

ZDPH 低合金钢表面第三体形成及演变的实验研究

李志强, 韩建民, 李卫京, 潘利科, 杨智勇

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 选用自主研制的摩擦制动用高纯净低合金钢(ZDPH 钢)及铜基粉末冶金材料为配对摩擦副材料,对 10 组环形摩擦试样分别进行 1~10min 的摩擦实验,研究摩擦材料表面第三体的形成过程及演变规律。结果表明:表面第三体可以在一定的摩擦速度和压力条件下形成;随着摩擦时间的增加,表面第三体会分别经历初生阶段和长大阶段,最终趋于稳定,覆盖率、平整度和致密度升高;第三体是由摩擦副材料磨屑及各自氧化物的混合物组成,在摩擦压力和表面高温的共同作用下,第三体经历着形成—破坏—形成的动态过程,其表面具有氧化色斑、粘着颗粒、粘着坑及少量剥离特征,局部存在摩擦副材料的直接转移,显微硬度测试显示第三体的硬度高于摩擦副基体材料。

关键词: 第三体;形成条件;演变规律

doi: 10.3969/j.issn.1005-5053.2013.5.002

中图分类号: TH117.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2013)05-0006-07

摩擦系统的摩擦性能很大程度上取决于摩擦副的表面状态,在摩擦过程中,摩擦力和热的交互作用会使摩擦表面发生一系列物理和化学变化,引起摩擦表面发生氧化、塑形变形甚至材料转移^[1,2]。第三体是存在于摩擦副表面的摩擦产物,常被称作摩擦转移膜、摩擦膜或表面膜等,它将传统的两体摩擦系统改变为三体摩擦系统^[3]。早在 1984 年,Godet 就基于润滑摩擦理论提出了第三体的概念,并认为摩擦磨屑的压实过程对第三体形成起着主导作用^[4];Majcherczak 等在研究碳系钢材料的第三体时提出,初生的第三体磨屑会在表面堆积并引起局部接触应力和温度的升高,导致磨屑被压紧形成压实区^[5];Eriksson 等认为摩擦层的不连续分布并不一定是由表面的凸起变形而引起^[6],在正常的摩擦条件下,摩擦表面原发性和继发性摩擦接触的交替出现才是形成不连续摩擦层的主因^[7-9]。如今虽然已有众多作者对应用于制动领域的摩擦材料进行了研究,但对表面第三体的结构和其作用仍有众多不同的见解,对不同摩擦副材料的表面第三体的形成和

演变过程的理解也不尽相同^[10-13]。本工作对新型 ZDPH 低合金钢^[14,15]及铜基粉末冶金材料组成的摩擦副开展实验研究,通过表面形貌观察和元素分析探讨第三体的形成及演变规律,为新型 ZDPH 材料的摩擦磨损研究提供理论基础。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为自主研制的摩擦制动用高纯净低合金钢—ZDPH 钢和铜基粉末冶金材料。ZDPH 材料为低碳低合金钢,含碳量(质量分数,下同)为 0.2~0.3%,主要微合金化元素为 Cr, Mo, V。ZDPH 材料经净化冶炼后非金属夹杂物及气体含量很低,其中 $P \leq 0.009\%$, $S \leq 0.006\%$ 。制样所用的 ZDPH 材料为热处理态,不同温度下的机械性能及热物理参数如表 1 所示。铜基粉末冶金材料的基体组元为 Cu-Sn 合金,含量约为 60%~70%,Sn 用于强化铜基体,铜粉和锡粉的粒度均为 -200 目;润滑组元为石墨,在摩擦过程中起润滑作用,含量约为 12%~18%,粒度为 -30~+200 目;摩擦组元为 Al_2O_3 , SiC 等陶瓷粉末,含量约为 15%~20%,粒度为 -60~+800 目。

1.2 实验方法

实验采用环-环对磨的方式,将两种材料制成环形摩擦试样在 MPX-2000 型摩擦磨损实验机上进行对磨实验,其中上环试样为 ZDPH 材料,外径 $D_{上外}$

收稿日期: 2013-03-25; 修订日期: 2013-05-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(M12JB00190); 国家自然科学基金项目(51271014)

作者简介: 李志强(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事钢质摩擦制动材料研究, (E-mail) 52347270@163.com

