

# 脉冲激光熔覆成形变半径 FeCrNiCu 合金圆筒 工艺及力学性能

任维彬<sup>1,2</sup>, 曹清林<sup>1</sup>, 庄百亮<sup>2</sup>, 陈世鑫<sup>1</sup>

(1. 江苏理工学院 常州市装备再制造工程重点实验室, 江苏 常州 213001)

(2. 机械科学研究总院江苏分院有限公司, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 针对激光立体成形变半径圆筒件边部及外沿塌陷、热累积效应引起力学性能下降等增材制造难点, 提出了脉冲激光成形 FeCrNiCu 合金圆筒件优化路径及工艺, 实现了变半径圆筒结构的直接熔覆成形, 验证了该结构件良好的组织构成以及力学性能。结果表明: 覆层顶部为细小致密的等轴晶组织, 中部由具有定向生长趋势的树枝晶构成, 底部由胞状晶构成, 晶内及晶间有颗粒状 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 型强化析出相析出。覆层显微硬度(HV)最高值为 6750 MPa, 覆层显微硬度(HV)主要分布在 5540~5760 MPa; 成形层(纵向)的抗拉强度最大为 1070 MPa, 抗拉强度范围 1010~1070 MPa; 成形层(横向)的抗拉强度最大为 960 MPa, 抗拉强度范围 780~960 MPa。覆层冲击韧性分布在 511.08~727.54 kJ·m<sup>-2</sup>, 相关力学试验验证了该结构件具有优良的力学性能。

**关键词:** 脉冲激光; FeCrNiCu 合金; 激光熔覆; 力学性能

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)03-0973-06

铁基合金变半径圆筒结构件由于应用范围广泛、半径变化复杂以及批量规模小等原因, 渐趋采用激光熔覆成形作为其主要制造工艺<sup>[1,2]</sup>。但该类结构件激光熔覆成形过程中的过度成形、边缘塌陷、形变超限以及力学性能下降等工程实际, 成为掣肘该类零部件增材制造形状控制与性能优化的难点<sup>[3-5]</sup>。

国内外学者针对上述问题开展了相关研究, Emamian等<sup>[6]</sup>研究者开展了激光熔覆工艺参数对铁基合金组织和性能的影响研究, Wirth等学者对激光熔覆成形工艺过程开展了一般性过程仿真和模型预测<sup>[7]</sup>, 具有较好的工艺指导作用; 石世宏团队开展了异形基面薄壁成形工艺过程的研究, 获得了较好的成形组织<sup>[8]</sup>, 刘干成等<sup>[9]</sup>研究者通过研究小模数铁基齿轮熔覆能量控制方法和成形路径规划, 实现了该类零件的表面修复。但上述研究又具有相对局限性, 表现在:

(1) 针对特殊结构及成形路径下, 熔覆成形组织及力学性能研究相对较少, 难以指导复杂形状构件熔覆成形工艺过程;

(2) 针对铁基材料成形过程的边缘塌陷以及多层成形过程中的过度成形研究较少, 难以实现成形过程的形状缺陷控制;

(3) 多层增材成形过程的热累积效应未得到工艺改善或控制, 力学性能未能实现较好优化。

综上, 研究采用脉冲激光优化工艺, 通过优化脉冲输出能量场、规划成形路径、设计辅助工装等方法, 实现 FeCrNiCu 合金变半径圆筒件熔覆成形, 并验证该结构件良好的金相组织以及优异的力学性能, 为该类合金结构件激光熔覆成形提供理论基础以及工艺参考。

## 1 圆筒件成形工艺

### 1.1 成形工艺策略

试验以45钢为基材, 以成形性良好、力学性能优异的 FeCrNiCu 合金为熔覆合金材料, 该合金粉末粒径为 50~150 μm, 其初始态宏观形貌如图1 所示。

