

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.09.006

激光喷丸处理对铁基熔覆层的组织演变和磨损性能的影响

钱绍祥

(镇江市高等专科学校 现代装备制造学院, 江苏 镇江 212028)

摘要: 为改善传统激光熔覆制备过程中产生的气孔、微裂纹、残余应力等质量问题, 提高熔覆层的力学性能, 采用激光喷丸 (Laser peening, LP) 后处理铁基熔覆层, 对比分析激光喷丸处理前后熔覆层的微观组织演变规律和磨损性能机理。结果发现, 经 LP 处理后, 熔覆层中没有发生相变, (110) 晶面衍射峰产生了宽化效应, 细化了表层的晶粒, 改变了表面复杂的残余应力场, 获得了均匀分布的残余压应力, 显微硬度为激光喷丸处理前的 1.3 倍, 摩擦系数相较于激光喷丸处理前降低了 25%, 有效的增强了熔覆层的磨损性能。

关键词: 激光熔覆; 激光喷丸; 显微组织; 残余应力; 磨损性能

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A

Effects of laser peening on the microstructure evolution and wear performance of Fe-based cladding layer

Qian Shaoxiang

(School of Modern Equipment Manufacturing, Zhenjiang College, Zhenjiang 212028, China)

Abstract: Aimed to eliminate the defects such as pore, microcrack and residual stress in traditional laser cladding layers, and improved cladding layer's mechanical property, Fe-based cladding layer was post-processed by laser peening(LP), microstructure evolution and wear mechanism of cladding layer before and after LP were comparative analyzed. The results show that, after LP process, there was no phase transition in the cladding layer, the broadening effect was generated on (110) crystal plane diffraction peak, grains of the surface layer were refined, the complex residual stress field on the surface of the cladding layer was changed, the uniformly distributed residual compressive stress was obtained, the layer's microhardness was 1.3 times of that before LP, the layer's friction coefficient is 25% lower than that before LP, the wear performance of the cladding layer was enhanced effectively.

Keywords: laser cladding; laser peening; microstructure; residual stress; wear performance

1 引言

45钢具有优异的力学性能和良好的抗变形能力, 广泛应用于汽车制造业中的关键零部件 (如齿轮、轴、连杆和螺栓等) [1,2]; 但因其表面显微硬度

较低、耐磨性较差, 导致材料表层发生损坏, 从而严重影响零部件的服役寿命, 因此改善45钢材料的表面性能对提高其服役的可靠性和延长使用寿命具有重要的现实意义^[3,4]。激光熔覆技术作为一种先进的材料表面制备技术, 具有经济性好、效率高、

收稿日期: 2024-05-13

修回日期: 2024-06-06

作者简介: 钱绍祥, 男, (1977—), 男, 博士, 副教授, email: qiansx@zjc.edu.cn

基金项目: 2022 年江苏省“青蓝工程”人才项目; 2022 年江苏省高校哲学社会科学研究一般项目 (2022SJYB2297); 2021 年镇江市高等专科学校校级党建与思想政治教育专项课题 (GZDJSZ202113); 2023 年镇江市高等专科学校校级教学改革重点项目 (2023ZD05)

灵活性好、工作环境无污染等特点,通常被认为是制备表面涂层的首选方法^[5,6],但它由于自身制造工艺的特点,熔覆过程中温度场的分布不均匀,使得加工区域存在较高的温度梯度,较易导致产生气孔、微裂纹、残余拉应力等冶金缺陷,从而影响熔覆层的制备质量,因此需要采用一定的后处理工艺,弥补激光熔覆存在的技术局限性,以求最大限度提高熔覆层的疲劳寿命。

近年来,研究人员开始探究采用后处理技术来进一步提高激光熔覆层的表面性能,早期的研究主要集中在优化激光熔覆工艺参数和采用热处理技术,以期改善熔覆层的显微组织和力学性能,但这些技术在使用过程中具有一定的局限性,并不能完全消除熔覆成形产生的冶金缺陷^[7-9]。后来出现的研究方向主要为表面形变强化,如表面喷丸处理^[10]、表面机械研磨^[11,12]、超声冲击处理^[13]等,通过在金属表面发生塑性形变,减少冶金缺陷,细化表层晶粒,获得表面残余压应力,从而提高表面相关的机械性能。方修洋等采用喷丸强化技术对CuNiIn涂层进行后处理,结果表明喷丸处理后的涂层获得了加工硬化层,引入了残余压应力场,延长了材料的服役寿命^[14],但喷丸设备能耗较大,加工后表面粗糙度低,强化效果不均匀,易产生喷丸死角,同时还会引入新的杂质;Cui等^[15]采用超声冲击处理激光熔覆层,研究结果表明被冲击的材料表层获得了梯度组织结构,晶粒得到了细化,产生了残余压应力场,但是影响表层材料的深度较浅,常会因为加工表面的不平整使得表层产生不均匀的冲击力。

