

低温离子渗硫技术研究现状及展望

崔娜, 韩彬, 王勇

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 低温离子渗硫技术克服了传统渗硫方法的不足,是目前最常用的 FeS 固体润滑薄膜制备方法。由于存在理论研究尚未完善、应用材料相对单一、微纳米硫化物薄膜表征困难等问题,该技术的应用推广及其工业化进程受到限制。综述了离子渗硫技术在渗硫机理、工艺研究、硫化物薄膜表征及渗硫层摩擦学性能等方面的研究进展,分析了渗硫层减摩作用机理和当前离子渗硫应用的基体材料类型,指出了其未来的发展方向。

关键词: 低温离子渗硫; 硫化物薄膜; 减摩机理

中图分类号: TG174.445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)06-0131-07

Research Status and Prospects of Low-temperature Ion Sulfurizing Technology

CUI Na, HAN Bin, WANG Yong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: Low-temperature ion sulfurizing technology overcomes many shortcomings existing in traditional sulfurizing methods, and has become the most commonly used preparation method of ferrous sulfide solid lubrication film. However, its theoretical study is not perfect yet, the sorts of materials applied are relatively deficient, and the characterization of micro/nano sulfide layer is difficult, all these factors restrict its promotion and industrialization process. The achievements and disadvantages of ion sulfurizing technology based on principle and process research, characterization of sulfide film and its tribological properties were presented in this paper. The anti-friction mechanism of sulfide layer was discussed. The substrate types of ion sulfurizing were introduced and the future prospects of ion sulfurizing technology were proposed.

KEY WORDS: low-temperature ion sulfurizing; sulfide layer; anti-friction mechanism

低温电解渗硫(Sulf-BT 法)技术广泛应用于滑动
零部件、合金钢工模具的表面减摩和耐磨处理^[1]。20
世纪 80 年代我国材料物理学家张弋飞首先发现固体
硫蒸气产生辉光放电的效应^[2],开拓了离子渗硫的新

收稿日期: 2014-07-06; 修订日期: 2014-08-14

Received: 2014-07-06; Revised: 2014-08-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51179202);山东省自然科学基金(ZR2009FM030);青岛市科技发展指导计划项目(KJZD-12-44-jch);清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLTKF13B04)

Fund: Supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China (51179202), Natural Science Foundation of Shandong Province of China (ZR2009FM030), Qingdao Science and Technology Development Plan Project (KJZD-12-44-jch) and the Tribology Science Fund of State Key Laboratory of Tribology (SKLTKF13B04)

作者简介: 崔娜(1987—),女,河南周口人,硕士,主要研究方向为表面改性和新材料连接技术。

Biography: CUI Na(1987—),Female, from Zhoukou, Henan, Master,Research focus: surface modification and new material connection technology.

通讯作者: 韩彬(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为材料连接与表面工程。

Corresponding author: HAN Bin(1973—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: material joining technology and surface engineering.

思路。与热喷涂、涂镀等其他表面处理工艺相比^[3],低温离子渗硫技术操作温度低,工件无变形,节能环保。大量应用研究表明^[4-6],在轻载摩擦副的性能改善方面,该技术能够在保持工件原有尺寸和精度的情况下,既减少摩擦功耗,节约耐磨材料,又能延长使用寿命,提高经济效益。

本文从低温离子渗硫基本原理的研究入手,着重介绍硫化物薄膜层表征和渗硫层摩擦学性能研究,分析并归纳其减摩作用机理及当前离子渗硫技术应用的基体材料类型,指出该技术未来的发展趋势,以期进一步推动我国低温离子渗硫技术的不断完善及其工业化进程。

1 机理及工艺研究

1.1 渗硫机理

国内外对于离子渗硫机理的研究较少。由于离子渗硫和离子渗氮的气相活化及沉积过程相似^[7],学者们从离子渗氮原理出发,提出了离子渗硫的基本原理,目前较为主流的看法有3种^[8-9]:1)正离子(包括载体气体和硫的正离子)在电场的作用下,轰击工件表面,被溅射的Fe原子与阴极附近的活性硫原子发生反应,重新沉积到工件表面;2)含硫气体在辉光放电的环境下分解或受热分解,产生活性的中性硫原子与工件发生反应;3)硫的正离子直接轰击工件表面,与被激活的Fe原子发生反应,并向内部扩散。三者的主要区别是轰击工件表面的工作粒子不同。

