

随动进给脉冲电流增强激光熔覆制备 镍基合金涂层试验

徐礼锋^{**}, 王东生^{*}

铜陵学院机械工程学院, 安徽 铜陵 244000

摘要 基于随动进给脉冲电流增强激光熔覆技术在 42CrMo 合金结构钢基体表面制备了 Ni60A 镍基合金涂层, 研究了脉冲电流对熔覆涂层的影响。结果表明: 采用随动进给电极, 利用脉冲电流的趋肤效应, 将大部分电流引入熔池, 提高了电流利用效率, 且较近的电极距离大大提高了电流密度, 增强了改善效果, 有利于制备缺陷少、质量高的熔覆涂层; 相对于传统激光熔覆, 脉冲电流增强激光熔覆既能提高熔覆效率, 又能细化熔覆层晶粒, 降低孔隙率, 并均匀熔覆层组织, 使其由常规激光熔覆形成的枝晶转变成等轴晶; 脉冲电流增强激光熔覆试样的孔隙率为 0.39%, 平均晶粒尺寸约为 4 μm , 优于常规激光熔覆的 0.62% 和 6 μm ; 同时采用随动进给电极可以减少熔覆层残余热应力和开裂敏感性, 特别是小电极距离特有的高能量密度脉冲电流在熔覆层裂纹尖端形成的绕流效应和焦耳热效应能够实现熔覆层裂纹的在线自愈合, 获得无裂纹的熔覆层, 从而解决了激光熔覆层易开裂问题。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 脉冲电流; 随动进给; 熔覆层裂纹; 在线自愈合

中图分类号 TG156.99

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0402006

Ni-Based Alloy Coating Prepared by Laser Cladding Strengthened by Follow-up Feed Pulse Current

Xu Lifeng^{**}, Wang Dongsheng^{*}

College of Mechanical Engineering, Tongling University, Tongling, Anhui 244000, China

Abstract In this study, Ni60A-based alloy coating was prepared on a 42CrMo alloy structured steel substrate surface using laser cladding strengthened by follow-up feed pulse current. Moreover, the effect of pulse current on laser cladding coating is investigated. Results demonstrate that the follow-up feed electrode can increase the utilization efficiency of the pulse current by exploiting its skin effect, directing most of the current into a melting pool. However, the relatively close electrode distance can significantly increase current density and strengthen the improvement effect, which is beneficial for preparing high-quality cladding coatings with few defects. Besides demonstrating higher efficiency than conventional laser cladding, the pulse current-strengthened laser cladding also refines the crystal grain size of the cladding layer, reduces porosity, and increases the uniformity of microstructures in the cladding layer. Hence, dendritic crystals in conventional laser cladding are transformed into isometric crystals. The porosity of the pulse current-strengthened laser cladding is 0.39% and the average grain size is approximately 4 μm , which are better than the corresponding values of 0.62% and 6 μm , respectively, for a conventional laser cladding. Moreover, the residual thermal stress and cracking sensitivity on the cladding layer are lowered by using the follow-up feed electrode. In particular, the streaming effect and Joule thermal effect produced by the unique high-energy density pulse current across a small electrode distance at the crack tip of the cladding layer can facilitate self-healing of cracks in the cladding layer. Therefore, a crack-free cladding layer can be obtained. Thus, the proposed method solves the easy-cracking problem of the laser cladding layer.

Key words laser technique; laser cladding; pulse current; follow-up feed; crack of clad layer; online self-healing

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 310.1515

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-10-20; 录用日期: 2019-11-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51205198)、安徽省自然科学基金 (1208085QE84)、安徽省高等学校省级自然科学研究重点项目 (KJ2015A197)、安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目 (gxyqZD2016320)

* E-mail: wangdongsheng@tlu.edu.cn; ** E-mail: abc402@163.com

1 引言

激光熔覆技术是一种常用的材料表面改性技术,为了获得性能更好的熔覆层,很多研究人员将超声振动^[1-6]、感应加热^[7-13]、电磁场^[14-19]等特殊工艺条件与激光熔覆技术相结合,通过改变激光熔覆过程中的固液对流传质以及凝固过程,达到细化晶粒、均匀组织和提升性能的目的。研究表明:在激光熔覆过程中引入超声振动,对均匀组织、减少缩孔、细化晶粒,以及减少熔覆层残余热应力和开裂敏感性都有很好的效果^[1-6];将感应加热与激光熔覆复合,即在感应加热的同时进行激光熔覆,不仅可大大提高熔覆效率,而且可以获得无裂纹的熔覆层^[7-13];电磁力对激光熔池具有搅拌作用,可以改变熔池凝固过程中的传热、传质及流动,有利于细化晶粒和提高熔覆层质量^[14-19]。