通讯作者: 韩建民, 男, 教授, (E-mail) jmhan@bjtu.edu.cn。

=34mm, 内径 $D_{\text{上内}} = 20\text{mm}$, 厚度 $h_{\text{上}} = 6\text{mm}$; 下环试样为铜基粉末冶金材料, $D_{\text{下外}} = 32\text{mm}$, 内径 $D_{\text{下内}} = 22\text{mm}$, 厚度 $h_{\text{下}} = 7\text{mm}$, 试样如图 1 所示。实验前在低速低压条件下对试样进行预磨, 同时对准摩擦面吹送高压空气以清除磨屑, 同时进行冷却。待磨合至接触面积超过 80% 后, 利用超声波清洗试样。首先对经过预磨的试样在不同的转速和摩擦压力下进行实验, 以确定能够在 ZDPH 试样表面形成第三体的转速、压力和实验时间等条件。接着在转速为 5880r/min、压力为 100N 的实验条件下, 用 10 个

ZDPH 材料的上环试样分别进行 1 ~ 10min 的摩擦实验, 来观察第三体形成过程中不同阶段的形貌特点以及演变规律。摩擦实验后, 使用 S-530 型及 JSM-5800 型扫描电子显微镜对 ZDPH 试样表面第三体进行形貌观察, 通过 Link ISIS 型能谱仪分析其元素组成, 并对表面第三体进行显微硬度测量, 测量压力选取 50g, 保压时间 15s。在实验过程中, 全程采用 IMPAC IPE140 型高速红外测温仪测量 ZDPH 试样靠近摩擦面位置的温度变化, 采集频率为 107 次/s。

表 1 ZDPH 材料不同温度下的力学性能及热物理参数

Table 1 Mechanical properties and thermal physical parameters at different temperature of ZDPH

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	E/GPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C/(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	$\alpha/(10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	$\lambda/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$
20	215	909		473	--	44.1
100	198	852	7840	487	11.1	43.8
200	200	788		523	12	43.6

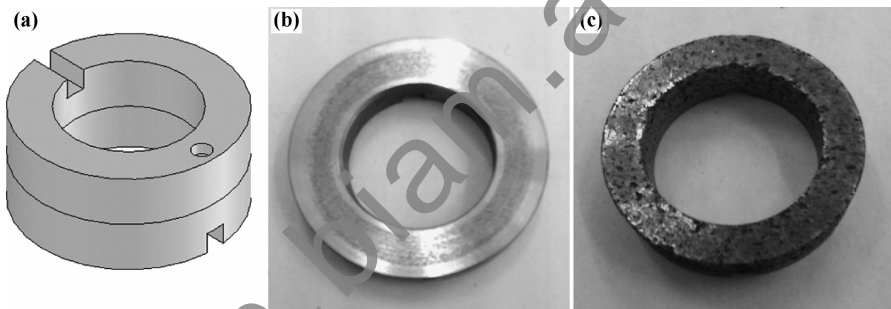


图 1 摩擦试样照片 (a) 摩擦试样示意图; (b) 上试样 (ZDPH); (c) 下试样 (铜基粉末冶金)

Fig. 1 The friction test sample (a) schematic drawing of the friction pairs; (b) upper ring (ZDPH); (c) lower ring (Cu-matrix powder metallurgy)

2 实验结果及分析

2.1 ZDPH 材料表面第三体的形成过程

为避免试样表面在预磨时生成第三体而影响后续实验结果, 采用低速、低压条件对摩擦试样进行预磨, 使用摩擦实验机的中速档 1970 r/min, 摩擦压力选取 20N, 当试样摩擦表面贴合良好后开始实验。在不同的速度、压力和摩擦时间条件下试制表面第三体, 实验选用 2930 r/min 和 5880 r/min 较高的两档转速, 摩擦线速度相当于 4.14 m/s 和 8.30 m/s, 摩擦压力从 20N 变化到 150N。试制结果证明, 在 5880r/min 的转速和 100N 的压力下摩擦 10min, 摩擦面上会形成连续黑色表面膜, 如图 2 所示。

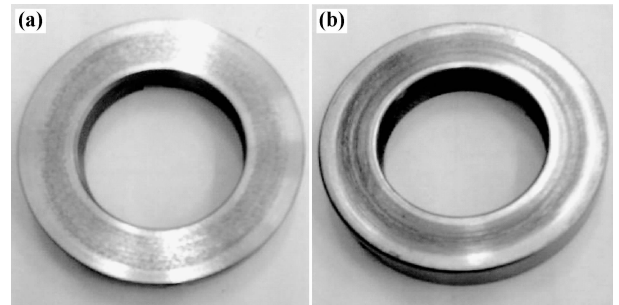


图 2 ZDPH 试样摩擦实验前后表面对比

Fig. 2 The comparison of the test samples' surfaces (a) before the test; (b) after the test

