

超声滚压轴承套圈表面强化的研究综述

巩立超¹, 潘永智¹, 刘彦杰¹, 董安峰², 杜连明¹, 付秀丽¹

(1. 济南大学 机械工程学院, 济南 250002; 2. 临清宇联轴承科技有限公司, 山东 聊城 252600)

摘要: 首先介绍了超声滚压的强化机理, 通过位错的湮灭与产生将晶粒细化至纳米级, 晶粒细化导致位错塞积、缠结, 使晶间滑移阻力变大, 增加材料变形抗力。进而综述了超声滚压工艺参数、表面完整性(表面形貌、残余应力及显微结构)对轴承套圈耐磨损性能与抗疲劳性能的影响规律。最后, 针对单一超声强化的不足, 指出了超声滚压复合强化技术的发展方向。声电耦合可增加表层材料塑性流动, 愈合微裂纹; 超声滚压细晶作用可增加晶界数量, 为离子提供了扩散通道, 增加了离子注入浓度与深度; 超声振动引起的空化效应和力学效应使熔覆层元素更均匀, 降低熔覆层孔隙率, 复合强化对超声滚压强化效果有明显的提升作用, 可进一步增强轴承套圈强化效果。

关键词: 超声滚压; 轴承套圈; 表面性能; 晶粒强化

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)08-0203-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.016

Surface Strengthening of Ultrasonic Rolling Bearing Rings

GONG Li-chao¹, PAN Yong-zhi¹, LIU Yan-jie¹, DONG An-feng², DU Lian-ming¹, FU Xiu-li¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250002, China;

2. Linqing Yulian Bearing Technology Co., Ltd., Shandong Liaocheng 252600, China)

ABSTRACT: Firstly, the paper introduces the strengthening mechanism of ultrasonic rolling: the grains are refined to nanometer level through the annihilation and generation of dislocations, and the grain refinement leads to dislocation stacking and entanglement, which increase the intergranular sliding resistance and the deformation resistance of materials; Furthermore, the paper summarizes the effects of ultrasonic rolling process parameters and surface integrity (surface morphology, residual stress and microstructure) on the wear resistance and fatigue resistance of bearing rings. Finally, in view of the shortcomings of single ultrasonic strengthening, the paper points out the development direction of the composite strengthening technology of ultrasonic rolling. Acoustic electric coupling can increase the plastic flow of surface material and heal micro cracks; The number of grain boundaries is increased by ultrasonic rolling, which provides diffusion channels for ions and increases the concentration and depth of ion implantation; The cavitation effect and mechanical effect caused by ultrasonic vibration make the elements of

收稿日期: 2021-07-03; 修订日期: 2021-09-27

Received: 2021-07-03; **Revised:** 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (5217052208); 山东省自然科学基金 (ZR202102280460); 济南市科研带头人工作室项目 (2019GXRC054); 山东省重大创新工程 (2019JZZY010451)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (5217052208); General Project of Shandong Natural Science Foundation (ZR202102280460); Jinan Scientific Research Leader Studio Project (2019GXRC054); Major Innovation Projects in Shandong Province (2019JZZY010451)

作者简介: 巩立超 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料表面强化。

Biography: GONG Li-chao (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: advanced equipment manufacturing technology.

通讯作者: 付秀丽 (1978—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为高效加工与表面精度控制。

Corresponding author: FU Xiu-li (1978-), Female, Doctor, Professor, Research focus: high efficiency machining and surface precision control.

引文格式: 巩立超, 潘永智, 刘彦杰, 等. 超声滚压轴承套圈表面强化的研究综述[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 203-213.

GONG Li-chao, PAN Yong-zhi, LIU Yan-jie, et al. Surface Strengthening of Ultrasonic Rolling Bearing Rings[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 203-213.

cladding layer more uniform and reduce the porosity of cladding layer. The composite strengthening can significantly improve the ultrasonic rolling strengthening effect, thereby further enhancing the strengthening effect of bearing rings.

KEY WORDS: ultrasonic surface rolling; bearing ring; surface property; grain strengthening

轴承作为主轴系统的重要组成部分,其使用寿命是整个系统低故障率的重要保障。风力发电机、航空发动机等受载情况复杂,工作条件恶劣,要求轴承能够适应更严苛的服役环境。轴承的主要失效形式有磨损、疲劳、断裂等^[1-2]。付洋洋等^[3]研究了风电变桨轴承外圈断裂的原因,发现风电变桨轴承在腐蚀环境中易产生点蚀坑,形成应力集中,从而在点蚀坑处萌生裂纹,淬硬层组织粗大,且深度不足,导致裂纹扩张,并诱发轴承套圈疲劳断裂^[4]。航空关节轴承作为一种球面滑动轴承,因表面质量及润滑不足引起的磨损失效是其主要失效形式^[5]。调心滚子轴承是一种常用的矿山机械轴承,长期超负荷运行与未及时维修是造成疲劳破坏的主要原因。朱孝录^[6]对外圈断裂进行了失效分析,认为动载荷产生的交变应力使疲劳断裂更容易发生。滚动轴承材料表面长期受交变接触压应力的作用,易产生块状剥落,使轴承接触疲劳磨损。同时,由于轴承套圈表面粗糙度过高及油膜破损加剧、周围温度升高,使润滑作用减弱^[7],磨损情况进一步加剧。

轴承套圈表面强化是减少轴承失效、延长轴承寿命的有效措施。传统轴承套圈强化一般选用热处理提高强度与硬度,消除内应力,最后磨削,保证轴承套圈的表面质量与尺寸精度^[8]。强化与光整分开进行,工序复杂,热处理过程中常出现尺寸变形、表层严重脱碳等质量问题,且磨削时产生的瞬时高温易造成工件表面磨削烧伤,产生残余拉应力,甚至出现微观裂纹^[9]。针对这一问题可以对轴承套圈强化方式进行改进,常见的表面强化方式有涂层、表面改性和机械强化。涂层可以有效提高轴承套圈的硬度及耐磨性,但与其与基体结合度不强,造成涂层易剥落^[10];表面改性有理想的强化效果,但高成本与难处理复杂形状零件限制了它在轴承套圈强化中的应用^[11];机械强化利用材料冷塑性的特点对轴承套圈进行强化^[12],传统机械强化方法(如喷丸、滚压)可以有效提高材料表面硬度、形成残余压应力层^[13]。但喷丸强化使工件表面粗糙度增大而增加磨损,需要后续光整加工,滚压强化产生的硬化层与基体有分层现象,表层易脱落,且滚压不适用于加工薄壁零件。

超声滚压强化作为一种新兴的表面强化技术,属于光整加工范畴。将静压力与超声冲击相结合,在材料表面形成塑性变形层^[14]。采用“削峰填谷”的方式降低表面粗糙度,在强化过程中,表层材料发生严重的塑性变形,并引入残余压应力,可抑制或延缓疲劳裂纹的萌生与扩展,提高材料的疲劳强度^[15]。高频冲击使材料表层晶粒梯度纳米化的同时,表面显微硬度

提高,且具有一定的硬度厚度,使材料减摩抗磨性得到提升^[16]。此外,超声滚压强化可以替代轴承套圈生产过程中的精磨,集强化与光整于一体,提高加工效率。目前针对超声滚压强化对轴承表面完整性的研究较多,但关于强化机理与性能之间的联系的研究较少。基于此,本文对超声滚压强化机理及其对轴承套圈耐磨损、抗疲劳性能的影响进行总结分析,并对今后的轴承套圈超声滚压的研究方向作出展望。

