

自纳米化结构金属材料摩擦磨损研究现状

李庆达¹, 王志明¹, 郭建永², 胡军¹, 王宏立¹, 赵胜雪¹

(1. 黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163319;

2. 肇庆学院 机械与汽车工程学院, 广东 肇庆 526061)

摘要: 从自纳米化结构金属材料的形成机理及制备方法入手, 阐述了表面自纳米化技术的优势, 包括工艺简单、无增材处理、纳米结构层呈梯度变化且与基体无明显界限、适用性强等。在此基础上, 重点综述了国内外学者对于自纳米化结构金属材料摩擦磨损的研究现状, 包括钢铁合金、镁合金、铝合金、钛合金以及其他金属。同时分析出自纳米化结构金属材料摩擦磨损研究存在的问题, 包括制备工艺参数的合理选择、高温钛合金表面自纳米化摩擦磨损性能的研究、腐蚀磨损特性的研究等。针对进一步拓展自纳米化结构金属材料的工业应用, 提出了该领域未来可行的研究方向, 以期为自纳米化结构材料研究提供有价值的参考。

关键词: 表面自纳米化; 自纳米化结构; 摩擦磨损; 钢铁合金; 镁合金; 铝合金; 钛合金

中图分类号: TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0085-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.011

Research Status on Friction and Wear of Self-nanostructure Metal Materials

LI Qing-da¹, WANG Zhi-ming¹, GUO Jian-yong², HU Jun¹,
WANG Hong-li¹, ZHAO Sheng-xue¹

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

ABSTRACT: This paper expounded the advantages of surface self-nanotechnology in terms of the formation mechanism and preparation method of self-nanostructure metal materials, including simple process, no additive treatment, gradient change of nanostructure layer and no obvious boundary with matrix, and strong applicability, et al. On this basis, the research status on friction and wear of self-nanostructure metal materials at home and abroad was reviewed, including steel alloys, magnesium alloys, aluminum alloys, titanium alloys and other metals. And the problems of friction and wear of metal materials with self-nanostructure were analyzed, including the reasonable selection of process parameters, the study of the friction and wear properties of the high-temperature self-nanometer titanium alloy, the study of corrosion and wear characteristics, et al. Aiming at

收稿日期: 2019-05-26; 修订日期: 2019-12-31

Received: 2019-05-26; Revised: 2019-12-31

基金项目: 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目 (YQ2019E032); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划 (UNPYSCT-2017106)

Fund: Excellent Youth Project of Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (YQ2019E032); The University Nursing Program for Young Scholars with Creative Talents of Heilongjiang Province (UNPYSCT-2017106)

作者简介: 李庆达 (1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事金属材料摩擦磨损与防护研究。邮箱: liqingda23@126.com

Biography: LI Qing-da (1982—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: friction, wear and protection of metal materials. E-mail: liqingda23@126.com

引文格式: 李庆达, 王志明, 郭建永, 等. 自纳米化结构金属材料摩擦磨损研究现状[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 85-96.

LI Qing-da, WANG Zhi-ming, GUO Jian-yong, et al. Research status on friction and wear of self-nanostructure metal materials[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 85-96.

expanding the industry application of self-nanostructure metal materials, a feasible research direction in this field was proposed, looking forward to providing valuable information for researching self-nanostructure metal materials.

KEY WORDS: surface self-nanocrystallization; self-nanostructure; friction and wear; steel alloy; magnesium alloy; aluminum alloy; titanium alloy

随着工业技术的不断发展,金属材料在工业领域被广泛应用,金属材料失效常发生于材料表面^[1],如摩擦磨损、腐蚀、疲劳裂纹等。磨损失效是工程领域最常见的一种失效方式,在所有失效零部件中,磨损失效超过 50%。每年因材料磨损失效造成了巨大的能源与经济损失,提高金属材料的摩擦磨损性能一直是工程材料科学家努力的目标^[2]。金属材料的失效与其表面结构和性能有关,通过改变材料的表面组织结构和性能,可有效地提高材料整体的力学性能。

纳米材料被定义为物理微观结构特征尺寸在 1~100 nm 范围内的一类纳米量级材料,其独特的结构特征决定了纳米材料具有较好的力学性能和物理化学性能^[3]。与普通晶体材料相比,纳米材料具有高强度、高硬度、高热膨胀系数、高热比、低导热率^[4]等特点,但由于金属纳米材料自身存在的低塑性与低韧性缺点,使得强度与塑性这两个重要的力学性能出现互相排斥,纳米材料自身难以同时满足这两种较优的力学性能,从而限制了纳米材料的进一步发展。基于此,1999 年, Lu K 和 Lu J 首次提出金属材料表面纳米化 (Surface self-nanocrystallization, SNC) 的概念^[5],表面纳米化是表面改性技术与纳米化技术相结合的一种材料表面处理新方法^[6]。材料经表面纳米化处理后,材料表层可在空间上呈现由纳米级到微米级变化的梯度纳米结构。这种梯度纳米结构,可有效提高材料的综合性能,如耐磨性能^[7]、抗疲劳性能^[8]、抗腐蚀性能^[9]、热稳定性能等^[10],以增加金属材料制品的服役寿命,并弥补纳米材料的不足。近年来,将表面纳米化技术应用于提高金属材料的耐磨性,已成为国内外学者研究的热点。该技术在低碳钢、不锈钢、

合金钢、钛合金、镁合金、铝合金等材料表面已得到实现^[11]。本文阐述了表面自纳米化的制备工艺及原理,并从不同金属材料入手,介绍了国内外自纳米化结构金属材料摩擦磨损的研究现状,系统分析其中存在的问题,指出自纳米化结构金属材料摩擦磨损未来研究发展的方向。

1 自纳米化结构金属材料成形机理

金属材料梯度自纳米化的处理方法分为 3 种^[12-14]:

1) 表面涂层和沉积 (如图 1a 所示) 主要是以增材处理的方式,将纳米颗粒固结在金属材料表面,获得与基材成分相同或不同的纳米结构涂层; 2) 表面自纳米化处理 (如图 1b 所示) 即利用非平衡的方法作用材料表面,增加材料表面的自由能,促使材料表面粗晶逐步细化为纳米晶,从而形成梯度纳米结构层; 3) 混合方法,即将表面纳米化技术和化学处理相结合,主要原理是在材料表面形成不同成分的固溶体和化合物^[14],如图 1c 所示。由上述原理分析可知,表面自纳米化技术具有以下优点: 工艺简单,易于实现; 与其他表面纳米化处理相比,无需引入其他化学物质; 纳米结构层由表及里呈梯度变化,纳米结构层与基体具有较好的结合强度,不易发生剥层脱落; 可适用于不规则形状或大面积材料表面,加工效率高,适用性强^[15-16]。

表面机械加工处理是实现金属材料表面自纳米化的有效技术。表面机械加工处理的方法有很多,如喷丸、挤压、冲击等。其主要的原理是通过外加载荷的作用,使得材料表面发生严重的塑性变形,在粗晶

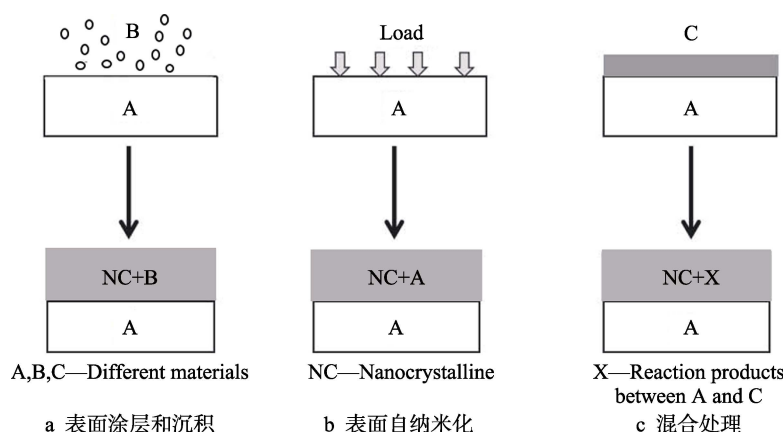


图 1 表面纳米结构制备的 3 种基本方法

Fig.1 Three basic methods for preparation of surface nanostructures: a) surface coating or deposition; b) surface self-nanocrystallization; c) hybrid treatment

