

超声表面滚压加工对 20CrMoH 钢 摩擦磨损性能的影响

屈盛官^{1,2}, 吴志兵^{1,2}, 张亚龙^{1,2}, 王金涛^{1,2}, 李小强^{1,2}, 耿建伟³, 邓云庆³

(1. 国家金属材料近净成形工程技术研究中心, 广州, 510640; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640; 3. 珠海飞马传动机械有限公司, 广东 珠海 519060)

摘要: 目的 提高 20CrMoH 钢的耐磨性能。方法 设置不同的超声滚压力 (700、1000、1300 N) 与次数 (3、6 次), 对 20CrMoH 钢进行超声表面滚压加工。采用扫描电子显微镜、粗糙度测量仪、光学显微镜、显微硬度测量仪、X 射线应力分析仪、端面型滑动磨损试验机和 3D 形貌仪等设备, 分别对加工前后试样的表面形貌、粗糙度、金相组织、显微硬度、表面残余压应力和摩擦磨损等性能进行对比分析。结果 经过超声表面滚压加工的试样, 与未处理试样相比, 在各项性能上都有较大的提升。表面形貌更加光整, 粗糙度 R_a 从 $0.82\ \mu\text{m}$ 下降至 $0.331\ \mu\text{m}$; 表面显微硬度从 $760\text{HV}_{0.2}$ 提高到 $856\text{HV}_{0.2}$, 提升了 12.63%; 表面残余压应力从 $-286\ \text{MPa}$ 提高到 $-565\ \text{MPa}$; 磨损机制从未处理试样的以磨粒磨损和疲劳磨损为主转变为以磨粒磨损和氧化磨损为主。试样在 1000 N 的作用力下进行 6 次超声滚压加工后, 材料的耐磨性能最好, 与未处理试样相比, 稳态平均摩擦系数大幅下降, 磨损体积从 $2.29\ \text{mm}^3$ 减小到 $0.74\ \text{mm}^3$, 减小了 67.69%。结论 超声表面滚压加工能有效改善 20CrMoH 钢试样的表面质量, 细化表层晶粒组织, 增加表面硬度与表面残余压应力, 显著提升材料的耐磨性能。

关键词: 20CrMoH 钢; 超声表面滚压; 显微硬度; 残余压应力; 摩擦磨损

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)02-0211-12

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.02.020

Effect of Ultrasonic Surface Rolling on Friction and Wear Properties of 20CrMoH Steel

QU Sheng-guan^{1,2}, WU Zhi-bing^{1,2}, ZHANG Ya-long^{1,2}, WANG Jin-tao^{1,2},
LI Xiao-qiang^{1,2}, GENG Jian-wei³, DENG Yun-qing³

(1. National Engineering Research Center of Near-Net-Shape Forming for Metallic Materials, Guangzhou 510640, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Sima Transmission Machinery Co. Ltd., Zhuhai 519060, China)

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-07-27

Received: 2021-03-25; Revised: 2021-07-27

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2020B090926003); 珠海市产学研合作项目 (ZH22017001200011PWC); 广东省自然科学基金 (2021A1515010550)

Fund: Key Area R & D Program of Guangdong Province (2020B090926003); Zhuhai Industry, Education and Research Cooperation Project (ZH22017001200011PWC); Natural Science Foundation of Guangdong Province of China (2021A1515010550)

作者简介: 屈盛官 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高性能金属材料的制备、精密成形以及机械零部件的摩擦磨损。

Biography: QU Sheng-guan (1966—), Male, Doctor, Professor, Research focus: preparation and precision forming of high-performance metal materials and friction and wear of mechanical parts.

引文格式: 屈盛官, 吴志兵, 张亚龙, 等. 超声表面滚压加工对 20CrMoH 钢摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 211-222.

QU Sheng-guan, WU Zhi-bing, ZHANG Ya-long, et al. Effect of Ultrasonic Surface Rolling on Friction and Wear Properties of 20CrMoH Steel[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 211-222.

ABSTRACT: In order to improve the wear resistance of 20CrMoH steel, different ultrasonic rolling forces (700 N, 1000 N and 1300 N) and passes (3 passes and 6 passes) were applied to perform ultrasonic surface rolling on 20CrMoH steel. The surface morphology, roughness, microstructure, microhardness, surface residual compressive stress and friction and wear properties of the samples before and after ultrasonic surface rolling were analyzed by scanning electron microscope, roughness tester, optical microscope, microhardness tester, X-ray stress analyzer, sliding wear tester of end-face type and 3D profilometer. Compared with the untreated sample, the properties of the samples processed by ultrasonic surface rolling were greatly improved, the surface appearance of material was significantly smoother, the roughness Ra decreased from 0.82 μm to 0.331 μm , the surface microhardness increased from 760HV_{0.2} to 856HV_{0.2}, with an increase by 12.63%, and the surface residual compressive stress increased from -286 MPa to -565 MPa. The wear mechanism changed from predominantly abrasive and fatigue wear of untreated samples to predominantly abrasive and oxidative wear. The wear resistance of the sample was the best after 6 passes of ultrasonic surface rolling under the force of 1000 N. Compared with the untreated sample, the wear volume was reduced from 2.29 mm³ to 0.74 mm³, with a decrease by 67.69%. Ultrasonic surface rolling can effectively improve the surface quality of 20CrMoH steel samples, refine the surface grain structure, increase the surface microhardness and surface residual compressive stress, and significantly improve the wear resistance of the material.

KEY WORDS: 20CrMoH steel; ultrasonic surface rolling; microhardness; residual compressive stress; friction and wear

工业机器人作为高端制造业中的关键产业,越来越受到人们的重视。机器人关节减速器中的齿轮通常在速度和载荷连续变化的情况下工作。在这种环境下,齿轮的表面就必须具有高硬度和良好的耐磨性^[1]。齿轮表面的失效,将直接降低齿轮的疲劳性能和使用寿命^[2-4]。齿轮失效具有多种形式,包括齿面磨损、疲劳断裂、点蚀、塑性变形、折齿、偏载、电蚀等^[5-10],其中以齿面磨损最为常见。齿面磨损贯穿齿轮的整个生命周期,它通过增添或去除齿面材料来改变齿面的平整性和受力分布,从而增大误差,降低精度^[11]。此外,过度磨损还会导致齿轮振动、噪音和发热^[12],降低工作效率和稳定性,诱发其他失效^[13]。因此,必须研究齿轮材料的磨损性能及其增强机理。磨损性能受到齿轮的表面质量、接触副材料的表面硬度、润滑条件与力学性能等多种因素的影响^[14-17]。其中,表面质量是影响磨损性能的主要因素之一。因此,国内外学者对齿轮材料的表面强化加工工艺如喷丸 (Shot Peening, SP)、超声表面滚压 (Ultrasonic Surface Rolling, USR) 等方法进行了研究^[18-19]。杨细莲等^[20]在研究中发现,不同下压量的 USR 加工会影响 AZ31B 镁合金的摩擦磨损性能。Zhao 等^[21]对 300M 钢进行 USR 处理后发现,材料表面缺陷得到修复,表面质量明显提高。Lai 等^[22]研究了 USR 强化对 23-8N 气门钢疲劳性能的影响,发现由 USR 加工所引起的材料表面残余压应力提高、加工硬化和晶粒细化等现象,可以提高材料的疲劳强度和耐磨性。Meng

等^[23]对 AISI 1045 钢进行 USR 表面强化加工后,发现材料的摩擦系数与磨损率都有明显的下降。与传统的表面强化技术相比,超声表面滚压加工不但能够提高材料的抗疲劳、耐磨损等性能,还具有在加工过程中无污染、无切屑、成本低、效率高以及操作简单等优点,目前已被广泛应用于生产制造业的机械加工当中。

20CrMoH 钢具有良好的淬透性和优异的碳氮共渗工艺性,被用于齿轮与轴的制造当中。20CrMoH 渗碳齿轮由于有了 Mo 元素的加入,其淬透性和心部硬度都有了显著的提高^[24]。然而,关于其表面强化工艺与摩擦磨损性能的研究却相对较少,亟待进一步研究。因此,本文以 20CrMoH 钢材料为研究对象,对施加了不同超声表面滚压 (USR) 工艺参数加工的材料表面显微组织、显微硬度、表面形貌、表面残余压应力等进行分析,研究 20CrMoH 钢的摩擦磨损性能与机理,为 20CrMoH 钢超声表面滚压工艺参数的选择提供重要参考。

1 试验

1.1 材料

试验所用的原材料为 20CrMoH 钢,其化学成分见表 1。原材料是直径为 50 mm 的棒料,试验所用为从棒料上切下的 $\phi 45 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的圆盘状试样。其热处理工艺如图 1 所示。将试样置于 920 $^{\circ}\text{C}$ 的气体渗碳

表 1 20CrMoH 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 20CrMoH steel

											wt%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	Ti	Fe
0.220	0.299	1.042	0.137	0.003	1.377	0.177	0.014	0.031	0.042	0.002	Bal.

