

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170904002

磁场环境中的 Mo-W 喷涂层摩擦磨损性能

闫涛^{1,2}, 刘贵民², 朱硕², 谢凤宽², 杜林飞², 惠阳²

(1. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 2. 陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100072)

摘要: 采用超音速等离子喷涂技术在 45CrNiMoVA 钢表面制备了 Mo-W 合金涂层, 并与 6061 铝合金组成摩擦副, 进行了磁场环境下的摩擦磨损试验。通过场发射扫描电镜 (SEM)、电子能谱仪 (EDS) 分析涂层组织; 采用 X 射线衍射仪分析涂层相组成; 在不同磁感应强度 (B) 下测试了涂层显微硬度、表面氧浓度和表面温度。结果表明: 随着磁感应强度的增加, Mo-W 涂层的摩擦因数降低, 磨损量有小幅减小。摩擦副表面的温度比不加磁场时有 10~20 °C 的温升。磁场的施加对 Mo-W 涂层显微硬度值不会造成影响。Mo-W 涂层磨损表面的氧含量随 B 的增加而变大。磨屑主要由表面覆有 Al_2O_3 的 Mo-W 合金微粒和 Al_2O_3 微粒组成, 磨屑粒径随着 B 的增加逐渐变小。磁场在 Mo-W 涂层与 6061 铝合金的摩擦中主要有两个作用: 一是提高摩擦副间的氧浓度, 促进氧化磨损; 二是使磨粒细化, 降低摩擦因数。

关键词: Mo-W 涂层; 磁场环境; 摩擦磨损; 超音速等离子喷涂

中图分类号: TG174.442; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0138-10

Friction and Wear Properties of Mo-W Spraying Coating in Magnetic Field

YAN Tao^{1,2}, LIU Gui-min², ZHU Shuo², XIE Feng-kuan², DU Lin-fei², HUI Yang²

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072; 2. Department of Equipment Support and Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072)

Abstract: Mo-W alloy coating was prepared on steel 45CrNiMoVA by supersonic plasma spraying technology, which formed the friction pairs with 6061 aluminum alloy. Friction and wear tests in magnetic field were studied on the friction pairs. The coating structure was analyzed by SEM and EDS, while the phase constituent of the coating was tested by X-ray diffractometer. The surface oxygen concentration and surface temperature were tested in different magnetic induction (B). The results show that with the increase of B , the friction coefficient of the Mo-W coating is reduced and the wear volume is slightly decreased. The friction surface temperature in magnetic field is 10 to 20 °C higher than that without magnetic field. The addition of magnetic field has no obvious effect on the microhardness of the Mo-W coating. The oxygen content of the worn Mo-W coating surface increases with the increase of B . The debris is mainly composed of Al_2O_3 particles and Mo-W alloy particles covered with Al_2O_3 , and the particle size decreases gradually with the increase of B . There are two main roles of magnetic field in the friction the of the Mo-W coating with 6061 aluminum alloy, one is to increase the oxygen concentration between the friction pairs and then promote the oxidation wear phenomenon; the other is to refine the abrasive particles and reduce the friction coefficient.

Keywords: Mo-W coating; magnetic field; friction and wear; supersonic plasma spraying

收稿日期: 2017-09-04; 修回日期: 2018-03-06

网络出版日期: 2018-03-13 11:28; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180313.1128.002.html>

通讯作者: 闫涛(1978—), 男(汉), 讲师, 博士; 研究方向: 先进表面功能涂层与关键技术; E-mail: bjyantao@163.com

基金项目: 北京市自然科学基金(2152031); 装备再制造技术国防科技重点实验室基金(9140C8502010C85)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Beijing (2152031) and Fund of National Key Laboratory for Remanufacturing (9140C8502010C85)

引文格式: 闫涛, 刘贵民, 朱硕, 等. 磁场环境中的 Mo-W 喷涂层摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 138-147.

YAN T, LIU G M, ZHU S, et al. Friction and wear properties of Mo-W spraying coating in magnetic field[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(2): 138-147.

0 引言

随着自动化、信息化技术在工业中的应用,电磁场无处不在,磁场在零件使用工况中的影响也越来越大,尤其是在一些与磁场环境相关的摩擦副中。在这些摩擦副中,有的利用磁场增大摩擦效果,如电磁制动器^[1];有的利用磁场增加刀具耐磨性,提高切削刀具的使用寿命^[2-4]。在电磁轨道发射领域,电磁轨道处于电流产生的强磁场中,为被发射体提供动力^[5-7]。此时,轨道和被发射体之间的摩擦磨损处于应力场、电场以及磁场的多场耦合环境中。

有研究表明,层状轨道可以增强电感梯度从而提高发射效率,同时某些功能涂层可以延长电磁轨道使用寿命^[4-5]。Nelson C和Trevor W运用等离子体源离子注入和离子束辅助沉积技术制备了多种涂层,通过电磁轨道炮发射对比试验表明,涂层可显著提高Cu轨道的耐磨、耐烧蚀性能^[8-9]。Matthew J通过研究发现,Mo和W是两种很好的增强轨道性能的材料^[10],可以提高轨道抗“刨削”和断裂失效的能力。Mo-W涂层从硬度、耐磨性等常规力学性能方面也有不错的表现^[11],但Mo-W涂层在磁场中的性能表现如何,以及磁场如何影响涂层的摩擦学性能,目前还不得而知。

文中采用超音速等离子喷涂技术制备了Mo-W合金涂层,并研究了磁场环境下Mo-W涂层的摩擦磨损性能。

1 试验

1.1 试验材料

基体材料:45CrNiMoVA钢((870±10)℃淬火、(430±10)℃回火),主要成份见表1^[12]。

喷涂粉末:①高密度Mo粉:纯度≥99.9%、粒径范围45~96 μm,采用吹制工艺制备;②高密度W粉:纯度≥99.9%、粒径范围45~96 μm。为保证粉体混合的均匀性和粉体流动性,采用混粉器将质量比为4:1的Mo、W粉末进行机械混合。

表1 45CrNiMoVA钢主要化学成分

Element	C	Ni	Cr	Mo
Content	0.42~0.50	1.30~1.80	0.80~1.10	0.20~0.30
Element	Mn	V	Fe	
Content	0.50~0.80	0.10~0.20	Bal.	