激光喷丸(laser peening, LP)作为一种优秀的金属材料表面强化处理技术,具有高压(GPa)、高能(GW)、超快(ns)的特点,通过超高应变速率的喷丸处理材料表面来提高显微硬度,细化表层晶粒,改善磨损性能。当前,国内外不少学者对LP技术进行了研究,TAN等采用喷丸、超声冲击、激光喷丸三种工艺对TC17合金表面进行强化处理,发现超声喷丸表面粗糙度为0.04~0.12 μm ,对表层的影响深度为0.8 mm,激光喷丸处理后表面粗糙度为0.36~0.12 μm ,对表层的影响深度为1.5 mm,激光喷丸对材料的强化效果最好^[16]。赵恺等采用激光冲击强化技术与冷喷涂技术相结合,研究纯铝涂层的残余应力和显微硬度的变化,结果发现涂层表面的残余应力状态由拉应力转变为压应力,表面显微硬度提高了34.49%^[17]。L. Hackel 等^[18]对激光直接成

型的零件进行激光喷丸后处理,发现激光喷丸处理对成型零件微观组织的变化、冶金缺陷的闭合、残余应力场的分布均产生了良好的影响。目前针对激光熔覆后试样采用激光喷丸处理的研究鲜有报道,对激光熔覆后材料性能的挖掘仍不够充分,为进一步改善金属材料的综合性能,提出激光熔覆+激光喷丸的复合强化方法,先采用激光熔覆技术制备满足特定工况要求的功能涂层,然后再运用激光喷丸处理弥补激光熔覆产生的冶金缺陷,将两者的技术优势结合起来,最大限度挖掘材料的性能,延长材料的疲劳寿命。

本研究采用激光熔覆技术在45钢表面制备铁基熔覆层,采用激光喷丸技术对熔覆层表面进行后处理,通过对比分析激光喷丸处理前后熔覆层的物相组成、显微组织、残余应力、显微硬度和磨损性能的变化,探究激光喷丸处理对熔覆层的组织和磨损性能的影响,并分析总结其影响规律。

2 试验材料和试验方法

2.1 试验材料

试验材料选用45钢,试样尺寸为100 mm×100 mm×20 mm,其化学成分(质量分数)如下:C 0.42%~0.50%、Si 0.17%~0.37%、Mn 0.50%~0.80%、Cr<0.25%、Ni<0.25%、P<0.035%、S<0.035%、Fe为余量;熔覆粉末为铁基合金粉,其化学成分(质量分数)如下:C 15.0%、Cr 13.6%、Si 1.2%、B 1.6%、Mo 0.8%、Fe为余量,颗粒尺寸为140~325目。试验前采用SiC砂纸将基体表面打磨平整,用丙酮去除表面油污和杂质,将待熔覆的粉末置于150 °C干燥箱进行烘干处理,确保熔覆层的制备质量。

2.2 试验方法

激光熔覆系统主要包括高功率光纤激光器、激光熔覆头、KUKA六轴联动的工业机器人、送粉系统;根据初步试验结果,选定激光熔覆的主要工艺参数为:激光功率1 800 W,光斑直径4.5 mm,搭接2 mm,扫描速度为5 mm/s,送粉量30 g/min,采用同轴送粉方式,纯氩气保护。激光喷丸处理采用美国LSPT公司的Procudo200型表面强化设备,主要工艺参数为:脉冲激光能量6 J,光斑直径3 mm,脉宽20 ns,波长1 053 nm,频率5 Hz,搭接率50%;试验前,将熔覆层的表面机械研磨至光滑表面,并在待喷丸表面贴上0.1 mm的黑色胶带作为吸收层,采用2 mm厚度的流动水作为约束层。

采用D8多功能粉末衍射仪对试样的物相组成进行分析；采用Quanta FEG250扫描电子显微镜观察试样的截面形貌和磨痕形貌；根据国标JB/T9394-2011，采用X350-A型应力测定仪测量试样表面的残余应力；根据ASTME92-2016标准，采用HVS-1000型维氏硬度计对试样进行显微硬度测试，加载载荷0.2 kg，加载时间为15 s；摩擦学测试采用往复摩擦试验机，采用CD15W-40润滑油进行油池润滑，上试样为SUS304圆柱销，直径6 mm，长为20 mm，下试样为试验样品，接触方式为销-滑块往复摩擦，载荷为10 N，行程为10 mm，频率为5 Hz，采用VK-X250K型三维共聚焦显微镜观察磨损表面的三维形貌。