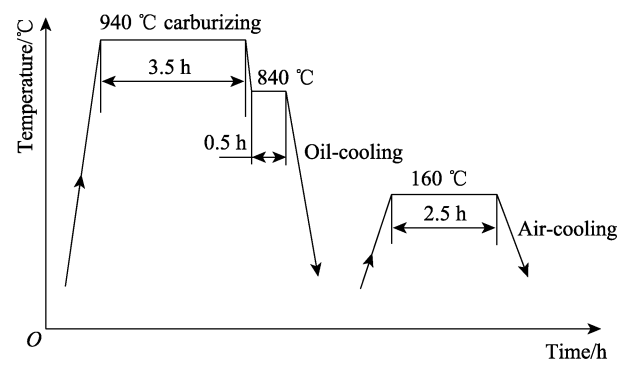


图 1 试样热处理方案
Fig.1 Heat treatment scheme of sample

炉中,交替加入酒精和煤油气体等渗碳剂,渗碳 3.5 h。渗碳后,在炉内冷却至 840 ℃,并放置 0.5 h。然后在淬火油中迅速冷却,在 160 ℃下保温 2.5 h后,空冷回火。在热处理后,对试样进行打磨,以去除表面

脱碳层。然后将其置于超声波清洗机中,清洗并烘干,完成试样的预处理。试样预处理之后的表面硬度大约为 62HRC。

1.2 方法

使用超声滚压设备对试样进行 USR 加工。该设备由卧式车床和豪克能超声滚压装置组成,USR 加工装置如图 2 所示。通过调节气压来控制滚压头施加在垂直于试样表面的作用力。加工过程中,润滑油从滚压头处流出,起到润滑和降温的作用。其中滚压头是表面硬度为 90.5HRA、直径为(10±0.01) mm 的 YG6 硬质合金球。在已有研究^[25]和前期试验的基础上,本试验选择稳定的超声滚压振幅和频率作为固定参数,通过改变对试样施加的超声滚压作用力与次数来探寻合适的工艺参数,具体的 USR 试验参数见表 2。

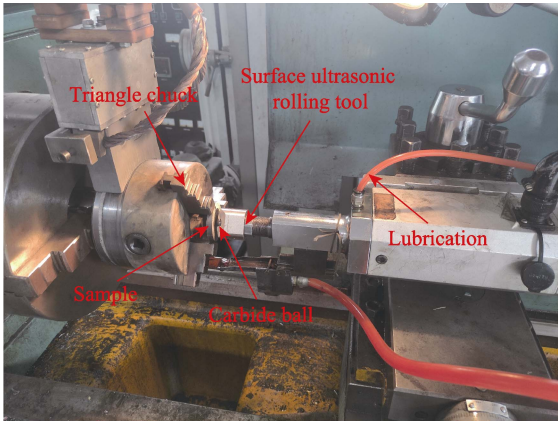
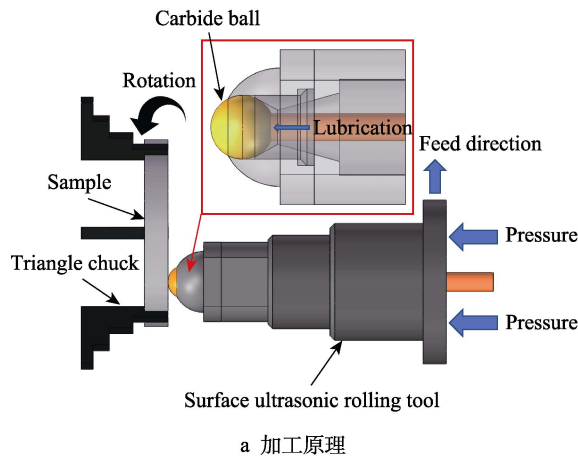


图 2 USR 加工
Fig.2 USR processing: a) processing principle; b) physical object of processing device

表 2 USR 加工参数
Tab.2 Parameters of USR

Sample number	Static force/N	Frequency/kHz	Amplitude/ μm	Passes
USR1	700	27	8	3
USR2	700	27	8	6
USR3	1000	27	8	3
USR4	1000	27	8	6
USR5	1300	27	8	3
USR6	1300	27	8	6

试样进行 USR 加工后,采用 MARUSRF-M300C 粗糙度测量仪,随机测量试样 3 个区域,取平均值。采用 SCTMC-HV50 维氏显微硬度测量仪测试试样截面的硬度分布,施加载荷为 200 g,加载后保压时间为 15 s。使用 4% (体积分数) 的硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀后,采用 LEICA-M165C 光学显微镜观察试

样表面与截面的显微组织。采用 PHILIPS-MRD X 射线应力分析仪测试试样表面残余压应力。采用端面型滑动磨损试验机 (MMU-10G) 对 USR 加工前后的试样进行摩擦磨损试验。采用 RTEC UP DUAL-MODE 3D 形貌仪观察试样的磨损形貌。采用 QUANTA 200 环境扫描电子显微镜观察试样的超声滚压表面及摩擦磨损形貌。

摩擦磨损试验机的原理如图 3 所示。试验选择销-盘的接触模式,其中对磨副是材料为 GCr15 钢、直径为 3 mm 的球头销。经过磨削与抛光加工后,表面粗糙度 R_a 约为 0.8 μm 。将球头销安装于滑动磨损试验机主轴上的夹具中,盘试样固定于试验机主轴下端的台面上。试验时,下端液压缸对试样台施加向上的轴向载荷,使主轴夹具内的销试样与固定于下端试样台上的盘试样紧密接触。紧接着,销试样跟随主轴进行旋转运动,从而在设定的参数下进行销-盘摩擦磨损试验,试验参数见表 3。

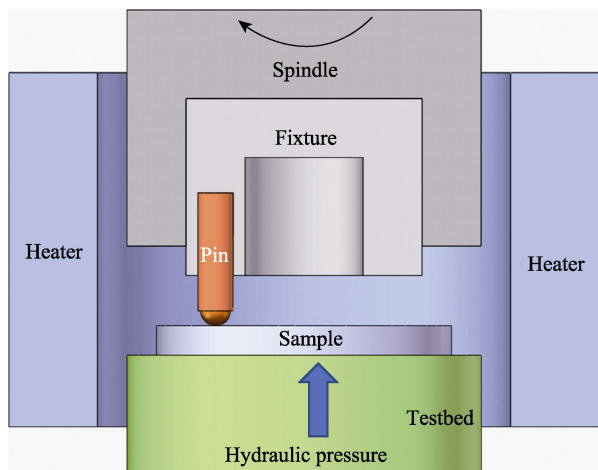


图 3 摩擦磨损试验机原理

Fig.3 Schematic diagram of friction and wear testing machine

表 3 摩擦磨损试验参数

Tab.3 Parameters of friction and wear test

Axial load/N	Temperature/℃	Speed/(r·min ⁻¹)	Time/s
250	25	60	1800

2 结果与讨论

2.1 表面形貌及表面粗糙度分析

USR 加工前后试样的表面 SEM 形貌如图 4 所示。从图 4a 可以清晰地看出, 未处理试样表面存在着大量的磨痕, 部分区域伴随有少量氧化皮。经过 USR 加工后, 各试样的表面磨痕都趋于平整, 表面质量得到了改善。从图 4b—g 可见, 试样 USR1 与 USR2 的