为了观察第三体的形成过程, 在 5880r/min 的转速、100N 的摩擦压力下, 对 10 组摩擦环试样分别进行了 1 ~ 10min 的摩擦实验。实验中对 10 个 ZDPH

试样的温度变化进行监测,温度变化曲线如图3,当摩擦时间小于4min时,试样的温度基本呈线性上升趋势,且每组试样的升温速率相近,温度值的差异在10℃左右;摩擦时间超过4min,试样热量的输入与散失速度渐渐趋于平衡,温度增速变缓最后趋于稳定,温度值相差5℃左右,实验过程中试样达到的最高温度为87.3℃。除摩擦时间外,10个ZDPH上环试样的实验参数全部相同,温度变化趋势相似,对每个试样的表面进行观察以研究第三体的形成和变化规律。

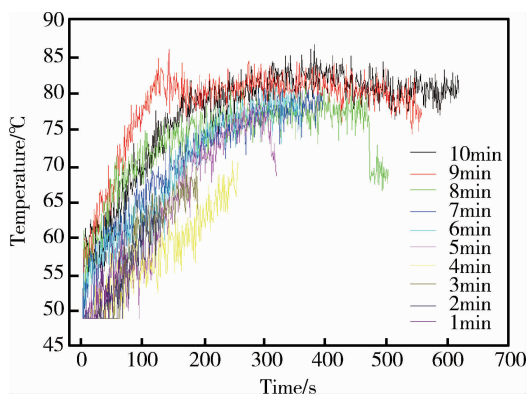


图3 摩擦时间不同的十个试样温升曲线

Fig. 3 The temperature curves of ten test samples under different friction time

在10组试样的摩擦表面分别取样,进行SEM观察及EDS分析。图4列出了ZDPH试样经过1min,4min,7min和10min摩擦实验后的表面形貌,左侧和右侧图像的放大倍数分别为100倍和2000倍。摩擦刚开始时,试样表面出现了颜色深浅相间的磨痕,磨痕的宽度大约为50~70 μm ,如图4a。图4b为摩擦进行1min时的高倍表面形貌图像,图中左侧的浅色区域为表面磨合痕迹,右侧为摩擦形成的表面膜,它们的交替存在共同构成了图4a中深浅相间的磨痕。随着摩擦时间的增加,磨屑不断堆积、压实,使表面浅色磨痕所占面积逐渐缩小,表面第三体膜层覆盖率不断增大,见图4c~f。当摩擦时间达到10min时,表面形成的致密、连续的第三体已经覆盖了试样的绝大部分表面。

随着摩擦时间的增加,ZDPH试样表面形貌在不断变化。基于不同时间的摩擦实验结果,可以将第三体的形成和生长过程分为三个阶段:首先是初始形成阶段,此时试样的温度较低且摩擦接触面上的磨屑较少,磨屑的堆积—压实过程仅发生在试样表面的局部位置,使表面第三体不能完全覆盖摩擦表面。同时,铜基粉末冶金材料的硬质点会导致磨粒磨损的发生,当接触表面的局部应力超过材料屈

服极限时,ZDPH试样表面将发生塑性变形而形成犁沟,使试样表面形成摩擦痕迹。周向分布的第三体与摩擦划痕共同存在,使摩擦表面呈现出颜色深浅相间的状态。随着摩擦过程的进行,第三体进入了生长阶段,此时不断有新的磨屑形成并滞留在表面的划痕和沟槽内,当磨屑堆积到一定量后,就会在摩擦压力和摩擦热的共同作用下被压实,使表面第三体的面积逐渐扩大、厚度逐渐增加,渐渐覆盖了原有的磨合痕迹,该过程中摩擦温升还会使磨屑发生氧化。当摩擦进行10min后,摩擦表面最终形成了连续、致密的第三体,试样表面原有的划痕、沟槽等已经基本消失,摩擦过程趋于稳定。在第三体生长过程中,表面出现分散的黑灰色斑点,这是由于在高温下,已经形成的第三体表面会被氧化,同时新形成的磨屑也会有一部分发生氧化反应,与未被氧化的磨屑混合后被压实而形成新的第三体。

