

超声表面滚压技术及其组合工艺现状

陶冠羽, 骆小双, 孙清云, 段海涛

(武汉材料保护研究所有限公司, 武汉 430030)

摘要: 概述了 USRP 在磨损、疲劳以及腐蚀领域的防护现状, 并对其防护机理进行了讨论。同时归纳了 USRP 技术存在的问题, 比如当表面强化层的塑性变形程度达到一定的极限时, 不仅很难进一步提高材料性能, 继续加工更会导致起皱、开裂等表面缺陷的产生, 最终致使材料性能恶化。在此基础上, 重点综述了组合 USRP 工艺的研究进展, 并按照组合工艺中 USRP 技术的时间顺序, 分为前端组合(超声滚压-等离子渗技术、超声滚压-物理气相沉积技术、超声滚压-微弧氧化技术等)、后端组合(热处理-超声滚压技术、激光冲击-超声滚压技术、激光熔覆-超声滚压技术、激光选区熔化-超声滚压技术等)以及同步复合工艺(电脉冲辅助超声滚压技术、温度场辅助超声滚压技术等)。最后, 就 USRP 技术及其组合工艺进一步的研究和发展方向进行了展望, 为 USRP 后续研究及应用提供技术参考。

关键词: 金属防护; 超声滚压; 表面组合工艺; 碳中和

中图分类号: TG176 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)02-0122-13

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.02.011

State of the Art of Ultrasonic Surface Rolling Technology and Its Combination Technology

TAO Guan-yu, LUO Xiao-shuang, SUN Qing-yun, DUAN Hai-tao

(Wuhan Research Institute of Materials Protection Co., Ltd., Wuhan 430030, China)

ABSTRACT: Metal materials, known as "industrial skeleton", are widely used in communication, electronics, transportation, medical, and other fields because of their good physical, chemical, and mechanical properties. However, corrosion, abrasion, fatigue, and other failure modes generally occur on the metal surface, which greatly limits the service life and effect of the material. As a new and environment-friendly surface strengthening technology, the ultrasonic surface rolling process (USRP) has become a research focus because of its great application potential in the field of material surface protection. The work aims to introduce the protection status of USRP in the field of wear, fatigue, and corrosion in China and internationally, and discuss the mechanism of USRP on the surface protection of metal materials.

However, with the development of modern science and technology, higher requirements are put forward for the surface properties of materials or parts. To a certain extent, the single USRP can not meet the high-performance

收稿日期: 2021-11-19; 修订日期: 2022-03-29

Received: 2021-11-19; Revised: 2022-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(51975421)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975421)

作者简介: 陶冠羽(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: TAO Guan-yu (1994-), Male, Master, Engineer, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 段海涛(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: DUAN Hai-tao (1981-), Male, Doctor, Researcher, Research focus: surface engineering.

引文格式: 陶冠羽, 骆小双, 孙清云, 等. 超声表面滚压技术及其组合工艺现状[J]. 表面技术, 2023, 52(2): 122-134.

TAO Guan-yu, LUO Xiao-shuang, SUN Qin-yun, et al. State of the Art of Ultrasonic Surface Rolling Technology and Its Combination Technology[J]. Surface Technology, 2023, 52(2): 122-134.

requirements of equipment for parts. The existing problems of USRP technology are summarized. For example, when the plastic deformation degree of the surface strengthening layer reaches a certain limit, it is not only difficult to further improve the performance but also easy to lead to surface defects such as wrinkling and cracking, which will affect the service performance of the material. In addition, the strengthening effect of USRP is often subject to the processing material. For example, due to the high hardness of high-strength alloy, it is difficult to form a deep strengthening layer on the surface through USRP processing, so the expected effect can not be achieved. Therefore, based on the existing USRP, the combined USRP surface strengthening treatment technology is formed by combining other surface strengthening processes to solve the limitations and technical barriers of a single technology.

According to the time sequence of the combined process, USRP was applied to the front end, back end and synchronous processing of the combined process. The front-end combination was to pretreat the material surface through USRP to improve the processing efficiency and processing performance of subsequent processes, mainly including USRP combined Plasma Infiltration technology, USRP combined Micro-arc Oxidation technology, USRP combined Physical Vapor Deposition technology, etc. In addition, in the process of part processing and manufacturing, some processing technologies inevitably affected the surface quality of the workpiece to a certain extent. At this time, the technical advantage that USRP could greatly improve the surface integrity of materials was used as the back-end process of combined process, to enhance the overall performance of parts. The back-end combination process mainly includes Heat Treatment combined USRP technology, Laser Shock combined USRP technology, Laser Cladding combined USRP technology, Laser Selective Melting combined USRP technology, etc. In the development process of the USRP combined process, researchers have also successively developed synchronous composite process. USRP technology is combined with electric pulse and temperature field to strengthen the material surface, to improve the material surface properties.

Under appropriate process conditions, USRP can effectively improve the surface quality of metal materials. Scholars have researched the protection against typical failures such as wear, fatigue, and corrosion, and achieved some results. However, the theory of USRP energy conversion is not clear. The relationship between the transformation of USRP from mechanical energy and ultrasonic energy into the energy required for material deformation is not clear, and the relevant theoretical support is blank, which is also one of the main factors limiting the development and performance improvement of the USRP process. Secondly, the combined USRP process provides a good technical way for improving the service performance of engineering materials and equipment and shows a good application prospect. However, the matching degree between the combined processes still needs to be improved, and the mechanism of material processability needs to be further discussed.

KEY WORDS: metal protection; ultrasonic rolling; surface combination process; carbon neutralization

金属材料素有“工业骨骼”之称,其凭借良好的物理、化学、力学等性能而被广泛应用于通信、电子、交通、医疗等领域^[1-4],是现代科技与产业发展的基础与先导。在国务院印发的国家行动纲领《中国制造2025》^[5]和十三届全国人大四次会议表决通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》^[6]中,均明确规定了要围绕“新材料”领域完成转型升级,建设材料强国,打造“大国筋骨”。综上所述,金属材料的战略地位可见一斑。然而,金属表面普遍会发生腐蚀、磨损、疲劳等失效形式,这极大地限制了材料的使用寿命和效果^[7-10]。如何提高金属材料的表面性能,并有效降低其失效风险,是推进材料强国的关键,同时也是现阶段先进材料制造领域的“卡脖子”难题。

超声表面滚压处理(USRP)作为一种新型、环保的表面强化技术,由于在材料表面防护领域展现出巨大的应用潜力而成为研究焦点^[11-13]。据 Web of

Science 核心合集数据显示,近5年来(2017—2021年),有关超声滚压研究的文章数量多达325篇,且整体呈现逐年递增的趋势,如图1所示。实际上,USRP是依据超声波振动设计的高效精密无切屑加工技术,通过将超声冲击和静载滚压相融合,由换能器将超声电信号进行转译,并通过变幅杆放大,最终以高频机械振动的形式在冲击头上输出,冲击载荷挤压工件表面,使其产生塑性变形^[14-15],如图2所示。从机理上分析,受超声波和机械滚压双重作用,USRP加工后的材料表面将会形成一定程度的塑性流动,使得表面的“峰”与“谷”相抵,进而显著降低表面粗糙度,提高材料的综合性能^[16]。同时,由于USRP加工赋予了材料表面较高的自由能,而使其表层发生剧烈的塑性形变,形成位错和孪晶等,并在持续、均匀的USRP作用下,最终形成纳米晶粒,从而达到改善材料性能的作用^[17]。图3列举了一些具有代表性的表面处理工艺。相较于深滚^[18](DR)、超声冲击^[19]

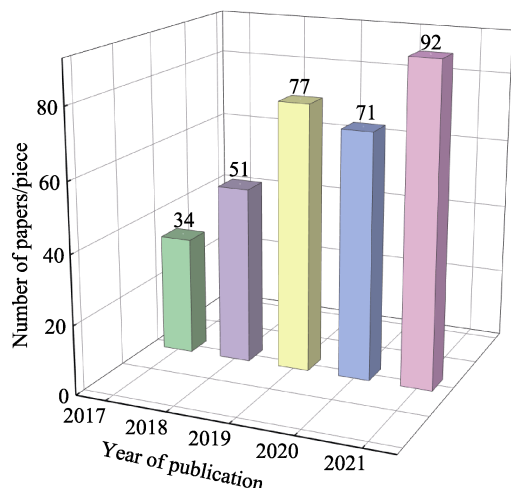


图1 近5年Web of Science核心合集超声滚压文献统计
Fig.1 Statistics of ultrasonic rolling documents in Web of Science core collection in recent 5 years