材料表面引入大量的缺陷和界面，促使材料表面粗晶逐步细化为纳米晶^[12,17]。针对不同金属材料，其晶粒细化机理也有着一定的差异，其中位错是晶粒细化的主要方式，可分为以下过程：金属材料在往复外加载荷的作用下，表面发生塑性变形，表面粗晶发生滑移和位错。随着材料表面应变量的增大，位错滑移转变为孪晶，并随着应变量的继续增大，孪晶数量增加，

孪晶尺寸进一步减小，其中孪晶中存在着高密度位错。当应变量达到一定程度时，位错胞将会湮灭、重组形成小角度的亚晶。在高应变、应变速率的作用下，亚晶通过吸收位错，取向差进一步增加^[17-18]。随着此过程的不断进行，最终，在材料表面可形成纳米晶层。表面自纳米化晶粒细化机理如图 2 所示^[19]。

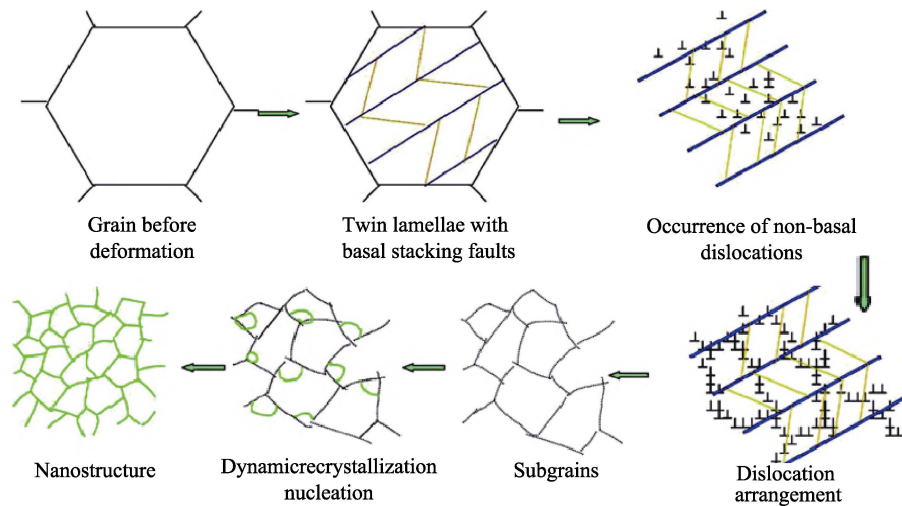


图 2 晶粒细化机理
Fig.2 Schematic diagram of grain refinement mechanism

2 自纳米化结构金属材料制备方法

目前常用于制备表面自纳米化结构的方法主要为表面机械加工处理，其中表面喷丸处理作为表面机械加工技术之一，因其加工简单、成本低等优点，常用在金属材料表面制备纳米化层。表面喷丸装置如图 3 所示^[11]，该装置主要由振动发声器、反射腔和弹丸组成。处理工件时，将弹丸（玻璃球、钢球、陶瓷球等）放置在反射腔内，通过振动发生器的高速振动，弹丸可随机均匀地撞击工件表面，使得工件表面发生塑性变形，弹丸冲击试样表面变化如图 4 所示^[4,12]。根据加工时选用的振动频率和弹丸大小，可将表面机械加工处理具体分为：表面机械研磨（Surface Mechanical Attrition Treatment, SMAT）^[20]、高能喷丸（High Energy Shot Peening, HESP）^[21]、超声喷丸（Ultrasonic Shot Peening, USSP）^[22]。其中表面机械研磨与其他喷丸处理具有较大的差异，使用的弹丸较大（直径为 0.2~1 mm），弹丸的速度较低（速度为 1~20 m/s）。

对于不规则和大面积的金属工件，超音速微粒轰击作为表面机械加工技术之一，可有效实现该金属工件的表面自纳米化处理^[23-24]。超音速微粒轰击如图 5 所示。工作时，大量微粒弹丸在超音速气流的作用下，以极高的速度撞击工件表面，通过微粒不断撞击工件表面，可使工件表面发生塑性变形，促使晶粒发生位

错生成孪晶和亚晶，最终使得金属材料表面粗晶细化为纳米晶^[25]。超音速微粒轰击材料表面塑性变形如图 6 所示。

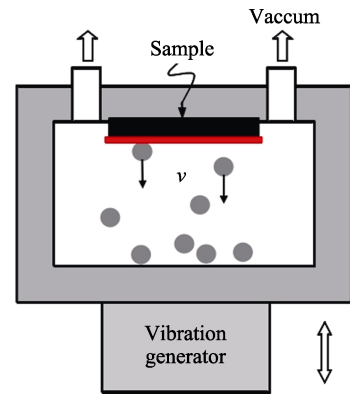


图 3 表面喷丸装置示意图
Fig.3 Schematic diagram of surface shot peening device

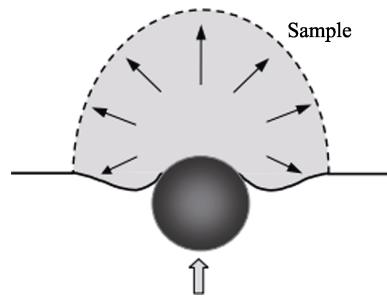


图 4 工件表面的塑性变形
Fig.4 Plastic deformation of sample surface

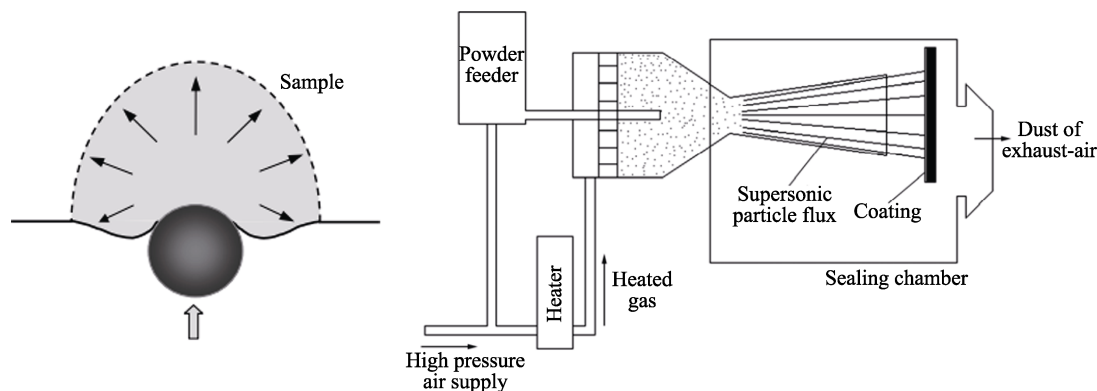


图5 超音速微粒轰击装置示意

Fig.5 Schematic diagram of supersonic fine particles bombarding facility

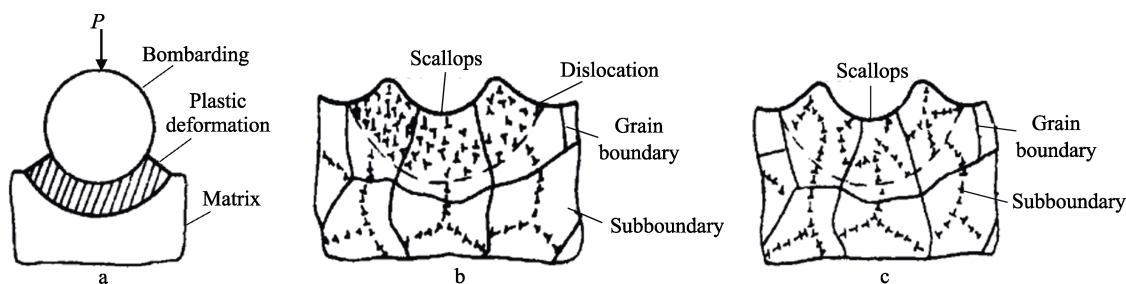


图6 微粒轰击材料表面塑性变形示意

Fig.6 Schematic diagram of plastic deformation on the surface of materials bombarded by supersonic particles