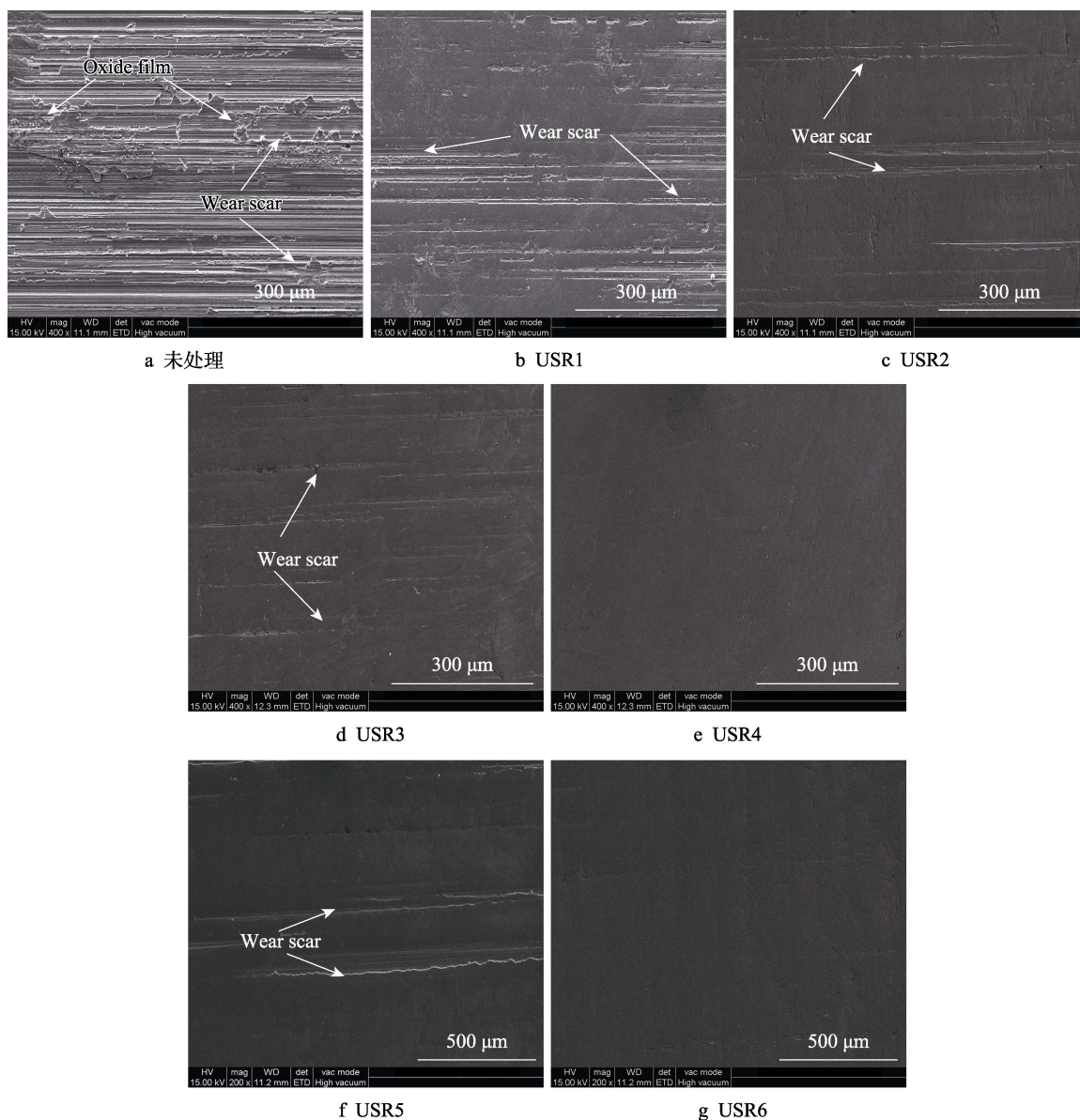


图 4 未处理与 USR 加工试样表面 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of surface morphology of untreated (a) and USR treated samples (b)—(g)

表面质量相较于未处理试样有所提升,但表面磨痕比较明显;试样 USR3 与 USR5 表面质量相较于 USR1 的提升效果更加显著,但仍然存在少量深度较浅的磨痕,并没有达到光整的效果;而试样 USR4 与 USR6 的表面磨痕基本消失,扫描电镜下几乎没有观察到缺陷,表面质量得到明显提升。说明 USR 加工时,较小的超声滚压作用力与次数都不足以使试样表面达到光整。在 1000 N 与 1300 N 的作用力下,超声滚压 6 次后,试样表面质量的改善效果较好。Bozdana 等^[26]研究指出,在较低的静力作用下,USR 加工不能使试样表面达到平整,但 USR 加工能使试样局部变形,产生热量,从而降低其塑性变形的抗性,使塑性变形更容易发生^[27]。因此,在一定范围内,增加超声滚压的作用力与次数,使试样表层发生更大程度的塑性变形,试样表面质量的改善效果就越明显。

未处理与 USR 加工试样的表面粗糙度如图 5 所示。未处理试样的表面粗糙度 R_a 为 $0.82\ \mu\text{m}$, 经过 USR 加工处理后, R_a 有了明显的下降, USR1—USR6 的表面粗糙度分别为 0.540 、 0.392 、 0.361 、 0.334 、 0.360 、 $0.331\ \mu\text{m}$, 其中试样 USR4 与试样 USR6 的表面粗糙度下降最为明显,较未处理试样分别下降了 59.27% 和 59.63% 。说明试样分别在 1000 N 与 1300 N 的作用力下,超声滚压 6 次所获得的表面粗糙度更好,这与试样表面形貌的分析结果相同。因为在 USR 加工过程中,超声滚压刀具上滚压头的高频振动冲击能够促进试样表面材料的塑性流动,试样表面的凹进区域逐渐被凸起材料所填满,从而表面缺陷得到一定程度的修复。因此,与常规表面滚压相比,USR 加工试样的表面粗糙度进一步降低^[28]。Liu 等^[29]在研究钛合金经过 USR 加工后的表面形貌时,观察到了相似的现象。这表明在一定的范围内提高 USR 加工时的超声滚压作用力与次数,有助于提升材料的表面质量。

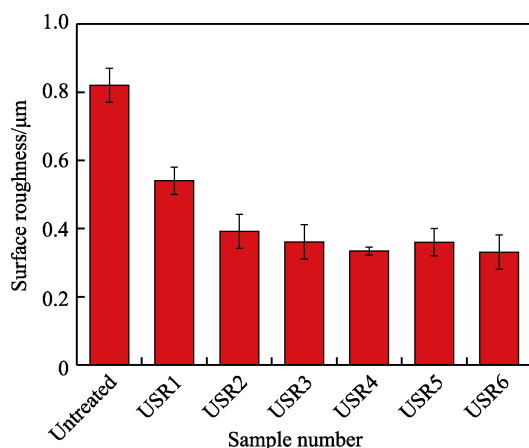


图 5 未处理与 USR 加工试样的表面粗糙度
Fig.5 Surface roughness of untreated and USR treated samples

2.2 显微硬度及显微组织分析

未处理与 USR 加工试样截面的显微硬度随深度的分布曲线如图 6 所示。由图 6 可知,未处理试样的显微硬度沿深度上变化较小,显微硬度约为 $760\text{HV}_{0.2}$; 经过 USR 加工的试样,显微硬度都有明显的增大,且表面硬度值最高, USR1—USR6 的显微硬度分别为 $786\text{HV}_{0.2}$ 、 $796\text{HV}_{0.2}$ 、 $808\text{HV}_{0.2}$ 、 $828\text{HV}_{0.2}$ 、 $832\text{HV}_{0.2}$ 、 $856\text{HV}_{0.2}$ 。可以看出,随着超声滚压作用力与次数的提高,材料表层的显微硬度越来越大。其中,试样 USR6 的表面硬度最大,相较于未处理试样,提升了 12.63% ,强化效果达到 $180\ \mu\text{m}$ 。说明 USR 加工能够在试样表面形成一个变质层,并且增大超声滚压的作用力与次数,产生变质层的作用效果更明显。随着截面深度的增加,显微硬度逐渐减小,在达到一定深度时,与未处理试样的显微硬度趋于一致,说明超声滚压产生变质层的效果随着截面深度的增加而逐渐减弱。

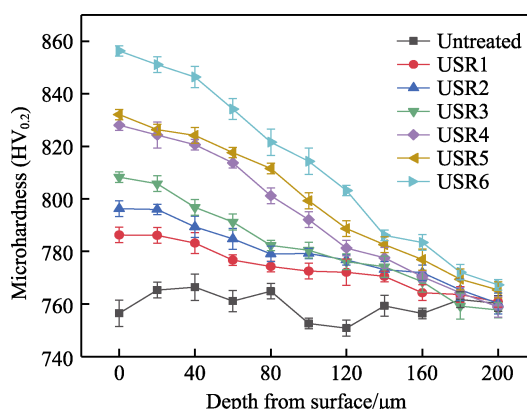


图 6 未处理与 USR 加工试样截面显微硬度分布
Fig.6 Cross-sectional microhardness distribution of untreated and USR treated samples