(UIT)、机械研磨^[20](SMAT)等传统表面强化技术容易对金属表面造成变形严重、应力集中等问题^[21], USRP技术能有效地对金属表面的微结构进行调节, 既能获得理想的塑性变形层和残余压应力, 又可显著提升材料的表面完整性、抗蚀及耐磨性能等^[22-24]。同时, USRP还可以对工件内壁进行加工, 具有方便、快捷、可大规模生产等优点^[25]。更重要的是, 相较于其他表面机械加工工艺(如车削、喷丸、滚压等), USRP加工过程中无切屑产生, 并且加工效率高, 可实现低能耗、低污染、低排放生产, 是一种助力实现“双碳”目标的绿色高效表面工程技术。

现阶段, 人们对于USRP技术的研究多集中于装置设计、工艺优化与微观组织研究等方面^[26-28], 相关综述也只是对USRP的工作原理、工艺参数或USRP加工试样的力学性能及其表面完整性等方面进行概括^[29-30]。基于此, 首先介绍了USRP技术在磨损、疲

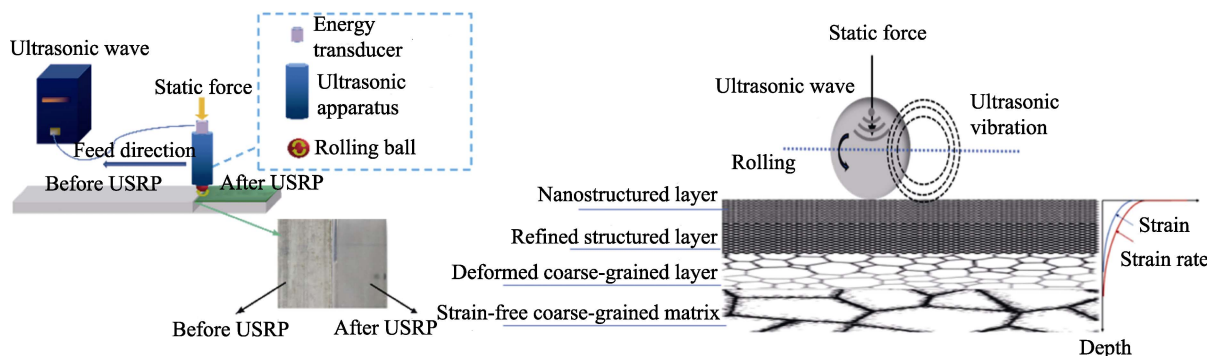


图2 超声表面滚压处理加工示意图^[14-15]
Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic surface rolling treatment^[14-15]

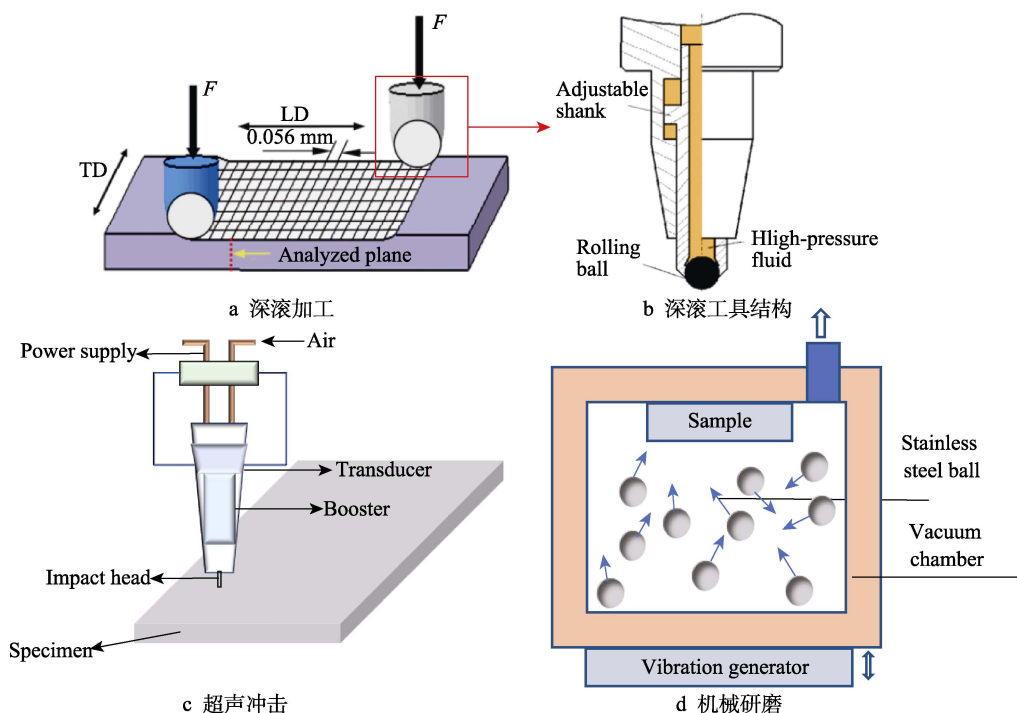


图3 传统表面处理工艺加工示意图^[18-20]
Fig.3 Schematic diagram of traditional surface treatment process^[18-20]: a) deep rolling; b) deep rolling tool structure; c) ultrasonic impact; d) mechanical grinding

劳以及腐蚀领域的防护现状, 并对其防护机理进行讨论。同时归纳了 USRP 技术目前存在的短板与不足。在此基础上, 重点综述了近年来 USRP 组合工艺的研究进展。最后, 就 USRP 技术及其组合工艺进一步研究和发展方向进行了展望, 以期为 USRP 技术的后续研究和应用提供技术参考。

1 USRP 表面防护

作为一种新兴的表面加工技术, USRP 技术凭借简单、高效、绿色以及出色的加工性能, 在金属表面防护应用领域具有巨大的潜力, 引发广大学者的兴趣。当前, 国内外研究人员主要从磨损防护、疲劳防护及腐蚀防护这 3 个方面来对 USRP 技术展开研究。

1.1 磨损防护

航空航天、芯片制造、交通运输等领域必不可少地会遭受磨损失效的困扰^[31-32]。据统计, 全球约 80% 的设备是由于磨损而报废的, 并且每年因磨损而引起的经济损失占一个国家 GDP 的 2%~7%^[33]。因此, 人们尝试利用 USRP 技术来提高金属材料的耐磨性能。

Zhang 等^[34]利用 USRP 技术对 25CrNi2MoV 钢表面进行强化, 并研究了加工前后试样的摩擦学性能。结果表明, 未加工试样表面的裂纹较多, 且呈现出严重的粘着磨损, 而 USRP 加工试样的磨损表面较为光滑, 且裂纹减少, 摩擦系数和磨损体积较未加工试样分别降低了 12.86% 和 39.48%。这主要归因于 USRP 加工提高了材料的显微硬度和残余压应力, 增强了冲击接触力, 降低了摩擦系数和磨损量, 最终提高了材料的耐磨性能。同时, Li 等^[35]研究了 USRP 技术对 Ti6Al4V 合金力学性能、显微组织和微动摩擦磨损特性的影响。结果表明, 材料表面显微硬度的提高、残余应力和显微组织的改善是其微动磨损和摩擦性能提高的主要原因, 且其磨损机制主要表现为磨粒磨损和粘着磨损。此外, Meng 等^[36]、Lai 等^[37]也得出类似的结论。

综上所述, USRP 加工主要通过降低材料表面粗糙度和摩擦系数, 同时赋予材料表面高硬度, 减小磨粒压入材料的深度, 使得材料的磨损量降低。同时, 残余压应力的引入还减少了表面裂纹的萌生, 进一步强化了材料的耐磨性能。

1.2 疲劳防护

在服役过程中, 金属表面不可避免地会发生疲劳破坏, 从而带来难以预估的灾难^[38-39]。据相关研究表明, USRP 加工不仅可以提高材料的耐磨性能, 还能有效改善金属的抗疲劳性能。

Liu 等^[40]对 Ti6Al4V 合金表面进行 USRP 加工, 并开展了疲劳试验。结果表明, 在 700 MPa 的最大应力下, USRP 试样的疲劳寿命比未处理试样提高了

23.5 倍。这是由于 USRP 加工引入的残余压应力可以延缓疲劳裂纹的产生, 并且可以降低裂纹扩展的速率。同时, 梯度纳米结构和表面加工硬化对抗疲劳性能的提升起到协同效应。此外, 加工试样的相结构变化也对材料疲劳性能的提升起着重要影响。Liu 等^[41]发现, 除残余压应力和梯度纳米结构层对表面裂纹萌生和扩展有抑制作用外, 马氏体相变对疲劳行为也有很大的影响。主要体现在 USRP 工艺诱导形成的马氏体相不但提高了材料的强度, 而且马氏体相变在循环加载过程中还吸收了裂纹扩展释放的应变能, 提高了材料在高循环疲劳情况下的使用寿命。该结论得到了 Xu 等^[42]人的印证。

USRP 加工改善材料疲劳性能的机理可归结为残余压应力、梯度纳米结构层和表面加工硬化等综合作用的结果。其中, 残余压应力是决定疲劳行为的主要因素, 因为残余压应力对疲劳裂纹的萌生和过早扩展有抑制作用, 其存在可以有效提高金属材料的疲劳裂纹扩展抗力^[43]。此外, 梯度纳米结构和加工硬化也是 USRP 试样抗疲劳性能提升的重要原因。