在熔池凝固过程中,施加电流同样可以改善材料组织及性能。电流与激光加工的复合较早地被应用于电流强化激光焊接^[20-22],直流电流会对熔池产生持续的加热作用,从而使晶粒变大,因此脉冲/交变电流具有更好的强化效果。然而,关于脉冲/交变电流对激光熔覆的影响的研究还很少^[23-24]。文献^[23]对FGH95镍基高温合金粉末进行了常规激光熔覆及脉冲电流辅助激光熔覆的对比试验研究,结果表明:脉冲电流的引入使得形核时熔池的过冷度增加,从而使形核率增加,晶粒尺寸减小且致密性提高。文献^[24]研究了交变电流对激光熔覆NiCrBSi涂层的影响,引入交变电流之后,晶粒细化,熔覆层底部的枝晶组织转变成等轴晶,同时熔覆层裂纹得到减少,另外涂层显微硬度和耐腐蚀性能都有所提高。

但文献^[23-24]中实验装置的电极位置是固定的,考虑到在激光熔覆过程中,激光器与工件做相对运动:如果施加电流的电极与工件相对不动,则熔池只会占到导体的一小部分,大部分的电流未通过熔池,这将大大降低电流的实际效果;如果把电极固定在激光头上,则电极就能始终位于靠近熔池的位置并相对于熔池保持位置不变,一方面可以将大部分电流引入熔池,提高电流利用效率,另一方面较近的电极距离可以大大提高电流密度,增强改善效果。

为了克服固定电极的不足,在原有的脉冲电流辅助激光熔覆工艺基础上,本文提出了一种新的随动进给脉冲电流增强激光熔覆的加工方法^[25],研究随动进给脉冲电流的电磁效应对激光熔覆Ni60A

镍基合金涂层的影响,以期获得缺陷少、性能佳的激光熔覆层。

2 试验与分析

2.1 材料

熔覆所用基体材料为42CrMo合金结构钢,尺寸为200 mm×100 mm×10 mm,具体成分(质量分数,%)如下:0.38~0.45 C,0.17~0.37 Si,0.5~0.8 Mn,0.9~1.2 Cr,0.15~0.25 Mo,≤0.03 Ni,≤0.03 Cu,≤0.035 P,≤0.035 S,余量为Fe。熔覆前,42CrMo基体经砂纸打磨、除油、干燥等预处理。

试验采用北京矿冶研究院的Ni60A镍基合金粉末作为熔覆材料,平均粒度为320目左右,约45 μm,具体成分(质量分数,%)如下:0.5~1.0 C,14~19 Cr,3.5~5.0 B,3.0~4.5 Si,≤5 Fe,余量为Ni。用扫描电子显微镜(SEM)观察Ni60A粉末形貌,如图1所示。

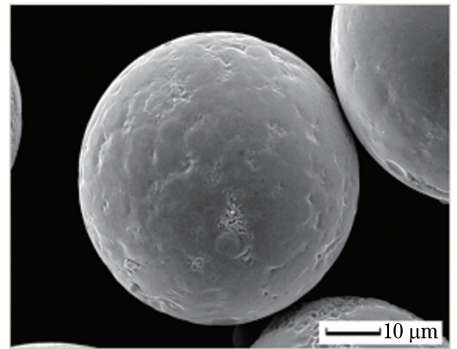


图1 Ni60A粉末SEM形貌

Fig. 1 SEM morphology of Ni60A powder

2.2 激光熔覆工艺

激光熔覆加工示意图如图2所示,在激光熔覆的同时,脉冲电流通过随动进给电极装置的滚动电极施加电流于熔池及其周边区域。随动进给电极装置主要包括可调固定支座、弹性压紧装置、Z字形斜向连接板和滚动电极组件;通过可调固定支座将整个随动进给电极装置固定在激光头上,从而实现电极与激光头的随动;弹性压紧装置可以保证电极与工件良好接触;采用滚动电极主要是为了方便电极在工件上运动,减小电极与工件的摩擦系数;此外,通过可调固定支座内的滑槽可以移动弹性压紧装置,从而调节两个滚动电极与熔池之间的距离,在较小的电极距离下,可以获得更大的电流密度;另外,根据需要,可调固定支座可沿激光扫描方向、垂直于激光扫描方向或斜向安装,考虑到施加脉冲电源的一个主要目的是减少熔覆层裂纹,而熔覆层裂纹是