3 结果与讨论

3.1 物相组成

图1显示了激光喷丸处理前后熔覆层的X射线衍射图谱，从图中可以看出，熔覆层的物相组成主要为 α -Fe马氏体相以及 $M_{23}C_6$ 、 M_7C_3 、FeCrB等析出相，激光喷丸处理后熔覆层并未出现新的衍射峰，衍射峰的峰位基本没有发生变化，而是在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间，衍射峰的峰强显著增高且变得更加的尖锐；这一方面表明在激光喷丸的作用下，Cr等元素与C、B元素在熔池中发生化学反应，生成碳化物和硼化物，这些硬质相通常以颗粒状弥散分布在晶体和晶粒间，产生弥散强化效应，有利于提高熔覆层的显微硬度，增强摩擦磨损性能；另一方面表明激光喷

丸处理并未在熔覆层中析出新的物相，从文献^[19]可知，金属材料的物相结构主要由组成材料的成分和凝固过程中冷却条件两种因素决定，激光喷丸处理仅仅是对熔覆层表面进行了物理处理，加工过程中并未引入其他元素，所以对熔覆层的物相结构不会产生影响。图2显示了激光喷丸处理前后(110)晶面衍射峰的半高宽，明显发现激光喷丸处理后的衍射峰变宽、变高，说明熔覆层的微观组织产生了晶格畸变和晶粒细化，由此可以推断激光喷丸处理诱导熔覆层表面结构发生了显著变化，细化了表层晶粒，引入了残余压应力，故(110)晶面衍射峰产生了增强效应和宽化效应^[20]。

3.2 显微组织分析

图3为激光喷丸处理前Fe基熔覆层的截面形貌图。从图3(a)可以看出，基体和熔覆层呈现良好的冶金结合，几乎没有明显的孔隙、裂纹等冶金缺陷，熔覆层与基体交界面的显微组织以平面晶为主，这主要是基体表面温度较低，熔池底部温度梯度较大，过冷度较少，导致晶体生成缓慢；熔覆层底部的显微组织主要以近乎垂直于交界面的粗大柱状晶和树枝晶组成，这是由于此处温度梯度较小，过冷度较大，加快了晶体的生长速度，大多形成了沿最大热流方向的柱状树枝晶；熔覆层内部由于受到马兰戈尼效应的影响，熔池表面的散热速率加快，使得过冷度增大，抑制了枝晶的择优生长，使得该区域显微组织出现等轴晶和比较短小的枝晶，如图3(b)所示。

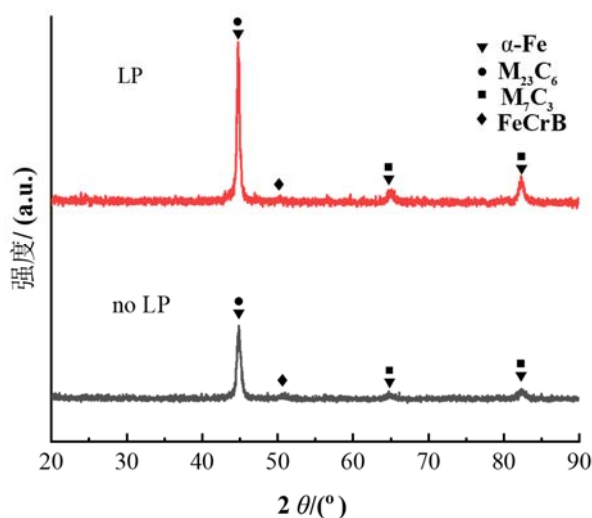


图1 激光喷丸前后熔覆层 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of cladding layers before and after laser peening