1.3 腐蚀防护

自然界普遍存在着腐蚀现象, 相对于磨损和疲劳性能, USRP 技术对材料腐蚀性能的影响就更为复杂, 现阶段学者们关于 USRP 对材料耐蚀机理的解释还存在分歧^[44]。其中, 一部分学者认为 USRP 技术可以提高金属材料的耐蚀性能。Ye 等^[45]使用 HK30C 毫克能设备在 AZ31B 镁合金表面进行 USRP 加工, 并研究了 USRP 对材料腐蚀性能的影响。结果表明, 与未处理试样相比, USRP 试样的腐蚀形貌更为完整, 裂纹缺陷更少, 且腐蚀速率较基材下降了 64.15%。这主要是由于 USRP 加工为 AZ31B 镁合金引入了残余压应力, 抑制了裂纹的产生, 并且表面粗糙度的降低使得腐蚀介质难以对材料内部进行侵蚀, 最终减缓了 AZ31B 镁合金的腐蚀进程。Xu 等^[42,46-47]研究了 USRP 加工前后试样在 3.5% NaCl 中性水溶液中的腐蚀行为, 由测试结果可知, USRP 加工使得试样的平均腐蚀速率降低了 60%~70%。这主要归因于晶粒细化和表层组织的均匀化, 而诱导的残余压应力起到了次要的作用。综上所述, 该部分学者认为 USRP 加工可以降低材料的表面粗糙度, 并且引入了残余压应力, 抑制了腐蚀裂纹的萌生, 从而提高了金属的耐蚀能力。

另一部分学者认为, 不同活性的金属在 USRP 处理后所表现出的耐蚀性能则可能截然相反。Xia 等^[48]采用 USRP 工艺合成了具有梯度纳米结构表层的 Cu-10Ni 合金, 并研究了未加工试样和 USRP 加工试样在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为。结果表明, 与未加工试样相比, USRP 加工试样的耐腐蚀性能显著提高。这主要归因于 USRP 加工促进了 Cu-10Ni 合金表面钝化膜[CuO、Cu₂O 和 Cu(OH)₂]的形成, 从而有效地保护基体免受腐蚀, 如图 4 所示。Zhang 等^[49]将由

USRP 处理的 17-4PH 不锈钢试样和未处理试样进行了对比分析,发现 USRP 加工试样的耐腐蚀性能得到明显提升。这主要是由于:USRP 加工显著提高了材料表面晶界的占比,促进了表面钝化膜的形成,从而增强了耐腐蚀性能;USRP 处理后,试样的表面粗糙度降低,缺陷减少,与腐蚀液的接触面积减小,腐蚀液在表面停留的时间减少,对提高耐腐蚀性有着积极的作用。该结论还得到岳亮亮等^[50]的印证。综上所述,该部分学者认为,对于钝态金属(如 304、316L 不锈钢等)而言,USRP 处理能更容易地在其表面生成致

密、均匀的钝化膜,从而提高材料的腐蚀防护能力。

然而,在刘莉等^[51]的研究中发现,表面纳米化作用会使活性金属表面腐蚀加剧,耐蚀性能大大降低。为了验证这一结论,陶冠羽^[52]通过 USRP 技术对活性金属 A3 碳钢表面进行加工,并将基材与加工后 USRP-A3 试样放入 120 g/L 的 NaCl 溶液中进行浸泡试验和电化学测试。结果表明,USRP 加工前后 A3 碳钢试样表面均发生了严重的腐蚀现象。通过对比图 5a、b 发现,USRP-A3 试样表面的点蚀坑较其基材显著增加,USRP-A3 试样的平均腐蚀速率(0.417 5 mm/a)

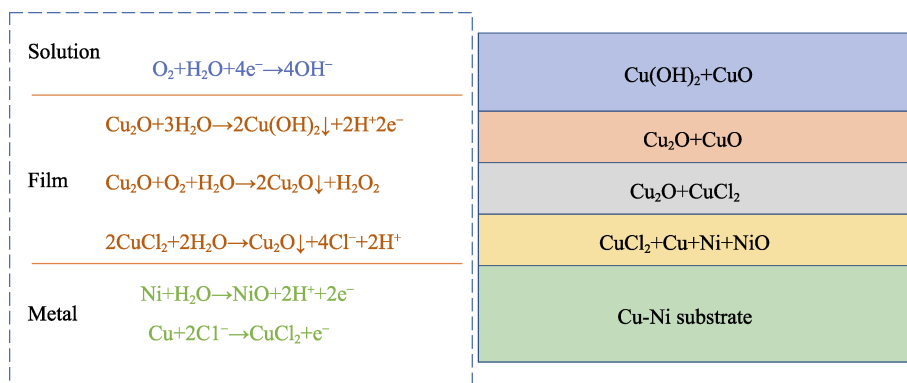


图 4 USRP 加工后 Cu-10Ni 合金腐蚀反应机理与钝化膜组成^[48]

Fig.4 Corrosion reaction mechanism and passive film composition of Cu-10Ni alloy after USRP processing^[48]

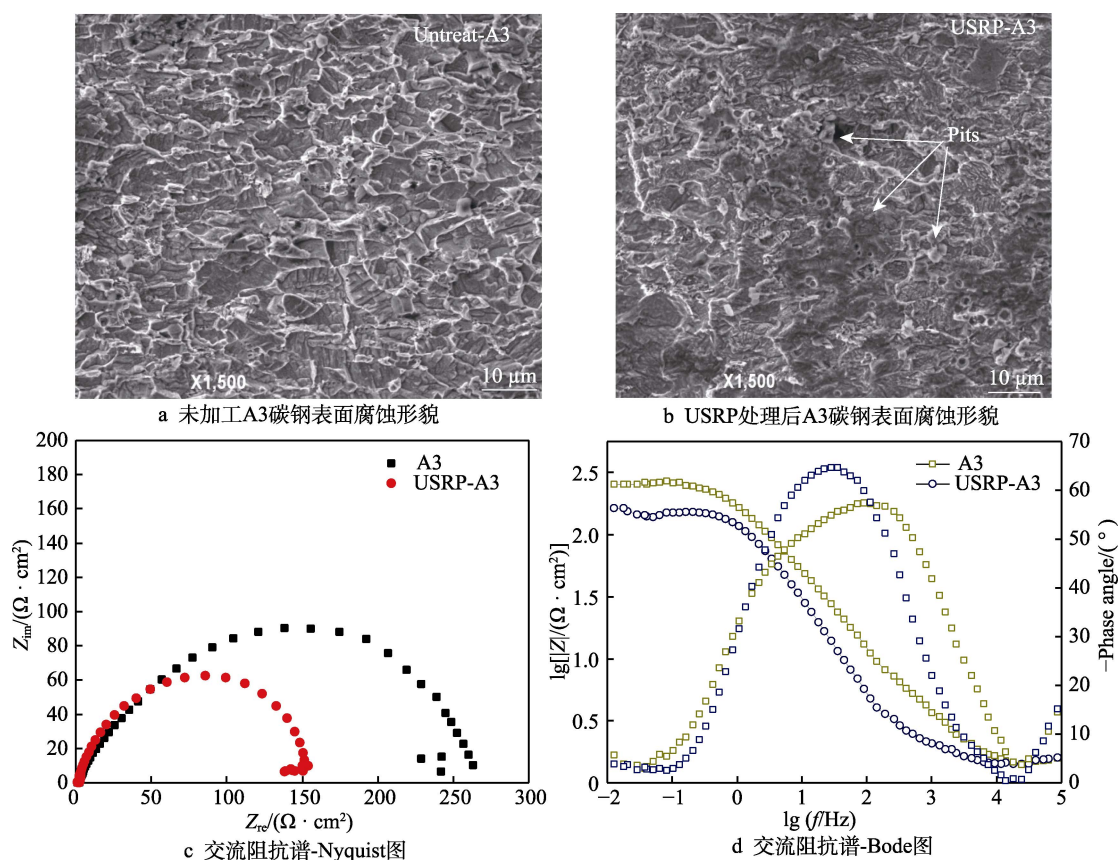


图 5 USRP 处理前后 A3 碳钢在 120g/L NaCl 溶液中的腐蚀形貌及交流阻抗谱^[52]

Fig.5 Corrosion morphology and AC impedance spectrum of A3 carbon steel in 120 g/L NaCl solution before and after USRP treatment^[52]: a) surface corrosion morphology of untreated-A3; b) surface corrosion morphology of USRP-A3; c) EIS-Nyquist; d) EIS-Bode