基材及 FeCrNiCu 合金材料成分如表1 所示。基材三维尺寸为 150 mm×150 mm×60 mm, 变半径圆筒底面外圆直径 7 cm, 顶面外圆直径 10 cm, 变半径结构高度为 3.5 cm, 半径厚度为 3 mm, 层间搭接率为 30%。试验采用脉冲激光优化工艺参数为: 激光功率 1.2 kW, 脉冲激光脉宽为 10 ms, 光斑直径为 3 mm, 扫描速度为 5 mm/s, 送粉速率 0.42 g/s, 占空比为 1:1。

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 国家科技重大专项项目(2018ZX04026001-008); 常州市科技计划资助项目(CJ20180058); 国防科技重点实验室基金(6142005180402); 常州市装备再制造工程重点实验室开放基金(CRM2018A02)

作者简介: 任维彬, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 江苏理工学院常州市装备再制造工程重点实验室, 江苏 常州 213001, E-mail: renweibin100@163.com

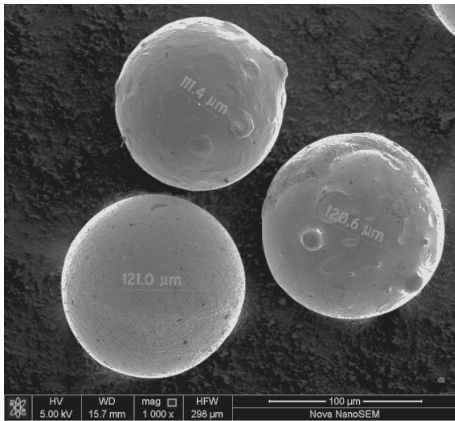


图 1 FeCrNiCu合金粉末初始态宏观形貌

Fig.1 Macro morphology of FeCrNiCu alloy powder at initial state

该变半径圆筒成形形状控制主要包含以下难点：

- (1) 熔覆成形的边缘塌陷在多层成形过程中形成累积叠加，造成局部塌陷的成形缺陷；
- (2) 多层成形的热累积效应加剧，易造成覆层与基体开裂，或形成覆层层间裂纹；
- (3) 变半径圆筒的外径成形熔滴滴滴，破坏底部覆层形状或形成表面粘结；
- (4) 多层成形热累积效应造成覆层力学性能下降以及热影响区过大，影响成形零部件工况性能。

针对上述成形难点，制定以下工艺策略：(1) 在逐层圆周成形叠加成形过程中，合理设置每层熔覆层

起点之间的间隔弧度，平均分布边缘塌陷位置，使成形层的塌陷形状缺失在后续成形过程中获得补偿；(2) 在首层成形前，对首层成形路径上进行打底层制备，提升覆层与基体间结合能力；(3) 在半径的逐层成形增加中，优化设置逐层抬升高度以及偏置量，避免成形过程中熔滴产生流淌；(4) 优化脉冲激光成形工艺参数，优化控制激光成形热输入，控制热影响区范围，避免热损伤引起覆层力学性能下降。

### 1.2 成形工艺设计

设单层成形高度为 $h$ ，成形目标高度为 $H$ ，设共需成形 $N$ 层，圆筒件外缘倾斜角度为 $\alpha$ ，每层外缘偏置量为 $m$ ，每一层激光熔覆起点间隔弧度为 $\beta$ ，如图2所示。多层叠加成形过程中，受熔池流动性和覆层两侧的外缘流淌作用影响，自第2层成形层开始，每层实际成形高度都略小于 $h$ ，为避免上述影响造成成形过程中离焦量过大，自第2层开始，熔覆加工头单层抬升高度设置为 $(h-0.2)$  mm，则

$$N=(H-h)/(h-0.2)+1 \tag{1}$$

$$\partial=\tan^{-1}(D-d)/2(H-h) \tag{2}$$

$$m=(H-h)/(N-1) \tag{3}$$

$$\beta=2\pi/(N-1) \tag{4}$$

基于已有脉冲激光优化工艺参数可知<sup>[10,11]</sup>，脉冲激光功率为1.2 kW，光斑直径为3 mm，扫描速度为5 mm/s，单道成形层宽度为3.2 mm，高度为1 mm，激光脉宽为10 ms，占空比为1:1。综上可知，共需成形44层，圆筒件倾斜角度 $\partial$ 为23.8°，每层外缘偏置为0.8 mm，每层熔覆起点弧度间隔为 $0.05\pi$ 。

