

蠕墨铸铁激光合金化熔覆的界面组织及性能

刘昊^{1,2}, 虞钢¹, 何秀丽¹, 李少霞¹, 朱天辉¹, 宁伟健¹, 郑彩云¹

(1. 中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190;

2. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对铸铁激光熔覆涂层结合界面淬硬硬化、裂纹倾向大的问题, 提出激光合金化与激光熔覆相结合的工艺在蠕墨铸铁表面制备 NiCoCrAlY 合金涂层。通过光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、维氏硬度计研究了激光合金化熔覆中熔覆层稀释率、组织、显微硬度的演化规律, 通过三点弯曲试验考察了熔覆层的结合特性及力学性能。结果表明: 激光合金化熔覆工艺方法将热影响区由马氏体组织转变为回火索氏体组织, 降低了淬硬层深度, 改善了熔覆层结合特性与塑性, 抗弯强度提高到 891 MPa。断口显示, 熔覆层与基体结合良好, 断裂机制是脆性解理断裂与韧窝断裂混合机制。

关键词: 蠕墨铸铁; 激光熔覆; 稀释率; 显微组织; 抗弯强度

中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2015)03-0171-06

Microstructure and mechanical properties of NiCoCrAlY coating on compacted graphite iron by laser cladding

LIU Hao^{1,2}, YU Gang¹, HE Xiu-li¹, LI Shao-xia¹, ZHU Tian-hui¹, NING Wei-jian¹, ZHENG Cai-yun¹

(1. Key Laboratory of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics, Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and

Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Considering the problem of quench hardening and cracking at the interface of laser cladding coating on the cast iron, a method combined laser alloy and laser cladding was proposed to produce NiCoCrAlY coating on compacted graphite iron. The dilution, microstructure and microhardness of the coating were investigated by means of optical microscope, scanning electron microscopy, X-ray diffractometer, Vickers hardness tester. The bonding characteristics and mechanical properties of the layer were evaluated by three-point bending test. The results show that martensite turns to tempered sorbite in heat affected zone by the laser alloy cladding method, thus the depth of hardening layer decreases. Simultaneously, the bonding characteristics and plasticity are improved, and the bending strength is raised to 891 MPa. The fracture morphology shows a good bonding between coating and substrate, and also a combination of cleavage fracture and dimple fracture.

Key words: compacted graphite iron; laser cladding; dilution; microstructure; bending strength

DOI:10.13289/j.issn.1009-6264.2015.03.031

激光熔覆技术是利用高功率密度激光束辐射基体材料,同时添加熔覆材料,使基体表面薄层与熔覆材料同时熔凝,在基体表面形成冶金结合的熔覆层(或称涂层)的方法^[1]。激光熔覆具有界面冶金结合、热影响区与加工变形小、熔覆层组织致密等优点。同时,激光熔覆层稀释率小,能够充分发挥熔覆合金材料的优异性能,所以激光熔覆近些年来得到国内外学者的高度重视^[2]。目前,已开展了在碳钢及合金

钢、高温合金、镁合金、钛合金等多种材料表面激光熔覆的工艺的研究^[2-4]。

蠕墨铸铁是车用发动机气缸盖等关键零部件的常用材料,但随着发动机向着高功率、高转矩等要求的持续增长,所带来的热负荷、机械负荷已逐渐接近或超过蠕墨铸铁材料的使用极限^[5-6]。在蠕墨铸铁表面激光熔覆高性能合金涂层是提高发动机零件使用性能的有效途径。但是,蠕墨铸铁中由于蠕虫状的石墨存在,其碳含量大,在快速熔凝激光处理中容易产生淬硬层,裂纹倾向性大,影响了熔覆层与基体的结合特性^[7-8]。董世运等^[8]在灰铸铁表面激光熔覆 NiCuFeBSi 合金,发现提高预热温度到 500 °C 可以避免出现连续的白口组织,降低界面脆性。而 Lestan 等^[9]的研究显示,在使用 VIM CRU 20 粉末和 Colmony 88 粉末激光熔覆时,预热基体对改善脆性和