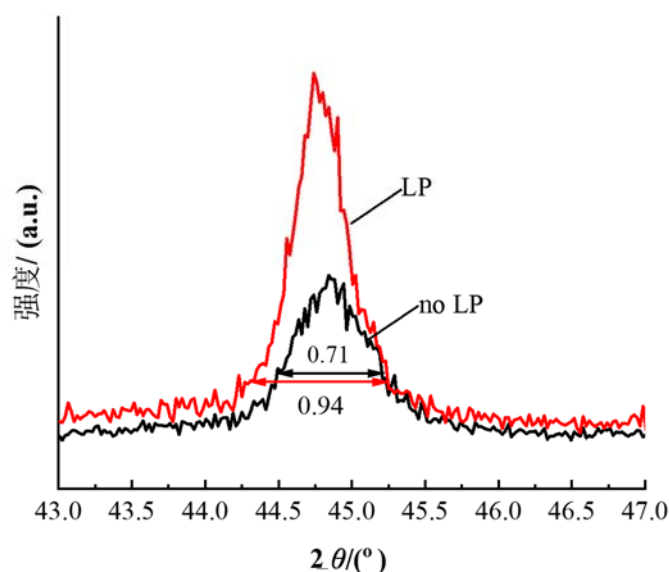
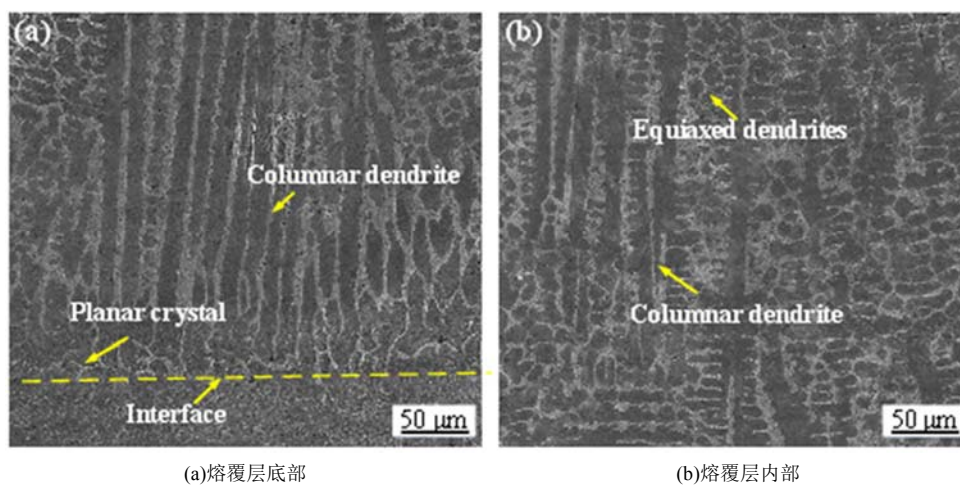


图 2 激光喷丸处理前后(110)晶面衍射峰半高宽

Fig.2 (110) crystal plane diffraction peak width at half maximum before and after laser peening



(a) 熔覆层底部

(b) 熔覆层内部

图 3 激光喷丸处理前熔覆层的微观组织

Fig.3 Microstructure of cladding layer before LP

图4为激光喷丸处理后熔覆层底部和内部的显微组织图。可以观察到,激光喷丸处理诱导熔覆层发生了明显的塑性变形,组织中已不见连续细长的树枝晶,晶粒的尺寸大小随着离激光喷丸表面距离的增加而逐渐变大。底部区域的柱状枝晶发生了碎化、断裂,分解为细小的树枝晶和等轴晶,内部区域大尺寸的树状枝晶已消失,主要由大量的等轴晶和细化的枝晶组成。这是因为激光喷丸处理区域的柱状晶和等轴晶的生长方向与发生塑性变形的方向几乎垂直,在受到超高应变率的激光冲击波作用后很容易发生破碎,由于塑性变形的表现方式为位

错运动,当位错运动到晶粒附近时,晶界对位错运动产生了阻碍,导致位错塞积现象的发生,大量的位错塞积形成位错墙,位错墙逐步演变为亚晶界,随着位错运动的持续,亚晶界转变为晶界,从而形成细小的晶粒;熔覆层的表层受激光冲击波的影响较大,位错运动复杂且沿着不同方向,最终形成随机分布的等轴晶和细小的枝晶;底部区域虽然受激光冲击波的影响相对于表层较小,位错运动相对较弱,但粗大的柱状晶仍受到激光冲击波的作用发生了断裂,形成了相对细化的树枝晶组织。

