

直流稳恒磁场对 45 钢摩擦磨损性能的影响

Effect on Friction and Wear Behaviour of 45 Steel in Direct Current Constant Magnetic Field

商 剑¹, 张永振¹, 邱 明², 徐永智² (1 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003;

2 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

SHANG Jian¹, ZHANG Yong-zhen¹, QIU Ming², XU Yong-zhi²

(1 School of Material Science & Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, Henan, China;

2 College of Mechanical and Electronic Engineering, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471003, Henan, China)

摘要: 大气条件下, 研究不同强度的直流稳恒磁场对 45 钢干滑动摩擦磨损性能的影响。结果表明: 与无磁场条件下相比, 材料的摩擦系数降低, 磨损量明显减少, 磨损表面光滑, 磨屑细化。微观分析表明, 45 钢在磁场条件下磨损后, 表面生成更多的氧, 认为氧化磨损及磨屑的润滑作用是磁场降低摩擦系数、减轻磨损的主要原因。

关键词: 直流磁场; 摩擦磨损; 磁场强度; 氧化

中图分类号: TH 117.3; TG 142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2009)11-0004-04

Abstract: The influence of D C constant magnetic field on tribological behaviour of 45 steel pin against disc in atmosphere was investigated. The results indicated that the wear loss decreased and friction coefficient went down, the worn surfaces were smooth and debris were fine obviously with a magnetic field. Microscopic analysis by SEM and EDS showed that more oxide-protective film formed on worn surface in the presence of a magnetic field. Oxidative wear mechanism and lubricated effect of debris were stated, which played an important role during the friction and wear.

Key words: direct current constant magnetic field; friction and wear; magnetic intensity; oxidation

材料的耐磨性不仅取决于其本身的组织和性能, 而且与摩擦接触部位的工作环境有密切关系^[1]。随着电磁技术的发展, 越来越多的电气设备、电磁仪器中的运动部件在电场和磁场工况条件下服役, 如高速铁路弓网-滑板接触系统、地铁、矿井轨道车的电力传输系统、磁化切削等。20 世纪 60 年代以来印度^[2-5]、日本^[6-10]、法国^[11-17] 等开展研究表明: 磁场能够改变铁磁性材料的摩擦学性能, 利用磁场控制摩擦、减小磨损成为摩擦学研究中一种很有前景的新途径。国内^[18-20] 在外加磁场直接控制摩擦磨损方面的研究尚处于起步阶段。

本工作研究了干滑动磨损条件下, 直流稳恒磁场强度对 45 钢/45 钢配副摩擦磨损性能的影响规律, 探索了直流稳恒磁场影响摩擦磨损的机理, 以期对摩擦学设计提供依据。

1 实验

1.1 实验设备及仪器

实验在自制的摩擦磨损试验机上进行, 试样采用

销-盘摩擦方式, 摩擦系数通过测量摩擦力矩计算得出, 磨损量采用精度为 0.1mg 的电子天平称量; 利用直流电磁线圈施加磁场, 采用直流换向衰减的方法退磁; 采用扫描电镜 (SEM) 对试样磨损后的表面进行形貌和组织观察; 采用能量分散谱仪 (EDS) 对磨损后的表面、磨屑进行成分测定。试验机及磁场施加装置如图 1 所示。

1.2 实验方法

实验在固定载荷、不同磁场强度的低转速条件下进行: 载荷为 230N, 速度为 0.542m/s, 时间为 5~20min (相对滑动距离 162~648m), 磁场强度在 $2.25 \times 10^4 \sim 4.5 \times 10^4$ A/m 之间。销、盘均采用 45 钢 (0.45C%, 质量分数), 销尺寸为 $\phi 18 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$, 盘尺寸为 $\phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。盘试样加工后经淬火处理硬度为 HRC45 左右。为避免材料实验后剩磁的影响, 在每次实验前, 除了对试样进行清洗, 还要对其进行退磁处理 (包括对材料磨损表面进行微观分析前); 由于磁场的作用, 摩擦副之间要产生磁力, 施加载荷时