1 超声滚压强化机理

塑性金属材料有2种强化途径(如图1所示)^[17]:一种是消除位错、滑移等晶体缺陷,获得理想的单晶材料,如无晶体缺陷纯铁(晶须直径为1.6 μm)的理论强度($\sigma_b=13\ 400\text{ MPa}$)是实际工业纯铁($\sigma_b=300\text{ MPa}$)的40多倍,材料强化效果显著;另一种是通过提高位错密度及其滑移阻力来增加材料强度。由于单晶材料一旦出现位错,其强度会迅速降低,所以现在提高金属材料强度的主要措施是提高其位错密度。超声滚压强化机理主要有位错强化、细晶强化、应变强化^[18-19]。

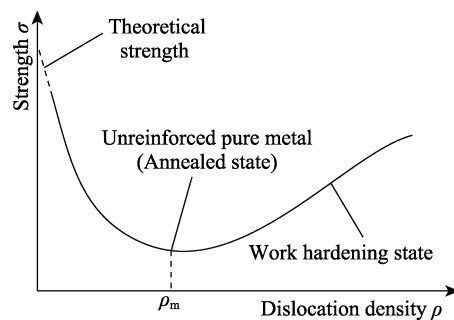


图1 材料强度与位错密度的关系^[17]

Fig.1 Relationship between material strength and dislocation density^[17]

1.1 位错强化

金属材料表层在超声滚压强化作用下易发生位错,且位错密度随位错萌生和增殖机制的激活而增加,导致位错间相互交截、缠结的情况增多,这使晶体滑移时的阻力显著提高,降低位错运动能力。根据位错强化机制,流变应力为滑移面内所有位错在单位时间内扫过一定面积时所需要的应力,其值等于滑移面上的位错滑移时所克服的阻力大小^[20]。位错对于金属材料的强化效果可用式(1)进行计算:

$$\sigma_{\text{dis}} = M\alpha Gb\rho^{1/2} \quad (1)$$

式中: σ_{dis} 为位错强化机制效果; M 为泰勒因子; α 为与材料有关的常数; G 为金属的剪切弹性模量; b 为博格斯矢量的模; ρ 为位错密度。

1.2 细晶强化

静压力和超声冲击联合作用于材料表面, 使之形成一个应力场, 如图 2 所示^[21]。材料表面在应力场的作用下发生塑性变形, 随着滚压头的不断移动, 应力场沿不同方向作用于同一塑性变形区域, 反复塑性变形使材料表层晶粒不断细化, 材料屈服强度 σ_s 与晶粒尺寸 d 的关系表示为^[22]:

$$\sigma_s = Kd^{-1/2} \quad (2)$$

式中: K 为与晶体有关的常数。由式 (2) 可知, 晶粒尺寸越小, 材料强度越高。

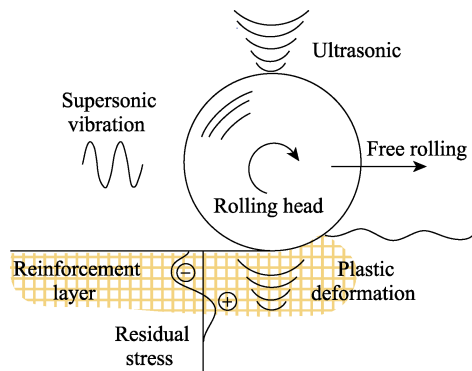


图 2 超声滚压原理^[21]

Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic rolling^[21]

随位错密度增大, 位错墙和位错缠结逐渐形成 (如图 3A₁ 和 B₁ 所示)。在连续冲击作用下, 位错墙和位错缠结变为小角度亚晶界 (如图 3A₂ 和 B₂ 所示), 这使得位错密度降低。由于位错不断湮灭和产生, 导致晶界两侧晶粒取向不同 (如图 3A₃ 和 B₃ 所示), 使晶界成为位错运动的阻碍。晶粒或亚晶在连续应力作用下不断碎化 (如图 3AA₁₂ 到 AA₄ 和 BB₁₂ 到 BB₄), 周而复始, 直到位错湮灭与产生达到平衡, 晶粒尺寸趋于稳定^[23], 从而在材料表面形成梯度纳米结构。晶粒细化使晶界处产生的位错塞积对晶间滑移的阻碍作用增强。

1.3 应变强化

超声滚压强化使金属表层发生塑性变形, 进而增大位错密度。位错之间存在相互作用, 使每一个位错发生运动时都受到其他位错的阻力, 且位错运动时发生相互交割, 并产生位错缠结等障碍, 阻碍位错的运动, 增加材料变形抗力, 因此强度得到提高。剧烈的塑性变形使材料内部晶粒拉长、晶格扭曲, 提高材料的抗变形能力, 材料表面拉应力变为残余压应力, 压应力使晶体内部空隙与缺陷减少^[24], 对于延缓疲劳裂纹的扩展有积极作用。超声滚压强化在不改变材料心

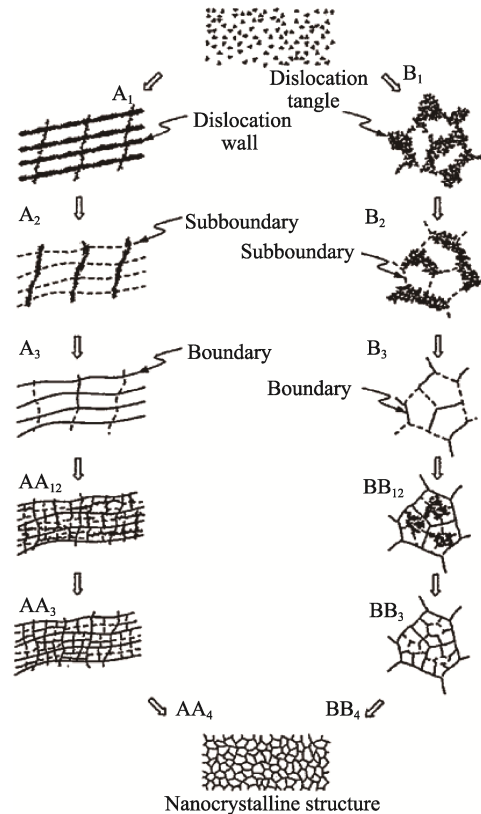


图 3 晶粒碎化过程^[23]

Fig.3 Illustration of grain refinement process^[23]

部组织的条件下, 增加其表面显微硬度, 使材料在具有良好塑性的同时, 具备较高的硬度, 提高材料的耐磨性^[25]。

2 超声滚压对轴承套圈性能的影响

将超声滚压加工应用于轴承套圈强化, 使轴承套圈发生塑性变形, 表层晶粒细化, 形成梯度纳米层。在微观组织细化和加工硬化共同作用下, 显著提高了轴承套圈的强度、表面显微硬度, 增强了轴承套圈的耐磨性能^[26]。超声滚压强化使材料表层由先前加工引起的拉应力变为残余压应力, 大大减缓了疲劳裂纹的扩展进程, 增加了轴承套圈的疲劳寿命。