2.2 第三体的主要微观特征分析

将经过10min摩擦实验的ZDPH试样摩擦表面放在扫描电镜下观察,在图5中,虚线左侧未参与摩擦,留有明显的原始机械加工痕迹,虚线右侧的试样表面磨痕较少、较为平整,表面不均匀的分布着粘着坑和暗灰色的氧化斑点。垂直于摩擦方向对试样表面进行线扫描分析,从Cu, O元素的分析结果中可看出明显的分界点,由于ZDPH材料中不含Cu元素,可以推断虚线右侧Cu元素含量的升高是因为在材料表面形成了第三体,因此Cu元素含量可以作为表面第三体形成的判据,结合形貌观察来辨别第三体的边界。O元素含量在虚线右侧发生了小幅升高,这是因为摩擦过程中第三体的形成伴随着氧化反应,但由于实验载荷较小且在室温环境下进行,试样能达到的最高温度较低,表面的氧化程度较轻。在更高的放大倍数下观察第三体边界,如图6。可以清晰的看到边界左侧保留着的原始加工和打磨痕迹,而右侧已经形成具有一定厚度的连续第三体;在远离边界的位置,试样的表面磨合痕迹已完全被第三体覆盖。形成第三体的表面一般比较平整、无明显划痕,分布有黑灰色斑点、少量凸起点、及形状不规则的粘着坑,少数位置出现层状破裂。

暗灰色的氧化斑点、表面凸起点、粘着坑及层状破裂等都是表面第三体存在的主要特征,图7~图9为对各种特征位置进行的能谱分析。第三体表面的凸起和粘结颗粒的化学成分中,Fe, Mn, Cr等元素来自ZDPH材料,而Al, Cu, Sn, Si等元素来自对磨的粉末冶金材料,如图7。在第三体表面可以观察到具有整齐、清晰的边界的表面粘着坑和层状剥离,说