1.2 工艺研究

1.2.1 工艺参数研究

离子渗硫是一个多参数的控制过程,工艺参数(渗硫温度、保温时间、电源电压、气压、占空比等)的合理控制可以实现渗硫层厚度、形貌、成分及显微硬度的调控。目前研究多集中于渗硫温度和时间。

渗硫温度主要影响渗硫层的成分及相组成^[10]。研究表明^[11],低温时渗硫层中基本检测不到硫化物相,随着温度的升高,S含量逐渐增加。由于温度过高易造成S过剩,形成不具有润滑作用的其他硫化物相(FeS_2 等),因此,低温离子渗硫温度在200℃左右。

渗硫时间是决定渗层厚度、硫浓度、表面状态及显微硬度的关键因素。张君^[12]研究表明,随着时间

的增加,渗层厚度及硫浓度均相应增加,二者变化趋势基本一致。此外,时间长短对渗层表面状态也有一定影响^[13],过长则表面粗糙,其显微硬度相应降低;过短则渗层太薄且不连续,适宜的时间是2~4h。

对离子渗硫工艺参数的研究还不够系统和深入。由于对离子渗氮工艺参数的研究较为成熟,其过程与离子渗硫相似,可以借鉴开展相关研究。

1.2.2 工艺优化及复合工艺的开发

离子渗硫工艺的优化主要针对渗硫效率的提高和渗硫质量的改善,已取得显著成效的方法有催渗技术和近几年发展起来的活性屏离子渗硫技术。应用于渗氮技术的表面预氧化^[14]、表面纳米化^[15]、表面预变形^[16]等方法,可以与离子渗硫技术相结合发挥良好的催渗作用。活性屏离子渗硫原理是网状活性屏上形成的硫化物溅射沉积到工件表面,形成渗硫层。该技术能够避免空心阴极效应^[17],同时改善复杂零部件的打弧烧伤和边缘效应,获得与传统离子渗硫技术同样的渗硫效果,但此法要求采用偏压电源。

为了进一步扩展离子渗硫的工业应用领域,提高该技术的环境适应性^[18],将离子渗硫技术与其他工艺相复合已被广泛应用。目前已从单一离子渗硫发展了S-N, S-N-C, N-C-O-S, Re-N-C-S-V-Nb等多元复合离子渗工艺^[19-21]、两步法^[22-23]和多种复合处理技术(磁控溅射、离子溅射、喷涂、复合镀渗、激光熔覆-离子渗硫等)相结合工艺^[24-25]。采用上述工艺在零部件表面制备的 FeS , WS_2 , MoS_2 和 ZnS ^[26-28]等是良好的固体润滑剂,能够满足复杂工况下钢铁零部件,如发动机、气缸活塞环、切削工具及钻杆接头等的固体润滑要求。清华大学、装甲兵工程学院、中国科学院兰州化学物理研究所、中国地质大学(北京)等对低温离子渗硫进行了较为系统的研究,取得了大量研究成果。

2 渗硫层的表征及其摩擦学性能

2.1 表征

渗硫层为微纳米尺寸的硫化物薄膜,对于纳米薄膜的表征存在诸多难点,可归纳为以下3个方面:1)渗硫层易被氧化和破坏,表面疏松多且其硬度低^[29],S元素在渗层制备、保存与加工的过程中极易被氧化、被切削液污染或受刮擦而损坏,杨臻等^[30]提出多次换气清洗渗炉,改善渗硫蒸气气源以及真空封装隔

氧保存的方式可以消除 S 元素在渗硫及存储环节的氧化失效;2) 试样制备及检测困难,一方面质软且厚度薄(几微米到几十微米)的渗硫层在磨制时极易形成卷边和倒角或者被磨粒填充和嵌入,另一方面,纳米尺度硫化物薄膜的表征和分析对试样的制备要求(光洁度,平整度,粗糙度等)较为苛刻,传统的加工方法很难满足要求,董玉明^[31]提出试样镶嵌时表面镀镍或用钢片紧贴渗硫层表面,但这同时也增加了实验的复杂性;3) 检测标准不统一,常规的检测方法难以向纳米尺度延伸,样品表面状态难以满足高精度检测设备的要求,导致小尺度薄膜的检测结果往往离散性较大。