2.1 耐磨损性能

磨损失效是指两材料表面不断摩擦, 使表层金属过度磨损而低于使用要求的失效 (如图 4 所示)^[27]。持续磨损不仅会导致轴承尺寸精度出现偏差, 而且影响轴承套圈形状变化, 使配合间隙增大及恶化工件表面形貌, 出现润滑不及时, 甚至不能润滑的情况, 严重影响轴承旋转精度和使用寿命。Zhou 等^[28]对 GCr15 耐磨性达到最大时的晶粒尺寸进行了研究, 发现纳米结构试样的硬度和塑性随晶粒尺寸的变化而单调变化, 最大的耐磨性是塑性与硬度共同作用的结果, 如修正的经验 Archard 方程所描述:

$$W = K \frac{P}{H} \quad (3)$$

式中： W 为施加压力 P 下的磨损率； H 为材料的硬度； K 为与材料延性有关的常数。

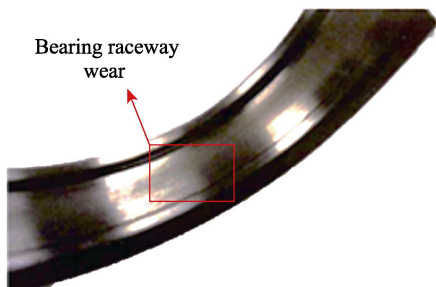


图 4 滚动轴承滚道磨损^[27]

Fig.4 Diagram of raceway wear of rolling bearing^[27]

2.1.1 工艺参数对耐磨性影响

超声滚压强化可以通过调控工艺参数达到理想的强化效果，各工艺参数对套圈表面完整性的影响见表 1，通过调节超声滚压强化工艺参数对强化后轴承套圈的耐磨性进行了研究。王晓强等^[29]对 42CrMo 轴承钢进行超声滚压，研究了工艺参数对材料表面硬化程度的影响，发现硬化层深度与表面显微硬度明显呈正相关性。硬化层深度小于 100 μm 时，加工时间越长，硬度越高。这种变化可能是由于位错缠结造成的，位错密度随加工时间的增加而变大，高密度位错使位

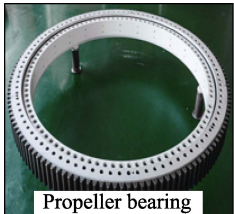


错缠结更容易形成^[30]。崔凤奎等^[31]研究了工艺参数对轴承套圈粗糙度的影响，结果表明，超声冲击对粗糙度影响明显，施加适当的振幅可以抹平车削遗留的刀痕，但振幅过大会使其表面瞬间产生严重的塑性变形，从而破坏试样的晶体结构，进而增加试样表面粗糙度，严重降低表面质量。Lee 等^[32]对 GCr15 进行了超声强化处理，材料表面硬度由 730HV 增加到 880HV，有效硬化层深度为 1.3 mm，材料耐磨损性能提升明显，这是材料表面晶粒细化所致。

2.1.2 表面形貌对耐磨性影响

粗糙表面易加剧磨损，但并非摩擦副表面形貌越光滑，耐磨性越好，织构的引入可以显著改善摩擦磨损性能。304 不锈钢常用于航空关节轴承，其表面磨损往往发生在远离润滑槽的区域。加载在轴承上的载荷使材料表面产生微凸起，在不断摩擦和挤压的过程中变成碎屑，使衬套表面磨损加剧^[38]。秦悦^[36]用超声滚压在 304 不锈钢表面制备织构，发现表面织构能显著改善超声滚压强化效果，使 304 不锈钢的耐磨性能提高 55%以上。不同处理对磨损量的影响如图 5 所示，原始试样、超声滚压强化试样、超声滚压与方形织构协同强化试样的球缺半径分别为 356、243、191 μm 。由图 5 可以看出，超声滚压协同织构强化试样的磨损量仅为原始试样的 1/15，表面织构可以在超声滚压强化的基础上进一步提高材料摩擦磨损性能。润滑情况对轴承套圈的磨损速率也有重要影响。

表 1 各工艺参数对不同轴承套圈材料影响

Tab.1 Influence of various process parameters on different bearing ring materials

Bearing ring material and application scenario	Failure form	Surface integrity	Influential regularity of each parameter
42CrMo ^[3,21,29,33]  Propeller bearing	Fatigue flaking and ring fracture	Surface roughness	It decreases with increasing amplitude and static pressure, and increases with severe plastic deformation subsequently
		Hardness	It increases with the increase of amplitude and static pressure and decreases with the increase of feed speed
		Residual stress	There is coupling enhancement between static pressure and amplitude, and the interaction between speed and feed speed affects impact density
GCr15 ^[6,34-35]  Mine machinery bearing	Fatigue wear	Surface roughness	Flutter is prone to occur at higher speed, while optimum surface roughness can be obtained at lower feed speed and moderate static pressure
		Hardness	Rotation speed has little influence on hardness, and static pressure and amplitude are not positively related to hardness
		Residual stress	It increases with static pressure and amplitude. Moreover it decreases with speed and feed speed
304 stainless steel ^[5,36-37]  Aviation joint bearing	Wear failure	Surface roughness	In inverse proportion to rolling pressure, it decreases first and then increases with increasing speed. And it decreases significantly with increasing rolling times appropriately
		Hardness	It is proportional to static pressure and rolling times, and increases first and then decreases with increasing speed
		Residual stress	Depth and size of the affected layer are proportional to rolling pressure and number of rolls

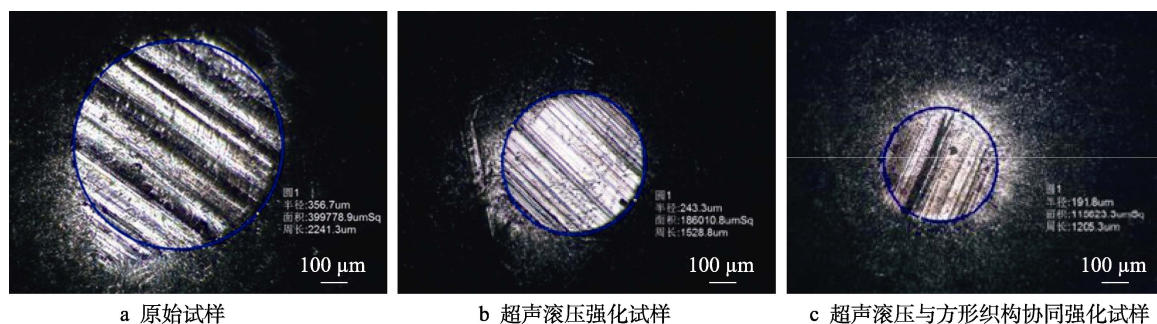
图 5 不同处理对磨损量的影响^[36]

Fig.5 Influence of different treatments on wear^[36]: a) the original sample; b) the specimen was strengthened by ultrasonic rolling; c) the specimen was strengthened by ultrasonic rolling and square texture

Amanov 等^[39]认为, 表面粗糙度较小或载荷较大时, 织构降低摩擦系数的效果最明显, 织构存储的润滑剂在混合润滑状态下形成动压润滑, 改善润滑状态, 不受限于润滑槽润滑, 织构还可以收集磨屑, 防止磨屑在摩擦副表面划伤, 提高轴承的摩擦磨损性能。

2.2 抗疲劳性能

接触疲劳失效是轴承的主要失效形式之一, 且其在破坏前没有明显的宏观变化, 因此比在静力下的破坏更具有危险性。深层剥落是接触疲劳失效的疲劳源, 其发生在轴承工作表面, 往往伴随着疲劳裂纹^[40], 如图 6 所示。由于裂纹的萌生与扩展占到了疲劳寿命的很大部分, 因此抑制裂纹萌生, 缓解裂纹扩展, 是提升轴承套圈抗疲劳性能的有效方法。