1.2 涂层制备

(1) 基体前处理工艺

对基体45CrNiMoVA钢分别采用砂纸打磨、超声波清洗、喷砂、预热(预热温度为100℃)等前处理工艺,以去除表面氧化膜、铁锈等杂质,增加表面粗糙度和表面活化程度,降低过冷度和残余应力。

(2) 喷涂设备及工艺

采用由装备再制造技术国防科技重点实验室自主研发的HEP-Jet超音速等离子喷涂系统。主气选择氩气,送气量为110 L/min;辅气选择氢气,送气量为17 L/min。喷涂电流为350 A,电压为140 V。冷却空气压力为0.5 MPa,送粉量为45 g/min,喷涂距离为100 mm。采用MH24型机械手驱动喷枪运动,线速度为40 m/min,搭接宽度为3 mm。涂层喷涂厚度约为300 μm。

1.3 涂层组织与性能检测

试验样品表面(涂层面积为10 mm×10 mm)均经过打磨、抛光处理。采用HVS-1000型显微硬度计测量Mo-W涂层的显微硬度,加载载荷100 g,加载时间为10 s。涂层表面显微硬度采用几何分布法,在涂层表面选取6个点,取其平均值。测量涂层截面的显微硬度采用直线法,选取6个点,其中保证有1个点选在基体上,1个点选在涂层与基体的界面上。

采用Nava NanoSEM450场发射型超高分辨率扫描电镜对涂层表面进行显微形貌观察分析;使用配备的X-Max 80型X射线能谱仪测定涂层内各元素分布及质量分数。使用UT302D型红外测温仪测量材料表面温度。涂层试样与6061铝合金销组成摩擦副,铝合金销几何尺寸如图1所示。

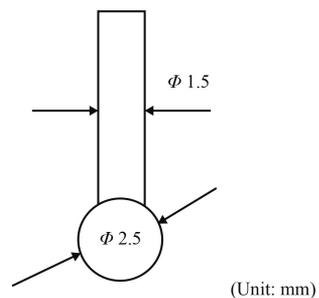


图1 6061铝合金试样几何尺寸

Fig.1 Geometrical size of 6061 Al alloy sample

表 2 6061 铝合金主要化学成分

Element	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Si	Fe	Al
Content	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.25	0.04-0.35	0.15	0.4-0.8	0.7	Bal.

6061 铝合金的化学成分如表 2 所示, 固溶处理+人工时效, 硬度为 93 HB。采用 CETR-3 型多功能摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验, 试验采用高速线性往复式磨损形式。试验载荷为 10 N, 滑动频率 20 Hz, 单次行程 3 mm, 时间 10 min。

采用 Lext OLS 型高精度三维形貌仪测量涂层表面粗糙度, 测量值取多组数据平均值。对不同条件下的摩擦磨损试验产生的磨痕进行体积测量, 进而采用公式 (1) 计算出磨损率。

$$\varpi = \frac{\Delta V}{NS} \quad (1)$$

其中: ϖ 为磨损率, $\mu\text{m}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$; ΔV 为磨损体积, μm^3 ; N 为载荷, N; S 为滑动行程, μm 。

磁场发生装置及氧浓度测试装置如图 2 所示。采用通过线圈激励磁场, 其内的磁感应强度采用公式 (2) 计算^[13]:

$$B = \mu_0 n I \quad (2)$$

式中, μ_0 是真空磁导率, 取值 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$; n 是匝数线密度 (单位长度的匝数), 取 1×10^4 匝/m; I 为电流强度, 单位 A, 通过调整电流大小得到摩擦副间的磁感应强度。参考电磁轨道发射时环境磁场强度^[7-8], 试验中所用电流大小分别为: 0、40、60、80、100、120 A, 从而计算得出磁感应强度分别为 0、0.5、0.75、1.0、1.25 和 1.5 T。

采用 MT-02 氧浓度记录仪放置在涂层表面, 检测氧浓度。静态测试时, 关闭吹风机; 动态测试时, 调节吹风机使涂层表面的空气流动速度控制在 1.5 m/s。

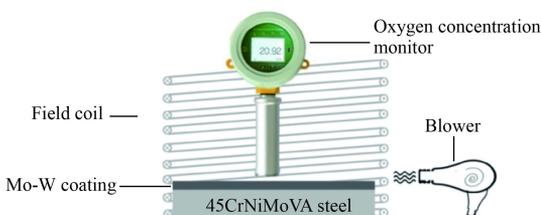


图 2 Mo-W 涂层表面氧浓度检测装置示意图

Fig.2 Sketch of oxygen concentration detector above Mo-W coating surface

2 结果与分析

2.1 磁场强弱对 Mo-W 涂层摩擦因数的影响

图 3 是在施加不同磁感应强度过程中, 摩擦副间的摩擦因数情况。由图可知, 不施加磁场时涂层的摩擦因数为 0.462; 随着磁感应强度的增加, Mo-W 涂层的摩擦因数缓慢减小。当所加磁感应强度为 1.5 T 时, 摩擦因数为最小 (0.315), 比不加磁场时减小约 31.8%。

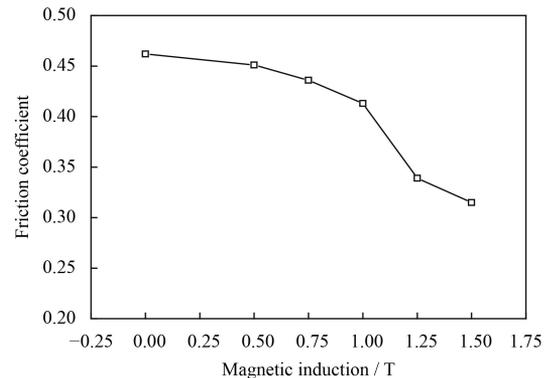


图 3 摩擦因数随磁感应强度变化

Fig.3 Friction coefficient varied with magnetic induction

2.2 磁场强弱对 Mo-W 涂层磨损量的影响

图 4 是 Mo-W 涂层体积磨损率随磁感应强度变化的情况。不施加磁场时, Mo-W 涂层的体积磨损率约为 $10.8 \times 10^5 \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。施加磁场后, 随着磁感应强度的增加, Mo-W 涂层的磨损率有所减小。当所加磁感应强度为 $B=1.50 \text{ T}$ 时, Mo-W 涂

