

激光与光电子学进展

激光熔覆与淬火再制造 QT700 球墨铸铁齿轮 熔覆层的组织与性能

陈世鑫¹, 雷卫宁^{1,2*}, 任维彬¹, 薛冰¹

¹江苏理工学院机械工程学院, 江苏 常州 213001;

²江苏省先进材料设计与增材制造重点实验室, 江苏 常州 213001

摘要 针对 QT700 球墨铸铁齿轮激光再制造表面硬度下降、界面白口组织聚集、熔覆层易开裂和易出现气孔缺陷等再制造难点, 本文提出了激光熔覆制备与激光淬火相结合的复合新工艺。通过优选材料成分接近、硬度等力学性能优良的 FeCrNiCu 合金, 实现了 QT700 球墨铸铁齿轮表面熔覆层的制备。通过熔覆层组织演化分析、表面硬度对比、摩擦磨损性能评价等试验, 验证了再制造熔覆层良好的力学性能。试验结果表明: 熔覆层熔合良好, 无气孔裂纹等成形缺陷, 呈较为显著的激光熔覆快速凝固组织特征; 熔覆层顶部经淬火后, 等轴晶更加细小, 晶粒粒度减小; 熔覆层中部的树枝晶枝干有所细化, 部分枝晶分离; 熔覆层底部的胞状晶尺度基本保持熔覆后的形态, 但界面白口组织向部分熔解、断续分离态转变; 淬火前熔覆层的显微硬度为 473~589 HV, 淬火后提升至 666~735 HV; 熔覆层淬火前的摩擦因数为 0.15~0.25, 淬火后降为 0.05~0.15。本研究为球墨铸铁的激光再制造提供了工艺借鉴和方法参考。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 激光淬火; 球墨铸铁; 再制造

中图分类号 TG407

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0514003

Microstructures and Performance of Laser Cladding and Quenching Remanufactured Cladding Layer on QT700 Ductile Cast Iron Gear Surface

Chen Shixin¹, Lei Weining^{1,2*}, Ren Weibin¹, Xue Bing¹

¹Faculty of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology,
Changzhou, Jiangsu 213001, China;

²Jiangsu Advanced Material Design and Additive Manufacturing Key Laboratory,
Changzhou, Jiangsu 213001, China

Abstract To address the remanufacturing difficulties of QT700 nodular cast iron gear, such as the decrease of surface hardness, the accumulation of chill microstructure at the interface, the easy cracking of the cladding layer, and the occurrence of porosity defects in the cladding layer, new composite process of laser cladding preparation and laser quenching to improve hardness is proposed. The FeCrNiCu alloy is chosen for its similar chemical composition and excellent mechanical properties (e. g., hardness). We prepare cladding layer on QT700 ductile cast iron gear surface; the good mechanical properties of the remanufactured coating are verified by experiments that include analysis of cladding layer microstructure evolution, surface hardness comparison, and evaluation of friction and wear performance. Results of these experiments show that the coating has good fusion, without pores, cracks and other

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-07-21; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51975264)、装备再制造技术国防科技重点实验室开放基金(6142005180402)、常州市科技计划(CJ20180058)、江苏省研究生实践创新项目(SJCX19_0694)

*E-mail: leiweining@jsut.edu.cn

forming defects; the microstructure is presented as a remarkable laser cladding rapid condensation structure. After quenching the top of the cladding layer, the equiaxed grains are finer and the grain size is reduced. Dendritic crystals in the middle part of the cladding layer are refined, and parts of the branches are separated. The size of cellular crystals at the bottom of the coating basically keeps the shape after cladding, but the chill microstructure at the interface is transtriated to partial melting and intermittent separation. After cladding, the microhardness of the cladding layer is about 473–589 HV, which is increased to 666–735 HV after quenching; the friction coefficient of the cladding is 0.15–0.25, optimized to 0.05–0.15 after quenching. This study provides process and method reference for laser remanufacturing of nodular cast iron.

Key words laser technique; laser cladding; laser quenching; nodular cast iron; remanufacturing

OCIS codes 140.3390; 310.1515; 310.1860; 310.3840

1 引言

球墨铸铁件的含碳量高,导致其再制造成形形状的控制较难。在球墨铸铁熔覆层的快速凝固过程中,被基体稀释的碳(C)元素无法形成稳态的石墨结构,而是形成以 Fe_3C 为主要物相的脆性白口组织。这种组织主要分布于熔覆层与基体的结合界面处,易导致熔覆层开裂^[1-4],而且这种组织会直接影响再制造件的后续切削加工性^[5-6]。此外,C元素在激光熔池的强对流搅拌作用下,会向熔池中心所在位置的周围迁移,易形成过饱和的高碳马氏体淬硬组织,从而增大了基体热影响区的硬脆性;熔池卷裹的空气中的氧(O)元素会与C元素发生不完全化合反应,生成一氧化碳(CO)气体,从而易使熔覆层中出现气孔缺陷^[7-8]。