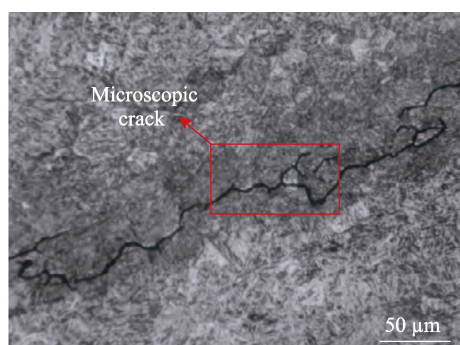


图 6 变桨轴承内圈显微裂纹^[40]
Fig.6 Variable propeller bearing inner ring microcrack^[40]

2.2.1 粗糙度对抗疲劳性能的影响

在循环载荷的作用下, 表面摩擦系数的增加会加速裂纹向材料表面扩展^[41], 对疲劳寿命产生影响。摩擦副中过大的粗糙峰不仅会刺破油膜, 与另一表面直接接触, 产生温升, 加剧磨损, 而且由于粗糙峰间润滑剂较少, 导致流体动压效应不够, 使接触应力增加, 磨损速率增加, 降低疲劳寿命。超声滚压强化利用金属冷塑性的特点, 将波峰压入波谷, 减少粗糙峰的数量, 降低轴承套圈的表面粗糙度, 减少粗糙峰的相互作用, 抑制微点蚀萌生, 减少宏观点蚀和表面剥落,

增加轴承疲劳寿命^[42]。304 不锈钢经强化后粗糙度由 $0.87 \mu\text{m}$ 降至 $0.19 \mu\text{m}$, 粗糙度等级提升 3 级, 由升降法测得其疲劳极限提高 19%, 疲劳性能得到增强^[37]。

2.2.2 残余应力对抗疲劳性能的影响

Åman 等^[43]对轴承钢进行疲劳试验时发现, 所有情况下, 在疲劳极限时均未观察到非扩展裂纹, 认为裂纹萌生极限即是疲劳极限, 超声滚压通过在材料表面预压应力有效抑制裂纹的萌生。最大残余压应力一般出现在材料次表层处^[44], 是因为材料表层处发生最大程度塑性变形, 塑性变形使残余应力得到释放, 从而降低了材料表面残余压应力值。Liu 等^[45]认为, 超声滚压强化后, 塑性变形和弹性变形之间的相互约束和平衡使应变进入晶粒, 随着塑性变形的增加, 更多的应变储存在晶体结构中, 从而造成更大、更深的残余压应力。鲁连涛等^[46]发现, 滚压后的裂纹萌生起点由材料表层转移到内部硬化层和残余压应力消失的地方, 表明残余压应力通过中和外加应力有效抑制了裂纹的萌生, 提高了材料的疲劳强度。

Luan 等^[47]研究了残余应力的热松弛, 在 200、300、400、500 °C 下对采用不同强化方式的工件进行退火, 并通过试验测定了残余应力和残余应力释放率, 如图 7 所示。结果表明, 高温对超声滚压过程中残余压应力的生成有促进作用, 而残余压应力的释放与工件表面状态有关, 经强化后, 残余应力释放速率明显降低。超声滚压强化的工件表面具有残余压应力高、释放速率低的优点, 使裂纹扩展速度维持在较低水平, 延长轴承在润滑不充分、干摩擦状态下的服役寿命。

2.2.3 微观结构对抗疲劳性能的影响

对 GCr15 进行超声滚压强化^[35], 材料表层在高频冲击下发生塑性变形, 伴随晶粒细化并产生位错滑移, 随下压量增加, 塑性变形量增大, 晶粒进一步细化, 使渗碳体呈颗粒状且分布均匀。根据 Navarro-Rios 模型^[48], 疲劳裂纹扩展速率与晶粒尺寸成正比, 晶粒尺寸越小, 裂纹扩张阻力越大, 裂纹扩展速率降低。同时, 由于晶界数量增多, 疲劳裂纹扩展时发生偏折行为, 在偏折点附近, 裂纹扩展速率明显降低^[49], 材料的抗疲劳性能增强。Zhang 等^[50]对次表面疲劳损伤

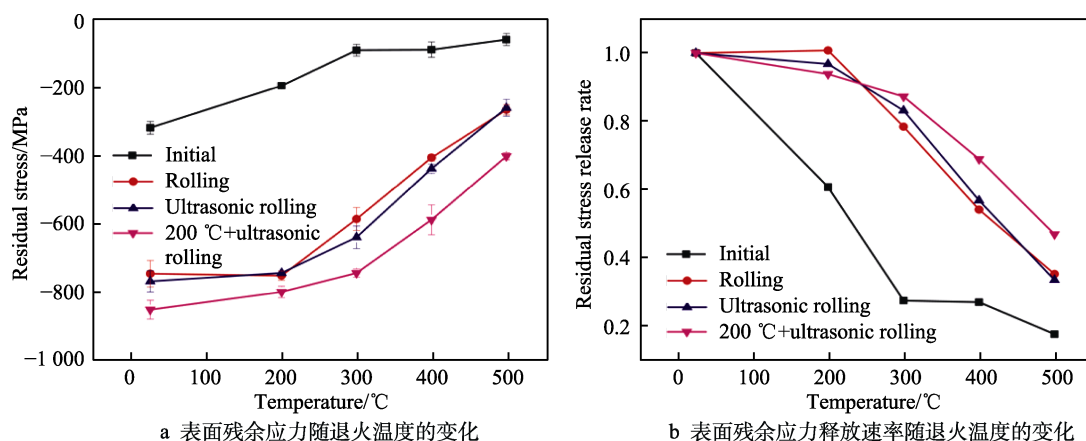
图7 表面残余应力的变化^[47]

Fig.7 The change of surface residual stress^[47]: a) the change of surface residual stress with the increase of annealing temperature; b) the release rate of surface residual stress changes with the increase of annealing temperature

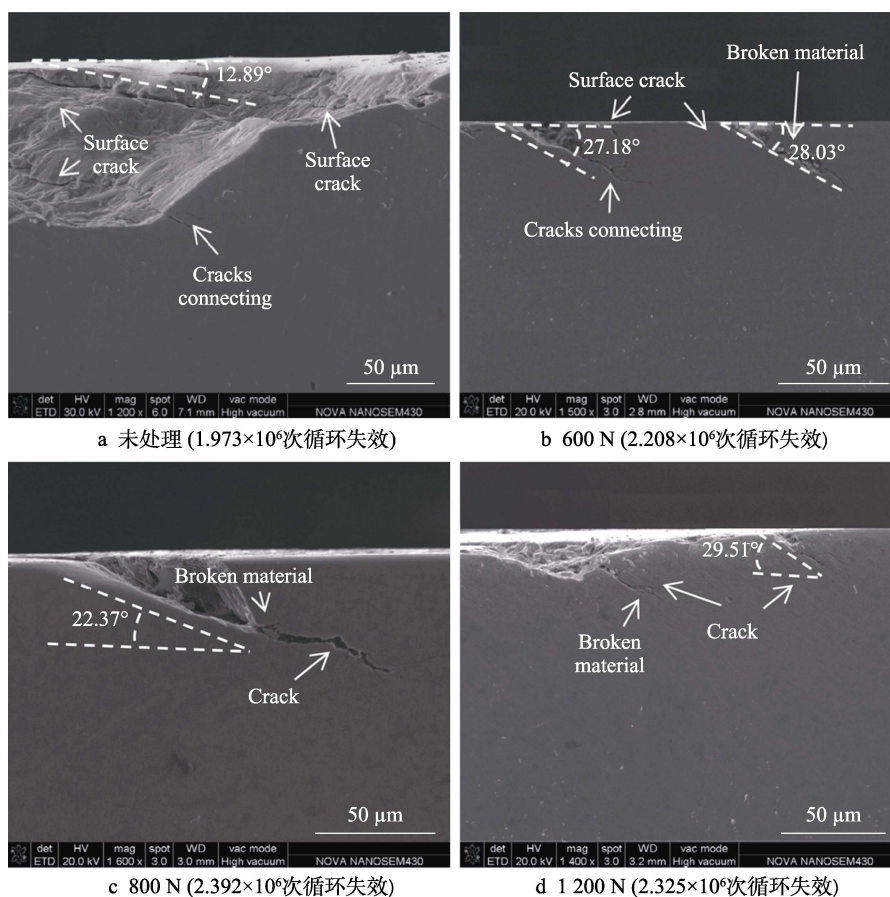
图8 次表面疲劳损伤截面^[50]