现已开展了对硫化物薄膜微观形貌、尺寸、厚度、结构、成分分布、力学性能及其与基体的结合强度的研究。扫描电子显微镜、透射电子显微镜、原子力显微镜、X 射线电子衍射、X 射线光电子能谱仪、俄歇电子能谱仪等仪器被广泛应用^[32]。薄膜纳米力学性能

(硬度及弹性模量)测试多采用纳米压痕法,目前宝山钢铁和中科院力学研究所已制定了该检测方法的标准^[33]。薄膜与基体的结合强度的测试多采用涂层附着划痕实验。

研究表明^[34],硫化物薄膜与基体结合良好(结合力 44N),不易剥落,利于维持其减摩润滑作用的持久发挥。现阶段,渗硫层结构组成及硫化物薄膜与基体的结合过渡状态仍是难点,尤其是对表面纳米多层膜各层间的复杂界面状态与界面效应更是少有报道。

2.2 摩擦学性能

对渗硫层摩擦学性能的研究较为成熟,目前已广泛开展了润滑油、干摩擦、水润滑、含硫添加剂复合润滑等不同润滑条件、不同温度(高温及常温)、不同载荷和不同基体状态下渗硫层摩擦学性能的研究,其典型应用实例见表 1。

表 1 低温离子渗硫典型应用实例
Tab.1 Typical applications of low-temperature ion sulphurizing

预处理	零部件类型	性能改善	研究学者
调质		接触疲劳寿命提高一倍	张平等
淬火+低温回火	刀具,模具	抗擦伤、耐磨性能改善: (高速钢>模具钢>45 钢)	王海斗等
激光淬火	缸套	抗高温粘着磨损性能好	蔡志海等
去应力退火	柴油机缸套	减摩性能好,摩擦系数下降 25%	何杰等
	铣刀	工作寿命提高 6.4 倍,效率提高 50%	魏有才等
淬火+低温回火		耐磨性和抗咬合性显著提高	袁叔贵等
常规淬火	308,207 轴承	使用寿命提高 3.3 倍,耐磨性好	赵振东等

研究表明,硫化物固体润滑相兼具良好的耐磨、减摩及抗擦伤、抗咬合性能,同时又不影响基体的承载能力,可显著提高摩擦副零件的接触疲劳寿命。渗硫层的减摩作用不仅在油润滑(浸油及滴油润滑)工况下有效,疏松且多孔的渗硫层可储存润滑油并形成吸附油膜,实现“流体润滑+固体润滑”的混合润滑,大幅提高摩擦零部件的抗擦伤和耐磨减摩性能,以提高摩擦副的工作稳定性。此外,马世宁等^[35]研究发现,复合处理获得的 S-C-N 共渗层与含硫添加剂的协同作用,能够生成复杂化合物和硫化物组成的化学反应膜,使表面具有更加优良的减摩耐磨性能。王海斗等^[36]对高速钢、模具钢和 45 钢渗硫层的摩擦学性能对比研究表明,不同材料表面渗硫层的摩擦学性能主要受基体硬度、组织结构及耐蚀性的影响,硬度

高、组织中有硬质相且耐蚀性好的钢材渗硫后摩擦学性能的改善越显著。张平等^[34]对缸套内壁激光淬火渗硫处理后,复合层表面的固体润滑硫化物有效抑制了高温粘着磨损和磨粒磨损,改善了缸套/活塞环摩擦副表面的匹配性能。

值得强调的是,根据摩擦学原理^[37],渗硫层只有结合高硬度基体,形成表层软、亚表面硬的理想摩擦学表面,才能充分发挥上述优异性能。这就要求以高硬度材质为基体进行渗硫,或者对软基体进行硬化处理,常用表面硬化方法有渗碳、渗氮、激光淬火或多元离子复合渗等。此外,渗硫层并非越厚越好^[38],过厚会降低工件的承载能力且易剥落,摩擦系数也会随之增大,因此,硫化物减摩耐磨固体润滑涂层的制备不能脱离实际工况^[39]。

3 渗硫层减摩机理

现阶段渗硫层的减摩机理被广泛讨论,总体上可归纳为以下4个方面的作用^[8,40]。

3.1 硫化物及渗硫层特殊结构的作用

不同离子渗硫工艺获得的硫化物(ZnS , WS_2 , MoS_2 , FeS 等)的特殊晶格结构对摩擦学性能的改善作用已获得广泛共识。硫化物的密排六方结构,使其具有剪切强度低,易沿密排面滑移的特性,故表现出很低的摩擦系数,使摩擦温升明显下降,大大提高零件的使用寿命和稳定性。