表1 试验材料成分

Table 1 Composition of test material ( $\omega/\%$ )

Material	Ni	Cr	Cu	Mn	Si	Ni	C	Fe
45 steel	0.15~0.25	0.15~0.25	0.10~0.25	0.50~0.80	0.17~0.37	-	0.42~0.50	Bal.
FeCrNiCu alloy	4.52~4.62	11.77~12.87	2.52~3.80	0.30~0.90	0.58~0.68	4.52~4.62	0.14~0.25	Bal.

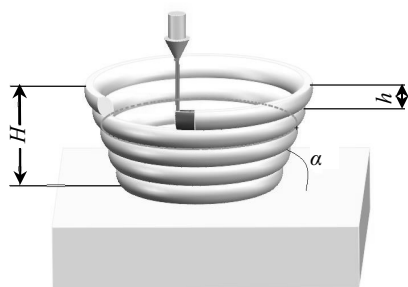


图 2 变半径圆筒结构成形过程

Fig.2 Forming process of with cylinder structure variable radii

### 1.3 成形工艺实现

试验前对45钢基材进行砂纸打磨，去除表面铁锈及氧化膜，并用丙酮及乙醇清洗烘干。将FeCrNiCu合金粉末置于DSZF-2型真空干燥箱内，以150 °C温度干燥2 h。试验采用YLS-4000型光纤激光再制造成形系统<sup>[12]</sup>，该系统为四路同轴送粉方式，熔覆成形过程中对熔池施加氩气保护。

首层成形过程中，为提升覆层与基体的结合能力，采用高功率激光工艺参数进行成形，采用的脉冲激光功率为3 kW，光斑直径为3 mm，扫描速度为9 mm/s，单道成形层宽度为3.4 mm，高度为0.8 mm，激光脉宽为10 ms，占空比为1:1。首层成形后，激光功率为1.2

kW, 光斑直径为3 mm, 扫描速度为5 mm/s, 单道成形层宽度为3.2 mm, 高度为1 mm, 激光脉宽为10 ms, 占空比为1:1。采用圆弧路径叠加成形, 各层熔覆起点间隔弧度为 $0.05\pi$ , 每层较上层向外缘偏置0.8 mm, 成形过程无间断, 共成形45层, 成形后整体形貌如图3所示。

## 2 覆层组织形貌

### 2.1 覆层金相组织

图4为该变半径圆筒首层覆层金相组织。由图4a可知, 覆层顶部为细小致密的等轴晶组织, 且部分等轴晶有相互熔合生长趋势, 这主要是因为成形过程中, 覆层顶部与空气直接接触, 散热条件良好, 温度梯度大, 形成较大的过冷度, 使晶粒组织具备细化条件, 同时, 在下一层的覆层形成过程中, 受直接热输入及热累积效应影响, 部分晶粒重熔并具备一定的保温条件, 形成继续熔合生长的条件<sup>[13]</sup>; 由图4b可知, 覆层中部由具有一定定向生长趋势的树枝晶构成, 该部位较覆层顶部具有更好的保温条件, 利于晶体孕育并定向生长, 因而该处树枝晶与沉积方向略成 $20^\circ\sim 30^\circ$ 夹角方向生长; 由图4c可知, 覆层底部主要由胞状晶构成, 该部位直接与基体接触, 散热条件较好, 利于细晶组织的形成<sup>[14]</sup>; 由图4d可知, 该筒形结构件与基体结合良好, 无明显气孔及裂纹等成形缺陷生成。进一步, 综合图4a~4d可知, 覆层各部位晶内及晶间有颗粒状强化相析出, 结合材料成分推断可能为 $M_7C_3$ 型强化析出相<sup>[15]</sup>, 该强化相的析出, 有利于增强覆层的强度和韧性。

