线在磨损面的非物理接触区发生变向进入摩擦区域的空气并从盘试样穿出.因此,该摩擦副靠近摩擦中心区域的磁场强度较为均匀.除此之外,有少量的磁力线通过45钢销在磨损面微凸体的真实物理接触点/面发生聚集并直接进入302不锈钢盘试样中,该局部区域的磁场强度有所增大.由于销试样中磁力线在其周缘附近磁力线更为集中,这会造成摩擦区域周边附近区域[见图10(a)中的A、B]的磁场强度大于靠近摩擦中心区域的磁场强度.此条件下的磁力线分布如图10(a)所示.

图10(b)为磁场作用下摩擦副在摩擦过程中45钢销试样磨损面上的磨屑分布示意图.根据图10(a)磁力线分布特征,摩擦区域周边附近区域[见图10(a)中的A、B]的磁场强度大于靠近摩擦中心区域的磁场强度,这造成了从45钢销中心区域到其周边边缘区域增大的磁场强度梯度 ΔH .该磁场强度梯度使摩擦过程中产生的铁磁性磨屑受到指向销试样周边的磁吸力作用 F ,在该磁吸力的作用下磨屑将沿着磨损面向销

试样周边附近运动,但所受磁吸力方向不平行于犁沟的磨屑运动时会受到犁沟两侧金属(虚线所示)的阻碍而停止,只有所受磁吸力方向平行于磨损面犁沟的磨屑才有可能沿着犁沟向销试样边缘区域运动.从而磨屑主要集中在销试样磨损面边缘沿摩擦方向的两侧区域,如图10(b)中的d6.此外,有少量的磁力线垂直穿过摩擦副直接接触的微凸峰并在此处有所集中,此区域附近的磨屑受到指向微凸峰的磁吸力作用从而被吸附且集中在此处,结果在磨损面上有少量的且呈点状分布的磨屑,如图10(b)中的d5.值得注意的是:当摩擦试验结束销、盘试样分离后,摩擦副之间的磨屑均吸附到45钢销磨损面上,如图5(d)和(e)所示.这主要是由于去掉磁场后45钢销的剩磁远大于302不锈钢盘中的剩磁所导致的.相比较而言,无磁场作用下销、盘试样之间虽然存在摩擦磁化引起的磁场,但该磁场相对较弱^[27],所产生的磁吸力不足以吸附磨屑,因此,摩擦过程产生的磨屑在重力的作用下或者随盘试样运动直接从摩擦区域脱落而造成摩擦区域不存在吸附磨屑,如图5(a~b)所示.

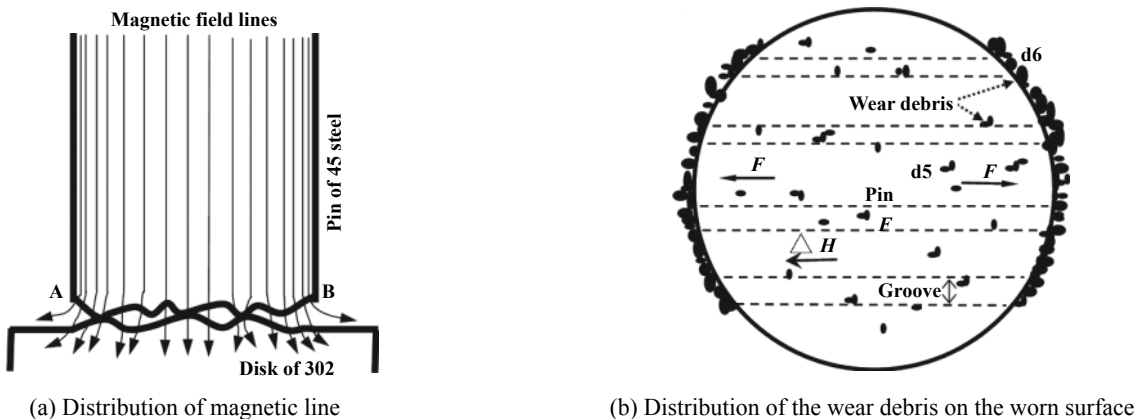


Fig. 10 Distribution of the magnetic field lines and the wear debris

图 10 磁力线及磨屑分布示意图

摩擦过程中严重磨损面的微凸体真实物理接触处的闪温可能超过材料的软化温度甚至达到其熔化温度,在此情况下试样材料的表面强度仅为常温下材料强度的1/10甚至更低^[28-30]。因此,无论摩擦副的两种试样材料的硬度如何,均有可能在严重磨损过程中发生局部熔化或者处于高塑性状态使得摩擦副材料相互转移,这也是该研究中在有、无磁场作用下45钢销磨损面上局部区域(深色区域)检测出302不锈钢成分Cr和Ni元素的主要原因。