渗硫层的多微孔结构,一方面能缓冲外载荷的直接作用,提高摩擦副的承载能力和抗擦伤性能;另一方面,渗硫层中微小的“毛细管”结构^[41],利于吸附润滑油形成稳定油膜,使其表面具有超常储油功能,润滑油还可与硫化物相互作用,形成表面活化物质。 FeS 在压力作用下被静电极化,可提高润滑油中表面活化物质的极性分子与金属表面的链接强度,显著提高边界润滑层的强度和润滑性能。

3.2 渗硫层物理化学特性的作用

渗硫层中的 FeS 熔点高,热稳定性好,大气环境下600℃也不会氧化分解,可在较宽温度范围内发挥减摩润滑作用。

渗硫层硬度低,渗硫处理后金属表面微凸体转化为软质硫化物,使得磨合阶段大大缩短,摩擦副提前进入稳定磨损阶段,推迟咬合的发生;渗硫层能使表面平整化,增大实际承载面积,降低接触应力,减缓表面微凸体对软金属的犁削作用,表现出优良的抗粘着性能。此外,摩擦过程中硫化物微粒对磨损表面进行磨合和抛光,同时金属磨屑也可能裹上 FeS 而改性,因此磨粒磨损和疲劳磨损均有所减弱,且渗硫层与基体为牢固的化学结合,不易剥落,能够维持渗硫效能的长期发挥。

3.3 硫化物的分解与再生

在受压和高温摩擦热下,摩擦表面发生复杂的物理化学过程,渗硫层可能发生分解破坏,并析出活性硫原子。它们一部分被氧化,一部分在摩擦热作用下又不断地与金属发生反应再次生成 FeS 等硫化物,即发生硫向金属内部的渗入或迁移,达到分解破坏与重

新合成的动态平衡。虽然渗硫层很薄,但它在磨损过程中的作用却很大。

3.4 氧化物膜的协同作用

在摩擦磨损过程中,硫化物在空气中受热,其表面高的空位浓度有利于氧的扩散和氧化物膜的形成^[42],氧化物膜中 Fe_3O_4 的固体润滑效果最好,氧化物膜与硫化物膜通过共同作用提高金属在边界润滑下的承载能力,以进一步改善抗擦伤及耐磨性能。

4 应用材料类型

自渗硫技术问世以来,其应用材料类型始终局限于钢铁材料(碳素结构钢、合金结构钢、碳素工具钢、合金工具钢及各类硬质合金等),大大限制了该技术在工业领域的推广和应用。马世宁等^[43]借鉴“活性屏离子渗氮”技术实现了7A52铝合金的离子渗硫,将离子渗硫技术的应用材料范围扩大至非钢铁材料领域(钛、铜、铝、锌及其合金等),但对于非金属及复合材料的离子渗硫研究至今尚未有报道。

在钢铁材料的离子渗硫方面,王海斗等^[44]在45钢、高速钢(W6Mo5Cr4V2)、模具钢(5CrNiMo)和不锈钢(2Cr13)4种钢表面都获得了减摩耐磨性能良好的 FeS 润滑膜层。刘沅东等^[45]在GCr15钢表面制备了 FeS 固体润滑薄膜,其减摩抗磨性能得到显著提高。孟凡深等^[46]研究表明,19CrNi5,20CrMnMo钢渗碳后真空离子硫化比低温电解硫化的抗咬合及抗磨损性能好。有研究表明^[47],超声速微粒轰击纳米化是位错运动的结果,而表面高密度的位错利于扩散反应的进行。马国政等^[48]也研究证明了超声速微粒轰击纳米化预处理显著改善了1Cr18Ni9Ti不锈钢离子渗硫的效果,利于形成致密均匀的硫化物薄膜。

在非钢铁材料离子渗硫方面,乔玉林等^[49]利用可移动网状活性屏辅助低温离子渗硫技术(ASPS),在铝合金表面制备了润滑性能优良的渗硫层;康嘉杰等^[28]采用电弧喷涂-离子渗硫复合工艺在45钢表面制备了 Zn/ZnS 复合涂层,结果表明,干摩擦条件下 Zn/ZnS 复合涂层的减摩耐磨性能比45钢直接渗硫的好;王利捷^[50]采用离子渗硫技术在Ti6Al4V表面原位合成以 TiS_2 为主,含有少量 TiS , Ti_2S , TiS_3 的渗硫层,具有良好的减摩和自润滑作用。