### 2.2 强化相验证

为验证熔覆层晶内及晶间强化析出相物相组成, 对熔覆层中部进行XRD物相分析, 结果如图5所示。可见, 熔覆层组织中含有铁素体及 $Cr_7C_3$ 等物相, 从而进一步确定弥散析出相主要为 $Cr_7C_3$ 相, 文献[14]中也

存在相关验证性证明。而 $Cr_7C_3$ 等强化物具有硬度和结合强度高、耐磨性好、抗腐蚀和抗氧化能力强等优点, 常在熔覆层晶内及晶间析出, 从而改善或增强熔覆层性能。

## 3 沉积成形件力学性能

### 3.1 沉积成形件显微硬度

该变半径结构件成形层硬度分布如图6所示, 成形层顶层表面附近显微硬度( $HV_{0.1}$ )最高, 达到6750 MPa, 这主要是因为该部位与空气直接接触, 具有相对较大的温度梯度, 形成等轴晶组织, 具有较高的硬度; 从成形层顶层至该层与前一层结合界面处显微硬度值呈下降趋势, 下降至5680 MPa, 硬度的下降主要是因为多层成形过程中, 热量的累积效应使该部位晶粒具有孕育长大的条件, 与成形件顶部相比, 晶粒明显粗大。由该结合界面处起, 至覆层首层显微硬度主要分布在5540~5760 MPa, 较成形件中间覆层部位硬度有所提升, 呈相对稳定的分布状态, 这主要是因为该部位与基体接触, 成形层具有良好的散热条件和较大的过冷度, 利于成形层细晶组织的形成和显微硬度的提高。



图3 变半径圆筒结构件成形后整体形貌

Fig.3 Overall shape of cylindrical structure with variable radii after laser cladding forming

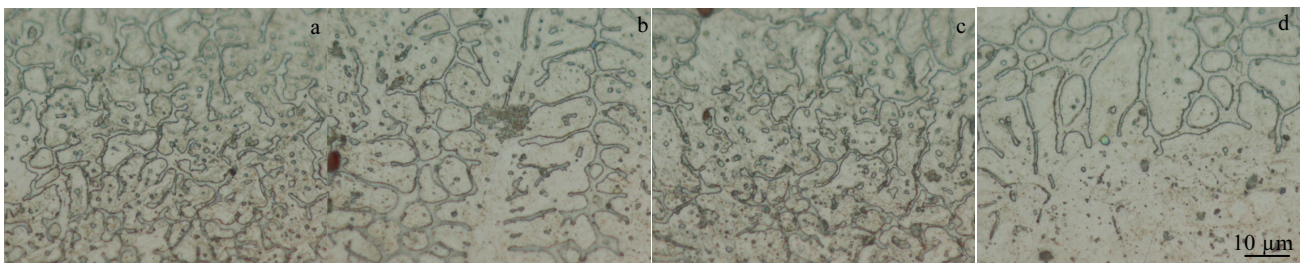


图4 变半径圆筒结构件金相组织

Fig.4 OM images of cylinder structure with variable radii: (a) top cladding layer, (b) middle cladding layer, (c) bottom cladding layer, and (d) interface

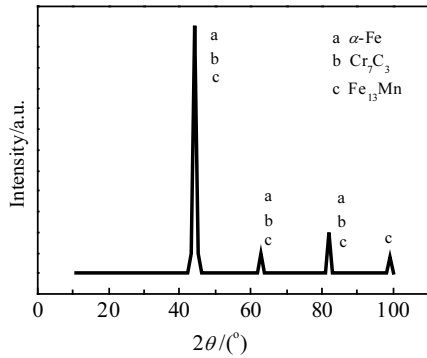


图 5 熔覆层强化析出相XRD图谱

Fig.5 XRD pattern of precipitated strengthening phases of the cladding layer

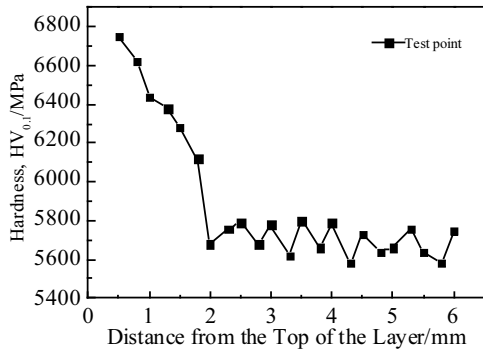


图 6 变半径结构圆筒成形层显微硬度分布

Fig.6 Microhardness distribution of the forming layer of the cylinder with variable radii