铸铁件激光熔覆的优化工艺窗口狭窄,在高密度的热输入作用下,熔覆层的硬度等表面力学性能的下降也会直接影响再制造熔覆层的使役性能^[9-10]。

许多研究人员已尝试采用激光熔覆工艺修复球墨铸铁件,以增强其表面性能。如:Arias-González等^[11]通过在铸铁表面激光熔覆镍基合金制备了表面硬化涂层,该涂层表现出了较高的硬度和优异的韧性;Lestan等^[12]采用激光沉积技术在球墨铸铁上沉积了不同的粉末,大多数粉末与基体结合良好;童文辉等^[13]在球墨铸铁上激光熔覆了添加有TiC颗粒的钴基合金,对熔覆层进行研究后发现,通过加入TiC颗粒可以增加硬质相的数量,从而大幅提升了熔覆层的硬度和耐磨性;何显煜等^[14]采用激光熔覆工艺在球墨铸铁上制备了镍基合金熔覆层,研究了扫描速率对熔覆层硬度的影响,获得了最佳的工艺参数区间;Liu等^[15]采用多层激光熔覆工艺在压铸石墨铸铁上制备了与基体呈良好结合的NiCrCo合金涂层,对该涂层进行研究后发现,多层沉积的热累积有助

于降低涂层内部的应力,并降低界面处的裂纹敏感性;Li等^[16]采用激光熔覆工艺在球墨铸铁上制备了Ni-Cu合金涂层,并研究了不同类型的沟槽和熔覆工艺对裂纹的影响,研究结果表明,圆形凹槽和交叉扫描工艺可以降低残余应力和裂纹倾向。

上述研究中制备的样品存在以下不足:

1) 铸铁齿轮经激光再制造后表面硬度下降,难以达到工况使役性能要求;

2) 脆性相易在界面聚集,这使得齿轮在一定转速条件下的动力传递过程中难以承载冲击载荷的作用,易发生断齿;

3) 在再制造过程中,熔覆层中C元素的扩散难以调整,尤其是熔覆表层部位的碳元素。

本文选取FeCrNiCu合金粉末作为熔覆粉末,基于Ni、Cu元素对C元素的强石墨化作用来减少白口组织,降低界面的脆性。与其他表面改性技术相比,激光淬火技术易于控制硬化层深度,经激光淬火处理后的熔覆层具有硬度高、硬化层均匀、变形小等优点^[17-18],因此本文选取激光淬火工艺对熔覆层进行表面强化处理。

本文以QT700球墨铸铁齿轮熔覆层的再制造为目标,提出了激光熔覆(制备熔覆层)与激光淬火(调整组织)相结合的复合再制造工艺,并采用该工艺实现了QT700球墨铸铁齿轮熔覆层的制备,为该类熔覆层的激光熔覆工艺优化与性能调控提供理论依据及参考。

2 试验材料与过程

2.1 材料成分

本试验以QT700球墨铸铁齿轮为基材,该齿轮的表面显微硬度为200~300 HV^[19];采用粒径为75~150 μm的FeCrNiCu合金粉末作为熔覆材料。考虑到激光熔覆过程中可能的元素烧损,适当调整部分

主要元素含量略高于基材。熔覆合金粉末和基材的化学成分如表 1 所示。Ni 元素和 Cu 元素的引入有利于熔覆层中软质相奥氏体组织区域的扩大,并可降低裂纹及开裂的可能性;Cr 元素的引入有利于熔覆

层中生成晶间强化相,提升熔覆层的强度和硬度;Si 元素的引入有利于提升熔池的流动性和熔覆层的脱氧造渣能力;少量的 Nb 元素有利于熔覆层晶内及晶间析出强化相,提高熔覆层的强度及硬度。

表 1 试验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of materials used in experiment

Material	Mass fraction/%						
	Fe	Cr	Ni	Cu	C	Si	Nb
QT700	Bal.	—	0.25–0.28	—	3.6–3.8	2.34–2.86	0.02–0.04
FeCrNiCu	Bal.	10.2–12.2	4.52–4.62	3.25–3.35	0.74–0.85	0.58–0.68	0.10–0.24

2.2 试验过程

试验前先对 QT700 齿轮基材进行打磨,以去除其表面的铁锈及氧化膜,并用丙酮及酒精进行清洗,烘干后备用。将 FeCrNiCu 合金粉末置于 DSZF-2 型真空干燥箱内,在 150 °C 的温度下干燥 2 h 时。熔覆试验采用 YLS-4000 型光纤激光再制造成形系统^[20]进行,采用四路同轴送粉方式,熔覆成形过程中对熔池施加氩气保护。

基于前期的激光优化工艺试验^[21-22],本次试验的主要参数如下:激光熔覆功率为 1.2 kW,光斑直径为 3 mm,扫描速度为 5 mm/s,载气流量为 3 L/min,送粉速率为 8.1 g/min,离焦量为 5 mm;激光淬火功率为 1.5 kW,扫描速度为 8 mm/s,离焦量为 60 mm。熔覆层的尺寸为 40 mm×40 mm×1 mm。淬火前,在熔覆层表面涂覆淬火能量吸收剂,以提升淬火能量的吸收率。在试验过程中,为避免光束反射,保持激光光束入射路径与基材表面法线的夹角约为 9°。试验过程如图 1 所示。