收稿日期: 2014-05-21; 修订日期: 2015-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(11272316, 11272317); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 刘昊(1985—),男,讲师,从事激光表面改性研究, E-mail: Liuha08556@163.com。

通讯作者: 虞钢(1958—),男,研究员,博士生导师,从事激光与材料相互作用和激光制造工艺力学研究, E-mail: gyu@imech.ac.cn。

裂纹的作用较小。另一方面,对于气缸盖等大体积复杂构件的预热消耗能量多,增加了工艺环节,限制了激光熔覆技术的优势的发挥。

本文提出激光合金化与激光熔覆相结合的工艺在蠕墨铸铁表面制备 NiCoCrAlY 高性能涂层,通过后续层熔覆对热影响区进行回火处理,改善界面硬脆性。分析稀释率、热影响区组织、熔覆层物相及显微硬度,通过三点弯曲试验考察所制备熔覆层的结合特性及力学性能。

1 实验材料与方法

实验采用的基体材料是蠕墨铸铁(牌号 RuT300),其显微组织由珠光体、铁素体和蠕虫状的石墨构成,蠕化率达到 85%,其化学成分(质量分数,%)为 C: 3.6, Si: 2.7, Mn: 0.2, P < 0.05, S < 0.02, Fe: 余量。熔覆粉末为 NiCoCrAlY 合金粉末,粒度-140 目 ~ +325 目(40 ~ 150 μm),化学成分(质量分数,%)为 C: 0.5, Co: 2.6, Cr: 18.6, Al: 3.4, Ni: 余量。

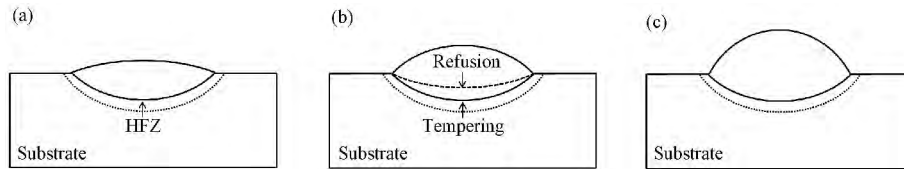


图1 激光合金化熔覆过程 (a) 激光合金化; (b) 后续层熔覆; (c) 熔覆层形貌

Fig. 1 Sketch of laser alloy cladding process

(a) laser alloying; (b) deposition of subsequent layers; (c) morphology of deposited coating

激光合金化熔覆工艺参数为:激光功率 900 W、光斑直径 2.03 mm、扫描速度 6 mm/s、熔覆道长 30 mm、送粉速率 4.15 g/min、提升距离 0.2 mm、悬停 1.5 s。根据数值计算,热影响区宽度约 0.5 mm,熔覆后续层时热影响区平均温度约 720 $^{\circ}\text{C}$ 。为考察工艺过程中组织性能的演化规律,在首层激光合金化后,再分别进行 2、3、4、5、6 层的熔覆实验。

实验结束后,采用超声波清洗仪清洗熔覆层与基体。沿横截面方向线切割熔覆层,打磨抛光后首先用体积分数 4% 的硝酸酒精腐蚀,在光学显微镜下观察熔覆层的宏观形貌、结合特性、及半熔化区、热影响区显微组织特征。然后重新打磨抛光,用王水再次腐蚀,观察熔覆层内显微组织。采用 Rigaku Dmax-RB 型 X 射线衍射仪分析涂层物相,使用 Cu 靶,工作电压为 40 kV。采用 ZEISS EVO18 Special Edition 型扫描电子显微镜(SEM)分析熔覆层高倍显微组织与弯曲断口形貌。采用 HXD-1000 型显微硬度计测量熔

从熔覆的工艺性能上讲,熔覆材料与基体材料的热膨胀系数、熔点等热物性参数接近^[10-11]。

实验采用 Nd: YAG 连续激光器,激光透镜焦距 150 mm。采用双筒刮板式送粉器及同轴送粉喷嘴输送合金粉末。RuT300 基体尺寸为 120 mm \times 60 mm \times 30 mm,实验前采用水磨砂纸打磨表面,并用丙酮和无水乙醇清洗。NiCoCrAlY 粉末在实验前烘干,保证粉末的流动性。