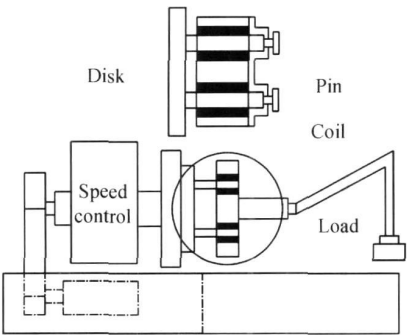


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 The sketch of equipment for testing

考虑磁场吸力的影响。

2 结果及讨论

2.1 直流稳恒磁场对摩擦系数及磨损量的影响

图 2 显示了不同磁场强度下 45 钢销-盘摩擦系数的变化。有、无磁场条件下,摩擦系数均随时间的增加而下降,与无磁场条件相比,磁场条件下摩擦系数下降 0.1~ 0.2,随着磁场强度的增加,摩擦系数下降得更多。

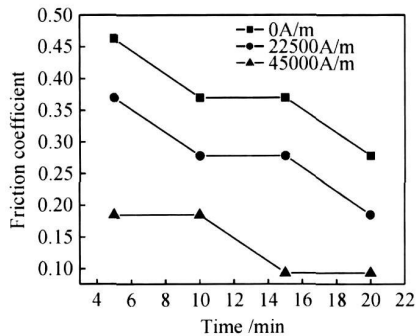


图 2 不同磁场强度时摩擦时间与摩擦系数的关系
(速度 0.542m/s, 载荷 230N)
Fig. 2 Relationships between friction coefficient and time with different magnetic intensity (velocity 0.542m/s, load 230N)

磁场强度对销、盘及总磨损量的影响如图 3 所示。磁场条件下,销、盘及总磨损量均随着磁场强度的增加而减少,从无磁场到有磁场条件下减少明显,与无磁场条件下相比,磁场条件下销磨损量最多减少达 70%,盘磨损量则最多减少近 87%,总磨损量减少近 90%。随着磁场强度的增加,磨损量逐渐减小,磁场强度达到 $4.5 \times 10^4 \text{ A/m}$ 时,磨损量最小。

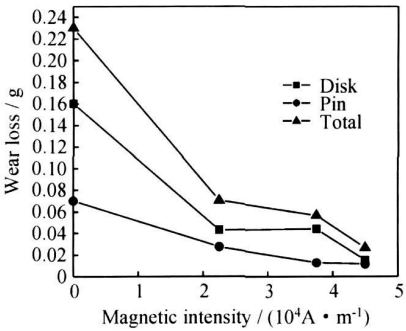


图 3 磁场强度与 45 钢磨损量的关系
(速度 0.542m/s, 载荷 230N, 5min)
Fig. 3 Wear loss of pin-disk and total as a function of magnetic intensity (velocity 0.542m/s, load 230N, in 5min)

2.2 直流稳恒磁场对磨损表面的影响

图 4 对比显示了有、无磁场条件下试样磨损后的表面形貌变化,肉眼即可以观察到两者的差别:无磁场时,磨损表面较粗糙,可见未完全脱离表面的颗粒,有磨粒磨损的特征,磨损较严重,有磁场时则不同:磨损后的表面较光滑,未完全脱离表面的颗粒相对数量较少且小得多,有黏着,磨痕边缘都有破坏和氧化的痕迹;表面能谱分别测得了图 4 中 A, B 区内 C, Fe, O 的相对含量,如图 5 所示。结果表明:磁场条件下磨损后,试样表面氧的相对含量高于无磁场时的氧含量(质量分数),虽然不同磁场强度时氧的相对含量相近,但是磁场条件下的氧化程度明显高于无磁场时的氧化程度。

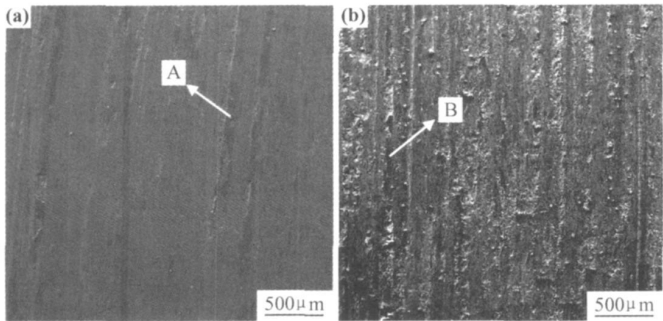


图 4 销磨损后表面形貌 SEM 照片 (a) 有磁场($4.5 \times 10^4 \text{ A/m}$); (b) 无磁场
Fig. 4 SEM photographs of the worn surfaces of pin (a) with a magnetic field($4.5 \times 10^4 \text{ A/m}$); (b) without a magnetic field