5 发展趋势

结合离子渗硫技术的研究现状,笔者认为未来该

技术的发展方向可归纳为机理研究、工艺研究和开发、应用材料推广3个方面。

目前提出的离子渗硫机理基本都是尝试性的,缺乏足够的理论支持和实验依据。对渗硫温度和保温时间、电压、气压、气体比例等参数的研究是重点。针对不同设备,各种零件离子渗硫工艺也需要进一步开发。多种复合处理相结合技术也是一个发展方向。

参考文献

- [1] MA G Z, XU B S, WANG H D, et al. The Low-temperature Ion Sulfurizing Technology and Its Applications[J]. *Physics Procedia*, 2013(50):131—138.
- [2] 张戈飞. 金属零件表面形成硫化物层的方法及设备: 中国, 85106828[P]. 1987-03-11.
ZHANG Yi-fei. Process for Forming Sulphide Layer on the Surface Metal Parts and Apparatus: China, 85106828[P]. 1987-03-11.
- [3] 张燕, 张行, 刘朝辉, 等. 热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J]. *装备环境工程*, 2013, 10(3):59—62.
ZHANG Yan, ZHANG Hang, LIU Zhao-hui, et al. Development Status of Thermal Spray Technology and Thermal Spray Materials[J]. *Equipment Environment Engineering*, 2013, 10(3):59—62.
- [4] KANG Jia-jie, WANG Cheng-biao, WANG Hai-dou, et al. Characterization and Tribological Properties of Composite 3Cr13/FeS layer[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203(14):1927—1932.
- [5] 刘沅东, 王成彪, 车延岗, 等. 离子轰击热处理技术对轴承钢摩擦学性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(5):127—133.
LIU Yuan-dong, WANG Cheng-biao, CHE Yan-gang, et al. Tribological Properties of 52100 Steel Treated by Different Plasma Bombardment Heat Treatment Method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(5):127—133.
- [6] 戴兵, 张恒华, 黄波, 等. DLC 表面处理对高速钢耐磨性能的影响[J]. *表面技术*, 2008, 37(6):24—26.
DAI Bing, ZHANG Heng-hua, HUANG Bo, et al. Effect of DLC Surface Treatment on Wear Resistance of High Speed Steel[J]. *Surface Technology*, 2008, 37(6):24—26.
- [7] HU Chun-Hua, MA Shi-Ning, QIAO Yu-Lin, et al. Formation Mechanism of Ion Sulphurized Layer on Nitrocarburized Surface of 45 Steel[J]. *Material Science and Technology*, 2008, 16(1):52—57.
- [8] WANG Hai-dou, XU Bin-shi, LIU Jia-jun, et al. The Friction-reduction Model of the Iron Sulfide Film Prepared by Plasma Source Ion Sulfuration[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(9/11):5236—5239.
- [9] 黄文波, 蒙继龙. 离子渗硫技术进展[J]. *金属热处理*, 2001, 26(7):43—45.
HUANG Wen-bo, MENG Ji-long. Development of Ion-sulphurizing[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, 26(7):43—45.
- [10] 王红波. 离子渗氮-渗硫复合处理对 Ti6Al4V 合金摩擦学性能的影响[D]. 西安: 长安大学, 2009.
WANG Hong-bo. Effect of Ion Nitriding-sulfurizing Composite Treatment on Tribological Behavior of Ti6Al4V[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [11] 江静华. 钢的稀土催化渗硫新工艺及渗层摩擦学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2003.
JIANG Jing-hua. New Steel Sulphurizing with Rare Earth Catalyzer and Tribology Properties of Produced Sulfide Coating[D]. Nanjing: Southeast University, 2003.
- [12] 张君. 冷作模具钢 Cr12MoV 表面改性及摩擦学性能的研究[D]. 上海: 上海大学, 2005.
ZHANG Jun. Surface Modification and the Study on Tribological Performance of Cr12MoV Cold Work Die [D]. Shanghai: Shanghai University, 2005.
- [13] 江静华, 蒋建清, 涂益友, 等. 稀土催化低温熔融渗硫工艺及渗硫层组织形貌[J]. *中国稀土学报*, 2002, 20(5):40—43.
JIANG Jing-hua, JIANG Jian-qing, TU Yi-you, et al. Low Temperature Sulphurizing with Rare Earth Addition[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2002, 20(5):40—43.
- [14] 周潘兵, 周浪. 氧化层对渗氮动力学的影响[J]. *材料热处理学报*, 2005, 26(4):102—105.
ZHOU Pan-bing, ZHOU Lang. Effect of Oxide Layer on Kinetics of Nitridation[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2005, 26(4):102—105.
- [15] 王天生, 于金库, 董冰峰, 等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的喷丸表面纳米化及其对耐腐蚀性的影响[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(9):51—54.
WANG Tian-sheng, YU Jin-ku, DONG Bing-feng, et al. Surface Nanocrystallization Induced by Shotpeening and Its Effect on Corrosion Resistance of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(9):51—54.
- [16] YUE Wen, GAO Xiao-cheng, LIU Yuan-dong, et al. Tribological Properties of Sulfurized-nitrided Layer Prepared by a Two-step Method[J]. *Vacuum*, 2011(85):1011—1016.
- [17] 马世宁, 胡春华, 乔玉林, 等. 活性屏离子渗硫层的结构与减摩耐磨性能研究[C]//第七届全国表面工程学术会议, 2008:150—153.
MA Shi-ning, HU Chun-hua, QIAO Yu-lin, et al. Study on