激光合金化熔覆如图 1 所示,其工艺过程是:

1) 在小送粉速率下,激光扫描基体材料表面形成表面合金化层; 2) 将激光头提升一段距离,悬停较短时间,再反向扫描熔覆基体表面; 3) 后续可反复多层熔覆,直到达到所需熔覆层厚度和稀释率的要求。第一层激光表面合金化改善基体的熔覆性能,同时基体熔覆的区域具有局部预热的作用。后续层适当控制提升距离和悬停时间等工艺参数,使形成的温度场对第一层中热影响区的马氏体等具有回火作用,以降低结合界面的内应力、硬脆性与裂纹倾向性。

覆层至基体深度方向的硬度分布,采用 100 g 的固定载荷标准,载荷保持时间为 15 s,测量点间隔 50 μm 。

为考察熔覆层的结合特性与力学性能,验证激光合金化熔覆的特点,对基体材料试样与具有激光熔覆层的试样进行三点弯曲试验。激光熔覆层由两种不同的方式制备:单层激光熔覆法和激光合金化熔覆法。弯曲试样尺寸为 60 mm \times 10 mm \times 2 mm,熔覆层厚度为 0.835 mm。弯曲试验在 RG3000A 电子式万能试验机下进行,压辊直径 10 mm,跨距 40 mm,试验速度 1.0 mm/min。考虑到铸铁材料抗压性能优于抗拉性能,进行弯曲试验时,将蠕墨铸铁基体置于上侧直接接触压头,使基体主要承受压应力作用。

2 结果及讨论

2.1 熔覆层稀释率

测量涂层的宽度 W 、高度 H 、以及在基材中的熔深 d ,测量结果如表 1 所示。根据熔覆层的宏观几何

形貌,其外轮廓线及基材熔合线均为抛物线。熔覆层稀释率可以表示为^[12]:

$$\eta = d / (d + H) \quad (1)$$

根据式(1)计算分别进行 1~6 层激光合金化熔覆的稀释率,列入表 1 内。稀释率表示基体元素对熔覆层合金成分的影响程度,是激光合金化与激光熔覆的主要差别。当合金涂层中基体元素所占比例超过 50% 并且涂层中材料元素分布较为均匀,则为激光合金化;反之,合金涂层中基体元素比例较少,涂层上部材料元素以添加材料为主,则为激光熔覆^[1]。从表 1 可以看出,随着层数的增加,稀释率逐渐降低。在 4 层以前,稀释率在 50% 以上,为合金化涂层,在 4 层以后,稀释率降至 50% 以下,为熔覆涂层。通过合理选择送粉速率与熔覆层数,可以达到所需熔覆层的厚度与稀释率要求。

表 1 熔覆层高度、熔深、厚度测量值与稀释率计算值

Table 1 The measured geometric parameters in cross section of the coating and calculated dilutions

Layer	1	2	3	4	5	6
Width/mm	2.279	2.386	2.404	2.412	2.601	2.627
Height/mm	0.235	0.339	0.527	0.697	0.860	0.961
Depth/mm	0.618	0.782	0.732	0.751	0.744	0.723
Dilution/%	72.5	69.8	58.1	51.9	46.4	42.9

2.2 热影响区组织演化

图 2 给出了单层熔覆的热影响区组织。在图 2 (a) 的低倍图片中,从上到下依次为熔覆层、热影响区、基材。热影响区是激光熔覆时温度在 A_{c1} 的等温线与熔合线之间的区域,热影响区发生固态相变。在熔合线附近,在熔覆过程中达到的温度较高,但低于材料熔点,蠕墨铸铁中的铁素体和珠光体在加热过程中奥氏体化,当激光束移动离开后,迅速降温而转变为贝氏体及竹叶状马氏体组织,如图 2 (b) 所示。在热影响区的下部位置,距熔合线距离远,马氏体转变