3 自纳米化结构金属材料摩擦磨损研究

近年来,国内外学者对自纳米化结构金属材料的力学性能进行了广泛的研究,部分学者对其摩擦磨损性能进行了探究,期待探索出一种提高金属材料耐磨性的新途径。材料耐磨性是指某种材料在一定的摩擦条件下抵抗磨损的能力^[26],因此对于材料耐磨性能的测定以磨损量作为主要衡量标准。大量国内外学者研究发现,表面自纳米化处理后的金属材料,其体积磨损量与表面硬度有着一定的负相关性。结合 Hall-Patch 公式与 Ar-chard 磨损定律可得出,自纳米化结构金属材料表面硬度与其体积磨损量有着直接的关系,如公式(1)、公式(2)^[27]所示:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k\sqrt{d} \quad (1)$$

$$v/l = kw/h \quad (2)$$

式(1)中: σ_y 为材料发生 0.2% 变形时的屈服强度,通常可以用显微硬度来表示; σ_0 为单晶体的屈服强度; d 为晶粒尺寸; k 为常数。

式(2)中: v 为体积磨损量; l 为滑动距离; k 为摩擦系数; w 为加载载荷; h 为摩擦试样的表面硬度。

随着材料表面粗晶细化为纳米晶,其晶粒尺寸减小。由公式(1)可得出,表面硬度提高。由公式(2)可知,硬度与体积磨损量成反比,随着表面硬度的提高,

体积磨损量减小,耐磨性能增强。

3.1 钢铁合金

表面自纳米化技术主要应用于金属材料,在实际生产中,钢铁材料在工程材料中应用最为广泛^[28]。为了提高钢铁材料的耐磨性能,减少能源消耗,国内外学者将表面自纳米化技术应用于钢铁合金上,并对其摩擦磨损性能进行研究。

目前,利用表面自纳米化技术提高钢铁合金表面耐磨性能的相关研究已取得一定的进展。史美霞等^[29]采用 SMAT 方法对低碳钢 Q235 进行表面处理,结果表明 Q235 表面形成了具有一定厚度的纳米结构层。干摩擦磨损实验结果表明,当载荷为 15~45 N,磨损 5 min 时,处理后试样的磨损量低于未处理的试样(如图 7a 所示);当磨损时间相同,载荷在 15~75 N 时,具有表面纳米化层试样的摩擦系数明显低于未处理试样(如图 7b 所示)。

李国宾等^[30]采用高能喷丸对 45#钢进行表面纳米化处理,通过环-盘摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验,研究表面纳米化对中碳钢磨损行为的影响。结果表明:在磨损时间为 5 min,载荷为 10~60 N 条件下,表面纳米化中碳钢的摩擦系数较处理前有所降低(如图 8a 所示);同样的磨损时间,当载荷为 10~40 N 时,其磨损质量损失较处理前有所降低(如图 8b 所示)。由此得出,表面纳米化能够减弱中碳钢的疲劳磨损效应,提高中碳钢的摩擦磨损性能。

Zhang 等^[31]对 1.0C-1.5Cr 钢进行表面机械研磨处理,并对其摩擦磨损性能进行了研究。结果表明:材料表面晶粒细化为纳米量级,处理 15 min 后,平均粒径可达 10~20 nm,最小摩擦系数达到 0.27,如图 9a 所示。处理时间在 15~30 min 内,1.0C-1.5Cr 钢耐磨性能较优,耐磨性比基体提高了 1 倍。磨痕深度随加工时间的变化规律如图 9b 所示,处理 15 min 后,磨痕深度变化显著。对磨损形貌进行观察,分析其磨

损机理可以得出,15 min 后磨损机理由粘着磨损转为磨粒磨损。

通过以上分析可知,表面自纳米化后,形成了具有一定厚度的梯度纳米结构层。由于纳米结构层厚度较薄,对其进行摩擦磨损实验时,如果施加载荷过大或者加工时间过长,将会造成纳米结构层的破坏,从而影响其耐磨性能。因此采用表面自纳米化处理技术时,应选择合适的加工工艺参数,以达到最大化耐磨

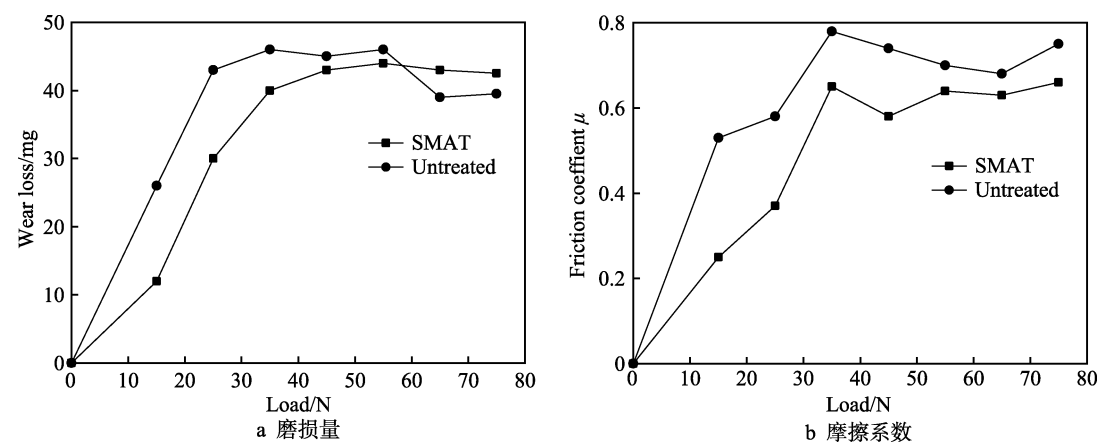


图 7 Q235 经 SMAT 处理前后磨损量和摩擦系数变化
Fig.7 Variation of wear loss (a) and friction coefficient (b) of Q235 before and after SMAT treatment

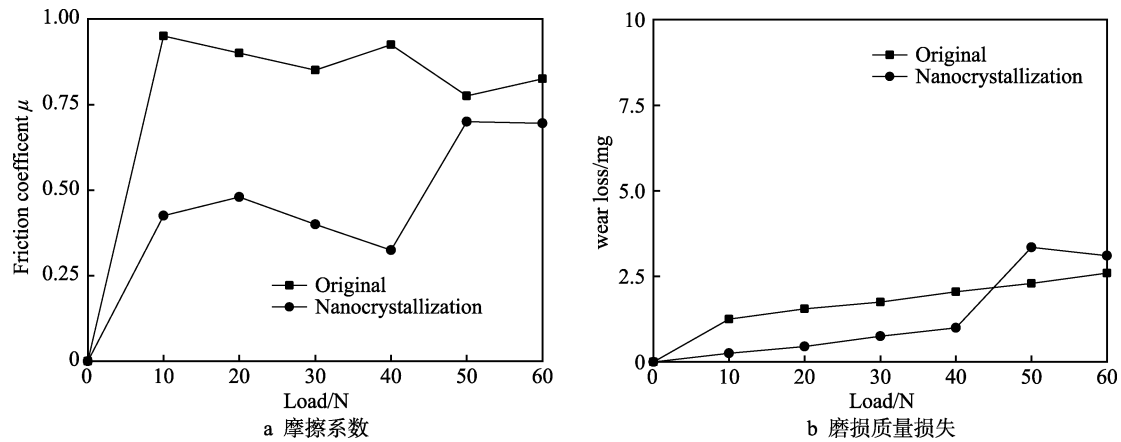


图 8 45#钢 SMAT 处理前后摩擦系数和磨损质量损失变化
Fig.8 Variation of friction coefficient (a) and wear loss (b)of 45# steel before and after SMAT treatment

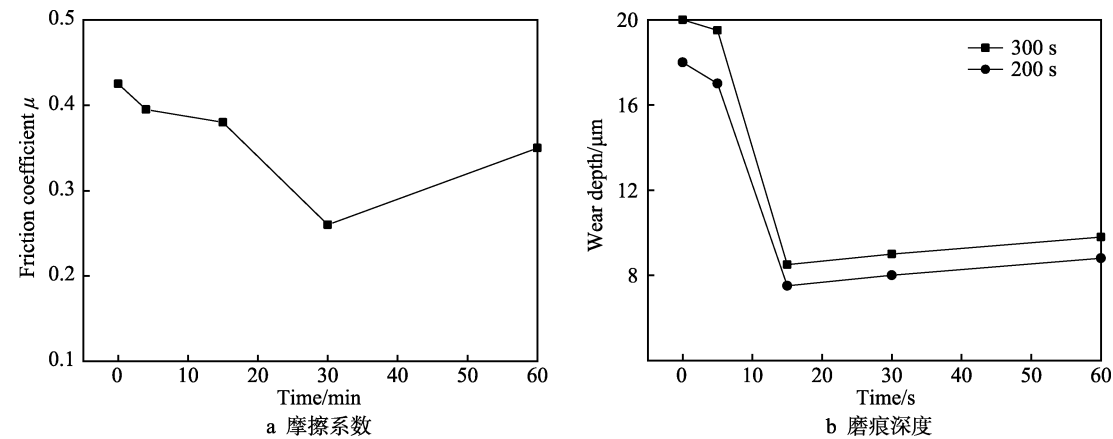


图 9 1.0C-1.5Cr 钢 SMAT 处理后摩擦系数与磨痕深度变化
Fig.9 Variation of friction coefficient (a) and wear mark depth (b) of 1.0c-1.5cr steel after SMAT treatment