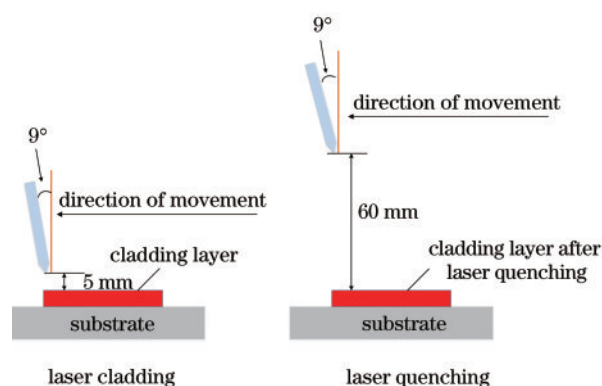


图 1 激光熔覆与激光淬火工艺试验过程

Fig. 1 Experiment processes of laser cladding and laser quenching

根据国标 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》制作夏比摆锤冲击试验试样,试样尺寸如图 2(a)所示。采用激光熔覆与激光淬火复合优化

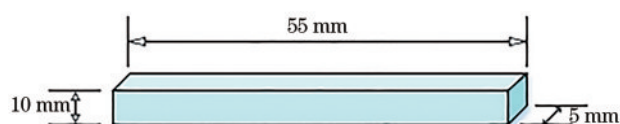


图 2 冲击试样的尺寸

Fig. 2 Size of impact sample

工艺制备 FeCrNiCu 合金块体件,成形的块体件尺寸为 70 mm×70 mm×7 mm。在块体件上通过切割加工出尺寸为 55 mm×10 mm×5 mm 的样件。试验机为 ANS 型摆锤式冲击试验机,各试样分别进行 3 组冲击试验,取 3 组试样冲击功和冲击韧度的平均值作为最终的冲击功和冲击韧度,试验温度为室温(30 °C)。

3 组织特征与优化

3.1 熔覆层的组织特征

图 3 为熔覆层顶部、中部、底部以及熔覆层与基体界面的显微组织。由图 3(a)可知,熔覆层顶部的组织以细小致密的等轴晶为主。这主要是因为该部位与空气接触,具有较好的散热条件,过冷度较大,因此该部位的熔池在快速冷凝过程中形成了细晶组织。同时,由图 3(a)还可以看出,晶内及晶界析出了大量的二次强化相,而富铜相强化质点很难观察到,从而判断强化相可能为 Cr₇C₃ 和 NbC 型碳化物。图 3(b)所示为熔覆层中部的显微组织,该部位的组织主要以与熔覆方向略成一定角度的粗大树枝晶为主,并伴随有部分二次枝晶萌生。这主要是因为熔覆层中部的温度梯度相对较小,有利于树枝晶的孕育、生长及形成二次分枝。由图 3(c)可知,熔覆层底部的组织主要以细晶奥氏体为主,晶内及晶界析出了未熔碳化物颗粒及强化相。由于该部位受基材的直接冷却作用,熔池的温度梯度较大,因而凝固形成的高温铁素体枝晶间距较小,形成的奥氏体晶粒较细。由图 3(d)可知,在熔覆层与

基体的界面处无裂缝等缺陷,熔覆层与基体之间形成了良好的冶金结合,但覆层底部近界面部位出现了白口组织,该组织的宽度较小且连续分布。该部位白口组织的形成是因为激光熔覆过程是一个具有极大加热与凝固速度的冶金过程,熔池温度在小于 3 s 的时间内能迅速降低至再结晶温度以下,熔池的冷却速度接近 $10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ^[23]。在熔覆层底部半熔化区位置,熔池凝固开始温度大大低于平衡态液/固相转变温度,半熔化区部位的金属溶液以非平衡方

式凝固,不能满足此处聚集的 C 元素石墨化所需的结晶条件, C 元素来不及生成稳定系石墨,因此以生成介稳定 Fe_3C 白口组织的形式结晶,然后形核并长大。由图 3(d) 还可以看出,熔覆层与基体界面周围存在气孔缺陷。这主要是由于熔池中的 C 元素与空气中的 O 元素发生不完全反应生成了 CO,在快速冷凝的温度骤降过程中,熔池中的气体溶解度迅速下降,CO 等熔池中溶解的气体来不及逸出,从而形成了气孔缺陷。