垂直于激光扫描方向,因此实际试验中滚动电极沿激光扫描方向布置。

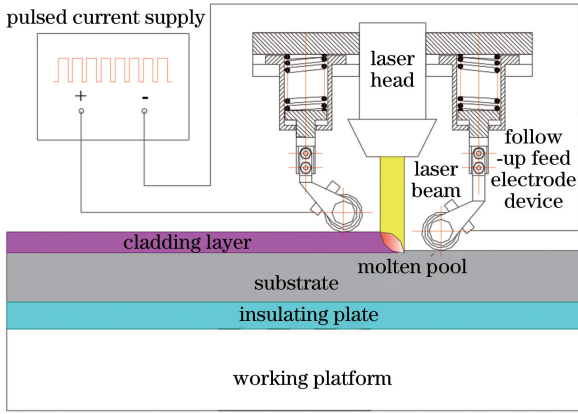


图2 随动进给脉冲电流增强激光熔覆加工示意图

Fig. 2 Schematic of the follow-up feed pulse current strengthened laser cladding processing

采用德国 IPG 公司 YLS-6000 型光纤激光器,选用 SPMD-3020 脉冲电源,进行随动进给脉冲电流增强同轴送粉激光熔覆试验。熔覆工艺参数如下:光斑直径为 5 mm;激光功率为 2000 W;扫描速率为 5 mm·s⁻¹;送粉速率为 25 g·min⁻¹;采用 Ar₂ 对熔池进行气体保护,载气量为 8 L·min⁻¹;平均脉冲电流为 50 A,脉冲频率为 400 Hz,脉宽为 100 μs。两个滚动电极沿激光扫描方向布置,一个滚动电极在激光器中心前端 15 mm,另一个滚动电极在激光器中心后端 20 mm 处。在对比试验中,常规激光熔覆与随动进给脉冲电流增强激光熔覆除有无脉冲电流外,其余工艺参数完全相同。

2.3 表征与分析

采用 XJP-300 光学显微镜观察熔覆试样横截面形貌;用 S3400 扫描电子显微镜分析涂层组织;孔隙率测量在研磨抛光后的熔覆层横截面上进行,首先将横截面图片转变成黑白二进制图像,然后用图像分析软件计算涂层中各个气孔的面积,以气孔总面积与涂层面积的比值作为涂层孔隙率;采用渗透探伤法来观察熔覆涂层表面的裂纹。

3 结果与讨论

3.1 熔覆层宏观形貌

图3为常规激光熔覆层和脉冲电流增强激光熔覆层的横截面形貌,二者均为典型的单道激光熔覆形貌,包括熔覆区(CZ)、熔合区(DZ)、热影响区(HAZ)和基体(substrate)。单道激光熔覆层横截面如图4所示,图中:W为熔覆区宽度,H为熔

覆区高度,A₁为熔覆区面积,w为熔合区宽度,h为熔合区深度,A₂为熔合区面积。同轴送粉激光熔覆的粉末利用率(熔覆效率)会影响熔覆区宽度W和熔覆区高度H的数值;而涂层稀释率η与熔覆区面积A₁和熔合区面积A₂相关。涂层稀释率对涂层组织和性能有很大的影响:涂层稀释率过高,基体材料对熔覆材料的稀释会降低涂层性能;而涂层稀释率过低时,基体和涂层界面的结合强度不足,该处会成为整个涂层的薄弱环节。因此,需要对激光熔覆中的涂层稀释率进行控制,合适的稀释率通常在10%~25%之间。涂层稀释率η的计算式为^[26]

$$\eta = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \times 100\% \quad (1)$$

熔覆区面积A₁和熔合区面积A₂可用抛物线公式计算:

$$A_1 = \frac{2}{3}WH, A_2 = \frac{2}{3}wh \quad (2)$$

则(1)式可简化为

$$\eta = \frac{wh}{WH + wh} \times 100\% \quad (3)$$

对于本试验,熔覆区宽度W与熔合区宽度w相等,则(3)式可进一步简化为

$$\eta = \frac{h}{H + h} \times 100\% \quad (4)$$

表1为两种激光熔覆试验所得的熔覆层横截面尺寸及计算的稀释率。从表1中可以看出:不管是熔覆区宽度W还是熔覆区高度H,脉冲电流增强对应数值都更大,表明其熔覆效率更高;对于涂层稀释率η,虽然脉冲电流增强激光熔覆的熔合深度略大,但由于其熔覆效率高,熔覆区高度H同样较大,因此两种试样的涂层稀释率η差别并不大,但传统激光熔覆试样的稀释率还是略大一些。