USR 加工时,由于超声振动的存在,滚压头可以对金属材料表面产生较大的冲击,进而使金属材料表面发生较大的塑性变形及表层组织细化^[30]。未处理与 USR 加工试样的表面金相组织如图 7a—g 所示, USR 加工前后,试样的表面显微组织均主要为板条状马氏体。可以看出,未处理试样的表面组织较为粗大,都呈现为“粗条状”。经过 USR 加工后,试样表层组织都出现了明显的细化现象,并且随着超声滚压作用力与次数的增加,晶粒细化的效果更加明显。图 7h 为试样 USR6 的截面金相组织,可以看出,在 1300 N 作用力下超声滚压 6 次后,试样表层材料发生了较为剧烈的塑性变形,表层材料晶粒与深层材料相比有明显的差异,细化深度约为 $68\ \mu\text{m}$,细化效果由表层到深层逐渐降低。林子龙等^[31]认为,USR 加工对试样引入了垂直于表面方向的压应力,试样的表面材料发生塑性变形,并向内部延伸,使表层材料组织产生位错,晶胞发生位移,同时位错密度也增大。为了平衡

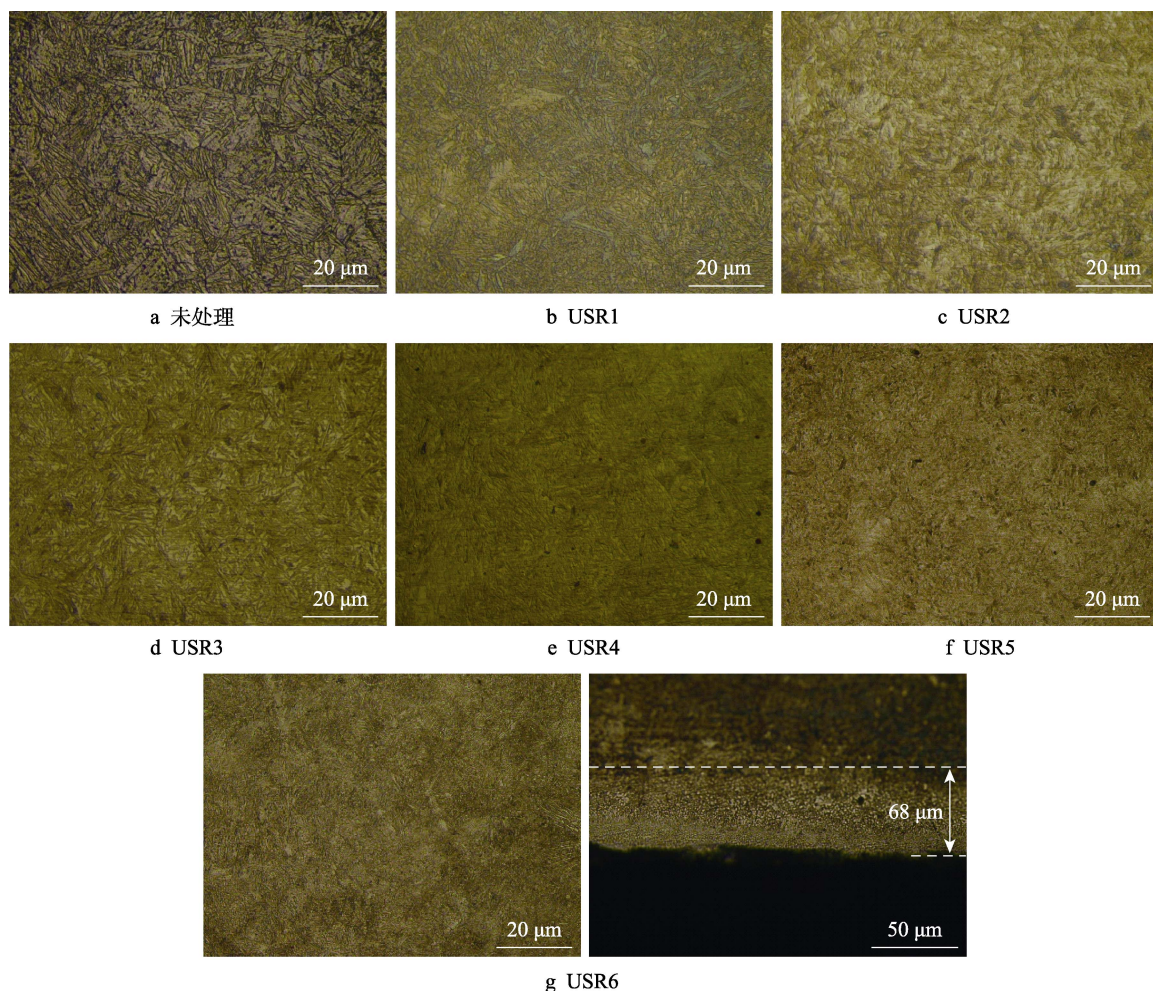


图7 未处理与 USR 加工试样金相组织
Fig.7 Optical microstructure of untreated (a) and USR treated samples (b)—(g)

系统的能量,晶粒组织在位错墙的附近发生湮灭、重排,产生新晶界,从而使晶粒组织细化。随着深度的增大,材料表层显微组织所受压应力逐渐减小,晶粒细化的效果也逐渐降低。

结合图6分析可知,材料表层硬度的增加,主要是晶粒细化所致。对于多晶体材料而言,其强度或硬度随着晶粒尺寸的变化通常服从 Hall-Petch 关系^[32]。通常情况下,晶界对位错运动存在阻碍作用。多晶体内部有位错运动发生时,由于晶界两侧晶粒的取向不同,在晶界附近的位错运动存在很大阻碍,不能直接穿过晶界进入到另一个晶粒中。又因晶界上的形变具有协调性要求,因此在晶界处的变形必须连续,这就导致位错无法穿过而在晶界附近产生塞积,从而使硬度增大。当材料发生晶粒细化后,组织中的晶界占比大幅上升,因此位错运动就受到更大的阻力,这样便使材料得到了强化^[33]。在对试样进行 USR 加工时,超声滚压作用力与次数的增加,使得试样表层材料发生塑性变形的程度增大,从而使材料组织的位错密度增加,晶粒细化更加明显,因此硬度也越大。

2.3 表面残余压应力分析

未处理与 USR 加工试样的表面残余压应力如图8所示。未处理试样的表面残余压应力为 -286 MPa ,这主要是在试样渗碳及机加工等过程中产生的。经过 USR 加工后,试样 USR1—USR6 表面的残余压应力都得到了不同程度的提高,分别为 -417 、 -519 、 -536 、 -565 、 -502 、 -326 MPa 。其中,试样 USR4 的表面残余压应力最大,即在 1000 N 作用力下超声滚压 6 次所获得的表面残余压应力提升最为明显。表面残余压应力是材料内部不均匀塑性变形而产生的结果,从微观的角度来说,其本质就是晶格畸变^[34]。在对试样进行 USR 加工时,试样表层材料发生不均匀的塑性变形,致使其表层组织发生晶格畸变,从而在材料表层产生了残余压应力。随着超声滚压作用力与次数的增加,材料的塑性变形更加剧烈,使得表面变质层深度增加,所以残余压应力的大小也随之变化。当残余压应力达到临界值时,继续增加超声滚压作用力或次数,就会导致材料表面的动态再结晶行为加剧,这一过程会引起残余压应力的释放^[33]。因此,试样 USR5 与

USR6 的表面残余压应力相较于 USR4 又有所下降。表面残余压应力的存在可以增大试样表面的疲劳抗性和塑性变形抗性,能够有效提升材料的耐磨性^[35]。

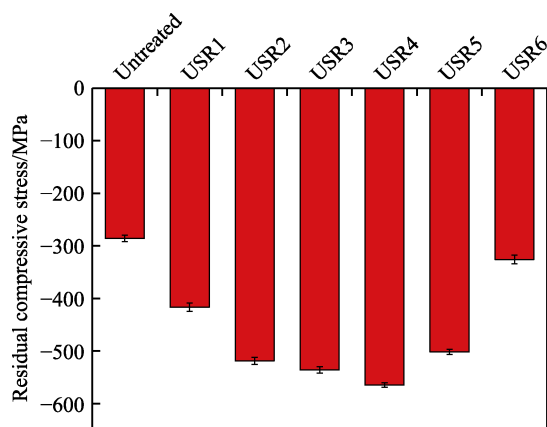


图 8 未处理与 USR 加工试样表面残余压应力
Fig.8 Surface residual compressive stress of untreated and USR treated samples