Fig.8 Typical graphs of the cross-sectional subsurface damage^[50]: a) untreated and 1.973×10^6 cycles to failure; b) 600 N and 2.208×10^6 cycles to failure; c) 800 N and 2.392×10^6 cycles to failure; d) 1200 N and 2.325×10^6 cycles to failure

进行了研究,如图8所示。超声滚压使裂纹角明显变大,有效减缓了次表面裂纹相互连接的速度,延长了表面材料剥落时间,增加了材料的疲劳寿命。

3 超声滚压复合强化

超声滚压复合强化可以明显提升超声滚压强化

效果,使材料表面易于发生塑性变形,有利于愈合表层微裂纹,增加硬化层深度及残余压应力影响层深,使摩擦磨损性能和疲劳性能明显提高。

3.1 声电耦合

超声滚压强化使工件表层发生严重塑性变形,从而降低表面粗糙度,同时位错密度增加使工件表面加

工硬化, 但高硬度的加工硬化层使表层塑性流动急剧变差, 导致微裂纹无法愈合。声电耦合加工对位错运动有促进作用^[51], 能量的输入增强了位错越过势垒的能力, 使位错数目增加, 进而提高金属表层的塑性变形能力。适当增加电脉冲可以增加工件表层塑性流动, 使微裂纹在超声滚压作用下加速愈合。304 不锈钢经超声滚压后, 表面质量明显提升, 但仍在表面上留有很多微观裂纹, 如图 9 所示^[52]。在超声滚压强化时, 对工件施加脉冲电流, 微观裂纹长度及数量明显减少, 且电流密度越大, 引起的电致塑性效应越强, 工件表面材料塑性流动能力提高, 使微观裂纹在超声滚压加工中更易愈合, 改善工件表面质量, 使轴承套圈疲劳性能增强。

3.2 超声滚压复合离子注入强化

将高能离子注入到材料表面, 在不改变材料本身组织结构的情况下, 提高材料的耐磨性、耐蚀性, 且强化层与基体结合良好, 但注入层深度较浅, 限制了离子注入的应用^[53]。超声滚压强化使金属表面纳米化, 晶界数量增多, 高晶界和位错密度为原子提供了许多扩散通道和扩散空间, 使原子可以快速地由初始位置转移到其他位置, 这有利于原子的扩散^[54]。同时, 塑性变形产生非平衡缺陷, 使材料表面活性增加, 增强对离子的吸附作用。超声滚压与离子注入协同强

化, 使化学元素注入浓度和深度均有所增加, 注入元素分布更加均匀。Zhao 等^[55]将 WC 注入到超声滚压后的 316 不锈钢表面, 结果表明, 超声滚压使离子扩散通道明显增加, 大量小 WC 颗粒起到弥散强化作用。复合强化后, 表面硬度由离子注入时的 313HV 提高到 494HV, 注入深度提高 100%, WC 膜与基体结合增强, 提高了腐蚀电位, 有效提高了空化腐蚀耐蚀性。此外, Nb 离子注入后, 在材料表层形成的氮氧化物有润滑效果^[56], 可降低摩擦系数, 提高轴承套圈耐磨性。

3.3 超声滚压复合激光熔覆强化

激光熔覆具有冷却速度快、温度高的特点, 可以用于修复轴承套圈点蚀、疲劳剥落等损伤, 但由于其快速的熔化和固化过程, 熔池内存在急剧的温度梯度, 使元素偏析和结构不均匀, 并形成粗大柱状晶, 易于裂纹扩展, 降低强度和疲劳性能^[57]。将激光熔覆与超声冲击结合, 对激光熔覆后的熔覆层进行超声滚压同步处理 (如图 10 所示^[58]), 超声振动引起的超声空化和力学效应可使涂层中元素充分搅拌和扩散, 避免产生应力集中, 降低熔覆层孔隙率^[59], 使熔覆层硬度和弹性模量增加, 产生具有良好性能的熔覆层, 并增强熔覆层与基体的结合力, 提高涂层的耐久性^[60]。超声振动引起的枝晶断裂可以有效消除柱状枝晶组

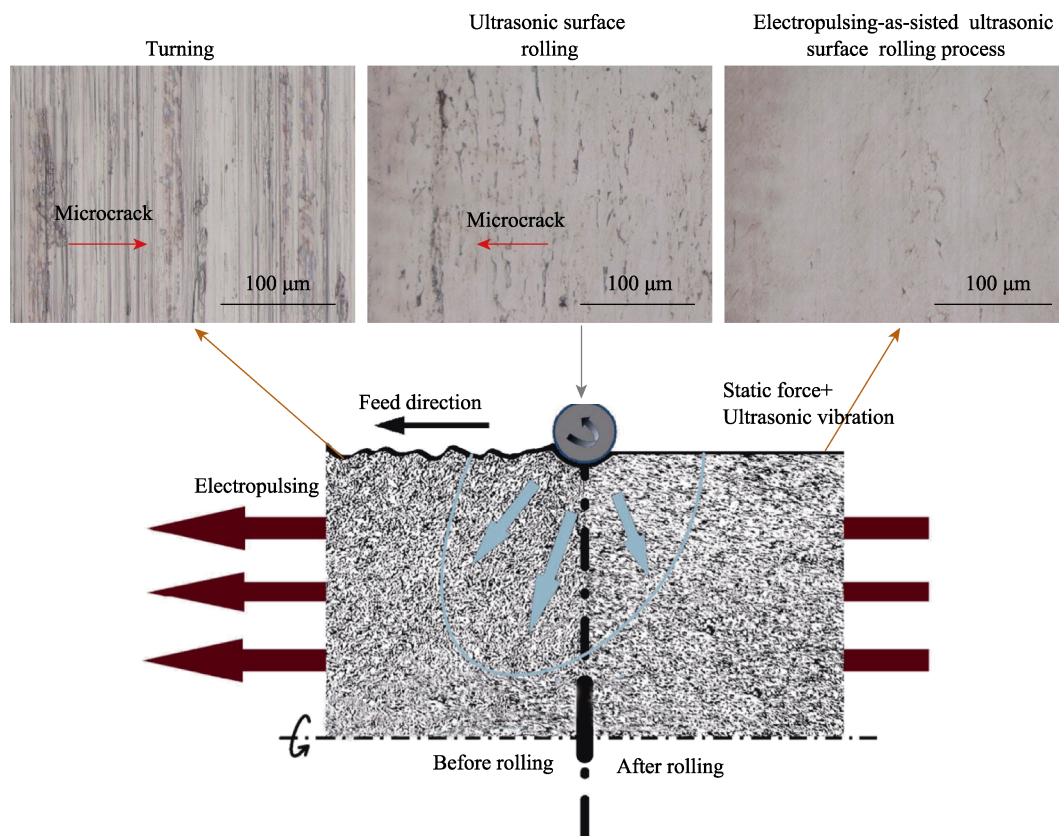


图 9 声电耦合加工对 304 不锈钢表面微观形貌的影响^[52]