### 3.2 沉积成形件拉伸性能

为评价结构件FeCrNiCu合金熔覆层间结合强度，采用INSTRON万能试验机测试熔覆层不同方向抗拉强度，试样制样尺寸如图7所示。

试样包括横向及纵向两类试样，取样方式及制备的部分试样形貌如图8所示。

试验设置加载速率为0.02 mm/s，初始载荷为0.003 kN。不同方向熔覆层拉伸试样试验结果如表2所示。

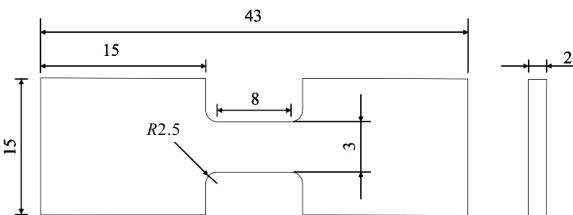


图 7 FeCrNiCu合金熔覆层拉伸试样制样尺寸

Fig.7 Size of the cladding layer tensile sample

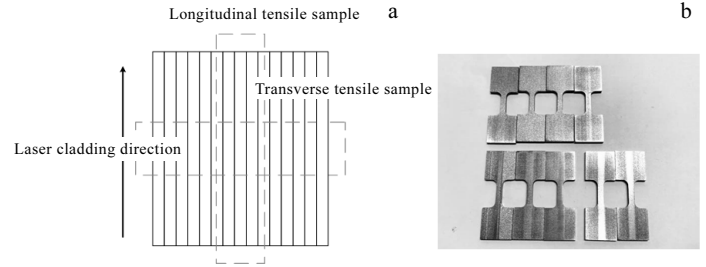


图 8 熔覆层取样方式及试样制备形貌

Fig.8 Sampling mode of the cladding layer (a) and morphology of part samples (b)

由表2可知，成形层(纵向)的抗拉强度最大为1070 MPa，抗拉强度范围1010~1070 MPa，抗拉强度平均值为1037 MPa；成形层(横向)的抗拉强度最大为960 MPa，抗拉强度范围780~960 MPa，抗拉强度平均值为840 MPa。图9为成形层拉伸性能曲线。由该曲线可知，成形层纵向与横向拉伸过程中不存在明显的屈服阶段，都属于脆性断裂，且成形层纵向抗拉强度优于横向方向抗拉强度。这主要是因为成形层（横向）拉应力方向上，受熔覆成形多道次搭接影响，搭接处力学性能受后续成形热输入影响，抗拉强度有所下降，且多道次搭接的交界都处于横向拉应力方向上，从而使该方向上抗拉强度较成形层(纵向)的抗拉强度有所下降。通过成形层抗拉强度试验可知，该结构件各熔覆层间以及熔覆方向上，均具有较好的抗拉强度，满足激光熔覆成形结构件力学性能要求。

### 3.3 沉积成形件冲击性能

为测试FeCrNiCu合金覆层的冲击韧性，根据国标《GB2650-2008焊接试样冲击性能检测标准》制作夏比冲击试验试样，试样尺寸如图10所示。采用激光熔覆优化工艺参数，熔覆制备FeCrNiCu合金块体结构，成形的块体件尺寸为70 mm×70 mm×5mm，切割加工

表 2 不同方向试样拉伸试验结果

Table 2 Tensile experiment results of the specimens in different directions (MPa)

Sample type	Sample number	Test value	Average value
Longitudinal cladding	1	1060	1037
	2	1070	
	3	1030	
	4	1010	
	5	1015	
Transverse cladding	1	960	840
	2	840	
	3	800	
	4	780	
	5	820	