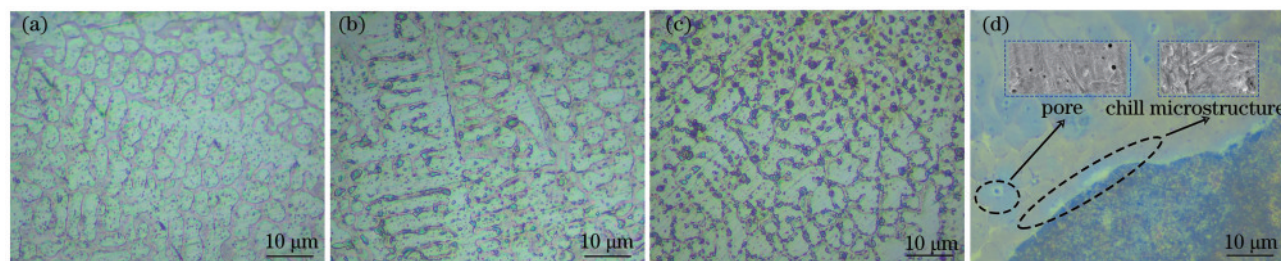


图 3 熔覆层的显微组织。(a)熔覆层顶部的显微组织;(b)熔覆层中部的显微组织;(c)熔覆层底部的显微组织;(d)熔覆层与基体界面的显微组织

Fig. 3 Microstructures of cladding layer. (a) Microstructure of the top cladding layer; (b) microstructure of the middle cladding layer; (c) microstructure of the bottom cladding layer; (d) interface between the cladding layer and the substrate

3.2 淬火后晶粒的细化

图 4 所示为熔覆层淬火前后的显微组织。由图 4(a) 可知:经激光淬火后,熔覆层顶部等轴晶的长度减小,晶粒组织较淬火前明显细化;熔覆层顶部晶粒的平均尺寸从淬火前的 $13 \text{ }\mu\text{m}$ 减小到了 $7.5 \text{ }\mu\text{m}$,晶粒度从淬火前的 3 级细化至 5 级。这主要是因为,在淬火激光束的作用下,熔覆层顶部的组织快速熔化和凝固,有利于晶粒的进一步细化;同时,较大的过冷度使相变驱动力增大^[19],加剧了强

化相的析出,强化相弥散分布在晶内及晶间,阻碍奥氏体晶粒的进一步长大,使奥氏体晶粒呈细化的趋势,并增大了其向马氏体转变的可能。由图 4(b) 可知,淬火后,熔覆层中部树枝晶的枝干明显细化,并伴随有部分二次枝晶分离。这主要是因为熔覆层中部组织吸收激光能量后,在热传导的作用下,再次获得较大的过冷度,为组织的分化及细化提供了驱动力,从而实现了树枝晶的细化以及部分一次枝晶与二次枝晶的分离。

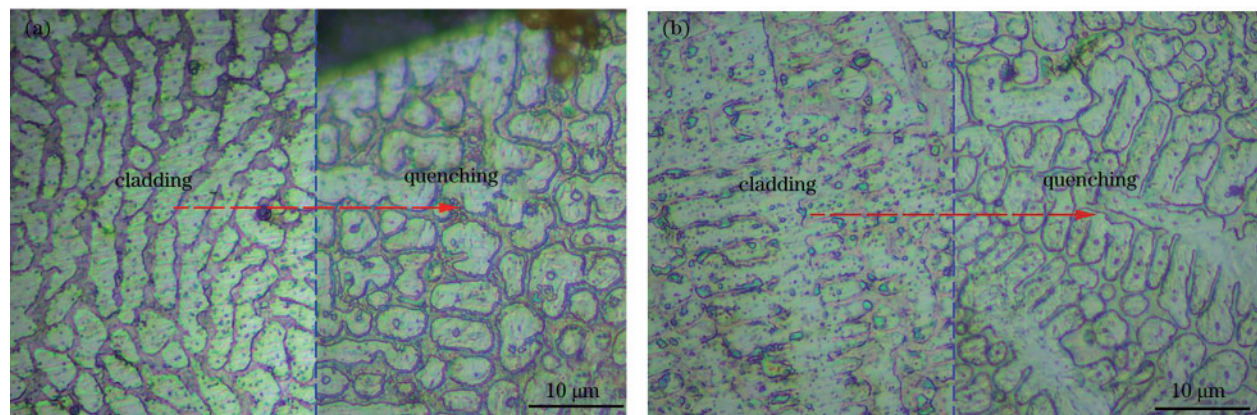


图 4 熔覆层淬火前后的显微组织对比。(a)熔覆层顶部的显微组织;(b)熔覆层中部的显微组织

Fig. 4 Comparison of microstructures of cladding layer before and after quenching. (a) Microstructures on the top of cladding layer; (b) microstructures in the middle of cladding layer

3.3 界面白口组织的强化

图 5 所示为激光淬火前后熔覆层与基材界面区域白口组织的变化,其中,X 射线能量色散谱(EDS 谱)中的 σ 表示各元素质量分数的标准差。由图 5(a) 可知,激光淬火前,界面区域的白口组织呈现为显著连续分布状态,激光淬火后,该位置处连续分布的白口组织有所分散,同时部分白口组织存在回熔趋势。这主要是因为激光淬火时,熔池的对流搅拌和热输入改变了 Ni、Cu 元素在该处的含量和