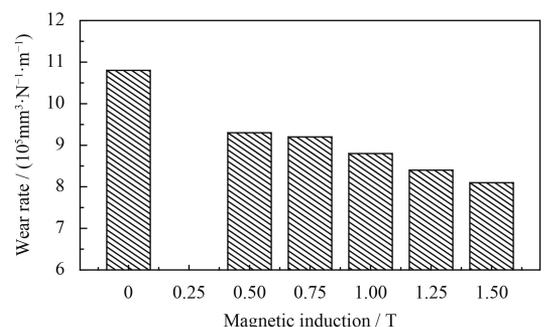


图 4 Mo-W 涂层体积磨损率随磁感应强度变化

Fig.4 Wear rate of Mo-W coating varied with magnetic induction

层的体积磨损率最小, 约为 $8.1 \times 10^5 \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

图 5 是 Mo-W 涂层磨损 3D 形貌。由图 5 可知, 不施加磁场时, Mo-W 涂层的磨损形貌较粗且深 (图 5(a)), 说明涂层的体积磨损量较大。施加磁场后, 涂层磨痕较细且浅 (图 5(b)), 说明施加磁场后 Mo-W 涂层的磨损量变小。

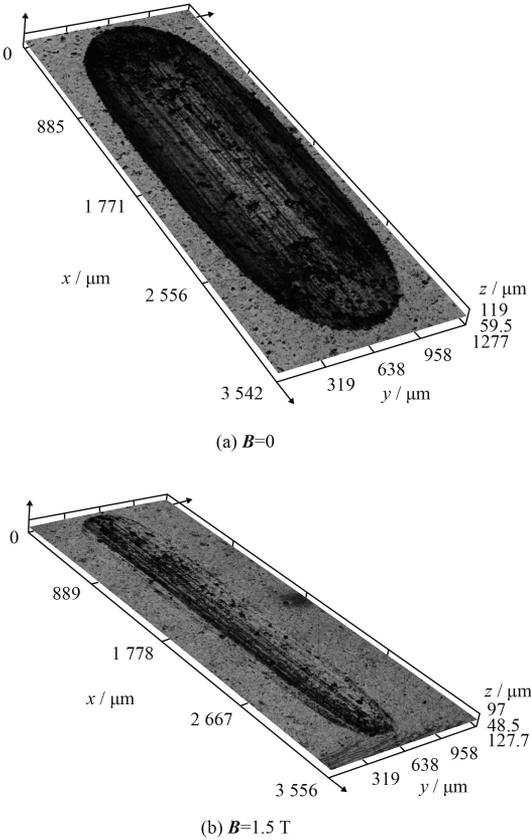


图 5 Mo-W 涂层磨损表面 3D 形貌

Fig.5 3D worn morphologies of Mo-W coating

2.3 Mo-W 涂层在磁场中的摩擦磨损机理

影响材料摩擦学性能的主要因素有材料本身属性、表面状态、摩擦环境 (如温度、电场、磁场、气氛) 等。

2.3.1 摩擦副材料属性

众所周知, 物质是由原子组成的, 而原子又是由原子核和核外电子构成。核外电子在不同轨道上绕核旋转运动使其具有轨道磁偶极矩; 而同时电子也进行自身的旋转, 从而具有自旋磁偶极矩。这两种磁矩的矢量和就构成了原子磁矩。材料的磁性是由其微观原子磁矩决定的, 而原子磁矩又是由电子运动产生的, 运动电子在磁场中会受到力的作用。所以, 磁场可以通过影响摩擦副

材料电子从而改变材料的摩擦学性能。根据材料的磁性不同, 把相对磁导率小于 1 的叫抗磁材料, 相对磁导率大于 1 的叫顺磁材料, 相对磁导率远大于 1 的叫铁磁材料。

Mo 位于门捷列夫周期表第 5 周期、第 VIB 族, 戈尔德斯密特将它称亲铁元素, 属顺磁体。W 也是 VIB 族金属, 外围电子层排布: $5d^46s^2$ [14]。从这一角度而言, Mo-W 喷涂层不是铁磁性材料, 即磁场对其力学性能应该影响不大。

6061 铝合金同样属于有色金属, 主要成分为 Al (表 2), 铝的磁导率约为 1, 属顺磁性材料[14], 所以 6061 铝合金也可以近似看作顺磁性材料。

以上分析可知, 6061 铝合金和 Mo-W 喷涂层都不是铁磁性材料, 但 Mo-W 涂层是制备在 45CrNiMoVA 钢表面上的, 从 45CrNiMoVA 钢的化学成分 (表 1) 可以看出, 45CrNiMoVA 钢的主要成份为 Fe。永磁铁吸引测试试验表明, 45CrNiMoVA 钢呈铁磁性材料属性。所以, 虽然 6061 铝合金和 Mo-W 喷涂层都不是铁磁性材料。但基体材料会对磁场的施加产生响应, 从而影响到摩擦副的摩擦表现。

2.3.2 施加磁场后摩擦副表面温度变化

摩擦界面温度也是影响涂层摩擦学性能的重要因素。为了进一步了解磁场施加后, 6061 铝合金和 Mo-W 喷涂层摩擦副表面摩擦温度变化情况, 对摩擦副表面进行了温度采样对比。在摩擦试验中, 每间隔 1 min 采集一次温度。图 6 是摩擦表面温度随着磁感应强度变化的情况。