是其基材 (0.303 8 mm/a) 的 1.37 倍。由其电化学阻抗谱 (见图 5c) 可知, USRP-A3 的容抗弧半径减小, 耐蚀性能减弱。这主要是因为对于活性金属 (如 A3 碳钢等) 而言, USRP 加工会导致材料表面的活性原子增多, 从而使得金属的溶解速率加快, 最终耐蚀性能大大降低。

综上所述, USRP 对金属材料腐蚀性能的影响既与 USRP 加工效果 (表面完整性、残余压应力等) 有关, 还可能与金属自身活性 (钝化性能) 存在关联, 综合作用因素较多, 作用机理尚不明确, 需要研究人员进一步对 USRP 技术的耐蚀机理进行探讨。

2 组合 USRP 工艺

2.1 USRP 技术存在的问题

随着现代科技的发展, 对材料或零部件的表面性能提出了更高要求, 单一的 USRP 技术在一定程度上已经不能满足设备对零部件的高性能要求。当材料表面强化层的塑性变形程度达到一定的极限时, 不仅很难进一步提高其性能, 继续加工更会导致起皱、开裂

等表面缺陷的产生, 进而影响材料的使用性能。此外, USRP 强化效果往往还受制于加工材料本体。例如, 由于高强合金本身硬度较大, 难以通过 USRP 加工在其表面形成较深的强化层, 从而无法达到预期效果。因此, 在现有 USRP 技术的基础上, 通过结合其他表面强化工艺, 形成了组合 USRP 表面强化处理技术, 以解决单一技术存在的局限性与技术壁垒。表 1 列举了单一 USRP 技术和组合 USRP 技术的优缺点。此外, 根据组合工艺中 USRP 技术的时间顺序, 可将 USRP 技术应用于组合工艺的前端、后端以及同步处理, 如图 6 所示。

表 1 单一 USRP 技术与组合 USRP 技术对比
Tab.1 Comparison between USRP technology and combined USRP technology

技术名称	优点	缺点
USRP 技术	工艺简单、成本低、效率高	工艺效果限制较多、单一加工提升有限
组合 USRP 技术	工艺简单、组合灵活、可突破单一 USRP 加工限制	前期开发难度较大

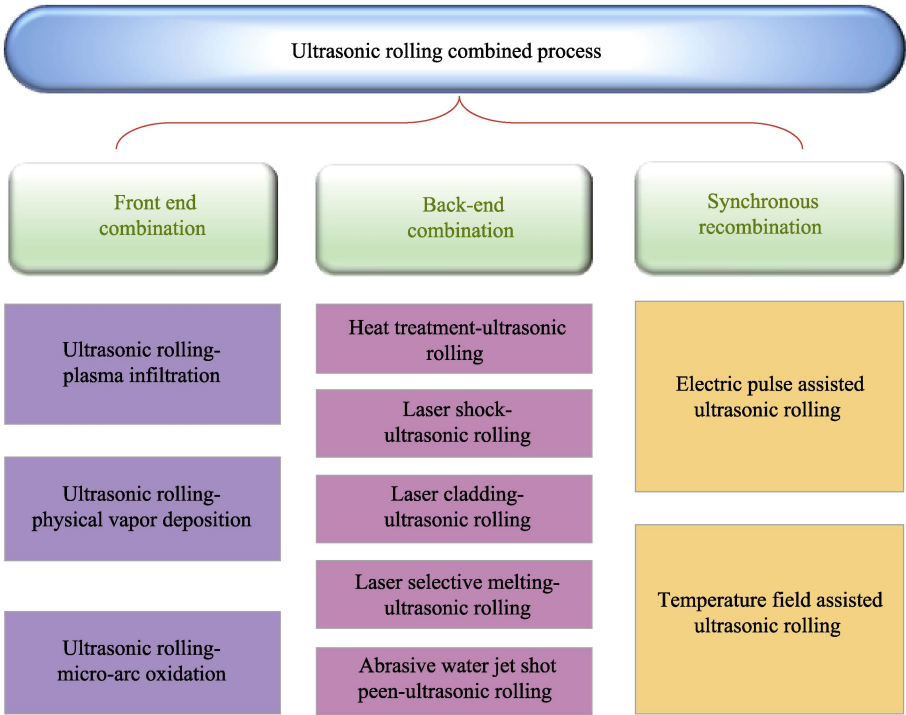


图 6 组合超声滚压工艺分类
Fig.6 Classification of combined ultrasonic rolling process

2.2 前端组合

目前, 比较常见的组合 USRP 工艺是将 USRP 技术应用于前端组合, 即通过 USRP 技术对材料表面进行预处理加工, 以期提升后续工艺的加工效率和加工性能。

2.2.1 超声滚压-等离子渗技术

Liu 等^[53]将 USRP 加工与等离子渗氮技术相结合, 在 690TT 合金表面制备出耐磨性能优异的渗层, 与单一等离子渗氮试样相比, 组合加工试样的硬度提高了 348%, 磨损率下降了 96%, 有效地改善了 690TT

合金表面微动磨损性能。这是因为：一方面，USRP 预处理后，金属表面的晶粒拥有较高的活性，从而加快了表面化学反应，并且晶粒之间高体积分数的界面又为原子扩散提供了理想的通道^[46]，利于元素扩散，实现“催渗”的目的，提高了化学热处理反应速率，并且增加了基体和渗层的结合力；另一方面，USRP 加工减缓了等离子渗导致的热疲劳裂纹的形成和长大，从而增强了金属材料的表面性能。另外，She 等^[54]利用 USRP 预处理金属钛后，又在 850 °C 下对其进行了等离子渗氮改性。研究发现，氮化层的硬度和厚度得到提升，有效地增加了等离子渗氮后样品的耐磨性。其中，渗层厚度增加主要得益于 USRP 预处理增加了材料表面活性能的非平衡缺陷，激发形成了大量晶界，使得原子活动的路径大幅增多，从而加快了等离子渗氮的进程。此外，USRP 预处理还能使其钛层表面晶粒细化、裂纹减少，进而发挥显著提高材料耐磨性能的作用。此外，Zhao 等^[55]研究了梯度纳米结构对 42MnCr52 钢等离子硫氮碳共渗改性层组织及性能的影响。结果表明，相比于单一的等离子硫氮碳试样，经 USRP 预处理后的试样，表面更加致密平整，渗层厚度平均提高了约 30%，并且组合加工试样的耐磨性能明显提高。这与 USRP 预处理增加了等离子硫氮碳共渗的扩散深度以及改善了渗层的均匀性密切相关。

基材的表面状态极大地影响超声滚压-等离子渗技术的效果，因此在等离子渗之前，首先需要保证材料表面尽可能地光滑平整，降低表面状态对涂层性能的影响。其次，需要根据实际材质和服役需求，选择合适的工艺参数，发挥出 USRP 改善材料表面质量的优势。最后，根据设计要求，适配热处理技术，发挥组合 USRP 工艺“1+1>2”的技术潜力。

2.2.2 超声滚压-微弧氧化 (MAO) 技术

微弧氧化 (MAO) 技术凭借加工高效、工艺简单以及绿色环保等优点成为最具潜力的一种表面处理

工艺。在 MAO 处理之前，一般可以通过喷丸加工对基材进行预处理。然而，一方面，喷丸处理容易对材料表面完整性造成一定的下降，导致在后期 MAO 处理时所制得膜层不够均匀致密；另一方面，膜表层的高孔隙率和相对较大的表面积也限制了 MAO 技术的发展。故而，亟需开发一种高效环保的微弧氧化膜强化技术。

魏征等^[56]首先在 AZ31B 金属表面利用 USRP 技术进行预处理，然后再使用 MAO 技术对表面进行镀膜，最终得到表面平整光滑、孔隙率低的 MAO 膜层。此外，魏征还对比了经 USRP 预处理后的微弧氧化试样 (USRP+MAO) 与直接微弧氧化镀膜试样 (MAO) 二者在标准磷酸盐缓冲液 (SPB 模拟体液) 中的腐蚀性能，结果见表 2。由表 2 可知，经 USRP 预处理的 MAO 试样，不管是腐蚀电位，还是腐蚀电流密度，测试结果都远优于纯 MAO 试样，这说明在 SPB 介质中 USRP+MAO 试样拥有更好的抗腐蚀性能。由交流阻抗模拟的等效电路所得数据可知，USRP+MAO 试样的阻抗明显大于纯 MAO 试样，进一步说明 USRP+MAO 试样较纯 MAO 试样更具有耐蚀防护的能力。这主要是由于 USRP 预处理可以大幅降低金属表层的晶粒尺寸，从而使 MAO 膜层的成核点增多，最终使得 MAO 膜层变得更加致密，其孔隙率由 31.7% 降低至 19.1% (如图 7 所示)，腐蚀溶液中的侵蚀性离子难以穿过 USRP+MAO 膜层，进而提高了镁合金试样的耐蚀性能。