- Friction Reduction and Wear Resistance Properties and Structure of Active Screen Ion Sulphurized Layer[C]//International Conference on Multi-functional Materials and Structures, 2008:150—153.
- [18] 康蓉莉,冯雪艳,何恩山.兵器装备环境工程发展需求[J].装备环境工程,2010,7(3):56—58.
KANG Rong-li, FENG Xue-yan, HE En-shan. Development Requirements of Weapon Materiel Environmental Engineering[J]. Equipment Environment Engineering, 2010, 7(3): 56—58.
- [19] 唐殿福,卯石刚.钢的化学热处理[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2009.
TANG Dian-fu, MAO Shi-gang. Chemical Heat Treatment of Steel[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2009.
- [20] 钟厉,戴仲谋,邵丽.循环N/C/O/S离子共渗对316Ti钢组织及耐腐蚀性的影响[J].表面技术,2012,41(3):67—70.
ZHONG Li, DAI Zhong-mou, SHAO Li. Influence of Ion N/C/O/S Cycling Penetration on the Structure and Corrosion Resistance of 316 Ti Steel[J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 67—70.
- [21] 徐永礼,庞祖高,马宽猷,等. Re-N-C-S-V-Nb多元共渗H13钢的热疲劳性能研究[J].表面技术,2013,42(5):35—44.
XU Yong-li, PANG Zu-gao, MA Kuan-you, et al. Research on the Thermal Fatigue Performance of H13 Steel by Re-N-C-S-V-Nb Multicomponent Permeating Treatment[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 35—44.
- [22] 万盛,韩彬,王勇,等.激光相变硬化-离子渗硫复合改性层的性能[J].金属热处理,2012,37(1):68—71.
WAN Sheng, HAN Bin, WANG Yong, et al. Properties of Laser Transformation Hardening and Ion Sulphurizing Compound Modified Layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(1): 68—71.
- [23] WANG H D, MA G Z, XU B S, et al. Microstructure and Vacuum Tribological Properties of 1Cr18Ni9Ti Steel with Combined Surface Treatments[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(11): 3546—3552.
- [24] 杨军胜.采用复合电镀技术提高Ti6Al4V摩擦学性能[D].西安:长安大学,2010.
YANG Jun-sheng. Improving Ti6Al4V Alloy's Friction and Wear Properties by Complex Processing Technology[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [25] 孙雪洁.渗氮层与渗氮/渗硫复合层在润滑条件下的摩擦学性能研究[D].北京:中国地质大学,2011.
SUN Xue-jie. A Study on Tribology Behaviors of Nitrided and Sulfur-nitrided Surfaces under Oil Lubrications[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2011.
- [26] ZHU Li-na, WANG Cheng-biao, WANG Hai-dou, et al. Tribological Properties of WS₂ Composite Film Prepared by a Two-step Method[J]. Vacuum, 2010(85): 16—21.
- [27] 田晓东,王利捷,郑文鹏. TC4钛合金表面辉光离子渗Mo渗S复合处理涂层的组织和摩擦学性能[J].表面技术,2013,42(2):4—6.
TIAN Xiao-dong, WANG Li-jie, ZHENG Wen-peng. Microstructure and Tribological Properties of Coatings Prepared by Glow Plasma Deposition Mo and S on TC4 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 4—6.
- [28] KANG Jia-jie, WANG Cheng-biao, WANG Hai-dou, et al. Research on Tribological Behaviors of Composite Zn/ZnS Coating under Dry Condition[J]. Applied Surface Science, 2012(258): 1940—1943.
- [29] 车延岗,袁静静,刘沅东,等. 35CrMo钢硫氮共渗层的摩擦学性能[J].材料保护,2010,43(8):25—29.
CHE Yan-gang, YUAN Jing-jing, LIU Yuan-dong, et al. Friction Property of Sulfurizing-nitriding Layer on 35CrMo Steel[J]. Materials Protection, 2010, 43(8): 25—29.
- [30] 杨臻,底月兰,张平,等. CrN/MoS₂固体自润滑复合膜渗硫层相结构研究[J].装甲兵工程学院学报,2012,26(4):78—82.
YANG Zhen, DI Yue-lan, ZHANG Ping, et al. Study on Phase Structure in CrN/MoS₂ Solid Self-lubricant Composite Film Sulfurized Layer[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2012, 26(4): 78—82.
- [31] 董玉明.低温渗硫研究[J].机械工人,2006(2):49—51.
DONG Yu-ming. Research on Low Temperature Sulfurizing[J]. Machinist Metal Forming, 2006(2): 49—51.
- [32] 王海斗,徐滨士,刘家浚.微纳米硫系固体润滑[M].北京:科学出版社,2009:69—72.
WANG Hai-dou, XU Bin-shi, LIU Jia-jun. Micro and Nano Sulfide Solid Lubrication[M]. Beijing: Science Press, 2011, 11: 73—75.
- [33] GB/T 25898—2010,仪器化纳米压入试验方法-薄膜的压入硬度和弹性模量[S].北京:中国标准出版社,2011.
GB/T 25898—2010, Instrumented Nanoindentation Test-indentation Hardness and Modulus of Thin Film[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [34] WANG Hai-dou, ZHUANG Da-ming, WANG Kun-lin, et al. The Comparison on Tribological Properties of Ion Sulfuration Steels under Oil Lubrication[J]. Materials Letters, 2003, 57: 2225—2232.
- [35] 马世宁,胡春华,朱乃姝.氮碳共渗-渗硫复合层的摩擦学行为[J].中国工程机械学报,2007,5(1):105—108.
MA Shi-ning, HU Chun-hua, ZHU Nai-shu. Tribology Behaviors of Nitrocarburized-sulphurized Layer[J]. Chinese