Fig.9 Effect of surface micro-morphology on 304 stainless steel machined by acoustic-electrical coupling^[52]

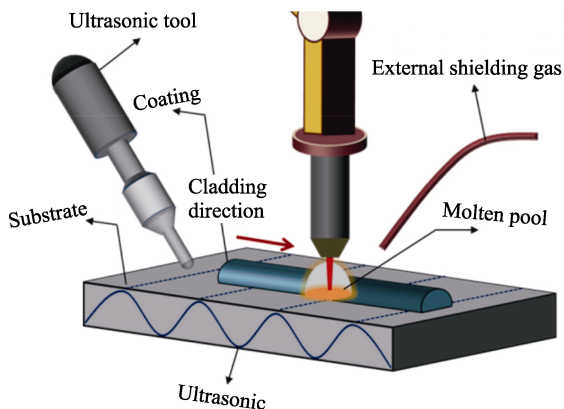


图 10 超声辅助激光熔覆^[58]
Fig.10 The subsequent laser cladding with ultrasonic assisted^[58]

织,增强形核,细化沉积层晶粒,改善沉积层晶粒组织的均匀性,扩展了沉积层等轴枝晶区域^[61]。李德英等^[62]对超声辅助激光熔覆 SiC/316L 复合涂层的残余应力进行了研究,发现合理控制超声振幅,可以缓和复合涂层的残余应力,并细化涂层组织,使 SiC 颗粒均匀分布。将超声滚压辅助激光熔覆不仅可以修复轴承套圈,还可对其进行表面改性,提高轴承套圈的耐磨性。

4 结语

本文以轴承套圈为主要研究对象,对超声滚压强化机理进行了归纳,总结了工艺参数对表面完整性的影响。基于超声滚压强化机理及对轴承套圈表层物理性质的改变,分析了超声滚压强化提高摩擦磨损及疲劳性能的原因,并总结了超声滚压复合强化在提高表面质量方面的机理及优势。

1) 超声滚压主要通过提高位错密度达到强化效果,强化机理主要有基于位错理论的位错强化、细化晶粒阻碍位错运动提高屈服强度的细晶强化,以及通过塑性变形产生加工硬化的应力强化。

2) 选择最佳的超声滚压强化工艺参数可使材料表层晶粒梯度纳米化,提高轴承套圈的显微硬度,降低表面粗糙度,以及将表层拉应力变为残余压应力,抑制裂纹萌生与扩展,提高轴承套圈的耐磨性与疲劳性能,但对耐磨损及抗疲劳机理还需进一步研究。

3) 表层织构不仅增强超声滚压强化效果,还可储存润滑油,改善其润滑条件,有效提高滑动轴承的耐磨性能,但对织构形貌和排列方式的选择及不同润滑条件下的作用机理还有待研究。

4) 复合强化对超声滚压强化效果有明显提升,是当下强化研究的热点,可用于轴承套圈表面强化与修复,加快超声滚压复合离子注入、激光熔覆、电脉冲等超声滚压复合强化工艺的发展,但对复合强化组合、最优工艺参数及强化理论研究还需进一步完善。

参考文献:

- [1] 朱金华, 刘建辉, 杨向军. 航空滚动轴承失效原因及预防的研究[J]. 设备管理与维修, 2020(13): 67-68.
ZHU Jin-hua, LIU Jian-hui, YANG Xiang-jun. Research on the Failure Causes and Prevention of Aeronautical Rolling Bearing[J]. plant Maintenance Engineering, 2020(13): 67-68.
- [2] WANG Cheng-biao, YU Xiang, WENG Li-jun, et al. Investigation of Failure Mechanism and Modification for Film-Lubricated Precise Angular-Contact Ball Bearing[J]. Vacuum, 2005, 77(2): 187-193.
- [3] 付洋洋, 王荣. 风力发电机组用变桨轴承外圈断裂的原因[J]. 机械工程材料, 2019, 43(4): 83-86.
FU Yang-yang, WANG Rong. Reason for Fracture of Pitch Bearing Outer Ring in Wind Turbine Generator[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(4): 83-86.
- [4] 郭浩, 雷建中, 扈林庄. 滚动轴承接触疲劳失效的影响因素及其研究现状[J]. 失效分析与预防, 2019, 14(3): 206-211.
GUO Hao, LEI Jian-zhong, HU Lin-zhuang. Influencing Factors of Contact Fatigue Failure of Rolling Bearings and Their Research Status[J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 14(3): 206-211.
- [5] SHEN Xue-jin, LIU Yun-fei, CAO Lei, et al. Numerical Simulation of Sliding Wear for Self-Lubricating Spherical Plain Bearings[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 1(1): 8-12.
- [6] 朱孝录. “浮动轴承”外圈断裂失效分析[J]. 机械传动, 2020, 44(12): 125-131.
ZHU Xiao-lu. Failure Analysis of Outer Ring Fracture of Floating Bearing[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(12): 125-131.
- [7] 陈晓梅, 王会强, 翟一潼, 等. GCr₁₅SiMn 滚动轴承钢的磨损失效分析[J]. 热加工工艺, 2021, 50(16): 159-162.
CHEN Xiao-mei, WANG Hui-qiang, ZHAI Yi-tong, et al. Analysis on Wear Failure of GCr₁₅SiMn Rolling Bearing Steel[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(16): 159-162.
- [8] 董凤奎, 刘年富, 廖卓文, 等. 热处理工艺对 GCr15 轴承钢淬火裂纹的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2020, 48(6): 46-50.
DONG Feng-kui, LIU Nian-fu, LIAO Zhuo-wen, et al. Effects of Heat Treatment Processes on Quenching Cracks of GCr15 Bearing Steel[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2020, 48(6): 46-50.
- [9] 邹龙江, 周全, 高路斯. GCr15 钢轴承外套圈磨削开裂失效分析[J]. 金属热处理, 2013, 38(9): 99-100.
ZOU Long-jiang, ZHOU Quan, GAO Lu-si. Failure Analysis on Grinding Cracking of GCr15 Steel Bearing Outer Ring[J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(9): 99-100.
- [10] 黄雄荣. 采用金属陶瓷涂层的自润滑关节轴承性能分析[J]. 轴承, 2018(7): 48-52.
HUANG Xiong-rong. Analysis on Performances of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings with Cermet Coa-