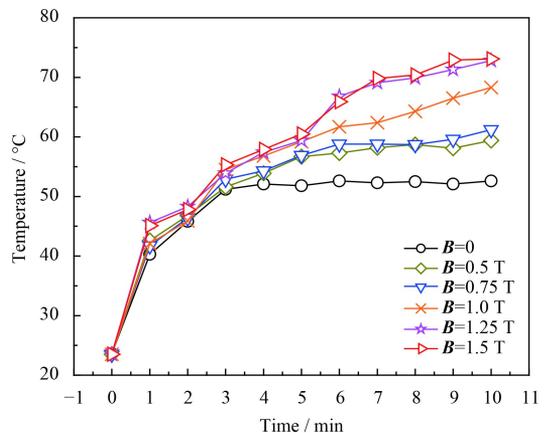


图 6 不同磁感应强度下 Mo-W 涂层摩擦表面温度

Fig.6 Temperature of wear surface on Mo-W coating under different magnetic inductions

由图6可以看出,当施加不同强度的磁场时,摩擦副表面的温度变化有所不同。与不加磁场时相比,涂层表面有10~20℃的温升。没有施加磁场时,涂层在摩擦3 min时进入温度稳定状态,表面温度稳定在52℃左右。当施加磁场时,涂层表面温度在摩擦10 min内都一直缓慢地升高。

当施加磁场的磁感应强度 ≤ 0.75 T时,摩擦副表面温度升高幅度较小,在摩擦试验结束前温度比不施加磁场时要高10℃左右。当磁感应强度 ≥ 1.0 T时,摩擦副表面温度升高幅度较大,在摩擦试验结束前温度比不施加磁场时要高20℃左右。究其原因,Mo-W涂层是顺磁性材料,受磁场影响较小。但基体45CrNiMoVA钢为铁磁性材料,从而产生涡流热效应,造成摩擦界面温度上升。

2.3.3 施加磁场后涂层显微硬度的变化

图7是Mo-W涂层显微硬度随磁感应强度的变化情况。由图7可知,未施加磁场前,涂层表面显微硬度平均值为563.2 HV_{0.1}。施加磁场后,显微硬度平均值虽然有微弱变化,但变化幅度在测量误差范围内。可见,施加磁场对Mo-W涂层显微硬度值基本不会造成影响。这说明施加磁场虽然会引起摩擦表面10~20℃的温升(图6),但

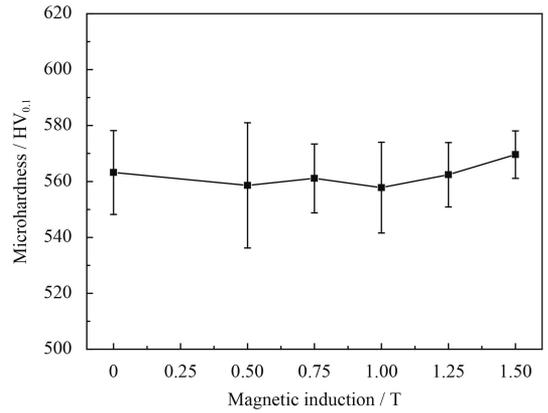


图7 Mo-W涂层显微硬度随磁感应强度的变化

Fig.7 Microhardness of Mo-W coating varied with magnetic induction

不致引起Mo-W涂层发生热相变而影响显微硬度。

综上所述,Mo-W涂层在磁场中表现出来的摩擦学性能不同并不是由于显微硬度变化引起的。

2.3.4 磨损表面分析

图8是不同磁场环境下Mo-W喷涂层与6061铝合金摩擦试验后的表面磨损形貌,表3是摩擦磨损试验前Mo-W涂层抛光后表面能谱分析结果和图8摩擦后表面的能谱分析结果。

由图8(a)可知,未施加磁场时,涂层表面磨损表现为粘着磨损和磨料磨损的复合磨损特征。究其原因,应该是硬度较低的6061铝合金在与

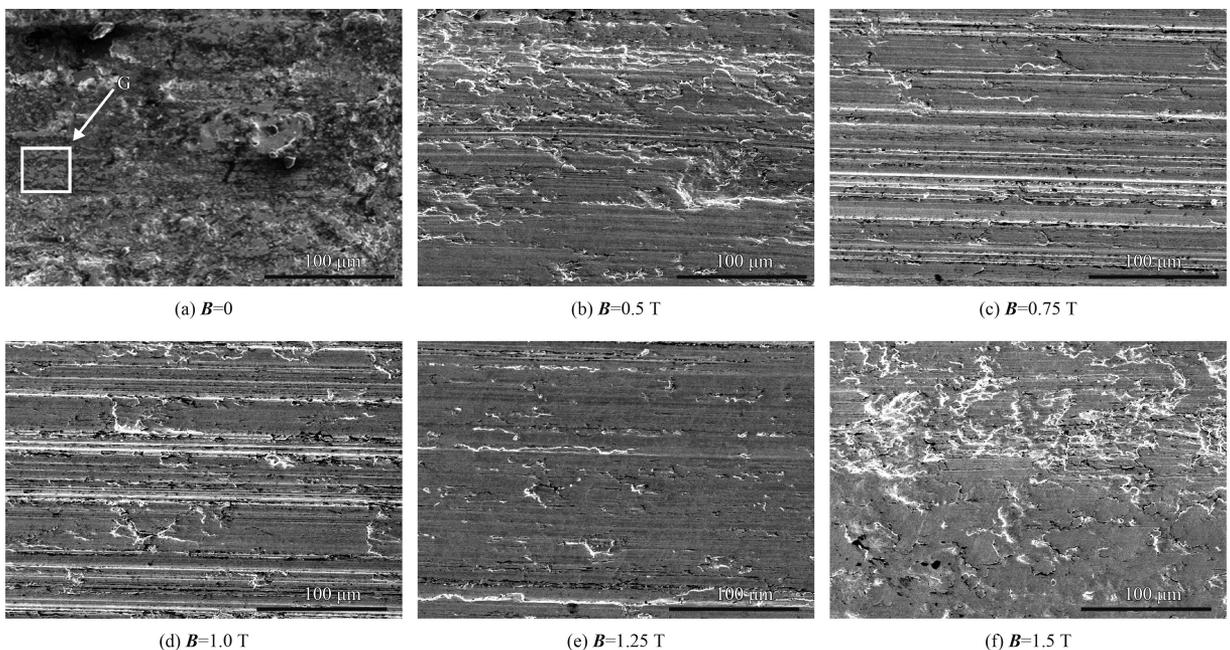


图8 不同磁场环境下Mo-W喷涂层表面磨损形貌

Fig.8 Worn surface morphologies of Mo-W coating under different magnetic inductions