2.2.3 超声滚压-物理气相沉积 (PVD) 技术

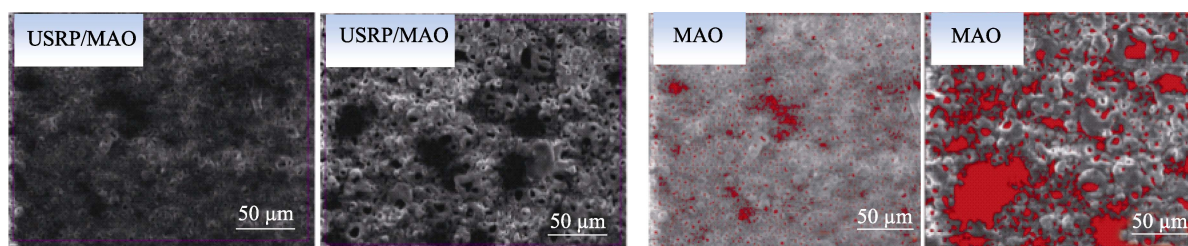
在前端组合工艺中，人们还利用 USRP 技术在金属表面构筑织构，然后再通过 PVD 技术在 USRP 预处理后的金属表面进行沉积镀膜，从而获得了结合度高、性能优异的涂层。

山东大学的 Meng 等^[57]在 AISI1045 钢表面利用 USRP 技术进行了微观组织构筑，制备出不同间距的

表 2 超声滚压预处理前后 MAO 镁合金试样的耐蚀性能^[56]

Tab.2 Corrosion resistance of MAO magnesium alloy samples before and after ultrasonic rolling pretreatment^[56]

Sample	E_{corr} (vs.SCE)/V	J_{corr} (mA·cm ⁻²)	R_s (Ω·cm ²)	CPE1-T/ (F·cm ²)	CPE1-P	R_1 (Ω·cm ²)	CPE2-T/ (F·cm ²)	CPE2-P	R_2 (Ω·cm ²)
USRP+MAO	-0.667	7.94×10^{-3}	8.535	1.694×10^{-5}	0.950 33	38.82	1.961×10^{-5}	0.962 33	57 636
USRP	-0.784	2.57×10^{-2}	19.08	6.623×10^{-6}	0.912 66	44.89	6.885×10^{-6}	0.848 92	34 634



a 表面SEM形貌

b 孔隙率

图 7 USRP/MAO 与 MAO 膜层表面 SEM 形貌、孔隙率分析^[56]

Fig.7 (a) SEM morphology and (b) porosity analysis of USRP+MAO and MAO films^[56]

线状微结构, 并组合 PVD 技术获得了与基体结合良好的 AlTiN 涂层 (如图 8 所示), 有效解决了单一处理后 AlTiN 涂层与基体结合不牢固的问题, 并显著提升了涂层材料的耐磨性能。其中, 超声滚压形成的织构为 AlTiN 涂层提供了较大的界面接触面积, 缩小了

涂层表面能之间的相互作用差异, 加强了涂层与基体间的结合力, 并且预置了理想的表面残余压应力和形成了梯度纳米层。综合以上因素, 最终提高了 AlTiN 涂层 (硬涂层) /AISI1045 钢 (软基材) 体系的结合强度和抗粘着磨损性能。

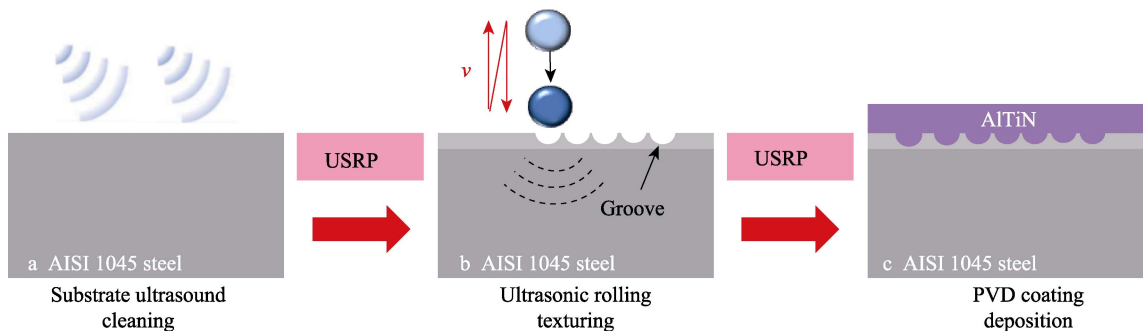


图 8 超声滚压-物理气相沉积组合工艺^[57]
Fig.8 Ultrasonic rolling and physical vapor deposition combined process^[57]

2.3 后端组合

在零部件的加工制造过程中, 某些加工技术不可避免地会对工件表面质量造成一定程度的影响。此时, 人们利用 USRP 加工可以大幅改善材料表面完整性的技术优势, 将其作为组合工艺的后端工序, 以此增强零部件的整体性能。

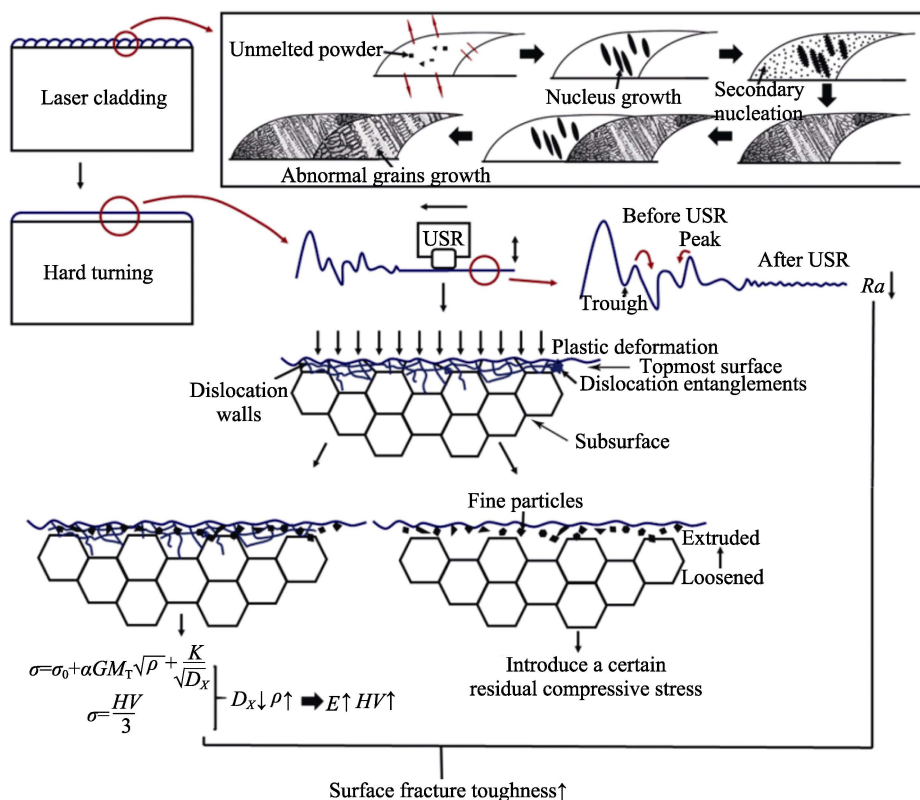
Li 等^[58]首先采用粉末冶金热等静压 (HIP) 工艺制备了 Ti6Al4V 合金棒材, 随后在真空炉中对其进行热处理, 最后使用 USRP 技术对其表面进行强化, 并开展了拉伸性能和疲劳性能的研究, 结果见表 3。由表 3 可知, 在拉伸性能方面, 拉伸强度和屈服强度分别提高了 3.6%和 3%, 面积减少率和伸长率分别降低了 30.9%和 13.1%。疲劳性能方面, 材料在高周疲劳测试中, 疲劳强度从 530 MPa 提高到 570 MPa。这主要得益于热处理和 USRP 技术的有效结合减少了材料初始裂纹点的数量, 延长了高周期应力下的疲劳寿命。鲁金忠等^[59]将激光冲击强化与 USRP 技术相结合, 发现该组合工艺可以使材料近表层的晶粒进一步细化, 同时还能改善材料表面因激光冲击强化带来的粗糙度变差的影响, 并减少了表层峰谷处的应力集中, 最终提升了镁合金的力学性能。Wang 等^[60]以 Ti6Al4V 合金为研究对象, 通过优化成形工艺, 获得了具有最佳性能的激光选区熔化 (SLM) 成形钛合金, 随后采用 USRP 技术作为后处理工艺对材料表面作