- tings[J]. Bearing, 2018(7): 48-52.
- [11] WANG Fei, ZHONG Li-jing, TANG Xia-hui, et al. A Homogeneous Focusing System for Diode Lasers and Its Applications in Metal Surface Modification[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 102: 197-206.
- [12] KHAJEIAN A, MAHMOUDI A H, MEHMANPARAST A. Shot Peening Effects on Residual Stresses Redistribution of Offshore Wind Monopile Multi-Pass Weldments[J]. Marine Structures, 2019, 66: 106-120.
- [13] QIAN L, ZHAN L, ZHOU B, et al. Effects of Electroplastic Rolling on Mechanical Properties and Microstructure of Low-Carbon Martensitic Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 812: 141144.
- [14] 赵波, 姜燕, 别文博. 超声滚压技术在表面强化中的研究与应用进展[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 023685.
ZHAO Bo, JIANG Yan, BIE Wen-bo. Ultrasonic Rolling Technology in Surface strengthening: Progress in Research and Applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 023685.
- [15] 张飞, 赵运才. 超声表面滚压改善 45# 钢表层特性及疲劳性能的研究[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 185-190.
ZHANG Fei, ZHAO Yun-cai. Research on Surface Characteristics and Fatigue Properties of 45# Steel by Ultrasonic Surface Rolling[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 185-190.
- [16] 张飞, 赵运才. 超声表面滚压处理对 45 钢摩擦学性能的影响及机理[J]. 机械工程材料, 2017, 41(8): 44-48.
ZHANG Fei, ZHAO Yun-cai. Influence of Ultrasonic Surface Rolling Processing on Tribological Performance of 45 Steel and Its Mechanism[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(8): 44-48.
- [17] 姚素兰. 金属材料强化机理的探讨[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1992, 13(2): 52-56.
YAO Su-lan. The Probe into Strengthening Mechanism of Metal Material[J]. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture and Animal Husbandry, 1992, 13(2): 52-56.
- [18] 韩爽, 段海涛, 杨学军, 等. 超声加工对球墨铸铁表面粗糙度的影响及其机理[J]. 机械工程材料, 2018, 42(5): 63-68.
HAN Shuang, DUAN Hai-tao, YANG Xue-jun, et al. Effect of Ultrasonic Machining on Surface Roughness of Ductile Cast Iron and Its Mechanism[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(5): 63-68.
- [19] 包卫平, 任学平, 马祖南. 多晶体材料的晶界强化模型研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 97-100.
BAO Wei-ping, REN Xue-ping, MA Zu-nan. Study on the Grain-Boundary Strengthening Model of Polycrystalline Materials[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 97-100.
- [20] 刘战强, 贺蒙, 赵建. 机械加工强化机理与工艺技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2015, 26(3): 403-413.
LIU Zhan-qiang, HE Meng, ZHAO Jian. Mechanical Machining Strengthening Mechanism and Material Processing Technology—A Review[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(3): 403-413.
- [21] 朱有利, 李礼, 王侃, 等. 一种超声深滚与滚光一体化抗疲劳制造技术[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 183-186.
ZHU You-li, LI Li, WANG Kan, et al. An Integrated Ultrasonic Deep Rolling and Burnishing Technology for Anti-Fatigue Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 183-186.
- [22] 范晓嫚, 徐流杰. 金属材料强化机理与模型综述[J]. 铸造技术, 2017, 38(12): 2796-2798.
FAN Xiao-man, XU Liu-jie. Review on Strengthening Mechanisms and Models of Metal Materials[J]. Foundry Technology, 2017, 38(12): 2796-2798.
- [23] 孙振铜. 表面纳米化渗氮对低合金钢耐 CO₂ 腐蚀性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2011.
SUN Zhen-tong. Study on CO₂ Corrosion Resistance of Low Alloy Steel after Surface Nanocrystallization Nitriding[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.
- [24] 楚广, 唐永建, 刘伟, 等. 纳米金属固体材料硬度及强度研究进展[J]. 湖南有色金属, 2005, 21(6): 21-24.
CHU Guang, TANG Yong-jian, LIU Wei, et al. Research Progress in Microhardness and Strength of Metal Nanocrystalline Materials[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2005, 21(6): 21-24.
- [25] 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 Nano-Crystallization of Metallic Materials[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(4): 15-18.
- [26] WANG Ya-ping, LI Yang, SUN Kang-ning. Effect of Process Duration on the Microstructures of Fast Multiple Rotation Rolling-Induced Nanocrystalline Layer and Its Wear Properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 159-166.
- [27] 李晓阳. 动车组牵引电机轴承游隙对载荷的影响及轴承寿命分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LI Xiao-yang. Influence of Clearance on Bearing Load and Analysis of Bearing Life of CRH Traction Motor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [28] ZHOU L, LIU G, HAN Z, et al. Grain Size Effect on Wear Resistance of a Nanostructured AISI52100 Steel[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(6): 445-448.
- [29] 王晓强, 刘东亚, 阮孝林, 等. 42CrMo 轴承钢超声滚挤压表面加工硬化程度研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(12): 1923-1929.
WANG Xiao-qiang, LIU Dong-ya, RUAN Xiao-lin, et al. Study on Work Hardening Degree in Ultrasonic Rolling Extrusion of 42CrMo Bearing Steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(12): 1923-1929.
- [30] BERTSCH K M, DE BELLEFON G M, KUEHL B, et al. Origin of Dislocation Structures in an Additively Manufactured Austenitic Stainless Steel 316L[J]. Acta Materialia, 2020, 199: 19-33.