表 3 Mo-W 涂层表面能谱分析

Table 3 EDS analysis of Mo-W coating

Element	Before wear	Fig. 8(a)	Fig. 8(b)	Fig. 8(c)	Fig. 8(d)	Fig. 8(e)	Fig. 8(f)	Region G
O	1.42	2.25	3.93	4.82	5.17	6.05	6.71	1.87
Mo	84.18	72.23	71.17	70.23	68.41	67.68	68.29	82.36
W	14.40	13.46	11.84	12.56	13.17	11.23	10.18	13.42
Al		12.06	13.06	12.39	13.25	15.04	14.82	2.35

Mo-W 涂层摩擦过程中, 在涂层硬相的作用下被割裂并粘附在涂层表面, 同时, 也伴有少量铝合金磨屑脱落并被氧化成 Al₂O₃ 颗粒, 成为摩擦表面中的磨粒, 产生磨粒磨损。

对整个视图表面进行 EDS 能谱测试结果表明, 涂层中的氧质量分数为 2.25%。通过与磨损试验前表面 EDS 能谱测试结果对比, 发现磨损表面的氧含量有所增加。对图 8 (a) 中摩擦表面进行选区 EDS 能谱分析 (G region), 发现未被铝合金覆盖区域的氧质量分数也由原来的 1.42% 增加为 1.87%。这说明在摩擦过程中, 除了有 6061 铝合金的氧化之外, Mo-W 涂层的新鲜表面不断暴露在空气中, 氧化现象也在同步进行。因此, 不施加磁场时的磨损现象也包括轻微的氧化磨损。

施加磁场后, Mo-W 涂层磨损表面 (图 8(b)~(f)) 的氧含量变大。当磁感应强度 B=0.5、0.75、1.0、1.25 和 1.5 T 时, 涂层磨损表面的氧质量分数分别上升到 3.93%、4.82%、5.17%、6.05% 和 6.71%(表 3)。显而易见, 随着磁感应强度的增加, 涂层磨损表面中的氧含量呈增加趋势。

图 9 是对 B=1.0 T 时磨损表面的 XRD 衍射分析结果, 发现其中除了 Mo、W 相外, 还有 MoO₃ 和 Al₂O₃ 衍射峰, 而喷涂态和未加磁场磨损后的 XRD 图谱则不明显^[15], 进一步说明了在摩擦

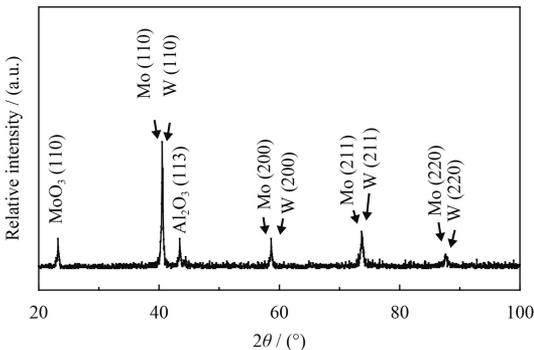


图 9 Mo-W 涂层磨损表面 XRD 图谱 (B=1.0 T)

Fig.9 XRD patterns of worn surface on Mo-W coating (B=1.0 T)

磨损过程中氧化现象的存在。

从微观形貌上看, 施加磁场后, Mo-W 涂层表面磨损形貌上出现大量的“犁沟”, 表现出明显的磨粒磨损特征 (图 8(b)~(f))。对 B=1.0 T 时的磨损表面高倍率放大后 (图 10), 在涂层表面还发现许多微小裂纹, 说明涂层在摩擦过程中由于循环应力的作用产生了一定的疲劳现象。涂层发生加工硬化后产生应力集中, 导致微裂纹的出现。

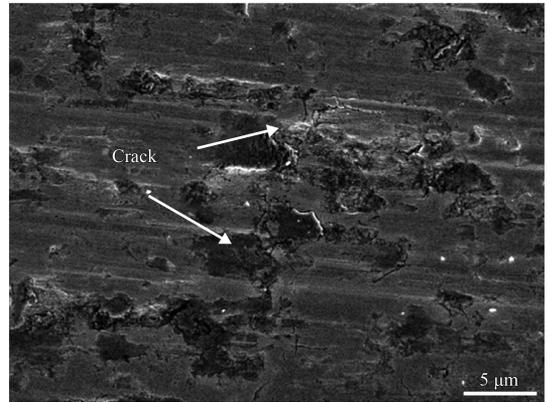


图 10 Mo-W 涂层磨损表面高倍率形貌

Fig.10 High magnification morphology of worn surface on Mo-W coating

2.3.5 磁场对 Mo-W 涂层磨损过程中的氧化影响

氧气的相对磁导率为 2.592, 属顺磁性物质。氧气分子在磁吸力的作用下会向磁场强度高的地方聚集。顺磁性磁偶极子在磁场中的受力可用公式 (3) 进行计算:

$$F = p_m \nabla H \quad (3)$$

其中: p_m 为氧气分子的磁偶极矩, $\text{Wb} \cdot \text{m}$; ∇H 为磁场强度 H 的梯度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

公式 (3) 说明氧气分子磁偶极子的受力取决于外磁场强度 H 的梯度 ∇H , 方向指向磁场强度 H 增大的方向^[16]。所以, 施加磁场会增加摩擦副间的氧含量, 进而促进摩擦副表面的氧化磨损。

为了证明摩擦副表面氧气含量增加与施加磁场有关,进一步了解摩擦表面的氧来源,设计了Mo-W涂层表面氧气浓度检测试验,对涂层表面分别进行了静态和动态表面氧气浓度测定。图11是Mo-W涂层表面氧气浓度与磁感应强度的关系。