进一步加工处理。结果表明, 与单一的 SLM 处理比较, SLM-USRP 组合工艺处理可以有效地降低材料的表面粗糙度, 提高表面残余压应力, 且表层出现较强的加工硬化, 耐磨性能也显著提升。此外, Fu 等^[61]通过磨料水射流喷丸 (AWJP) 组合 USRP 技术, 探究了 AWJP-USRP 加工对 40CrNiMo 钢表面完整性和抗压疲劳性能的影响规律。结果表明, 采用组合表面改性工艺可在材料表层得到性能良好的梯度结构, 且由于表面粗糙度降低, 硬度提高, 加之组织梯度和残余应力梯度的形成使得材料的疲劳性能显著提高。另外, Ye 等^[62]使用激光熔覆技术将 Cr-Ni 合金粉末熔覆在 1045 钢表面, 然后采用 USRP 技术作为后处理工艺, 改善其表面状态。结果表明, 激光熔覆-USRP 组合工艺可以有效解决单一激光熔覆技术处理材料的表面质量差等问题, 提高了材料的力学性能。这主要得益于将 USRP 技术引入激光熔覆工艺中, 可以显著降低材料表面的粗糙度, 并在其表层形成极小的晶粒, 从而增强了材料的表面显微硬度, 改善了表面抗裂性能, 作用机理如图 9 所示。

综上所述, USRP 加工作为组合工艺后端处理的原因如下: 改善组合工艺前工序对材料表面造成的质量问题, 如表面粗糙度增大、应力集中等; 提高材料的显微硬度, 生成梯度纳米结构, 并引入残余压应力, 使材料的性能得到提升。

表 3 超声滚压处理前后样品的拉伸性能与疲劳性能^[58]
Tab.3 Tensile and fatigue properties of samples before and after ultrasonic rolling^[58]

Sample	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Rate of reduction in area/%	Elongation/%	High-cycle stress/MPa
Heat-treated	1 005	921	43.8	16.5	530
USRP+Heat-treated	1 042	949	12.9	3.4	570

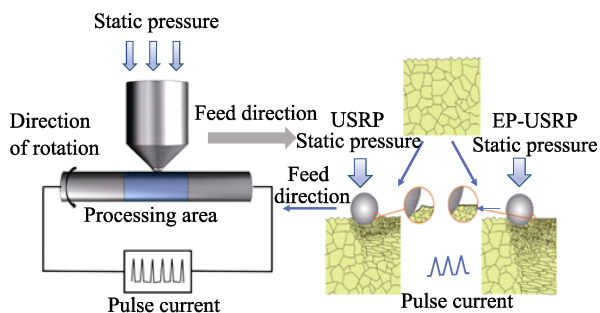
图9 激光熔覆-超声滚压组合工艺作用机理^[62]Fig.9 Action mechanism of laser cladding and ultrasonic rolling combined process^[62]

2.4 同步复合

在 USRP 组合工艺的发展进程中,除了将 USRP 技术作为前、后端处理之外,研究人员还陆续研究出同步复合工艺。即将 USRP 技术与电脉冲、温度场等同步复合,对材料表面进行强化,从而达到协同效应,提高材料的表面性能。

2.4.1 电脉冲辅助超声滚压同步处理技术

由 Wang 等^[63]发明的电脉冲辅助超声滚压 (EP-USRP) 加工方法是一种新的材料表面强化技术,主要通过在 USRP 加工过程中应用电脉冲来降低材料的抗变形能力,提高材料的延展性和表面质量,其工艺原理如图 10 所示。脉冲电流作为一个瞬间的高能输入,能够改善金属材料的塑形变形、再结晶、相转变等,降低材料的加工硬化效果和减少内部的缺

图10 电脉冲辅助 USRP 工艺原理^[63]Fig.10 Schematic diagram of EP-USRP process^[63]

陷,从而实现在材料加工过程中优化微观结构、降低变形阻抗、改善零件的变形极限和表面质量等目的。EP-USRP 能够突破 USRP 有限的冲击深度和不稳定的局部疲劳损坏等限制,发挥复合加工的技术优势。

许金宝等^[64]使用 EP-USRP 技术处理 6061 铝合金。结果表明,EP-USRP 处理样品的表面质量明显优于 USRP 处理试样,且加工层的厚度同步增加,晶粒尺寸进一步减小,摩擦学性能显著提升。这主要得益于在 EP-USRP 加工过程中,产生的漂移电子可以促进同向位错运动,加快塑性变形的速度,生成更厚的变形层。此外,由于涂层与基体之间的组织更加致密,表现出更好的结合力,使得 EP-USRP 试样的摩擦学性能大幅增加。Sun 等人^[65]通过 EP-USRP 工艺处理镍铝青铜 (NAB),与未经处理和经 USRP 处理试样相比,EP-USRP 试样的表面粗糙度大大降低,并且在 NAB 表面上形成了超 1 000 μm 厚的硬度梯度层,大幅提高了试样的表面强度。同时,电脉冲增强了金属的塑性流变,促进了位错的扩散和移动,因此可通过不同的电脉冲强度获得相应的表面质量和力学性能。最后,与未处理试样和 USRP 试样相比,EP-USRP 增强了 NBA 试样表面的抗空蚀能力,这主要归功于 EP-USRP 可以改善材料的表面质量,减弱空泡坍塌,表面预置的压应力和加工硬化能很好地抵抗空泡的冲击,且表层结构的偏转改变了裂纹扩展的方向,提高了材料的电化学腐蚀性能,从而大大提高了处理后 NAB 表面的抗空蚀能力。

2.4.2 加热辅助超声滚压同步处理技术

表面加热辅助超声滚压同步处理是在单一 USRP 技术的基础上, 将温度场引入到材料的表面超声强化过程中, 利用加热温度对材料力学性能和微观结构的影响, 从而获得性能更好的材料表面改性层。其原理主要是由于加热能够使材料的力学性能发生显著的降低, 增加材料的滑移体系和机制, 从而减少了材料产生严重塑性变形所需的变形能。在相同的冲击作用下, 相对于常温的表面超声滚压, 将使材料产生更大的塑性变形。故而, 表面加热辅助超声复合滚压处理的材料将会获得更好的表面改性层, 其微观结构和力学性将会有进一步的提升。其次, 由于致密的位错密度和缠结, 形成了更高的显微硬度和更深的硬化深度, 以及更厚的表面改性层, 使得材料的拉伸性能和抗疲劳性能也随之增强。

Li 等^[66]采用表面加热辅助 USRP 工艺对热等静压 (HIP) Ti6Al4V 材料表面进行了处理, 研究发现, 复合加工后, 材料具有更加优越的性能, 主要体现在复合加工试样拥有更好的晶粒细化和应变强化效果, 表面改性层的显微硬度明显提升。当在 140 °C 时进行加热辅助, Ti6Al4V 金属的耐磨性能最优。该结论得到蒋书祥等^[67]的印证。此外, 巩贤宏等^[68]利用卤素灯对材料表面进行升温, 并通过红外热像仪对表面温度进行监控, 如图 11 所示。当温度达到 200 °C 时, 利用自制的超声滚压装置对 Inconel 718 高强合金进行加工, 并保持温度至加工结束后 30 min。结果表明, 相对于单一 USRP 材料, 加热辅助超声滚压后, 材料的抗磨减摩性能增幅明显, 这主要是归功于加热辅助超声滚压试样拥有更大的硬度和屈服强度。

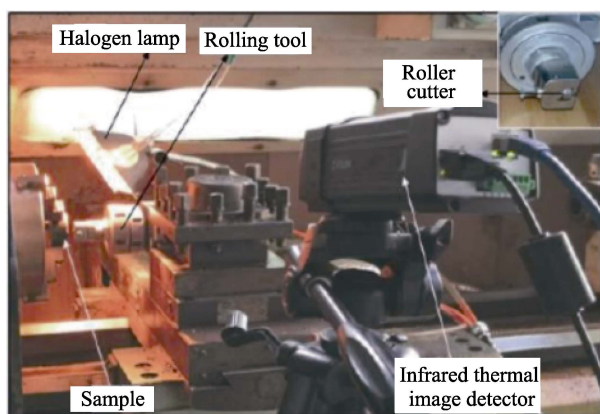


图 11 加热辅助超声滚压复合加工装置^[67]

Fig.11 Heating-assisted ultrasonic rolling composite processing device^[67]

综上所述, 与单一表面处理技术相比, USRP 组合表面强化工艺展现出优异的协同效应, 使得表面性能得到显著改善, 突破单一处理的技术瓶颈, 并发挥出多学科融合的优势, 推进了表面工程技术的发展。但是, 目前组合 USRP 表面强化工艺还处于发展阶

段, 各方面的工艺水平还有待提升, 组合工艺之间的匹配度仍需改进, 材料加工性能的机理研究需要进一步探讨。

3 结语

在合适的工艺条件下, 超声滚压技术可有效改善金属材料的表面质量, 学者们已经对磨损、疲劳、腐蚀等典型失效的防护开展了研究, 并取得了一定成果。其次, 组合 USRP 工艺为改善工程材料及其装备的服役性能提供了良好的技术途径, 展示出良好的应用前景, 因而应大力开展相关组合工艺的研究, 实现对落后、低效、污染严重的工艺进行升级改造, 为实现工业制造“双碳”目标而努力。关于 USRP 技术的应用发展, 还需注意以下问题:

1) 目前有关 USRP 能量转化理论还不清晰。USRP 由机械能和超声波能转化为材料形变所需的能量之间的关系还不明确, 相关的理论支撑处于空白状态, 这也是限制 USRP 工艺开发和性能提升的主要因素之一。

2) USRP 在加工细长孔工件时受到限制。受限于 USRP 加工头的尺寸, USRP 在加工细长孔工件内壁时, 目前还无法完成小于 USRP 加工头尺寸的细长孔零部件的加工。

3) USRP 加工不同金属材料的数据库处于空白状态。根据不同的材料性能要求, 需要灵活、便捷地将 USRP 技术与相关工艺进行适配, 从而提升 USRP 组合工艺的加工效率与加工质量。

参考文献:

- [1] ZHAO Q Z, YONG X Y, JING A L, et al. Advances in Coatings on Magnesium Alloys for Cardiovascular Stents—A Review[J]. *Bioactive Materials*, 2021, 6(12): 4729-4757.
- [2] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 280-292.
JIN He-xi, WEI Ke-xiang, LI Jian-ming, et al. Research Development of Titanium Alloy in Aerospace Industry[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 280-292.
- [3] TAE M A. Long-Term Initiation Time for Stress -Corrosion Cracking of Alloy 600 with Implications in Stainless Steel: Review and Analysis for Nuclear Application[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, 137: 103760.
- [4] 郑敏, 杨瑾, 张华. 多孔金属材料的制备及应用研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(18): 78-93.
ZHENG Min, YANG Jin, ZHANG Hua. Review on Preparation and Applications of Porous Metal Materials[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(18): 78-93.
- [5] 中华人民共和国中央人民政府网. 中国制造 2025

- [EB/OL]. <http://www.gov.cn>, 2015-05-19.
- Network of the Central People's Government of the People's Republic of China. Made in China 2025[EB/OL]. <http://www.gov.cn>, 2015-05-19.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. <http://www.gov.cn>, 2021-03-13.
- Network of the Central People's Government of the People's Republic of China. The 14th Five Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Outline of Long-term Objectives for 2035[EB/OL]. <http://www.gov.cn>, 2021-03-13.
- [7] 曾晓雁, 吴懿平. 表面工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- ZENG Xiao-yan, WU Yi-ping. Surface Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [8] FAIDZI M K, ABDULLAH S, ABDULLAH M F, et al. Review of Current Trends for Metal-Based Sandwich Panel: Failure Mechanisms and Their Contribution Factors[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 123: 105302.
- [9] ZAFFORA A, DI FRANCO F, SANTAMARIA M. Corrosion of Stainless Steel in Food and Pharmaceutical Industry[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2021, 29: 100760.
- [10] 谭茜匀, 王艳丽. 质子交换膜燃料电池不锈钢双极板的腐蚀行为及其表面防护的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 192-200.
- TAN Qian-yun, WANG Yan-li. Research Progress on Corrosion Behavior and Surface Protection of Stainless Steel Bipolar Plate of Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 192-200.
- [11] 唐洋洋, 李林波, 王超, 等. 超声表面滚压纳米化技术研究现状[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 160-169.
- TANG Yang-yang, LI Lin-bo, WANG Chao, et al. Research Status of USRP Nanocrystallization Technology[J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 160-169.
- [12] 焦锋, 兰帅领, 王毅, 等. 超声滚压 12Cr2Ni4A 齿轮钢残余压应力特性研究及参数优化[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 334-341.
- JIAO Feng, LAN Shuai-ling, WANG Yi, et al. Residual Stress Characteristics and Parameters Optimization of Ultrasonic Rolling 12Cr2Ni4A Gear Steel[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 334-341.
- [13] 孙银莎, 贾云飞, 苑光健, 等. 超声表面滚压加工纯钛梯度材料的力学性能反演与有限元分析[J]. 机械工程材料, 2021, 45(10): 58-65.
- SUN Yin-sha, JIA Yun-fei, YUAN Guang-jian, et al. Inversion and Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Pure Titanium Gradient Material by Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(10): 58-65.
- [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] YIN M G, CAI Z B, ZHANG Z X, et al. Effect of Ultrasonic Surface Rolling Process on Impact-Sliding Wear Behavior of the 690 Alloy[J]. Tribology International, 2020, 147: 105600.
- [16] 曹凤国. 超声加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- CAO Feng-guo. Ultrasonic Machining Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [17] 韩靖, 盛光敏, 胡国雄. 金属材料表面自纳米化研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(S1): 2-6.
- HAN Jing, SHENG Guang-min, HU Guo-xiong. Research Present on Surface Self-Nanocrystallization of Metallic Materials[J]. Materials Review, 2007, 21(S1): 2-6.
- [18] LUO Xian, TAN Qi-yang, MO Ning, et al. Effect of Deep Surface Rolling on Microstructure and Properties of AZ91 Magnesium Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(7): 1424-1429.
- [19] 王志明, 李庆达, 汪昊, 等. 超声冲击对 65Mn 钢渗铬层摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 52-59.
- WANG Zhi-ming, LI Qing-da, WANG Hao, et al. Effect of Ultrasonic Impact on the Friction and Wear Properties of Chromized Layer of 65Mn Steel[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 52-59.
- [20] CHEN Gang, FU Yuan-jie, CUI Yun, et al. Effect of Surface Mechanical Attrition Treatment on Corrosion Fatigue Behavior of AZ31B Magnesium Alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 127: 461-469.
- [21] DAI K, SHAW L. Comparison between Shot Peening and Surface Nanocrystallization and Hardening Processes[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 463(1-2): 46-53.
- [22] Li Y G, Lian G H, Geng J W, et al. Effects of Ultrasonic Rolling on the Surface Integrity of in-Situ TiB₂/2024Al Composite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 293: 117068.
- [23] LIU J Y, CHEN D M, SU B. Effects of Ultrasonic Surface Rolling Processing on the Corrosion Properties of Uranium Metal[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 556: 153239.
- [24] DUAN Y, QU S G, JIA S Y. Effects of Ultrasonic Surface Rolling Processing on Microstructure and Wear Properties of High-Carbon High-Chromium Steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 422: 127531.
- [25] 陈新春. 超声滚压加工技术在圆柱面加工中应用的可行性分析[J]. 工程机械, 2018, 49(5): 42-45, 96.
- CHEN Xin-chun. Feasibility Analysis of Ultrasonic Rolling Processing to Cylindrical Surfaces[J]. Construction Machinery and Equipment, 2018, 49(5): 42-45.
- [26] ZHANG Y L, LAI F Q, QU S G, 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.
- [27] WANG P, GUO H, WANG D F, et al. Microstructure and Tribological Performances of M50 Bearing Steel Processed by Ultrasonic Surface Rolling[J]. Tribology International, 2022, 175: 107-118.
- [28] 栾晓圣, 梁志强, 赵文祥, 等. 组织状态对 45CrNiMoVA 钢超声滚压表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2021, 34(4): 74-81.
- LUAN Xiao-sheng, LIANG Zhi-qiang, ZHAO Wen-xiang, et al. Effect of Microstructure on Surface Integrity of 45CrNiMoVA Steel by Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. China Surface Engineering, 2021, 34(4): 74-81.
- [29] LIU R, YUAN S, LIN N M, et al. Application of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification (UNSM) Technique for Surface Strengthening of Titanium and Titanium Alloys: A Mini Review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 351-377.
- [30] 李光辉, 林有希, 蔡建国. 金属材料超声滚压表面强化的研究进展[J]. 工具技术, 2020, 54(1): 3-8.
- LI Guang-hui, LIN You-xi, CAI Jian-guo. Research Progress on Ultrasonic Rolling Surface Strengthening of Metallic Material[J]. Tool Engineering, 2020, 54(1): 3-8.
- [31] 董凯辉, 宋影伟, 韩恩厚. 钛合金耐磨微弧氧化制备技术的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 57-65.
- DONG Kai-hui, SONG Ying-wei, HAN En-hou. Research Progress on the Preparation of Wear-Resistant Micro-Arc Oxidation Coatings on Titanium Alloys[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 57-65.
- [32] 曹振飞, 齐海波, 林齐, 等. 一种高速列车制动盘高熵合金耐磨层组织和性能的研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 30-35.
- CAO Zhen-fei, QI Hai-bo, LIN Qi, et al. Microstructure and Properties of High Entropy Alloy Wear-Resistant Layer for High-Speed Train Brake Disc[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 30-35.
- [33] 刘瑾, 马磊. 金属减磨修复技术助力工业节能降耗[N]. 经济日报, 2010-05-18(13).
- LIU Jin, MA Lei. Metal Wear Reduction and Repair Technology Helps Industry Save Energy and Reduce Consumption[N]. Economic Daily, 2010-05-18(13).
- [34] ZHANG Y L, HUANG L M, LU F, et al. Effects of Ultrasonic Surface Rolling on Fretting Wear Behaviors of a Novel 25CrNi2MoV Steel[J]. Materials Letters, 2021, 284: 128955.
- [35] LI G, QU S G, PAN Y X, et al. Effects of the Different Frequencies and Loads of Ultrasonic Surface Rolling on Surface Mechanical Properties and Fretting Wear Resistance of HIP Ti-6Al-4V Alloy[J]. Applied Surface Science, 2016, 389: 324-334.
- [36] MENG Y, DENG J X, ZHANG Y, et al. Tribological Properties of Textured Surfaces Fabricated on AISI 1045 Steels by Ultrasonic Surface Rolling under Dry Reciprocating Sliding[J]. Wear, 2020, 460-461: 203488.
- [37] LAI F Q, QU S G, LEWIS R, et al. The Influence of Ultrasonic Surface Rolling on the Fatigue and Wear Properties of 23-8N Engine Valve Steel[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 299-313.
- [38] 李斌, 董丽虹, 王海斗, 等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 106-118.
- LI Bin, DONG Li-hong, WANG Hai-dou, et al. Research Progress on Corrosion Fatigue of Aerospace Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 106-118.
- [39] 王延朋, 丁昊昊, 邹强, 等. 列车车轮踏面滚动接触疲劳研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 120-128.
- WANG Yan-peng, DING Hao-hao, ZOU Qiang, et al. Research Progress on Rolling Contact Fatigue of Railway Wheel Treads[J]. Surface Technology, 2020, 49(5): 120-128.
- [40] LIU C S, LIU D X, ZHANG X H, et al. Improving Fatigue Performance of Ti-6Al-4V Alloy via Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(8): 1555-1562.
- [41] LIU Y X, CHEN H, WANG R Z, et al. Fatigue Behaviors of 2205 Duplex Stainless Steel with Gradient Nanostructured Surface Layer[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 147: 106170.
- [42] XU X C, LIU D X, ZHANG X H, et al. Mechanical and Corrosion Fatigue Behaviors of Gradient Structured 7B50-T7751 Aluminum Alloy Processed via Ultrasonic Surface Rolling[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 40: 88-98.
- [43] HUANG H W, WANG Z B, LU J, et al. Fatigue Behaviors of AISI 316L Stainless Steel with a Gradient Nanostructured Surface Layer[J]. Acta Materialia, 2015, 87: 150-160.
- [44] 郑晓东, 林有希, 蔡建国. 超声滚压加工材料腐蚀行为的研究进展[J]. 热加工工艺, 2022, 51(2): 1-5.
- ZHENG Xiao-dong, LIN You-xi, CAI Jian-guo. Research Progress in Corrosion Behavior of Materials Processed by Ultrasonic Rolling[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(2): 1-5.
- [45] YE H, SUN X, LIU Y, et al. Effect of Ultrasonic Surface Rolling Process on Mechanical Properties and Corrosion Resistance of AZ31B Mg Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 372: 288-298.
- [46] XU X C, LIU D X, ZHANG X H, et al. Influence of Ultrasonic Rolling on Surface Integrity and Corrosion Fatigue Behavior of 7B50-T7751 Aluminum Alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 125: 237-248.
- [47] XU Xing-chen, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua, et al. Effects of Ultrasonic Surface Rolling on the Localized Corrosion Behavior of 7B50-T7751 Aluminum Alloy[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(3): 738.
- [48] XIA T, ZENG L, ZHANG X, et al. Enhanced Corrosion Resistance of a Cu10Ni Alloy in a 3.5 wt% NaCl Solution by Means of Ultrasonic Surface Rolling Treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 363: 390-399.
- [49] ZHANG Qing-long, HU Zhan-qi, SU Wen-wen, et al. Microstructure and Surface Properties of 17-4PH Stainless Steel by Ultrasonic Surface Rolling Technology[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 321: 64-73.