后,还有少量未发生转变的奥氏体。所以,热影响区最终显微组织由贝氏体、竹叶状马氏体、残余奥氏体和石墨构成,相当于淬火组织。热影响区中竹叶状马氏体力学性能的特点是高强度、高硬度,但韧性较差,即硬而脆。马氏体形成体积膨胀,产生相变应力,使热影响区结合界面易产生微裂纹。

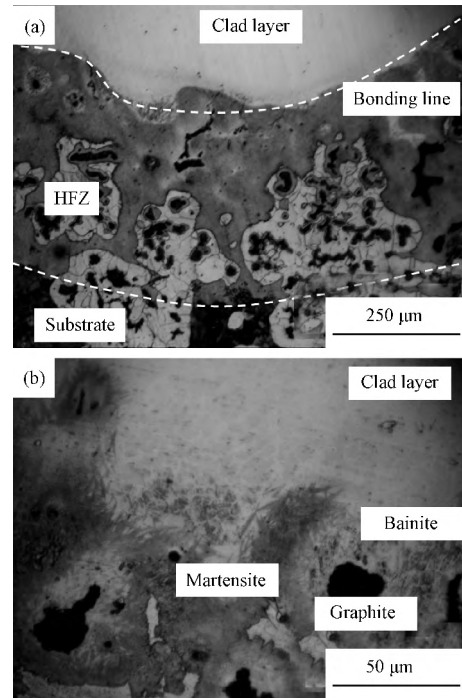


图 2 激光合金化熔覆 1 层的热影响区显微组织 (a) 全貌; (b) 高倍放大图

Fig. 2 Microstructure of heat affected zone with one layer cladding (a) general morphology; (b) high magnification view

采用激光合金化熔覆的方法,激光熔覆 6 层的结合界面与热影响区组织如图 3 所示。通过图 3 (a) 与图 2 (a) 的对比发现,热影响区组织发生较大变化。在熔合线附近,虽然仍存在部分竹叶状马氏体组织,如图 3 (b),但在热影响区中距离熔合线稍远的部分,

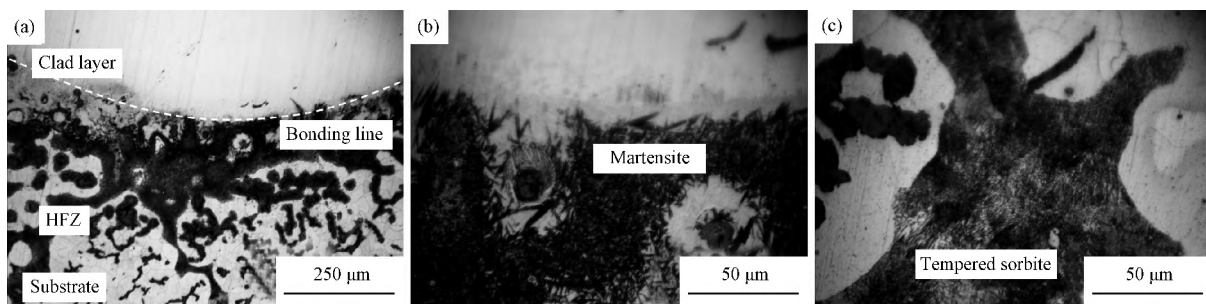


图 3 激光合金化熔覆 6 层的热影响区显微组织 (a) 全貌; (b) 结合区; (c) 回火区

Fig. 3 Microstructure of heat affected zone with 6 layers of laser alloy cladding (a) general morphology; (b) bonding zone; (c) tempered zone

显微组织转变为回火索氏体。图3(c)的高倍图像清晰显示回火索氏体中铁素体和渗碳体的片层状组织形态。这说明在后续层的熔覆中,由于持续的热输入,使基体的温度升高,对第一层形成的热影响区产生高温回火作用。这种高温回火作用减小和消除了前续层熔覆时的内应力,降低了结合界面处的硬度,提高了塑性和韧性,使其综合力学性能优良。