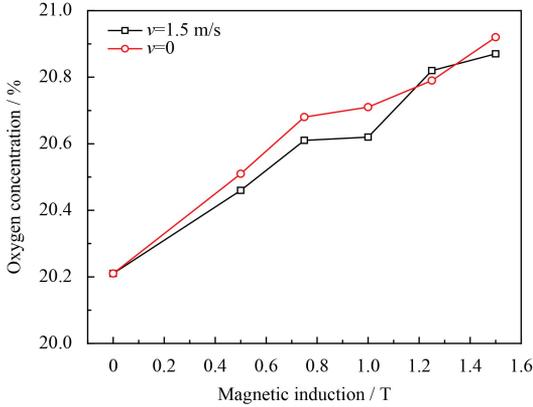


图11 Mo-W涂层表面氧气浓度随磁感应强度的变化

Fig.11 Oxygen concentration on Mo-W coating surface varied with magnetic induction

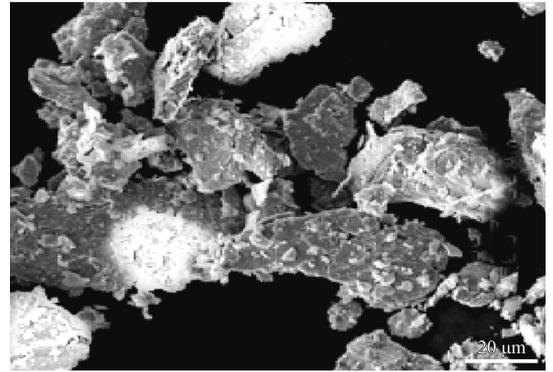
由图11可知,Mo-W涂层表面氧气浓度随着磁感应强度的增加呈上升趋势。当涂层表面空气静止时,磁感应强度为1.5 T时测得表面氧气体积分数最大,比不施加磁场时增加0.66%。当涂层表面空气流动速度为1.5 m/s时,磁感应强度为1.5 T时表面氧气体积分数最大,比不加磁场时增加0.71%。当施加磁感应强度为0.75~1.0 T时,氧气浓度增势较缓,说明在此磁感应强度范围内磁场的变化对氧气浓度的影响较小。另外,在施加相同磁感应强度时,涂层表面的氧气浓度与空气是否流动关系不大。因此,从试验数据可以推断出,磁场可以使涂层表面氧气浓度增加,从而促进Mo-W涂层摩擦磨损表面的氧化。

2.3.6 磨屑分析

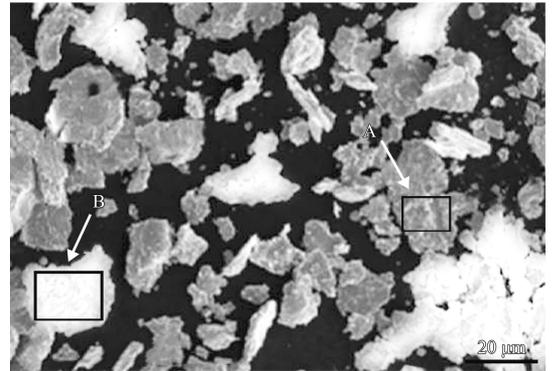
图12是施加磁场前后Mo-W涂层与6061铝合金摩擦磨损试验后磨屑的微观形貌。由图可以看出,未施加磁场时(图12(a)),磨屑呈不规则的片状,大致由50、20和10 μm以下3种粒径尺寸组成。施加磁场后,磨屑粒径有变小的趋势。当施加的磁感应强度为0.5 T时,主流磨屑尺寸变为30 μm左右(图12(b));当施加的磁感应强度为1.0 T时,主流磨屑尺寸变为20 μm左右(图12(c));当施加的磁感应强度为1.5 T时,主流磨屑尺寸小于10 μm(图12(d))。



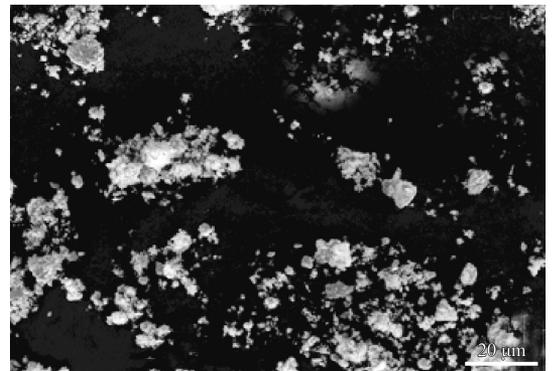
(a) $B=0$



(b) $B=0.5$ T



(c) $B=1.0$ T



(d) $B=1.5$ T

图12 不同磁感应强度下的磨屑微观形貌

Fig.12 Morphologies of grindings under different magnetic inductions

对磨屑进行分析还可以看出, 磨屑主要由两种微粒组成, 一种是在 SEM 下导电性较好的微粒(A), 呈暗灰色; 另一种是导电性不好、呈亮白色的微粒(B)。两种微粒进行 EDS 能谱分析结果如表 4 所示。可以看出, 暗灰色微粒主要以 Mo 为主, Al 含量为其次, 有少量的 W 元素, O 元素质量分数为 3.93%, 说明微粒存在氧化现象。另一种亮白色微粒的元素组成主要以 Al 和 O 为主, 同时含有少量的 Mo、W 元素。

表 4 图 12(c) 中选区磨屑能谱分析

Table 4 EDS analysis of regions in Fig.12(c) (w/o%)

Element	Area A	Area B
O	3.93	15.25
Mo	71.17	25.36
W	11.84	5.21
Al	13.06	54.18

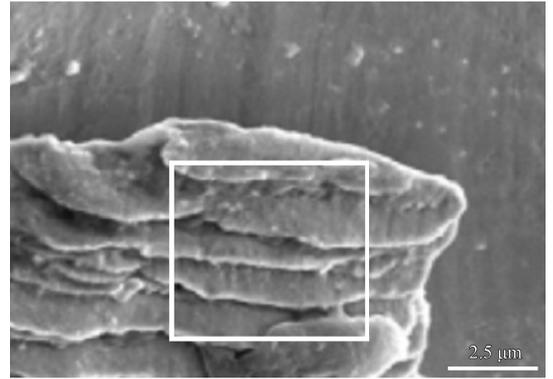
EDS 能谱分析结果还说明, 在 Mo-W 涂层与 6061 铝合金摩擦副的磨屑中, 一种是由 Mo-W 涂层脱落而来的磨屑, 其主要成分是 Mo-W 合金, 但表面也覆有 Al₂O₃ 的粘着产物; 另一种磨屑的主要成分是 Al₂O₃, 其原因是 6061 铝合金在摩擦过程中粘着在 Mo-W 涂层表面, 后由于结合不牢, 在摩擦切向力的作用下脱落, 被氧化形成。

