

金属材料直流磁场干摩擦的研究进展

魏永辉^{1,2}, 王秀丽¹, 刘元朋¹, 蒋志强¹, 冯宪章¹

(1. 郑州航空工业管理学院 机电工程学院, 郑州 450046;

2. 航空经济发展河南省协同创新中心, 郑州 450046)

摘 要: 磁场干摩擦主要是研究磁场强度参量对材料干摩擦磨损性能的影响机理和规律。系统综述了金属材料直流磁场干摩擦的研究过程、研究方法和相应研究成果。阐述了不同磁属性(抗磁性、顺磁性和铁磁性)材料的磁场干摩擦特性及其机理, 得出材料磁导率与其磁场干摩擦学特性有一定对应关系, 材料磁导率越大, 磨损率和摩擦系数的减小趋势越明显, 并指出了试验研究中遇到的问题, 如应关注摩擦副材料选配、磁场施加装置、摩擦接触方式及装卡装置等。为了避开材料化学成分不同造成的干扰, 设计了三种制备方案, 发现通过热处理工艺改变微观组织相含量或添加铁、钴、镍等铁磁性元素进行化学成分设计等常规的材料制备方法, 难以达到目的。最终利用奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 较大的冷加工硬化特性, 采用常温下锻造工艺制备了不同磁导率的几种相同成分材料, 使磁导率成为关键变量。研究了磁场强度、材料磁导率与其磁场干摩擦特性的交互影响情况和规律, 并展望了未来需要开展的研究方向。

关键词: 磁场; 干摩擦; 磁导率; 机理

中图分类号: TG701 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0223-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.030

Dry Friction of Metal Materials under DC Magnetic Field

WEI Yong-hui^{1,2}, WANG Xiu-li¹, LIU Yuan-peng¹, JIANG Zhi-qiang¹, FENG Xian-zhang¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2. Collaborative Innovation Center for Aviation Economy Development of Henan Province, Zhengzhou 450046, China)

ABSTRACT: For dry friction in magnetic field, the work mainly aims to study mechanism and rule of effects of magnetic field intensity parameters on dry friction and wear properties of materials. Study process, study methods and corresponding study results regarding dry friction of metal materials in DC magnetic field were reviewed systematically. Dry friction properties and mechanism of different magnetic (diamagnetic, paramagnetic and ferromagnetic) materials in magnetic field were expounded. It was concluded that magnetic permeability of materials had certain corresponding relation with dry friction properties in dry friction. The higher the magnetic permeability was, the more obvious the decreasing trend of wear rate and wear coefficient were. Problems encountered during experimental study were pointed out, for example, friction pair material selection, magnetic field applying device, frictional contact mode and holding jig should be noted. Three preparation schemes were designed to prevent interference caused by difference in chemical composition. It was founded that the aim was hardly achieved in conventional

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-09-12

Received: 2017-06-10; Revised: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(51641509, U1404518); 河南省科技攻关项目(162102210086)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51641509, U1404518), Science and Technology Foundation of Henan (162102210086)

作者简介: 魏永辉(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为磁场干摩擦学。

Biography: WEI Yong-hui(1979—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: the magnetic-environment dry tribology.

material preparation methods by changing micro-structure phase content with heat treatment process, or changing chemical composition by adding ferromagnetic elements including Fe, Co and Ni. Finally, relying on extensive cold working hardening characteristics of austenitic stainless steel 1Cr18Ni9Ti, several materials with identical composition and of different magnetic permeability were prepared by adopting forging process at room temperature. As a result, magnetic permeability became a key variable. Reciprocal effect and effect law of magnetic field intensity and material magnetic permeability on dry friction properties in magnetic field were studied, and research orientation in the future was expected.