随着后续层的熔覆,距离熔合线最远的马氏体逐步发生高温回火。定义熔合线以下马氏体区域的深度为淬硬层深度,其反映了结合界面的硬脆性和内应力水平。淬硬层深度随熔覆层数的变化如图4所示。随着熔覆层数的增加,淬硬层深度逐渐降低。

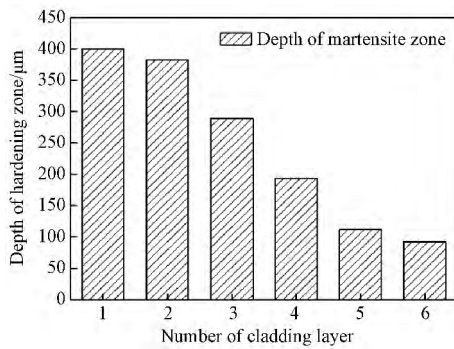


图4 淬硬层深度随熔覆层数的变化

Fig. 4 Depth of hardening layer with different cladding layers

2.3 熔覆层物相

熔覆层 X 射线衍射分析结果如图5所示。 NiCoCrAlY 合金涂层的相结构为 $\gamma\text{-(Fe,Ni)}$ 、 Cr_7C_3 以及少量的 Ni_3Al 。激光熔覆的快速凝固过程中,热流主要沿垂直于基体水平面的方向散失, $\gamma\text{-(Fe,Ni)}$ 柱状树枝晶按晶体学择优方向生长,方向性明显,如图6所示。 Cr_7C_3 碳化物与 Ni_3Al 金属间化合物呈短棒状,分布在枝晶晶界之间。 γ 镍基固溶体为连续相,其中固溶了Co、Al等元素,具有良好的常温与高温力学性能,优异的韧性与稳定性^[13]。 Cr_7C_3 碳化物为高硬度析出相,其硬度为1400~1800 HV。由于熔覆层中C元素主要由熔化的基体材料通过熔池扩散到熔覆层中,所以稀释率的大小与熔覆层中 Cr_7C_3 含量具有直接关联。

2.4 显微硬度

图7是熔覆试样显微硬度沿深度方向的分布曲线。从图7(a)的单层熔覆层的硬度曲线看出,显微硬度在熔覆层内分布比较均匀,平均显微硬度为461.73 HV0.1。熔覆的热影响区宽度约为0.4 mm,