2.3.7 Mo-W 涂层与 6061 铝合金摩擦副在磁场中的磨损过程分析

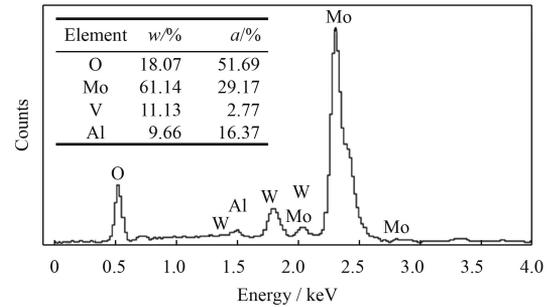
Mo-W 涂层与 6061 铝合金在磁场中的的摩擦磨损可分为 3 个阶段。

第一阶段: 初始磨合阶段。摩擦在 Mo-W 涂层与 6061 铝合金的表层氧化膜之间进行。由于 6061 铝合金的表层氧化膜硬度较大, 而 Mo-W 涂层的表层组织相对于心部组织较为“松软”^[11], 使涂层发生塑性变形, 直至脱落 (图 13)。另外, 由选区能谱分析可知, 脱落后的微粒氧化现象也比较严重。在此阶段, Mo-W 涂层的磨损率较大, 磁场所起的作用主要是增加了摩擦副表面的氧气浓度, 促进了脱落微粒的氧化。

第二阶段: 粘着磨损+磨粒磨损阶段。随着摩擦的进行, 6061 铝合金表面较硬的氧化膜消失, 露出“新鲜的”6061 铝合金。同时, Mo-W 涂层表面的“疏松”组织^[11]也被磨除, 露出密实的涂层组织, 硬度也显著增加 (图 14)。所以, 此阶段主要发生 6061 铝合金材料转移, 形成粘着磨损。此



(a) Grinding morphology of Mo-W coating



(b) EDS analysis of selected region

图 13 摩擦过程中脱落的 Mo-W 涂层微粒 (B=1.0 T) 及选区能谱分析

Fig.13 Grinding morphology of Mo-W coating (B=1.0 T) and EDS analysis of region

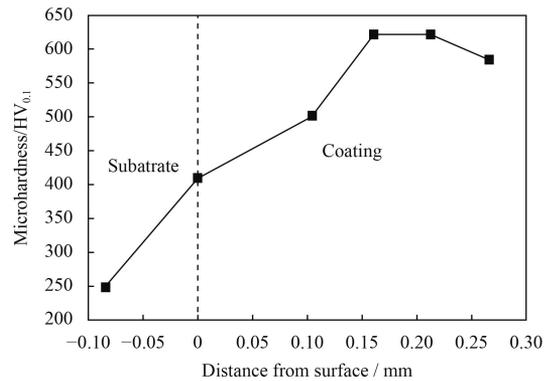


图 14 显微硬度沿涂层厚度方向的分布

Fig.14 Microhardness along the direction of cross section

时, 磁场的主要作用仍然是促进摩擦副接触面氧化。另外, 第一阶段脱落的微粒在局部热影响下软化, 通过反复“挤压”作用容易变形和断裂, 从而使磨屑变小。

第三阶段: 稳定的磨粒磨损阶段。有的研究称之为“三体磨损”^[17], 即摩擦磨损在 Mo-W 涂层、磨屑和 6061 铝合金三者之间进行, 其中磨屑由 Mo-W 涂层微粒和 Al₂O₃ 微粒组成, 形成磨粒

磨损。粘着磨损转移到 Mo-W 涂层表面的 6061 铝合金材料, 在应力的“反复”作用下产生加工硬化, 同时部分从涂层表面脱落, 形成新的磨粒。这种以 6061 铝合金为主的新磨粒在磁场中会被促进氧化, 磨粒也逐渐变小。这些磨粒在摩擦副间形成一个“微轴承”, 减小了摩擦副间的摩擦因数, 同时也减少了 Mo-W 涂层和 6061 铝合金之间的直接接触, 从而减少了磨损量。

由以上分析可以看出, 磁场主要起到两个作用: 一是提高了摩擦副间的氧气浓度, 促进了摩擦副间的氧化磨损现象; 二是提高了摩擦热量, 这可能是磁场能转换为热能形式释放^[18], 也可能是在摩擦副间产生电磁感应形成“微涡流”而产生热量^[1]。在热量影响下磨粒先软化后细化, 从而降低摩擦因数, 改善了摩擦条件。

3 结 论

(1) 随着磁感应强度的增加, Mo-W 涂层的摩擦因数降低, 磨损量有小幅减小。当施加不同强度的磁场时, 涂层表面温度一直在缓慢升高, 摩擦副表面的温度与不施加磁场时相比有 10~20 °C 的温升。施加磁场对 Mo-W 涂层显微硬度值不会造成影响。

(2) 施加磁场后, Mo-W 涂层磨损表面的氧含量变大, 且随着磁感应强度 B 的增加氧含量呈增加趋势。Mo-W 涂层表面氧气浓度测试表明, 磁场可以使涂层表面氧气浓度增加, 从而促进 Mo-W 涂层磨损表面的氧化。

(3) 随着磁感应强度的增加, 磨屑粒径逐渐变小。磨屑主要由表面覆有 Al_2O_3 的 Mo-W 合金微粒和 Al_2O_3 微粒组成。磁场在 Mo-W 涂层与 6061 铝合金的摩擦中主要有两个作用: 一是提高了摩擦副间的氧气浓度, 促进了氧化磨损; 二是提高了摩擦热量, 促进了磨粒软化和细化, 降低了摩擦因数。

参考文献

[1] 韩红彪, 吴育兵, 张永振, 等. 直流磁场下销盘摩擦过程中的电磁感应力矩分析[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(1): 31-36.
HAN H B, WU Y B, ZHANG Y Z, et al. Analysis of electromagnetic induction torque of the pin and disk during friction process under DC magnetic field[J]. Tribology, 2015, 35(1): 31-36 (in Chinese).