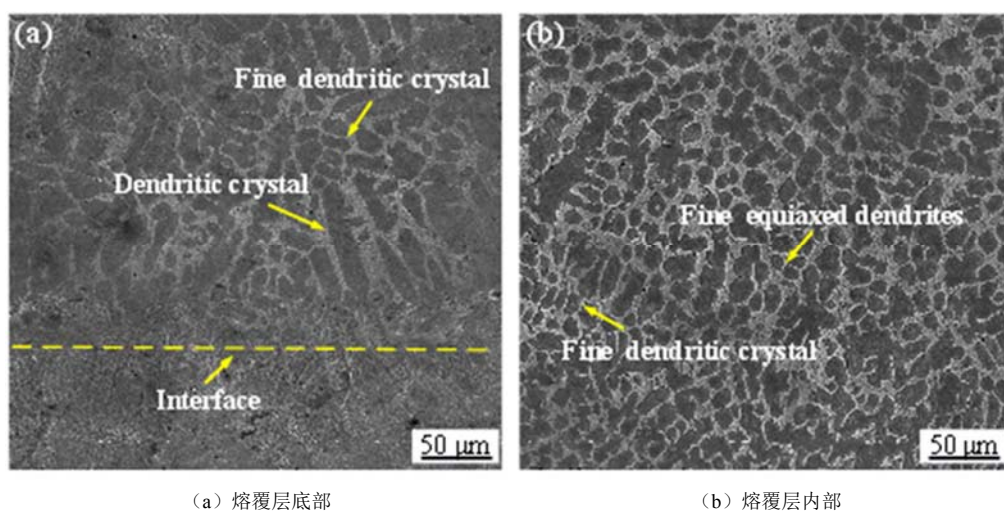


图4 激光喷丸处理后熔覆层的微观组织

Fig.4 Microstructure of cladding layer after LP

3.3 残余应力

图5显示的是激光喷丸处理前后熔覆层表面的残余应力场分布（任意选取表面上5个不同点进行测量）。从图中可以明显的看出，未经激光喷丸处理的熔覆层表面残余应力 σ_x 范围为-151~146 MPa， σ_y 范围为-34~138 MPa；激光喷丸处理后，表面残余应力 σ_x 范围为-707~-635 MPa， σ_y 范围为-584~-417 MPa；未激光喷丸处理的熔覆层存在复杂的残余应力场分布，既有残余拉应力，又有残余压应力，且应力分布不均匀，波动较大；激光喷丸处理后，熔覆层表面残余拉应力转变为较大的压应力且分布相对均匀。熔覆层的残余应力主要来自三个方面：熔池凝固过程中的相变应力、熔池加热过程中受热不均匀而产生的热应力、以及熔池凝固时的冷应力；

激光熔覆过程中相变应力相对较小，对熔覆层中残余应力场的影响不大，主要是金属粉末在基材上熔化膨胀时受到周边材料的约束形成压应力，在凝固过程中，熔池产生收缩行为时受到边缘材料的拉伸产生拉应力，熔化和凝固过程中不均匀的塑性变形是导致熔覆层内复杂残余应力场分布的主要原因。激光喷丸处理是将高能冲击波作用于该区域使得金属材料表层产生超高应变率塑性变形，表层晶粒产生横向体积膨胀，对周边组织进行挤压，使得表面晶粒间距变小，经过多次激光喷丸处理后，晶粒逐步得到细化，表面硬度得到提升，形成了硬化的塑性变形区，改变了熔覆层表面的应力状态，呈现出较大的残余压应力场分布。

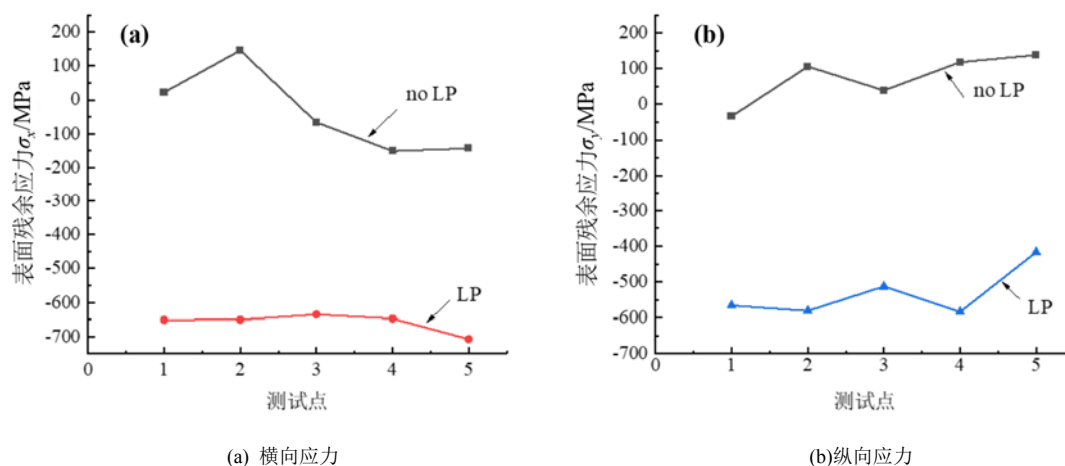


图5 激光喷丸处理前后熔覆层的表面残余应力

Fig.5 Surface residual stress of cladding layer before and after LP

3.4 显微硬度

图6显示的是激光喷丸处理前后熔覆层的截面显微硬度分布(在深度方向上经过基体和熔覆层每相隔0.2 mm测量十个点)。从图中可以清楚的观察到,未经激光喷丸处理的熔覆层显微硬度相较于基体得到了明显的提高,其平均显微硬度约为535.3 HV_{0.2},是基体显微硬度的2.8倍,说明铁基熔覆层显著提高了基体的显微硬度,但该区域的显微硬度存在一定程度上的波动,而经过激光喷丸处理后的熔覆层形成了相对均匀的显微硬度分布,其平均显微硬度为692 HV_{0.2},是激光喷丸处理前熔覆层显微硬度的1.3倍,形成的硬化层深度达到1 mm以上,表明激光喷丸处理可以显著提高熔覆层的显微硬度,这一方面归因于激光喷丸处理使得熔覆层表面材料发生了塑性流动,产生了加工硬化,导致表层结构密度得到了强化,形成了塑性变形层;另一方面激光喷丸处理使得表层内晶粒被挤压、拉伸,细化了表层的晶粒,增加了表层材料的抗应变能力。根据Hall-Petch的细晶强化理论^[21],显微硬度的增加是基于加工硬化和细晶强化两种效应的综合,激光喷丸处理使得熔覆层内产生更多的小尺寸晶粒,小晶粒的增多使得晶体发生位错运动时位错壁增加,提高了熔覆层的抗变形能力,导致屈服强度增加,致使熔覆层的显微硬度增加。