明表面第三体的演变是一个形成和破坏交替出现的 动态过程,如图 8 和图 9。

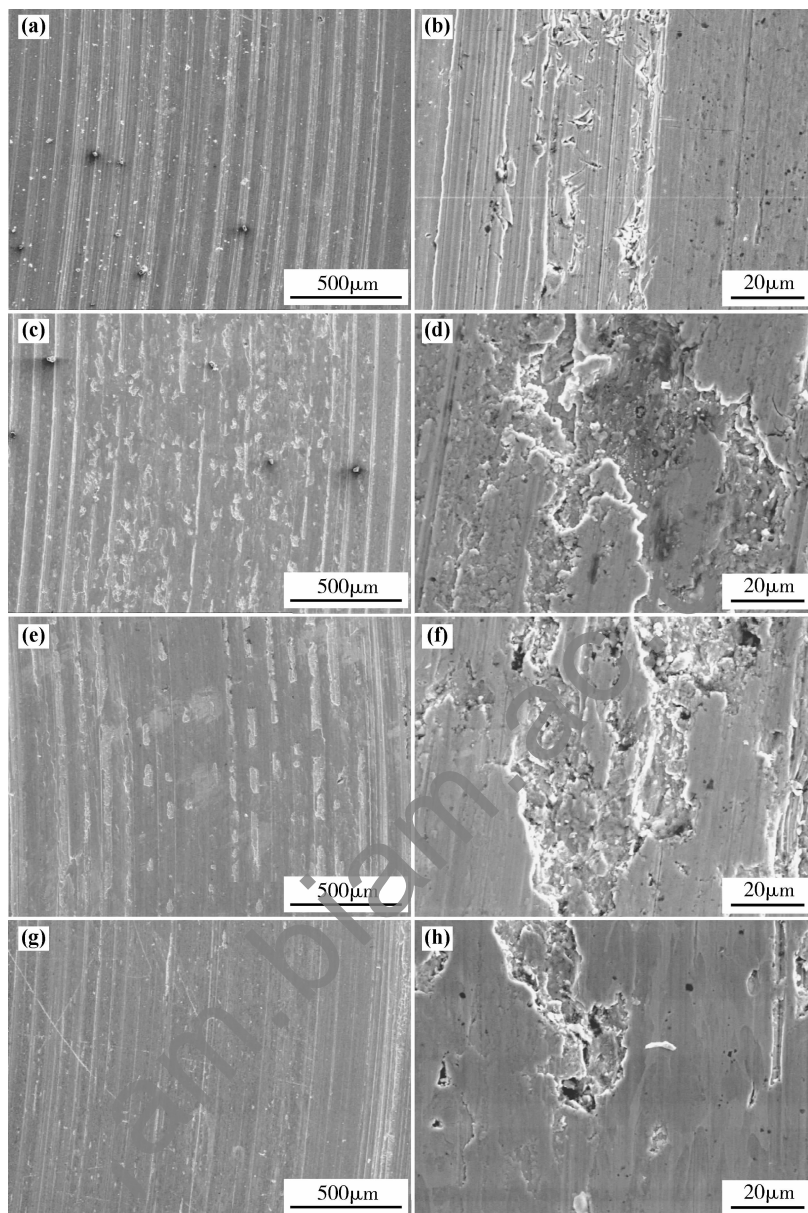


图 4 不同摩擦时间的表面微观形貌

Fig. 4 The micro appearances of test samples under different friction time
(a), (b) 1min; (c), (d) 4min; (e), (f) 7min; (g), (h) 10min

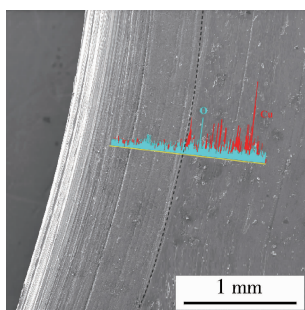


图 5 试样表面元素线扫描分析

Fig. 5 The line scanning analysis on the surface of the ZDPH test sample

第三体的形成过程同时伴随着粘着磨损,在摩擦表面形成大小、形状不同的粘着坑,内部堆积有大量磨屑,在图中呈亮白色。图 8 中的元素分析结果显示 Fe 元素含量较高,说明最初形成的第三体与摩擦表面结合强度不高,摩擦过程中第三体会从表面脱离并露出摩擦副材料,脱离下来的第三体薄膜或被排出摩擦界面、或被再次碾碎后与新生成的磨屑一同储存于粘着坑内。随着摩擦过程的进行,摩擦产生的热量不断累积,试样表面温度升高。元素分析在第三体表面凸起位置和粘着坑内均检测到 O 元素,说明磨屑颗粒和第三体

表面均发生了氧化反应。氧化后的磨屑颗粒在粘着坑内堆积到一定程度后被压实,颗粒间再次紧密结合形成第三体,此时形成的第三体为初生第三体和磨屑氧化物的混合物。

发生层状破裂和剥离的第三体表面一般比较粗糙,由于摩擦过程中表面并不是均匀接触,而是存在局部高温高压的部位,这不仅容易使表面第三体发生剥离,还会使摩擦副材料中较软的铜基粉末冶金材料直接粘附在摩擦表面上,因此会在表面的磨屑堆积中检测到很高的 Cu 元素含量。经过反复摩擦滑动,试样温度的持续上升会引起

表面局部区域软化并发生塑性流变,粘着撕裂减少,第三体稳定长大直至其形成速度与破坏速度达到动态平衡,表面磨屑的非压实区域逐渐减小,第三体压实区面积增大,摩擦表面逐渐形成光滑、致密的第三体。通过试样表面的显微硬度测试,得到第三体压实区硬度为 966 HV,非压实区的硬度为 270 HV,ZDPH 材料基体硬度为 289 HV。这说明第三体压实区的磨屑间结合强度较高,这使第三体的硬度明显高于摩擦环基体材料的硬度。高硬度的第三体覆盖于 ZDPH 材料表面有利于其耐磨性的提高。

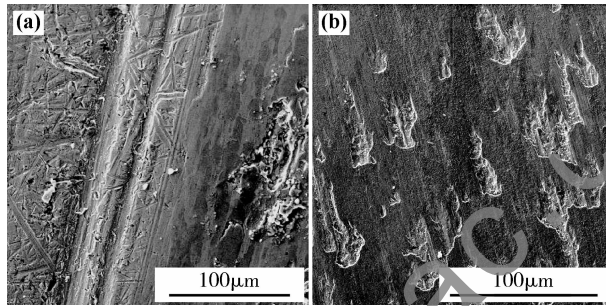


图 6 第三体表面微观形貌 (a)边界附近;(b)远离边界

Fig. 6 The micro appearance of the third body (a) near the boundary; (b) far from the boundary