KEY WORDS: magnetic field; dry friction; magnetic permeability; mechanism

磁性是物质的基本属性之一^[1], 磁场干摩擦主要是研究磁场强度参量对材料干摩擦磨损性能的影响机理和规律^[2-4]。现代研究发现, 磁场能够影响金属的摩擦学表现, 从相关学术资料来看^[5-23], 该项研究国外开展得较早、较多, 而国内则处于正在涉入阶段。随着电磁技术应用范围的不断扩大, 越来越多的摩擦副服役于电磁工况条件下, 如电磁弹射^[24-26]、电力机车的接触导线与滑板^[27-29]、磁悬浮列车的传动系统、电动机中的轴承等^[30,31]。所以研究金属材料磁场干摩擦性能的影响因素及其规律性, 为进行摩擦学设计提供理论依据, 成为了亟待解决的课题^[32-35]。

1 铁/铁、非铁(顺)/铁磁性材料的磁场干摩擦特性和干涉机理^[34-37]

国内外的磁场摩擦学研究结论不尽一致, 为此, 项目组通过铁磁性/铁磁性和非(顺)铁磁性/铁磁性材料摩擦副选配, 以特斯拉(T)作为磁场强度单位进行试验研究, 并详细探讨了铁磁性/铁磁性、非铁磁性/铁磁性摩擦副干摩擦学特性的磁场干涉机理。试验验证了磁场能够加快45#钢的腐蚀(氧化)速度, 表明磁场能使45#钢周围的O₂浓度升高, 促进氧化, 从另一方面验证了日本K. Kumagai^[30-31]的试验结论。

铁磁性摩擦副的摩擦磨损过程中, 磁场对磨损产物的捕获作用使其在摩擦副表面上形成自生改性层, 显著改善了摩擦副的摩擦磨损性能。磁场可细化磨屑, 并促进其氧化。这是由于一方面磁场可使附近的O₂浓度升高; 另一方面磨屑细化至纳米级尺寸时, 会发生超顺磁效应^[38-40], 更易被吸附, 增大了磨屑与空气中O₂的总接触表面积; 再者, 磁场还可使摩擦面温度升高。摩擦面温度升高的原因有: 磁场的捕获作用使磨屑滞留的量更大、时间更长, 减缓散热; 产生磨屑过程中, 基体表面的磁弹性能以热能形式被释放。

随着外磁场强度增大, 铁磁性/铁磁性摩擦副40CrMoA/W18Cr4V和2Cr13/W18Cr4V的磨损量和平均摩擦系数均有降低趋势, 非铁磁性/铁磁性摩擦副Ti6Al4V/W18Cr4V的平均摩擦系数和W18Cr4V环

的磨损量有降低趋势, 而Ti6Al4V的磨损量却有升高趋势。说明不同材料的磁场摩擦学特性不同, 同为铁磁性材料摩擦副的磁场摩擦学特性也不完全相同, 相比而言, 非铁磁性材料的磁场摩擦学特性差别更大。

磁场干涉下, 含铁磁性材料摩擦副的磨损机制除了有氧化磨损、粘着磨损、三体磨损外, 还有黏附磨损。

2 不同磁属性材料自、互配副的磁场干摩擦特性和机理^[40-42]

关于不同磁属性材料, 国外研究文献报道^[5-23]多为单一配副, 研究不够系统, 试验参数、工况也不太一致, 所以需要比较系统地研究不同磁性材料的磁场干摩擦特性。在目前多种试验条件和理论不够成熟的情况下, 难以开展全部磁性材料的深入研究, 由于顺磁性材料与亚铁磁性材料、抗磁性材料和反铁磁性材料的磁导率差别较小(如图1)^[43-46], 故选取顺磁性材料和抗磁性材料为代表, 与铁磁性材料进行磁场干涉下的摩擦学试验研究。