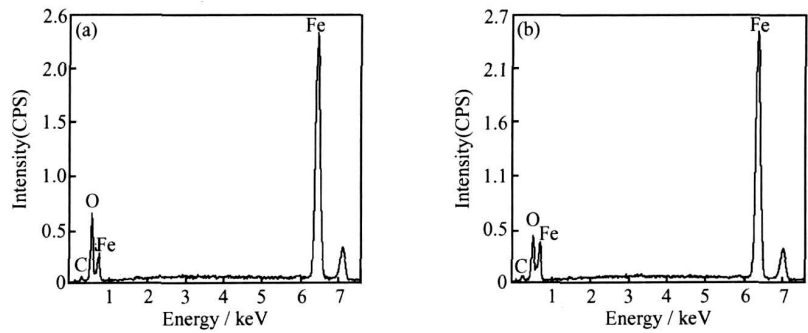


图 5 销磨损后表面的 EDS (a) 有磁场($4.5 \times 10^4 \text{ A/m}$); (b) 无磁场

Fig. 5 EDS of the worn surface of the pin (a) with a magnetic field ($4.5 \times 10^4 \text{ A/m}$); (b) without a magnetic field

2.3 直流稳恒磁场对磨屑的影响

图 6 为磨屑形貌的 SEM 照片。从图 6 可以看出, 无磁场时磨屑颗粒较大, 多呈块、片状且大小不均匀, 颜

色为棕黑色, 有磁场时磨屑颗粒很细小, 形状规则且大小较均匀, 并有金属光泽。能谱成分分析表明: 磁场下磨屑氧元素的含量相对高于无磁场时氧元素的含量。

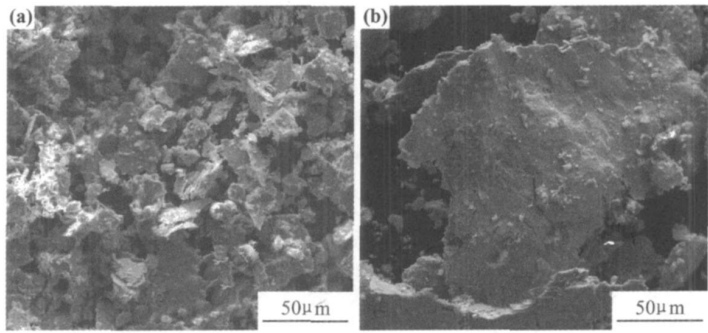


图 6 磨屑形貌的 SEM 照片(载荷 230N, 滑动距离 162m) (a) 有磁场 ($4.5 \times 10^4 \text{ A/m}$); (b) 无磁场

Fig. 6 SEM morphologies of the debris(load 230N, sliding distance 162m)

(a) with a magnetic field($4.5 \times 10^4 \text{ A/m}$); (b) without a magnetic field

3 结果与讨论

在同种金属的摩擦磨损过程中, 黏着磨损机制往往起主要作用, 一般也存在氧化磨损、剥层、微切削等^[21], 是多种磨损机制的混合。在不同的条件下, 各种类型的磨损机制所占的比例和影响程度不同。

首先, 静态无摩擦条件下, 磁场会使 45 钢产生磁致伸缩效应引起磁致伸缩强化, 从而使 45 钢表面或整体硬度有所提高, H. zaidi, K. J. Chin^[15, 16] 等人在研究中均发现磁场条件下材料磨损后表面显微硬度提高; 摩擦磨损过程中, 摩擦副接触表面产生循环摩擦应力, 磁致伸缩和摩擦应力的联合作用引起材料物相或组织结构的变化, 图 7 是有、无磁场条件材料表层及内部纵切面显微组织, 可以看出磁场使 45 钢表面层区组织发生明显变化, 无磁场时表层或亚表层出现空洞等缺陷, 而磁场条件下, 表层区缺陷相对明显减少; 组织均匀致