2.4 摩擦磨损性能分析

未处理与 USR 加工试样在摩擦磨损试验时,摩擦系数随时间的变化曲线如图 9 所示。从图 9a 可以看出,在磨损的初始磨合阶段,未处理试样的摩擦系数急剧升高。这主要是因为未处理试样表面粗糙度较大,存在大量凹凸不平的缺陷,在粗糙峰与摩擦副进行摩擦时,压力较高,抗剪切能力较大;进入稳定磨损阶段后,摩擦系数的波动范围仍然较广,这说明试样的磨损剧烈。经过 USR 加工后,试样的摩擦系数在初始阶段就有逐渐增大的趋势,如图 9b—g 所示。这主要是因为试样的表面质量较高,粗糙度小,摩擦阻力也小,但是在经过一段时间的磨损后,对磨副中 2 种材料表面都被不同程度地磨损,球头销与试样盘的接触方式由点接触转变为面接触,并在表面产生磨屑和犁沟,因此摩擦系数有逐渐增大的趋势。随着摩擦磨损试验的进行,试样开始进入稳定磨损的阶段,摩擦系数也逐渐趋于平稳。

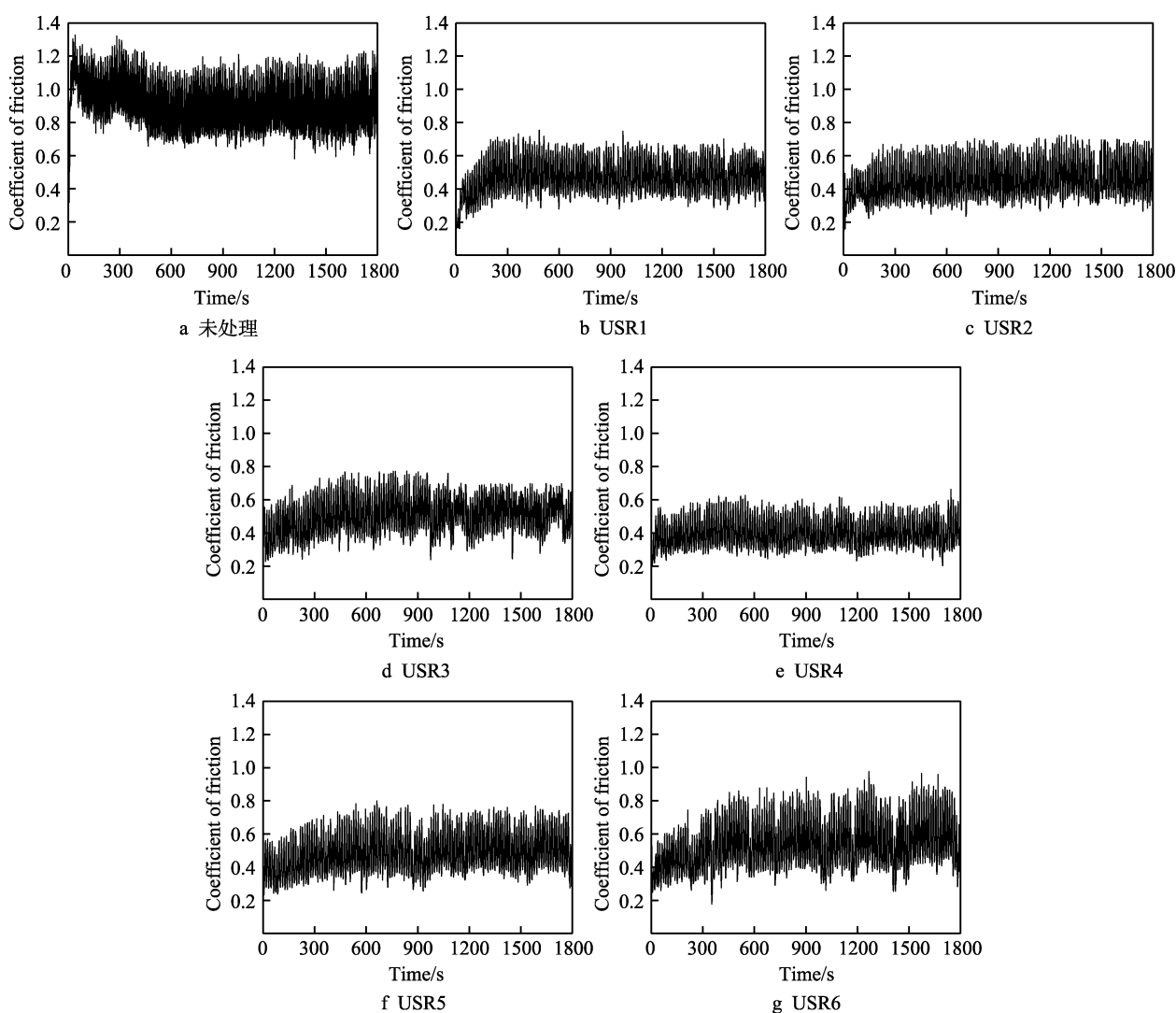


图 9 未处理与 USR 加工试样的摩擦系数曲线
Fig. 9 Friction coefficient curves of untreated (s) and USR treated samples (b)—(g)

未处理与 USR 加工试样的稳态平均摩擦系数如图 10 所示,未处理试样的稳态平均摩擦系数为 0.871, 经过 USR 加工处理后, 稳态平均摩擦系数大幅下降, 分别为 0.472、0.449、0.465、0.399、0.457、0.486。Wang 等^[36]在对 40Cr 合金钢进行 USR 表面强化时, 也发现了 USR 加工处理能够有效降低试样的摩擦系数。这是因为 USR 加工使试样材料的晶粒尺寸得到细化, 表面硬度增大, 同时在试样表层一定深度上产生的残余压应力能够抵消一部分试样所承受的接触应力, 从而在摩擦磨损过程中表现为摩擦系数降低。可以发现, 试样 USR4 的稳态平均摩擦系数最小, 且在稳定磨损阶段的波动幅度也最小, 稳态平均摩擦系数较未处理试样下降了 54.19%。试样 USR5 和 USR6 与 USR4 相比, 稳态平均摩擦系数又有所升高。这可能是因为 USR 加工时, 对试样施加的作用力过大以及超声滚压次数过多, 使材料表面过硬, 从而导致摩擦磨损性能下降^[37]。

未处理与 USR 加工试样的磨损轮廓与 3D 形貌如

图 11 所示, 其中蓝色区域为凸起部位, 红色区域为凹陷部位。可以看出, 试样磨损的轮廓都大致呈现为 U 字形。由图 11a 可知, 未处理试样的磨损痕深度为 47 μm ,

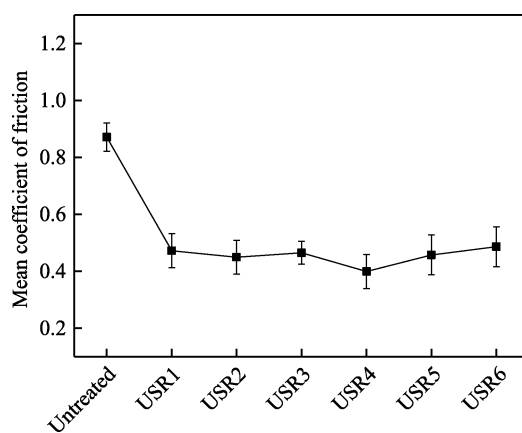


图 10 未处理与 USR 加工试样的稳态平均摩擦系数
Fig.10 Steady-state average friction coefficient of untreated and USR treated samples