分布。Ni、Cu 元素为强石墨化元素,进入该区域的 Ni、Cu 元素增强了 C 结晶过程中的石墨化作用,部分抵消了 C、Si 含量减少导致的白口倾向,从而优化了该区域白口组织的分布形态。从图 5(a) 和图 5(b) 所示的界面 EDS 图谱可以看出, Ni 元素的质量分数从淬火前的 2.0% 减少到淬火后的 1.2%, Cu 元素从淬火前的 0.1% 减少到 0, C 元素从淬火前的 5.9% 减少到 4.8%。这是因为 Ni、Cu 元素促使 C 结晶过程消耗了部分 Ni 元素、Cu 元素和 C 元素。

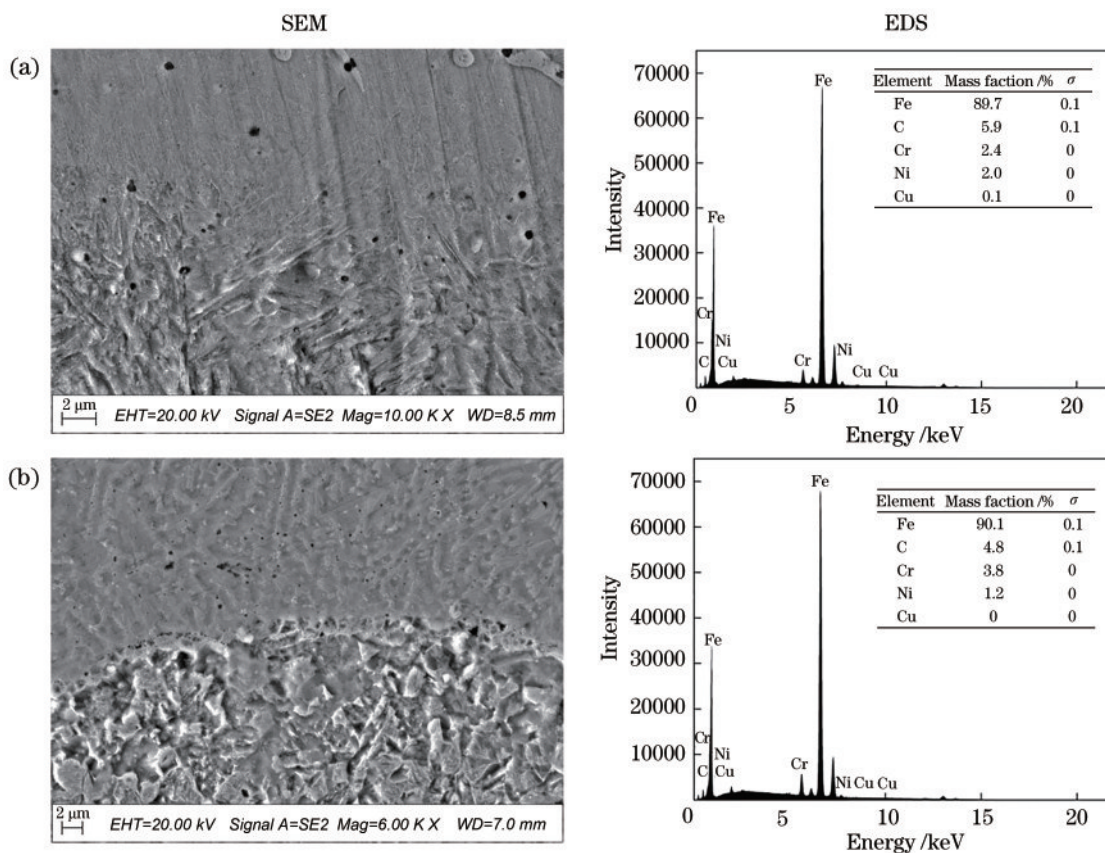


图 5 熔覆层与基材界面区域白口组织的 SEM 形貌和 EDS 谱。(a) 激光淬火前; (b) 激光淬火后

Fig. 5 SEM images and EDS spectra of chill microstructure at the interface area between cladding layer and substrate. (a) Before laser cladding; (b) after laser quenching

3.4 熔覆层中强化相的验证

为了进一步验证熔覆层中晶内及晶间强化相的物相组成,对熔覆层中部的强化相进行 X 射线衍射(XRD)分析,结果如图 6 所示。可以看出,熔覆层中含有铁素体及 Cr_7C_3 等物相,从而进一步确定弥散析出相主要为 Cr_7C_3 相,文献[24]中也有相关验证性证明。 Cr_7C_3 等物相具有硬度和结合强度高、耐磨性好以及良好的耐蚀性和抗氧化能力,常被用作强化相在熔覆层的晶内及晶间析出,以改善或增强熔覆层的性能。