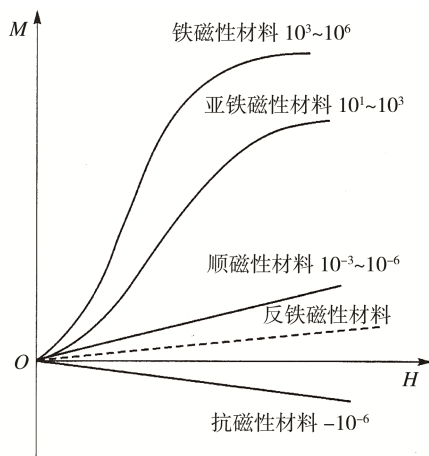


图1 五类磁体的磁化曲线示意图

Fig.1 Magnetization curves of five kinds of magnets

摩擦试验机多采用具有良好机械性能(硬度、韧性和强度等)的钢铁质合金制造。与其他环境(气氛、温度和湿度等)不同, 施加磁场可能会对由铁磁性钢

铁合金制造的试样装卡装置和摩擦试验机造成一定影响,并最终影响试验结果。为了避免这种情况出现,对于采用的摩擦试验机,特将销试样的装卡装置采用顺磁性铝合金材料制作。然而,环试样必须安装在铁磁性钢质转动轴上,施加磁场后,虽然销、环试样瞬时接触面的磁场相同,但铁磁性转动轴会使环试样受到的磁场力有一定差别。所以将抗磁性、顺磁性和铁磁性材料分别制成销、环试样,采用互配副、自配副方式进行摩擦学试验,分别探讨其干摩擦特性、磁场干涉机理和配副关系的同时,借机考察试样装卡装置磁性对环试样的影响。

以铁磁性高速钢、顺磁性铝合金、抗磁性锌黄铜材料为研究对象,对其互配副、自配副在磁场环境下进行干摩擦磨损试验研究,并通过分析仪器对其摩擦面、磨屑进行微观形貌和能谱分析,分别分析了抗/顺、顺/抗、抗/铁、铁/抗、铁/顺、顺/铁磁性摩擦副材料的磁场摩擦学特性,并分别探讨试验结果和磨损机理,总结规律性。

以上研究发现,无论施加磁场与否,锌黄铜-锌黄铜自配副试样销和环的磨损量及其在磁场干涉下的整体变化趋势均不相同,甚至差别较大;无论施加磁场与否,试样销和环摩擦副的相对尺寸以及其摩擦滑动形式均能对其摩擦学特性造成影响;无论是否施加磁场,铝合金-锌黄铜互配副在试验过程中出现明显的粘着、粘合现象,使其摩擦副的干摩擦学特性出现较大偏差。因此干摩擦研究需考虑摩擦副材料化学成分的影响,且销、环试样的选配方式可能会使摩擦学研究出现偏差。磁场强度的增大,有利于铁磁性高速钢减磨降摩,而不利抗磁性锌黄铜减磨降摩;铝合金/锌黄铜中铝合金销的磨损量有减小趋势。

对于改进的 MPV1500 型摩擦磨损试验机,试验分析得出了针对销试样的摩擦学特性进行研究和分析为较可靠的研究手段,而针对环试样开展分析探讨可能会出现偏差,尤其是将抗磁性或顺磁性材料作为环试样时。磁场环境下,关注试样的摩擦接触方式、磁场施加装置、装卡装置及其磁学性能或化学成分是很有必要的。磁场干涉下的干摩擦磨损更加复杂,对摩擦接触方式、装卡装置和试验机设计制造提出了更高要求,其摩擦磨损试验机设计要考虑更多、更复杂的因素。

3 材料磁性对磁场干摩擦性能的影响^[45]

为了尽量避开机械性能和化学成分的影响,深入地研究材料磁性(磁导率)对其磁场摩擦磨损性能的影响程度,有研究者提出并利用相对耐磨性分析方法定义了磁场干涉因子^[47-48]。前面已得出,针对销试样开展相关研究分析较为可靠,故对与不同销试样的磁