- [31] 崔凤奎, 苏涌翔, 荣莎莎, 等. 超声滚挤压轴承套圈表面粗糙度数学模型对比分析[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(5): 199-204.
CUI Feng-kui, SU Yong-xiang, RONG Sha-sha, et al. Comparative Analysis of Mathematical Model for Surface Roughness of Ultrasonic Rolling Extrusion Bearing Rings[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(5): 199-204.
- [32] LEE C S, PARK I G, PYOUN Y S, et al. Rolling Contact Fatigue Characteristics of SAE52100 by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology[J]. International journal of Modern Physics B, 2010, 24(15): 3065-3070.
- [33] 徐红玉, 刘立波, 崔凤奎. 风电轴承套圈超声滚压强化残余应力形成规律分析[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(5): 125-132.
XU Hong-yu, LIU Li-bo, CUI Feng-kui. Analysis of Residual Stress Formation in Ultrasonic Rolling Strengthening of Wind Power Bearing Rings[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(5): 125-132.
- [34] 兰叶深, 郭骞惠, 徐文俊, 等. 基于超声滚压加工的轴承内圈表层残余应力研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(10): 28-30.
LAN Ye-shen, GUO Qian-hui, XU Wen-jun, et al. Study on Surface Residual Stress of Bearing Inner Ring Based on Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(10): 28-30.
- [35] 刘森忠. 超声滚压对 GCr15 材料的表面性能影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
LIU Sen-zhong. Effect on the Surface Properties of GCr15 by Ultrasonic Rolling[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [36] 秦悦. 超声滚压与表面织构协同加工航空关节轴承工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
QIN Yue. The Research on Synergistic Effects of Ultrasonic Surface Rolling Process and Surface Texture for Aviation Spherical Plain Bearing[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [37] 张飞, 上官绪超. 表面超声滚压处理对 AISI304 不锈钢疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 136-140.
ZHANG Fei, SHANGGUAN Xu-chao. Effect of Surface Ultrasonic Rolling Processing on Fatigue Properties of AISI304 Austenite Stainless Steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(16): 136-140.
- [38] YUAN Ze-wei, QIN Yue, DENG Chun-li, et al. Synergistic Effects of Surface Strengthening and Surface Micro-Texture on Aviation Spherical Plain Bearing Tribological Properties[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2018, 232(7): 797-808.
- [39] AMANOV A, CHO I S, PYOUN Y S, et al. Micro-Dimpled Surface by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification and Its Tribological Effects[J]. Wear, 2012, 286-287: 136-144.
- [40] 张新国, 姚兵印, 卢正欣. 1.5 MW 风力发电机组变桨轴承开裂失效分析[J]. 金属加工(热加工), 2019(10): 56-61.
ZHANG Xin-guo, YAO Bing-yin, LU Zheng-xin. Failure Analysis on the Cracking of the Pitch Bearing of 1.5 MW Wind Turbine[J]. MW Metal Forming, 2019(10): 56-61.
- [41] GUAN Jian, WANG Li-qin, ZHANG Zhi-qiang, et al. Fatigue Crack Nucleation and Propagation at Clustered Metallic Carbides in M50 Bearing Steel[J]. Tribology International, 2018, 119: 165-174.
- [42] QIN Hai-feng, REN Zhen-cheng, ZHAO Jing-yi, et al. Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on the Wear and Micropitting Behavior of Bearing Steel in Boundary Lubricated Steel-Steel Contacts[J]. Wear, 2017, 392-393: 29-38.
- [43] ÅMAN M, WADA K, MATSUNAGA H, et al. The Influence of Interacting Small Defects on the Fatigue Limits of a Pure Iron and a Bearing Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 135: 105560.
- [44] 李凤琴, 赵波. 超声加工滚压力对钛合金表层特性的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 34-40.
LI Feng-qin, ZHAO Bo. Effect of Ultrasonic Processing Burnishing Pressure on Titanium Alloy Surface Properties[J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 34-40.
- [45] LIU Dan, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua, et al. Plain Fatigue and Fretting Fatigue Behaviors of 17-4PH Steel Subjected to Ultrasonic Surface Rolling Process: A Comparative Study[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 399: 126196.
- [46] 鲁连涛, 盐泽和章, 姜燕. 深层滚压加工对高碳铬轴承钢超长寿命疲劳行为的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(5): 515-520.
LU Lian-tao, YAN Ze-he-zhang, JIANG Yan. Influence of Deeply Rolling Process on ultra-Long Life Fatigue Behavior of High carbon-Chromium Bearing Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(5): 515-520.
- [47] LUAN Xiao-sheng, ZHAO Wen-xiang, LIANG Zhi-qiang, et al. Experimental Study on Surface Integrity of Ultra-High-Strength Steel by Ultrasonic Hot Rolling Surface Strengthening[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 392: 125745.
- [48] YANG Xin-jun, ZHOU Jian-xin, LING Xiang. Influences of Surface Grain Size and Gradient Variation along Depth on Fatigue Life of Metallic Materials[J]. Materials & Design, 2013, 43: 454-459.
- [49] 蔡振, 张显程, 涂善东. 超声表面滚压加工对 Ti-6Al-4V 合金显微组织及表面完整性的影响[J]. 机械工程材料, 2018, 42(1): 7-10.
CAI Zhen, ZHANG Xian-cheng, TU Shan-dong. Effects of Ultrasonic Surface Rolling Process on Microstructure and Surface Integrity of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(1): 7-10.
- [50] ZHANG Ya-long, LAI Fu-qiang, QU Sheng-guan, et al. Effect of Ultrasonic Surface Rolling on Microstructure

- and Rolling Contact Fatigue Behavior of 17Cr₂Ni₂MoVNb Steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 366: 321-330.
- [51] 张硕, 徐梓真, 张冰, 等. 高能电脉冲-超声滚压耦合技术对淬火态 GCr15 钢表面强化研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(2): 82-86.
- ZHANG Shuo, XU Zi-zhen, ZHANG Bing, et al. Surface Properties of Quenched GCr15 Steel Enhanced by Electropulsing Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. *Materials Review*, 2017, 31(2): 82-86.
- [52] WANG Hai-bo, SONG Guo-lin, TANG Guo-yi. Effect of Electropulsing on Surface Mechanical Properties and Microstructure of AISI 304 Stainless Steel during Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 662: 456-467.
- [53] YAN Chao, ZENG Qun-feng, HE Wan-jun, et al. Enhanced Surface Hardness and Tribocorrosion Performance of 60NiTi by Boron Ion Implantation and Post-Annealing[J]. *Tribology International*, 2021, 155: 106816.
- [54] ZHAO X H, ZHAO Y Q, XU D S, et al. Effect of Gradient Nanostructure on Plasma Sulfonitrocarburizing of 42MnCr52 Steel[J]. *Tribology Transactions*, 2020, 63(1): 133-143.
- [55] ZHAO X H, NIE D W, XU D S, et al. Effect of Gradient Nanostructures on Tribological Properties of 316L Stainless Steel with High Energy Ion Implantation Tungsten Carbide[J]. *Tribology Transactions*, 2019, 62(2): 189-197.
- [56] DENG Bin, TAO Ye, HU Zhi-jie. The Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of TiN Coatings after Nb and C Ion Implantation[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 284: 405-411.
- [57] CUI Ze-qin, QIN Zhen, DONG Peng, et al. Microstructure and Corrosion Properties of FeCoNiCrMn High Entropy Alloy Coatings Prepared by High Speed Laser Cladding and Ultrasonic Surface Mechanical Rolling Treatment[J]. *Materials Letters*, 2020, 259: 126769.
- [58] WEN Xin, CUI Xiu-fang, JIN Guo, et al. Design and Characterization of FeCrCoAlMn_{0.5}Mo_{0.1} High-Entropy Alloy Coating by Ultrasonic Assisted Laser Cladding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835: 155449.
- [59] ZHU Li-da, XUE Peng-sheng, LAN Qing, et al. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106915.
- [60] AMANOV A, KARIMBAEV R, BERKEBILE S P. Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on Wear Mechanisms of Thermally-Sprayed WC-Co Coating[J]. *Wear*, 2021, 477: 203873.
- [61] YUAN Ding, SUN Xiao-jing, SUN Lai-bo, et al. Improvement of the Grain Structure and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Fabricated by Laser and Wire Additive Manufacturing Assisted with Ultrasonic Vibration[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 813: 141177.
- [62] 李德英, 张坚, 赵龙志, 等. 超声作用下激光熔覆 SiC/316L 复合涂层残余应力数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(10): 2270-2276.
- LI De-ying, ZHANG Jian, ZHAO Long-zhi, et al. Numerical Simulation of Residual Stress in SiC/316L Composite Coating by Ultrasonic Aided Laser Cladding[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(10): 2270-2276.

责任编辑: 刘世忠

(上接第 178 页)

- [81] EL-ATWANI O, CUNNINGHAM W S, ESQUIVEL E, et al. In-Situ Irradiation Tolerance Investigation of High Strength Ultrafine Tungsten-Titanium Carbide Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2019, 164: 547-559.
- [82] LANG E, MADDEN N, SMITH C, et al. Deciphering the Role of Second Phase Precipitates on Early-Stage Surface Morphology Development of Dispersion-Strengthened W Alloys under Low Energy He Irradiation[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2019, 19: 47-54.
- [83] KURISHITA H, KOBAYASHI S, NAKAI K, et al. Development of Ultra-Fine Grained W-(0.25-0.8)wt%TiC and Its Superior Resistance to Neutron and 3 MeV He-Ion Irradiations[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, 377(1): 34-40.
- [84] UEDA Y, OHNO N, KAJITA S, et al. Development of Tungsten Materials for Plasma Facing Components in Japan[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 52(3): 513-520.
- [85] MIYAMOTO M, NISHIJIMA D, UEDA Y, et al. Observations of Suppressed Retention and Blistering for Tungsten Exposed to Deuterium-Helium Mixture Plasmas [J]. *Nuclear Fusion*, 2009, 49(6): 065035.

责任编辑: 刘世忠