4 熔覆层的主要力学性能

4.1 显微硬度

从熔覆层顶部到界面处的硬度分布如图 7 所示。由图 7 可知:激光淬火前,熔覆层的显微硬度为 473~589 HV,激光淬火后,熔覆层顶部的硬度为 666~735 HV。通过淬火硬度提升区域可判定淬火深度约为 500 μm 。在激光淬火的急冷条件下,极大的凝固结晶速度有利于熔覆层形成更为细小致密的晶体组织,达到细晶强化的作用。由图 7 还可以

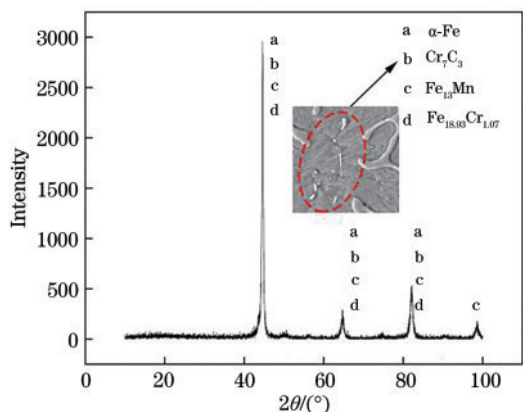


图 6 熔覆层的主要强化相

Fig. 6 Main strengthening precipitations in the cladding coating
 看出,由熔覆层顶部至结合界面处,显微硬度不断下降。这主要是因为熔覆层中部为粗大的树枝晶,硬度较覆层顶部的等轴晶区域有所下降;而在近界面处,受热输入的直接影响,存在一定程度的界面软化,因此硬度下降。

4.2 摩擦磨损性能

采用NANOVEA摩擦磨损测试仪进行球-盘接触式往复摩擦磨损试验,试验在常温无润滑条件下进行,摩擦副选用 $\varnothing 6$ mm的GCr15钢球,加载力为2 N,加载频率为3 Hz。激光淬火前后的试样在室温下的摩擦因数曲线如图8所示。由图8可知:激光淬火前,

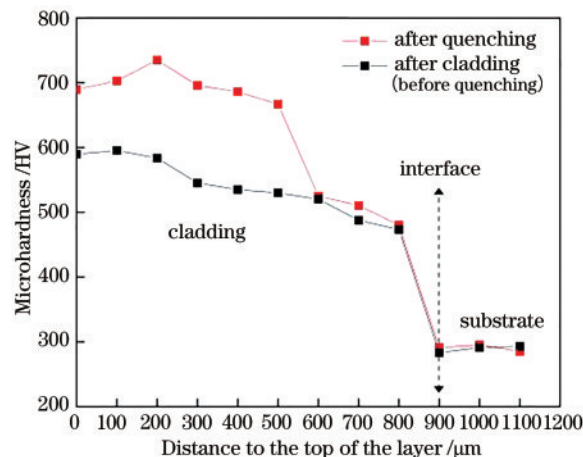


图 7 激光淬火前后,试样横截面的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution on the cross-section of the sample before and after laser quenching

熔覆层的摩擦因数分布在0.15~0.25之间,磨损率约为 $8.23 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{mm})$;激光淬火后,熔覆层的摩擦因数分布在0.05~0.15之间,磨损率约为 $3.85 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{mm})$,磨损率约为前者的1/2。由此可见,激光淬火后熔覆层的表面耐磨性能明显优于激光淬火前。这主要是因为熔覆层表层经过淬火的快速冷却作用后,晶粒进一步细化,同时温度达到了奥氏体转变的相变点,促使部分奥氏体向马氏体转变,实现了熔覆层表面耐磨性的提升^[25]。

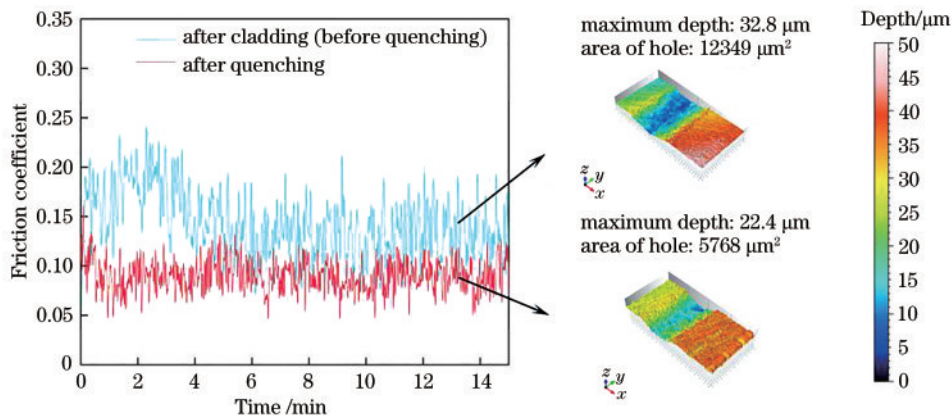


图 8 熔覆层表面的摩擦因数曲线及摩擦磨损形貌

Fig. 8 Friction coefficient curves and friction and wear morphologies of cladding layer surface