场干摩擦性能进行纵向比较,主要针对销试样及其配副进行宏观分析和研究。

对不同成分的抗磁性、顺磁性和铁磁性材料,分别采取自、互配副方式,在同一滑动速度和载荷下进行磁场干摩擦磨损试验研究。结果表明磁场干涉下,材料的磁学参量——磁导率与磁场干摩擦学特性有一定的对应关系:铁磁性材料的耐磨性能得到提高,抗磁性材料的耐磨性能反而恶化;含铁磁性材料摩擦配副的减摩性能得到提高,含抗磁性材料又不含铁磁性材料的摩擦配副减摩性能恶化;对于顺磁性材料,其与铁磁性材料配副时,耐磨性能恶化,减摩性能得到提高,而与其与抗磁性材料配副时,耐磨性能得到提高,减摩性能恶化。综上,规律性总体比较明显。销、环配副的选配、化学成分以及试样装卡装置对不同材料磁场干摩擦特性有一定影响,具有一定的系统依赖性^[49]。

4 不同磁导率相同材料的制备及分析^[50]

对不同磁属性材料各配副磁场干摩擦学特性的研究,已得出材料磁导率与其磁场干摩擦学特性有一定对应关系。为了更深入探究磁场干涉对材料干摩擦学特性的影响,有必要研究材料磁导率与摩擦副磁场干摩擦学特性的耦合关系。不同材料化学成分(性能)以及销、环的选配可能会对磁场摩擦学的研究结果造成一定影响,为了避开材料化学成分不同造成的干扰,制备不同磁导率而化学成分含量相同或近似的材料,使磁导率参数直接或间接成为关键变量。

此前,国内外学者对于磁场干摩擦学的研究多是选取不同磁导率的不同材料进行磁场干摩擦磨损试验。材料的化学成分不同,使其具有不同的化学性能、导热性能和机械性能等,以至于得出的试验结果无法横向比较,难以进行深入量化分析,只能大概地了解磁场对不同磁属性材料的影响规律,存在一定的系统依赖性。对特定的试验对象,其研究结果是可靠的,而对于工程应用中根据磁场干摩擦学特性进行材料选择的指导性原则太宽泛,工程应用的难度较大。因此,能否制备出具有不同磁导率且具有相同或相近化学成分含量的新材料已成为磁场摩擦学深入研究的瓶颈。

为了制备具有相同化学成分含量、不同磁导率的新材料,曾设计了三种制备方案。发现通过热处理工艺或添加铁、钴、镍等铁磁性元素进行材料化学成分设计等常规的材料制备方法,难以达到目的。而非常规的制备方案反而能得到理想的结果,即以顺磁性奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 为母材,利用其较大的冷加工硬化特性,采用常温下锻造工艺以改变其微观组织和晶粒各向异性来改变材料磁导率^[51-53],通过控制

不同的锻造变形量,制备具有不同磁导率相同成分含量的材料。

按照硬度不同进行分类,选择初始态 1Cr18Ni9Ti (165HB) 和硬度为 20、25、30HRC 的 A、B、C、D 四种试样。采用磁天平法分别测量了各试样与高速钢的相对磁导率,分别为 1:36、1:124、1:93、1:302,表明磁导率有了很大提高,试样制备达到了预期效果。通过 X 衍射和微观组织形貌分析了磁导率提高的主要原因:首先,奥氏体相含量可降低 20.1%;其次,马氏体组织、板条状奥氏体孪晶和层片状组织可能会提高磁晶各向异性;此外,锻造后的 1Cr18Ni9Ti 在经王水腐蚀后仍保持了很高的耐腐蚀性能。该方案的优点是初始态的 1Cr18Ni9Ti 为磁导率很低的顺磁性材料,冷锻工艺不改变其化学成分和含量,磁导率改变较大,且工艺简单。

5 不同磁导率相同材料的磁场干摩擦学特性和干涉机理^[54]

以具有高耐磨性的高速钢为环试样,以滑动速度 0.6 m/s、载荷 200 N,在不同外磁场强度下运行 15 min,进行摩擦学试验。由于四种试样销的硬度和机械性能不同,采用相对耐磨性分析法引入磁场干涉因子,以分离出磁导率的影响因素,从而分析磁导率的影响。通过配有能谱仪的扫描电镜、X 射线衍射仪分析了摩擦面形貌、化学成分变化和磨屑尺寸、成分,并分析探讨了不同硬度和磁导率的 1Cr18Ni9Ti 材料作为销试样的磁场干摩擦学摩擦磨损机理,然后引入磁场干涉因子探讨材料磁导率对其磁场干摩擦学特性的影响程度。