[2] ALIREZA D, SASAN K A, ALIREZA F T, et al. Effects of magnetic assistance on improving tool wear resistance and cutting mechanisms during steel turning[J]. Wear, 2017, 384: 1-7.

[3] ANANT K S, SUNIL J, PULAK M P. Mechanism of material removal in ball end magnetorheological finishing process[J]. Wear, 2013, 302: 1180-1191.

[4] OMAR B, BARNEY K, BARRY G. Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134: 190-196.

[5] 陈允, 徐伟东, 袁伟群, 等. 电磁发射中铝电枢与不同材料导轨间的滑动电接触特性[J]. 高压电技术, 2013, 39(4): 937-942.
CHEN Y, XU W D, YUAN W Q, et al. Sliding electrical contacts between aluminum armature and different materials in railgun[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 937-942 (in Chinese).

[6] 巩飞, 翁春生. 电磁轨道炮滑动电接触的热效应[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 91-95.
GONG F, WENG C S. Thermal effect of sliding electrical contact in electromagnetic railgun[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014, 28(1): 91-95 (in Chinese).

[7] ZIELINSKI A. Disrupting armature ejecta and its effects on rail damage in solid-armature railguns[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(3): 941-946.

[8] NELSON C, EDISON C. Application of coatings for electromagnetic gun technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 704-708.

[9] TREVOR W, DOYLE T. The Effect of surface coating on the onset of rail gouging[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2011, 39(4): 168-172.

[10] SIOPI S M J, RICHARD W. Materials selection exercise for electromagnetic launcher rails[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(8): 4831-4838.

[11] 闫涛, 刘贵民, 吴行, 等. 超音速等离子喷涂 Mo-W 涂层的力学性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 107-114.
YAN T, LIU G M, WU H, et al. Mechanical properties of Mo-W coatings prepared by supersonic plasma spraying[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 107-114 (in Chinese).

[12] 韩文政, 谭俊, 姜厚温, 等. 坦克金属材料热处理[M]. 北京: 装甲兵工程学院, 1996: 136.
HAN W Z, TAN J, JIANG H W, et al. Heat treatment of tank metal materials[M]. Beijing: Armored Forces Engineering Academy, 1996: 136 (in Chinese).

[13] 陈树川, 陈凌冰. 材料物理性能[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 3-45.
CHEN S C, CHEN L B. Physical properties of materials[M].

- Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1999:3-45 (in Chinese).
- [14] 田民波. 磁性材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 20-36. TIAN M B. Magnetic material[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 20-36 (in Chinese).
- [15] 闫涛. 多场耦合条件下 Mo-W 喷涂层的摩擦磨损性能及机理[D]. 北京: 陆军装甲兵学院, 2017. YAN T. Friction & wear properties and mechanism of Mo-W coating under multi field coupling[D]. Beijing: Army Academy of Armored Forces, 2017 (in Chinese).
- [16] 栗凤超, 王立, 吴平, 等. 氧气在梯度磁场中流动及扩散行为研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(11): 1097-1099. LI F C, WANG L, WU P, et al. Study of flow and diffusion behavior of oxygen in gradient magnetic field[J]. Journal of Engineering Thermaophysics, 2011, 32(11): 1097-1099 (in Chinese).
- [17] ZAIDI H, AMIRAT M, FRENEET J, et al. Magnet tribology of ferromagnetic/ ferromagnetic sliding couple[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 1518-1526.
- [18] 魏永辉, 张永振, 陈跃, 等. 国内外磁场干摩擦学研究现状及展望[J]. 润滑与密封, 2010, 35(5): 94-98. WEI Y H, ZHANG Y Z, CHEN Y, et al. Research situation and prospect of magnetic field tribological Inforeign and domestic[J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(5): 94-98 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)

—————

• 本刊讯 •

2018 第 25 届国际热处理及表面工程联合会大会将在西安举行

2018 年 9 月 11—14 日, 由国际热处理及表面工程联合会 (IFHTSE) 发起, 中国机械工程学会热处理分会主办的 2018 第 25 届国际热处理及表面工程联合会将在西安举行。此次会议属于国际热处理及表面工程联合会的系列会议之一, 是国际热处理及表面工程领域具有较高水平的学术会议。

会议将邀请十几位国际著名学者和院士到会做特邀报告, 预计将有 40 多个国家和地区近千人参加, 学者们将就热处理及表面工程领域的最新研究成果及业界动态进行广泛、深入的交流和探讨。除大会主旨报告外, 将组织召开 27 个专题分论坛, 涉及表面工程领域的有: 关键零部件的热处理与表面工程、高能束表面工程与增材制造、表面功能化涂层和表面完整性与抗疲劳制造以及再制造等 13 个专题。经过表面工程等关键技术的创新发展, 再制造已经形成资源高效再利用的科学模式, 日益成为国家循环经济发展战略的重要支撑; 再制造作为此次会议的一个重要专题, 由再制造技术国家重点实验室和西安文理学院共同组织。

欢迎国内外广大热处理及表面工程工作者踊跃参会投稿。会议网站 www.25ifhtse.org, 需英文在线投稿, 被接受的论文将收录在大会论文集中, 会前出版论文集 (或光盘), 会后选拔优秀论文推荐至相关支持媒体正式发表。摘要截止日期: 2018 年 4 月 20 日; 接收通知: 2018 年 4 月 30 日; 全文截止日期: 2018 年 6 月 30 日。与会期间, 将分别评选出 Tom Bell 青年作者奖和大会优秀青年作者奖。

(本刊编辑部 供稿)