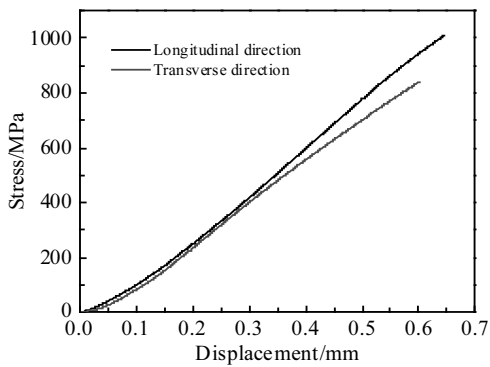


图9 成形层纵向与横向拉伸试验过程曲线

Fig.9 Process curves of longitudinal and transverse tensile experiment of forming layer

了如下尺寸的试样:  $l(55 \text{ mm}) \times h(10 \text{ mm}) \times w(5 \text{ mm})$ , 试样开V形坡口, 缺口角度 $45^\circ$ , V型缺口, 缺口底部高度: 8 mm, 缺口对称面-端部距离: 27.5 mm。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, 取平均值, 温度条件为室温 $30^\circ\text{C}$ 。

覆层冲击试验结果如表3所示, 覆层冲击功分布在10.22~14.55 J之间, 均值为11.96 J; 覆层冲击韧性

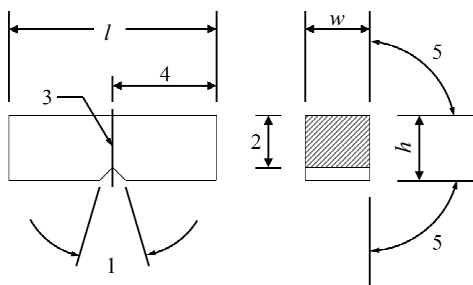


图10 激光熔覆覆层冲击试验样品尺寸

Fig.10 Sample size of laser cladding layer for laser impact experiment

表3 FeCrNiCu合金覆层室温冲击韧性试验结果

Table 3 Experiment results of impact toughness of FeCrNiCu alloy layer at room temperature

Sample No.	Impact energy/J	Impact toughness/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$
1	10.38	519.04
2	14.55	727.54
3	12.67	633.62
4	11.98	599.03
5	10.22	511.08
Average value	11.96	598.02

分布在 $511.08\sim 727.54 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , 均值为 $598.02 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , 明显高于45钢的室温冲击韧性为 $465 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。较好的覆层冲击韧性形成主要是由于覆层晶内及晶间析出 $M_7C_3$ 型强化析出相<sup>[15]</sup>, 起到弥散强化作用, 有利于增强覆层的强度和韧性。因此, 该结构件具有优良的抗冲击力学性能。

## 4 结论

1) 首层成形采用激光功率为3 kW, 光斑直径为3 mm, 扫描速度为9 mm/s, 激光脉宽为10 ms, 占空比为1:1。首层成形后, 激光功率为1.2 kW, 光斑直径为3 mm, 扫描速度为5 mm/s, 激光脉宽为10 ms, 占空比为1:1。采用圆弧路径叠加成形, 各层熔覆起点间隔弧度为 $0.05\pi$ , 每层较上层向外缘偏置0.8 mm, 共成形45层。

2) 覆层顶部为细小致密的等轴晶组织, 覆层中部由具有一定定向生长趋势的树枝晶构成, 覆层底部主要由胞状晶构成, 该筒形结构件与基体结合良好, 无明显气孔及裂纹等成形缺陷生成。覆层各部位晶内及晶间有颗粒状 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 型强化析出相析出。

3) 成形层显微硬度( $\text{HV}_{0.1}$ )最高值为6750 MPa, 覆层显微硬度主要分布在5540~5760 MPa。成形层(纵向)的抗拉强度最大为1070 MPa, 抗拉强度范围1010~1070 MPa; 成形层(横向)的抗拉强度最大为960 MPa, 抗拉强度范围780~960 MPa。覆层冲击韧性分布在 $511.08\sim 727.54 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , 相关力学试验验证了该结构件具有优良的力学性能。