性能的提高。

金属材料表面在外加载荷的作用下,发生塑性变形,产生梯度纳米结构。然而外加载荷使得材料表面引入残余压应力,对普通金属材料引入残余应力,会使材料表面发生微裂纹,成为疲劳磨损失效的根源。相反,对于梯度纳米结构金属材料,有益残余应力的引入,有助于提高金属材料摩擦磨损性能^[32]。张新峰等^[33]采用机械喷丸技术对 316L 不锈钢进行表面自纳米化处理,研究了加工前后试样的摩擦磨损性能。结果表明:316L 不锈钢经过表面纳米化后,表面产生的残余压应力最大可达 370 MPa,纳米梯度深度可达 0.8 mm。通过显微硬度计测试与摩擦磨损试验后得出,表面纳米化后,316L 不锈钢表面显微硬度提高了近 0.5 倍,表面摩擦系数明显降低,且摩擦磨损质量损失为对比试样的 10%。

对于同种材料 316L 不锈钢, Roland 等^[34]采用表面机械研磨后,研究其退火前后摩擦磨损性能的变化。结果表明:表面纳米结构层硬度可达 6 GPa,随着深度的增加而逐渐降低,且退火处理后并没有减少残余压应力,随着退火温度的升高,形成了更多的马氏体相,保持了较高的残余压应力。通过对不同处理方法试样的摩擦系数曲线分析得出,处理后试样的摩擦系数均比原始样品小,且退火后试样的摩擦系数第一部分保持不变,一段时间内又迅速增加接近曲线的末端(如图 10 所示)。这主要是因为退火导致氧化层硬度增加,磨损一段时间后,氧化层被破坏,但退火后引入的残余压应力和较高的硬度,弥补了摩擦力的增加。

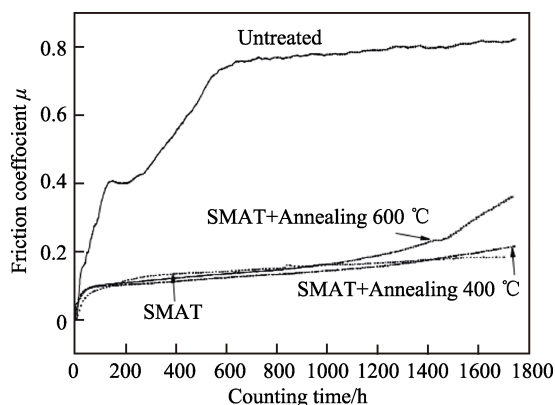


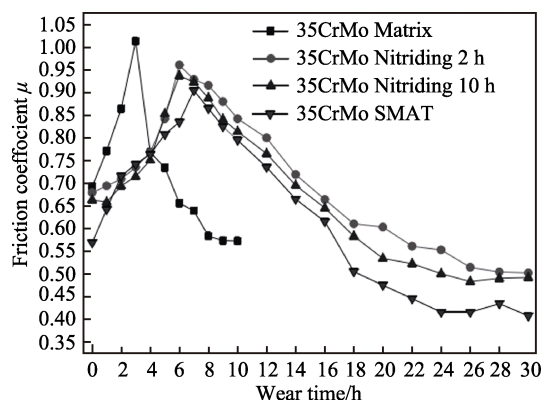
图 10 316L 不锈钢不同处理后摩擦系数随磨损时间的变化

Fig.10 Variation of friction coefficient of 316L stainless steel with the wear time after different treatments

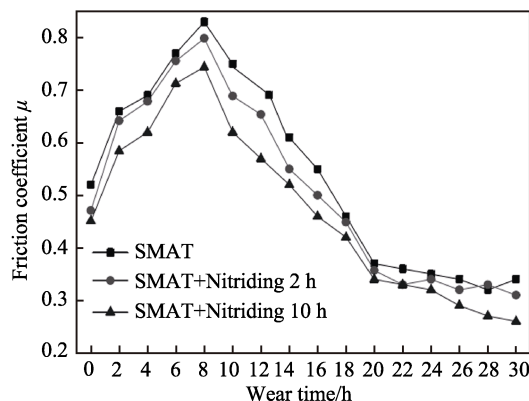
表面自纳米化后,晶粒细化为纳米晶结构,其独特的结构可大幅度提高材料表面化学元素的渗入浓度和深度。同时可以显著加快原子在金属材料中扩散的动力学过程,缩短化学热处理工艺的时间^[35]。大量国内外学者将表面自纳米化与表面化学处理工艺相结合,使材料表面的耐磨性能进一步提高。

Sahu 等^[36]采用 SMAT 与化学渗碳耦合对 Ni-Cr-Mo 合金钢表面耐磨性能进行研究。结果表明:在表面机械研磨-渗碳处理后,合金钢表面形成由碳化物 α -Fe 和 Fe_3C 交替组成的层状纳米复合结构,且碳化物层数随时间的增加而增加,晶粒尺寸和厚度不断减少。表面硬度也随处理时间的延长呈指数上升,最大可达到 980HV。碳的扩散速度比起常规化学渗碳高至 1.524×10^{13} 倍,耐磨性显著增强。

王伟等^[37]在 35CrMo 和 40Cr 调质的低合金钢表面进行超声表面加工处理,并对超声冲击加工处理前后的材料进行渗氮处理。结果表明:表面纳米化预处理后的渗氮效果明显好于未经过表面纳米化预处理的试样,且随着渗氮时间增加,渗氮效果越明显。超声冲击处理与超声冲击+渗氮试样的表面硬度值分别为 695HV 和 706HV,与基体相比,分别提高约 2.5 倍和 2.6 倍,并且硬度值呈梯度变化,距离表面越远,硬度越小。对 35CrMo 钢进行不同处理,由摩擦系数对比分析得出,表面自纳米化和单独渗氮处理后的摩擦系数均比未处理的低(如图 11a 所示)。表面自纳米化与表面自纳米化+渗氮两种方法均可有效改善材料的耐磨性,但表面自纳米化+渗氮处理后摩擦系数更低,效果更明显(如图 11b 所示)。



a 未处理、渗氮和表面纳米化的对比



b 纳米化和表面纳米化+渗氮的对比

图 11 35CrMo 钢不同处理后摩擦系数对比

Fig.11 Comparison of the friction coefficient of 35CrMo after different treatment: a) comparison of untreated, nitriding and surface nano; b) comparison of nano and nano + nitriding surface

表面自纳米化与化学热处理技术相结合, 不仅有效提高了金属材料的耐磨性能, 而且提高了化学渗碳、渗氮的效率, 为改善工程材料力学性能, 提高服役寿命, 提供了一条良好的新途径, 具有较好的应用前景。

3.2 有色金属

近年来, 随着工业的快速发展, 镁合金、铝合金、钛合金作为轻质结构金属材料, 被广泛应用于航空航天、医疗、汽车^[38-40]等领域, 如何增加其服役寿命显得尤为重要。表面自纳米化处理属于无增材加工工艺, 在提高金属材料表面性能的同时, 材料的结构不会发生明显变化, 且处理后不引入杂质。针对其特点, 国内外学者对镁、铝、钛合金表面自纳米化处理也进行了大量研究。

3.2.1 镁合金

镁合金作为最轻的金属材料, 因其良好的耐腐蚀性能, 被广泛应用于各个领域。为了提高镁合金的服役寿命, 减少镁合金因磨损失效带来的能源损失, 对其耐磨性能的研究也成为重中之重。Xia 等^[41]通过 SMAT 技术, 在 AZ31 镁合金表面制备了梯度纳米层, 对 AZ31 合金的摩擦行为进行了系统的研究。结果表明: SMAT 处理后, 镁合金的硬度约为原始样件的 1.5 倍。在低速 (0.05 m/s) 时, 磨损机理主要为磨料磨损; 当速度为 0.5 m/s 时, 磨损机理主要为氧化磨损; 当速度在 0.05~0.5 m/s 时, SMAT 处理前后的摩擦系数均随着载荷的增加而减小, 且 SMAT 处理后的镁合金在各种载荷下的摩擦系数也均小于未处理的镁合金。当载荷分别为 10、30、50 N, 滑动速度为 0.5 m/s 时, 相比未处理的试样, SMAT 处理的镁合金磨损率分别下降 49.9%、59.9%、58.1%。