有、无磁场下,对于不同磁导率 1Cr18Ni9Ti 的磁场干摩擦学特性研究表明,随着硬度的增大,摩擦面的氧元素含量升高,犁沟形貌逐渐变浅且窄,磨损量和摩擦系数均有减小趋势,耐磨和减摩性能有所提高;随着载荷的增大,摩擦面的犁沟形貌逐渐变宽且深,氧含量减小,磨损量快速增大,摩擦系数呈减小趋势。随着摩擦速度的增大,摩擦面逐渐平滑,且出现局部龟裂、脱落现象,磨损量和摩擦系数均略有增大趋势。磁场干涉下,摩擦副的磨损机制有氧化磨损、粘着磨损、三体磨损和黏附磨损。

载荷和滑动速度在摩擦学研究中非常重要,同样,在磁场干摩擦学特性研究也不例外。目前,项目组正在进行不同磁导率的销试样与高速钢环配副的正交干摩擦试验,试验条件为滑动速度 0.4~0.8 m/s、载荷 100~250 N、磁场强度 0~260 mT。研究有、无磁场下,相同化学成分、不同磁导率和硬度的四种试样销(1Cr18Ni9Ti),在不同载荷、滑动速度条件下的干摩擦磨损特性。

6 结论及展望

通过引入磁场干涉因子探讨了不同磁属性材料的磁场干涉机理,分析了材料磁性的影响机理,得出材料磁导率与其磁场干摩擦性能有一定对应关系。此外,磁场干摩擦学的研究还应关注摩擦副选配和试样装卡装置、磁场施加装置等的磁性。

摩擦副材料的化学成分不同使磁场干摩擦的试验研究难以进行横向比较和量化分析,因此提出了制备具有相同化学成分、不同磁导率的几种新材料的设想。试验发现采用常规的化学成分设计和热处理工艺难以达到目的,而采用锻造工艺制备顺磁性奥氏体材料则取得了成功,为进一步深入研究磁场干摩擦学特性提供了可能。

虽然,通过试验研究得出了磁场影响干摩擦特性的整体趋势,以及摩擦副材料选择的指导原则和配副选配的影响因素等^[54]。但由于短时间内磁场环境下的干摩擦磨损研究的理论知识和设备难以完善,如采用的试验设备经改造,测量的是相对磁导率,只考虑了低磁场下的初始磁导率,而材料磁导率是个会随着外磁场变化而变化的变值。理论上,材料磁场干摩擦学特性还与其他材料磁学参数——居里温度、磁致伸缩系数和饱和磁感应强度等也有一定关系。

参考文献:

- [1] 都有为. 磁性材料新近进展[J]. 物理, 2006, 35(9): 730-739.
DU You-wei. Development of Magnetic Materials in Recent Years[J]. Physics, 2006, 35(9): 730-739.
- [2] 薛群基, 党鸿辛. 摩擦学研究的发展趋势与概况[J]. 摩擦学学报, 1993, 13(1): 17-20.
XU Qun-ji, DANG Hong-xin. Developing Trends and Situation in Tribology Research[J]. Journal of Tribology, 1993, 13(1): 17-20.
- [3] 温诗铸. 我国摩擦学研究的现状与发展[J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 1-6.
WEN Shi-zhu. Existing State and Development of Tribology Research in China[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 1-6.
- [4] 谢友柏, 张嗣伟. 摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
XIE You-bo, ZHANG Si-wei. Study on Application Status and Development Strategy of Tribology Science and Engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [5] HAN H, GAO Y, ZHANG Y. 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.
- [6] 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 Hong-biao, WU Yu-bing, ZHANG Yong-zhen, et al. Analysis of Electromagnetic Induction Torque of the Pin and Disk during Friction Process under DC Magnetic Field[J]. Journal of Tribology, 2015, 35(1): 31-36.
- [7] 韩红彪, 高云凯, 张永振, 等. 直流磁场下销盘摩擦副接触面的磁感应强度和磁吸力分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(4): 503-507.
- HAN Hong-biao, GAO Yun-kai, ZHANG Yong-zhen, et al. Magnetic Flux Density and Magnetic Attraction on Contact Surfaces of Pin-Disk Friction Pair under DC magnetic field[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(4): 503-507.
- [8] 韩红彪, 刘何, 张永振, 等. 直流磁场下销盘摩擦接触区的电磁感应现象[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(5): 557-563.
- HAN Hong-biao, LIU He, ZHANG Yong-zhen, et al. The Electromagnetic Induction Phenomena in Friction Contact Area of Pin and Disk under DC Magnetic Field [J]. Journal of Tribology, 2015, 35(5): 557-563.
- [9] SHANGGUAN B, ZHANG Y Z, XING J D, et al. Study of the Friction and Wear of Electrified Copper against Copper Alloy under Dry or Moist Conditions [J]. Tribology Transactions, 2010, 53(6): 927-932.
- [10] SENOUCI A, ZAIDI H, FRENE J, et al. Damage of Surfaces in Sliding Electrical Contact Copper/Steel[J]. Applied Surface Science, 1999, 144-145(98): 287-291.
- [11] 董祥林, 简小刚. 磁场对中碳钢滑动摩擦磨损的影响[J]. 金属学报, 1999(6): 571-580.
- DONG Xiang-lin, JIAN Xiao-gang. Effect of a Magnetic Field on Sliding Friction and Wear of Medium Carbon Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999(6): 571-580.
- [12] BATAINEH O, KLAMECKI B, KOEPKE B G. Effect of Pulsed Magnetic Treatment on Drill Wear[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(2): 190-196.
- [13] BOCKSTEDT J, KLAMECKI B E. Effects of Pulsed Magnetic Field on Thrust Bearing Washer Hardness[J]. Wear, 2007, 262(9-10): 1086-1096.
- [14] IIDIA Y, STOLARSKI T A, SATO K. Surface Damage Resulting from Rolling Contact Operating in Magnetic Field[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2007, 40(24): 7629-7637.
- [15] HIRATSUKA K. Wear of Metals in a Magnetic Field in Boundary Lubrication[J]. Tribology, 1993, 25: 269-276.
- [16] ZAIDI H, AMIRAT M, FRÉNE J, et al. Magnetotribology of Ferromagnetic/Ferromagnetic Sliding Couple[J]. Wear, 2007, 263(7-12): 1518-1526.
- [17] 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(1): 477-481.
- [18] KUMAGAI K, SUAUKI K, KAMIYAE O. Study on Reduction in Wear due to Magnetization[J]. Wear, 1993, 162(1): 196-201.
- [19] MANSORI M E, IORDACHE V, SEITIER P, et al. Improving Surface Wearing of Tools by Magnetization When Cutting Dry[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 188-189: 566-571.
- [20] MUJU M, GHOSH A. Effect of a Magnetic Field on the Diffusive Wear of Cutting Tools[J]. Wear, 1980, 58: 137-145.
- [21] GAO Fu-min, FAN Jian-chun, ZHAO Kun-peng, et al. In Situ Observation of the Magnetic Domain in the Process of Ferroalloy Friction[J]. Tribology International, 2016, 97: 371-378.
- [22] ZAIDI H, AMIRAT M, FRENE J, et al. Magnetic Tribology of Ferromagnetic/Ferromagnetic Sliding Couple[J]. Wear, 2007, 263: 1518-1526.
- [23] AMIRAT M, ZAIDI H, FRENE J. A Study of Contact Temperature and Tribological Behavior of Magnetized Sliding Brass-Steel Couple in Different Gas Environments[J]. Engineering Tribology, 2008, 222: 279-290.
- [24] 刘文, 李敏, 白象忠, 等. 电磁炮发射轨道受指数函数磁压力的变形计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(8): 1336-1340.
- LIU Wen, LI Min, BAI Xiang-zhong, et al. Deformation Calculation of Electromagnetic Launcher's Rail Subjected to Exponential Magnetic Pressure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(8): 1336-1340.
- [25] 孙丹. 美国海军成功试射新型舰载电磁炮[N]. 北京日报, 2012-03-01.
- SUN Dan. The United States Navy Successfully Tested a New Naval Electromagnetic Gun[N]. Beijing Daily, 2012-03-01.
- [26] 残霏. 电磁炮[EB/OL]. [2012-06-22]. <http://baike.baidu.com/>.
- CAN Fei. Electromagnetic Gun[EB/OL]. [2012-06-22]. <http://baike.baidu.com/>.
- [27] 丁涛, 王鑫, 陈光雄. 120 ~ 170 km/h 条件下碳滑板/铜接触线摩擦磨损性能试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 36-40.
- DING Tao, WANG Xin, CHEN Guang-xiong, et al. Experimental Study on Friction and Wear Behavior of Carbon Strip/Copper Contact Wire at Speeds of 120 ~ 170 km/h[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 36-40.
- [28] 张永振, 宋克兴, 杜三明, 等. 载流摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- ZHANG Yong-zhen, SONG Ke-xing, DU San-ming, et al. Tribology of Current Carrier[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [29] 徐永智. 直流磁场条件下 45# 钢干滑动摩擦磨损性能的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2008.