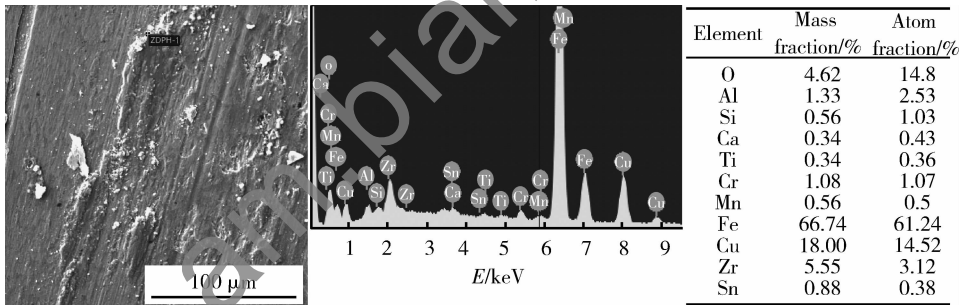


图 7 第三体表面粘着颗粒位置的能谱分析

Fig. 7 The EDS analysis on the adhesive particles of the third body's surface

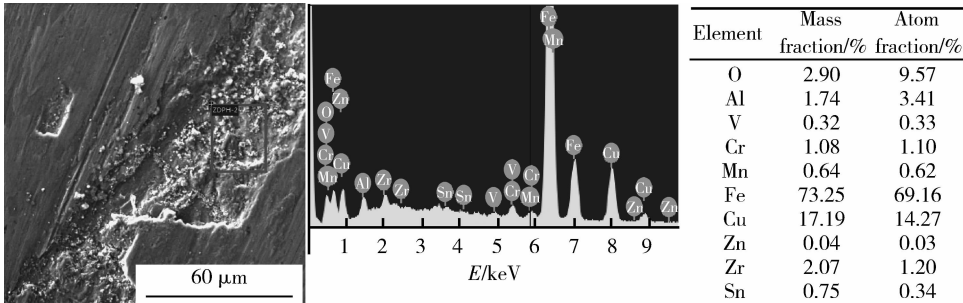


图 8 第三体表面粘着坑位置能谱分析

Fig. 8 The EDS analysis on the adhesion pit of the third body's surface

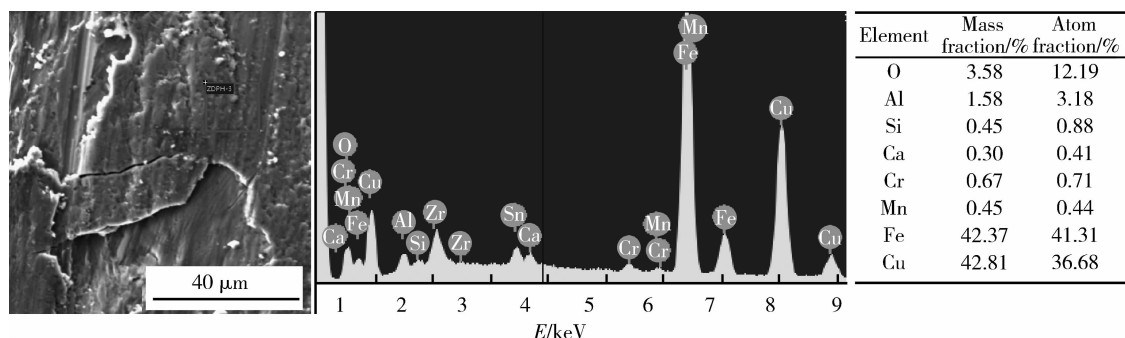


图 9 第三体表面剥离附近位置的能谱分析

Fig. 9 The EDS analysis on the third body near the surface peeling

3 结论

(1) ZDPH 材料表面第三体为黑色连续光亮薄膜, 摩擦实验及元素分析表明, 第三体由摩擦副磨屑及各自的氧化物混合压实而成, 其形成分为三个阶段, 从初生阶段经过动态生长最终形成稳定、均匀致密的第三体。

(2) 表面第三体具有表面凸起与颗粒堆积、粘着坑和层状剥离等主要特征, 局部存在摩擦副材料的直接转移。第三体的动态演化过程伴随着氧化反应和粘着磨损, 其形成与破坏过程是交替出现的。

(3) 当第三体的形成速度与破坏速度达到动态平衡, 摩擦表面形成光滑、致密的第三体, 覆盖率高, 第三体的硬度大于基体材料的硬度, 有助于稳定摩擦系数、减小磨损量。