磨损面微凸体中溶质原子的浓度可根据Thomson-Freundlich方程^[31]进行计算:

$$C_i = C_i(\infty) \exp\left(\frac{2\sigma M}{rRT\rho}\right)$$

式中: C_i 为微凸体中溶质原子的浓度; $C_i(\infty)$ 为基体材料的溶质原子浓度; σ 为微凸体的表面能; r 为微凸体的平均半径; T 为摩擦面温度; ρ 为溶质原子的密度; M 为溶质原子的原子量; R 为气体常数。

由于摩擦过程中试样磨损面承受热-力的作用,这使得磨损面微凸体的表面能 σ 增加^[32],且C原子的扩散系数较大,因此45钢销磨损面微凸体中的C元素的含量有所升高。这样45钢销磨损面上的转移层主要含有元素Cr、Fe和C(C含量大于45钢基体),这三种元素可能生成Cr-Fe-C系碳化物,该系碳化物使得45钢销磨损面上的转移层(深色区域)的耐磨性较45钢基体有所提高^[33],这就是前述转移层(深色区域)能承担大部分摩擦磨损且其表面变得平滑的主要原因。

磁场作用下,在摩擦过程中摩擦副之间吸附了部分细小的磨屑,并且有较多的磨屑从摩擦区域沿摩擦方向向销试样周边运动,上述这些磨屑有可能在摩擦副之间发生滚动,磨屑的滚动造成了磁场作用下的平均摩擦系数相比于无磁场作用下的平均摩擦系数有所减小。同时,摩擦副之间存在的磨屑和从摩擦区域向销周边运动的磨屑在一定程度上能隔离销、盘且减小了它们直接接触的程度,从而弱化了摩擦副之间材料的相互转移。磨屑这种隔离作用造成了磁场作用下的销试样磨损面上Cr含量小于无磁场作用下销试样磨损面上的Cr含量。Cr含量低,45钢销磨损面转移层中生成的Cr-Fe-C系碳化物量也有所减少,使得转移层的耐磨性降低。这可能是磁场作用下销试样磨损量大于无磁场作用下销试样磨损量的主要原因。

磁场作用下45钢销/45钢盘摩擦磨损研究显示:在摩擦副之间吸附有大量细小的磨屑,且随摩擦时间的延长促使销磨损面逐渐形成一层稳定的氧化物,从而

摩擦过程达到稳定阶段并进入轻微磨损过程^[25]。在本研究的45钢销/302不锈钢盘摩擦磨损试验中,在盘磨损面上没有吸附磨屑、摩擦副间仅有少量磨屑被观察到,并且销磨损面始终没有发生显著氧化、摩擦磨损过程没有显现出轻微磨损特征。从而可以得出:摩擦过程中大量磨屑被吸附到盘磨损面及摩擦副之间是引起销磨损面氧化的充分条件,磨屑也是磁场影响材料摩擦磨损特性的载体。