- XU Yong-zhi. Study on Tribological Properties of 45[#] Steel Couple during the Process of Dry Sliding under D.C. Magnetic Field[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2008.
- [30] 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.
- [31] KUMAGAI K, SASADA T. Wear of Metals in a Magnetic Field[J]. Wear, 1993, 160: 119-123.
- [32] 魏永辉, 张永振, 陈跃. 国内外磁场干摩擦学研究现状及展望[J]. 润滑与密封, 2010, 33(5): 94-98.
WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Research Situation and Prospect of Magnetic Field Tribological in Foreign and Domestic[J]. Lubrication Engineering, 2010, 33(5): 94-98.
- [33] 魏永辉, 魏永强, 袁晓东, 等. 金属材料磁场干摩擦的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 21-24.
WEI Yong-hui, WEI Yong-qiang, YUAN Xiao-dong, et al. Research Progress on Dry Sliding Friction Tribology of Metallic Materials under a Magnetic-field[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(10): 21-24.
- [34] WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue, et al. Influence of DC Steady Magnetic Field on Friction and Wear Characteristics of Friction Pair of High-speed Steel/2Cr13 Stainless Steel[J]. Advanced Materials Research, 2011, 291-294: 1521-1525.
- [35] WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Study of Dry Sliding Friction and Wear Characteristic of High-speed Steel/Ti6Al4V Alloy under Direct Steady Magnetic Field[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 50-51: 348-352.
- [36] WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Study of Dry Sliding Friction and Wear Characteristic of High-speed Steel/40CrMoA Steel under Direct Steady Magnetic Field[J]. Advanced Materials Research, 2011, 183-185: 1642-1646.
- [37] 魏永辉, 张永振, 陈跃. 直流稳恒磁场下高速钢/45[#]钢环干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 399-403.
WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Dry Sliding Friction and Wear of High-speed Steel/45[#] Steel Tribo-pair under Direct Current Steady Magnetic Field[J]. Journal of Tribology, 2010, 30(4): 399-403.
- [38] 计齐根, 都有为. 磁场热处理对 Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe 纳米材料磁性和微磁结构的影响[J]. 材料科学与工艺, 2010, 8(4): 22-25.
JI Qi-gen, DU You-wei. Effects of Magnetic Annealing on Magnetic Properties and Microstructure of Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe Nanocomposite[J]. Material Science & Technology, 2010, 8(4): 22-25.
- [39] 陈庆梅, 宗小林. 磁性纳米材料及其在癌症诊疗中的应用[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(6): 340-345.
CHEN Qing-mei, ZONG Xiao-lin. Magnetic Nanomaterials and Their Applications in Diagnosis and Treatment of Cancer[J]. Micronanoelectronic Technology, 2009, 46(6): 340-345.
- [40] 魏永辉, 张永振, 陈跃. 锌黄铜-铝合金互配副干摩擦学特性的磁场干涉机制研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(2): 184-190.
WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Interfering Mechanism of Magnetic Field in Dry-sliding Tribological Properties of Mutual Pairs CuZn-Aluminum Alloy[J]. Journal of Tribology, 2013, 33(2): 184-190.
- [41] 魏永辉, 张永振, 陈跃. 磁场干涉下锌黄铜自配副干摩擦学特性研究[J]. 材料工程, 2013(8): 23-27.
WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Dry-sliding Tribological Characteristics of CuZn Self-Matched Pairs under Interfering of Magnetic Field[J]. Material Engineering, 2013(8): 23-27.
- [42] 魏永辉, 张永振, 陈跃. 磁场干涉下锌黄铜-高速钢互配副干摩擦学特性研究[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(5): 26-32.
WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Study on Magnetic-field Dry Tribology Characteristics of Mutual Pair CuZn-W18Cr4V[J]. Materials Science & Technology, 2013, 21(5): 26-32.
- [43] 肖阳, 孙友松, 陈光忠. 永磁场磁力研磨 TC11 钛合金的实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(2): 229-234.
XIAO Yang, SUN You-song, CHEN Guang-zhong. Experimental Study of Magnetic Abrasive Finishing of TC11 Titanium Alloy in Permanent Magnetic Field[J]. Surface Technology, 2017, 46(2): 229-234.
- [44] 曹勇, 杨志成. 磁场对航空拖缆碳钢材料腐蚀行为影响研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 42-47.
CAO Yong, YANG Zhi-cheng. Effect of Magnetic Field on Corrosion Behavior of Aerial Cable's Carbon Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 42-47.
- [45] 张家胜, 王敏. 磁性衬板在球磨机中的应用[J]. 矿业工程, 2005, 3(2): 31-32.
ZHANG Jia-sheng, WANG Min. Application of Magnetic Linings in Ball Mill[J]. Mining Engineering, 2005, 3(2): 31-32.
- [46] 孔祥华, 杨穆, 王帅. 材料物理基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
KONG Xiang-hua, YANG Mu, WANG Shuai. The Basis of Materials Physics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [47] 魏永辉, 张永振, 陈跃. 磁场干涉对不同磁属性材料干摩擦学特性的影响[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 102-110.
WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue. Influence of Magnetic Field Interfering on Dry-Sliding Tribological Characteristics of Materials with Different Magnetic Properties[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 102-110.
- [48] 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, 1999.