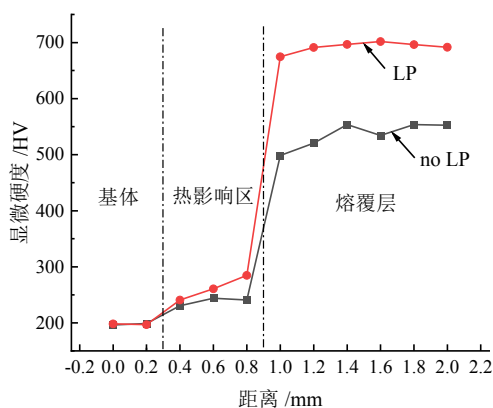


图6 激光喷丸处理前后熔覆层的截面硬度

Fig.6 Sectional hardness of cladding layer before and after laser peening

3.5 摩擦磨损

3.5.1 摩擦系数曲线

图7显示了激光喷丸处理前后熔覆层试样和基体的摩擦系数随摩擦磨损时间的变化曲线图。从图

中可以发现,随着摩擦磨损时间的变化,试样表面摩擦系数的变化规律基本相似,主要表现为初始时摩擦系数急剧变化的磨合阶段和摩擦系数趋于平稳的稳定摩擦阶段,赫兹接触应力原理证明了这一现象。试样的表面质量对摩擦系数的波动性起着决定性的影响,根据图中摩擦系数的变化规律可以发现,未经激光喷丸处理的熔覆层摩擦系数总体比较平稳,但其波动性相比基体和激光喷丸处理后的试样较为明显,一方面表明熔覆层成形质量好,空隙较少;另一方面说明激光喷丸处理有效提高了熔覆层的成形质量,减少了冶金缺陷。在稳态的摩擦磨损阶段,基体的摩擦系数稳定在0.175左右,未经激光喷丸处理的熔覆层摩擦系数保持在0.134左右,激光喷丸处理后的摩擦系数保持在0.1左右,相较于未经激光喷丸处理熔覆层,激光喷丸处理后的摩擦系数降低了25%,表明激光喷丸处理后的熔覆层表现了更为优异的磨损性能。

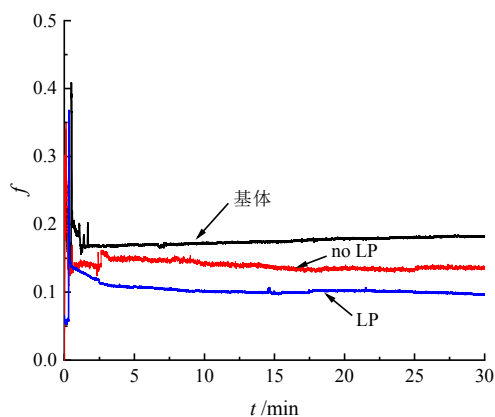


图7 三种试样的摩擦系数曲线图

Fig.7 Friction coefficient curves of three samples

3.5.2 共聚焦磨痕形貌扫描

为了进一步获得摩擦磨损表面的形貌信息,对表面磨痕进行高聚焦拍摄并研究其几何特征。从图8中可以明显观察到,基体的表面磨损相较于其他两种试样严重,摩擦磨损性能最差,磨痕表面最为粗糙,未经激光喷丸处理的熔覆层试样较好一些,激光喷丸处理后的表面状况最好。基体表面的最大磨痕宽度为939.335 μm ,最大犁沟深度为8.273 μm ;未经激光喷丸处理后熔覆层表面的最大磨痕宽度为370.413 μm ,最大犁沟深度为5.484 μm ;激光喷丸处理后熔覆层表面的最大磨痕宽度为235.972 μm ,最大犁沟深度为2.032 μm ;可以得出,基体、激光