杨亚鹏等^[42]在 AZ91D 镁合金表面采用激光冲击强化处理。结果表明: 处理后, AZ91D 镁合金表面纳米结构的显微硬度明显增强, 平均摩擦系数比未处理的样品大幅度降低, 磨痕的犁沟状特征明显减小, 磨痕底部变得光滑, 摩擦试验产生的磨屑明显减少, 磨损量降低。分析得出, 由于表面硬度的增大, 提高了抵抗外物压入的能力, 使其耐磨性增强。

值得注意的是, 利用表面自纳米化技术提高金属材料耐磨性能并非适用于所有的磨损环境和材料, 不同的磨损条件会产生不同的磨损机理。Liu 等^[43]采用表面机械研磨方法处理 GW63K 镁合金, 对处理后纳米晶结构合金的磨损性能进行了研究。结果表明: 相比未处理镁合金, SMAT 处理后的镁合金具有较差的耐磨性能。分析得出, 这与不同滑动速度下的磨损机理有关。在滑动速度为 0.05 m/s 时, 主要磨损机制为磨料磨损。由于纳米结构镁合金韧性与延展性较差, 导致合金断裂, 使其耐磨性较差。当滑动速度为 0.2 m/s (高速) 时, 磨损机理转化为氧化磨损。此时

摩擦系数低, 磨损质量损失小, 但由于氧化磨损碎片填充到磨损表面, 引发微裂缝, 从而导致纳米结构镁合金耐磨性能较差。表面自纳米化处理后的镁合金磨痕深度比未处理的镁合金更深, 如图 12 所示。

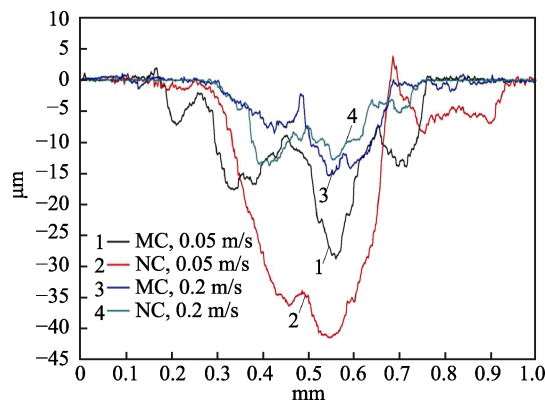


图 12 GW63K 镁合金磨痕横断面轮廓

Fig.12 Cross-section profile of GW63K Mg alloy worn scars

针对 Liu 等的研究结果, Li 等^[44]将回复处理引入到表面自纳米化制备工艺中, 对比研究了回复处理对自纳米化层摩擦磨损特性的影响。研究表明: 在不改变梯度纳米结构的前提下, 合适的回复处理工艺能够提高其抗磨性。原因在于回复处理可提高镁合金纳米层的韧性和延展性, 再一次证实韧性和延展性对镁合金的耐磨性具有较大的影响, 与 Liu 等的研究结果相符合。同时, 结合磨屑的形貌提出了梯度纳米镁合金的磨粒磨损模型, 如图 13 所示。

由上述分析可知, 表面自纳米化工艺对于镁合金耐磨性并非完全具有积极的影响, 原因在于镁合金独特的密排六方结构和较差的塑性。合理的回复处理工艺对于自纳米化镁合金耐磨性具有积极的作用。

3.2.2 铝合金

铝合金具有密度低、熔点低、塑性高等特点, 因其独特的物理化学特性, 成为工业中使用最为广泛的有色金属材料之一, 因此对于铝合金材料的摩擦磨损性能的研究显得尤为重要。基于此, 马慧娟等^[45]采用超声冷锻技术对 2024 铝合金进行表面自纳米化处理, 研究其摩擦磨损性能。结果表明: 处理后的铝合金表面晶粒得到细化, 且平均表面粗糙度仅为 5.50 nm, 纳米结构层表面硬度为 106.72HV, 约为未处理铝合金表面硬度的 1.76 倍。处理后的铝合金摩擦系数从未处理时的 0.80 降至 0.65, 且磨痕深度比未处理的铝合金基体浅, 磨损量也明显减小。从而得出, 表面自纳米化可有效提高铝合金的耐磨性能。

对同种材料 2024 铝合金, Wen 等^[46]采用表面机械研磨处理对其耐蚀、耐磨性能进行了研究。结果表明: 经过 30 min 处理后, 铝合金表面形成 55 nm 的纳米晶层, 且纳米层引入了 5 μm 厚的纳米级含铁表层, 富铁层的存在降低了铝合金的耐蚀性。由于晶粒

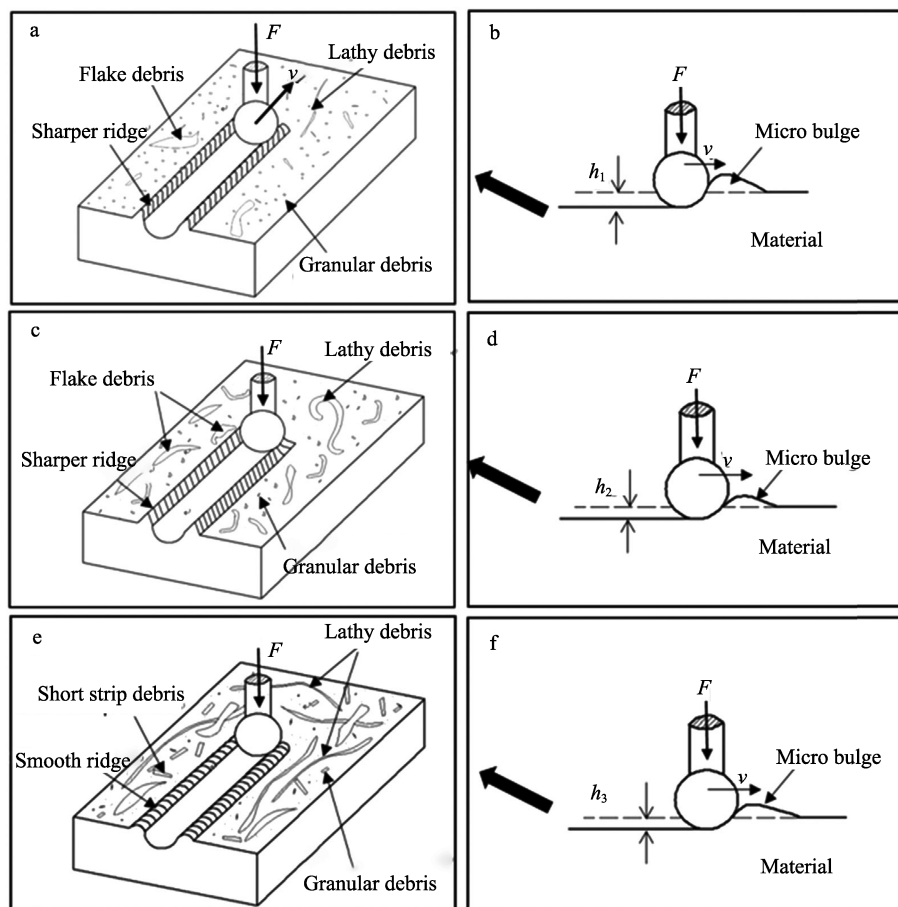


图 13 镁合金摩擦磨损示意
Fig.13 Diagram of friction and wear of magnesium alloy

细化, 导致表面硬度的提高以及富铁层 Fe_2O_3 的润滑作用, 从而提高了铝合金的耐磨性能。

田龙等^[47]对 7055 铝合金采用高能喷丸处理, 对其耐磨性能进行了研究。结果表明: 铝合金表面发生了强烈的塑性变形, 材料表面分布着幅值较高、深度层可达 0.6 mm 的残余压应力, 且最大压应力可达 -369 MPa。处理后的铝合金显微硬度较基体提高了 0.5 倍, 且摩擦系数明显降低, 磨损量为未处理试样的 32%。由此证明高能喷丸处理可有效改善 7055 铝合金的耐磨性能。