- Journal of Construction Machinery, 2007, 5(1): 105—108.
- [36] 王海斗, 徐滨士, 刘家浚, 等. 基体状态对 FeS 层固体润滑性能的影响[J]. 润滑与密封, 2005(1): 34—36.
- WANG Hai-dou, XU Bin-shi, LIU Jia-jun, et al. Influence on the Solid Lubrication of Iron Sulfide Layer from Substrate State[J]. Lubrication Engineering, 2005(1): 34—36.
- [37] 张平, 曾庆强, 蔡志海. 激光淬火渗硫复合层的抗高温摩擦磨损性能[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(1): 72—75.
- ZHANG Ping, Zeng Qing-qiang, Cai Zhi-hai. High Temperature Tribological Properties of Laser Quenching and Ion Sulphidized Composite Layer[J]. Journal of Armored Force Engineering, 2010, 24(1): 72—75.
- [38] 杜明英, 向楠, 朱张校. 灰铸铁离子渗氮渗硫复合处理改性层的摩擦学性能[J]. 金属热处理, 2005, 30(5): 12—15.
- DU Ming-ying, XIANG Nan, ZHU Zhang-xiao, et al. Tribological Characteristics of the Surface Layer of Grey Cast Iron Modified by Ion Nitriding & Ion Sulfurizing[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(5): 12—15.
- [39] ZHANG Ning, ZHUANG Da-ming, LIU Jia-jun, et al. Effect of Sulphide Layers on the Tribological Behavior of Steels under Boundary Lubrication Conditions[J]. Applied Surface Science, 2001(181): 61—67.
- [40] WANG Hai-dou, XU Bin-shi, LIU Jia-jun, et al. Investigation on Friction and Wear Behaviors of FeS Films on L6 Steel Surface[J]. Applied Surface Science, 2005(252): 1084—1091.
- [41] 李新, 马世宁, 刘吉延. CrMoCu 合金铸铁离子渗硫层的摩擦学性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3): 156—158.
- LI Xin, MA Shi-ning, LIU Ji-yan. Study on Tribological Performance of Ion Sulphurized Layer on CrMoCu Alloy Cast Iron[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3): 156—158.
- [42] KANG Jia-jie, WANG Cheng-biao, WANG Hai-dou, et al. Characterization and Tribological Properties of Composite 3Cr13/FeS Layer[J]. Surface & Coatings Technology, 2009(203): 1927—1932.
- [43] 马世宁, 胡春华. 活性屏离子渗硫层的制备及形貌结构研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2007, 21(5): 81—83.
- MA Shi-ning, HU Chun-hua. Study on Morphologies, Structures and Preparations of Active Screen Ion Sulphurized Layers[J]. Journal of Armored Force Engineering, 2007, 21(5): 81—83.