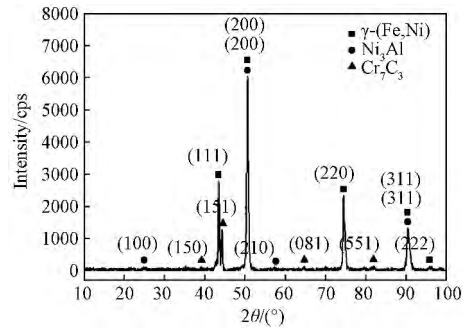


图5 熔覆层 X 射线衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of coating

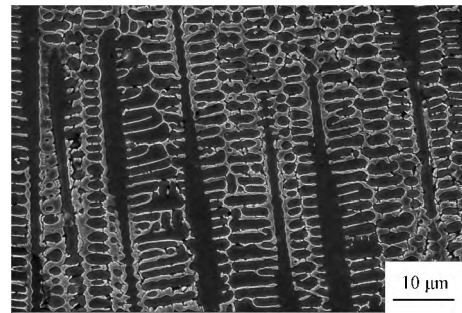


图6 熔覆层显微组织

Fig. 6 Microstructure of coating

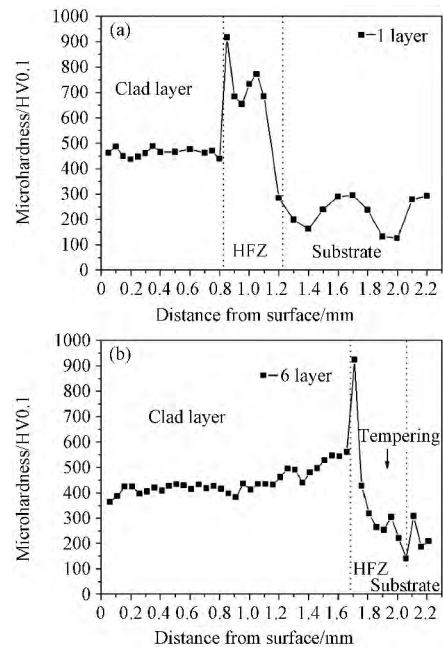


图7 熔覆层显微硬度分布

(a) 单层熔覆; (b) 六层熔覆

Fig. 7 Microhardness distribution of coatings

(a) one-layer cladding; (b) six-layer cladding

由于具有高碳马氏体、贝氏体等淬硬组织,此区域内显微硬度最高达到916.85 HV0.1。蠕墨铸铁基体的

平均显微硬度为 227.76 HV0.1。由于具有不同的相,显微硬度在热影响区与基体位置具有一定波动。

激光合金化熔覆 6 层的试样沿深度方向的显微硬度分布曲线,如图 7(b) 所示。与单层熔覆的显微硬度分布相比,熔覆层内的显微硬度,由结合界面到熔覆层表面呈现出略微下降的趋势,平均硬度也降低到 440.57 HV0.1。这是因为多层熔覆使稀释率降低, Cr_7C_3 高硬度相含量减少。经历后续层的回火后,热影响区中下部的显微硬度显著下降至 317 ~ 426 HV0.1 之间,这部分硬度对应图 3(c) 所示的回火索氏体组织。显微硬度的变化说明,激光合金化熔覆方法改善了熔覆层与基体的硬度匹配关系。

2.5 弯曲性能

图 8 给出了 3 种不同试样在三点弯曲试验中的载荷挠度曲线。其中,试样 S1 是未进行熔覆的蠕墨铸铁试样,试样 S2、S3 的基体为蠕墨铸铁,并分别采用单层激光熔覆法与激光合金化熔覆法在各自的表面上熔覆了 NiCoCrAlY 合金涂层。从图 8 中可以看出,3 条载荷挠度曲线具有相似的特征。以试样 S1 为例,试样弯曲到 P 点之前,载荷与挠度保持线性关系,弯曲变形为线弹性变形,此阶段的弯曲弹性模量可以定义为:

$$E_b = \frac{L_s^3}{48I} \left(\frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \quad (2)$$

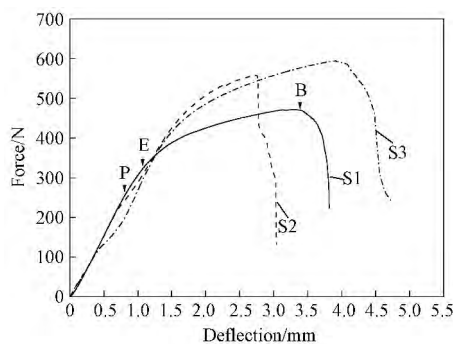


图 8 弯曲试验的载荷挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curve of bending test

式中 L_s 为跨距 I 为试样截面惯性矩, F 为载荷 f 为挠度。试样弯曲在 E 点之前,变形均为弹性变形,在 E 点之后发生塑性变形,到达 B 点时,试样断裂,最大载荷 F_{bb} ,则抗弯强度定义为:

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb} L_s}{4W} \quad (3)$$

式中 W 为试样截面系数。试样断裂时对应的挠度定义为断裂挠度 f_{bb} 。在载荷挠度曲线中,弹性极限点 E 至断裂点 B 两点之间试样发生塑性变形。定义此两

点对应的挠度之差为塑性阶段,表征试样的塑性。3 种试样的弯曲性能数据如表 2 所示。

表 2 试样的弯曲性能

Table 2 Bending property of sample

Sample	S1	S2	S3
Bending elastic modulus/GPa	63.4	57.6	56.8
Plastic stage/mm	2.24	1.10	2.40
Bending strength/MPa	707	882	891
Fracture deflection/mm	3.31	2.72	3.91