- JIAN Xiao-gang. Effects of DC Magnetic Field on Dry Friction and Wear of Ferromagnetic Materials[D]. Shenyang: Institute of Metal Research of Chinese Academy of Sciences, 1999.
- [49] 谢友柏. 摩擦学的三个公理[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(3): 161-166.
- XIE You-bo. Three Axioms in Tribology[J]. Journal of Tribology, 2001, 21(3): 161-166.
- [50] WEI Yong-hui, WANG Xiu-li, ZHANG Yong-zhen, et al. Preparation and Micro-analysis of the 1Cr18Ni9Ti with Different Magnetic and Same Component[J]. Materials Science, 2015, 21(4): 622-625.
- [51] 李志林. 材料物理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- LI Zhi-lin. Material Physics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [52] 赵志伟, 何皎洁, 刘杰. 新型磁性 Fe/Mn 纳米复合材料对水中铅离子的去除[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 27-30.
- ZHAO Zhi-wei, HE Jiao-jie, LIU Jie. Effect of Magnetic Fe/Mn Nanocomposites on the Removal of Lead Ion in the Aqueous Solution[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8): 27-30.
- [53] 孔祥华, 杨穆, 王帅. 材料物理基础[M]. 北京, 冶金工业出版社, 2010.
- KONG Xiang-hua, YANG Mu, WANG Shuai. Material Physics Basis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [54] WEI Yong-hui, ZHANG Yong-zhen, CHEN Yue, 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.