参考文献:

- [1] OKADA M, LIU N S, PRAKASH V, *et al.* Tribology of high-speed metal-on-metal sliding at near-melt and fully-melt interfacial temperatures[J]. *Wear*, 2001, 249(8): 672 - 686.
- [2] 孙志华, 刘明, 国大鹏, 等. 不同厚度铝合金微弧氧化陶瓷层摩擦学性能研究[J]. *材料工程*, 2010(11): 69 - 73, 78.
(SUN Z H, LIU M, GUO D P, *et al.* Study on tribological behavior of microarc oxidation ceramic coating of aluminum alloy with different thickness[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2010(11): 69 - 73, 78.)
- [3] 韩晓明, 高飞, 符蓉, 等. 三体摩擦体系中材料摩擦特性的研究进展[J]. *中国材料进展*, 2009, 28: 8 - 13.
(HAN X M, GAO F, FU R, *et al.* Recent progress in tribological theories involving the behavior of the third body [J]. *Materials China*, 2009, 28: 8 - 13.)
- [4] GODET M. The third-body approach: a mechanical view of wear[J]. *Wear*, 1984, 100: 437 - 452.
- [5] MAJCHERCZAK D, DUFRÉNOY P, BERTHIER Y, *et al.* Experimental thermal study of contact with third body [J]. *Wear*, 2006, 261: 467 - 476.
- [6] ÖSTERLE W, URBAN I. Friction layers and friction films on PMC brake pads[J]. *Wear*, 2004, 257: 215 - 226.
- [7] ERIKSSON M, BERGMAN F, JACOBSON S. Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing conditions[J]. *Wear*, 1999, 232: 163 - 167.
- [8] ERIKSSON M, JACOBSON S. Tribological surfaces of organic brake pads[J]. *Tribology International*, 2000, 33: 817 - 827.
- [9] ERIKSSON M, BERGMANN F, JACOBSON S. On the nature of tribological contact in automotive brakes[J]. *Wear*, 2002, 252: 26 - 36.
- [10] 雷宝灵, 易茂中, 徐惠娟, 等. C/C 刹车材料摩擦表面层的微结构[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(6): 64 - 69.
(LEI B L, YI M Z, XU H J, *et al.* Microstructures of the worn surface layer of C/C composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(6): 64 - 69.)
- [11] LEPESANT P, BOHER C, BERTHIER Y, *et al.* A phenomenological model of the third body particles circulation in a high temperature contact [J]. *Wear*, 2013, 298 - 299: 66 - 79.
- [12] DIOMIDIS N, MISCHLER S. Third body effects on friction and wear during fretting of steel contacts[J]. *Tribology International*, 2011, 44(11): 1452 - 1460.
- [13] ÖSTERLE W, DÖRFEL I, PRIETZEL C, *et al.* A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test [J]. *Wear*, 2009, 267: 781 - 788.
- [14] 芦金宁, 韩建民, 李荣华, 等. 300km/h 高速列车高纯净锻钢制动盘材料的研究[J]. *铁道学报*, 2003, 25(6): 108 - 111.
(LU J N, HAN J M, LI R H, *et al.* Study on the highly

purified forging steel for the brake disk of 300 km/h express trains [J]. Journal of The China Railway Society, 2003, 25(6):108-11.)

[15] 孙春华. ZDPH 高纯净锻钢制动盘材料热处理工艺及组织性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009.

Experimental Research on Formation and Evolution Process of Third Body of ZDPH Low Alloy Steel

LI Zhi-qiang, HAN Jian-min, LI Wei-jing, PAN Li-ke, YANG Zhi-yong

(School of Mechanical Electric and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: During the friction process, the two-body friction system is changed into three-body system by the third body which formatted on the surface of the friction material. The formation and evolution of third body plays an important role to the friction and wear properties of materials. 10 tests with different friction time which is from 1 to 10 minutes were carried out by using ZDPH low alloy steel and copper matrix powder metallurgy. The result shows that the third body appears on the surface at certain speed and pressure. During friction process, the friction surface is covered by the third body which tends to be more consistent and flattened. Third body is the mixture of the friction materials particles and their oxides. With the high pressure and temperature, the third body on the surface experiences a dynamic process of forming and destroying. Oxidized spots, adhesive particles, adhesive pits, surface peeling and material transfer can be observed on it. And the micro-hardness of the third body is higher than the hardness of friction material.

Key words: third body; formation; evolution