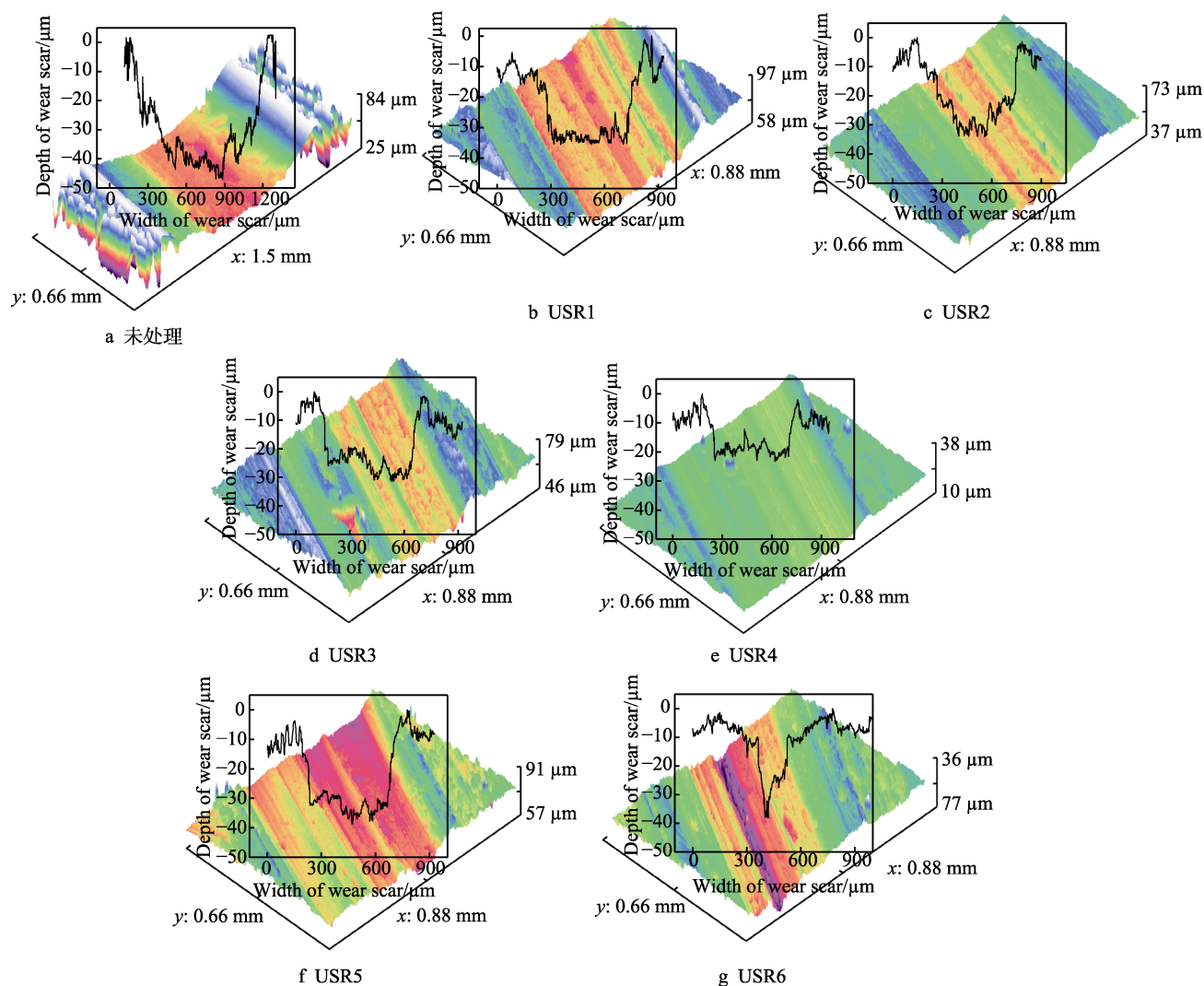


图 11 未处理与 USR 加工试样的摩擦磨损 3D 形貌

Fig.11 3D morphology of friction and wear of untreated (a) and USR treated samples (b)—(g)

磨痕边缘材料有明显的隆起。这是因为未处理试样表面质量较差, 硬度相对较低, 在摩擦时, 边缘区域受到销头的挤压, 从而形成了凸起的毛刺。由图 11b—g 可知, 经过 USR 加工的试样, 磨痕深度都有了明显的减小, USR1—USR6 的磨痕深度分别为 35、33、30、22、37、38 μm 。其中, USR4 试样的磨痕深度最小, 说明 USR 加工能够有效减小试样的磨损深度。

通过观察图 11 中各试样的磨损 3D 形貌可知, 各试样的磨痕都近似为球冠状。因此, 可以通过各试样的磨痕深度来近似计算其磨损体积, 计算公式如式 (1) 所示。

$$V = \left[r^2 \arccos\left(\frac{r-h}{r}\right) - (r-h)\sqrt{2rh-h^2} \right] \times l \quad (1)$$

式中: V 为磨损体积 mm^3 ; r 为销头的半径, mm ; l 为磨痕长度, mm ; h 为磨痕深度, mm 。计算出各组试样的磨损体积如图 12 所示, 其中未处理试样的磨损体积最大, 为 2.29 mm^3 , 而试样 USR1—USR6 的磨损体积都有明显减小, 分别为 1.48、1.35、1.17、0.74、1.60、 1.67 mm^3 。试样 USR4 的磨损体积最小, 与未处理试样相比, 磨损体积下降了 67.69%。与图 8 中残余压应力的结果对照可以发现, 磨损体积更小的现象发生在残余压应力更高的试样上。Amanov 等^[38]的研究结果表明, 由超声表面处理所引起的加工硬化和残余压应力能够提高材料的耐磨性, 并且与加工硬化相比, 残余应力的作用更加明显。综上所述, USR 加工能够有效降低 20CrMoH 钢在摩擦磨损试验中的摩擦系数, 减小磨损体积, 提高它的耐磨性, 尤其是在 1000 N 的作用力下超声滚压 6 次后, 材料耐磨性能提升效果明显。其中, 材料的表面质量、残余压应力和硬度是主要影响因素。

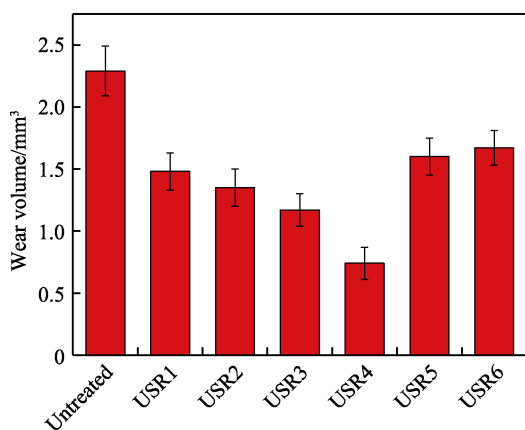


图 12 未处理与 USR 加工试样的磨损体积

Fig.12 Wear volume of untreated and USR treated samples

2.5 磨损机理分析

未处理与 USR 加工试样的摩擦磨损 SEM 形貌如图 13 所示。从图 13a 可以看出, 未处理试样在摩擦磨损试验后, 磨痕宽度与深度较大, 产生的犁沟特征

比较明显, 并附着少量颗粒状的磨屑, 这属于磨粒磨损的典型特征。出现磨粒磨损是因为在摩擦磨损试验过程中, 未处理试样的硬度相对较低, 在球头销与试样进行滑动摩擦时, 球头销对试样表面进行挤压, 并沿滑动方向推动, 部分材料被推挤而堆积在磨痕两侧, 当有磨屑从表面脱落时, 它又被压入试样的磨痕中一起进行摩擦, 在球头销的推动下, 磨痕表面被犁出沟槽, 最终形成了磨粒磨损^[39]。同时, 磨痕表面有大量的疲劳剥落坑, 部分凹坑区域附有大块磨屑, 表明在磨损过程中还存在疲劳磨损机制。此外, 磨痕边缘还存在剪切裂纹以及快被剪切脱落的材料, 这说明在磨损过程中, 试样与球头销接触的区域, 材料发生了较大的剪切变形。这是因为未处理试样的硬度与强度都相对较低, 其表面抵抗塑性变形的能力相对较弱。由此可知, 未处理试样的磨损机制是以磨粒磨损和疲劳磨损为主。由于未处理试样的表面粗糙度较大, 在磨损时, 球头销与试样接触后的相对运动阻力较大, 但表面硬度却相对较小, 抵抗塑性变形的能力就较弱, 从而导致其摩擦系数与磨损体积较大, 这与前面摩擦磨损性能的分析结果一致。