4.3 熔覆层的冲击性能

除硬度与耐磨性外,齿轮再制造熔覆层抗冲击载荷的能力,也是关系齿轮使役性能的重要方面。为了进一步测试FeCrNiCu合金熔覆层的冲击韧性,本文进行了夏比摆锤冲击试验。试验结果表明,激光熔覆试样的冲击功在11.58~15.23 J之间,均值为12.76 J,冲击韧度在517.08~729.32 kJ/m²

之间,均值为598.92 kJ/m²,均优于QT700铸铁的室温冲击性能。熔覆层晶内及晶间的析出相Cr₇C₃等起到了弥散强化的作用,利于熔覆层强度和韧性的提高^[26]。

5 结 论

在QT700球墨铸铁表面制备FeCrNiCu熔覆层的

工艺参数如下:激光熔覆功率为 1.2 kW,光斑直径为 3 mm,扫描速度为 5 mm/s,载气流量为 3 L/min,送粉速率为 8.1 g/min,离焦量为 5 mm;激光淬火功率为 1.5 kW,扫描速度为 8 mm/s,离焦量为 60 mm。

熔覆层经激光淬火后,其顶部等轴晶更为细小致密,中部的树枝晶枝干明显细化,并伴有部分二次枝晶分离,界面附近区域的白口组织由连续分布优化为有所分散并呈部分回熔状态,晶内及晶间弥散析出了 Cr_7C_3 强化相,无气孔、裂纹等成形缺陷。

熔覆层经淬火后,淬火深度约为 500 μm ,熔覆层顶部硬度为 666~735 HV,熔覆层的摩擦因数分布在 0.05~0.15 之间,磨损率约为 $3.85 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 。

激光熔覆后,熔覆层与基材界面上方存在少量气孔。为了更好地控制球墨铸铁件激光熔覆层的质量,针对该缺陷,可以从以下几个方面展开进一步工作:1)调整激光熔覆工艺。通过增大送粉量来增加粉末对激光能量的吸收,减小基体的熔化深度,从而减少石墨进入熔池的量;或者通过降低扫描速度来增加熔池在液态的停留时间,使其大于熔池内形成的气泡上浮至熔覆层表面的时间。2)在成形室内制造惰性或真空负压环境,将活性气体留存量降至最低,以避免发生造气反应,形成气泡。

参 考 文 献

- [1] Zheng J P, Chu M Q, Zhang S Y. Research progress on laser cladding repair surface strengthening technology of cast iron materials[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(17): 1-6,10.
郑江鹏, 初铭强, 张书彦. 铸铁材料激光熔覆修复表面强化技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(17): 1-6,10.
- [2] Yan S X, Dong S Y, Xu B S, et al. Effect of preheating temperature on microstructure and property of laser clad Ni-based alloy coating on gray cast iron substrate [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1): 30-36.
闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. 预热温度对灰铸铁表面激光熔覆镍基涂层组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 30-36.
- [3] Zhai J H, Xu H Y, Liu Z J, et al. Experimental study on laser cladding of Ni-based alloys on spheroidal graphite cast iron surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101412.
翟建华, 许慧印, 刘志杰, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆镍基合金试验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101412.
- [4] Zhao C S, Xing Z G, Wang H D, et al. Advances in laser cladding on the surface of iron carbon alloy matrix [J]. Materials Review, 2018, 32(3): 418-426.
赵聪硕, 邢志国, 王海斗, 等. 铁碳合金表面激光熔覆的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(3): 418-426.
- [5] Zhu H M, Hu J P, Li B C, et al. Research progress of laser cladding stainless steel coating on Fe-based substrate[J]. Surface Technology, 2020, 49(3): 74-84.
朱红梅, 胡际鹏, 李柏春, 等. 铁基材料表面激光熔覆不锈钢涂层的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 74-84.
- [6] Xu S M, Sun W H, Wu W J. Application and prospect of laser cladding technology in auto remanufacturing field [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(22): 33-36.
徐素明, 孙维汉, 武文娟. 激光熔覆技术在汽车再制造领域的应用及前景[J]. 热加工工艺, 2017, 46(22): 33-36.
- [7] Ren W B, Zhou J Y, Zhang S R, et al. Forming and performance control of pulsed laser remanufacturing for K418 alloy impeller [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(10): 3315-3319.
任维彬, 周金宇, 张锁荣, 等. K418 高温合金叶轮脉冲激光再制造形状与性能控制[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(10): 3315-3319.
- [8] Sheng J J, Wang L, Liu R, et al. Effects of heat treatment on microstructure and performance of laser clad IN939 alloy [J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 202-209,252.
盛家锦, 王梁, 刘蓉, 等. 热处理对激光熔覆 IN939 合金涂层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 202-209,252.
- [9] Jeyaprakash N, Yang C H, Duraiselvam M, et al. Investigation of high temperature wear performance on laser processed nodular iron using optimization technique [J]. Results in Physics, 2019, 15: 102585.
- [10] Xu J, Zhou J Y, Ren W B, et al. K418 blade laser remanufacturing three-dimensional forming Inconel 718 coating process and microstructure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 031401.
徐杰, 周金宇, 任维彬, 等. Inconel 718 覆层工艺用于 K418 叶片激光再制造立体成形[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 031401.
- [11] Arias-González F, del Val J, Comesana R, et al. Fiber laser cladding of nickel-based alloy on cast iron