从试样 S1 的载荷挠度曲线可以看出,蠕墨铸铁在弯曲断裂前存在比较明显的弹性变形与塑性变形,显示出蠕墨铸铁具备一定的塑性。从图 8 看出,3 种试样的弯曲弹性模量相差不大,但 NiCoCrAlY 涂层提高了蠕墨铸铁材料的弹性极限。采用单层激光熔覆的试样 S2,其塑性降低,断裂挠度仅为 2.72 mm,低于基体材料 3.31 mm 的断裂挠度。这种趋势的发生与热影响区产生的马氏体、内应力及微裂纹有关。采用激光合金化熔覆的试样 S3,其断裂挠度、抗弯强度和塑性都得到了明显的提高。

为进一步考察激光合金化熔覆的界面结合特性和断裂机理,在扫描电子显微镜下观察试样 S3 的断口,断口如图 9 所示。图 9(a) 中的点划线表示了熔覆层与基体的结合界面。在弯曲断口上,熔覆层与基体的结合界面在正应力与剪应力作用下没有发生剪断、撕裂,保持良好的冶金结合状态。与基体区域的断口相比,合金熔覆层区域的断口较为平整。这与激光熔覆快速凝固,形成的晶粒尺寸细小而致密有关。

图 9(b) 是在断口的基体区域高倍 SEM 图像,可以看出,此位置的断口上具有典型的河流花样与撕裂岭,断裂属于解理断裂机制。解理是沿晶体内部某一结晶面发生的断裂,是金属材料脆性断裂特征。河流花样是不同的解理断裂平面相互连接形成的台阶。从图 9(b) 中看出,河流花样在裂纹扩展中趋于合并,这减缓了裂纹前沿的扩展速度。在弯曲断裂过程中,断口上的解理小裂纹的不断长大、合并,最后以塑性方式撕裂断口残余连接的部分,形成撕裂岭,这是基体材料具有塑性变形能力的原因之一。

图 9(c) 是在断口的涂层区域高倍 SEM 图像,可以看出,此位置的断口上具有众多韧窝,并且韧窝呈柱状树枝晶生长方向分布,显示出沿晶断裂的特点。在熔覆凝固过程中,局部偏析与合金补缩不足,使晶间强度弱化。在熔覆层受拉应力时,晶间的韧窝成核密度

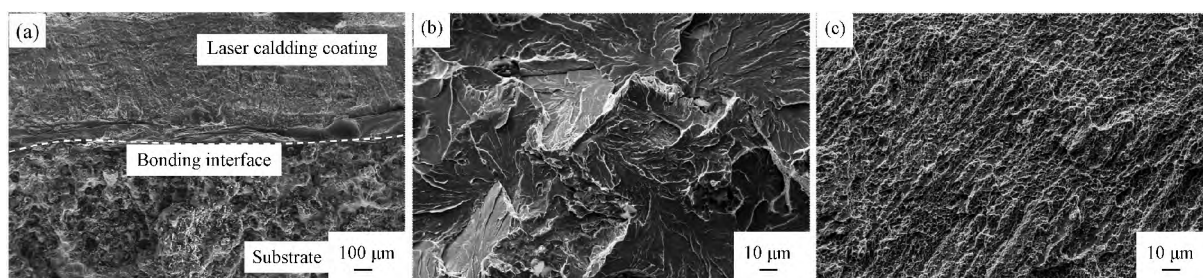


图9 弯曲断口形貌 (a) 全貌; (b) 基体区域; (c) 涂层区域

Fig. 9 Fracture morphology of bending test (a) general morphology; (b) substrate; (c) coating

大 韧窝沿晶界长大和聚集,最后形成沿晶断裂的断口形貌。稀释率小的熔覆层以细小致密、具有高度发达二次枝晶的柱状树枝晶的组织结构为主。相关研究指出,熔覆层柱状枝晶与二次枝晶的微观组织结构特点有利于裂纹的闭合,起到延缓裂纹扩展的作用^[14]。同时,由于晶粒细小致密,大量的晶界阻碍了位错滑移现象。所以,熔覆层提高了试样的抗弯强度。