密。其次, 材料表面或亚表面的许多微观行为如位错、原子扩散等均受到磁场的影响, 大量位错积聚在材料表面, 提高了其强度, 改善了接触面的应力分布, 从而减少磨损量。再次, 摩擦过程中磁场力吸附大量磨屑积聚在摩擦副接触面附近, 长时间的保持在界面, 不容易脱落, 在摩擦过程中吸收了较多的机械能; 作为中间介质的磨屑覆盖在摩擦界面, 避免金属表面的直接接触, 具有隔离作用; 同时磨屑反复研磨变得更细化、光滑, 在接触界面间起到类似固体润滑剂的作用。再次, 磨屑的细化使其表面积增加, 比刚从母体剥落时更容易氧化, 氧化程度增大。目前很多研究表明, 磁场可以促进氧化。Kumagai^[9] 认为磁场直接促进氧化, 根据氧分子比其它气体分子磁导率高的性质, 测量了外磁场作用下磁体表面区域氧浓度的水平。数据表明: 磁场使空气氧浓度只有微小量的增加, 对表面氧化影响较小。此外 Kumagai 还从氧化增重和氧化面积扩大的角度设计实验来证明, 但实验结果均表明氧化作用

很小,难以作为在磨损试验过程中短时间内出现大量氧化的有力证据,因此我们认为磁场仅会对加速氧化产生轻微影响。此外,有些学者认为磁场间接促进氧化。Hiratsuka K, Sasada T^[6]认为磁场影响了铁磁体

对氧的化学吸附活化能,即降低材料表面的氧化激活能,从而磨屑及接触面对氧气的吸附加速,材料表面更容易氧化,进而影响摩擦磨损性能,笔者更偏重于此观点。

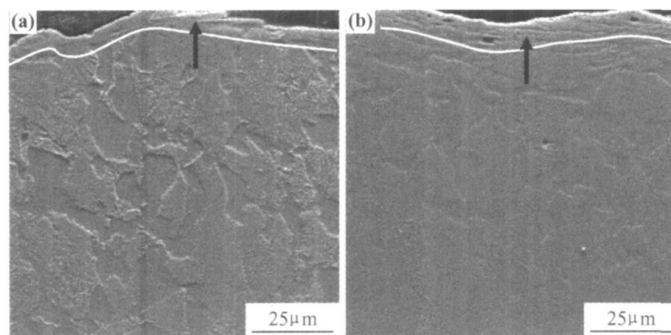


图 7 磨损表面纵切面显微组织(载荷 230N,滑动距离 162m) (a) 有磁场; (b) 无磁场

Fig. 7 Microphotographs of worn surfaces of pin (load 230N, sliding distance 162m)

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

总之,在摩擦动态过程中,摩擦应力和磁致伸缩强化联合作用,改善了 45 钢的表面硬度和强度,摩擦过程中,磁场力吸引磨屑至摩擦表面,使其反复研磨从而细化,起到隔离和润滑的作用,导致氧化磨损增加,这些都是磁场影响 45 钢/45 摩擦学性能的原因。

4 结论

(1) 与无磁场条件相比,直流稳恒磁场下 45 钢/45 配副的摩擦系数降低,磨损量明显减少。

(2) 大气环境下,直流稳恒磁场更容易促进 45 钢磨损表面及磨屑的氧化。

(3) 磁致伸缩强化,氧化磨损和磨屑润滑的共同作用,是直流稳恒磁场减摩耐磨的主要原因。

参考文献

- [1] 高彩桥. 摩擦金属学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988. 78 - 92.
- [2] MUJUM K, GHOSH A. A model of adhesive wear in the presence of a magnetic field [J]. Wear, 1977, 41: 103- 116.
- [3] MUJUM K, RADHAKRISHNA A. Wear of non-magnetic materials in the presence of a magnetic field [J]. Wear, 1980, 58: 49- 58.
- [4] MUJUM K, GHOSH A. Effect of a magnetic field on the diffusive wear of cutting tools [J]. Wear, 1980, 58: 137- 145.
- [5] NEEMA M L, PANDEY P C. The effect of magnetization on the wear of high speed steel tools [J]. Wear, 1980, 59: 355- 362.
- [6] HIRATSUKA K, SASADA T, NOROSE S. The magnetic effect on the wear of metals [J]. Wear, 1986, 110: 251- 261.