表1 熔覆层横截面尺寸及稀释率

Table1 Cross-section size and dilution rate of cladding layers

Sample	W/mm	H/mm	h/mm	η/%
Conventional laser cladding	5.14	1.58	0.52	24.8
Follow-up feed pulse current strengthened laser cladding	5.37	1.89	0.59	23.8

相对于传统激光熔覆,脉冲电流增强激光熔覆具有较高的粉末利用率(熔覆效率),主要归因于以下两个方面^[23]:

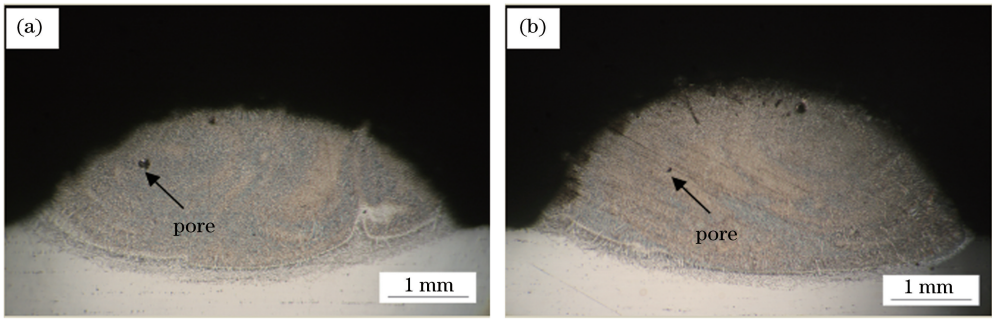


图 3 熔覆层横截面形貌。(a)常规激光熔覆;(b)随动进给脉冲电流增强激光熔覆

Fig. 3 Cross-section morphology of cladding layers. (a) Conventional laser cladding; (b) follow-up feed pulse current strengthened laser cladding

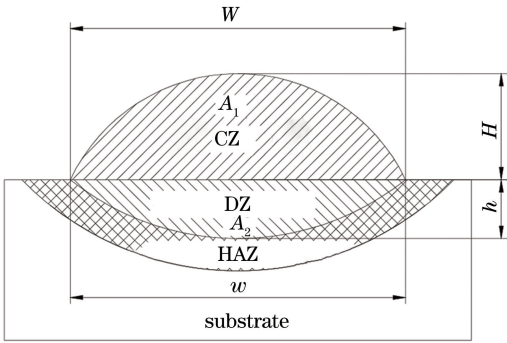


图 4 单道激光熔覆横截面示意图

Fig. 4 Schematic of cross-section of single laser cladding

1) 引入脉冲电流的焦耳热效应使基体温度升高,相当于引入另一个热源,因此在激光熔覆过程中所需要消耗的熔化基体表面形成熔池的激光能量相应减少,有更高比例的激光能量用于加热粉末,与传统激光熔覆相比,在相同的激光熔覆参数下(不考虑脉冲电流),在同轴送粉过程中脉冲电流增强激光熔覆熔化的粉末比例更高。

2) 由于脉冲电流作用带来的基体预热效果,基体接收的总能量增加,相应形成的熔池尺寸也有所增大,有更高比例的粉末可以进入激光熔池,粉末与基体非熔池表面相撞而反弹损失的比例降低,从而粉末利用率提高。

3.2 熔覆层孔隙率

从图 3 的熔覆层横截面照片可以看出,不管是传统激光熔覆试样还是脉冲电流增强激光熔覆试样都有孔隙的存在,用图像分析软件对涂层横截面图片进行黑白二进制处理,经计算得到传统激光熔覆试样的孔隙率为 0.62%,而脉冲电流增强激光熔覆试样为 0.39%,后者的孔隙率低于前者。孔隙是激光熔覆过程中经常出现的问题之一,孔隙会影响到熔覆层的力学性能和疲劳性能,从而影响熔覆试样的使用效果。熔覆层中的孔隙主要包括气孔和收缩孔两种类型,气孔一般为规则形状,通常由熔覆产生的气体或在熔覆过程中卷入但没有及时排出的空气产生,而收缩孔的形状通常是不规则的,是由金属凝固过程中液态金属来不及补充而引起的^[24]。

采用脉冲电流增强激光熔覆工艺时,脉冲电流的电磁力对熔池有压缩效应,一方面能把熔池中的气体挤压排出,减少气孔,另一方面在熔池凝固过程中能将液体补充到间隙处,有效消除缩孔,从而减小了熔覆层孔隙率,提高了熔覆层致密性^[23]。