喷丸处理前、后熔覆层的磨痕宽度逐渐变窄、深度逐渐变浅,这一结果与图7中所描述的摩擦系数检测结果相吻合。

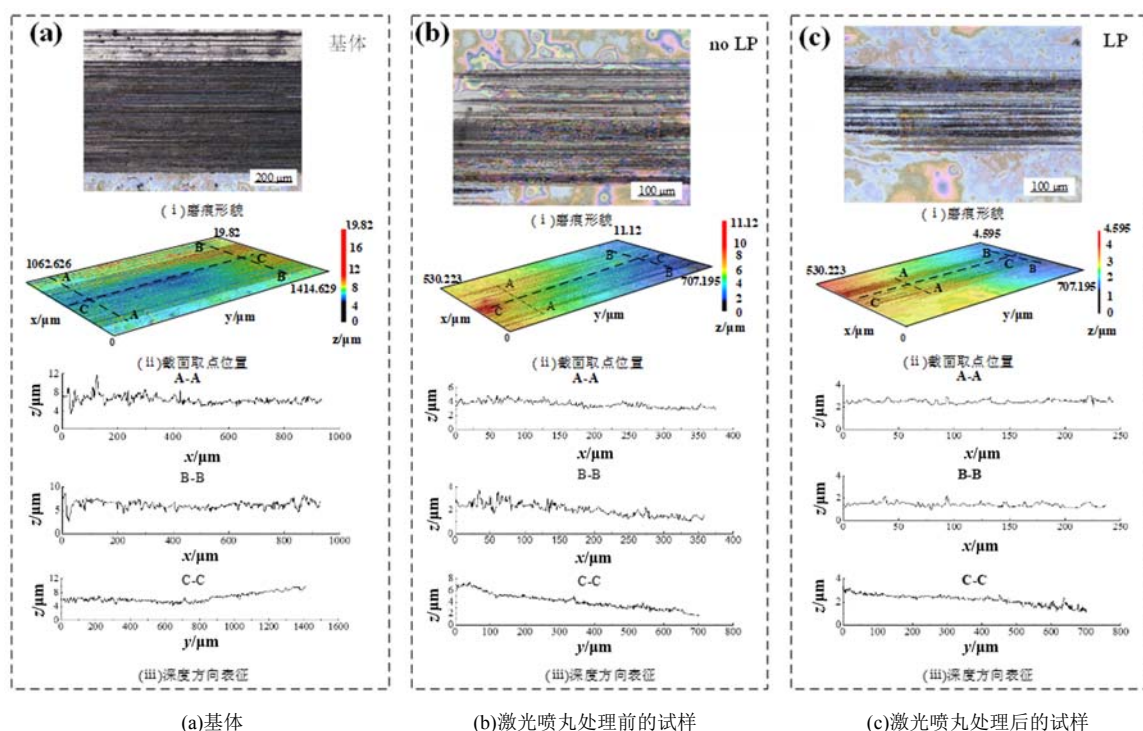


图8 三种试样磨损表面形貌

Fig.8 Wear surface morphology of three samples

图9为三种试样的磨痕SEM图。从图中可以观察到三种试样的磨痕形貌均出现沿磨损方向的材料分层现象,这主要是因为摩擦磨损过程中对磨件产生的犁沟作用压迫材料向两侧转移,从而出现犁沟状的磨痕形貌,表现为典型的磨粒磨损机理。图9(a)中基材出现了较深的犁沟和面积的剥落坑,这主要是由于基体材料的硬度较低,对磨件在法向载荷的作用下压入基体内部,增大了两交界面的接触应力,当原子间的黏着力大于45钢的剪切力时,在基体表层发生剪切破坏,造成表面材料的脱落,表现为黏着磨损;图9(b)相较于基材出现了浅一些

的犁沟和较少的剥落坑,表明熔覆层伴有轻微的黏着磨损,由于Fe基熔覆层具有较高的显微硬度,在磨损过程中表层材料不易产生剥离,减少了黏着磨损的发生;图9(c)中黏着磨损明显减少,主要以浅犁沟为主,说明激光喷丸后熔覆层表面的磨损机理主要以磨粒磨损为主,由于激光喷丸处理使得熔覆层表面形成塑性变形层,获得了均匀分布的表面残余压应力,提高了表面的显微硬度,提升了表层抗微变形能力,减少了黏着磨损现象,从而增强了熔覆层的耐磨性。

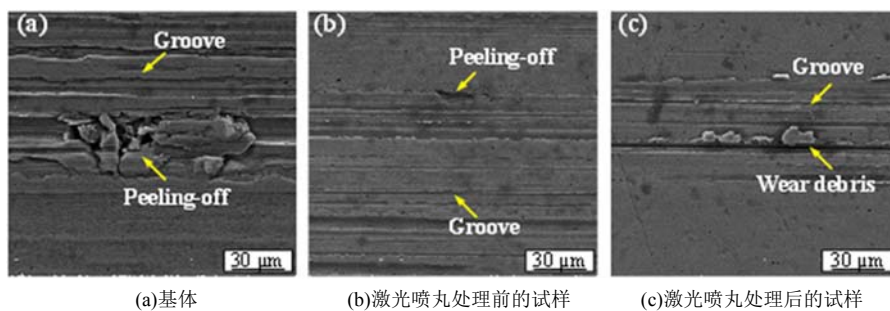


图10 三种试样磨损表面的SEM像

Fig.10 SEM images of worn surfaces of three samples

4 结论

(1) 经激光喷丸处理后, Fe基熔覆层没有发生相变, (110)晶面衍射峰产生了增强效应和宽化效应, 熔覆层内组织发生了碎化、断裂, 形成了随机分布的细小等轴晶和细化的枝晶。