- [7] KUMAGAI K, TAKAHASHI M, KAMIYA O. Wear behaviour in the presence of magnetic fields for pin-on-disc repeated dry wear tests [J]. Tribology International, 1992, 25 (2): 91- 98.
- [8] KUMAGAI K. Effects of magnetic fields on wear of ferromagnetic material [J]. Bull Japan Soc of Prec Engg, 1985, 19 (1): 43- 48.
- [9] KAZUO, KUMAGAI K, KOSHI SUZUKI, et al. Study on reduction in wear due to magnetization [J]. Wear, 1993, 162- 164: 196- 201.
- [10] KAZUO, KUMAGAI K, KAMIYA O. Effects of magnetization on wear [J]. Tribology Transaction, 1997, 40: 621- 626.
- [11] ZAIDI H, PAN L, PAULMIER D, et al. Influence of a magnetic field on the wear and friction behavior of a nickel/XC 48 steel couple [J]. Wear, 1995, 181- 183: 799- 804.
- [12] MANSORI M EL, ZAIDI H, PAULMIER D, et al. Surface modifications of a non-ferro-magnetic copper/ferromagnetic steel XC48 couple in magnetized sliding contact [J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 86- 87: 511- 515.
- [13] MANSORI M EL, PAULMIER D. Effects of selective transfer on friction and wear of magnetized steel/graphite sliding couple [J]. Applied Surface Science, 1999, 144- 145: 233- 237.
- [14] ZAIDI H, SENOUCI A. Influence of magnetic field on surface medication and the friction behavior of sliding couple aluminium/XC48 steel [J]. Science Surface and Coatings Technology, 1999, 120- 121: 653- 658.
- [15] CHIN K J, ZAIDI H, NGUYEN M T, et al. Tribological behavior and surface analysis of magnetized sliding contact XC48 steel/XC48 steel [J]. Wear, 2001, 250: 470- 476.
- [16] CHIN K J, ZAIDI H, MATHIA T. 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.

(下转第 13 页)

钨才导致该相富集钨元素。

从图 6 可知, 钨含量的提高会导致 δ'' 相析出量的显著增加。但是仅从热力学角度还无法推知 δ'' 相对力学性能是否有利, 发展高稳定性的 718 合金时若要加入钨, 则要综合考虑元素钨对高温合金其它因素如加工性能的影响。

以上热力学计算结果可看出, 碳、铝、钛、铌和钨中任何一个合金元素含量的改变, 都会引起铝、钛、铌、铬、铁、钼和钨在析出相间的重新分配, 进而改变相的析出规律。其中碳含量提高会显著促进 MC 和 $M_{23}C_6$ 这两种碳化物的形成。铌含量增加可显著促进 δ 相析出。铝和钛含量提高均会促进高稳定性 γ' 相析出, 抑制 δ 相形成。当铝含量大于 1% 或钨的加入量大于 1.5% 时, 一种具有六方晶体结构的高稳定性的富铌 (钨) 相就会析出。这些相的析出规律的改变对于发展高稳定性的 718 合金具有重要的指导意义。

3 结论

(1) 718 合金中碳含量变化主要对碳化物的析出量有显著影响, 对碳化物的析出温度没有明显影响, 发展高稳定性的 718 合金建议碳含量控制在 0.01% 以下。

(2) 718 合金中铝和钛含量增加会显著提高 γ' 相的固溶温度和增加其析出量, 同时抑制 δ 相析出, 从而使 718 合金的稳定性显著提高。但铝和钛含量过高会分别促进 σ 相和 η 相形成, 因此发展高稳定性的 718 合金建议铝含量宜小于 1.5%, 钛含量宜保持 1% 不变。