通过以上研究可知, 表面自纳米化可有效提高铝合金表面的耐磨性能, 极大地推动铝合金材料在各个领域的广泛应用。通过 Wen 等的研究表明, 表面自纳米化虽然提高了铝合金的耐磨性能, 但同时引入了富铁层, 降低了铝合金的耐蚀性能。因此选择合理的表面强化工艺, 最大程度地提高铝合金的综合性能, 可能是未来研究的重点。

3.2.3 钛合金

钛合金具有强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等优点, 作为航空航天发动机的主要金属材料, 其摩擦磨损性能也是国内外大量学者研究的热点。顾艳红等^[48]针对 Ti-6Al-4V 钛合金, 采用超声冷锻预处理与微弧氧化

(MAO) 技术相结合制备具有生物活性的 (MAO) 涂层, 对其耐磨性能进行研究。结果表明: 超声冷锻钛合金表面晶粒得到细化, 且表面粗糙度平均仅为 36.98 nm, 经过超声冷锻预处理的 MAO 涂层显微硬度由 330HV 提高到 518HV, 预处理后的 MAO 涂层摩擦系数降低, 且磨损量为基体试样的 1/3。由此可得出, 超声冷锻技术可有效提高钛合金微弧氧化涂层的耐磨性能。

Anand Kumar 等^[49]对 Ti-6Al-4V 钛合金进行 SMAT 处理, 对其微动磨损性能进行了研究。结果表明: 在强烈的塑性变形后, 钛合金表面形成纳米结构层, 与未处理的试样相比, 硬度增强, 且随着距表面距离的增加, 硬度逐渐减小。由钢球和氧化铝球的试样微动磨损试验可知, 未处理试样与 SMAT 处理试样的摩擦系数相差较大, 且随着微动次数的增加而减小 (如图 14 所示)。分析得出, 由于初期 SMAT 处理后试样的硬度较高, 摩擦粘附成分较小, 导致摩擦系数较小。但由于未处理的试样经过塑性变形, 晶粒细化, 从而产生加工硬化, 使得摩擦粘附成分减少, 导致最后未处理试样与 SMAT 处理试样摩擦系数趋于一致。对于磨损量的研究结果表明, 同等测试条件下, 氧化铝球对磨时的磨损量明显高于钢球对磨, 如图 15 所示。这是由于 Ti-6Al-4V 试样与氧化铝球摩擦发生化

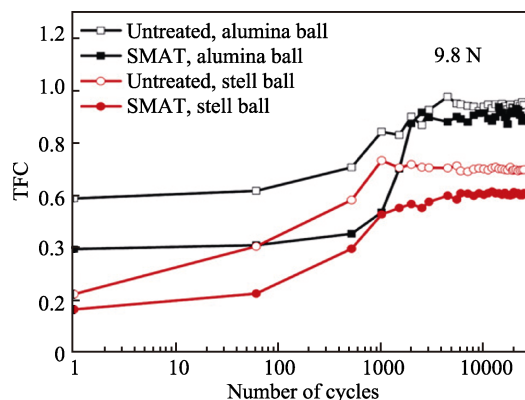


图 14 钢球和氧化铝球对磨未处理与处理后试样摩擦系数随微动周期数的变化

Fig.14 Variation of TFC with the number of fretting cycles for untreated and treated samples fretted against steel and alumina balls

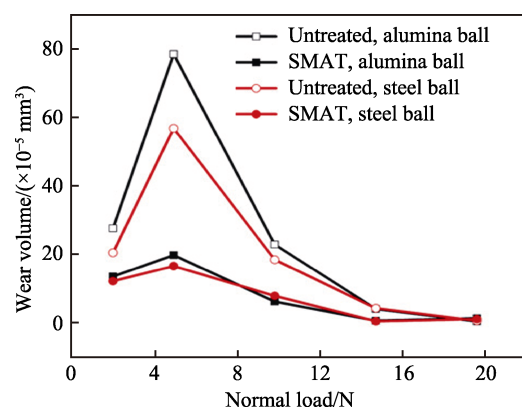


图 15 钢球和氧化铝球对磨未处理与处理后试样磨损量随施加载荷的变化

Fig.15 Variation of wear loss with the load for untreated and treated samples fretted against steel and alumina balls

学反应,产生磨料磨损碎片,引起三体磨损机理所致。

通过以上研究可知,表面自纳米化技术对钛合金耐磨性能的提升具有一定的作用。大多研究主要针对常温下表面自纳米化处理后钛合金摩擦磨损性能的分析,由于钛合金常作为发动机的主要材料,工作时会产生高温,因此探究高温环境中表面自纳米化对钛合金耐磨性能的影响及摩擦磨损分析,可能将是未来的研究重点。

3.3 其他金属

国内外学者除了对铁碳合金和铝镁钛合金进行表面自纳米化的摩擦磨损研究外,还对单质铜、铁、钛及其他有色金属等材料进行研究,取得了一定的进展。

Zhang 等^[50]采用表面机械研磨处理法,在矿物油润滑条件下,对大块纯铜表面进行纳米晶层的制备。结果表明:与粗晶铜相比,SMAT 处理后与未处理铜的磨损量均随载荷的增大而增大,SMAT 处理的铜磨损量的减小幅度大。在 50 N 载荷下,SMAT 处理后

的铜磨损体积比未处理的粗晶铜减少近 20 倍。

Tong 等^[51]采用 SMAT 与化学渗氮结合的方法,在纯钛基板上制备了纳米层。结果表明:SMAT 样品的气体氮化动力有很大提高。SMAT 试样的表面硬度为 6.1 GPa 左右,由表层至基体,硬度逐渐降低至 2.0 GPa,且 SMAT 处理试样的摩擦系数较未处理试样明显降低。SMAT 渗氮降低了划痕深度,改善渗氮 SMAT 试样的摩擦磨损性能,分析得出摩擦磨损性能的提高可能是纳米晶氮化层硬度较高所致。

Wen 等采用表面机械研磨处理 (SMAT) 在工业纯钛表面制备纳米晶层^[52]。结果表明:晶粒尺寸随处理表面深度的增加而增大。对销-盘式摩擦磨损试验后的结果进行分析得出,与原始样品相比,纳米晶层试样摩擦系数减小,且磨损量也明显降低。通过观察 SMAT 处理前、后的磨损形貌得出,磨损机制分别为磨料与粘着磨损共存、磨料磨损,证明了 SMAT 方法可有效提高工业纯钛的耐磨性。

Demangel 等^[53]将表面自纳米化技术首次应用于人造关节材料 Co28Cr6Mo 钴基合金,研究了不同处理时间和表面抛光方法(抛光布、刷子和充满磨料颗粒的液体)对钴基合金表面硬度和形貌的影响。结果表明:随着处理时间的增加,钴基合金硬度也随之增加,25 min 时硬度趋于饱和;与其他两种抛光方法相比,抛光布具有较好的平整度。划痕实验结果表明,穿透深度随着表面抛光效果的增加而减小,划痕深度与硬度测量值存在直接相关性,SMAT 处理显著提高了抗划强度,特别是在较高的负载下,SMAT 处理后,划痕深度可降低 30%~60%。

Hu 等^[54]采用 SMAT 技术在镍钛合金表层制备由纳米晶和亚微米晶粒组成的超细晶粒层,利用摩擦磨损试验台研究了在干滑动条件下超细晶粒层的摩擦磨损特性。结果表明:处理后镍钛合金的表面硬度约为基体的 2 倍,且磨损量和磨损深度均随着载荷的增大而增大。当载荷在 5~15 N 内时,SMAT 试样的磨损深度和磨损体积均低于原始试样。进一步探究其磨损机理得出,剥层磨损为原始粗晶镍钛合金的主要磨损机理,而表面机械研磨处理后的镍钛合金磨损机理主要为磨粒磨损。

通过以上研究可知,大多学者对于表面自纳米化后的摩擦磨损分析主要集中在磨粒磨损、粘着磨损与剥层磨损,而表面自纳米化金属在腐蚀环境下的摩擦磨损研究鲜有报道。大多是研究表面自纳米化处理对金属材料腐蚀特性的影响,而对其腐蚀磨损的研究较少。因此探究表面自纳米化金属材料的腐蚀磨损特性有可能将成为研究的重点。