(2) 经激光喷丸处理后, 熔覆层表面复杂的残余应力场发生了改变, 呈现出较大的均匀分布的残余压应力场; 提高了熔覆层的显微硬度, 形成了相对均匀的显微硬度分布, 其平均显微硬度为692 HV_{0.2}, 为激光喷丸处理前的1.3倍。

(3) 经激光喷丸处理后, 在油润滑的条件下, 熔覆层的摩擦系数相较于激光喷丸处理前降低了25%, 主要是浅犁沟为主(即少量的磨料磨损), 表现出良好的磨损性能。

参考文献

- [1] 刘艳, 冀杰. 45#钢表面 Ni-W/ZnO 超疏水复合涂层的制备及性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(5):26-33.
- [2] Wongpanya P, Saramas Y, Chumkratoke C, et al. Erosion-corrosion behaviors of 1045 and J55 steels in crude oil[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 189: 106965.
- [3] 王权, 刘秀波, 刘庆帅, 等. 45#钢激光熔覆 Ni60/Cu 自润滑复合涂层组织演变及摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2022, 35(6): 232-243.
- [4] 许昌, 杨龙刚, 李坦, 等. 百皮秒激光冲击强化 45 钢工艺研究与表面性能评估[J]. 原子能科学技术, 2023, 57: 207-219.
- [5] 和豪涛, 吴笑伟, 李金辉. 汽车用 AZ91 镁合金的表面改性与性能研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(12):1-7.
- [6] 张好强, 张哲远, 刘印, 等. 激光熔覆高性能非晶复合涂层的研究现状与分析[J]. 2023, 45(8):67-73.
- [7] Zhou Z P, Lei Q, Yan Z, et al. Effects of process parameters on microstructure and cracking susceptibility of a single crystal super-alloy fabricated by directed energy deposition[J]. Materials & Design, 2021, 198: 109296.
- [8] 王兴东. 45#钢表面激光熔覆不锈钢涂层工艺及组织性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [9] 翁益青, 薛瑞雷, 满蛟, 等. 热处理对高速激光熔覆不锈钢熔覆层组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 276-283.
- [10] Zhu W G, Ma C, Zhang C H, et al. Fatigue crack propagation behavior in Ti-6Al-4V alloy with surface gradient structure fabricated by high-energy shot peening[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33:3003-3016.
- [11] Ghosh S, Bibhanshu N, Suwas S, et al. Surface mechanical attrition treatment of additively manufactured 316L stainless steel yields gradient nanostructure with superior strength and ductility[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 820:141540.
- [12] 任宏伟, 宁江利, 徐博, 等. 表面机械研磨处理 Mg-Gd-Y 合金不同应变层的时效硬化行为和机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(7): 2577.
- [13] Mao X Y, Sun J Y, Feng Y Y, et al. High-temperature wear properties of gradient microstructure induced by ultrasonic impact treatment[J]. Materials Letters, 2019, 246: 178-181.
- [14] 方修洋, 宫健恩, 曹晓英, 等. 喷丸与 CuNiIn 涂层复合处理对高温合金棒试样微动疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程, 2023, 36 (4):89-96.
- [15] Cui Z Q, Qin Z Dong P, et al. Microstructure and corrosion properties of FeCoNiCrMn high entropy alloy coating prepared by high speed laser cladding and ultrasonic surface mechanical rolling treatment[J]. Materials Letters, 2020, 259:126769.
- [16] Tan L, Yao C, Zhang D, et al. Effects of different mechanical surface treatments on surface integrity of TC17 alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 398:126073.
- [17] 赵恺, 陈凯, 姜高强等. 激光冲击对冷喷涂纯铝涂层表面形貌的影响[J]. 中国激光, 2023, 4(50): 0402004-1-9.
- [18] Hackel L, Rankin J R, Rubenchik A, et al. Laser peening: a tool for additive manufacturing post-processing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 67-75.
- [19] 华一新. 冶金过程动力学导论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004:31-65.
- [20] 杨启. TC4 钛合金棒结构的微动疲劳损伤及喷丸防护机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [21] Bozdana T, Ginday 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.