(3) 718 合金中铌含量的提高会显著增加 δ 相含量, 建议发展高稳定性的 718 合金铌含量宜控制在标准成分的上限 5.4% 而不宜再提高。

(4) 当铝含量大于 1% 或钨加入量大于 1.5% 时, 718 合金中会析出一种具有六方晶体结构的富铌 (钨) 相, 利用该相高稳定性的特性可制造细晶合金。

参考文献

- [1] COZAR R, PINEAU A. Morphology of γ' and γ'' precipitates and thermal stability of inconel 718 type alloys [J]. Metallurgical Transactions A, 1973, 4: 47–59.
- [2] COLLIER J P, SONG H W, PHILIPS J C, et al. The effect of varying Al, Ti, and Nb content on the phase stability of INCONEL 718 [J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19: 1657–1688.
- [3] 潘崇超, 李殿国, 徐凤琴, 等. 改型 718 合金的研制 [J]. 金属材料研究, 2004, 30(2): 54–58.
- [4] DONG J X, XIE X S, ZHAO S H. Enhancement of thermal structure stability in a Nb base superalloy [J]. Scripta Metallurgica, 1993, 28: 1477–1482.

- [5] KENNEDY R L. ALLVAC® 718 PLUS™, Superalloy for the next forty years [A]. Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives [C]. Warrendale: TMS, 2005. 1–14.
- [6] LIU FANG, SUN WENRU, DU JINHUI, et al. Microstructure and properties of modified and conventional 718 alloys [J]. Trans Nonferrous Met Soc, 2006, 16: 1940–1943.
- [7] FAN Hongmei, ZENG Yanping, WANG Xishu, et al. Study on inclusion induced fatigue crack initiation and propagation in ultra-high strength steel for aerospace application [J]. Iron and Steel, 2006, 42(7): 72–75.
- [8] 刘发信, 袁文明, 汤鑫, 等. 细晶晶粒度与力学性能的关系 [J]. 材料工程, 1996, (9): 25–26.
- [9] 吕宏军, 姚草根, 张凯峰, 等. GH4169 合金细晶成形工艺与机理及其性能研究 [J]. 机械工程材料, 2003, 27(1): 15–17.
- [10] XIE Xishan, DONG Jianxin, ZHANG Maicang, et al. Embrittlement effect of iron and nickel base superalloys in high temperature long time exposures [A]. Advanced Materials and Processes for Gas Turbines [C]. Warrendale: TMS, 2003. 207–215.
- [11] ZHAO Shuangqun, XIE Xishan, SMITH G D, et al. Research and improvement on structure stability and corrosion resistance of nickel-base superalloy INCONEL alloy 740 [J]. Materials and Design, 2006, 27(10): 1120–1127.

基金项目: 国家自然科学基金 (50771011)

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2008-12-05

作者简介: 付书红 (1979—), 女, 博士生, 从事高温合金方面的研究工作, 联系地址: 北京科技大学材料科学博 2005 级 255 号信箱 (100083), E-mail: fshdora@163.com

(上接第 7 页)

- [17] ZAIDI H, AMIRAT M, FRENE J, et al. Magnetotribology of ferromagnetic/ferromagnetic sliding couple [J]. Wear, 2007, 263: 1518–1526.
- [18] 董祥林, 陈金荣, 简小刚. 磁场对中碳钢滑动摩擦磨损的影响 [J]. 金属学报, 1999, 35(6): 577–580.
- [19] 陈金荣, 董祥林. 直流磁场对载荷变化时磁性材料摩擦磨损的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28: 35–38.
- [20] 简小刚. 直流稳恒磁场对铁磁性材料干滑动摩擦磨损影响初探 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所硕士论文, 1999.
- [21] 李建明. 磨损金属学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 108–109.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50775066); 国家 973 资助项目 (2007CB607603)

收稿日期: 2008-12-25; 修订日期: 2009-03-11

作者简介: 商剑 (1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事材料干摩擦学研究, E-mail: shangbahao@163.com

通讯作者: 张永振 (1963—), 男, 博士, 教授, 博导, 目前主要从事材料干摩擦学研究, 联系地址: 河南省洛阳市涧西区西苑路 48 号河南科技大 学校本部 134 信箱 (471003), E-mail: yzzhang@mail.haust.edu.cn