3 结论

a. 45钢销磨损面仅在磁化摩擦过程中吸附少量的磨屑,而顺磁性的302不锈钢盘磨损面在有、无磁场作用下均无吸附磨屑。

b. 与无磁场时的情况相比,磁场作用下45钢销/302不锈钢盘摩擦副的平均摩擦系数有所减小,连续摩擦时45钢销的磨损量有所增加。

c. 摩擦过程中,45钢销的磨损面没有形成氧化层而发生了302不锈钢盘向45钢销材料转移并形成了耐磨性较高的转移层。

d. 磁场使摩擦副之间吸附有少量磨屑并使之氧化和细化,该部分磨屑在一定程度上隔离摩擦副并使45钢销磨损面转移层中Cr元素含量减少从而弱化了转移层的耐磨性。

e. 摩擦过程中大量磨屑被吸附到盘磨损面及摩擦副之间是引起销磨损面氧化的充分条件,也是磁场影响材料摩擦磨损特性的载体。

参考文献

- [1] K Kumagai, K Suzuki, O Kamiya. Study on reduction in wear due to magnetization[J]. *Wear*, 1993, 162-164: 196-201. doi: 10.1016/0043-1648(93)90501-C.
- [2] H Han, S Du, Y Zhang, et al. Effect of DC magnetic field in friction and wear properties of 45 steel at different velocities[J]. *Tribology Letters*, 2016, 64: 38. doi: 10.1007/s11249-016-0754-z.
- [3] K Hiratsuka, T Sasada, S Norose. The magnetic effect on the wear of metals[J]. *Wear*, 1986, 110: 251-261. doi: 10.1016/0043-1648(86)90102-X.
- [4] Y Wei, Y Zhang, Y Chen, et al. Impact of material permeability on friction and wear properties under the interference of DC steady magnetic field[J]. *Tribology International*, 2013, 57: 162-169. doi: 10.1016/j.triboint.2012.07.019.
- [5] H Zaidi, L Pan, D Paulmier, et al. Influence of a magnetic field on the wear and friction behaviour of a nickel/XC 48 steel couple[J]. *Wear*, 1998, 181-183: 799-804.
- [6] HY Bi, ZJ Wang. Wear of medium carbon steel in the presence of Nd-Fe-B permanent magnetic field[J]. *Materials Letters*, 2003, 57:

- 1752–1755. doi: [10.1016/S0167-577X\(02\)01063-7](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01063-7).
- [7] A F Yetim, H Kovaci, M Aslan, et al. The effect of magnetic field on the wear properties of a ferromagnetic steel[J]. *Wear*, 2013, 301: 636–640. doi: [10.1016/j.wear.2012.11.077](https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.11.077).
- [8] Dong Xianglin, Jian Xiaogang, Bi Hongyun, et al. Effect of a magnetic field on sliding friction and wear of medium carbon steel[J]. *ACTA Metallurgica Sinica*, 1999(6): 577–580 (in Chinese) [董祥林, 简小刚, 毕红运, 等. 磁场对中碳钢滑动摩擦磨损的影响[J]. *金属学报*, 1999(6): 577–580].
- [9] D Paulmier, H Zaidi, R Bediri, et al. Steel surface modifications in magnetised contact[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1995, 76-77: 583–588. doi: [10.1016/0257-8972\(95\)02607-X](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02607-X).
- [10] H Zaidi, A Senouci. Influence of magnetic field on surface modification and the friction behavior of sliding of sliding couple aluminium/XC 48 steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1995, 120-121: 653–658.
- [11] KJ Chin, H Zaidi, M T Nguyen, et al. Tribological behavior and surface analysis magnetized sliding contact XC48 steel/ XC48 steel[J]. *Wear*, 2001, 250: 470–476. doi: [10.1016/S0043-1648\(01\)00658-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00658-5).
- [12] H Zaidi, K J Chin, J Frene. Analysis of surface and subsurface of sliding electrical contact steel/steel in magnetic field[J]. *Surface and Coating Technology*, 2001, 148: 241–250. doi: [10.1016/S0257-8972\(01\)01355-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01355-X).
- [13] T A. Stolarski, Y Maiida Influence of magnetic filed on wear in high frequency reciprocating sliding contacts[J]. *Tribology International*, 2001, 44: 1004–1013.
- [14] TA Stolarski, Y Makida. Influence of permanent magnetic field on wear performance of dry sliding contacts[J]. *Wear*, 2001, 271: 1109–1123.
- [15] J Jiang, Y Tian, Y Meng. Role of external magnetic filed during friction of ferromagnetic materials[J]. *Wear*, 2011, 271: 2991–2997. doi: [10.1016/j.wear.2011.07.003](https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.07.003).
- [16] K Hiratsuka, T Sasada. Wear of metals in a magnetic field[J]. *Wear*, 1993, 160: 119–123. doi: [10.1016/0043-1648\(93\)90412-F](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90412-F).
- [17] M Amirat, H Zaidi, A Senouci. Nucleation and formation of oxide film with the magnetic field on dry sliding contact of ferromagnetic steel[J]. *Lubrication Science*, 2011, 23: 19–31. doi: [10.1002/ls.v23.1](https://doi.org/10.1002/ls.v23.1).
- [18] K J Chin, H Zaidi, T Mathia. Oxide film formation in magnetized sliding steel/steel contact-analysis of the contact stress field and film failure mode[J]. *Wear*, 2005, 259: 477–481. doi: [10.1016/j.wear.2005.02.122](https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.122).
- [19] H Zaidi, M Amirat, J Frene T Mathis, et al. Magnetotribology of ferromagnetic/ ferromagnetic sliding couple[J]. *Wear*, 2007, 263: 1518–1526. doi: [10.1016/j.wear.2007.01.081](https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.081).
- [20] H Han, Y Gao, Y Zhang, et al. Effect of magnetic field distribution of friction surface on friction and wear properties of 45 steel in DC magnetic field[J]. *Wear*, 2015, 328-329: 422–435. doi: [10.1016/j.wear.2015.02.062](https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.062).
- [21] M Varenberg, G Halperin, I Etsion. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear[J]. *Wear*, 2002, 252: 902–910. doi: [10.1016/S0043-1648\(02\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00044-3).
- [22] M Mosleh, B A Khemet. A surface texturing approach for cleaner disc brakes[J]. *Tribology Transactions*, 2006, 49: 279–283. doi: [10.1080/05698190600639913](https://doi.org/10.1080/05698190600639913).
- [23] J Y Xu, J L Mo, B Huang, et al. Reducing friction-induced vibration and noise by clearing wear debris from contact surface by blowing air and adding magnetic field[J]. *Wear*, 2018, 408-409: 238–247. doi: [10.1016/j.wear.2018.05.018](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.018).
- [24] J S Sheasby, J H Vandergeest. Debris control in dry wear testing[J]. *Wear*, 1981, 73: 283–294. doi: [10.1016/0043-1648\(81\)90296-9](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90296-9).
- [25] Han Hongbiao. Study on coupling mechanism of dry friction in DC magnetic field[D]. Northwestern Polytechnical University, 2015(in Chinese) [韩红彪. 直流磁场干摩擦的耦合作用机制研究[D]. 西北工业大学, 2015].
- [26] Dong Xiuwen, Li Yan, Chen Shulan, et al. Measurement of permeability of weak magnetic austenitic stainless steel[J]. *Inspection and Quarantine Science*, 2004, 14(3): 51–53 (in Chinese) [董秀文, 李岩, 陈淑兰, 等. 弱磁性奥氏体不锈钢磁导率的测量[J]. *检验检疫科学*, 2004, 14(3): 51–53]. doi: [10.3969/j.issn.1674-5354.2004.03.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5354.2004.03.016).
- [27] K Zhao, J Fan, F Gao, e al. Research on trio-magnetization phenomenon of ferromagnetic materials under dry reciprocating sliding[J]. *Tribology International*, 2015(92): 146–153.
- [28] W D Marscher. A critical evaluation of the flash-temperature concept[J]. *ASLE Transactions*, 1981, 25(2): 157–174.
- [29] Zhu Baoliang, Yang Zhaoxiong, Liu Jiajun. The measurement of frictional temperature and its effect in sliding contact[J]. *Solid Lubrication*, 1989, 9(1): 23–29 (in Chinese) [朱宝亮, 杨兆雄, 刘家浚. 滑动接触中摩擦温度的测定及其影响[J]. *固体润滑*, 1989, 9(1): 23–29].
- [30] G Sutter, N Ranc. Flash temperature measurement during dry friction process at high sliding speed[J]. *Wear*, 2010, 268: 1237–1242. doi: [10.1016/j.wear.2010.01.019](https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.01.019).
- [31] Xu Zuyao. Thermodynamics of metallic materials[M]. Beijing: Science Press, 1981: 242(in Chinese) [徐祖耀. *金属材料热力学* [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 242].
- [32] Zhang Renjie, Zhu Baoliang, Liu Jiajun, et. al Mutual transfer of materials for dry sliding of brass against stainless steel[J]. *Solid Lubrication*, 1990, 10(3): 178–184 (in Chinese) [张人佺, 朱宝亮, 刘家浚, 等. H70黄铜-0Cr18Ni9不锈钢滑动磨损表面材料的相互转移之研究[J]. *固体润滑*, 1990, 10(3): 178–184].
- [33] Wang Qingbao, Wang Zhihui, Li Shimin. Microstructures and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys with high carbon content[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(6): 119–123 (in Chinese) [王清宝, 王智慧, 李世敏. Fe-Cr-C系高碳耐磨堆焊合金组织及性能[J]. *焊接学报*, 2004, 25(6): 119–123]. doi: [10.3321/j.issn:0253-360X.2004.06.032](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-360X.2004.06.032).