试样 USR1—USR6 的摩擦磨损 SEM 形貌见图 13b—g。可以看出, 经过 USR 加工的试样, 磨痕都出现了磨粒磨损的特征, 但磨痕表面光滑, 磨痕宽度、边缘裂纹和疲劳剥落坑的数量较未处理试样明显减小。说明试样经过 USR 加工后, 疲劳磨损机制大大减弱, 与未处理试样相比, 磨损状态更加平稳, 表明 USR 加工后的试样具有良好的耐磨性能。这是因为 USR 加工使试样表面发生了塑性变形, 引起了表层组织的晶粒细化, 提高了材料表层的显微硬度。此外, 材料表层产生的残余压应力在摩擦过程中能够抵消一部分材料表面所承受的接触应力, 使试样实际承受的接触应力减小。另外, USR 加工试样的磨痕局部区域存在少量的硬质磨屑, 并且有明显的氧化膜出现, 说明在磨损过程中发生了氧化。这是因为经过 USR 加工后, 试样的表面硬度较大, 导致在摩擦时接触区域的瞬时温度较高, 材料在空气中不断生成氧化膜, 最终形成氧化磨损。由此可知, USR 加工试样的磨损机制发生了改变, 是以磨粒磨损和氧化磨损为主。从图 13e 可见, 试样 USR4 的磨痕表面相对其他试样较光滑, 磨痕深度较浅, 氧化膜与剥落坑的数量也较少, 说明在 1000 N 的作用力下超声滚压 6 次后的试样具有优异的耐磨性。试样 USR5 与 USR6 的磨痕表面质量与其他组相比反而更差 (如图 13f、g 所示), 表面出现了较深的犁沟, 被氧化层覆盖的区域增多, 磨痕边缘材料出现了脱落。这是因为试样表面硬度较高, 在磨损过程中, 球头销与试样相互挤压, 导致边缘部分区域凸起, 容易产生较大的应力集中。在球头销的反复作用下, 凸起部分从试样表面分离, 形成高硬度磨粒, 随后落入磨痕区域, 形成试样盘、高硬度磨粒、

球头销的三体磨料磨损,从而使磨痕表面产生更深的犁沟。同时,高硬度磨粒的摩擦,使接触区域的温度急剧升高,导致氧化磨损进一步加剧,从而在摩擦过

程中产生了更多的氧化膜。因此,虽然试样 USR5 与 USR6 具有更高的显微硬度,但是耐磨性能却没有试样 USR4 好。

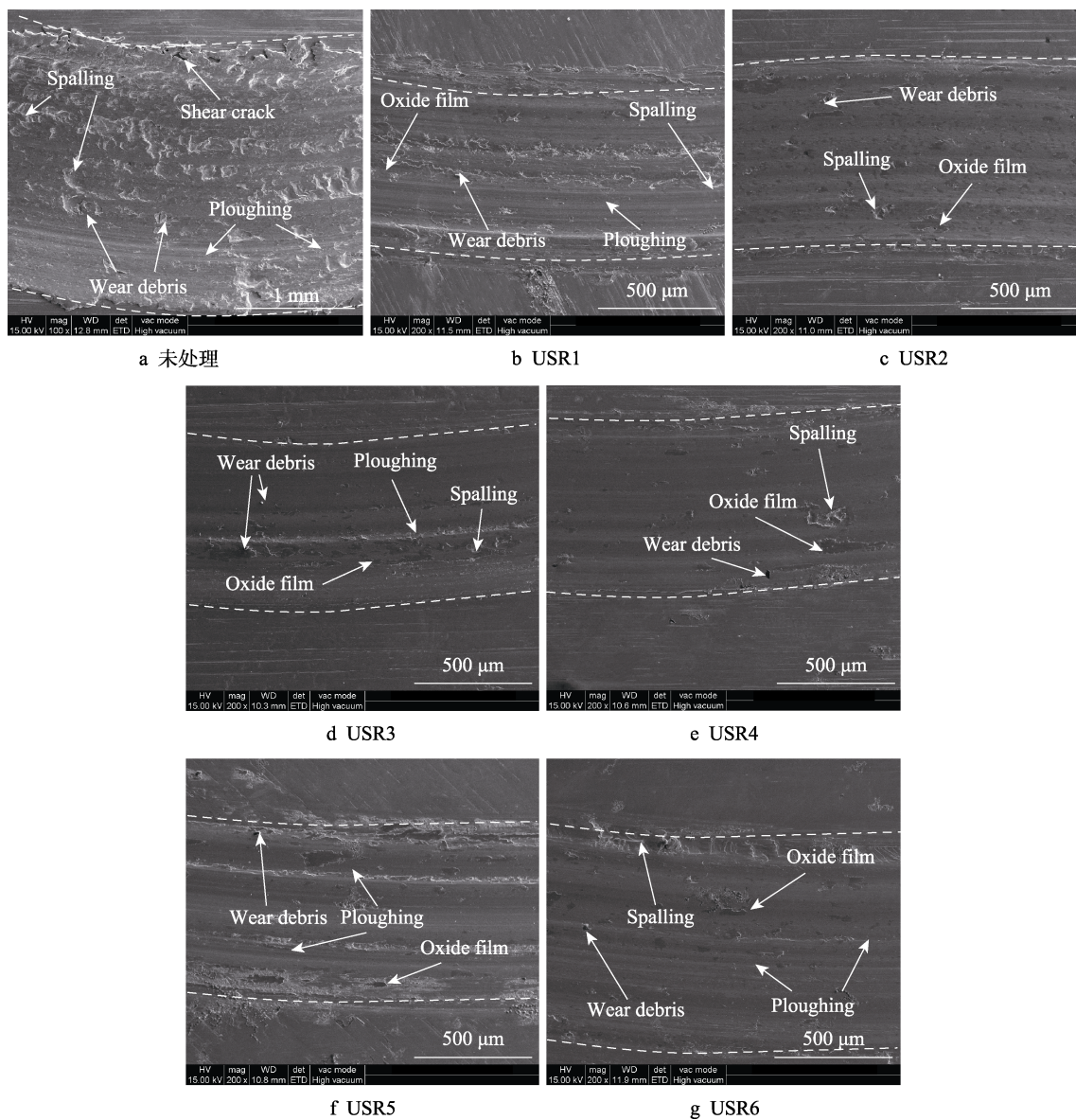


图 13 未处理与 USR 加工试样的摩擦磨损形貌
Fig.13 Friction and wear morphology of untreated and USR treated samples

3 结论

1) 采用 USR 加工工艺能够有效改善 20CrMoH 钢的表面质量,增加试样的表面硬度,细化材料的表层晶粒组织。

2) USR 加工工艺能够增大材料的表面残余压应力。在 1000 N 作用力下超声滚压 6 次,材料表面的残余压应力达到最大。继续增大超声滚压作用力与次数,表面残余压应力反而下降。

3) USR 加工后,20CrMoH 钢的耐磨性能显著提升,材料的表面质量、表面残余压应力和硬度是主要影响因素。与未处理试样相比,摩擦系数与磨损体积

均大幅降低,磨损机制由磨粒磨损与疲劳磨损为主转变为以磨粒磨损与氧化磨损为主。其中,在 1000 N 作用力下超声滚压 6 次后,材料的耐磨性最好,与未处理试样相比,稳态平均摩擦系数和磨损体积分别下降了 54.19%和 67.69%。

参考文献:

- [1] 付海峰,李俏,徐跃明.重载齿轮热处理及应用[J].金属热处理,2020,45(3):178-185.
FU Hai-feng, LI Qiao, XU Yue-ming. Heat Treatment Technologies and Its Application of Heavy Duty Gears[J].