- [44] 王海斗, 庄大明, 王昆林, 等. 低温离子渗硫层的干摩擦学性能对比研究[J]. 材料热处理学报, 2002, 23(4): 30—33.
- WANG Hai-dou, ZHUANG Da-ming, WANG Kun-lin, et al. A Comparative Study on Wear resistance of Ion Sulfide Layers of Different Steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2002, 23(4): 30—33.
- [45] 刘沅东, 王成彪, 岳文, 等. 磨损条件对轴承钢低温离子渗硫层摩擦学行为的影响[J]. 润滑与密封, 2007, 32(11): 108—117.
- LIU Yuan-dong, WANG Cheng-biao, YUE Wen, et al. Tribological Behavior of Low-temperature Ion Sulphurized Layer on GCr15 under Different Wear Conditions[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(11): 108—117.
- [46] 孟凡深, 侯林峰. 19CrNi5, 20CrMnMo 钢渗碳后硫化对摩擦磨损性能的影响[J]. 河南科技大学学报, 2004, 25(4): 6—9.
- MENG Fan-shen, HOU Lin-feng. Influence of 19CrNi5 and 20CrMnMo Sulfurized after Cementite on Anti-fretting Performance[J]. Henan University of Science and Technology, 2004, 25(4): 6—9.
- [47] 葛利玲, 路彩虹, 井晓天, 等. 40Cr 钢表面纳米化组织与性能的研究[J]. 表面技术, 2008, 37(2): 11—13.
- GE Li-ling, LU Cai-hong, JING Xiao-tian, et al. Study on Microstructure and Properties of 40Cr Steel Surface Nanocrystallization[J]. Surface Technology, 2008, 37(2): 11—13.
- [48] MA Guo-zheng, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al. Effects of Surface Nanocrystallization Pretreatment on Low-temperature Ion Sulfurization Behavior of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel[J]. Applied Surface Science, 2010(257): 1204—1210.
- [49] 乔玉林, 胡春华, 马世宁, 等. 活性屏离子渗硫工作气压对铝合金表面 FeS 固体润滑层的影响[J]. 材料保护, 2010, 43(10): 53—57.
- QIAO Yu-lin, HU Chun-hua, MA Shi-ning, et al. Effect of Working Air Pressure of Active Screen Ion Sulphurizing on FeS Solid Lubricating Layer of Luminum Alloy[J]. Journal of Materials Protection, 2010, 43(10): 53—57.
- [50] WANG Li-jie, XING Ya-zhe, WANG Hong-bo, et al. Effect of Nitriding-sulfurizing Composite Treatment on the Tribological Behavior of Titanium Alloys[J]. Rare Metals, 2010, 29(6): 604—607.
- [51] 欧信兵, 张津. 强烈塑性变形表面纳米化的研究现状[J]. 表面技术, 2008, 37(3): 60—64.
- OU Xin-bing, ZHANG Jin. Research Progress in Surface Nanocrystallization Induced by Severe Plastic Deformation[J]. Surface Technology, 2008, 37(3): 60—64.