3.3 熔覆层组织

图 5 分别为传统激光熔覆和脉冲电流增强激光熔覆所得熔覆层组织的 SEM 图,可以看出:传统激

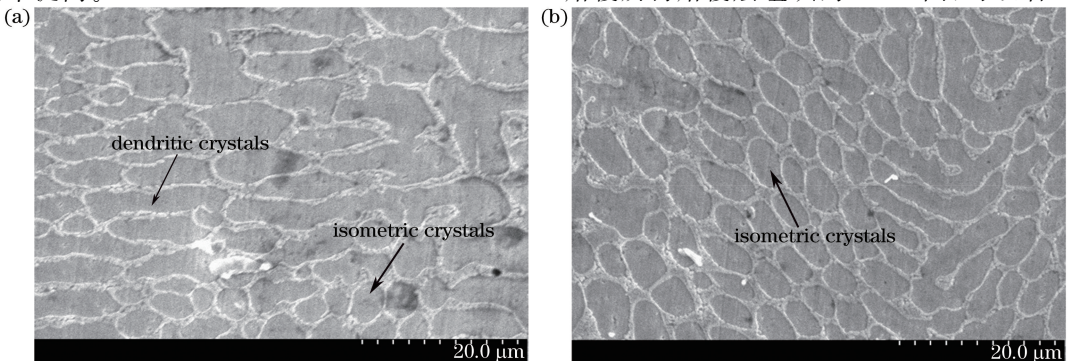


图 5 熔覆层组织形貌。(a)常规激光熔覆;(b)随动进给脉冲电流增强激光熔覆

Fig. 5 Morphology of cladding layers. (a) Conventional laser cladding; (b) follow-up feed pulse current strengthened laser cladding

光熔覆组织中底部存在枝晶组织,而脉冲电流增强激光熔覆组织基本为等轴晶;另外脉冲电流增强激光熔覆组织中的晶粒更细小,常规激光熔覆试样晶粒的平均尺寸约为 $6\ \mu\text{m}$,而相应脉冲电流增强激光熔覆试样晶粒的平均尺寸约为 $4\ \mu\text{m}$,这与文献[23-24]的研究结果一致。

脉冲电流增强激光熔覆获得细小的等轴晶与其熔覆过程中熔池较大的过冷度有关。对于脉冲电流增强激光熔覆,其过冷度主要由常规无电流增强激光熔覆时熔池凝固的过冷度,由脉冲电源电势差带来的过冷度增加,及由脉冲电流的焦耳热效应引起的温度升高(过冷度降低)三个因素综合决定,但电势差对过冷度的影响要大于焦耳热效应,因此脉冲电流增强激光熔覆较常规激光熔覆有更大的过冷度,熔池凝固速度也更快。熔池凝固过程中大的过冷度有利于形核率的提高,使晶粒数量增加,晶粒生长减少,从而可获得更细小的等轴晶。

3.4 熔覆层裂纹

传统激光熔覆试样有 7 条垂直于激光扫描方向

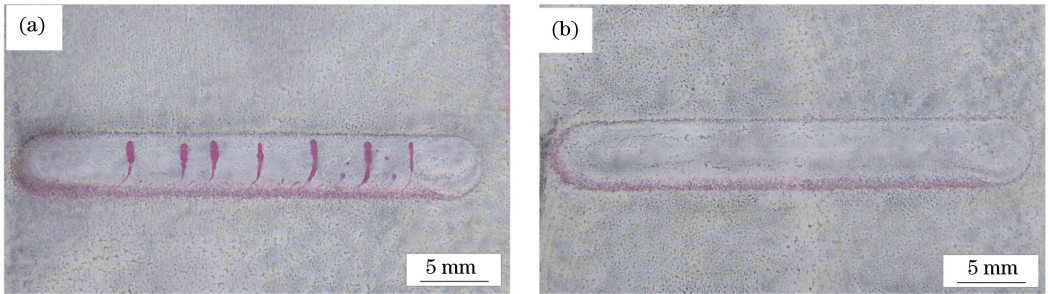


图 6 熔覆试样宏观裂纹探伤图。(a)传统激光熔覆;(b)随动进给脉冲电流增强激光熔覆

Fig. 6 Macroscopic crack of cladding samples. (a) Conventional laser cladding;
(b) follow-up feed pulse current strengthened laser cladding