## 参考文献 References

- [1] Chalvin M, Campocasso S, Hugel V *et al.* *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*[J], 2020, 65: 1
- [2] Li Dongsheng(李东升), Shi Tuo(石拓), Shi Shihong(石世宏) *et al.* *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2019, 46(11): 1 102 002
- [3] Kim C K, Choi S G, Kim J H *et al.* *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*[J], 2020, 12: 1
- [4] Chen Yong(陈勇), Chen Hui(陈辉), Jiang Yishuai(姜亦帅) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2019, 47(11): 1
- [5] Devojno O G, Feldshtein E, Kardapolava M A *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2018, 358: 195
- [6] Emamian A, Alimardani M, Khajepour A. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2014, 16(4): 511
- [7] Eisenbarth D, Esteves P M, Wirth F *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 362: 397

- [8] Wang Cong(王 聪), Shi Shihong(石世宏), Fang Qinqin(方琴琴) *et al.* *Infrared and Laser Engineering*(红外与激光工程)[J], 2018, 47(1): 0 106 001
- [9] Liu Gancheng(刘干成), Huang Bo(黄 博). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2019, 46(10): 1 002 009
- [10] Ren Weibin(任维彬), Dong Shiyun(董世运), Xu Binshi(徐滨士) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(9): 2487
- [11] Ren Weibin(任维彬), Dong Shiyun(董世运), Xu Binshi(徐滨士) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2015, 45(5): 1
- [12] Ren Weibin(任维彬), Dong Shiyun(董世运), Xu Binshi(徐滨士) *et al.* *Journal of Harbin Institute of Technology*(哈尔滨工业大学学报)[J], 2017, 49(5): 173
- [13] Yan Shixing(闫世兴), Dong Shiyun(董世运), Xu Binshi(徐滨士) *et al.* *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2015, 43(1): 30
- [14] Li Mingchuan(李明川), Zhang Peilei(张培磊), Yu Zhishui(于治水) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(4): 1225
- [15] Azimi G, Shamanianb M. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 595: 598

## Process and Mechanical Properties of FeCrNiCu Alloy Cylinder with Variable Radii Prepared by Pulsed Laser Cladding Forming

Ren Weibin<sup>1,2</sup>, Cao Qinglin<sup>1</sup>, Zhuang Bailiang<sup>2</sup>, Chen Shixin<sup>1</sup>

(1. Changzhou Key Laboratory for Remanufacturing, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

(2. Jiangsu Branch of China Academy of Machinery Science & Technology Co., Ltd, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Aiming at the outer and edge collapse of the cylinder with variable radii prepared by laser cladding forming, the decrease of the mechanical properties caused by the thermal accumulation effect. optimized path and process of FeCrNiCu alloy cylinder by pulsed laser forming were put forward. The direct cladding forming of the cylinder structure with variable radii was realized, and the good structure and mechanical properties of the structure were verified. The results show that the top of the forming layer is fine and dense equiaxed crystal structure, the middle of the forming part is composed of dendrites with a certain directional growth trend, the bottom of the forming part is composed of cellular crystal, and there are granular Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> enhanced precipitates inside and between the crystals. The highest microhardness (HV<sub>0.1</sub>) of the coating is 6750 MPa, and the microhardness (HV<sub>0.1</sub>) of the coating is mainly distributed in 5540~5760 MPa. The maximum longitudinal tensile strength of the forming layer is 1070 MPa, and the tensile strength ranges from 1010 to 1070 MPa. The maximum transverse tensile strength of the forming layer is 960 MPa, and the tensile strength ranges from 780 to 960 MPa. The impact toughness distribution of the coating is 511.08~727.54 kJ·m<sup>-2</sup>, and the excellent mechanical properties of the forming part are verified by the relevant mechanical experiments.

**Key words:** pulsed laser; FeCrNiCu alloy; laser cladding; mechanical property

---

Corresponding author: Ren Weibin, Ph. D., Lecturer, Changzhou Key Laboratory for Remanufacturing, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, P. R. China, E-mail: renweibin100@163.com