- [J]. Applied Surface Science, 2016, 374: 197-205.
- [12] Lestan Z, Milfelner M, Balic J, et al. Laser deposition of Metco 15E, Colmony 88 and VIM CRU 20 powders on cast iron and low carbon steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9/10/11/12): 2023-2028.
- [13] Tong W H, Zhao Z L, Zhang X Y, et al. Microstructure and properties of TiC/Co-based alloy by laser cladding on the surface of nodular graphite cast iron [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(4): 472-478.
童文辉, 赵子龙, 张新元, 等. 球墨铸铁表面激光熔覆 TiC/钴基合金组织和性能研究[J]. 金属学报, 2017, 53(4): 472-478.
- [14] He Y Y, Liu Y J, Chen M, et al. Study on effect of laser scanning speed on microstructure and properties of cladding layer [J]. Laser Technology, 2019, 43(2): 201-204.
何昱煜, 刘益剑, 陈明, 等. 激光扫描速率与熔覆层组织性能的规律研究[J]. 激光技术, 2019, 43(2): 201-204.
- [15] Liu H, Hao J B, Han Z T, et al. Microstructural evolution and bonding characteristic in multi-layer laser cladding of NiCoCr alloy on compacted graphite cast iron[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 232: 153-164.
- [16] Li Y J, Dong S Y, Yan S X, et al. Surface remanufacturing of ductile cast iron by laser cladding Ni-Cu alloy coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 347: 20-28.
- [17] Ding H H, Su C R, Wang W J, et al. Investigation on the rolling wear and damage properties of laser discrete quenched rail material with different quenching shapes and patterns [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378: 124991.
- [18] Su C R, Lyu C L, Shi L B, et al. Effect of laser dispersed quenching on wear and damage property of ductile iron [J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 85-90.
苏超然, 吕长乐, 师陆冰, 等. 激光离散淬火对球墨铸铁磨损与损伤性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 85-90.
- [19] Tang L, Wang W J, Zhang Y L, et al. Effect of laser quenching process on surface hardness and hardened layer depth of QT700-2 ductile cast iron[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(5): 82-86.
唐亮, 王文健, 张亚龙, 等. 激光淬火工艺对 QT700-2 球墨铸铁表面硬度与硬化层深度的影响
- [J]. 机械工程材料, 2020, 44(5): 82-86.
- [20] Ren W B, Dong S Y, Xu B S, et al. Process optimization and forming repair of laser remanufacture for FV520(B) steel blade simulator [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(1): 6-12.
任维彬, 董世运, 徐滨士, 等. FV520(B) 钢叶片模拟件激光再制造工艺优化及成形修复[J]. 材料工程, 2015, 43(1): 6-12.
- [21] Yang P C, Song Y L, Liu Y H, et al. Effect of scanning speed on microstructure of laser cladding layer on nodular cast iron [J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 187-192.
杨鹏聪, 宋雨来, 刘耀辉, 等. 扫描速度对球墨铸铁激光熔覆层组织的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 187-192.
- [22] Yang Z, Fan X F, Qiu C J, et al. Effect of laser power on quenched microstructure and friction and wear properties of 40CrNiMoA steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(3): 128-133.
杨振, 樊湘芳, 邱长军, 等. 激光功率对 40CrNiMoA 钢表面淬火组织和摩擦磨损性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 128-133.
- [23] Zhang X Y, Zhang X M, Liu J, et al. Effect of different cooling rates on hardened layer of nodular cast iron after laser heat treatment [J]. Applied Laser, 2019, 39(5): 860-865.
张校源, 张心明, 刘佳, 等. 冷却速率对激光热处理球墨铸铁中硬化层的影响[J]. 应用激光, 2019, 39(5): 860-865.
- [24] Li W Q. Laser cladding intensification on on 30CrMnSi surface [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(10): 1058-1061.
黎文强. 30CrMnSi 钢表面激光熔覆强化技术研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(10): 1058-1061.
- [25] Song R H, Peng Y. Effects of fiber laser quenching on wear performance of 45 steel used for cam [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(5): 86-92.
宋瑞宏, 彭云. 光纤激光淬火对凸轮用 45 钢表面磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 86-92.
- [26] Ping X L, Fu H G, Sun S T. Progress in preparation of hard phase reinforced Ni-based alloy composite coating by laser cladding [J]. Materials Reports, 2019, 33(9): 1535-1540.
平学龙, 符寒光, 孙淑婷. 激光熔覆制备硬质颗粒增强镍基合金复合涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 1535-1540.