随动进给脉冲电流增强激光熔覆工艺可以大大降低熔覆层开裂敏感性主要归因于其特殊的组织结构以及脉冲大电流对裂纹的在线自愈合作用。脉冲电流增强激光熔覆试样组织更均匀、孔隙率更低、晶粒尺寸更小,从而可有效减少熔覆过程中残余热应力并抑制试样开裂趋势。另外,作用在熔覆层上的脉冲电流对生成的少量裂纹具有在线自愈合作用。裂纹在线自愈合示意图如图 7 所示。在脉冲大电流作用下,因电流无法通过裂纹而在裂纹尖端形成绕流效应[图 7(a)]。在焦耳热效应的作用下,裂纹尖端位置温度显著升高,会形成一超过熔点的局部高温区,但高温区域材料的热膨胀会受到周边温度较低区域材料的限制,从而在裂纹尖端附近区域产生很高的局部压应力^[33-34]。在高温和压应力的双重作

的横向宏观裂纹,而相应的随动进给脉冲电流增强激光熔覆试样没有宏观裂纹,如图 6 所示。激光熔覆时熔覆材料的快速熔化和凝固,导致涂层中残余应力很大,熔覆层极易产生裂纹,从而限制了激光熔覆技术的应用范围,因此熔覆层的裂纹控制是激光熔覆研究的一个热点问题。控制熔覆层裂纹的常用措施有调整涂层应力状态和优化工艺方法等。在熔覆过程中,对试样进行预热和/或缓冷处理可以释放熔覆层残余应力,减少裂纹,但过高的温度容易引起熔覆层晶粒粗大^[27];本课题组^[28]提出的采用凸字形激光束代替常规激光束的方法也可达到类似的预热缓冷效果;超声振动辅助激光熔覆^[29]和感应加热辅助激光熔覆^[30]等复合激光熔覆工艺都能获得无裂纹的熔覆层。裂纹自愈合归因于裂纹尖端的绕流效应和低温等离子效应,大脉冲电流可用于实现疲劳裂纹、淬火裂纹等裂纹的愈合^[31-32],有研究人员将脉冲电流与激光熔覆相结合,研究结果表明激光熔覆过程中施加脉冲/交变电流同样有助于减少熔覆层裂纹^[24],但电极固定限制了电流密度的提高,影响了改善效果。

用下,裂纹尖端闭合并愈合,从而使裂纹长度缩短[图 7(b)],在新的裂纹尖端产生新的绕流效应[图 7(c)],经过多次高能量密度脉冲电流作用,整条裂纹逐渐自愈合[图 7(d),7(e)]。

4 结 论

本文在 42CrMo 合金结构钢基体表面进行了常规激光熔覆和随动进给脉冲电流增强激光熔覆制备 Ni60A 镍基合金涂层对比试验。相对于固定电极法脉冲电流增强激光熔覆,采用随动进给电极,利用脉冲电流的趋肤效应,将大部分电流直接引入熔池,提高了电流利用效率,且较近的电极距离可以大大提高电流密度,增强改善效果。

相对于传统激光熔覆,脉冲电流增强激光熔覆

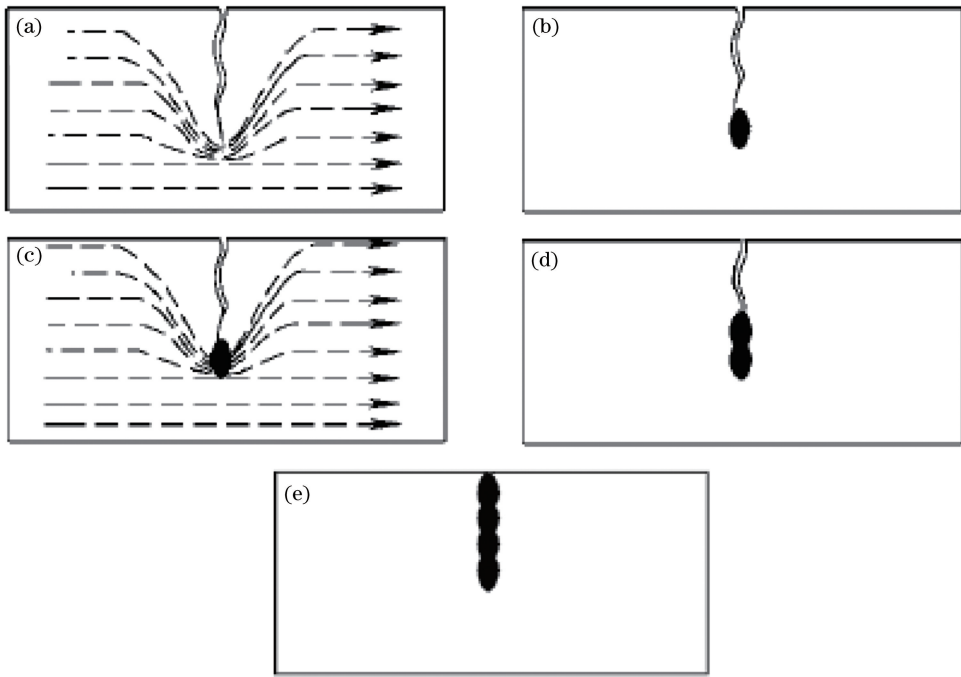


图7 熔覆层裂纹自愈示意图。(a)裂纹尖端产生绕流效应;(b)裂纹尖端闭合并愈合;