总之, NiCoCrAlY 熔覆层在弯曲至断裂过程中始终与基体的界面结合良好。由于有蠕墨铸铁和 NiCoCrAlY 熔覆层两部分材料存在,断裂机制是脆性解理断裂与韧窝断裂相结合的混合断裂机制。采用激光合金化方法制备熔覆层,降低了淬硬层深度,提高了热影响区的塑性和韧性。

3 结论

1) 随着激光合金化熔覆层数的增加,稀释率降低。涂层在 4 层以前,稀释率在 50% 以上,为合金化涂层;在 4 层以后,稀释率降至 50% 以下,为熔覆涂层;

2) 热影响区由于快速冷却而产生马氏体、贝氏体组织,显微硬度最高;后续层熔覆过程产生的温度场对热影响区产生回火作用,降低了淬硬层的深度与显微硬度,具有消除内应力,改善界面力学性能的作用;

3) 采用激光合金化熔覆 NiCoCrAlY 涂层的试样,其断裂挠度、抗弯强度分别提高到 3.91 mm、891 MPa,塑性得到明显的改善。熔覆层试样断口中熔覆层与基体的界面结合良好,断裂机制是脆性解理断裂与韧窝断裂相结合的混合断裂机制。

参 考 文 献

- [1] Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Stephen Corbin. Laser Cladding[M]. Florida: CRC Press, 2005.
- [2] 钟敏霖, 刘文今. 国际激光材料加工研究的主要领域与热点[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1653-1659.
ZHONG Min-lin, LIU Wen-jin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research[J]. Chinese Journal of Laser, 2008, 35(11): 1653-1659.
- [3] Dubourg L, Archambeault J. Technological and scientific landscape of laser cladding process in 2007[J]. Sur Coat Tech, 2008, 202(24): 5863-5869.
- [4] Bekir S Y, Shahzada Z S. Laser Surface Processing and Model Studies[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [5] Dawson S, Schroeder T. Practical applications for compacted graphite iron[J]. AFS Transactions, 2004, 71(1): 1211-1216.
- [6] 聂树真. 强度分布整形激光束加载模拟热负荷温度场的实验研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2011: 2-14.
NIE Shu-zhen. Experimental study on the simulation of thermal fatigue temperature field loaded by the shaped laser beam of intensity distribution[D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011: 2-14.
- [7] 周振峰. 铸铁焊接冶金与工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 董世运, 闫世兴, 徐滨士, 等. 铸铁件激光熔覆 NiCuFeBSi 合金组织及力学性能[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 67-73.
DONG Shi-yun, YAN Shi-xing, XU Bin-shi, et al. Microstructure and mechanical property of NiCuFeBSi alloy with laser cladding on substrate of gray cast irons[J]. Chinese Journal of Laser, 2012, 39(12): 67-73.
- [9] 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]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9/12): 2023-2028.
- [10] 谭真, 郭广文. 工程合金热物性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [11] Zhang X, Xu B, Wang H, et al. Modeling of the residual stresses in plasma-spraying functionally graded ZrO₂/NiCoCrAlY coatings using finite elements method[J]. Materials & design, 2006, 27(4): 308-315.
- [12] 乔虹, 李庆棠, 符寒光, 等. 激光熔覆工艺参数对 Fe-Cr-B 合金涂层组织和硬度的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 164-168.
QIAO Hong, LI Qing-tang, FU Han-guang, et al. Effect of processing parameters on microstructure and hardness of Fe-Cr-B alloy coating by laser cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(2): 164-168.
- [13] 刘秀波, 虞钢, 郭建, 等. 等离子体熔覆 γ/ Cr₇C₃ 复合材料涂层组织与耐磨性研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(6): 114-117.
LIU Xiu-bo, YU Gang, GUO Jian, et al. Study on microstructure and wear resistance of plasma jet clad γ/ Cr₇C₃ composite coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(6): 114-117.
- [14] Li Z Y, Zhao H Y, Gu Y, et al. Fatigue crack propagation in laser alloyed ductile cast iron surface[J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25(1): 012003.