- [50] 岳亮亮, 马保吉. 超声表面滚压对 AZ31B 镁合金腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(6): 560-568.
YUE Liang-liang, MA Bao-ji. Effect of Ultrasonic Surface Rolling Process on Corrosion Behavior of AZ31B Mg-Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(6): 560-568.
- [51] 刘莉, 李瑛, 王福会. 钝性纳米金属材料的电化学腐蚀行为研究: 钝化膜生长和局部点蚀行为[J]. 金属学报, 2014, 50(2): 212-218.
LIU Li, LI Ying, WANG Fu-hui. Electrochemical Corrosion Behavior of Nanocrystallized Materials: Growth of Passive Film and Local Pitting Corrosion[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(2): 212-218.
- [52] 陶冠羽. 超声滚压处理用于集输管线钢表面防护的可行性预研[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
TAO Guan-yu. Feasibility Study on Ultrasonic Rolling Process for Steel Surface Protection of Gathering Pipeline[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [53] LIU J B, ZHANG X H, CUI Z Y, et al. Effects of Ultrasonic Surface Rolling Processing and Plasma Nitriding on the Fretting Wear Behavior of Inconel 690TT[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 402: 126312.
- [54] SHE Ding-shun, LIU Shi-hao, KANG Jia-jie, et al. Abrasive Wear Resistance of Plasma-Nitrided Ti Enhanced by Ultrasonic Surface Rolling Processing Pre-Treatment[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2019, 12(19): 3260.
- [55] 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.
- [56] 魏征, 马保吉, 李龙, 等. 镁合金表面超声滚压预处理对微弧氧化膜耐蚀性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(1): 117-124.
WEI Zheng, MA Bao-ji, LI Long, et al. Effect of Ultrasonic Rolling Pretreatment on Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coating of Mg-Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(1): 117-124.
- [57] MENG Y, DENG J X, LU Y, et al. Fabrication of AlTiN Coatings Deposited on the Ultrasonic Rolling Textured Substrates for Improving Coatings Adhesion Strength[J]. Applied Surface Science, 2021, 550: 149394.
- [58] LI G, QU S G, GUAN S, et al. Study on the Tensile and Fatigue Properties of the Heat-Treated HIP Ti-6Al-4V Alloy after Ultrasonic Surface Rolling Treatment[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 379: 124971.
- [59] 鲁金忠, 季仕杰, 吴刘军, 等. 激光冲击-超声滚压复合工艺对 AZ91D 镁合金力学性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4): 1301-1309.
LU Jin-zhong, JI Shi-jie, WU Liu-jun, et al. Effect of Laser Shock Peening and Ultrasound Surface Rolling Combined Processes on Mechanical Properties of AZ91D Mg Alloy[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(4): 1301-1309.
- [60] WANG Zhen, XIAO Zhi-yu, HUANG Chuan-shou, et al. Influence of Ultrasonic Surface Rolling on Microstructure and Wear Behavior of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2017, 10(10): 1203.
- [61] FU Hai, LIANG Yi-long. Study of the Surface Integrity and High Cycle Fatigue Performance of AISI 4340 Steel after Composite Surface Modification[J]. Metals, 2019, 9(8): 856.
- [62] YE H, ZHU J, LIU Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Cladded CrNi Alloy by Hard Turning (HT) and Ultrasonic Surface Rolling (USR)[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 393: 125806.
- [63] WANG H B, SONG G L, TANG G Y. Enhanced Surface Properties of Austenitic Stainless Steel by Electropulsing-Assisted Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 282: 149-154.
- [64] 许金宝, 唐国翌, 卢德文, 等. 电脉冲对 6061 铝合金超声滚压表面力学性能与显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(18): 90-95.
XU Jin-bao, TANG Guo-yi, LU De-wen, et al. Effects of Electropulsing on Surface Mechanical Properties and Microstructure of 6061 Aluminum Alloy during Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(18): 90-95.
- [65] SUN Y G, WANG H B, LIU W, et al. Improvement of Surface Resistance to Cavitation Corrosion of Nickel Aluminum Bronze by Electropulsing-Assisted Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 368: 215-223.
- [66] LI Gang, QU Sheng-guan, XIE Ming-xin, et al. Effect of Multi-Pass Ultrasonic Surface Rolling on the Mechanical and Fatigue Properties of HIP Ti-6Al-4V Alloy[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2017, 10(2): 133.
- [67] 蒋书祥. 热力耦合高速二维超声滚压表面形变强化机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
JIANG Shu-xiang. Research on the Mechanism of Surface Strain Strengthening in Thermo-Mechanical Coupling High Speed Two-Dimensional Ultrasonic Rolling Process[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.
- [68] 巩贤宏. 温度场辅助超声滚压强化 Inconel718 合金表面完整性和机械性能的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
GONG Xian-hong. Influence of Ultrasonic Roller Burnishing Coupled with Warm Treatment on Surface Integrity and Mechanical Behaviors of Inconel718 Alloy[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.

责任编辑: 刘世忠