(c)新裂纹尖端产生新绕流效应;(d)新裂纹尖端闭合并愈合;(e)裂纹多次愈合后自愈的整条裂纹

Fig. 7 Schematics of crack self-healing of cladding layer. (a) Follow effect at the crack tip; (b) closed and healing of crack tip; (c) new follow effect at new crack tip; (d) closed and healing of new crack tip; (e) self-healing whole crack after multi crack healing

既可以提高熔覆效率,又能细化熔覆层晶粒,同时能降低试样孔隙率,均匀熔覆层组织,另外熔覆底部由常规激光熔覆形成的枝晶转变成等轴晶。传统激光熔覆有多条熔覆宏观裂纹,而脉冲电流增强激光熔覆试样没有宏观裂纹;随动进给脉冲电流增强激光熔覆可以显著减少熔覆层残余热应力和开裂敏感性,特别是小电极距离时高能量密度脉冲电流能够在熔覆层裂纹尖端形成绕流效应和焦耳热效应,这可使熔覆层裂纹实现在线自愈合,从而解决激光熔覆层易开裂问题。

参 考 文 献

- [1] Li M, Han B, Wang Y, et al. Investigation on laser cladding high-hardness nano-ceramic coating assisted by ultrasonic vibration processing[J]. Optik, 2016, 127(11): 4596-4600.
- [2] Ma G, Yan S, Wu D, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ultrasonic assisted laser clad yttria stabilized zirconia coating[J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 9622-9629.
- [3] Cong W, Ning F. A fundamental investigation on ultrasonic vibration-assisted laser engineered net shaping of stainless steel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 121: 61-69.
- [4] Alavi S H, Harimkar S P. Melt expulsion during ultrasonic vibration-assisted laser surface processing of austenitic stainless steel[J]. Ultrasonics, 2015, 59: 21-30.
- [5] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. High-temperature oxidation resistance of co-based alloy coatings by ultrasonic vibration assisted laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0102006. 徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 超声振动辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗高温氧化性能[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0102006.
- [6] Zhang A F, Fu T, Wang T, et al. Effect of ultrasonic vibration on microstructure and properties of laser clad and solution-aging treated Ti6Al4V alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202004. 张安峰, 付涛, 王潭, 等. 超声振动对激光熔覆及固溶时效 Ti6Al4V 合金组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202004.
- [7] Farahmand P, Kovacevic R. Laser cladding assisted with an induction heater (LCAIH) of Ni-60%WC coating [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 244-258.
- [8] Zhou S F, Lei J B, Dai X Q, et al. A comparative study of the structure and wear resistance of NiCrBSi/50wt.%WC composite coatings by laser