4 结语

表面自纳米化技术自从提出以来,就成为国内外

学者重点关注及研究的热点。表面自纳米化处理使金属材料表面形成了特有的梯度纳米结构,使得表层到基体硬度值呈梯度变化,材料表层显微硬度得到大幅度提升,金属材料的耐磨性能得到了有效提高。表面自纳米化技术为提高金属材料表面耐磨性能、增加服役寿命、减少能源消耗,提供了一种切实可行的新途径,但将表面自纳米化技术应用于金属材料耐磨处理,仍有许多问题需要进一步解决,主要包括:

1) 探索不同加工工艺与材料耐磨性能的关系,寻找针对不同材料的最优加工工艺参数,获得摩擦磨损性能的最大提升。

2) 关于自纳米化结构金属材料的摩擦磨损机理,目前仍然沿用传统粗晶材料的摩擦磨损理论,应结合纳米晶粒摩擦磨损现象探究相应的摩擦磨损机理,发展金属纳米摩擦学理论。

3) 表面自纳米化技术虽然可以提高金属材料的摩擦磨损性能,但其提高程度有限。如何结合已有的金属材料表面处理方法,使自纳米化结构材料与现有表面处理技术耦合,获得更佳的摩擦磨损性能,也应是该领域的重点研究方向。

4) 计算机模拟是现今材料领域的一个重要分支,如何将计算机模拟技术应用于自纳米化结构材料的设计和加工中应是该领域必不可少的研究方向。

参考文献:

- [1] 樊志罡, 朱其芳, 马通达. 表面纳米化技术对金属材料性能影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(3): 266-268.
FAN Zhi-gang, ZHU Qi-fang, MA Tong-da. The influence of surface nanocrystallization technology on the properties of metal materials[J]. Corrosion science and protection technology, 2014, 26(3): 266-268.
- [2] SHI Y N, HAN Z. Tribological behaviors of nanostructured surface layer processed by means of surface mechanical attrition Treatment[J]. Key engineering materials, 2008, 384: 321-334.
- [3] 游凯, 宋丹, 程兆俊, 等. 金属材料表面纳米化研究现状[J]. 热加工工艺, 2016, 45(4): 15-18.
YOU Kai, SONG Dan, CHENG Zhao-jun, et al. Research status of surface nanocrystallization of metallic materials [J]. Hot working technology, 2016, 45(4): 15-18.
- [4] 何柏林, 熊磊. 金属表面纳米化及其对材料性能影响的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(2): 116-120.
HE Bai-lin, XIONG Lei. Research progress in effect of metal surface nanocrystallization on material properties [J]. Ordnance material science and engineering, 2016, 39(2): 116-120.
- [5] LU K, LU J. Surface Nanocrystallization of metallic material presentation of the concept behind a new approach [J]. J mater sci techn, 1999, 15(3): 193.
- [6] 吴建军, 李阳, 孙德明. 金属材料表面自纳米化研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(1): 1-2.
WU Jian-jun, LI Yang, SUN De-ming. Research progress of the metal surface self-nanocrystallization [J]. Heat treatment technology and equipment, 2013, 34(1): 1-2.
- [7] 田峰, 杨辉. 40Cr钢表面高能喷丸纳米化及其耐磨性能[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 52-54.
TIAN Feng, YANG Hui. Experimental study on wear behavior of surface nanocrystallization of 40Cr[J]. Surface technology, 2013, 42(5): 52-54.
- [8] KINOSHITA K, IMAMURA A, WATANABE Y, et al. Effects of ultrasonic peening on fatigue strength of out-of-plane gusset joints[J]. International journal of steel structures, 2014, 14(4): 769-776.
- [9] FU T I, WANG X, LIU JX, et al. Characteristics and corrosion behavior of pure titanium subjected to surface mechanical attrition[J]. Springer, 2017, 69(10): 1844-1847.
- [10] LIU Y. Mechanical properties and thermal stability of nanocrystallized pure aluminum produced by surface mechanical attrition treatment[J]. Materials science engineering, 2015, 636(11): 446-451.
- [11] 刘刚, 雍兴平, 卢柯. 金属材料表面纳米化的研究现状[J]. 中国表面工程, 2001, 52(3): 1-5.
LIU Gang, YONG Xing-ping, LU Ke. Research status of surface nanocrystallization of metal materials[J]. China surface engineering, 2001, 52(3): 1-5.
- [12] LU K, LU J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment[J]. Mater sci eng, 2004, 38(3): 375-377.
- [13] 刘刚, 周蕾. 工程金属材料的表面纳米化技术(一)[J]. 纳米科技, 2006, 3(1): 51-56.
LIU Gang, ZHOU Lei. Surface nanocrystallization technology of engineering metal materials[J]. Nanotechnology, 2006, 3(1): 51-56.
- [14] 刘红. 金属材料表面纳米化研究现状[J]. 石油工程建设, 2010, 36(3): 11-15.
LIU Hong. Research status of surface nanocrystallization of metallic materials[J]. Petroleum engineering construction, 2010, 36(3): 11-15.
- [15] 丛志新, 王宇. 浅析表面自身纳米化及其应用进展[J]. 热处理技术与装备, 2008, 29(1): 10-14.
CONG Zhi-xing, WANG Yu. Surface self-nanocrystallization and the progress of its application[J]. Heat treatment technology and equipment, 2008, 29(1): 10-14.
- [16] 颜亮. 超声冲击对钢轨摩擦磨损性能的影响[D]. 南昌: 华东交通大学, 2009.
YAN Liang. Effect of the rubbing and wearing behavior of steel rail by ultrasonic peening[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009.
- [17] 李东, 裴广玉. 金属材料表面纳米化机制研究现状[J].