- Heat Treatment of Metals, 2020, 45(3): 178-185.
- [2] LV You, LEI Li-qun, SUN Li-na. Effect of Microshot Peened Treatment on the Fatigue Behavior of Laser-Melted $W_6Mo_5Cr_4V_2$ Steel Gear[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 98: 121-130.
 - [3] FRANCIS A, YANG Y, VIRTANEN S, et al. Iron and Iron-Based Alloys for Temporary Cardiovascular Applications[J]. Journal of Materials Science Materials in Medicine, 2015, 26(3): 138-154.
 - [4] ZHANG P, ZHANG F C, WANG T S. Preparation and Microstructure Characteristics of Low-Temperature Bainite in Surface Layer of Low Carbon Gear Steel[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(17): 7609-7614.
 - [5] 陈敢泽. 齿轮常见的失效形式及预防[J]. 中国特种设备安全, 2008, 24(10): 46-49.
CHEN Gan-ze. Common Failure Forms and Prevention of Gears[J]. China Special Equipment Safety, 2008, 24(10): 46-49.
 - [6] 王春亮, 杨力, 刘乐, 等. 齿轮的失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2007, 43(7): 366-369.
WANG Chun-liang, YANG Li, LIU Le, et al. Failure Analysis of the Gear[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2007, 43(7): 366-369.
 - [7] 徐涛元. 齿轮开裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2009, 45(5): 315-317.
XU Tao-yuan. Cracking Failure Analysis of Gear[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2009, 45(5): 315-317.
 - [8] 龚寄. 齿轮失效分析及其故障诊断方法研究[J]. 装备制造技术, 2016(8): 138-140.
GONG Ji. Failure Analysis and Fault Diagnosis Method of Gear[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(8): 138-140.
 - [9] 陈亮, 吴刚, 谭小明, 等. 大型从动齿轮油槽开裂原因分析[J]. 金属加工(热加工), 2017(3): 14-17.
CHEN Liang, WU Gang, TAN Xiao-ming, et al. Analysis on Cracking Causes of Oil Groove of Large Driven Gear[J]. MW Metal Forming, 2017(3): 14-17.
 - [10] 王荣. 汽车主轴齿轮断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2007, 43(5): 257-259.
WANG Rong. Fracture Analysis of Principal Axis Gear of Car[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2007, 43(5): 257-259.
 - [11] DING H. Dynamic Wear Models for Gear Systems[D]. Ohio: The Ohio State University, 2007.
 - [12] HU Chong-qing, SMITH W A, RANDALL R B, et al. Development of a Gear Vibration Indicator and Its Application in Gear Wear Monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 76-77: 319-336.
 - [13] BRANDÃO J A, MARTINS R, SEABRA J H O, et al. An Approach to the Simulation of Concurrent Gear Micropitting and Mild Wear[J]. Wear, 2015, 324-325: 64-73.
 - [14] CHENG Xia-wei, JIANG Zheng-yi, WEI Dong-bin, et al. Effects of Surface Preparation on Tribological Behaviour of a Ferritic Stainless Steel in Hot Rolling[J]. Wear, 2017, 376-377: 1804-1813.
 - [15] MANDAL G, TEWARY N K, GHOSH S K. Enhancement of Mechanical Properties in Bainitic Steel Processed from Different Austenitization Temperatures[J]. Steel Research International, 2018, 89(2): 1700259.
 - [16] ZHANG Ya-long, QU Sheng-guan, LAI Fu-qiang, et al. Effect of Quenching Temperature on Microstructure and Rolling Contact Fatigue Behavior of $17Cr_2Ni_2MoVNb$ Steel[J]. Metals, 2018, 8(9): 735.
 - [17] WU S C, XU Z W, KANG G Z, et al. Probabilistic Fatigue Assessment for High-Speed Railway Axles Due to Foreign Object Damages[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117: 90-100.
 - [18] UNAL O, VAROL R. Surface Severe Plastic Deformation of AISI 304 via Conventional Shot Peening, Severe Shot Peening and Repeening[J]. Applied Surface Science, 2015, 351: 289-295.
 - [19] 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, 2017, 10(2): 133.
 - [20] 杨细莲, 邹宇, 黄文婷, 等. 超声表面滚压对 AZ31B 镁合金摩擦磨损性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1214-1218.
YANG Xi-lian, ZOU Yu, HUANG Wen-ting, et al. Effects of Ultrasonic Surface Rolling Process on Friction and Wear Properties of AZ31B Mg Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(11): 1214-1218.
 - [21] ZHAO Wei-dong, LIU Dao-xin, ZHANG Xiao-hua, et al. Improving the Fretting and Corrosion Fatigue Performance of 300M Ultra-High Strength Steel Using the Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 30-38.
 - [22] LAI Fu-qiang, QU Sheng-guan, 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.
 - [23] MENG Ying, DENG Jian-xin, ZHANG Yun, 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.
 - [24] 吴凯, 唐进元, 孙思源, 等. 20CrMoH 与 8620H 材料的齿轮热处理变形分析[J]. 机械传动, 2019, 43(2): 89-93.
WU Kai, TANG Jin-yuan, SUN Si-yuan, et al. Analysis of Gear Heat Treatment Deformation of 20CrMoH and 8620H Materials[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(2): 89-93.
 - [25] 马梦阳. 发动机配气机构凸轮——挺柱接触副材料表面超声滚压强化与疲劳行为研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
MA Meng-yang. Study on the Surface Ultrasonic Rolling Strengthening and Fatigue Behavior of the Cam-Tappet Contact Pair Material of Engine Valve Train[D]. Guang-

- zhou: South China University of Technology, 2020.
- [26] BOZDANA A T, GINDY N N Z. Comparative Experimental Study on Effects of Conventional and Ultrasonic Deep Cold Rolling Processes on Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Technology, 2008, 24(11): 1378-1384.
- [27] YU Xing-bo, WANG Li-jiang. Effect of Various Parameters on the Surface Roughness of an Aluminium Alloy Burnished with a Spherical Surfaced Polycrystalline Diamond Tool[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(3): 459-469.
- [28] 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.
- [29] LIU Dan, LIU Dao-xin, GUAGLIANO M, et al. Contribution of Ultrasonic Surface Rolling Process to the Fatigue Properties of TB8 Alloy with Body-Centered Cubic Structure[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 61: 63-74.
- [30] 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): 42-67.
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): 42-67.
- [31] 林子龙, 赵秀娟, 任瑞铭, 等. 表面超声滚压对 D2 车轮钢磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(6): 83-87.
LIN Zi-long, ZHAO Xiu-juan, REN Rui-ming, et al. Effect of Surface Ultrasonic Rolling Process on Wear Performance of D2 Wheel Steel[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(6): 83-87.
- [32] PANDE C S, MASUMURA R A, ARMSTRONG R W. Pile-up Based Hall-Petch Relation for Nanoscale Materials[J]. Nanostructured Materials, 1993, 2(3): 323-331.
- [33] 黄卓笑, 张显程, 涂善东, 等. 表面深滚处理对纯镍组织性能及残余应力分布的影响[J]. 航空材料学报, 2016, 36(1): 39-47.
HUANG Zhuo-xiao, ZHANG Xian-cheng, TU Shan-dong, et al. Effects of Surface Deep Rolling Treatment on Mechanical Properties and Residual Stress Field in Pure Nickel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(1): 39-47.
- [34] 程晓宇, 王晓梅. 残余应力的本质及其调整[J]. 全面腐蚀控制, 2009, 23(7): 33-35.
CHENG Xiao-yu, WANG Xiao-mei. Essence of Residual Stress and Adjust[J]. Total Corrosion Control, 2009, 23(7): 33-35.
- [35] SUH C M, SONG G H, SUH M S, et al. Fatigue and Mechanical Characteristics of Nano-Structured Tool Steel by Ultrasonic Cold Forging Technology[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 443(1-2): 101-106.
- [36] WANG Ting, WANG Dong-po, LIU Gang, et al. Investigations on the Nanocrystallization of 40Cr Using Ultrasonic Surface Rolling Processing[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 1824-1829.
- [37] REN Zhao-jun, LAI Fu-qiang, QU Sheng-guan, et al. Effect of Ultrasonic Surface Rolling on Surface Layer Properties and Fretting Wear Properties of Titanium Alloy $Ti_5Al_4Mo_6V_2Nb_1Fe$ [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 389: 125612.
- [38] AMANOV A, CHO I S, KIM D E, et al. Fretting Wear and Friction Reduction of CP Titanium and Ti-6Al-4V Alloy by Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 207: 135-142.
- [39] RAI P K, SHEKHAR S, MONDAL K. Effects of Grain Size Gradients on the Fretting Wear of a Specially-Processed Low Carbon Steel Against AISI E52100 Bearing Steel[J]. Wear, 2018, 412-413: 1-13.

(上接第 192 页)

- [23] 赵晓男, 陈光雄, 崔晓璐, 等. 高速列车车轮多边形磨损的形成机理及影响因素探究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 8-13.
ZHAO Xiao-nan, CHEN Guang-xiong, CUI Xiao-lu, et al. Formation Mechanism and Influencing Factors of the Polygonal Wear of High-speed Train Wheels[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 8-13.
- [24] 崔晓璐, 黄博, 陈光雄. 抑制轮轨摩擦自激振动的扣件结构多参数拟合研究[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 68-74.
CUI Xiao-lu, HUANG Bo, CHEN Guang-xiong. Research on Multi-Parameter Fitting of Fastener Structures to Suppress Wheel-Rail Friction Self-excited Vibration[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1): 68-74.
- [25] PERSSON I, IWICKI S. Optimisation of Railway Wheel Profiles Using a Genetic Algorithm[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41: 517-526.