- cladding and laser induction hybrid cladding [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 60: 17-27.
- [9] Wang D Z, Hu Q W, Zheng Y L, et al. Study on deposition rate and laser energy efficiency of laser-induction hybrid cladding [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 77: 16-22.
- [10] Meng L, Zhao W, Hou K, et al. A comparison of microstructure and mechanical properties of laser cladding and laser-induction hybrid cladding coatings on full-scale rail [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 748: 1-15.
- [11] Zhou S F, Dai X Q, Xiong Z, et al. Functionally graded YSZ/NiCrAlY coating prepared by laser induction hybrid rapid cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(4): 0403004.
周圣丰, 戴晓琴, 熊征, 等. 激光感应复合快速熔覆功能梯度 YSZ/NiCrAlY 涂层的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403004.
- [12] Li L J, Wang Y Y, Zhang A F, et al. Silicon refinement of TC4 grains by induction heating assisted laser cladding deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0602006.
李丽君, 王豫跃, 张安峰, 等. 感应加热辅助 Si 细化激光熔覆沉积 TC4 晶粒的研究[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0602006.
- [13] Liang Z Y, Zhang A F, Li L J, et al. Induction heating assisted modifier boron refining of TC4 grains by laser cladding deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0702001.
梁朝阳, 张安峰, 李丽君, 等. 感应加热辅助变质剂硼细化激光熔覆沉积 TC4 晶粒的研究[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0702001.
- [14] Zhai L L, Ban C Y, Zhang J W. Investigation on laser cladding Ni-base coating assisted by electromagnetic field [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114: 81-88.
- [15] Zhang N, Liu W, Deng D, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the pore distribution in laser cladding process [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 247-254.
- [16] Zhou J Z, Xu J L, Huang S, et al. Effect of laser surface melting with alternating magnetic field on wear and corrosion resistance of magnesium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309: 212-219.
- [17] Zhai L L, Ban C Y, Zhang J W, et al. Characteristics of dilution and microstructure in laser cladding Ni-Cr-B-Si coating assisted by electromagnetic compound field[J]. Materials Letters, 2019, 243: 195-198.
- [18] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. Thermal corrosion resistance of Co-based alloy coatings by laser cladding assisted by electromagnetic stirring[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0114002.
徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗热腐蚀性能[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0114002.
- [19] Liu H X, Ji S W, Jiang Y H, et al. Microstructure and property of Fe60 composite coatings by rotating magnetic field auxiliary laser cladding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0103007.
刘洪喜, 纪升伟, 蒋业华, 等. 旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60 复合涂层的显微组织与性能[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103007.
- [20] Xiao R S, Ambrosy G, Zuo T C, et al. New approach to improve the laser welding process of aluminum by using an external electrical current[J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20(23): 2163-2165.
- [21] Zhang X G, Li L Q, Chen Y B, et al. Effects of pulse parameters on weld microstructure and mechanical properties of extra pulse current aided laser welded 2219 aluminum alloy joints [J]. Materials, 2017, 10(9): 1091.
- [22] Chen S H, Li L Q, Tao W, et al. Laser welding-brazing characteristics of Ti/Al dissimilar alloy with assistant current [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(11): 1942-1947.
陈树海, 李俐群, 陶汪, 等. 电流辅助钛/铝异种合金激光熔钎焊的特性[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(11): 1942-1947.
- [23] Xie D, Zhao J, Qi Y, et al. Decreasing pores in a laser cladding layer with pulsed current [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(11): 111401.
- [24] Zhai L, Wang Q, Zhang J, et al. Effect of alternating current electric field on microstructure and properties of laser cladding Ni-Cr-B-Si coating [J]. Ceramics International, 2019, 45(14): 16873-16879.
- [25] Wang D S, Zhou X H, Ji Y, et al. A laser cladding device for crack self healing of cladding layer and its processing method: CN110453216 A [P]. 2019-11-15.
王东生, 周杏花, 季燕, 等. 一种熔覆层裂纹自愈合的激光熔覆装置及其加工方法: CN110453216 A [P]. 2019-11-15.
- [26] Kim J D, Peng Y. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 104 (3): 284-293.
- [27] Liang Z H, Ma E B. Structural design of substrate preheating for laser cladding [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(7): 54-56.

- 梁志宏, 马恩波. 激光熔覆成形预热基板设计及试验研究[J]. 机械设计与制造, 2009(7): 54-56.
- [28] Wang D S, Tian Z J, Wang J W, et al. A method of crack control in laser cladding process with changing power density distribution of laser beam[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1): 0103004.
- 王东生, 田宗军, 王泾文, 等. 一种通过改变激光功率密度分布控制熔覆层裂纹的方法[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103004.
- [29] Chen C Y, Deng Q L, Song J L. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(z1): 44-48.
- 陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. Ni 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(z1): 44-48.
- [30] Zhou S F, Zeng X Y, Hu Q W. Realization of laser cladding and crack-free ceramic-metal composite coatings[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 76-80.
- 周圣丰, 曾晓雁, 胡乾午. 金属陶瓷复合涂层的激光熔覆与无裂纹的实现[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 76-80.
- [31] Song H, Wang Z J. Microcrack healing and local recrystallization in pre-deformed sheet by high density electropulsing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490(1/2): 1-6.
- [32] Hosoi A, Nagahama T, Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 533: 38-42.
- [33] Deng D W, Yu T, Zhang L, et al. Effect of healing on mechanical properties by the combined treatment of pulse current and laser applied to deep crack in titanium alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 93-98.
- 邓德伟, 于涛, 张林, 等. 脉冲电流-激光愈合钛合金深层裂纹愈合处理对力学性能的影响机理研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 93-98.
- [34] Deng D W, Yu T, Zhang L, et al. Effect of healing on microstructure by the combined treatment of pulse current and laser applied to deep crack in titanium alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 38-44.
- 邓德伟, 于涛, 张林, 等. 脉冲电流-激光复合愈合钛合金深层裂纹微观组织研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 38-44.