- 材料导报, 2013, 27(22): 5-8.
- LI Dong, PEI Guang-yu. Study on surface nanocrystallization mechanism of metal materials[J]. Material review, 2013, 27(22): 5-8.
- [18] 张洪旺, 刘刚, 黑祖昆, 等. 表面机械研磨诱导 AISI 304 不锈钢表层纳米化 II 晶粒细化机理[J]. 金属学报, 2003(4): 347-350.
- ZHANG Hong-wang, LIU Gang, HEI Zu-kun, et al. Surface nanocrystallization of AISI304 stainless steel induced by surface mechanical attrition treatment grain refinement mechanism[J]. Acta metallurgica sinica, 2003(4): 347-350.
- [19] TAO N, WANG Z, TONG W, et al. An investigation of surface nanocrystallization mechanism in Fe induced by surface mechanical attrition treatment[J]. Acta materialia, 2002, 50(18): 4603-4616.
- [20] 孙勇, 朱留宪, 马世伟. 表面机械研磨对 AZ31 合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39(2): 448-451.
- SUN Yong, ZHU Liu-xian, MA Shi-wei. Effect of surface mechanical lapping on microstructure and mechanical properties of AZ31 alloy[J]. Foundry technology, 2018, 39(2): 448-451.
- [21] 周圳, 鲁世红, 张涛, 等. 铝合金弹性预应力超声喷丸成形试验[J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 31-39.
- ZHOU Zhen, LU Shi-hong, ZHANG Tao, et al. Experimental study of elastic prestressed ultrasonic peen forming on aluminum alloy[J]. China surface engineering, 2017, 30(3): 31-39.
- [22] ZHANG J, OU X B, YANG D H, et al. Surface nanocrystallization of magnesium alloy AZ91D by high-energy shot peening[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials science edition), 2009, 24(4): 515-519.
- [23] 刘玉亮, 刘杰, 熊天英. 超音速微粒轰击 40Cr 钢的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2012, 37(7): 14-16.
- LIU Yu-liang, LIU Jie, XIONG Tian-ying. Tribological behavior of 40Cr steel treated by supersonic particles bombarding[J]. Lubrication engineering, 2012, 37(7): 14-16.
- [24] HAN Y J, YE F X, DING K Y, et al. Effects of supersonic fine particles bombarding on thermal barrier coatings after isothermal oxidation[J]. Transactions of non-ferrous metals society of China, 2012, 22(7): 1629-1637.
- [25] 熊天英, 刘志文, 李智超, 等. 超音速微粒轰击金属表面纳米化新技术[J]. 材料导报, 2003, 17(3): 69-71.
- XIONG Tian-ying, LIU Zhi-wen, LI Zhi-chao, et al. Supersonic fine particles bombarding a novel surface nanocrystallization technology[J]. Material review, 2003, 17(3): 69-71.
- [26] 邹洪庆, 吕基成, 钱建才, 等. 氟聚合物耐磨自润滑涂层的性能与工程应用效果[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 96-102.
- ZOU Hong-qing, LYU Ji-cheng, QIAN Jian-cai, et al. Performance and engineering application of fluoropolymer wear resistant self-lubricating coating[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 96-102.
- [27] 夏双五, 刘勇, 吕坚. 梯度纳米结构镁合金[J]. 中国材料进展, 2016, 35(11): 825-834.
- XIA Shuang-wu, LIU Yong, LYU Jian. The gradient nanostructure of mg alloys[J]. Materials China, 2016, 35(11): 825-834.
- [28] 张枝森, 何柏林, 徐先锋. 钢材表面纳米化技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 17-20.
- ZHANG Zhi-sen, HE Bai-lin, XU Xian-feng. Research progress of surface nanocrystallization technology for steel[J]. Hot working technology, 2017, 46(4): 17-20.
- [29] 史美霞, 杜华云, 卫英慧, 等. 表面纳米化对低碳钢在干摩擦条件下摩擦磨损性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(1): 26-30.
- SHI Mei-xia, DU Hua-yun, WEI Ying-hui, et al. Friction and wear properties of low carbon steel by means of surface nanocrystalline under dry friction[J]. Journal of iron and steel research, 2011, 23(1): 26-30.
- [30] 李国宾, 关德林, 张明星. 表面纳米化中碳钢在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(5): 39-43.
- LI Guo-bin, GUAN De-lin, ZHANG Ming-xing. Friction and wear properties of medium carbon steel by means of surface nanocrystalline under dry friction[J]. Tribology, 2008, 28(5): 39-43.
- [31] ZHANG J B, WANG A X, ZHANG Y J. Study on the friction and wear properties of the surface nanocrystallized 1.0C-1.5Cr steel induced by the surface mechanical attrition treatment[J]. Bao steel technical research, 2010, 4(4): 17-21.
- [32] 金辉, 何柏林. 表面处理技术改善结构表面残余应力的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019, 48(6): 30-34.
- JIN Hui, HE Bai-lin. Research progress of surface residual stress of structure improved by surface treatment technology[J]. Hot working technology, 2019, 48(6): 30-34.
- [33] 张新锋. 表面纳米化对 316L 不锈钢摩擦磨损性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(10): 2464-2466.
- ZHANG Xin-feng. Effects of surface nanocrystallization on friction and wear properties of 316L stainless steel[J]. Foundry technology, 2015, 36(10): 2464-2466.
- [34] ROLAND T, RETRAINT D, LU K, et al. Effect of surface nanocrystallization on tribological properties of stainless steel[J]. Materials science forum, 2006, 524-525: 717-722.
- [35] 胡国雄, 盛光敏, 韩靖. 塑性变形诱发表面自纳米化的研究及其应用[J]. 材料导报, 2007, 21(4): 117-121.
- HU Guo-xiong, SHENG Guang-min, HAN Jing. Investigation and application of surface self-nanocrystallization induced by severe plastic deformation[J]. Material review, 2007, 21(4): 117-121.
- [36] SAHU J N, SASIKUMA C. Development of hard and

- wear resistant surface coating on Ni-Cr-Mo steel by surface mechano-chemical carburization treatment (SMCT)[J]. *Journal of materials processing tech*, 2018, 263: 285-295.
- [37] 王伟. 超声表面纳米化对低合金钢摩擦磨损性能研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
- WANG Wei. Research on friction and wear properties of low alloy steel processed by ultrasonic surface nanocrystallization[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [38] 李权, 王福德, 王国庆, 等. 航空航天轻质金属材料电弧熔丝增材制造技术[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(3): 74-82.
- LI Quan, WANG Fu-de, WANG Guo-qing, et al. Aerospace light metal material arc fuse additive manufacturing technology[J]. *Aviation manufacturing technology*, 2018, 61(3): 74-82.
- [39] 于振涛, 余森, 程军, 等. 新型医用钛合金材料的研发和应用现状[J]. *金属学报*, 2017, 53(10): 1238-1264.
- YU Zhen-tao, YU Sen, CHENG Jun, et al. Development and application of new medical titanium alloy materials[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2017, 53(10): 1238-1264.
- [40] 姚宏亮, 曾琦, 陈贺静, 等. 铝合金轮毂锻造自动喷雾润滑柔性应用[J]. *锻压技术*, 2018, 43(9): 10-13.
- YAO Hong-liang, ZENG Qi, CHEN He-jing, et al. Flexible application of automatic spray lubrication in forging aluminum alloy wheels[J]. *Forging & stamping technology*, 2018, 43(9): 10-13.
- [41] XIA S W, LIU Y, DONG M, et al. Effect of surface mechanical attrition treatment on tribological behavior of the AZ31 alloy[J]. *Journal of materials science technology*, 2016, 32: 1245-1252.
- [42] 杨亚鹏, 陈晓晓, 张亚, 等. 激光冲击强化对AZ91D镁合金力学性能的试验研究[J]. *应用激光*, 2018, 38(5): 798-804.
- YANG Ya-peng, CHEN Xiao-xiao, ZHANG Ya, et al. Experimental study on mechanical properties of AZ91D magnesium alloy by laser shock peening[J]. *Applied laser*, 2018, 38(5): 798-804.
- [43] LIU Y, JIN B, LI D J, et al. Wear behavior of nanocrystalline structured magnesium alloy induced by surface mechanical attrition treatment[J]. *Surface coatings technology*, 2015, 261: 219-226.
- [44] LI Q D, LU H, LI D Y. Effect of recovery treatment on the wear resistance of surface hammered AZ31 Mg alloy[J]. *Wear*, 2019, 426-427: 981-988.
- [45] 马慧娟, 顾艳红, 车俊铁, 等. 表面纳米化对 2024 铝合金耐磨性能的影响[J]. *材料保护*, 2016, 49(7): 56-59.
- MA Hui-juan, GU Yan-hong, CHE Jun-tie, et al. Effect of surface nanocrystalline on wear resistance of 2024 aluminum alloy[J]. *Materials protection*, 2016, 49(7): 56-59.
- [46] WEN L, WANG Y M, ZHOU Y, et al. Iron-rich layer introduced by SMAT and its effect on corrosion resistance and wear behavior of 2024 Al alloy[J]. *Materials chemistry and physics*, 2011, 126: 301-309.
- [47] 田龙, 张伟. 表面纳米化对 7055 铝合金耐磨性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(35): 10608-10611.
- TIAN Long, ZHANG Wei. Effect of surface nanocrystalline on wear resistance of 7055 aluminum alloy[J]. *Science technology and engineering*, 2013, 13(35): 10608-10611.
- [48] 顾艳红, 马慧娟, 陈玲玲, 等. Ti6Al4V 钛合金超声波冷锻微弧氧化涂层的制备及耐磨性能[J]. *中国表面工程*, 2016, 29(1): 87-95.
- GU Yan-hong, MA Hui-juan, CHEN Ling-ling, et al. Wear resistance of maocoated Ti6Al4V alloy prepared by ultrasonic cold forging technology[J]. *China surface engineering*, 2016, 29(1): 87-95.
- [49] ANAND S, GANESH S, SANKARA T S N, et al. Influence of counterbody material on fretting wear behaviour of surface mechanical attrition treated Ti-6Al-4V[J]. *Tribology International*, 2013, 57: 107-114.
- [50] ZHANG Y S, HAN Z. Fretting wear behavior of nanocrystalline surface layer of pure copper under oil[J]. *Tribology letters*, 2007, 27(1): 53-59.
- [51] TONG W P, SUN J, ZUO L, et al. Study on wear and friction resistance of nanocrystalline Fe nitrided at low temperature[J]. *Wear*, 2011, 271(5): 653-657.
- [52] WEN M, WEN C, HODGSONAND P, et al. Wear behaviour of pure Ti with a nanocrystalline surface layer[J]. *Applied mechanics and materials*, 2011, 66-68: 1500-1504.
- [53] DEMANGEL C, POZNANSKI A, STEENHOUT V, et al. Benefit of a surface nanocrystallization treatment on Co28Cr6Mo abrasive wear properties[J]. *Advanced materials research*, 2014, 966-967: 435-441.
- [54] HU T, WEN C S, SUN G Y, et al. Wear resistance of Ni-Ti alloy after surface mechanical attrition treatment[J]. *Surface coatings technology*, 2010, 205: 506-510.